

**ESTIMACIJA KRVNOG PRITISKA NA OSNOVU FOTOPLETIZMOGRAMA
KORISTEĆI VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE****FEEDFORWARD NEURAL NETWORK APPROACH FOR BLOOD PRESSURE
ESTIMATION FROM PPG SIGNALS**Igor Jorgovanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu se obrađuje postupak estimacije krvnog pritiska, na osnovu obeležja izvučenih iz PPG signala, pomoću veštačkih neuronskih mreža. Napravljeno je više modela neuronskih mreža sa različitim obeležjima na ulazu kako bi se našli najbitnije karakteristike PPG signala koje imaju vezu sa krvnim pritiskom. Na kraju su poređene performanse svih modela za isti set podataka za testiranje.

Ključne reči: Krvni pritisak, veštačke neuronske mreže, feedforward neuronska mreža, fotopletizmografija

Abstract – This article addresses the procedure for estimating blood pressure, based on features extracted from PPG signals, using artificial neural networks. Multiple models have been made so as to find the best combination of characteristics, of the PPG signal, that correlate to blood pressure the most. The results from all models are then directly compared.

Keywords: Blood pressure, artificial neural networks, feedforward neural network, photoplethysmography

1. UVOD

Krvni pritisak je osnovna fiziološka veličina čiji produženi abnormalni nivoi mogu izazvati razne kardiovaskularne bolesti. Svakodnevno praćenje istog kod pacijenata u dužim periodima je trenutna praksa koju primenjuju lekari kako bi se smanjili rizici i stopa smrtnosti zbog hipertenzije. Razvojem tehnologije se olakšava proces merenja, i samim tim i praćenje, krvnog pritiska, međutim, merenje krvnog pritiska jednom ili nekoliko puta dnevno još uvek ostavlja prostor za kasnu detekciju problema.

Jedan pristup neprekidnom praćenju krvnog pritiska je da se koriste signali koji mogu da se prikupljaju pasivno, npr. EKG signali ili PPG signali koji se dobijaju pomoću svetlosnih dioda, fotodetektora i prateći softver koji su svi implementirani u pametne satove. Akvizicija EKG-a ograničava pokretljivost pacijenta radi preciznog merenja, i nije pouzdano za kontinuirano praćenje [1]. Pored toga,

visoka impendansa kože uzrokuje fluktuacije bazne linije, značajan šum i, u nekim slučajevima, gubitak EKG traga. Sa druge strane, PPG uređaji rade na osnovu optički dobijenog signala koji može da detektuje promene volumena krvi u arteriji, i oni se već koriste radi detekcije nivoa kiseonika u krvi i srčanog pulsa.

2. FOTOPLETIZMOGRAFIJA

Fotopletizmografija (eng. *Photoplethysmography*, PPG) je neinvazivna tehnika koja se koristi za merenje volumenskih promena u krvi unutar perifernih krvnih sudova. Ova metoda koristi svetlosne senzore za detekciju promene u apsorpciji svetlosti, koja varira sa količinom krvi prisutnom u tkivima. Ima široku primenu u medicini za praćenje srčanog ritma, oksigenacije krvi i drugih vitalnih znakova [2]. Sa razvojem naprednih senzorskih tehnologija i nosivih uređaja, PPG postaje sve važnija u oblasti telemedicine i personalizovane zdravstvene zaštite.

2.1. Princip fotopletizmografije

Svetlost koja prolazi kroz biološko tkivo može biti apsorbovana od strane različitih supstanci, uključujući pigmente u koži, kostima, arterijskoj i venskoj krvi. Većina promena u protoku krvi se dešava u arterijama i arteriolama, ali ne i u venama. Na primer, arterije sadrže veću količinu krvi u toku sistolne faze srčanog ciklusa nego u toku dijastolne faze [3].

PPG senzori optički detektuju promene u volumenu protoka krvi tj. promene u detektovanom intenzitetu svetlosti, u mikrovaskularno tkivu putem refleksije ili transmisije kroz tkivo.

3. METOD

U ovom radu je napravljeno pet različitih modela neuronskih mreža koji na osnovu različitih setova obeležja na ulazu estimiraju vrednost sistolnog i dijastolnog pritiska na izlazu. PPG signali i odgovarajuće vrednosti krvnog pritiska su preuzeti iz baze podataka o kojoj se mogu videti detaljnije informacije u okviru rada [4]. Odabir obeležja koja se izvlače iz PPG signala je baziran na istraživanju [5].

NAPOMENA: Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Luka Mejić, docent

3.1. Obrada podataka

Podatke je, pre ulaska u neuronsku mrežu, potrebno obraditi tako što se uklone nebitne informacije, poput šuma, i izdvoje karakteristična obeležja čije vrednosti zavise od krvnog pritiska. Prosleđivanjem delova umesto celog signala neuronskim mrežama povećava preciznost mreže time što ne uzima u obzir informacije iz signala koje ne utiču na željeni izlaz.

Za ekstrakciju obeležja su pored samog PPG signala potrebni i prvi izvod PPG signala i njegov amplitudski spektar. Kako bi se precizno numerički odredio prvi izvod potrebno je filtrirati signal. Granične frekvencije filtera su empirijski određene na osnovu amplitudskog spektra PPG signala koji se filtrira. Korišćeni su *band-pass* filteri koji filtriraju i jednosmernu komponentu i više frekvencije (uglavnom preko 5Hz).

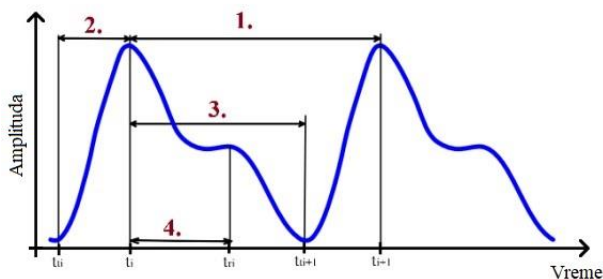
Nakon filtriranja se izračunao prvi izvod signala na osnovu kojeg se vrši ekstrakcija obeležja iz vremenskog domena, koja se prosleđuju na ulaz svih pet modela. Pored njih, na ulaze pojedinih modela se prosleđuju sledeća obeležja iz frekvencijskog domena: frekvencija prvog harmonika, odnos amplituda prva dva harmonika i vrednost amplitude prvog harmonika.

3.2. Ekstrakcija obeležja

Neki od najbitnijih parametara iz PPG signala koji se koriste u algoritmima za estimaciju krvnog pritiska su:

- Srčani ciklus (eng. *Cardiac period*)
- Vreme uspona sistolnog pritiska (eng. *Systolic upstroke time*)
- Dijastolno vreme (eng. *Diastolic time*)
- RPTT (eng. *Reflected Pulse Transit Time*)

Srčani ciklus je trajanje jednog otkucaja srca, vreme uspona sistolnog pritiska je vreme potrebno pulsu da dostigne maksimalan pik, dok je dijastolno vreme vreme kada je srce u stanju relaksacije. PTT se odnosi na vreme koje je potrebno da pritisni talas putuje između dva proizvoljno odabrana arterijska mesta, i u zavisnosti od kog do kog mesta se meri, postoje različiti tipovi PTT-a. RPTT je podtip PTT-a gde se meri vreme između detekcije prvog pika i detekcije reflektovanog pika. Spomenuta obeležja su prikazani na slici ispod.



Slika 1. Vremenska obeležja PPG signala – 1. Srčani ciklus, 2. Vreme uspona sist. pritiska, 3. Dijastolno vreme i 4. RPTT

Kako bi se dobile tačne vrednosti vrhova i “dolina” u signal (lokalni i globalni ekstremi) potrebno je izračunati prvi izvod i zatim pronaći njegove preseke sa nulom, ti trenuci odgovaraju ekstremima u originalnom signalu. Tako se dobijaju tri od četiri trenutaka koja su neophodna

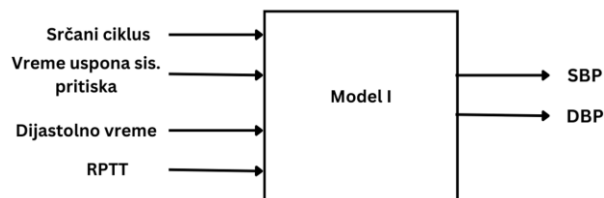
za računanje vrednosti vremenskih obeležja. Poslednji trenutak, vreme pojave reflektovanog pika, se nalazi na osnovu lokalnog maksimuma u prvom izvodu koji se nalazi između drugog i trećeg preseka sa nulom u prvoj periodi izvoda.

Pored vremenskih karakteristika, naučna istraživanja u poslednjih nekoliko godina ukazuju na korelaciju frekvencijskih osobina PPG signala i krvnog pritiska [5]. Primenom *Matlab*-ovog algoritma za detekciju pikova (*FindPeaks*) nad amplitudskim spektrima se dobiju vrednosti amplituda i frekvencija prva dva harmonika svakog PPG signala.

Ukoliko jedan pacijent ima više segmenata PPG signala koji su uspešno prošli kroz obradu signala, krajnje vrednosti obeležja su srednje vrednosti svih segmenata.

3.3. Modeli

Prvi model estimira krvni pritisak isključivo na osnovu obeležja iz vremenskog domena. Na ulaz se prosleđuju četiri vremenska obeležja koja su nabrojana na početku poglavlja 3.2. Prvi model je skiciran na slici ispod.



Slika 2. Prvi model

Drugi model pored ta 4 vremenska obeležja prima na ulazu vrednost frekvencije prvog harmonika filtriranog PPG signala. Cilj je da se poređenjem rezultata ovog modela sa rezultatima prvog modela ukaže na uticaj frekvencije rada srca na krvni pritisak, ukoliko je dovoljno značajan da se kvantifikuje.

Treći model, nalik drugom, sadrži sva 4 obeležja iz vremenskog domena i jedno obeležje iz frekvencijskog domena: odnos amplituda prva dva harmonika. Ovaj model uzima u obzir pretpostavku da vrednost amplituda prva dva harmonika ima korelaciju sa krvnim pritiskom [5], jedino umesto da se posmatraju vrednosti, posmatra se njihov odnos.

Četvrti model je kombinacija prethodna dva, gde se na ulaz prosleđuju svakako sva 4 obeležja iz vremenskog domena, frekvencija prvog harmonika i odnos amplituda prva dva harmonika. Ideja ovog modela je da se, ukoliko modeli sa samo frekvencijom ili odnosom amplituda na ulazu ne uspeju da ostvare vezu sa krvnim pritiskom, koriste oba tipa informacije dobijenih iz frekvencijskog domena zajedno sa obeležjima iz vremenskog domena.

Poslednjem modelu se prosleđuju na ulaz sva obeležja kao i prethodnom modelu i pored njih se dodatno prosleđuje i vrednost amplitude prvog harmonika. Na slici ispod je skiciran peti model.

3.4. Konfiguracije veštačkih neuronskih mreža

Kako bi se izbegli problemi poput preobučavanja i nedovoljne obuke mreže napravljeno je nekoliko konfiguracija za svaki model sa različitim širinom i/ili dubinom mreže. Napravljene su konfiguracije sa jednim, dva i tri skrivena sloja sa po 6, 8, 12, 16, 24 i 32 neurona po skrivenom sloju kako bi se pokrio što veći broj slučajeva. Što se tiče aktivacionih funkcija, za sve kombinacije postoje 3 različite verzije u kojima je aktivaciona funkcija sigmoidna, ispravljena linearna funkcija i tangens hiperbolik redom. Pored toga, eksperimentisano je i sa različitim stopama učenja u vrednostima: 0.01, 0.001 i 0.0001. Promene stope učenja su pratile i promena broja epoha koja se prostirala od 100 do 300, kako bi se mreža sigurna stigla obučiti.

3.5. Statistička analiza i procena performansi modela

Nakon što su svi modeli obučeni i testirani, njihove performanse će se prvobitno proceniti i uporediti na osnovu srednje vrednosti njihove relativne i apsolutne greške, maksimalne vrednosti apsolutne greške i distribucije apsolutnih grešaka. Međutim, zbog velikog broja modela koji su napravljeni, dolazi do čestog preklapanja prethodno spomenutih kriterijuma procene performanse. Zbog toga je izvršena statistička metoda za poređenje dobijenih rezultata svih konfiguracija kako bi se utvrdilo da li postoji statistički značajna razlika između modela, na osnovu čega se mogu dokazati odnosi koji su pretpostavljeni poređenjem grešaka, ukoliko postoje razlike između performansi.

Za podatke koji su prošli test normalnosti upotrebljena je *Repeated Measures One-Way ANOVA* za inicijalno poređenje i ukoliko je dobijena *p-vrednost* bila manja od 0.05 vršila se *post-hoc* analiza zajedno sa *Bonferroni korekcijom* za dobijanje finalne *p-vrednosti*. Za podatke koji nisu prošli test normalnosti upotrebljena je *Friedmanova ANOVA* za poređenje.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju su prikazane tabelama srednje vrednosti relativnih i apsolutnih greške svih modela, maksimalne vrednosti apsolutne greške i distribucija apsolutnih grešaka koje ti modeli prave. Prikazani su i rezultati poređenja performansi modela pomoću statističke analize i diskutovani ti rezultati.

Što se tiče prvog i trećeg modela, koji su imali više od jedne konfiguracije, statistička analiza je pokazala da nema značajne razlike između tih konfiguracija, tako da su za dalje rezultate izabrane konfiguracije sa najmanjim relativnim greškama.

4.1. Relativne i apsolutne greške modela

U tabeli ispod su prikazane brojne metrike po kojima se mogu porediti performanse svih modela, koje su spomenute u prethodnom poglavlju. Pored njih, u nastavku ovog poglavlja je prikazana i tabela sa brojem estimacija sa apsolutnim odstupanjima manjim ili jednakim 5, 10 i 15 *mmHg* u odnosu na ukupan broj estimacija, u procentima, što je metrika koje će se koristiti za klasifikaciju modela.

Tabela 1. Performanse modela pri estimaciji sistolnog pritiska

Sistolni pritisak			
Model	Srednja relativna greška [%]	Srednja apsolutna greška [mmHg]	Maksimalna apsolutna greška [mmHg]
Model I	9.26	11.50	34.01
Model II	9.57	11.91	35.10
Model III	8.62	10.50	30.90
Model IV	8.06	9.97	33.66
Model V	9.78	12.01	35.97

Tabela 2. Performanse modela pri estimaciji dijastolnog pritiska

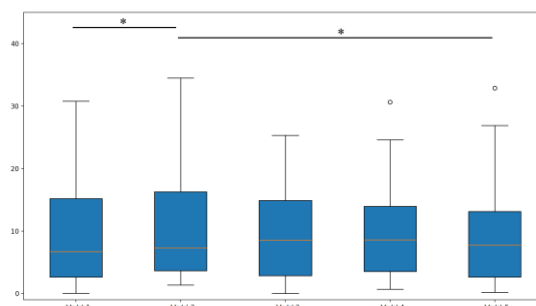
Dijastolni pritisak			
Model	Srednja relativna greška [%]	Srednja apsolutna greška [mmHg]	Maksimalna apsolutna greška [mmHg]
Model I	10.55	6.84	19.08
Model II	11.63	7.51	21.39
Model III	9.11	5.85	14.87
Model IV	10.28	6.56	16.23
Model V	9.99	6.41	17.42

Na tabelama 1. i 2. se može videti da je teško okarakterisati bilo koji model kao bolji ili gori od bilo kog drugog modela na osnovu datih kriterijuma zbog njihovog preklapanja. U sledećoj tabeli su prikazani rezultati statističke analize koji su pokazali statističku značajnu razliku u odnosu performansi svih modela.

Tabela 3. Rezultati statističke analize performansi modela sa *p-vrednostima* manjim od 0.05

Modeli koji se poredi	<i>p-vrednost</i> za sistolni pritisak	<i>p-vrednost</i> za dijastolni pritisak
1 i 2	0.670	0.033*
2 i 5	0.670	0.033*

Na osnovu rezultata poređenja može se zaključiti da nema statistički značajne razlike između svih 5 modela što se tiče estimacije sistolnog pritiska. Međutim, za estimaciju dijastolnog pritiska je pokazano da postoji razlika između prvog i drugog modela, i između drugog i petog modela, pošto su sve te *p-vrednosti* manje od 0.05. Ti rezultati zajedno sa slikom 4. pokazuju da su prvi i peti model bolji od drugog pri estimaciji dijastolnog pritiska.



Slika 4. Relativne greške – DBP

Treći i četvrti model imaju međusobno veoma slične performanse pri estimaciji dijastolnog pritiska i njihov odnos sa ostalim modelima ne može da se zaključi jer imaju veću srednju vrednost relativne greške ali manju standardnu devijaciju.

U sledećoj tabeli su prikazani prethodno spomenuti procenti estimacija sa određenim apsolutnim odstupanjima za dijastolni pritisak i odgovarajuće klase koje modeli uspevaju da dostignu.

Tabela 4. *Distribucija apsolutnih grešaka modela pri estimaciji DBP*

Model	% estimacija aps. greška ≤ 5 mmHg	% estimacija aps. greška ≤ 10 mmHg	% estimacija aps. greška ≤ 15 mmHg
Model I	50.0 %	77.3 %	100 %
Model II	50.0 %	68.2 %	81.8 %
Model III	45.4 %	78.3 %	95.6 %
Model IV	40.1 %	77.3 %	95.4 %
Model V	50.0 %	77.3 %	86.4 %

Na osnovu standarda klasifikacije uređaja za merenje krvnog pritiska BHS [7], svi modeli dostižu klasu C, dok prvi model dostiže čak klasu B, što znači da je moguća primena u medicini.

5. ZAKLJUČAK

Kako broj ljudi sa povišenim krvnim pritiskom i/ili drugim kardiovaskularnim problemima raste, tako je i potreba za konstantnim praćenjem krvnog pritiska veća, kako bi se na vreme uočio problem i samim tim znatno smanjio rizik od srčanih komplikacija ili smrti. Međutim, trenutna tehnologija ne omogućava nivo konzistentnosti praćenja krvnog pritiska koji je potreban kako bi se sa potpunom sigurnošću uočila abnormalnost na vreme, a aktivno merenje ume da uzrokuje povećan pritisak kod nekih ljudi, fenomen koji je poznat kao efekat belog mantila, što dovodi do neispravno očitanih vrednosti. Zbog toga je potrebna tehnologija koja će pasivno da prati stanje krvnog pritiska u toku dana i, ukoliko dođe do abnormalnih nivoa, da obavesti korisnika kako bi mogao na vreme da odreaguje ako ima potrebe.

Implementacija u vidu pametnog sata koji prikuplja PPG signal već postoji, i ta informacija može da se iskoristi kako bi se procenila vrednost krvnog pritiska uz pomoć veštačkih neuronskih mreža.

Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, svi modeli estimiraju krvni pritisak sa sveukupnom preciznošću od oko 89-92%, s tim da su u testovima bili prisutni podaci od ljudi sa znatno povišenim krvnim pritiskom u nedovoljnoj količini kako bi se model obučio za takve slučajeve u potpunosti. Većina rezultata kod ljudi sa normalnim krvnim pritiskom su estimirani sa relativnom greškom od 5-6%, što pokazuje da ovakav pristup može da nađe primenu u svakodnevnom praćenju kardiovaskularnih parametara kod sportista ili ljudi sa kardiovaskularnim problemima. Po standardnom protokolu klasifikacije uređaja za merenje krvnog pritiska, jedan model je klasifikovan klasom B, što znači da može da se koristi u kliničkim istraživanjima i u medicini, iako samo za dijastolni pritisak. Ovaj metod

klasifikacije je namenjen za uređaje koji direktno mere pritisak i samim tim što je metod estimacije uspeo da pokaže ovakav rezultat znači da, uz unapređenja, može se napraviti model koji zadovoljava uslove za upotrebu u medicini.

S obzirom da su modeli u ovom radu obučeni podacima pacijenata u stanju mirovanja, model je u stanju da estimiru krvni pritisak takođe u stanju mirovanja. Moguća unapređenja uključuju proširivanje baze podataka za obuku kako bi estimirane vrednosti bile još vernije pravim vrednostima, i proširivanje baze podataka tako da uključi i podatke ljudi van stanja mirovanja, npr. u toku treninga, trčanja, plivanja i slično. Kada bi se mreža obučila sa podacima u različitim stanjima čoveka, primena bi mogla da se proširi na praćenje krvnog pritiska u toku treninga, što može biti veoma bitna informacija profesionalnim sportistima.

6. LITERATURA

- [1] M. Sharma, K. Barbosa, V. Ho, D. Griggs, T. Ghirmai, S. K. Krishnan, T. K. Hsiai, J.-C. Chiao, H. Cao, "Cuff-Less and Continuous Blood Pressure Monitoring: A Methodological Review," *Wearable Technologies*, 2017.
- [2] T. Tamura, Y. Maeda, M. Sekine, M. Yoshida, "Wearable Photoplethysmographic Sensors—Past and Present." *Electronics* 2014.
- [3] A. Poliński, J. Kot, A. Meresta, "Analysis of correlation between heart rate and blood pressure" *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2011.
- [4] Y. Liang, Z. Chen, G. Liu, M. Elgendi, "A new, short-recorded photoplethysmogram dataset for blood pressure monitoring in China," *Scientific Data (Sci Data)*, 2018.
- [5] J. H.-S. Wang, M.-H. Yeh, P. C.-P. Chao, T.-Y. Tu, Y.-H. Kao, R. Pandey, "A fast digital chip implementing a real-time noise-resistant algorithm for estimating blood pressure using a non-invasive, cuffless PPG sensor" *Microsystem Technologies*, 2020.
- [6] E. O'Brien, B. Waeber, G. Parati, J. Staessen, M.G. Myers, "Blood pressure measuring devices: Recommendations of the European Society of Hypertension." *BMJ*, 2001.

Kratka biografija:



Igor Jorgovanović rođen je u Novom Sadu 2000. godine. Diplomski rad na temu –*Modelovanje rada kalcinatora pomoću veštačkih neuronskih mreža*- iz oblasti Elektrotehnike i računarstva odbranio je na Fakultetu tehničkih nauka 2023. godine.

Kontakt: igor.jorgovanovic@gmail.com