

IMPLEMENTACIJA ALGORITMA ZA PROCENU MORFOLOŠKIH PROMENA GRUDNOG KOŠA KOD DECE SA CEREBRALNOM PARALIZOM KORIŠĆENJEM 3D KAMERA

ALGORITHM IMPLEMENTATION FOR ASSESSING THORACIC MORPHOLOGICAL CHANGES IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY USING 3D CAMERAS

Doroteja Majstorović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – **BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu predstavljen je novi pristup za neinvazivnu procenu morfoloških promena grudnog koša kod dece sa cerebralnom paralizom, zasnovan na upotrebi dubinske kamere. Razvijeni algoritam integriše napredne tehnike obrade slike i trodimenzionalnih podataka za praćenje referentnih tačaka na grudnom košu, omogućavajući kvantitativnu analizu respiratornog ciklusa. Eksperimentalna validacija pokazala je visoku ponovljivost merenja između sesija, sa razlikama manjim od 1% u površinama poprečnih preseka, što sugeriše potencijal metode za kliničku primenu. Predloženi pristup predstavlja značajan korak ka razvoju pristupačnih i pouzdanih metoda za praćenje respiratorne funkcije kod pedijatrijske populacije sa neuromišićnim poremećajima.

Ključne reči: cerebralna paraliza, dubinska kamera, morfološke promene, respiratorna funkcija, obrada slike, neinvazivno praćenje

Abstract – This paper presents a novel approach for non-invasive assessment of chest wall morphological changes in children with cerebral palsy, based on depth camera technology. The developed algorithm integrates advanced image processing and three-dimensional data analysis techniques for tracking reference points on the chest wall, enabling quantitative analysis of the respiratory cycle. Experimental validation demonstrated high measurement repeatability between sessions, with differences less than 1% in cross-sectional areas, suggesting the method's potential for clinical application. The proposed approach represents a significant step towards developing accessible and reliable methods for monitoring respiratory function in pediatric populations with neuromuscular disorders.

Keywords: cerebral palsy, depth camera, morphological changes, respiratory function, image processing, non-invasive monitoring

1. UVOD

Procena respiratorne funkcije kod dece sa cerebralnom paralizom predstavlja značajan izazov u kliničkoj praksi, prvenstveno zbog čestih deformiteta grudnog koša i ograničene pokretljivosti karakteristične za ovo stanje [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Nikola Jorgovanović, red. prof.

Tradicionalne metode procene, poput rendgenskog snimanja i CT (eng. *computed tomography*, CT) skeniranja, iako precizne, nose rizik od izlaganja zračenju i često nisu praktične za redovno praćenje [2][3]. Alternativne metode, poput optoelektronske pletizmografije, mogu biti nepristupačne zbog visokih troškova opreme [4].

Cerebralna paraliza kao neuromišićni poremećaj često je praćena specifičnim respiratornim izazovima koji značajno utiču na kvalitet života pacijenta [5]. Deformiteti grudnog koša, kao što su *pectus excavatum* ili kifoza, dodatno komplikuju respiratornu funkciju kod ove populacije. Praćenje ovih promena tradicionalno zahteva redovna snimanja, što predstavlja dodatni izazov u radu sa decom.

Razvoj tehnologija za medicinsko snimanje, posebno dubinskih kamara, otvorio je nove mogućnosti za neinvazivnu procenu anatomskih struktura. Ovi uređaji omogućavaju trodimenzionalno mapiranje površinskih karakteristika tela u realnom vremenu, što ih čini posebno pogodnim za praćenje morfoloških promena kod pacijenata sa neuromišićnim poremećajima [6].

2. METODE

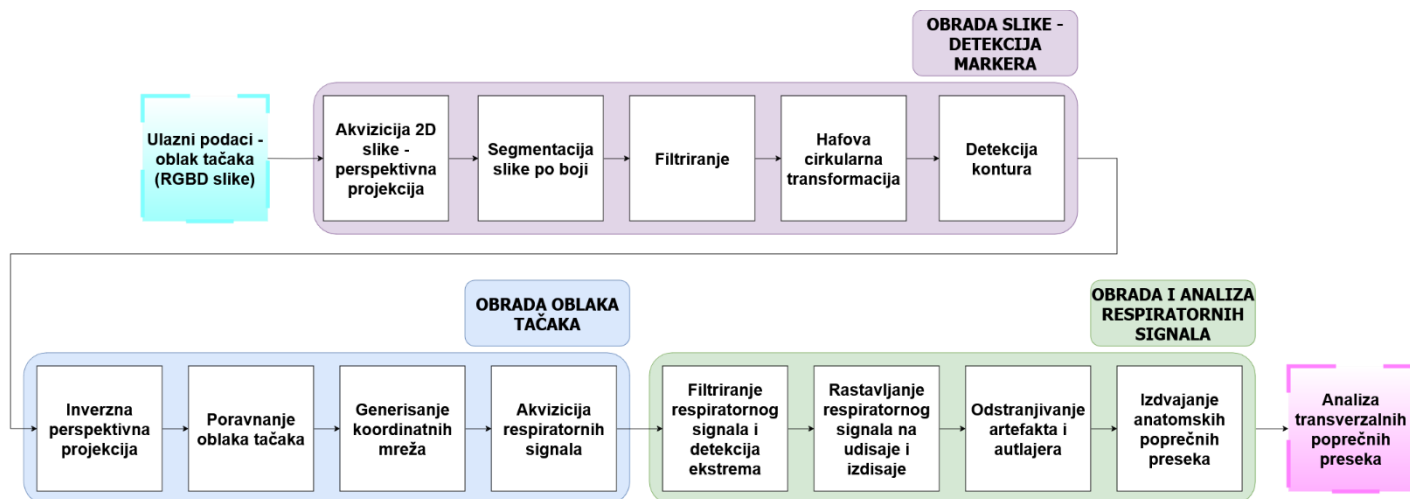
Razvijeni sistem zasniva se na upotrebi *Intel RealSense D435i* dubinske kamere [7], koja omogućava istovremeno prikupljanje RGB slike i podataka o dubini scene. Kamera je pozicionirana na fiksnoj visini od 527mm iznad pacijenta, obezbeđujući konzistentan ugao snimanja i pokrivenost regije od interesa.

Algoritam za obradu podataka implementiran je kroz nekoliko ključnih faza, koji su prikazani dijagramom na slici 1.

2.1. Obrada slike – detekcija markera

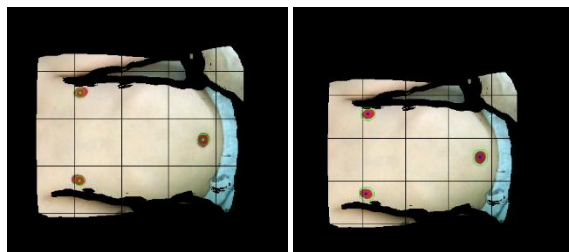
U prvoj fazi, trodimenzionalni oblak tačaka (eng. *point cloud*) dobijen sa kamere transformiše se u dvodimenzionalni prostor primenom perspektivne projekcije, koristeći intrinzične parametre kamere. Za praćenje morfoloških promena, na ključnim anatomskim tačkama (bradavice i pupak) postavljaju se crveni kružni markeri.

Detekcija markera realizovana je kroz višestepeni proces koji kombinuje segmentaciju po boji u RGB prostoru i napredne tehnike detekcije oblika. Nakon inicijalne segmentacije crvenih regiona, primenjuju se Gausov i



Slika 1. Dijagram algoritma

medijan filter za redukciju šuma, praćeni Hafovom cirkularnom transformacijom [8] za detekciju kružnih oblika. Dodatna verifikacija vrši se kroz analizu kontura detektovanih objekata [9], čime se značajno povećava robusnost sistema (slika 2.).



Slika 2. Rezultat detekcije kružnih markera.

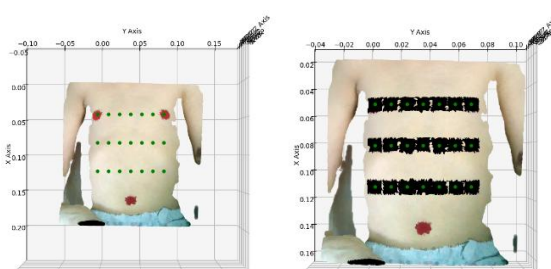
Leva figura sa slike 2. prikazuje rezultate primene Hafove transformacije. Zelenom bojom su označeni detektovani centroidi kružnica kao i njihove granice. Desna figura sa slike 2. prikazuje rezultate nakon dodatne primene detekcije kontura. Plavom bojom su označeni centroidi kružnica, dok zelena boja označava detektovane kružne granice objekta.

2.2. Obrada oblaka tačaka

Nakon uspešne detekcije markera u 2D prostoru, njihove pozicije se mapiraju nazad u 3D prostor primenom inverzne perspektivne projekcije. Zatim se primenjuje ridigna transformacija u cilju poravnanja oblaka tačaka.

Za sistematsko praćenje morfoloških promena, implementiran je sistem generisanja koordinatne mreže 3x7 tačaka. Mreža se formira automatski nakon detekcije markera, sa sedam ekvidistantnih tačaka između bradavica duž y-ose i tri nivoa merenja između bradavica i pupka (slika 3. leva figura). Oko svake tačke mreže definiše se region interesa dimenzija 2x2 cm, unutar kojeg se prati varijacija dubine tokom respiratornog ciklusa (slika 3. desna figura).

U ovim regionima, merena je promena udaljenosti između površine torza i stola tokom vremena. Za svaku tačku, dubina je predstavljala najkraće rastojanje od te tačke do površine stola, izračunata kao razlika između z-koordinate stola (d), (d zapravo predstavlja rastojanje kamere od stola) i z-koordinate površinske tačke (z).



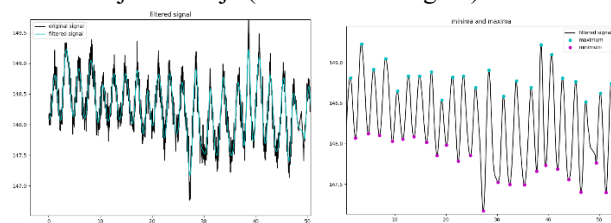
Slika 3. Prikaz koordinatne mreže (leva figura) i definisanih regiona od interesa oko svake tačke koordinatne mreže (desna figura)

Signal $r(t)$ prikazuje promenu dubine kroz vreme, što je omogućilo praćenje varijacije dubine tokom respiratornog ciklusa. Na ovaj način, za svaki region od interesa generisan je respiratorni signal koji predstavlja promene u dubini grudnog koša tokom vremena.

$$r(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d - z_i(t)) \quad (1)$$

2.3. Obrada respiratornih signala

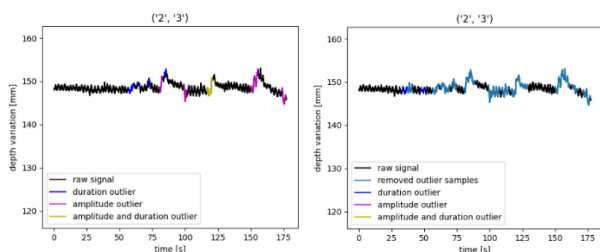
Signali se filtriraju niskopropusnim Butterworth filtrom, četvrtog reda, granične frekvencije 1Hz radi eliminacije šuma (slika 2. leva figura). Implementiran je algoritam za detekciju lokalnih ekstrema koji omogućava identifikaciju faza udisaja i izdisaja (slika 2. desna figura).



Slika 2. Prikaz filtriranja sirovih signala (leva figura) i detekcija ekstrema na filtriranom signalu (desna figura)

Za eliminaciju artefakata i ekstremnih vrednosti (eng. *outlier*; u daljem tekstu autlajer) primenjuje se *IQR* (eng. *Interquartile range*, *IQR*) metoda, koja se iterativno ponavlja dok se ne dobije signal koji reprezentuje dominantni obrazac disanja (slika 3.) [10]. Algoritam za izbacivanje autlajera i artefakta primenjen je rekurzivno,

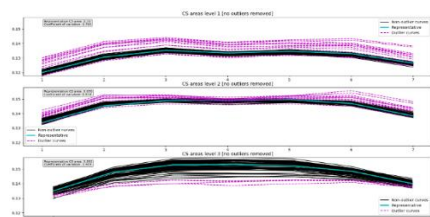
odstranjivanje je vršeno dok svi autlajeri i artefakti nisu izbačeni. Važno je napomenuti da algoritam poseduje samozaustavnih mehanizam, kako se sve krive ne bi u jednom trenutku smatrale autlajerom. Ideja je da se u signalu zadrži više od 50% krivih. Detektovani autlajeri su odstranjeni na svim kanalima u 3x7 mreži.



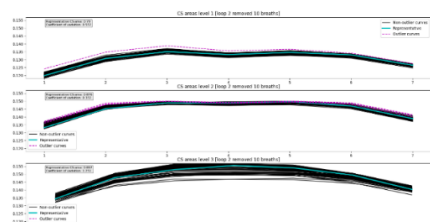
Slika 3. Iterativno odstanjivanje artefakata i ekstremnih vrednosti

Leva figura sa slike 3. predstavlja artefakte i ekstremne vrednosti tj. autlajere detektovane u prvoj iteraciji algoritma. Plavom bojom označeni su autlajeri po trajanju disajnog obrasca, ciklama bojom autlajeri po amplitudi disajnog obrasca, dok žutom su označeni autlajeri koji su bili detektovani kao autlajeri i po trajanju i po amplitudi. Desna figura sa slike 3. predstavlja narednu iteraciju odstranjivanja autlajera, gde su svetlo plavom bojom označeni autlajeri iz prethodne iteracije. Prethodno pomenute boje (plava, ciklama, žuta) ukazuju na nove autlajere detektovane u datoj iteraciji algoritma. Posmatrajući delove krive koji nisu obojeni (predstavljeni crnom bojom), dolazi se do zaključka da je odstranjivanje autlajera i artefakata dovelo do znatno ujednačenijeg signala.

Na osnovu prečišćenih signala generišu se poprečni preseki za svaki nivo mreže (slika 4. i 5.), dok reprezentativni preseki predstavljaju medoid u skupu podataka. Slike 4. i 5. prikazuju tri kategorije podataka: autlajere (isprekidana linija ciklama boje), reprezentativni poprečni presek (svetlo plava linija) i preostale podatke iz skupa (crna linija).



Slika 4. Prikaz inicijalnih poprečnih preseka za svaki nivo (pre odstranjivanja artefakata i autlajera iz respiratornog signala)



Slika 5. Prikaz finalnih poprečnih preseka za svaki nivo (nakon odstranjivanja artefakata i autlajera iz respiratornog signala)

3. REZULTATI

Evaluacija sistema pokazala je značajno poboljšanje u konzistentnosti merenja kroz iterativnu primenu algoritma za eliminaciju ekstremnih vrednosti. Koeficijenti varijacije prikazani u Tabeli 1. odnose se na prvog ispitanika, prvu sesiju, u trenucima inspiracije. Inicijalni koeficijenti varijacije za tri nivoa merenja prikazani pomenutom tabelom značajno su smanjeni nakon obrade, ukazujući na efektivnost implementiranog sistema za eliminaciju artefakata.

Tabela 1. Prikaz koeficijenata varijacije površina poprečnih preseka za jednog ispitanika za trenutke inspiracije

faza obrade	nivo 1	nivo 2	nivo 3
incijalna	1.785	0.878	1.949
finalna	0.552	0.332	1.251

Poređenje rezultata između dve sesije merenja, za prvog ispitanika u trenucima inspiracije, pokazalo je izuzetnu konzistentnost u površinama poprečnih preseka, gledajući Tabelu 2.

Tabela 2. Poređenje površina reprezentativnih poprečnih preseka između dve sesije za trenutke inspiracije (prvi ispitanik)

sesija	nivo 1	nivo 2	nivo 3
1	0.79 m ²	0.87 m ²	0.875 m ²
2	0.79 m ²	0.876 m ²	0.879 m ²

Slična konzistentnost uočena je i za trenutke ekspiracije, sa razlikama manjim od 1% između sesija.

Pored demonstrirane konzistentnosti između sesija kod pojedinačnog ispitanika, sistem je pokazao i visoku repetitivnost pri testiranju na drugom ispitaniku. Tabelama 3. i 4. prikazani su rezultati za još jednog ispitanika, takođe u trenucima inspiracije.

Tabela 3. Prikaz koeficijenata varijacije površina poprečnih preseka za drugog ispitanika za trenutke inspiracije

faza obrade	nivo 1	nivo 2	nivo 3
incijalna	0.429	0.359	1.104
finalna	0.327	0.26	0.683

Tabela 4. Poređenje površina reprezentativnih poprečnih preseka između dve sesije za trenutke inspiracije (drugi ispitanik)

sesija	nivo 1	nivo 2	nivo 3
1	0.772 m ²	0.779 m ²	0.792 m ²
2	0.775 m ²	0.794 m ²	0.776 m ²

Poređenje koeficijenata varijacije između dva ispitanika (Tabele 1. i 3.) pokazuje različite stepene smanjenja nakon primene algoritma za eliminaciju artefakata i autlajera. Kod prvog ispitanika zabeleženo je značajnije smanjenje koeficijenata varijacije od 69.1%, 62.2% i 35.8% za prvi, drugi i treći nivo, respektivno. Drugi ispitanik pokazuje umerenija smanjenja od 23.8%, 27.6% i 38.1%. Inicijalne vrednosti koeficijenata varijacije kod drugog ispitanika (0.429, 0.359, 1.104) bile su znatno niže u odnosu na prvog

ispitanika (1.785, 0.878, 1.949), što može objasniti manje izraženo procentualno smanjenje. Razlika u inicijalnim vrednostima može se pripisati prisustvu specifičnih artefakata u signalima prvog ispitanika koji nisu bili prisutni kod drugog ispitanika. Uprkos različitim inicijalnim vrednostima, algoritam je u oba slučaja uspešno smanjio varijabilnost podataka, pri čemu su finalne vrednosti koeficijentata varijacije kod oba ispitanika svedene na uporediv nivo.

Dodatno je važno primetiti da su finalne vrednosti kod prvog ispitanika (0.552, 0.332, 1.251) i drugog ispitanika (0.327, 0.26, 0.683) relativno bliske za prva dva nivoa merenja, dok je razlika izraženija na trećem nivou. Prvi i drugi nivo pokazuju konzistentnije rezultate nakon obrade, što je od posebnog značaja za analizu s obzirom da obuhvataju anatomske relevantne regije. Treći nivo merenja, koji se nalazi ispod grudnog koša, pokazuje veću varijabilnost čak i nakon obrade, ali se ovi podaci mogu zanemariti u daljoj analizi zbog anatomske pozicije koja nije od primarnog interesa za praćenje respiratorne funkcije.

Rezultati pokazuju da je razvijen sistem robusan i primenljiv u realnim uslovima merenja, uspešno kompenzujući manje pokrete ispitanika i varijacije u osvetljenju. Generisani poprečni preseki omogućavaju jasnu vizualizaciju morfoloških promena tokom respiratornog ciklusa, sa dobrom diskriminacijom između faza inspiracije i ekspiracije. Konzistentnost rezultata između različitih sesija merenja, kao i uspešna primena na različitim ispitanicima, potvrđuje pouzdanost sistema i njegov potencijal za praktičnu primenu.

4. DISKUSIJA

Analiza rezultata dobijenih implementacijom razvijenog sistema otkriva nekoliko značajnih aspekata. Prvo, postignuta je visoka preciznost u detekciji i praćenju referentnih tačaka, što je ključno za pouzdanu procenu morfoloških promena. Implementirani višestepeni pristup detekciji markera pokazao se robusnim u realnim kliničkim uslovima, uspešno prevazilazeći izazove varijabilnog osvetljenja i pokreta pacijenta.

Posebno je značajna sposobnost sistema da generiše konzistentne rezultate na različitim nivoima merenja grudnog koša. Ova karakteristika omogućava sveobuhvatnu analizu respiratorne funkcije, što je od velikog značaja za razumevanje obrazaca disanja kod dece sa cerebralnom paralizom. Mala varijabilnost u merenjima između sesija (<1%) kao i uspešna validacija sistema na različitim ispitanicima sugerišu visoku pouzdanost metode, što je ključno za kliničku primenu.

Ključne prednosti sistema uključuju neinvazivnost metode, pristupačnost opreme i mogućnost kontinuiranog praćenja promena u realnom vremenu. Uprkos obećavajućim rezultatima, identifikovana su određena tehnička ograničenja koja zahtevaju dalje usavršavanje. Potreba za manuelnim postavljanjem markera predstavlja potencijalno usko grlo u procesu merenja, dok zahtev za relativno stabilnim položajem pacijenta može predstavljati izazov kod dece sa izraženijim motoričkim smetnjama. Međutim, ova ograničenja ne umanjuju značajno potencijal

sistema za kliničku primenu, posebno uzimajući u obzir prednosti koje nudi u odnosu na konvencionalne metode procene.

5. ZAKLJUČAK

Predstavljeni algoritam za procenu morfoloških promena grudnog koša predstavlja značajan doprinos u razvoju pristupačnih i pouzdanih metoda za praćenje respiratorne funkcije kod dece sa cerebralnom paralizom. Eksperimentalni rezultati potvrđuju robusnost i preciznost sistema, sa konzistentnim merenjima kako između sesija tako i među različitim ispitanicima. Buduća istraživanja trebalo bi usmeriti ka razvoju metoda za automatsku detekciju anatomske tačke, implementaciji naprednih algoritama za kompenzaciju pokreta i validaciji sistema na većoj kliničkoj populaciji. Ovakav pristup otvara nove mogućnosti za dugoročno praćenje progresije deformiteta i evaluaciju efekata terapijskih intervencija kod pedijatrijske populacije sa neuromišićnim poremećajima.

6. LITERATURA

- [1] P. Rosenbaum, N. Paneth, A. Leviton, M. Goldstein, and M. Bax, "A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006," *Dev. Med. Child Neurol.*, vol. 49, pp. 8–14, Feb. 2007, doi: 10.1111/j.1469-8749.2007.tb12610.x.
- [2] B. M. Bludevich *et al.*, "External caliper-based measurements of the modified percent depth as an alternative to cross-sectional imaging for assessing the severity of pectus excavatum," *J. Pediatr. Surg.*, vol. 55, no. 6, pp. 1058–1064, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jpedsurg.2020.02.053.
- [3] A. Semionov, J. Kosiuk, A. Ajlan, and F. Discepolo, "Imaging of Thoracic Wall Abnormalities," *Korean J. Radiol.*, vol. 20, no. 10, p. 1441, 2019, doi: 10.3348/kjr.2019.0181.
- [4] A. Lain, L. Garcia, C. Gine, O. Tiffet, and M. Lopez, "New Methods for Imaging Evaluation of Chest Wall Deformities," *Front. Pediatr.*, vol. 5, p. 257, Dec. 2017, doi: 10.3389/fped.2017.00257.
- [5] Y. Horimoto *et al.*, "Thoracic Deformity in the Transverse Plane among Adults with Severe Cerebral Palsy," *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 24, no. 8, pp. 763–766, 2012, doi: 10.1589/jpts.24.763.
- [6] K. Bartol, D. Bojanic, T. Petkovic, and T. Pribanic, "A Review of Body Measurement Using 3D Scanning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67281–67301, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3076595.
- [7] "Intel RealSense D435i." [Online]. Available: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>
- [8] "Algoritam - HoughCircle." [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d70/tutorial_hough_circle.html
- [9] "Algoritam - findContours." [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html
- [10] A. LoMauro, A. Colli, L. Colombo, and A. Aliverti, "Breathing patterns recognition: A functional data analysis approach," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 217, p. 106670, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.cmpb.2022.106670.

Kratka biografija:

Doroteja Majstorović rođena je u Beogradu 1997 godine. Upisuje osnovne akademske studije 2016. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer biomedicinsko inženjerstvo koje završava 2020. godine. Potom, iste godine, takođe na istom fakultetu, upisuje master studije, smer Automatika i upravljanje sistemima sa fokusom na biomedicinsko inženjerstvo.

Kontakt: doroteja603@gmail.com