

Inercijalni senzori za primjenu u rehabilitacijskoj robotici

Mlinarić, Tina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:887992>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

INERCIJALNI SENZORI ZA PRIMJENU U
REHABILITACIJSKOJ ROBOTICI

Rijeka, rujan 2022.

Tina Mlinarić

0069081705

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

INERCIJALNI SENZORI ZA PRIMJENU U
REHABILITACIJSKOJ ROBOTICI

Mentor: Doc. dr. sc. Kristina Marković

Komentor: Doc. dr. sc. Ervin Kamenar

Rijeka, rujan 2022.

Tina Mlinarić

0069081705

IZJAVA

kojom ja, Tina Mlinarić, JMBAG: 0069081705, studentica Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, kao autor završnog rada s naslovom: Inercijalni senzori za primjenu u rehabilitacijskoj robotici:

1. Izjavljujem da sam završni rad izradila samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Kristine Marković i doc. dr. sc. Ervina Kamenara. U radu sam primijenila metodologiju znanstveno-istraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u radu citirala sam i povezala s korištenim bibliografskim jedinicama sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

2. Dajem odobrenje da se, bez naknade, trajno pohrani moj rad u javno dostupnom digitalnom repozitoriju ustanove i Sveučilišta te u javnoj internetskoj bazi radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu, sukladno obvezi iz odredbe članka 83. stavka 11. Zakona o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju (NN 123/03, 198/03, 105/04, 174/04, 02/07, 46/07, 45/09, 63/11, 94/13, 139/13, 101/14, 60/15).

Potvrđujem da je za pohranu dostavljena završna verzija obranjenog i dovršenog završnog rada. Ovom izjavom, kao autor dajem odobrenje i da se moj rad, bez naknade, trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim studentima i djelatnicima ustanove.

Studentica

Tina Mlinarić

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. TEORIJSKI DIO RADA	4
2.1. Princip rada IMU senzora	4
2.1.1. Akcelerometar	5
2.1.2. Žiroskop	8
2.1.3. Magnetometar	9
2.2. Primjena IMU-a u rehabilitacijskog robotici	10
3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	12
3.1. Pregled stanja tehnike korištenog sustava.....	12
3.2. Dobiveni oblik podataka	16
3.2.1. Troosni akcelerometar	16
3.2.2. Troosni žiroskop	17
3.2.3. Troosni magnetometar	17
3.3. Kinematski parametri.....	17
3.4. Kalibracijski proces sa softverom Shimmer 9DOF	18
3.4.1. Kalibracija akcelerometra	20
3.4.2. Kalibracija žiroskopa	21
3.4.3. Kalibracija magnetometra.....	23
3.5. Provjera kalibracijskih parametara pomoću softvera Shimmer 9DOF	26
3.5.1. Provjera kalibracijskih podataka za akcelerometar.....	26
3.5.2. Provjera kalibracijskih podataka za žiroskop	28
3.5.3. Provjera kalibracijskih podataka za magnetometar	29
4. ZAKLJUČAK.....	30
5. LITERATURA.....	32
ZAHVALE.....	34
SAŽETAK	35
SUMMARY	36

1. UVOD

Terapeutski i pomoćni roboti sve češće su sredstvo za korištenje u rehabilitaciji pacijenata s trajnim posljedicama moždanog udara. Moždani udar je stanje u kojem je poremećen dotok krvi u mozak, što rezultira nedostatkom kisika, oštećenjem mozga, a time i gubitkom funkcije. Zbog same neuroplastičnosti mozga, mozak ne može povratno dobiti određenu funkciju već je treba ponovo pridobiti kroz vježbu. Prema bazi podataka Svjetske zdravstvene organizacije (SZO, engl. *World Health Organization (WHO)*), svake godine 15 milijuna osoba doživi moždani udar, a trećina od njih ostane trajno hendikepirana [1]. Navedena problematika zahtjeva tehnologiju koja djeluje na neurološka i ortopedska oštećenja, te oslabljenu motoriku, a za nju se zajednički koristi naziv rehabilitacijska robotika. Upravo se u nazivu prepoznaje sama svrha ove grane robotike, a to je oporavak pacijenta u postizanju određenih pokreta tijela, najčešće udova, u kombinaciji s tradicionalnom fizioterapijom.

Rehabilitacijska robotika predstavlja područje robotike u kojem je posebno zanimljivo korištenje prednosti inercijskih senzora (engl. *Inertial Measurement Unit – IMU*, tj. inercijska mjerna jedinica). Glavna zadaća IMU senzora u sustavu robota je stvaranje sustava za mjerenje kretanja tj. dobivanjem 3D položaja/orijentacije objekta prikupljanjem mjernih jedinica na senzoru, npr. linearno ubrzanje i brzina rotacije objekta. Kombiniranjem svih dobivenih podataka iz određenog pokreta, može se stvoriti automatizirana kretanja na samom robotu prilagođena za pacijenata i kretanje za koje su zakinuti.

Rad se sastoji od dva glavna dijela: teorijski i eksperimentalni. U teorijskom dijelu pojasniti će se sam rad IMU senzora te kako se njegov rad primjenjuje u radu rehabilitacijskog robota na primjerima. U eksperimentalnom dijelu će se testirati rad inercijalnih senzora marke Shimmer3, te će biti provedena kalibracija dobivenih podataka i provjera istih u dostupnom programskom rješenju. Svrha eksperimentalnog dijela rada je sami uvid u rad IMU senzora koji se koriste u rehabilitacijskog robotici u smislu prikupljanja podataka linearnog ubrzanja (koristeći akcelerometar), kutne brzine (koristeći žiroskop) i jakosti magnetskog polja (koristeći magnetometar).

2. TEORIJSKI DIO RADA

Kako bi se razumjela tema, potrebno je prvotno opisati princip rada IMU senzora po komponentama i time njihov rad u sustavu s ostalim komponentama rehabilitacijskog robota.

2.1. Princip rada IMU senzora

IMU posebna je vrsta senzora sa zadatkom mjerenja linearnog ubrzanja, rotacijske brzine i jakosti magnetskog polja. 6-osni IMU se sastoji od troosnog akcelerometra i troosnog žiroskopa, dok 9-osni IMU još uključuje i troosni magnetometar. Navedena tri pojedinačna inercijska senzora moraju biti zajedno montirana u ortogonalnu skupinu poznatu kao trijada. Ovaj skup inercijskih senzora postavljenih u trijadu obično se naziva troosni inercijski senzor, jer senzor može pružiti jedno mjerenje duž svake od tri osi [2]. U nastavku se navode principi rada svake komponente sustava inercijalnih senzora, način obrade podataka dostupnim programskim rješenjima i njihova primjena u rehabilitacijskoj robotici.

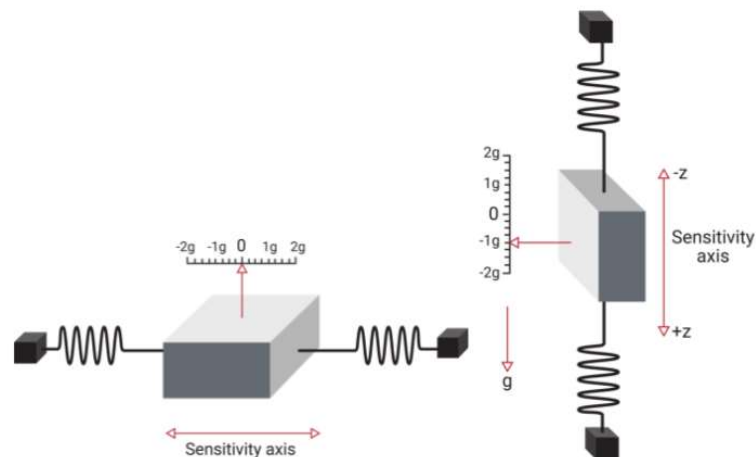
Inercija je sklonost tijela da se odupre promjeni kretanja. Izravno je proporcionalan masi objekta, pa što je tijelo teže, to više inercije ima, i ostao bi u pokretu zauvijek ako je u okruženju bez trenja (Prvi Newtonov zakon). Koristeći to razumijevanje, sada se može odrediti koncept referentnog okvira ili inercijskog okvira. Newton je zaključio da je za zakone kretanja da bi imali značenje, kretanje tijela mora biti mjereno u odnosu na neki referentni okvir. Ako Newtonovi zakoni vrijede u ovom okviru, naziva se inercijski okvir. Stoga, ako Newtonovi zakoni vrijede u jednom referentnom okviru, tada vrijede u bilo kojem drugom okviru pri jednolikom gibanju [2]. Koristeći znanje o inerciji, može se objasniti rad komponenata inercijske mjerne jedinice.

Princip rada komponenata biti će analiziran prema MEMS¹ proizvedenim jedinicama, jer se najčešće koriste u današnjim IMU-ovima.

¹ MEMS (eng. *Micro-electromechanical systems*) - procesna tehnologija koja se koristi za stvaranje sitnih integriranih uređaja ili sustava koji kombiniraju mehaničke i električne komponente.

2.1.1. Akcelerometar

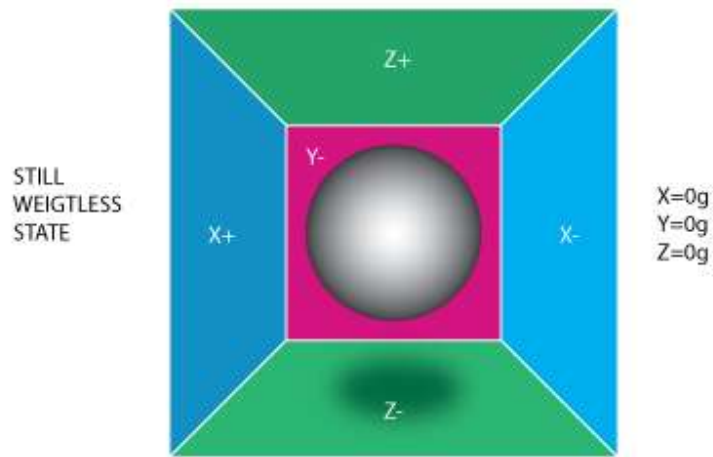
Akcelerometar je primarni senzor odgovoran za mjerenje inercijalnog ubrzanja ili promjene brzine tijekom vremena, a može se naći u različitim tipovima, uključujući mehaničke akcelerometre, kvarcne akcelerometre i MEMS akcelerometre. MEMS akcelerometar u biti je masa suspendirana oprugom, kao što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1. Horizontalni i vertikalni model akcelerometra [3]

Kad je akcelerometar podvrgnut linearnom ubrzanju duž osi osjetljivosti, ubrzanje uzrokuje pomicanje mase na jednu stranu, pri čemu je iznos otklona proporcionalan ubrzanju.

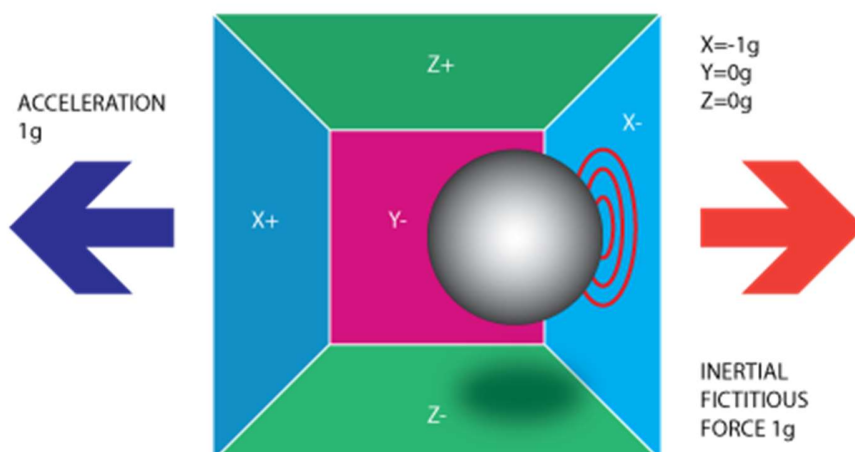
Dobar način vizualizacije rada akcelerometra je zamišljena kutija u obliku kocke s kuglicom u njoj, kako je prikazana na slikama 2.2 – 2.4. Šest stranica kocke su pozitivni/negativni smjerovi X, Y i Z osi.



Slika 2.2. Akcelerometar u slobodnom padu [4]

Na slici 2.2. je prikazana kuglica na sredini šuplje kocke. Na akcelerometar ne djeluje nikakva sila, tj. nema inercijalnog ubrzanja. Akceleracija izmjerena na svakoj osi će biti nula. To je prikaz kada je uređaj u slobodnom padu.

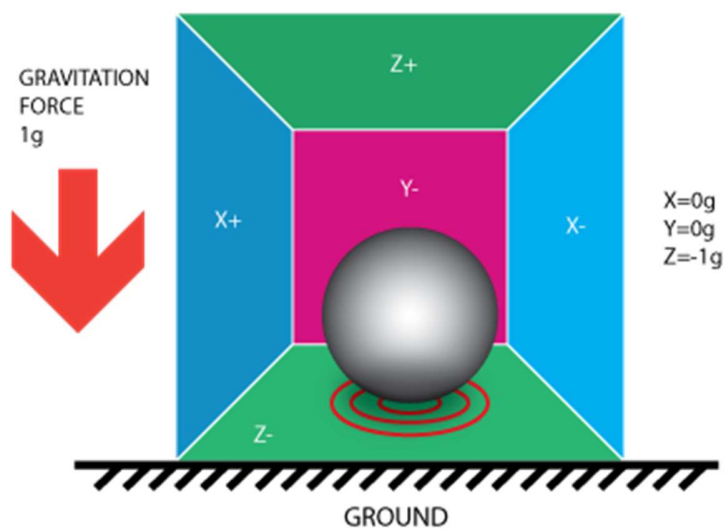
I dalje zanemarujući gravitaciju uz pretpostavku da je kuglica bez težine, za nagli pokret kocke u lijevo (ubrzanje od $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$), kuglica će udariti u zid oznake $-X$ (slika 2.3). Mjerenjem sile pritiska kugle na zid dobivamo vrijednost -1 g na os X .



Slika 2.3. Akcelerometar u pokretu u lijevo [4]

Akcelerometar će detektirati silu koja je usmjerena u suprotnom smjeru od vektora akceleracije i ta sila se naziva inercijska sila ili fiktivna (d'Alembertova) sila. Zaključujući iz navedenog, akcelerometar mjeri ubrzanje neizravno putem sile koja se primjenjuje na jedan od njegovih zidova. Ova sila može biti uzrokovana ubrzanjem, ali kao što ćemo vidjeti u sljedećem primjeru, nije uvijek uzrokovano ubrzanjem [4].

Ako se model postavi na Zemlju tj. primijenimo gravitacijsku silu, kuglica će pasti na Z-zid i izazvati će silu od 1 g na donju stijenku, kao što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4. Akcelerometar u mirovanju [4]

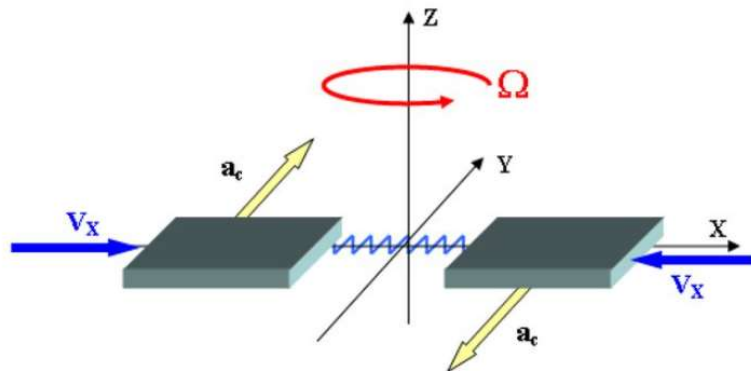
2.1.2. Žiroskop

Sustav MEMS žiroskopa se sastoji od dvije mase spojene pomoću elastičnog elementa (slika 2.5). Temeljni učinak koji određuje rad svih žiroskopa zasnovanih na MEMS-u je Coriolisov učinak, koji se pak temelji na Newtonovom zakonu kretanja. No, ono što tvrdi je da se masa kreće po smjeru X i da je podvrgnuta kutnoj rotaciji duž smjera z, pa doživljava silu zvanu Coriolisova sila:

$$F_{cor} = -2 \cdot m \cdot \omega \times v \quad (2-1)$$

gdje je m masa, v obodna brzina čestica unutar sustava i ω kutna brzina sustava.

Smjer Coriolisove sile i ubrzanja je dan vektorskim umnoškom obodne brzine i kutne brzine (kako je navedeno u jednadžbi 2-1). Vibriranje masa u suprotnim smjerovima (pozitivni i negativni smjer na X-osi) i podvrgnutost kutnoj rotaciji na Z-osi daju Coriolisove sile (i ubrzanja) istog intenziteta ali u obrnutim smjerovima [5].



Slika 2.5. Prikaz principa rada vibrirajućeg MEMS žiroskopa [6]

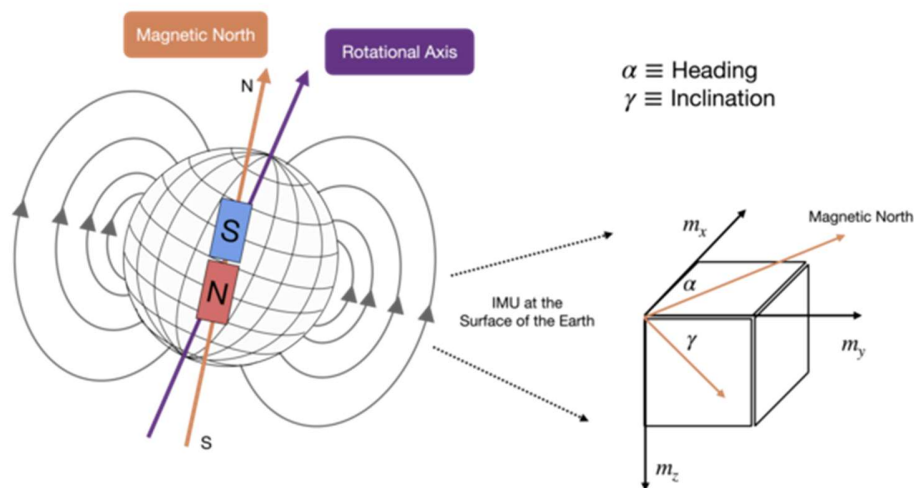
Korištenjem izvorne orijentacije sustava u inercijalnom referentnom okviru kao početni uvjet i integrirajući kutnu brzinu, trenutna orijentacija sustava je poznata u svakom trenutku.

Svaki kanal žiroskopa mjeri rotaciju oko jedne X, Y ili Z osi.

2.1.3. Magnetometar

Magnetska polja opisuju utjecaj električnih struja i magnetskih materijala na okolna tijela, a magnetometar, kako ime govori, mjeri magnetska polja.

Može otkriti fluktuacije² u magnetskom polju Zemlje mjerenjem gustoće magnetskog toka zraka na mjestu senzora u prostoru. Kroz te fluktuacije, pronalazi vektor prema Zemljinom magnetskom sjeveru, a to se može spojiti zajedno s podacima akcelerometra i žiroskopa za određivanje apsolutnog smjera (slika 2.6).



Slika 2.6. Prikaz djelovanja magnetometra [7]

Magnetometri se uglavnom klasificiraju u dvije kategorije: skalarne i vektorske magnetometre. Vektorski magnetometri mjere vektorske komponente magnetskog polja. Skalarni magnetometri mjere veličinu vektorskog magnetskog polja i taj isti će se koristiti u sustavu koji se koristi u ovom radu.

² Fluktuacija – promjena u strujanju.

Jedna od metoda koju koriste magnetometri oslanja se na ono što je poznato kao Hall-ov učinak. Hall-ov učinak je stvaranje razlike napona (Hall-ov napon) na električnom vodiču, poprečno na električnu struju u vodiču i na primijenjeno magnetsko polje okomito na struju. To znači da magnetometri mogu koristiti poluvodičke materijale za prolaz struje i utvrditi je li magnetsko polje u blizini. Na taj način magnetometar stvara procjenu deformirane struje ili struje nagnute pod utjecajem djelovanja magnetskog polja. Napon na kojem se događa navedeno je Hall-ov napon koji je proporcionalan magnetskom polju [7].

2.2. Primjena IMU-a u rehabilitacijskog robotici

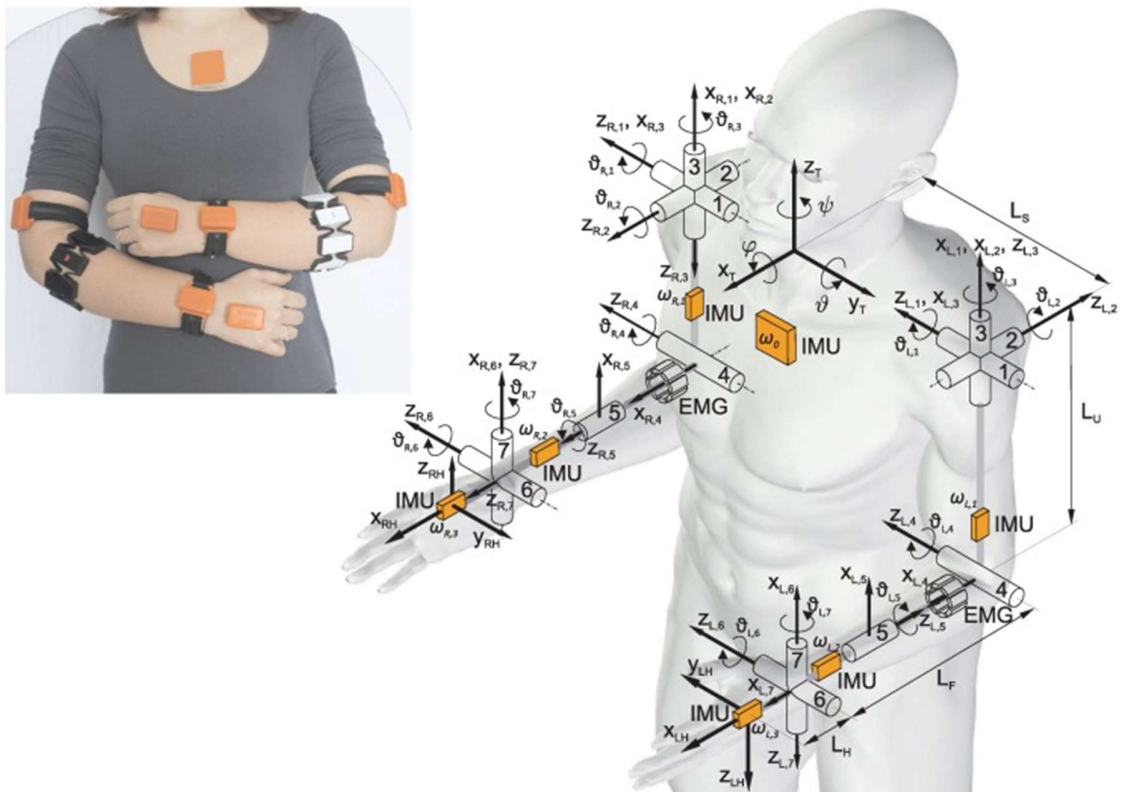
Od značajne vrijednosti korištenja robotike u rehabilitaciji je uključivanje intenzivnih ponavljajućih treninga, izvođenje kućne rehabilitacije s daljinskim upravljanjem, automatsko prilagođavanje podrške uređaja na temelju progresivnosti oporavka pacijenta, povećanje angažmana pacijenta kroz računalne aktivnosti u obliku igara i praćenja napretka kroz procjenu ishoda [8].

Rehabilitacijski roboti mogu se podijeliti u sustave s krajnjim efektorom i sustave egzoskeleta. Odluka o odabranom pristupu temelji se na kriterijima kinematike i ovisi o primjeni i o rasponima kretanja. Za pokrete koji zahtijevaju raspon manji od 45° se koriste sustavi krajnjeg efektora, a za kretanje koje zahtijevaju veći nagib zglobova. Za detaljniji opis primjene IMU-a u rehabilitacijskoj robotici, koristit će se njegova uloga u sustavu rada rehabilitacijskog egzoskeleta. Robotski egzoskeleti smatraju se nosivim elektromehaničkim uređajima koji su razvijeni kao augmentativni uređaji za oporavak fizičkih izvedba nositelja-pacijenta ili kao uređaj ortoza za rehabilitaciju hoda tj. pomoć pri kretanju [9].

Za potrebe objašnjenja principa rada IMU-a u sustavu egzoskeleta koristit će se primjer egzoskeleta za ruke (engl. *upper-limb exoskeleton*), kako je prikazano na slici 2.7. Narančasti okviri predstavljaju IMU senzore, a dva segmentirana cilindra predstavljaju EMG³ elektrode oko ruke. Postavljaju se na pozicije za najefikasnije mjerenje podataka koji će se poslužiti na radu egzoskeleta (dijelovi ruke koji imaju najveće promjene položaja tj. najveću mjerenu aktivnost i

³ EMG – elektromiografski senzori za mjerenje električne aktivnosti mišića.

zglobovi). Nakon postavljanja senzora, potrebno je izvesti rehabilitacijske vježbe za ruke kako bi se odredio položaj mišića za dva različita pokreta držanja ruke. Skup IMU senzora koristi se za mjerenje kinematskih parametara pokreta i položaja, a površinski EMG senzori koriste se za praćenje stanja napreznosti mišića. EMG i IMU senzor se postavljaju na zdravu ruku, a signal iz zdrave ruke koristit će se za pomicanje egzoskeleta dok će izvoditi vježbe na ruci pacijenta za rehabilitaciju. Prikupljeni podaci moraju se kalibrirati i obraditi pomoću odgovarajućeg softvera, što će se prikazati u eksperimentalnom dijelu rada [10].



Slika 2.7. Nosivi senzori pričvršćeni na nositelja te kinematski model s koordinatnim sustavima [11]

3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U narednom poglavlju će se opisati postupak prikupljanja podataka ubrzanja, kutne brzine i vektora magnetskog polja pomoću dostupne tehnike iz Laboratorija za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Završno će se kalibrirani podaci provjeriti putem dostupnog programa i komentirati.

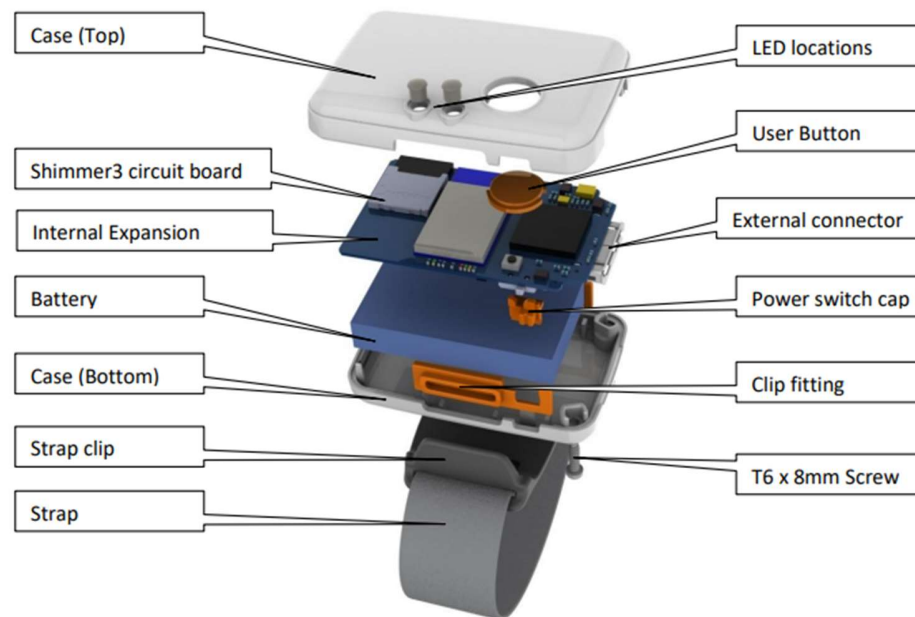
3.1. Pregled stanja tehnike korištenog sustava

U svrhu provedbe eksperimentalnog dijela rada, koristiti će se *Shimmer3* IMU senzor proizveden od tvrtke Shimmer Technologies. Uz sami hardver, koristiti će se i programska podrška iste tvrtke *Shimmer 9DoF Calibration* u svrhu prikupljanja podataka iz senzora preko Bluetooth veze i njihova kalibracija, te provjera dobivenih podataka.



Slika 3.1. Korišteni Shimmer3 senzor iz Laboratorija za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci

Izgled senzora Shimmer3 je prikazan na slici 3.1. Težak je 21 g i njegove dimenzije su 51 mm x 34 mm x 14 mm. Također, uz senzore se komercijalno dobije i remenić za ručni zglob i remen za struk kako bi se mogao lakše postaviti senzor na navedena mjesta [12].



Slika 3.2. Građa Shimmer3 IMU senzora [13]

Slika 3.2. prikazuje pojedine komponente Shimmer3 senzora. Senzor se sastoji od kućišta (gornji i donji dio), LED lampica, tzv. „User Button“ i elektroničkog dijela s baterijom.

Dostupna su dva softverski kontrolirana LED indikatora. Lijevi indikator (gledano prema slici) namijenjen je za prikaz operativnog statusa i prikazuje jedno od tri boje:

Radni status:

- Zeleno: ispravno;
- Žuto: upozorenje;
- Crveno: greška.

Desni indikator je dvobojan i namijenjen je za prikaz moda podatkovne komunikacije.

Status podataka:

- Plavo: *bluetooth* komunikacija;
- Zeleno: očitavanje podataka.

Za postupak kalibriranja je izuzetno bitan stalak za kalibraciju. Njegova svrha je stabilizacija Shimmer3 senzora tijekom kalibracije. Zbog zaobljenog dizajna Shimmer3 kućišta, kalibracija se ne bi trebala provoditi bez navedenog stalka, jer će to značajno utjecati na točnost.



Slika 3.3. Stalak za kalibraciju Shimmer3 senzora

Uz senzore (koji se kupuju pojedinačno) dolazi tzv. *Shimmer Dock*. To je višenamjenski uređaj koji pruža tri primarne funkcije:

1. Punjenje Shimmer senzora;
2. Pristup MicroSD kartici⁴;
3. Programiranje Shimmera [13].



Slika 3.4. Shimmer Dock sa senzorom na punjenju

⁴ MicroSD služi za uključivanje dodatne memorije, s kapacitetom do 32 GB.

3.2. Dobiveni oblik podataka

Pravi senzori su podložni pogreškama zbog neusklađenosti u postavljanju senzora, a prema idealnoj zamisli troosni IMU trebao bi se sastajati od tri međusobno ortogonalna jednoosna senzora. U biti, u realnoj situaciji, osi senzora nisu točno ortogonalne jedna na drugu. Radi ove situacije, postavlja se rotacijska matrica R kojom su definirane stvarne senzorske osi (x , y i z) s obzirom na pretpostavljene senzorske osi (x' , y' i z').

Za troosni senzor vrijedi:

$$Y = KRv + b + n$$

$$\begin{bmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{x'ix} & r_{x'iy} & r_{x'iz} \\ r_{y'ix} & r_{y'iy} & r_{y'iz} \\ r_{z'ix} & r_{z'iy} & r_{z'iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

gdje je Y izlazna veličina iz senzora, K je dijagonalna matrica faktora skaliranja senzorskih osi tj. osjetljivost, b je vektor pomaka tj. vrijednost izlaza senzora za mjerenu veličinu u iznosu od 0, a n je vektor šuma [14].

Svaki se senzor kalibrira pomoću linearnog modela senzora prikazanog u jednadžbi. Ova se jednadžba primjenjuje na žiroskope, akcelerometre i magnetometre.

3.2.1. Troosni akcelerometar

Ovaj sustav se sastoji od tri međusobno ortogonalna jednoosna akcelerometra, a svaka os mjeri određeni udio inercijske akceleracije ($a_1 \cos \theta_i$) i gravitacijske akceleracije ($g \cos \varphi_i$). Proporcije mjerene određenom osi ovise o kutovima između osi i smjerova komponenata ubrzanja (kako je definirano jednadžbom 3-2).

Konačni vektor akceleracije dobiven od troosnog akcelerometra:

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_x + g \cos \varphi_x \\ a_1 \cos \theta_y + g \cos \varphi_y \\ a_1 \cos \theta_z + g \cos \varphi_z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

gdje su θ_i i φ_i kutovi koje os a_i čini s vektorom inercijskog ubrzanja a_1 i vektorom gravitacije g .

3.2.2. Troosni žiroskop

Konačni vektor kutne brzine dobiven od troosnog žiroskopa:

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \cos \beta_x \\ \omega \cos \beta_y \\ \omega \cos \beta_z \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

gdje je β_i kut koji mjerna os ω_i čini s osi rotacije.

3.2.3. Troosni magnetometar

Vektor magnetskog polja dobiven od troosnog magnetometrom:

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cos \alpha_x \\ m \cos \alpha_y \\ m \cos \alpha_z \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

gdje je α_i kut koji mjerna os m_i čini s vektorom magnetskog polja \bar{m} [14].

3.3. Kinematski parametri

Kompletna kinematika trodimenzionalnog tijela u prostoru se može opisati određenim varijablama:

- Linearni pomak središta mase tijela (x, y i z) – dobivanje zahtjeva složene algoritme fuzije senzora.

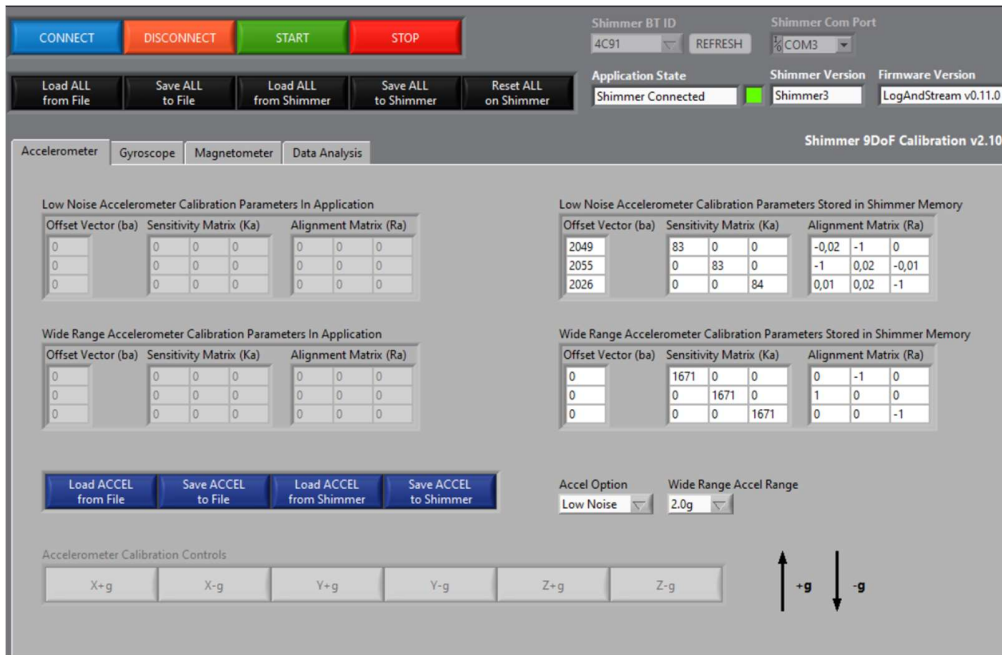
- Linearna brzina središta mase tijela (\dot{x}, \dot{y} i \dot{z}) – dobiva se integriranjem linearnog ubrzanja, ali se moraju uzeti u obzir pomak akcelerometra i šum u mjere za uklanjanje pogrešaka kako bi se osigurala točna procjena.
- Linearno ubrzanje središta mase tijela (\ddot{x}, \ddot{y} i \ddot{z}) – izravno se dobiva iz akcelerometra.
- Kutni pomak tijela u dvije ravnine (θ_{xy}, θ_{yz}) – za trenutni pomak se može dobiti pomoću stacionarnog akcelerometra i/ili magnetometra, ali za dobivanje kontinuiranog kutnog pomaka za pokretno tijelo se mora dobiti fuzijom barem akcelerometra i žiroskopa.
- Kutna brzina tijela u dvije ravnine (ω_{xy}, ω_{yz}) – izravno se dobiva iz žiroskopa.
- Kutno ubrzanje tijela u dvije ravnine (a_{xy}, a_{yz}) – dobiva se deriviranjem kutne brzine, ali vodeći računa o visokofrekventnim šumovima koju uvodi derivacija.

Ove parametre moguće je procijeniti IMU sensorima, npr. linearno ubrzanje i kutna brzina se izravno procjenjuju iz akcelerometra i žiroskopa, odnosno kutno ubrzanje može se odrediti izračunom derivacije kutne brzine (vodeći računa o šumu koji se dobiva iz derivacije). Kutni pomak se procjenjuje pomoću akcelerometra i/ili magnetometra, dok je zajednički rad akcelerometra i žiroskopa potreban za točan izračun kutnog pomaka tijela [14].

3.4. Kalibracijski proces sa softverom Shimmer 9DOF

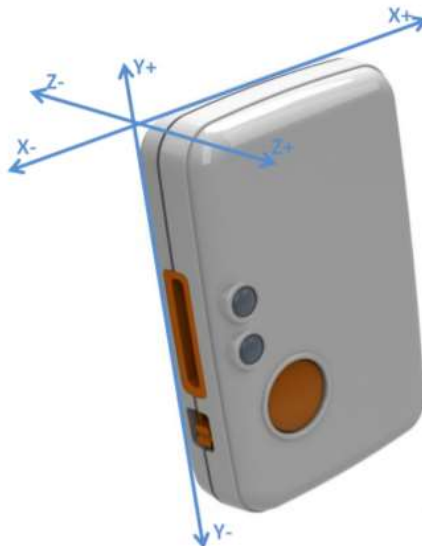
Kalibracija senzora je metoda poboljšanja performansi senzora uklanjanjem strukturnih pogrešaka iz mjerenja senzora. Strukturne pogreške su razlike između očekivanog izlaza senzora i njegovog izmjenjenog izlaza, koje se dosljedno pojavljuju svaki put kada se izvrši novo mjerenje. Uklanjanjem strukturnih pogrešaka, kalibracija osigurava način poboljšanja ukupne točnosti senzora [15].

Za prikupljanje podataka i kalibriranje koristiti će se software Shimmer 9DOF preuzet sa službene stranice Shimmer Sensoring. U programu će se označiti Shimmer Bluetooth ID i spojiti sa Shimmer senzorskom jedinicom. Povezivanje sa Shimmer senzorom vrši se klikom na plavi gumb Connect. Tijekom procesa uspostavljanja veze, tekstualni okvir Application State prikazuje „Shimmer Connected“, kako je prikazano na slici 3.5.



Slika 3.5. Sučelje programa Shimmer 9DoF s povezanim Shimmer senzorom

Za ova mjerenja se koristi koordinatni sustav prikazan na slici 3.6.



Slika 3.6. Korišteni koordinatni sustav na Shimmer3 senzoru [14]

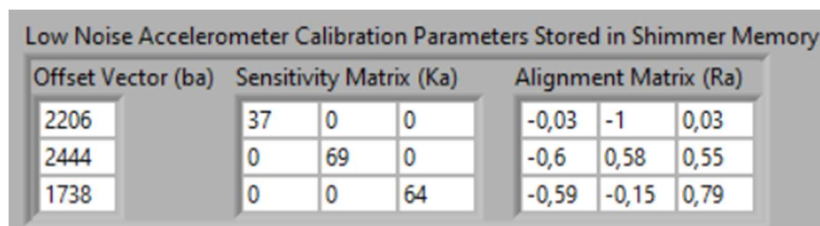
3.4.1. Kalibracija akcelerometra

Prvo će se označiti raspon za akcelerometar (može se birati između 1.5 g, 2.0 g, 4.0 g ili 6.0 g). U našem slučaju je odabrano 2.0 g. Nakon toga se pokreće *Data Streaming* tj. prikupljanje podataka sa senzora.

Pozicije akcelerometra za kalibriranje su sljedeće:

1. Pozicija Shimmera da +X os gleda prema gore pritom se stisne „X+g“.
2. Pozicija Shimmera da -X os gleda prema gore pritom se stisne „X-g“.
3. Pozicija Shimmera da +Y os gleda prema gore pritom se stisne „Y+g“.
4. Pozicija Shimmera da -Y os gleda prema gore pritom se stisne „Y-g“.
5. Pozicija Shimmera da +Z os gleda prema gore pritom se stisne „Z+g“.
6. Pozicija Shimmera da -Z os gleda prema gore pritom se stisne „Z-g“.

Posljedično će kalibracijski parametri biti automatski izračunati, a pojavom plave sjene oko kalibracijskih parametara je indikator da su novi parametri dostupni za spremanje u Shimmer-ovu memoriju. Za spremanje parametara će se prekinuti prikupljanje i pritisnuti „Save ACCEL to Shimmer“ naredbu. Sada su podaci spremljeni, ali da se podaci spremu u datoteku, pritisne se „Save ACCEL to File“ naredba.



Low Noise Accelerometer Calibration Parameters Stored in Shimmer Memory

Offset Vector (ba)	Sensitivity Matrix (Ka)	Alignment Matrix (Ra)
2206	37 0 0	-0,03 -1 0,03
2444	0 69 0	-0,6 0,58 0,55
1738	0 0 64	-0,59 -0,15 0,79

Slika 3.7. Dobiveni podaci za akcelerometar u programu Shimmer 9DoF

Vektor pomaka akcelerometra u promatranom slučaju iznosi:

$$b_a = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2206 \\ 2444 \\ 1738 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Matrica osjetljivosti za akcelerometar je:

$$K_a = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37 & 0 & 0 \\ 0 & 69 & 0 \\ 0 & 0 & 64 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

Rotacijska matrica za akcelerometar je:

$$R_a = \begin{bmatrix} r_{x'x} & r_{x'y} & r_{x'z} \\ r_{y'x} & r_{y'y} & r_{y'z} \\ r_{z'x} & r_{z'y} & r_{z'z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,03 & -1 & 0,03 \\ -0,6 & 0,58 & 0,55 \\ -0,59 & -0,15 & 0,79 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

3.4.2. Kalibracija žiroskopa

Kao i u prethodnom postupku, pokreće se Data Streaming iz senzora.

Prateći sljedeće korake, odvija se kalibracija žiroskopa:

1. Postaviti Shimmer u mirujuće stanje i pritisnuti naredbu „Stationary“.
2. Zarotirati Shimmer 360° u smjeru kazaljke na satu oko X-osi i pritisnuti „Rotate X“ naredbu.
3. Zarotirati Shimmer 360° u smjeru kazaljke na satu oko Y-osi i pritisnuti „Rotate Y“ naredbu.
4. Zarotirati Shimmer 360° u smjeru kazaljke na satu oko Z-osi i pritisnuti „Rotate Z“ naredbu.

Isto kao i prije, pojaviti će se plava sjena oko kalibracijskih podataka kao znak da su novi parametri dostupni za spremanje u Shimmer memoriju. Postupak spremanja se ponavlja, osim što se stisne naredba „Save GYRO to File/Shimmer“.

Gyroscope Calibration Parameters Stored In Shimmer Memory								
Offset Vector (bg)			Sensitivity Matrix (Kg)			Alignment Matrix (Rg)		
-108			2,98	0	0	1	-0,03	-0,03
-18			0	47,98	0	1	0	0
68			0	0	0,63	0,92	0,38	-0,08

Slika 3.8. Dobiveni podaci za žiroskop u programu Shimmer 9DoF

Vektor pomaka žiroskopa u promatranom eksperimentu je:

$$b_a = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -108 \\ -18 \\ 68 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

Matrica osjetljivosti za žiroskop je:

$$K_a = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,98 & 0 & 0 \\ 0 & 47,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0,63 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

Rotacijska matrica za žiroskop je:

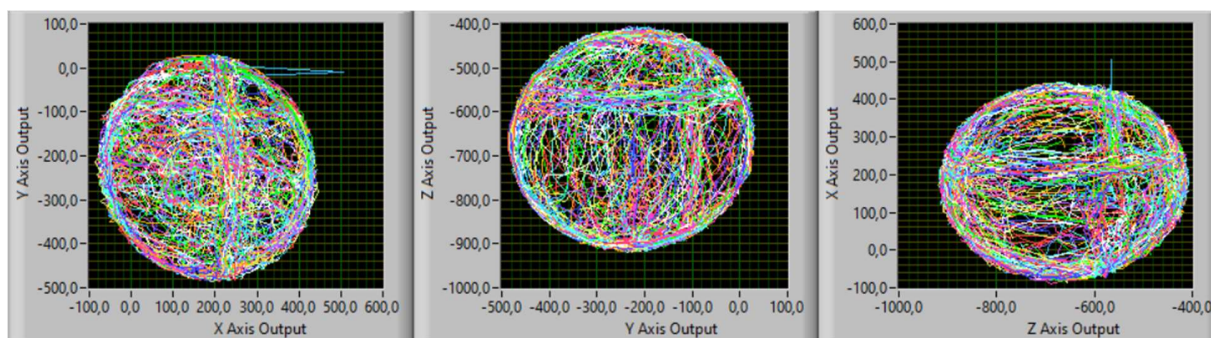
$$R_a = \begin{bmatrix} r_{x1x} & r_{x1y} & r_{x1z} \\ r_{y1x} & r_{y1y} & r_{y1z} \\ r_{z1x} & r_{z1y} & r_{z1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,03 & -0,03 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0,92 & 0,38 & -0,08 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

3.4.3. Kalibracija magnetometra

Kao i u prethodnom postupku, pokreće se Data Streaming iz senzora.

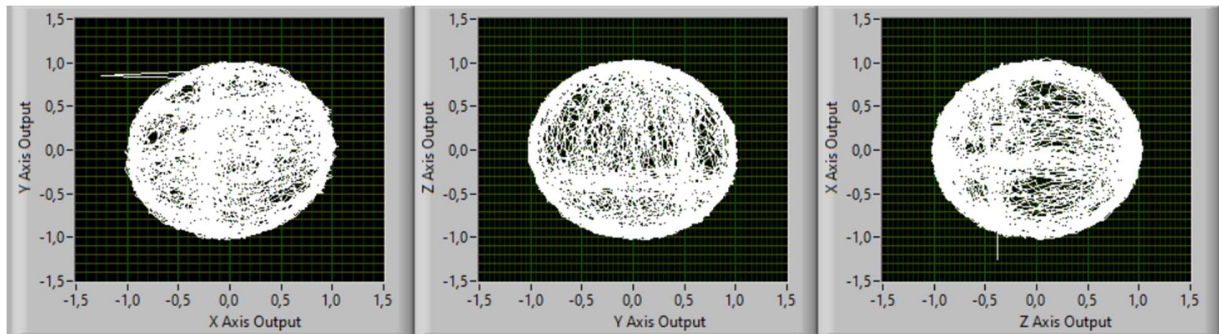
Postavlja se Shimmer na lokaciji uniformne magnetske snage tj. gdje nema lokalnih magnetskih polja u blizini koja bi mogla predstavljati smetnju tijekom kalibracije.

Pritisne se naredba „Rotate XYZ“ za početak kalibracije. Shimmer treba rotirati oko svih osi. Za optimalne rezultate, trebalo bi rotirati Shimmer kako bi se na grafičkom prikazu izlaznih podataka za dvije osi (kako je prikazano na slici 3.8.) dobilo što više oblika potpunih sfera.



Slika 3.9. Grafički izlazni kalibracijski podaci za magnetometar

Kalibracijski parametri su automatski izračunati. Za pregledavanje kalibracijskih parametara, treba promijeniti magnetometarski format u „Calibrated“. Idealna kalibracija trebala bi rezultirati iscrtavanjem triju jediničnih kružnica sa središtem blizu (0,0,0), kako je prikazano na slici 3.8. U slučaju odstupanja iz središta ili da su oblici daleko od pravilnog oblika kružnica, postupak kalibracije bi se trebao ponoviti.



Slika 3.9. Grafički izlazni kalibracijski podaci za magnetometar

Isto kao i prije, pojaviti će se plava sjena oko kalibracijskih podataka kao znak da su novi parametri dostupni za spremanje u Shimmer memoriju. Postupak spremanja se ponavlja, osim što se stisne naredba „Save MAG to File/Shimmer“

Magnetometer Calibration Parameters Stored In Shimmer Memory								
Offset Vector (bm)			Sensitivity Matrix (Km)			Alignment Matrix (Rm)		
182			270	0	0	-1	0	0
-226			0	265	0	0	1	0
-663			0	0	261	0	0	-1

Slika 3.10. Dobiveni podaci za magnetometar u programu Shimmer 9DoF

Dobiveni vektor pomaka magnetometra je:

$$b_a = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 182 \\ -226 \\ -663 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Matrica osjetljivosti za magnetometar je:

$$K_a = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 270 & 0 & 0 \\ 0 & 265 & 0 \\ 0 & 0 & 261 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

Rotacijska matrica za magnetometar je:

$$R_a = \begin{bmatrix} r_{x'ix} & r_{x'iy} & r_{x'iz} \\ r_{y'ix} & r_{y'iy} & r_{y'iz} \\ r_{z'ix} & r_{z'iy} & r_{z'iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

3.5. Provjera kalibracijskih parametara pomoću softvera Shimmer 9DOF

Za provjeru se prebacuje na prozor pod imenom „Data Analysis“ radi provjere točnosti kalibracije.

3.5.1. Provjera kalibracijskih podataka za akcelerometar

Ispravno kalibrirani akcelerometar će izmjeriti $9,8 \text{ m/s}^2$ na osi okrenutoj prema gravitaciji i 0 m/s^2 na ostale dvije osi kada Shimmer3 miruje. Odstupanje malih razlika je prihvatljivo [16].

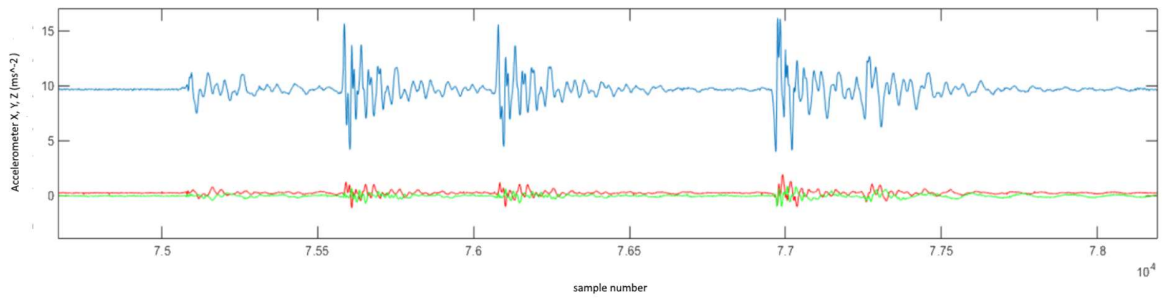
Na slici 3.11. je prikazan graf ubrzanja (m/s^2) gdje je na x-osi broj snimljenih uzoraka. Okretanjem tj. namještanjem položaja senzora nam graf mijenja vrijednosti. Naime, ne dobivaju se željeni podaci jer se pri drugom položaju graf kompletno miče od vrijednosti 0, a prima preveliku vrijednost koja nije blizu vrijednosti gravitacijskog ubrzanja.



Slika 3.11. Graf analize kalibriranih podataka za akcelerometar

Zbog prevelikih oscilacija u provjeri kalibriranih podataka, kalibracija akcelerometra nije u potpunosti uspješna. Razlog istome je preveliki šum koji utječe na dobiveni signal iz akcelerometra. Problem, također, može biti u nelinearnosti podataka.

Na slici 3.12. je prikazan primjer pravilno kalibriranih podataka. Upravo zbog šuma na signalu se može primijetiti da signal fluktuiira iznad i ispod $9,8 \text{ m/s}^2$. Utjecaj buke može biti smanjen, ili u promatranom slučaju reguliran, korištenjem tehnika filtriranja u naknadnoj obradi podataka.

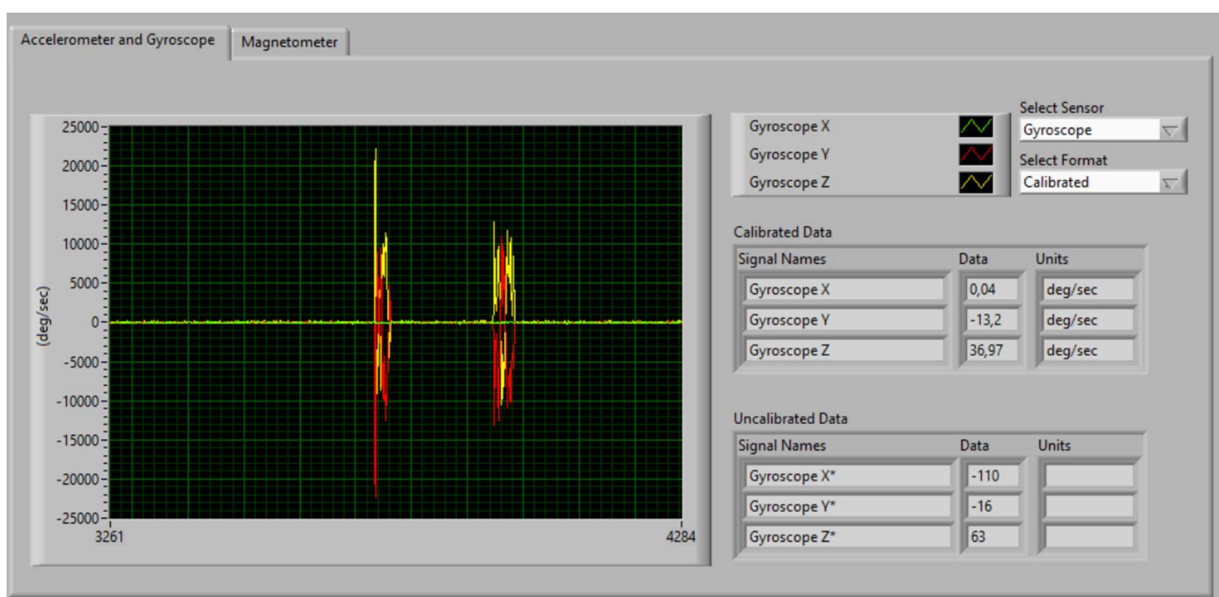


Slika 3.12. *Primjer grafa analize ispravno kalibriranih podataka za akcelerometar [14]*

3.5.2. Provjera kalibracijskih podataka za žiroskop

Ispravno kalibrirani žiroskop će izračunati 0 °/s na svim osima kada Shimmer miruje. Odstupanje malih razlika je prihvatljivo [16].

Na slici 3.13. je prikazani graf (°/s)/uzorak. Kako je prikazano, jedinica kada miruje, podaci variraju oko osi 0. Odstupanja velikih razmjera se događaju samo pri pomicanju senzora.



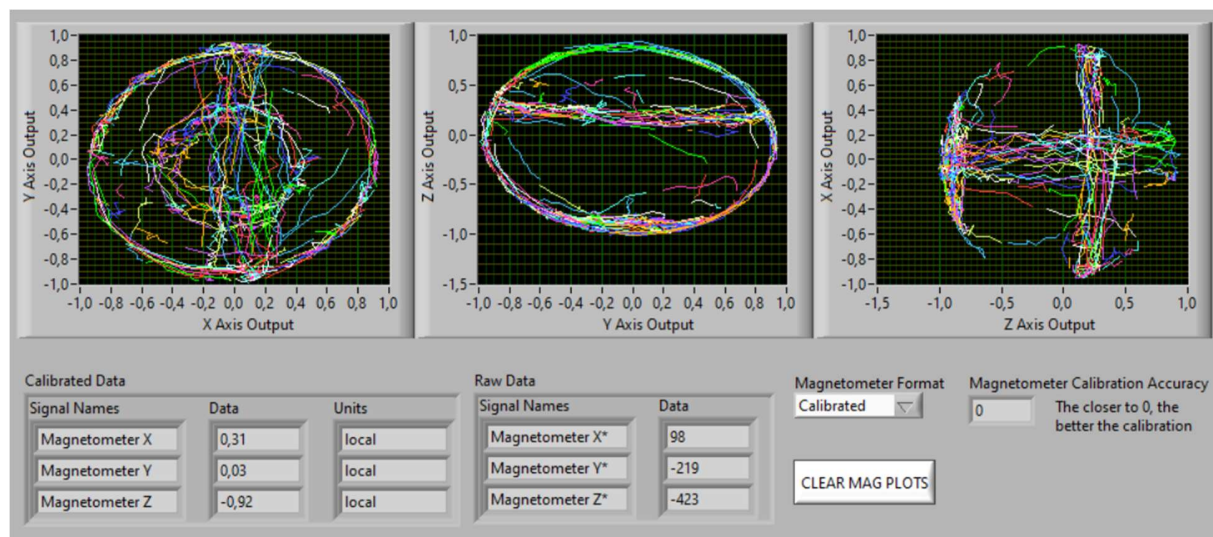
Slika 3.13. Graf analize kalibriranih podataka za žiroskop

U tabličnom prikazu pod „Calibrated Data“ su izmjereni kalibracijski podaci koji su bitni za provjeru točnosti kalibracije. Odstupanja u ovom slučaju nisu velika te možemo zaključiti da je žiroskop uspješno kalibriran.

3.5.3. Provjera kalibracijskih podataka za magnetometar

Ispravno kalibrirani magnetometar s jednom osi usmjerenoj prema vektoru magnetskog polja mjerit će vrijednost 1 na toj osi i 0 na ostale dvije osi. Odstupanje malih razlika je prihvatljivo [16].

Na slici 3.14. su prikazani grafovi po dobivenim podacima za osi X-Y, Y-Z i Z-X. Rotiranjem magnetometra po X, Y i Z osi dobiti će se kružnice sličnog oblika kako je to bilo prilikom kalibracije.



Slika 3.14. Grafovi analize kalibriranih podataka za magnetometar

Za samostalnu provjeru kalibracijske točnosti, prikazana je vrijednost izračuna „Magnetometer Calibration Accuracy“ koju daje programsko sučelje uređaja. Kako je prikazano, što je vrijednost bliža 0 to je uspješnija kalibracija. U promatranom slučaju je prikazana 0 tako da se zaključuje da je kalibracija podataka magnetometra bila uspješna.

4. ZAKLJUČAK

Inercijalne mjerne jedinice daju trodimenzionalne podatke za ubrzanja, kutne brzine, vektore magnetskog polja u vlastitom koordinatnom sustavu. Povoljne su za korištenje u sustavu s EMG sensorima u svrhu rehabilitacije određenih funkcija pacijenata. Najčešće služe u radu egzoskeleta koji prvotno izmjeri radne podatke zdravog uda (u našem slučaju ruke) te istim podacima se služi na liječenju uda osobe s poteškoćama. Prednost korištenja IMU senzora je njihova veličina i težina koja je potpuno neinvazivna i ne utječe nikako na izvedbu pokreta.



Slika 5.1. Primjer egzoskeleta na ruci pacijenta [17]

U radu se koristio IMU sustav dostupan od tvrtke Shimmer Technologies. Uz određene pokrete senzora, koji su bili dostupni u korisničkim priručnicima tvrtke na njihovoj web-stranici, očitani su podaci iz senzora u komercijalno dostupnom programu Shimmer 9DoF. Nakon učitavanja postavljena je kalibracija istih podataka kako bi se mogla provjeriti točnost mjerenja.

Budući da su mjerenja dobivena iz MEMS sustava, podložna su značajnim šumovima. Ovo je standardni problem u fuziji IMU senzora za koje postoje određeni algoritmi za bolju procjenu ili filteri koji smanjuju učinak šumova na mjerenja. Mjerenje preko IMU zahtijevaju homogeno magnetsko polje, što otežava postupak u zatvorenim prostorima u blizini feromagnetskog materijala ili električnih uređaja. U realnom se slučaju navedenog nehomogenog magnetskog polja može pouzdano jedino odrediti nagib, ali i ne sami smjer senzora. Isti problem se uočio u zadnjem poglavlju pri provjeri dobivenih podataka s podacima u komercijalno dostupnom programu.

5. LITERATURA

- [1] Službena stranica World Health Organization (www.world-stroke.org/)
- [2] S Interneta: hr.jf-parede.pt/imu-sensor-working-its-applications
- [3] S Interneta: www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-mems
- [4] Starlino (prosinac 2009.): Vodič za korištenje IMU (akcelerometra i žiroskopa). S Interneta: http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [5] YT kanal: nanolearning (studeni 2014.): „How do MEMS gyroscopes work?“ S Interneta: https://www.youtube.com/watch?v=PK05u9c3yWI&t=4s&ab_channel=nanolearning
- [6] D'Alessando A.; D'Anna G.: „Retrieval of Ocean Bottom and Downhole Seismic sensors orientation using integrated MEMS gyroscope and direct rotation measurements“, *Advances in Geosciences*. 2014.
- [7] S Interneta: makersportal.com/blog/calibration-of-a-magnetometer-with-raspberry-pi
- [8] Tiboni M.; Borboni A.; Verite F.; Bregoli C.; Amici C.: „Sensors and Actuation Technologies in Exoskeletons: A Review“, *Sensors (Basel)*. 2022.
- [9] Sirlantzis K.; Bashir Larsen L. i dr.: „Robotics“, *Handbook of Electronic Assistive Technology*. 2019.
- [10] Ganesan Y.; Gobee S.; Durairajah V.: „Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor“, *Procedia Computer Science*. 2015.
- [11] Repnik E.; Puh U.; Goljar N.; Munih M.; Matjaž M.: „Using Inertial Measurement Units and Electromyography to Quantify Movement during Action Research Arm Test Execution“, *Sensors (Basel)*. 2018.
- [12] YT kanal: Shimmer Sensing (listopad 2013.): „Shimmer3 IMU Introduction Video“ S Interneta: https://www.youtube.com/watch?v=l4LapVeQKBk&t=181s&ab_channel=ShimmerSensing

[13] Shimmer priručnik za korištenje. S Interneta: <https://bmslab.utwente.nl/wp-content/uploads/2019/12/Shimmer-User-manual.pdf>

[14] Shimmer3 IMU priručnik za korištenje. S Interneta: <https://bmslab.utwente.nl/wp-content/uploads/2019/12/Shimmer-IMU-inertia-and-gyroscope-sensors.pdf>

[15] EL-PRO-CUS: „What is Sensor Calibration – Definition and It's Application“ S Interneta: <https://www.elprocus.com/sensor-calibration-definition-and-its-application/>

[16] YT kanal: Shimmer Sensing (listopad 2013.): „Shimmer 9DOF Calibration v2 0“ S Interneta: https://www.youtube.com/watch?v=aI2WDecTtfs&t=14s&ab_channel=ShimmerSensing

[17] S Interneta: <https://www.hjdgvdffds.tk/products.aspx?cname=exoskeleton+system&cid=26>

ZAHVALE

Zahvaljujem svojem mentoru doc. sc. Ervinu Kamenaru na podršci, korisnim savjetima, informacijama i materijalima tijekom pisanja ovoga rada.

Zahvaljujem se svojoj majci Suzani za bezuvjetnu podršku i ljubav koju mi je pružala kroz školovanje, ali i cijeli život.

Rad posvećujem svojoj prijateljici Ivi za koju znam da bi bila sretna zbog mog uspjeha. Volim te Ive, ae!

SAŽETAK

Posljedice moždanog udara često rezultiraju gubljenjem sposobnosti odrađivanja radnji udova (ruku) potrebnih za svakodnevne aktivnosti. Najčešće je to posljedica oštećenja dijela mozga koji je zadužen za određenu radnju. S obzirom da se radi o plastičnosti, pacijent ne može pridobiti natrag istu sposobnost nego je treba ponovo naučiti. U svrhu rehabilitacije moguće je koristiti rehabilitacijske robote – najčešće u obliku egzoskeleta. Egzoskelet se sastoji od inercijalnih i EMG senzora koji prema radu zdrave ruke (u slučaju ovog rada) uče robotsku napravu radnju koja će se primijeniti na ruku pacijenta.

Inercijalni senzori su zaduženi za prikupljanje podataka linearnog ubrzanja, kutne brzine i jakosti magnetskog polja. Upravo iz tog razloga sastoji se od troosnog akcelerometra, žiroskopa i magnetometra. U Laboratoriju za precizno inženjerstvo na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci se, u svrhu izrade rada, koristila komercijalna oprema i softver Shimmer Sensing tvrtke kako bi se opisao postupak prikupljanja i kalibriranja podataka dobivenih iz IMU senzora.

Tijekom rada na projektu, uočeno je nekoliko bitnih zaključaka. Utjecaj šuma na dobiveni signal znatno utječe na uspješnost kalibriranja podataka, što se prikazalo na podacima dobivenih od akcelerometra. Također, bitan uvjet pri mjerenju inercijalnim senzorom je da mjerenje mora biti vršeno u prostoru bez lokalnih magnetskih polja koja bi mogla utjecati na signal. Konačno se predlaže dodatno filtriranje podataka za uspješnu obradu i korištenje istih.

Ključne riječi: rehabilitacijska robotika, egzoskelet, inercijalni senzori, IMU, Shimmer3, kalibracija, biomehanika

SUMMARY

The survival of stroke often results in losing patient's ability to perform limb actions needed for performing daily living activities. Most often, this is the result of damage to the part of the brain that is responsible for a certain action. Since it is a matter of plasticity, the patient cannot regain the same ability, but must be taught again. For the purpose of rehabilitation, rehabilitation robots can be used - most often in the form of an exoskeleton. The exoskeleton consists of inertial and EMG sensors that, according to the operation of the healthy hand (in the frame of this thesis), teach the robotic device the action that will be applied to the patient's hand.

Inertial sensors are responsible for collecting data on linear acceleration, angular velocity and magnetic field strength. Precisely for this reason, they consist of a three-axis accelerometer, gyroscope and magnetometer. In the Precision Engineering Laboratory at the Faculty of Engineering University of Rijeka, commercial equipment and software manufactured by Shimmer Sensing company were used to describe the process of collecting and calibrating data obtained from IMU sensors.

A few important conclusions were drawn during the work. The influence of noise on the received signal significantly affects the success of data calibration, which was shown in the data obtained from the accelerometer. Also, an important condition when measuring with an inertial sensor is that the measurement must be performed in a space with no local magnetic fields that could affect the signal. Finally, additional data filtering is suggested for successful processing and use of the same.

Keywords: rehabilitation robotics, exoskeleton, inertial sensors, IMU, Shimmer3, calibration, biomechanics