

# Prikupljanje, sinkronizacija i analiza podataka tijekom pojedinačnog treninga boričkih vještina

---

Haček, Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:434065>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Klara Haček**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danijel Pavković

Studentica:

Klara Haček

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Danijelu Pavkoviću na povjerenju i savjetima te asistentici Tari Knežević i volonteru Luki Bužiću na podršci tijekom provedbe istraživanja i izrade rada.

Posebno zahvaljujem roditeljima na bezuvjetnoj potpori tijekom studija.

Klara Haček



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur. broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Klara Haček** JMBAG: **0035221815**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prikupljanje, sinkronizacija i analiza podataka tijekom pojedinačnog treninga borilačkih vještina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Collection, synchronization, and analysis of data acquired during individual martial arts training**

Opis zadatka:

Trening borilačkih vještina uključuje složene pokrete velike brzine, što predstavlja izazov za sveobuhvatnu analizu izvedbe. Tradicionalne metode često se oslanjaju na subjektivna opažanja ili podatke jednog senzora, ograničavajući stečene uvide. Kako bi se postiglo dublje razumijevanje tehnika borilačkih vještina, ova studija predlaže okvir za prikupljanje i analizu sinkroniziranih podataka iz inercijske mjerne jedinice (IMU) i optičkog sustava za praćenje koji će u sinergiji pružiti širi prostorni kontekst i omogućiti preciznu analizu pokreta udova sportaša. Ključni izazov leži u sinkronizaciji ovih heterogenih skupova senzora kako bi se osiguralo točno vremensko usklađivanje tokova podataka. S obzirom na navedeno, u radu je potrebno napraviti sljedeće:

1. Dati pregled sustava inercijskih mjernih jedinica i sustava za praćenje pokreta koji se u današnje vrijeme koriste uz detaljan opis konkretne opreme korištene u ovom radu.
2. Organizirati laboratorijski postav za prikupljanje podataka tijekom treninga koji uključuje uređaj za mjerenje vremena reakcije na zvučne podražaje (IMU jedinica), OptiTrack sustav za snimanje pokreta i odgovarajuće markere te snimanje pokreta.
3. Provesti naknadnu obradu snimljenih podataka s ciljem sinkronizacije podataka iz dva izvora i eliminacije eventualnih pogrešaka i smetnji mjernim signalima.
4. Usporediti trajektorije pokreta kod udaraca koji su rezultirali kraćim vremenom reakcije s udarcima koji su rezultirali duljim vremenom reakcije, te analizirati ponovljivost pokreta pri određenoj vježbi i korelirati način izvođenja vježbe s vremenom reakcije.

U radu je također potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

*Danijel Pavković*

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Danijel Pavković

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

*Ivica Garašić*

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Metodologija istraživanja.....	2
1.2. Integracija tehnologije u sportsku analizu .....	2
1.2.1. Tehnologija bazirana na IMU sustavima .....	2
1.2.2. Tehnologija bazirana vizijskim sustavima.....	4
1.2.2.1. Vizijski sustavi koji zahtijevaju korištenje vizualnih markera .....	4
1.2.2.2. Vizijski sustavi koji ne zahtijevaju korištenje vizualnih markera .....	5
1.3. Fuzija senzora .....	5
1.4. Dinamičko vremensko poravnanje.....	7
2. OPREMA I POSTAV ZA MJERENJE.....	9
2.1. Uređaj za mjerenje vremena reakcije.....	9
2.1.1. Princip rada .....	10
2.2. Optički sustav za praćenje pokreta.....	11
3. PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA .....	15
3.1. Prikupljanje podataka.....	15
3.2. Obrada podataka .....	16
3.2.1. Označavanje markera.....	17
3.2.2. Otklanjanje smetnji u signalu.....	18
3.2.2.1. Pogreške u označavanju markera.....	18
3.2.2.2. Okluzije.....	19
3.2.2.3. Pogreške refleksije .....	21
3.2.2.4. Šumovi .....	23
4. ANALIZA PODATAKA.....	24
4.1. Trajektorije.....	24
4.2. Brzine .....	24
4.3. Ubrzanja .....	25
4.4. Pseudokod .....	25
5. REZULTATI .....	26
5.1. Trajektorije šake.....	27
5.2. Brzine šake .....	29

---

5.3. Akceleracije šake .....	31
5.5. Usporedba trajektorija.....	34
6. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	42
PRILOZI.....	44

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Primjer elementarnog pokreta- tajlandski boks [3] .....	1
Slika 2.	Primjer uređaja s integriranom IMU tehnologijom [6] .....	3
Slika 3.	Tri razine fuzije senzora [11] .....	6
Slika 4.	Uređaj za mjerenje vremena reakcije [14] .....	9
Slika 5.	Dijagram toka rada uređaja [14].....	10
Slika 6.	Primex 13 kamera [16] .....	11
Slika 7.	Pasivni marker sa stalkom [16] .....	11
Slika 8.	Konfiguracija kamera u prostoru.....	12
Slika 9.	Raspored markera na trupu ispitanika (lijevo) Raspored markera po ruci ispitanika (desno) .....	13
Slika 10.	Raspored markera na boksačkoj rukavici.....	13
Slika 11.	Pozicija kamera u odnosu na ispitanika .....	15
Slika 12.	Rezultati jednog ciklusa mjerenja .....	16
Slika 13.	Neuređen raspored markera u nultoj poziciji .....	17
Slika 14.	Raspored markera grupiranih u skupine – nulta pozicija (lijevo) Ispitanik – nulta pozicija (desno) .....	18
Slika 15.	Izgubljena oznaka markera (lijevo) Naknadno označen marker (desno) .....	19
Slika 16.	Primjer okluzije markera .....	19
Slika 17.	Trajektorije markera u smjeru koordinatnih osi $x$ , $y$ i $z$ u trenutku detekcije refleksije .....	21
Slika 18.	Trajektorija s uklonjenim dijelom signala u smjeru $z$ osi.....	22
Slika 19.	Rekonstruirana trajektorija u smjeru $z$ osi.....	22
Slika 20.	Trajektorije markera na desnoj rukavici – desni direkt.....	27
Slika 21.	Trajektorije markera na lijevoj rukavici – lijevi direkt .....	27
Slika 22.	Trajektorije markera na desnoj rukavici – desni kroše.....	28
Slika 23.	Trajektorije markera na lijevoj rukavici – lijevi kroše .....	28
Slika 24.	Brzina desne šake u smjeru osi $y$ – desni direkt .....	29
Slika 25.	Brzina desne šake u smjeru osi $y$ – lijevi direkt .....	30
Slika 26.	Brzina desne šake u smjeru osi $y$ – desni kroše.....	30
Slika 27.	Brzina lijeve šake u smjeru osi $y$ – lijevi kroše .....	31
Slika 28.	Akceleracija desne šake – desni direkt.....	31
Slika 29.	Akceleracija lijeve šake – lijevi direkt .....	32
Slika 30.	Akceleracija desne šake – desni kroše .....	32
Slika 31.	Akceleracija lijeve šake – lijevi kroše.....	33
Slika 32.	Trajektorije svih udaraca – desni direkt .....	34
Slika 33.	Trajektorije svih udaraca – lijevi direkt .....	34
Slika 34.	Trajektorije svih udaraca – desni kroše.....	35
Slika 35.	Trajektorije svih udaraca – lijevi kroše .....	35
Slika 36.	Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – desni direkt.....	36
Slika 37.	Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – lijevi direkt.....	36
Slika 38.	Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – desni kroše .....	37
Slika 39.	Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – lijevi kroše.....	37
Slika 40.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 1-4 .....	38
Slika 41.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 1-4 .....	39
Slika 42.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 1-4 .....	39



Slika 43.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi kroše, udarci 1-4 .....	40
Slika 44.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 1-4 .....	44
Slika 45.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 5-8 .....	44
Slika 46.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 9-12 .....	45
Slika 47.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 13-16 .....	45
Slika 48.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 17-20 .....	46
Slika 49.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 1-4 .....	46
Slika 50.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 5-8 .....	47
Slika 51.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 9-12 .....	47
Slika 52.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 13-16 .....	48
Slika 53.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 17-20 .....	48
Slika 54.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 1-4 .....	49
Slika 55.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 9-12 .....	49
Slika 56.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 5-8 .....	50
Slika 57.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 13-16 .....	50
Slika 58.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 17-20 .....	51
Slika 59.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi kroše, udarci 5-8 .....	51
Slika 60.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 1-4.....	52
Slika 61.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 9-12.....	52
Slika 62.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 13-16.....	53
Slika 63.	DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 17-20.....	53

---

## **POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
CRTA	Regionalni centar izvrsnosti za robotske tehnologije
IMU	Inertial Measurement Unit
DTW	Dynamic Time Warping

---

**SAŽETAK**

U sklopu ovog rada, analizirana je biomehanika elementarnih udaraca karakterističnih udaračkim borilačkim sportovima. Osobito je naglašena analiza kinematike udaraca u ovisnosti o vremenu reakcije na zvučne podražaje. Podaci za istraživanje prikupljeni su u Regionalnom centru izvrsnosti za robotske tehnologije u Zagrebu (CRTA) korištenjem uređaja za mjerenje brzine reakcije na zvučne podražaje baziranog na IMU tehnologiji i OptiTrack sustava za praćenje pokreta u trodimenzionalnom prostoru. U sklopu rada provedeno je precizno mjerenje, snimanje i analiza pokreta ispitanika. Principom fuzije senzora, omogućena je integracija podataka s različitih uređaja, pružajući sveobuhvatan uvid u kinematiku udaraca u kontekstu vremena. Sinkronizacija podataka dobivenih s različitih senzora provedena je identifikacijom različitih faza udaraca. Detekcija varijacija u izvođenju udaraca i procjena kvalitete tehnike ispitanika provedena je analizom podataka dobivenih primjenom algoritma dinamičkog vremenskog poravnavanja (DTW). Red veličine dobivenih rezultata u smislu pozicije i vremena naglašavaju važnost primjene precizne tehnologije u svrhu optimizacije udaračkih tehnika. Provedeno istraživanje u tehničkom aspektu omogućuje produbljenju biomehaničku analizu elementarnih udaraca u borilačkim sportovima te podržava razvoj individualnih programa koji poboljšavaju izvedbu boraca. Daljnje istraživanje moglo bi pružiti uvid u utjecaj različitih struktura treninga na izvedbu sportaša.

Ključne riječi: borilačke vještine, kinematika udaraca, IMU tehnologija, OptiTrack, analiza pokreta, Dinamičko vremensko poravnanje (DTW)

---

**SUMMARY**

This thesis investigates the biomechanics of fundamental strikes characteristic of martial arts, emphasizing the analysis of strike kinematics relative to auditory cue reaction times. The data was collected at the Regional Center of Excellence for Robotic Technologies in Zagreb (CRTA), utilizing an IMU-based device to measure reaction time to auditory stimuli and an OptiTrack system for three-dimensional motion tracking. This research involved precise measurement, recording, and analysis of participant movements. By employing sensor fusion principles, the integration of data from different devices was facilitated, offering a holistic view of strike kinematics within a temporal context. Data synchronization across different sensors was achieved by identifying distinct phases of the strikes. Variations in strike execution and the quality of technique were assessed through the analysis of data using the Dynamic Time Warping (DTW) algorithm. The positional and temporal precision of the results underscores the importance of employing advanced technology to optimize striking techniques. The technical aspects of this research provide a comprehensive biomechanical analysis of elementary strikes in martial arts. The research supports the development of personalized training programs that enhance fighter performance. Future research could explore the impact of various training structures on athlete performance, further contributing to the optimization of martial arts techniques.

Keywords: martial arts, strike kinematics, IMU technology, OptiTrack, motion analysis, Dynamic Time Warping (DTW)

## 1. UVOD

Izvođenje pokreta u borilačkim sportovima zahtijeva visoku razinu fizičke spremnosti koja uvjetuje precizno izvođenje kompleksnih pokreta. U ovom kontekstu, fizička spremnost očitava se u izdržljivosti, snazi i brzini sportaša koje su ključne za efikasnost i uspješnost u različitim borilačkim disciplinama. Tehnika, kao temeljni element, ovisi o dubokom razumijevanju i kontroli vlastitog tijela te sposobnosti pravilnog izvođenja pokreta. Svaka borilačka vještina ima svoje specifičnosti koje određuju koje aspekte fizičke spremnosti treba naglasiti u treningu. Učinkovit trening stoga mora biti prilagođen kako bi se maksimalno iskoristili potencijal i kapacitet sportaša. Unatoč zavaravajućoj slici borilačkih vještina kao sredstvo iskazivanja agresije ili puke fizičke obrane, osobni razvoj svakog borca temelji se na samokontroli i odgovornosti koji su neizbježni pri prakticiranju borilačkih vještina. [1]

Prema [2], modalitet borbe može se podijeliti na udarački, hrvački i mješoviti. Neke od borilačkih disciplina koje se temelje na udaranju su boks, kickboxing, tajlandski boks (prikazan na slici Slika 1), karate i taekwondo. Navedene discipline temelje se na tehnikama udaranja rukama, nogama, koljenima i laktovima. Nositelji hrvačkih disciplina su brazilski jiu-jitsu, hrvanje, sambo i judo. Oni se temelje se na tehnikama hrvanja, rušenja, zahvatima zglobova i prisiljavanju na predaju. Naposljetku, mješoviti modaliteti generalno su predstavljani kao mješovite borilačke vještine koje uključuju kombinaciju tehnika udaranja i hrvanja.



Slika 1. Primjer elementarnog pokreta- tajlandski boks [3]

## 1.1. Metodologija istraživanja

Udaračke discipline odlikuju se složenim pokretima velikih brzina. Tradicionalne metode analize pokreta pri udaranju temeljene su na subjektivnim opažanjima ili se oslanjaju na podatke jednog senzora, što često rezultira nepotpunim ili čak krivim uvidom u kinematiku pokreta i izvedbu borca. Cilj ovog rada je provesti temeljitu analizu elementarnih pokreta karakterističnim udaračkim tehnikama borilačkih vještina u svrhu stjecanja boljeg razumijevanja kinematike izoliranih udaraca u ovisnosti o vremenu reakcije na zvučne podražaje. Analizirani podaci izmjereni su korištenjem uređaja za mjerenje brzine reakcije temeljenom na IMU tehnologiji (kasnije IMU uređaj) i optičkog sustava za praćenje pokreta (OptiTrack). Ključni izazov leži u sinkronizaciji podataka dobivenih iz ovih dvaju izvora kako bi se osiguralo točno vremensko usklađivanje dobivenih signala.

## 1.2. Integracija tehnologije u sportsku analizu

Najistaknutiji faktori u kojima se ogleda vještina sportaša u borilačkim sportovima su fizičke predispozicije i trud uloženi u napredak. Primjena novih tehnologija potaknuta njihovim napretkom, osobito u području senzorske tehnologije, rezultira nizom proizvoda koji primjenu nalaze u sportskom sektoru. Navedeni proizvodi sportašima i trenerima omogućuju bolje razumijevanje i prilagodbu treninga za usavršavanje vještina i postizanje maksimalnih rezultata. Ekspanzija tržišta sportske tehnologije, ne samo da je revolucionirala metode treninga, već je i znatno potaknula potražnju za sve dubljim istraživanjima unutar sportske znanosti. [4] Istraživanja u sportu temelje se na realnim podacima o izvedbi sportaša dobivenim promatranjem i mjerenjem različitih parametara. Mjerenja u sportu, osobito pri izvođenju udaraca u borilačkim sportovima, uključuju niz poteškoća kao što su otežano praćenje pokreta radi brzine i kompleksnosti izvođenja istog i izvođenja pokreta po različitim osima u prostoru. Dodatan izazov predstavljaju strogi zahtjevi za preciznošću i pouzdanošću prikupljenih podataka. Prema [5], postoje dvije kategorije tehnologija za praćenje pokreta: tehnologije bazirane na vizijskim sustavima i tehnologije bazirane na ne-vizijskim sustavima.

### 1.2.1. Tehnologija bazirana na IMU sustavima

Senzori temeljeni na ne-vizijskim tehnologijama kao što su inercijske mjerne jedinice (engl. *Inertial Measurement Units*, IMU) omogućuju praćenje pokreta bez potrebe za primjenom

vanjskih odašiljača i kamera. Ovakav se tip senzora može izravno pričvrstiti na tijelo ispitanika ili na sportski rekvizit, što omogućava praćenje pokreta van okvira klasičnih laboratorijskih uvjeta. [5] Uređaji temeljeni na tehnologiji inercijskih mjernih jedinica, jedan su od najčešće korištenih alata pri analizi pokreta u sportu. Male dimenzije i proporcionalno mala energetska potrošnja IMU senzora, omogućuju integraciju istih u niz proizvoda koji primjenu nalaze u sportskom sektoru. Velik dio proizvoda pritom spadaju u kategoriju nosive tehnologije. Primjeri proizvoda prikazani su na slici Slika 2 i uključuju pametne satove, pametnu odjeću, pametne naočale i niz traka s integriranim IMU sensorima za praćenje različitih parametara tijekom sportske aktivnosti.



**Slika 2. Primjer uređaja s integriranom IMU tehnologijom [6]**

IMU uređaji omogućuju pouzdano praćenje i analizu pokreta, što je od iznimne važnosti za sveobuhvatno razumijevanje i unapređenje sportskih performansi. Elementarne komponente od kojih se sastoji inercijska mjerna jedinica su akcelerometar, žiroskop i magnetometar. Akcelerometar se koristi za mjerenje ubrzanja duž tri koordinatne osi ( $x$ ,  $y$  i  $z$ ), žiroskop za mjerenje kutnih brzina oko tri koordinatne osi ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$  i  $\omega_z$ ), a magnetometar za mjerenje gustoće magnetskog polja Zemlje duž tri koordinatne osi ( $B_x$ ,  $B_y$  i  $B_z$ ). Korištenjem postupaka sažimanja izmjerenih podataka koji daju informacije o akceleraciji, kutnoj brzini i gustoći magnetskog polja, moguće je odrediti položaj, brzinu, orijentaciju i smjer gibanja promatranog objekta u prostoru. Položaj i brzina gibanja određuju se integriranjem mjernog signala

akceleracije, pri čemu je potrebno uzeti u obzir posmak mjernog signala (engl. *drift*) uzrokovan komponentom akceleracije sile teže. Orijehtacija promatranog objekta u prostoru određuje se integriranjem mjernog signala kutne brzine i primjenom algoritma sažimanja s mjernim signalom akceleracije. Smjer gibanja promatranog objekta u prostoru određuje se primjenom algoritma sažimanja s mjerenjima akcelerometra i žiroskopa. [7]

Sustavi bazirani na IMU tehnologiji omogućavaju mjerenja izrazito visoke točnosti i ponovljivosti, no kvaliteta izmjerenog signala može biti kompromitirana različitim vrstama grešaka. Te greške uključuju: pogrešku pomaka, pogrešku faktora razmjera, pogrešku neusklađenosti te odstupanja uzrokovana parazitskim mjerenjima i šumovima. Greške pomaka podrazumijevaju pogrešku stabilnosti koja se manifestira kao promjene u signalu detektirane tokom jednog mjerenja u nepromijenjenim uvjetima i pogrešku ponovljivosti koja se manifestira kao odstupanje u rezultatima niza uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine u nepromijenjenim uvjetima. Greška faktora razmjera podrazumijeva odstupanje uzrokovano neproporcionalnim očitavanjem odnosa ulaznog i izlaznog signala senzora. Greška neusklađenosti uzrokovana je nesavršenostima u mehaničkoj montaži senzora. [8] Unatoč navedenim pogreškama, IMU senzori zadovoljavaju visoke zahtjeve za točnošću i ponovljivošću u sportu.

### ***1.2.2. Tehnologija bazirana vizijskim sustavima***

Vizijski sustavi za praćenje pokreta dijele se u dvije skupine: sustavi koji zahtijevaju korištenje vizualnih markera i sustavi koji ne zahtijevaju korištenje vizualnih markera.

#### ***1.2.2.1. Vizijski sustavi koji zahtijevaju korištenje vizualnih markera***

Prednost korištenja vizijskih sustava koji zahtijevaju korištenje vizualnih markera u odnosu na vizijske sustave koji ne zahtijevaju korištenje vizualnih markera je veća preciznost izmjerenih podataka. Kod snimanja provedenih korištenjem sustava s vizualnim markerima, vizualni markeri služe kao identifikatori modela snimanog objekta. Marker se pritom dijele na aktivne i pasivne markere.

Aktivni markeri razlikuju se od pasivnih po principu rada i izvedbi. Aktivni markeri kontinuirano emitiraju svjetlosni signal čijom detekcijom sustav izračunava položaj promatranog objekta u prostoru. Posljedično, aktivni markeri zahtijevaju izvor napajanja, što znatno utječe na tržišnu cijenu markera. Preciznost mjerenja provedenih korištenjem vizijskih



sustava s aktivnim markerima je izrazito visoka, no okolnosti provođenja mjerenja limitirani su na laboratorijske uvjete.

S druge strane, pasivni markeri ne zahtijevaju izvor napajanja jer je njihova površina izrađena od reflektirajućeg materijala. Sustav kamera kontinuirano odašilje snop infracrvenih zraka koje se reflektiraju s površine markera i bivaju detektirane istim kamerama koje ih odašilju. Sustav zatim izračunava 3D položaj markera u prostoru kombiniranjem 2D podataka iz nekoliko kamera.

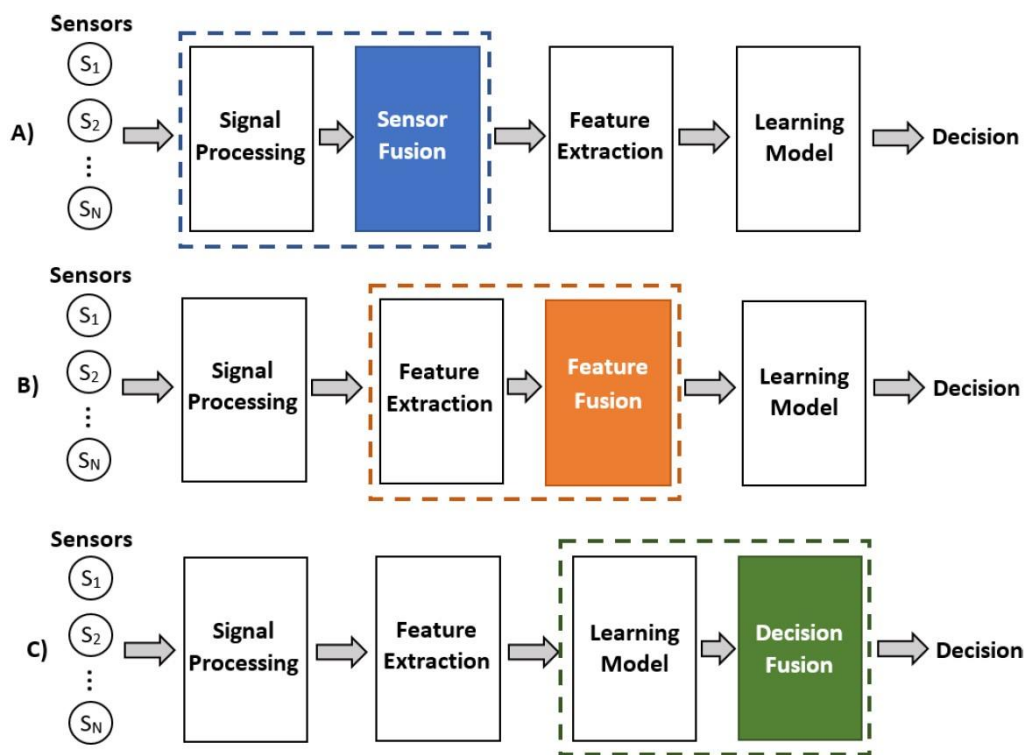
#### 1.2.2.2. Vizijski sustavi koji ne zahtijevaju korištenje vizualnih markera

Vizijski sustavi koji ne zahtijevaju korištenje vizualnih markera temelje se na korištenju optičkih senzora ili dubinskih kamera. Ovim se pristupom parametri pokreta dobivaju primjenom tehnika računalnog vida koje se provode izravno na video zapisu prethodno snimljenom korištenjem odgovarajućih postavka kamera. Kao i kod ostalih metoda, korištenje više kamera rezultira pouzdanijim rezultatima mjerenja radi problematike zaklanjanja zbog fiksnog kuta gledanja u slučaju korištenja jedne kamere. Sustavi za praćenje pokreta koji ne koriste markere manje ograničavaju ispitanika pri kretanju jer ne zahtijevaju fizičke markere pričvršćene na objekt praćenja. [5]

### 1.3. Fuzija senzora

Fuzija senzora (engl. *Sensor fusion*) je metoda prikupljanja informacija s različitih senzora kako bi se estimiralo stanje dinamičkog sustava. Estimacija stanja dinamičkog sustava korištenjem više isto- ili raznovrsnih senzora generalno rezultira točnijim i pouzdanijim informacijama, nego promatranje sustava pomoću jednog senzora. [9] Kada je riječ o fuziji senzora, razlikuju se dva pristupa. Prvi pristup opisuje usklađivanje signala dobivenih iz senzora različitih vrsta u istim uvjetima. Drugi pristup opisuje usklađivanje podataka dobivenih od istovrsnih senzora u različitim uvjetima mjerenja. [10]

Fuzija senzora odvija se na tri razine koje se odvijaju sekvencijalno. Razine fuzije senzora prikazani su na slici Slika 3.



Slika 3. Tri razine fuzije senzora [11]

Prva razina fuzije (engl. *Low level fusion*) podrazumijeva početnu fazu akvizicije i pripreme podataka s različitih senzora. Ako više senzora mjeri isti fizikalni parametar, moguće je kombinirati njihove podatke već na ovoj razini kako bi se poboljšala preciznost mjerenja ili smanjila buka. Ako senzori mjere različite parametre, njihova se obrada odvija na ovoj razini, a integracija podataka na višoj.

Druga razina (engl. *Mid level fusion*) uključuje izdvajanje značajki iz podataka dobivenih s različitih neovisnih senzora kako bi se stvorile pojedinačne reprezentacije vektora značajki. Ovaj proces omogućuje analizu i obradu senzorskih podataka na složenijoj razini, gdje se iz sirovih podataka senzora ekstrahiraju relevantne informacije (značajke) koje se dalje koriste u analizi.

Treća razina (engl. *High level fusion*) koristi se za klasifikaciju različitih izdvojenih značajki. Rezultat klasifikacije koristi se za donošenje odluka o okruženju i identifikaciju potrebnih

akcija. Ovaj postupak uključuje analizu kombiniranih značajki iz prethodnih razina kako bi se formulirale predikcije temeljene na podacima. [9][8]

Integracija tih triju razina fuzije u sklopu ovog rada pruža sveobuhvatan pristup analizi sportskih performansi pa tako i dublje razumijevanje korelacije kinematike udaraca i vremena reakcije u borilačkim vještinama.

Prva razina fuzije senzora u ovom radu koristi se za osnovnu sinkronizaciju i integraciju podataka prikupljenih s uređaja za mjerenje vremena reakcije pomoću inercijske mjerne jedinice i optičkog sustava za praćenje pokreta. Na ovoj razini, podaci koji se prikupljaju uključuju informacije o položaju, brzini, ubrzanju i orijentaciji sportaša tijekom izvođenja udaraca. Ovi podaci su temelj za sve daljnje analize i moraju biti precizno sinkronizirani i integrirani kako bi rezultati bili pouzdani.

Na drugoj razini fuzije senzora odvija se ekstrakcija ključnih značajki iz prikupljenih podataka, odnosno ekstrakcija trajektorija. Koje će biti korištene pri usporedbi pojedinačnih udaraca.

Na trećoj razini fuzije senzora, analizirani podaci se koriste za donošenje zaključaka o izvedbi pokreta. Ova razina uključuje kompleksnije analitičke metode kao što je algoritam dinamičkog poravnavanja vremena koji omogućuje usporedbu niza udaraca čije izvođenje varira u vremenu.

Fuzijom podataka dobivenih s IMU jedinice uređaja za mjerenje vremena reakcije i optičkog sustava za praćenje pokreta moguće je ostvariti sinergiju koja maksimizira prednosti obje tehnologije, što istraživačima i ispitanicima daje detaljan uvid u izvođenje udarca. Taj uvid neizbježan je za razumijevanje kinematike pokreta i omogućava uočavanje specifičnosti pri izvedbi pokreta ispitanika, što ispitaniku omogućava ciljanu prilagodbu treninga u svrhu poboljšavanja tehnike pojedinca.

#### **1.4. Dinamičko vremensko poravnanje**

Algoritam dinamičkog vremenskog poravnavanja (engl. *Dynamic time wrapping*, DTW) je metoda koja nastoji uskladiti dvije vremenski ovisne sekvence. Princip na kojem se temelji DTW je nelinearna transformacija sekvenci s ciljem usklađivanja njihovih trajanja. Cilj algoritma dinamičkog vremenskog poravnavanja je odrediti optimalno vremensko poravnanje ili ocjenu sličnosti dviju sekvenci koje se uspoređuju, odnosno diskretnih obilježja signala. Za usporedbu dviju sekvenci obilježja potrebno je definirati lokalnu funkciju cijene  $c(x, y)$ , koja predstavlja mjeru sličnosti elemenata  $x$  jedne sekvence i elementa  $y$  druge sekvence. Kriterij uspoređivanja dvaju vremenski ovisnih sekvenci je minimiziranje ukupnog iznosa funkcije

cilja, definirane matricom troškova. [12] Svaki element matrice troškova predstavlja trošak usklađivanja određenih elemenata dviju sekvenci koji se određuje za sve parove elemenata  $x$  i  $y$ . Ako su  $x$  i  $y$  slični, funkcija cilja je niska, a ako se razlikuju, iznos funkcije cilja je veći. Cilj je pronaći vremensko poravnanje između sekvenci na temelju matrice troškova.

Vremensko poravnanje je definirano putom, odnosno nizom polja matrice cijena. Za pronalaženje optimalnog puta, odnosno puta čija je funkcija cilja najniža, koristi se algoritam zasnovan na dinamičkom programiranju. Potrebno je definirati akumuliranu matricu cijena  $D$ . Svaka vrijednost  $D(n, m)$  označava akumuliranu cijenu optimalnog puta počevši od početnih indeksa do koordinata  $(n, m)$ . Ukupna cijena sličnosti dviju sekvenci je  $D(N, M)$ , gdje su  $N$  i  $M$  dimenzije matrice cijena, odnosno dužine sekvenci obilježja koje se uspoređuju. [13]

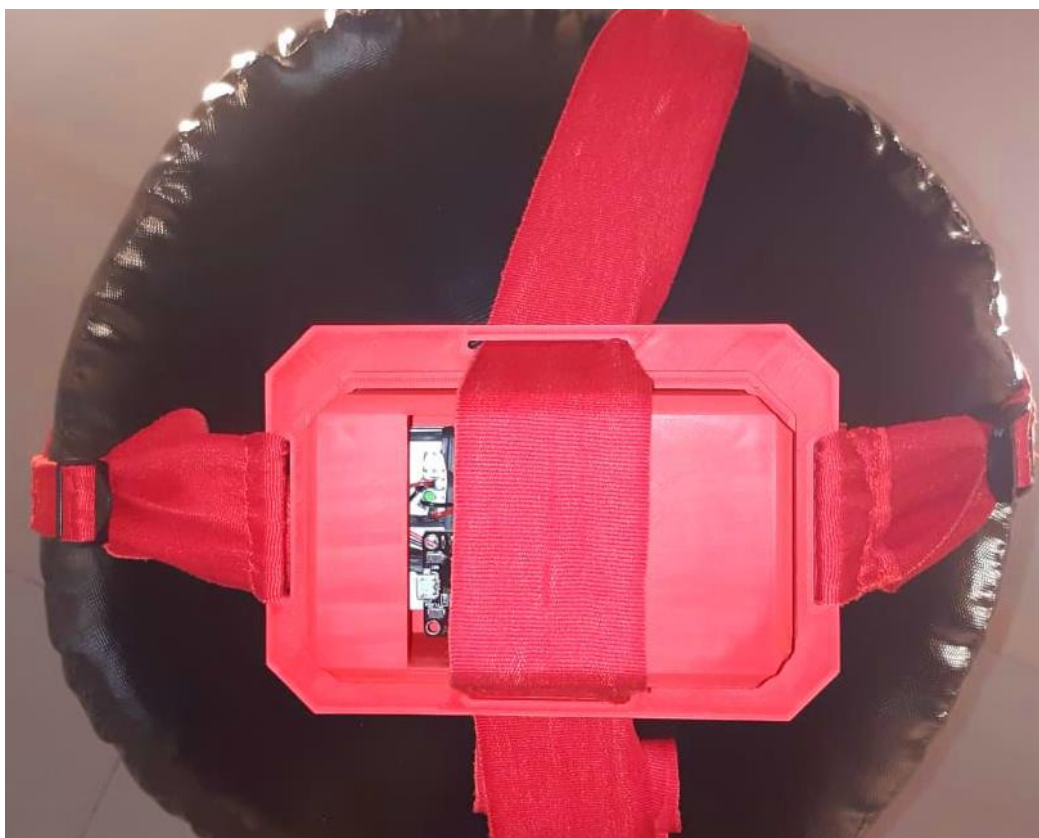
Algoritam dinamičkog vremenskog poravnavanja aktivno se primjenjuje u prepoznavanju govora, usporedbi rukopisa, prepoznavanju gesta pa i u analizi sportskih performansi. Usporedba trajektorija pojedinačnih udaraca u sklopu ovog rada provedena je korištenjem DTW algoritma. Izvođenje udarca pri mjerenju vremena reakcije je izrazito dinamička pojava, stoga je potrebno primijeniti algoritam koji omogućava međusobnu usporedbu trajektorija sekvenci različitog trajanja.

## 2. OPREMA I POSTAV ZA MJERENJE

Kao što je spomenuto u uvodu, sustav senzora korišten u svrhu provedbe istraživanja sastoji se od uređaja za mjerenje vremena reakcije pomoću inercijske mjerne jedinice i optičkog sustava za praćenje pokreta (OptiTrack).

### 2.1. Uređaj za mjerenje vremena reakcije

Uređaj za mjerenje vremena reakcije korišten pri sakupljanju podataka za provedbu istraživanja u sklopu ovog rada prikazan je na slici Slika 4.

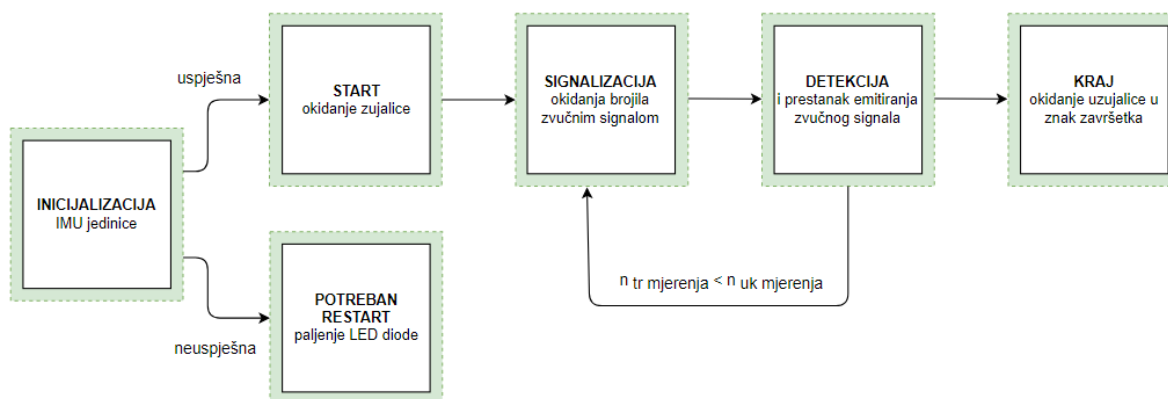


Slika 4. Uređaj za mjerenje vremena reakcije [14]

Kao što je vidljivo na slici, montaža uređaja vrši se pomoću elastičnih traka. Uređaj se montira na donju plohu vreće za boks paralelno s dnom. Ključna elektronička komponenta na kojoj se temelji detekcija trzaja je senzorski modul GY-521 koji integrira inercijsku mjernu jedinicu tipa MPU6050. Obradu i odašiljanje izmjerenih podataka iz korištenog uređaja vrši mikrokontroler NodeMCU v3.

### 2.1.1. Princip rada

Dijagram toka rada uređaja, prikazan na slici Slika 5, temelji se na principu detekcije trzaja uzrokovanim udarcem u vreću za boks.



Slika 5. Dijagram toka rada uređaja [14]

Nakon uključivanja uređaja, zujalica se oglašava u znak signalizacije uspješne inicijalizacije elektroničkih komponenata. Inicijalno oglašavanje uređaja korisniku daje do znanja da je uređaj ispravno aktiviran i da ciklus mjerenja može započeti. Korisnik potom čeka iduće oglašavanje zujalice na koje reagira udarcem u vreću za boks. Oglašavanje zujalice izaziva reakciju ispitanika i označava početak mjerenja vremena reakcije. Zvučni signal iz zujalice kontinuirano se emitira sve do trenutka detekcije udarca. Vremenski razmak između inicijalnog oglašavanja zujalice (u slučaju prvog mjerenja) ili detekcije udarca (u slučaju drugog mjerenja na dalje) i idućeg oglašavanja nasumičan je i nalazi se u rasponu od 6000 ms do 9000 ms. Jedan ciklus mjerenja sastoji se od unaprijed definiranog broja oglašavanja zujalice. Kraj ciklusa mjerenja popraćen je s tri uzastopna zvučna signala kratkog trajanja. Izmjerenim rezultatima se pristupa povezivanjem mobilnog uređaja ili računala s uređajem za mjerenje vremena reakcije putem WiFi protokola. Adresa web stranice na kojoj se prikazuju rezultati mjerenja je 192.168.4.1. [14]

Uređaj za mjerenje vremena reakcije temeljen na IMU tehnologiji pruža pouzdane informacije o vremenu reakcije, no ne pruža uvid u kinematiku izvođenja samog pokreta. S obzirom da je kinematika izvođenja pokreta ključna za cjelovitu analizu u sklopu ovog rada, neophodno je uključiti sustav s mogućnošću praćenja pokreta u vremenu.

## 2.2. Optički sustav za praćenje pokreta

OptiTrack sustav [15] pruža detaljan uvid u kinematiku izvedbe pokreta zahvaljujući svojoj sposobnosti preciznog praćenja pokreta u realnom vremenu. Korištenjem visokokvalitetnih kamera i reflektirajućih markera, ovaj sustav omogućuje točnu trodimenzionalnu rekonstrukciju pokreta ispitanika, što je ključno za dubinsku analizu i optimizaciju tehničkih vještina u sportu. Budući da OptiTrack omogućuje praćenje složenih pokreta u različitim sportskim disciplinama, neizostavan je alat u suvremenim istraživanjima usmjerenim na poboljšanje performansi i smanjenje rizika od ozljeda. Ključni elementi ovog sustava su infracrvene kamere Primex13 (Slika 6) i pasivni markeri sfernog oblika (Slika 7).

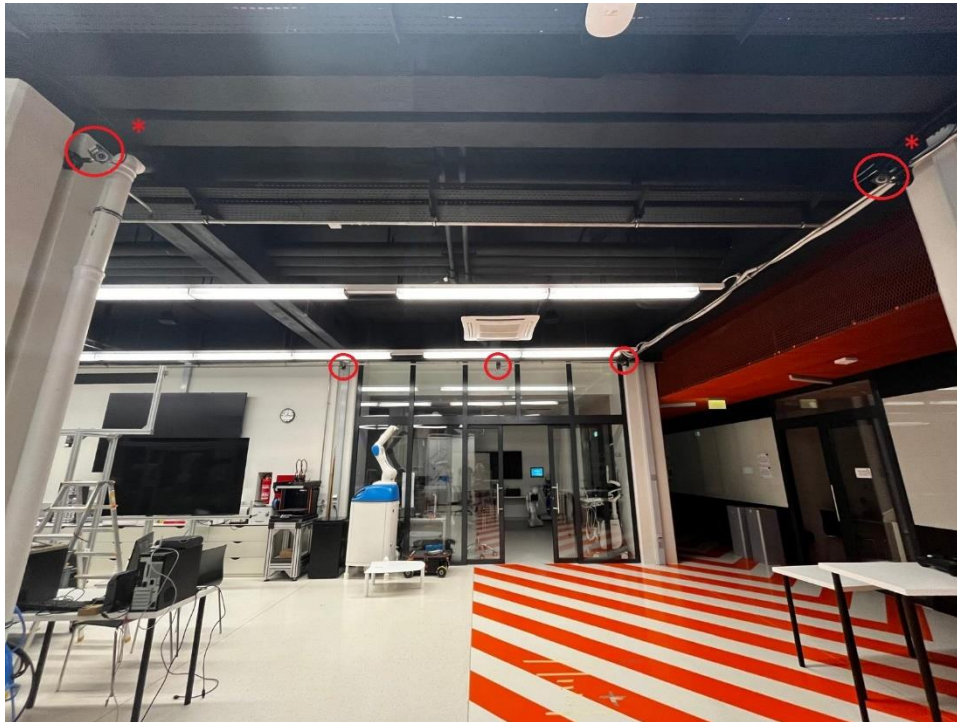


Slika 6. Primex 13 kamera [16]



Slika 7. Pasivni marker sa stalkom [16]

Kako bi se osigurala dovoljna pokrivenost prostora snimanog za potrebe ovog rada, korišten je sustav od 8 kamera u pravokutnoj konfiguraciji. Kamere su postavljene na visini od 3.5 m. Raspored kamera u prostoru prikazan na slici Slika 8 simetričan je s obzirom na ravninu dviju kamera označenih crvenom zvjezdicom.



**Slika 8. Konfiguracija kamera u prostoru**

Kako bi udarci, koji su predmet analize ovog rada, bili ispravno snimljeni, korišteno je odijelo prilagođeno tijelu ispitanika s markerima pričvršćenim na pozicijama relevantnim za prikupljanje podataka potrebnih za naknadnu analizu i vizualizaciju pokreta. Po jedan marker pozicioniran je na svako rame i kuk ispitanika, konfiguracija tih četiri markera predstavlja trup ispitanika i prikazana je na slici Slika 9 lijevo sa spomenutim markerima zaokruženim crveno. Na svakoj ruci nalazi se još tri markera, po jedan na svakoj nadlaktici, laktu i podlaktici. Marker na ruci prikazani su na slici Slika 9 desno s markerima zaokruženim crveno.





**Slika 9.** Raspored markera na trupu ispitanika (lijevo) Raspored markera po ruci ispitanika (desno)

Na svakoj rukavici nalazi se još tri markera koji predstavljaju ravninu sklopljene šake pri udaranju. Konfiguracija markera na rukavici prikazana je na slici Slika 10.



**Slika 10.** Raspored markera na boksačkoj rukavici

Pozicije markera u vremenu snimljene su relativno u odnosu na proizvoljno odabrani globalni koordinatni sustav uz frekvenciju uzorkovanja od 120 Hz. Program korišten za snimanje i obradu podataka nakon snimanja naziva se Motive [17].

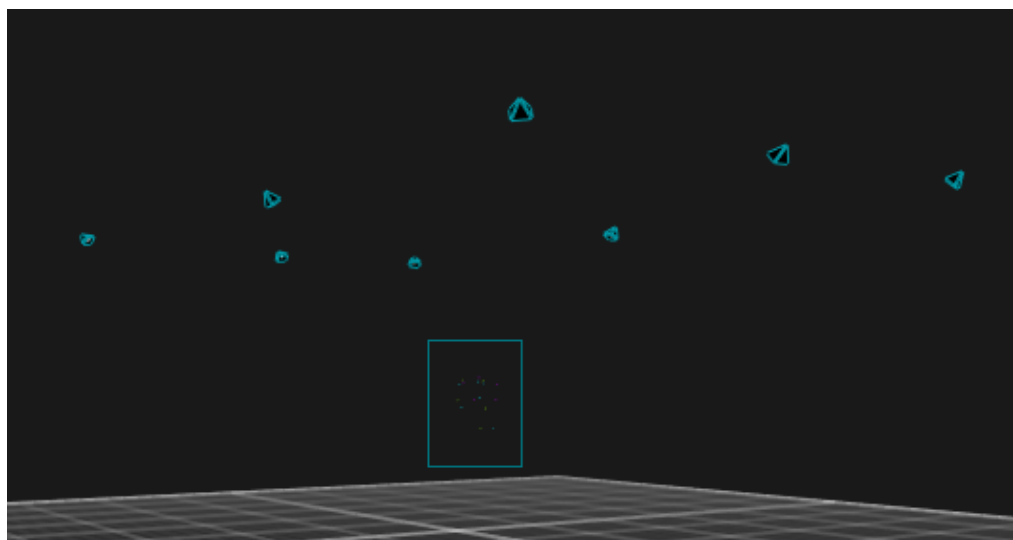
Kombinacija uređaja za mjerenje vremena reakcije temeljenog na IMU tehnologiji i OptiTracka rezultira cjelovitim sustavom senzora koji omogućava sveobuhvatnu analizu sportskih performansi. IMU uređaj pruža precizne podatke o vremenu reakcije, a OptiTrack nadopunjuje analizu pružanjem detaljnog vizualnog uvida u izvedbu pokreta ispitanika. Integracijom ovih tehnologija, može se dobiti dublji uvid u kinematiku udarca te preciznije evaluirati i poboljšavati tehnika izvedbe.

### 3. PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA

Podaci koji su korišteni u svrhu istraživanja prikupljeni su pomoću uređaja za mjerenje vremena reakcije na zvučne podražaje baziranom na IMU tehnologiji i optičkog sustava za praćenje pokreta. Prikupljanje podataka izvršeno je u Regionalnom centru izvrsnosti za robotske tehnologije CRTA [18] u Zagrebu. Ispitanik je volonter muškog spola s četverogodišnjim iskustvom u udaračkim borilačkim sportovima na amaterskoj razini. Udarci koji će biti analizirani u sklopu rada su prednji direkt (engl. Jab), stražnji direkt (engl. Cross), lijevi kroše (engl. Lead hook) i desni kroše (engl. Rear hook). Navedeni udarci su četiri od šest temeljnih udaraca ručnih tehnika u udaračkim borilačkim sportovima. [19]

#### 3.1. Prikupljanje podataka

Položaj tijela ispitanika na početku i kraju svakog snimanja naziva se nulta pozicija i unaprijed je dogovorena. U slučaju ovog snimanja, nulta pozicija je pozicija garda (engl. *Guard*). Konfiguracija kamera u odnosu na tijelo ispitanika prikazana je na slici Slika 11. Pravokutnik u sredini slike označava poziciju ispitanika. Vreća za boks duljine 120 cm, promjera 35 cm i težine 30 kg fiksno je postavljena ispred ispitanika.



Slika 11. Pozicija kamera u odnosu na ispitanika

Svaki udarac je sniman u serijama koje se sastoje od četiri mjerenja. Pojam jedno mjerenje odnosi se na mjerenje provedeno uređajem za mjerenje vremena reakcije i podrazumijeva pet udaraca, što znači da se svaka serija sastoji od ukupno 20 ponovljenih udaraca iste vrste.

Podaci sakupljeni mjerenjem vremena reakcije IMU uređajem očitavani su s web stranice kojoj se pristupilo povezivanjem mobilnog uređaja s IMU uređajem za mjerenje reakcije. Na slici Slika 12 prikazani su rezultati zabilježeni tijekom jednog takvog ciklusa mjerenja.

**Reaction time  
FEEDBACK**

**ROUND 1 TIME = 391 ms**

**ROUND 2 TIME = 494 ms**

**ROUND 3 TIME = 358 ms**

**ROUND 4 TIME = 370 ms**

**ROUND 5 TIME = 429 ms**

**AVERAGE TIME = 408 ms**

**Slika 12. Rezultati jednog ciklusa mjerenja**

Podaci snimljeni korištenjem OptiTrack sustava daju informacije o položaju markera u prostoru u ovisnosti o vremenu.

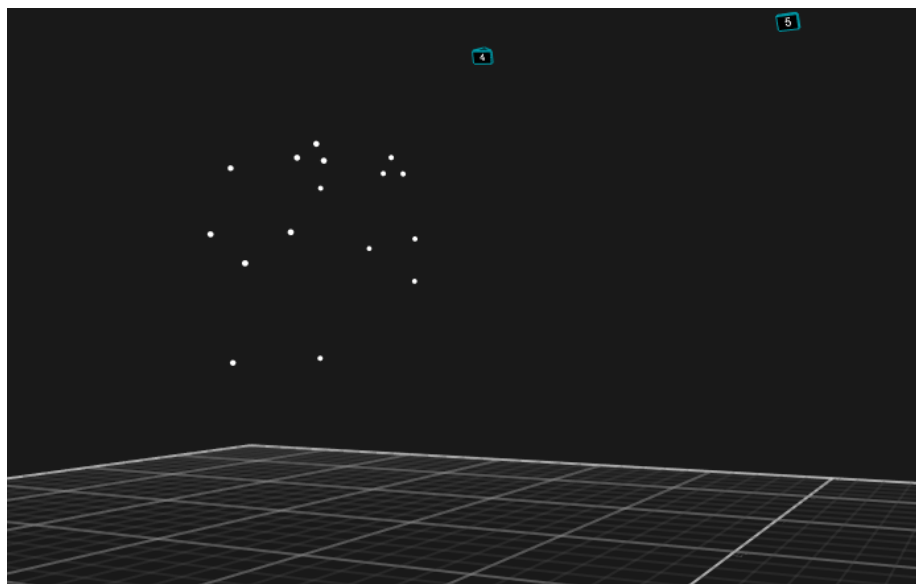
### **3.2. Obrada podataka**

Podaci izmjereni pomoću IMU uređaja su kvantitativne vrijednosti koje opisuju vrijeme reakcije ispitanika i dodatna obrada tih podataka nije potrebna.

Podaci snimljeni kamerama OptiTrack sustava su  $x$ ,  $y$  i  $z$  koordinate detektiranih markera snimane frekvencijom od 120 Hz. Manipulacija neuređenom snimkom bila bi izrazito komplicirana, stoga je potrebno provesti naknadnu obradu podataka. Postupak naknadne obrade podataka uključuje redom identifikaciju i grupiranje markera te ispravljanje nepravilnosti signala.

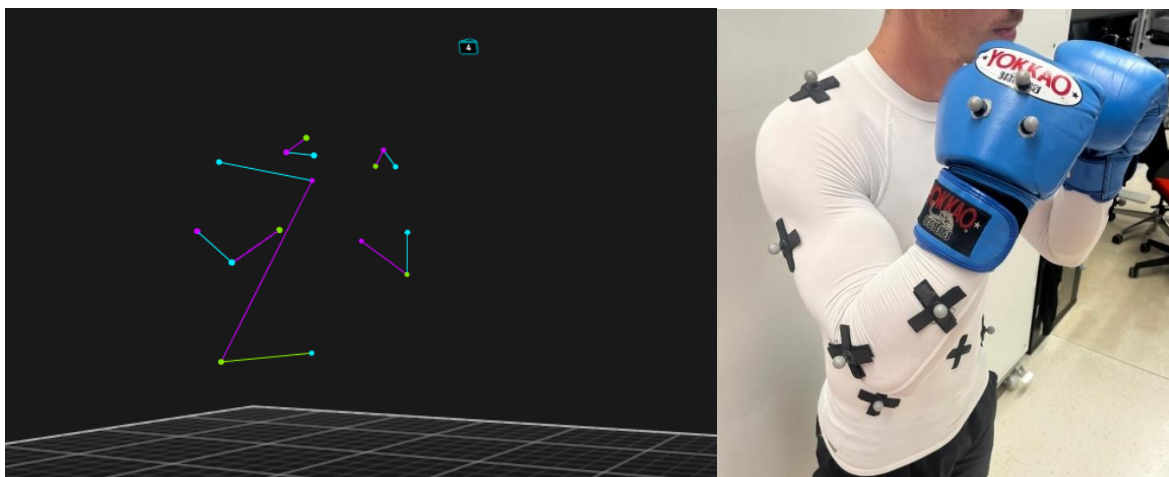
### 3.2.1. Označavanje markera

Za potrebe ovog rada, korišteno je ukupno 16 markera grupiranih u 5 skupa markera. Na slici Slika 13 prikazane su pozicije markera u prostoru kada se ispitanik nalazi u nultoj poziciji.



**Slika 13. Neuređen raspored markera u nultoj poziciji**

Markerima su tijekom naknadne obrade dodijeljene oznake u svrhu identifikacije. Jednoznačno označavanje omogućava lakše praćenje markera kroz snimku. Prvi od 5 skupova markera sastoji se od 4 markera (jedan na svakom ramenu i jedan na svakom kuku) i predstavlja ravninu trupa ispitanika. Drugi i treći skup markera sastoji se od po 3 markera i predstavljaju lijevu i desnu ruku ispitanika s markerima pozicioniranim na nadlaktici, laktu i podlaktici ispitanika. Četvrti i peti skup markera također se sastoje od po 3 markera koje predstavljaju ravninu zatvorene šake pri udaranju u vreću za boks. Pojedini skupovi markera prikazani su na slici Slika 14 lijevo, markeri svakog skupa međusobno su povezani ravnim linijama. Na slici Slika 14 desno prikazan je ispitanik u poziciji prikazanoj na slici lijevo radi usporedbe.



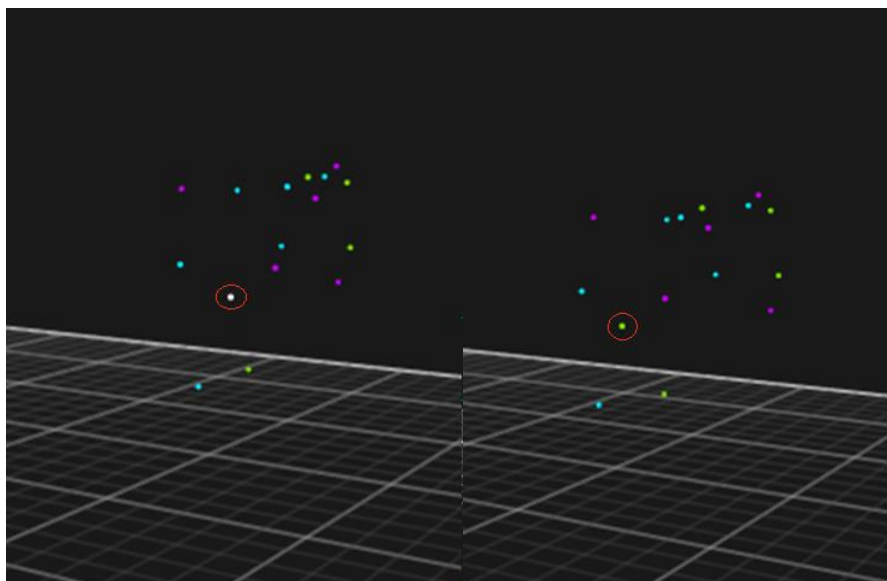
**Slika 14. Raspored markera grupiranih u skupine – nulta pozicija (lijevo) Ispitanik – nulta pozicija (desno)**

### **3.2.2. Otklanjanje smetnji u signalu**

Smetnje u signalu najčešće se pojavljuju se u obliku pogrešaka u označavanju markera, okluzija, pogrešaka refleksije i šumova. Navedene smetnje očituju se nedostatkom podataka (pojavom praznina) i nekontinuiranih prijelaza u signalu.

#### **3.2.2.1. Pogreške u označavanju markera**

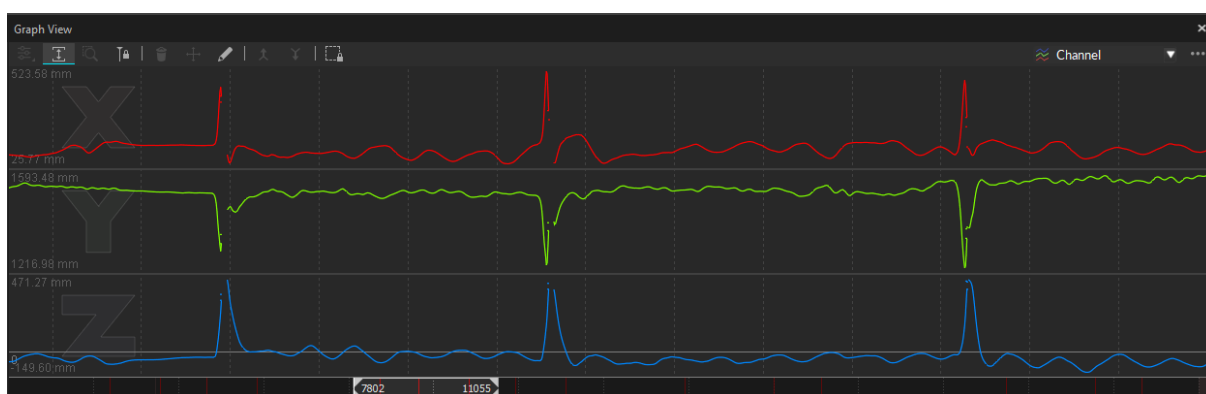
Pogreške u oznakama očituju se u obliku neoznačenih, pogrešno označenih i zamijenjenih oznaka i ispravljaju se ručnim dodjeljivanjem ispravnih oznaka. [20] Neoznačeni markeri prepoznaju se po karakterističnoj bijeloj boji. Primjer neoznačenog markera prikazan je na slici Slika 15 lijevo. Marker zaokružen crvenom bojom izgubio je oznaku tijekom snimanja, naknadno označen marker prikazan je na slici Slika 15 desno.



**Slika 15. Izgubljena oznaka markera (lijevo) Naknadno označen marker (desno)**

### 3.2.2.2. Okluzije

Pogreške u označavanju markera najčešće se javljaju uslijed okluzije. Okluzije markera su praznine u signalu koje nastaju zbog zaklanjanja pogleda kamere na marker. U tom slučaju, marker neće biti rekonstruiran u 3D prostor i uvest će se praznina u trajektoriji markera. Primjer okluzije vršnog markera na lijevoj rukavici pri snimanju lijevog krošea prikazan je na slici Slika 16.



**Slika 16. Primjer okluzije markera**

Crvena krivulja na grafu predstavlja kretanje u smjeru osi  $x$ , zelena krivulja kretanje u osi  $y$ , a plava kretanje u osi  $z$ . Okluzije markera su kritične jer na dijelovima gdje se pojavljuju nema

prikupljene informacije o trajektoriji. Ako je izgubljeni marker značajan za daljnju analizu, a informacije okolnih markera također ne postoje ili nisu dovoljno pouzdane, potrebno je ponovno snimanje pokreta. Ako se radi o situaciji kada su ostali podaci dovoljno informativni da se putanja markera može interpolirati, koristite se interpolacijske funkcije za modeliranje okludirane trajektorije.

Prije provedbe interpolacije potrebno je provesti metodu obrezivanja krajeva signala. Ova metoda uklanja nekoliko kadrova prije i poslije pojave praznine u trajektoriji. Obrezivanje krajeva signala je nužno radi mogućih malih odstupanja u signalu uzrokovanih okluzijom. Preporuča se obrezivanje malih segmenata podataka, približno tri kadra. Preskakanje ovog koraka može negativno utjecati na funkcionalnost narednih koraka koji se oslanjaju na postojeće podatke jer se gubljenjem markera unosi mala netočnost u posljednjem trenutku prije nestajanja markera.

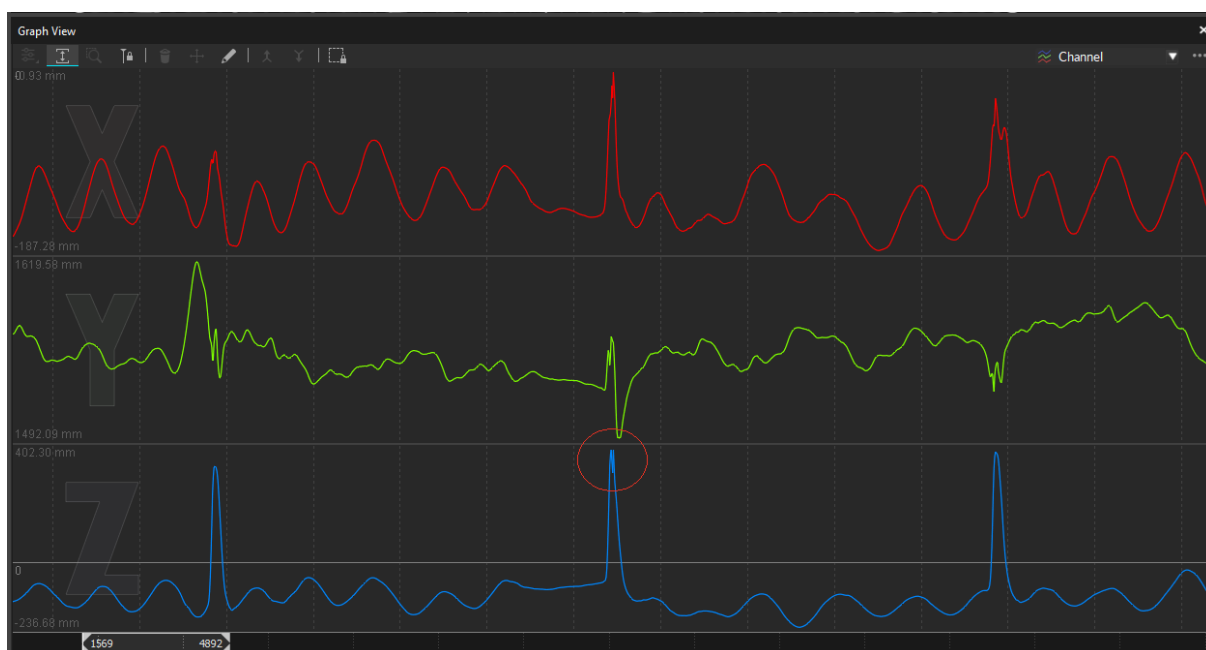
Nakon podrezivanja praznina, potrebno je iste popuniti. Opcije interpolacije dostupne u alatima za uređivanje softvera korištenog za prikupljanje i obradu podataka uključuju: konstantnu, linearnu, kubičnu i interpolaciju na temelju uzorka. Prve tri opcije interpolacije (konstantna, linearna i kubična) baziraju se na analizi trajektorije pojedinog markera, što znači da se procjena pozicije markera vrši korištenjem podatka prije i nakon nastanka praznine. Metoda konstantne interpolacije, koja se temelji na primjeni aproksimacije nultog stupnja, i linearna interpolacija, temeljena na interpolaciji prvog stupnja, nisu korištene u sklopu ovog rada zbog karakteristika promatranih pokreta – ljudski su pokreti pretežito kompleksni i dinamični, obično sa sinusoidnim obilježjima. Konstantna interpolacija pretpostavlja da je položaj markera stacionaran i nepromjenjiv, a linearna interpolacija pretpostavlja ravnomjerno kretanje koje nije adekvatno za precizno modeliranje udaraca koji uključuju nagla ubrzanja i usporavanja. U sklopu rada povremeno je korištena kubna interpolacija, koja se temelji na modeliranju trajektorije korištenjem polinoma trećeg stupnja. Iako ovaj pristup omogućava preciznije praćenje kompleksnih ljudskih pokreta, najčešće je korištena interpolacija na temelju uzorka. Pri snimanju pojedinih udaraca, najčešće su nestajali markeri pozicionirani na rukavici ispitanika u trenutku udarca. S obzirom da se na rukavici nalazi 3 markera u trokutnoj formaciji čiji se međusobni odnos u prostoru tijekom snimanja nije mijenjao, rekonstrukcija podataka mogla se provesti metodom interpolacije na temelju uzorka. Interpolacija na temelju uzorka koristi trajektorije odabranih referentnih markera za procjenu položaja okludiranog markera, što je omogućilo izrazito preciznu rekonstrukciju pozicije okludiranih markera na rukavici. U



kasnijoj analizi korišteni su podaci jednog od markera na rukavici, stoga je preciznost podataka o njihovoj poziciji igrala ključnu ulogu u točnosti provedene analize.

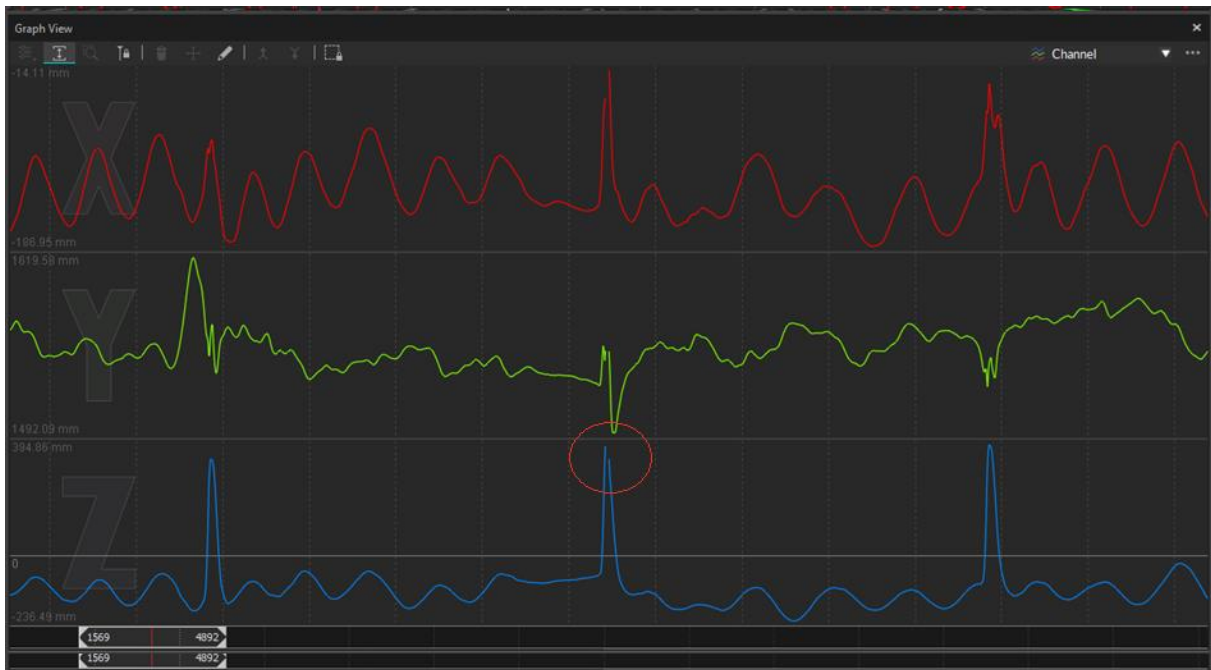
### 3.2.2.3. Pogreške refleksije

Pogreške refleksije nastaju uslijed reflektiranja snopa infracrvenih zraka emitiranog iz kamera s površina koje nisu namijenjene za refleksiju prilikom snimanja. U svrhu ispitivanja, korištene su kožne boksačke rukavice s glatkom površinom, što je povremeno rezultiralo pojavom refleksije. Nepredviđene refleksije mogu biti pogrešno zabilježene kao podaci o markerima i rezultirati rekonstrukcijom refleksija u 3D prostoru koje iskrivljavaju podatke o poziciji markera u prostoru. Na slici Slika 17 prikazan je primjer detekcije refleksije rukavice u trenutku udarca.



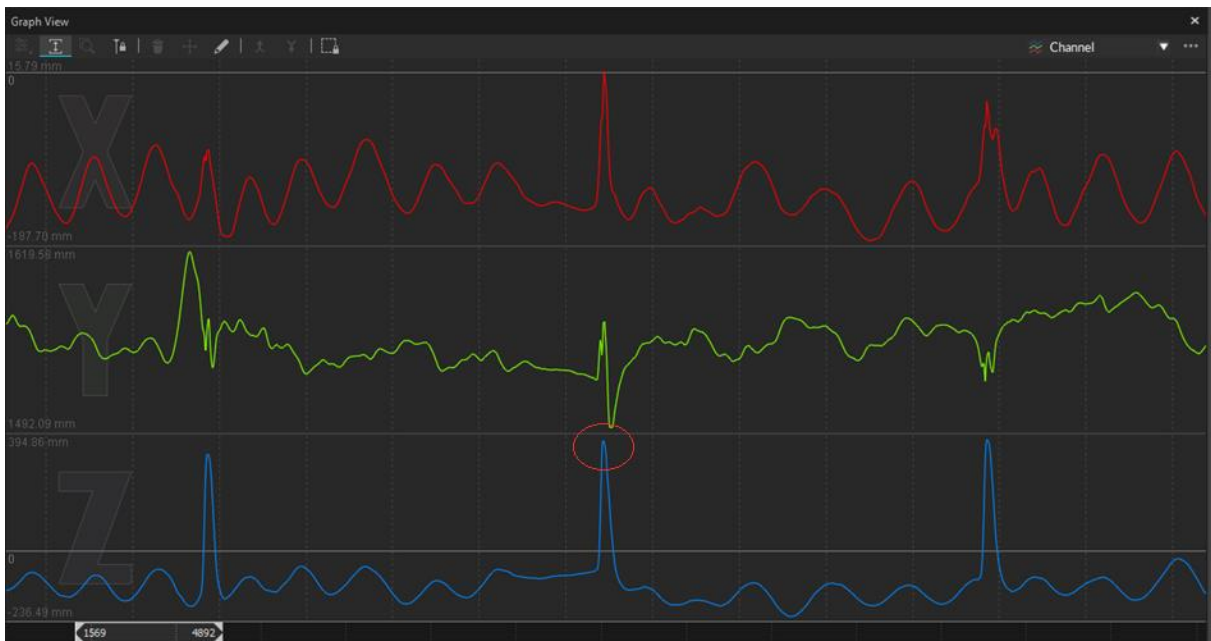
**Slika 17. Trajektorije markera u smjeru koordinatnih osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  u trenutku detekcije refleksije**

Ovu vrstu grešaka potrebno je identificirati vizualnom inspekcijom signala. Prepoznavanje refleksije kao markera od strane sustava očituje se naglim skokom u signalu. Greške refleksije ispravljaju se uklanjanjem dijela signala koji je pogrešno detektiran kao što je prikazano na slici Slika 18.



**Slika 18. Trajektorija s uklonjenim dijelom signala u smjeru z osi**

Signal se potom rekonstruira primjenom prikladne metode interpolacije, rezultat ispravljanja greške prikazan je na slici Slika 19.



**Slika 19. Rekonstruirana trajektorija u smjeru z osi**

#### 3.2.2.4. Šumovi

Šumovi u signalu mogu biti uzrokovani raznim čimbenicima kao što su smetnje okolišnog svjetla, kvaliteta kamere ili netočnosti postavljanja i ispravljaju se primjenom filtera, npr. Butterworthovog, Kalmanovog, Fourierove ili Wavelet transformacije.

## 4. ANALIZA PODATAKA

U nastavku je detaljno opisan proces analize podataka prikupljenih tijekom izvođenja specifičnih udaraca. Podaci su prikupljeni korištenjem visoko preciznog sustava za praćenje pokreta koji detektira 3D koordinate ruke tijekom udarca i IMU uređaja za mjerenje brzine reakcije te obrađeni korištenjem programskog koda razvijenog u Pythonu unutar razvojnog okruženja VS Code Studio. Analiza podataka obuhvaća pripremu podataka, segmentaciju signala s ciljem identifikacije udaraca te usporedbu trajektorija udaraca pomoću metode dinamičkog vremenskog poravnanja (DTW). Cilj ove analize je kvantificirati izvedbu ispitanika, identificirati područja za tehničko usavršavanje te pružiti uvid u dosljednost izvedenih udaraca.

### 4.1. Trajektorije

Analiza trajektorija omogućuje detaljan uvid u kretanje ruke tijekom udarca. Ako borac poznaje tehniku udaranja, upoznat je s očekivanim izgledom trajektorije te mu ovaj uvid omogućava identifikaciju faza udarca gdje postoji potencijal za tehničko usavršavanje. Također, međusobna usporedba trajektorija pruža uvid u ponovljivost izvođenja udaraca, koja je vjeran pokazatelj razine sportaša. Usporedba trajektorija primjenom dinamičkog vremenskog poravnanja važan je aspekt analize podataka u ovom kodu. U kodu se za svaki udarac određuju početni i završni trenutak na temelju detektiranih skokova u akceleraciji. Najveći skok u akceleraciji u negativnom smjeru (maksimalno usporavanje) označava trenutak udarca u vreću, kojim, za potrebe ovog rada, završava udarac. Segmentacija udar provodi se oduzimanjem vremena reakcije od trenutka udarca u vreću. Iz svih segmentiranih trajektorija, bira se ona s najkraćim trajanjem kao referentna trajektorija za usporedbu. Ova trajektorija opisuje kretanje najbržeg udarca i postaje temelj za usporedbu s ostalim trajektorijama. Korištenjem DTW, svaki segment trajektorije uspoređuje se s referentnom trajektorijom. Za svaku usporedbu izračunava se DTW udaljenost koja kvantificira sličnost između dvije trajektorije. Deriviranjem pozicije predstavljene trajektorijama dobivaju se informacija o brzini.

### 4.2. Brzine

Informacije o brzini izvođenja udarca mogu se koristiti kao referenca pri praćenju učinkovitosti treninga usmjerenih na povećanje brzine. Varijacije u brzini udaraca vjeran su indikator utjecaja

specifičnih treninga na performanse sportaša. Ključna uloga brzine u sklopu ovog rada je određivanje ubrzanja koje se dobiva deriviranjem brzine.

### 4.3. Ubrzanja

Ključna uloga analize ubrzanja u ovom radu bila je odrediti fazu udarca. Kao što je opisano, segmentacija udarca provedena je identifikacijom završne faze udarca - kada rukavica dotakne vreću za boks.

### 4.4. Pseudokod

Kod razvijen za analizu snimljenih podataka sastoji se od slijedećih ključnih koraka:

1. Učitavanje i prilagođavanje formata podataka iz CSV datoteke
2. Računanje diferencijala pozicije  $dy$  i vremena  $dt$  za izračunavanje brzine
3. Računanje brzine  $v_y$  u smjeru  $y$  osi korištenjem diferencijala pozicije i vremena
4. Računanje diferencijala brzine  $dv_y$  za izračunavanje ubrzanja
5. Računanje ubrzanja  $a_y$  u smjeru  $y$  osi korištenjem diferencijala brzine i vremena
6. Vizualizacija pozicije  $y$ , brzine  $v_y$  i ubrzanja  $a_y$  markera
7. Segmentacija udaraca identificiranjem početnog i završnog trenutka udarca
8. Priprema segmenta za DTW analizu
9. Određivanje najbržeg udarca na temelju minimalnog trajanja
10. Vizualizacija svih udaraca na zajedničkom dijagramu
11. Vizualizacija DTW usporedbe trajektorija svih udaraca s numeričkim vrijednostima udaljenosti u odnosu na najbrži udarac

## 5. REZULTATI

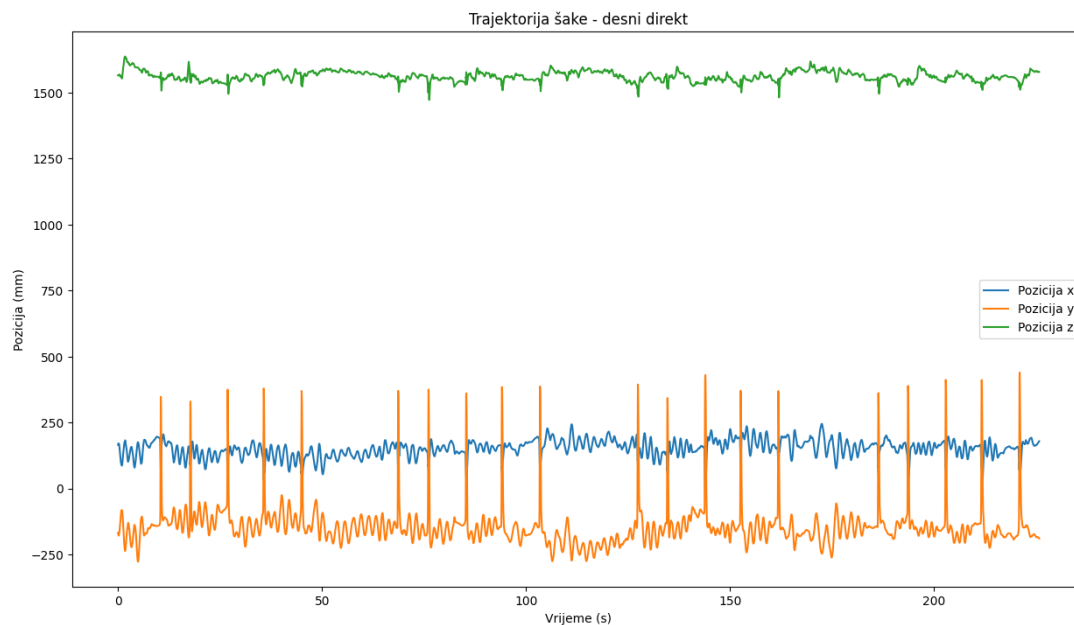
U nastavku su prikazani rezultati analize u obliku grafičkih prikaza prikupljenih podataka. Rezultati su dobiveni primjenom metode dinamičkog vremenskog poravnavanja. Ulazni podaci pritom su niz podataka o poziciji markera šake kojom je proveden udarac u odnosu na koordinatu  $y$  u prostoru u ovisnosti o vremenu. Izlaz iz ove analize su numerički i grafički prikazi koji kvantificiraju sličnost između udaraca.

Za potrebe vizualizacije, odabran je jedan specifični udarac koji je prepoznat kao najbrži u nizu zabilježenih pokušaja. Ovaj udarac služi kao referentna točka za usporedbu s ostalim udarcima. Sekvenca udaraca započinje inicijalnom pozicijom u trenutku oglašavanja zujalice i završava trenutkom udarca u vreću za boks.

U nastavku se nalaze grafički prikazi trajektorija, brzina i ubrzanja cijele serije od 20 udaraca iste vrste u smjeru koordinatnih osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  grafički prikazi trajektorija pojedinačnih udaraca iz te serije u smjeru osi  $y$ . Grafički prikazi pojedinačnih udaraca podrazumijevaju trajektorije udaraca od početka mjerenja vremena reakcije do trenutka udarca u vreću i prikazane su na jednom grafu. Isti udarci, naknadno su prikazani s ujednačenim početnim pozicijama u prostoru radi lakše usporedbe trajektorija. Pojedinačni udarci potom su prikazani u usporedbi s najbržim udarcem u obliku DTW mapa koje ilustriraju kako se pojedini udarci vremenski i prostorno usklađuju s referentnim udarcem.

## 5.1. Trajektorije šake

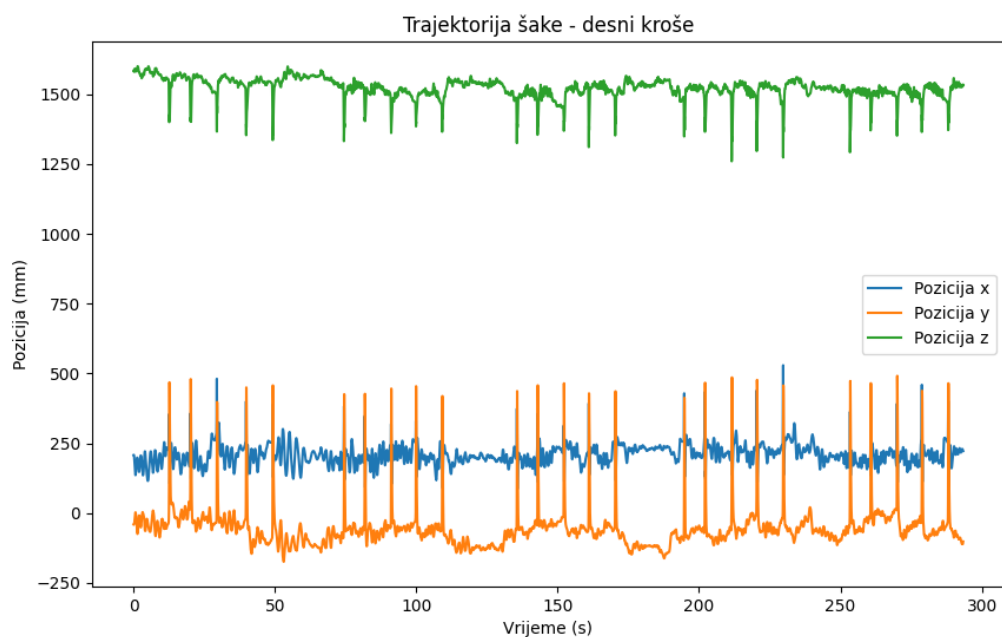
Slika 20 - Slika 23 prikazuju trajektorije šake kojom je izveden udarac u tri koordinatne osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  tijekom izvođenja serije od 20 ponovljenih udara iste vrste.



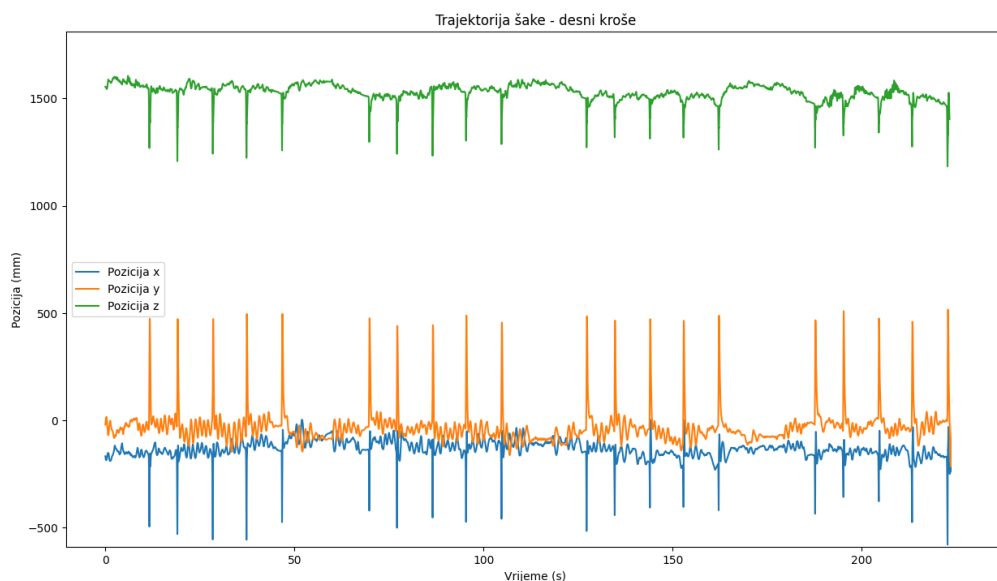
**Slika 20. Trajektorije markera na desnoj rukavici – desni direkt**



**Slika 21. Trajektorije markera na lijevoj rukavici – lijevi direkt**



**Slika 22. Trajektorije markera na desnoj rukavici – desni kroše**



**Slika 23. Trajektorije markera na lijevoj rukavici – lijevi kroše**

Os  $x$  grafičkih prikaza predstavlja vrijeme u sekundama [s], a os  $y$  poziciju u odnosu na zadani koordinatni sustav u prostoru u milimetrima [mm].

Zelenom linijom (Pozicija  $z$ ) prikazano je kretanje desne šake s obzirom na os  $z$  koordinatnog sustava. Pri izvođenju desnog i lijevog direkta, uočeni su blagi skokovi u amplitudi trajektorije



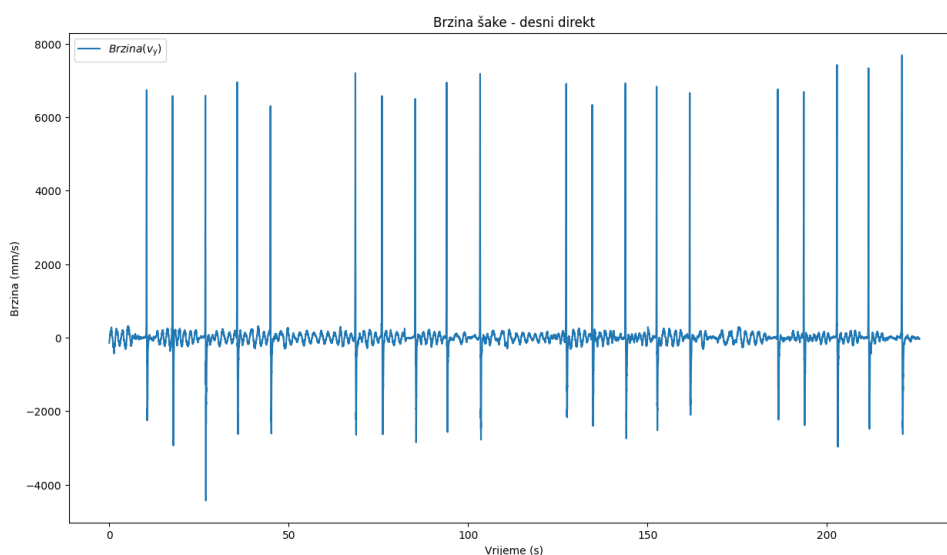
u smjeru osi  $z$ , ovi su skokovi znatno izraženiji u trajektorijama desnog i lijevog krošea. Iz uočenog se može zaključiti da pri izvođenju direkta ispitanika nema znatnog pomaka šake u smjeru koordinatne osi  $z$ , dok je prilikom izvođenja krošea pomak u smjeru osi  $z$  izraženiji.

Plavom linijom (Pozicija  $x$ ) prikazano je kretanje promatrane šake s obzirom na os  $x$  koordinatnog sustava. Pri izvođenju direkta ponovno nema izraženih skokova u amplitudi, dok su isti ponovno prisutni pri izvođenju krošea. Suprotan smjer skokova u signalu prilikom provođenja krošea uzrokovan je pozicioniranjem ishodišta koordinatnog sustava u ravnini trupa ispitanika.

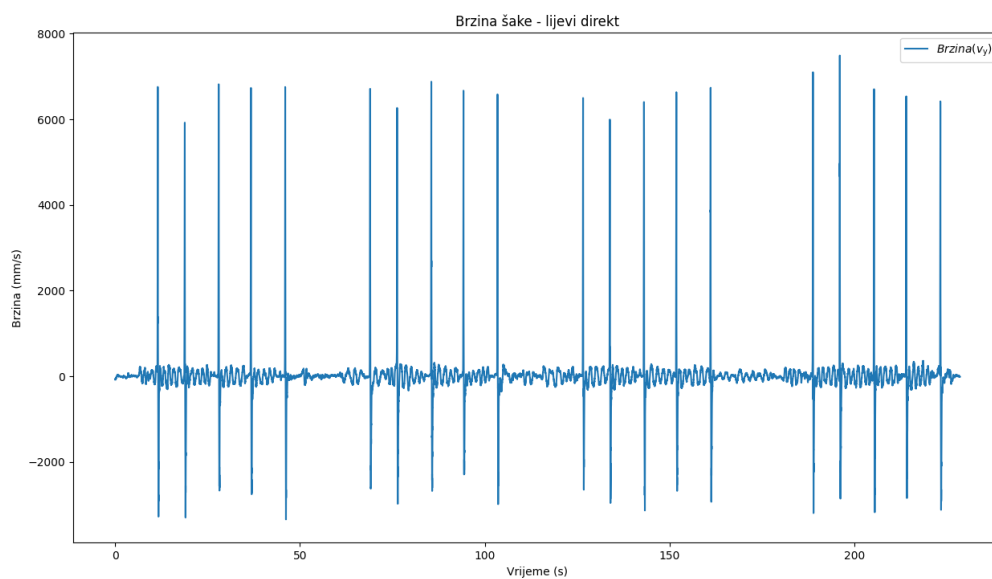
Narančastom linijom (Pozicija  $y$ ) prikazano je kretanje šake s obzirom na os  $y$  koordinatnog sustava. Skok u amplitudi u smjeru koordinatne osi  $y$  izražen je prilikom izvođenja svakog snimljenog udarca. Apsolutna vrijednost naglog porasta u amplitudi ukazuje na činjenicu da se udarci pretežito provode u smjeru koordinatne osi  $y$ . Podaci izmjereni u smjeru ove koordinatne osi biti će korišteni su za daljnju analizu u sklopu rada.

## 5.2. Brzine šake

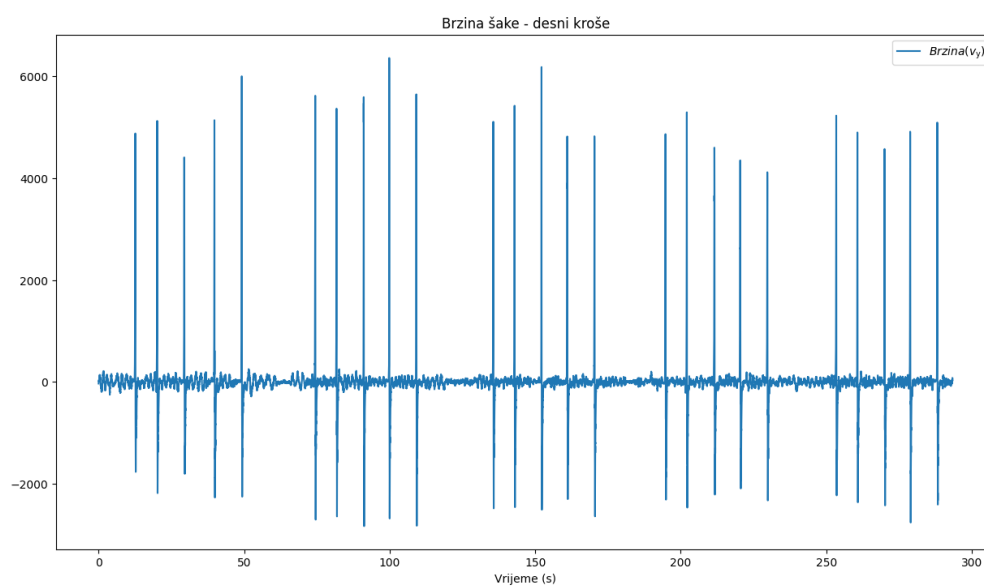
Grafovi na slikama Slika 24 - Slika 27 prikazuju brzine šake kojima se izvodi udarac u ovisnosti o vremenu.



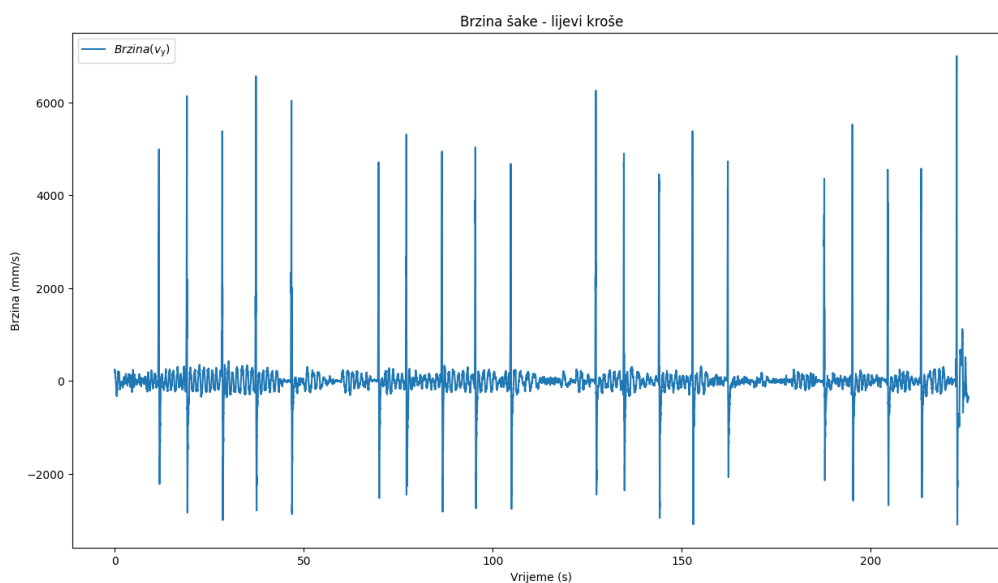
Slika 24. Brzina desne šake u smjeru osi  $y$  – desni direkt



**Slika 25. Brzina desne šake u smjeru osi y – lijevi direkt**



**Slika 26. Brzina desne šake u smjeru osi y – desni kroše**

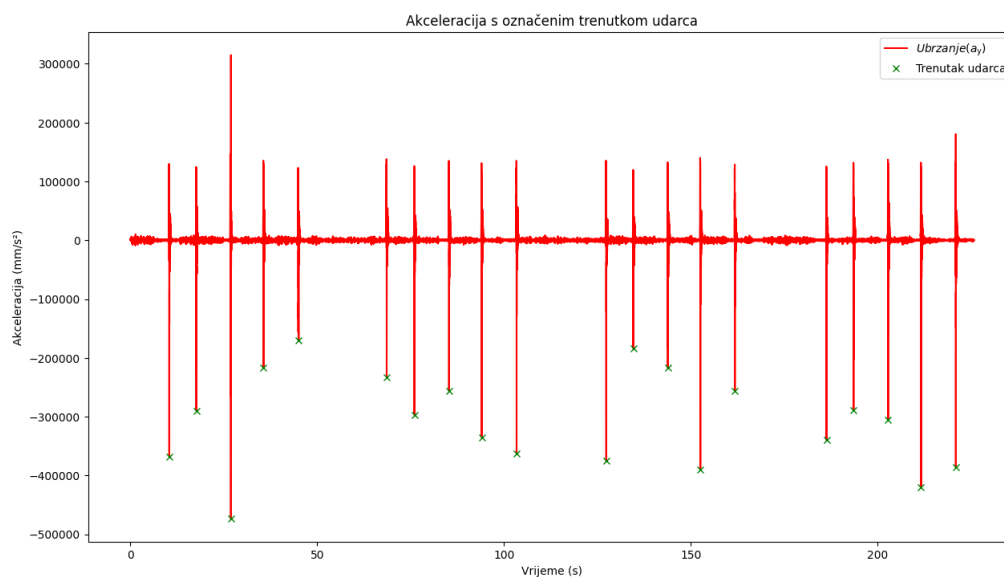


**Slika 27. Brzina lijeve šake u smjeru osi y – lijevi kroše**

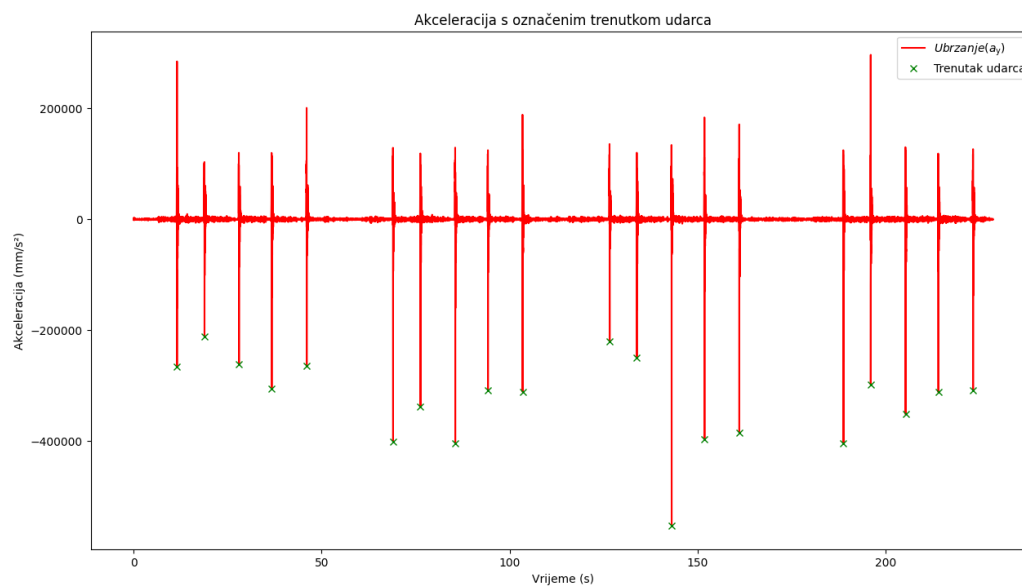
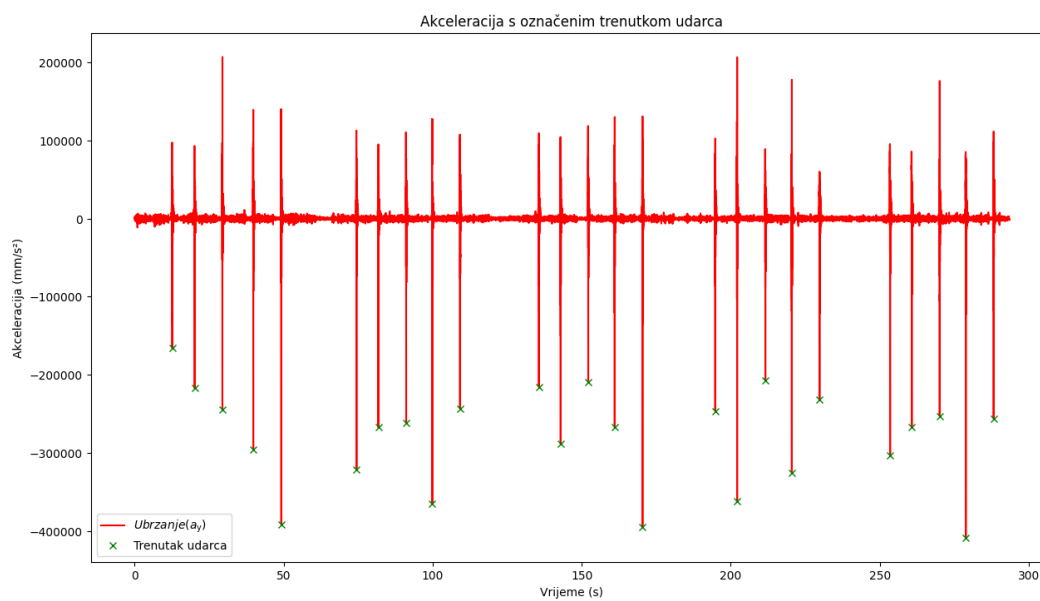
Na osi y prikazanih grafova nalaze se vrijednosti brzine u smjeru koordinatne osi y u prostoru prikazane u milimetrima po sekundi [mm/s] u odnosu vrijeme u sekundama [s] prikazano na osi x. Vertikalne linije na grafu predstavljaju trenutke naglih promjena pozicije, odnosno brzinu u pozitivnom i negativnom smjeru koordinatne osi y u prostoru.

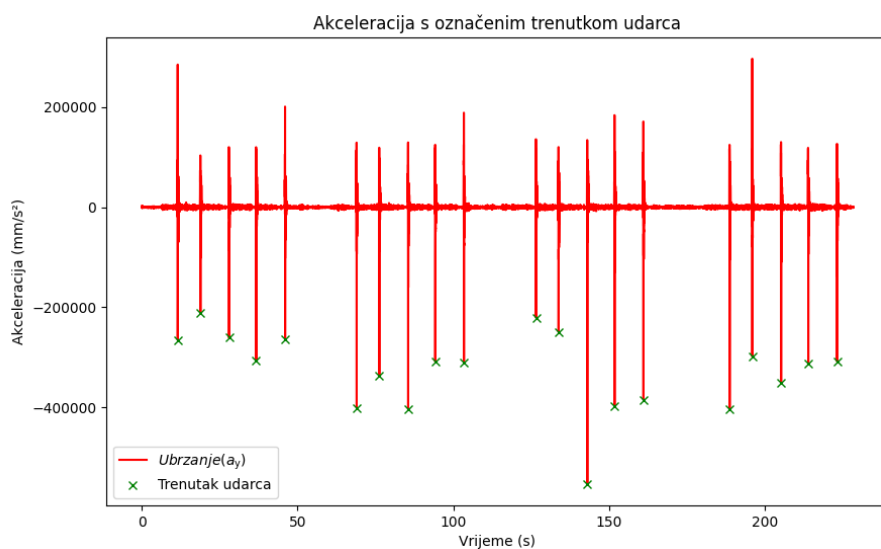
### 5.3. Akceleracije šake

Grafovi na slikama Slika 28 - Slika 31 prikazuju akceleraciju šake pri izvođenju udarca s označenim maksimalnim vrijednostima.



**Slika 28. Akceleracija desne šake – desni direkt**

**Slika 29. Akceleracija lijeve šake – lijevi direkt****Slika 30. Akceleracija desne šake – desni kroše**

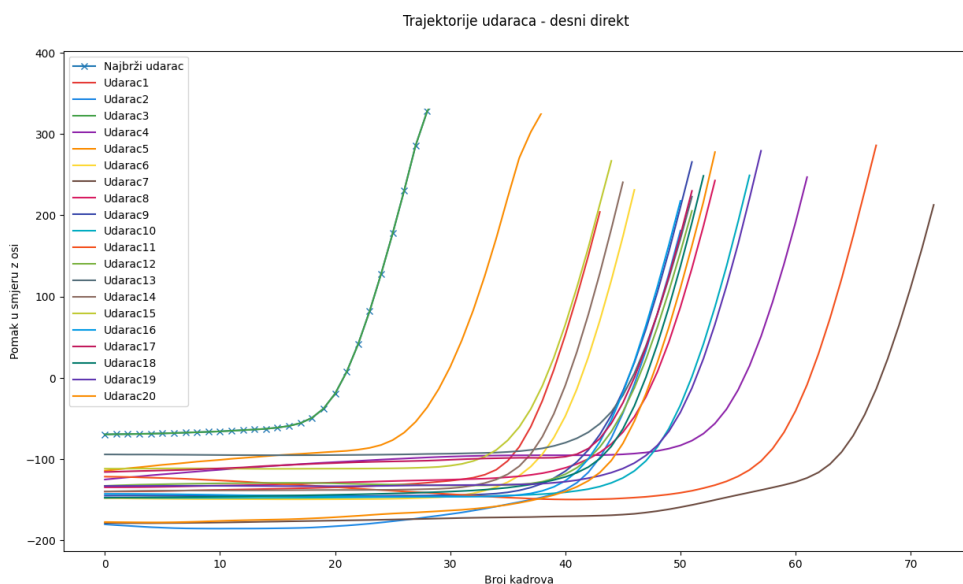


**Slika 31. Akceleracija lijeve šake – lijevi kroše**

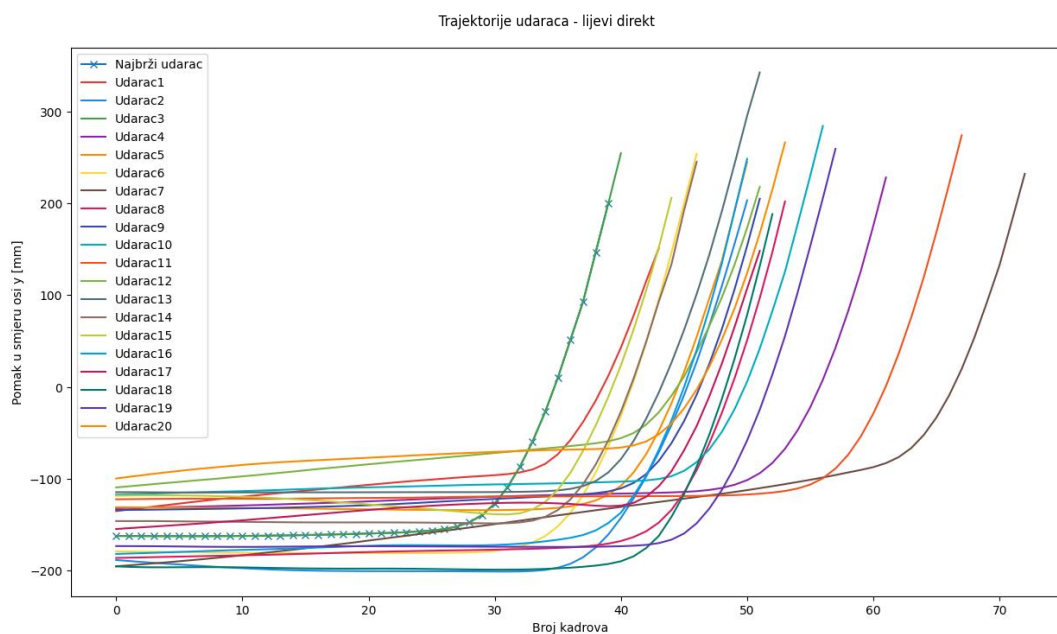
Na osi  $y$  prikazana je vrijednost akceleracije u smjeru osi  $y$  koordinatnog sustava u prostoru u milimetrima po sekundi na kvadrat [ $\text{mm/s}^2$ ], a na osi  $x$  vrijeme u sekundama [s]. Ubrzanje šake prikazano je crvenom linijom s maksimalnim vrijednostima označenim zelenim  $x$ . Maksimalne vrijednosti deceleracije upućuju na trenutak udarca ispitanika u vreću.

## 5.5. Usporedba trajektorija

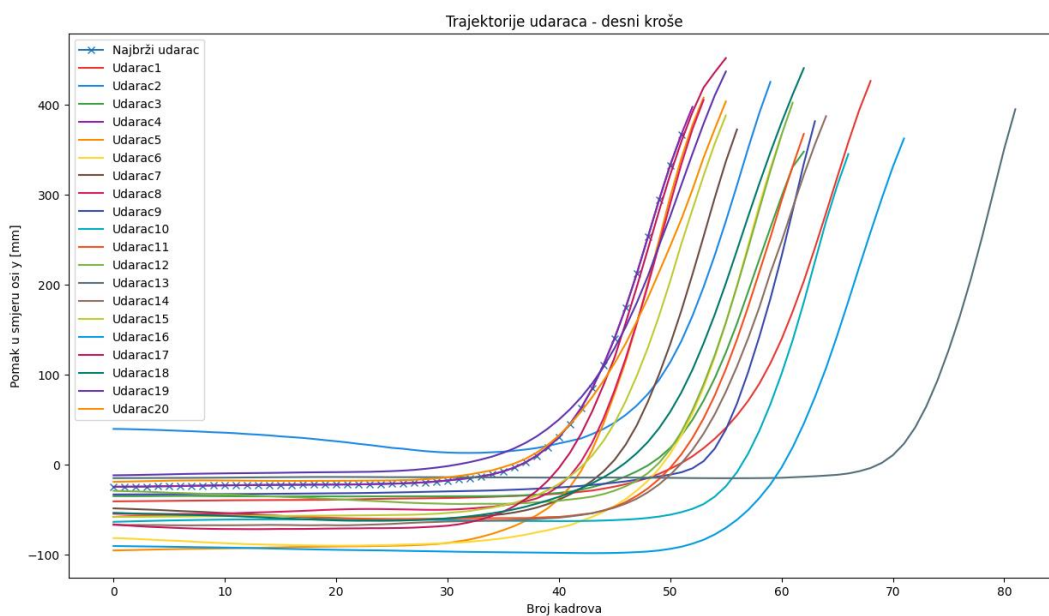
Slike Slika 32 - Slika 35 prikazuju grafove s trajektorijama promatrane šake u smjeru osi y. Na grafu je prikazano svih 20 udaraca unutar serije snimanja u usporedbi s najbržim udarcem serije.



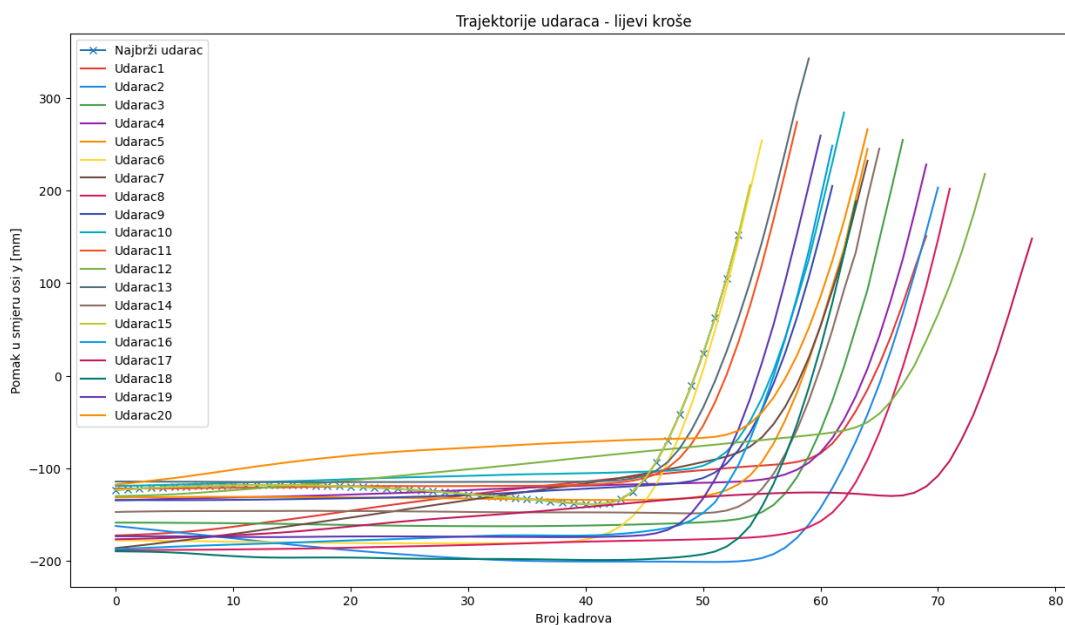
**Slika 32. Trajektorije svih udaraca – desni direkt**



**Slika 33. Trajektorije svih udaraca – lijevi direkt**



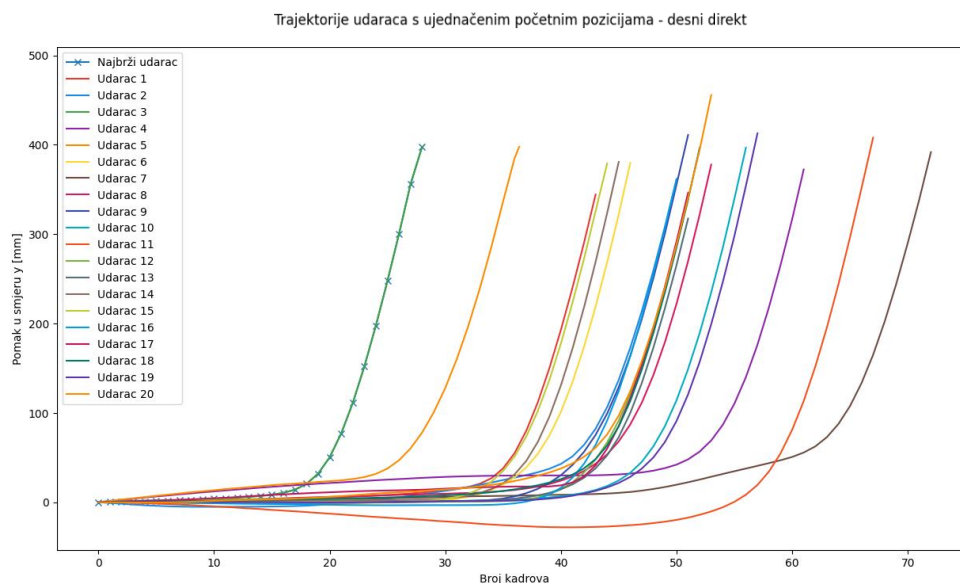
Slika 34. Trajektorije svih udaraca – desni kroše



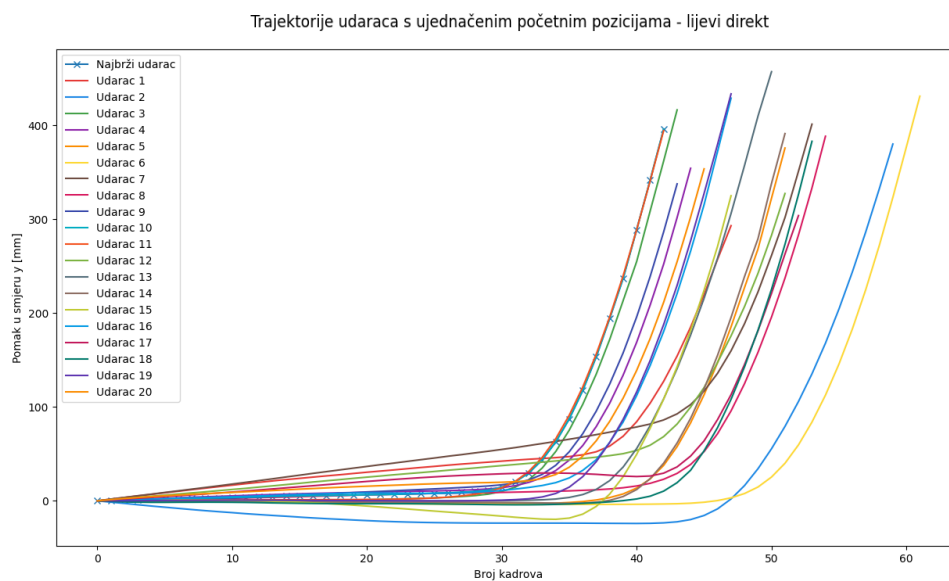
Slika 35. Trajektorije svih udaraca – lijevi kroše

Na osi  $x$  prikazan je broj kadrova snimljenih između trenutka oglašavanja zujalice i trenutka udarca u vreću za boks, a na osi  $y$  prikazan je položaj šake u odnosu na os  $y$  u milimetrima [mm]. Linija označena plavim  $x$  predstavlja trajektoriju najbržeg udarca iz serije udaraca i koristi se kao referenca za usporedbu s drugim udarcima. Ostale linije predstavljaju trajektorije ostalih udaraca izvedenih tijekom mjerenja.

Rasipanja rezultata u početnoj i završnoj poziciji uzrokovana su dinamičnom prirodom mjerenja. Pri izvođenju serije udaraca, početna pozicija ruke koja izvodi udarac isključivo varira u rasponu udaljenosti do 100 mm s obzirom na os y s iznimkom koja je uočena pri snimanju desnog krošea – odstupanje udarca 16 je veće. Radi preglednije usporedbe trajektorija bez obzira na razlike u njihovim početnim pozicijama u prostoru, na slikama Slika 36 - Slika 39 prikazane su trajektorije svakog udarca iz serije udaraca s početkom u istoj točki s obzirom na y os u prostoru.

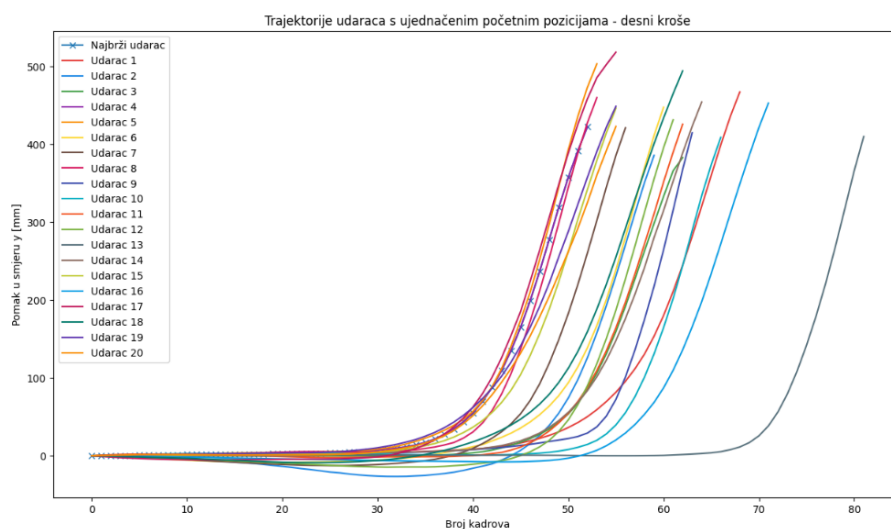


**Slika 36. Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – desni direkt**

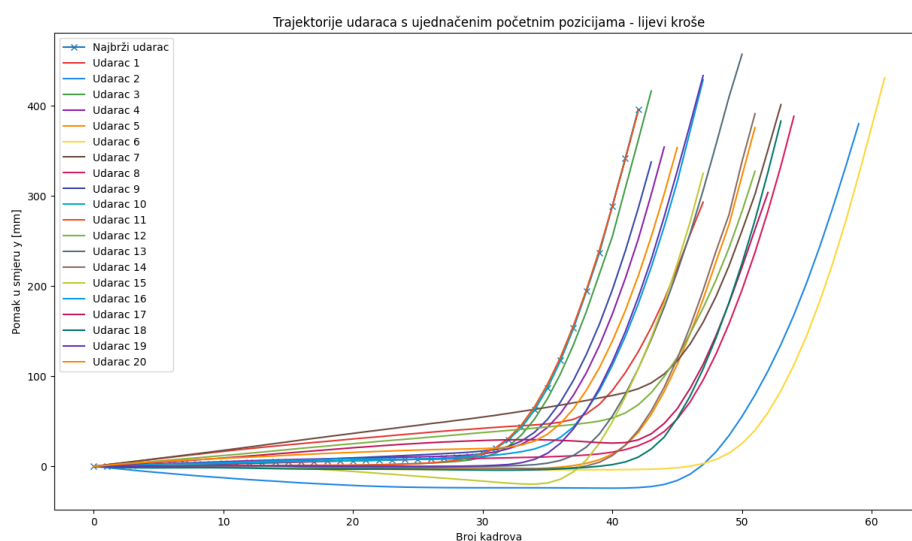


**Slika 37. Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – lijevi direkt**





**Slika 38.** Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – desni kroše

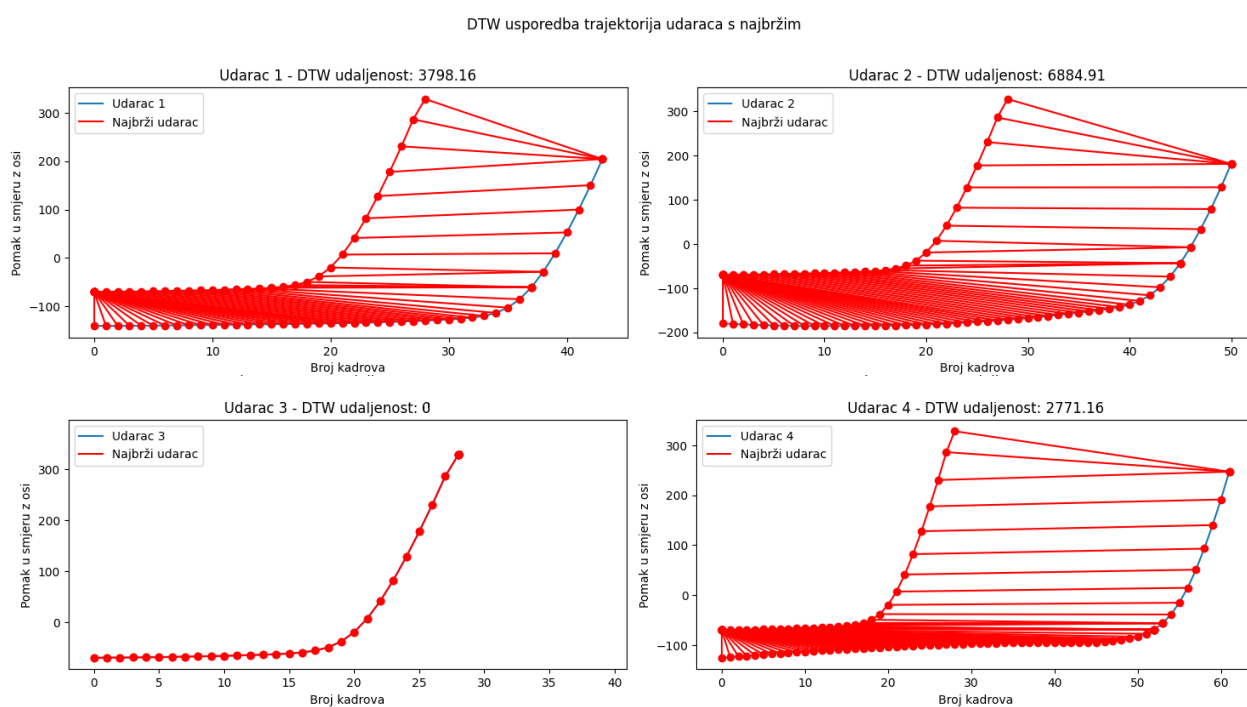


**Slika 39.** Trajektorije svih udaraca s ujednačenim početnim pozicijama – lijevi kroše

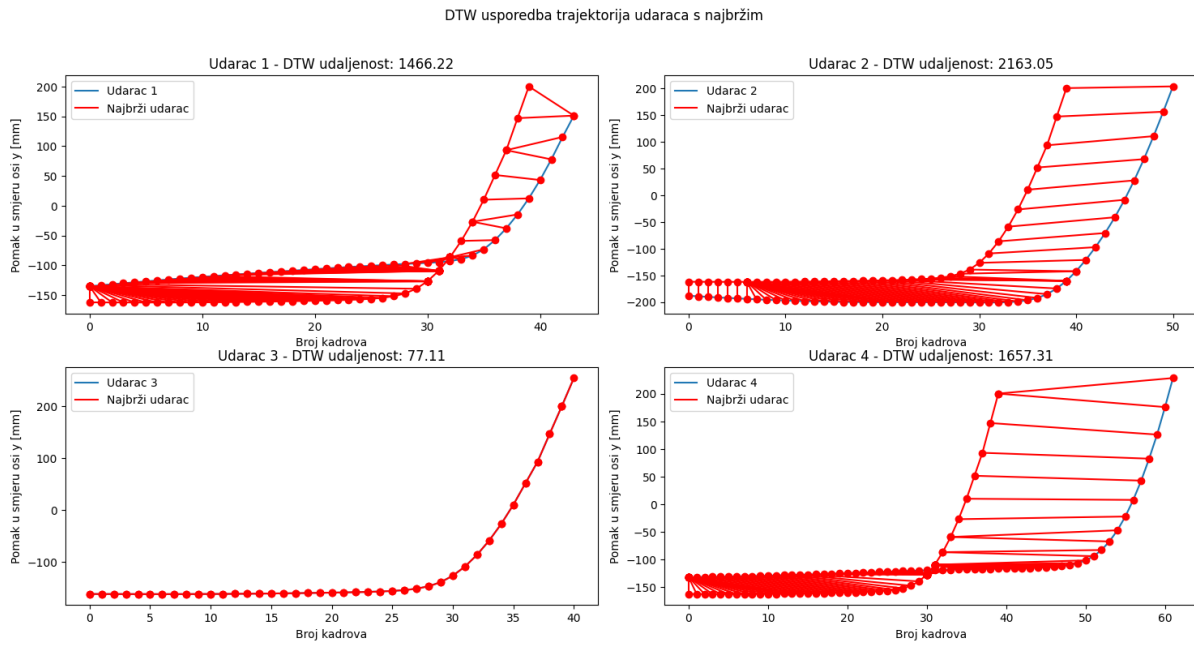
Kao i na grafovima prikazanim na slikama Slika 32 - Slika 35, na osi  $x$  prikazan je broj kadrova snimljenih između trenutka oglašavanja zujalice i trenutka udarca u vreću za boks. Na osi  $y$  prikazan je položaj šake s obzirom na smjer osi  $y$  koordinatnog sustava u prostoru u milimetrima [mm]. Početne pozicije u prostoru na ovim su grafovima svedene na zajedničku točku u 0 radi naglašavanja varijacija trajektorija šake s ciljem lakše usporedbe pojedinačnih udaraca. Linija označena plavim  $x$  ponovno predstavlja trajektoriju najbržeg udarca iz serije udaraca i koristi se kao referenca za usporedbu s drugim udarcima. Ostale linije i ovdje predstavljaju trajektorije

ostalih udaraca izvedenih tijekom mjerenja. Varijacije u završnim položajima udarca uzrokovane su kretanjem boksačke vreće uslijed udarca tijekom snimanja.

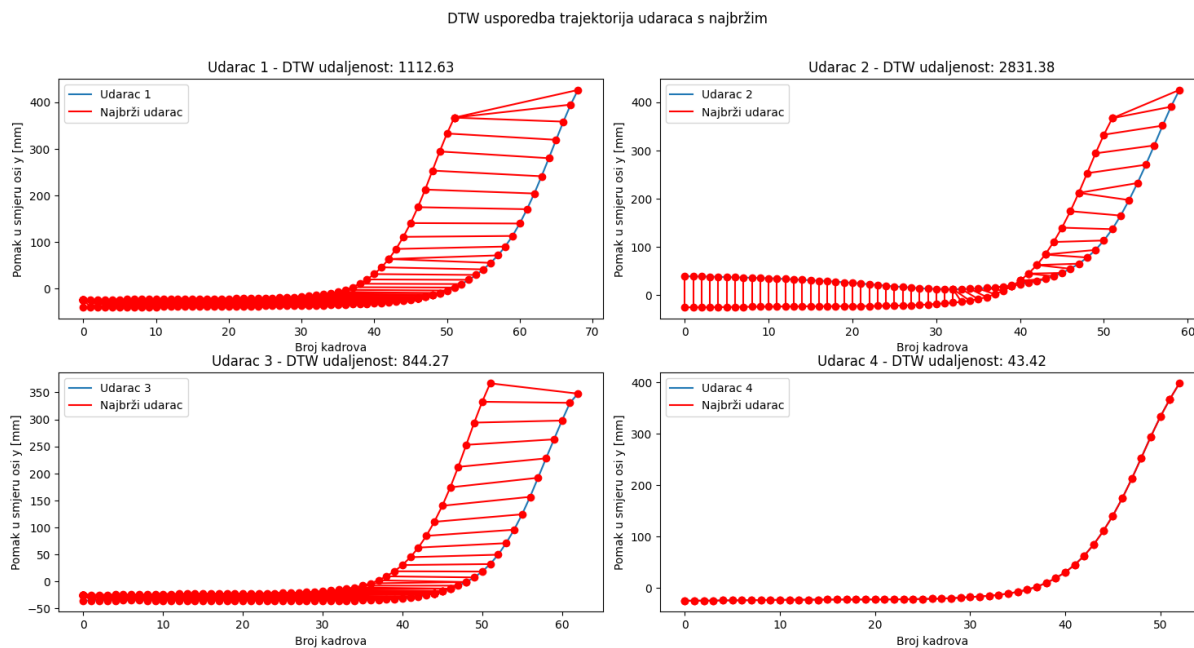
Grafovi na slikama Slika 40- Slika 43 prikazuju usporedbu trajektorija pojedinačnih udaraca s najbržim udarcem u seriji korištenjem metode dinamičkog vremenskog poravnavanja. Grafovi u nastavku prikazuju usporedbu prva 4 udarca, usporedbe ostalih udaraca nalaze se u prilogu.



**Slika 40. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 1-4**

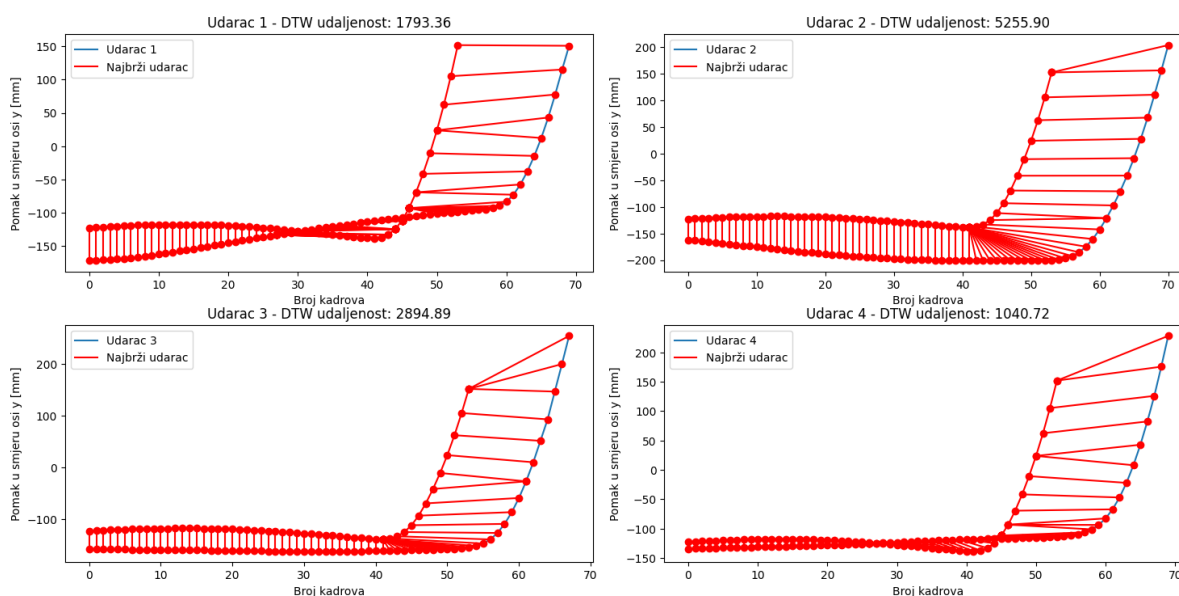


**Slika 41. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 1-4**



**Slika 42. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 1-4**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 43. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi kroše, udarci 1-4**

Kao i na prikazima Slika 32 - Slika 35, os  $x$  na ovim grafovima predstavlja broj kadrova snimljenih između trenutka oglašavanja zujalice i trenutka udarca u vreću za boks, a os  $y$  predstavlja položaj šake u smjeru osi  $y$  u prostoru u milimetrima [mm]. Trajektorije svih udaraca iz serije na ovim su grafovima prikazane zasebno u usporedbi s najbržim udarcem. Crvene točke povezanim linijama predstavljaju poravnanje između dva niza podataka. Na svakom grafu navedena je numerička vrijednost koja pokazuje ukupnu razliku između uspoređivanih trajektorija. Manja vrijednost DTW udaljenosti ukazuje na veću sličnost između uspoređenih trajektorija i obratno.

Promatranjem slika Slika 44 - Slika 63 iz priloga uočena su slijedeća zapažanja. Na slikama Slika 44 - Slika 53 koje prikazuju trajektorije desnog i lijevog direkta uočeno je značajan rasap vremenskog trajanja udarca kod desnog direkta u usporedbi s lijevim direktom. Usporedbom Slika 54 - Slika 63 koje prikazuju trajektorije desnog i lijevog direkta sa slikama Slika 44 - Slika 53 koje prikazuju trajektorije desnog i lijevog krošea uočeno je da je rasap u vremenima trajanja udaraca manji pri izvedbi udaraca lijevom rukom u odnosu na desnu. Manji rasap također je uočeno pri izvedbi krošea u usporedbi izvedbe krošea s izvedbom direkta. Vremena reakcije i trajanje samog udaraca bili kraći pri izvođenju direkta, a ponovljivost udaraca veća pri izvođenju krošea.

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je provesti temeljitu analizu elementarnih pokreta karakterističnih udaračkim borilačkim sportovima kako bi se steklo bolje razumijevanje kinematike izoliranih udaraca u ovisnosti o vremenu reakcije na zvučne podražaje. Analizirani podaci izmjereni su korištenjem uređaja za mjerenje brzine reakcije temeljenog na IMU tehnologiji i visoko preciznog optičkog sustava za praćenje pokreta (OptiTrack). IMU uređaj mjeri vrijeme reakcije na zvučne podražaje, dok OptiTrack sustav snima 3D koordinate kretanja ruke sportaša tijekom izvođenja udaraca, što omogućuje detaljnu analizu kinematike udaraca. Kako bi se osiguralo točno vremensko usklađivanje dobivenih signala, podaci su sinkronizirani prepoznavanjem trenutka udarca u vreću popraćenog maksimalnom deceleracijom šake ispitanika. Dinamičko vremensko poravnanje (DTW) primijenjeno je za usporedbu različitih udaraca.

Rezultati analize prikazani su kroz niz grafova koji ilustriraju kretanje ruke tijekom izvođenja udaraca, uključujući trajektorije, brzine i ubrzanja ruke. Promatrani udarci su lijevi direkt, desni direkt, lijevi kroše i desni kroše.

Pri izvođenju desnog i lijevog direkta, uočen je relevantan pomak samo u jednoj koordinatnoj osi, što se u potpunosti poklapa s očekivanjima s obzirom na tehniku izvođenja udarca. Pri izvođenju desnog i lijevog krošea očekivan je uočljiv pomak u dvije koordinatne osi, a detektiran je u sve tri. Udarac bi bio tehnički ispravniji da je pomak u smjeru osi z slabije izražen. Također je uočeno da su vrijeme reakcije i trajanje udaraca bili kraći pri izvođenju direkta, a ponovljivost udaraca veća pri izvođenju krošea. Na temelju dobivenih rezultata, preporuča se treniranje tehnike izvođenja krošea usmjereno na smanjenje suvišnih pokreta u smjeru osi z te treniranje ponovljivosti izvedbe udarca kod izvođenja direkta zadavanjem fiksne mete pri udaranju. Manji rasap u vremenima trajanja udaraca pri izvedbi oba udarca lijevom rukom sugerira potrebu za pojačanim treningom desne ruke ako je ispitaniku cilj ujednačavanje obje strane u smislu brzine i impulsa sile.

Daljnja istraživanja mogla bi se proširiti na analizu utjecaja različitih vrsta treninga na kinematiku udaraca. To bi moglo uključivati promatranje kako specifični treninzi usmjereni na poboljšanje brzine, snage ili koordinacije utječu na izvedbu udaraca. Takva istraživanja pružaju vrijedne uvide u učinkovitost treninga za optimizaciju izvedbe sportaša.

**LITERATURA**

- [1] Fuller, J. R.: Martial arts and psychological health. *British Journal of Medical Psychology*, 1988.
- [2] Fernandes, J. R., de Brito, M. A., Brito, C. J., Aedo-Munoz, E., Miarka, B.: Technical-tactical actions of fighters specialized in striking, grappling, and mixed combat in the Ultimate Fighting Championship, *IDO MOVEMENT FOR CULTURE. Journal of Martial Arts Anthropology*, 2022.
- [3] <https://pixers.ca/wall-murals/two-men-exercising-thai-boxing-silhouette-53203002>, pristupljeno 20. lipnja 2024.
- [4] Mali, N. P.: Modern technology and sports performance: An overview, *International Journal of Physiology, Nutrition and Physical Education*, 5(1): 212-216, 2020.
- [5] Haratian, R.: Motion capture sensing technologies and techniques: A sensor agnostic approach to address wearability challenges. *Sensing and Imaging*, 23(1), 2022.
- [6] <https://pairroxz.com/blog/wearable-technology>, pristupljeno 20. lipnja 2024.
- [7] Hrgetic M.: „Inercijske mjerne jedinice“, predavanje iz kolegija Senzori, 2021.
- [8] Ferguson J.: „Calibration of Deterministic IMU Errors“, *Embry-Riddle Aeronautical University Scholarly Commons*, 2015.
- [9] Chu, Y., Cetin, K.: Sensing systems for smart building occupant-centric operation, *The*
- [10] Mendes Jr., J. J. A., Vieira, M. E. M., Pires, M. B., Stevan Jr. S. L.: *Sensor Fusion and Smart Sensor in Sports and Biomedical Applications*, Sensors, 2016.
- [11] <https://www.sensortips.com/featured/sensor-fusion-levels-and-architectures-faq/>, pristupljeno 20. lipnja 2024.
- [12] Müller, M.: Dynamic Time Warping. In: *Information Retrieval for Music and Motion*. Springer, Berlin, Heidelberg., 2007.
- [13] Ratković, M., Marijan, M., Miljković, T., Bjelić M.: Metoda za segmentaciju muzičkog signala na osnovu matrice samosličnosti, *Zbornik Radova*, Istočno Sarajevo, 2023.
- [14] Haček, K. (2022). Prototip uređaja za mjerenje vremena reakcije na zvučne podražaje (Završni rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [15] <https://optitrack.com/>, pristupljeno 23. lipnja 2024.
- [16] <https://optitrack.com/accessories/>, pristupljeno 23. lipnja 2024.
- [17] <https://optitrack.com/software/motive/>, pristupljeno 23. lipnja 2024.
- [18] <https://cрта-robotics.com/>, pristupljeno 03. srpnja 2024.
- [19] <https://www.legendsboxing.com/post/boxing-moves>, pristupljeno 25. lipnja 2024.

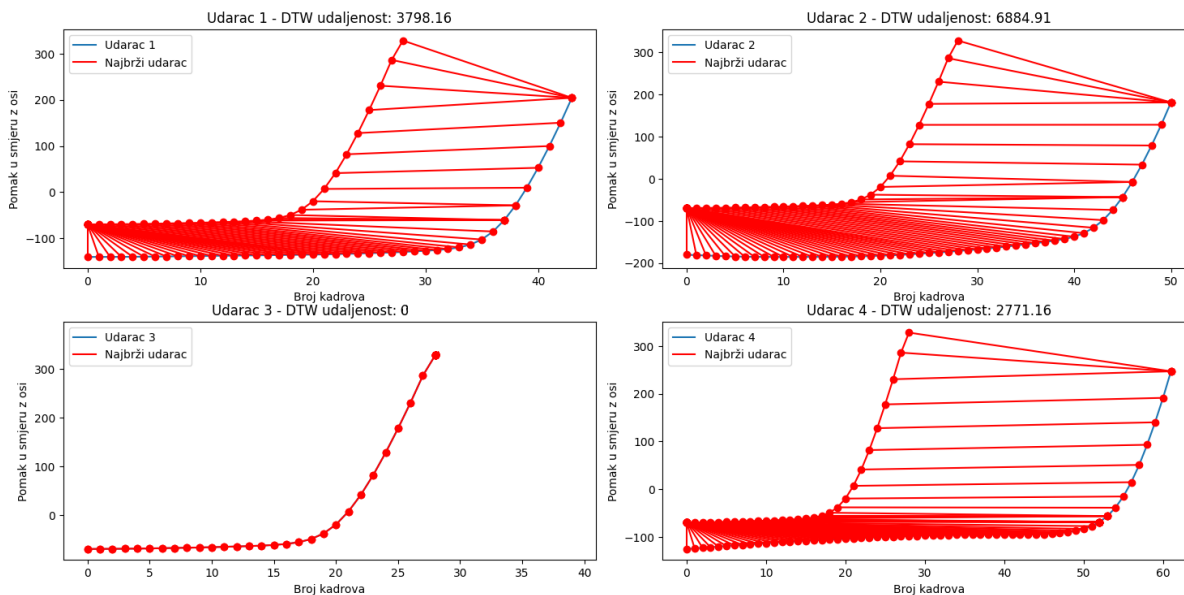
---

[20] <https://docs.optitrack.com/motive/data-editing>, pristupljeno 29. lipnja .2024.

**PRILOZI**

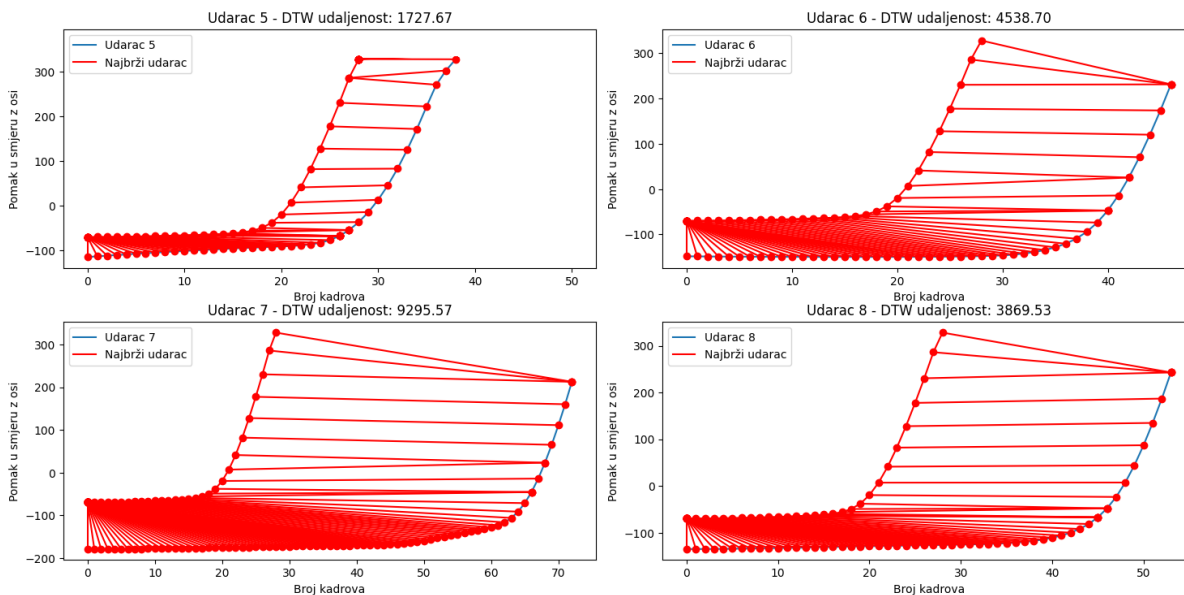
**1. Desni direkt**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 44. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 1-4**

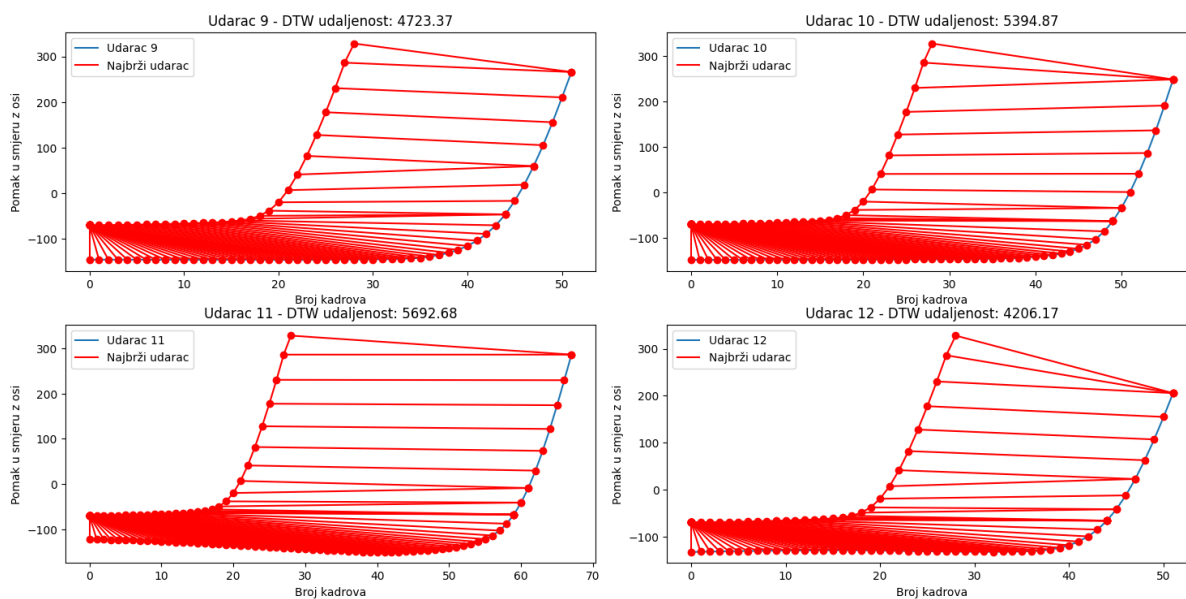
DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 45. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 5-8**

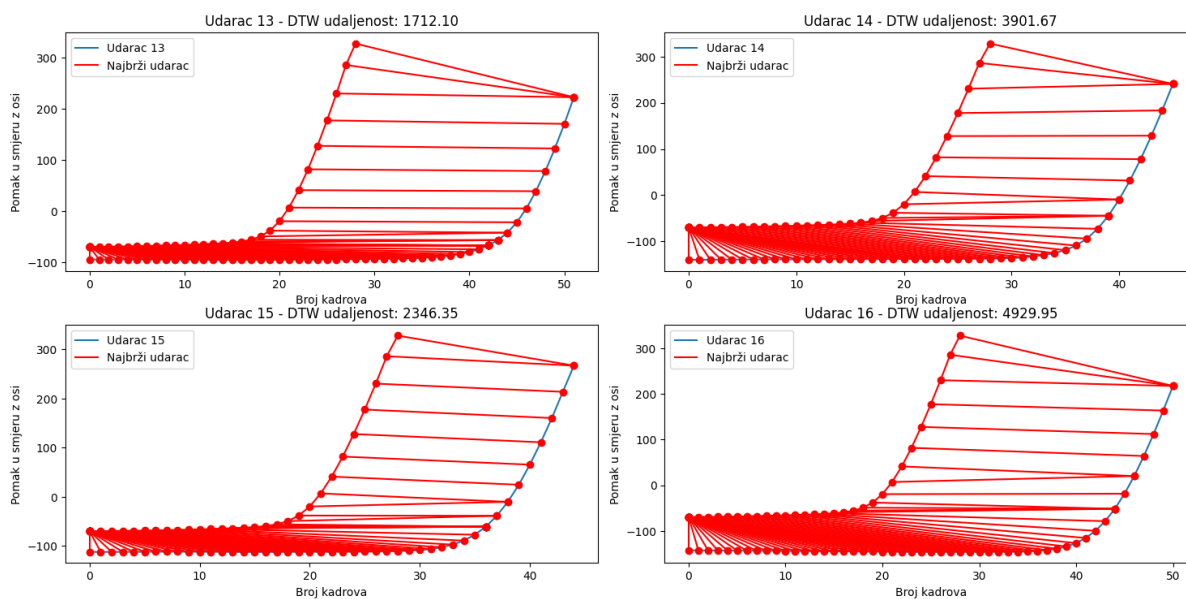


DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



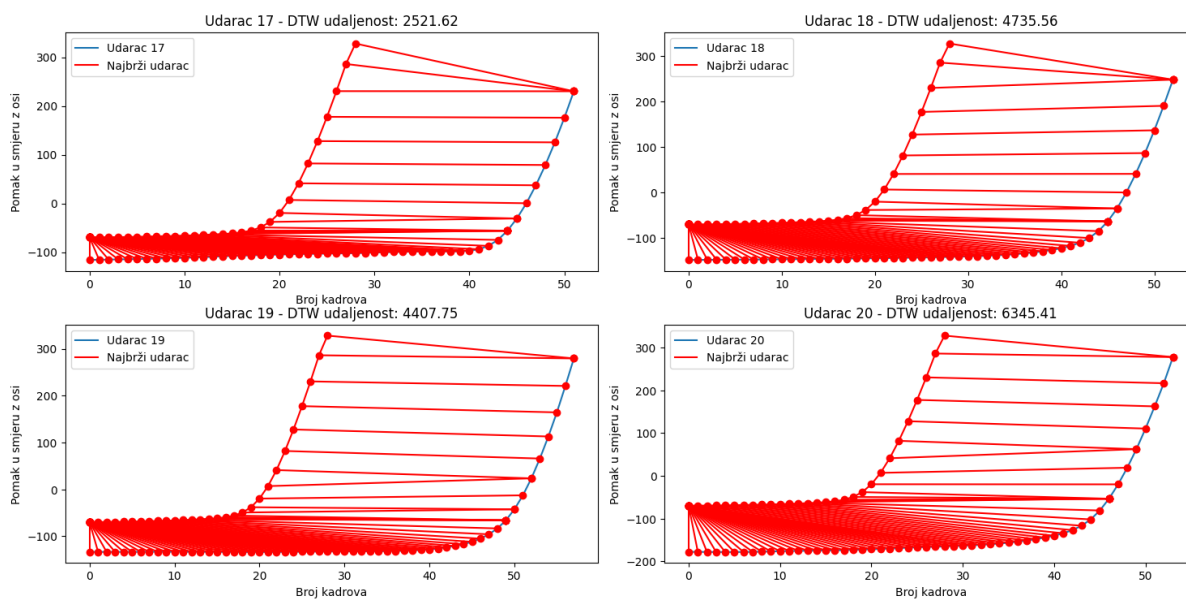
**Slika 46. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 9-12**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 47. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 13-16**

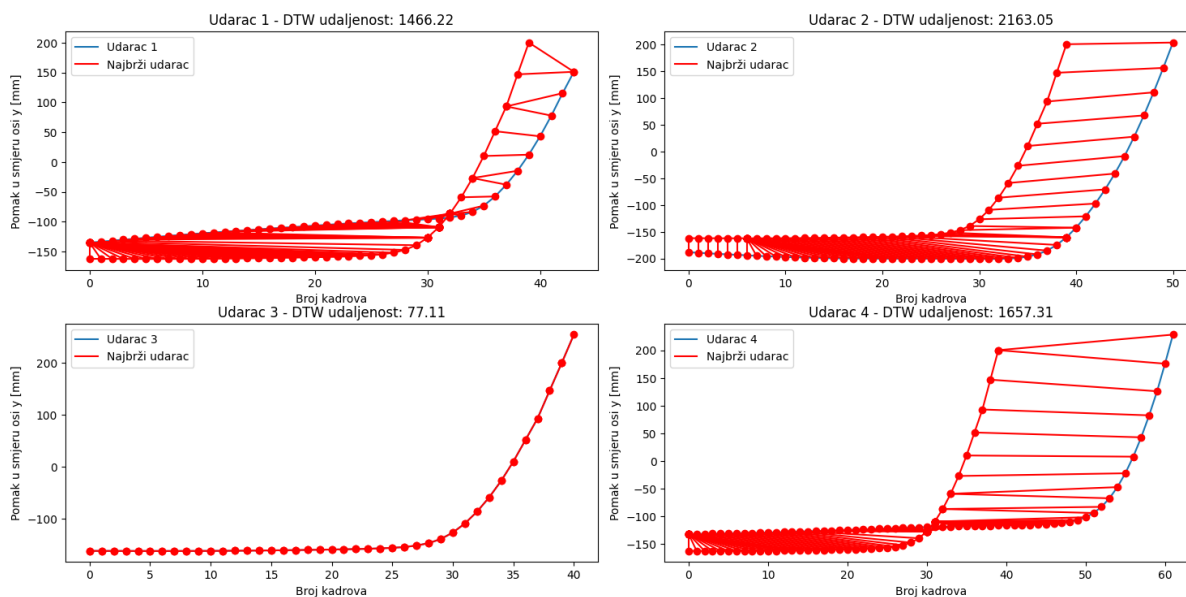
DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



Slika 48. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni direkt, udarci 17-20

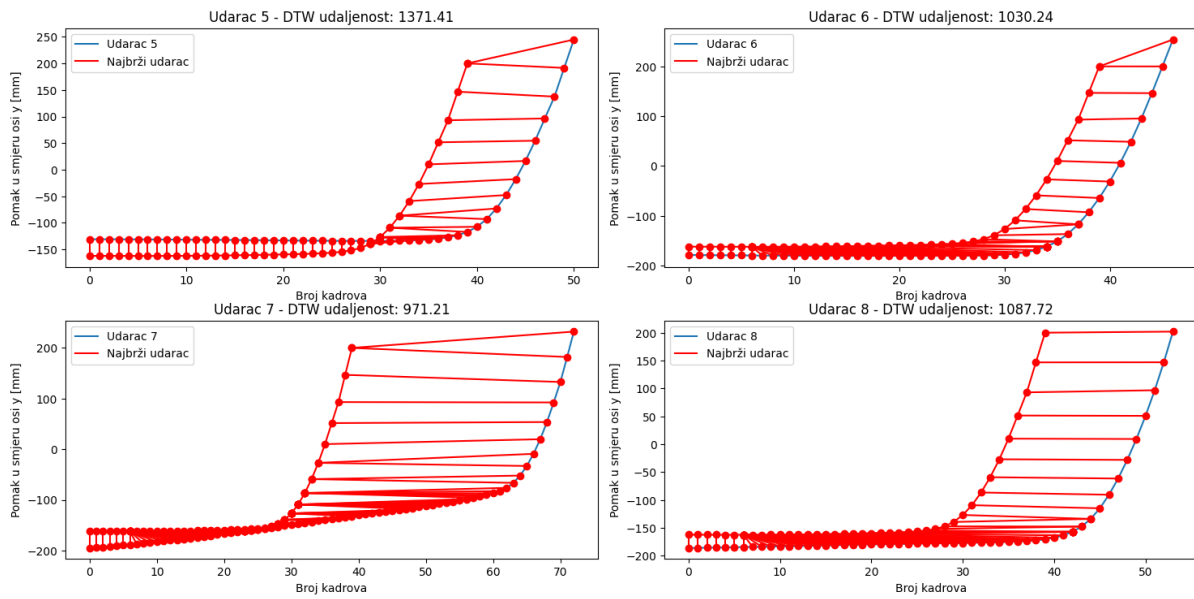
## 2. Lijevi direkt

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



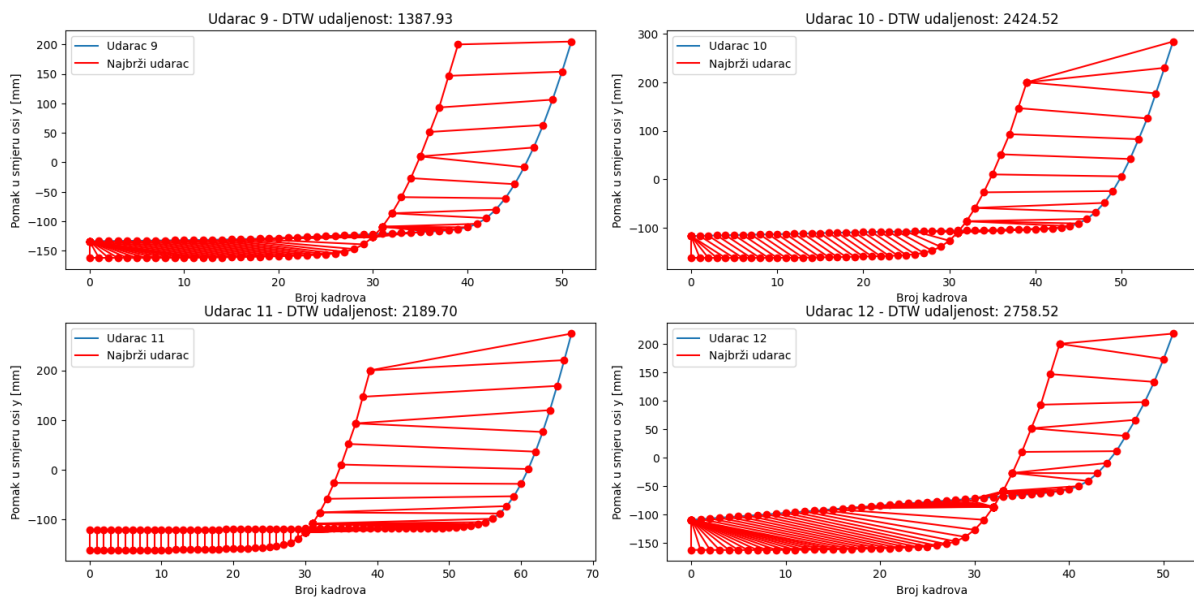
Slika 49. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 1-4

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



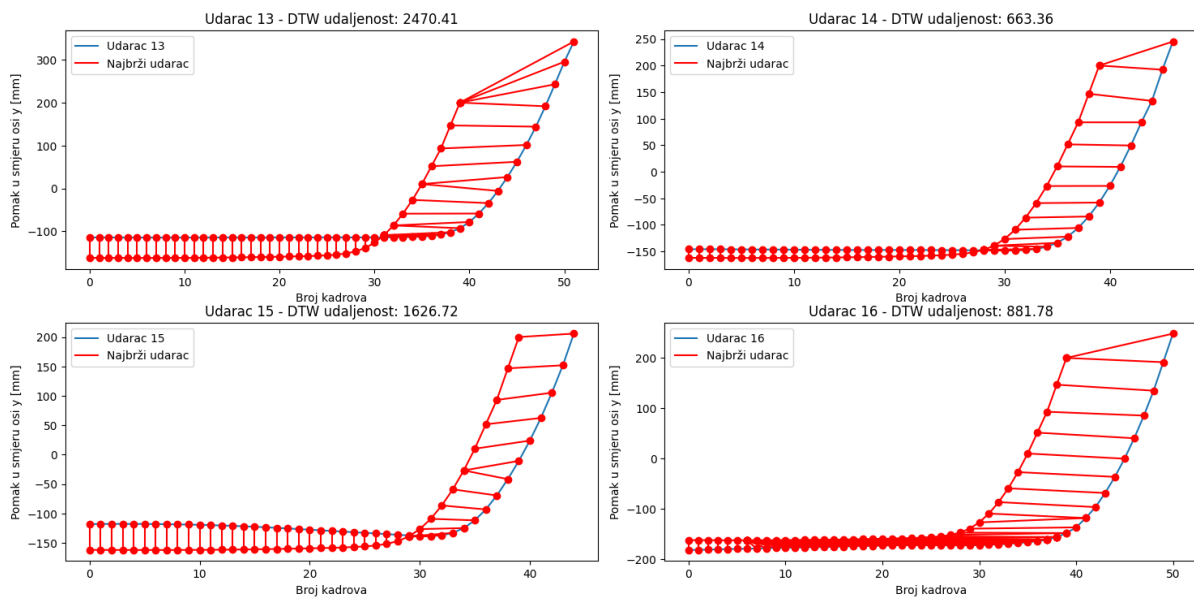
**Slika 50. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 5-8**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



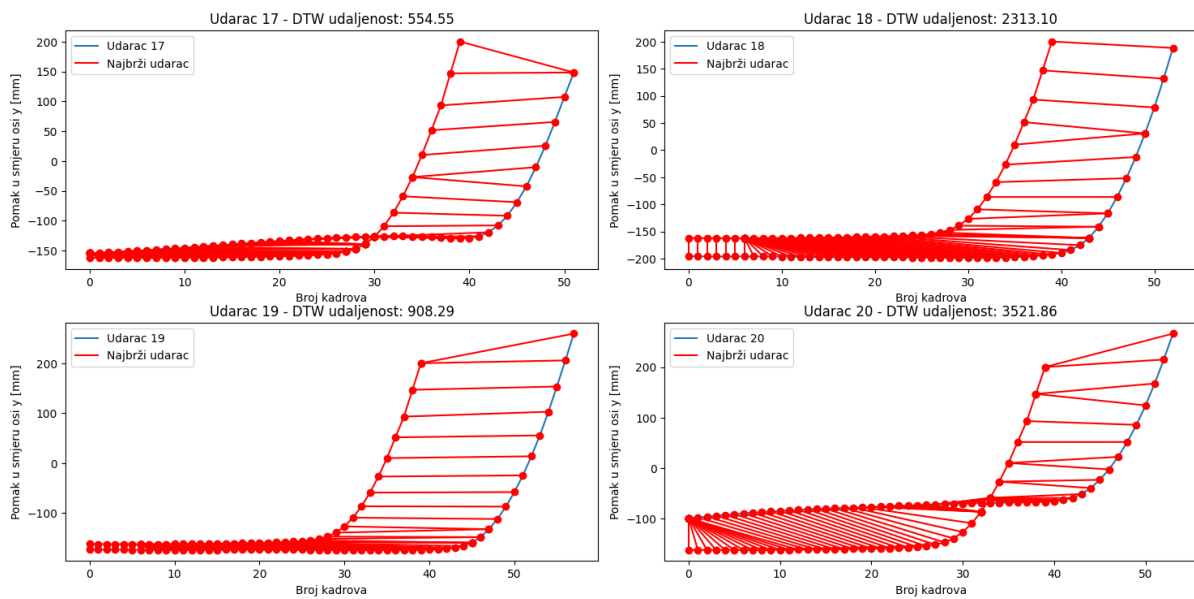
**Slika 51. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 9-12**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



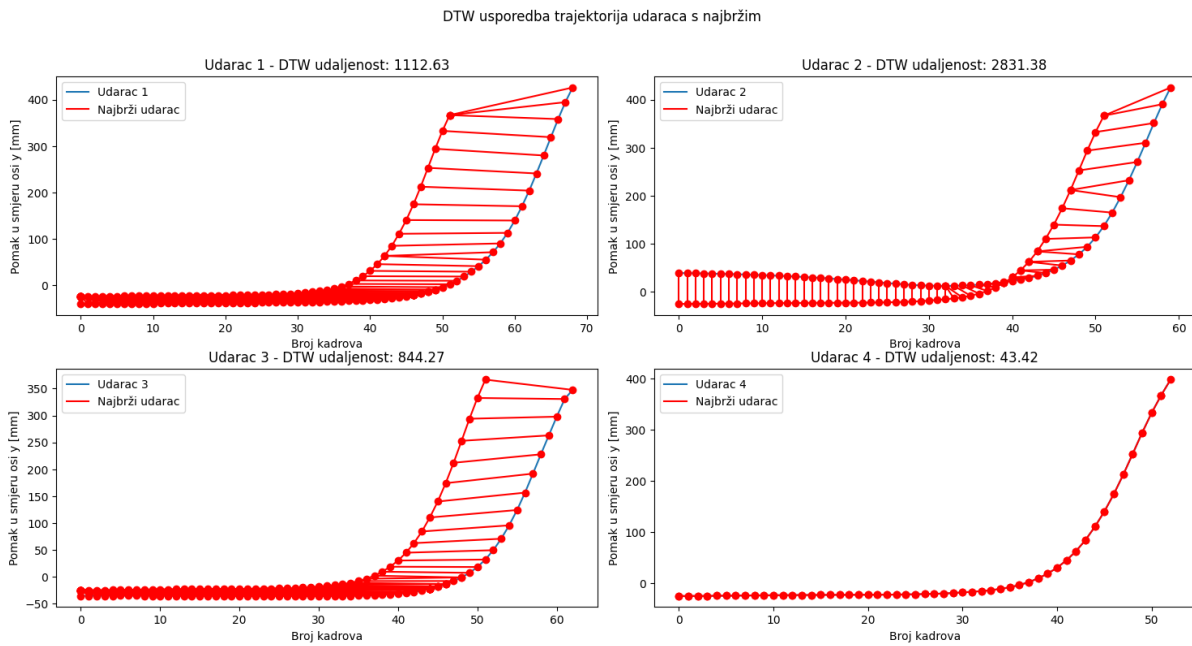
Slika 52. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 13-16

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim

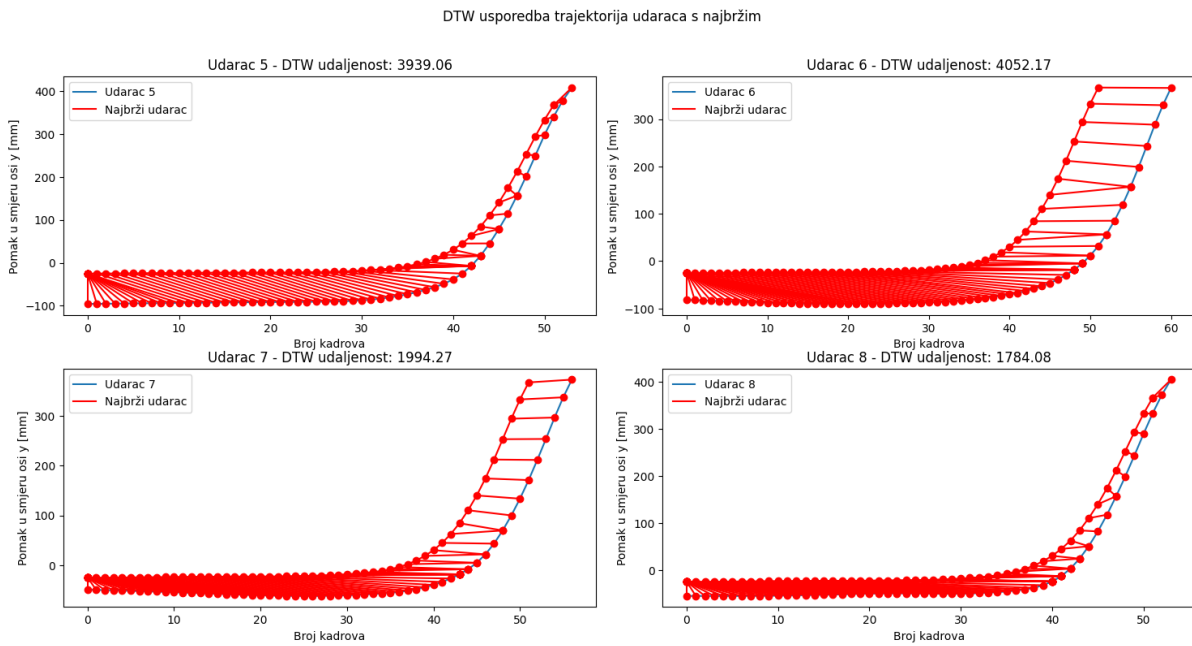


Slika 53. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi direkt, udarci 17-20

### 3. Desni kroše

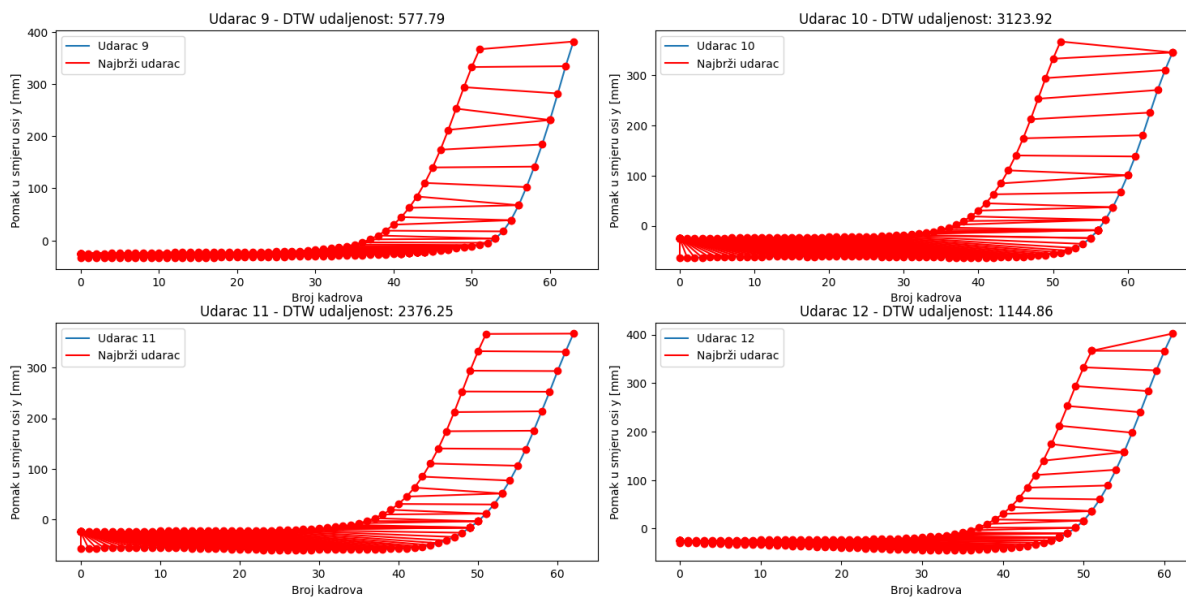


**Slika 54. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 1-4**



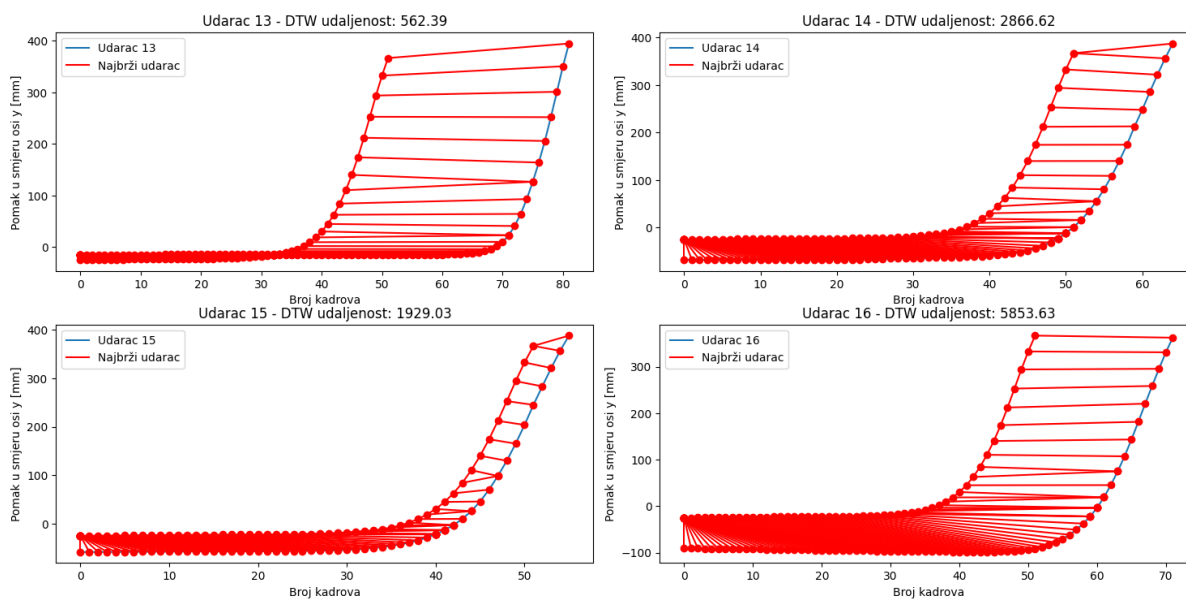
**Slika 55. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 9-12**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



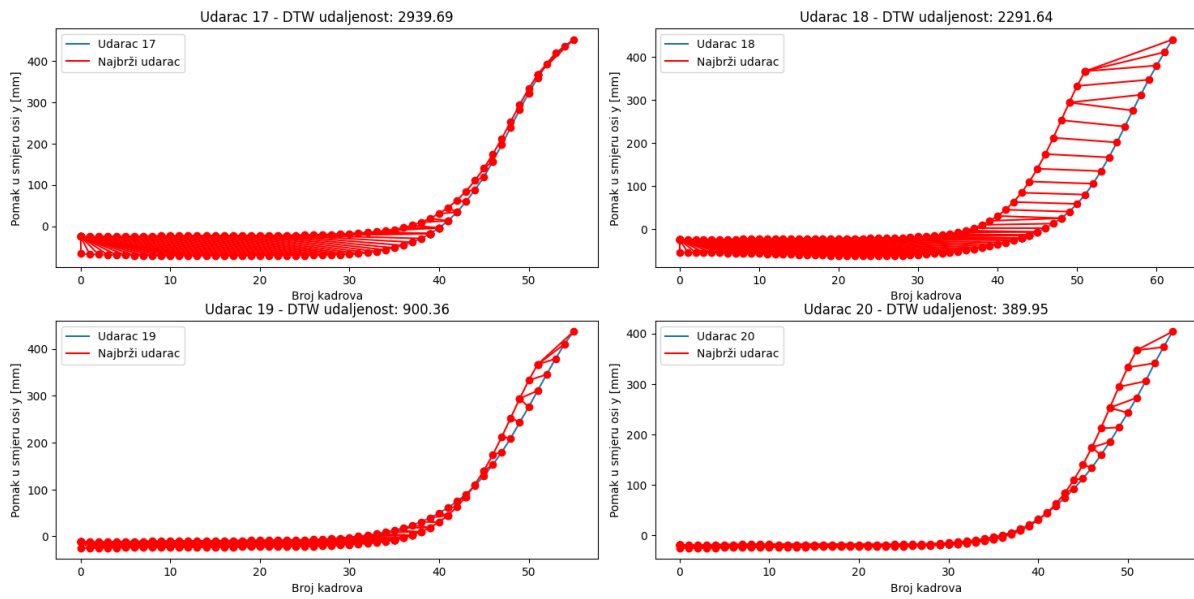
**Slika 56. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 5-8**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 57. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 13-16**

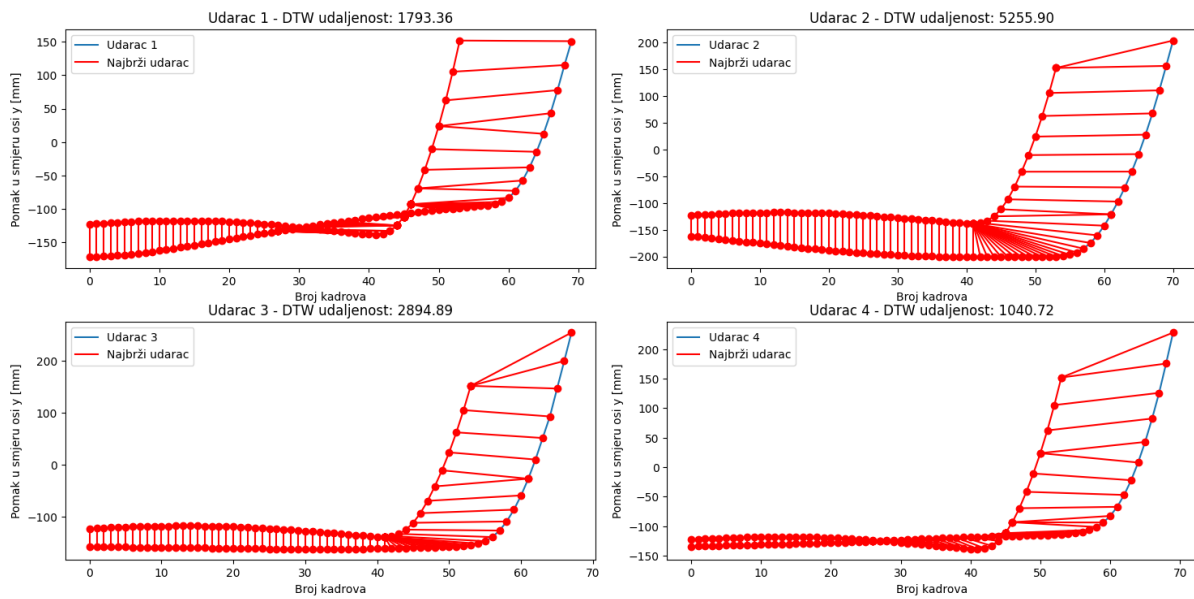
DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



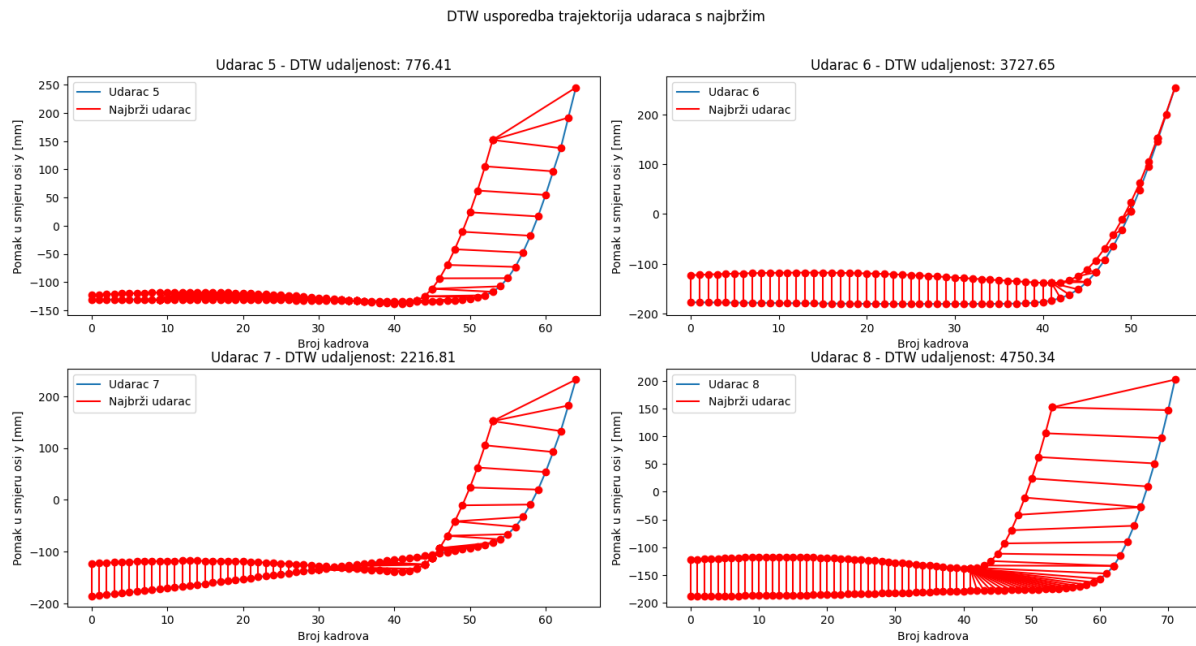
Slika 58. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – desni kroše, udarci 17-20

#### 4. Lijevi kroše

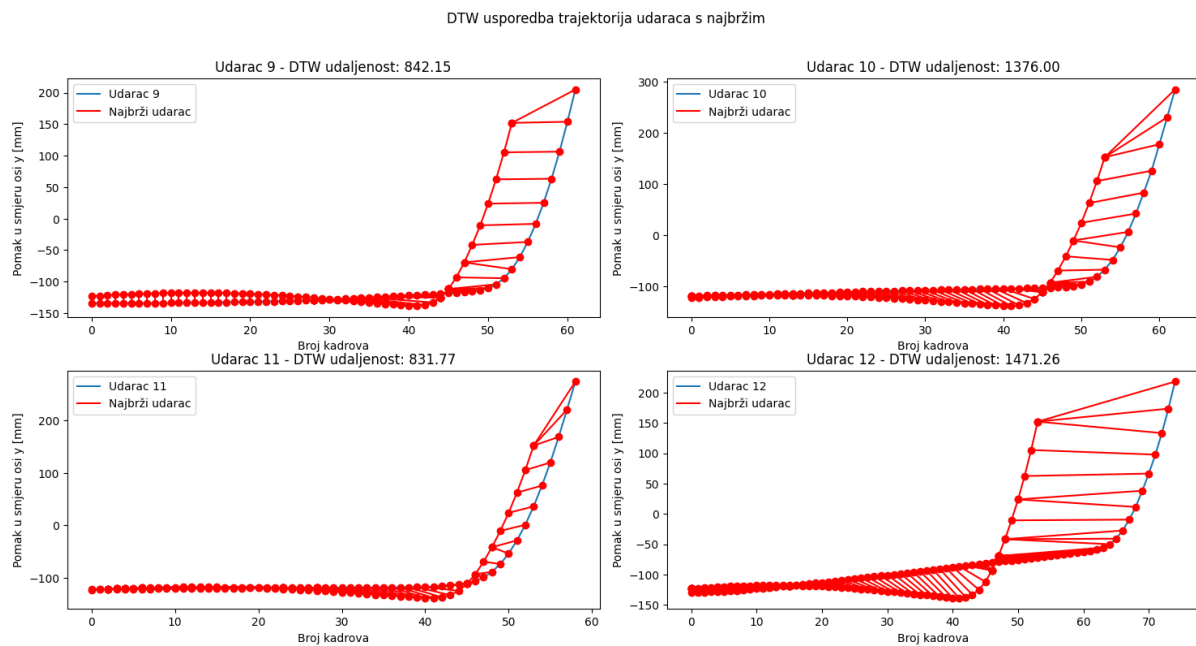
DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



Slika 59. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti – lijevi kroše, udarci 5-8



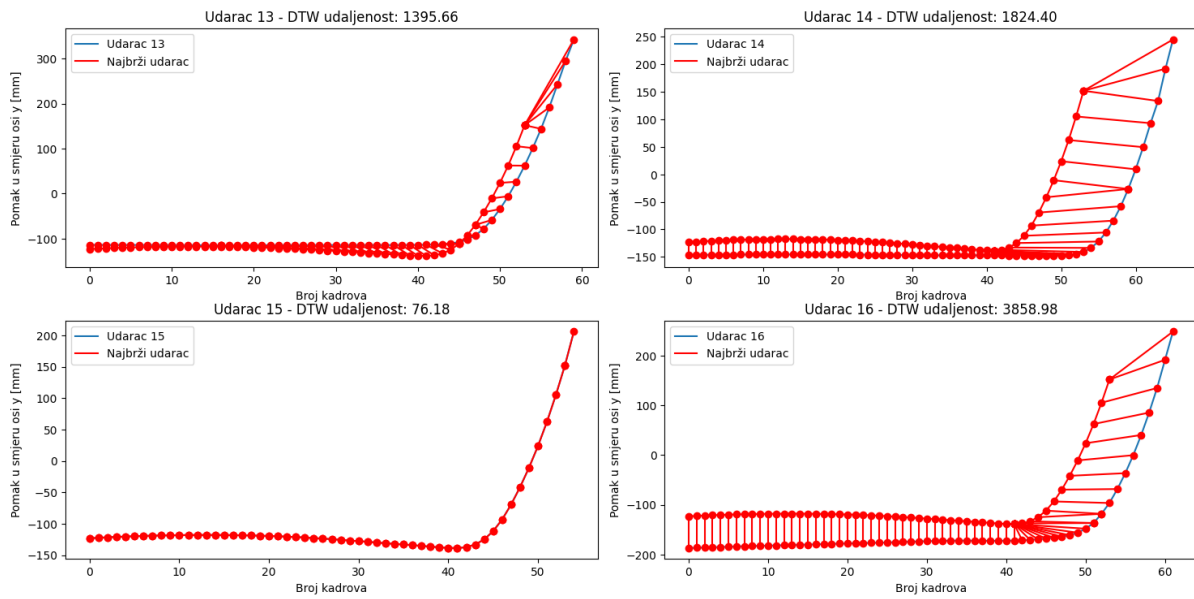
**Slika 60. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 1-4**



**Slika 61. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 9-12**

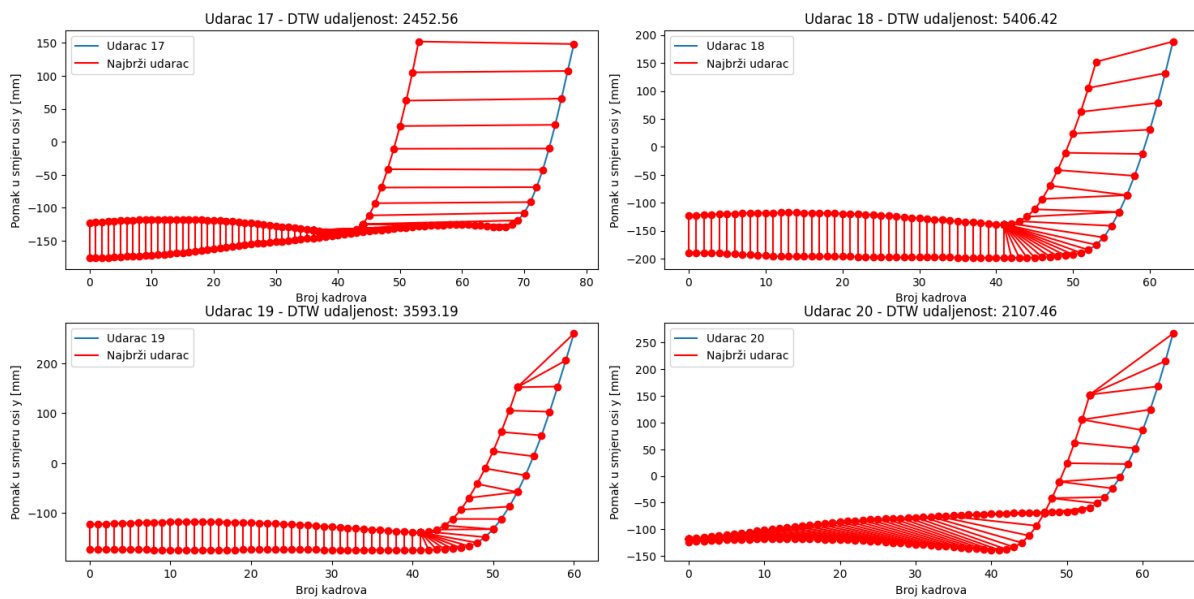


DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 62. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 13-16**

DTW usporedba trajektorija udaraca s najbržim



**Slika 63. DTW usporedba trajektorija s numeričkim vrijednostima udaljenosti - lijevi kroše, udarci 17-20**