



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**BIOLOŠKI INSPIRISANE ROBOTSKE OČI ZA
ISTRAŽIVANJE NEVERBALNE KOMUNIKACIJE
IZMEĐU ČOVEKA I HUMANOIDNIH ROBOTA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:

Prof. dr Maja Čavić

Kandidat:

Marko Penčić

Novi Sad, 2024. godine

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Марко Пенчић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Маја Чавић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Биолошки инспирисане роботске очи за истраживање невербалне комуникације између човека и хуманоидних робота
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница: 139 Поглавља: 9 Референци: 354 Табела: 19 Слика: 105 Графикона: 0 Прилога: 0
Научна област:	Мехатроника
Ужа научна област (научна дисциплина):	Мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи
Кључне речи / предметна одредница:	Биолошки инспирисане роботске очи, дизајн структуре, механички и електрични систем, интеракција између човека и робота, друштвено асистивни робот, интерактивни робот, невербална комуникација
Резиме на језику рада:	Дисертација приказује биолошки инспирисане роботске очи са 7 и 8 степени слободе за истраживање невербалне комуникације између човека и робота. Укупно су развијена четири универзална, напредна и софистицирана решења роботских очију, од чега два са карактеристикама мушког и два са карактеристикама женског ока – сва решења су безазорна и у потпуности заснована на кинематичким принципима људског ока. Приказани кинематички модели механичких система очију, заједно са поступком оптималне димензионе синтезе, могу бити од велике помоћи истраживачима

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

	<p>приликом развоја роботских очију. Употребом приказаног алгоритма развоја и поступака оптималне синтезе заснованим на кинематичким моделима, могуће је пројектовати и прилагодити очи без обзира на облик и запремину главе хуманоида, што приказана решења карактерише универзалним, за оба пола, имајући у виду кантални нагиб очних капака. Осим тога, приказана решења су јефтина, малих димензија и маса, једноставна за реализацију, имплементацију и комерцијализацију.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	25.05.2022. год.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Слободан Дудић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Мирко Раковић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Драгана Орос, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Александар Родић, научни саветник, Институт Михајло Пупин, Београд</p> <p>Ментор: др Маја Чавић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Marko Penčić
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Maja Čavić, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Biologically inspired robotic eyes for research of non-verbal communication between human and humanoid robots
Language of text (script):	Serbian language (latin script)
Physical description:	Number of: Pages: 139 Chapters: 9 References: 354 Tables: 19 Illustrations: 105 Graphs: 0 Appendices: 0
Scientific field:	Mechatronics
Scientific subfield (scientific discipline):	Mechatronics, Robotics and Automation and Integrated Systems
Subject, Key words:	Biologically inspired robotic eyes, structural design, mechanical and electrical system, human-robot interaction (HRI), socially assistive robot (SAR), interactive robot, non-verbal communication
Abstract in English language:	The thesis presents biologically inspired robotic eyes with 7 and 8 degrees of freedom for research of non-verbal communication between human and robots. In total, four universal, advanced and sophisticated robotic eye solutions have been developed, two of which have the characteristics of a male eye and two with the characteristics of a female eye – all solutions have low backlash and are completely based on the kinematic principles of the human eye. The presented kinematic models of mechanical eye systems, together with the procedure of optimal dimensional synthesis, can be of great help to researchers when developing robotic eyes. Using the shown development algorithm and opti-

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

	mal synthesis procedures based on kinematic models, it is possible to design and adjust the eyes regardless of the shape and volume of the humanoid head, which characterizes the presented solutions as universal, for both genders, taking into account the canthal tilt of the eyelids. In addition, the presented solutions are low cost, small in size and weight, simple to realize, implement and commercialize.
Accepted on Scientific Board on:	25 May 2022
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: PhD Slobodan Dudić, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: PhD Mirko Raković, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: PhD Dragana Oros, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: PhD Aleksandar Rodić, Scientific Advisor, Mihajlo Pupin Institute, Belgrade Supervisor: PhD Maja Čavić, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note:	

Zahvalnost

Neizmernu zahvalnost dugujem svojoj majci koja je srcem bila uz mene, verovala u mene i moja dostignuća, uprkos mnogobrojnim izazovima unazad 20 god. Posvećujem joj disertaciju...

Zahvaljujem se kolegici i mentoru, prof. Maji Čavić, sa kojom saradujem već 10 god. na problemima prenosa snage i kretanja, počevši od predmeta Odabrana poglavlja iz prenosa snage i kretanja...

Zahvaljujem se kolegici, prof. Dragani Oros, na sugestijama, predlozima i nesebičnoj pomoći...

Zahvaljujem se članovima Komisije, kao i svim kolegama na savetima i konstruktivnim predlozima tokom istraživanja i formiranja ove disertacije, što je doprinelo kvalitetu iste...

Posebno se zahvaljujem Tatjani Cuckić na pažljivom čitanju rukopisa, kao i na tome što je uvek bila uz mene ohrabrujući me da nastavim dalje, čak i kada mi je bilo najteže i naizgled nemoguće...

Sada, već pre mnogo godina, u potrazi za predmetnim profesorom na predmetu Neindustrijska robotika, tumarajući hodnicima Mašinskog instituta Fakulteta tehničkih nauka, put me je odveo do kancelarije br. 120. Na pelir papiru, na vratima, bilo je istaknuto ime „Branislav Borovac, profesor robotike.“ Udahnuo sam duboko (rekoh sebi „uz Božju pomoć, pa šta bude“), zakucao na vrata i potegao kvaku. Otvarajući vrata, ugledao sam profesora koji sedi bočno naspram ulaznih vrata kucajući tekst na tastaturi računara. Spetljano sam mu se obratio sa „Dobar dan, Professore. Da li imate malo vremena za mene?“, na šta se on energično okrenuo i rekao, „Naravno Kolega. Ja sam tu zbog Vas. Izvolite, sedite.“ Sve ostalo je istorija i hvala mu što je tada bio tu za mene, u protivnom, ne biste čitali ovaj rukopis. Takođe mu se zahvaljujem što je odškrinuo vrata Narodne Republike Kine...

Na samom kraju, naravno, dugujem zahvalnost i svima onima koji nikada neće pročitati ovaj rukopis, a zbog kojih je njegovo objavljivanje godinama čekalo, očito, sada već, neko bolje vreme...

Zaječar, novembar 2023. god.

Marko Penčić

Struktura disertacije

Doktorska disertacija prikazuje jedan deo rezultata istraživanja kandidata tokom 10 god. rada na razvoju humanoidnih robota i njihovih struktura, u okviru nekoliko projekata od čega su najznačajniji: (i) *Razvoj robota kao sredstva za pomoć u prevazilaženju teškoća u razvoju dece*¹, (ii) *Razvoj robotske platforme antropomorfnih karakteristika za ostvarivanje socijalno-prihvatljive i adekvantne interakcije u radnom okruženju čoveka*², (iii) *Razvoj i realizacija savremene višerprstne antropomorfne robotske šake*³, i (iv) *Razvoj socijalno-asistivnog robota kao ključne tehnologije u rehabilitaciji dece sa cerebralnom paralizom*⁴.

Disertacija se sastoji od ukupno devet poglavlja, čija je struktura sledeća.

— **Poglavlje I** prikazuje uvodna razmatranja koja ukazuju da postoji sve veća potreba za uslužnim robotima socijalne inteligencije radi integracije sa ljudima u svakodnevnom okruženju i obavljanja različitih zadataka. Takvi roboti moraju biti sposobni za naprednu društvenu interakciju, kao i stabilnu manipulaciju sa ljudima i objektima. Ipak, većina uslužnih robota je projektovana za obavljanje neinteraktivnih usluga poput čišćenja, nadzora ili dostave. Usled rasta potreba, od društvenih robota se očekuje obavljanje inteligentnih i društveno interaktivnih radnji kao što su prijem i vođenje ljudi, emocionalno druženje, neki aspekti medicinske nege i dr., što čini interakciju između čoveka i robota ključnom za poboljšanje aspekata kvaliteta života i veće efikasnosti u pružanju usluga nege ljudi. Osim konkretnog asistivnog zadatka, interaktivni roboti moraju da ispune i odgovarajuće socio-emocionalne zahteve. Da bi društveno asistivni robot bio prihvaćen kao kompetentan partner ljudima, on mora da bude sposoban da komunicira sa njima na efikasan i jasan, ali i prirodan i dopadljiv način, upotrebom verbalnih i neverbalnih signala. Lice je najizražajni deo tela, dok su oči najizražajni deo lica, zbog čega oči predstavljaju izrazito moćno sredstvo za realizovanje neverbalne komunikacije. Sve ovo dobija na značaju ako se ima u vidu da su lica većine razvijenih robota kruta i nepokretna. Ukoliko se u očne jabučice ugrade kamere, onda je moguće, upotrebom sistema vizije, ostvariti i neku od funkcija veštačkog vida robota, kao što su detekcija lica osobe ili objekta ispred robota, procena odstojanja od

¹ Republički projekat [III44008, prof. dr Branislav Borovac]

² Pokrajinski projekat [114-451-2116/2011, prof. dr Branislav Borovac]

³ Pokrajinski projekat [114-451-660/2015-03, prof. dr Mirko Raković]

⁴ Bilateralni projekat, Republika Srbija – Narodna Republika Kina [451-02-818/2021-09/19, prof. dr Maja Čavić]

robotu i sl., čime se omogućava širi spektar zadataka koje robot može da izvrši. Zbog svega toga, oči su izrazito važne i efektivne komponente društveno interaktivnih robota, što implicira opravdanost njihovom razvoju i realizaciji.

– **Poglavlje II** se bavi strukturom i dimorfizmom ljudskog oka, kao i kinematičkim parametrima očne jabučice, očnih kapaka i obrva. Shodno tome, definisani su pokreti oka, opsezi kretanja i brzine, a njihovo dostizanje predstavlja osnovni zahtev za realizaciju. Pored primarne uloge – čulo vida, oči i obrve su ključni elementi za prepoznavanje lica i realizovanje neverbalne komunikacije. Funkcionalnosti robotskog sistema, poput modela vizuelne pažnje i sistema za prepoznavanje lica i objekata, omogućavaju robotu da uspostavi i održava kontakt očima sa sagovornikom, što odaje utisak fokusiranosti i prirodnosti interakcije. Mogućnost podešavanja položaja obrva i kapaka omogućava generisanje facijalnih ekspresija robota radi simulacije različitih emocija. Treptanje i brzine pokreta jabučica i kapaka su veoma važni aspekti funkcionalnosti koji doprinose prirodnosti komunikacije robota.

– **Poglavlje III** prikazuje pregled dostupne literature i podatke o realizovanim robotima koji su u stanju da na intuitivan i transparentan način izražavaju emocije, nalik ljudima, pomeranjem karakterističnih delova lica, kao što su oči, obrve i usta, nezavisno od ostatka lica. U konstrukciji i realizaciji lica društveno interaktivnih robota, postoje dva osnovna pristupa. Prvi se odnosi na kruta lica sa pokretljivim mehaničkim delovima – očne jabučice, očni kapci, obrve i usta, dok drugi pristup podrazumeva kruto lice na kome se prikazuju oči, obrve i usta upotrebom svetlećih dioda; takođe, moguće je kombinovati ova dva pristupa. U skladu sa tim, pregled literature je obuhvatio dve grupe problema: (i) roboti koji imaju kruta lica i pokretljive mehaničke delove poput očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, i (ii) roboti koji takođe imaju kruta lica, pri čemu se očne jabučice i kapci aktuiraju mehanički, dok se obrve i/ili usta prikazuju upotrebom svetlećih dioda. Dodatno su analizirani: (i) broj stepeni slobode očiju i obrva zbog toga što veći broj stepeni slobode omogućava veći asortiman pokreta i samim tim veći spektar neverbalnih izraza licem – emocije, (ii) na koji način se vrši prenos kretanja sa aktuatora na očne jabučice, kapke i obrve – izlazni članovi pogonskih mehanizama, (iii) vrste upotrebljenih aktuatora i senzora, i (iv) sposobnost robota da proizvede facijalne ekspresije.

– **Poglavlje IV** opisuje predmet istraživanja i prikazuje postavljene hipoteze: (H1) moguće je modelirati mehanički sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) u skladu sa biološkim principima i kinematikom ljudskog oka, (H2) moguće je formirati strukturu mehaničkog

sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da omogući bezazorno bidirekciono kretanje, (H3) moguće je formirati upravljački sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da ispuni kinematičke parametre ljudskog oka, i (H4) moguće je eksperimentalno dokazati da je predložena struktura mehaničkog sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) sposobna da ostvari neverbalnu komunikaciju upotrebom lica robota. Na osnovu svega toga, cilj istraživanja je razvoj potpuno novog mehaničkog, električnog i upravljačkog sistema robotskih očiju i obrva specijalne kinematske strukture, sa karakteristikama muškog i ženskog oka, koji na funkcionalnom nivou treba da omogući asortiman pokreta koji imaju ljudske oči i obrve, radi simulacije različitih emocionalnih stanja robota. Mehanički sistem treba da predstavlja naprednu hardversku platformu za razvoj i implementaciju robotske vizije i algoritama različite namene kao što je detekcija lica i objekata, prepoznavanje emocija, semantička segmentacija scene, i dr. Upotrebom sistema vizije, koji je podržan sofisticiranim mehaničkim i upravljačkim sistemom, društveno asistivni roboti potencijalno mogu da rasterete zdravstveni sistem doprinoseći kvalitetu nege obolelih i ugroženih lica, kao i bezbednosti zdravstvenih radnika.

– **Poglavlje V** detaljno razmatra mehanički sistem očnih jabučica, očnih kapaka i obrva sa aspekta strukture i dimenzija. Mehanički sistem za kretanja sa aktuatora na izlazne članove – očne jabučice, očni kapci i obrve, treba da ispuni visoke zahteve u pogledu: (i) kinematike – bidirekciono kretanje bez trzaja tokom promene pravca i smera naglim usporavanjem, zaustavljanjem i ubrzavanjem, (ii) strukture – visoka pouzdanost, visok stepen iskorišćenja, i najvažnije, bezazornost kojom se obezbeđuje visoka tačnost pozicioniranja i visoka tačnost i ponovljivost pokreta, što je od suštinskog značaja, (iii) veličine i mase – što manje dimenzije i mase koje imaju reperkusije na raspoloživ prostor u glavi robota (smeštaj mehaničkog i električnog sistema), i inercijalne sile, respektivno. Najpre je urađen detaljan pregled transmisija u skladu sa postavljenim zahtevima. Na osnovu izbora optimalne transmisije iz skupa analiziranih, predložene su strukture mehaničkih sistema očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, na osnovu čega je urađena kinematička analiza i optimalna dimenziona sinteza. Takođe, ispitan je odnos promene položaja ulaznog/izlaznog člana svih mehanizama radi procene uticaja na upravljački sistem – dobijene promene su bliske linearnim što je veoma povoljno sa aspekta upravljanja. Zbog strukture veza, svi mehanizmi obezbeđuju niska trenja i male zazore, što je veoma važno za iniciranje pokreta bez trzaja, kao i visoku tačnost pozicioniranja koja obezbeđuje visoku tačnost i ponovljivost pokreta.

– **Poglavlje VI** detaljno razmatra električni sistem očnih jabučica, očnih kapaka i obrva. Aktuatori za pokretanje mehaničkih sistema očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, treba da ispune visoke zahteve u pogledu: (i) kinematike – bidirekciono kretanje u različitim opsezima, kao i *min/max* brzine i ubrzanja što je od suštinskog značaja za glatke pokrete praćenja i rapidne – sakadične pokrete, (ii) strukture – bezazornost aktuatora, (iii) senzoričke i upravljanja – visoka tačnost pozicioniranja i ponovljivost pokreta, zatvorena upravljačka sprega, (iv) veličine i mase – male dimenzije i mase aktuatora i čitavog upravljačkog sistema imajući u vidu raspoloživ prostor u glavi robota za smeštaj mehaničkog sistema i aktuatora sa upravljanjem. Najpre je urađen detaljan pregled aktuatora u skladu sa postavljenim zahtevima. Na osnovu izbora optimalnog tipa aktuatora iz skupa analiziranih, predložena je struktura upravljačkog sistema jabučica, kapaka i obrva. Kompaktni sistemi koji obuhvataju motor, reduktor, senzor i motor-kontroler, predloženi su za pokretanje mehanizama. Najpogodnije rešenje za upravljanje je kombinacija motora jednosmene struje sa odgovarajućim reduktorom i senzorom apsolutnog položaja ili inkrementalnim enkodrom. Dalje je predložena struktura servo kontrolera za upravljanje svakog motora ponosob, dok je na kraju prikazan izbor aktuatora i upravljanja za pokretanje segmenta oka.

– **Poglavlje VII** eksperimentalno utvrđuje u kojoj meri je predloženo rešenje očiju i obrva sposobno da ispolji emocije grupi ljudskih subjekata. Ljudi, kao društvena bića, teže interakciji sa drugim subjektima i nedostatak ekspresije osećanja mogu protumačiti kao nezainteresovanost sagovornika. Zbog toga je važno da robot bude sposoban da ispoljava emocije i komunicira sa ljudima na prirodan i transparentan način, upotrebom verbalnih i neverbalnih signala. Prema Ekmanu, šest osnovnih emocija relevantnih za eksperiment je izabrano: iznenađenje, strah, gađenje, bes, sreća i tuga. Na osnovu izgleda robota *MARKO*, dizajniran je dvodimenzionalni prikaz njegovog lica, sa jednom izmenom – donji deo lica koji obuhvata nos i usta je prekriven zaštitinom maskom. Ova izmena je urađena iz nekoliko razloga: (i) pažnja subjekata treba da bude usmerena na gornju polovinu lica robota – razvijene oči i obrve, kao i njihovu sposobnost da ispolje emocije, (ii) donja polovina lica je kruta i nepokretna, i zbog toga nije od značaja za eksperiment – treba napomenuti da su nos i usta izrazito važni delovi lica za ispoljavanje i prepoznavanje emocija, i prikazati ih kao nepokretne uz druge pokretne delove lica (oči i obrve), učinilo bi ispoljene izraze lica neskladnim što bi potencijalno zbunilo subjekte, (iii) lice robota *MARKO* je srcoliko i već na prvi pogled privlači pažnju okoline svojim pozitivnim stavom, bez obzira na položaj

pokretnih delova lica – zbog toga je važno prekriti lice i pažnju subjekata usmeriti na gornji deo lica i regiju oka, i (iv) globalna pandemija virusom SARS-CoV-2 nametnula je upotrebu zaštitne maske u komunikaciji, što je danas opšteprihvaćeno.

– **Poglavlje VIII** sumira rezultate istraživanja i obuhvata: (i) poređenje prikazanog mehaničkog sistema sa kinematikom ljudskog oka, (ii) prednosti usvojene strukture mehanizama i njihovu rekonfigurabilnost, i (iii) sposobnost mehaničkog sistema da proizvede facialne ekspresije. Mehanički sistem se sastoji od tri podсистema koji omogućavaju kretanje očnih jabučica, očnih kapaka i obrva nezavisno od ostatka lica robota; zahvaljujući svojoj strukturi, mehanički sistem jabučica omogućava sve pokrete oka što je glavni uslov za realizovanje binokularne funkcije veštačkog vida robota i stereoviziju. Većina usvojenih mehanizama za pogon mehaničkog sistema jabučica, kapaka i obrva su polužni, dok je za podizanje obrva usvojen mehanizam zasnovan na navojnom vretenu; zbog toga je ispitana rekonfigurabilnost polužnih mehanizama tako da kinematika oka ostane nenarušena. Cilj eksperimenta je bio da se utvrdi da li je predloženo rešenje strukture robotskih očiju i obrva sposobno da efikasno izrazi emocije čoveku i u kojoj meri; odgovor na ovo pitanje je tražen eksperimentom u kojem su subjektima prikazivani video klipovi robota *MARKO* kako izražava osnovne emocije licem koje je kao takve definisao Ekman.

– **Poglavlje IX** prikazuje doprinos disertacije. Glavni doprinos su četiri univerzalna, napredna i sofisticirana hardverska rešenja robotskih očiju sa 7 i 8 stepeni slobode od čega su dva sa karakteristikama muškog, a dva sa karakteristikama ženskog oka, u potpunosti zasnovana na kinematičkim principima ljudskog oka. Veoma važan aspekt funkcionalnosti je i upotreba bezazornih mehanizama, što je od suštinskog značaja za implementaciju robotske vizije i algoritama različite namene, naročito ako se ima u vidu da će kamere biti locirane u očima robota. Prikazani kinematički model mehaničkog sistema oka, zajedno sa postupkom optimalne dimenzione sinteze, može biti od velike pomoći istraživačima prilikom razvoja robotskih očiju. Mogućnost primene rezultata se ogleda i u tome da, upotrebom prikazanog algoritma razvoja i postupaka optimalne sinteze zasnovanim na kinematičkim modelima, moguće je projektovati i prilagoditi oči bez obzira na oblik i zapreminu glave humanoida, što prikazano rešenje karakteriše univerzalnim, za oba pola, imajući u vidu kantalni nagib očnih kapaka. Osim toga, prikazana rešenja su jeftina, malih su dimenzija i masa, jednostavna za realizaciju, implementaciju i komercijalizaciju.

Sadržaj

Ključna dokumentacijska informacija.....	ii
Zahvalnost.....	vi
Struktura disertacije.....	vii
Skraćenice.....	xiii
Poglavlje I Uvod.....	1
Poglavlje II Ljudsko oko.....	7
Poglavlje III Pregled stanja u oblasti.....	16
Poglavlje IV Predmet istraživanja.....	26
Poglavlje V Mehanički sistem.....	32
Poglavlje VI Električni sistem.....	75
Poglavlje VII Eksperiment.....	100
Poglavlje VIII Rezultati i diskusija.....	109
Poglavlje IX Zaključak.....	117
Plan tretmana podataka.....	120

Skraćenice

HRI	— interakcija između čoveka i robota, eng. Human–Robot Interaction
SIR	— društveno interaktivni robot, eng. Socially Interactive Robot
IoT	— internet stvari, eng. Internet of Things
IoMT	— internet medicinskih stvari, eng. Internet of Medical Things
SAR	— društveno asistivni robot, eng. Socially Assistive Robot
AI	— veštačka inteligencija, eng. Artificial Intelligence
LC	— lateralni kantus, lat. Lateral Canthus
MC	— medijalni kantus, lat. Medial Canthus
PF	— palpebralna fisura, lat. Palpebral Fissure
CT	— kantalni nagib, lat. Canthal Tilt
DoF	— stepen slobode, eng. Degree of Freedom
LED	— svetleća dioda, eng. Light-Emitting Diode
LCD	— ekran (displej) od tečnog kristala, eng. Liquid Crystal Display
CMOS	— tehnologija za izradu digitalnih i analognih mikroelektronskih sklopova, eng. Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DC	— jednosmerna struja, eng. Direct Current
CCS	— namenski formiran senzor, eng. Custom Control Sensor
RGB-D	— senzor dubine, eng. Red Green Blue-Depth
CBCDA	— aktuator pogonjen Bouden kablovima, eng. Compliant Bowden Cable-Driven Actuator
CCD	— čip za konverziju fotona u elektrone, eng. Charge-Coupled Device
FSR	— otpornik za detekciju sile dodirrom, eng. Force-Sensing Resistor
USB	— univerzalna serijska magistrala, eng. Universal Serial Bus
LFR	— laserski daljinomer, eng. Laser Range Finder
IR	— infracrveno zračenje ili infracrvena svetlost, eng. InfraRed
RFID	— identifikacija putem radio frekvencije, eng. Radio Frequency Identification
RC	— daljinsko upravljanje radio signalima, eng. Radio Control
HMI	— interakcija između čoveka i mašine, eng. Human-Machine Interaction
ASD	— poremećaj iz spektra autizma, eng. Autism Spectrum Disorder
CP	— cerebralna paraliza, eng. Cerebral Palsy
MCI	— blago kognitivno oštećenje, eng. Mild Cognitive Impairment
PP	— „guraj-vuci“ kabl, eng. Push-Pull
KP	— kinematički par, eng. Kinematic Pair
TI	— indeks transmisije mehanizma, eng. Transmission Index

AC	—	naizmjenična struja, eng. Alternating Current
EHA	—	elektrohidraulički aktuator, eng. Electro-Hydraulic Actuator
HAS	—	hidraulički aktuiran sistem, eng. Hydraulic Actuating System
SHA	—	hidraulički aktuator formiran od mekih materijala, eng. Soft Hydraulic Actuator
SAJ	—	aktuacija zgloba formiranog od mekih materijala, eng. Soft-Actuated Joint
SPA	—	pneumatski aktuator formiran od mekih materijala, eng. Soft Pneumatic Actuator
CA	—	vazduh pod pritiskom, eng. Compressed Air
PLC	—	programabilni logički kontroler, eng. Programmable Logic Controller
PAM	—	pneumatski veštački mišić, eng. Pneumatic Artificial Muscle
PWM	—	modulacija širine impulsa, eng. Pulse-Width Modulation
MPAM	—	višepovezani pneumatski veštački mišić, eng. Multi-connection PAM
LabVIEW	—	naziv softvera, eng. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
SRT	—	alati kod robotike mekih materijala za izradu aktuatora, eng. Soft Robotics Toolkit
BLDC	—	motor jednosmerne struje bez četkica, eng. Brushless DC motor
PMDC	—	motor jednosmerne struje sa četkicama i permanentnim magnetom, eng. Permanent Magnet DC motor
PC	—	personalni računar, eng. Personal Computer
EC	—	embedid kontroler, eng. Embedded Controller
IMU	—	jedinica za merenje inercije, eng. Inertial Measurement Unit
HRC	—	saradnja između čoveka i robota, eng. Human-Robot Collaboration
BEAR	—	aktuator za robote sa integrisanim upravljanjem u oba smera, eng. Back-drivable Electromechanical Actuator for Robotics
SEA	—	serijski elastični aktuator, eng. Series Elastic Actuator
TFSEA	—	serijski eleastični aktuator koji reaguje na promenu sile prenosa, eng. Transmission Force-sensing SEA
RWHC	—	hibridno upravljanje zamenom radnih mesta, eng. Rotating Workspace Hybrid Control
PPSeCo	—	serijska komunikacija velike brzine od tačke do tačke, eng. Point-to-Point high-speed Serial Communication
CAN Bus	—	mrežni kontroler, eng. Controller Area Network
RF	—	radio frekvencija, eng. Radio Frequency
PID	—	proporcionalno-integralni-derivacioni kontroler, eng. Proportional-Integral-Derivative
GPS	—	sistem za globalno pozicioniranje, eng. Global Positioning System
PIC	—	proporcionalno-integralni kontroler, eng. Proportional-Integral Controller
FLC	—	fazi logički kontroler, eng. Fuzzy Logic Controller
DAQ	—	prikupljanje podataka, eng. Data Acquisition
CAD	—	projektovanje pomoću računara, eng. Computer-Aided Design
MOSFET	—	vrsta operacionog pojačavača, eng. Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect Transistor

DSP	— digitalni procesor signala, eng. D igital S ignal P rocessor
GPR	— radar čiji signal prodire kroz zemlju radi detekcije objekata, eng. G round P enetrating R adar
ANTLA	— antagonistički vođen linearni aktuator, eng. AN Tagonistically-driven L inear A ctuator
Wi-Fi	— bežični prenos podataka, eng. W ireless F idelity
UDP	— komunikacioni protokol za prenos paketa podataka, eng. U ser D atagram P rotocol
TinyML	— tehnologije mašinskog učenja koje troše energiju u mW, eng. T iny M achine L earning
AR	— proširena realnost, eng. A ugmented R eality
SBC	— računar sa integrisanom upravljačkom pločom, eng. S ingle- B oard C omputer
FACS	— sistem za kodiranje facijalnih ekspresija, eng. F acial A ction C oding S ystem
AU	— akciona jedinica, eng. A ction U nit
FEI	— identifikacija facijalne ekspresije, eng. F acial E xpression I dentification

Sadržaj

1 Uvod	1
Reference.....	4

1 Uvod

Sa porastom starije populacije u savremenom društvu [1.1,1.2], kao i brzim porastom distribuiranih porodica ili porodica sa jednim roditeljem [1.3,1.4], postoji sve veća potreba za uslužnim robotima socijalne inteligencije radi integracije sa ljudima u svakodnevnom životnom okruženju i obavljanja različitih zadataka kako bi se poboljšale usluge nege starijih ljudi, osoba sa posebnim potrebama ili osoba koje su usamljene ili žive same [1.5,1.6]. Shodno tome, takvi roboti moraju biti sposobni za naprednu društvenu interakciju, kao i stabilnu manipulaciju sa ljudima i objektima iz okoline uz apsolutnu bezbednost [1.7,1.8]. Sa druge strane, većina uslužnih robota je projektovana za obavljanje neinteraktivnih usluga poput čišćenja, nadzora ili dostave [1.9,1.10], ali danas, usled rasta potreba, od društvenih robota se očekuje obavljanje inteligentnih i društveno interaktivnih radnji kao što su prijem i vođenje ljudi, emocionalno druženje, neki aspekti medicinske nege i dr., što čini interakciju između čoveka i robota (eng. *Human-Robot Interaction – HRI*) ključnom za poboljšanje aspekata kvaliteta života i veće efikasnosti u pružanju usluga nege ljudi [1.11–1.14].

Društveno interaktivni roboti (eng. *Socially Interactive Robot – SIR*) se projektuju radi interakcije sa ljudima na intuitivan i transparentan način tako da oponašaju ljudske reakcije što je moguće vernije [1.15,1.16]. Osim konkretnog asistivnog zadatka, interaktivni roboti moraju da ispune i odgovarajuće socio-emocionalne zahteve i to u širokom spektru oblasti kao što su zdravstvo i nega ljudi, obrazovanje, poboljšanje kvaliteta života, zabava, zajednički rad sa ljudima [1.17,1.18]. Da bi *SIR* bio prihvaćen kao kompetentan partner ljudima, on mora da bude sposoban da komunicira sa njima na efikasan i jasan, ali i prirodan i dopadljiv način, upotrebom verbalnih i neverbalnih signala – govor tela, gestovi, facijalne ekspresije, orijentacija glave i sl., kojim se za kratko vreme saopštava veliki broj socio-emocionalnih informacija [1.19,1.20]. Treba napomenuti da je lice najizražajniji deo tela, a oči najizražajniji deo lica, zbog čega oči predstavljaju izrazito moćno sredstvo za realizovanje neverbalne komunikacije [1.21,1.22]. Sve ovo dobija na značaju ako se ima u vidu da su lica većine razvijenih robota kruta i nepokretna.

Prilikom spontane humane konverzacije, ljudi šalju i primaju neverbalne informacije čija je svrha dopuna lingvističke informacije [1.23]. Ti paralingvistički znaci u velikoj mjeri doprinose kvalitetu komunikacije, pa tako treptanje očiju signalizira spremnost za započinjanje razgovora; uspostavljanje kontakta očima i podizanje obrva signalizira spremnost da čovek (ili robot) prekine svoj govor i reč prepusti sagovorniku; razumevanje i odobravanje sagovornika se ispoljava blago namrštenim izrazom očiju, dok se zbunjenost izražava širom otvorenih očnih kapaka i podizanjem obrva, čime se sagovorniku signalizira da treba da prekine komunikaciju ili ponovi poslednju izjavu [1.24,1.25]. Takođe, da bi roboti participirali u emocionalno baziranim interakcijama, oni moraju imati sistem za prepoznavanje i interpretaciju signala – emocija, sistem za modeliranje sopstvenog emotivnog odgovora i, naravno, moraju biti u stanju da fizički ispolje emotivno stanje u zavisnosti od situacionog konteksta, što je ključno [1.26–1.28]. Mogućnost podešavanja položaja obrva, položaja i intenziteta otvorenosti očnih kapaka, kao i pravca pogleda, omogućava generisanje različitih emocija. Ukoliko se u očne jabučice ugrade kamere, onda je moguće, zahvaljujući sistemu vizije, ostvariti i neku od funkcija veštačkog vida robota, kao što su detekcija lica osobe ili objekta ispred robota, procena odstojanja od robota i sl., čime se omogućava širi spektar zadataka koje robot može da izvrši. Zbog svega toga, oči i obrve su izrazito važne i efektivne komponente *SIR*, što implicira opravdanost njihovom razvoju i realizaciji.

Iskustva zdravstvenih radnika najrazvijenijih zemalja sveta tokom prethodnih nekoliko godina pandemije virusom *SARS-CoV-2* i njegovim varijantama [1.29,1.30], pokazala su da je zdravstveni sistem fundamentalno nepripremljen za dugotrajnu ili intenzivnu borbu [1.31,1.32]. Naime, sistem se vrlo brzo preopteretio zbog čega mnogi rizikuju da dobiju substandardnu negu, dok je stopa dijagnostifikovanja vodećih bolesti poput malignih i kardiovaskularnih značajno redukovana [1.33,1.34]. Kako obolelima u pandemiji, tako i hronično bolesnim, potrebna je medicinska nega koja se zasniva na svakodnevnoj međuljudskoj interakciji, a koja u uslovima pandemije nije lako i bezbedno izvodljiva [1.35,1.36]. Iskustva su pokazala da upotreba disruptivnih tehnologija, poput Industrije 4.0, Interneta stvari (eng. *Internet of Things – IoT*), Interneta medicinskih stvari (eng. *Internet of Medical Things – IoMT*) i druge [1.37–1.44], zajedno sa robotskim tehnologijama [1.45,1.46], mogu imati ključnu ulogu u borbi protiv budućih bolesti širokih razmera, kao i rasterećenja i sprečavanja kolapsa zdravstvenih sistema širom sveta.

Prema [1.47,1.48], neke značajne primene disruptivnih i robotskih tehnologija u prevenciji i očuvanju javnog zdravlja se ogledaju kroz upotrebu: (i) dijagnostičkih robota za

brzo i masovno skeniranje i testiranje ljudi merenjem telesne temperature i uzimanje orofaringealnog brisa, (ii) logističkih robota za bezbedan transport infektivnog otpada, sterilisanog medicinskog materijala, uzoraka briseva, krvi i urina, (iii) robota za zdravstvenu zaštitu pacijenata i obavljanje jednostavnih zadataka poput dopremanja hrane i lekova, (iv) dezinfekcionih robota za čišćenje i dezinfekciju bolničkih i javnih prostorija, (v) društveno asistivnih robota (eng. *Social Assistance Robots – SAR*) za HRI kao snažna podrška zdravstvenom sistemu. Treba napomenuti da roboti ne zahtevaju zaštitne maske, brzo i lako se dezinfikuju i što je najvažnije, ne oboljevaju [1.49]. Sa druge strane, upotreba zaštitne maske kod ljudi izaziva empatiju i smanjuje anksioznost [1.50–1.52], pa SAR takođe mogu imati zaštitne maske, što je u skladu sa društveno odgovornim ponašanjem.

Na osnovu sprovedenih istraživanja i dostupnih primera iz prakse [1.53–1.55], smatra se da socijalni i psihološki aspekt medicinske nege može biti u izvesnoj meri nadomešten upotrebom SAR. Pored toga što takvi roboti moraju biti apsolutno bezbedni i po ljude i po objekte iz okoline, oni moraju biti u stanju i da se prilagode ljudima i njihovom okruženju. Za uspešno delovanje SAR u svakodnevnom okruženju čoveka, interakcija između ljudi i robota je ključna [1.56–1.58]. Pored verbalne, veoma je važno realizovati i neverbalnu komunikaciju kojom se za kratko vreme saopštava veliki broj informacija – u socijalnom kontekstu, čak 60-65% značenja se prenosi neverbalnim signalima [1.59–1.61]. Bez obzira na držanje tela i gestikulaciju, oči i obrve su najekspresivniji deo lica predstavljajući vrlo moćno sredstvo za generisanje emocija, naročito kada je lice prekriveno zaštitnom maskom, što je i danas čest slučaj, čak i izvan zdravstvenih institucija.

Funkcionalnosti robotskog sistema, poput modela vizualne pažnje i sistema za prepoznavanje lica i objekata, omogućavaju robotu da uspostavi i održava kontakt očima sa sagovornikom, što odaje utisak fokusiranosti i prirodnosti interakcije. Mogućnost podešavanja položaja obrva i kapaka omogućava generisanje facijalnih ekspresija robota radi simulacije različitih emocionalnih stanja. Treptanje i brzine pokreta jabučica i kapaka su veoma važni aspekti funkcionalnosti koji doprinose prirodnosti komunikacije robota. Ukoliko se u očne jabučice ugrade kamere, onda je moguće, upotrebom sistema vizije, ostvariti i neku od funkcija veštačkog vida robota, što je jedan od ciljeva ovog istraživanja.

Trenutno u robotici postoji izražena tendencija da se žene koriste kao modeli za fizičku realizaciju veštačke inteligencije (eng. *Artificial Intelligence – AI*) više nego muškarci [1.62–1.64]. Žene se percipiraju kao više ljudi od muškaraca, a generalno i u poređenju sa neljudskim entitetima poput životinja i mašina. Prema tome, žene roboti se percipiraju sa

pozitivnijim ljudskim kvalitetima nego muški roboti. Pretpostavljena humanost ženskih robota povećava uspešnost njihovog korišćenja u socijalnom, a naročito u zdravstvenom kontekstu, što dovodi do povoljnijih stavova prema *AI* rešenjima u tim oblastima.

Cilj ovog istraživanja je biomimetički dizajn mehaničkog sistema očiju za muške i ženske humanoidne robote, u skladu sa mogućim preferencijama potencijalnih korisnika, sa adekvatnim kinematskim karakteristikama, koji na funkcionalnom nivou treba da omogućiti spektar pokreta koji imaju ljudske oči i obrve radi simulacije emocionalnih stanja robota. Predloženi mehanički sistem predstavlja naprednu i univerzalnu hardversku platformu za razvoj i implementaciju robotske vizije i algoritama različite namene poput detekcije i praćenja lica, prepoznavanje emocija i sl. Upotrebom kvalitetnog sistema vizije, zasnovanom na sofisticiranom mehaničkom i upravljačkom sistemu, *SAR* potencijalno mogu da doprinesu rasterećenju zdravstvenog sistema, naročito kvalitetu nege obolelih i ugroženih lica, bezbednosti zdravstvenih radnika u slučajevima gde je neophodna izolacija pacijenata koji boluju od neke zarazne bolesti, poboljšanju kvaliteta života generalno, čak i do nivoa životnog partnera, kao i podrške u terapiji osoba sa posebnim potrebama, poput cerebralne paralize, demencije i kancera – dokazano je da *SAR* mogu u velikoj meri da ohrabre pacijente i doprinesu uspehu terapije, što je od izuzetnog značaja.

Reference

- 1.1. Lutz, W., Sanderson, W., Scherbov, S.: The coming acceleration of global population ageing. *Nature* **451**(7179), 716–719 (2008).
- 1.2. He, W., Goodkind, D., Kowal, P.: *An Aging World: 2015*. International Population Reports. U.S. Government Printing Office, Washington (2016).
- 1.3. Sandbulte, J., Choe, E.K., Carroll, J.M.: Towards family-centered health technologies that support distributed families on sustainable healthy practices together. *Proc. Assoc. Inf. Sci. Technol.* **57**(1), e274-1– e274-11 (2020).
- 1.4. Baker, D.G.: The increase of single parent families: An examination of causes. *Policy Sciences* **32**(2), 175–188 (1999).
- 1.5. Broekens, J., Heerink, M., Rosendal, H.: Assistive social robots in elderly care: A review. *Gerontechnology* **8**(2), 94–103 (2009).
- 1.6. Pino, M., Boulay, M., Jouen, F., Rigaud, A.S.: “Are we ready for robots that care for us?” Attitudes and opinions of older adults toward socially assistive robots. *Front. Aging Neurosci.* **7**, 141-1–141-15 (2015).
- 1.7. Cifuentes, C.A., Pinto, M.J., Céspedes, N., Múnera, M.: Social robots in therapy and care. *Curr. Robot. Rep.* **1**, 59–74. (2020).
- 1.8. Pervez, A., Ryu, J.: Safe physical human robot interaction-past, present and future. *J. Mech. Sci. Technol.* **22**, 469–483 (2008).
- 1.9. Holland, J., Kingston, L., McCarthy, C., Armstrong, E., O’Dwyer, P., Merz, F., McConnell, M.: Service robots in the healthcare sector. *Robotics* **10**(1), 47-1–47-47 (2021).
- 1.10. Seyitoğlu, F., Ivanov, S.: Service robots as a tool for physical distancing in tourism. *Curr. Issues Tour.* **24**(12), 1631–1634 (2021).
- 1.11. Fraune, M.R., Komatsu, T., Preusse, H.R., Langlois, D.K., Au, R.H., Ling, K., Suda, S., Nakamura, K., Tsui, K.M.: Socially facilitative robots for older adults to alleviate social isolation: A participatory design workshop approach in the US and Japan. *Front. Psychol.* **13**, 904019-1–904019-22 (2022).
- 1.12. Céspedes, N., Irfan, B., Senft, E., Cifuentes, C.A., Gutierrez, L.F., Rincon-Roncancio, M., Belpaeme, T., Múnera, M.: A socially assistive robot for long-term cardiac rehabilitation in the real world. *Front. Neurobotics* **15**, 633248-1–633248-19 (2021).
- 1.13. Clabaugh, C., Mahajan, K., Jain, S., Pakkar, R., Becerra, D., Shi, Z., Deng, E., Lee, R., Ragusa, G., Matarić, M.: Long-term personalization of an in-home socially assistive robot for children with autism spectrum disorders. *Front. Robot. AI* **6**, 110-1–110-18 (2019).
- 1.14. Niewiadomski, R., Bruijnes, M., Huisman, G., Gallagher, C.P., Mancini, M.: Social robots as eating companions. *Front. Comput. Sci.* **4**, 909844-1–909844-13 (2022).

- 1.15. Adams, B., Breazeal, C., Brooks, R.A., Scassellati, B.: Humanoid robots: A new kind of tool. *IEEE Intell. Syst. App.* **15**(4), 25–31 (2000).
- 1.16. Fong, T., Nourbakhsh, I., Dautenhahn, K.: A survey of socially interactive robots. *Robot. Auton. Syst.* **42**(3-4), 143–166 (2003).
- 1.17. Okamura, A.M., Matarić, M.J., Christensen, H.I.: Medical and health-care robotics. *IEEE Robot. Autom. Mag.* **17**(3), 26–37 (2010).
- 1.18. Deng, E., Mutlu, B., Matarić, M.J.: Embodiment in socially interactive robots. *Found. Trends Robot.* **7**(4), 251–356 (2019).
- 1.19. Lugin, B.: Introduction to socially interactive agents. In: Lugin, B., Pelachaud, C., Traum, D. (eds.) *The Handbook on Socially Interactive Agents: 20 years of Research on Embodied Conversational Agents, Intelligent Virtual Agents, and Social Robotics. Volume 1: Methods, Behavior, Cognition*, pp. 1–20. ACM, New York (2021).
- 1.20. Onyeulo, E.B., Gandhi, V.: What makes a social robot good at interacting with humans? *Information* **11**(1), 43–1–43-13 (2020).
- 1.21. Shimada, M., Yoshikawa, Y., Asada, M., Saiwaki, N., Ishiguro, H.: Effects of observing eye contact between a robot and another person. *Int. J. Soc. Robot.* **3**, 143–154 (2011).
- 1.22. Hietanen, J.K.: Affective eye contact: an integrative review. *Front. Psychol.* **9**, 1587-1–1587-15 (2018).
- 1.23. Shione, N., Wakabayashi, Y., Kitaoka, N.: Automatic speech recognition using linguistic and verbal/non-verbal information. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA 2023)*, pp. 1–6. IEEE Xplore, New York (2023).
- 1.24. Breazeal, C.: Toward sociable robots. *Robot. Auton. Syst.* **42**(3-4), 167–175 (2003).
- 1.25. Poggi, I., D'Errico, F.: Social signals: A psychological perspective. In: Ali Salah, A., Gevers, T. (eds.) *Computer Analysis of Human Behavior*, pp. 185–225. Springer-Verlag, London (2011).
- 1.26. Breazeal, C.: Emotion and sociable humanoid robots. *Int. J. Hum-Comput. St.* **59**(1-2), 119–155 (2003).
- 1.27. Liu, Z., Wu, M., Cao, W., Chen, L., Xu, J., Zhang, R., Zhou, M., Mao, J.: A facial expression emotion recognition based human-robot interaction system. *IEEE CAA J. Autom. Sinica* **4**(4), 668–676 (2017).
- 1.28. Cavallo, F., Semeraro, F., Fiorini, L., Magyar, G., Sinčák, P., Dario, P.: Emotion modelling for social robotics applications: A review. *J. Bionic Eng.* **15**, 185–203 (2018).
- 1.29. Velavan, T.P., Meyer, C.G.: The COVID-19 epidemic. *Trop. Med. Int. Health* **25**(3), 278–280 (2020).
- 1.30. Jacobs, J.L., Haidar, G., Mellors, J.W.: COVID-19: challenges of viral variants. *Ann. Rev. Med.* **74**, 31–53 (2023).
- 1.31. Misra-Hebert, A.D., Jehi, L., Ji, X., Nowacki, A.S., Gordon, S., Terpeluk, P., Chung, M.K., Mehra, R., Dell, K.M., Pennell, N., Hamilton, A., Milinovich, A., Kattan, M.W., Young, J.B.: Impact of the COVID-19 pandemic on healthcare workers' risk of infection and outcomes in a large, integrated health system. *J. Gen. Intern. Med.* **35**(11), 3293–3301 (2020).
- 1.32. Walton, M., Murray, E., Christian, M.D.: Mental health care for medical staff and affiliated healthcare workers during the COVID-19 pandemic. *Eur. Heart J. Acute Cardiovasc. Care* **9**(3), 241–247 (2020).
- 1.33. Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., Bray, F.: Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA-Cancer J. Clin.* **71**(3), 209–249 (2021).
- 1.34. Einstein, A.J., Shaw, L.J., Hirschfeld, C., Williams, M.C., Villines, T.C., Better, N., Vitola, J.V., Cerci, R., Dorbala, S., Raggi, P., Choi, A.D., Lu, B., Sinitsyn, V., Sergienko, V., Kudo, T., Nørgaard, B.L., Maurovich-Horvat, P., Campisi, R., Milan, E., Louw, L., Allam, A.H., Bhatia, M., Malkovskiy, E., Goebel, B., Cohen, Y., Randazzo, M., Narula, J., Pascual, T.N.B., Pynda, Y., Dondi, M., Paez, D.: International impact of COVID-19 on the diagnosis of heart disease. *J. Am. Coll. Cardiol.* **77**(2), 173–185 (2021).
- 1.35. Kendzerska, T., Zhu, D.T., Gershon, A.S., Edwards, J.D., Peixoto, C., Robillard, R., Kendall, C.E.: The effects of the health system response to the COVID-19 pandemic on chronic disease management: A narrative review. *Risk Manag. Healthc. Policy* **14**, 575–584 (2021).
- 1.36. Kwon, S., Joshi, A.D., Lo, C.H., Drew, D.A., Nguyen, L.H., Guo, C.G., Ma, W., Mehta, R.S., Shebl, F.M., Warner, E.T., Astley, C.M., Merino, J., Murray, B., Wolf, J., Ourselin, S., Steves, C.J., Spector, T.D., Hart, J.E., Song, M., VoPham, T., Chan, A.T.: Association of social distancing and face mask use with risk of COVID-19. *Nat. Commun.* **12**, 3737-1–3737-10 (2021).
- 1.37. Javaid, M., Haleem, A., Vaishya, R., Bahl, S., Suman, R., Vaish, A.: Industry 4.0 technologies and their applications in fighting COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr.* **14**(4), 419–422 (2020).
- 1.38. Singh, R.P., Javaid, M., Haleem, A., Suman, R.: Internet of things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr.* **14**(4), 521–524 (2020).
- 1.39. Swayamsiddha, S., Mohanty, C.: Application of cognitive Internet of Medical Things for COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr.* **14**(5), 911–915 (2020).
- 1.40. Vaishya, R., Javaid, M., Khan, I.H., Haleem, A.: Artificial Intelligence (AI) applications for COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr.* **14**(4), 337–339 (2020).
- 1.41. Bragazzi, N.L., Dai, H., Damiani, G., Behzadifar, M., Martini, M., Wu, J.: How Big Data and Artificial Intelligence can help better manage the COVID-19 Pandemic. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **17**(9), 3176-1–3176-8 (2020).
- 1.42. Singh, R.P., Javaid, M., Kataria, R., Tyagi, M., Haleem, A., Suman, R.: Significant applications of virtual reality for COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr.* **14**(4), 661–664 (2020).
- 1.43. Siriwardhana, Y., Gür, G., Ylianttila, M., Liyanage, M.: The role of 5G for digital healthcare against COVID-19 pandemic: Opportunities and challenges. *ICT Express* **7**(2), 244–252 (2021).

- 1.44. Marbouh, D., Abbasi, T., Maasmi, F., Omar, I.A., Debe, M.S., Salah, K., Jayaraman, R., Ellahham, S.: Blockchain for COVID-19: Review, opportunities, and a trusted tracking system. *Arab. J. Sci. Eng.* **45**, 9895–9911 (2020).
- 1.45. Wang, X.V., Wang, L.: A literature survey of the robotic technologies during the COVID-19 pandemic. *J. Manuf. Syst.* **60**, 823–836 (2021).
- 1.46. Tavakoli, M., Carriere, J., Torabi, A.: Robotics, smart wearable technologies, and autonomous intelligent systems for health-care during the COVID-19 pandemic: An analysis of the state of the art and future vision. *Adv. Intell. Syst.* **2**(7), 2000071-1–2000071-7 (2020).
- 1.47. Javaid, M., Haleem, A., Rab, S., Suman, R.: Robotics applications for public health and safety during the COVID-19 pandemic. In: Samani, H. (eds.) *Robotics for Pandemics*, pp. 1–18. CRC Press, Boca Raton (2022).
- 1.48. Zhao, Z., Ma, Y., Mushtaq, A., Rajper, A.M.A., Shehab, M., Heybourne, A., Song, W., Ren, H., Tse, Z.T.H.: Applications of robotics, artificial intelligence, and digital technologies during COVID-19: A review. *Disaster Med. Public Health Prep.* **16**(4), 1634–1644 (2022).
- 1.49. Chauhan, A.: Robotics and automation: The rescuers of COVID era. In: Oliva, D., Hassan, S.A., Mohamed, A. (eds.) *Artificial Intelligence for COVID-19*. SSDC, vol. 358, pp. 119–151. Springer, Cham (2021).
- 1.50. Pfattheicher, S., Nockur, L., Böhm, R., Sassenrath, C., Petersen, M.B.: The emotional path to action: Empathy promotes physical distancing and wearing of face masks during the COVID-19 pandemic. *Psychol. Sci.* **31**(11), 1363–1373 (2020).
- 1.51. Carbon, C.-C.: About the acceptance of wearing face masks in times of a pandemic. *i-Perception* **12**(3), 1–14 (2021).
- 1.52. Nakayachi, K., Ozaki, T., Shibata, Y., Yokoi, R.: Why do Japanese people use masks against COVID-19, even though masks are unlikely to offer protection from infection? *Front. Psychol.* **11**, 1918-1–1918-5 (2020).
- 1.53. Raigoso, D., Céspedes, N., Cifuentes, C.A., del-Ama, A.J., Múnera, M.: A survey on socially assistive robotics: Clinicians’ and patients’ perception of a social robot within gait rehabilitation therapies. *Brain Sci.* **11**(6), 738-1–738-13 (2021).
- 1.54. Getson, C., Nejat, G.: Socially assistive robots helping older adults through the pandemic and life after COVID-19. *Robotics* **10**(3), 106-1–106-23 (2021).
- 1.55. Scassellati, B., Vázquez, M.: The potential of socially assistive robots during infectious disease outbreaks. *Sci. Robot.* **5**(44), eabc9014-1–eabc9014-2 (2020).
- 1.56. Ficocelli, M., Terao, J., Nejat, G.: Promoting interactions between humans and robots using robotic emotional behavior. *IEEE T. Cybernetics* **46**(12), 2911–2923 (2016).
- 1.57. Saunderson, S., Nejat, G.: How robots influence humans: A survey of nonverbal communication in social human–robot interaction. *Int. J. Soc. Robot.* **11**, 575–608 (2019).
- 1.58. Shiomi, M., Sumioka, H., Ishiguro, H.: Survey of social touch interaction between humans and robots. *J. Robot. Mechatron.* **32**(1), 128–135 (2020).
- 1.59. Burgoon, J.K., Guerrero, L.K., Floyd, K.: *Nonverbal Communication*. Routledge, New York (2010).
- 1.60. Knapp, M.L., Daly, J.A.: *The Sage Handbook of Interpersonal Communication*. SAGE Publications, Thousand Oaks (2011).
- 1.61. Gentile, J.P., Gillig, P.M.: *Psychiatry of Intellectual Disability: A Practical Manual*. John Wiley & Sons, Chichester (2012).
- 1.62. Borau, S., Otterbring, T., Laporte, S., Fosso Wamba, S.: The most human bot: Female gendering increases humanness perceptions of bots and acceptance of AI. *Psychol. Market.* **38**(7), 1052–1068 (2021).
- 1.63. Costa, P., Ribas, L.: AI becomes her: Discussing gender and artificial intelligence. *Tech. Arts J. Spec. Res.* **17**(1-2), 171–193 (2019).
- 1.64. Seo, S.: When female (male) robot is talking to me: Effect of service robots’ gender and anthropomorphism on customer satisfaction. *Int. J. Hosp. Manag.* **102**, 103166-1–103166-8 (2022).

Sadržaj

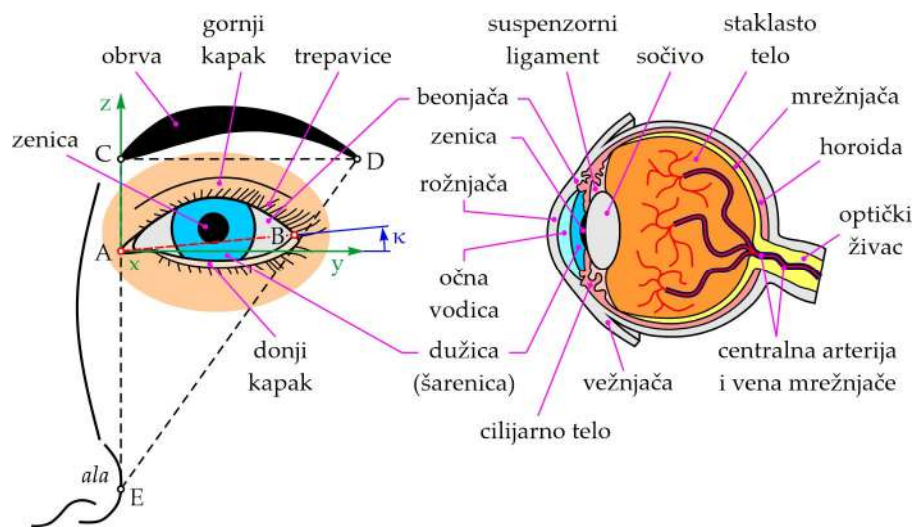
2 Ljudsko oko	7
2.1 Struktura	7
2.2 Dimorfizam.....	9
2.3 Kinematika.....	10
2.4 Zaključak.....	12
Reference.....	14

2 Ljudsko oko

Pored primarne uloge – čulo vida, oči i obrve su ključni elementi za prepoznavanje lica i realizovanje neverbalne komunikacije. U zavisnosti od intenziteta otvorenosti oka, položaja očne jabučice, očnih kapaka i obrva, kao i njihovih brzina, moguće je ispoljiti različite emocije. Nadalje se razmatra struktura, dimorfizam i kinematika oka.

2.1 Struktura

Oči su najvažniji čulni organ u prirodi koji omogućava percepciju okoline – približno 80% svih utisaka iz spoljašnje sredine se opaža čulom vida [2.1,2.2]. Svake sekunde oči se prilagođavaju okruženju, svetlosnim uslovima, bojama i raznim drugim efektima, apsorbujući informacije i šaljući ih mozgu [2.3,2.4]. Prema [2.5–2.7], očni aparat sadrži: (i) očnu jabučicu, (ii) vidne puteve i (iii) pomoćne elemente oka – Slika 2.1. Očna jabučica, zahvaljujuću strukturi svojih medija, dioptrijskom aparatu i prisustvu neuroepitelnih elemenata mrežnjače (lat. *retina*), omogućava primanje vidnih utisaka. Vidni putevi povezuju nervnu opnu očne jabučice – mrežnjaču, sa vidnim centrima u mozgu. Stoga, vidni nadražaj formiran na mrežnjači, prenosi se u odgovarajuće centre mozga radi dalje interpretacije signala. Pomoćni elementi oka su obrve, očni kapci, trepavice, suzni aparat (lat. *apparatus lacrimalis*), vežnjača (lat. *conjunctiva*), mišići očne jabučice i očna šupljina (lat. *orbita*). Primarna uloga pomoćnih elemenata oka je da zaštite očnu jabučicu i omogućće nesmetano funkcionisanje svih složenih procesa koje oko svakodnevno obavlja. Očna jabučica (lat. *bulbus oculi*) je nalik sferi i sastoji se od tri omotača i gelastog sadržaja koji ispunjava 4/5 jabučice. Prednji deo spoljašnjeg omotača predstavlja rožnjača (lat. *cornea*) – suštinski važan element dioptrijskog aparata imajući u vidu njegovu providnost i blagu zakrivljenost, dok je zadnji deo ovog omotača neprovidan, značajno veći, bele boje i naziva se beonjača (lat. *sclera*). Srednji omotač, čija je uloga da hrani jabučicu, obuhvata dužicu ili šarenicu (lat. *iris*) – dijafragma za regulisanje količine svetlosti, cilijarno telo (lat. *corpus ciliare*) – proizvodi i luči očnu vodicu (lat.



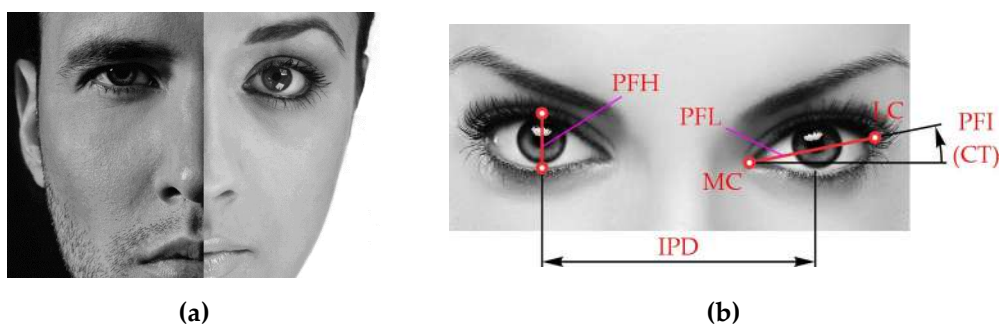
Slika 2.1 Ljudsko oko – struktura i pomoćni elementi.

aqueous humour), i horoida (lat. *choroid*) – ključan u ishrani optičkog dela mrežnjače. Unutrašnji omotač – mrežnjača, u embriološkom smislu predstavlja produžetak moždane materije i zahvaljujući neuroepitelnim ćelijama omogućava primanje vidnih nadražaja. Sadržaj očne jabučice obuhvata očnu vodicu – bistra i potpuno providna tečnost od koje u velikoj meri zavisi stanje intraokularnog pritiska, očno sočivo (lat. *lens crystallina*) – providna struktura bikonveksnog oblika za refrakciju svetlosti, akomodaciju i apsorpciju ultraljubičastog zraka, i staklasto telo (lat. *corpus vitreum*) – gusta, viskozna i providna struktura koja obezbeđuje krutost jabučice. Treba napomenuti da optički živac (lat. *nervus opticus*), kao deo vidnih puteva, povezuje ćelije mrežnjače sa moždanim aparatom šaljući mu impulse. Obrva, zahvaljujući svojoj strukturi i lučnom obliku, štiti oko od prekomerne svetlosti i spečava prodiranje znoja i vode oticanjem izvan oka. Osim zaštitne uloge, obrve imaju i vrlo važnu ulogu u svakodnevnoj komunikaciji i podjednako su važne u prepoznavanju lica kao i oči [2.8,2.9]. Očni kapci su tanke kožne formacije sastavljene od mišića i vezivnih elemenata koje sprema zatvaraju očnu šupljinu štiteći jabučicu. Kada su kapci otvoreni, uočava se otvor u obliku elipse – zbog suznog aparata, unutrašnji ugao ovog otvora je zaobljen (lat. *medial canthus*), dok je spoljni oštar (lat. *lateral canthus*). Očni kapci treptanjem doprinose oticanju suza koje odnose nečistoće sa prednje strane oka. Po rubovima kapaka se nalaze trepavice i što su one gušće, efektivnije su u zaštiti oka od prašine i mehaničkih povreda. Suzni aparat obezbeđuje vlažnost oka i na taj način održava transparentnost rožnjače. Osim toga, suze svojim biohemijskim osobinama štite oko od povreda i infekcije.

Vežnjača povezuje očne kapke sa jabučicom, dok mišići očne jabučice pozicioniraju jabučicu unutar očne šupljine. Zahvaljujući ovim mišićima – ukupno ih je šest od čega su dva kosa i četiri prava, omogućena je rotacija jabučice u svim pravcima. Očna šupljina je nalik piramidi čije zidove formiraju različite kosti, pa je jabučica dobro zaštićena [2.5–2.7]. Prečnik jabučice je približno 25 mm i bez značajnih razlika između polova i starosnih grupa [2.10], dok se međuzenično rastojanje muškog i ženskog pola razlikuje i prosečno je 65 mm i 61 mm, respektivno [2.11].

2.2 Dimorfizam

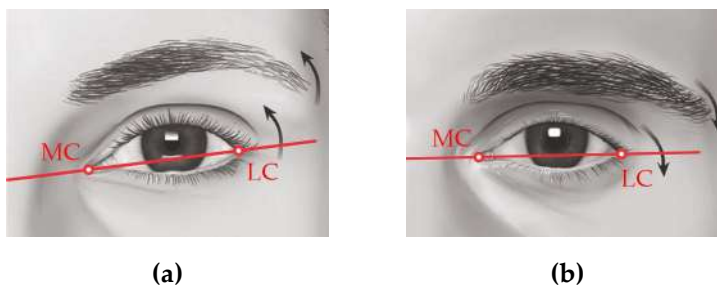
Antropometrija lica utvđuje, i one, naizgled zanemarljive razlike, poput dimenzija očnih kapaka i obrva, njihov položaj, intenzitet otvorenosti kapaka, rastojanje između zenica i dr. Treba napomenuti da dva identična lica ne postoje i da je lice najizražajniji deo tela, dok su oči najizražajniji deo lica – vidi Sliku 2.2a. Očni kapci, obrve i trepavice, kao pomoćni elementi oka, imaju značajan udeo u dimorfizmu lica. Obrve su kod žena, u odnosu na horizontalnu osu, pod mnogo većim uglom nego kod muškaraca. Takođe, postoje razlike i u obliku i veličini obrva, što je slučaj i sa trepavicama. Međutim, posebno je od značaja dimorfizam očnih kapaka, što se nadalje razmatra.



Slika 2.2 (a) Dimorfizam lica; **(b)** Osnovni parametri oka: *LC* – lateralni kantus, *MC* – medijalni kantus, *PFL* – dužina palpebralne fisure, *PFH* – visina palpebralne fisure, *PFI* ili *CT* – nagib palpebralne fisure ili kantalni nagib, *IPD* – međuzenično rastojanje.

Prema Slici 2.2b, lateralni kantus (*LC*) predstavlja spoljni ugao kapaka, dok se medijalni kantus (*MC*) odnosi na unutrašnji ugao kapaka. Palpebralna fisura (*PF*) je eliptički prostor između *LC* i *MC* otvorenih kapaka, dok veličina *PF* direktno zavisi od intenziteta otvorenosti kapaka. Posebno je zanimljiv dimorfizam *PF* na šta uticaj imaju i rasne razlike. Ženske oči su isturenije u odnosu na muške, zbog čega imaju veću visinu *PF*. Osnovna razlika između muškog i ženskog oka je nagib *PF* ili kantalni nagib (*CT*) koji predstavlja ugao između prave koja spaja *LC* i *MC* sa horizontalnom osom. U skladu sa tim, *CT* može biti

pozitivan, neutralan i negativan. Pozitivan *CT* je karakteristika ženskog oka i postoji kada je *LC* veći od *MC* – Slika 2.3a; neutralan ili blago pozitivan *CT* je karakteristika muškog oka i postoji kada su *LC* i *MC* na bliskom nivou – Slika 2.3b, dok je negativan *CT* najčešće odlika starih ljudi i tada je *LC* manji od *MC*.



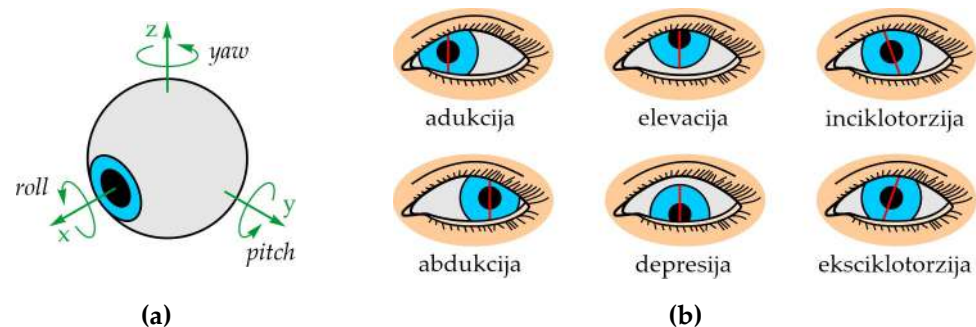
Slika 2.3 (a) Pozitivan *CT*; (b) Neutralan ili blago pozitivan *CT*.

Istraživanja ukazuju da lepa lica nemaju univerzalne karakteristike, već da postoje razlike u percepciji lepote i atraktivnosti lica različitih rasa i etničkih grupa. Osim polnih, postoje i individualne razlike. Analiza *CT* brazilskih belaca, brazilskih Japanaca i brazilskih Indijanaca iz gornjeg basena reke Rio Negro u oblasti savezne države Amazonija je prikazana u [2.12]; na uzorku od 107 subjekata oba pola, opseg *CT* je $0\div 10.67^\circ$ (prosečno $4.6\pm 2.39^\circ$) za brazilске belce, $0.81\div 14.78^\circ$ (prosečno $9.39\pm 2.96^\circ$) za brazilске Japance i $0\div 13.92^\circ$ (prosečno $9.64\pm 2.51^\circ$) za brazilске Indijance. Analiza *CT* 89 Afroamerikanaca i 75 belih Amerikanaca u zavisnosti od pola i uzrasta je prikazana u [2.13]; rezultati ukazuju da uzrast ima minimalan značaj na veličinu *CT*, dok su polne i rasne razlike očigledne; tako afroamerički muškarci imaju *CT* prosečno $3.9\pm 2.1^\circ$, dok žene $6.0\pm 2.3^\circ$; prosečna vrednost *CT* američkih belaca je $4.6\pm 2.2^\circ$ za muškarce, a $5.8\pm 2.3^\circ$ za žene. Analiza *CT* 300 subjekata, od čega 150 muškaraca i 150 žena, pripadnika malezijske južnoindijske populacije je prikazana u [2.14]; *CT* kod muškaraca je prosečno $4.72\pm 2.39^\circ$, dok kod žena iznosi $7.05\pm 3.00^\circ$; osim toga, analizirani su i drugi parametri oka na osnovu čega je potvrđen polni dimorfizam u svim aspektima. Analiza *CT* 234 muškaraca i 264 žena pripadnika azijske populacije, što je ukupno 498 subjekata, prikazana je u [2.15]; *CT* muškaraca je prosečno $7.9\pm 2.4^\circ$, dok je kod žena $8.8\pm 2.3^\circ$. Antropometrijska analiza lica 68 subjekata oba pola latino populacije: belo-azijskih, latino-azijskih i latino-belih, prikazana je [2.16]; *CT* belo-azijske populacije prosečno iznosi $8.22\pm 1.87^\circ$, latino-azijske populacije je $2.69\pm 2.40^\circ$, dok je za latino-belu populaciju prosečno $6.16\pm 2.43^\circ$. Analiza položaja očnih kapaka 9 pripadnika korejsko-američke popu-

lacije i 10 pripadnika kinesko-američke populacije, prikazana je u [2.17]; opseg CT pripadnika korejsko-američke populacije je $4.5\div 11.7^\circ$ (prosečno $7.3\pm 2.1^\circ$), dok je kod pripadnika kinesko-američke populacije $0\div 12.3^\circ$ (prosečno $6.0\pm 2.9^\circ$). Prema [2.18], srednja vrednost CT 594 subjekata korejske populacije, od čega 273 muškaraca i 321 žena, je $8.5\pm 2.5^\circ$ za muškarce i $9.3\pm 2.5^\circ$ za žene. Antropometrijska i estetska analiza 102 lica američkih Indijanki je prikazana u [2.19], a rezultati su poređeni sa podacima populacije severnoameričkih belkinja; prosečna vrednost CT američkih Indijanki je $3.5\pm 2.2^\circ$, što je manje od prosečnog CT severnoameričkih belkinja koja je $4.1\pm 2.2^\circ$. Analiza 107 lica persijskih žena je prikazana u [2.20], a rezultati su poređeni, kao u prethodnom radu, sa severnoameričkim belkinjama; prosečna vrednost CT persijskih žena je $3.04\pm 2.39^\circ$. Analiza prosečnih i atraktivnih ženskih lica različitih rasa i etničkih grupa je prikazana u [2.21]; prema tome, CT prosečnog i atraktivnog lica belkinje je 4.12° i 7.13° , respektivno, dok je CT prosečnog i atraktivnog korejskog lica je 9.77° i 8.87° , respektivno; CT prosečnog i atraktivnog afričkog lica je 5.39° i 9.98° , respektivno, dok atraktivno azijsko lice žene ima CT 8.64° . Prema [2.22], CT atraktivnog lica belkinje je čak 12.6° , dok kod atraktivnog azijskog lica iznosi čak 13.2° . Na osnovu svega toga, zaključuje se da atraktivnost lica raste sa povećanjem CT kapaka, što je danas jedna od najčešćih procedura u korektivnoj hirurgiji – zatezanje i podizanje kapaka ili tzv. blefaroplastika kapaka (eng. *eyelid blepharoplasty*).

2.3 Kinematika

Očna jabučica ima 3 stepena slobode (eng. *Degree of Freedom – DoF*), omogućavajući sve tri rotacije (Slika 2.4a): oko z -ose ili *yaw* rotacija, oko y -ose ili *pitch* rotacija i oko x -ose ili *roll* rotacija. U zavisnosti od smera rotacije (\pm), postoje različite vrste pokreta jabučice (Slika 2.4b): pokreti adukcije i abdukcije omogućavaju horizontalnu rotaciju jabučice oko vertikalne ose pomerajući pogled medijalno (ka nosu) i lateralno (spolja), respektivno; pokreti



Slika 2.4 (a) Rotacije očne jabučice; (b) Vrste pokreta očne jabučice u zavisnosti od smera rotacije.

elevacije i depresije se odnose na vertikalnu rotaciju jabučice oko horizontalne ose pomerajući pogled nagore i nadole, respektivno; pokreti inciklotorzije i eksciklotorzije omogućavaju rotaciju jabučice oko linije vida pomerajući oko medijalno i lateralno, respektivno.

Prema [2.23], opsezi pokreta adukcije i abdukcije su približno jednaki i iznose $44.9 \pm 7.2^\circ$ i $44.2 \pm 6.8^\circ$, respektivno, pa je ukupan *yaw* pokret jabučice približno 90° . Sa druge strane, opsezi elevacije i depresije se razlikuju i iznose $27.9 \pm 7.6^\circ$ i $47.1 \pm 8.0^\circ$, respektivno, pa je ukupan *pitch* pokret jabučice približno 75° . Najmanja pokretljivost jabučice je prilikom inciklotorzije i eksciklotorzije – svega nekoliko stepeni [2.24], pa se zbog toga *roll* pokreti jabučice u ovom radu zanemaruju. Brzina jabučica zavisi od vrste i prirode pokreta, i određuje se posmatranjem oba oka istovremeno. Prema [2.25,2.26], osnovni tipovi pokreta očiju su: (i) horizontalne i vertikalne sakade (eng. *saccades*), (ii) glatki pokreti praćenja (eng. *smooth pursuit movements*), (iii) pokreti vergencije (eng. *vergence*), i (iv) vestibulookularni refleks (eng. *vestibulo-ocular reflex*). Sakade predstavljaju rapidne pokrete očiju između fiksiranih tačaka menjajući naglo pravac pogleda – npr., čitanje novina ili pretraživanje objekata u sobi; tada ugaona brzina jabučice dostiže $400 \div 800^\circ/\text{s}$. Sa druge strane, glatki pokreti praćenja su blagi i veoma spori pokreti očiju omogućavajući praćenje objekata u pokretu na velikoj udaljenosti; tada maksimalna ugaona brzina jabučice dostiže maksimalno $30^\circ/\text{s}$. Za razliku od drugih tipova pokreta gde oba oka rotiraju u istom smeru, pokreti vergencije omogućavaju rotaciju jabučica u suprotnim smerovima radi fokusiranja objekata – npr., kretanje prsta ka nosu i udaljavanje od njega; tada ugaona brzina jabučice iznosi $30 \div 150^\circ/\text{s}$. Vestibulookularni pokreti su refleksni pokreti očiju za suprotstavljanje iznenadnim i naglim pokretima glave omogućavajući stabilizaciju slike, i tada ugaona brzina jabučice dostiže $800^\circ/\text{s}$.

Treptanje je složena, kratkotrajna i gotovo periodična fiziološka akcija koja se sastoji iz punog zatvaranja i otvaranja očnih kapaka, dok vreme trajanja zavisi od vrste pokreta. Prema [2.27,2.28], osnovni tipovi pokreta kapaka su: (i) refleksno treptanje – nevoljni, iznenadni i rapidni pokreti izazvani stimulacijom rožnjače, npr. dodirima oka ili bilo kojim drugim perifernim stimulusom; vreme trajanja ovih pokreta je najkraće i iznosi 205 ± 18 ms, (ii) voljno treptanje – pokreti koje subjekt izvodi svesno pod unurašnjim ili spoljašnjim komandama; trajanje ovih pokreta je duže i iznosi 275 ± 37 ms, i (iii) spontano treptanje – nesvesni i kontinuirani pokreti čije je trajanje najduže i iznosi 334 ± 67 ms. Treba napomenuti da faza zatvaranja traje dva i po puta kraće nego faza otvaranja oka, a samim tim se i brzine razlikuju [2.28]. Stopa spontanog treptanja je prosečno $10 \div 20$ treptaj/min [2.29], što zavisi

od uzrasta, pola, doba dana, ali i od umora i koncentracije – žene dvostruko više trepnu nego muškarci za isto vreme [2.30]. Prema [2.31], opseg kretanja gornjeg kapka zavisi od tipa i faze pokreta i najveći je za refleksno treptanje i fazu zatvaranja oka, $41.3 \pm 5.3^\circ$, dok tada ugaona brzina gornjeg kapka dostiže $1108.0 \pm 157.0^\circ/\text{s}$. Opseg kretanja donjeg kapka se u literaturi može pronaći samo kao posledica vertikalnih sakada i tada se kapci kreću zajedno sa jabučicom gore-dole [2.32]. Vizuelno, normalni položaj očnih kapaka u mirovanju podrazumeva da je gornji kapak 2 mm ispod periferije dužice, dok je donji kapak tačno na periferiji dužice [2.33]. Sa druge strane, neki autori mere rastojanje kapaka od centra zenice [2.34,2.35]. Opservacijom, linija dodira kapaka prilikom žmurenja se nalazi između centra zenice i njene periferije, i tada donji kapak izvrši maksimalnu rotaciju.

Prema [2.36], idealni položaj obrve je definisan pravouglim trouglom (vidi Sliku 2.1) koji formira medijalni i lateralni kantus – tačke *C* i *D*, respektivno, zajedno sa spoljnim delom – tačka *E* (lat. *ala*). Postoji sedam fundamentalnih pokreta obrva [2.37], čije amplitude direktno zavise od toga koji deo obrve je aktuiran (medijalno, iznad zenice ili lateralno) i u kom pravcu (podizanje ili spuštanje). Prema [2.38], sposobnost podizanja obrva opada sa godinama, pa za uzrast od 20–39 god. i ≥ 40 god. je 13.0 ± 2.9 mm i 9.8 ± 2.0 mm za medijalni kantus, dok je 15.7 ± 2.6 mm i 12.7 ± 1.7 mm iznad zenice (eng. *midpupillary line*), respektivno. Sa druge strane, za markere postavljene iznad zenice oka i voljne pokrete, maksimalno podizanje leve i desne obrve je 9.75 mm i 10.14 mm, dok brzine iznose 24.11 mm/s i 25.87 mm/s, respektivno [2.39]. Međutim, prilikom iznenadnih pokreta izazvanih, npr. strahom, obrve, zajedno sa gornjim kapcima, podižu se refleksno i tada su brzine pokreta obrva daleko veće.

2.4 Zaključak

Na osnovu strukture, dimorfizma i kinematike oka i obrva, zaključeno je sledeće: (i) iako jabučica ima 3 *DoF*, u robotici su od značaja *pitch* i *yaw* pokreti čiji su opsezi približno 90° (abdukcija 45° + adukcija 45°) i 75° (elevacija 25° + depresija 50°), respektivno; *roll* pokreti jabučice imaju veoma mali opseg, pa se zbog toga najčešće zanemaruju; jabučica dostiže najveću ugaonu brzinu prilikom sakadnih i vestibulookularnih pokreta – skoro $800^\circ/\text{s}$, dok je najmanja tokom glatkih pokreta praćenja, maksimalno $30^\circ/\text{s}$; (ii) gornji i donji kapci se razlikuju po svim kinematičkim parametrima – gornji kapak je približno dvostruko širi nego donji kapak, pa je i opseg kretanja gornjeg kapka približno dva puta veći nego donjeg

kapka, a shodno tome, i brzine; maksimalni opsezi kretanja gornjih i donjih kapaka su približno 45° i 20° , respektivno, dok ugaona brzina gornjeg kapka prilikom refleksinih pokreta i donje faze dostiže približno $1100^\circ/s$; treba napomenuti da faza zatvaranja oka traje dva i po puta kraće nego faza otvaranja, dok je vreme trajanja jednog punog treptaja u opsegu $0.2\div 0.4$ s; osnovna karakteristika ženskog oka je pozitivan CT čije su prosečne vrednosti $5\div 10^\circ$, pri čemu veće vrednosti imaju pozitivne efekte na atraktivnost lica, (iii) kinematika obrva je veoma složena i zavisi od toga koji deo obrve je aktuiran i u kom smeru; podizanje obrva je približno $10\div 15$ mm, dok prilikom voljnih pokreta maksimalna brzina obrva dostiže 25 mm/s; međutim, prilikom refleksnih pokreta očnih kapaka i obrva treba očekivati mnogo veće brzine obrva.

Reference

- 2.1 Wilson, D.J., Lin, Z., Bower, D.Q., Deravi, L.F.: Engineering color, pattern, and texture: From nature to materials. *Matter* **4**(7), 2163–2171 (2021).
- 2.2 Calviño-Günther, S., Vallod, Y.: Patient care: From body to mind. In: Boulanger, C., McWilliams, D. (eds.) *Passport to Successful ICU Discharge*, pp. 29–42. Springer, Cham (2020).
- 2.3 Engel, S.A., Wilkins, A.J., Mand, S., Helwig, N.E., Allen, P.M.: Habitual wearers of colored lenses adapt more rapidly to the color changes the lenses produce. *Vision Res.* **125**, 41–48 (2016).
- 2.4 Liu, X., Engel, S.A.: Higher-level meta-adaptation mitigates visual distortions produced by lower-level adaptation. *Psychol. Sci.* **31**(6), 654–662 (2020).
- 2.5 Litričin, O., Blagojević, M., Cvetković, D.: *Ophthalmology (in Serbian)*. Elit Medica, Belgrade (2004).
- 2.6 Cvetković, D., Golubović, S., Hentova-Senčanić, P., Ignjačev, M., Jovanović, M., Kontić, Đ., Latković, Z., Milenković, S., Misita, V., Risić, D., Stanojević-Paović, A.: *Ophthalmology for Medical Students (in Serbian)*. University of Belgrade, Faculty of Medicine, CIBID, Belgrade (2021).
- 2.7 Zlatanović, G., Veselinović, D., Jovanović, P.: *Ophthalmology (in Serbian)*. University of Niš, Faculty of Medicine, Niš (2021). Đurić, M., Milisavljević, M., Maliković, A., Đonić, D., Milovanović, P.: *Head and Neck Anatomy (in Serbian)*. University of Niš, Faculty of Medicine, Galaksija, Niš (2021).
- 2.8 Sadr, J., Jarudi, I., Sinha, P.: The role of eyebrows in face recognition. *Perception* **32**(3), 285–293 (2003).
- 2.9 Sinha, P., Balas, B., Ostrovsky, Y., Russell, R.: Face recognition by humans: Nineteen results all computer vision researchers should know about. *P. IEEE* **94**(11), 1948–1962 (2006).
- 2.10 Bekerman, I., Gottlieb, P., Vaiman, M.: Variations in eyeball diameters of the healthy adults. *J. Ophthalmol.* **2014**, 503645–503645-5 (2014).
- 2.11 Murray, N.P., Hunfalvay, M., Bolte, T.: The reliability, validity, and normative data of interpupillary distance and pupil diameter using eye-tracking technology. *Transl. Vis. Sci. Technol.* **6**(4), 2-1–2-12 (2017).
- 2.12 Hanada, A.L., de Souza Jr, E.N., Moribe, I., Cruz, A.A.V.: Comparison of palpebral fissure obliquity in three different racial groups. *Ophthalmic Plast. Reconstr. Surg.* **17**(6), 423–426 (2001).
- 2.13 Price, K.M., Gupta, P.K., Woodward, J.A., Stinnett, S.S., Murchison, A.P.: Eyebrow and eyelid dimensions: An anthropometric analysis of African Americans and Caucasians. *Plast. Reconstr. Surg.* **124**(2), 615–623 (2009).
- 2.14 Packiriswamy, V., Kumar, P., Rao, K.M.: Photogrammetric analysis of palpebral fissure dimensions and its position in Malaysian South Indian ethnic adults by gender. *N. Am. J. Med. Sci.* **4**(10), 458–462 (2012).
- 2.15 Park, D.H., Choi, W.S., Yoon, S.H., Song, C.H.: Anthropometry of Asian eyelids by age. *Plast. Reconstr. Surg.* **121**(4), 1405–1413 (2008).
- 2.16 Fry, C.L., Naugle Jr, T.C., Cole, S.A., Gelfond, J., Chittoor, G., Mariani, A.F., Goros, M.W., Haik, B.G., Voruganti, V.S.: The Latino eyelid: Anthropometric analysis of a spectrum of findings. *Ophthalmic Plast. Reconstr. Surg.* **33**(6), 440–445 (2017).
- 2.17 Cho, M., Glavas, I.P.: Anatomic properties of the upper eyelid in Asian Americans. *Dermatol. Surg.* **35**(11), 1736–1740 (2009).
- 2.18 Song, W.C., Kim, S.J., Kim, S.H., Hu, K.S., Kim, H.J., Koh, K.S.: Asymmetry of the palpebral fissure and upper eyelid crease in Koreans. *J. Plast. Reconstr. Aesthet. Surg.* **60**(3), 251–255 (2007).

- 2.19. Husein, O.F., Sepehr, A., Garg, R., Sina-Khadiv, M., Gattu, S., Waltzman, J., Wu, E.C., Shieh, M., Heitmann, G.M., Galle, S.E.: Anthropometric and aesthetic analysis of the Indian American woman's face. *J. Plast. Reconstr. Aesthet. Surg.* **63**(11), 1825–1831 (2010).
 - 2.20. Sepehr, A., Mathew, P.J., Pepper, J.P., Karimi, K., Devcic, Z., Karam, A.M.: The Persian woman's face: A photogrammetric analysis. *Aesth. Plast. Surg.* **36**(3), 687–691 (2012).
 - 2.21. Rhee, S.C., Woo, K.S., Kwon, B.: Biometric study of eyelid shape and dimensions of different races with references to beauty. *Aesth. Plast. Surg.* **36**(5), 1236–1245 (2012).
 - 2.22. Rhee, S.C.: Differences between Caucasian and Asian attractive faces. *Skin Res. Technol.* **24**(1), 73–79. (2018).
 - 2.23. Lee, W.J., Kim, J.H., Shin, Y.U., Hwang, S., Lim, H.W.: Differences in eye movement range based on age and gaze direction. *Eye* **33**(7), 1145–1151 (2019).
 - 2.24. Lin, H.Y., Fang, Y.T., Chuang, Y.J., Karlin, J.N., Chen, H.Y., Lin, S.Y., Lin, P.J., Chen, M.: A comparison of three different corneal marking methods used to determine cyclotorsion in the horizontal meridian. *Clin. Ophthalmol.* **11**, 311–315 (2017).
 - 2.25. Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., LaMantia, A.-S., McNamara, J.O., Williams, M.S.: *Neuroscience*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland (2004).
 - 2.26. Sparks, D.L.: The brainstem control of saccadic eye movements. *Nat. Rev. Neurosci.* **3**(12), 952–964 (2002).
 - 2.27. Esteban, A., Traba, A., Prieto, J.: Eyelid movements in health and disease. The supranuclear impairment of the palpebral motility. *Neurophysiol. Clin.* **34**(1), 3–15 (2004).
 - 2.28. VanderWerf, F., Brassinga, P., Reits, D., Aramideh, M., Ongerboer de Visser, B.: Eyelid movements: Behavioral studies of blinking in humans under different stimulus conditions. *J. Neurophysiol.* **89**(5), 2784–2796 (2003).
 - 2.29. Barbato, G., Ficca, G., Muscettola, G., Fichelle, M., Beatrice, M., Rinaldi, F.: Diurnal variation in spontaneous eye-blink rate. *Psychiatry Res.* **93**(2), 145–151 (2000).
 - 2.30. Sforza, C., Rango, M., Galante, D., Bresolin, N., Ferrario, V.F.: Spontaneous blinking in healthy persons: An optoelectronic study of eyelid motion. *Ophthalmic Physiol. Opt.* **28**(4), 345–353 (2008).
 - 2.31. Malbouisson, J.M., Messias, A., Garcia, D.M., De Paula Cechetti, S., Barbosa, J.C., Cruz, A.A.: Modeling upper eyelid kinematics during spontaneous and reflex blinks. *J. Neurosci. Methods* **191**(1), 119–125 (2010).
 - 2.32. Malbouisson, J.M., Velasco e Cruz, A.A., Messias, A., Leite, L.V., Rios, G.D.: Upper and lower eyelid saccades describe a harmonic oscillator function. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **46**(3), 857–862 (2005).
 - 2.33. Carter, S.R.: Eyelid disorders: Diagnosis and management. *Am. Fam. Physician* **57**(11), 2695–2702 (1998).
 - 2.34. Small, R.G., Meyer, D.R.: Eyelid metrics. *Ophthalmic Plast. Reconstr. Surg.* **20**(4), 266–267 (2004).
 - 2.35. Chun, Y.S., Park, H.H., Park, I.K., Moon, N.J., Park, S.J., Lee, J.K.: Topographic analysis of eyelid position using digital image processing software. *Acta Ophthalmol.* **95**(7), e625–e632 (2017).
 - 2.36. Yalçinkaya, E., Cingi, C., Söken, H., Ulusoy, S., Muluk, N.B.: Aesthetic analysis of the ideal eyebrow shape and position. *Eur. Arch. Oto-Rhino-L.* **273**(2), 305–310 (2016).
 - 2.37. Guaitella, I., Santi, S., Lagrue, B., Cavé, C.: Are eyebrow movements linked to voice variations and turn-taking in dialogue? An experimental investigation. *Lang. Speech* **52**(2-3), 207–222 (2009).
 - 2.38. Sclafani, A.P., Jung, M.: Desired position, shape, and dynamic range of the normal adult eyebrow. *Arch. Facial Plast. Surg.* **12**(2), 123–127 (2010).
 - 2.39. Feng, G., Zhuang, Y., Gao, Z.: Measurement and analysis of associated mimic muscle movements. *J. Otol.* **10**(1), 39–45 (2015).
-

Sadržaj

3 Pregled stanja u oblasti.....	16
3.1 Kruto lice robota sa pokretnim mehaničkim delovima	17
3.2 Hibridno lice robota – pokretni mehanički delovi i upotreba <i>LED</i> dioda.....	20
3.3 Zaključak.....	22
Reference	23

3 Pregled stanja u oblasti

Pregled literature treba da pruži informacije o realizovanim robotima koji su u stanju da na intuitivan i transparentan način izražavaju emocije, nalik ljudima, pomeranjem karakterističnih delova lica, kao što su oči, obrve i usta, nezavisno od ostatka lica. Shodno tome, u konstrukciji i realizaciji lica *SIR* postoje dva osnovna pristupa. Prvi se odnosi na kruta lica sa pokretljivim mehaničkim delovima – očne jabučice, očni kapci, obrve i usta, dok drugi pristup podrazumeva kruto lice na kome se prikazuju oči, obrve i usta upotrebom svetlećih dioda (eng. *Light-Emitting Diode – LED*); moguće je kombinovati ova dva pristupa.

Treba napomenuti da pregled stanja u oblasti obuhvata robote čija su lica kruta, dok se lica prekrivena veštačkom kožom zanemaruju – animatronicke glave, androidi i ginoidi [3.1–3.10], zbog toga što su očne jabučice kod takvih robota najčešće nepokretne ili rotiraju samo oko horizontalne ose upotrebom jednog aktuatora. Roboti čija su lica fleksibilna omogućavaju veći asortiman facijalnih izraza formiranjem kožnih nabora, zbog čega je neophodno aktuirati brojne tačke na licu robota, što je poseban problem. Osim toga, lica robota koja predstavljaju ekran (displej) od tečnog kristala (eng. *Liquid Crystal Display – LCD*) [3.11–3.16] na kome se prikazuju karakteristični delovi lica ili tzv. *mask-bot* projektori [3.17–3.22], takođe nemaju pokretne mehaničke delove, pa se zbog toga zanemaruju.

Na osnovu svega toga, pregled literature će obuhvatiti dve grupe problema: (i) roboti koji imaju kruta lica i pokretljive mehaničke delove poput očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, i (ii) roboti koji takođe imaju kruta lica, pri čemu se očne jabučice i kapci aktuiraju mehanički, dok se obrve i/ili usta prikazuju upotrebom *LED* dioda (kod nekih robota lice menja boju u skladu sa ispoljenom emocijom). Dodatno će se analizirati: (i) broj *DoF* očiju i obrva zbog toga što veći broj *DoF* omogućava veći asortiman pokreta i samim tim širi spektar neverbalnih izraza licem – emocije, (ii) na koji način se vrši prenos kretanja sa aktuatora na očne jabučice, kapke i obrve – izlazni članovi pogonskih mehanizama, (iii) vrste upotrebljenih aktuatora i senzora, i (iv) sposobnost robota da proizvede facijalne ekspresije.

3.1 Kruto lice robota sa pokretnim mehaničkim delovima

Humanoidna robotska glava po imenu *HYDROiD* sa minimalnim emocionalnim sposobnostima, prikazana je u [3.23]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF*, očne kapke sa 3 *DoF* i mehanizam za pokretanje usta sa ukupno 5 *DoF*; *pitch* pokrete jabučica (rotacija oko *y*-ose ili pokret gore-dole) i *yaw* pokrete jabučica (rotacija oko *z*-ose ili pokret levo-desno) omogućavaju sistemi zupčanika i remenica, respektivno, dok jabučice i obrve aktuiraju *Athlonix 12G88* motori i *Parallax GWS Naro* servomotori, respektivno; robot je u stanju da proizvede dve facijalne ekspresije: sreću i tugu.

Robotska glava po imenu *EMYS (EMotive headY System)* sa mogućnostima izražavanja emocija, prikazana je u [3.24]; robot ima očne jabučice sa 2 *DoF* i očne kapke sa ukupno 4 *DoF* koje aktuiraju minijaturni *Hitec HS-65HB* servomotori; za percepciju okoline je upotrebljena kamera *Logitech Sphere AF color CMOS* (eng. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) locirana u nosu robota, *Kinect* senzor za detekciju pokreta, kao i mikrofoni za prijem zvuka i prepoznavanje govora; robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: bes, gađenje, strah, radost, tugu i iznenađenje.

Senzorisana robotska glava po imenu *Muecas* za afektivnu *HRI*, prikazana je u [3.25]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, obrve sa ukupno 4 *DoF* i usta sa 1 *DoF*; *pitch* pokrete jabučica omogućava servomotor *Faulhaber linear DC* (eng. *Direct Current*) *LM-2070* preko mehanizma sa linearnim kretanjem, dok dva servomatora *Faulhaber linear DC LM-1247* direktnim pogonom (eng. *direct drive*) obezbeđuju nezavisne *yaw* pokrete jabučica; obrve direktno aktuiraju servomotori *Hitec HS-45HB*; robot ima stereo audio sistem – zvučnici i mikrofoni, sistem vizije koji se sastoji od kamere *Point Grey Dragonfly2 IEEE-1394* sa *CCS* senzorom (eng. *Custom Control Sensor*) i kontrolerom, kao i *RGB-D* senzor (eng. *Red Green Blue-Depth*); robot je u stanju da ispolji 4 facijalne ekspresije: tugu, sreću, strah i bes.

Mobilna humanoidna robotska platforma po imenu *Robovie*, dizajnirana za *HRI*, prikazana je u [3.26]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* koje direktno aktuiraju motori, senzore za detekciju prepreka, taktilne senzore, omnidirekcionni senzor za viziju i mikrofoni za prijem i prepoznavanje glasovnih komandi upotrebom sistema za interpretaciju govora.

Društveni robot *SyPEHUL (System of Physics, Electronics, HUMANoid robot and machine Learning)* je prikazan u [3.27]; robot ima očne jabučice sa 2 *DoF*, obrve sa 2 *DoF*, usta sa 4 *DoF* i uši sa 2 *DoF* – svi zglobovi su aktuirani servomotorima, dok je kamera za detekciju

facijalnih ekspresija locirana između očuju; robot je u stanju da proizvede četiri facijalne ekspresije: sreću, tugu, ljutnju i iznenađenje.

Društveni robot po imenu *Probo*, dizajniran za istraživanje neverbalne *HRI*, prikazan je u [3.28]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, očne kapke sa 2 *DoF*, obrve sa 4 *DoF*, usne sa 2 *DoF*, uši sa 2 *DoF* i 1 *DoF* za pomeranje vilice; jabučice, kapke i obrve pokreću *CBCDA* aktuatori (eng. *Compliant Bowden Cable-Driven Actuator*); takođe, robot ima *CCD* kameru (eng. *Charge-Coupled Device*) za viziju lociranu između očiju, mikrofone za prijem i obradu zvuka i otpornik za detekciju sile dodirrom (eng. *Force-Sensing Resistor – FSR*); robot je u stanju da proizvede 6 facijalnih ekspresija: ljutnju, gađenje, strah, sreću, tugu i iznenađenje.

Humanoidna istraživačka platforma za neuronauke po imenu *CB* (*Computational Brain*), prikazana je u [3.29]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* i u svakom oku po dve kamere – *Elmo MN42H*, 17 mm *OD* (periferni vid) i *Elmo QN42H*, 7 mm *OD* (fovealni vid) za vizuelno procesiranje i okularno-motoričke reakcije upotrebom senzora i softvera za obradu slike; stereo mikrofoni omogućavaju čulo sluha nakon perceptivne obrade signala.

Humanoidna glava *Amir-II* sa mogućnostima izražavanja emocija je prikazana u [3.30]; robot ima očne kapke sa 2 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i usta sa ukupno 3 *DoF* – svi zglobovi su aktuirani *Dynamixel AX-12* servomotorima, dok je za viziju upotrebljena *web* kamera sa univerzalnom serijskom magistralom (eng. *Universal Serial Bus – USB*) postavljena na glavi robota; robot je u stanju da proizvede četiri facijalne ekspresije: sreću, ljutnju, tugu i gađenje.

Humanoidni robotski torzo po imenu *James*, dizajniran za delovanje u dinamičnom i nestrukturiranom okruženju čoveka, prikazan je u [3.31,3.32]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF*, a u njima dve digitalne *Point Grey Dragonfly CCD* kamere koje aktuiraju *Faulhaber* motori posredstvom mehanizama sa tendonima (eng. *tendon-driven mechanism*); takođe, robot ima senzor za orijentaciju u prostoru *Intersense iCube2 3-axis* (vestibularni sistem) postavljen na glavi, dok su za informacije o dodiru upotrebljeni senzori pritiska.

Robot nalik bebi po imenu *Infanoid*, dizajniran za istraživanje osnovnih mehanizama društvene interakcije, prikazan je u [3.33]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i usne sa 2 *DoF*; u svakoj jabučici su locirane dve različite kamere *CCD color* sa širokougaonim sočivom (vidno polje oko 120° horizontalno) za prepoznavanje objekata i telefot sočivom (vidno polje oko 20° horizontalno) za fokusiranje objekata; jabučice aktuiraju ukupno tri motora omogućavajući sakadične i glatke pokrete praćenja.

Mobilni humanoidni robot po imenu *Robotinho* – turistički vodič sa sposobnostima multimodalne interakcije, prikazan je u [3.34]; robot ima oči sa 4 *DoF* koje defakto predstavljaju dve *USB* kamere (donji kapci se pomeraju zajedno sa jabučicama), obrve sa 4 *DoF*, gornje kapke sa 1 *DoF*, kao i vilicu i usta sa ukupno 6 *DoF* – svi zglobovi se aktuiraju malim digitalnim *Dynamixel* servoima; takođe, robot ima senzor položaja (dvoosni akcelerometar i dva žiroskopa), dok za detekciju rastojanja koristi osam ultražvučnih senzora *Devantech SRF02*, kao i *LRF* (eng. *Laser Range Finder*) senzor; robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: iznenađenje, strah, radost, tugu, bes i gađenje.

Robot za generisanje emocija po imenu *EDDIE* (*Emotion Display with Dynamic Intuitive Expressions*) je prikazan u [3.35]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF* u kojima se nalaze *FireWire* kamere, očne kapke sa 4 *DoF* i obrve sa 4 *DoF* koje aktuiraju *Atom Mini* servomotori posredstvom poluga i prstenova; pored senzora za viziju, na glavi se nalaze dva mikrofona za identifikaciju zvuka i prepoznavanja govora; robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: radost, iznenađenje, ljutnju, gađenje, tugu i strah.

Humanoidni robot sa aktivnim vidom po imenu *MERTZ* je prikazan u [3.36]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i 1 *DoF* za gornje kapke; u očima su locirane kamere *Point Grey OEM Dragonfly* omogućavajući vizuelni input, dok mikروفon *GN Netcom VA-2000 voice array* omogućava interakciju sa više ljudi istovremeno; osim toga, robot ima senzore sile i motor enkodere.

Mobilni-spretno-socijalni robot po imenu *MDS Nexi* sa visokoartikulisanim licem za *HRI*, prikazan je u [3.37,3.38]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, očne kapke sa 2 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i vilicu sa 3 *DoF*; u jabučicama su locirane kamere *FireWire color* sa mikrosočivom od 6 mm, dok se u okviru čela nalazi trodimenzionalna infracrvena (eng. *InfraRed – IR*) kamera za prepoznavanje lica i objekata, zajedno sa četiri mikrofona za lokalizaciju zvuka; svi zglobovi su opremljeni strujnim sensorima i visokorezolucionim enkoderima; robot je u stanju da proizvede nekoliko facijalnih ekspresija: ljutnju, zbunjenost, uzbuđenje, dosadu.

Karlsruhe humanoidna glava – eksperimentalna robotska platforma za realizaciju interaktivnih servisnih zadataka i istraživanje kognitivne vizije, prikazana je u [3.39]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* koje aktuiraju *Harmonic Drive* motori sa sprezanjem bez zazora (eng. *zero backlash*) i *Faulhaber DC* motori sa bezazornim zupčanicima omogućavajući *pitch* i *yaw* pokrete očiju, respektivno; u svakoj jabučici se nalaze dve *PointGrey Dragonfly2 IEEE-1394* kamere (širokougaono sočivo za periferni vid i uskougaono sočivo za fovealni vid,

respektivno); takođe, robot ima senzor za detekciju akustičkog događaja (šestokanalni mikrofonski sistem) i inercijalni sistem (enkoderi i žiroskop).

Društveni robot po imenu *Doris* – turistički vodič sa izrazitim karakteristikama ženskog pola, prikazan je [3.40]; hardver obuhvata mobilnu platformu, trup i glavu; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF*, očne kapke sa 2 *DoF*, trepavice sa 4 *DoF* i usne sa ukupno 6 *DoF* koje aktuiraju servomotori; u okviru platforme su postavljeni enkoderi, sonari, omnidirekcione kamere, *RFID* (eng. *Radio Frequency Identification*) čitač sa antenom, laserski daljinomer itd; fazi kontroleri upravljaju licem i glasovnim modulima, dok su kontroleri putanje (kontroler pratilac putanje i kontroleri u hodniku) razvijeni upotrebom fazi logike.

3.2 Hibridno lice robota – pokretni mehanički delovi i upotreba *LED* dioda

Interaktivna robotska mačka po imenu *iCat* sa mogućnostima prepoznavanja lica i objekata, prikazana je u [3.41,3.42]; robot ima jabučice sa 3 *DoF*, očne kapke sa 2 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i usta sa ukupno 4 *DoF* – sve zglobove aktuiraju *RC* (eng. *Radio Control*) servomotori, dok se u nosu nalazi kamera za prepoznavanje objekata i lica; takođe, robot ima i audio sistem – mikrofone za prijem, snimanje zvučnih signala, prepoznavanje govora i smeru odakle dolazi, kao i zvučnik za generisanje govora, taktilne senzore i višebojne *LED* diode u ušima i nogama radi efikasnijeg ispoljavanja emocija; robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: sreću, iznenađenje, strah, tugu, gađenje i bes.

Bilefeld antropomorfna robotska glava po imenu *Flobi* sa čovekolikim izgledom, prikazana je u [3.43]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF*, a u svakoj *Point Grey Dragonfly2* kameru, očne kapke sa 4 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i usta sa ukupno 6 *DoF*; jabučice i obrve aktuiraju *Maxon* motori posredstvom poluga i mehanizama sa tendonima, respektivno; takođe, robot ima *RGB* senzor i *M12* mikrosočiva, mikrofona visoke osetljivosti, dva različita žiroskopa i *LED* diode u obrazima koji menjaju boje u skladu sa ispoljenom emocijom; maksimalna ugaona brzina sakadičnih pokreta je 500°/s; robot je u stanju da proizvede pet facijalnih ekspresija: sreću, tugu, bes, iznenađenje i strah.

Napredna verzija robota *Flobi* po imenu *Floka*, prikazana je u [3.44]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* i očne kapke sa 4 *DoF*; jabučice aktuiraju *Faulhaber 1524* motori sa bezazornim četvorostepenim zupčastim reduktorima posredstvom sistema poluga, dok kapke aktuiraju *Faulhaber 1331* motori sistemom opruga, remenica i kablova; u svakoj jabučici se nalazi *Ximea USB3* kamera oznake *MK042CG-CM-BRD*, dok povratnu informaciju o položaju obezbeđuju enkoderi relativnog položaja postavljeni na motore.

Interaktivni robot po imenu *Golden Horn* sa mogućnostima izražavanja emocija i prepoznavanja lica, prikazan u [3.45]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* i gornje kapke sa ukupno 4 *DoF* koje aktuiraju *AI* motori; osim toga, robot ima *LED* diode u obrazima radi generisanja pojedinih emocija, dok su *web* kamera i mikrofoni inkapsulirani u jabučice omogućavajući prepoznavanje lica i glasa, respektivno; robot je u stanju da proizvede šest osnovnih i nekoliko dodatnih facijalnih ekspresija: sreću, ljutnju, tugu, iznenađenje, gađenje i strah, kao i pospanost, nervozu, sumnju, vrtoglavicu, i dr.

Bipedalni robot po imenu *Romeo* je prikazan u [3.46]; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* koje aktuiraju *Maxon DCX10L* motori upotrebom proksimalnih veza; maksimalna kontrolisana i nekontrolisana ugaona brzina jabučice je $450^\circ/\text{s}$ i $1000^\circ/\text{s}$, respektivno; robot ima dve *Aptina Imaging MT9M114* kamere locirane u jabučice, *LED* diode za generisanje usana, mikrofoni i zvučnike, taktilne senzore, kao i senzor dubine za navigaciju i percepciju.

Humanoidna platforma *Epi*, dizajnirana za eksperimentalna istraživanja u razvojnoj robotici, prikazana je u [3.47]; ono što izdvaja ovog robota od drugih su njegove oči, tj. zenice sa kojima se može upravljati zajedno sa bojom dužice oka; robot ima očne jabučice sa 4 *DoF* koje aktuiraju *Dynamixel RX-28* servomotori omogućavajući *yaw* pokrete jabučica, dok *pitch* pokreti nisu mogući; maksimalna ugaona brzina horizontalnih sakada je $475^\circ/\text{s}$; svako oko ima mogućnost animiranih pokreta zenice čije se telo sastoji od *LED* prstena sa 12 *RGB* dioda koje aktuiraju *Dynamixel XL-320* servomotor; robot ima locirane kamere u oba oka, taktilne i senzore uglova u rukama, kao i *LED* diode za generisanje usana.

Ekspresivni robot nalik medvedu po imenu *eBear* za istraživanje *HRI* uključujući verbalnu i neverbalnu komunikaciju, prikazan je u [3.48]; robot ima očne jabučice sa 2 *DoF*, očne kapke sa 2 *DoF*, obrve sa 2 *DoF*, kao i 2 *DoF* za uši – sve zglobove aktuiraju *Hitec PWM* servomotori; takođe, robot ima kameru za prepoznavanje facijalnih ekspresija zahvaljujući sistemu za prepoznavanje slike i *LED* diode za prikazivanje usana i generisanje različitih emocija; robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: radost, ljutnju, tugu, gađenje, iznenađenje i strah.

Humanoidna robotska platforma otvorenog koda *iCub*, dizajnirana kao podrška u istraživanju otelotvorene kognicije, prikazana je u [3.49]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF* – kamere su locirane u jabučicama i aktuiraju ih *Faulhaber DC* motori preko zupčastih kaiševa, dok se obrve i usta prikazuju upotrebom *LED* dioda omogućavajući osnovne facijalne ekspresije; osim toga, robot ima taktilnu sensoriku i sposobnost da interpretira govor.

Twente humanoidna glava – istraživačka platforma za interakciju između čoveka i mašine (eng. *Human-Machine Interaction – HMI*), prikazana je u [3.50]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF* u kojima se nalaze *CCD* kamere za praćenje objekata i percepciju izraza lica, dok se obrve i usta prikazuju *LED* diodama omogućavajući izraze lica nalik ljudima.

Multifunkcionalni emocionalni dvonožni humanoidni robot po imenu *KIBO*, sa mogućnostima izraza lica i različitim uređajima za interakciju sa ljudima, prikazan je u [3.51]; robot ima očne jabučicama sa 4 *DoF*, očne kapke sa 4 *DoF*, obrve sa 2 *DoF* i usne sa ukupno 5 *DoF*; u jabučice su locirane stereo kamere, dok aktuiranje vrše mali *Hitec RC* servomotori; robot ima kameru za estimaciju položaja, mikrofone za prepoznavanje glasovnih komandi, ultrazvučni senzor za detekciju prepreka i merenje udaljenosti od objekta, kao i donju kameru za detekciju prepreka na podu; zahvaljujući *LED* diodama, robot menja boju lica u zavisnosti od situacionog konteksta i ispoljene emocije.

Humanoidni robot po imenu *WE-4RII (Waseda Eye No.4 Refined II)* za izražavanje emocija je prikazan u [3.52]; robot ima očne jabučice sa 3 *DoF* u kojima se nalaze *CCD* kamere, očne kapke sa 6 *DoF*, obrve sa ukupno 8 *DoF*, usne sa 4 *DoF* i 1 *DoF* za pomeranje vilice; *pitch* pokrete jabučica omogućava jedan *DC* motor i sistem sa talasnim prenosnikom (eng. *harmonic drive*) preko mehanizma sa kaiševima (eng. *belt-driven mechanism*), dok nezavisne *yaw* pokrete jabučica omogućavaju *DC* motori i torzione opruge preko mehanizma sa tendonima – na sličan način se aktuiraju i kapci; maksimalna ugaona brzina jabučica je $600^\circ/\text{s}$, dok za jedan pun treptaj iznosi $900^\circ/\text{s}$ u trajanju od 0.3 s, što je nalik čoveku; robot ima mikrofone, senzore za merenje temperature, taktilne, gas i senzore sile, dok obrazi menjaju boju u skladu sa situacionim kontekstom – ispoljenom emocijom, elektroluminiscencijom (eng. *electroluminescence*); pored prepoznavanja govora, robot je u stanju da proizvede šest facijalnih ekspresija: sreću, iznenađenje, bes, gađenje, strah i tugu.

3.3 Zaključak

Na osnovu pregleda dostupne literature i analizom rezultata, zaključeno je sledeće: (i) roboti najčešće imaju očne jabučice sa 3 ili 4 *DoF* omogućavajući zajednički *pitch* i nezavisne *yaw* pokrete očiju ili nezavisne *pitch* i *yaw* pokrete svakog oka, respektivno; (ii) roboti generalno imaju očne kapke sa 2 ili 4 *DoF* omogućavajući rotaciju gornjih kapaka nezavisno (dok su donji kapci nepokretni ili se pomeraju u skladu sa vertikalnim sakadama oka) ili pomeranje svakog kapka nezavisno, respektivno; (iii) roboti obično imaju obrve sa 2 ili 4

DoF omogućavajući nezavisnu rotaciju ili translaciju obrva, ili nezavisnu rotaciju i translaciju svake obrve, respektivno; (iv) prenos kretanja sa aktuatora na jabučice, kapke i obrve se najčešće realizuje upotrebom zupčanika, poluga i prstenova, mehanizmima sa tendoni- ma, kaiševima ili kablovima – fleksibilnim [3.53,3.54] ili krutim čeličnim užadima [3.55, 3.56], linearnim mehanizmima sa vođicama ili direktnim pogonom aktuatorima; (iv) aktu- iranje zglobova se najčešće vrši servomotorima, dok se ređe koriste *Maxon* i *Faulhaber DC* motori, prevashodno zbog cene; (v) kamere mogu biti locirane u jabučicama – jedna ili dve u svakom oku omogućavajući percepciju okoline, prepoznavanje lica i objekata upotrebom sistema vizije i sistema za obradu slike, međutim, većina robota ima kamere locirane izvan jabučica, u predelu čela, nosa ili na grudima; (vi) roboti generalno imaju jedan ili više mi- krofona za prijem i obradu zvučnih signala, kao i zvučnik za emitovanje verbalnih poruka; (vii) konačno, samo jedan robot ima razvijene oči i obrve u skladu sa biološkim principima i kinematičkim parametrima ljudskog oka.

Reference

- 3.1 Park, I.W., Kim, J.Y., Cho, B.K., Oh, J.H.: Control hardware integration of a biped humanoid robot with an android head. *Robot. Auton. Syst.* **56**(1), 95–103 (2008).
- 3.2 Ahn, H.S., Lee, D.W., Choi, D., Lee, D.Y., Hur, M., Lee, H.: Designing of android head system by applying facial muscle mechanism of humans. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, pp. 799–804. IEEE Xplore, New York (2013).
- 3.3 Nakaoka, S.I., Kanehiro, F., Miura, K., Morisawa, M., Fujiwara, K., Kaneko, K., Kajita, S., Hirukawa, H.: Creating facial motions of Cybernetic Human HRP-4C. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009)*, pp. 561–567. IEEE Xplore, New York (2010).
- 3.4 Becker-Asano, C., Ishiguro, H.: Intercultural differences in decoding facial expressions of the android robot Geminoid F. *J. Artif. Intell. Soft Comput. Res.* **1**(3), 215–231 (2011).
- 3.5 Vlachos, E., Schärfe, H.: An open-ended approach to evaluating android faces. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015)*, pp. 746–751. IEEE Xplore, New York (2015).
- 3.6 Hashimoto, T., Hitramatsu, S., Tsuji, T., Kobayashi, H.: Development of the face robot SAYA for rich facial expressions. In: *Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference (SICE-ICCAS 2006)*, pp. 5423–5428. IEEE Xplore, New York (2007).
- 3.7 Ishihara, H., Asada, M.: Design of 22-DOF pneumatically actuated upper body for child android ‘Affetto’. *Adv. Robotics* **29**(18), 1151–1163 (2015).
- 3.8 Ajibo, C.A., Ishi, C.T., Mikata, R., Liu, C., Ishiguro, H.: Analysis of body gestures in anger expression and evaluation in android robot. *Adv. Robotics* **34**(24), 1581–1590 (2020).
- 3.9 Lazzeri, N., Mazzei, D., Ben Moussa, M., Magnenat-Thalmann, N., De Rossi, D.: The influence of dynamics and speech on understanding humanoid facial expressions. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **15**(4), 1–16 (2018).
- 3.10 Ishiguro, H., Nishio, S.: Building artificial humans to understand humans. In: Ishiguro, H., Dalla Libera, F. (eds.) *Geminoid Studies*, pp. 21–37. Springer, Singapore (2018).
- 3.11 Fitter, N.T., Kuchenbecker, K.J.: Designing and assessing expressive open-source faces for the Baxter robot. In: Agah, A., Cabibihan, J.J., Howard, A., Salichs, M., He, H. (eds.) *Social Robotics: ICSR 2016*. LNAI, vol. 9979, pp. 340–350. Springer, Cham (2016).
- 3.12 Meghdari, A., Alemi, M., Zakipour, M., Kashanian, S.A.: Design and realization of a sign language educational humanoid robot. *J. Intell. Robot. Syst.* **95**, 3–17 (2019).
- 3.13 Wairagkar, M., Lima, M.R., Bazo, D., Craig, R., Weissbart, H., Etoundi, A.C., Reichenbach, T., Iyengar, P., Vaswani, S., James, C., Barnaghi, P. Emotive response to a hybrid-face robot and translation to consumer social robots. *IEEE Internet Things* **9**(5), 3174–3188 (2021).

- 3.14 Tan, Z.H., Thomsen, N.B., Duan, X., Vlachos, E., Shepstone, S.E., Rasmussen, M.H., Højvang, J.L.: iSocioBot: A multimodal interactive social robot. *Int. J. Soc. Robot* **10**, 5–19 (2018).
- 3.15 Lehmann, H., Sureshbabu, A.V., Parmiggiani, A., Metta, G.: Head and face design for a new humanoid service robot. In: Agah, A., Cabibihan, J.J., Howard, A., Salichs, M., He, H. (eds.) *Social Robotics: ICSR 2016*. LNAI, vol. 9979, pp. 382–391. Springer, Cham (2016).
- 3.16 Lee, D.W., Elsharkawy, A., Jun, K., Lee, Y.D., Kim, S., Kim, M.S.: 24/7 elderly guard robot: Emergency detecting, reacting, and reporting. In: *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2021)*, pp. 2122–2126. IEEE Xplore, New York (2021).
- 3.17 Pierce, B., Kuratate, T., Vogl, C., Cheng, G.: “Mask-Bot 2i”: An active customisable robotic head with interchangeable face. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, pp. 520–525. IEEE Xplore, New York (2013).
- 3.18 Delaunay, F., Belpaeme, T.: Refined human-robot interaction through retro-projected robotic heads. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2012)*, pp. 106–107. IEEE Xplore, New York (2012).
- 3.19 Mollahosseini, A., Graitzer, G., Borts, E., Conyers, S., Voyles, R.M., Cole, R., Mahoor, M.H.: ExpressionBot: An emotive lifelike robotic face for face-to-face communication. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2014)*, pp. 1098–1103. IEEE Xplore, New York (2015).
- 3.20 Pierce, B., Cheng, G.: Herbert: Design and realization of a full-sized anthropometrically correct humanoid robot. *Front. Robot. AI* **2**, 14-1–14-22 (2015).
- 3.21 Specian, A., Mead, R., Kim, S., Matarić, M., Yim, M.: Quori: A community-informed design of a socially interactive humanoid robot. *IEEE T. Robot.* **38**(3), 1755–1772 (2021).
- 3.22 Ågren, I., Thunberg, S.: Robot persuasiveness depending on user gender. In: *Proceedings of the International Conference on Human-Agent Interaction (HAI 2022)*, pp. 247–249. ACM Press, New York (2022).
- 3.23 Alfayad, S., El Asswad, M., Abdellatif, A., Ouezdou, F.B., Blanchard, A., Beaussé, N., Gaussier, P.: HYDROiD humanoid robot head with perception and emotion capabilities: Modeling, design, and experimental results. *Front. Robot. AI* **3**, 15-1–15-16 (2016).
- 3.24 Kędzierski, J., Muszyński, R., Zoll, C., Oleksy, A., Frontkiewicz, M.: EMYS – Emotive head of a social robot. *Int. J. Soc. Robot.* **5**(2), 237–249 (2013).
- 3.25 Cid, F., Moreno, J., Bustos, P., Núñez, P.: Muecas: A multi-sensor robotic head for affective human robot interaction and imitation. *Sensors* **14**(5), 7711–7737 (2014).
- 3.26 Kahn, P.H. Jr., Kanda, T., Ishiguro, H., Freier, N.G., Severson, R.L., Gill, B.T., Ruckert, J.H., Shen, S.: “Robovie, you’ll have to go into the closet now”: Children’s social and moral relationships with a humanoid robot. *Dev. Psychol.* **48**(2), 303–314 (2012).
- 3.27 Mada Sanjaya, W.S., Anggraeni, D., Juwardi, A., Munawwaroh, M.: Design of real time facial tracking and expression recognition for human-robot interaction. *J. Phys. Conf. Ser.* **1090**, 012044-1–012044-10 (2018).
- 3.28 Goris, K., Saldien, J., Vanderborght, B., Lefeber, D.: Mechanical design of the huggable robot PROBO. *Int. J. Hum. Robot.* **8**(3), 481–511 (2011).
- 3.29 Cheng, G., Hyon, S.-H., Morimoto, J., Ude, A., Hale, J.G., Colvin, G., Scroggin, W., Jacobsen, S.C.: CB: A humanoid research platform for exploring neuroscience. *Adv. Robotics* **21**(10), 1097–1114 (2007).
- 3.30 Shafie, A.A., Alias, M.F., Rashid, N.K.: Graphical user interface for humanoid head Amir-II. In: *Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010)*, pp. 1–3. IEEE Xplore, New York (2010).
- 3.31 Jamone, L., Metta, G., Nori, F., Sandini, G.: James: A humanoid robot acting over an unstructured world. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2006)*, pp. 143–150. IEEE Xplore, New York (2007).
- 3.32 Nori, F., Jamone, L., Sandini, G., Metta, G.: Accurate control of a human-like tendon-driven neck. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2007)*, pp. 371–378. IEEE Xplore, New York (2009).
- 3.33 Kozima, H.L.: Infanoid: A babybot that explores the social environment. In: Dautenhahn, K., Bond, A., Cañamero, L., Edmonds, B. (eds.) *Socially Intelligent Agents*. MSASSO, vol. 3, pp. 157–164. Springer, Boston (2002).
- 3.34 Faber, F., Bennewitz, M., Eppner, C., Gorog, A., Gonsior, C., Joho, D., Schreiber, D., Behnke, S.: The humanoid museum tour guide Robotinho. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)*, pp. 891–896. IEEE Xplore, New York (2009).
- 3.35 Sosnowski, S., Bittermann, A., Kuhnlenz, K., Buss, M.: Design and evaluation of emotion-display EDDIE. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, pp. 3113–3118. IEEE Xplore, New York (2007).
- 3.36 Aryananda, L., Weber, J.: MERTZ: A quest for a robust and scalable active vision humanoid head robot. In: *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2004)*, pp. 513–532. IEEE Xplore, New York (2005).
- 3.37 Lee, J.K., Breazeal, C.: Human social response toward humanoid robot’s head and facial features. In: *Proceedings of the Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI-EA 2010)*, pp. 4237–4242. ACM Press, New York (2010).
- 3.38 Breazeal, C., Siegel, M., Berlin, M., Gray, J., Grupen, R., Deegan, P., Weber, J., Narendran, K., McBean, J.: Mobile, dexterous, social robots for mobile manipulation and human-robot interaction. In: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference (SIGGRAPH 2008)*, pp. 1–1. ACM Press, New York (2008).

- 3.39 Asfour, T., Welke, K., Azad, P., Ude, A., Dillmann, R.: The Karlsruhe humanoid head. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2008)*, pp. 447–453. IEEE Xplore, New York (2009).
- 3.40 Vásquez, B.P.E.A., Matía, F.: A tour-guide robot: Moving towards interaction with humans. *Eng. Appl. Artif. Intel.* **88**, 103356-1–103356-17 (2020).
- 3.41 De Ruyter, B., Saini, P., Markopoulos, P., Van Breemen, A.: Assessing the effects of building social intelligence in a robotic interface for the home. *Interact. Comput.* **17**(5), 522–541 (2005).
- 3.42 Tscherepanow, M., Hillebrand, M., Hegel, F., Wrede B., Kummert, F.: Direct imitation of human facial expressions by a user-interface robot. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2009)*, pp. 154–160. IEEE Xplore, New York (2010).
- 3.43 Lütkebohle, I., Hegel, F., Schulz, S., Hackel, M., Wrede, B., Wachsmuth, S., Sagerer, G.: The Bielefeld anthropomorphic robot head “Flobi”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, pp. 3384–3391. IEEE Xplore, New York (2010).
- 3.44 Schulz, S., zu Borgsen, S.M., Wachsmuth, S.: See and be seen—rapid and likeable high-definition camera-eye for anthropomorphic robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019)*, pp. 2524–2530. IEEE Xplore, New York (2019).
- 3.45 Huang, H.-K., Yu, H.-H., Chen, Y.-J., Lee, Y.-N.: Development of an interactive robot with emotional expressions and face detection. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2008)*, pp. 201–206. IEEE Xplore, New York (2008).
- 3.46 Pateromichelakis, N., Mazel, A., Hache, M.A., Koumpogiannis, T., Gelin, R., Maisonnier, B., Berthoz, A.: Head-eyes system and gaze analysis of the humanoid robot Romeo. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, pp. 1374–1379. IEEE Xplore, New York (2014).
- 3.47 Johansson, B., Tjøstheim, T.A., Balkenius, C.: Epi: An open humanoid platform for developmental robotics. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **17**(2), 1–11 (2020).
- 3.48 Zhang, X., Mollahosseini, A., Kargar, A.H.B., Boucher, E., Voyles, R.M., Nielsen, R., Mahoor, M.H.: eBear: An expressive bear-like robot. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2014)*, pp. 969–974. IEEE Xplore, New York (2014).
- 3.49 Parmiggiani, A., Maggiali, M., Natale, L., Nori, F., Schmitz, A., Tsagarakis, N.G., Santos-Victor, J., Becchi, F., Sandini, G., Metta, G.: The design of the iCub humanoid robot. *Int. J. Hum. Robot.* **9**(4), 1250027-1–1250027-24 (2011).
- 3.50 Reilink, R., Visser, L.C., Brouwer, D.M., Carloni, R., Stramigioli, S.: Mechatronic design of the Twente humanoid head. *Intell. Serv. Robot.* **4**(2), 107–118 (2011).
- 3.51 Lee, S., Kim, J.-Y., Kim, M.: Development and walking control of emotional humanoid robot, KIBO. *Int. J. Hum. Robot.* **10**(4), 1350024-1–1350024-35 (2013).
- 3.52 Itoh, K., Miwa, H., Zecca, M., Takano, H., Roccella, S., Carrozza, M.C., Dario, P., Takanishi, A.: Mechanical design of emotion expression humanoid robot WE-4RII. In: Zielińska, T., Zieliński, C. (eds.) *Romansy 16: Robot Design, Dynamics and Control*. CSM, vol. 487, pp. 255–262. Springer, Vienna (2006).
- 3.53 Xie, Y., Liu, J., Li, H., Han, C., Xie, S., Luo, J.: Design and validation of robotic bionic eye with multiple flexible ropes parallel mechanism inspired by oculomotor law. *Mechatronics* **80**, 1026862021-1–1026862021-12 (2021).
- 3.54 John, A., van Opstal, J., Bernardino, A.: A cable-driven robotic eye for understanding eye-movement control. In: *Proceedings of the International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA 2023)*, pp. 128–133. IEEE Xplore, New York (2023).
- 3.55 Rajendran, S.K., Wei, Q., Zhang, F.: Two degree-of-freedom robotic eye: Design, modeling, and learning-based control in foveation and smooth pursuit. *Bioinspir. Biomim.* **16**(4), 046022-1–046022-11 (2021).
- 3.56 Rajendran, S.K., Wei, Q., Yao, N., Zhang, F.: Design, implementation, and observer-based output control of a super-coiled polymer-driven two degree-of-freedom robotic eye. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **8**(9), 5958–5965 (2023).

Sadržaj

4 Predmet istraživanja	26
4.1 Robot MARKO.....	26
4.2 Robot SARA.....	28
4.3 Hipoteze.....	29
Reference	30

4 Predmet istraživanja

Unazad dve decenije, robotika u zdravstvu je sve prisutnija i njene tehnologije su generalno prihvaćene od strane lekara, medicinskih sestara i pacijenata [4.1–4.3]. Upotreba SAR ima pozitivne efekte u terapiji osoba sa poremećajem iz spektra autizma (eng. *Autism Spectrum Disorder – ASD*) [4.4–4.6], cerebralnom paralizom (eng. *Cerebral Palsy – CP*) [4.7–4.9] i demencijom [4.10–4.12]. Takođe, robot kao emocionalna i socijalna podrška osobama sa blago kognitivnim oštećenjem (eng. *Mild Cognitive Impairment – MCI*) ili osobama u poznim godinama života koje su same i/ili usamljene, predmet je brojnih istraživanja [4.13–4.16]. Pored zadatka koji treba da izvrši, od SAR se očekuje da sa ljudima komunicira na prirodan i intuitivan način, nalik ljudima, verbalno, naročito neverbalno.

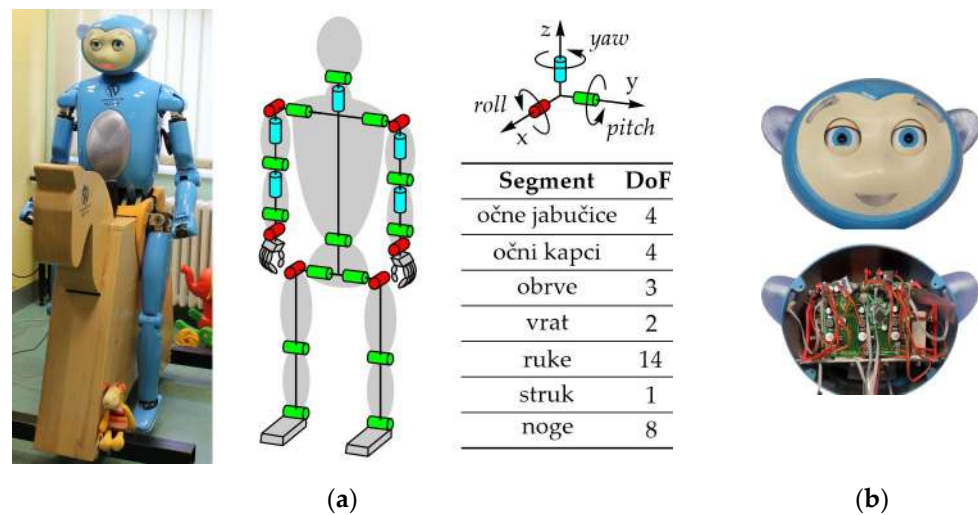
4.1 Robot MARKO

Slika 4.1 prikazuje robota MARKO¹, koji predstavlja motivacioni aparat u fizikalnoj terapiji dece sa CP [4.17]. Imajući u vidu prirodu CP i da ne postoje dva deteta sa identičnom kliničkom manifestacijom, ključno je već u prvim godinama života otkriti bolest, utvrditi dijagnozu i započeti fizikalnu terapiju [4.18–4.20]. Osnovni cilj terapije je osnaživanje muskulature (torzo, kukovi i rameni pojas radi držanja tela, mogućnosti hodanja i pomeranja ruku u svakodnevnom životnim aktivnostima poput upotrebe pribora za jelo, pranje zuba, pružanje higijene i dr.), kao i unapređenje motoričkih sposobnosti deteta, čiji uspeh direktno zavisi od toga koliko je dete sposobno i u stanju da dugotrajno vežba. Dodatni cilj terapije je unapređenje kognitivnih sposobnosti deteta vežbama fine motorike – npr., ispred deteta se nalazi sto, a na njemu jednostavni predmeti poput valjka, prizme ili kocke, u različitim veličinama i bojama, gde dete treba da prepozna odgovarajući predmet, uhvati ga prstima, premesti sa jedne strane stola na drugi i pozicionira na unapred definisano mesto. Iako je

¹ Mobilni Antropomorfni Robot Kognitivnih Osobina – MARKO, razvijen u okviru nacionalnog projekta pod nazivom „Razvoj robota kao sredstva za pomoć u prevazilaženju teškoća u razvoju dece.“

[III44008, prof. dr Branislav Borovac]

uspeh terapije direktno proporcionalan dužini trajanja terapije odnosno vremenu koje dete provede važbajući, problem je defakto u egzekuciji pokreta usled oštećenja mozga. Naime, pokreti su često naporni, bolni i zamorni – čak i oni najjednostavniji, pa dete vrlo brzo gubi interesovanje za vežbanjem. Upravo zato je razvijen robot *MARKO*, tj. da se deci ponudi partner sa kojim će im biti zanimljivije da vežbaju, i koji će biti u stanju da demonstrira odgovarajuće vežbe propisane terapijom. Robot najpre ostvaruje interakciju sa detetom, verbalno, nakon čega započinje demonstraciju odgovarajuće vežbe. Zatim dete treba da ponovi vežbu onoliko puta koliko može, a posle svake urađene vežbe, robot nagradi dete u vidu pohvale – krajnji cilj terapije je veći procenat izvršavanja motoričkih radnji deteta.

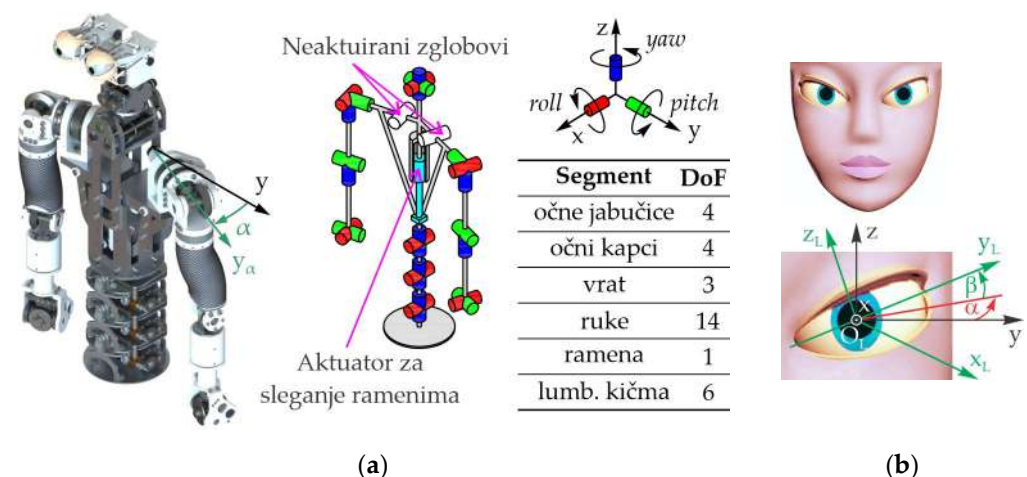


Slika 4.1 (a) Asistivni čovekoliki robot *MARKO* i njegova kinematska struktura; (b) Glava robota.

Prema studiji [4.21], urađenoj u okviru Klinike za dečju rehabilitaciju i rehabilitaciju u Novom Sadu, utvrđeno je da robot *MARKO* ima pozitivne efekte na interesovanje dece za vežbanjem, motiviše ih i ohrabruje da duže vežbaju u odnosu na konvencionalni pristup čime se povećava uspeh terapije. Zapažanju su da za svako dete treba formirati poseban scenario i da deca sa *CP*, generalno, percipiraju robote kao živa bića. Zbog toga je veoma važno da robot ispoljava emocije nalik ljudima, upotrebom lica pomerajući karakteristične delove kao što su oči i obrve, intuitivno, u skladu sa situacionim kontekstom i kinematičkim principima oka i obrva. Robot *MARKO* ima kruto lice i očne jabučice sa 4 *DoF*, očne kapke sa 4 *DoF* i obrve sa ukupno 3 *DoF*, dok su *LED* diode locirane u ušima robota, kao i za prikazivanje usta. Jabučice aktuiraju *Modelcraft* servoi, a u njima se nalaze *CCD Fire-i board* kamere. Osim toga, robot poseduje mikrofoni, zvučnik i sistem za sintezu i prepoznavanje govora. Ostali aspekti funkcionalnosti ovog robota su prikazani u [4.22–4.25].

4.2 Robot SARA

Slika 4.2 prikazuje robota *SARA*², koji predstavlja mobilnu platformu za istraživanje *HRI* u svakodnevnoj okolini čoveka sa fokusom na sposobnosti neverbalne komunikacije robota. Naime, robot je razvijen u skladu sa biološkim principima, tako da glava, ruke i trup imaju proporcije ženskog tela, dok je lice oblikovano sa izrazitim karakteristikama ženskog pola, što je prikazano na Slici 4.2b. Radi toga su očni kapci rotirani u dve ravni, prvo oko z -ose za ugao α , a potom oko x -ose za ugao β . Iako je umetnički doživljaj lica opšteprihvaćen i na osnovu njega su formirane oči, ovaj robot zbog prenaplašenog dizajna lica i očiju, kao i dodatne rotacije očnih kapaka koja u prirodi ne postoji, defakto, nije sposoban da izrazi ni polovinu od šest osnovnih emocija licem – naknadnim istraživanjem su uočeni pomenuti problemi i zbog toga ovo lice, sa aspekta ispoljavanja emocija, nije upotrebljivo i treba ga redizajnirati, što prevazilazi okvire ovog istraživanja. Radi gestikulacije i proširenja spektra neverbalnih signala, robot je sposoban da, ukoliko ne razume pitanje ili ne zna odgovor, jednostavno slegne ramenima, što je retkost među robotima [4.26]. Pored toga, razvijena je i višesegmentna lumbalna struktura sa 6 *DoF* [4.27], kao i njene napredne varijante [4.28, 4.29] radi povećanja mobilnosti gornjeg dela tela, bez pomeranja donjeg. Takođe, razvijen je i vrat sa 3 *DoF* koji je bezazoran i samokočiv, kao podrška pokretima glave i očiju. *SARA* ima očne jabučice sa 4 *DoF* i očne kapke sa 4 *DoF*, bez drugih pokretnih ili svetlećih elemenata na licu. Ostali aspekti funkcionalnosti ovog robota su prikazani u [4.30–4.34].



Slika 4.2 (a) Društveni humanoidni robot *SARA* i “njena” kinematska struktura; (b) Prikaz lica i očnih kapaka robota rotiranih u dve ravni, najpre oko z -ose za ugao α , a potom oko x -ose za ugao β .

² Socijalno-prihvatljiv humanoidni robot po imenu *SARA*, razvijen u okviru pokrajinskog projekta pod nazivom „Razvoj robotske platforme antropomorfnih karakteristika za ostvarivanje socijalno-prihvatljive i adekvantne interakcije u radnom okruženju čoveka.“ [114-451-2116/2011, prof. dr Branislav Borovac]

4.3 Hipoteze

Na osnovu prikazanih robota i opisanih problema, mehanički sistemi očnih jabučica, očnih kapaka i obrva su postali predmet istraživanja iz nekoliko razloga – odnosi se na jednog ili oba robota: (i) oči i obrve robota nisu u stanju da proizvedu vrste pokreta, opsege kretanja i brzine pokreta nalik ljudskim, što na funkcionalnom nivou treba da omogući spektar pokreta koji imaju ljudske oči i obrve radi simulacije emocionalnih stanja robota, što je ključni problem; takođe, položaj očnih kapaka – kantalni nagib, kao i položaj međusobnog dodira kapaka, nisu u skladu sa biološkim principima oka; (ii) postojeći aktuatori nisu sposobni da proizvedu brzine nalik ljudskim, dok na izlaznom vratilu postoje značajne vrednosti zazora, što ima negativne efekte na tačnost pozicioniranja i ponovljivost pokreta izlaznih članova – jabučice, kapci i obrve, naročito ako se ima u vidu da su u očima locirane kamere; ovaj problem izaziva trzaje prilikom iniciranja pokreta i promene smera kretanja, što može negativno uticati na stabilnost slike i percepciju okoline; (iii) dimenzije i oblik aktuatora su direktno uticali na strukturu mehaničkog sistema koja nije optimalna, dok su dimenzije prevelike, pa moduli oka zauzimaju veći deo glave (vidi Sliku 4.1b, dole); rezultat toga su potencijalni problemi u kretanju članova mehanizama, poput nepovoljnih uglova prenosa i niske efikasnosti (eng. *low mechanical advantage*), zbog čega se veći deo snage troši na savlađivanje trenja u vezama; (iv) pogonski mehanizmi oka su polužni ravanski i prostorni, ali su poluge neadekvatno koncipirane što je izazvalo probleme u kinematici; (v) dimenzije modula očiju su direktno uticale na strukturu i dimenzije mehanizama za rotaciju i translaciju obrva, pa su obrve pozicionirane izvan regije oka (vidi Sliku 4.1b, gore), što nije u skladu sa antropometrijom lica; defakto, obrve nisu funkcionalne zbog neadekvatnog pogonskog sistema usled nedostatka prostora u glavi; (vi) svaka jabučica ima 2 DoF , i zbog svega navedenog, postoji problem neusaglašenosti pokreta prilikom realizacije horizontalnih i vertikalnih sakada što se manifestuje efektom strabizma; dodatni problem je realizacija pokreta vergencije koji treba da omoguće fokusiranje objekata, što je uslov binokularnog veštačkog vida robota; (vii) platforme očiju i obrva su formirane upotrebom praškastih materijala sa tačnim učvršćivačima (eng. *3D binder jetting technology*) i 3D štampe topljenjem plastičnog depozita, respektivno; posledica toga su greške u izradi usled deformacija prilikom očvršćavanja i hlađenja formiranih delova, što je direktno uticalo na tačnost izrade odnosno montažu i funkcionalnost čitavog sklopa; sve to je proizvelo dodatne probleme poput zazora/zaglavljivanja u vezama i/ili trenje prilikom rada.

Na osnovu svega navedenog, postavljene su sledeće hipoteze:

- H1: *Moguće je modelirati mehanički sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) u skladu sa biološkim principima i kinematikom ljudskog oka;*
- H2: *Moguće je formirati strukturu mehaničkog sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da omogući bidirekciono kretanje bez zazora;*
- H3: *Moguće je formirati upravljački sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da ispuni kinematičke parametre ljudskog oka;*
- H4: *Moguće je dokazati da je predložena struktura mehaničkog sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) sposobna da ostvari neverbalnu komunikaciju upotrebom lica robota;*

Na osnovu svega navedenog, cilj istraživanja je razvoj potpuno novog mehaničkog, električnog i upravljačkog sistema robotskih očiju i obrva specijalne kinematske strukture, sa karakteristikama muškog i ženskog oka, koji na funkcionalnom nivou treba da omogući asortiman pokreta koji imaju ljudske oči i obrve, radi simulacije različitih emocionalnih stanja robota. Mehanički sistem treba da predstavlja naprednu hardversku platformu za razvoj i implementaciju robotske vizije i algoritama različite namene kao što je detekcija lica i objekata, prepoznavanje emocija, semantička segmentacija scene, i dr. Upotrebom sistema vizije, koji je podržan sofisticiranim mehaničkim i upravljačkim sistemom, SAR potencijalno mogu da rasterete zdravstveni sistem doprinoseći kvalitetu nege obolelih i ugroženih lica, kao i bezbednosti zdravstvenih radnika.

Reference

- 4.1. Kolpashchikov, D., Gerget, O., Meshcheryakov, R.: Robotics in healthcare. In: Lim, C.P., Chen, Y.W., Vaidya, A., Mahorkar, C., Jain, L.C. (eds.) *Handbook of Artificial Intelligence in Healthcare*. ISRL, vol. 212, pp. 281–306. Springer, Cham (2022).
- 4.2. Riek, L.D.: Healthcare robotics. *Commun. ACM* **60**(11), 68–78 (2017).
- 4.3. Kim, J., Gu, G.M., Heo, P.: Robotics for healthcare. In: Jo, H., Jun, H.W., Shin, J., Lee, S. (eds.) *Biomedical Engineering: Frontier Research and Converging Technologies*. BB, vol. 9, pp. 489–509. Springer, Cham (2016).
- 4.4. Alabdulkareem, A., Alhakbani, N., Al-Nafjan, A.: A systematic review of research on robot-assisted therapy for children with autism. *Sensors* **22**(3), 944–1–944–16 (2022).
- 4.5. Huijnen, C.A.G.J., Verreussel-Willen, H.A.M.D., Lexis, M.A.S., De Witte, L.P.: Robot KASPAR as mediator in making contact with children with autism: A pilot study. *Int. J. Soc. Robot.* **13**(2), 237–249 (2021).
- 4.6. Simut, R.E., Vanderfaeillie, J., Peca, A., Van de Perre, G., Vanderborght, B.: Children with autism spectrum disorders make a fruit salad with Probo, the social robot: An interaction study. *J. Autism Dev. Disord.* **46**(1), 113–126 (2016).
- 4.7. Blankenship, M.M., Bodine, C.: Socially Assistive Robots for children with cerebral palsy: A meta-analysis. *IEEE Trans. Med. Robot. Bionics* **3**(1), 21–30 (2021).
- 4.8. Buitrago, J.A., Bolaños, A.M., Caicedo Bravo, E.: A motor learning therapeutic intervention for a child with cerebral palsy through a social assistive robot. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.* **15**(3), 357–362 (2020).
- 4.9. Malik, N.A., Hanapiah, F.A., Rahman, R.A.A., Yussof, H.: Emergence of socially assistive robotics in rehabilitation for children with cerebral palsy: A Review. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **13**(3), 135–1–135–7 (2016).
- 4.10. Hung, L., Gregorio, M., Mann, J., Wallsworth, C., Horne, N., Berndt, A., Liu, C., Woldum, E., Au-Yeung, A., Chaudhury, H.: Exploring the perceptions of people with dementia about the social robot PARO in a hospital setting. *Dementia* **20**(2), 485–504 (2021).
- 4.11. Lu, L.C., Lan, S.H., Hsieh, Y.P., Lin, L.Y., Lan, S.J., Chen, J.C.: Effectiveness of companion robot care for dementia: A Systematic review and meta-analysis. *Innov. Aging* **5**(2), gab013-1– gab013-13 (2021).

- 4.12. Mannion, A., Summerville, S., Barrett, E., Burke, M., Santorelli, A., Kruschke, C., Felzmann, H., Kovacic, T., Murphy, K., Casey, D., Whelan, S.: Introducing the social robot MARIO to people living with dementia in long term residential care: Reflections. *Int. J. Soc. Robot.* **12**(2), 535–547 (2020).
- 4.13. Louie, W.Y., McColl, D., Nejat, G.: Acceptance and attitudes toward a human-like socially assistive robot by older adults. *Assist. Technol.* **26**(3), 140–150 (2014).
- 4.14. Abdi, J., Al-Hindawi, A., Ng, T., Vizcaychipi, M.P.: Scoping review on the use of socially assistive robot technology in elderly care. *BMJ Open* **8**(2), e018815-1–e018815-20 (2018).
- 4.15. Martinez-Martin, E., Del Pobil, A.P.: Personal robot assistants for elderly care: An overview. In: Costa, A., Julian, V., Novais, P. (eds.) *Personal Assistants: Emerging Computational Technologies*. ISRL, vol. 132, pp. 77–91. Springer, Cham (2018).
- 4.16. Kim, Y.-I., Lee, H.-W., Kim, T.-H., Kim, J.-H., Ok, K.-I.: The effect of care-robots on improving anxiety/depression and drug compliance among the elderly in the community. *J. Korean Soc. Biol. Ther. Psychiatry* **26**(3), 218–226 (2020).
- 4.17. Borovac, B., Raković, M., Gnjatović, M., Nikolić, M., Delić, V., Penčić, M., Savić, S., Tasevski, J., Mišković, D., Mikov, A., Krasnik, R.: Development and testing of humanoid robot MARKO – An assistant in therapy for children. In: *Proceedings of the International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2018)*, pp. 12–15. Association of Serbia for Systems, Automatic Control and Measurements, Belgrade (2018).
- 4.18. Anttila, H., Autti-Rämö, I., Suoranta, J., Mäkelä, M., Malmivaara, A.: Effectiveness of physical therapy interventions for children with cerebral palsy: A systematic review. *BMC Pediatr.* **8**(1), 14-1–10 (2008).
- 4.19. Imms, C.: Children with cerebral palsy participate: A review of the literature. *Disabil. Rehabil.* **30**(24), 1867–1884 (2008).
- 4.20. Ketelaar, M., Vermeer, A., Hart, H., Van Petegem-van Beek, E., Helders, P.J.: Effects of a functional therapy program on motor abilities of children with cerebral palsy. *Phys. Ther.* **81**(9), 1534–1545 (2001).
- 4.21. Tasevski, J., Gnjatović, M., Borovac, B.: Assessing the children's receptivity to the robot MARKO. *Acta Polytech. Hung.* **15**(5), 47–66 (2018).
- 4.22. Penčić, M., Savić, S., Čavić, M., Borovac, B., Lu, Z.: Development of the lower body of assistive humanoid robot MARKO. In: *Proceedings of the International Scientific and Expert Conference (TEAM 2016)*, pp. 23–28. Faculty of Materials Science and Technology, Trnava (2016).
- 4.23. Penčić, M., Čavić, M., Borovac, B.: Development of the low backlash planetary gearbox for humanoid robots. *FME Trans.* **45**(1), 122–129 (2017).
- 4.24. Penčić, M., Čavić, M., Rackov, M., B. Borovac: Assistive humanoid robot MARKO: Development of the waist mechanism. In: *Proceedings of the International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering (DEMI 2017)*, pp. 495–500. Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka (2017).
- 4.25. Penčić, M., Čavić, M., Savić, S., Rackov, M., Borovac, B., Lu, Z.: Assistive humanoid robot MARKO: Development of the neck mechanism. *MATEC Web Conf.* **121**(1), 08005-1–08005-8 (2017).
- 4.26. Penčić, M., Čavić, M., Borovac, B., Lu, Z.: Social humanoid robot SARA: Development and realization of the shrug mechanism. In: Gasparetto, A., Ceccarelli M. (eds.) *Mechanism Design for Robotics: MEDER 2018*. MMS, vol. 66, pp. 369–377. Springer, Cham (2019).
- 4.27. Penčić, M.M., Borovac, B.A., Kovačević, D.I., Čavić, M.V.: Development of the multi-segment lumbar spine for humanoid robots. *Therm. Sci.* **20**(suppl. 2), S581–S590 (2016).
- 4.28. Penčić, M., Čavić, M., Brkić, B., Rackov, M.: A novel 3 DOFs waist mechanism for humanoid robots: Kinematic analysis and motion simulation. In: Uhl, T. (eds.) *Advances in Mechanism and Machine Science: IFToMM WC 2019*. MMS, vol. 73, pp. 2809–2818. Springer, Cham (2019).
- 4.29. Penčić, M., Brkić, B., Čavić, M., Rackov, M.: Dynamic analysis and motion simulation of the 3 DOFs waist mechanism for humanoid robots. In: Kuo, C.-H., Lin, P.-C., Essomba, T., Chen, G.-C. (eds.) *Robotics and Mechatronics: ISRM 2019*. MMS, vol. 78, pp. 63–75. Springer, Cham (2020).
- 4.30. Penčić, M., Čavić, M., Rackov, M., Borovac, B., Lu, Z.: Drive system of the robot eyeballs and eyelids with 8 DOFs. In: Doroftei, I., Oprisan, C., Pislă, D., Lovasz, E.-C. (eds.) *New Advances in Mechanism and Machine Science: SYROM 2017*. MMS, vol. 57, pp. 47–56. Springer, Cham (2018).
- 4.31. Penčić, M., Čavić, M., Borovac, B., Lu, Z., Rackov, M.: Robotic eyes with 7 DOFs: Structural design and motion simulation. In: Arakelian, V., Wenger, P. (eds.) *ROMANSY 22: Robot Design, Dynamics and Control*. CISM, vol. 584, pp. 52–60. Springer, Cham (2019).
- 4.32. Penčić, M., Rackov, M., Čavić, M., Kiss, I., Cioată, V.G.: Social humanoid robot SARA: Development of the wrist mechanism. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **294**(1), 012079-1–012079-10 (2018).
- 4.33. Penčić, M., Čavić, M., Borovac, B., Rackov, M.: Social humanoid robot SARA: Dynamic analysis of the arm. In: *Proceedings of the International Scientific Conference on Industrial Systems (IS 2017)*, pp. 130–135. Faculty of Technical Sciences, Novi Sad (2017).
- 4.34. Penčić, M., Čavić, M., Savić, S., Gnjatović, M., Borovac, B., Lu, Z.: Social humanoid robot SARA: Development and dilemmas. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2017)*, ROI2.5-1–ROI2.5-6. ETRAN Society and Academic Mind, Belgrade (2017).

Sadržaj

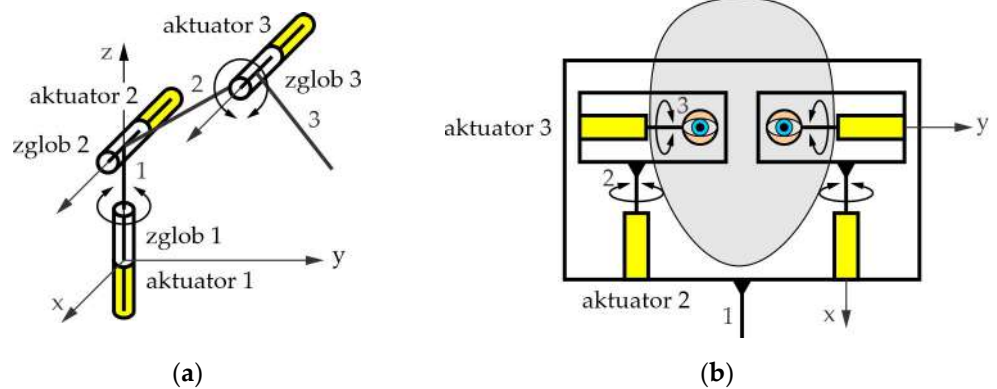
5 Mehanički sistem.....	32
5.1 Pregled transmisija	32
5.1.1 Transmisije sa elastičnim elementom	34
5.1.2 Transmisije sa zupčanicima	41
5.1.3 Transmisije sa frikcionim elementima.....	41
5.1.4 Transmisije sa transmisionim vratilom	42
5.1.5 Transmisije sa mehanizmom	43
5.1.6 Prednosti i nedostaci.....	45
5.2 Stuktura mehaničkog sistema	46
5.2.1 Mehanički sistem očnih jabučica	46
5.2.2 Mehanički sistem očnih kapaka	50
5.2.3 Mehanički sistem obrva.....	55
5.3 Dimenziona sinteza mehaničkog sistema.....	57
5.3.1 Mehanizmi očnih jabučica.....	57
5.3.2 Mehanizmi očnih kapaka	60
5.3.3 Mehanizmi obrva	66
5.4 Rezultati	70
Reference	72

5 Mehanički sistem

Mehanički sistem za prenos snage i kretanja sa aktuatora na izlazne članove – očne jabučice, očni kapci i obrve, treba da ispuni visoke zahteve u pogledu: (i) kinematike – bidirekciono kretanje bez trzaja tokom promene pravca i smera naglim usporavanjem, zaustavljanjem i ubrzavanjem, (ii) strukture – visoka pouzdanost, visok stepen iskorišćenja, i najvažnije, bezazornost (eng. *low backlash*) kojom se obezbeđuje visoka tačnost pozicioniranja i visoka tačnost i ponovljivost pokreta, što je od suštinskog značaja, (iii) veličine i mase – što manje dimenzije i mase koje imaju reperkusuje na raspoloživ prostor u glavi robota (smestaj mehaničkog i električnog sistema), i inercijalne sile, respektivno.

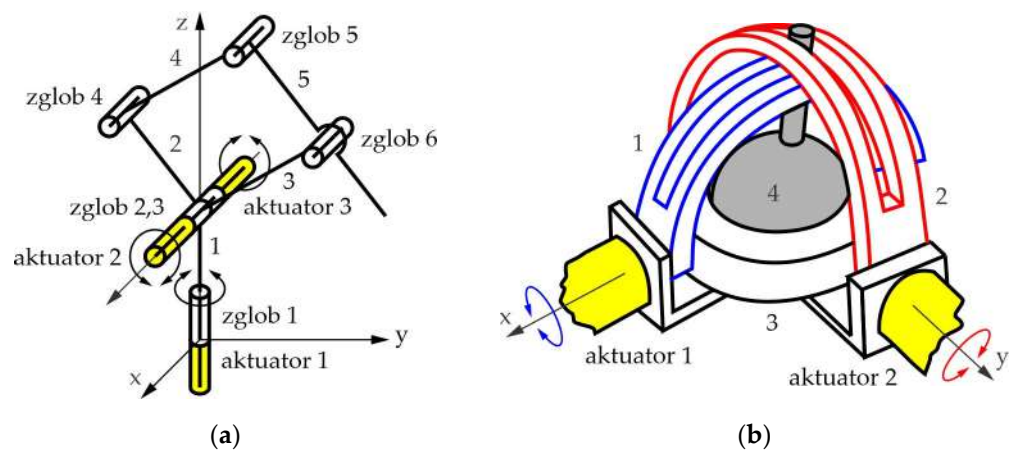
5.1 Pregled transmisija

Segmenti robota se aktuiraju na dva načina: (i) direktnim pogonom zgloba, što je prikazano na Slici 5.1a, i (ii) upotrebom neke vrste transmisije, što se nadalje razmatra. Kada je reč o direktnom pogonu zgloba, aktuator je postavljen na prethodni član mehanizma i direktno povezan na sledeći član. Takav pogon je najjednostavniji za realizaciju – trenje između aktuatora i zgloba je najmanje, dok je krutost najveća. Međutim, postoje dva osnovna problema: (i) aktuator je pozicioniran u pravcu ose koju pogoni što može imati negativne efekte na raspoloživ prostor za ugradnju aktuatora, naročito ako se ima u vidu da segmenti humanoida, u pogledu dimenzija, treba da budu nalik ljudskim – vidi Sliku 5.1b; jedan od



Slika 5.1 (a) Struktura serijskog manipulatora; (b) Aktuatori za pogon očiju izvan glave robota.

načina za prevazilaženje ovog problema je upotreba pljosnatih aktuatora (eng. *flat motor*), čija je ukupna dužina manja ili bliska prečniku/širini aktuatora – treba napomenuti da pljosnati aktuatori visokih performansi obično prevazilaze dimenzije samog zgloba humanoidea, i (ii) problem pokretanja sistema sa više *DoF*; naime, ukoliko mehanizam ima strukturu otvorenog kinematskog lanca – Slika 5.1a, tada svaki sledeći aktuator predstavlja gravitaciono i inercijalno opterećanje za prethodne aktuatore (npr., aktuator 3 za aktuator 2, aktuatori 3 i 2 za aktuator 1), i ovaj problem se prevazilazi upotrebom složenih ravanskih ili prostornih mehanizama koji omogućavaju odgovarajuća kretanja članova mehanizama, pri čemu aktuatori ostaju na nepokretnom članu. Slika 5.2a prikazuje tipičan primer i upotrebu složenih ravanskih mehanizama kod manipulatora ASEA [5.1,5.2] (aktuator 3 je postavljen upravno na rotaciono postolje 1, gde preko članova 2 i 4 pokreće član 5; aktuatori 2 i 3 su saosni), dok Slika 5.2b prikazuju upotrebu prostornih mehanizama kod očne jabučice [5.3] (aktuatori 1 i 2 su pričvršćeni za nepokretan član 3, dok sa suprotne strane direktno aktuiraju članove 1 i 2, rotirajući jabučicu 4 oko *x* i *y*-ose).



Slika 5.2 (a) Struktura ASEA manipulatora; (b) Struktura očne jabučice prostorne konfiguracije.

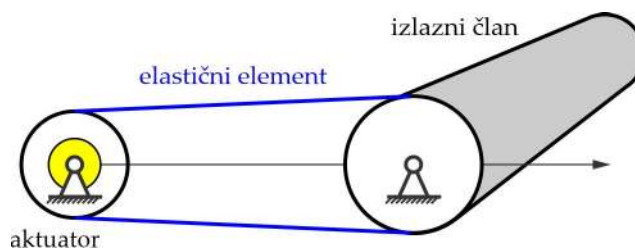
Potreba za osnaživanjem zglobova robota, umanjeње veličine i mase segmenata ili ograničenje u pogledu prostora za ugradnju mehaničkih i električnih sistema, sve to implicira na izmeštanje aktuatora izvan zgloba prema postolju, zbog čega je neophodna neka vrsta transmisije – u robotici, transmisija ima dve osnovne funkcije: (i) prenos snage i kretanja sa aktuatora – ulazni član, do radnog ili izvršnog dela mehanizma kao što je npr. hvataljka – izlazni član, i (ii) promena brzine i obrtnog momenta sa ulaznog na izlazne članove mehanizama. Nadalje, u skladu sa postavljenim zahtevima, razmatraju se najznačajniji tipovi transmisija – radi jednostavnosti se analiziraju mehanički sistemi sa 1 *DoF* gde ulazni i izlazni članovi vrše rotaciono kretanje.

5.1.1 Transmisije sa elastičnim elementom

Transmisije sa elastičnim elementom imaju niz prednosti, poput male mase, niskog trenja, fleksibilne strukture i mogu biti bezazorne; sa druge strane, ne zahtevaju podmazivanje i zaptivanje, i mogu da premoste velike udaljenosti ulazno/izlaznih članova, što je veoma važno. Kao osnovno opterećanje postoje normalni naponi usled istezanja, a zbog čvrstoće materijala, transmisije sa elastičnim elementom mogu da prenose velika opterećenja. Treba napomenuti da upotreba elastičnog elementa proizvodi niz nelinearnih fenomena što može imati negativne efekte na upravljanje. U nastavku se razmatraju najvažnija rešenja.

Zatvoreni elastični element

Slika 5.3 prikazuje prenos sistemom sa zatvorenim elastičnim elementom koji se sastoji od dve remenice sa fiksnim osama obrtanja i remenom u formi kaiša, tendona ili kabla [5.4]. Aktuator je fiksiran za pogonsku remenicu – ulazni član, dok je za gonjenu remenicu fiksiran segment robota – izlazni član. Prenos snage i kretanja sa ulaznog na izlazni član sistema omogućava remen fenomenom trenja. Transformacija brzine i obrtnog momenta je moguća upotrebom remenica različitog prečnika. Pored toga, postoje različite izvedbe u pogledu oblika i poprečnih preseka remena.



Slika 5.3 Prenos sistemom sa zatvorenim elastičnim elementom.

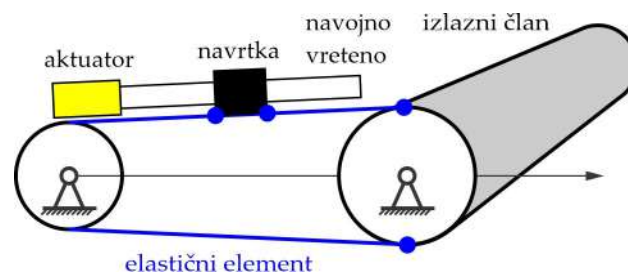
Radi ispravnog funkcionisanja sistema, između remenica i remena je neophodno adekvatno trenje, što se postiže zatezanjem remena na jedan od dva načina: (i) promenom osnog rastojanja što konstrukciju može učiti komplikovanom, i (ii) postavljanjem remenice zatezača što, takođe, čitav sistem može učiniti složenim, dimenziono većim, a time i težim. Treba napomenuti da vratila minijaturnih aktuatora za humanoide trpe relativno male vrednosti radijalnih sila, zbog čega posebnu pažnju treba povesti oko sile zatezanja remena, jer od toga direktno zavisi vek trajanja prvog ležaja na aktuatoru – važi za direktan pogon! Osim toga, sa remenicama zatezačima postoji problem rada u oba smera – naime, kod kretanja u jednom smeru, zatezač se postavlja na slobodni ogranak remena, a kod kretanja u oba smera, ogranak je naizmenično vučni i slobodni. Takođe, upotreba zatezača može dovesti i do neželjenih singulariteta u položaju remena [5.5]. Sa druge strane, prenosnik je izuzetno jednostavan ukoliko se radi o sistemu sa 1 *DoF*, malom međuosnom rastojanju i paralelnim osama obrtanja – u slučaju većih međuosnih rastojanja ulaza/izlaza i neparalelnih osa obrtanja, neophodne su dodatne, tzv. prevojne remenice što značajno povećava trenje i zahteva veći prostor za ugradnju. Za slučaj serijskih sistema sa više *DoF*, ovakav sistem za aktuatore izvan zglobova nije pogodan, pa se zglobovi moraju premostiti upotrebom velikog broja prevojnih remenica što povećava trenje i ograničava opseg rotacije izlazne remenice [5.6]. Osim klasičnog remena – kaiša, može se upotrebiti i zupčasti kaiš, i tada nema proklizavanja, ali je problem sa zazorima veći [5.7]. Slično zupčastom kaišu funkcionišu i lančani prenosnici koji mogu da prenose velike snage, ali zbog svojih dimenzija, mase i buke, u humanoidnoj robotici se retko koriste [5.8].

Otvoreni elastični element

Kod pogona sa otvorenim elastičnim elementom, svaki elastični element – kabl ili tendon, jednim krajem je pričvršćen za aktuator, a suprotnim za segment robota. Međutim, kablovi/tendoni na ovakav način prenose silu samo u jednom smeru – shodno tome, radi realizacije kontrolisanog kretanja segmenta u oba smera, neophodno je upotrebiti više kablova/tendona nego što je broj *DoF*. Snaga i kretanje se obezbeđuju tako što aktuator vuče kabl pričvršćen za izlazni član – segment robota, i na taj način ga pokreće. Treba istaći da najveći problem kod ovih transmisija predstavlja potreba za sprečavanjem opuštenosti kabla, jer za ispravno funkcionisanje sistema, kablovi moraju biti zategnuti sve vreme. Iako se stanje opuštenosti jednog kabla, u opštem slučaju, može tolerisati zbog toga što u datom

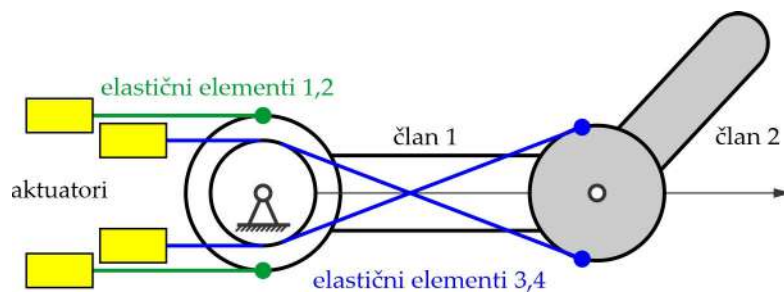
trenutku pogon vrši drugi kabl, prelazak iz stanja opuštenosti u zategnuto stanje (koje nastaje kada pokretanje treba da vrši ponovo prvi kabl) utiče na krutost sistema izazivajući vibracije [5.9]. Dakle, elastičnost, fleksibilnost, trenje i histerezis predstavljaju probleme koji zahtevaju upotrebu naprednih nelinearnih strategija upravljanja. Osnovni uslov kod ovih sistema je da sile u kablovima moraju biti pozitivne – kabl je opterećen na zatezanje. Zbog toga detektovanje i informacije o silama u kablovima postaju neophodni prilikom projektovanja strategije upravljanja, kao i čitavog upravljačkog sistema [5.10].

Slika 5.4 prikazuje prenos sistemom sa dve remenice, linearnim aktuatorom i kablom, pri čemu je kabl sa oba kraja pričvršćen za jednu remenicu – segment robota, dok je oko druge prebačen. Element aktuatora koji se linearno kreće (npr. navrtka po navojnom vretenu aktuatora koji transformiše obrtno u linearno kretanje – eng. *spindle drive*), fiksiran je za kabl i povlači ga napred-nazad, rotirajući remenice u oba smera. Ova konfiguracija je naizgled kompaktna, međutim postavljanje linearnog aktuatora u sistem remenica zahteva dodatni prostor. Treba napomenuti da hod linearnog aktuatora direktno utiče na opseg kretanja remenica odnosno segmenta robota. Takođe, neophodan je poseban sistem za zatezanje kabla – mobilna remenica, jer klasičan zatezač zbog nedostatka prostora nije moguće upotrebiti. Prednost mehanizma sa navojnim vretenom su niska trenja i bezazornost, kao i mogućnost prenošenja vrlo velikih opterećenja [5.11].



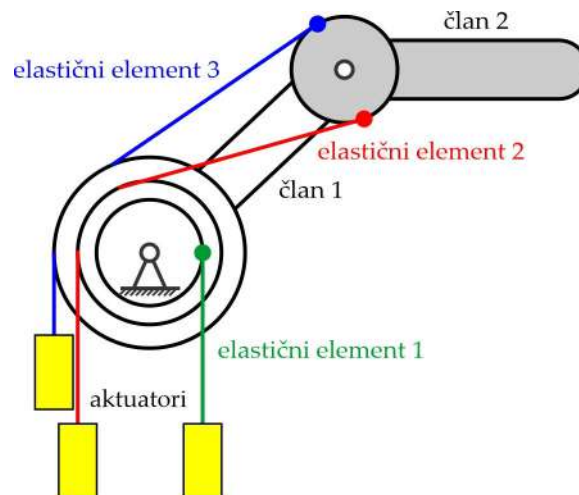
Slika 5.4 Prenos sistemom sa linearnim aktuatorom i kablom.

Slika 5.5 prikazuje prenos sistemom kablova i remenica/koturača – prednost ovog sistema je kod robota sa više DoF . Naime, dva aktuatora putem kablova 1 i 2 pokreću član 1, dok druga dva aktuatora preko kablova 3 i 4 pokreću član 2. Najjednostavniji način je da se za n DoF upotrebi $2n$ kablova, što obezbeđuje nezavisnu kontrolu kretanja u zglobovima, manje sile u kablovima, ali se povećava kompleksnost mehanizma. Radi funkcionalnosti sistema, veoma je važno povesti računa oko adekvatnog postavljanja kablova 3 i 4.



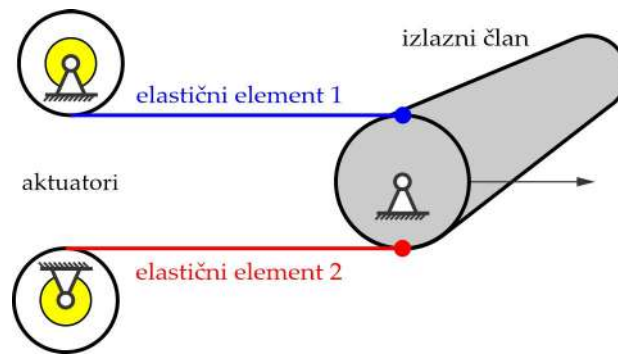
Slika 5.5 Prenos sistemom kablova i remenica/koturača.

Kada mehanizam ima više DoF , a ose zglobova nisu paralelne, tada postoji problem odgovarajućeg sprovođenja (eng. *routing*) kablova, što se postiže usložnjavanjem rešenja ili aproksimacijama čime se gubi tačnost realizacije kretanja [5.12,5.13]. Sa druge strane, ukoliko je potrebno smanjiti broj aktuatora, tada je za n DoF moguće primeniti $n+1$ kabl kako bi kretanje svih članova u sistemu bilo potpuno određeno – kontrolisano, što je prikazano na Slici 5.6. Za ispravno funkcionisanje sistema, veoma je važan način na koji se kablovi sprovode preko koturača, što utiče na veličinu sile u kablju i ukupno trenje [5.14].



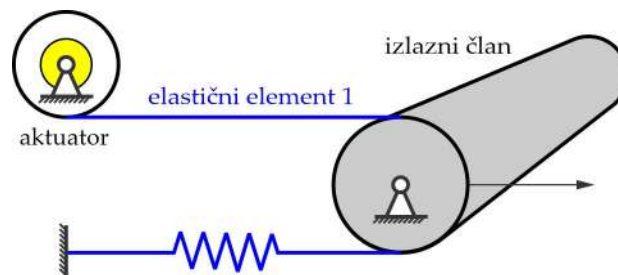
Slika 5.6 Prenos sistemom kablova i remenica/koturača sa redukovanim DoF .

Prema tome, za pogon jednog DoF kretanja, neophodan je prenos sistemom sa dva kabla i dva aktuatora, što je prikazano na Slici 5.7. Prvi krajevi oba kabla su pričvršćeni za rotacione aktuatore, dok su suprotni krajevi fiksirani za izlazni član – segment robota. Sile u kablovima kontrolišu aktuatori, dok se krutost zglobova – zategnutost kablova, kontrolišu antagonističkim upravljanjem oba aktuatora; za pogon sistema sa 1 DoF su neophodna dva aktuatora što implicira na veću složenost sistema, komplikovano upravljanje i dr.



Slika 5.7 Prenos sistemom sa dva aktuatora i dva kabla.

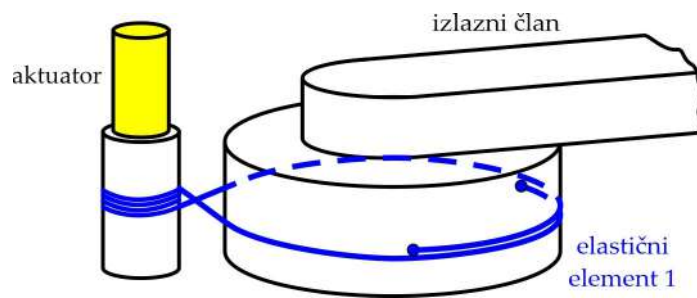
Slika 5.8 prikazuje prenos sistemom sa jednim aktuatorom, kablom i oprugom. Naime, opruga se suprotstavlja aktuatoru putem kabla i na taj način vrši kretanje u jednom smeru, dok aktuator u suprotnom. Zahvaljujući opruzi, kabl je uvek zategnut i dopunski elementi nisu neophodni. Treba napomenuti da efikasnost aktuatora nije ista u oba smera – ukoliko aktuator rotira u pozitivnom matematičkom smeru (vidi Sliku 5.8), tada izlazni član prima manji obrtni moment, jer se deo snage aktuatora troši na savlađivanje sile kojom se opruga suprotstavlja – asimetrična transmisija (eng. *asymmetric cable transmission*). Dodatni problem su vibracije u opruzi izazvane naglim promenama smera aktuatora [5.15].



Slika 5.8 Prenos sistemom sa aktuatorom, kablom i oprugom.

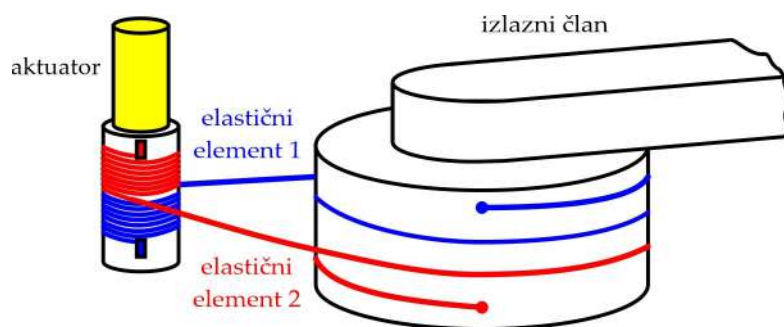
Transmisije kapstanom

Transmisija kapstanom (eng. *capstan transmission*) se sastoji od ulaznog/izlaznog bubnja međusobno povezanih kablom ili kablovima – pritom, moguće su različite varijante. Slika 5.9 prikazuje varijantu prenosa kapstanom “jedan-ulaz/jedan-izlaz” sa jednim kablom, namotanim oko manjeg bubnja aktuatora, dok su krajevi kabla unakrsno pričvršćeni za veliki bubanj. Aktuator pogoni mali bubanj na kome se namotava jedan krak kabla, dok se suprotni krak odmotava i nadoknađuje potrebnu promenu dužine – zahvaljujući trenju ne dolazi do proklizavanja kabla po bubnju. Radi boljeg funkcionisanja, neophodno je formirati žlebove na bubnjevima. Postavljanje malog bubnja blizu velikom omogućava skoro potpunu eliminaciju radialnih sila na vratilu [5.16].



Slika 5.9 Prenos kapstanom “jedan-ulaz/jedan-izlaz” sa jednim kablom.

Slika 5.10 prikazuje varijantu prenosa kapstanom “jedan-ulaz/jedan-izlaz” sa dva kabla – aktuator takođe pokreće manji bubanj. Kablovi su jednim krajem pričvršćeni za mali bubanj, a suprotnim za veliki bubanj na kome je fiksiran segment robota. U zavisnosti od smera obrtanja aktuatora, odgovarajući kabl se namotava, povlači i rotira veliki bubanj, dok se drugi kabl odmotava i nadoknađuje promenu dužine [5.17,5.18].



Slika 5.10 Prenos kapstanom “jedan-ulaz/jedan-izlaz” sa dva kabla.

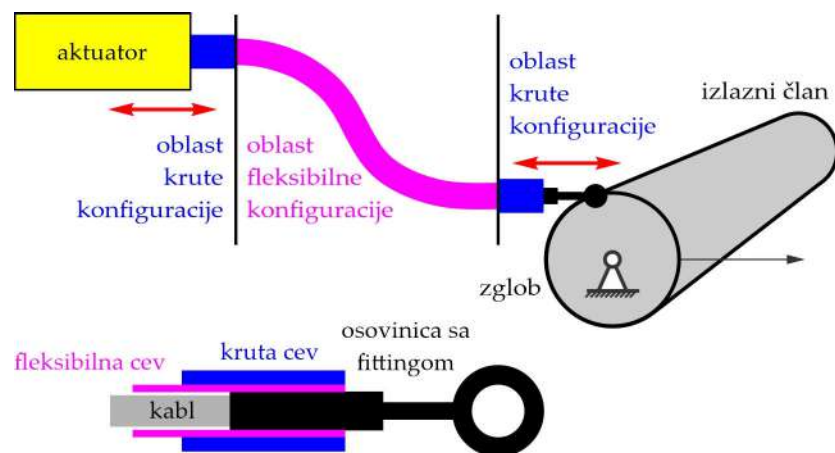
Prenosni odnos se može menjati kod obe varijante upotrebom bubnjeva različitih prečnika. Pritom, kablovi moraju biti zategnuti sve vreme zbog čega na velikom bubnju, na mestu fiksiranja kabla za bubanj (eng. *anchor point*), postoje sklopovi zatezača. Za velike vrednosti momenta na izlaznom članu, koriste se kapstan transmisije sa “više-ulaza/jedan-izlaz” [5.19], dok za posebne zahteve, kao što su veliko međuosno rastojanje, neparalelne ose ulaza/izlaza, velike sile na izlazu i dr., koriste se složenije konfiguracije mehanizma upotrebom međuvratila, prevojnih remenica, sistema koturača [5.20].

Prednosti ovog tipa prenosa su niska trenja i odsustvo zazora ukoliko je mehanizam konfigurisan u najjednostavnijoj varijanti, tj. sa 1 *DoF*, gde je mala udaljenost između ulaznog/izlaznog vratila. U slučaju sistema sa više *DoF*, kao i prenosa snage i kretanja na veće udaljenosti, problemi su sledeći: (i) neophodnost za permanentnim zatezanjem kablova što se obezbeđuje upotrebom zatezača ili postavljanjem dodatnih prevojnih remenica, (ii) ograničena veličina momenta koji se može preneti, što se rešava dodavanjem reduktora u

postojeću transmisiju, (iii) sa povećanjem broja prevojnih remenica raste i trenje, i (iv) kod prostornog rasporeda remenica dolazi do problema sa opuštanjem kabla. Osim toga, motor se postavlja na vratilo malog bubnja (ukoliko nije neophodna dodatna redukcija) što može dovesti do velikih dimenzija. Sa druge strane, efikasna i precizna kontrola sile i pozicije hvataljke na izlaznom članu je komplikovana zbog nelinearnih problema kao što su trenje, klizanje, savojna krutost kabla itd. Jedno od rešenja je postavljanje senzora na hvataljku, ali to nije uvek moguće, najčešće zbog ograničenja u prostoru. Zbog svega toga, pažnja se posvećuje razvijanju matematičkih modela koji opisuju pomenute fenomene, kao i razvoju odgovarajućih strategija upravljanja [5.21].

Push–Pull kablovi

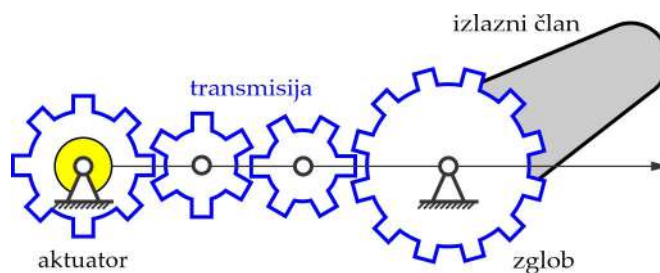
Slika 5.11 prikazuje prenos sa “guraj-vuci” (eng. *Push-Pull – PP*) kablom koji se sastoji od cevi kroz koju prolazi metalni kabl – čelično uže. Naime, i kabl i cev su fleksibilni, ali su na krajevima spojeni za krutu osovinicu odnosno krutu cev. Osovinice se vezuju za pogonski i gonjeni član. *PP* kablovi su fleksibilni, imaju malu masu i dimenzije (a time i inerciju), omogućavaju prenos velikih sila (mada je sila pri guranju manja od sile pri vučenju) i dostupni su kao standardni delovi zbog čega imaju nisku cenu. Upotreba *PP* kablova omogućava pozicioniranje aktuatora izvan zgloba na neku povoljniju poziciju, npr. postoje roboti. Da bi se smanjilo trenje između kabla i cevi, često se u fleksibilnu cev ubacuje i zatvara lubrikant. Međutim, pravi nivo trenja je vrlo teško odrediti zbog uticaja različitih faktora, kao što su: prostorni oblik kabla, prethodno zatezanje, relativna brzina kretanja kabla kroz cev i sl. Matematički modeli koji opisuju dinamiku ovih transmisija nisu razvijeni što upravljanje čini veoma problematičnim [5.22–5.24].



Slika 5.11 Prenos *PP* kablom.

5.1.2 Transmisije sa zupčanicima

Slika 5.12 prikazuje prenos sistemom zupčanika. Transmisije sa zupčanicima omogućavaju visoku tačnost u pogledu kinematike, pouzdane su i mogu imati visoku efikasnost. Međutim, zupčasti prenosnici zahtevaju posebne uslove rada i nisu pogodni za prenos na velike udaljenosti, dok apsorpcija udara i otpornost na udar nisu tako dobri kao kod fleksibilnih transmisija. Cilindrični zupčanici se najčešće koriste, najjednostavniji su za izradu i montažu, i imaju zadovoljavajuće prenosne odnose. Za slučaj većih prenosnih odnosa ili za prenos na veće udaljenosti (eng. *long-distance transmissions*), upotrebljavaju se višestepeni zupčasti prenosnici, ali se tada povećava trenje i zazori u sistemu. Glavni nedostatak konvencionalnih zupčastih prenosnika su zazori prilikom sprezanja zubaca zupčanika – međutim, zazori su neophodni za pravilno funkcionisanje zupčastog para. Ako je zazor premali, može doći do zaglavljivanja zupčanika (eng. *jam*), a ukoliko je primetan, može doći do poremećaja u prenosu i problema u pozicioniranju izlaznog člana. Prilikom sprezanja se javljaju i udari koji proizvode vibracije i buku, a kao posledica udara moguća su oštećenja bokova zubaca (eng. *pitting*), čime se skraćuje radni vek zupčanika. Zazori prilikom sprezanja predstavlja poseban problem kada postoji potreba za pogonom u oba smeru. Alternativa su bezazorni zupčasti prenosnici (eng. *low backlash gear transmission*) [5.25]. Konstrukcija takvih prenosnika je složena, a izrada skupa. Takođe, značajan problem zupčastih prenosnika je masa ukoliko se proizvode od metala. Međutim, kada radna opterećenja nisu velika, kao što je ovde slučaj, problem se prevazilazi zupčanicima od polimera [5.26–5.28]. U humanoidnoj robotici se zupčaste transmisije često koriste, uglavnom za prenos snage i kretanja preko manjih udaljenosti, u realizacijama šaka, prstiju, očiju [5.29,5.30].

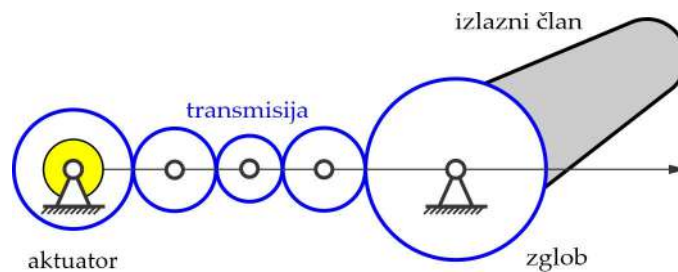


Slika 5.12 Prenos sistemom zupčanika.

5.1.3 Transmisije sa frikcionim elementima

Slika 5.13 prikazuje prenos sistemom frikcionih elemenata gde se prenos snage i kretanja realizuje neposrednim kontaktom i trenjem dodirnih površina pogonskog i gonjenog ele-

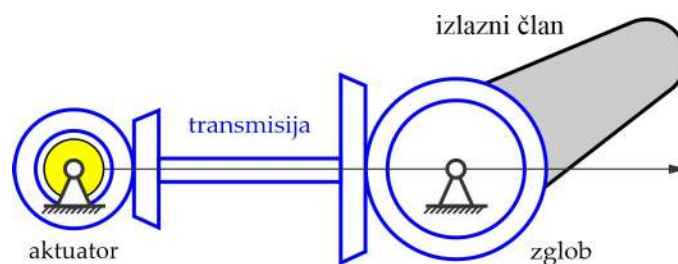
menta – zbog uslova rada, glavni problemi su proklizavanje i puzanje. Dobre osobine frikcionih prenosnika su: jednostavna izrada elemenata – cilindri i konusi, laka montaža i demontaža, tih i bešuman rad – nema zujanja karakterističnog za zupčanike, svi udari i preopterećenja se amortizuju proklizavanjem frikcionih točkova, mogućnost kontinualne promene prenosnog odnosa, i dr. Bez obzira na to, frikcionni prenosnici se u robotici vrlo retko upotrebljavaju zbog niza efekata koje za vreme rada proizvode: velika opterećenja vratila i ležaja, puzanje na dodirnim površinama, neravnomerno trošenje i habanje dodirnih površina kao posledica klizanja, povećane temperature, teško je ostvariti tačan prenosni odnos i neophodnost uređaja za generisanje sile pritiska na dodirnim površinama [5.31,5.32].



Slika 5.13 Prenos sistemom frikcionih elemenata.

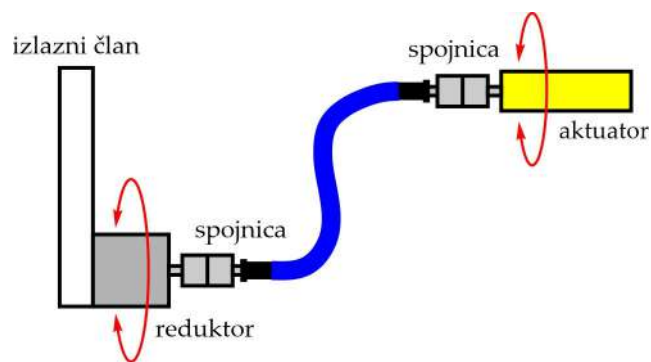
5.1.4 Transmisije sa transmisionim vratilom

Slika 5.14 prikazuje prenos sistemom sa krutim transmisionim vratilom, što je čest slučaj u industriji mobilnih mašina. Glavna funkcija ove vrste transmisije je prenos snage i kretanja na veliku udaljenost bez transformacije obrtnog momenta. Veza između ulaznog/izlaznog vratila sa transmisionim vratilom se realizuje na različite načine – zupčanici, spojnice, itd. Ukoliko se veze formiraju upotrebom kardanskih spojnica, dobija se kardansko vratilo što omogućava prenos snage i kretanja između ulaznog/izlaznog vratila koja nisu koaksijalna. Zbog prenosa na velikim udaljenostima, transmisiono vratilo ima velike dimenzije, a samim tim i masu. Kod kardanskog vratila, u slučaju većih vrednosti ugla između ulaznog/izlaznog vratila, transmisiono vratilo vrši neravnomerno kretanje sa velikim udarima [5.33].



Slika 5.14 Prenos sistemom sa krutim transmisionim vratilom.

Slika 5.15 prikazuje prenos sistemom sa fleksibilnim vratilom. Zahvaljujući svojoj strukturi, ovaj tip transmisije omogućava pozicioniranje aktuatora daleko izvan zgloba, čak do postolja robota. Treba napomenuti da su fleksibilna vratila lagana, imaju male dimenzije, a time i inerciju. Promenom oblika fleksibilnog vratila, transmisija se prilagođava varijacijama u promeni rastojanja između aktuatora i izlaznog člana. Fleksibilna vratila su dostupna kao standardni delovi i samim tim imaju nisku cenu. Torzioni elastični fenomeni u kombinaciji sa savijanjem vratila značajno utiču na dinamičko ponašanje ovog sistema, a time i na efikasno upravljanje, što je predmet intenzivnih istraživanja [5.34,5.35].



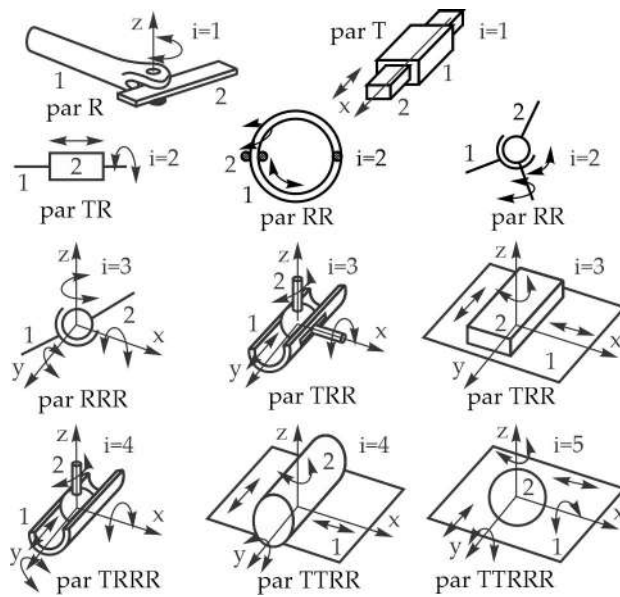
Slika 5.15 Prenos sistemom sa fleksibilnim vratilom.

5.1.5 Transmisije sa mehanizmom

Mehanizam se sastoji od grupe članova međusobno povezanih vezama – zglobovima, omogućavajući relativno kretanje članova. Funkcija mehanizma je da omogući prenos, razvođenje i transformaciju snage i kretanja. Kinematički par (eng. *Kinematic Pair – KP*) predstavlja celinu od dva člana povezanih odgovarajućom vezom, dok veza određuje vrstu njihovog kretanja. *KP* mogu biti reda 1,2,3,4 i 5, gde je red *KP* određen *DoF* kretanja, dok se *DoF* kinematičkih parova određuje prema mogućnosti kretanja jednog člana u odnosu na drugi. Moguća kretanja koja omogućava veza u *KP* su translacija (T) i rotacija (R) u pravcu i oko prostornih koordinatnih osa. Tabela 5.1 prikazuje *KP* određenog reda, dok Slika 5.16 ilustruje nekoliko primera *KP* određenog reda i vrste kretanja koje omogućavaju [5.36].

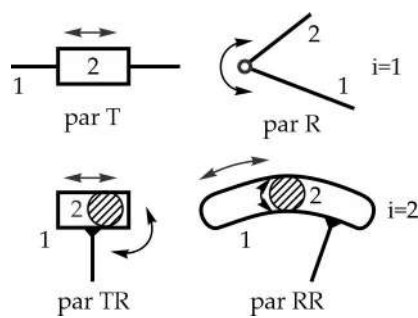
Tabela 5.1 *KP* i vrste kretanja koje omogućavaju.

Red para	Vrsta kretanja		
$i = 1$	R	T	–
$i = 2$	RR	TR	–
$i = 3$	RRR	TRR	TTR
$i = 4$	–	TRRR	TTRR
$i = 5$	–	–	TTRRR

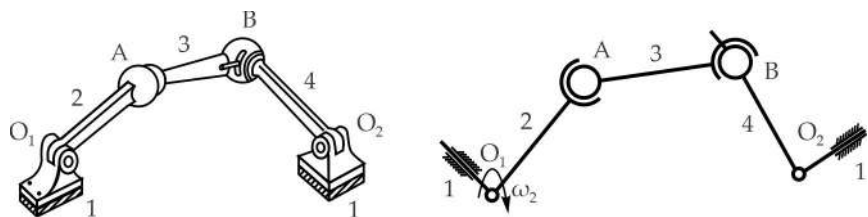


Slika 5.16 Prikaz KP i relativna kretanja koja omogućavaju.

U zavisnosti od strukture, članovi mehanizma vrše kretanje u prostoru ili u ravni. Slika 5.17 prikazuje KP prvog i drugog reda za kretanje u ravni, dok Slika 5.18 prikazuje prostorni zglojni četvorougao i njegovu kinematičku šemu. Naime, članovi 2 i 4 vrše rotaciju oko osa koje prolaze kroz cilindrične zglobove O_1 i O_2 , respektivno; članovi 2 i 3 odnosno 3 i 4, povezani su sfernim zglobovima – tačke A i B; član 3 tokom kretanja zauzima različitu poziciju i orijentaciju u prostoru. Zahvaljujući sfernim zglobovima, prostorni mehanizmi omogućavaju veoma složene i dinamički zahtevne pokrete, ali je njihova kinematika i dinamika vrlo komplikovana, pa se u praktičnim realizacijama ređe primenjuju [5.36].

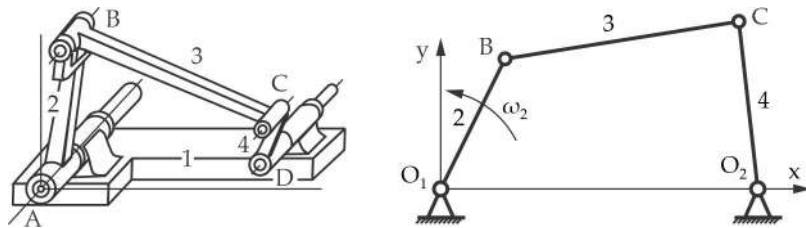


Slika 5.17 Prikaz KP kod ravanskih mehanizama: T, R, TR i RR.



Slika 5.18 Prostorni zglojni četvorougao i njegova kinematska šema.

Slika 5.19 prikazuje ravanski zglobni četvorougao. Članovi 2 i 4 vrše rotaciju oko osa koje prolaze kroz cilindrične zglobove O_1 i O_2 , respektivno; obe ose su paralelne sa x -osom. Dakle, članovi 2 i 4 vrše rotaciju u međusobno paralelnim vertikalnim ravnima. Članovi 2 i 3 odnosno 3 i 4, povezani su cilindričnim zglobovima – tačke B i C, što implicira da se član 3 takođe kreće u vertikalnoj ravni. Ravanski mehanizmi su jednostavni za realizaciju, jednostavnija im je kinematika i dinamika, i omogućavaju širok spektar kretanja [5.36].



Slika 5.19 Ravanski zglobni četvorougao i njegova kinematička šema.

5.1.6 Prednosti i nedostaci

Transmisije sa mehanizmom su najpogodnije iz više razloga. Promenom strukture – broj veza i članova, kao i tipovi veza, može se vršiti transformacija kretanja: rotacija/translacija u rotaciju/translaciju, u istom ili različitim pravcima osa/vođica, u istom ili različitom opsegu – puna rotacija, oscilatorno rotaciono ili oscilatorno pravolinijsko kretanje. Primenom tehnika sinteze, moguće je formirati mehanizam koji ostvaruje kretanje željenih karakteristika. Osim toga, moguće je ostvariti prenos na velike udaljenosti upotrebom višočlanih mehanizama dok se, sa druge strane, izborom pogodnog oblika člana mehanizma i tipa veze mogu realizovati prenosi u malom radnom prostoru. Mehanizmi sa kinematičkim parom nižeg reda – R i T par, mogu prenositi izuzetno velika opterećenja [5.37].

U većini realizacija, članovi mehanizama se mogu smatrati krutim telima – nema elastičnih fenomena, pa samo zazor i trenja u vezama utiču na tačnost rada mehanizama. Kako se kod mehanizama prenos snage i kretanja vrši preko sistema tela povezanih vezama, može doći do akumulacije greške. Greška raste sa brojem članova mehanizma i redom sastavnih KP . Ovo se prevazilazi primenom mehanizama sa što manjim brojem članova i primenom KP nižeg reda – prvi izbor prilikom projektovanja je uvek četvoročlani ravanski mehanizam koji u svojoj strukturi ima samo T i R veze [5.38]. Na efikasnost prenosa utiče i međusobni položaj članova mehanizma i ovaj problem se opisuje veličinom koja se naziva ugao pritiska/prenosa. Optimalnom sintezom je moguće odrediti dimenzije i inicijalne položaje članova mehanizama tako da se postigne zadovoljavajuća efikasnost [5.39,5.40]. Zbog svega toga, primena polužnih mehanizama u robotici ima značajnu primenu [5.41–5.43].

Mehanizmi, ukoliko se veze koncipiraju i realizuju kvalitetno, nemaju većih problema sa trenjem i zazorima, a takođe se mogu, pogodnim oblikovanjem članova, elegantno smestiti u raspoloživi prostor. Upotrebom plastičnih materijala se obezbeđuje mala masa pokretnih članova mehanizma, a time i inercijalna opterećenja u sistemu. Na osnovu svega toga, kao transmisija između aktuatora i izlaznog člana – očne jabučice, očni kapci i obrve, usvajaju se polužni mehanizmi ravanske i prostorne strukture.

5.2 Struktura mehaničkog sistema

Mehanički sistem se sastoji iz tri nezavisna podsistema: (i) mehanički sistem jabučica, (ii) mehanički sistem očnih kapaka i (iii) mehanički sistem obrva. Shodno tome, svaki od njih biće razmotren u pogledu strukture i, nakon toga, preliminarnih dimenzija. U nastavku je prikazana struktura pogonskih sistema jabučica, kapaka i obrva, kao i osnovne relacije koje opisuju njihovo kinematičko ponašanje.

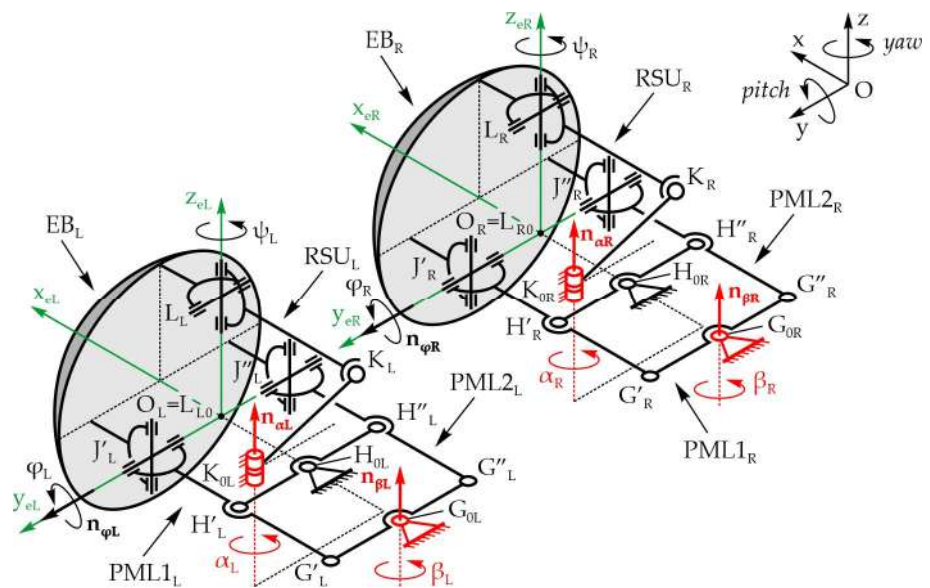
5.2.1 Mehanički sistem očnih jabučica

Mehanički sistem jabučica, sa aspekta funkcionalnosti i kinematike, treba da ima 3 ili 4 DoF . Ukoliko ima 4 DoF , leva i desna jabučica se fizički realizuju kao dva potpuno nezavisna modula i to ima svojih prednosti, ali i nedostatke. Takvo rešenje je dobro sa aspekta brze i lake montaže i demontaže što implicira na veće istraživačke mogućnosti, jer se svakim modulom može manipulirati nezavisno. Međutim, glavni problem predstavlja permanentna potreba za sinhronizovanim kretanjem obe jabučice istovremeno kako bi se izbegao efekat strabizma. Razlika u kretanju levog i desnog oka, ma koliko mala, subjektivno je veoma primetna i može značajno uticati na percepciju prirodnog funkcionisanja očiju. Ovaj problem se prevazilazi oduzimanjem 1 DoF , tj. sistemom sa 3 DoF i fizičkom vezom koja obezbeđuje potpuno simultano i sinhronizovano kretanje oba oka. Naravno, ovde postoji izražen problem montaže i demontaže, pošto se radi o jednom modulu za oba oka.

Očne jabučice sa 4 DoF

Slika 5.20 prikazuje strukturu mehaničkog sistema jabučica sa ukupno 4 DoF koji omogućava *pitch* i *yaw* rotacije jabučica – uglovi $\varphi_{L/R}$ i $\psi_{L/R}$, respektivno. Mobilne platforme $L_{L/R}$, $J'_{L/R}$ i $J''_{L/R}$ su očne jabučice koje su realizovane kao sfere sa centrima u tačkama $O_{L/R}$. Bazne platforme su integrisane u glavi robota – nepokretni član mehanizma, i definisane su tačkama $K_{0(L/R)}$, $H_{0(L/R)}$ i $G_{0(L/R)}$. Kretanje jabučice je definisano sa jednom $RSU_{L/R}$ nogom koja predstavlja otvoreni kinematički lanac (R, S i U su oznake za rotacioni – cilindrični,

sferni i univerzalni zglob, respektivno) kao i dve identične noge PML1_{L/R} i PML2_{L/R} koje formiraju ravanski zglobni četvorouglovi paralelogramske konfiguracije G_{0(L/R)}, G'_{L/R}, H'_{L/R}, H_{0(L/R)} i G_{0(L/R)}, G''_{L/R}, H''_{L/R}, H_{0(L/R)}, respektivno. Pritom, RSU_{L/R} obezbeđuje *pitch* rotaciju – ugaio φ_{L/R}, dok PML1_{L/R} i PML2_{L/R} obezbeđuju *yaw* rotaciju jabučica – ugaio ψ_{L/R}. Pokretanje se vrši sa 4 aktuatora u zglobovima K_{0L}, K_{0R}, G_{0L} i G_{0R}. PML1_{L/R} i PML2_{L/R} noge se aktuiraju istim aktuatorom, jer su poluge G_{0(L/R)}, G'_{L/R} i G_{0(L/R)}, G''_{L/R} međusobno kruto povezane. Jedinični vektori osa R zglobova su n_{α(L/R)} i n_{φ(L/R)}. Zbog strukture veza, jabučice mogu da vrše *pitch* i *yaw* rotacije nezavisno i/ili simultano. Centar jabučice se ne pomera tokom kretanja, pa je kretanje jabučice sferno u odnosu na njen centar. Lokalni koordinatni sistem O_{L/R}X_{e(L/R)}Y_{e(L/R)}Z_{e(L/R)} je fiksiran za očnu jabučicu i u početnom trenutku se pravci osa poklapaju sa pravcima osa globalnog nepokretnog koordinatnog sistema Oxyz. Sa obzrom da su mehanizmi obe jabučice u pogledu strukture identični, indeksi za levu L i desnu R jabučicu se nadalje zanemaruju.



Slika 5.20 Struktura mehaničkog sistema očnih jabučica sa 4 DoF; napomena: indeksi L i R se odnose na levo i desno oko, respektivno.

Na osnovu ulaznih kinematičkih parametara pogonskog sistema jabučica: dužine poluga i položaja ulaznih članova mehanizama – uglovi α i β, izlazni kinematički parametri se određuju: položaji – uglovi φ i ψ, i ugaone brzine jabučica. Najpre se razmatra *pitch* rotacija jabučice definisana uglom rotacije φ:

$$\varphi = 2 \arctan \left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{c - b} \right) \tag{1}$$

gde je:

$$a = (\mathbf{k} - \mathbf{l}_0)^T [\mathbf{P}_{n\varphi}] (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0) \quad (2)$$

$$b = (\mathbf{k} - \mathbf{l}_0)^T [\mathbf{I} - \mathbf{Q}_{n\varphi}] (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0) \quad (3)$$

$$c = (\mathbf{k} - \mathbf{l}_0)^T [\mathbf{Q}_{n\varphi}] (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{k}_s - \mathbf{l}_s)^T (\mathbf{k}_s - \mathbf{l}_s) - \frac{1}{2} (\mathbf{k} - \mathbf{l}_0)^T (\mathbf{k} - \mathbf{l}_0) - \frac{1}{2} (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0)^T (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0) \quad (4)$$

$$\mathbf{k} = [\mathbf{R}_{\alpha, n\alpha}] (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_0) + \mathbf{k}_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{l} = [\mathbf{R}_{\varphi, n\varphi}] (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_0) + \mathbf{l}_0 \quad (6)$$

gde je:

\mathbf{k} i \mathbf{l} – vektori tekućih položaja tačaka K i L,

\mathbf{k}_0 i \mathbf{l}_0 – vektori položaja nepokretnih tačaka K_0 i L_0 ,

\mathbf{k}_s i \mathbf{l}_s – vektori inicijalnih položaja tačaka K i L,

$[\mathbf{R}_{\alpha, n\alpha}]$ i $[\mathbf{R}_{\varphi, n\varphi}]$ – matrice rotacije, i

$[\mathbf{P}_{n\varphi}]$ i $[\mathbf{Q}_{n\varphi}]$ – odgovarajuće matrice.

Matrica rotacije $[\mathbf{R}_{\alpha, n\alpha}]$ za ugao rotacije α oko ose $\mathbf{n}_\alpha(n_{\alpha x}, n_{\alpha y}, n_{\alpha z})$ je:

$$[\mathbf{R}_{\alpha, n\alpha}] = \begin{bmatrix} n_{\alpha x}^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & n_{\alpha x} n_{\alpha y} (1 - \cos \alpha) - n_{\alpha z} \sin \alpha & n_{\alpha x} n_{\alpha y} (1 - \cos \alpha) - n_{\alpha z} \sin \alpha \\ n_{\alpha x} n_{\alpha y} (1 - \cos \alpha) + n_{\alpha z} \sin \alpha & n_{\alpha y}^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & n_{\alpha y} n_{\alpha z} (1 - \cos \alpha) - n_{\alpha x} \sin \alpha \\ n_{\alpha x} n_{\alpha z} (1 - \cos \alpha) - n_{\alpha y} \sin \alpha & n_{\alpha y} n_{\alpha z} (1 - \cos \alpha) + n_{\alpha x} \sin \alpha & n_{\alpha z}^2 (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matrica rotacije $[\mathbf{R}_{\varphi, n\varphi}]$ za ugao rotacije φ oko ose $\mathbf{n}_\varphi(n_{\varphi x}, n_{\varphi y}, n_{\varphi z})$ je:

$$[\mathbf{R}_{\varphi, n\varphi}] = \begin{bmatrix} n_{\varphi x}^2 (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & n_{\varphi x} n_{\varphi y} (1 - \cos \varphi) - n_{\varphi z} \sin \varphi & n_{\varphi x} n_{\varphi z} (1 - \cos \varphi) + n_{\varphi y} \sin \varphi \\ n_{\varphi x} n_{\varphi y} (1 - \cos \varphi) + n_{\varphi z} \sin \varphi & n_{\varphi y}^2 (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & n_{\varphi y} n_{\varphi z} (1 - \cos \varphi) - n_{\varphi x} \sin \varphi \\ n_{\varphi x} n_{\varphi z} (1 - \cos \varphi) - n_{\varphi y} \sin \varphi & n_{\varphi y} n_{\varphi z} (1 - \cos \varphi) + n_{\varphi x} \sin \varphi & n_{\varphi z}^2 (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Matrice $[\mathbf{P}_{n\alpha}]$ i $[\mathbf{Q}_{n\alpha}]$ se određuju prema:

$$[\mathbf{P}_{n\alpha}] = \begin{bmatrix} 0 & -n_{\alpha z} & n_{\alpha y} \\ n_{\alpha z} & 0 & -n_{\alpha x} \\ -n_{\alpha y} & n_{\alpha x} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\mathbf{Q}_{n\alpha}] = \begin{bmatrix} n_{\alpha x}^2 & n_{\alpha x} n_{\alpha y} & n_{\alpha x} n_{\alpha z} \\ n_{\alpha x} n_{\alpha y} & n_{\alpha y}^2 & n_{\alpha y} n_{\alpha z} \\ n_{\alpha x} n_{\alpha z} & n_{\alpha y} n_{\alpha z} & n_{\alpha z}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ugaona brzina izlaznog člana LL_0 je:

$$\dot{\varphi} = \frac{(\dot{\mathbf{k}})^T (\mathbf{k} - \mathbf{1})}{(\mathbf{k} - \mathbf{1})^T [\mathbf{P}_{n\varphi}] (\mathbf{1} - \mathbf{1}_0)} \tag{11}$$

Brzina tačke K je poznata i iznosi:

$$\dot{\mathbf{k}} = \dot{\alpha} [\mathbf{P}_{n\alpha}] (\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \tag{12}$$

Sada se određuje brzina tačke L na jabučici:

$$\dot{\mathbf{i}} = \dot{\varphi} [\mathbf{P}_{n\varphi}] (\mathbf{1} - \mathbf{1}_0) \tag{13}$$

Nadalje se razmatra yaw rotacija jabučice. Položaj tačaka J' i J'' je definisan vektorima j' i j'', respektivno (x₀ i y₀ su koordinate centra jabučice):

$$\mathbf{j}' = (-\overline{G'G_0} \sin \beta + x_0, \overline{G'G_0} \cos \beta + y_0, 0) \tag{14}$$

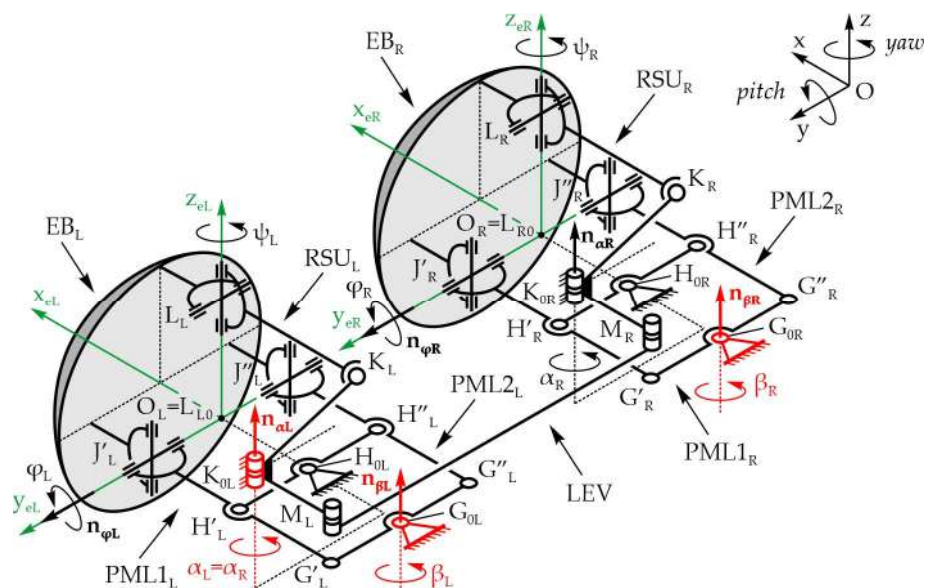
$$\mathbf{j}'' = (\overline{G''G_0} \sin \beta + x_0, -\overline{G''G_0} \cos \beta + y_0, 0) \tag{15}$$

Budući da je G₀G' = G₀G'', očna jabučica prilikom promene ugla β vrši rotaciju oko z-ose. Zbog toga je položaj jabučice – ugao ψ, jednak položaju ulaznog člana – ugao β, pa je:

$$\psi = \beta, \dot{\psi} = \dot{\beta} \tag{16}$$

Očne jabučice sa 3 DoF

Slika 5.21 prikazuje strukturu mehaničkog sistema jabučica sa ukupno 3 DoF koji omogućava pitch i yaw rotacije jabučica – uglovi φ_{L/R} i ψ_{L/R}, respektivno. U odnosu na sistem



Slika 5.21 Struktura mehaničkog sistema očnih jabučica sa 3 DoF; napomena: indeksi L i R se odnose na levo i desno oko, respektivno.

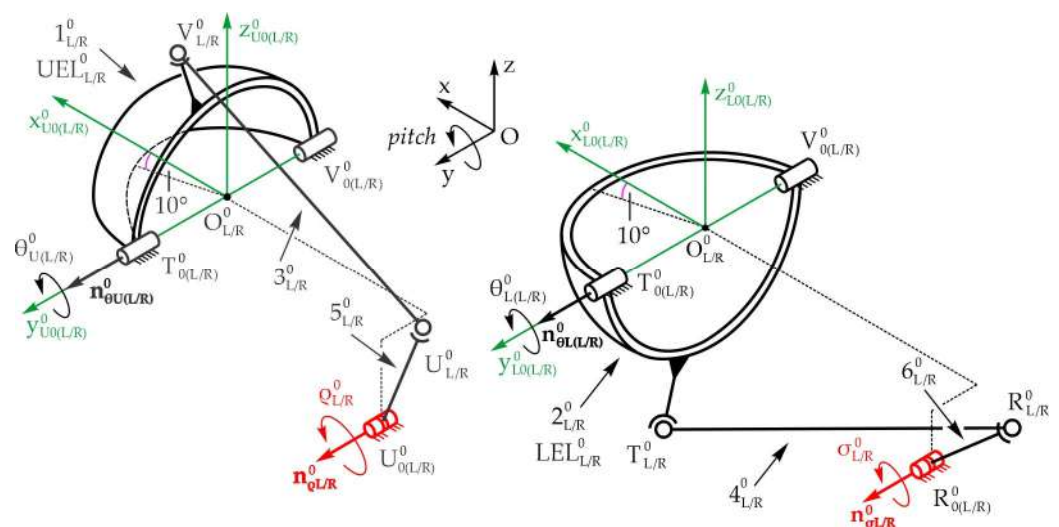
sa 4 *DoF*, dodat je ravanski zglobovi četvorougao paralelogramske konfiguracije LEV koji prenosi kretanje sa aktiviranog zgloba K_{OL} na pasivni zglob K_{OR} , pa je $\alpha_L = \alpha_R$. Jednačine su identične kao u slučaju mehaničkog sistema očnih jabučica sa 4 *DoF*, pa se neće ponavljati.

5.2.2 Mehanički sistem očnih kapaka

Osnovna razlika između muškog i ženskog oka je u kantlnom nagibu očnih kapaka, pa se nadalje razmatraju strukture mehaničkih sistema očnih kapaka za muške i ženske robote sa neutralnim i pozitivnim kantlnim nagibom, respektivno.

Očni kapci sa neutralnim kantlnim nagibom ($\kappa = 0^\circ$)

Slika 5.22 prikazuje strukturu mehaničkog sistema očnih kapaka sa ukupno 4 *DoF* koji omogućava rotaciju gornjih i donjih kapaka – uglovi $\theta_{U(L/R)}^0$ i $\theta_{L(L/R)}^0$, respektivno. Gornji i donji kapci $U_{EL(L/R)}^0$ i $L_{EL(L/R)}^0$ su sferne ljuske sa centrima u tačkama $O_{L/R}^0$ (centri jabučica). Mehanički sistem se sastoji od četiri prostorna mehanizma RSSR konfiguracije koje pokreću aktuatori u zglobovima $U_{0(L/R)}^0$ i $R_{0(L/R)}^0$. Jedinični vektori osa R zglobova su $\mathbf{n}_{\theta U(L/R)}^0$ i $\mathbf{n}_{\theta L(L/R)}^0$ za gornji kapak, kao i $\mathbf{n}_{\theta L(L/R)}^0$ i $\mathbf{n}_{\theta R(L/R)}^0$ za donji kapak. Lokalni koordinatni sistemi su fiksirani za odgovarajući očni kapak i u početnom trenutku se pravci osa poklapaju sa pravcima osa glavnog nepokretnog koordinatnog sistema $Oxyz$. Očni kapci su otvoreni u početnom trenutku, a kada se zatvore, ravan njihovog dodira prolazi kroz y -osu i nalazi se pod uglom od 10° u odnosu na horizontalnu ravan određenu pravama $T_{0(L/R)}^0 V_{0(L/R)}^0$ i $O_{L/R}^0 X_{0(L/R)}^0$. Imajući u vidu da su mehanizmi levih i desnih kapaka strukturno identični, indeksi L i R se nadalje zanemaruju.



Slika 5.22 Struktura mehaničkog sistema očnih kapaka sa 4 *DoF* i neutralnim kantlnim nagibom; napomena: indeksi L i R se odnose na levo i desno oko, respektivno.

Na osnovu ulaznih kinematičkih parametara pogonskog sistema kapaka: dužine poluga i položaji ulaznih članova mehanizama – uglovi ρ^0 i σ^0 , izlazni kinematički parametri se određuju: položaji – uglovi θ^0_U i θ^0_L , kao i ugaone brzine kapaka. Najpre je određen položaj gornjeg kapka:

$$\theta^0_U = 2 \arctan \left(\frac{-a^0 + \sqrt{(a^0)^2 + (b^0)^2 - (c^0)^2}}{c^0 - b^0} \right) \quad (17)$$

gde je:

$$a^0 = (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)^T [\mathbf{P}^0_{n\theta U}] (\mathbf{v}^0_s - \mathbf{v}^0_0) \quad (18)$$

$$b^0 = (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)^T [\mathbf{I} - \mathbf{Q}^0_{n\theta U}] (\mathbf{v}^0_s - \mathbf{v}^0_0) \quad (19)$$

$$c^0 = (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)^T [\mathbf{Q}^0_{n\theta U}] (\mathbf{v}^0_s - \mathbf{v}^0_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{u}^0_s - \mathbf{v}^0_s)^T (\mathbf{u}^0_s - \mathbf{v}^0_s) - \frac{1}{2} (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)^T (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0) - \frac{1}{2} (\mathbf{v}^0_s - \mathbf{v}^0_0)^T (\mathbf{v}^0_s - \mathbf{v}^0_0) \quad (20)$$

$$\mathbf{u}^0 = [\mathbf{R}^0_{e,nq}] (\mathbf{u}^0_s - \mathbf{u}^0_0) + \mathbf{u}^0_0 \quad (21)$$

$$\mathbf{v} = [\mathbf{R}^0_{\theta,n\theta U}] (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_0) + \mathbf{v}_0 \quad (22)$$

gde je:

\mathbf{u}^0 i \mathbf{v}^0 – vektori tekućih položaja tačaka U^0 i V^0 ,

\mathbf{u}^0_0 i \mathbf{v}^0_0 – vektori položaja nepokretnih tačaka U^0_0 i V^0_0 ,

\mathbf{u}^0_s i \mathbf{v}^0_s – vektori inicijalnih položaja tačaka U^0 i V^0 ,

$[\mathbf{R}^0_{e,nq}]$ i $[\mathbf{R}^0_{\theta,n\theta U}]$ – matrice rotacije (videti jednačine 7 i 8, respektivno), i

$[\mathbf{P}^0_{n\theta U}]$ i $[\mathbf{Q}^0_{n\theta U}]$ – odgovarajuće matrice (videti jednačine 9 i 10, respektivno).

Ugaona brzina izlaznog člana $V^0V^0_0$ je:

$$\dot{\theta}^0_U = \frac{(\dot{\mathbf{u}}^0)^T (\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)}{(\mathbf{u}^0 - \mathbf{v}^0_0)^T [\mathbf{P}^0_{n\theta U}] (\mathbf{v}^0 - \mathbf{v}^0_0)} \quad (23)$$

Brzina tačke U^0 je poznata i iznosi:

$$\dot{\mathbf{u}}^0 = \dot{\rho}^0 [\mathbf{P}^0_{nq}] (\mathbf{u}^0 - \mathbf{u}^0_0) \quad (24)$$

Sada se određuje brzina tačke V^0 na gornjem kapku:

$$\dot{\mathbf{v}}^0 = \dot{\theta}_L^0 \left[\mathbf{P}_{n\theta u}^0 \right] (\mathbf{v}^0 - \mathbf{v}_0^0) \quad (25)$$

Položaj donjeg kapka se određuje prema:

$$\theta_L^0 = 2 \arctan \left(\frac{-a^0 + \sqrt{(a^0)^2 + (b^0)^2 - (c^0)^2}}{c^0 - b^0} \right) \quad (26)$$

gde je:

$$a^0 = (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}_0^0)^T \left[\mathbf{P}_{n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0) \quad (27)$$

$$b^0 = (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}_0^0)^T \left[\mathbf{I} - \mathbf{Q}_{n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0) \quad (28)$$

$$c^0 = (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}_0^0)^T \left[\mathbf{Q}_{n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0) + \frac{1}{2} (\mathbf{r}_s^0 - \mathbf{t}_s^0)^T (\mathbf{r}_s^0 - \mathbf{t}_s^0) - \frac{1}{2} (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}_0^0)^T (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}_0^0) - \frac{1}{2} (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0)^T (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0) \quad (29)$$

$$\mathbf{r}^0 = \left[\mathbf{R}_{\sigma, n\sigma}^0 \right] (\mathbf{r}_s^0 - \mathbf{r}_0^0) + \mathbf{r}_0^0 \quad (30)$$

$$\mathbf{t}^0 = \left[\mathbf{R}_{\theta, n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}_s^0 - \mathbf{t}_0^0) + \mathbf{t}_0^0 \quad (31)$$

gde je:

\mathbf{r}^0 i \mathbf{t}^0 – vektori tekućih položaja tačaka R^0 i T^0 ,

\mathbf{r}_0^0 i \mathbf{t}_0^0 – vektori položaja nepokretnih tačaka R^0_0 i T^0_0 ,

\mathbf{r}_s^0 i \mathbf{t}_s^0 – vektori inicijalnih položaja tačaka R^0 i T^0 ,

$[\mathbf{R}_{\sigma, n\sigma}^0]$ i $[\mathbf{R}_{\theta, n\theta L}^0]$ – matrice rotacije (videti jednačine 7 i 8, respektivno), i

$[\mathbf{P}_{n\theta L}^0]$ i $[\mathbf{Q}_{n\theta L}^0]$ – odgovarajuće matrice (videti jednačine 9 i 10, respektivno).

Ugaona brzina izlaznog člana $T^0 T^0_0$ je:

$$\dot{\theta}_L^0 = \frac{(\dot{\mathbf{r}}^0)^T (\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}^0)}{(\mathbf{r}^0 - \mathbf{t}^0)^T \left[\mathbf{P}_{n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}^0 - \mathbf{t}_0^0)} \quad (32)$$

Brzina tačke R^0 je poznata i iznosi:

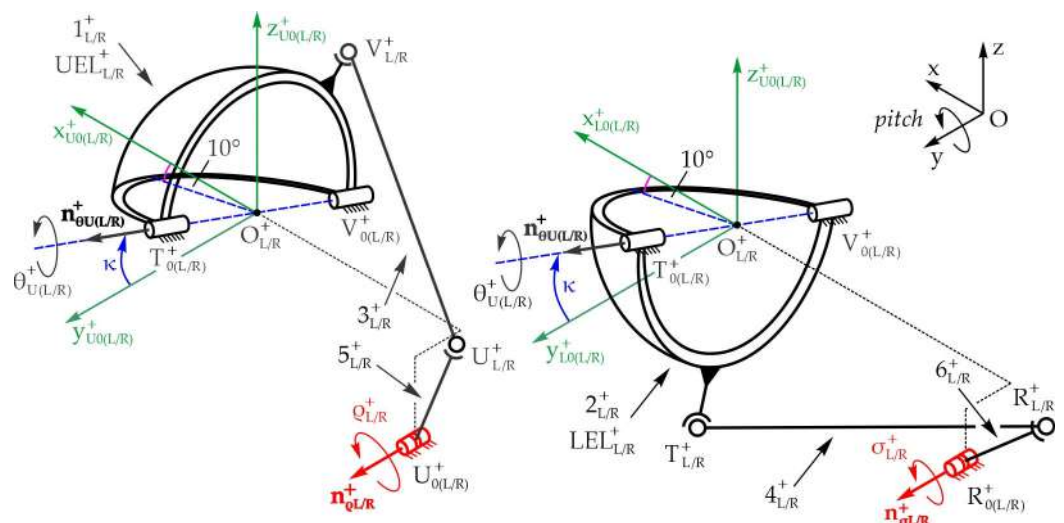
$$\dot{\mathbf{r}}^0 = \dot{\sigma}^0 \left[\mathbf{P}_{n\sigma}^0 \right] (\mathbf{r}^0 - \mathbf{r}_0^0) \quad (33)$$

Sada se određuje brzina tačke T^0 na donjem kapku:

$$\dot{\mathbf{t}}^0 = \dot{\theta}_L^0 \left[\mathbf{P}_{n\theta L}^0 \right] (\mathbf{t}^0 - \mathbf{t}_0^0) \quad (34)$$

Očni kapci sa pozitivnim kantalnim nagibom ($\kappa > 0^\circ$)

Slika 5.23 prikazuje strukturu mehaničkog sistema očnih kapaka sa ukupno 4 DoF koji omogućava rotaciju gornjih i donjih kapaka – uglovi $\theta^+_{U(L/R)}$ i $\theta^+_{L(R)}$, respektivno. Gornji i donji kapci $UEL^+_{L/R}$ i $LEL^+_{L/R}$ su sferne ljuske sa centrima u tačkama $O^+_{L/R}$ (centri jabučica). Mehanički sistem se sastoji od četiri prostorna mehanizma RSSR konfiguracije koje pogone aktuatori u zglobovima $U^+_{0(L/R)}$ i $R^+_{0(L/R)}$. Jedinični vektori osa R zglobova su $\mathbf{n}^+_{\theta U(L/R)}$ i $\mathbf{n}^+_{\theta L/R}$ za gornji kapak, kao i $\mathbf{n}^+_{\theta L(L/R)}$ i $\mathbf{n}^+_{\theta R/L}$ za donji kapak. Lokalni koordinatni sistemi su fiksirani za odgovarajući očni kapak i u početnom trenutku se pravci osa poklapaju sa pravcima osa glavnog nepokretnog koordinatnog sistema $Oxyz$. Očni kapci su zarotirani u vertikalnoj ravni za ugao kantang nagiba κ . U početnom trenutku kapci su otvoreni, a kada se zatvore, ravan dodira prolazi kroz osu zglobova $T^+_{0(L/R)}$ i $V^+_{0(L/R)}$ koja se nalazi pod uglom od 10° u odnosu na ravan određenu pravama $T^+_{0(L/R)}V^+_{0(L/R)}$ i $O^+_{L/R}x_{U0/L0(L/R)}$ (nije horizontalna ravan!). Imajući u vidu da su mehanizmi levih i desnih kapaka strukturno identični, indeksi L i R se nadalje zanemaruju. Najpre se određuje položaj gornjeg kapka.



Slika 5.23 Struktura mehaničkog sistema očnih kapaka sa 4 DoF i pozitivnim kantalnim nagibom; napomena: indeksi L i R se odnose na levo i desno oko, respektivno.

Na osnovu ulaznih kinematičkih parametara pogonskog sistema kapaka: dužine poluga i položaji ulaznih članova mehanizama – uglovi ρ^+ i σ^+ , izlazni kinematički parametri se određuju: položaji – uglovi θ^+_U i θ^+_L , i ugaone brzine kapaka.

$$\theta^+_U = 2 \arctan \left(\frac{-a^+ + \sqrt{(a^+)^2 + (b^+)^2 - c^{+2}}}{c^+ - b^+} \right) \tag{35}$$

gde je:

$$a^+ = (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+_0)^T [\mathbf{P}^+_{n\theta U}] (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0) \quad (36)$$

$$b^+ = (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+_0)^T [\mathbf{I} - \mathbf{Q}^+_{n\theta U}] (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0) \quad (37)$$

$$c^+ = (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+_0)^T [\mathbf{Q}^+_{n\theta U}] (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{u}^+_s - \mathbf{v}^+_s)^T (\mathbf{u}^+_s - \mathbf{v}^+_s) - \frac{1}{2} (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+_0)^T (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+_0) - \frac{1}{2} (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0)^T (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0) \quad (38)$$

$$\mathbf{u}^+ = [\mathbf{R}^+_{\varrho, n\varrho}] (\mathbf{u}^+_s - \mathbf{u}^+_0) + \mathbf{u}^+_0 \quad (39)$$

$$\mathbf{v}^+ = [\mathbf{R}^+_{\theta, n\theta U}] (\mathbf{v}^+_s - \mathbf{v}^+_0) + \mathbf{v}^+_0 \quad (40)$$

gde je:

\mathbf{u}^+ i \mathbf{v}^+ – vektori tekućih položaja tačka U^+ i V^+ ,

\mathbf{u}^+_0 i \mathbf{v}^+_0 – vektori položaja nepokretnih tačka U^+_0 i V^+_0 ,

\mathbf{u}^+_s i \mathbf{v}^+_s – vektori inicijalnih položaja tačka U^+ i V^+ ,

$[\mathbf{R}^+_{\varrho, n\varrho}]$ i $[\mathbf{R}^+_{\theta, n\theta U}]$ – matrice rotacije (videti jednačine 7 i 8, respektivno), i

$[\mathbf{P}^+_{n\theta U}]$ i $[\mathbf{Q}^+_{n\theta U}]$ – odgovarajuće matrice (videti jednačine 9 i 10, respektivno).

Ugaona brzina izlaznog člana $V^+V^+_0$ je:

$$\dot{\theta}^+_U = \frac{(\dot{\mathbf{u}}^+)^T (\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+)}{(\mathbf{u}^+ - \mathbf{v}^+)^T [\mathbf{P}^+_{n\theta U}] (\mathbf{v}^+ - \mathbf{v}^+_0)} \quad (41)$$

Brzina tačke U^+ je poznata i iznosi:

$$\dot{\mathbf{u}}^+ = \dot{\rho}^+ [\mathbf{P}^+_{n\varrho}] (\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^+_0) \quad (42)$$

Sada se određuje brzina tačke V^+ na gornjem kapku:

$$\dot{\mathbf{v}}^+ = \dot{\theta}^+_U [\mathbf{P}^+_{n\theta U}] (\mathbf{v}^+ - \mathbf{v}^+_0) \quad (43)$$

Položaj donjeg kapka se određuje prema:

$$\theta^+_L = 2 \arctan \left(\frac{-a^+ + \sqrt{(a^+)^2 + (b^+)^2 - (c^+)^2}}{c^+ - b^+} \right) \quad (44)$$

gde je:

$$a^+ = (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+_0)^T [\mathbf{P}^+_{n\theta L}] (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0) \quad (45)$$

$$b^+ = (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+_0)^T [\mathbf{I} - \mathbf{Q}^+_{n\theta L}] (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0) \quad (46)$$

$$c^+ = (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+_0)^T [\mathbf{Q}^+_{n\theta L}] (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0) + \frac{1}{2} (\mathbf{r}^+_s - \mathbf{t}^+_s)^T (\mathbf{r}^+_s - \mathbf{t}^+_s) - \frac{1}{2} (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+_0)^T (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+_0) - \frac{1}{2} (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0)^T (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0) \quad (47)$$

$$\mathbf{r}^+ = [\mathbf{R}^+_{\sigma, n\sigma}] (\mathbf{r}^+_s - \mathbf{r}^+_0) + \mathbf{r}^+_0 \quad (48)$$

$$\mathbf{t}^+ = [\mathbf{R}^+_{\theta, n\theta L}] (\mathbf{t}^+_s - \mathbf{t}^+_0) + \mathbf{t}^+_0 \quad (49)$$

gde je:

\mathbf{r}^+ i \mathbf{t}^+ – vektori tekućih položaja tačaka R^+ i T^+ ,

\mathbf{r}^+_0 i \mathbf{t}^+_0 – vektori položaja nepokretnih tačaka R^+_0 i T^+_0 ,

\mathbf{r}^+_s i \mathbf{t}^+_s – vektori inicijalnih položaja tačaka R^+ i T^+ ,

$[\mathbf{R}^+_{\sigma, n\sigma}]$ i $[\mathbf{R}^+_{\theta, n\theta L}]$ – matrice rotacije (videti jednačine 7 i 8, respektivno), i

$[\mathbf{P}^+_{n\theta L}]$ i $[\mathbf{Q}^+_{n\theta L}]$ – odgovarajuće jednačine (videti jednačine 9 i 10, respektivno).

Ugaona brzina izlaznog člana $T^+T^+_0$ je:

$$\dot{\theta}^+_L = \frac{(\dot{\mathbf{r}}^+)^T (\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+)}{(\mathbf{r}^+ - \mathbf{t}^+)^T [\mathbf{P}^+_{n\theta L}] (\mathbf{t}^+ - \mathbf{t}^+_0)} \quad (50)$$

Brzina tačke R^+ je poznata i iznosi:

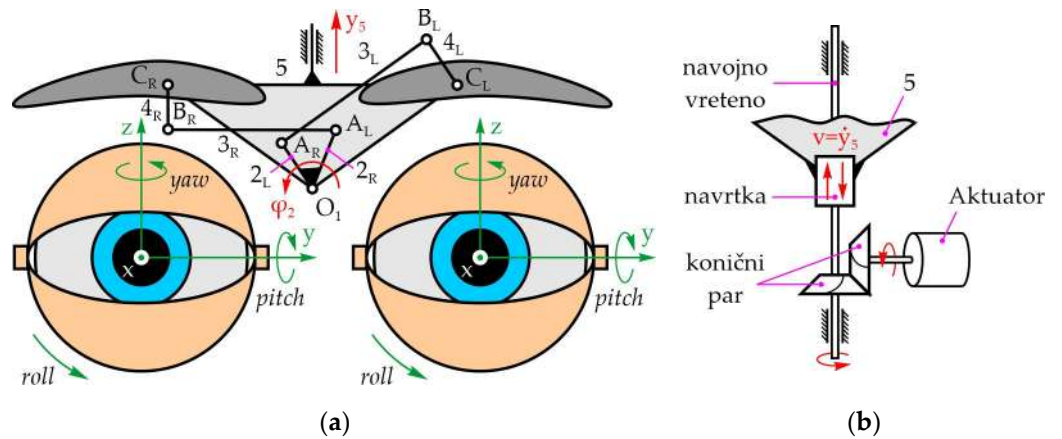
$$\dot{\mathbf{r}}^+ = \dot{\sigma}^+ [\mathbf{P}^+_{n\sigma}] (\mathbf{r}^+ - \mathbf{r}^+_0) \quad (51)$$

Sada se određuje brzina tačke T^+ na donjem kapku:

$$\dot{\mathbf{t}}^+ = \dot{\theta}^+_L [\mathbf{P}^+_{n\theta L}] (\mathbf{t}^+ - \mathbf{t}^+_0) \quad (52)$$

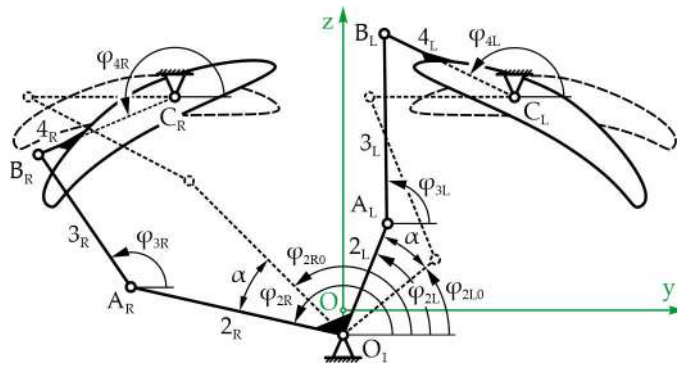
5.2.3 Mehanički sistem obrva

Slika 5.24a prikazuje mehanički sistem obrva sa ukupno 2 *DoF* omogućavajući rotaciju i translaciju obrva – ugao φ_2 i vertikalno pomeranje člana z_5 , respektivno. Mehanizam za rotaciju obrva se sastoji od dve poluge 2_L i 2_R koje su međusobno fiksirane predstavljajući ulazni član 2, poluge 3_L i 3_R – plivajući članovi, kao i poluge 4_L i 4_R koje su fiksirane za levu i desnu obrvu, respektivno – izlazni članovi. Podizanje obrva omogućava član 5 koji vrši translatorno kretanje u odnosu na nepokretni član 1. Prema Slici 5.24b, član 5 je kruto vezan za navrtku koja se kreće po navojnom vretenu mehanizma omogućavajući transformaciju rotacionog u translatorno kretanje. Aktuator je pozicioniran paralelno sa x -osom, između modula levog i desnog oka zahvaljujući koničnom zupčastom paru ($i = 1$).



Slika 5.24 (a) Strukturna mehaničkog sistema obrva sa 2 DoF; (b) Mehanizam sa navojnim vretenom.

Slika 5.25 prikazuje mehanizam za rotaciju obrva u inicijalnom – horizontalnom položaju, kao i rotiranom položaju. Sa obzirom da se prilikom rotacije obrva član 5 ne kreće, čitav mehanizam se može posmatrati kao dva nezavisna zglobna četvorougla.



Slika 5.25 Mehanizam za rotaciju obrva u inicijalnom i rotiranom položaju.

Dužine članova 2, 3 i 4 za levi i desni mehanizam su $r_{2(L/R)}$, $r_{3(L/R)}$ i $r_{4(L/R)}$, respektivno. Odnos između ugla rotacije obrva $\varphi_{4(L/R)}$ i ugla ulaznog člana $\varphi_{2(L/R)}$ je: gde je:

$$\varphi_{4(L/R)} = \varphi_{d(L/R)} + \arccos \frac{r_{3(L/R)}^2 - d_{L/R}^2 - r_{4(L/R)}^2}{2d_{L/R}r_{4(L/R)}} \tag{53}$$

gde je:

$$\varphi_{d(L/R)} = \arctan \frac{z_{C(L/R)} - z_{A(L/R)}}{y_{C(L/R)} - y_{A(L/R)}} \tag{54}$$

$$d_{L/R} = \sqrt{(x_{C(L/R)} - x_{A(L/R)})^2 + (y_{C(L/R)} - y_{A(L/R)})^2} \tag{55}$$

dok su $y_{C(L/R)}$ i $z_{C(L/R)}$ koordinate tačke C za levi/desni mehanizam. Prema tome, koordinate tačke A za levi/desni mehanizam su:

$$y_{A(L/R)} = y_{O1} + r_{2(L/R)} \cos \varphi_{2(L/R)} = y_{O1} + r_{2(L/R)} \cos \left(\varphi_{2(L0/R0)} + \alpha \right) \quad (56)$$

$$z_{A(L/R)} = z_{O1} + r_{2(L/R)} \sin \varphi_{2(L/R)} = z_{O1} + r_{2(L/R)} \sin \left(\varphi_{2(L0/R0)} + \alpha \right) \quad (57)$$

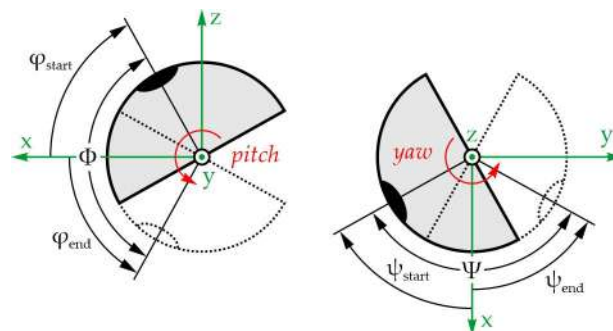
gde su: $\varphi_{2(L/R)}$ – ugao položaja člana 2 za levi/desni mehanizam, $\varphi_{2(L0/R0)}$ – ugao ulaznog člana u inicijalnom položaju, tj. kada su obrve u horizontalnom položaju, i α – ugao rotacije člana 2 u inicijalnom položaju.

5.3 Dimenziona sinteza mehaničkog sistema

Osnovna funkcija mehanizma je da prenese kretanje sa ulaznog na izlazni član. Pri tome je neophodno da se pogonska sila efikasno prenese na izlazni član mehanizma – mera ove efikasnosti je indeks transmisije (eng. *Transmission Index – TI*) [5.44] čija vrednost zavisi od dimenzija i trenutnog položaja mehanizma. Prilikom kretanja, *TI* se menja u granicama od 0 do 1 i što je vrednost bliža 1, mehanizam je efikasniji. Stoga, dimenziona sinteza će se izvršiti tako da mehanizmi očnih jabučica, očnih kapaka i obrva ostvare propisane opsege kretanja uz što veći *TI*.

5.3.1 Mehanizmi očnih jabučica

Slika 5.26 prikazuje vertikalne i horizontalne sakadične pokrete jabučice – uglovi φ i ψ , respektivno. Sa obzirom da su pokreti jabučica isti za mehanizme sa 3 i 4 *DoF*, mehanizmi se ne razmatraju posebno, već samo jedan. Za kinematički model vertikalnih sakada se usvaja da je jabučica u inicijalnom položaju rotirana za ugao $\varphi_{\text{start}} = -30^\circ$ oko *y*-ose. Tokom pokreta, jabučica rotira za ugao $\Phi = 75^\circ$ do krajnjeg položaja definisanog sa $\varphi_{\text{end}} = 45^\circ$. Za slučaj horizontalnih sakada, jabučica kreće iz inicijalnom položaja definisanog sa $\varphi_{\text{start}} = -45^\circ$, zatim rotira oko *z*-ose za ugao $\Psi = 90^\circ$ do krajnjeg položaja definisanog sa $\psi_{\text{end}} = 45^\circ$. Vreme trajanje oba pokreta je usvojeno i iznosi maksimalno 0.2 s.



Slika 5.26 Vertikalne i horizontalne sakade oka – *pitch* i *yaw* rotacije.

Za slučaj *pitch* rotacije, TI za mehanizam jabučice je definisan kao kosinus ugla između pravca plivajućeg člana KL i pravca brzine tačke L [5.45], pa je:

$$TI_{EB} = \frac{|\overline{KL} \cdot \vec{v}_L|}{|\overline{KL}| |\vec{v}_L|} \quad (58)$$

Pored propisanih opsega kretanja jabučice i uslova da vrednost TI bude što bliži 1, dodatni zahtev se odnosi na minimizaciju dimenzija mehanizma. Pošto se pojedini zahtevi suprotstavljaju, zadatak dimenzione sinteze se formuliše kao optimizacioni problem – minimizacija funkcije cilja $F(x)$, $x \in D$ za zadata ograničenja, gde je $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ vektor optimizacionih varijabli, $D = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g(x) \leq 0 \wedge h(x) = 0\}$ je skup vektora rešenja koji zadovoljavaju zadata ograničenja, dok su $g(x) \leq 0$ i $h(x) = 0$ su vektori ograničenja. Optimizacione varijable su geometrijski parametri mehanizma: dužina ulaznog člana K_0K , dužina izlaznog člana OL , ugao položaja ulaznog člana u početnom položaju α_{start} , i opseg kretanja ulazne poluge definisan uglom $A = |\alpha_{end} - \alpha_{start}|$. Na osnovu svega toga, funkcija cilja je definisana kao:

$$f(x) = \frac{1}{|\text{mean value of } (TI_{EBi})|} \quad (59)$$

gde je: TI_{EBi} , $i = 1, \dots, n$, niz vrednosti TI tokom pokreta jabučice.

Što se tiče ograničenja, kao prvi uslov je propisan željeni interval kretanja jabučice kao $h_1 = |\varphi_{end} - \varphi_{start} - 75^\circ| = 0$, a kao drugi uslov se zahteva da dimenzije mehanizma moraju biti što manje imajući u vidu raspoloživ prostor unutar glave robota, pa su ograničenja dimenzija mehanizma u formi nejednakosti postavljena – Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Donje i gornje vrednosti optimizacionih varijabli za jabučicu.

	K_0K [mm]	OL [mm]	α_{start} [°]	A [°]
<i>min</i>	15	15	50	50
<i>max</i>	25	25	90	90

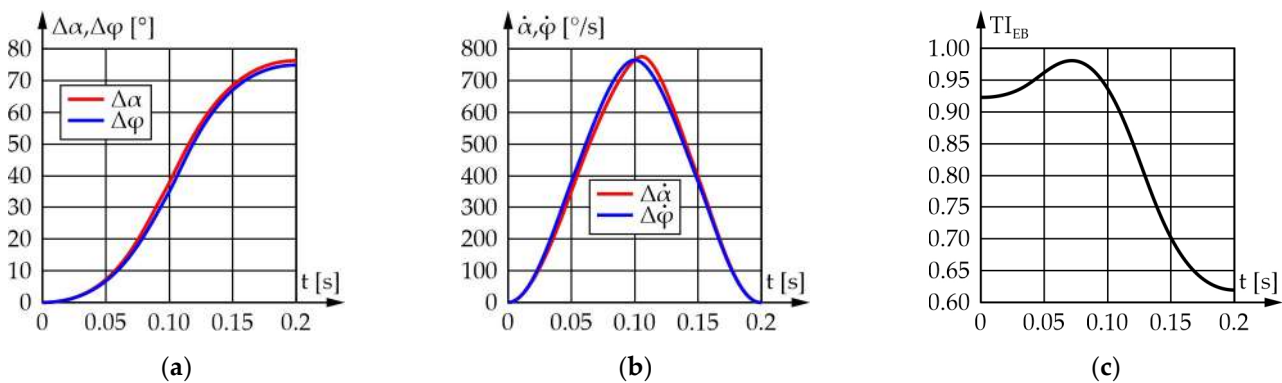
Sledeće veličine su propisane iz konstruktivnih razloga – centar jabučice je usvojen za koordinatni početak $O(0,0,0)$; osa rotacije ulaznog člana je paralelna sa z -osom, pa je $\mathbf{n}_\alpha = (0,0,1)$; osa rotacije izlaznog člana je paralelna sa y -osom, pa je $\mathbf{n}_\varphi = (0,0,1)$; položaj nepokretne tačke K_0 (položaj aktuatora) je $K_0(-80,10,10)$; u početnom položaju, tačka L se nalazi u vertikalnoj xOz ravni, dok je duž OL pod uglom od 120° u odnosu na x -osu, pa je $\mathbf{1}_s = (\overline{OL} \cos 120^\circ, 0, \overline{OL} \sin 60^\circ)$. Na osnovu svega toga, optimalna dimenziona sinteza RSU noge je urađena i rezultati su prikazani u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Dimenzije RSU noge za rotaciju jabučice oko y -ose.

KoK [mm]	KL ¹ [mm]	OL [mm]	α_{start} [°]	A [°]
24.001	78.782	23.185	68.365	76.204

¹ Dužina spojnog člana KL je jednoznačno određena propisanim i optimizovanim vrednostima geometrijskih parametara.

Slika 5.27 prikazuje rezultate simulacije kretanja na osnovu podataka iz Tabele 5.3. Treba napomenuti da $\Delta\alpha$ i $\Delta\varphi$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa α_{start} i φ_{start} , respektivno.

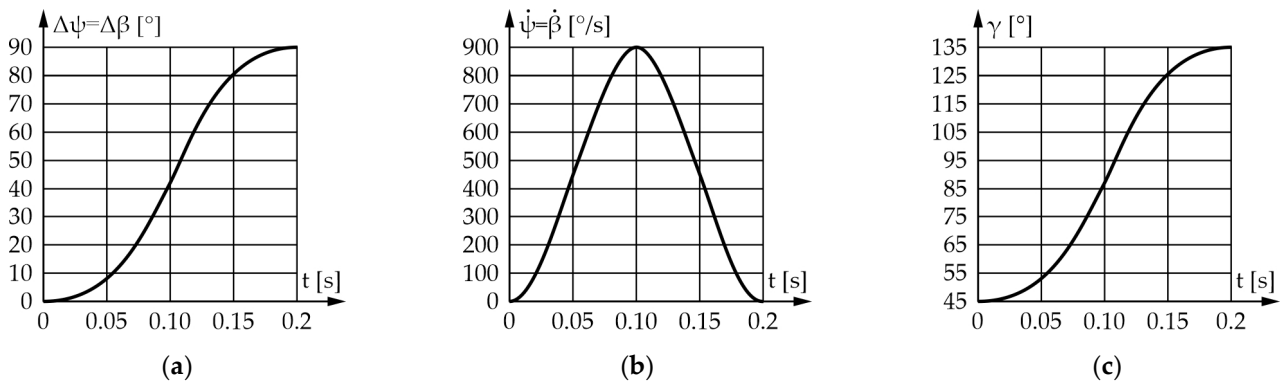


Slika 5.27 Kretanje jabučice oko y -ose: (a) Pomeranje ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog/izlaznog člana; (c) TI za pokrete oka gore-dole.

Prema Slici 5.27, za opseg pokreta jabučice od 75°, aktuator treba da izvrši rotaciju za 76.2°; pritom, maksimalna ugaona brzina jabučice je 769.1°/s, dok je potrebna ugaona brzina aktuatora 770.4°/s; TI je od 0.62 do 0.98, što je zadovoljavajuće.

U slučaju *yaw* rotacije, pogon se realizuje putem ravanskih zglobnih četvorouglova paralelogramske konfiguracije, pa je kretanje jabučice identično kretanju aktuatora ($\psi = \beta$) i ne zavisi od dimenzija mehanizma. Kod ravanskih mehanizama, TI se svodi na ugao prenosa γ koji predstavlja ugao između poluga (pravaca) OJ' , $H'J'$ i OJ'' , $H''J''$, respektivno. Prema [5.46], za poluzne mehanizme preporučene vrednosti ugla prenosa su $\gamma_{min} \geq 45^\circ$ i $\gamma_{max} \leq 135^\circ$. U ovom slučaju, ugao prenosa zavisi samo od ugla položaja ulaznog člana G_0G' i G_0G'' . Na osnovu svega toga, simulacija kretanja je urađena i rezultati su prikazani na Slici 5.28. Treba napomenuti da $\Delta\beta$ i $\Delta\psi$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa β_{start} i ψ_{start} , respektivno.

Prema Slici 5.28, opsezi kretanja i ugaone brzine jabučice i aktuatora su jednaki i iznose 90° i 769.1°/s, respektivno, dok su vrednosti ugla prenosa u granicama od 45° do 145°, što je zadovoljavajuće.



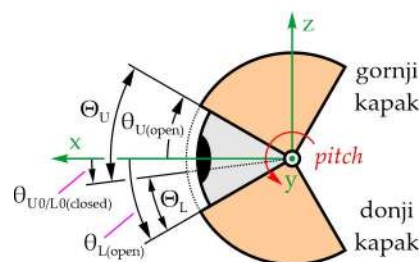
Slika 5.28 Kretanje jabučice oko z-ose: (a) Pomeranje ulaznog/izlaznog člana u odnosu na inicijalni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog/izlaznog člana; (c) TI za pokrete oka zdesna-nalevo.

5.3.2 Mehanizmi očnih kapaka

Najpre se razmatraju mehanizmi očnih kapaka sa neutralnim kantalnim nagibom, a potom i sa pozitivnim kantalnim nagibom.

Neutralan kantalni nagib ($\kappa = 0^\circ$)

Slika 5.29 prikazuje pokrete kapaka. Mogućnost podešavanja intenziteta otvorenosti kapaka omogućava generisanje različitih emocija, a treptanje doprinosi utisku prirodnosti interakcije – radi toga su definisani opsezi i vreme trajanja pokreta za jedan treptaj. U inicijalnom položaju, kapci su pozicionirani pod uglovima $\theta_{L0/U0} = \theta_{L/U(open)} = 35^\circ/-40^\circ$. Gornji kapak se rotira za ugao $\Theta_U = 50^\circ$ do zatvorenog položaja definisanog uglom $\theta_{Uclosed}$, a donji kapak za ugao $\Theta_L = 25^\circ$ do zatvorenog položaja definisanog uglom $\theta_{Lclosed}$. U zatvorenom položaju kapci se dodiruju u ravni koja se nalazi pod uglom $\theta_{L0/U0} = \theta_{L/U(closed)} = 10^\circ$ u odnosu na horizontalnu ravan. Kapci se potom vraćaju u početni položaj. Vreme trajanja za jedan treptaj je usvojeno i iznosi maksimalno 0.25 s.



Slika 5.29 Kretanje gornjeg i donjeg kapka nezavisno od jabučice ($\kappa = 0^\circ$).

Dimenziona sinteza će se izvršiti tako da mehanizmi kapaka ostvare potrebne opsege kretanja $\Theta_{U/L}$ uz što bolji prenos sile. Za mehanizam gornjeg kapka, TI se definiše kao kosinus ugla između pravca spojnog člana 3^0 i pravca brzine tačke veze V^0 , pa je:

$$TI^0_U = \frac{\left| \overline{U^0V^0} \cdot \vec{v}_V^0 \right|}{\left| \overline{U^0V^0} \right| \left| \vec{v}_V^0 \right|} \quad (60)$$

Na sličan način se definiše TI za donji kapak, pa je:

$$TI^0_L = \frac{\left| \overline{R^0T^0} \cdot \vec{v}_T^0 \right|}{\left| \overline{R^0T^0} \right| \left| \vec{v}_T^0 \right|} \quad (61)$$

Zatim se definiše funkcija cilja kao:

$$F(x) = \frac{1}{\left| \text{mean value of } (TI^0_{U/Li}) \right|} \quad (62)$$

gde je $TI^0_{U/Li}$, $i=1, \dots, n$, niz vrednosti indeksa transmisije tokom pokreta kapka.

Opsezi kretanja kapaka su: za gornji kapak $h_1 = |\theta_{Uopen} - \theta_{Uclosed}| - 50^\circ = 0$, dok je za donji $h_2 = |\theta_{Lclosed} - \theta_{Lopen}| - 25^\circ = 0$. Takođe, $TI^0_{U/L}$ ne sme da padne ispod neke minimalne vrednosti (usvojeno 0.5) – $g_1: 0.5 - \min \text{ value of } (TI^0_{U/Li})$.

Optimizacione varijable za gornji kapak su: dužina ulazne poluge $U^0_0U^0$, dužina izlazne poluge O^0V^0 , ugao položaja ulazne poluge u početnom položaju ρ^0_{start} , i opseg kretanja ulazne poluge, tj. ugao $P^0 = |\rho^0_{end} - \rho^0_{start}|$, dok su optimizacione varijable za donji kapak: dužina ulazne poluge $R^0_0R^0$, dužina izlazne poluge O^0T^0 , ugao položaja ulazne poluge u početnom položaju σ^0_{start} , i opseg kretanja ulazne poluge, tj. $\Sigma^0 = |\sigma^0_{end} - \sigma^0_{start}|$.

Oči robota moraju biti smeštene u raspoloživ prostor glave robota, pa su ograničenja dimenzija mehanizma za gornji/donji kapak u formi nejednakosti data – Tabele 5.4 i 5.5.

Tabela 5.4 Gornji kapak – donje i gornje granične vrednosti optimizacionih varijabli ($\kappa = 0^\circ$).

	$U^0_0U^0$ [mm]	O^0V^0 [mm]	ρ^0_{start} [°]	P^0 [°]
<i>min</i>	15	34	220	50
<i>max</i>	25	40	240	90

Tabela 5.5 Donji kapak – donje i gornje granične vrednosti optimizacionih varijabli ($\kappa = 0^\circ$).

	$R^0_0R^0$ [mm]	O^0T^0 [mm]	ρ^0_{start} [°]	Σ^0 [°]
<i>min</i>	15	34	125	25
<i>max</i>	25	40	145	45

Sledeće veličine su propisane iz konstruktivnih razloga – centar jabučice je usvojen za koordinatni početak $O^0(0,0,0)$; ose rotacije ulaznog i izlaznog člana su paralelne sa y -osom, pa je $\mathbf{n}^0_e = \mathbf{n}^0_\sigma = (0,1,0)$ i $\mathbf{n}^0_{\theta L} = \mathbf{n}^0_{\theta U} = (0,1,0)$; položaj nepokretnih tačaka U^0_0 i R^0_0 (položaj aktuatora) je $U^0_0(-100,30,-15)$ i $R^0_0(-100,30,-35)$; u položaju $\theta_{Uclosed}$, tačka V^0 se nalazi u vertikalnoj yOz ravni, dok je član O^0V^0 pod uglom od 60° u odnosu na y -osu, pa je

$\mathbf{v}_s^0 = \left(0, \overline{O^0V^0} \cos 60^\circ, \overline{O^0V^0} \sin 60^\circ\right)$; u položaju $\theta_{L,closed}$, tačka T^0 se nalazi u vertikalnoj yOz ravni, dok je član O^0T^0 pod uglom od -60° u odnosu na y -osu, $\mathbf{t}_s^0 = \left(0, \overline{O^0T^0} \cos 60^\circ, -\overline{O^0T^0} \sin 60^\circ\right)$.

Na osnovu svega, optimalna dimenziona sinteza RSSR mehanizma za gornji/donji kapak je urađena i dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 5.6 i 5.7, respektivno.

Tabela 5.6 Dimenzije RSSR mehanizma za pokretanje gornjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$).

$U^0_0U^0$ [mm]	U^0V^0 ¹ [mm]	O^0V^0 [mm]	ρ^0_{start} [°]	P^0 [°]
21.644	93.034	35.996	228.938	75.330

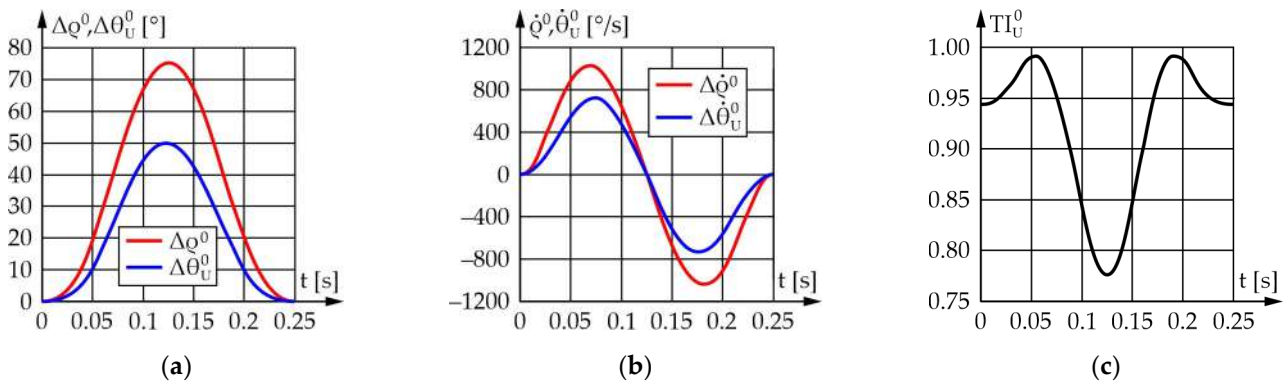
¹ Dužina spojnog člana U^0V^0 je jednoznačno određena propisanim i optimizovanim vrednostima geometrijskih parametara.

Tabela 5.7 Dimenzije RSSR mehanizma za pokretanje donjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$).

$R^0_0R^0$ [mm]	R^0T^0 ¹ [mm]	O^0T^0 [mm]	σ^0_{start} [°]	Σ^0 [°]
23.934	118.044	35.604	129.500	38.945

¹ Dužina spojnog člana R^0T^0 je jednoznačno određena propisanim i optimizovanim vrednostima geometrijskih parametara.

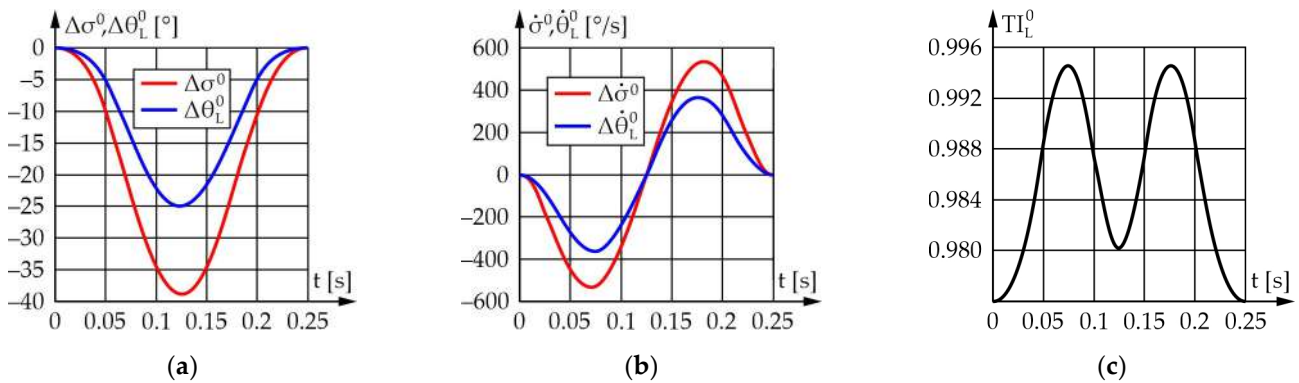
Slika 5.30 prikazuje rezultate simulacije mehanizma gornjeg kapka prema podacima iz Tabele 5.6. Treba napomenuti da $\Delta\rho^0$ i $\Delta\theta^0_U$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa ρ^0_{start} i $\theta^0_{U,open}$, respektivno.



Slika 5.30 Mehanizam gornjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$): (a) Pomeranje ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog/izlaznog člana; (c) TI za jedan treptaj.

Prema Slici 5.30, za opseg kretanja gornjeg kapka od 50° , aktuator treba da izvrši rotaciju za 75.3° ; pritom, maksimalna ugaona brzina gornjeg kapka iznosi $727.9^\circ/s$, dok je potrebna ugaona brzina aktuatora $1034.6^\circ/s$; TI je od 0.62 do 0.98, što je zadovoljavajuće.

Slika 5.31 prikazuje rezultate simulacije mehanizma donjeg kapka prema podacima iz Tabele 5.7. Treba napomenuti da $\Delta\sigma^0$ i $\Delta\theta^0_L$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa σ^0_{start} i $\theta^0_{L,open}$, respektivno.

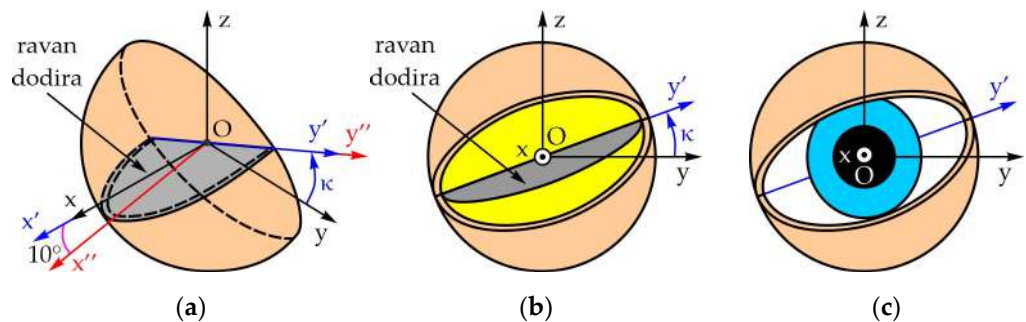


Slika 5.31 Mehanizam donjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$): (a) Pomeranje ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog/izlaznog člana; (c) TI za jedan treptaj.

Prema Slici 5.31, za opseg kretanja donjeg kapka od 25° , aktuator treba da izvrši rotaciju za 38.9° ; pritom, maksimalna ugaona brzina donjeg kapka iznosi $353.4^\circ/\text{s}$, dok je potrebna ugaona brzina aktuatora $535.9^\circ/\text{s}$; TI je od 0.62 do 0.98, što je zadovoljavajuće.

Pozitivan kantalni nagib ($\kappa > 0^\circ$)

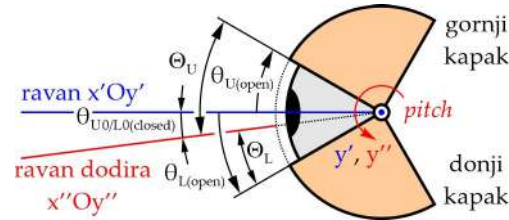
Slika 5.32a prikazuje gornji i donji levi očni kapak u zatvorenom položaju. Kapci su, u odnosu na jabučicu, rotirani u jednoj ravni za ugao κ oko x -ose. U zatvorenom položaju, kapci se međusobno dodiruju u ravni dodira $x''Oy''$, koja je u odnosu na ravan $x'Oy'$ rotirana za ugao od 10° oko y' -ose. Zbog toga kapci prilikom treptanja rotiraju nezavisno oko y' -ose, dok jabučica vrši rotaciju oko y i z -ose, što je prikazano na Slici 5.32b-c.



Slika 5.32 Šematski prikaz kapaka levog oka ($\kappa > 0^\circ$): (a) Kapci u zatvorenom položaju i ravan dodira; (b) Frontalni pogled na kapke u otvorenom – početnom položaju; (c) Frontalni pogled na čitavo oko.

Slika 5.33 prikazuje pokrete kapaka sa pozitivnim kantalnim nagibom. Pokreti su po parametrima identični kao kod kapaka sa neutralnim kantalnim nagibom, a jedina razlika je u tome što se rotacija kapaka vrši oko y' -ose. U početnom položaju, kapci su pozicionirani pod uglovima $\theta_{L0/U0} = \theta_{L/U(\text{open})} = 35^\circ/-40^\circ$ u odnosu na ravan $x'Oy'$. Gornji kapak rotira za ugao $\Theta_U = 50^\circ$ do zatvorenog položaja definisanog uglom $\theta_{U\text{closed}}$, dok donji kapak za ugao $\Theta_L = 25^\circ$ do zatvorenog položaja definisanog uglom $\theta_{L\text{closed}}$. U zatvorenom položaju,

kapci se dodiruju u ravni $x''Oy''$ koja stoji pod uglom $\theta_{L0/U0} = \theta_{L/U(\text{closed})} = 10^\circ$ u odnosu na ravan $x'Oy'$. Kapci se potom vraćaju u početni položaj. Vreme trajanja za jedan treptaj je usvojeno i iznosi maksimalno 0.25 s.



Slika 5.33 Kretanje gornjeg i donjeg kapka nezavisno od očne jabučice ($\kappa > 0^\circ$).

Dimenziona sinteza će se izvršiti tako da mehanizmi kapaka ostvare potrebne opsege kretanja $\Theta_{U/L}$ uz što bolji prenos sile. Za mehanizam gornjeg kapka, TI se definiše kao kosinus ugla između pravca spojnog člana 3^+ i pravca brzine tačke veze V^+ , pa je:

$$TI^+_U = \frac{|\overline{U^+V^+} \cdot \vec{v}^+_V|}{|\overline{U^+V^+}| |\vec{v}^+_V|} \tag{63}$$

Na sličan način se definiše TI za donji kapak, pa je:

$$TI^+_L = \frac{|\overline{R^+T^+} \cdot \vec{v}^+_T|}{|\overline{R^+T^+}| |\vec{v}^+_T|} \tag{64}$$

Zatim se definiše funkcija cilja kao:

$$F(x) = \frac{1}{|\text{mean value of } (TI^+_{U/Li})|} \tag{65}$$

gde je $TI^+_{U/Li}$, $i=1, \dots, n$, niz vrednosti indeksa transmisije tokom pokreta kapka.

Opsezi kretanja kapaka su: za gornji kapak $h_1 = |\theta_{Uopen} - \theta_{Uclosed}| - 50^\circ = 0$, dok je za donji kapak $h_2 = |\theta_{Lclosed} - \theta_{Lopen}| - 25^\circ = 0$. Takođe, $TI^+_{U/L}$ ne sme da padne ispod neke minimalne vrednosti (usvojeno 0.5) – $c_1 = 0.5 - \min \text{ value of } (TI^+_{U/Li})$.

Optimizacione varijable za gornji kapak su: dužina ulazne poluge $U^+_0U^+$, dužina izlazne poluge O^+V^+ , ugao položaja ulazne poluge u početnom položaju ρ^+_{start} , i opseg kretanja ulazne poluge, tj. ugao $P^+ = |\rho^+_{end} - \rho^+_{start}|$, dok su optimizacione varijable za donji kapak: dužina ulazne poluge $R^+_0R^+$, dužina izlazne poluge O^+T^+ , ugao položaja ulazne poluge u početnom položaju σ^+_{start} , i opseg kretanja ulazne poluge, tj. $\Sigma^+ = |\sigma^+_{end} - \sigma^+_{start}|$.

Oči robota moraju biti smeštene u raspoloživ prostor glave robota, pa su ograničenja dimenzija mehanizma za gornji/donji kapak data u Tabeli 5.8 i 5.9, u formi nejednakosti.

Tabela 5.8 Gornji kapak – donje i gornje granične vrednosti optimizacionih varijabli ($\kappa > 0^\circ$).

	$U^+_0U^+$ [mm]	O^+V^+ [mm]	ρ^{+start} [°]	P^+ [°]
<i>min</i>	15	34	70	60
<i>max</i>	25	40	90	80

Tabela 5.9 Donji kapak – donje i gornje granične vrednosti optimizacionih varijabli ($\kappa > 0^\circ$).

	$R^+_0R^+$ [mm]	O^+T^+ [mm]	ρ^{+start} [°]	Σ^+ [°]
<i>min</i>	15	34	60	40
<i>max</i>	25	40	80	60

Sledeće veličine su propisane iz konstruktivnih razloga – centar jabučice je usvojen za koordinatni početak $O^+(0,0,0)$; ose rotacije ulaznog člana su paralelne sa y -osom $\mathbf{n}^{+\sigma} = \mathbf{n}^{+\sigma} = (0,1,0)$; ose rotacije izlaznog člana su paralelne sa y' -osom, pa je $\mathbf{n}^{+\theta L} = \mathbf{n}^{+\theta U} = (0, \cos \kappa, \sin \kappa)$. Za ugao kantalnog nagiba je usvojena vrednost $\kappa = 20^\circ$, dok su realne vrednosti manje, međutim, na ovaj način se analizira najgori slučaj po pitanju funkcionisanja polužnih mehanizama za pogon kapaka. Položaj nepokretnih tačaka U^+_0 i R^+_0 (položaj aktuatora) je $U^+_0(-100,30,-11.5)$ i $R^+_0(-100,-30,-29.5)$; u položaju $\theta_{Uclosed}$, položaj tačke V^+ je definisan na sledeći način: član O^+V^+ se nalazi u vertikalnoj yOz ravni pod uglom od $20^\circ + \kappa = 40^\circ$ u odnosu na z -osu, pa je $\mathbf{v}^+_s = (0, -\overline{O^+V^+} \sin 40^\circ, \overline{O^+V^+} \cos 40^\circ)$; u položaju $\theta_{Lclosed}$, položaj tačke T^+ je definisan: član O^+T^+ se nalazi u vertikalnoj yOz ravni pod uglom od $200^\circ + \kappa = 220^\circ$ u odnosu na z -osu, pa je $\mathbf{t}^+_s = (0, \overline{O^+T^+} \sin 40^\circ, -\overline{O^+T^+} \cos 40^\circ)$.

Na osnovu svega navedenog, optimalna dimenziona sinteza RSSR mehanizma za gornji/donji kapak je urađena i dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 5.10 i 5.11.

Tabela 5.10 Dimenzije RSSR mehanizma za pokretanje gornjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$).

$U^+_0U^+$ [mm]	$U^+V^+{}^1$ [mm]	O^+V^+ [mm]	ρ^{+start} [°]	P^+ [°]
22.458	92.012	36.749	78.269	77.442

¹ Dužina spojnog člana U^+V^+ je jednoznačno određena propisanim i optimizovanim vrednostima geometrijskih parametara.

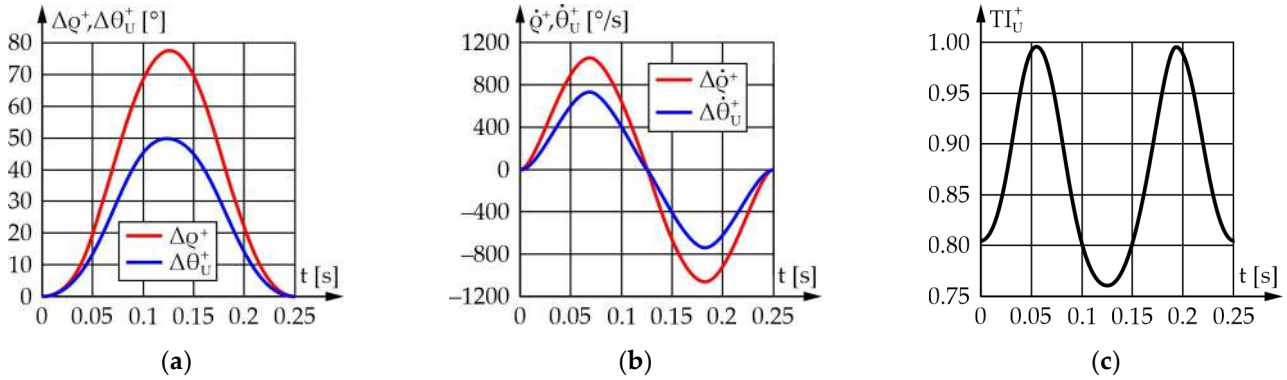
Tabela 5.11 Dimenzije RSSR mehanizma za pokretanje donjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$).

$R^+_0R^+$ [mm]	$R^+T^+{}^1$ [mm]	O^+T^+ [mm]	σ^{+start} [°]	Σ^+ [°]
19.452	78.743	37.904	68.804	52.02

¹ Dužina spojnog člana R^+T^+ je jednoznačno određena propisanim i optimizovanim vrednostima geometrijskih parametara.

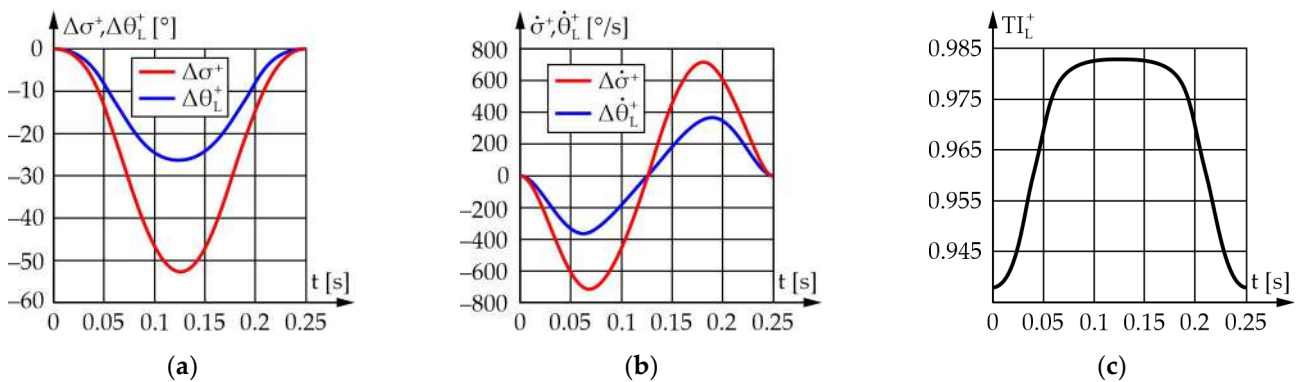
Slika 5.34 prikazuje rezultate simulacije mehanizma gornjeg kapka prema podacima iz Tabele 5.10. Treba napomenuti da $\Delta\rho^+$ i $\Delta\theta^+_{U}$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa ρ^{+start} i θ^+_{Uopen} , respektivno.

Prema Slici 5.34, za opseg kretanja gornjeg kapka od 50° , aktuator treba da izvrši rotaciju za 77.4° ; pritom, maksimalna ugaona brzina gornjeg kapka iznosi $737.1^\circ/s$, dok je potrebna ugaona brzina aktuatora $1063.6^\circ/s$; TI je od 0.864 do 0.939, što je zadovoljavajuće.



Slika 5.34 Mehanizam gornjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$): (a) Pomeranje ulaznog i izlaznog člana u odnosu na početni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog i izlaznog člana; (c) TI za jedan treptaj.

Slika 5.35 prikazuje rezultate simulacije mehanizma donjeg kapka prema podacima iz Tabele 5.11. Treba napomenuti da $\Delta\sigma^+$ i $\Delta\theta_L^+$ predstavljaju vrednosti relativnog pomeranja ulaznog/izlaznog člana u odnosu na početni položaj definisan sa σ^{+start} i θ^{+Lopen} , respektivno.



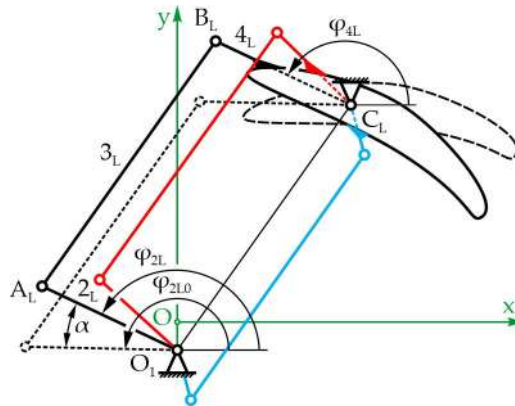
Slika 5.35 Mehanizam donjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$): (a) Pomeranje ulaznog i izlaznog člana u odnosu na početni položaj; (b) Ugaona brzina ulaznog i izlaznog člana; (c) TI za jedan treptaj.

Prema Slici 5.35, za opseg kretanja donjeg kapka od 25° , aktuator treba da izvrši rotaciju za 52.02° ; pritom, maksimalna ugaona brzina donjeg kapka iznosi $363.6^\circ/s$, dok je potrebna ugaona brzina aktuatora $714.44^\circ/s$; TI je od 0.938 do 0.983, što je zadovoljavajuće.

5.3.3 Mehanizmi obrva

Slika 5.36 prikazuje najjednostavnije rešenje za levi mehanizam – paralelogramski zglojni četvorougao čije su naspramne stranice jednake. Prema tome, uglovi položaja ulaznog i

izlaznog člana su jednaki, pa je $\varphi_{2L} = \varphi_{4L}$. Pritom, dužina člana 3_L je tačno određena i jednaka je rastojanju između nepokretnih oslonaca O_1 i C_L . Sa druge strane, dužine poluga 2_L i 4_L moraju biti međusobno jednake, ali njihova dužina nije određena, jer postoji beskonačno mnogo konstrukcionih rešenja.



Slika 5.36 Mehanizam za rotaciju leve obrve.

Imajući u vidu da se član 2 sastoji iz dve međusobno fiksirane poluge 2_L i 2_R koje rotiraju zajedno, ukoliko leva poluga rotira za ugao α , za isti ugao će rotirati i desna poluga (vidi Sliku 5.25). Budući da je radni mehanizam leve obrve paralelogramske konfiguracije, leva obrva će takođe rotirati za ugao α . Dalje, imajući u vidu da su pokreti obrva simetrični u odnosu na vertikalnu osu, sledi da desna obrva mora rotirati za ugao $-\alpha$. Prema tome, projektovanje desnog zglobnog četvorougla se svodi na zadatak sinteze mehanizma kao generatora funkcije, čije rešavanje zahteva metode optimizacija:

$$\varphi_{4R} - \varphi_{4R0} = -\alpha = -(\varphi_{2R} - \varphi_{2R0}) \tag{66}$$

pa je funkcija cilja formirana kao kvadrat razlike uglova rotacije ulaznog i izlaznog člana mehanizma u odnosu na inicijalni – horizontalni položaj:

$$f(x) = \sum_i ((\varphi_{4Ri} - \varphi_{4R0}) - (-\alpha_i))^2 \tag{67}$$

gde je $\alpha_i -20^\circ, -19^\circ, \dots, 0^\circ, \dots, +19^\circ, +20^\circ$, što znači da obrve rotiraju u odnosu na horizontalni položaj za ugao $\pm 20^\circ$.

Usvojene dimenzije mehanizama su: prečnik oka je 60 mm, međuzenično rastojanje je 85 mm, tačke oko kojih rotiraju obrve su $C_R(-30,44)$ mm i $C_L(30,44)$ mm, dok se aktuator nalazi u tački $O_1(0,10)$. Treba napomenuti da su dimenzije jabučica i rastojanje između njih

direktno preuzeti sa lica robota *MARKO*, čije su oči i obrve predmet rekonstrukcije. Promenljive optimizacije su dužine poluga r_{2R} , r_{3R} i r_{4R} , i inicijalni – neutralni položaj ulaznog člana φ_{2R0} . Osim toga, i -ti položaj ulaznog člana se određuje prema:

$$\varphi_{2Ri} = \varphi_{2R0} + \alpha_i \quad (68)$$

Takođe, mehanizam mora biti sastavljiv i efikasan u svim položajima prilikom kretanja. Dinamičku efikasnost mehanizma definiše ugao prenosa koji predstavlja razliku kinematičkih parametara φ_{3R} i φ_{4R} , pa je:

$$\gamma_R = \varphi_{3R} - \varphi_{4R} \quad (69)$$

Sa porastom ugla prenosa, veći deo snage se koristi za savlađivanje radnog opterećenja, a manji za unutrašnja opterećenja, pa je mehanizam efikasniji. Manji uglovi prenosa dovode do zaglavljivanja mehanizma, zbog čega je definisano ograničenje za minimalni ugao prenosa $\gamma_{Rmax} = 55^\circ$. Imajući u vidu raspoloživ prostor između očiju (vidi Sliku 5.24a), *min* i *max* vrednosti ugla φ_{2R0} ulaznog člana su propisane – Tabela 5.12.

Tabela 5.12 Desni mehanizam obrva – donje i gornje granice optimizacionih varijabli.

	r_{2R} [mm]	r_{3R} [mm]	r_{4R} [mm]	φ_{2R0} [°]
<i>min</i>	10	40	10	50
<i>max</i>	20	50	20	90

Na osnovu svega toga, optimalna dimenziona sinteza desnog mehanizma za rotaciju obrva je urađena i dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 5.13.

Tabela 5.13 Dimenzije desnog mehanizma za rotaciju obrva.

r_{2R} [mm]	r_{3R} [mm]	r_{4R} [mm]	φ_{2R0} [°]
10.99	40.00	10.99	70.79

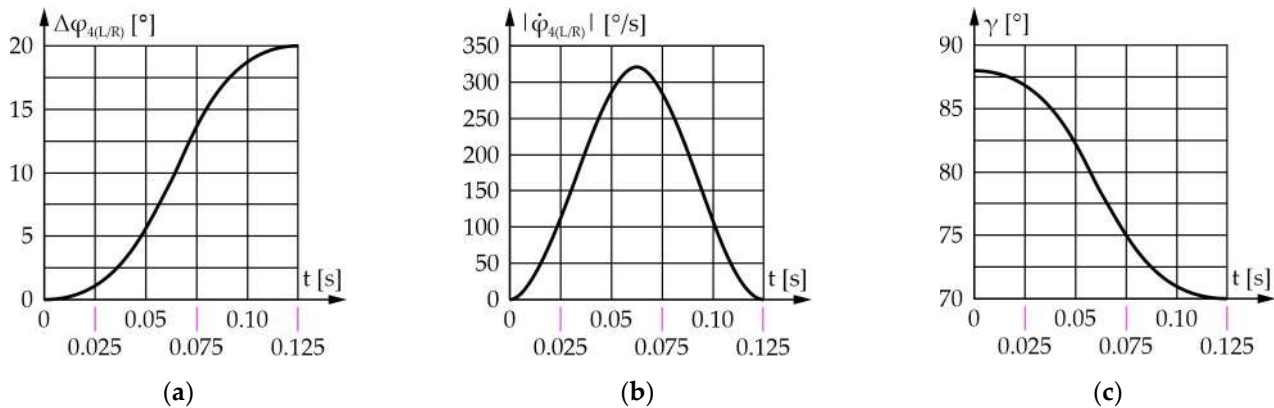
Sa obzirom da je levi mehanizam paralelogramske konfiguracije i imajući u vidu dimenzije desnog mehanizma, za dužine poluga $2L$ i $4L$ se usvaja $r_{2L} = r_{4L} = 10$ mm, pa se dužina spojne poluge levog mehanizma određuje prema:

$$r_{3L} = \sqrt{(x_{O1} - x_{CL})^2 - (y_{O1} - y_{CL})^2} \quad (70)$$

pa se zamenom dobija $r_{3L} = 45.35$ mm.

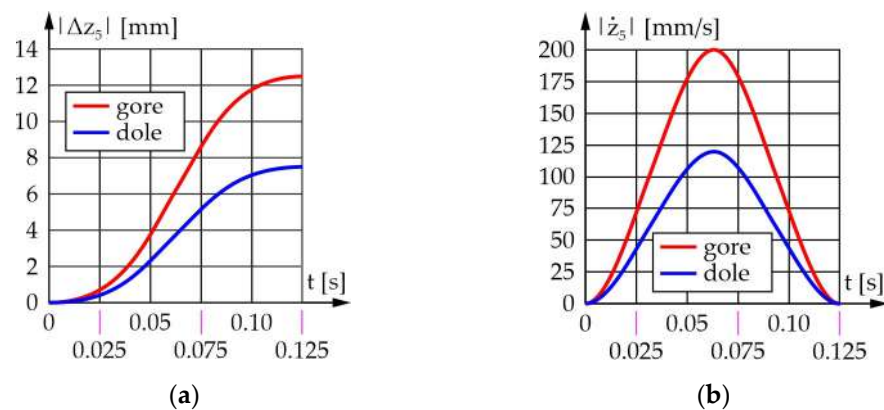
Slika 5.37 prikazuje rezultate simulacije mehanizma za rotaciju obrva. Treba napomenuti da $|\Delta\varphi_{4(L/R)}|$ predstavljaju apsolutne vrednosti relativnog pomeranja izlaznih članova $4L$ i $4R$ u odnosu na inicijalni – horizontalni položaj. Prema Slici 5.37, opsezi kretanja i

ugaone brzine obrva i aktuatora su jednaki i iznose 20° i $320.0^\circ/\text{s}$, respektivno. Sa obzirom da vrednosti ugla prenosa zavise od mehanizama obrva (levi/desni) i smeru rotacije obrva (\pm), Slika 5.37c prikazuje jedan slučaj promene ugla prenosa od ukupno četiri, pri čemu su vrednosti ugla prenosa za sve situacije u propisanim granicama, tj. od 67° do 110° .



Slika 5.37 Mehanizam za rotaciju obrva: (a) Pomeranje ulaznog/izlaznog člana – apsolutne vrednosti; (b) Ugaona brzina ulaznog/izlaznog člana – apsolutne vrednosti; (c) TI za rotaciju desne obrve nadole

Slika 5.38 prikazuje rezultate simulacije kretanja izlaznog člana mehanizma za podizanje i spuštanje obrve. Treba napomenuti da $|\Delta z_5|$ predstavlja apsolutne vrednosti relativnog pomeranja izlaznog člana u odnosu na inicijalni položaj mehanizma.



Slika 5.38. Mehanizam za podizanje i spuštanje obrva: (a) Pomeranje izlaznog člana – apsolutne vrednosti; (b) Ugaona brzina izlaznog člana – apsolutne vrednosti.

Prema Slici 5.38a, ukupan vertikalni hod obrve iznosi 20 mm, od čega je 12.5 mm za podizanje i 7.5 mm za spuštanje. Slika 5.38b prikazuje maksimalne brzine izlaznog člana mehanizma za refleksne pokrete obrva simulirajući emociju straha – brzina podizanja obrva je tada 200.0 mm/s , dok za spuštanje iznosi 120 mm/s , što je uporedivo sa [5.47].

5.4 Rezultati

Tabela 5.14 sumira i prikazuje rezultate strukturne i dimenzione sinteze pogonskih sistema jabučica, kapaka i obrva. Treba napomenuti da ugaona brzina ulaznog člana mehanizma za podizanje i spuštanje obrva direktno zavisi od parametara mehanizma sa navojnim vretenom, kao što su prečnik vretena, vrsta navoja i korak, ugao zavojnice i broj hodova zavojnice – vidi Sliku 5.24b, pa se na osnovu toga lako može odrediti.

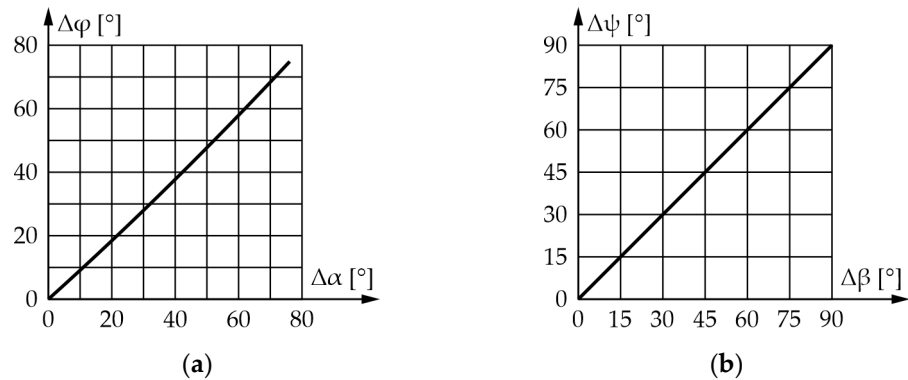
Tabela 5.14 Struktura i kinematički parametri pogonskih mehanizama jabučice, kapaka i obrva.

Parametar	Očne jabučice		Gornji kapci	Donji kapci	Obrve	
Vrsta pokreta	Vertikalne sakade (oko y -ose)	Horizontalne sakade (oko z -ose)	Jedan treptaj (oko y -ose)	Jedan treptaj (oko y -ose)	Rotacija (oko x -ose)	Podizanje / spuštanje (duž x -ose)
Vrsta mehanizma	2 <i>RSU</i> noge nezavisne ili međusobno povezane <i>RRRR</i> paralelogramskim mehhanizmom, ukupno 2 <i>DoF</i> ili 1 <i>DoF</i>		2 <i>RSSR</i> nezavisne zglobne veze, ukupno 2 <i>DoF</i>	2 <i>RSSR</i> nezavisne zglobne veze, ukupno 2 <i>DoF</i>	7-člani ravanski mehanizam za nezavisnu i/ili istovremenu rotaciju i translaciju obrva, ukupno 2 <i>DoF</i>	
Kretanje izlaznog člana	75° (od -30° do 45°)	90° (od -45° do 45°)	±50° (otvaranje i zatvaranje)	±25° (otvaranje i zatvaranje)	±20° (levo/desno)	+12.5 mm / -7.5 mm (gore/dole)
Vreme trajanja pokreta	0.2 s (gore/dole)	0.2 s (desno-levo)	0.125 s / 0.125 s (otvaranje i zatvaranje)	0.125 s / 0.125 s (otvaranje i zatvaranje)	0.125 s / 0.125 s (levo/desno)	0.125 s / 0.125 s (gore/dole)
Max. brzina na izlaznom članu	769.1°/s	899.5°/s	727.9°/s	353.4°/s	320.0°/s	200.0 mm/s / 120.0 mm/s (gore/dole)
Kretanje ulaznog člana	76.2°	90°	75.3° (za $\kappa = 0^\circ$) 77.4° (za $\kappa = 20^\circ$)	38.9° (za $\kappa = 0^\circ$) 52.02° (za $\kappa = 20^\circ$)	20°	mehanizam sa navojnim vretenom ¹
Max. brzina na ulaznom članu	770.4°/s	899.5°/s	1034.6°/s (za $\kappa = 0^\circ$) 1063.6°/s (za $\kappa = 20^\circ$)	535.9°/s (za $\kappa = 0^\circ$) 714.4°/s (za $\kappa = 20^\circ$)	320.0°/s	

¹ Ulazni parametri direktno zavise od karakteristika navoja/vretena mehanizma sa navojnim vretenom – vidi Sliku 5.24b.

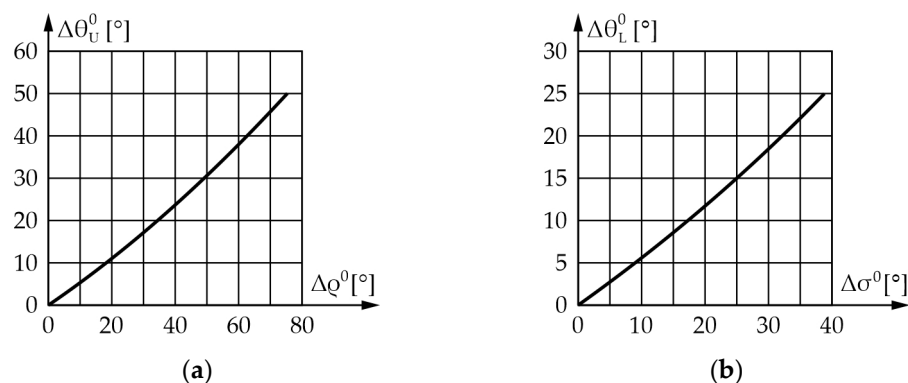
Prema Tabeli 5.14, može se zaključiti da su vrednosti kinematičkih parametara očnih kapaka sa pozitivnim i negativnim kantlnim nagibom veoma slični. Značajnija razlika postoji samo u slučaju donjeg kapka sa pozitivnim kantlnim nagibom gde je potreban veći hod aktuatora (oko 30%) za realizaciju istog pokreta, ali to ne predstavlja problem. Dalje, radi procene uticaja na upravljački sistem, formirane su zavisnosti promene položaja izlaznog/ulaznog člana mehanizama jabučica i kapaka. Zbog strukture mehanizama za rotaciju jabučica u horizontalnoj ravni, kao i mehanizama za rotaciju i translaciju obrva, zavisnost promene relativnih pomeranja izlaznog/ulaznog člana u sva tri slučaja je po prirodi linearna, pa je $\Delta\psi = \Delta\beta$, $\Delta\varphi_{4(L/R)} = \Delta\varphi_{2(L/R)}$ i $\Delta z_5 = c \cdot$ ugaoni pomeraj aktuatora, gde je $c = const$.

Slika 5.39a prikazuje funkciju promene ugla rotacije jabučica u vertikalnoj ravni $\Delta\varphi$ u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\alpha$. Zavisnost je bliska linearnoj, nelinearnost – najveće odstupanje od prave linije koja spaja početnu i krajnju tačku grafika u odnosu na puni opseg, iznosi svega 2.38%. Slika 5.39b prikazuje funkciju promene ugla rotacije jabučica u horizontalnoj ravni $\Delta\psi$ u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\beta$ – zbog strukture mehanizma, zavisnost je linearna.



Slika 5.39 Zavisnost promene položaja ulaznog/izlaznog člana mehanizma očnih jabučica: (a) $\Delta\varphi/\Delta\alpha$ za rotaciju u vertikalnoj ravni; (b) $\Delta\psi/\Delta\beta$ za rotaciju u horizontalnoj ravni.

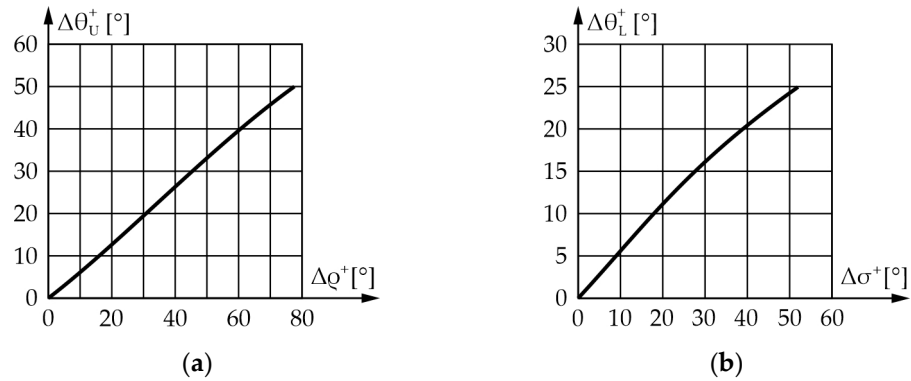
Slika 5.40a prikazuje funkciju promene ugla rotacije gornjeg kapka $\Delta\theta^0_U$, za $\kappa = 0^\circ$, u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\rho^0$, dok Slika 5.40b prikazuje funkciju promene ugla rotacije donjeg kapka $\Delta\theta^0_L$, za $\kappa = 0^\circ$, u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\sigma^0$. U oba slučaja je utvrđena nelinearnost od 5.86% i 4.94% punog opsega respektivno, što je zadovoljavajuće.



Slika 5.40. Zavisnost promene položaja ulaznog/izlaznog člana mehanizma očnih kapaka: (a) $\Delta\theta^0_U/\Delta\rho^0$ za rotaciju gornjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$); (b) $\Delta\theta^0_L/\Delta\sigma^0$ za rotaciju donjeg kapka ($\kappa = 0^\circ$).

Slika 5.41a prikazuje funkciju promene ugla rotacije gornjeg kapka $\Delta\theta^{+}_U$, za $\kappa = 20^\circ$, u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\rho^+$, dok Slika 5.41b pri-

kazuje funkciju promene ugla rotacije donjeg kapka $\Delta\theta^+_L$, za $\kappa = 20^\circ$, u zavisnosti od promene ugla položaja ulaznog člana mehanizma $\Delta\sigma^+$. U oba slučaja je utvrđena nelinearnost od 2.73% i 7.05% punog opsega respektivno, što je zadovoljavajuće.



Slika 5.41. Zavisnost promene položaja ulaznog/izlaznog člana mehanizma očnih kapaka: (a) $\Delta\theta^+_u/\Delta\rho^+$ za rotaciju gornjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$); (b) $\Delta\theta^+_L/\Delta\sigma^+$ za rotaciju donjeg kapka ($\kappa = 20^\circ$).

Na osnovu svega toga, zaključuje se da su dobijene promene vrlo bliske linearnim, što je veoma značajno sa aspekta upravljanja. U nastavku se razmatra struktura upravljačkog sistema i predlažu komponente za upravljanje mehanizmima jabučica, kapaka i obrva. Takođe, razmatra se i struktura servo kontrolera za upravljanje jednim aktuatorom u okviru predloženog upravljačkog sistema.

Reference

- 5.1. Vukobratović, M.: *Applied Dynamics of Manipulation Robots: Modelling, Analysis and Examples*. Springer-Verlag, Berlin (1989).
- 5.2. Suysinx, P., Geradin, M.: *An Introduction to Robotics: Mechanical Aspects*. University in Liège, Liège (2004).
- 5.3. Su, H., Dickstein-Fischer, L., Harrington, K., Fu, Q., Lu, W., Huang, H., Cole, G., Fischer, G.S.: Cable-driven elastic parallel humanoid head with face tracking for Autism Spectrum Disorder interventions. In: *Proceedings of the IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology (EMB 2010)*, pp. 467–470. IEEE Xplore, New York (2010).
- 5.4. Beira, R., Lopes, M., Praça, M., Santos-Victor, J., Bernardino, A., Metta, G., Becchi, F., Saltarén, R.: Design of the robot-cub (iCub) head. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, pp. 94–100. IEEE Xplore, New York (2006).
- 5.5. Sulzer, J.S., Peshkin, M.A., Patton, J.L.: Catastrophe and stability analysis of a cable-driven actuator. In: *Proceedings of the IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS 2006)*, pp. 2429–2433. IEEE Xplore, New York (2006).
- 5.6. Lee, J.J.: *Tendon-Driven Manipulators: Analysis, Synthesis, and Control*. PhD Thesis, University of Maryland, College Park (1991).
- 5.7. Kilic, E., Dölen, M., Koku, A.B.: Analysis and estimation of motion transmission errors of a timing belt drive. *Turk. J. Elec. Eng. Comp. Sci.* **18**(5), 11-883–11-897 (2010).
- 5.8. Tanasijević, S.: *Mechanical Drives: Chain Drives, Timing Belt Drives, Cardanic Drives (in Serbian)*. Naučna knjiga, Belgrade (1989).
- 5.9. Lee, Y.H., Lee, J.J.: Modeling of the dynamics of tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons. *Mech. Mach. Theory* **38**(12), 1431–1447 (2003).
- 5.10. Palli, G., Borghesan, G., Melchiorri, C.: Modeling, identification, and control of tendon-based actuation systems. *IEEE T. Robot.* **28**(2), 277–290 (2011).
- 5.11. Garrec, P.: Design of an anthropomorphic upper limb exoskeleton actuated by ball-screws and cables. *U.P.B. Sci. Bull.* **72**(2), 23–34 (2010).
- 5.12. Biamino, D., Cannata, G., Maggiali, M., Piazza, A.: MAC-EYE: A tendon driven fully embedded robot eye. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2005)*, pp. 62–67. IEEE Xplore, New York (2006).

- 5.13. Wang, X.Y., Zhang, Y., Fu, X.J., Xiang, G.S.: Design and kinematic analysis of a novel humanoid robot eye using pneumatic artificial muscles. *J. Bionic Eng.* **5**(3), 264–270 (2008).
- 5.14. Tsai, L.W.: Design of tendon-driven manipulators. *ASME. J. Mech. Des.* **117**(B), 80–86 (1995).
- 5.15. Wang, W., Yu, L., Yang, J.: Toward force detection of a cable-driven micromanipulator for a surgical robot based on disturbance observer. *Mech. Sci.* **8**(2), 323–335 (2017).
- 5.16. Lu, Y., Fan, D.: Non-intervene cable wrapping method for precise cable drive. In: *Proceedings of the International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM 2012)*, pp. 378–383. IEEE Xplore, New York (2012).
- 5.17. Rahmati, Z., Behzadipour, S.: Analysis and design of a cable-driven mechanism for a spherical surgery robot. In: *Proceedings of the Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME 2015)*, pp. 221–226. IEEE Xplore, New York (2016).
- 5.18. Mazumdar, A., Spencer, S.J., Hobart, C., Dabbling, J., Blada, T., Dullea, K., Kuehl, M., Buerger, S.P.: Synthetic fiber capstan drives for highly efficient, torque controlled, robotic applications. *IEEE Robot. Automat. Lett.* **2**(2), 554–561 (2017).
- 5.19. Xie, X., Jiang, X., Fan, S., Fan, D.: Compact design of a novel precise cable drive mechanism with high precision and large torque-to-weight ratio. *Mech. Sci.* **10**(1), 47–56 (2019).
- 5.20. Xue, R., Du, Z., Yan, Z., Ren, B.: An estimation method of grasping force for laparoscope surgical robot based on the model of a cable-pulley system. *Mech. Mach. Theory* **134**, 440–454 (2019).
- 5.21. Xue, R., Ren, B., Yan, Z., Du, Z.: A cable-pulley system modeling based position compensation control for a laparoscope surgical robot. *Mech. Mach. Theory* **118**, 283–299 (2017).
- 5.22. Grosu, S., Rodriguez-Guerrero, C., Grosu, V., Vanderborght, B., Lefeber, D.: Evaluation and analysis of push-pull cable actuation system used for powered orthoses. *Front. Robot. AI* **5**, 105-1–105-11 (2018).
- 5.23. Billier, A., Stellan, G., Metta, G., Parmiggiani, A.: Robot hand design with linkage and push-pull cable transmission. In: *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2019)*, pp. 1281–1286. IEEE Xplore, New York (2019).
- 5.24. Guerrero, C.R., Grosu, V., Grosu, S., Leu, A., Ristic-Durrant, D., Vanderborght, B., Lefeber, D.: Torque control of a push-pull cable driven powered orthosis for the CORBYS platform. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2015)*, pp. 25–30. IEEE Xplore, New York (2015).
- 5.25. Kuzmanović, S., Rackov, M.: *Gearmotors with Low Backlash in Army Engineering (in Serbian)*. Military Technical Institute, Belgrade (2012).
- 5.26. Illenberger, C.M., Tobie, T., Stahl, K.: High-performance plastic gears. In: Radzevich, S.P. (eds.) *Recent Advances in Gearing*, pp. 143–182. Springer, Cham (2022).
- 5.27. Mao, K., Langlois, P., Madhav, N., Greenwood, D., Millson, M.: A comparative study of polymer gears made of five materials. *Gear Technol.* **2019**(11-12), 68–72 (2019).
- 5.28. Jain, M., Patil, S.: A review on materials and performance characteristics of polymer gears. *P. I. Mech. Eng. C-J. Mec.* **237**(12), 2762–2790 (2023).
- 5.29. Wang, Y., Li, W., Togo, S., Yokoi, H., Jiang, Y.: Survey on main drive methods used in humanoid robotic upper limbs. *Cyborg Bionic Syst.* **2021**, 9817487-1–9817487-12 (2021).
- 5.30. Alfayad, S., El Asswad, M., Abdellatif, A., Ouezdou, F.B., Blanchard, A., Beaussé, N., Gaussier, P.: HYDROiD humanoid robot head with perception and emotion capabilities: Modeling, design, and experimental results. *Front. Robot. AI* **3**, 15-1–15-16 (2016).
- 5.31. Nikolić, V.: *Machine Elements: Theory, Calculation, Examples (in Serbian)*. Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac (2004).
- 5.32. Miltenović, V.: *Machine Elements: Shapes, Calculation, Application (in Serbian)*. Faculty of Mechanical Engineering, Niš (2009).
- 5.33. Janković, D.: *Joint Transmissions: Theory, Design, Calculation (in Serbian)*. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade (1995).
- 5.34. Wang, F., Jones, C.L., Shastri, M., Qian, K., Kamper, D.G., Sarkar, N. Design and evaluation of an actuated exoskeleton for examining motor control in stroke thumb. *Adv. Robotics* **30**(3), 165–177 (2016).
- 5.35. Rodriguez-Cianca, D., Rodriguez-Guerrero, C., Verstraten, T., Jimenez-Fabian, R., Vanderborght, B., Lefeber, D.: A flexible shaft-driven Remote and Torsionally Compliant Actuator (RTCA) for wearable robots. *Mechatronics* **59**, 178–188 (2019).
- 5.36. Zlokolica, M., Čavić, M., Kostić, M.: *Machine Mechanics (in Serbian)*. Faculty of Technical Sciences (2004).
- 5.37. Čavić, M., Penčić, M., Rackov, M., Dorić, J., Lu, Z.: Graphical synthesis of 6-bar dwell linkage mechanism. *FME Trans.* **47**(2), 226–233 (2019).
- 5.38. Hsu, K.L., Chung, J.Y.: A modular method for mechanical error analysis of planar linkages composed of class II Assur group kinematic chains. *J. Mech. Robot.* **14**(1), 014503-1–014503-12 (2022).
- 5.39. Čavić, M., Penčić, M., Oros, D., Čavić, D., Orošnjak, M., Rackov, M.: High-capacity stacking apparatus for thermoforming machine—Part I: Synthesis of intermittent mechanisms as stacker driving units. *Adv. Mech. Eng.* **13**(8), 1–18 (2021).
- 5.40. Penčić, M., Čavić, M., Oros, D., Čavić, D., Orošnjak, M., Karanović, V.: High-capacity stacking apparatus for thermoforming machine—Part II: Structural design of the adjustable stacker driving mechanism. *Adv. Mech. Eng.* **13**(10), 1–19 (2021).
- 5.41. Chen, B.J., Wen, S.F., Liu, G.H., Lee, Y.Y., Shih, W.P., Dai, C.L., Dai, C.A., Hu, Y.C.: Humanoid eye robot with angle control and image registration. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011)*, pp. 1177–1182. IEEE Xplore, New York (2012).

-
- 5.42. Olson, S., Abd, M., Engeberg, E.D.: Human-inspired robotic eye-hand coordination enables new communication channels between humans and robots. *Int. J. Soc. Robot.* **13**, 1033–1046 (2021).
 - 5.43. Ke, X., Qiu, B., Xin, J., Yun, Y.: Vision development of humanoid head robot SHFR-III. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2015)*, pp. 1590–1595. IEEE Xplore, New York (2016).
 - 5.44. Sutherland, G., Roth, B.: A transmission index for spatial mechanisms. *ASME J. Eng. Ind.* **95**(2), 589–597 (1973).
 - 5.45. Chen, C., Angeles, J.: Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages. *Mech. Mach. Theory* **42**(9), 1225–1237 (2007).
 - 5.46. Balli, S.S., Chand, S.: Transmission angle in mechanisms (Triangle in mech). *Mech. Mach. Theory* **37**(2), 175–195 (2002).
 - 5.47. Fitzpatrick, R.: Designing and Constructing an Animatronic Head Capable of Human Motion Programmed using Face-Tracking Software. MSc Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester (2010).
-

Sadržaj

6 Električni sistem.....	75
6.1 Pregled aktuatora i senzora.....	75
6.1.1 Elektrohidraulički aktuatori.....	75
6.1.2 Elektropneumatski aktuatori.....	76
6.1.3 Električni aktuatori.....	79
6.1.4 Prednosti i nedostaci.....	90
6.2 Arhitektura upravljačkog sistema.....	91
6.3 Izbor aktuatora.....	94
Reference.....	96

6 Električni sistem

Aktuatori za pokretanje mehaničkih sistema očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, treba da ispune visoke zahteve u pogledu: (i) kinematike – bidirekciono kretanje u različitim opsezima, kao i *min/max* brzine i ubrzanja što je od suštinskog značaja za glatke pokrete praćenja i rapidne – sakadične pokrete, (ii) strukture – bezazornost aktuatora, (iii) sensorike i upravljanja – visoka tačnost pozicioniranja i ponovljivost pokreta, zatvorena upravljačka sprega, (iv) veličine i mase – male dimenzije i mase aktuatora i čitavog upravljačkog sistema imajući u vidu raspoloživ prostor u glavi robota za smeštaj mehaničkog sistema i aktuatora sa upravljanjem.

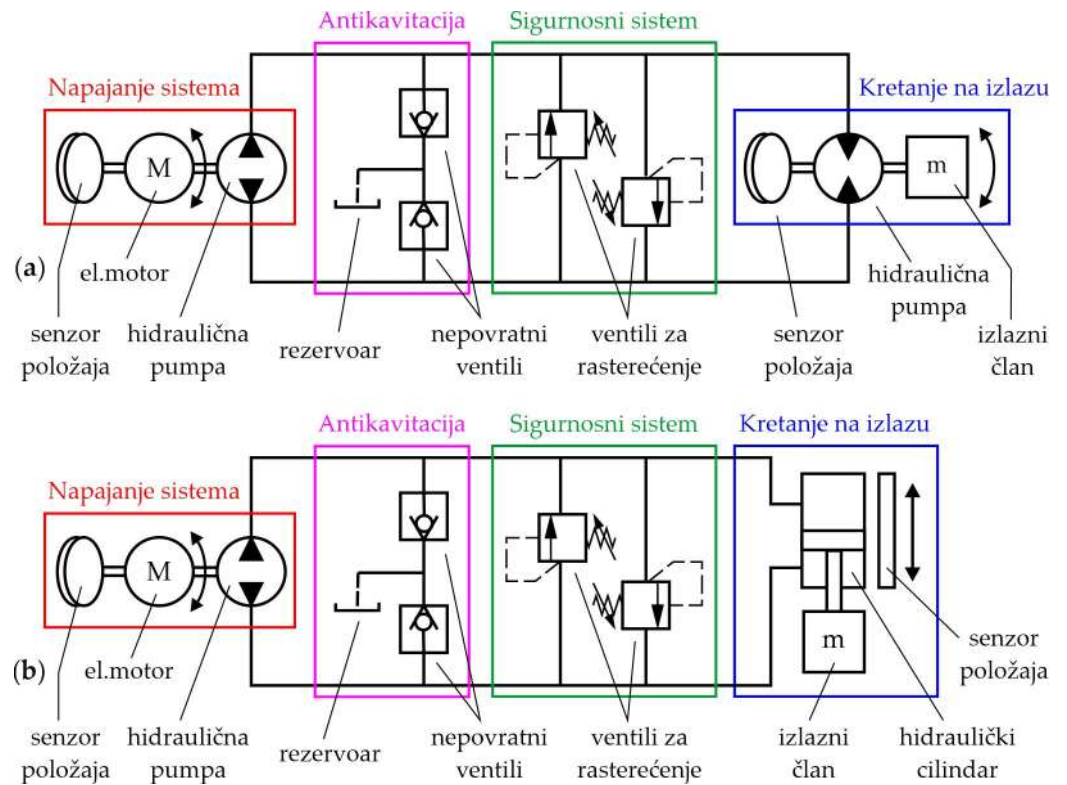
6.1 Pregled aktuatora i senzora

Pregled aktuatora će obuhvatiti tri osnovne grupe: (i) elektrohidraulički aktuatori, (ii) elektropneumatski aktuatori i (iii) električni *DC* aktuatori; treba napomenuti da električni aktuatori naizmjenične struje (eng. *Alternating Current – AC*) prevazilaze zahteve u pogledu veličine i mase, kao i drugih parametara, pa se zbog toga zanemaruju.

6.1.1 Elektrohidraulički aktuatori

Slika 6.1 prikazuje sistem elektrohidrauličkog aktuatora (eng. *Electro-Hydraulic Actuator – EHA*) koji se sastoji od: (i) pogona sa pumpom, elektromotorom i upravljanjem, (ii) hidrauličkih vodova, ventila i regulatora, i (iii) aktuatora sa upravljanjem i sensorima. Za razliku od klasičnih hidrauličkih sistema, pumpa kod *EHA* sistema je direktno povezana na aktuator bez dodatnih razvodnika – u nekim slučajevima postoji samo komandni razvodnik [6.1]. Zahvaljujući tome, *EHA* sistemi su krajnje jednostavni i laki za upotrebu (povratna sprega). U zavisnosti od problema kretanja, aktuator u elektrohidrauličkom sistemu može

biti rotacioni ili linearni. Hidraulički deo omogućava generisanje velikih sila na izlazu, dok elektro deo prima povratne informacije od senzora pozicije sa izlaznog člana omogućavajući upravljanje hidrauličnom pumpom.



Slika 6.1 Sistem elektrohidrauličkog aktuatora: (a) Rotacioni; (b) Linearni.

EHA sisteme karakterišu dobra upravljivost, visoka efikasnost, kompaktnost sistema, i veoma značajno, ne postoje smetnje u komunikaciji između aktuatora kao kod električnih sistema [6.2]. Treba napomenuti da *EHA* sistem na izlaznom članu može da proizvede slične ili bolje performanse (sila pritiska ili obrtni moment) nego električni sistem. Iako su mnogi roboti sa nogama koristili električne aktuatore i mehaničke prenosnike visokih performansi [6.3–6.5], osnaživanje zglobova i umanjenje veličine pogona upotrebom *EHA* sistema – npr. *BigDog* i *Atlas* roboti [6.6–6.8], privlači sve veću pažnju istraživača. U nastavku se razmatra primena *EHA* tehnologije kod hidrauličkih pogonjenih robota sa fokusom na komponente i upravljanje.

Novi hidraulički sistem za aktuaciju (eng. *Hydraulic Actuating System – HAS*), zasnovan na *EHA* sistemu, a implementiran na egzoskeletu za donji deo dela, prikazan je u [6.1]; Sistem se sastoji od elektro servomotora, brze mikro pumpe, cilindra, rezervoara specijalne konstrukcije, kao i ventilskog bloka; autori su razvili dvosmernu klipnu pumpu, rezervoar

bez pritiska sa fleksibilnom strukturom, ventilski blok sa ventilom za regulaciju protoka, direkcionim upravljačkim ventilom i ventilom sigurnosnim – kao rezultat toga, ukupna masa inovativnog *HAS* sistema je značajno redukovana, uz dobar frekvencijski odziv, pri čemu su ispunjeni postavljeni zahtevi u pogledu kinematike.

Električno pogonjen ventil od mekog materijala (eng. *soft valve*) za upravljanje hidrauličkim aktuatorom je prikazan u [6.9]; aktuator je formiran od mekog materijala (eng. *Soft Hydraulic Actuator – SHA*) sa kanalima od dinamičkog dielektričnog elastomera kroz koje protiče fluid (mezoskale 0.1–1 mm); ovi aktuatori su lagani, imaju mogućnost upravljanja pritiskom i protokom fluida, i veoma kratko vreme odziva što je od izuzetnog značaja.

Elektrohidraulički aktuatori, dizajnirani po uzoru na biološke principe nogu pauka radi brze akcije mekih zglobova (eng. *Soft-Actuated Joint – SAJ*), prikazani su u [6.10]; sistem je sposoban za brzu akciju, a u poređenju sa malom masom koju ima, može da ostvari velike sile i ugaone pomeraje; elektrohidraulički *SAJ* proizvodi značajne vrednosti momenta i ima veliki propusni opseg uz nisku potrošnju energije – vreme akcije je 12 ms, dok za vraćanje u početni položaj iznosi 31 ms; ovakav sistem, zahvaljujući električnim vodovima, eliminiše potrebu za vodovima fluida i upravljačkim ventilima; problemi predloženog sistema su komplikovana realizacija i delaminacija tokom velikih vrednosti momenta na izlaznom članu pri kontinualnom režimu i malim uglovima pomeranja.

Razvoj dvoprstne robotske hvataljke sa povratnom spregom aktuirane *EHA* sistemom je prikazan u [6.11]; za aktuiranje hvataljke je upotrebljena hidraulička krilna pumpa sa jednosmernim motorom *Faulhaber BP4* bez četkica i planetarni prenosnik *32/3R*; inovaciju predstavlja upotreba magnetoreološkog fluida kao pogonskog fluida, koji omogućava hvataljci veću brzinu kretanja i promenu krutosti prilikom pomeranja prstiju – zbog robustnosti prstiju, postoji problem sa hvatanjem i manipulacijom objektima.

Analiza malih i brzih elektrohidrostatskih klipno-aksijalnih aktuatora – pumpi, prikazana je u [6.12]; potencijalni problemi ovih pumpi su: kavitacija, pulsacija protoka i pritiska, nagibno kretanje rotirajuće grupe i problem pregrevanja, dok su moguća rešenja: upotreba novih materijala za sprečavanje kavitacije i pregrevanja, napredne tehnologije podmazivanja, predviđanje povećanja temperature i bolje upravljanje za male pumpe.

Razvoj prototipa male pumpe visokog pritiska za *EHA* sisteme je prikazan u [6.13]; od senzora su upotrebljeni linearni enkoder za detekciju položaja klipa, rotacioni enkoder za detekciju brzine motora, kao i senzori pritiska i struje; autori su najpre analizirali gubitke kod internog curenja i gubitke viskoznog trenja – zazor unutar pumpe u velikoj meri

utiče na interno curenje fluida i gubitak viskoznoeg trenja; potom, autori su poredili dve različite pumpe (zupčasta i trohoidna) sa kućištima od keramike i aluminijuma – zaključak je da su gubici internog curenja redukovani za 56.2% upotrebom kućišta od keramike.

Mehanizam i upravljanje radom humanoidnog robota *HIDRA*, čije je čitavo telo ak-tuirano elektrohidrostatskim aktuatorima, prikazani su u [6.14]; robot ima glavu sa 1 *DoF*, trup sa 2 *DoF*, ruke sa 16 *DoF*, šake sa 10 *DoF* i noge sa 12 *DoF*, što je ukupno 41 *DoF*; za pokretanje hidrauličnih pumpi su upotrebljeni *DC* motori bez četkica, upravljani putem strujnog signala, dok je za podešavanje pritiska koji deluje na cilindar upotrebljen regulator pritiska; takođe, realizovana je i upravljačka povrtana sprega; šaka ovog robota ima četiri prsta sa tetivama koje pokreće mini linearni *EHA* sistem pozicioniran u podlaktici [6.15]; radi što manjih gubitaka energije, postojeći sistem "*HIDRA-in*" je unapređen novim *EHA* sistemom koji se sastoji od grupa cilindara sa pet klipova bez klipnjače i pet pumpi; nova grupa cilindara ima 80% manje gubitka energije, a daljim poboljšanjem krutosti kompo-nenti pumpe, gubici energije su redukovani za 93%.

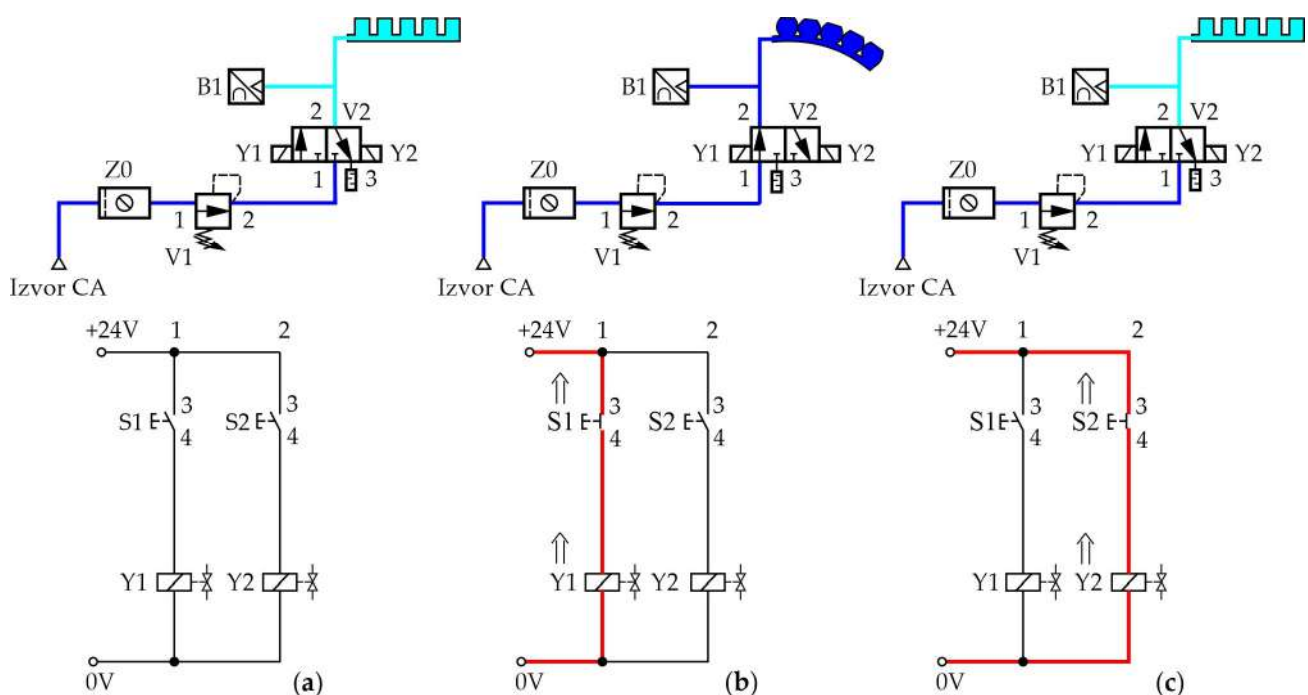
Poređenje električnih i hidrauličnih servomotora sa različitim aspekata (obrotni mo-ment, brzina rotacije, snaga na izlazu, gustina i stepen snage), prikazano je u [6.16]; rezul-tati ukazuju da su hidraulični motori superiorniji u pogledu gustine i stepena snage, dok su elektromotori manji i imaju brži odziv; razlike u performansama hidrauličnih i električ-nih motora zavise od veličine motora – električni motori su brži od hidrauličnih u poređe-nju sa sličnim gustinama snage.

Trendovi u hidraulici sa fokusom na noge robota – humanoidi, roboti spasiooci i ve-like mašinerije, prikazani su u [6.17]; inovacije hidrauličnih aktuatora i komponenti se od-nose na kompaktnost i lakše komponente sa aspekta veće energetske efikasnosti radi sve češćih primena u mobilnim sistemima; u budućnosti, mobilna hidraulika mora da ispuni brojne zahteve kao što su: redukcija mase u odnosu na energiju i snagu, veći stepen uštede energije, poboljšanje statičkog i dinamičkog ponašanja sistema, veća operativnost, bolja do-stupnost i veća pouzdanost, bolja kompatibilnost sa okruženjem i brza izrada prototipa i simulacija sistema.

6.1.2 Elektropneumatski aktuatori

Veštački mišići robota omogućavaju ravnotežu između opsega pokreta, odnosa snage i mase, kao i inherentne usklađenosti faktora oblika pneumatskog mišića – zahvaljujući to-

me, ovaj tip aktuatora je poželjan za različite primene u robotici [6.18]. Radi ponašanja veštačkih mišića nalik ljudskim, neophodno je modelovati i izraditi prototipove mišića, kao i projektovati i realizovati njihovo upravljanje. Najveći problem, za sada, predstavlja izrada mekih pneumatskih aktuatora (eng. *Soft Pneumatic Actuator – SPA*), ali i senzora za detekciju položaja aktuatora radi realizacije povratne sprege. Slika 6.2 prikazuje šemu i princip rada SPA sistema sa elektro upravljanjem koji se sastoji od: (i) izvora vazduha pod pritiskom (eng. *Compressed Air – CA*), (ii) pripreme grupe Z0, (iii) regulatora pritiska – ventil V1, (iv) razvodnika CA – ventil V2, (v) analognog senzora pritiska B1 i (vi) mekog aktuatora A.



Slika 6.2 Šematski prikaz SPA sistema: (a) Početni položaj; (b) Krajnji položaj; (c) Vraćanje u početni položaj.

CA se kroz pripremu grupu Z0 dovodi do regulatora pritiska V1 na kome je unapred podešen željeni pritisak. Regulisani CA se dalje dovodi do ventila V2 (ovaj ventil je 3/2 normalno zatvoren bistabilni razvodnik sa elektro upravljanjem). Ako elektromagneti Y1 i Y2 nisu aktivirani, tada CA ne prolazi prema aktuatoru – Slika 2a. Međutim, pritiskom na električni taster S1, elektromagnet Y1 se aktivira i razvodni ventil V2 se otvara, pa regulisani CA prolazi prema aktuatoru koji menja položaj – Slika 2b. Na pneumatskom vodu između razvodnika V2 i aktuatora, postavljen je analogni senzor pritiska B1 koji meri pritisak u komori aktuatora i informaciju o tome šalje kontroleru – mikrokontroler ili PLC (eng. *Programmable Logic Controller*), koji dalje, ukoliko je potrebno, reguliše rad ventila V1

menjajući pritisak odnosno poziciju aktuatora. Aktiviranjem električnog prekidača S2, aktivira se elektromagnet Y2 i nakon toga razvodni ventil V2 i aktuator se vraćaju u početni položaj – Slika 2c. Upotreba povratne sprege omogućava preciznije upravljanje radom aktuatora. Dalje se razmatra primena SPA tehnologije kod robota – hvataljke i pneumatski mišići, sa fokusom na komponente i upravljanje.

Dizajn antropomorfne robotske šake sa ukupno 22 *DoF* je prikazan u [6.19]; svaki *DoF* pokreće par antagonističkih pneumatskih veštačkih mišića (eng. *Pneumatic Artificial Muscle – PAM*), dok su Bouden kablovi (eng. *Bowden cable*) korišćeni kao tetive; prednost ovih *PAM* i kablova su jednostavna implementacija, zahtevaju mali prostor i lagani su; radi upravljanja silom pritiska delova šake, upotrebljeni su pneumatski taktilni senzori u formi kože dlana i vrhova prstiju, kao i dodatni senzori sile na aktuatorima.

Biološki inspirisan ortotički uređaj za pomoć dorzalnoj fleksiji stopala tokom hoda, prikazan je u [6.20]; ovaj uređaj ima integrisani pneumatski i upravljački sistem: pneumatski sistem čini kompresor, regulator protoka vazduha i proporcionalni regulator za regulisanje CA koji dolazi do komandnog razvodnika za upravljanje četiri *PAM*, od čega su dva za svaku nogu, dok upravljački sistem čine dve nezavisne upravljačke jedinice zasnovane na upotrebi *Arduino-Uno R3* kontrolera; prva jedinica generiše *PWM* (eng. *Pulse-Width Modulation*) signal koji upravlja proporcionalnim regulatorom, dok druga prima signale sa senzora ugla i na osnovu tih podataka direktno aktivira komandne razvodnike četiri *PAM*.

Prototip višepovezanih *PAM* (eng. *Multi-connection PAM – MPAM*) aktuatora, prikazan je u [6.21]; šest uzanih mišićnih vlakana sličnih *McKibben PAM* su postavljeni u dva reda i tri kolone – zahvaljujući tome, postignuta je veća kontaktna površina fiksnog kraja i manja ukupna zapremina što povećava fleksibilnost mišića; radi realizacije *MPAM*, mišićna vlakna su formirana konfiguracijom Y tipa 3 i 5 portnog priključka, respektivno; vlakna mišića direktno aktivira proporcionalni ventil pritiska kojim upravlja mikrokontroler; upotrebljen je senzor pomeraja za praćenje pomeranja mišića, senzor sile za praćenje zatezanja mišića, kao i senzor pritiska, dok se signali sa senzora vraćaju na mikrokontroler radi povratne upravljačke sprege.

Jednodimenzioni dvosmerni zglob, zasnovan na *PAM* tehnologiji, prikazan je u [6.22]; osim fleksibilnosti, ovaj zglob je kompaktan; sistem se sastoji od kompresora, pripreme grupe, proporcionalnog ventila pritiska, direkcionog ventila sa elektro upravljanjem, *PAM* aktuatora, žiroskopa, *PLC*, *3D* kamere sa sistemom za obradu slike i upravljačkog računara.

Meki robotski zglob za apsorpciju udara je prikazan u [6.23]; po uzoru na strukturu lakatnog zgloba čoveka, autori su predložili manipulator sa 1 *DoF*, a radi procene funkcije dislokacije zgloba, eksperimentalno su ispitali dinamički i kvazistatički udar na zglobu; pored toga, autori su predložili i meki robotski zglob sa 2 *DoF* za realizaciju četiri osnovna pokreta ljudske ruke upotrebom *PAM* aktuatora uz mogućnost dislokacije – treba napomenuti da su *PAM* razvijeni i zasnovani na *McKibben* tipu mišića; *LabVIEW* kontroler upravlja *PAM* aktuatorom putem četiri proporcionalna regulatora pritiska, dok je za merenje sile reakcije *PAM* upotrebljena merna ćelija.

Dizajn i izrada prototipa *SPA* sa mogućnostima savijanja upotrebom kompozita na bazi silikona i gume, prikazani su u [6.24]; novina u dizajnu predstavlja upotreba procedure optimizacije topologije radi veće sposobnosti savijanja aktuatora što za posledicu ima veću nosivosti aktuatora; osim toga, eksperimentalno je dokazano da predloženi *SPA* ima bolje performanse nego komercijalno dostupan *SRT* (eng. *Soft Robotics Toolkit*) aktuator u poređenju maksimalnog ugla savijanja i sile na izlaznom članu.

Metoda za merenje pomeraja *SPA* bez eksternih senzora položaja, prikazana je u [6.25]; merenje položaja aktuatora je omogućeno ugradnjom metalne opruge u spoljašnji sloj cilindričnog mekanog aktuatora, a zatim merenjem frekvencije oscilovanja opruge koja se menja u zavisnosti od dužine opruge; dodatna funkcija opruge je ograničenje radijalnog širenja aktuatora tokom pritiska; na kraju, dobijena je aproksimacija odnosa između frekvencije i položaja, a validnost opruge je procenjena eksperimentalno.

6.1.3 Električni aktuatori

Električni *DC* aktuatori obuhvataju najveću grupu aktuatora i nadalje se razmatraju samo one grupe koje ima smisla upotrebiti za pokretanje zglobova humanoida: (i) motori bez četkica (eng. *Brushless DC motor – BLDC*), (ii) motori sa četkicama i permanentnim magnetom (eng. *Permanent Magnet DC motor – PMDC*), (iii) linearni motori (eng. *DC linear motor*), (iv) koračni motori (eng. *Stepper motor*) i (v) motori sa integrisanim mehaničkim prenosnikom (eng. *RC servomotor* i *Gearmotor/Gearhead*).

BLDC motori

Dizajn mehaničkog i električnog sistema socijalnog robota *Nancy*, prikazan je u [6.26]; radi realizacije željenih pokreta i lagane strukture robota, kao vučni mehanizam su upotrebljeni Bouden kablovi koje aktuiraju *BLDC* motori smešteni u donji deo tela; radi stabilizacije robota, *BLDC* motori sa internom kočnicom su upotrebljeni kod velikih zglobova poput

ramena, kolena i skočnog zgloba; pored toga, korišćen je i industrijski personalni računar (eng. *Personal Computer – PC*), kamere, audio sistem, laser senzor, napajanje, kao i sistemi za upravljanje kretanjem – *Dynamixel* i *Arduino* kontroleri.

Robot violinista po imenu *Hathaani*, dizajniran da svira karnatičku muziku, prikazan je u [6.27]; robot svira violinu pomoću mehanizma sa jednim prstom inspirisanim pokretima leve ruke čoveka; prst je aktuiran mikro servomotorom *MG90* sa reduktorom, dok *BLDC* motor *Maxon EC45* pogoni linearni klizač duž žica violine – motorom upravlja *EPOS4 50/5* kontroler; za praćenje pozicije prsta u realnom vremenu, upotrebljen je pomoćni enkoder, dok su glavni enkoderi integrisani u motorima.

Poređenje mehaničkih i električkih sistema dvonožnih humanoida sa fokusom na strukturu, aktuaciju, sensoriku i izradu, prikazano je u [6.28]; na primer, kod robota *Katz* je korišćen *BLDC* motor sa planetarnim zupčanicima ugrađenim u kućište statora, dok motorom upravlja embedid kontroler (eng. *Embedded Controller – EC*); ovaj sistem koristi i robot po imenu *Mini Cheetah MIT*; najčešće korišćeni senzori su magnetni enkoderi zasnovani na *Hall* efektu, senzori sile/obrnog momenta (eng. *Force/Torque – F/T*), senzor temperature, kao i jedinica za merenje inercije (eng. *Inertial Measurement Unit – IMU*) koja se sastoji od akcelerometra, žiroskopa i magnetometra.

Napredni humanoidni robot po imenu *ARMAR-6* sa ukupno 28 *DoF*, razvijen za saradnju između čoveka i robota (eng. *Human-Robot Collaboration – HRC*), prikazan je u [6.29]; najčešće upotrebljeni aktuatori su *BLDC* konfiguracije: (i) za ruke čak 16 *BLDC* motora sa reduktorima i *Elmo* kontrolerima, (ii) za torzo jedan *BLDC* motor sa navojnim vretenom, kočnicom i *Elmo* kontrolerom, i (iii) za mobilnu platformu 4 *BLDC* motora sa kočnicama i *Elmo* kontrolerima; upotrebljeni su sledeći senzori: *Roboception RC_visard 160* stereo senzor za 3D viziju, *Primesense Carmine RGB-D* senzor, dve *Point Grey Flea* kamere za stereoviziju, apsolutni i inkrementalni enkoder, senzor ubrzanja, temperature, *F/T* senzor i dva 2D lida-ra; *PC* računar je upotrebljen za upravljanje radom čitavog robota – prikupljanje informacija od senzorskih uređaja i komunikaciju sa drajverima motora.

Upravljački sistem za prevenciju pada bipedálnih robota je prikazan u [6.30]; aktuiranje kukova, kolena i skočnih zglobova je omogućeno sa ukupno 14 *BLDC* motora postavljenih u zglobove – upotrebljen je šestoosni senzor sile, šok senzor i *IMU*; upravljački sistem čine tri podsistema – donji, srednji i gornji koji međusobno komuniciraju putem *EtherCAT* i *Ethernet* protokola, dok srednji sloj komunicira sa drajverima motora putem optike radi brže sinhronizacije podataka.

Dizajn *BLDC* motora sa integralnim hlađenjem za robote sa nogama, prikazan je u [6.31]. *BEAR* (eng. *Back-drivable Electromechanical Actuator for Robotics*) aktuator se sastoji od *BLDC* motora sa planetarnim reduktorom i odgovarajućom elektronikom; radi hlađenja namotaja motora i sprečavanja pregrevanja, u zaptiveno kućište statora su integrirani kanali u kojima se nalazi rashladna tečnost – zahvaljujući tome, motor može da ostvari bolje performanse naročito kod hodajućih robota.

Razvoj humanoidnog robota po imenu *Baneoid* sa ukupno 17 zglobova od čega su 13 elastični, prikazan je u [6.32]; noga robota ima 5 *DoF* gde x i y -osu kuka aktuiraju *BLDC Maxon EC* motori sa *Harmonic Drive* reduktorima upravljani *Dinamixel MX-64T* drajverom – od senzora je upotrebljen šestoosni senzor sile; aktuiranje ruku i torza obezbeđuju *DC* motori, dok stopala pogone *RC* servomotori; upravljanje radom čitavog robota je omogućeno putem *ODROID XU3 lite* mini računara.

Razvoj gornjeg dela tela humanoida sa ukupno 52 *DoF* (glava, ruke i torzo), prikazan je u [6.33]: glavu aktuiraju *BLDC* motori sa *Harmonic Drive* reduktorom i potencijometrom za merenje apsolutne pozicije motora zajedno sa mehaničkim graničnicima, dok se drajveri i upravljački deo nalaze u okviru postolja glave; ruke su formirane modularnim zglobovima sa integrisanim upravljačkim delom i drajverima, *BLDC* motorima sa *Harmonic Drive* reduktorom i kočnicom, dok senzori obuhvata magnetni i fotoelektrični enkoder, *Hall* senzore, temperaturni i strujni senzor, kao i šestoosni senzor sile; torzo je aktuiran na sličan način kao i ruke robota, dok se međusobna komunikacija između opisanih upravljačkih podсистema odvija putem *Ethernet* i *Point-to-Point* serijske komunikacije.

Razvoj, analiza i upravljanje serijski elastičnog aktuatora (eng. *Series Elastic Actuator* – *SEA*) za pokretanje noge robota, prikazani su u [6.34]; *SEA* koristi oprugu za merenje i upravljanje silom između motora i tereta – međutim, postoji više tipova *SEA* konfiguracija; za pogon noge je korišćena *TFSEA* (eng. *Transmission Force-sensing SEA*) konfiguracija koja obuhvata *BLDC* motor sa servo drajverom i *Harmonic Drive* reduktorom, torzione opruge i dva enkodera – inkrementalni i apsolutni, dok je za upravljanje kretanjem korišćen *RWHC* (eng. *Rotating Workspace Hybrid Control*) algoritam sa tri sloja *HC*, transformacija *RW* i kontroleri za upravljanje radom zglobova.

Robotski sistem ruke i šake je prikazan u [6.35]; zglobovi su uglavnom modularni i sastoje se od *BLDC* motora, *Harmonic Drive* reduktora, magnetnog enkodera i senzora – temperaturni, strujni i senzor sile; upravljački sistem se sastoji od kontrolera za upravljanje

radom ruke i šake koji putem *PPSeCo* (eng. *Point-to-Point high-speed Serial Communication*) protokola komunicira sa upravljačkim kolima 1, 2 i 3 koji upravljaju radom *BLDC* motora.

Razvoj sistema za testiranje i eksperimentalnu identifikaciju trenja u modularnim pogonima robota, prikazan je u [6.36]; moduli se sastoje od *BLDC* motora sa *Harmonic Drive* reduktorom, motor kontrolera, inkrementalnog enkodera na vratilu motora, apsolutnog enkodera postavljenog na izlaznom vratilu i interfejsa za prikupljanje i obradu podataka; razvijeni sistem sadrži i senzor broja obrtaja, kočnicu i zupčaste prenosnike.

Napredni kontroler pokreta nazvan *FlexSEA-Execute* za različite primene u robotici, prikazan je u [6.37]; ovaj kontroler je deo sistema egzoskeleta sa *BLDC* motorima i sastoji se od *BLDC* motor drajvera, sigurnosnog ko-procesora, *RS485* priključaka, pojačala, šestoosne *IMU* jedinice, *USB* i programabilnog dodatnog konektora.

Novi robusni adaptivni upravljački algoritam, čija je implementacija urađena na humanoidnom robotu po imenu *BERT II*, prikazan je u [6.38]; ruka robota ima 7 *DoF* koje aktuiraju *Maxon BLDC* motori sa *EPOS* drajverima i inkrementalnim enkoderima – *EPOS* drajveri su povezani na *dSPACE* sistem putem *CAN Bus* mreže (eng. *Controller Area Network*); predloženi algoritam je kodiran u *Simulink* blokovima na *PC* računaru i kompajliran i prosleđen na *dSPACE* embedid sistem.

***PMDC* motori**

Pregled robotskih tehnologija za rehabilitaciju donjih ekstremiteta čoveka, prikazan je u [6.39]. Od 25 analiziranih, samo *Body Extender* egzoskelet ima ugrađene *PMDC* motore – ukupno 12 ovih motora aktira egzoskelet zajedno sa navojnim vretenom, polužnim mehanizmom i mehanizmom sa remenicama i tendonima (eng. *pulley-tendon mechanism*); osim toga, upotrebljeni su senzori sile i akcelerometar.

Razvoj dvoosnog robota za pisanje teksta putem prepoznavnja govora, prikazan je u [6.40]; postojeći sistem robota aktuiraju dva *PMDC* motora upravljani jednim motor drajverom koji putem *RF* (eng. *Radio Frequency*) modula komunicira sa *Arduino Uno* kontrolerom; autori su predložili novi sistem sa dva *DC* koračna motora za pogon *x* i *y*-ose, dok je pokretanje olovke i pisanje omogućeno servomotorom – sistemom upravlja *Arduino Uno* mikrokontroler; upotrebljen je akcelerometar i senzori pozicije kod motora.

Matematičko modelovanje, simulacija i upravljanje *PMDC* motorom radi ispitivanja njegovih performansi u zavisnosti od željenog kretanja ruke robota, prikazani su [6.41];

više upravljačkih kontrolera sa različito implementiranim upravljanjem radom motora je projektovano, a realizacijom zatvorene povratne sprege su dobijene željene performanse.

Modelovanje i upravljanje robotskom rukom sa 2 *DoF* je prikazano u [6.42]. Aktuiranje ruke se vrši *PMDC* motorima, dok je simulacijom ispitano u kojoj meri dodavanje *PID* (eng. *Proportional-Integral-Derivative*) regulatora utiče na performanse sistema.

Dizajn embedid *PID* kontrolera za robota koji prati kretanje sunca u realnom vremenu, prikazan je u [6.43]; hardver kontrolera upravlja radom drajverima i *PMDC* motorima, *DC* motorom koji pokreće linearne aktuatore, i mehanizmom za rotaciju solarnog panela; od senzora se koristi sistem za globalno pozicioniranje (eng. *Global Positioning System – GPS*), piranometar, anemometar i elektronski merač nagiba.

Efektivno i pouzdano upravljanje brzinom *PMDC* motora sa promenljivim opterećenjem, prikazano je u [6.44]; radi upravljanja brzinom motora, autori su projektovali dva kontrolera: *PIC* (eng. *Proportional-Integral Controller*) i *FLC* (*Fuzzy Logic Controller*) čiju su funkcionalnost ispitivali simulacijom u *MATLAB* softveru.

Prototip robota po imenu *Clothbot* za penjanje po vertikalnoj podlozi od tkanine, prikazan je u [6.45]; robot je aktuiran sa dva *PMDC* motora (hvataljka i rep); za upravljanje radom motora, autori su projektovali i realizovali kontroler, dok su od senzora upotrebili enkodere postavljene na točkove robota, kao i *IMU*.

Pojednostavljeni modeli za upravljanje pozicijom *PMDC* motora, prikazani su u [6.46]; autori su razmatrali modelovanje servo upravljanja motora gde su predložili statički idealan i dinamički realan model; osim motora, koristili su reduktor, senzore pozicije – potenciometar ili optički enkoder, kao i embedid digitalni kontroler – *PID* sa dominantnim *P*.

Implementirani model za sistem upravljanja brzinom *PMDC* motora upotrebom metode samopodešavanja *PID* kontrolera zasnovane na fazi tehnici, prikazan je u [6.47]; *on-line* upravljanje brzinom *DC* motora je realizovano *DAQ* (eng. *Data Acquisition*) uređajem koji omogućava prikupljanje signala iz mernih izvora – optički enkoder i drajver motora, kao i digitalizaciju signala radi analize na *PC* računaru putem *LabVIEW* platforme.

Aktuatori i računarom potpomognuto projektovanje (eng. *Computer-Aided Design – CAD*) robota, prikazani su u [6.48]; pored projektovanja robota, urađeno je poređenje pneumatskih, hidrauličkih i *DC* električnih motora na osnovu čega je izabran optimalni aktuator za dati sistem; aktuiranje zglobova humanoida se najčešće vrši *PMDC* motorima sa nekom vrstom transmisije i odgovarajućim upravljačkim kontrolerom.

Linearni motori

Dizajn i upravljanje egzoskeleta po imenu *MINDWALKER*, prikazani su u [6.49]; pogon nogu je realizovan linearnim aktuatorima koji se sastoje od *BLDC* motora *Hacker A60 7S_V2* sa navojnim vretenom *SKF SD 12X4*, dok upravljačka elektronika sadrži 6 *MOSFET* (eng. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect Transistor*) tranzistora i *gate-driver* pojačavača snage integrisanih u zadnjem delu aktuatora; za upravljanje brzinom i određivanje pozicije motora, koristi se 12-bitni apsolutni enkoder.

Egzoskelet i rukavica za simultanu rehabilitaciju šake, prikazni su u [6.50]; egzoskelet jednog prsta se sastoji iz tri sloja – gornji je pasivan, srednji aktivan, a donji fiksiran; aktivni sloj je nalik opruzi koja se savija kada se ostvari potrebna sila koju proizvodi *DC* linearni motor putem Bouden kabla; svaki motor je upravljan *Dual H-Bridge L293D* motor drajverom, dok *Arduino Mega* generiše *PWM* signal prema drajveru motora; pomeraj opruge je meren linearnim potencijometrom, dok se senzor koji detektuje savijanje nalazi na svakom prstu i meri ugao savijanja.

Razvoj petoosne glodalice delta konfiguracije je prikazan u [6.51]; šest *DC* linearnih motora pokreće svaki *DoF* mašine, dok upravljački sistem sadrži master mikrokontroler koji putem šest drajvera pokreće motore nogu mehanizama i komunicira sa *PC* računarnom.

Modelovanje egzoskeleta po imenu *ExoArm* sa 7 *DoF*, prikazano je u [6.52]; aktuiranje zglobova je omogućeno *Thomson DC* aktuatorima preko sistema Bouden kablova.

Koračni motori

Razvoj egzoskeleta za rehabilitaciju donjih ekstremiteta sa ukupno 6 *DoF*, prikazan je u [6.53]; kukove aktuiraju dva *DC* koračna motora sa kaišem i remenicom, dok kolena pokreću linearni aktuatori sa navojnim vretenom; mehanizam nogu aktuiraju *DC* koračni motori sa navojnim vretenom – motore pokreću drajveri kojima upravlja mikrokontroler *Arduino* putem *PWM* signala, dok *Arduino* komunicira putem *USB* sa *PC* računarnom koji upravlja radom čitavog egzoskeleta; kod upravljanja radom motora, radi realizacije povratne sprege, upotrebljeni su potencijometri i *IMU* senzori.

Upravljački sistem za upravljanje radom robotske ruke, zasnovan na digitalnom procesoru signala (eng. *Digital Signal Processor – DSP*) i čipu *TMS320F28335*, prikazan je u [6.54]; robotsku ruku aktuiraju četvorofazni *DC* motor *28BYJ-48*, dok se promenom frekvencije i broja impulsa menja brzina i pozicija motora; pored toga, upotrebljen je senzor pozicije motora i senzor pritiska.

Razvoj inteligentnog rovera za istraživanje Marsa, prikazan je u [6.55]; rover – mobilna platforma, sastoji se od četiri mehanizma nalik paukovih nogu za kretanje po različitim tipovima terena, dok je odozgo postavljena robotska ruka sa hvataljkom; mehanizme nogu pokreću linearni aktuatori sa drajverima, dok točkove aktuiraju DC motori sa integrisanim reduktorom (eng. *gearmotor*) i drajverima; rotaciju robotske ruke omogućava DC koračni motor sa drajverom; takođe, brojni senzori su upotrebljeni: *PH*, senzor vlage i temperature, senzor za analizu sastava zemljišta i kvaliteta vazduha, senzor pritiska, intenziteta osvetljenja i senzor za merenje udaljenosti, *GPR* (eng. *Ground Penetrating Radar*), *IMU* i sistem za viziju; glavni upravljački sistem čine *INTEL-NUC* procesor i *Arduino Mega* mikrokontroleri – upravljaju radom svakog od podsistema.

Dizajn i implementacija robota za detekciju lica i izbegavanje prepreka upotrebom neuronskih mreža i genetskog algoritma, prikazani su u [6.56]; aktuiranje robota vrše dva DC koračna motora sa drajverima, dok treći DC koračni motor omogućava rotaciju kamere; upotrebljeni su senzor temperature i vlage, ultrazvučni senzor i sistem za viziju, dok upravljanje radom robota omogućava *PIC16F877* mikrokontroler.

Robot na dva točka, sposoban da podešava svoju ravnotežu balansom, prikazan je u [6.57]; hardver se sastoji od dva DC koračna motora *A4988* sa drajverima, *Arduino Nano* mikrokontrolera, *MPU-6050* uređaja – žiroskop i akcelerometar, kao i *Bluetooth* modula za komunikaciju sa pametnim telefonom.

Upravljanje radom robotske ruke u *pick-and-place* operacijama upotrebom uređaja sa *Android* aplikacijom, prikazano je u [6.58]; dva DC koračna motora sa drajverima aktuiraju telo robota, dok druga dva aktuiraju ruku sa hvataljkom; upravljanje radom ovih motora sa ukupno četiri kontrolera vrši *Arduino ATMEGA 328* mikrokontroler koji prima informacije od *Android* aplikacije putem *Bluetooth* modula.

Dizajn, integracija i evaluacija robota za branje jabuka, prikazani su u [6.59]; robotska ruka se nalazi na mobilnom postolju sa vođicama koje aktira *NEMA 23* koračni motor sa drajverom, dok ruku i hvataljku aktira ukupno devet *Dynamixel Pro* servomotora – na hvataljci se nalazi kamera za viziju; *PC* računar upravlja radom svih aktuatora i komunicira sa motor drajverima putem *USB* komunikacije.

Robotska dvoprstna hvataljka promeljive krutosti, prikazana je u [6.60]; prste hvataljke aktira DC koračni motor sa navojnim vretenom, dok rotaciju hvataljke omogućava DC koračni motor postavljen u gornjem delu hvataljke; detektovanje sile na hvataljci je

omogućeno senzorem sile *FUTEK LSB200*; osim toga, na hvataljci je postavljen i sistem za viziju omogućavajući praćenje sile hvatanja putem kamere radi dalje regulacije sile.

RC servomotori

Dvonožni humanoidni robot po imenu *Albert HUBO* sa ukupno 66 *DoF*, prikazan je u [6.61]; glava robota je android tipa sa ukupno 28 *DoF*, dok vrat ima 3 *DoF* – lice i glavu aktuira ukupno 31 *RC* servomotor; jedan *PC* računar se koristi za upravljanje pokretima glave, dok drugi upravlja telom; radom *RC* servomotora upravlja mikrokontroler *Atmel ATMEGA8-16PI* pozicioniran u zadnjem delu lobanje gde putem *CAN Bus* komunicira sa *PC* računarom; u glavi su locirane kamere, mikrofoni, zvučnici i sistem za prepoznavanje glasa; osim toga, robot poseduje inercijalni senzor, *F/T* senzor i senzor za merenje nagiba.

Biomimetički robot po imenu *ELIRO-II*, sposoban da pronađe hranu u vidu male baterije i da se njome nahrani, prikazan je u [6.62]; robot se sastoji iz dva segmenta – prvi predstavlja glavu, oči i usta, dok se drugi odnosi na stomak; mehanizme glave i usta aktuira ukupno pet *RC* servomotora *HSR5995TG* sa drajverima, dok čitavim robotom upravlja mikrokontroler; mali *CMOS* senzor *PO-1030* je korišćen za viziju, a fotosenzor za detekciju ugla nagiba baterije.

Dizajn robotskog lica za izražavanje emocija je prikazan u [6.63]; svih 28 *DoF* aktuiraju *RC* servomotori *Futaba S3103*, dok motorima upravlja servo kontroler *SSC32* koji putem *RS232* komunicira sa *PC* računarom; mikroprocesor 8051 upravlja radom mehanizama za suze i crvenilo u licu, a serijskom vezom je povezan sa *PC* računarom.

Mehanizam glave i lica humanoidnog robota sa mogućnostima prikazivanja facijalnih ekspresija je prikazan u [6.64]; svi mehanizmi su aktuirani *RC* servomotorima kojima upravlja *Pololu SSC30A* kontroler; ovaj kontroler serijskim putem komunicira sa *Arduino* mikrokontrolerom koji upravlja svim pokretima glave i vrši potrebne proračune – *Arduino* dalje komunicira sa *PC* računarom.

Razvoj robotskog vrata sa dva četvoročlana mehanizma *4R* i *RPPR* konfiguracije za klimanje i rotaciju glave, respektivno, prikazan je u [6.65]; oba mehanizma pokreću *RC* servomotori – njima upravlja *Pololu* kontroler putem *PWM* signala, dok kontroler prima komande od *PC* računara putem *RS232* komunikacije; motori poseduju potenciometar za merenje pozicije vratila rotora; merenje uglova pomeranja je omogućeno eksternom kamerom koja snima glavu, dok *MATLAB* softver obrađuje informacije sa kamere.

Emocionalni robot za istraživanje facijalnih ekspresija je prikazan u [6.66]; robotska glava ima ukupno 16 *DoF* (6 *DoF* za obrve, 2 *DoF* za očne kapke, 2 *DoF* za očne jabučice, 4 *DoF* za usta i 2 *DoF* za vrat); svaki *DoF* aktira po jedan *RC* servomotor kojim upravlja mikrokontroler *MCS-51* putem *PWM* signala; mikroprocesor komunicira sa *PC* računarom putem *RS232* komunikacije; takođe, robot poseduje *CCD* kameru postavljenu na nos robota.

Razvoj interaktivne robotske glave za prikazivanje pokreta cervikalne kičme – vrata, radi rehabilitacije, prikazan u [6.67]; glava se sastoji od mehanizma za pokretanje vrata sa 3 *DoF* kojeg aktiraju *DC* motori sa drajverima i *Arduino* mikrokontroler – za merenje pozicije motora su upotrebljeni inkrementalni enkoderi; robot koristi softver za prepoznavanje glasovnih komandi, dok za prepoznavanje lica poseduje sistem za viziju koji obuhvata dve kamere sa odgovarajućim softverom i bazom podataka.

Razvoj robotskog lica sa veštačkim mišićima za generisanje facijalnih ekspresija, prikazan je u [6.68]; lice se sastoji od šest modula sa aktuatorima koji pokreću očne jabučice, očne kapke, obrve, čelo, obraze, usne, vilicu i vrat – pritom, svaki od ovih modula poseduje embedid kontroler *PIC258/458* koji upravlja radom aktuatora i komunicira sa drugim modulima putem *CAN* protokola; modul oka pokreće aktuator sa više *DoF* zasnovan na dielektričnom elastomeru; za pokretanje modula kože – obrve, obrazi i čelo, autori su razvili novi tip aktuatora nazvan *ANTLA* (eng. *ANTagonistically-driven Linear Actuator*); vrat aktiraju *Maxon DC* servomotori sa kontrolerima, dok vilicu i očne kapke pokreću *RC* servomotori upravljani mikrokontrolerom.

Inteligentni humanoidni robot sa 16 *DoF*, proizveden od sekundarnih sirovina, prikazan je u [6.69]; robot ima oči sa 1 *DoF*, vrat sa 1 *DoF*, noge sa 8 *DoF*, ramena sa 4 *DoF* i laktove sa 2 *DoF* – svi zglobovi se aktiraju *MG995 DC* servomotorima; pored toga, od hardvera je upotrebljen *Arduino Uno R3* za upravljanje radom servo kontrolera, *Raspberry Pi 3* za *web* kameru i mikrofona, dok je za detekciju prisustva čoveka upotrebljen ultrazvučni senzor.

Robotska glava nalik ljudskoj po imenu *i-RoK*, prikazana je u [6.70]; vratni mehanizam sa 4 *DoF* aktiraju tri *DC* servomotora i jedan *RC Maxi* servomotor; oči imaju 3 *DoF*, pri čemu pokrete levo-desno omogućavaju dva *RC Mini* servomotora, a pokrete gore-dole jedan *RC Mini* servomotor; vilicu sa 1 *DoF* aktira *RC Mini* servomotor; treba napomenuti da se u okviru jabučica nalaze kamere.

Hibridno morfološko robotsko lice po imenu *MorphFace*, prikazano je u [6.71]; kruto lice pokreću modularni linearni aktuatori koji se sastoje od linerane vođice, izlaznog člana

(oči, nos, usta i vilica), mehaničkih delova, Bouden kabla, opruge za vraćanje u inicijalni položaj i RC servomotora *MG996R* koji pokreće ovaj složeni mehanizam, dok 12-kanalni *Pololu Maestro* servo drajver upravlja radom aktuatora.

Gornji deo tela robota po imenu *Troy* sa glavom u obliku *LCD* ekrana, razvijen za terapiju osoba sa autizmom, prikazan je u [6.72]; vrat ima 2 *DoF*, a ruke 8 *DoF* – sve zglobove aktuiraju *RC Hobby* servomotori, dok njima upravlja *Lynxmotion SSC-32* kontroler.

Gearmotor/Gearhead

Razvoj robotskih invalidskih kolica upravljanih po poziciji, brzini i orijentaciji upotrebom pokreta glave pacijenta, prikazan je u [6.73]; ovaj prototip treba da prikuplja informacije o željenom pravcu i smeru kretanja od osobe sa invaliditetom koja se nalazi u kolicima; informacije se prikupljaju putem sistema za vizualizaciju kretanja koji detektuje orijentaciju glave, ultrazvučnih senzora za detekciju pozicije, senzora pokreta za detekciju orijentacije i optičkog enkodera za detekciju brzine pomeranja; sistem za vizualizaciju kretanja je povezan na *PC* računar, dok preostali senzori šalju signale na mikrokontroler *Teensy 3.2*, koji, osim što upravlja radom aktuatora za pokretanje kolica, on putem *Wi-Fi* (eng. *Wireless Fidelity*) mreže i *UDP* (eng. *User Datagram Protocol*) protokola komunicira sa *PC* računarnom odnosno dobija informacije i od sistema za vizualizaciju kretanja; kolica aktuiraju ukupno dva motora *Makeblock DC gearmotor* sa *L298N* drajverima.

Robotski sistem za navigaciju i izbegavanje prepreka zasnovan na *TinyML* (eng. *Tiny Machine Learning*) i proširenoj realnosti (eng. *Augmented Reality – AR*), prikazan je u [6.74]; Sistem sadrži dva modula od čega jedan za navigaciju, a drugi za detekciju objekata; sistem za navigaciju komunicira sa korisnikom, robotom i kamerama, dok korisnik upravlja robotom putem prenosnih uređaja – npr. pametni telefon, *Bluetooth* komunikacijom; kada je reč o detekciji objekata, mikrokontroler robota *Arduino Nano 33 BLE* se povezuje na telefon i koristi njegovu kameru, ali poseduje i dodatnu kameru *OV7670* povezanu na mikrokontroler; aktuiranje robota omogućavaju dva *Gearhead DC* motora sa *TB6612FNG* drajverima, dok upotrebom *IMU* modula robot može da ostvari funkciju samobalansiranja.

Razvoj antropomorfne robotske vilice sa 6 *DoF* je prikazan u [6.75]; prva od dve razvijene, sastoji se iz dva nezavisna paralelna manipulatora i vilice povezane sa njima preko dva zgloba, dok ukupno četiri aktuatora *Maxon DC Gearmotor* putem kaiša i remenice pokreću manipulatore robota po *x* i *y*-osama; takođe, moguće je i bočno pomeranje vilice upo-

trebom klizača i *DC Gearmotors*; inkrementalni enkoderi su upotrebljeni za detekciju položaja; druga varijanta vilice predstavlja rekonstrukciju prethodno opisane radi otklanjanja problema u hardveru – kaišni mehanizam je zamenjen navojnim vretenom i na taj način je eliminisana potreba za dodatnom redukcijom radi osnaživanja pogona; sve to implicira na značajne uštede u pogledu prostora za ugradnju motora, kao i jednostavnije upravljanje; drugu varijantu aktuira šest *Maxon DC* motora snage 11 W; oba prototipa poseduju jedan glavni *AT89S8253* mikrokontroler i šest dodatnih *LM629-8* kontrolera.

Razvoj robotske hvataljke sa rolerima ugrađenim u vrhovima prstiju, prikazan je u [6.76]; hvataljka je troprstna i svaki prst ima 3 *DoF*; prvi – donji segment prsta direktno pogoni *Robotis Dynamixel XM430-W350* aktuator; srednji segment upravlja orijentacijom rolera na vrhu prsta i pogoni ga digitalni servomotor *Savox Micro SW0250MG*; poslednji – vršni segment prsta, aktuira *DC Micro Gearmotor* sa inkrementalnim enkoderom.

SwarmRail sistem, koji predstavlja inovativno rešenje za upravljanje rojevima mobilnih jedinica – robota, prikazan je u [6.77]; mobilni roboti se kreću po šinama koje su konfigurisane i postavljene daleko iznad zemlje; ovi roboti mogu biti opremljeni različitim alatima ili robotskom rukom za manipulaciju objektima – takođe je moguća saradnja više robota oko realizacije složenih zadatka; aktuiranje mobilne jedinice sa osam pogonskih i osam gonjenih omnidirekcionih točkova *Rotacaster R2-0504-60* omogućavaju četiri *BLDC Gearmotors Pololu 4752*, dok njihovim radom upravlja *Arduino Mega 2560*; pored toga, svaki robot ima četiri *IR* senzora *EXP-R63-145*, osam *IR* senzora *Iduino ST1081*, kao i *IMU*.

Razvoj robota za penjanje po merdevinama, prikazan je u [6.78]; hardver robota obuhvata jedan *LXD-218* servomotor, dva *RDS3128* servomotora i jedan *DC Gearmotor* sa drajverom; *Arduino Mega 2560* mikrokontroler upravlja radom robota, dok su upotrbljeni *IR* i ultrazvučni senzori za penjanje.

6.1.4 Prednosti i nedostaci

Na osnovu postavljenih zahteva, formirane su tri grupe aktuatora koji potencijalno mogu biti upotrebljeni za mehanizme očiju i obrva. Za svaku grupu je urađen detaljan pregled robotskih sistema sa aspekta primene aktuatora, senzora i upravljanja. Međutim, svaka grupa aktuatora ima svoje prednosti i nedostatke koje treba pažljivo sagledati prilikom izbora aktuatora i njegovog upravljačkog sistema.

Elektropneumatski aktuatori – klasični pneumatski sistemi su unapred eliminisani zbog toga što ne mogu da ispune postavljene zahteve. Za razliku od njih, *PAM* i *MPAM*

aktuatori mogu da budu veoma malih dimenzija, jeftini su za izradu i mogu da proizvedu sile za pomeranje očnih jabučica, očnih kapaka i obrva – upravljanje ovim aktuatorima je u fazi razvoja i za dati problem nije moguće ostvariti visoku tačnost pozicioniranja niti dovoljno dobru ponovljivost. Dodatni problem može biti dovođenje *CA* do aktuatora što ograničava mobilnost (postojanje kompresora), dok bi pneumatski vodovi zauzimali mnogo veći prostor unutar glave robota u poređenju sa električnim flet kablovima.

EHA aktuatori – klasični hidraulički sistemi, kao i pneumatski, unapred su odbačeni zbog toga što ne mogu da ispune nijedan od postavljenih zahteva. *EHA* aktuatori su veoma kompaktni i upotrebom servo upravljanja mogu da ostvare visoku tačnost pozicioniranja i ponovljivost pokreta, ali ne mogu da ostvare izrazito brze pokrete, poput rapidnih pokreta očiju. Problem *EHA* sistema predstavljaju dimenzije koje zahtevaju mnogo veći prostor za ugradnju od raspoloživog u glavi robota. Osim toga, ovakav sistem radi na visokim pritiscima što zahteva odgovarajuće hidraulične vodove koji zbog većih prečnika zauzimaju veći prostor. Dodatni nedostatak ovih sistema je pregrevanje pumpe što zahteva implementaciju sistema za hlađenje.

Električni aktuatori – *AC* aktuatori su unapred eliminisani zbog toga što prevazilaze osnovne zahteve u pogledu veličine i mase, pa su nadalje razmatrani samo *DC* aktuatori podeljeni u nekoliko grupa. Sa obzirom na njihove osobine i praktične primene, zaključeno je da pojedine grupe ovih aktuatora, kao što su *PMDC*, *BLDC* i *RC* servomotori, mogu u velikoj meri da ispune postavljene zahteve. Zbog svega toga, za pokretanje mehaničkih sistema očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, usvaja se akcija putem električnih aktuatora sa odgovarajućim upravljanjem.

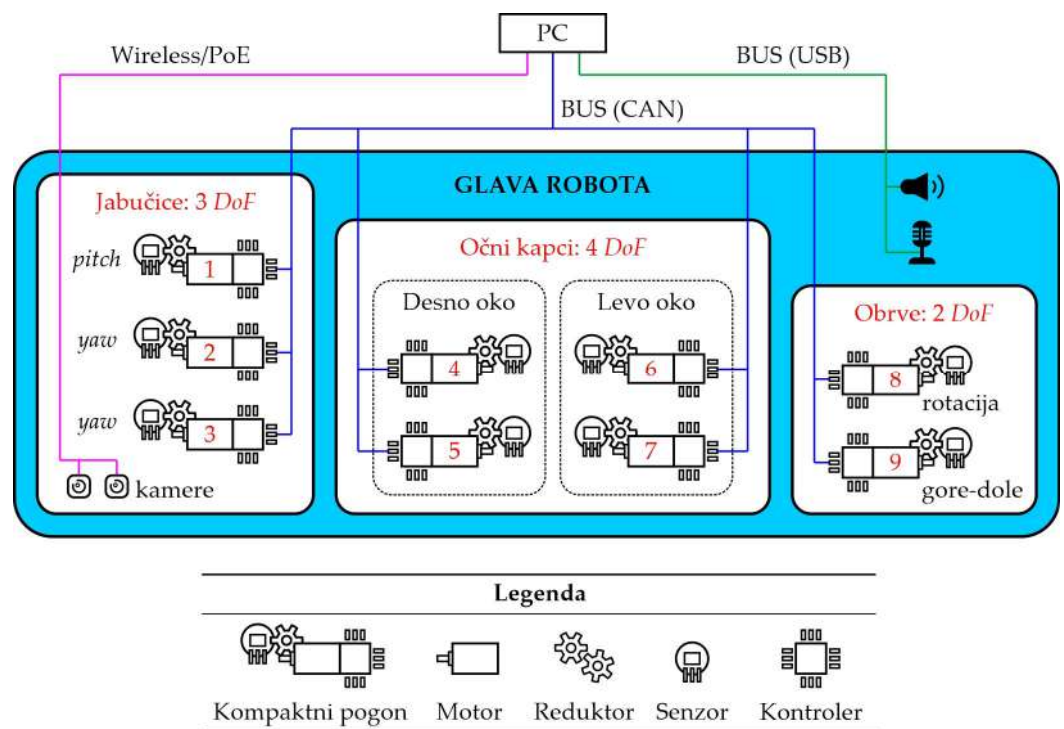
6.2 Arhitektura upravljačkog sistema

Slika 6.3 prikazuje strukturu i hijerarhiju predloženog upravljačkog sistema očiju robota. Kretanje očnih jabučica, očnih kapaka i obrva je omogućeno sinhronizovanom akcijom 9 nezavisnih aktuatora, od čega su tri za jabučice, četiri za kapke i dva za obrve.

Relativno jednostavnu i efikasnu implementaciju aktuatora predstavljaju minijaturni *DC* motori. Radi realizacije željenih kinematičkih parametara izlaznih članova oka, svi *DC* motori zahtevaju precizno i sofisticirano upravljanje. Embedid *PC* računar, *SBC* (eng. *Single-Board Computer*) ili mikrokontroler visokih performansi, nalazi se na vrhu hijerarhijske strukture i sinhronizuje celokupan sistem šaljući komande svim podređenim upravljačkim jedinicama. Ova komponenta takođe direktno upravlja i audio izlazom – zvučni

signali, govor. Digitalizovani audio ulaz za prepoznavanje govora može biti dodeljen ovom sistemu. Takođe, slike koju snimaju kamere, postavljene unutar očnih jabučica, obrađuju se od strane računara na vrhu hijerarhijske strukture.

Prema Slici 6.3, kompaktni pogonski (eng. *compact drive*) sistemi za pokretanje mehanizama očiju, obrva i kapaka su predloženi. Pokretanje jabučica se vrši pomoću tri aktuatora – aktuator 1 je zajednički za obe jabučice omogućavajući istovremene *pitch* pokrete (vertikalne sakade), dok aktuatori 2 i 3 omogućavaju nezavisne *yaw* pokrete jabučica u istim ili suprotnim smerovima (horizontalne sakade i fokusiranje objekata – stereovizija). Pokretanje gornjih i donjih kapaka je potpuno nezavisno zahvaljujući četiri aktuatora, od čega su za gornje kapke aktuatori 4 i 6, dok su za donje kapke aktuatori 5 i 7. Preostali aktuatori omogućavaju nezavisnu rotaciju i translaciju obrva – aktuator 8 omogućava rotaciju obe obrve istovremeno, ali u suprotnim smerovima, dok aktuator 9 omogućava podizanje obe obrve istovremeno. Kombinacijom različitih pokreta i položaja jabučica, kapaka i obrva, moguće je generisati širok spektar neverbalnih izraza licem.

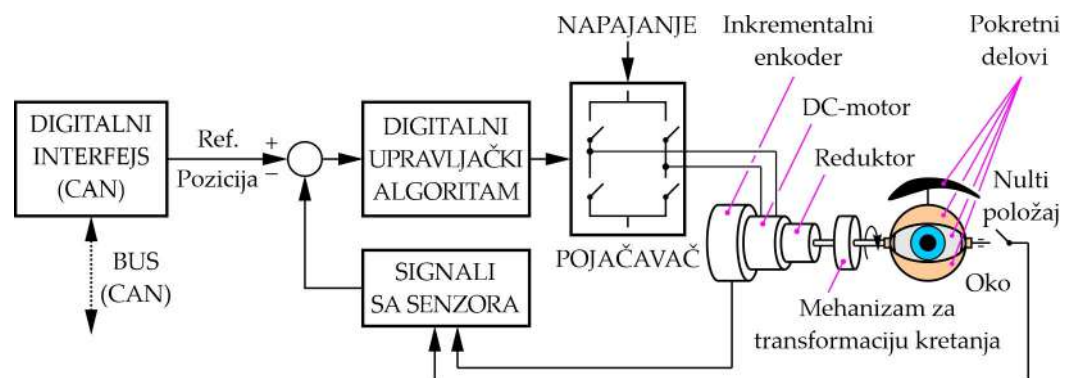


Slika 6.3 Struktura i hijerarhija sistema upravljanja.

Jedno veoma efikasno rešenje za aktuatore je upotreba DC motora sa ugrađenim planetarnim prenosnikom (eng. *planetary gearhead*, sa jednim ili više paketa zupčanika u okviru zajedničkog kućišta čime se obezbeđuju različiti prenosni odnosi) i integrisanim

inkrementalnim enkoderom. Za detekciju položaja, osim inkrementalnog enkodera, može se upotrebiti i senzor apsolutnog položaja. Prednost upotrebe ovog senzora predstavlja eliminacija senzora nultog položaja pomoću koga se podešava početni položaj sistema.

Slika 6.4 prikazuje strukturu podređenog servo kontrolera koji upravlja jednim aktuatorom koji neposredno utiče na 1 *DoF* sistema, uz pretpostavku da je aktuator tipa *DC* motor. Preko digitalnog interfejsa – npr. *CAN*, glavni kontroler postavlja zahtevane ciljne pozicije ili profile promene pozicija koje upravljani element treba da ostvari tokom zadatog vremena. Pritom se zadata veličina postavlja kao referentni ulaz upravljačkog algoritma – ovaj algoritam je implementiran na mikrokontroleru ili digitalnom procesoru signala odgovarajućih performansi pri čemu svoju funkciju obavlja na osnovu praćenja trenutne pozicije vratila *DC* motora preko inkrementalnog enkodera. Snagu na motor prenosi pojačavač – implementiran kao mosni drajver, kojim direktno upravlja upravljački algoritam. Prilikom inicijalizacije servo kontrolera, senzor nultog položaja (prekidač ili optički senzor) omogućava da se sistem dovede u poznat položaj.



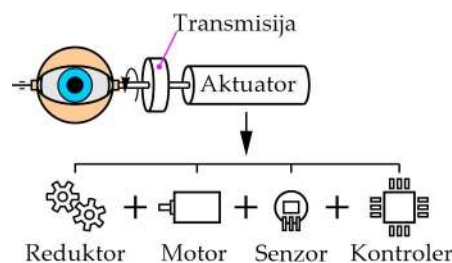
Slika 6.4 Struktura jednog servo kontrolera.

Treba napomenuti da motor i reduktor moraju biti izabrani tako da, pri naponu koji je na raspolaganju, motor može da ostvari ugaonu brzinu nešto veću od maksimalne neophodne za realizaciju najbržeg pokreta. Osim toga, komunikacija između pojedinačnih kontrolera u okviru sistema se može ostvariti pomoću robusne komunikacione mreže, poput *CAN* magistrale.

6.3 Izbor aktuatora

Slika 6.5 prikazuje elektromehanički sistem koji se sastoji od: (i) aktuatora – pogonski član, (ii) transmisije – prenosnik i transformator obrtnog momenta i brzine, (iii) segmenta robota – izlazni član. Za potrebe humanoidnih robota, aktuatori se proizvode u formi kompaktne

cilindrične ili prizmatične celine koja obuhvata motor, reduktor (planetarni), senzor i kontroler. Prilikom izbora motora, merodavni su obrtni moment (T) i željena brzina (n/ω), na osnovu čega se lako određuje snaga motora (P_M). Najpre se utvrđuje obrtni moment na izlaznom članu prema uslovima rada, za šta su merodavni statički (T_s) i dinamički moment (T_D). Statički moment uzima u obzir masu segmenta, rastojanje centra mase od ose oko koje rotira, kao i gravitaciono ubrzanje, dok dinamički moment uzima u obzir moment inercije segmenta za osu oko koje rotira, željenu ugaonu brzinu, kao i vreme zaleta motora, što zavisi od vrste i proizvođača motora. U nastavku se usvaja aktuator za rotaciju očne jabučice oko y -ose, dok se na identičan način mogu usvojiti aktuatori za svaki mehanizam.



Slika 6.5 Prikaz elektromehaničkog sistema.

Jabučica robota se može aproksimirati kao polusfera, na primer, prečnika $\varnothing 45$ mm i mase 45 g. Izborom dovoljno male kamere i aktuatora, prečnik jabučice se može redukovati do dimenzija nalik ljudskim, što je ključno. Imajući u vidu ulazne parametre, najpre je određen statički moment $T_s = 4.5$ mNm; ugaona brzina jabučice za pokret oko y -ose je $770.4^\circ/\text{s}$ odnosno 13.5 s⁻¹; prenosni odnos četvoročlanog mehanizma je $i = 1$, dok je vreme zaleta motora $\Delta t = 0.5$ s [6.79]. Shodno tome, vrednost dinamičkog momenta je određena $T_D = 0.5$ mNm, pa je ukupan obrtni moment na jabučici $T_J = 5$ mNm; budući da je $i = 1$, broj obrtaja i obrtni moment na izlaznom vratilu reduktora su $n_R = 129$ min⁻¹ i $T_R = 5$ mNm, respektivno – u skladu sa tim, snaga motora je $P_M = 105$ mW (treba napomenuti da su stepen iskorišćenja planetarnog reduktora i četvoročlanog mehanizma računati sa $\eta_R = 0.8$ i $\eta_L = 0.95$, respektivno). *Maxon Motors* nudi širok asortiman motora, reduktora, senzora i kontrolera, gde su svi uređaji savršeno kompatibilni omogućavajući mnogo kombinacija.

Imajući u vidu male merodavne vrednosti momenta i snage, mogućnosti za izbor motora su velike, najpre u pogledu prečnika motora (6–12 mm), što direktno utiče na krajnje dimenzije elektromehaničkog sistema. Međutim, prilikom izbora reduktora treba voditi računa i o prečniku izlaznog vratila koji je 1.5–3 mm, što može biti problematično sa aspekta montaže ulaznog člana mehanizma, pa nema potrebe za minimalizmom. Prema

[6.79], za pokretanje jabučice oko y -ose, usvojen je motor *Maxon RE 10*, oznake 256094, sa parametrima: $P_{Mmax} = 0.75 \text{ W}$, $T_{Mmax} = 0.731 \text{ mNm}$, $n_{Mmax} = 2790 \text{ min}^{-1}$ i $U = 12 \text{ V}$. Na osnovu brojeva obrtaja reduktora $n_R = 129 \text{ min}^{-1}$ i manjeg broja obrtaja motora zbog rezerve $n_M = 2500 \text{ min}^{-1}$, prenosni odnos planetarnog reduktora je 19.3, pa se usvaja prva manja katalogska vrednost – usvojen je planetarni reduktor *Maxon GP 10A*, oznake 256094, sa parametrima: $T_{Rmax} = 30 \text{ mNm}$, $i_R = 16$, $n_{Rmax} = 12000 \text{ min}^{-1}$ i $\eta_R = 0.81$. Sada je usvojen senzor odnosno *Maxon Encoder MR*, tip *S*, oznake 323053, sa 256 inkremenata i 2 kanala, dok je na kraju usvojen kontroler *Maxon EPOS4 Compact 24/1.5 CAN*, oznake 546714, sa parametrima: $U = 10\text{--}24 \text{ V(DC)}$, $I = 1.5 \text{ A}$, 10 ulaza (8 digitalnih i 2 analogna), 2 digitalna izlaza i *CANopen* interfejs.

Reference

- 6.1 Sun, M., Ouyang, X., Mattila, J., Yang, H., Hou, G.: One novel hydraulic actuating system for the lower-body exoskeleton. *Chin. J. Mech. Eng.* **34**(1), 1–10 (2021).
- 6.2 Kaminaga, H., Ko, T., Masumura, R., Komagata, M., Sato, S., Yorita, S., Nakamura, Y.: Mechanism and control of whole-body electro-hydrostatic actuator driven humanoid robot Hydra. In: Kulić, D., Nakamura, Y., Khatib, O., Venture, G. (eds.) *International Symposium on Experimental Robotics (ISER 2016)*. SPAR, vol. 1, pp. 656–665. Springer, Cham (2016).
- 6.3 Lohmeier, S., Buschmann, T., Ulbrich, H.: System design and control of anthropomorphic walking robot LOLA. *IEEE/ASME T. Mech.* **14**(6), 658–666 (2009).
- 6.4 Lee, K., Hong, S., Oh, J.H.: Development of a lightweight and high-efficiency compact cycloidal reducer for legged robots. *Int. J. Precis. Eng. Man.* **21**, 415–425 (2020).
- 6.5 García, P.L., Crispel, S., Saerens, E., Verstraten, T., Lefeber, D.: Compact gearboxes for modern robotics: A review. *Front. Robot. AI* **7**, 103-1–103-20 (2020).
- 6.6 Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R.: BigDog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proc. Vol.* **41**(2), 10822–10825 (2008).
- 6.7 Zhai, C., Zhang, P., Xu, H., Yuan, X., Zhou, L., Wu, R.: The application and inspiration of robots in the US military. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS 2023)*, pp. 24–28. IEEE Xplore, New York (2023).
- 6.8 Nelson, G., Saunders, A., Playter, R.: The PETMAN and Atlas robots at Boston Dynamics. In: Goswami, A., Vadakkepat, P. (eds.) *Humanoid Robotics: A Reference*, pp. 169–186. Springer, Dordrecht (2019).
- 6.9 Xu, S., Chen, Y., Hyun, N.S.P., Becker, K.P., Wood, R.J.: A dynamic electrically driven soft valve for control of soft hydraulic actuators. *P. Natl. Acad. Sci. USA* **118**(34), e2103198118-1–e2103198118-9 (2021).
- 6.10 Kellaris, N., Rothmund, P., Zeng, Y., Mitchell, S.K., Smith, G.M., Jayaram, K., Keplinger, C.: Spider-inspired electrohydraulic actuators for fast, soft-actuated joints. *Adv. Sci.* **8**(14), 2100916-1–2100916-16 (2021).
- 6.11 Shembekar, S., Kamezaki, M., Zhang, P., He, Z., Tsunoda, R., Otsuki, K., Sakamoto, H., Sugano, S.: Preliminary development of a powerful and backdrivable robot gripper using magnetorheological fluid. In: *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020)*, pp. 1458–1463. IAARC Publications, Kitakyushu (2020).
- 6.12 Chao, Q., Zhang, J., Xu, B., Huang, H., Pan, M.: A review of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps in aerospace applications: Challenges and solutions. *J. Mech. Design* **141**(5), 050801-1–050801-13 (2019).
- 6.13 Komagata, M., Ko, T., Nakamura, Y.: Small size hydraulic pumps with low heat generation for electro hydrostatic actuation of humanoid robots. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2018)*, pp. 483–488. IEEE Xplore, New York (2019).
- 6.14 Kaminaga, H., Ko, T., Masumura, R., Komagata, M., Sato, S., Yorita, S., Nakamura, Y.: Mechanism and control of whole-body electro-hydrostatic actuator driven humanoid robot Hydra. In: Kulić, D., Nakamura, Y., Khatib, O., Venture, G. (eds.) *International Symposium on Experimental Robotics (ISER 2016)*. SPAR, vol. 1, pp. 656–665. Springer, Cham (2016).
- 6.15 Ko, T., Kaminaga, H., Nakamura, Y.: Underactuated four-fingered hand with five electro hydrostatic actuators in cluster. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017)*, pp. 620–625. IEEE Xplore, New York (2017).
- 6.16 Sakama, S., Tanaka, Y., Kamimura, A.: Characteristics of hydraulic and electric servo motors. *Actuators* **11**(1), 11-1–11-18 (2022).

- 6.17 Suzumori, K., Faudzi, A.A.: Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: A review. *Adv. Robotics* **32**(9), 458–476 (2018).
- 6.18 Zhang, J., Sheng, J., O'Neill, C.T., Walsh, C.J., Wood, R.J., Ryu, J.H., Desai, J.P., Yip, M.C.: Robotic artificial muscles: Current progress and future perspectives. *IEEE T. Robot.* **35**(3), 761–781 (2019).
- 6.19 Gong, D., Hao, L., Yu, J., Zuo, G.: Bionic design of a dexterous anthropomorphic hand actuated by antagonistic PAMs. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR 2020)*, 493–498. IEEE Xplore, New York (2020).
- 6.20 Hu, X., Luo, C., Li, H., Jia, L., Song, C., Wang, Z., Qu, X.: An ankle based soft active orthotic device powered by pneumatic artificial muscle. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR 2019)*, pp. 374–378. IEEE Xplore, New York (2020).
- 6.21 Zhang, S., Gong, D., Yu, J.: Design of a multi-connection pneumatic artificial muscle. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER 2022)*, pp. 301–306. IEEE Xplore, New York (2022).
- 6.22 Wang, X., Geng, D.X., Zhang, L.Z., Sun, G.D., Xu, W.Z., Wang, P.: Structure and function of one-dimensional two-way pneumatic flexible bending joint. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1986**(1), 012033-1–012033-5 (2021).
- 6.23 Seo, Y.-S., Cho, S.J., Lee, J.-Y., Park, C., Kim, U., Lee, S., Kim, B., Park, C., Song, S.-H.: Human-mimetic soft robot joint for shock absorption through joint dislocation. *Bioinspir. Biomim.* **15**(1), 016001-1–016001-19 (2019).
- 6.24 Liu, C.H., Chen, L.J., Chi, J.C., Wu, J.Y.: Topology optimization design and experiment of a soft pneumatic bending actuator for grasping applications. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **7**(2), 2086–2093 (2022).
- 6.25 Azami, O., Morisaki, D., Miyazaki, T., Kanno, T., Kawashima, K.: Development of the extension type pneumatic soft actuator with built-in displacement sensor. *Sensors Actuat. A-Phys.* **300**, 111623-1–111623-9 (2019).
- 6.26 Ge, S.S., Liew, C.F., Li, Y., Yang, J.: System design and hardware integration of social robot Nancy. In: *Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2011)*, pp. 336–341. IEEE Xplore, New York (2012).
- 6.27 Sankaranarayanan, R., Weinberg, G.: Design of Hathaani – A robotic violinist for Carnatic music. In: *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2021)*, pp. 1–25. MIT Press, Massachusetts (2021).
- 6.28 Ficht, G., Behnke, S.: Bipedal humanoid hardware design: A technology review. *Curr. Robot. Rep.* **2**(2), 201–210 (2021).
- 6.29 Asfour, T., Waechter, M., Kaul, L., Rader, S., Weiner, P., Ottenhaus, S., Grimm, R., Zhou, Y., Grotz, M., Paus, F.: Armar-6: A high-performance humanoid for human-robot collaboration in real-world scenarios. *IEEE Robot. Autom. Mag.* **26**(4), 108–121 (2019).
- 6.30 Shirai, T., Nagamatsu, Y., Suzuki, H., Nozawa, S., Okada, K., Inaba, M.: Design and evaluation of torque based bipedal walking control system that prevent fall over by impulsive disturbance. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018)*, pp. 739–746. IEEE Xplore, New York (2019).
- 6.31 Zhu, T., Ahn, M.S., Hong, D.: Design and experimental study of BLDC motor immersion cooling for legged robots. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2021)*, pp. 1137–1143. IEEE Xplore, New York (2022).
- 6.32 Mizuuchi, I., Hondo, T., Ito, T., Kozak, T., Asaoka, T., Tsuneoka, Y., Ogata, S., Yamamoto, N.: Development of a whole-body elastic humanoid Baneoid. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2015)*, pp. 889–894. IEEE Xplore, New York (2015).
- 6.33 Dong, Y., Zhang, Z., Hu, H.: Development of an upper body humanoid robot. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2014)*, pp. 143–148. IEEE Xplore, New York (2015).
- 6.34 Lee, C., Oh, S.: Development, analysis, and control of series elastic actuator-driven robot leg. *Front. Neurobot.* **13**, 17-1–17-21 (2019).
- 6.35 Liu, Y., Cui, S., Liu, H., Jin, M., Ni, F., Li, Z., Li, C.: Robotic hand-arm system for on-orbit servicing missions in Tiangong-2 Space Laboratory. *Assembly Autom.* **39**(5), 999–1012 (2019).
- 6.36 Baur, J., Dendorfer, S., Pfaff, J., Schütz, C., Buschmann, T., Ulbrich, H.: Experimental friction identification in robot drives. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, pp. 6006–6011. IEEE Xplore, New York (2016).
- 6.37 Duval, J.F., Herr, H.M.: FlexSEA-Execute: Advanced motion controller for wearable robotic applications. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2016)*, pp. 1056–1061. IEEE Xplore, New York (2016).
- 6.38 Mahyuddin, M.N., Khan, S.G., Herrmann, G.: A novel robust adaptive control algorithm with finite-time online parameter estimation of a humanoid robot arm. *Robot. Auton. Syst.* **62**(3), 294–305 (2014).
- 6.39 Hasan, S.K., Dhingra, A.K.: State of the art technologies for exoskeleton human lower extremity rehabilitation robots. *J. Mechatron. Robot.* **4**(1), 211–235 (2020).
- 6.40 Begum, M.M.R., Chandramouli, M.S., Gowtham, M.T.: Design and development of dual axis control robot for writing robot through speech recognition. *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.* **2**(3), 78–84 (2020).
- 6.41 Ebrahimi, N.: Modeling, simulation and control of a robotic arm. engrXiv (Engineering Archive) (2019).
- 6.42 Ghaleb, N.M., Aly, A.A.: Modeling and control of 2-DOF robot arm. *IJEERT* **6**(11), 24–31 (2018).

- 6.43 Engin, M., Engin, D.: Design of real time embedded PID controller for Sun tracking robot manipulator. In: *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2014)*, pp. 670–675. IEEE Xplore, New York (2014).
- 6.44 Tuna, M., Fidan, C.B., Kocabey, S., Gorgulu, S.: Effective and reliable speed control of permanent magnet DC (PMDC) motor under variable loads. *J. Electr. Eng. Technol.* **10**(5), 2170–2178 (2015).
- 6.45 Wu, X., Liu, J., Zhou, Y., Lv, Q., Hu, C.: Movement control and attitude adjustment of climbing robot on flexible surfaces. *IEEE T. Ind. Electron.* **65**(3), 2618–2628 (2017).
- 6.46 Kelly, R., Zepeda, G., Monroy, C.: On simplified models of position servo actuators for control purposes. In: *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD 2021)*, pp. 1–6. IEEE Xplore, New York (2021).
- 6.47 Gowthaman, E., Balaji, C.D.: Self tuned PID based speed control of PMDC drive. In: *Proceedings of the International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s 2013)*, pp. 686–692. IEEE Xplore, New York (2013).
- 6.48 Vukobratović, M., Potkonjak, V., Inoue, K., Takano, M.: Actuators and computer-aided design of robots. In: Nwokah, O.D.I, Hurmuzlu, Y. (eds.) *The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement and Control*, pp. 523–556. CRC Press, Boca Raton (2017).
- 6.49 Wang, S., Wang, L., Meijneke, C., Van Asseldonk, E., Hoellinger, T., Cheron, G., Ivanenko, Y., La Scaleia, V., Sylos-Labini, F., Molinari, M., Tamburella, F.: Design and control of the MINDWALKER exoskeleton. *IEEE T. Neur. Sys. Reh.* **23**(2), 277–286 (2014).
- 6.50 Yang, S.H., Koh, C.L., Hsu, C.H., Chen, P.C., Chen, J.W., Lan, Y.H., Yang, Y., Lin, Y.D., Wu, C.H., Liu, H.K., Lo, Y.C.: An instrumented glove-controlled portable hand-exoskeleton for bilateral hand rehabilitation. *Biosensors* **11**(12), 495-1–495-12 (2021).
- 6.51 Thinh, N.T., Tho, T.P.: Kinematic analysis and development of five-axis milling machine based on parallel mechanisms. In: *Proceedings of the International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2016)*, pp. 145–154. IEEE Xplore, New York (2016).
- 6.52 Herbin, P.: Design and modeling of an exoskeleton torque sensor. *Sci. J. Marit. Univ. Szczec.* **51**(123), 89–94 (2017).
- 6.53 Narayan, J., Kumar Dwivedy, S.: Preliminary design and development of a low-cost lower-limb exoskeleton system for paediatric rehabilitation. *P. I. Mech. Eng. H.* **235**(5), 530–545 (2021).
- 6.54 Wu, Y., Cheng, Y.: Design of mechanical arm-motor control system based on DSP. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2019)*, pp. 348–353. IEEE Xplore, New York (2019).
- 6.55 Aswath, S., Unnikrishnan, V.J., Sreekuttan, T.K., Abin Simon, H., Deepu, P.M., Menon, M., Basil, P., Ramachandran, R., Sengar, A., Balakrishnan, A., Dutt, K.: Design and development of an intelligent rover for Mars exploration. In: *Proceedings of the Annual International Mars Society Convention (MSC 2016)*, pp. 1–11. The Mars Society, Washington (2016).
- 6.56 Rathan, N., Venkatesh, A.: Design and implementation of Soft-i-Robot for face detection and obstacle avoidance using neural networks and genetic algorithm. *Asian J. Appl. Sci.* **1**(2), 120–126 (2017).
- 6.57 Shekhawat, A.S., Rohilla, Y.: Design and control of two-wheeled self-balancing robot using Arduino. In: *Proceedings of the International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC 2020)*, pp. 1025–1030. IEEE Xplore, New York (2020).
- 6.58 Sawarkar, M.R., Raut, T.R., Nutan, P.N., Meshram, S.C., Pournima, P.T.: Pick and place robotic arm using android device. *IRJET* **4**(3), 1706–1709 (2017).
- 6.59 Silwal, A., Davidson, J.R., Karkee, M., Mo, C., Zhang, Q., Lewis, K.: Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester. *J. Field Robot.* **34**(6), 1140–1159 (2017).
- 6.60 Zhu, H., Li, X., Chen, W., Li, X., Ma, J., Teo, C.S., Teo, T.J., Lin, W.: Weight imprinting classification-based force grasping with a variable-stiffness robotic gripper. *IEEE T. Autom. Sci. Eng.* **19**(2), 969–981 (2021).
- 6.61 Park, I.W., Kim, J.Y., Cho, B.K., Oh, J.H.: Control hardware integration of a biped humanoid robot with an android head. *Robot. Auton. Syst.* **56**(1), 95–103 (2008).
- 6.62 Jeong, K.W., Cho, I.J. and Lee, Y.J.: Development of autonomous eating mechanism for biomimetic robots. *Proc. of SPIE* **6042**(1), 60423G-1–60423G-6 (2006).
- 6.63 Lin, C.C., Huang, H.P.: Design of a face robot with facial expression. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2009)*, pp. 492–497. IEEE Xplore, New York (2010).
- 6.64 Asheber, W.T., Lin, C.Y., Yen, S.H.: Humanoid head face mechanism with expandable facial expressions. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **13**(1), 29-1–29-8 (2016).
- 6.65 Tadesse, Y., Subbarao, K., Priya, S.: Realizing a humanoid neck with serial chain four-bar mechanism. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **21**(12), 1169–1191 (2010).
- 6.66 Kuo, P.T., Chung, I., Chen, J.E., Wu, C.W.: An emotional robot with facial expressions. *Chung Hua J. Sci. Eng.* **5**(4), 9–13 (2007).
- 6.67 Amanda, H.A.H., Athuraliya, S., Bandara, G.A.M.T., Dohanayaka, S.R., Muthumala, A.T.D.S., Jayasekara, A.G.B.P.: Interactive robotic head for neck exercises. In: *Proceedings of the Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon 2015)*, pp. 165–170. IEEE Xplore, New York (2015).
- 6.68 Choi, H.R., Kwak, J.W., Chi, H.J., Jung, K.M., Hwang, S.H.: Development of face robot actuated by artificial muscle. In: *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2004)*, pp. 1229–1234. IMSRU, Kuala Lumpur (2004).
- 6.69 Naveenkumar, S. The intelligent humanoid robot. *IRJET* **7**(9), 2384–2389 (2020).

-
- 6.70 Olcucuoglu, O., Koku, A.B., Konukseven, E.I.: i-RoK: A human like robotic head. In: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2007)*, pp. 442–446. IEEE Xplore, New York (2009).
 - 6.71 Lalitharatne, T.D., Tan, Y., He, L., Leong, F., Van Zalk, N., de Lusignan, S., Iida, F., Nanayakkara, T.: MorphFace: A hybrid morphable face for a robotpatient. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **6**(2), 643–650 (2021).
 - 6.72 Ricks, D.J., Colton, M.B., Goodrich, M.A.: Design and evaluation of a clinical upper-body humanoid robot for autism therapy. In: *Proceedings of the International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (ICABB 2010)*, pp. 1–8. [CD-ROM], Venice (2010).
 - 6.73 González-Cely, A.X., Callejas-Cuervo, M., Bastos-Filho, T.: Wheelchair prototype controlled by position, speed and orientation using head movement. *HardwareX* **11**, e00306-1– e00306-15 (2022).
 - 6.74 Zhu, X., Li, R., Hu, J., Zhang, H., Luo, Q., Duan, Q., Jiang, K., A.: Guided task and obstacle alert robot system based on TinyML and augmented reality. In: *Proceedings of the International Conference on Control, Robotics and Intelligent System (CCRIS 2022)*, pp. 225–229. ACM, New York (2022).
 - 6.75 Flores, E., Fels, S., Vatikiotis-Bateson, E.: Chew on this: Design of a 6 DOF anthropomorphic robotic jaw. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2007)*, pp. 648–653. IEEE Xplore, New York (2008).
 - 6.76 Yuan, S., Epps, A.D., Nowak, J.B., Salisbury, J.K.: Design of a roller-based dexterous hand for object grasping and within-hand manipulation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2020)*, pp. 8870–8876. IEEE Xplore, New York (2020).
 - 6.77 Görner, M., Benedikt, F., Grimmel, F., Hulin, T.: SwarmRail: A novel overhead robot system for indoor transport and mobile manipulation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2020)*, pp. 5905–5911. IEEE Xplore, New York (2020).
 - 6.78 Moey, L.K., Teng, N.L.S., Ng, J.Y., Solihin, M.I., Badrulhisam, N.H., Design and development of ladder climbing robot. *Appl. Mech. Mater.* **899**, 31–41 (2020).
 - 6.79 MAXON Precision Drive Systems, Catalog: Product Range 2023/24 (2023).
-

Sadržaj

7 Eksperiment.....	100
7.1 Postavke.....	100
7.2 Dizajn.....	101
7.3 Procedura.....	102
7.4 Rezultati.....	103
7.5 Zaključak.....	107
Reference.....	107

7 Eksperiment

Ljudi, kao društvena bića, teže interakciji sa drugim subjektima i nedostatak ekspresije osećanja mogu protumačiti kao nezainteresovanost sagovornika. Zato je važno da robot bude sposoban da ispoljava emocije i komunicira sa ljudima na prirodan i transparentan način, upotrebom verbalnih i neverbalnih signala [7.1]. Prema [7.2], čovek je u stanju da opazi i razume emotivna stanja koja robot izražava na osnovu relativno malog broja pokretnih tačaka na licu robota, što implicira da su osećanja nešto što ljudsko oko "traži" na licu sagovornika, čak i kad je sagovornik robot.

7.1 Postavke

Radi utvrđivanja u kojoj meri predloženo rešenje očiju i obrva može neverbalno da prenese emocije, urađen je eksperiment. Cilj je bio da se odredi koliko su predložene oči i obrve sposobne da uspešno izraze emocije grupi ljudskih subjekata. Prema Ekmanu [7.3], šest osnovnih emocija relevantnih za eksperiment je izabrano: iznenađenje, strah, gađenje, bes, sreća i tuga. Ove osnovne emocije su se pokazale kao univerzalno prepoznatljive u okviru Ekmanovog istraživanja na merenju pokreta koje lice generiše prilikom ispoljavanja emocija. Da bi raščlanio složene pokrete lica prilikom izražavanja emocija, Ekman je razvio sistem za kodiranje facijalnih ekspresija (eng. *Facial Action Coding System – FACS*). Sistem je razvijen za interpretaciju najčešćih facijalnih ekspresija identifikacijom specifičnih mišićnih aktivnosti koje izazivaju trenutne promene u izgledu lica – ovi specifični pokreti se nazivaju akcione jedinice (eng. *Action Unit – AU*) i mogu biti klasifikovani, na primer, kao „podizanje gornjih kapaka“ ili „pomeranje unutrašnjeg kraja obrve“ [7.4].

Prema [7.5], crte lica kod većine robota su skromne i sa ograničenim sposobnostima u poređenju sa ljudskim. Iako gornji deo lica robota najčešće ima svega nekoliko *DoF*, postoji skup minimalnih karakteristika za ljudske izraze lica kojim se efikasno ispoljavaju

emocije [7.2]. Na osnovu Ekmanovog suštinskog rada [7.6], kao i drugih radova na temu lica robota [7.7,7.8], postavke eksperimenta su započete definisanjem grupa *AU* za izražavanje osnovnih – gorenavedenih šest emocija, uzimajući u obzir samo kretanje očiju i obrva. Tabela 7.1 prikazuje grupe *AU* za šest osnovnih emocija koje robot *MARKO* treba da izrazi. Treba istaći da robot *SARA* nije obuhvaćen ovim eksperimentom zbog toga što potrebna rekonstrukcija lica robota – vidi Poglavlje 2, prevazilazi okvire ovog istraživanja.

Tabela 7.1. Grupe *AU* za emocije koje robot treba da izrazi.

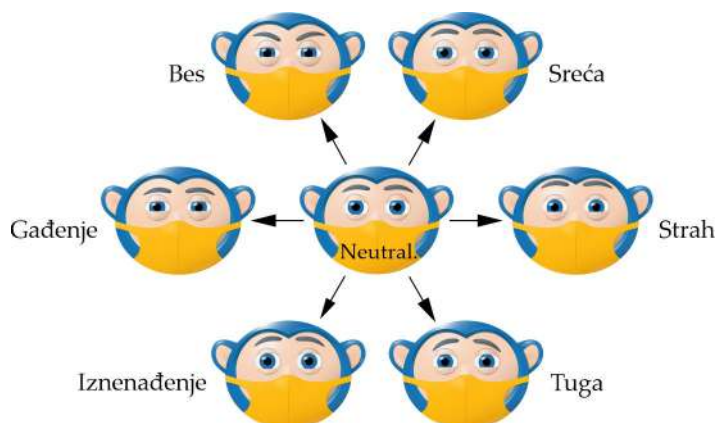
Emocija	Gornji kapci	Donji kapci	Obrve vertikalno	Spoljašnji kraj obrva	Pogled
Bes	Spušteni delimično	Podignuti malo iznad šarenice do zenice	Spuštene potpuno	Podignut potpuno prema gore	Direktan
Gađenje	Spušteni delimično	Podignuti malo iznad šarenice do zenice	Spuštene potpuno	Ravan	Direktan
Iznenadenje	Podignuti malo iznad šarenice do beonjače	Neutralan položaj	Podignute potpuno	Podignut blago prema dole	Direktan
Sreća	Spušteni blago	Podignuti blago	Podignute blago	Ravan	Direktan
Strah	Podignuti malo iznad šarenice do beonjače	Podignuti malo iznad šarenice do zenice	Podignute potpuno	Ravan	Direktan
Tuga	Podignuti blago	Podignuti blago	Podignute potpuno	Podignut potpuno prema dole	Spušten

7.2 Dizajn

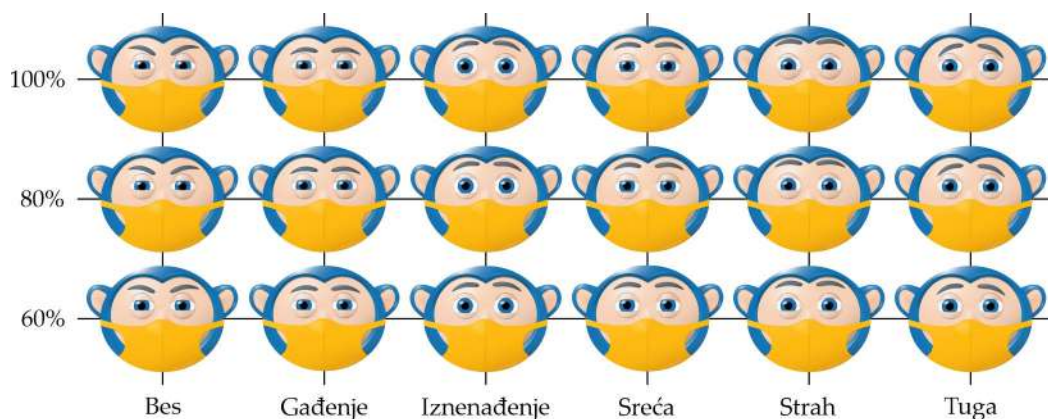
Na osnovu postojećeg izgleda robota *MARKO* [7.9], dizajniran je 2D prikaz njegovog lica, sa jednom izmenom. Naime, donji deo lica koji obuhvata nos i usta je prekriven zaštitinom maskom. Ova izmena je urađena iz nekoliko razloga: (i) pažnja subjekata treba da bude usmerena na gornju polovinu lica robota – razvijene oči i obrve, kao i njihovu sposobnost da ispolje emocije, što je tema istraživanja, (ii) donja polovina lica je kruta i nepokretna, i zbog toga nije od značaja za eksperiment – treba napomenuti da su nos i usta izrazito važni delovi lica za ispoljavanje i prepoznavanje emocija [7.3,7.6], i prikazati ih kao nepokretne uz druge pokretne delove lica (oči i obrve), učinilo bi ispoljene izraze lica neskladnim što bi potencijalno zbunilo subjekte, (iii) lice robota *MARKO* je srcoliko i već na prvi pogled privlači pažnju okoline svojim pozitivnim stavom, bez obzira na položaj pokretnih delova lica – zbog toga je važno prekriti lice i pažnju subjekata usmeriti na gornji deo lica i regiju oka, i (iv) globalna pandemija virusom *SARS-CoV-2* nametnula je upotrebu zaštitne maske u svakodnevnoj komunikaciji, što je danas opšteprihvaćeno.

Slika 7.1, na osnovu podataka iz Tabele 7.1, prikazuje šest osnovnih izraza lica robota *MARKO*: bes, gađenje, iznenadenje, sreću, strah i tugu. Radi pouzdanosti eksperimenta,

svaka emocija koju ispoljava robot biće prikazana subjektima tri puta, nasumično izmešana sa prikazima drugih emocija [7.8]. Identična emocija se prikazuje tri puta, ali različitim intenzitetom tako što se varira intenzitet ekspresije odgovarajućih *AU*, što omogućava istraživačima da utvrde da li intenzitet ekspresije ima uticaj na njenu prepoznatljivost [7.1]. Slika 7.2 prikazuje 6 emocija robota u zavisnosti od intenziteta ekspresije: 60%, 80% i 100%.



Slika 7.1 Robot MARKO i šest osnovnih emocija upotrebom očiju i obrva.



Slika 7.2 Šest različitih emocija robota sa različitim intenzitetom ekspresije, redom: 60%, 80% i 100%.

Prema podacima iz Tabele 7.1, formirani su video klipovi sa šest različitih emocija, sa tri nivoa intenziteta ekspresije, što je ukupno 18 video klipova. Slično kao u [7.2,7.8], svaki video klip se sastoji iz pet segmenata: (i) početni trenutak, gde je lice robota u neutralnom položaju – ukupno 3 s, (ii) tranzicioni period, gde robot menja izraz lica iz neutralnog u izraz neke emocije – ukupno 0.5 s, (iii) izraz lica koji odgovara nekoj emociji – ukupno 3 s, (iv) tranzicioni period, gde se lice robota vraća u inicijalni položaj – ukupno 0.5 s, i (v) završni trenutak, gde je lice robota u neutralnom položaju – ukupno 3 s. Prema tome, trajanje svakog klipa iznosi ukupno 10 s.

7.3 Procedura

Eksperiment je sproveden u laboratorijskim uslovima na fakultetu, sa kontrolisanim osvetljenjem i zvukom, bez značajnih poremećaja pažnje. Svaki subjekt u eksperimentu sedi ispred LCD ekrana veličine 23 inča, na rastojanju od 2 m, što je prikazano na Slici 7.3. Cilj eksperimenta je da se utvrdi koliko je predloženo rešenje očiju i obrva sposobno da izražava emocije tako da subjekti razumeju koju emociju robot ispoljava. Budući da su oči vrlo važne u razmeni emocija u međuljudskim interakcijama, relevantno je odrediti u kojoj meri je prikazani model sposoban da izrazi osnovne emocije.



Slika 7.3 Prikaz nekoliko kadrova subjekata za vreme trajanja eksperimenta.

U eksperimentu je učestvovao 51 subjekt – svi studenti na osnovnim studijama uzrasta 18 do 27 god., prosečne starosti 21.57 god., od čega je 29 ženskog i 22 muškog pola. Subjekti nisu bili svesni cilja istraživanja niti su imali prethodno iskustvo sa sličnim modelima i istraživanjima. Nakon davanja saglasnosti i upoznavanja sa eksperimentom, svakom subjektu je prikazano 18 video klipova u kojima robot *MARKO* izražava neku emociju. Svakom subjektu su klipovi prikazani nasumičnim redosledom, uz uslov da se ista emocija nijednom nije prikazala dva puta zaredom. Subjektima je dato neograničeno vreme da ispune svaki zadatak, ali nije dozvoljeno da se isti klip prikazuje više puta. Posle svakog video klipa, subjektima je dat upitnik za identifikaciju facijalnih ekspersija (eng. *Facial Expression Identification – FEI*) [7.2], sa ukupno tri pitanja. Pitanje #1 predstavlja jednostavan

zadatak i odnosi se na identifikovanje prikazane emocije u video klipu, biranjem emocije sa spiska šest osnovnih emocija poređanih po alfabetskom redu za koju subjekti smatraju da najbliže odgovara video klipu. Nakon toga, subjekti prelaze na Pitanje #2 gde treba odgovoriti u kojoj meri je ispoljena emocija sa aspekta intenziteta na skali od 0 (nimalo) do 6 (najjače), slično kao u [7.2,7.5,7.10,7.11]. Zatim je postavljeno Pitanje #3, gde su subjekti imali priliku da, ukoliko žele, izaberu jednu ili više "alternativnih emocija" za koje smatraju da robot možda izražava, osim one koju su odabrali u Pitanju #1, slično kao u [7.2]. U nastavku, "primarna tačnost" se odnosi na jednom odgovoru na Pitanje #1, dok "sekundarna tačnost" uključuje odgovore na Pitanja #1 i #3 zajedno.

7.4 Rezultati

Podaci iz popunjenih *FEI* upitnika su uneti u matricu podataka radi analize i interpretacije upotrebom softvera za statistiku *IBM SPSS_v23*. Globalno, prvi pokušaj subjekata je bio tačan u 45.8% slučajeva (primarna tačnost je postignuta u 420 od 918 slučajeva). Subjekti su pogađali drugi put u 25.7% slučajeva, dok je tačnost bila u 20.8% slučajeva (49 od 236 slučajeva). Kombinovano, subjekti su uspešno prepoznali izraze lica robota u 51.1% slučajeva, u prvom ili drugom pokušaju, što je zadovoljavajuće.

Tabela 7.2 prikazuje matricu konfuzije gde su krostabulirane emocije koje su prepoznali subjekti (u redovima, uzimajući u obzir samo prvi pokušaj), i emocije koje je robot generisao (u kolonama). Čelije tabele sadrže procenete poklapanja ili nepoklapanja prepoznate i prikazane emocije, pri čemu su po dijagonali iz gornje leve do donje desne ćelije prikazana poklapanja (sive ćelije), a u ostalim nepoklapanja.

Tabela 7.2 Matrica konfuzije i stopa prepoznavanja identifikovanih emocija u procentima.

		Ispoljena emocija – robot <i>MARKO</i>					
		Bes	Gađenje	Iznenadjenje	Sreća	Strah	Tuga
Identifikovana emocija ¹	Bes	92.8	28.9	0.0	3.4	2.0	0.0
	Gađenje	5.2	35.5	2.6	34.2	6.5	2.6
	Iznenadjenje	1.3	9.9	51.6	31.5	46.4	1.3
	Sreća	0.0	7.2	5.9	6.7	38.6	1.3
	Strah	0.7	11.8	27.5	12.8	4.6	11.1
	Tuga	0.0	6.6	12.4	11.4	2.0	83.7

¹ Emocija koju su identifikovali subjekti u prvom pokušaju.

Prema podacima iz Tabele 7.2, izrazi besa i tuge su uspešno prepoznati u velikom broju slučajeva (92.8% i 83.7%, respektivno); izraz iznenadjenja je uspešno prepoznat u po-

Tabela 7.3 Krostabulacija identifikovanih emocija za svaki od tri nivoa intenziteta ispoljene emocije; sivi redovi se odnose na frekvencije ispravno identifikovanih emocija za svaki od tri nivoa intenziteta.

Ispoljena emocija – robot MARKO		Intenzitet ispoljene emocije			Ukupno	
		60%	80%	100%		
Bes	Identifikovana emocija	Bes	47	45	50	142
		Gađenje	2	5	1	8
		Iznenadenje	1	1	0	2
		Sreća	0	0	0	0
		Strah	1	0	0	1
		Tuga	0	0	0	0
	Ukupno	51	51	51	153	
Gađenje	Identifikovana emocija	Bes	12	10	22	44
		Gađenje	14	22	18	54
		Iznenadenje	7	2	6	15
		Sreća	3	3	5	11
		Strah	4	8	6	18
		Tuga	1	5	4	10
	Ukupno	41	50	61	152	
Iznenadenje	Identifikovana emocija	Bes	0	0	0	0
		Gađenje	3	1	0	4
		Iznenadenje	30	31	18	79
		Sreća	0	5	4	9
		Strah	13	9	20	42
		Tuga	5	5	9	19
	Ukupno	51	51	51	153	
Sreća	Identifikovana emocija	Bes	1	1	3	5
		Gađenje	16	17	18	51
		Iznenadenje	12	16	19	47
		Sreća	4	4	2	10
		Strah	8	6	5	19
		Tuga	8	7	2	17
	Ukupno	49	51	49	149	
Strah	Identifikovana emocija	Bes	1	1	1	3
		Gađenje	8	2	0	10
		Iznenadenje	29	25	17	71
		Sreća	19	17	23	59
		Strah	2	5	0	7
		Tuga	2	1	0	3
	Ukupno	61	51	41	153	
Tuga	Identifikovana emocija	Bes	0	0	0	0
		Gađenje	2	1	1	4
		Iznenadenje	2	0	0	2
		Sreća	0	1	1	2
		Strah	7	5	5	17
		Tuga	40	44	44	128
	Ukupno	51	51	51	153	

Napomena: ukupan broj subjekata je 51.

lovini slučajeva (51.6%), mada je često pogrešno identifikovan kao strah (27.5%); izraz gađenja je uspešno prepoznat u 1/3 slučajeva (35.5%), i često je mešan za besom (28.9%); izraz sreće je uspešno prepoznat u malom broju slučajeva (6.7%), i često pogrešno identifikovana kao gađenje (34.2%) ili iznenađenje (31.5%); izraz straha je takođe prepoznat u malom broju slučajeva (4.6%), a pogrešno je identifikovan kao iznenađenje (46.4%) ili sreća (38.6%). Tabela 7.3 prikazuje detaljnu analizu prvih pokušaja identifikovane emocije prikazane u svakom video klipu, za svaki od tri nivoa intenziteta, dok Tabela 7.4 sumira ove rezultate.

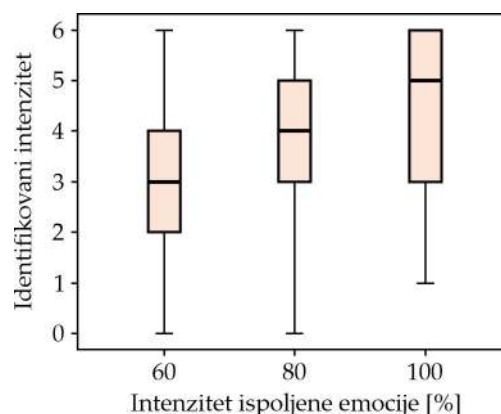
Tabela 7.4 Broj ispravno identifikovanih emocija u zavisnosti od nivoa intenziteta ispoljene emocije.

Intenzitet ispoljene emocije	Ispoljena emocija – robot MARKO					
	Bes	Gađenje	Iznenađenje	Sreća	Strah	Tuga
60%	47 (92.1%)	14 (27.4%)	30 (58.8%)	4 (7.8%)	2 (3.9%)	40 (78.4%)
80%	45 (88.2%)	22 (43.1%)	31 (60.8%)	4 (7.8%)	5 (9.8%)	44 (86.3%)
100%	50 (98.0%)	18 (35.3%)	18 (35.3%)	2 (3.9%)	0 (0%)	44 (86.3%)

Napomena: ukupan broj subjekata je 51.

Na osnovu podataka iz Tabele 7.4, zaključuje se da intenzitet izraza nema značajnu ulogu u identifikaciji emocije – subjekti su birali istu emociju nezavisno od intenziteta pokreta. Još zanimljivije, izrazi iznenađenja i straha su identifikovani sa većom tačnošću kada su prikazani sa 60% i 80% intenziteta, nego sa 100%.

Iako intenzitet izraza nema uticaja na percepciju emocije, bio je primetan subjektima. Primećena je slaba, ali značajno pozitivna korelacija između intenziteta izraza robota i pretpostavljenog intenziteta izraza od strane subjekata, upotrebom Spirmanov koeficijenta korelacije ($\rho=0.304$, $p<0.01$). Prema tome, subjekti su određenim stepenom uspešnosti identifikovali intenzitet izraženih emocija, na skali od 0 do 6: (i) za izraženu emociju sa 60% intenziteta, subjekti su identifikovali intenzitet emocije sa medijanom 3, (ii) za izraženu emociju sa 80% intenziteta, subjekti su identifikovali intenzitet emocije sa medijanom 4, (iii) za izraženu emociju sa 100% intenziteta, subjekti su identifikovali intenzitet emocije sa medijanom 5, što je prikazano na Slici 7.4. Ova korelacija je još zanimljivija kada se posmatra svaka emocija posebno, pa je za tri emocije koje su najuspešnije prepoznate u prvom pokušaju – bes, tuga i iznenađenje, koeficijent korelacije je još veći i interpretira se kao “umeren”, tj. $\rho=0.570$, $p<0.01$; $\rho=0.452$; $p<0.01$; $\rho=0.462$, $p<0.01$, respektivno.



Slika 7.4 Box-and-Whisker grafik na kome je prikazan intenzitet identifikovanih emocija: 0 do 6, za sva tri nivoa intenziteta izraza lica robota, redom: 60%, 80% i 100%.

Pol subjekata nije imao značajan uticaj na uspešnost identifikacije emocija – iako je primećena mala razlika u primarnoj tačnosti ženskih i muških subjekata (46.9% i 44.2%, respektivno), ova razlika nije značajna ($\phi=0.027$, $p=0.409$), dok u sekundarnoj tačnosti nije primećena razlika između polova ($\phi=0.023$, $p=0.479$). Takva analiza svake emocije posebno, dala je slične rezultate. Radi utvrđivanja “efekta uvežbanosti” subjekata na uspešnost identifikacije emocija, prikupljeni podaci su podeljeni na trećine, na osnovu redosleda kojim su prikazivani video klipovi – zatim je posmatrana primarna tačnost u svakoj trećini eksperimenta, međutim nije bilo nikakvih značajnih razlika.

7.5 Zaključak

Predloženo rešenje strukture robotskih očiju i obrva je naročito sposobno da izrazi emocije besa i tuge, što je u skladu sa prethodnim istraživanjima, a delimično za izraz iznenađenja; sa druge strane, gađenje, sreća i strah su nedovoljno dobro identifikovani i često pogrešno identifikovani sa drugim emocijama; bes i tuga ovde dolaze do izražaja zbog toga što obrve u oba slučaju zauzimaju ekstremne položaje, u smislu vertikalnog položaja i položaja spoljašnjih krajeva – ova „jedinstvenost“ izraza ove dve emocije se podudara sa pravilom „preklapanja“ iz prethodnog istraživanja koje ukazuje da „što je manje *DoF* u izrazu emocije koji se preklapaju sa drugim emocijama, izraz te jedne emocije biće prepoznatljiviji“ [7.8]; ovo pravilo važi i za izraz iznenađenja – iako obrve zauzimaju ekstremni vertikalni položaj, spoljašnji krajevi se ne kreću na jedinstven i značajan način, što ukazuje na razlog zbog čega je izraz ove emocije tačno identifikovan samo u polovini slučajeva; ograničenja u uspešnosti izražavanja ostalih emocija se podudaraju sa pravilom „pokrivenosti“, definisanim od strane istih autora: „što se više *AU* potrebnih za izražavanje date emocije može

prikazati *DoF* robota, to će emocija biti prepoznatljivija“ [7.8]; izrazi pojedinih emocija zahtevaju pokrete delova lica koji nisu obuhvaćeni ovim istraživanjem [7.3]: (i) iznenađenje zahteva pokret „padanje vilice“, (ii) strah prati specifičan pokret usta koji, ponekad, uopšte ne uključuje pokret obrva, (iii) gađenje se prvenstveno izražava specifičnim pokretom usta i naborima nosa, (iv) sreća se izražava pokretom usana i nazolabijalnih bora koje se protežu od nosa prema spoljašnjim krajevima usana, (v) strah, iznenađenje i sreća, ukoliko se posmatraju samo oči i obrve, međusobno se ne razlikuju mnogo – zbog toga su pokreti drugih delova lica od suštinskog značaja za uspešnu identifikaciju ovih složenih emocija [7.6]. Treba napomenuti da je strah naročito komplikovan za izražavanje zbog upotrebe velikog broja mišića i kompleksne kontrole, mada je i retkost izraza ove emocije u svakodnevnom životu verovatno faktor u slaboj uspešnosti identifikacije koju su pokazali subjekti eksperimenta [7.12].

Reference

- 7.1. Bartneck, C., Reichenbach, J., Breemen, A.: In your face, robot! The influence of a character's embodiment on how users perceive its emotional expressions. In: *Proceedings of the International Conference on Design and Emotion*, pp. 32–51. METU, Ankara (2004).
- 7.2. Bennett, C.C., Šabanović, S.: Deriving minimal features for human-like facial expressions in robotic faces. *Int. J. Soc. Robot.* **6**(3), 367–381 (2014).
- 7.3. Ekman, P., Friesen, W.V.: *Unmasking the Face. A Guide to Recognizing Emotions from Facial Clues*. Malor Books, Cambridge (2003).
- 7.4. Ekman, P., Friesen, W.V., Hager, J.C.: *Facial Action Coding System. Manual and Investigator's Guide*. Research Nexus, Salt Lake City (2002).
- 7.5. Schiano, D.J., Ehrlich, S.M., Rahardja, K., Sheridan, K.: Face to interface: Facial affect in (hu)man and machine. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2000)*, pp. 193–200. ACM, New York (2000).
- 7.6. Ekman, P., Friesen, W.V.: *Unmasking the Face*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs (1975).
- 7.7. Canamero, L., Fredslund, J.: I show you how I like you – Can you read it in my face? [robotics]. *IEEE T. Syst. Man Cy. A* **31**(5), 454–459 (2001).
- 7.8. Shayganfar, M., Rich, C., Sidner, C.L.: A design methodology for expressing emotion on robot faces. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, pp. 4577–4583. IEEE Xplore, New York (2012).
- 7.9. Borovac, B., Raković, M., Nikolić, M., Delić, V., Savić, S., Penčić, M., Mišković, D.: Robotics as assistive technology for treatment of children with developmental disorders – Example of robot MARKO. In: Rackov, M., Mitrović, R., Čavić, M. (eds.) *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering: KOD 2021*. MMS, vol. 109, pp. 69–76. Springer, Cham (2022).
- 7.10. Breazeal, C.: Emotion and sociable humanoid robots. *Int. J. Hum.-Comput. St.* **59**(1-2), 119–155 (2003).
- 7.11. Sosnowski, S., Bittermann, A., Kuhlentz, K., Buss, M.: Design and evaluation of emotion-display EDDIE. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, pp. 3113–3118. IEEE Xplore, New York (2007).
- 7.12. Bennett, C.C., Šabanović, S.: The effects of culture and context on perceptions of robotic facial expressions. *Interact. Stud.* **16**(2), 272–302 (2015).

Sadržaj

8 Rezultati i diskusija.....	109
8.1 Sposobnosti mehaničkog sistema	109
8.2 Rekonfigurabilnost mehanizama.....	110
8.3 Efikasnost neverbalne komunikacije.....	114
Reference	115

8 Rezultati i diskusija

Ovo poglavlje sumira rezultate i obuhvata: (i) poređenje prikazanog mehaničkog sistema sa kinematikom ljudskog oka, (ii) prednosti usvojene strukture mehanizama i njihovu rekonfigurabilnost, (iii) sposobnost mehaničkog sistema da proizvede facijalne ekspresije.

8.1 Sposobnosti mehaničkog sistema

Mehanički sistem se sastoji od tri podistema koji omogućavaju kretanje očnih jabučica, očnih kapaka i obrva nezavisno od ostatka lica robota. Zahvaljujući svojoj strukturi, mehanički sistem jabučica omogućava sve pokrete oka što je glavni uslov za realizovanje binokularne funkcije veštačkog vida robota i stereoviziju. Horizontalne i vertikalne sakade su veoma važne zbog rapidnih pokreta, dok pokreti vergencije omogućavaju fokusiranje objekata. Pored refleksnih pokreta, veoma je važno realizovati i glatke pokrete praćenja čije generisanje i kvalitet direktno zavise od strukture usvojenih mehanizama i njihovih veza, zbog čega trenje i zazori u zglobovima moraju biti što manji. U suprotnom, prilikom iniciranja pokreta, može doći do trzaja i vibracija što ima negativne efekte na stabilnost slike naročito ako se ima u vidu da će kamere za prepoznavanje okoline, objekata i lica biti locirane u očima robota. Sa aspekta kinematike, mehanički sistemi jabučica, kapaka i obrva su u velikoj meri sposobni da oponašaju ljudsko oko. Tabela 8.1 prikazuje poređenje kinematičkih parametara ljudskog oka sa parametrima prikazanih mehaničkih sistema oka robota, uz napomenu da svi kinematički parametri u tabeli predstavljaju ekstremne vrednosti.

Tabela 8.1. Poređenje kinematičkih parametara ljudskog oka sa parametrima prikazanih mehaničkih sistema oka robota.

Poređenje	Očne jabučice				Očni kapci				Obve			
	Pitch rotacija		Yaw rotacija		Gornji kapak		Donji kapak		Rotacija		Podizanje/Spuštanje	
	opseg [°]	brzina [°/s]	opseg [°]	brzina [°/s]	opseg [°]	brzina [°/s]	opseg [°]	brzina [°/s]	opseg [°]	brzina [°/s]	opseg [mm]	brzina [mm/s]
Čovek	75	800	90	800	±45	1100	±20	NA	NP	NP	+15 / NA	25 / NA
Robot	75	769.1	90	899.5	±50	727.9* 737.1**	±25	353.4* 363.6**	±20	320.0	+12.5 / -7.5	200.0 / 120.0

Napomena: NA – nije dostupno u literaturi; NP – ne postoji pokret; * kantalni nagib: $\kappa = 0^\circ$; ** kantalni nagib: $\kappa = 20^\circ$.

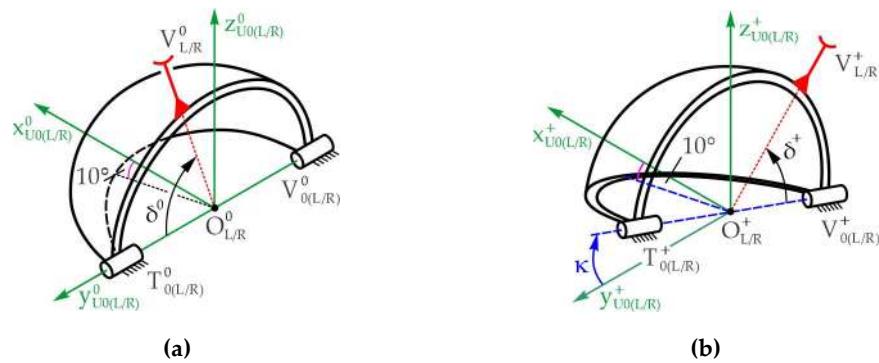
Pokreti obrva su složeni i zavise od toga koji deo obrve je aktuiran i u kom smeru (rotacija obrve kod ljudi ne postoji, već samo podizanje i spuštanje). Prilikom refleksnih pokreta obrva izazvanih strahom, obrve se pomeraju istovremeno sa gornjim kapcima zbog čega treba očekivati mnogo veće brzine od 25 mm/s, koliko je pronađeno u literaturi. Amplituda podizanja obrva u velikoj meri zavisi od uzrasta i opada sa godinama. Pretraživanjem literature, opseg pokreta donjeg kapka nije pronađen, već je estimiran imajući u vidu da je opseg kretanja gornjih kapaka približno dva puta veći nego donjih. Treba napomenuti da opseg pokreta gornjih kapaka direktno zavisi od tipa pokreta – vidi Poglavlje 2.

8.2 Rekonfigurabilnost mehanizama

Većina usvojenih mehanizama za pogon mehaničkog sistema jabučica, kapaka i obrva su polužni, dok je za podizanje obrva usvojen mehanizam zasnovan na navojnom vretenu. Polužni mehanizmi omogućavaju širok opseg radnih brzina, imaju visoku pouzdanost, mogu biti bezazorni (što zavisi od izvedbe), jednostavni su za realizaciju i montažu, dok mehanizmi sa navojnim vretenom omogućavaju transformaciju kretanja, imaju širok opseg koraka i brzina, takođe mogu biti bezazorni (što zavisi od tipa navoja), imaju visoku pouzdanost i jednostavni su za implementaciju. Bezazornost mehanizama omogućava visoku tačnost pozicioniranja očnih jabučica koja omogućava visoku tačnost i ponovljivost pokreta, što je ključno. Polužni mehanizmi imaju različitu strukturu i oblik članova, pa se zbog toga lako optimizuju. Sferno kretanje jabučice je najjednostavnije realizovati upotrebom prostornih polužnih mehanizama. Imajući u vidu ograničen prostor u glavi robota gde se nalazi čitav mehatronički sistem, prenos kretanja je najpogodnije realizovati prostornim polužnim mehanizmima. Kretanje izlaznog člana mehanizma je tačno definisano osom oko koje rotira – npr. očni kapci rotiraju oko y -ose. Sa druge strane, upotrebom prostornih polužnih mehanizama konstruktor ima mogućnost izbora odgovarajućeg kretanja ulaznog člana mehanizma, npr. rotacija oko x , y ili z -ose, čime se konstrukcija može lako oblikovati i prilagoditi raspoloživom prostoru unutar glave robota. Posebnu pogodnost predstavlja činjenica da se članovi mehanizama mogu formirati tehnologijom 3D štampe praha plastike (a ne žice), i tada se dobijaju članovi vrlo malih masa sa visokim kvalitetom izrade u pogledu tolerancija mera i klase hrapavosti površina. Zbog toga se inercijalna opterećenja u mehanizmu izazvana velikim ubrzanjima smanjuju, naročito kod refleksnih pokreta.

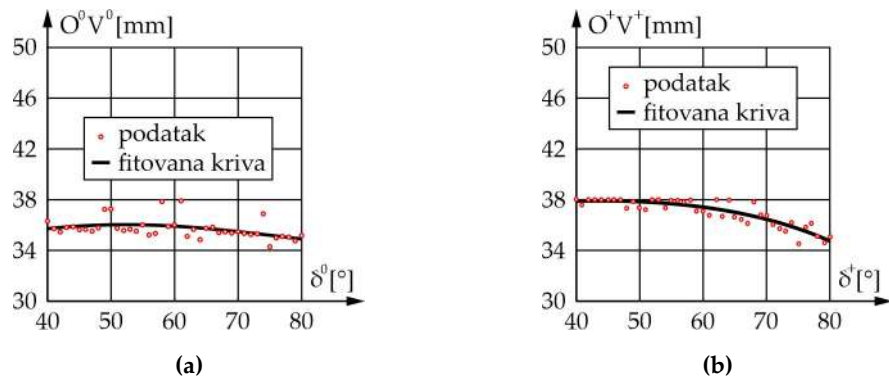
Slika 8.1 prikazuje izlazni član mehanizma gornjeg kapka sa neutralnim i pozitivnim kantlnim nagibom ($u_{gao} \kappa$), respektivno. Član O^0V^0 mora da vrši rotaciju oko y -ose, ali

njegov položaj može biti različit. Zbog toga je interesantno ispitati u kojoj meri je moguće menjati položaj poluge O^0V^0 ($\kappa = 0^\circ$) odnosno O^+V^+ ($\kappa = 20^\circ$), a da kinematika gornjeg kapka u oba slučaja ostane nenarušena. Konstruktivni parametar – ugao δ^0 odnosno δ^+ , menja se u intervalu od 40° do 80° . Manji od 40° ne može biti zbog kolizije sa bočnim delom lica odnosno mehanizmom sa suprotne strane, respektivno, dok veći od 80° ne može biti zbog kolizije sa jabučicom u oba slučaja. Sa aspekta konstruisanja, ovaj podatak je veoma važan zbog čega je ispitana rekonfigurabilnost mehanizama za pokretanje gornjih očnih kapaka.

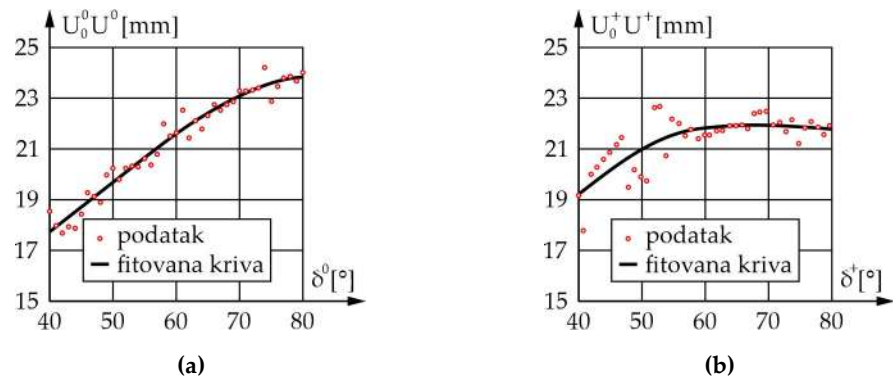


Slika 8.1 Promena geometrijskih parametara gornjih kapaka: (a) Položaj člana O^0V^0 u zavisnosti od ugla δ^0 ($\kappa = 0^\circ$); (b) Položaj člana O^+V^+ u zavisnosti od ugla δ^+ ($\kappa = 20^\circ$).

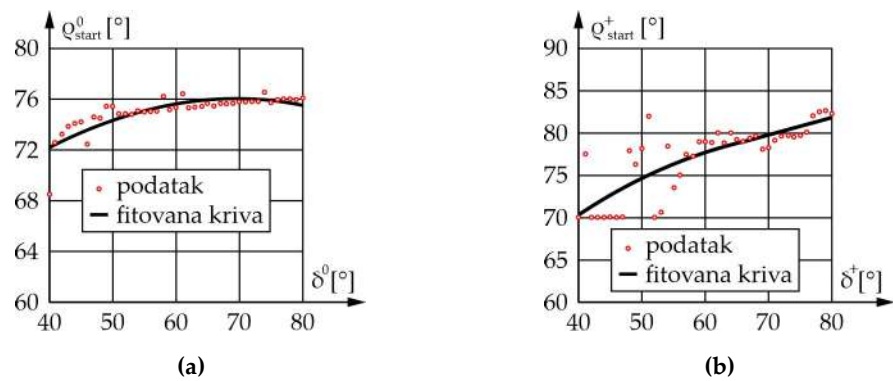
Na osnovu postupka prikazanog u Poglavlju 5.3, dimenziona sinteza mehanizma gornjeg kapka za svaki ugao δ^0 ($\kappa = 0^\circ$) odnosno δ^+ ($\kappa = 20^\circ$) je urađena. Slike 8.2 i 8.3 prikazuju promenu dužine izlaznog odnosno ulaznog člana u oba slučaja, respektivno, dok Slike 8.4 i 8.5 prikazuju inicijalni položaj ulaznog člana mehanizma, kao i njegov interval kretanja u oba slučaja, respektivno. Na osnovu analize rezultata, za svaki ugao δ^0 ($\kappa = 0^\circ$) odnosno δ^+ ($\kappa = 20^\circ$) u intervalu 40° do 80° , moguće je formirati mehanizam. Pritom, dimenzije članova mehanizma ostaju u propisanim granicama, a kinematičko ponašanje se ne menja.



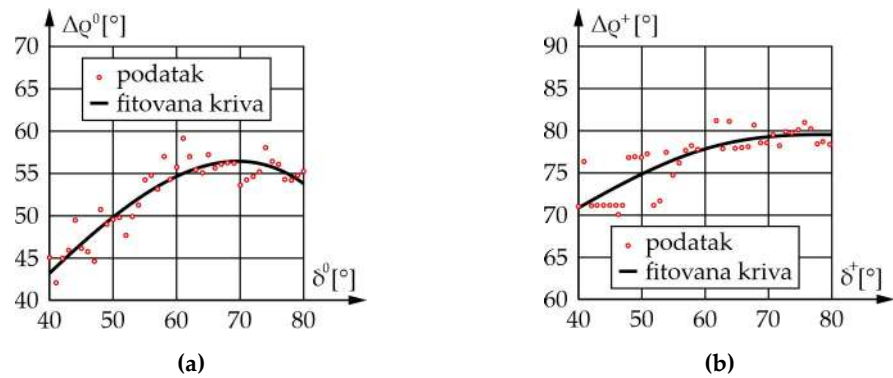
Slika 8.2. Promena dužine izlaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



Slika 8.3. Promena dužine ulaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



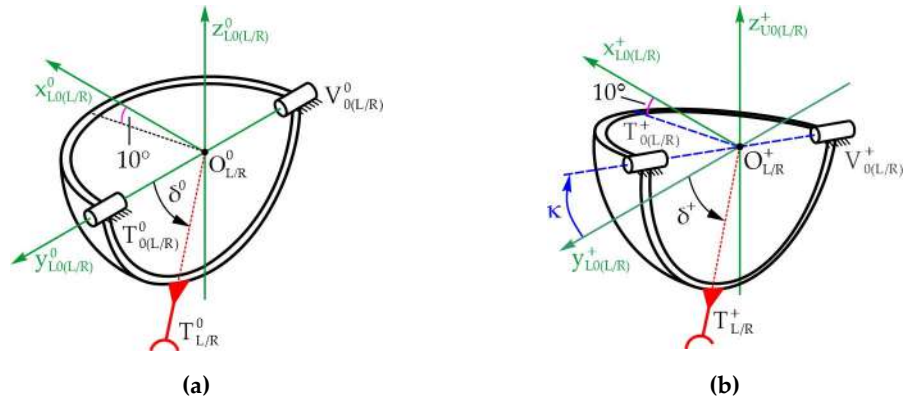
Slika 8.4. Promena inicijalnog položaja ulaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



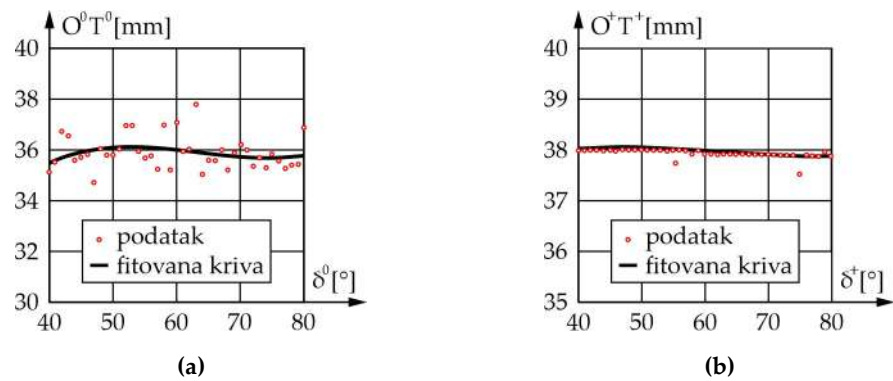
Slika 8.5. Promena intervala kretanja ulaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.

Slika 8.6 prikazuje izlazni član mehanizma donjeg kapka sa neutralnim i pozitivnim kantnim nagibom, respektivno. Na isti način i za iste parametre i podatke je ispitana rekonfigurabilnost mehanizama za pokretanje donjih kapaka. Slike 8.7 i 8.8 prikazuju promenu dužine izlaznog odnosno ulaznog člana mehanizma u oba slučaja, respektivno, dok Slike 8.9 i 8.10 prikazuju inicijalni položaj ulaznog člana, kao i njegov interval kretanja, respektivno. Za svaki ugao δ^0 ($\kappa = 0^\circ$) odnosno δ^+ ($\kappa = 20^\circ$) u intervalu $40 \div 80^\circ$, mehanizam

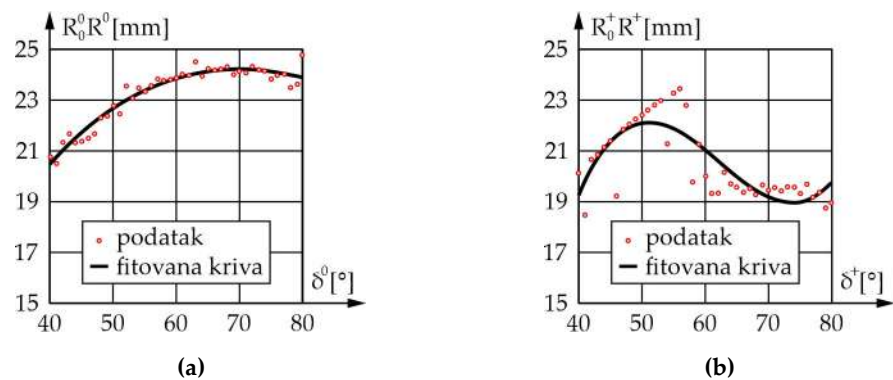
je sastavljiv u svim položajima. Pritom, dimenzije članova mehanizma ostaju u propisanim granicama, dok je kinematičko ponašanje takođe nepromenjeno, što je od izuzetnog značaja. Na taj način je potvrđena rekonfigurabilnost mehanizama za pokretanje očnih kapaka, što prikazana rešenja karakteriše univerzalnim, bez obzira na zapreminu glave robota.



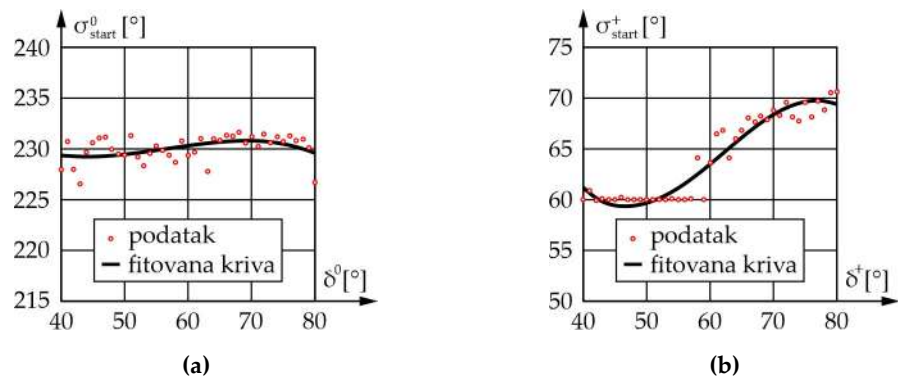
Slika 8.6 Promena geometrijskih parametara donjih kapaka: (a) Položaj člana O^0T^0 u zavisnosti od ugla δ^0 ($\kappa = 0^\circ$); (b) Položaj člana O^+T^+ u zavisnosti od ugla δ^+ ($\kappa = 20^\circ$).



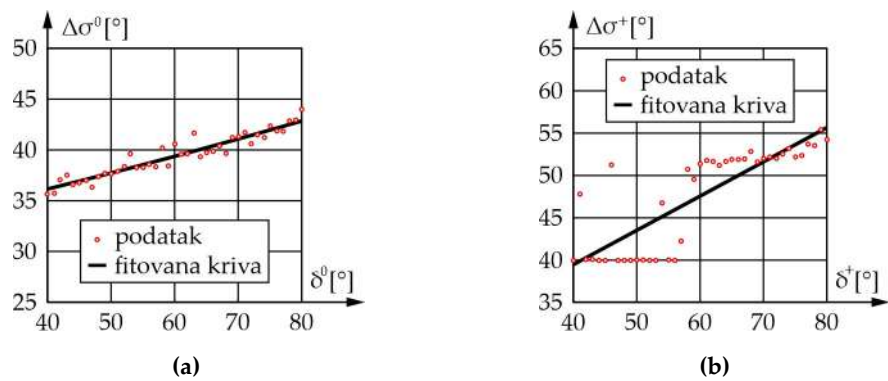
Slika 8.7. Promena dužine izlaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



Slika 8.8. Promena dužine ulaznog člana mehanizma gornjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



Slika 8.9. Promena inicijalnog položaja ulaznog člana mehanizma donjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.



Slika 8.10. Promena intervala kretanja ulaznog člana mehanizma donjih kapaka u zavisnosti od ugla δ^0 i δ^+ , respektivno: (a) $\kappa = 0^\circ$; (b) $\kappa = 20^\circ$.

8.3 Efikasnost neverbalne komunikacije

Cilj eksperimenta je bio da se utvrdi da li je predloženo rešenje strukture robotskih očiju i obrva sposobno da efikasno izrazi emocije čoveku i u kojoj meri. Odgovor na ovo pitanje je tražen eksperimentom u kojem su subjektima prikazivani video klipovi robota *MARKO* kako izražava osnovne emocije licem, a koje je kao takve definisao Ekman. Prepoznatljivost Ekmanovih osnovnih izraza lica je test kojim se često utvrđuje sposobnost robotskog lica da proizvede emocije [8.1]. Rezultati eksperimenta se smatraju dobrim, naročito ako se ima u vidu da su subjektima prikazivani samo video klipovi robota koji ispoljava emocije. Naime, roboti koji su fizički prisutni su ubedljiviji, pa subjekti bolje identifikuju emocije nego u slučaju vizuelne reprezentacije na ekranu [8.2]. Fizička prisutnost robota je ključna za prepoznavanje neverbanih signala koje robot pokušava da prenese [8.3]. Izraz gađenja je uspešno identifikovan u oko 35% slučajeva, što je iznad očekivanja, imajući u vidu da se gađenje vrlo često izostavlja iz ovakih istraživanja, usled specifičnog izraza koji zahteva

pokret nosa [8.3,8.4]. Intenzitet izraza emocije je uspešno prepoznat u značajnom broju slučajeva, naročito za izraze besa, tuge i iznenađenja, što pokazuje da, barem za izraze ovih emocija, intenzitet pokreta može da prikaže i intenzitet emocije. Činjenica da intenzitet izraza nije imao značajan uticaj na uspešnost identifikovanja emocija je u skladu sa prethodnim istraživanjima [8.5], koja su pokazala da čak i kada je emocija na licu robota prikazana sa 50% intenziteta, ljudi su bili u stanju da je prepoznaju. Takođe, činjenica da su ženski i muški subjekti istim stepenom uspešnosti identifikovali emocije se ne slaže sa prethodnim istraživanjima [8.6,8.7], koja su pokazala da su osobe ženskog pola uspešnije u identifikovanju emocija. Treba istaći da unazad nekoliko godina postoji veliko interesovanje istraživača za prepoznavanje emocija licem upotrebom zaštitne maske [8.8–8.17]. Takođe, treba napomenuti da su svi učesnici eksperimenta sličnih godina starosti – studenti osnovnih studija, i da nemaju relevantnih zdravstvenih problema što ograničava generalizaciju rezultata, pošto je dokazano da deca i starije osobe sa različitom stopom uspešnosti prepoznaju izraze lica u poređenju sa mladim odraslim osobama [8.18–8.20], kao i što osobe sa određenim mentalnim poteškoćama doživljavaju izraze lica drugačije u poređenju sa kontrolnim grupama [8.21–8.23]. Ovo je od posebnog značaja ukoliko će se prikazano rešenje implementirati u kontekstu zdravstva, gde će biti u kontaktu sa specifičnim grupama.

Reference

- 8.1. Bazo, D., Vaidyanathan, R., Lentz A., Melhuish, C.: Design and testing of a hybrid expressive face for a humanoid robot. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp. 5317–5322. IEEE Xplore, New York (2010).
- 8.2. Li, J.: The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents. *Int. J. Hum.-Comput. St.* **77**, 23–37 (2015).
- 8.3. Hortensius, R., Hekele, F., Cross, E.S.: The perception of emotion in artificial agents. *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.* **10**(4), 852–864 (2018).
- 8.4. Bennett, C.C.; Šabanović, S. The effects of culture and context on perceptions of robotic facial expressions. *Interact. Stud.* **16**(2), 272–302 (2015).
- 8.5. Bennett, C.C.; Šabanović, S. Deriving minimal features for human-like facial expressions in robotic faces. *Int. J. Soc. Robot.* **6**(3), 367–381 (2014).
- 8.6. Abbruzzese, L., Magnani, N., Robertson, I.H., Mancuso, M.: Age and gender differences in emotion recognition. *Front. Psychol.* **10**, 2371-1–2371-15 (2019).
- 8.7. Hoffmann, H., Kessler, H., Eppel, T., Rukavina, S., Traue, H.C.: Expression intensity, gender and facial emotion recognition: Women recognize only subtle facial emotions better than men. *Acta Psychol.* **135**(3), 278–283 (2010).
- 8.8. Carbon, C.C.: Wearing face masks strongly confuses counterparts in reading emotions. *Front. Psychol.* **11**, 566886-1–566886-8 (2020).
- 8.9. Marini, M., Ansani, A., Paglieri, F., Caruana, F., Viola, M.: The impact of facemasks on emotion recognition, trust attribution and re-identification. *Sci. Rep.* **11**(1), 5577-1–5577-14 (2021).
- 8.10. Kastendieck, T., Zillmer, S., Hess, U.: (Un)mask yourself! Effects of face masks on facial mimicry and emotion perception during the COVID-19 pandemic. *Cogn. Emot.* **36**(1), 59–69 (2021).
- 8.11. Carbon, C.C., Serrano, M.: The impact of face masks on the emotional reading abilities of children – A lesson from a joint school-university project. *Iperception* **12**(4), 1–17 (2021).

- 8.12. Ramachandra, V., Longacre, H.: Unmasking the psychology of recognizing emotions of people wearing masks: The role of empathizing, systemizing, and autistic traits. *Pers. Individ. Differ.* **185**, 111249-1–111249-6 (2022).
 - 8.13. Tsantani, M., Podgajacka, V., Gray, K.L.H., Cook, R.: How does the presence of a surgical face mask impair the perceived intensity of facial emotions? *PLoS One* **17**(1), e0262344-1–e0262344-16 (2022).
 - 8.14. Pavlova, M.A., Sokolov, A.A.: Reading covered faces. *Cereb. Cortex* **32**(2), 249–265 (2022).
 - 8.15. Thomas, P. J. N., Caharel, S.: Do masks cover more than just a face? A study on how facemasks affect the perception of emotional expressions according to their degree of intensity. *Perception* **53**(1), 3–16 (2023).
 - 8.16. Ventura, M., Palmisano, A., Innamorato, F., Tedesco, G., Manippa, V., Caffò, A.O., Rivolta, D.: Face memory and facial expression recognition are both affected by wearing disposable surgical face masks. *Cogn. Process.* **24**(1), 43–57 (2023).
 - 8.17. Wang, S., Han, C., Sang, Z., Zhang, X., Chen, S., Wang, H., Wang, G., Xu, Y., Lei, X., Chen, J.: Hidden faces, altered perceptions: The impact of face masks on interpersonal perception. *Front. Psychol.* **14**, 1203442-1–1203442-8 (2023).
 - 8.18. De Sonneville, L.M., Verschoor, C.A., Njokiktjien, C., Op het Veld, V., Toorenaar, N., Vranken, M.: Facial identity and facial emotions: Speed, accuracy, and processing strategies in children and adults. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* **24**(2), 200–213 (2002).
 - 8.19. Mill, A., Allik, J., Realo, A., Valk, R.: Age-related differences in emotion recognition ability: A cross-sectional study. *Emotion* **9**(5), 619–630 (2009).
 - 8.20. Sullivan, S., Ruffman, T., Hutton, S.B.: Age differences in emotion recognition skills and the visual scanning of emotion faces. *J. Gerontol. B-Psychol. Sci. Soc. Sci.* **62**(1), P53–P60 (2007).
 - 8.21. Brotman, M.A., Guyer, A.E., Lawson, E.S., Horsey, S.E., Rich, B.A., Dickstein, D.P., Pine, D.S., Leibenluft, E.: Facial emotion labeling deficits in children and adolescents at risk for bipolar disorder. *Am. J. Psychiatry* **165**(3), 385–389 (2008).
 - 8.22. Wolff, S., Stiglmayr, C., Bretz, H.J., Lammers, C.H., Auckenthaler, A.: Emotion identification and tension in female patients with borderline personality disorder. *Br. J. Clin. Psychol.* **46**(3), 347–360 (2007).
 - 8.23. Işık Ulusoy, S., Gülseren, Ş.A., Özkan, N., Bilen, C.: Facial emotion recognition deficits in patients with bipolar disorder and their healthy parents. *Gen. Hosp. Psychiatry* **65**, 9–14 (2020).
-

9 Zaključak

Ovo istraživanje prikazuje biomimetički dizajn mehaničkog sistema očiju za muške i ženske humanoidne robote, u skladu sa mogućim preferencijama potencijalnih korisnika, sa adekvatnim kinematskim karakteristikama, koji na funkcionalnom nivou treba da omogućí spektar pokreta koji imaju ljudske oči i obrve radi simulacije emocionalnih stanja robota. Na osnovu toga su formirane hipoteze i svaki od navedenih problema je rešavan.

H1: *Moguće je modelirati mehanički sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) u skladu sa biološkim principima i kinematikom ljudskog oka;*

Prikazani mehanički sistem omogućava nezavisne pokrete jabučica, kapaka i obrva od ostatka lica i sastoji se od tri podsistema: (i) mehanički sistem očnih jabučica, (ii) mehanički sistem očnih kapaka i (iii) mehanički sistem obrva. Mehanički sistem jabučica ima 3 ili 4 *DoF* omogućavajući zajedničke *pitch* i nezavisne *yaw* pokrete ili nezavisne *pitch* i *yaw* pokrete svakog oka, respektivno. Zahvaljujući svojoj strukturi, sposoban je da proizvede sve pokrete jabučica u skladu sa biološkim principima oka, što je od izuzetnog značaja za realizovanje binokularne funkcije veštačkog vida robota i stereoviziju. Mehanički sistem očnih kapaka ima 4 *DoF* omogućavajući nezavisnu rotaciju svakog kapka, dok mehanički sistem obrva ima 2 *DoF* i omogućava podizanje obe obrve istovremeno, kao i rotaciju obrva u suprotnim smerovima. Sa aspekta kinematike, mehanički sistemi jabučica, kapaka i obrva su u velikoj meri sposobni da proizvedu pokrete nalik ljudskim – vrste pokreta, opsezi kretanja i ugaone brzine, što je od suštinskog značaja za generisanje facijalnih ekspresija i neverbalnu komunikaciju robota na prirodan i intuitivan način. Prema tome, zaključuje se da je prva hipoteza potvrđena.

H2: *Moguće je formirati strukturu mehaničkog sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da omogućí bidirekciono kretanje bez zazora;*

Na osnovu izbora optimalne transmisije iz skupa analiziranih, predložene su strukture mehaničkih sistema očnih jabučica, očnih kapaka i obrva, zasnovane na polužnim mehanizmima i navojnom vretenu, na osnovu čega je urađena kinematička analiza i optimalna dimenziona sinteza u skladu sa kinematikom ljudskog oka. Takođe, ispitan je odnos promene položaja ulaznog/izlaznog člana polužnih mehanizama radi procene uticaja na upravljački sistem – dobijene promene su vrlo bliske linearnim što je veoma povoljno sa aspekta upravljanja. Osim toga, razmotrena je i potvrđena rekonfigurabilnost polužnih

mehanizama, što je od izuzetnog značaja prilikom dizajna glave humanoida. Zbog strukture veza, svi mehanizmi obezbeđuju niska trenja i male zatore, što je veoma važno za iniciranje pokreta bez trzaja, kao i visoku tačnost pozicioniranja koja obezbeđuje visoku tačnost i ponovljivost pokreta. Prema tome, zaključuje se da je druga hipoteza potvrđena.

H3: *Moguće je formirati upravljački sistem (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) tako da ispuni kinematičke parametre ljudskog oka;*

Analizom različitih tipova aktuatora je utvrđeno da električni aktuatori jedini ispunjavaju zadate parametre sistema. Kao rezultat toga, predloženi su kompaktni sistemi za pokretanje mehanizama koji obuhvataju motor, planetarni reduktor, senzor i motor kontroler. Najpogodnije rešenje za upravljanje je kombinacija DC motora sa odgovarajućim reduktorom i senzorom apsolutnog položaja ili inkrementalnim enkoderom. Struktura servo kontrolera za upravljanje svakog motora ponaosob je takođe predložena, dok je na kraju prikazan način izbora aktuatora i upravljanja za jedan segment oka. Prema tome, zaključuje se da je treća hipoteza potvrđena.

H4: *Moguće je dokazati da je predložena struktura mehaničkog sistema (očnih jabučica, očnih kapaka i obrva) sposobna da ostvari neverbalnu komunikaciju upotrebom lica robota;*

Uspeh mehaničkog sistema je zavisio i od toga u kojoj meri je sposoban da omogućiti robotu generisanje facijalnih ekspresija, zbog čega je urađen eksperiment. U tu svrhu je upotrebljeno dvodimenziono lice robota *MARKO* koje je bilo prekriveno zaštitnom maskom radi fokusiranja subjekata na regiju oka. Subjekti su ocenjivali efikasnost neverbalne komunikacije robota prikazivanjem kratkih video klipova. Predložena struktura robotskih očiju je sposobna da u velikoj meri efikasno izrazi emocije ljutnje i tuge, dok delimično emociju iznenađenja. Izrazi gađenja, sreće i straha su slabo identifikovani i često pogrešno tumačeni od strane subjekata kao druge emocije. Potpuno razotkrivanje lica, pored očiju i obrva, zahteva prisustvo usana i njihov položaj, dok je za emociju gađenja specifično pomeranje nosa i čela. Prema tome, zaključuje se da je četvrta hipoteza delimično potvrđena.

Glavni doprinos ovog istraživanja su četiri univerzalna, napredna i sofisticirana hardverska rešenja robotskih očiju sa 7 i 8 *DoF*, od čega su dva sa karakteristikama muškog, a dva sa karakteristikama ženskog oka, a koja su u potpunosti zasnovana na kinematičkim principima ljudskog oka. Veoma važan aspekt funkcionalnosti je i upotreba bezazornih mehanizama, što je od suštinskog značaja za implementaciju robotske vizije i algoritama različite namene, naročito ako se ima u vidu da će kamere biti locirane u očima robota. Prikazani kinematički model mehaničkog sistema oka, zajedno sa postupkom optimalne

dimenzione sinteze, može biti od velike pomoći istraživačima prilikom razvoja robotskih očiju. Mogućnost primene rezultata se ogleda i u tome da, upotrebom prikazanog algoritma razvoja i postupaka optimalne sinteze zasnovanim na kinematičkim modelima, moguće je projektovati i prilagoditi oči bez obzira na oblik i zapreminu glave humanoida, što prikazano rešenje karakteriše univerzalnim, za oba pola, imajući u vidu kantalni nagib očnih kapaka. Osim toga, prikazana rešenja su jeftina, malih su dimenzija i masa, jednostavna za realizaciju, implementaciju i komercijalizaciju.

Dalji rad će obuhvatiti fizičku realizaciju svakog od opisanih mehaničkih sistema kako bi se merenjem verifikovale vrednosti kinematičkih parametara očnih jabučica, očnih kapaka i obrva dobijene simulacijom. Osim toga, neophodna je rekonstrukcija lica robota *SARA* kako bi robot bio u stanju da ispolji svih šest osnovnih emocija, što sada nije moguće zbog prenatlaženog dizajna. Nakon toga, na robotima *MARKO* i *SARA*, bile bi implementirane nove oči i obrve kako bi se ispitala efikasnost neverbalne komunikacije imajući u vidu da ljudi mnogo bolje reaguju na fizički prisutne robote od virtuelnih.

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Биолошки инспирисане роботске очи за истраживање невербалне комуникације између човека и хуманоидних робота
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
1.Републички пројекат [ИИИ44008, проф. др Бранислав Боровац]: Развој робота као средства за помоћ у превазилажењу тешкоћа у развоју деце; 2.Покрајински пројекат [114-451-2116/2011, проф. др Бранислав Боровац]: Развој роботске платформе антропоморфних карактеристика за остваривање социјално-прихватљиве и адекватне интеракције у радном окружењу човека; 3.Билатерални пројекат, Република Србија – Народна република Кина [451-02-818/2021-09/19, проф. др Маја Чавић]: Развој социјално-асистивног робота као кључне технологије у рехабилитацији деце са церебралном парализом;
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <u>У оквиру ове студије нису прикупљани подаци.</u>
1.2 Врсте података а) <u>квантитативни</u> б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, <u>упитници</u> , тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____

г) административни подаци: навести врсту _____

д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: **.JPG, .mp4**

е) текст, навести врсту: **.doc**

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____

г) Текст фајл, датотека: **упитник и резултати**

д) JPG фајл, датотека: **слике и видео записи**

е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли: **18**

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.): **51 испитаник, 18 снимака сваки**

1.3.3. Поновљена мерења

а) Да

б) **Не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак између поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) **Да**

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- а) **експеримент**, навести тип: **упитник**
- б) корелационо истраживање, навести тип _____
- ц) анализа текста, навести тип _____
- д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
- в) Ако је одговор да, навести сутестије за третман замене недостајућих података
- _____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Процедуру експеримента је вршила једна особа, док су друге две особе контролисале ток експеримента.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Једна особа је уносила податке, док је друга особа контролисала валидност унетих података.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у _____ репозиторијум.

3.1.2. URL адреса: https://drive.google.com/file/d/1b76_MKOyT88dcftaDCTj-F5Har5HBou/view?uspdrive_link

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) **Да**

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

Преузимање са наведеног линка.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? **1 година**

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се одnose на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности

(https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- a) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- a) јавно доступни
- б) **доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области**
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

за потребе истраживања из дате области.

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

послати мејлом захтев за шифру уз напомену за које потребе би се подаци користили.

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Марко Пенчић, mpencic@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Марко Пенчић, mpencic@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Марко Пенчић, mpencic@uns.ac.rs