

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.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Metode prikupljanja podataka	2
3. Analiza IMU senzora	10
4. Analiza dostupnih baza podataka	16
5. Stvaranje vlastite baze podataka	19
6. Implementacija metode strojnoga učenja	28
7. Zaključak	38
Literatura	39

1. Uvod

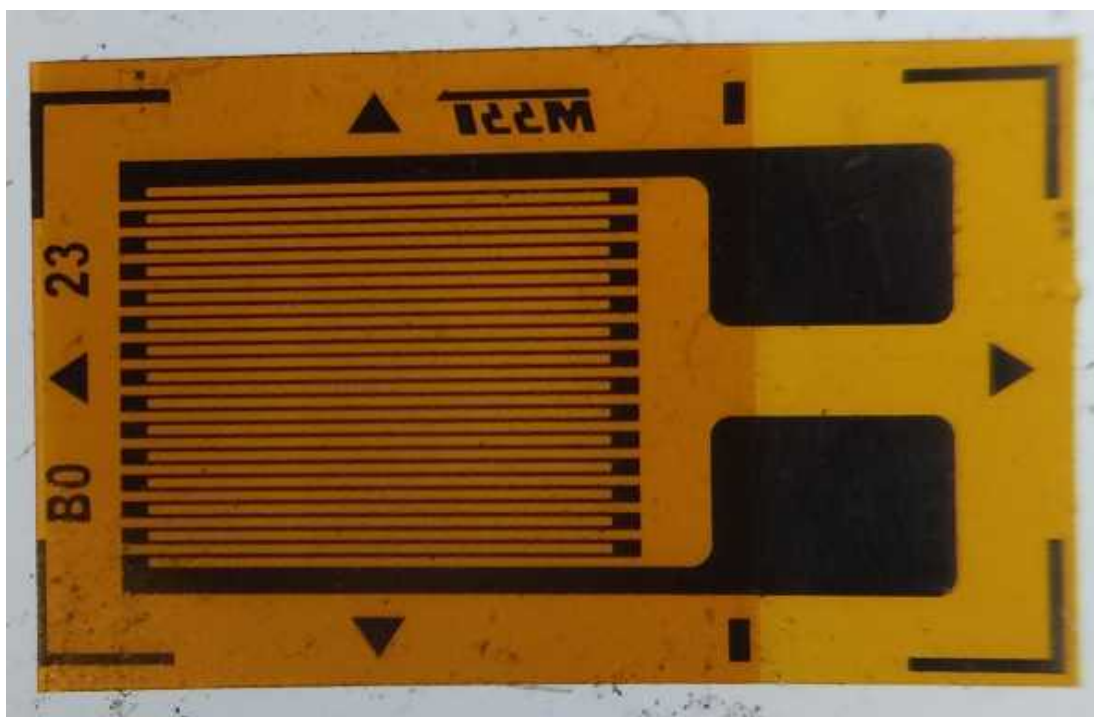
Karakteristike pokreta ljudskoga tijela vrlo su individualne te ovise o mnogo čimbenika kao što su genetika, odgoj te fizička sprema. Ti pokreti su toliko jedinstveni da se mogu koristiti za identifikaciju osoba dok su s druge strane toliko slični da čak i manje devijacije u tim pokretima također mogu 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 s igrama u virtualnoj stvarnosti (Fang et al., 2017), korištenje inercijskih (IMU) senzora za precizno snimanje hoda u svrhu 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 s posebno postavljenim vizualnim oznakama po dijelovima 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 dijagnosticiranje 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. Metode prikupljanja podataka

Podaci o ljudskim pokretima mogu se prikupljati koristeći različite metode i tehnologije. Svaka od tih tehnologija ima svoju granu primjene te možda neće biti adekvatna za primjenu u nekoj drugoj grani.

Prva razmatrana metoda prikupljanja informacija o pokretima je korištenje platformi sila. Platforme sila su elementi po kojima osoba hoda te u sebi ima elastično mjerilo deformacija odnosno tenzometrijski pretvornik prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1: Izgled mjerila deformacija (preuzeto sa *wikipedia.com*)

Ovakvo mjerilo mjeri uzdužnu deformaciju tako da se elastični vodič prilikom deformacije produlji odnosno skрати čime se zbog produljenja i sužavanja odnosno skraćivanja i širenja vodiča mijenja ukupan otpor i time se deformacija može izmjeriti. Ovisno o arhitekturi mjerila on mjeri deformaciju u nekome smjeru te kombinacijom više mjerila može se izmjeriti deformacija u sve tri osi. Na taj način može se dobiti

GRFV (eng. *Ground Reaction Force Vector*) koji predstavlja, prema trećem Newtonovom zakonu, silu reakcije i suprotna je utjecaju osobe koja djeluje na ploču. Osim ovakvih mjerila deformacija mogu se koristiti piezoelektrici koji svojom deformacijom stvaraju naboj koji se uz pomoć nabojskog pojačala pretvara u napon. Piezoelektrične platforme sila puno su preciznije ali su i znatno skuplje te ovisi o budžetu i o primjeni koja se tehnologija koristi. Ovakav pristup daje uvid isključivo u sile koje djeluju na stopala i distribuciju težišta što je vrlo povoljno za analizu hoda ali i za ništa drugo. Platforme sila vrlo su popularne pri mjerenju performansa sportaša te mnogi profesionalne sportske ustanove i klubovi ulažu u vlastite ploče kako bi mogli nadzirati svoje igrače. Ovakav pristup je korišten za prikupljanje jedne od najvećih baza podataka anotiranih za kliničku analizu (Horsak et al., 2020) opisanu u kasnijem poglavlju. Koristeći isto načelo, kako bi se lakše mogle pratiti sile koje djeluju na stopala prilikom raznih aktivnosti, moguće je napraviti uloške za cipele koje su također mjerila sila. Na ovakav način moguće je pratiti korake ispitanika bez postavljanja više velikih platformi sila te ograničavanje ispitanika na samo tu manju površinu što je za potrebe praćenja performansi sportaša u pojedinim sportovima idealno.

Jedna od metoda koja služi baš praćenju pozicija donjih ekstremiteta je korištenje egzoskeleta. Egzoskelet je naprava koja se postavi na vanjsku stranu ljudskoga tijela kako bi se njegovi dijelovi kretali skupa sa dijelovima tijela. Kako je svako tijelo različitih dimenzija egzoskelet se mora moći namjestiti prema fizionomiji osobe na koju se postavlja kako bi zglobovi bili u ravnini s osovima egzoskeleta. Za snimanje kretanja, na osovine egzoskeleta se postavljaju promjenjivi otpornici koji te osovine pretvaraju u goniometar - uređaj koji mjeri kuteve. Svaki pokret zgloba može se zapisati kao promjena otpora u vremenu. Za to je potrebno imati osovine na području kukova, koljena i skočnih zglobova. Ovakav pristup puno vjernije snima pokrete tijela od platformi sila jer se ne gleda samo sila reakcije podloge već se precizno mjere kutevi njegovih ekstremiteta u vremenu.

Problem korištenja egzoskeleta je taj što sam egzoskelet može značajno promijeniti način kretanja. Razlog tome je masa egzoskeleta koja ovisi o materijalima i izvedbi te način pričvršćivanja za ljudsko tijelo. Također promjenjivi otpornici snimaju kuteve ekstremiteta u samo jednoj ravnini te ne snimaju niti konstrukcija dopušta moguću rotaciju ekstremiteta u drugim smjerovima. Egzoskeleti mogu poslužiti za snimanje pokreta no njihova prava primjena nije u domeni prikupljanja podataka. Njihova primjena leži u robotskim egzoskeletima kakav je primjerice na slici 2.2.

Robotski egzoskeleti su naprave koje nemaju isključivo senzore i snimaju pokrete već uz senzore imaju i aktuatora kao elektromotore. Aktuatori glume ljudske pokrete i



Slika 2.2: Primjerak robotskog egzoskeleta Exo-H3 (preuzeto sa *technaid.com*)

pomažu osobama s poteškoćama. Jedna od glavnih primjena robotskih egzoskeleta je u fizikalnim terapijama u kojima pacijenti zbog nekakve ozljede trebaju učiti ponovno hodati te pomažu nepokretnim osobama i osobama koje su doživjele moždani udar da postanu i ostanu mobilni. Potencijal ovakvih robotskih egzoskeleta je uvidjela i vojna industrija te je razvoj krenuo i u tom smjeru. U slučaju da osoba nije nepokretna moguće je iskoristiti senzore kako bi se pokreti snimali te bi aktuatori istovremeno te pokrete izvodili (Jung et al., 2015). Time se znatno rasterećuje ljudsko tijelo ali ovisno i o snazi aktuatora moguće je i povećati ljudsku snagu. Na taj bi način jedna osoba mogla podizati predmete znatno teže nego što bi ona to sama ikad mogla napraviti i to bez ikakvog naprezanja jer bi cijela težina predmeta bila raspoređena na strukturi egzoskeleta a ne na ljudskom tijelu što značajno rasterećuje tijelo te se osoba vremenom ne umara. Ovakva tehnologija se također razmatra za veliko unapređenje radnih uvjeta u građevinskoj i logističkoj industriji jer bi se znatno umanjile nesreće uzrokovane padom predmeta zbog ljudskog umora i očuvala ljudska tijela jer ne bi više dolazilo do ozljeda primjerice dobivanja bruha zbog prevelikog tereta na tijelu.

Kako sam egzoskelet znatno utječe na slobodno kretanje udova sljedeća razmatrana metoda prikupljanja podataka taj problem pokušava riješiti bez naprava koje bi smetale snimanju slobodnog pokreta. Digitalne kamere snimaju kretanje osobe te kako nisu pričvršćene na osobu na nikakav način ne utječu na njeno kretanje stoga je osoba

u mogućnosti kretati se na najprirodniji mogući način. Ovisno o količini okvira u sekundi kojom kamera snima osobu može se dobiti brzo uzorkovanje primjerice korištenjem vrlo brzih kamera s i do 12600 okvira u sekundi ili korištenjem standardnih potrošačkih kamera do 100 okvira u sekundi. Idući od okvira do okvira osoba ručno može označiti karakteristične točke na ljudskome tijelu te na taj način doći do podataka no takav postupak bi bio vrlo iscrpljujuć i nepraktičan. Za automatizaciju tog postupka može se iskoristiti nekoliko različitih metoda. Prva razmatrana će biti korištenje računalnog vida. Računalni vid je grana računalne znanosti koja se bavi načinom na koji računalo obrađuje digitalne slike i video zapise te razumijeva njihov sadržaj. Za rješavanje ovakve problematike se izdvajaju zavidna sredstva te je istraživanje došlo vrlo daleko. Kina je jedna od zemalja koja ulaže puno sredstava u tehnologiju računalnog vida jer joj je u interesu koristiti tehnologiju za masovni nadzor građana. Snimke s kamere se analiziraju te je algoritam u mogućnosti prepoznati točnu osobu koja se na snimci nalazi u stvarnome vremenu. Na sličan način je moguće na snimci prepoznati ljudsko tijelo te označiti interesne točke kao zglobove ekstremiteta te na taj način automatizirano prikupiti podatke o karakteristikama pokreta. Problem ovoga pristupa je ovisnost o osvjetljenju i o dovoljno velikom kontrastu između osobe i pozadine kako bi algoritam pronašao željene točke. U slučaju da je kontrast suviše mali algoritam neće biti u mogućnosti prepoznati osobu ni interesne točke na snimci. Kada su laboratorijski uvjeti mogući koristi se kombinacija pozadine i odjeće koja je vrlo kontrastna te koristeći jednostavnu obradu slike moguće je izdvojiti samu siluetu osobe što znatno poboljšava rezultate algoritma i prepoznavanje pokreta.

Za povećanje preciznosti praćenja pokreta moguće je koristiti sljedeću razmatranu metodu a to je korištenje reflektirajućih markera prilikom snimanja. Reflektirajući markeri su napravljeni po mogućnosti od retroreflektirajućih materijala (često poznatih pod nazivom *mačje oko*) koji iz bilo kojeg kuta mogu reflektirati izvor svjetlosti u istom smjeru iz kojega ta svjetlost dolazi za razliku od zrcala koja reflektiraju svjetlost u ovisnosti o upadnome kutu. Za potrebe snimanja takvih markera izvor svjetlosti se nalazi pored objektiva kamere te markeri postavljeni na ljudsko tijelo daju vrlo dobru oznaku traženih točaka. Prilikom obrade snimke te markere je vrlo lako izdvojiti jer su znatno svjetliji od svoje okoline te se na taj način može dobiti vrlo precizna snimka pozicija tih točaka u prostoru. Kako bi ti markeri predstavljali dio tijela što preciznije potrebno ih je postaviti na vrlo usku odjeću kako bi se kretali točno s tijelom bez dodatnih smetnji koje bi kretanje tkanine proizvelo. Također, kako se što većim kontrastom lakše detektiraju, ti markeri trebaju biti postavljeni na tamnu odjeću, ovisno o primjeni crnu ili sivu. Za još bolje rezultate mogu se i iskoristiti i **aktivni** markeri

koji su u suštini LED diode te emitiraju svjetlost što znači da ne ovisi o dodatnome osvjetljenju za razliku od *pasivnih* (reflektirajućih) markera koji samo reflektiraju već postojeće svjetlo. Ovakav pristup dopušta postavljanje i praćenje proizvoljnog broja točaka na ljudskome tijelu. Jedini uvjet je da te točke budu dovoljno razmaknute jedne od drugih kako bi kamera sa svoje udaljenosti mogla razlikovati svaku točku posebno. Kako je kamera uređaj koji snima dvodimenzionalnu sliku iz perspektive u kojoj se nalazi postoji problem snimanja pokreta u tri dimenzije. Jedna kamera nije u mogućnosti uhvatiti više dimenzija i adekvatna je za snimanje pokreta u dvije dimenzije slično kao i egzoskelet. Za dobivanje dubine moguće je ostvariti stereoskopiju uz pomoć još jedne kamere, postavke koja je u svijetu poznata kao *3D kamera*. Naime na taj je način moguće dobiti informaciju o dubini no vidljivost markera još uvijek ovisi o perspektivi kamera te ovakva postavka je podložna problematici okluzije. Okluzija se javlja u slučajevima kada marker iz pozicije kamere nije vidljiv jer se ili nalazi iza osobe ili neki drugi predmet zaklanja pogled. U ovakvim slučajevima sustav za prepoznavanje pojedinih markera tretira isti marker kao dva različita markera te se na taj segmentiran način podaci zapisuju. Kako bi se podaci povezali potrebno je manualnim putem tražiti takve markere te na neki način interpolirati dio podatka koji zbog okluzije nedostaje kako bi se, ono što je sustav vidio kao dva različita markera pretvorili opet u jedan kontinuirani. Zbog okluzije je moguće izgubiti velik broj korisnih podataka stoga je pozicija kamera krucijalna. Kako bi se dobila kompletna snimka pokreta u tri dimenzije potrebno je koristiti više kamera istovremeno. Te kamere moraju biti postavljene na način da u kadru postoji preklapanje s kadrom druge kamere kako bi se migracija markera iz kadra jedne u kadar druge kamere mogao pratiti i prepoznati kao isti marker a ne kao dva različita. Za ovakvu postavu potrebno je imati minimalno tri kamere no više kamera predstavlja manji rizik od javljanja okluzije.

Koristeći veliki broj kamera visoke rezolucije, mogućnosti snimanja velikog broja okvira u sekundi, postavljajući vrlo velik broj markera na tijelo te koristeći vrlo moćna računala koja te snimke analiziraju te pretvaraju snimke u korisne podatke o pokretu mogu se dobiti vrlo kvalitetni podaci. No toliko kvalitetni podaci imaju svoju cijenu koja je izvan budžeta većini ustanova te samo neke velike kompanije si ovakve sustave mogu priuštiti. Ova tehnologija je vrlo raširena u industriji računalnih igara (eng. *Gaming*) te filmskoj industriji za potrebe specijalnih efekata. Njihova uporaba i svrha tehnologije je vrlo slična. U filmskoj industriji se češće koriste siva odjela s markerima jer je osobama koje kasnije rade specijalne efekte u postprodukciji vrlo bitno vidjeti izvor svjetla na filmskome setu te su markeri pasivni kako ne bi nepoželjnim osvjetljenjem utjecali na svoju okolinu u kadru. Također se u filmskoj industriji koristi manji

broj kamera jer su kadrovi dvodimenzionalni i najčešće je samo jedna kamera glavna dok nekoliko drugih kamera ima funkciju praćenja markera u prostoru. U industriji računalnih igara kadar nije statičan već je potrebno vrlo precizno snimiti pokrete iz što više kuteva kako bi došlo do minimalne okluzije. Za to su primjereniji aktivni markeri i crna odjela su preferabilna jer se dobije veći kontrast između tijela i markera a za razliku od filmske industrije osvjetljenje nije bitno jer je mjesto radnje virtualno te se izvor svjetla postavlja programski. Također je poželjno vrlo precizno snimiti pokrete iz svih kuteva zbog dinamične perspektive koja se u 3D igrama može mijenjati ovisno o poziciji i orijentaciji igrača, stoga je potrebno imati što više kamera postavljenih oko površine na kojoj se osoba nalazi. Zahvaljujući tome glumac ili neka stručna osoba tipa majstor borilačkih vještina može svoju točku izvesti najbolje što može te se ti isti pokreti mogu primijeniti na likove u igri te kao rezultat toga likovi u igrama imaju vjerodostojne, ljudske pokrete koje je nemoguće ostvariti umjetno. Također se u obje industrije koristi specijalna kamera montirana na glavu osobe koja glumi te je usmjerena u lice na kojemu se također nalaze markeri. Na ovaj način se maksimalno izbjegava okluzija markera te se snimaju pomaci pojedinog mišića lica tijekom glume kako bi se u procesu animacije dobili pravi ljudski izrazi lica. Ovakva postavka opreme je vidljiva na slici 2.3 na kojoj se nalazi scena iz filma "Planet Majmuna: Revolucija" (eng. *"Dawn of the Planet of the Apes"*) (2014.) redatelja Matta Reevesa.

Kako je već napomenuto ranije u poglavlju, ovakav sustav za praćenje pokreta ima veliki budžetni rang no jeftinije varijante su vrlo neprecizne i podložne problemima okluzije dok su skuplje varijante suviše skupe ali zato i znatno preciznije. Također problem je isto i sama infrastruktura i lokacija snimanja jer ovakva postava opreme je vrlo statična i zahtjeva studijske uvjete što si mnoge ustanove ne mogu priuštiti. Također veliki broj markera za potrebe klasifikacije pokreta nije potreban. Zbog svih ovih problema ovakvo rješenje se može iskoristiti no vrlo je skupo i rukovanje ovakvom opremom je često vrlo zahtjevno te je iz tih razloga neadekvatno.

Zadnja razmatrana metoda je ona koja se u ovome radu koristi te ona uključuje korištene inercijskih (IMU) senzora. IMU senzori su senzori koji se sastoje od akcelometra, žiroskopa i magnetometra. Korištenjem tih triju informacija moguće je pratiti pokrete u prostoru. Žiroskop daje informaciju o kutnoj brzini u određenoj osi, akcelometar daje informaciju o akceleraciji koja djeluje na njega te magnetometar daje informaciju o magnetnom polju oko sebe koje uz odsustvo bilo kakvih metalnih predmeta i magneta daje informaciju o orijentaciji senzora u zemljinom magnetnom polju odnosno služi kao svojevrsni kompas. Koristeći sve ove informacije moguće je pozicionirati uređaj te pratiti pokrete uređaja. IMU senzori se nalaze u svakom pamet-



Slika 2.3: Primjer opreme za praćenje pokrena u filmu (preuzeto sa aeromental.com)

nom telefonu kao senzor orijentacije kako bi se prilagodila orijentacija ekrana, zapis o orijentaciji uslikanih fotografija ali i pojedini pametni telefoni kreativnije koriste IMU senzore te se oni mogu koristiti za upravljanje neakvih gestama primjerice trešnja pametnog telefona pali svjetlo kamere ili okretanje telefona ekranom prema dole odbija dolazeći poziv i slično. Ovakvi senzori se također koriste za praćenje orijentacije letjelica u zraku te za mjerenja i nadgledanja primjerice vibracija. Oni mogu biti vrlo malih dimenzija te kao takvi mogu biti postavljeni na bilo koje mjesto. Također zahtijevaju malo energije za svoj rad stoga se mogu postaviti na neku udaljenu lokaciju gdje mogu snimati podatke. Cijena takvog senzora je vrlo pristupačna i minimalna cijena trenutno je 3,33€ od kineskog nabavljača preko stranice AliExpress.com što čini ovakve senzore vrlo povoljnima za nabaviti i koristiti u većim količinama. Koristeći pseudoperiodičnost ljudskog pokreta proizvođači poput tvrtke Xiaomi su napravili uređaje za praćenje tjelesne aktivnosti (eng. *Fitness tracker*) u obliku sata koji koristeći IMU senzore mogu detektirati i brojati pojedini korak te koristeći BLE (eng. *Bluetooth Low Energy*) šalje telemetriju na pametni telefon na kojemu aplikacija analizira signale te može prepoznati različite aktivnosti primjerice sjedenje, hodanje, trčanje i slično koristeći samo jedan senzor.

Korištenjem više senzora postavljenih na udovima tijela moguće je puno preciz-

nije snimati kretanja pri čemu osoba ima veliku slobodu, veću nego u slučaju optičkog praćenja pokreta gdje se slobodno giba ispred kamera, veću nego u slučaju korištenja egzoskeleta u kojemu sama naprava utječe na kretanje i snima podatke u samo jednoj ravnini te je moguće dobiti više podataka nego što to pružaju platforme sila. Osoba se može kretati bez prisustva druge osobe te se signali mogu snimati na memorijske kartice ili slati preko interneta što čini ovakvu metodu prikupljanja podataka vrlo adekvatnom. U daljnjim poglavljima detaljnije se analizira rad senzora te metode prikupljanja podataka i primjena tih podataka nad neuronskom mrežom kako bi se klasificirali pokreti donjih ekstremiteta.

3. Analiza IMU senzora

IMU (eng. *Inertial Measurement Unit*) je elektromehanički uređaj koji služi za mjerenje sila, kutnih brzina te pozicije uređaja koristeći skup senzora: akcelerometar, 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 ovakvog 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 unaprijeđena 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*) koje su u današnje vrijeme sve popularnije. Vrlo su bitni također u navigacijskim uređajima jer u kombinaciji s 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 gdje služe kao dodatna metoda interakcije igrača s igrom. Prva promatrana komponenta bit će akcelerometar.

Akcelerometar

Akcelerometar je senzor koji mjeri iznos ubrzanja u određenom smjeru. Jednostavan akcelerometar se može konceptirati 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 elek-

tričnome 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 džepnim upaljačima koji svojom deformacijom bacaju iskrpu 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.

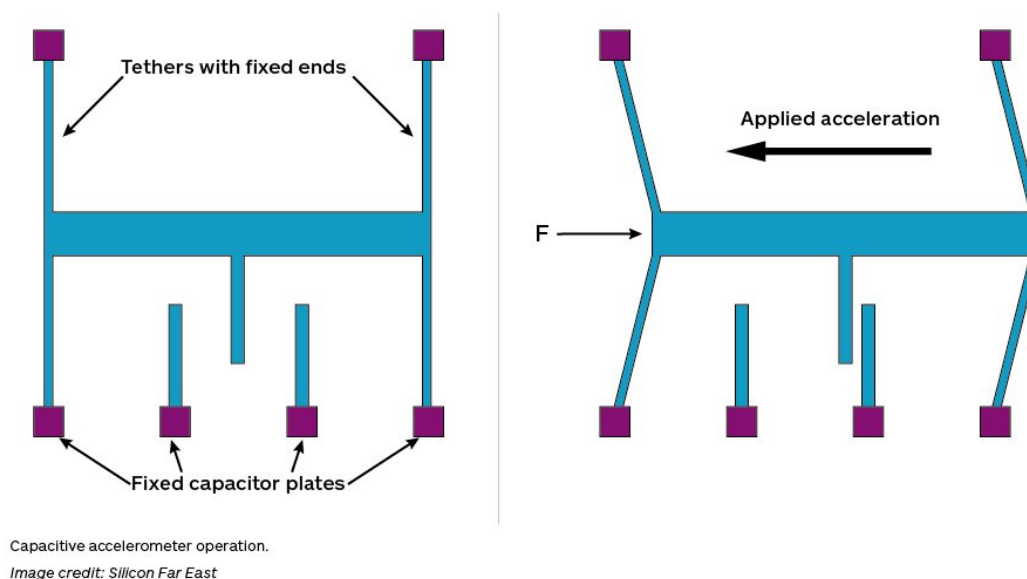
$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

U jednadžbi ϵ predstavlja permitivnost dielektrika koji se nalazi između ploča kondenzatora, A je površina ploča kondenzatora te je d udaljenost dviju ploča. Površina kondenzatora se ne mijenja, permitivnost je konstantna jer se ne mijenja dielektrik te jedina promjenjiva varijabla je udaljenost d . Načelo rada vidljivo je na slici 3.1.

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 kardanskog 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 koja 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 nezamjenjiv i je-



Slika 3.1: Princip rada kapacitivnog akcelerometra (preuzeto sa [insights.globalspec.com](https://www.insights.globalspec.com))

dan od najbitnijih komponenti svih letjelica jer uvijek letjelici daje referentnu točku iz koje se može zaključiti njen točan položaj u zraku. Koristeći promjenjive otpornike odnosno potencioetre 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 bilo kakvog 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 zglobovi 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 istom brzinom 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 te je 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. 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 nosioc naboja putuje 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 izvor energije te kako bi oni imali prostora putovati na jednu od strana vodiča on mora biti plosnat i veće površine. Primjer načela 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. 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 rad (2,5 mW) (TDK) što je vrlo poželjno za sustave napajane baterijom kao što su to mobilni telefoni ili 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 rasterećuje 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 izradi što često 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 1,95 V (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 1,8 V pri čemu zahtjeva 3,11 mA struje. U usporedbi sa L3GD20H kojemu je potrebno 3 V te zahtjeva 5 mA struje zahtjeva znatno manje snage što je primjerenije za rješenja koja ovise o baterijskim napajanjima primjerice ugradbeni IoT sustavi ili mobilni telefoni. ICM može koristiti samo pojedine komponente te svaka od komponenti može podržavati određenu brzinu uzorkovanja. Akcelerometar maksimalno može slati svoja mjerenja frekvencijom od 4,5 kHz, žiroskop 9 kHz te magnetometar 100 Hz. U dokumentaciji čipa L3GD20H nisu navedene točne frekvencije uzorkovanja po komponenti, samo su navedene podržane frekvencije između 11,9 Hz i 757,6 Hz. Ove vrijednosti predlažu da je za potrebu snimanja nekakvih visokofrekventnih vibracija bolji odabir ICM čip no za potrebe snimanja pokreta dijelova tijela visoka frekvencija nije bitan kriterij. Iz tog razloga valja razmotriti još jednu skupinu IMU senzora a to su oni koji se nalaze u pametnim telefonima. Svaki pametni telefon u sebi ima jedan IMU senzor koji tom telefonu daje dodatne funkcionalnosti kao navigaciju, kompas, rotaciju prikaza ekrana i kao način upravljanja igrama. Mana ovoga pristupa je ta što sami modeli i specifikacije 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 mobilni

podržavaju uzorkovanje frekvencijom od 100 Hz što je prema Nyquistovom teoremu dovoljno za snimanje periodičnih pokreta od gotovo 50 Hz što je i više nego dovoljno. Također ovakav pristup umanjuje e-otpad jer je jedan mobilni telefon već gotov sustav sa vlastitim napajanjem, načinom punjenja, sučeljem za upravljanje (dodirik) 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 koriste Bevilacqua et al. (2018) u radu koji koristi samo jedan IMU senzor postavljen na polovici potkoljenične kosti te uzorkuje signal frekvencijom od 102,4 Hz te putem bluetooth veze šalje podatke na pametni telefon na kojemu se sami podaci obrađuju te je preciznost prepoznavanja pokreta vrlo visoka.

4. 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 snimane osobe pri čemu su se snimali tri osi akcelerometra i tri osi žiroskopa frekvencijom uzorkovanja od 50 Hz. 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 akcelerometra 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 nisu anotirani 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 natkoljenica, 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, travnatoj površini, neravnoj kamenoj cigli i šljunku. 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 analizu primjera 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 snimani sa 6 IMU senzora te 2 EMG senzora. IMU senzori su postavljeni na natkoljenice, potkoljenice 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, voženje 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 akcelerometra 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 Cherezhnev 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 onakva klasifikacija 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 *klippinga* te je takav signal gotovo neiskoristiv. Svaki takav slučaj je dokumentiran u tablici te se po potrebi ti podaci mogu izbjeći.

Posljednja razmatrana baza podataka je jedna od najvećih baza podataka hoda s 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 platformi sila (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 s 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 platformi sila koje snimaju samo silu kojom pacijenti djeluju na njih te takva baza podataka nije primjerena za analizu pojedinih pokreta već samo hoda.

5. 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 natkoljenica i potkoljenica.

Ovisno o razini preciznosti, cijeni 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 s drugim uređajima i programima. U ovome radu, zbog jednostavnosti, koristiti će se pametni telefon.

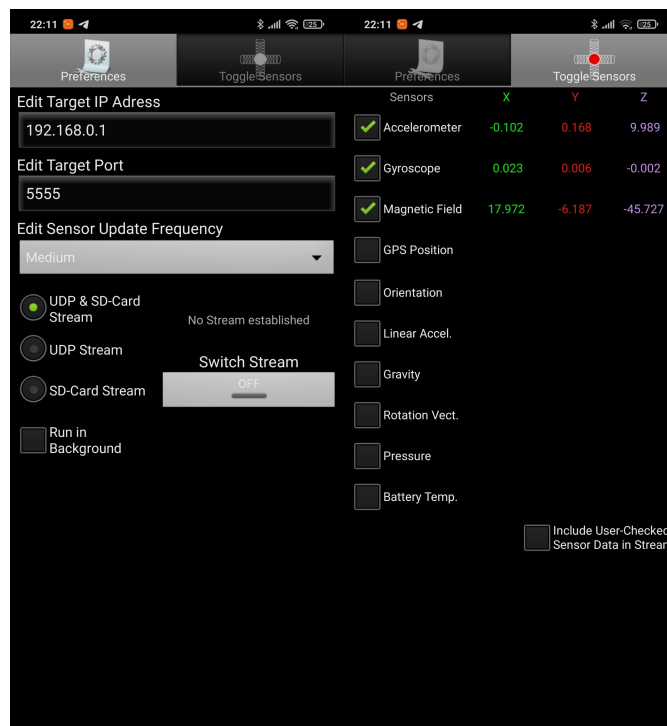
Tipičan životni vijek jednog pametnog telefona u prosjeku je dvije godine nakon čega korisnici redovito kupuju nove modele jer stariji postaju neadekvatni po pitanju trajanja baterije, količine memorije, performansama komponenti i slično. Svaki takav stariji model telefona vrlo često stoji nekorišten 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, uređaji se mogu postaviti osobi na bilo koji dio tijela na

vrlo jednostavan način i svaka bi osoba iz svoga doma mogla pridonijeti 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 za obradu informacija u stvarnome vremenu ili za centralizirano prikupljanje podataka na računalu. Neke od takvih aplikacija su *Sensor Data* i *phyphox* koje se koriste u edukaciji te su u doba COVID pandemije nezamjenjivi alati za izvođenje fizikalnih eksperimenata kod kuće 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 s 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 pronaći određeni paket unutar snimke mrežnog prometa. Koristeći tu mogućnost promet se može snimiti na računalu 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 5.1.

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 5.2. Svi podaci prikazuju vrijednosti redom x , y , i z osi.

Kako bi se ti podaci primili i pohranili na adekvatan način potrebno je napraviti



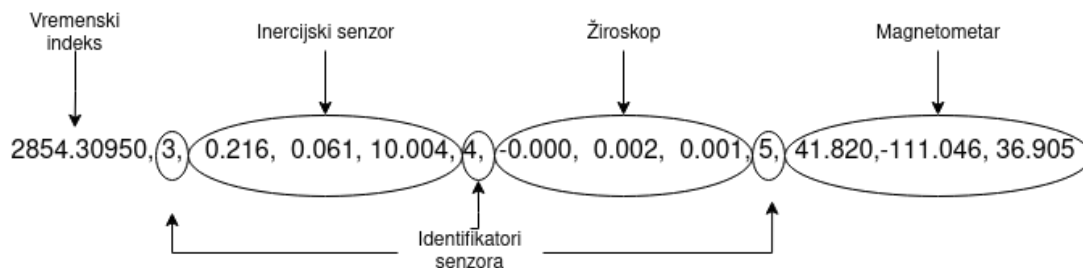
Slika 5.1: Izgled aplikacije Sensorstream IMU+GPS

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 5.1: Izmjerene frekvencije uzorkovanja

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



Slika 5.2: Primjerak primljenih podataka

se koriste u znanosti. Implementira višedimenzionalne matrice te sve funkcije za operaciju nad njima uključujući promjenu oblika matrice, konkatencije matrica te sve ostale 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 s mobilnih uređaja je *Matplotlib* koji je potreban za vizualizaciju podataka u obliku grafova.

Listing 5.1: 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 5.1 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 unijeti 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 redoslijedu 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 i 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 5.2: Primanje podataka

```

1  while ( True ):
2      sample = []
3      for phone in client:
4          bytes_adress_pair = phone.recvfrom( buffer )
5          data = []
6          message = bytes_adress_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

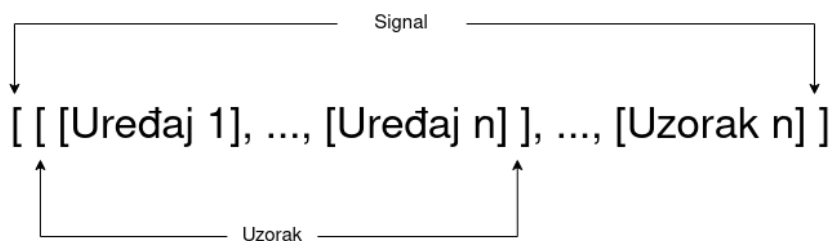
```

```

20     if len(sample) != 0:
21         signal.append(sample)
22     else :
23         continue

```

U odsječku koda 5.2 prima se datagram svakog mobilnog uređaja. Svaki datagram se uzima iz međuspremnika 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 zasebnih podataka pomoću `split` funkcije uzimajući zarez kao graničnik. Zatim te podatke valja filtrirati pri čemu se uklanja *vremenski indeks*, identifikatori senzora te podaci magnetometra prikazanih na slici 5.2. Eksperimentalno se pokazalo da se pri prvim 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 5.3.



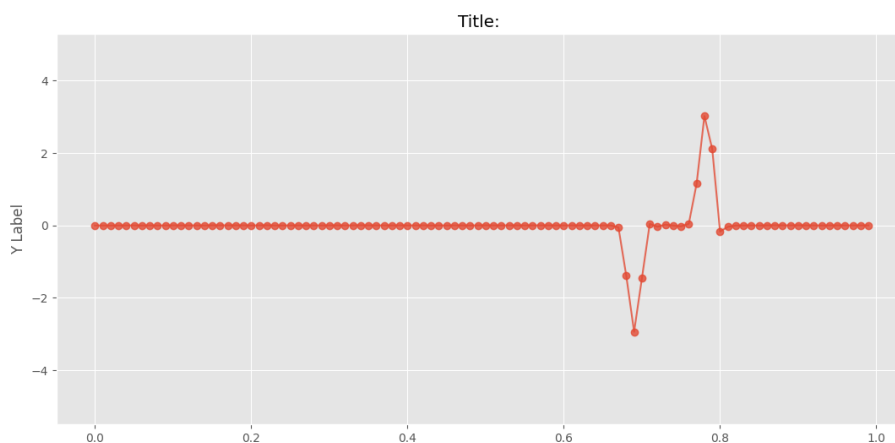
Slika 5.3: Struktura podataka

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 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 iscertavajući odgovarajuće vrijednosti na grafu vrlo je jasno vidljiv period te same karakteristike funkcije (slika 5.4). 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 $-2,5 \text{ rad/s}$. Zatim se potkoljenica u stanju potpune ispruženosti smiri te kutna brzina iznosi 0. Pri spuštanju kutna brzina raste te također iznosi približno $2,5 \text{ rad/s}$, ali u ovom slučaju u pozitivnom smjeru. Uzeći ove vrijednosti može se ostvariti konačan automat koji prati vrijednosti signala te mijenja 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. Ovakav signal se pohrani te se čeka nova perioda. U slučaju da ponavljanje nije dobro odnosno da iz nekog razloga karakteristične vrijednosti nisu dosegnute zbog krivog izvođenja ili je osoba ne izvede vježbu slučajno dosegla vrijednost okidanja zbog kojeg je automat ostao u krivome stanju potrebno je vremenski ograničiti izvođenje vježbe. Ako osoba ne izvede vježbu unutar nekog određenog vremena koje ovisi o vježbi automat se vraća u početno stanje te se čeka novi period.

Anotacija signala može biti izvedena na više načina. Podaci mogu biti pohranjeni u pojedinim datotekama kojima se anotacija nalazi u nazivu kao što je to kod Chereshev i Kertész-Farkas (2018). Ovakav pristup omogućuje da se anotacija vrlo lako programski može učitati prilikom učitavanja relevantnih podataka iz datoteke no za to je potrebno ručno imenovati datoteku prilikom svakog snimanja podataka. Podaci mogu biti anotirani u posebnoj datoteci koja se nalazi skupa sa samim podacima kao što je to u Zou et al. (2020) gdje su podaci pohranjeni u svom direktoriju dok je datoteka s anotacijom izvan tog direktorija. Također moguće je i pohraniti anotaciju unutar datoteke s podacima no radi praktičnosti učitavanja podataka znatno je jednostavnije imati anotacije izvedene na jedan od navedenih načina. Podaci se također mogu pohraniti na više načina. Za korištenje sa NumPy bibliotekom moguće je podatke jednostavno pohraniti



Slika 5.4: Primjer jednog ponavljanja vježbe, x - vrijeme, y - kutna brzina

u obliku matrice u binarnoj `.npy` datoteci no ovakva datoteka nije čitljiva koristeći druge programske biblioteke i pakete. Postoji mogućnost da je neka interoperabilnost implementirana sa bibliotekama u drugim programskim jezicima zbog popularnosti NumPy biblioteke no to nije dobra praksa. Najveću interoperabilnost se može postići koristeći jedan od otvorenih i čestih formata kao što je to obična tekstualna datoteka u kojoj su vrijednosti zapisane u ljudski čitkom ASCII formatu, CSV zapis, JSON i XML iako su zadnja dva formata za potrebe pohrane signala neadekvatni. Na ovaj način neovisno o odabranoj tehnologiji podaci se mogu na jednostavan način učitati i za potrebe bržeg pristupa podataka pohraniti u binarnom obliku po izboru. Dokle god su podaci u nekom obliku koji se može lako učitati sam način zapisa nije toliko bitan, ono što je uz set podataka najbitnije je dobra dokumentacija koja opisuje točnu strukturu, oblik i format podataka. Za popularne podatke kao što su to CSV podaci nije toliko krucijalno jer su često podaci unutar datoteke već opisani te postoje već gotove funkcije za učitavanje takvih podataka u gotovo svakom programskom jeziku. Dokumentacija je bitna kad se podaci zapisuju u tekstualnu datoteku jer iz samih podataka često nije jasan njihov format odnosno što predstavlja redak a što stupac. Chereshev i Kertész-Farkas (2018) su uz posebnu `README` datoteku u svaku datoteku upisali i zaglavlje u koje su zapisani metapodaci kao što su ime aktivnosti odnosno dodatna anotacija podataka, datum snimanja te su označeni stupci u kojima se nalaze podaci. Za učitavanje podataka je također dobra praksa i vrlo korisno svima koji će tu bazu podataka koristiti ustupiti vrlo jednostavne elementarne programe implementirane u raznim programskim jezicima koji učitavaju podatke na ispravan način kako bi korisnik taj kod jednostavno mogao uključiti u vlastiti kod i koristiti već gotovu funkciju.

Primjer takvog koda je prikazan u isječku 5.3.

Listing 5.3: Funkcija za učitavanje HuGaDB podataka

```
1  def load_file(path_to_file):
2      return np.genfromtxt(path_to_file, delimiter='\\t', \\
3                          skip_header=4, \\
4                          dtype=np.float32)
```

Ovo je primjerak enkapsulacije već gotove NumPy funkcije koja iz formatirane tekstualne datoteke učitava vrijednosti s postavkama pomoću kojih te podatke učitavaju na ispravan način. Ovu funkciju su za svoj set podataka napisali Chereshev i Kertész-Farkas (2018). Funkcija kao argument prima apsolutnu putanju do datoteke te vraća objekt tipa `numpy.array`. Ostali argumenti govore funkciji da su podaci tipa float veličine 32 bita, da postoji zaglavlje od 4 redaka koje nije dio podataka te da su svi podaci razdvojeni tabulatorom.

6. Implementacija metode strojnoga učenja

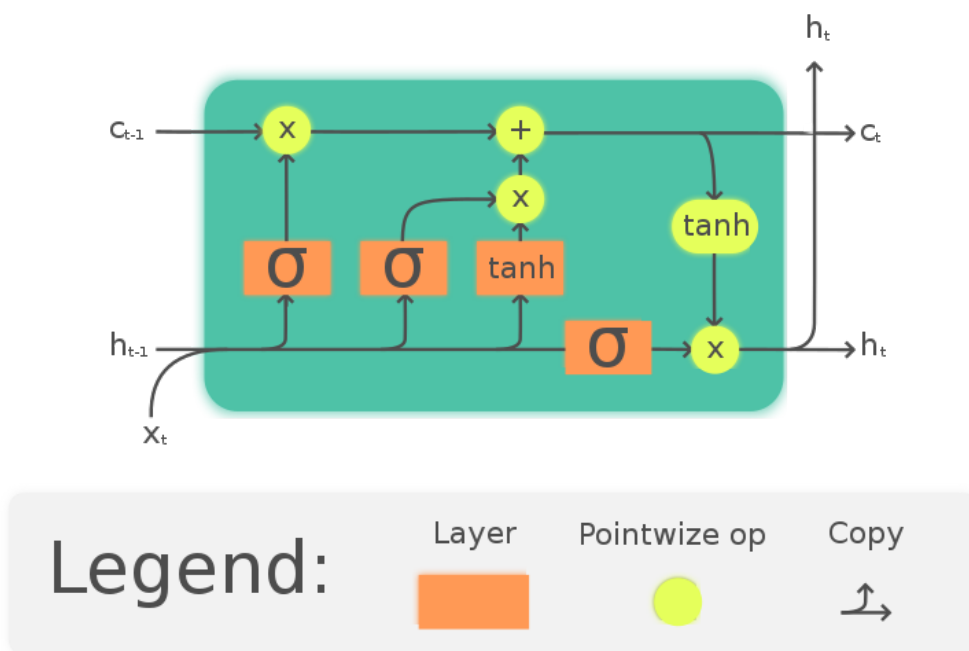
Strojno učenje (eng. *Machine learning*) je nauka o algoritmima koji se korištenjem podataka vremenom automatski poboljšavaju. Ti algoritmi imaju dvije svrhe, predviđanje budućih događaja i klasifikaciju podataka s obzirom na podatke kojima je izgrađen model. Za ostvarenje svrha tih algoritama potrebne su dvije ključne stvari, neuronska mreža i skup podataka. Neuronska mreža je u modernom smislu mreža umjetnih neurona koji su međusobno povezani između slojeva te svojim radom imitiraju biološke neurone. Jednostavan neuron sastoji se od svojih ulaza, izlaza neurona iz sloja prije na koje je primjenjena neka težina te izlaza. jednostavan neuron sumira vrijednosti prijašnjih neurona sa težinom te tu vrijednost normalizira i kao takvu ju šalje u sljedeći sloj koji radi isti takav postupak. Normalizacija vrijednosti je postupak kojim se vrijednosti unutar mreže održavaju na nekoj maloj razini, često između 0 i 1 ili između -1 i 1 kako vrijednosti u mreži ne bi dosezale velike iznose. To se ostvaruje korištenjem aktivacijske funkcije u neuronu a takva funkcija može biti primjerice *tanh*, *sig* ili najjednostavnija *step* funkcija. Svaka se mreža sastoji od tri glavna sloja, ulazni sloj, skriveni sloj i izlazni sloj. Ulazni i izlazni slojevi imaju onoliko neurona koliko ima samih ulaza odnosno izlaza. U skrivenome sloju se može nalaziti proizvoljan broj slojeva od kojih svaki sloj ima proizvoljan broj neurona. U klasičnome slučaju neuroni su jednosmjerni te se tok podataka odvija iz sloja u sloj od ulaza prema izlazu no danas postoje razne mreže koje ne prate klasičan model. Kako bi se vrijednosti težina između neurona ugodile tako da mreža izvodi željenu funkciju potrebno je provesti treniranje mreže koristeći set podataka koji predstavljaju primjere točnih ulaza i izlaza funkcije. Za bolje rezultate treniranja potrebno je imati što je više moguće kvalitetnih podataka koji što vjernije predstavljaju realne probleme i rješenja kakvi bi se našli u stvarnoj primjeni. Za to je potrebno na korektan način prikupiti što veći broj podataka. Primjeri takvih podataka se mogu naći na internetu, neki od primjera su IMDB skup podataka za prepoznavanje mišljenja u kojemu su podaci binarno anotirani odnosno

svaka kritika je anotirana kao dobra ili loša. Nakon treniranja, mreža je u mogućnosti zaključiti iz teksta nalazi li se u njemu dobra ili loša kritika. Još jedan primjer podataka je MINST baza podataka koja se sastoji od 60000 slika od 28x28 piksela rukom pisanih znamenki te oznakama koje se znamenke na tim slikama nalaze. Nakon treniranja mreža je sposobna na slici prepoznati rukom pisane pojedine znamenke. Prilikom učenja mreža svakog koraka, koristeći trenutne vrijednosti težina veza koje u početku mogu biti nasumične, na izlazu aktivira neuron za koji trenutno misli da bi trebao biti upaljen. Ta se vrijednost uspoređuje sa traženom izlaznom vrijednosti te se između tih dviju vrijednosti računa pogreška (eng. *loss*). Ta pogreška se koristi za ugađanje težina veza između neurona koristeći neku od metoda prostiranja podataka unazad (eng. *backpropagation*) kao što je to gradijentni spust te se ponovno koriste podaci iz skupa podataka za treniranje kako bi se opet izračunala pogreška odnosno mreža ulazi u novu epohu. Pogreška nikada neće iznesti nula no može biti dovoljno mala. Nakon faze treniranja mreže, uz uvjet da su rezultati zadovoljavajući, ona se može koristiti nad realnim podacima uz određenu vjerojatnost pogreške koja je često vrlo mala. Točnost mreže se može izraziti kao omjer pogođenih izlaza i svih izlaza no ova vrijednost nije vrlo mjerodavna kada se mjeri nad skupom podataka kojima je mreža bila trenirana. Može biti dobar indikator do koje mjere je mreža toča no u slučaju prekomjernog učenja mreže ona "zapamti" parove vrijednosti iz skupa za treniranje što daje dojam da je mreža vrlo precizna no pri analizi koristeći druge podatke ona daje loše rezultate. Ova pojava se zove pretreniranost (eng. *overfitting*). Kako bi se ona detektirala potrebno je imati testni skup podataka koji nikako ne sudjeluju u samom treniranju mreže. Ti podaci služe tome da se nakon treniranja mreža validira nad podacima koje do sada "nije vidjela" odnosno nije mogla zapamtiti te ovakvi podaci daju bolji dojam o točnosti mreže. Obično ti testni skupovi podataka nisu posebni skupovi već se iz skupa svih podataka izdvoji jedan udio koji služi svrsi testiranja. Ovaj korak je vrlo krucijalan i ne smije se izostaviti. Za izbjegavanje pretreniranosti mreže podatke je potrebno na neki način nasumično pomiješati odnosno pobrinuti se o tome da prilikom treniranja na ulaz mreže ne dolaze sekvencijalno istovrsni podaci jer će to loše utjecati na cijelokupan ishod. Na primjer ako se vrši analiza slike na kojoj bi mreža trebala prepoznati psa ili mačku u slučaju da prvih n podataka predstavlja psa na slici mreža bi radila odlično kod prepoznavanja pasa no ne bi bila dobra pri prepoznavanju mačaka ili u ekstremnom slučaju mislila bi da se na svim slikama nalazi pas. Također je vrlo bitno da skup bude što raznolikiji jer u slučaju male raznolikosti mreža također ne bi radila očekivano što bi se u istoj analogiji prepoznavanja ljubimaca na slici moglo manifestirati na način da prepoznaje samo jednu vrstu psa odnosno mačke

ili prepoznaje samo u slikama koje su slikane iz određenog kuta. Podaci moraju biti što raznovrsniji iz razloga što se zahtjeva od mreže da radi u nekom općem odnosno generalnom slučaju.

Kako se neuronske mreže koriste nad raznim različitim podacima postoji mnogo arhitektura i vrsta mreže no za ovaj rad je najbitnija RNN (eng *Recurrent Neural Network*). RNN mreža je mreža koja u sebi sadrži sloj neurona koji imaju povratnu vezu. Povratna veza u neuronu služi kao unutarnja memorija te je iz tog razloga vrlo povoljna za analizu toka podataka kao što su signali u vremenu ili pisani tekst u kojemu je bitno imati informaciju o tome što se ranije našlo na ulazu. Danas se za to koriste LSTM (eng. *Long Short-Term Memory*) ćelije. LSTM ćelije su ćelije sa povratnom vezom koje se sastoje od više segmenata odnosno vrata. Povratnom vezom je ostvarena unutarnja memorija koja ulazi u vrata zaborava. Također u vrata zaborava ulaze i sam ulaz te izlaz LSTM ćelije iz sloja prije. Ulaz podataka i informacija prijašnje ćelije se vektorski kombiniraju te se normalizacijom vektora koristeći sigmoid funkciju dobiva vektor zaborava s vrijednostima između 0 i 1. Matrično se množi s trenutnom unutarnjom memorijom pri čemu elementi pomnoženi s brojevima bliskim nuli isčezavaju odnosno oni se "zaboravljaju". U ulazna vrata ulazi ista kombinacija ulaza kao i u vrata zaborava pri čemu se oni dijele u segment koji se normalizira sigmoid funkcijom i segment koji se normalizira \tanh funkcijom. Tangens hiperbolički služi isključivo normalizaciji podataka te matrično pomnožen sa segmentom iz sigmoid funkcije opet odlučuje koji segmenti su više bitni a koji nisu te se dodaju unutarnjoj memoriji za sljedeći korak. Na kraju u izlazna vrata ulazi novo stanje unutarnje memorije normaliziran funkcijom \tanh te sigmoid ulaznih podataka. Njihov matrični umnožak predstavlja izlaz iz LSTM ćelije te taj podatak ulazi u ulaz sljedeće ćelije skupa sa ulaznim podatkom. LSTM ćelija je prikazana na slici 6.1. Ovakve ćelije su potrebne zbog problema pri rasprostiranju unatrag. Naime koristeći gradijentni spust sam gradijent svakim slojem isčezava te u većini slučajeva prvi slojevi u RNN mreži nisu na nikakav način korigirani prilikom učenja što znatno utječe na performanse mreže. Koristeći LSTM ćelije gradijent ne isčezava te se težine ispravno ugađaju.

U ovom radu će se za izradu neuronske mreže koristiti Keras. Keras je sučelje za TensorFlow napisano u programskom jeziku python koje služi za brzu i jednostavnu izradu modela neuronskih mreža. TensorFlow je jedna od najpopularnijih platformi za strojno učenje. Otvorenoga je koda te njegove biblioteke nude gotovo sve funkcije potrebne za primjenu strojnoga učenja. Keras kao sučelje nudi vrlo visoku razinu apstrakcije u izradi neuronskih mreža te uzevši u obzir doseg ovoga rada je dobar izbor za implementaciju.



Slika 6.1: Logički prikaz jedne LSTM ćelije

Ostvarena mreža se uvelike bazira na mreži korištenoj u primjerima obrade ranije spomenute analize rukom pisanih znamenki. U tom primjeru se rješava problem n-klasifikacije pri čemu postoji 25 ulaza u mrežu od kojih svaki predstavlja jedan redak od 25 piksela. Prolaskom kroz mrežu aktivira se jedan od 10 izlaznih neurona koji predstavlja jednu znamenku od 0 do 9. U ovome radu će se obrađivati HuGaDB baza podataka opisana u ranijem poglavlju. Od svih dostupnih podataka koristit će se podskup senzora kakav je opisan u poglavlju ranije odnosno akselerometri i žiroskopi koji se nalaze postavljeni na podkoljenici i nadkoljenici desne noge. Kako ti senzori predstavljaju ukupno 12 istovremenih signala ulaz u mrežu treba biti veličine 12. Kako je skup podataka anotiran za akcije opisane u ranijem poglavlju potrebno je izdvojiti skup podataka za testiranje od skupa podataka za treniranje što je bilo napravljeno nasumičnim odabirom nekolicine primjera svakog kretanja. Zbog malog broja primjera nekih pokreta kao što su putovanje liftom i hodanje po stepenicama neki podaci su zanemareni te se razmatra samo 6 kretnji: vožnja bicikla, trčanje, sjedenje u automobilu, statično sjedenje, stajanje i hodanje. Iz tog naloga izlaz treba biti veličine 6. Zbog jednostavnosti Keras sučelja sama implementacija mreže je vrlo kratka i jednostavna. Slijedi kod koji implementira mrežu.

```
1 import numpy as np
```

```

2     import tensorflow as tf
3     from tensorflow.keras.models import Sequential
4     from tensorflow.keras.layers import Dense, Dropout, LSTM
5     import tensorflow.keras.optimizers
6
7     final_len = 5300
8
9     x_train = np.load("x_train_normal.npy")
10    y_train = np.load("y_train_normal.npy")
11    x_test = np.load("x_test_normal.npy")
12    y_test = np.load("y_test_normal.npy")
13
14    model = Sequential()
15    model.add(LSTM(128, input_shape=(12, final_len), \
16                  activation='relu', return_sequences=True))
17    model.add(Dropout(0.2))
18
19    model.add(LSTM(128, activation='relu'))
20    model.add(Dropout(0.2))
21
22    model.add(Dense(32, activation='relu'))
23    model.add(Dropout(0.2))
24
25    model.add(Dense(6, activation='softmax'))
26
27    model.compile(loss="categorical_crossentropy", \
28                  optimizer='adam', metrics=["accuracy"])
29    model.fit(x_train, y_train, epochs=60, \
30              validation_data=(x_test, y_test), \
31              batch_size=30, shuffle=True)
32    model.save("moj_model")

```

Model RNN mreže se nalazi opisan u linijama 14-25. Koristi se sekvencijski model koji samo jedan ulaz i jedan izlaz. Ulazi i izlazi su vektori te dimenzija vektora predstavlja broj ulaza odnosno izlaza. Sekvencijski model je najjednostavniji model tipične topologije u kojoj vrijednosti idu redom po slojevima od ulaza prema izlazu. Svaki sloj se dodaje korištenjem metode `add`. Prvi sloj je LSTM sloj veličine 128 ćelija. Kako u sekvencijskom modelu postoji samo jedan ulaz ovaj sloj se može tretirati

kao prvi sloj unutar skrivenog sloja neuronske mreže. Iz tog razloga je potrebno napomenuti oblik ulazne matrice koja je visine 12 i duljine `final_len` koja će biti bolje objašnjena kasnije. Argument `return_sequences` govori treba li sljedećem sloju predati cijelu sekvencu izlaza iz pojedinog neurona ili samo zadnju vrijednost. Kako je ovo samo prvi od dva LSTM sloja potrebno je ovaj argument označiti istinitim kako bi sljedeći sloj dobio ispravnu sekvencu podataka. Nakon prvog LSTM sloja sljedeći sljedeći koji je jednake veličine ali u ovome sloju ne koristimo `return_sequence` opciju jer je sljedeći sloj gusto povezani odnosno sastoji se od klasičnih neurona a ne od LSTM neurona i stoga je potrebna samo posljednja vrijednost. Zadnji sloj je ponovno gusto povezani sloj veličine 6 koji predstavlja izlaz neuronske mreže. Između svakoga sloja postoji još jedan međusloj u kodu naveden kao *Dropout*. Funkcija ovih slojeva je blokirati izlaze nekog udjela neurona. Nasumično blokiranje neurona uvelike pomaže u generalizaciji mreže odnosno efektivan je alat protiv pretreniranja mreže. Konstanta 0,2 predstavlja blokiranje 20% neurona iz sloja prije koji se svaki put nasumično odabiru. Na kraju, model se izgradi korištenjem metode `compile` u liniji 27 uz odabir funkcije gubitka, načina optimiziranja te željene metrike za validaciju i poboljšanje mreže. Na kraju metoda `fit` provodi učenje nad podacima danima u argumentima. Argument `batch_size` grupira ulazne podatke u grupe te vrši ugađanje težina nakon svake grupe. Odabrani broj epoha je 60 te opcija `shuffle` govori funkciji da dodatno nasumično mješa ulazne podatke kako bi se izbjeglo pretreniranje mreže. Uvježbana mreža se pohranjuje u posljednjoj liniji koda.

Performanse mreže ovise o njezinoj arhitekturi no još veći faktor su podaci za treniranje. Sami sirovi podaci u većini slučajeva nisu primjereni za strojno učenje. Oni trebaju proći kroz više razina obrade i normalizacije kako bi bili koristan set podataka kojime bi se neuronska mreža mogla trenirati. Prvi doticaj s podacima je učitavanje sirovih podataka u memoriju. U slučaju HuGaDB skupa podataka učitavanje pojedine snimke vrši se funkcijom navedenom u isječku 5.3. Funkcija vraća matricu s učitanim podacima onako kako je zapisana u datoteci što znači da su vrijednosti svakog pojedinog senzora u svome stupcu. Za učitavanje cijelog seta podataka za treniranje potrebno spremati podatke u posebnu strukturu no zbog jednostavnosti odnosno ograničenja Keras sučelja ulazni podaci moraju biti u matričnom obliku. Kako bi se oformila matrica potrebno je sve zapise svesti na iste matrične dimenzije. To se može napraviti na tri načina, skraćivanjem dugačkih zapisa, produljivanjem kratkih ili kombinacijom produljivanja i skraćivanja. Zbog formata unosa potrebno je prvo transponirati matricu kako bi se signali koji su zapisani u stupcima bili zapisani u redcima kako format unosa zahtjeva. Transponiranje matrice se ostvaruje koristeći funkciju `numpy.transpose()`

te bi sve matrice trebale biti visine 12. Za proširivanje matrice i popunjavanje novim vrijednostima koristi se funkcija `numpy.pad()` koja prima tri argumenta, matricu koju treba proširiti, uređenu četvorku koja označava broj vrijednosti kojima se popunjuje matrica sa svake strane matrice te način popunjavanja.

Listing 6.1: Proširivanje matrice

```
1 np.pad(data, ((0, 0), (0, max_len - data.shape[1])),  
2         mode='wrap')
```

Podrazumjevan način popunjavanja matrice je `'constant'` pri čemu se sve vrijednosti postave na neku konstantu. Ovakva metoda nije dobra jer drastično mijenja izgled signala te bi zbog toga funkcionalnost mreže bila loša. Druge ponuđene metode uključuju proširivanje najvećim, najmanjim, srednjim vrijednostima i slično no zanimljivije metode koriste same vrijednosti matrice pri proširivanju. Tako je na primjer moguće zrcaliti matricu te popunjavati istim vrijednostima ali obratnim redoslijedom (`'symmetric'` metoda), i `'wrap'` metodom popunjavati vrijednosti tom istom matricom. Ove metode ne narušavaju izgled i funkciju signala stoga su adekvatne za proširivanje ovakvih matrica. Neuronske mreže puno bolje funkcioniraju onda kada su podaci u rangu vrijednosti između -1 i 1 odnosno 0 i 1 ovisno o tipu podataka. Kako bi se tome podaci prilagodili potrebno je izvršiti normalizaciju podataka. Najjednostavnija metoda normalizacije vrijednosti je djeljenje sa maksimalnom vrijednosti u toj matrici. U dokumentaciji podataka naznačeno je da su sve vrijednosti žiroskopa u intervalu $[-2000, 2000]$ stupnjeva u sekundi te da su sve vrijednosti akcelerometra u intervalu $[-2g, 2g]$ pri čemu je g akceleracija slobodnog pada. Prilikom učitavanja svaki se signal prije proširivanja matrice podjeli sa 2000 ili $2g$ kako se ne bi nakon proširivanja djelilo više vrijednosti unutar matrice. Ova metoda nije u potpunosti radila jer su nakon djeljenja neke vrijednosti bile u tisućama stoga je bilo potrebno podijeliti sve signale sa 1000. Zbog pseudoperiodičnosti signala moguće je signale podijeliti na manje djelove te na taj način povećati skup podataka i umanjiti pretrenjiranje jer će se podaci moći prilikom učenja lakše pomiješati. Iz tog razloga se svaki signal produljuje na 21200 uzoraka. To je dulje od najduljeg signala no radi djeljenja je bitno imati broj uzoraka koji ima više cjelobrojnih djelitelja. Svaki se signal djeli na 4 djela koristeći funkciju `numpy.array_split` te se i izlazna matrica za svaku datoteku dodaje 4 puta. Na ovaj su način svi signali duljine 5300 uzoraka.

Listing 6.2: Kod za predobradu podataka

```
1 import numpy as np  
2 import matplotlib.pyplot as plt
```

```

3 import os
4 import random
5
6 # Odabir stupaca
7 # Stupci |rsacc| |rsgyro| |rtacc| |rtgyro|
8 columns = (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17)
9
10 actions = ["bicycling", "running",
11            "sitting_in_car", "sitting",
12            "standing", "walking"]
13
14 max_len = 21200
15 final_len = max_len
16 g = 9.81
17
18 def load_file(path_to_file):
19     return np.genfromtxt(path_to_file, delimiter='\t',
20                          skip_header=4, usecols=columns,
21                          dtype=np.float32)
22
23 def normalize(data):
24     normal = np.array([
25         data[0] / (2*g*1000),
26         data[1] / (2*g*1000),
27         data[2] / (2*g*1000),
28         data[3] / 2000000,
29         data[4] / 2000000,
30         data[5] / 2000000,
31         data[6] / (2*g*1000),
32         data[7] / (2*g*1000),
33         data[8] / (2*g*1000),
34         data[9] / 2000000,
35         data[10] / 2000000,
36         data[11] / 2000000,
37     ])
38     return normal
39
40 def load_data(path):

```

```

41     x = []
42     y = []
43     data = os.listdir(path)
44     random.shuffle(data)
45     for sample in data:
46         for split in np.array_split(pad_data( \\
47             np.transpose(normalize( \\
48                 load_file(path+sample))))), 4, axis=1):
49             x.append(split)
50         for action in actions:
51             if action in sample:
52                 out = [0.0 for i in actions]
53                 out[actions.index(action)] = 1.0
54                 for j in range(5):
55                     y.append(np.transpose( \\
56                         np.array(out, dtype=np.float32)))
57                 break
58
59     return x, y
60
61 def pad_data(data):
62     return np.pad(data, \\
63         ((0, 0), (0, max_len - data.shape[1])), \\
64         mode='wrap') \\
65
66 db_dir = "/path/to/HuGaDB/Data/"
67 test_dir = "/path/to/HuGaDB/Test/"
68
69 print("setting_up_training_data...")
70 x_train, y_train = load_data(db_dir)
71 print(x_train[0].shape, y_train[0].shape)
72
73 print("setting_up_test_data...")
74 x_test, y_test = load_data(test_dir)
75
76
77 y_train = np.array(y_train, dtype=np.float32)
78 x_train = np.array(x_train, dtype=np.float32)

```

```

79 x_test = np.array(x_test, dtype=np.float32)
80 y_test = np.array(y_test, dtype=np.float32)
81
82 np.save('x_train_normal.npy', x_train)
83 np.save("y_train_normal.npy", y_train)
84 np.save("x_test_normal.npy", x_test)
85 np.save("y_test_normal.npy", y_test)

```

Predobrada podataka vrši se u kompoziciji funkcija u recima 46-48. Kako sve 4 matrice predstavljaju istu radnju potrebno je za svaku u matricu izlaznih podataka 4 puta umetnuti ispravnu izlaznu matricu što se vrši u petlji u redku 54. U petlji u redku 50 se koristeći listu akcija u imenu datoteke traži ključna riječ te se ovisno o akciji na adekvatnom mjestu u izlaznoj matrici stavlja vrijednost 1 (linija 53). U glavnome djelu programa poziva se funkcija `load_data()` koja vraća dvije liste podataka, listu ulaznih i izlaznih podataka. Kako su sve matrice unutar tih listi istoga oblika moguće je listu pretvoriti u matricu koristeći funkciju `numpy.array()` u linijama 77-80. Na kraju je podatke potrebno pohraniti kako se cijela procedura predobrane ne bi ponavljala svako treniranje.

Bez predobrade podataka mreža je mogla dostići vrlo nisku razinu točnosti od 0.1765 odnosno približno 18%. Sa obradom podataka, no bez normalizacije, razina točnosti je porasla na 0.3971 odnosno približno 40%. Sa normalizacijom podataka razina točnosti je porasla na 0.8676 odnosno približno 87%.

Za treniranje neuronske mreže moguće je odabrati veličinu grupe podataka odnosno nakon koliko podataka će se obnoviti težine veza u mreži te broj epoha odnosno koliko puta će se taj postupak ponavljati nad svim podacima. Velika veličina grupe uvelike ubrzava treniranje mreže no umanjuje kvalitetu mreže. Ove se vrijednosti eksperimentalno postavljaju i mijenjaju između treniranja neuronske mreže kako bi se postigle što bolje performanse. Postavke za jednu mrežu nad jednim skupom podataka možda neće biti adekvatne na drugoj mreži sa drugim skupom podataka. Broj epoha ne smije biti premalen jer se u tom slučaju mreže ne trenira dovoljno no ako je prevelik onda dolazi do pretreniranja i mreža ne radi dobro na pravim podacima.

7. 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*, 15, 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.