

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 2451

**Klasifikacija pokreta ljudskog tijela
temeljena na podacima s
inercijskih senzora**

Ivan Trubić

Zagreb, lipanj 2021.

*Umjesto ove stranice umetnite izvornik Vašeg rada.
Da bi ste uklonili ovu stranicu obrišite naredbu \izvornik.*

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Razrada	2
2.1. Bolesti koljena	2
2.2. Dosadašnja rješenja	2
2.3. Rješenje koristeći IMU senzore	2
2.4. Analiza IMU senzora	2
2.5. Analiza dostupnih baza podataka	7
2.6. Stvaranje vlastite baze podataka	10
2.7. Implementacija metode strojnoga učenja	16
2.8. Rezultati	16
3. Zaključak	17
Literatura	18

1. Uvod

Karakteristike pokreta ljudskoga tijela vrlo su individualne te ovise o mnogo čimbenika kao što su genetika, odgoj te fizička sprema. Ti pokreti su toliko jedinstveni da se mogu koristiti za identifikaciju osoba dok su s druge strane toliko slični da čak i manje devijacije u tim pokretima također mogu ukazivati na neke zdravstvene probleme. Ljudski pokreti mogu se klasificirati na razne načine koristeći računalni vid ili razne senzore postavljene na ljudskome tijelu. Svaka od metoda ima svoju granu primjene kao: identifikacija osoba temeljenog na hodu koristeći računalni vid na nadzornim kamerama (D et al., 2019), praćenje pokreta igrača u interakciji sa igrama u virtualnoj stvarnosti (Fang et al., 2017), korištenje inercijskih (IMU) senzora za precizno snimanje hoda u svhu otkrivanja bolesti i rehabilitacije te mnoge druge.

Klasifikacija pokreta vrlo je složen problem te kao takav nema dobro rješenje koristeći klasične algoritme. Razvojem moći računala te metoda strojnoga učenja ovaj problem postaje rješiv. Za snimanje pokreta može se koristiti kamera ili senzori. Koristeći kameru, na snimci se koriste metode računalnog vida te se traže karakteristike ljudskog tijela kako bi se na snimci prepoznala osoba te koristeći te karakteristične točke analizira se hod. Također, kamera može snimati osobu sa posebno postavljenim vizualnim oznakama po djelovima tijela te koristeći te vizualne oznake analizirati pokrete. Nedostatak kamera je taj što snimaju iz jedne perspektive te zbog toga može doći do okluzije oznaka. Inercijski (IMU) senzori eliminiraju kamere te ne pate od problema okluzije. Inercijski senzori su relativno jeftini i mali uređaji koji se postavljaju na ključne dijelove ljudskoga tijela te pružaju vrlo dobar uvid u ljudske pokrete. Primjerice mogu se staviti na ruke te upravljati igrama i uređajima ali se mogu koristiti i u medicinske svrhe za analizu hoda i diagnosticiranje zdravstvenih problema kao i za provođenje terapijskih vježbi bez nadzora stručnjaka. Ovaj rad će se više fokusirati na medicinski aspekt klasifikacije pokreta, preciznije analizu hoda (*eng.* gait) i terapiju koljena.

2. Razrada

2.1. Bolesti koljena

2.2. Dosadašnja rješenja

2.3. Rješenje koristeći IMU senzore

2.4. Analiza IMU senzora

IMU (eng. *Inertial Measurement Unit*) je elektromehanički uređaj koji služi za mjerenje sila, kutih brzina te pozicije uređaja koristeći skup senzora: akcelometar, žiroskop te magnetometar. Svaki od pojedinih senzora se sastoji od 3 manja senzora koji svoj posao obavlja u odnosu na pojedinu os u prostoru. Oni u kombinaciji čine jednu jedinicu koja mjeri vrijednosti u sve 3 prostorne dimenzije. Rane izvedbe ovakvoga senzora (poput one u Apollo 11 letjelici) su bile vrlo velikih dimenzija i nisu u sebi imale magnetometar. Danas su se dimenzije IMU senzora znatno smanjile te je moguće izraditi sve potrebne komponente u sklopu jednog čipa koristeći unaprijeđenja izrade sklopova u samom siliciju. Iako komponente jesu napravljene u siliciju one su još uvijek elektromehaničke po prirodi što znači da se komponente slobodno gibaju unutar silicijske ploče na samome čipu te su kao takve mikro-elektromehaničke (skraćeno *MEMS*). Danas su takvi uređaji nezamjenjivi u bilo kakvim letjelicama a pogotovo u bespilotnim letjelicama (eng. *drone*) koji su u današnje vrijeme sve popularniji. Vrlo su bitni također u navigacijskim uređajima jer u kombinaciji sa GPS uređajima daju dodatnu mogućnost pozicioniranja u slučajevima kada sam GPS signal nije pristupačan kao što je to primjerice u tunelima te dodatno povećavaju preciznost praćenja kretanja. To je jedan od razloga zašto je IMU senzor neizbježna komponenta pri izradi pametnih telefona. U rukama inženjera IMU senzori su dobili mnogo raznih kreativnih svrha te se mogu naći kao dio kontrolera u igraćim konzolama di služe kao dodatna metoda

interakcije igrača sa igrom. Prva promatrana komponenta bit će akcelometar.

Akcelometar

Akcelometar je senzor koji mjeri iznos sile u određenom smjeru. Jednostavan akcelometar se može konceptuirati kao masa ovješena na opruzi. Opruga se komprimira onoliko koliko je masa teška odnosno onoliko koliko je utjecaj gravitacije na tu masu. U slučaju pojave nove sile u smjeru opruge ona se dodatno otpušta odnosno steže te je ukupan iznos sile na tijelo "*pohranjen*" unutar opruge odnosno istog je iznosa ali suprotne orijentacije. Kako bi se taj iznos mogao očitati u električnome obliku potrebno je izvršiti pretvorbu a to se može ostvariti na dva načina, koristeći piezoelektrike te korištenje kapacitivnosti. Piezoelektrici su materijali koji svoju deformaciju mogu pretvoriti u električni impuls te obratno, električni impuls mogu pretvoriti u mehaničku deformaciju. Vrlo su korisni te njihova primjena varira od senzora koji vibracije akustičnih instrumenata pretvara u električne signale kako bi se oni mogli snimiti i obraditi do okidača u đepnim upaljačima koji svojom deformacijom bacaju iskru potrebnu za započinjanje vatre. Od tog piezoelektričnog materijala se može napraviti opruga te bi kompresija i dekompresija opruge mogla davati električni signal ekvivalentan iznosu sile na masu. Takva izvedba je vrlo skupa ali vrlo precizna za promatranje nekih pojava primjerice visokofrekventnih vibracija.

Druga mogućnost je korištenje kapacitivnosti kao mjeru kompresije i dekompresije opruge. Ako je masa ovješena na opruzi jedna ploča kondenzatora, onda je površina na kojoj se sama opruga ovješena druga ploča kondenzatora. Ako su te dvije ploče pod naponom, kompresija i dekompresija opruge približava i udaljava jednu ploču (masu) u odnosu na drugu ploču (površinu) te se kapacitet povećava odnosno smanjuje što opisuje sljedeća jednadžba.

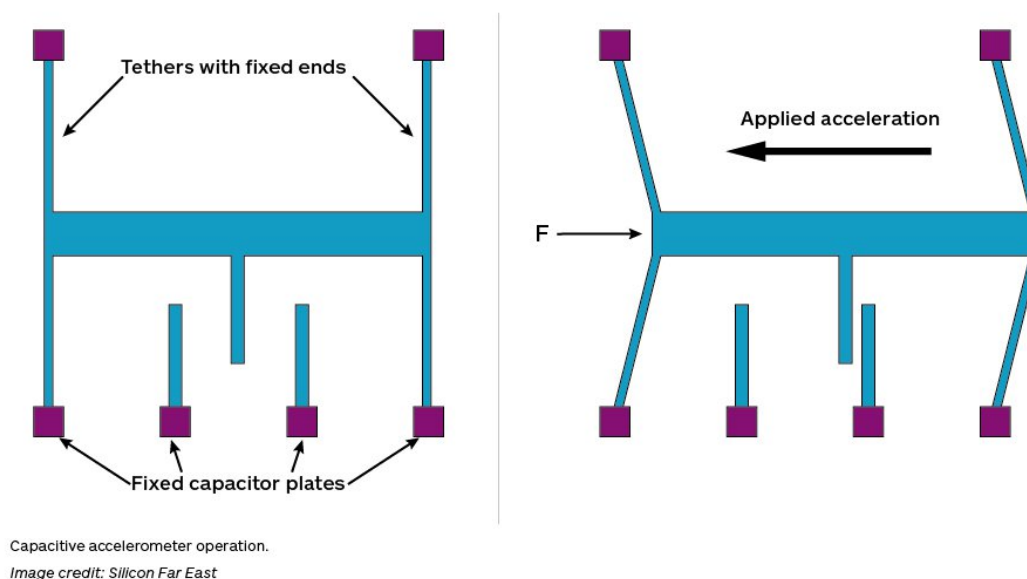
$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Jedina promjenjiva varijabla je udaljenost d . Princip rada vidljiv je na slici 2.1.

Kako bi se dimenzije akcelometra u potpunosti smanjile potrebno je razviti takav kapacitivni elektromehanički uređaj napravljen od silicija koji bi bio u nekom od adekvatnih pakiranja za integrirane krugove. Također kako bi bili u mogućnosti promatrati silu u prostoru potrebno je napraviti pojedini senzor za svaku od tri prostorne koordinate te kako bi one bile u što većoj mjeri usklađene potrebno je sve ostvariti unutar jedne površine silicija kako bi bili skupa unutar integriranoga kruga u fiksnoj poziciji.

Žiroskop

Žiroskop je uređaj koji se sastoji od rotirajućeg diska koji se nalazi unutar kardan-



Slika 2.1: Princip rada kapacitivnog akselometra (preuzeto sa insights.globalspec.com)

skog zgloba (eng. *gimbal*). Rotirajući disk ima svoju kutnu količinu gibanja koja je promjenjiva jedino onda kada se na rotirajući disk djeluje silom, u protivnom disk se rotira slobodno u ravnini u kojoj je zavrćen. Kardanski zglob je konstrukcija prstenja oko tog diska koji se oko diska slobodno može rotirati u svim smjerovima bez da utječe na poziciju diska odnosno idejno ne djeluje silom na taj disk. Ovakav uređaj je neznamjenjiv i jedan od najbitnijih komponenti svih letjelica jer uvijek letjelici daje referentnu točku iz koje se može zaključiti točan položaj iste u zraku. Koristeći varijabilne otpore odnosno potencijometre postavljene na osovine kardanskog zgloba, točna pozicija se može pretvoriti u električni signal koji se dalje može obrađivati i koristiti primjerice za automatsku korekciju pozicije bilokakvog projektila ili letjelice što nudi mogućnost autopilota. Također, kako je brzina prva derivacija puta u vremenu, tako je i kutna brzina derivacija promjene kuta u vremenu te se iz brzine promjene kuta može izračunati i kutna brzina prilikom rotacije žiroskopa. Ovakva izvedba žiroskopa je relativno velikih dimenzija te nikako nije primjerena za ugradnju u uređaje malih dimenzija kao što je to nekakav mobilni uređaj. Za dizajn uređaja koji je dovoljno malih dimenzija potrebno je opet okrenuti se elektromehaničkim jedinicama implementiranim u poluvodiču. Kod takve implementacije nije moguće imati rotirajući disk i kardanski zglob što znači da na ovakvoj skali nije moguće ostvariti pravi žiroskop koji bi konstantno pratio poziciju uređaja ali je moguće napraviti uređaj koji mjeri kutnu brzinu. Takav uređaj se sastoji od vibrirajuće strukture, pojednostavljeno, dvije mase koje titraju u suprotnim smjerovima. Prilikom rotacije, mase se više ne nalaze u

inercijskom sustavu već u akceleriranome što znači da na njih djeluju inercijalne sile. Kada je sustav u rotaciji unutar njega djeluju razne sile kao što su centrifugalna, centripetalna i Coriolisova sila. Coriolisova sila je inercijska sila koju tijela doživljavaju prilikom gibanja u rotiranom okviru promatranja. Sveprisutna je na planeti Zemlji te je vidljiva prilikom puštanja značajne količine vode u umivaoniku kao smjer vrtloženja vode i zaslužna za uragane. Smjer djelovanja Coriolisove sile je okomit na smjer gibanja te na smjer rotacijskog vektora vidljivo na slici ??.

Magnetometar

Magnetometar je senzor koji mjeri jačinu magnetnog polja koristeći pojave u elektromagnetizmu. Promjena magnetnog polja može inducirati napon unutar vodiča koji se nalazi u blizini no na taj se način može detektirati samo promjena. Za mjerenje magnetnog polja koristi se Hallov efekt. Hallov efekt je fizikalna pojava koja javlja prilikom gibanja nabijene čestice kroz magnetno polje. Električki nabijena čestica unutar magnetnog polja mijenja svoju putanju te počinje skretati i u slučaju gibanja po beskonačnoj površini počinje svoje kružno gibanje pri čemu centripetalnu silu predstavlja Lorenzova sila. Pri ograničenoj površini nosioci naboja putuju po vodiču prateći krivulju u smjeru u kojemu na njega djeluje Lorenzova sila te se na taj način istovrsni nosioci nađu na istoj strani vodiča te nisu nasumično raspršeni po njemu. Ta polarizacija predstavlja napon koji se može izmjeriti pri čemu iznos tog napona ovisi o kutu između silnica magnetnoga polja i vodiča te samom intenzitetu magnetnoga polja. Kako bi se nosioci naboja gibali unutar vodiča potrebno je vodič spojiti na naponski izvor energije te kako bi oni imali prostora putovati na jednu od strana vodiča on mora biti plosnat i veće površine. Primjer principa rada magnetometra vidljiv je na slici ??.

Svaka od opisanih komponenata predstavlja samo dio pojedinog senzora i to dio koji mjeri pojave u samo jednom smjeru. Kako bi se dobila kompletna slika potrebno je koristiti tri komponente, po jedna za svaki smjer u koordinatnom sustavu. Kako bi se to postiglo potrebno je osmisliti arhitekturu poluvodičke pločice te paziti na preciznost i ispravno pozicioniranje svake komponente kako bi ona mjerila točno svoj smjer u odnosu na druge. Ovakvi senzori dolaze često u pakiranju kao pojedini čipovi ili kao jedna cijela IMU cjelina odnosno SiP (eng. System in Package).

Ovakvih IMU sustava za razvoj uređaja na tržištu ima mnogo. Neki takvi su ICM-20948 tvrtke TDK i BMI serija IMU senzora tvrtke Bosch koji su više industrijski orijentirani te postoje i oni orijentirani za hobiste i razvoj prototipova primjerice razvojne pločice tvrtki *Adafruit* i *SparkFun*. Senzor ICM-20948 jedan je od najraširenijih IMU senzora u području znanosti i industrije iz razloga što zahtjeva vrlo malo snage za pokretanje (2.5mW) (TDK) što je vrlo proizvoljno za sustave napajane bate-

rijom kao što su to mobilni telefoni ili nekakvi IoT (eng. *Internet of Things*) uređaji. Također nudi i digitalni procesor pokreta (eng. *Digital Motion Processor - DMP*) koji služi tome da se algoritmi analize pokreta mogu izvoditi na tom procesoru čime se rasteće glavni procesor ili mikrokontroler što dodatno štedi energiju. Dolazi u QFN (eng. *Quad Flat No-leads*) pakiranju te je u slučaju nabavke samo takvoga čipa potrebno je izraditi vlastitu tiskanu pločicu što je poželjno u slučaju potrebe za nekim prilagođenim rješenjem no u slučaju izrade prototipa dodaje još jedan zahtjevan proces u izradu što nije poželjno. Neke kineske kompanije izrađuju već gotove tiskane pločice koje se mogu nabaviti što je vrlo poželjno za izradu prototipa. Druga vrsta takvih senzora su senzori za izradu jednostavnih prototipa i hobiste i primjeri takvih su Adafruit L3GD20H i SparkFun Razor IMU. Adafruit IMU razvojno okruženje u sebi sadrži čip L3GD20H tvrtke ST te nudi priključke te pretvarače napona kako bi se ova razvojna pločica mogla spojiti sa popularnim razvojnim okruženjima kao što je to Arduino ili ESP32. Razor IMU sadrži čip MPU-5250 također tvrtke TDK koji je prethodnik već navedenog čipa ICM-20948 te u trenutku pisanja ovoga rada je označen sa EOL (eng. *End Of Life*) te proizvođač preporučuje korištenje trenutne ICM verzije čipa. Popularna sučelja kojima se međusobno razvojne platforme i senzori povezuju su I2C i SPI. Bitna razlika između ICM-20948 i L3GD20H je u logičkim naponskim razinama. ICM za komunikaciju koristi maksimalnih 1.95V (TDK) što se bitno razlikuje od naponskih razina razvojnih okruženja pri čemu Arduino koristi 5V TTL i ESP32 koristi 3.3V TTL. Za korištenje sa takvim okruženjima potrebno je koristiti most za pretvorbu signala primjerice PCA9306 most za pretvorbu I2C signala korišten u Pollind (2018). Prednost ICM čipa u odnosu na ostale navedene je mogućnost napajanja naponom od 1.8V pri čemu zahtjeva 3.11mA struje. U usporedbi sa L3GD20H kojemu je potrebno 3V te zahtjeva 5mA struje zahtjeva znatno manje snage što je primjerenije za rješenja koja ovise o baterijskim napajanjima primjerice ugrađeni IoT sustavi ili mobilni telefoni. ICM može koristiti samo pojedine komponente te svaka od komponenti može podržavati određenu brzinu uzorkovanja. Akselometar maksimalno može slati svoja mjerenja frekvencijom od 4.5kHz, žiroskop 9kHz te magnetometar 100Hz. U dokumentaciji čipa L3GD20H nisu navedene točne frekvencije uzorkovanja po komponenti, samo su navedene podržane frekvencije između 11.9Hz i 757.6Hz. Ove vrijednosti predlažu da je za potrebu snimanja nekakvih visokofrekventnih vibracija bolji odabir ICM čip no za potrebe snimanja pokreta djelova tijela visoka frekvencija nije bitan kriterij. Iz tog razloga valja razmotriti još jedan set IMU senzora a to je onaj koji se nalazi u pametnome telefonu. Svaki pametni telefon u sebi ima jedan IMU senzor koji tom telefonu daje dodatne funkcionalnosti kao navigaciju, kom-

pas, rotaciju orijentacije ekrana i kao način upravljanja igrama. Mana ovoga pristupa je ta što sam model i specifikacija senzora nisu javno dostupni podaci ne iz razloga tajnosti i intelektualnog vlasništva već proizvođači ne smatraju to bitnim informacijama. Iz tog razloga nije moguće referencirati tehničku dokumentaciju i saznati neke ključne informacije u slučajevima kada je vrlo bitna preciznost i performansa senzora. Prednost ovoga pristupa je ta što svi mobiteli podržavaju uzorkovanje frekvencijom od 100Hz što je prema Nyquistovom teoremu dovoljno za snimanje periodičnih pokreta od gotovo 50Hz što je i više nego dovoljno. Također ovakav pristup umanjuje e-otpada jer je jedan mobilni telefon već gotov sustav sa vlastitim napajanjem, načinom punjenja, sučeljem za upravljanje (dodir) te mogućnošću spremanja podataka odnosno slanja podataka preko bluetooth veze ili WiFi mreže. Također pametni telefoni imaju u sebi vrlo moćne procesore te bi se na njima mogla i izvoditi sama obrada podataka ukoliko za time ima potrebe. Kako gotovo svaka osoba posjeduje minimalno jedan takav uređaj, skupljanje podataka u velikoj količini na taj način postaje vrlo jednostavan i jeftin. Sličan pristup se koristi u Bevilacqua et al. (2018), radu koji koristi samo jedan IMU senzor postavljen na polovici potkoljenične kosti te uzorkuje signal frekvencijom od 102.4Hz te putem bluetooth veze šalje podatke na pametni telefon na kojemu se sami podaci obrađuju te je preciznost prepoznavanja pokreta vrlo visoka.

2.5. Analiza dostupnih baza podataka

Mnogo je znanstvenih radova napisano na temu ljudskih pokreta i analizu istih. Kako bi se ljudski pokreti analizirali potrebno ih je na neki način snimiti a to se može ostvariti jednom od metoda analiziranih u pijašnjem poglavlju. Kako bi znanost mogla napredovati te kako bi se drugi ljudi mogli uvjeriti u rezultate rada, mnogi autori svoje podatke stavljaju javno dostupnima. Ovo će se poglavlje baviti analizom već dostupnih baza podataka, metodom prikupljanja tih podataka te njihovom svrhom. Većina dostupnih podataka su prikupljeni podaci o hodu (eng. *gait*). Razlikuju se u broju sudionika, metodi prikupljanja podataka, i svrsi prikupljanja tih podataka.

Prva razmatrana baza podataka je *whuGAIT* autora Zou et al. (2020). U svome radu autori razmatraju mogućnost biometrijske identifikacije i autentifikacije osoba koristeći specifične karakteristike hoda. Skup podataka sastoji se od podataka prikupljenih sa pametnog telefona koji se nalazio u džepu osobe koja je bila snimana pri čemu su se snimali tri osi akselometra i tri osi žiroskopa frekvencijom uzorkovanja od 50Hz. U prikupljanju podataka je sudjelovalo 118 različitih osoba. Skup podataka je podjeljen u 8 podskupova od kojih su podskupovi 1-4 namijenjeni za identifikaciju

osobe, 5 i 6 za autentifikaciju i skupovi 7 i 8 za razdvajanje podataka između onih u kojima se vrši hodanje i onih u kojima se ne hoda kako bi se korištenjem neuronske mreže razdvojio kontinuirani tok podataka. U svim podskupovima su podaci zapisani u tekstualnu datoteku kao CSV vrijednosti. Svaka tekstualna datoteka predstavlja jednu os akselometra odnosno žiroskopa te svaka linija unutar datoteke je uzorak hoda neke osobe. U posebnoj datoteci se nalaze brojevi koji predstavljaju pojedinu osobu kojoj snimka hoda pripada. Svrha ovih podataka je treniranje neuronske mreže koja rješava problem n-klasne klasifikacije odnosno pokušava prepoznati i identificirati odnosno autentificirati osobu bazirano isključivo na njezinom hodu. Koristeći ove podatke Zou et al. (2020) su dobili preciznost od 93% u identifikaciji i autentifikaciji no ovi podaci nisu iskoristivi za klasifikaciju pojedinog pokreta jer nije anotirana za pojedine pokrete te se ne može iskoristiti za treniranje takve mreže no pokazuju da je moguće snimiti vrlo precizne karakteristike pokreta koristeći samo jedan pametni telefon.

Sljedeća razmatrana baza podataka je ona koju su snimili Luo et al. (2020). Njihov cilj je bio napraviti bazu koja sadrži podatke o načinu hoda po raznim površinama kako bi uvidili performanse hoda. Prilikom snimanja sudjelovalo je 30 osoba (15 ženskih i 15 muških). Svaka osoba je na sebi imala po 6 IMU senzora: lijeva i desna potkoljenica, lijeva i desna nadkoljenica, donji dio leđa oko L1 kralješka i desno zapešće. Svaka osoba je hodala ravno bez promjene smjera 6 puta po ravnoj asfaltiranoj površini, uzbrdici odnosno nizbrdici, stepenicama u oba smjera, travnata površina, neravna kamena cigla i šljunak. Podaci svakoga od 6 senzora su pohranjeni u svojoj CSV datoteci označenoj šifrom iz koje je vidljivo na kojoj se lokaciji nalazio senzor te po kojoj površini osoba hoda. Podaci svake pojedine osobe se nalazi unutar vlastitog direktorija. Svaki hod unutar direktorija dolazi i sa binarnom datotekom koja predstavlja te podatke. Uz sve te podatke Luo et al. (2020) su također obradili i uveli u *Matlab* datoteku pod imenom `data.mat`. Ovakva baza podataka nudi razne mogućnosti poput klasificiranja površine po kojoj osoba hoda ili samo detekcija hoda općenito neovisno o površini. Autori su ponudili svoju bazu podataka sa svrhom da unaprijede već postojeće baze ljudskoga hoda koje su zbog tehničkih ograničenja snimane isključivo u laboratorijskim uvjetima te kao takve nisu bile primjerene za primjere iz stvarnoga svijeta. Razvojem IMU tehnologije i bežične komunikacije Luo et al. (2020) odlučili su napraviti set podataka snimajući hod u stvarnome svijetu. Ova baza podataka također nije primjerena za potrebe ovoga rada jer su anotirani samo tereni po kojima ispitanici hodaju te se ne klasificira pokret.

Bazu podataka pod imenom HuGaDB su ostvarili Chereshev i Kertész-Farkas (2018). Prilikom provedbe radnji snimljeno je 18 različitih sudionika koji su imali

6 IMU senzora na sebi te 2 EMG senzora. IMU senzori su postavljeni na nadkoljenice, podkoljenice te stopala sudionika pri čemu su snimali radnje: hodanje, trčanje hodanje uz stepenice, hodanje niz stepenice, samo sjedenje, sjedenje iz stajaćeg položaja, ustajanje iz sjedećeg položaja, stajanje, vožnje bicikla, dizanje unutar dizala, spuštanje unutar dizala i sjedenje u automobilu kao putnik. Sve radnje su u potpunosti segmentirane što znači da su ispravno anotirane te spremne za treniranje neuronske mreže. Podaci su pohranjeni u tekstualne datoteke u kojima svaki stupac predstavlja vrijednosti pojedinog segmenta svakog senzora pri čemu je pozicija senzora označena sa oznakom strane na kojoj se nalazi R i L te pozicijom na nozi F, S i T (eng. *Foot, Shin i Thigh* redom). Uz poziciju senzora oznaka *acc* i *gyro* označava pojedinu komponentu IMU senzora te oznake *x*, *y* i *z* predstavljaju pojedinu os. Tako jedan segment s oznakom *acc_rs_x* označava podatke akselometra na desnoj potkoljenici u *x* osi. Svaka tekstualna datoteka se sastoji od identifikatora sudionika, rednog broja ponavljanja, aktivnosti, verzije i prefiksa koji označava datoteku sa podacima. Tako primjerice datoteka sa imenom *HGD_v1_walking_17_02.txt* označava podatke prve verzije baze podataka u kojoj osoba pod rednim brojem 17 hoda po drugi put. Autori Chereshev i Kertész-Farkas (2018) na svojoj *github* stranici nude već gotove skripte koje služe učitavanju podataka u matlab i python programe te skriptu koja tekstualne datoteke pretvara u *SQLite* bazu podataka. Ova baza podataka se ne bavi pojedinim djelom tijela no uzimajući samo podskup senzora bilo bi moguće ostvariti prepoznavanje akcije poput vožnje bicikla, hodanja i slično što je puno bliže klasifikaciji pokreta kakva se razmatra u ovome radu. Problematika ove baze podataka je navedena u uputstvima te nalaže da su zbog greške u žiroskopu neke vrijednosti krive jer je snimak pojačan 10 puta što je dovelo do *klipinga* te je takav signal gotovo neiskoristiv. Svaki takav slučaj je dokumentiran u tablici te se po potrebi ti podaci mogu izbjeći.

Poslijednja razmatrana baza podataka je jedna od najvećih baza podataka hoda sa kliničkim anotacijama koju su snimili Horsak et al. (2020). Podaci su prikupljeni u Austrijskom rehabilitacijskom centru od 2007. do 2018. godine. U prikupljanju je sudjelovalo 2085 pacijenata. Svaki je pacijent trebao bez ikakvih pomagala prehodati 10 metara preko potisnih ploča (eng. *Pressure plate*) koje su snimale GRF (eng. *Ground Reaction Force*) odnosno silu pritiska stopala. Svaki pacijent je svoj hod ponovio 10 puta te je ponavljao hod na tjednoj bazi. Snimke su anotirane prema dijagnozi te prema razini rehabilitacije kako bi se mogle usporediti i sa drugim pacijentima te kako bi imali uvid u proces rehabilitacije. Problematika ove baze podataka je u tome što se za snimanje pokreta ne koriste inercijski senzori već se koristi set potisnih ploča koje snimaju samo težinu kojom pacijenti djeluju na njih te takva baza podataka nije

primjerena za analizu pojedinih pokreta već samo hoda.

2.6. Stvaranje vlastite baze podataka

Za stvaranje vlastite baze podataka potrebno je definirati svrhu i ciljeve te baze a zatim odrediti metodu prikupljanja podataka. U ovome će radu fokus biti primarno na stvaranje baze podataka korisne za analizu pokreta koja bi se mogla upotrijebiti u svrhe fizikalne terapije koljena. Za snimanje općenitih pokreta može se iskoristiti mnogo senzora postavljenih po cijelome tijelu ali za potrebe snimanja jednoga zgloba potrebno je koristiti dva senzora, po jedan sa svake strane uda kojeg zglob povezuje. U konkretnom primjeru koljena to su nadkoljenica i potkoljenica.

Ovisno o razini preciznosti, cjeni i dostupnosti potrebno je odabrati i same senzore za prikupljanje podataka. Redovito se sustavi senzora za istraživačke svrhe rade baš za tu namjenu te postoji mnogo sustava otvorenog koda i otvorenih komponenti koji se mogu iskoristiti. Razni proizvođači nude i svoja već gotova komercijalna rješenja za koje garantiraju rad i pružaju podršku ali takvi sustavi ponekad nisu adekvatni za istraživačke svrhe zbog svoje zatvorenosti i potencijalnog manjka interoperabilnosti sa drugim uređajima i programima. U ovome radu, zbog jednostavnosti, koristiti će se pametni telefon.

Tipičan životni vijek jednog pametnog telefona u prosjeku je dvije godine nakon čega korisnici redovito kupuju nove modele jer stariji postaju neadekvatni po pitanju trajanja baterije, količine memorije, performansama komponenti i slično. Svaki takav stariji model telefona vrlo često stoji nekorišten iako je još uvijek funkcionalan. Gotovo svaki pametni telefon u sebi sadrži IMU senzor te u sebi već ima povezivosti poput *WiFi* i *Bluetooth*. Uzimajući u obzir također da pametni telefoni imaju i ugrađenu bateriju koja može još uvijek biti dovoljno dugotrajna, ekran osjetljiv na dodir kao metodu interakcije i to sve ukomponirano u uređaj koji svojim dimenzijama stane u džep dolazimo do zaključka da su pametni telefoni i više nego adekvatni za prikupljanje podataka. Također, vrlo je realna pretpostavka da svaka osoba ima pristup minimalno jednome, vjerojatno i dva pametna telefona što čini prikupljanje velike količine podataka od većeg broja sudionika znatno jednostavnijim. Koristeći držače pametnog telefona za trčanje ili marame, uređaji se mogu postaviti osobi na bilo koji dio tijela vrlo jednostavno i svaka bi osoba iz svoga doma mogla pridonjeti stvaranju baze podataka.

Aplikacija koja očitava vrijednosti može biti napravljena posebno, no na tržištu postoje gotove aplikacije, redovito otvorenoga koda, koje se već time bave. Bitno

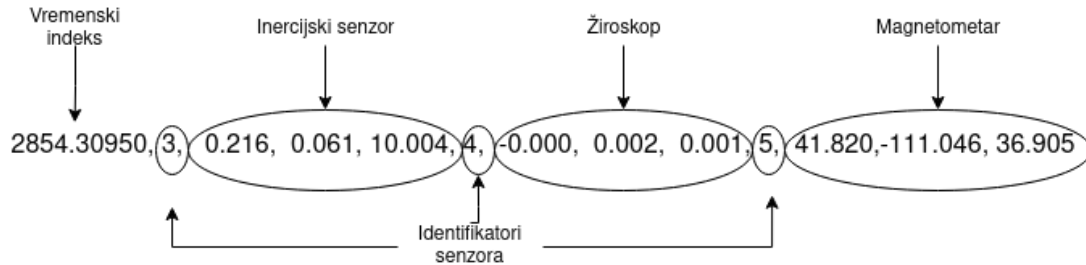
je pronaći odgovarajuću aplikaciju no u slučaju da takva ne postoji potrebno je izraditi svoju. Mnoge aplikacije u trgovini ne nude selekciju samo određenih senzora već snimaju sve senzore kojima pametni telefon raspolaže, te u većini slučajeva nude formatiranu pohranu podataka isključivo u memoriju uređaja što je vrlo neadekvatno ako bi se uređaji koristili primjerice za obradu informacija u stvarnome vremenu ili za centralizirano prikupljanje podataka primjerice na računalo. Neke od takvih aplikacija su *Sensor Data* i *phyphox* koje se koriste u edukaciji te su u doba COVID pandemije nezamjenjivi alati za vršenje fizikalnih eksperimenata kao dio školske zadaće. Nedostatak ovih aplikacija je taj što sve podatke snimaju na lokalnoj memoriji uređaja te nisu primjerene za obradu podataka u stvarnome vremenu. Aplikacija *Sensorstream IMU+GPS* ne nudi grafičke prikaze podataka već u svojoj vrlo bazičnoj funkcionalnosti nudi odabir senzora uz prikaz trenutnih vrijednosti istih te odabir akcije koju želimo napraviti sa tim podacima. Ponuđene su funkcije spremanja vrijednosti u CSV (*Comma separated value*) formatu, slanje podataka koristeći UDP protokol te kombinaciju oboje. Za slanje podataka korištenjem UDP protokola potrebno je navesti određenu IP adresu uređaja te *port* na kojemu uređaj očekuje promet. Također nudi 4 frekvencije uzorkovanja označene sa *slow*, *medium*, *fast* i *fastest*. Te frekvencije uzorkovanja nisu dobro dokumentirane te nigdje nije navedeno koliko one iznose zapravo. Za mjerenje tih frekvencija može se iskoristiti alat *wireshark*. Wireshark je alat otvorenoga koda koji služi za analizu mrežnoga prometa. Vrlo raširen i nezamjenjiv alat za svaku granu računarstva koja se bavi mrežnim prometom. Nudi razne opcije od kojih je jedna od moćnijih ugrađeni filter koji vrlo precizno može naći određeni paket unutar snimke mrežnog prometa. Koristeći tu mogućnost promet se može snimiti na računalo te kasnije filtrirati samo one pakete koje mobilni uređaj šalje. Gledajući vremenske indekse prvoga i posljednjega paketa dobivamo ukupno trajanje snimanja te znajući točan broj paketa može se izračunati približna frekvencija uzorkovanja te su one prikazane u tablici 2.1.

Uzorkovanje	Trajanje (s)	Broj poruka	Frekvencija
Slow	12.21	61	5
Medium	3.98	61	15
Fast	6.85	344	50
Fastest	2.14	299	124

Tablica 2.1: Izmjerene frekvencije uzorkovanja

Također koristeći *wireshark* alat može se jedan paket analizirati i vidjeti format

podataka koju uređaj šalje. Podaci su u CSV formatu u kojima se šalje vremenski indeks, identifikacijski brojevi senzora te same vrijednosti senzora kako se vidi u slici 2.2. Svi podaci prikazuju vrijednosti redom x , y , i z osi.



Slika 2.2: Primjerak primljenih podataka

Kako bi se ti podaci primili i pohranili na adekvatan način potrebno je napraviti program klijent koji osluškuje na određenim portovima. Implementacija tog programa u ovome radu biti će napravljena koristeći skriptni jezik python.

Python je vrlo popularan jezik mnogih mogućnosti koji je vrlo jednostavan za naučiti i koristiti te zbog svoje popularnosti raspolaže mnogim bibliotekama. Neke od tih vrlo korisnih biblioteka koje će biti korištene u ovome radu su *numpy*, *matplotlib* te *socket*. Python se kao skriptni jezik izvodi liniju po liniju te se svaka linija interpretira tek kad ona dođe na red za izvršavanje što ukida proces prevođenja programa u strojni kod kao što je to primjerice potrebno kod programskog jezika C. Iz tog razloga je vrijeme izvršavanja takvoga koda znatno dulje što znatno utječe na performanse programa. Kako bi se izvođenje kompliciranijih matematičkih operacija znatno ubrzalo te kako bi se ponudio veći opseg već gotovih funkcija napravljena je biblioteka *numpy*. Numpy je biblioteka koja nudi gotovo sve potrebne funkcije za izradu programa koji se koriste u znanosti. Implementira višedimenzionalne matrice te sve funkcije za operaciju nad njima uključujući promjenu oblika matrice te sve matrične operacije. Također nudi i funkcije za Fourierovu transformaciju, statističku obradu, generatore nasumičnih brojeva i slično. Numpy implementacija matrica je znatno bliža onakvim matricama kao što su u programskome jeziku C te su kao takve memorijski znatno manje zahtjevne od originalnih matrica koje nudi python. Također kako bi operacije nad matricama bile brze operacije su implementirane u programskome jeziku C te prevedene unaprijed tako da biblioteka nudi vrlo jednostavnu sintaksu uz jako veliku brzinu izvođenja te manju veličinu datoteke pri pohrani podataka. Biblioteka *socket* nudi funkcije za umreživanje koje su potrebne kako bi se podaci uspješno primili sa mobilnih uređaja je *matplotlib* koji je potreban za vizualizaciju podataka u obliku grafova.

Listing 2.1: Ostvarivanje veze na strani klijenta

```
1 def init_client(srv_port):
2     client_socket = socket.socket(family=socket.AF_INET, \
3                                   type=socket.SOCK_DGRAM)
4     client_socket.bind((self_ip, srv_port))
5     return client_socket
6
7 client = []
8
9 client.append(init_client(port))
10 print("UDP_client_up")
```

U kodu 2.1 je vidljiv način na koji se koristi biblioteka *socket*. Svaki mobilni uređaj predstavlja instanca klase *socket* koja se sprema u listu klijenata *client* što omogućuje povezivanje proizvoljnog broja mobilnih senzora pri čemu svaki senzor treba imati svoj poseban port. Port na računalu bi trebao biti slobodan odnosno niti jedna druga aplikacija ne bi smjela koristiti taj port za svoj promet. Dobra praksa nalaže da se za osobne potrebe koriste portovi brojeva većih od 1024 kako bi se izbjegli mogući zauzeti portovi nekakvih standardnih protokola kao što su *https* i slični. U ovome slučaju mobilni uređaj s indeksom 0 koristi port broja 5555 te svaki sljedeći zauzima port $5555 + i$ pri čemu je i indeks uređaja. Točan broj je potrebno unjeti ručno na svaki uređaj koji šalje podatke. Stvaranje instance *socket* odvija se u liniji 2 i 3 pri čemu se u argumentu treba navesti tip veze. Za familiju veze se navodi *AF_INET* što predstavlja IP protokol te pod tip se navodi *SOCK_DGRAM* što označava korištenje UDP protokola. UDP (eng. *User Datagram Protocol*) je jedan od osnovnih transportnih protokola koji podatke prenosi po principu *best effort*, pretpostavlja se da su datagrami došli do odredišta u ispravnome redosljedu te se ne potvrđuje primitak datagrama. Ovakav protokol ne garantira cjelovitost podataka no nudi manje zagušenje prometa zbog nedostatka potvrđivanja svakog primljenog datagrama i retransmisije u slučaju gubitka te se iz tog razloga koristi za prijenos videa ili VoIP (eng. *Voice over IP*) pozive. U liniji 4 se instanca razreda *socket* povezuje s odgovarajućim portom na odgovarajućem mrežnom uređaju koji je predstavljen vlastitom IP adresom *self_ip*. Na kraju funkcija *init_client* vraća instancu kako bi bila spremljena u klijentsku listu.

Listing 2.2: Primanje podataka

```
1 while(True):
2     sample = []
3     for phone in client:
```

```

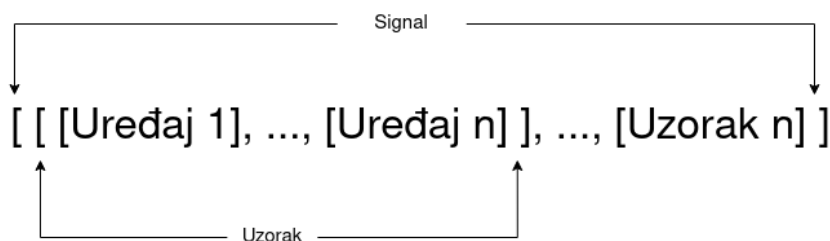
4         bytes_address_pair = phone.recvfrom(buffer)
5         data = []
6         message = bytes_address_pair[0].decode().split(",")
7         for i in message:
8             data.append(i.strip())
9
10        # filteri podataka
11        if "4" not in data:
12            continue
13
14        for i in data_filter:
15            data.pop(i)
16
17        if len(data) != 0:
18            sample.append(data[:6])
19
20    if len(sample) != 0:
21        signal.append(sample)
22    else:
23        continue

```

U odsječku koda 2.2 prima se datagram svakog mobilnog uređaja. Svaki datagram se uzima iz međuspremnik koji je veličine 1024 bajta. Svaki datagram se sastoji od samih podataka (u 6. liniji koda pod indeksom 0) te IP adrese pošiljatelja koja u ovoj implementaciji nije potrebna te se može izostaviti. Nad podacima se vrše obrade poput uklanjanja bjelina (linija 8.) te rastavljanje podataka iz jednog monolitnog zapisa podataka u više posebnih podataka pomoću `split` funkcije uzimajući zarez kao graničnik. Zatim te podatke valja filtrirati pri čemu se uklanja *vremenski indeks*, identifikatori senzora te podaci magnetometra vidljivi na slici 2.2. Eksperimentalno se pokazalo da se pri prvih nekoliko mjerenja od početka slanja podataka sa mobilnih uređaja izostavljaju vrijednosti žiroskopa te se gledajući prisutnost tih vrijednosti dodatno vrši čekanje na spremnost svih senzora u mobilnome uređaju. U ovome kodu to se vrši uvjetovanjem u liniji 11. Struktura podataka je prikazana u slici 2.3.

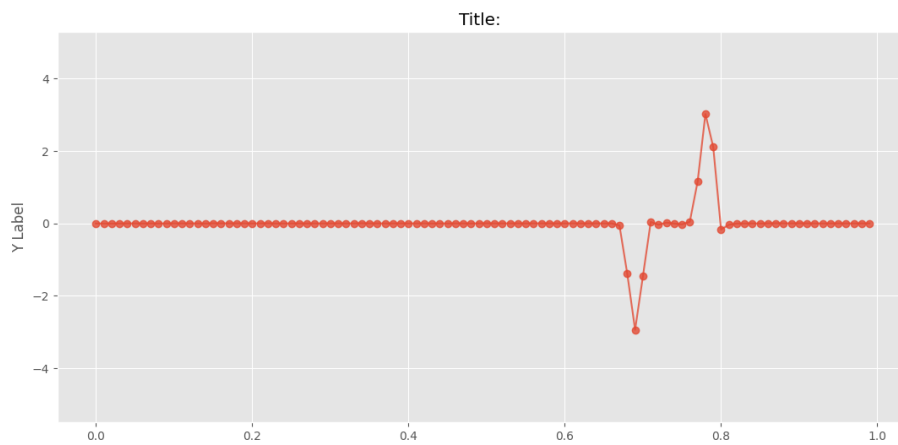
Uzorak jednoga uređaja je lista vrijednosti njegovih senzora. Jedan uzorak je lista uzoraka **svih** uređaja. Signal je samo lista uzoraka. Na ovaj se način akcija može snimiti i koristeći biblioteku *numpy* pohraniti na računalo za daljnju obradu.

Kako bi se prikupili odgovarajući podaci za treniranje i uporabu neuronske mreže potrebno je iz toka podataka izdvojiti pojedina ponavljanja vježbi kako bi samo ti bitni



Slika 2.3: Struktura podataka

segmenti ili bili prikupljeni za treniranje neuronske mreže ili kako bi se pojedini segment predao neuronskoj mreži na klasifikaciju. Mnogi radovi primjerice Bevilacqua et al. (2018), Jung et al. (2015) i Bonnet et al. (2016) spominju pronalazak karakterističnih točaka unutar signala kao jednu od glavnih faza predobrade signala. Ovisno o željenom rezultatu moguće je promatrati statičke osobine signala kao što su to prosjek, standardna devijacija, varijancija i slično te dinamičke kao što su to energija, prosjek energije, odnos harmonika, energetska entropija i slično (Bevilacqua et al., 2018). Također je moguće napraviti posebne klasifikatore koji su u suštini neuronske mreže trenirane posebno za detekciju pojedinih osobina signala kao što su to napravili Jung et al. (2015). Najjednostavniji pristup tome je promatranje samo jedne osi određenoga senzora u nekome vremenskom periodu kao što su to napravili Bonnet et al. (2016). Promatranjem samo jedne osi jednoga senzora fokus može biti na pseudoperiodičnosti tog signala te se detekcija periodičnosti i segmentacija može odviti pomoću detekcije rubnih vrijednosti. Izvođenjem jednostavnije vježbe poput ispruživanja potkoljenice (eng. *leg extension*) s obzirom na poziciju mobilnog uređaja koji se nalazi ekranom okrenutim od potkoljenice uspravno na potkoljenici može se sav fokus staviti na vrijednosti žiroskopa u x osi. Snimajući te iscrtavajući odgovarajuće vrijednosti na grafu vrlo je jasno vidljiv period te same karakteristike funkcije (slika 2.4). Dok se vježba ne izvodi signal je vrlo miran i iznosi približno 0. U trenutku početka pružanja potkoljenice zbog smjera rotacije mobilnog uređaja kutna brzina iznosi otprilike $-2.5rad/s$. Zatim se potkoljenica u stanju potpune ispruženosti smiri te kutna brzina iznosi 0. Pri spuštanju kutna brzina raste te također iznosi približno $2.5rad/s$, ali u ovom slučaju u pozitivnom smjeru. Uzeći ove vrijednosti može se ostvariti konačan automat koji prati vrijednosti signala te mjenja stanja u odnosu na iste pri čemu se pamti početak perioda. Ako se automat nađe u prihvatljivom stanju onda to predstavlja kraj periode te je poznat cijeli segment signala koji predstavlja jedno ponavljanje.



Slika 2.4: Primjer jednog ponavljanja vježbe, x - vrijeme, y - kutna brzina

2.7. Implementacija metode strojnoga učenja

2.8. Rezultati

3. Zaključak

Zaključak.

LITERATURA

Antonio Bevilacqua, Bingquan Huang, Rob Argent, Brian Caulfield, i Tahar Kechadi. Automatic classification of knee rehabilitation exercises using a single inertial sensor: a case study. Magistarski rad, Insight Centre for Data Analytics, University College of Dublin, Ireland, 2018.

Vincent Bonnet, Vladimir Joukov, Dana Kulić, Philippe Fraisse, Nacim Ramdani, i Gentiane Venture. Monitoring of hip and knee joint angles using a single inertial measurement unit during lower limb rehabilitation. *Sensors*, 16(6), 2016.

Roman Chereshevnev i Attila Kertész-Farkas. Hugadb: Human gait database for activity recognition from wearable inertial sensor networks. U van der Aalst Wil M P, Ignatov Dmitry I, Khachay Michael, Kuznetsov Sergei O., Lempitsky Victor, Lomazova Irina A., Loukachevitch Natalia, Napoli Amedeo, Panchenko Alexander, Pardalos Panos M., Savchenko Andrey V., i Wasserman Stanley, urednici, *Analysis of Images, Social Networks and Texts*, stranice 131–141, Cham, 2018. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-73013-4.

Seckiner D, Mallett X, Maynard P, Meuwly D, i Roux C. Forensic gait analysis - morphometric assessment from surveillance footage. *Forensic science international*, 296(57-66), 2019.

Wei Fang, Lianyu Zheng, Huanjun Deng, i Hongbo Zhang. Real-time motion tracking for mobileaugmented/virtual reality using adaptivevisual-inertial fusion. *Sensors*, 2017.

Brian Horsak, Djordje Slijepcevic, Anna-Maria Raberger, Catherine Schwab, Marianne Worisch, i Matthias Zeppelzauer. Gaitrec, a large-scale ground reaction force dataset of healthy and impaired gait. *Sci Data*, 7(143), 2020.

Jun-Young Jung, Wonho Heo, Hyundae Yang, i Hyunsub Park. A neural network-

based gait phase classification method using sensors equipped on lower limb exoskeleton robots. *Sensors*, 2015.

Yue Luo, Sarah Coppola, Philippe Dixon, Song Li, Jack Dennerlein, i Boyi Hu. A database of human gait performance on irregular and uneven surfaces collected by wearable sensors. *Sci Data*, 7(209), 2020.

Michael Pollind. Mini data capture. Github project, 2018.

TDK. *World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking™ Device*.

Q. Zou, Y. Wang, Y. Zhao, Q. Wang, i Q. Li. Deep learning-based gait recognition using smartphones in the wild. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 15(1):3197–3212, 2020.

Klasifikacija pokreta ljudskog tijela temeljena na podacima s inercijskih senzora

Sažetak

Sažetak na hrvatskom jeziku.

Ključne riječi: Ključne riječi, odvojene zarezima.

Title

Abstract

Abstract.

Keywords: Keywords.