



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Távközlési és Médiainformaticai Tanszék

Teljes emberi test mozgásrögzítés és megjelenítés vezeték nélküli szenzorhálózat segítségével

TDK-dolgozat

Készítette:

Rausch Marcell

Konzulens:

Dr. Fehér Gábor

2016

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	1
Kivonat	4
Abstract	5
Bevezetés	6
1. A mozgásrögzítés korábbi eljárásai	1
1.1 Optikai mozgásrögzítés	1
1.1.1 Hagyományos kamera alapú mozgásrögzítés	1
1.1.2 3D kamera alapú mozgásrögzítés	3
1.2 Szenzoros mozgásrögzítés.....	3
1.2.1 Nyúlás szenzor alapú mozgásrögzítés	3
1.2.2 Elmozdulás szenzor alapú mozgásrögzítés	4
1.2.3 Mechanikus rendszerek.....	5
2. Szenzoros mozgásrögzítéshez szükséges szenzorok meghatározása	6
2.1 Inertial Measurement Unit	6
2.1.1 Gyorsulásmérő.....	7
2.1.2 Giroszkóp	8
2.1.3 Magnetométer.....	9
3. A szenzorhálózat tervezése	10
3.1 Perifériális egységek felépítése és feldolgozó algoritmusok összehasonlítása	10
3.1.1 IMU szenzor.....	11
3.1.2 Vezeték nélküli adó	12
3.1.3 Mikrokontroller	14
3.2 Mikrokontrolleren futó feldolgozó algoritmusok összehasonlítása.....	15
3.2.1 Euler-szögek.....	15
3.2.2 Kvaterniók.....	16

3.2.3	Complementary filter	17
3.2.3	Madgwick filter	17
3.2.4	Mahony filter	18
3.2.5	Kalman filter.....	18
3.3	Központi egység felépítése.....	18
3.3.1	Raspberry PI Zero.....	19
3.3.2	MQTT protokoll	20
4.	Kivitelezés	22
4.1	Perifériális egységek	22
4.1.1	Szenzor kalibrálása	23
4.1.2	Szenzor beállítása	23
4.1.3	Rádió alapú hálózati réteg.....	24
4.2	Központi egység	24
4.3	Szenzorok rögzítése	25
4.3.1	3D modellezés	25
4.3.2	Kész modellek 3D nyomtatása	26
4.4	Tesztelés és mérés.....	27
4.4.1	Statikus hiba	27
4.4.2	Sodródás.....	28
4.4.3	Dinamikus hiba	29
4.4.4	NRF24 rádió átviteli sebesség és csomagvesztés mérése	30
4.4.5	Akkumulátoros üzemidő becslése	30
4.5	Megjelenítés	31
4.5.1	Unity game engine	31
4.5.2	Embermodell	31
4.5.3	MQTT protokoll	32
4.5.4	Embermodell mozgatása	32

4.5.5	Tesztelés.....	33
5.	Értékelés.....	36
5.1	Tapasztalatok.....	36
5.2	Jövőbeli tervek.....	36
Köszönetnyilvánítás.....		37
Ábrák jegyzéke		38
Táblázatok jegyzéke		40
Irodalomjegyzék		41

Kivonat

Saját testünk harmadik személyként történő megfigyelése sok tekintetben hasznos lehet. Technikai sportok eredményességéhez nagyban hozzájárul, ha külső szemlélőként látjuk magunkat a gyakorlat végzése során. Ilyen módon kijavíthatjuk saját hibáinkat, csökkenthető a helytelen gyakorlatvégzésből adódó sérülésveszély. Gyerekek mozgásából felismerhetők fejlődési rendellenességek, melyek így kezelhetővé válnak. Egyes betegségek tünetei lehetnek akaratlan, ismétlődő, nem célszerű, de ritmosos mozgásformák, melyeknek a beteg nincs feltétlenül tudatában. Huzamosabb megfigyelés esetén a periodikus mozgások könnyen észlelhetők.

Az emberi mozgás megfigyelésének számos módja lehet. A legelterjedtebb a képi rögzítés, mely helyhez kötött, továbbá a kamera elől rejtett végtagokról nem szolgál hasznos információval. A szenzorokkal történő mozgásrögzítés ezekre megoldást nyújt. A szenzorok nagy mintavételi frekvenciája lehetővé teszi a pontos követést, valamint a vezeték nélküli adatkapcsolat kényelmessé teszi a viseletüket.

Dolgozatomban hálózatba szervezett vezeték nélküli szenzorok tervezését és megépítését, az ezekből nyert adatok feldolgozását és megjelenítését mutatom be. A szenzorok a végtagokra és felsőtestre rögzíthetők, valamint a hálózat bármikor könnyen kiegészíthető új szenzorokkal, ezzel növelhetik a megjelenítés pontosságát, vagy hozzáadhatók sporteszközök. A felsőtestre rögzített, központi egység gyűjti össze a végtagoktól érkező adatokat és továbbítja a feldolgozó egység felé, mely legtöbbször egy számítógép. A számítógép képes valós időben követni a szenzorokat viselő személy mozgását és egy teljes embermodell képében megjeleníteni ezt. A modell forgatható, így több szögből is megtekinthető. Amennyiben a hálózat nincs csatlakoztatva a megjelenítőhöz, a központi egység elmenti az adatokat. Az elmentett adatokból a mozgás visszajátszható, ez alkalmassá teszi a szabadtéri mozgásrögzítésre.

Abstract

In some cases, seeing the movement of our body and limbs as a 3rd person, can be useful in many aspects. Observing ourselves performing a technical sport can be rewarding and progressing. This way it becomes possible to fix incorrectly performed movements and lower the risk of injury. “Developmental coordination” disorder, which affects elementary school-aged children, can be detected by observing their movements and can be treated with physiotherapy. Capturing a child’s movement can help to detect the disorder and to perform physiotherapy exercises correctly. Symptoms of several diseases are unintentional, repetitive, purposeless, or even rhythmic, which patients are often not aware of. With long term observation these periodic acts are easily detectable.

Capturing movement of the human body has many methods. The most common way is via camera. Using cameras, some details can be unseen, such as a hidden limb behind the upper-body. This kind of observation is stationary, always need to be in eyesight of lenses. On the other hand, observing with inertial measurement units (IMU) provide an appropriate solution for these problems. An IMU measures and reports a body part’s acceleration, angular rate, and the magnetic field surrounding the body part. The high sampling rate of sensors allows to capture movements precisely. Furthermore, wireless connection makes it more comfortable to wear.

The topic of my paper is the design and construction of an IMU based wireless network, processing the raw data and represent movement of the observed body. The sensors are attached to limbs and to the torso. New sensors can be easily added to the network, to improve display accuracy or to add sports equipment to the observation. The sensor attached to chest is the main unit, which collects the data from peripheral IMUs located on limbs, and sends to the processing unit. If the processing unit, which is mostly a computer, is not connected, the main unit saves the collected data for future processing. The computer displays a humanoid whose body parts replicate in real-time the movement of the observed body. Previously offline recorded data, on the main unit of the network, can be replayed on the computer, which allows to capture outdoor activities for future observation. The human model on the screen can be rotated, allowing it to be examined from different angles.

Bevezetés

Napjainkban a digitális mozgásrögzítés szerteágazó területeken van jelen. A filmes animációk mozgásának élethűbbé tételéhez régóta használnak optikai mozgásrögzítést[1], mely során nagy sebességű kamerákkal rögzítik a színészek mozgását, s ezt az eljárást alkalmazzák videojáték animációkhoz is. Hétköznapiabb példa a sok háztartásban előforduló, Xbox Kinect játékkonzol. Az eszköz lehetővé teszi a játékok mozgással való vezérlését kiegészítő eszközök viselése nélkül. Hagyományos kamerákkal ellentétben, a Kinect három dimenzióban képes feltérképezni a teret és rekonstruálni a játékos testtartását. A 2006-ban megjelent Nintendo által gyártott Wii játékkonzol optikai megfigyelés helyett szenzoros mozgásrögzítést alkalmaz.

A filmes animációkhoz használt optikai mozgásrögzítéshez nagysebességű kamerák szükségesek. Ezen kamerák több szögből figyelik a jelölökkel ellátott ruhát viselő személy mozgását. A megoldás precízen elhelyezett kamerákat igényel, ezért elsősorban stúdiókban alkalmazzák. Helyhez kötöttsége miatt azonban nem alkalmas sportolás közbeni mozgásrögzítésre.

A beágyazott áramkörök, valamint elektromechanikus szenzorok gyártástechnológiájának fejlődésével egyre precízebb és kisebb egységek készítése vált lehetővé alacsony előállítási költség mellett. A méret csökkenésével megjelentek a viselhető szenzorok, melyek precíz mozgásrögzítést tesznek lehetővé a viselő akadályozása nélkül. A hordhatóságból adódó helyfüggetlenség miatt új alkalmazásterületek nyílnak meg. Ilyen például a sport, a gyógyászat vagy akár a harcászat.

A dolgozatban egy vezeték nélküli szenzorhálózat tervezésének és megépítésének lépéseit, valamint az ebből nyert adatok vizuális megjelenítését mutatom be. A mozgást érzékelő szenzorokat a felsőtesten és a végtagokon kell rögzíteni. A végtagokon elhelyezett szenzorokból érkező adatokat a mellkasra rögzített központi egység gyűjti össze rádiócsatornán és továbbítja a megjelenítő felé. Az elsődleges cél a sportolók mozgásának rögzítése. Ennek legfőbb oka, hogy ha a hálózat képes a sportolás közben fellépő gyors mozdulatok követésére, akkor a hétköznapi alkalmazásra is megfelel. A megjelenítő eszköz felé MQTT protokollon keresztül folynak az adatok, ami lehetőséget ad az adatok felhőbe való továbbítására. A felhőben további analitikák végezhetők, illetve több eszközön is megjeleníthető a szenzorhálózatot viselő mozgása.

A dolgozat 1. fejezete az irodalomban fellelhető optikai-, valamint szenzoros mozgásrögzítési eljárásokat tárgyalja, ezek előnyeivel és hátrányaival. A szenzoros mozgásmegfigyeléshez elsődleges szempont a megfelelő érzékelő kiválasztása. A giroszkóp érzékeny a gyors elfordulásokra, ugyanakkor hosszútávon pontatlan lehet. Ennek kompenzálására két referenciairány választása szükséges, melyeknek megfelelő az állandó irányú gravitációs gyorsulás, valamint a föld mágneses északi iránya. Az ezen irányok mérésére alkalmas gyorsulásmérőt és magnetométert, valamint a giroszkópot tartalmazó IMU (Inertial Measurement Unit), működésének ismertetését a 2. fejezet tárgyalja bővebben.

A hálózat két főbb részre osztható perifériális- és központi egységekre. A perifériális egységek a testrészekre rögzítve helyezkednek, míg a központi egység a mellkasra illeszkedik. Egy testrésze rögzített egység tartalmaz egy IMU-t, mely ebben az esetben egy InvenSense által gyártott MPU-9250 eszköz. A választott 9 szabadságfokú szenzor 3 tengelyű giroszkópot, gyorsulásmérőt és magnetométert tartalmaz. A központi egység felé történő rádiós adattovábbításért egy NRF24L01P modul felel. A szenzor adatainak feldolgozását, valamint a rádió vezérlését egy STM32F042 típusú mikrokontroller végzi. A központi egység azonos IMU szenzort és NRF24 rádiót tartalmaz, egy WIFI modullal kiegészítve. A feldolgozásért egy Raspberry Pi Zero felelős, mely WIFI hálózaton továbbítja az összegyűjtött adatokat a megjelenítő felé. A tervezés lépései, a kiválasztott eszközök tulajdonságai, valamint a feldolgozó algoritmusok bemutatására a 3. fejezetben kerül sor.

A szenzorhálózat tervek alapján való megépítése a 4. fejezetben kerül részletezésre. A rádiócsatorna fontos tulajdonsága az átviteli sebessége. Az adatlap szerint az NRF24 rádió 2Mbps felhasználói átviteli sebességen képes az adattovábbításra, mely a használt hálózati réteg hatására csökken. Egy szenzor a mérések alapján egy szenzor 30kbps sebességen küld, így a tervezett 9 darab szenzor 270kbps-os sávzélességet igényel. Továbbá fontos az MPU-9250 és ennek adatait feldolgozó Madgwick-szűrő hatékonyságának vizsgálata statikus helyzetben, valamint dinamikus mozgások közben. A Madgwick-szűrő kiváló dinamikus tulajdonsággal rendelkezik, hatékonyan képes követni a gyors mozgásokat még nagy gyorsulások esetén is.

A szenzor adatainak megjelenítése 4.5 fejezetben látható. A megjelenítés Unity videojáték-motor segítségével történik, mely képes valós időben fogadni és megjeleníteni az MQTT bróker felől érkező adatokat.

1.fejezet

A mozgásrögzítés korábbi eljárásai

A mozgásrögzítés sokakat foglalkoztató téma, így terjedelmes szakirodalommal rendelkezik. Számos módszert fejlesztettek ki a megfigyelésre, ebben a fejezetben ezek összefoglalása olvasható

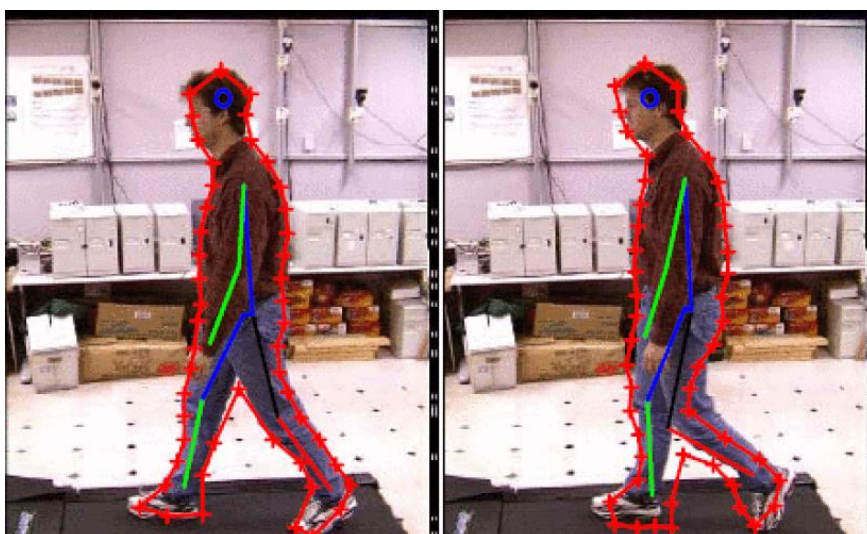
1.1 Optikai mozgásrögzítés

Az optikai mozgásrögzítéshez alkalmazhatók hagyományos kamerák, melyek akadálya a 3D információk kinyerése. 3D kamerát használva pontosabb becslés kapható a személy testtartásáról.

1.1.1 Hagományos kamera alapú mozgásrögzítés

A hagyományos kamerák a teret 2 dimenzióra képezik le, a testrészek helyzetének megállapításához azonban 3 dimenziós hely- és szögadatokat szükségesek. Ennek megoldására különböző módszereket fejlesztettek ki.

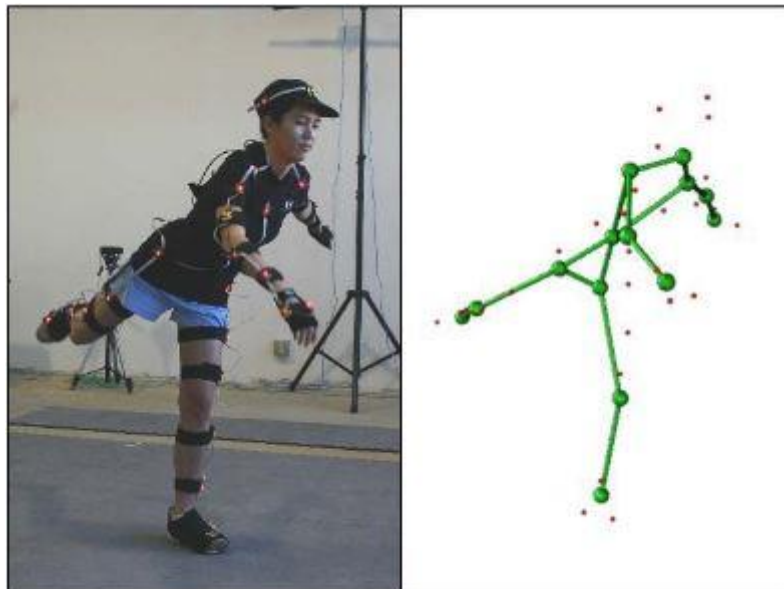
Kamerásrögzítés esetén gyakorta szilüettekben indulnak ki[3]. Ez a módszer alkalmas az emberi leegyszerűsített csontváz helyzetének és testtartásának becslésére. Ez a csontváz később hozzárendelhető az animált test csontvázához, testrészeihez. A kamera előtt eltakart végtagok helyzetére, ezek korábbi mozgása alapján képes becslést adni.



1.1 ábra Emberi sziluett és csontváz becslés

Az 1.1-es ábrán egy észlelt sziluett körvonala és a csontváz becsült helyzete látható. A módszer előnye, hogy a megfigyeltnek nem szükséges semmilyen kiegészítő eszközt viselnie, továbbá bármely kellő felbontású kamera felhasználható. Ugyanakkor hátránya, hogy precíz követést igénylő alkalmazásterületekhez nem kielégítő a pontossága. A legelterjedtebb kamerák 24 képet rögzítenek másodpercenként, ami olcsóbb szenzoroknál elmosódásokat okozhat, ezzel rontva a becslés megbízhatóságát.

Nagyobb pontosság érhető el, ha a megfigyelt személy testrészein úgy nevezett *markerek* (jelölők) kerülnek rögzítésre[2]. Két féle jelölőt különböztetünk meg: passzív és aktív. A passzív jelölők jó fényvisszaverő anyagból készülnek, melyet a kameránál elhelyezett fényforrás világít meg és az erről visszaverődő fényt képesek a kamerák detektálni. Az aktív jelölők egy LED fényforrást tartalmaznak, melyek a kamera digitális rekeszével szinkronban, vele azonos frekvencián villognak. Mindkét esetben a kamera, optikai szűrők segítségével, a jelölőkből érkező fény frekvenciájára van kalibrálva, így csak a jelölők láthatók a rögzített képen. Jelentős különbség a két jelölő között, hogy az aktív rendszer képes plusz információ továbbítására a villogás frekvenciájának modulálásával. Ezzel egyértelműen azonosíthatók a jelölők. A testen elhelyezkedő passzív jelölők azonosításához viszont folyamatos megfigyelés szükséges. A több kamerás detektálás után, a markerek meghatározott pozíciójából rekonstruálható a megfigyelt személy csontváza.



1.2 ábra Aktív jelölők testen való elhelyezkedése, valamint jobb oldalon a kamera által észlelt jelölők és ezek alapján rekonstruált csontváz

Fontos a jelölők pontos elhelyezése, mely az 1.2 ábra bal oldalán látható. A testrészek elfordulásának szabadsági fokától függően egy, kettő, vagy három jelölő szükséges. Például a csuklóra egy, míg a fejre három jelölő szükséges. Egy kamera esetén gondot jelentenek a

kitakart jelölők, aminek kompenzálására több kamerát használnak. Ezzel a módszerrel centiméteres pontosság érhető el, ugyanakkor költséges kamerák szükségesek az ilyen precíz mozgásrögzítéshez.

1.1.2 3D kamera alapú mozgásrögzítés

3D kamerák a hagyományos képekkel ellentétben mélység információkkal is szolgálnak. A legelterjedtebb ilyen szenzor a Microsoft Kinect [5][16]. Professzionális felhasználásra alkalmas a LIDAR[4] [4] szenzor. A Kinect egy infra projektor segítségével egy hálót vetít maga el. A testekre vetített háló torzul, ezekből a torzulásokból következtetni lehet a pontok távolságára. A 3D képen láthatóvá válik a test sziluettje, melyhez, az előző pontban bemutatott módszerhez hasonlóan, hozzárendelhető egy csontváz. A LIDAR rendszer egy forgatható szenzort tartalmaz, mely lézeres távolságmérők sorából áll. Az eszköz az érzékelő forgatásával térképezi fel a környezetet.

Lényeges különbség a hagyományos kamera alapú módszerrel ellentétben, hogy az emberi sziluettet mélységadatokból és nem képek közötti különbségből határozza meg.

1.2 Szenzoros mozgásrögzítés

Szenzoros mozgásrögzítés alatt a testrészeken elhelyezett mozgásérzékelő szenzorokat értem. Ezek a szenzorok leggyakrabban gyorsulásmérőt, giroszkópot és opcionálisan magnetométert tartalmaznak. Ezen érzékelők mérik az egyes relatív vagy abszolút orientációját. E módszer előnye, az optikai képrögzítéssel szemben, hogy nem okoznak gondot az eltakart testrészek, jelölők. Továbbá a szenzoros mozgásrögzítésnél nem szükséges a precízen beállított kamerák látószögében tartózkodni, ezzel nagyobb szabadságot nyújt.

1.2.1 Nyúlás szenzor alapú mozgásrögzítés

A nyúlás szenzor egy olyan textil, mely speciális bevonattal van ellátva. Ilyen bevonat lehet Polipirrol, vagy szén és gumi keveréke. Az anyag ellenállása megnyúlás hatására változik, mely mérésével következtetni lehet a nyúlás mértékére. Ilyen bevonattal ellátott anyagból készített ruhadarab viselése esetén a megnyúlásból következtetni lehet a testrészek helyzetére [6]. A megoldás nagy előnye a hétköznapi ruhadarabok viselésével érhető el a mozgás rögzítése. Hátránya, hogy az anyag öregedésével változik az ellenállása, folyamatos kompenzációt igényel, így növelve a pontatlanságot. Továbbá, a lassú tranziensek miatt alacsony, akár 1 másodperc is szükséges a stabil értékek megállapításához.

1.2.2 Elmozdulás szenzor alapú mozgásrögzítés

A legelterjedtebb elmozdulás érzékelő szenzorok a gyorsulásmérő és giroszkóp, melyeket együtt használva az angol szakirodalom *Inertial Measurement Unit*-nak, röviden IMU-nak hív. Ezen túl én is IMU-ként fogok az ilyen szenzor fúzióra hivatkozni. Egy IMU, magnetométerrel



1.3 ábra Xsens MVN szenzorhálózattal felszerelt ruha

kiegészítve képes meghatározni saját abszolút orientációját, a föld mágneses északi irányához. Számos IMU alapú megvalósítás készült, az emberi mozgáskövetésre[9] [10].Az Xsens, MVN[9] nevű, megvalósítása egy 17 szenzorból álló vezetékes hálózat. A szenzorok az 1.3 ábra szerinti elrendezésben kerültek rögzítésre, egy erre a célra készített ruhán. A megvalósítás a testrészek orientációja mellett, azok térbeli haladását is rögzíti a gyorsulásmérő adatok integrálásával. A hálózat egy GPS szenzorral van kiegészítve, az integrálással kapott távolságok hibájának kompenzálására.

Az Xsens vezeték nélküli megvalósítással is szolgál[11] . A vezetékes megoldáshoz hasonló elrendezésben pántokkal kerülnek rögzítésre a szenzorok. Az adatlap szerint, a szenzor 1kHz-es kiolvasási frekvencián üzemel, míg a megjelenítéshez használt adatokat 60Hz-en küldi a megjelenítő felé. Ez a szenzorhálózat nagymértékben hasonlít a dolgozatomban bemutatott megoldásra. Az Xsens hálózat központi egysége a megjelenítő számítógéphez van csatlakoztatva, így a mozgásrögzítés helyszíne a központi egység 10 m-es körzetére redukálódik.

A [7] cikkben bemutatott, az Xsens MVN ruhához hasonló szenzorhálózat, IMU szenzorokon kívül taktilis érzékelőket is tartalmaz. A taktilis szenzorok, a bőrhöz hasonlóan, egy felületen több ponton képesek mérni a nyomás erősségét. Így, a tárgyakkal való interakciókról is szolgáltat információt. A hálózatot kiegészítő érzékelők a háton, csípőn és talpon kerültek elhelyezésre. A talpon lévő szenzorral érzékelhetők a lépések, ezzel korrigálható a gyorsulásmérő adatainak integrálásával kapható távolságmérés hibája.

1.2.3 Mechanikus rendszerek

A mechanikus mozgásrögzítő rendszerek, egy teljes külső csontváz felépítésével valósulnak meg[8]. Ez a váz az emberi testre, testrészek külső felszínére kerül felerősítésre és a testrészek egymással bezárt szögét méri. A váz csuklópontjaiban elhelyezett potenciométerek ellenállását mérve meghatározható a testrészek orientációja. Az eljárás előnye, hogy potenciométerrel nagy felbontás érhető el, valamint analóg mivoltából adódóan a mintavevő egységen múlik mekkora a mintavételi frekvencia. A rendszer robosztus mérete akadályozza a viselő mozgását, alkalmatlanná téve a sportolás közbeni viselésre.

2.fejezet

Szenzoros mozgásrögzítéshez szükséges szenzorok meghatározása

A mozgásrögzítés szenzoros módszerének választása miatt szükséges a megfelelő szenzorok kiválasztása. A továbbiakban az erre alkalmas szenzorok részletezése olvasható.

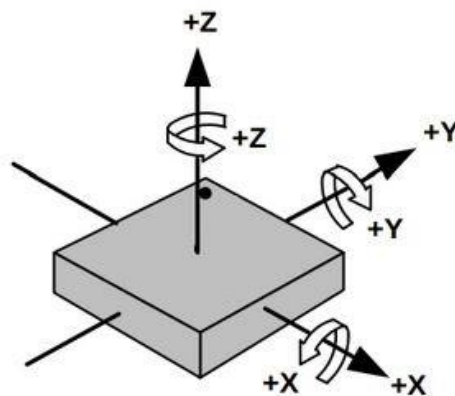
A giroszkóp elfordulási szögsebességet mér, ezt kiintegrálva megkapható az eszköz orientációja a kezdeti helyzethez képest. Általánosabb orientáció kapható egy állandó referencia irány választásával. Gyorsulásmérővel kiegészítve, rendelkezésre áll a gravitációs gyorsulás, melynek iránya állandó. Az így kapott 6 szabadságfokú szenzor mérései alapján megállapítható az eszköz gravitációs gyorsulással bezárt szöge. Ezen szenzoroknál megfigyelhető, a sodródás a függőleges tengely körül, nyugalmi helyzetben. Ennek oka a giroszkóp nem nulla átlagú hibája. A giroszkóp hibája korrigálható egy újabb, a gravitációs gyorsulásra merőleges referenciairány választásával. Magnetométer hozzáadásával meghatározható a föld mágneses északi iránya. Az mágneses észak és gravitációs gyorsulás alkotta referencia síkhoz kalibrálható a szenzor. Az így kapott orientáció abszolút, valamint sodródásmentes.

Ebben a fejezetben a mikro-elektromechanikus giroszkóp, gyorsulásmérő, valamint magnetométer alapvető működése kerül részletezésre.

2.1 Inertial Measurement Unit

Az angol szakirodalom Intertial Measurement Unit-nak vagy röviden IMU-nak nevezi az olyan eszközöket, melyek képesek mérni a testre ható erőt, a test elfordulását és olykor az azt körülvevő mágneses mezőt. Egy IMU gyorsulásmérőket, giroszkópokat és opcionálisan

magnetométereket is tartalmaz. A testre ható összes erő mérésére, egy ortogonális koordináta-rendszer három tengelye mentén kell elhelyezni a szenzorokat.

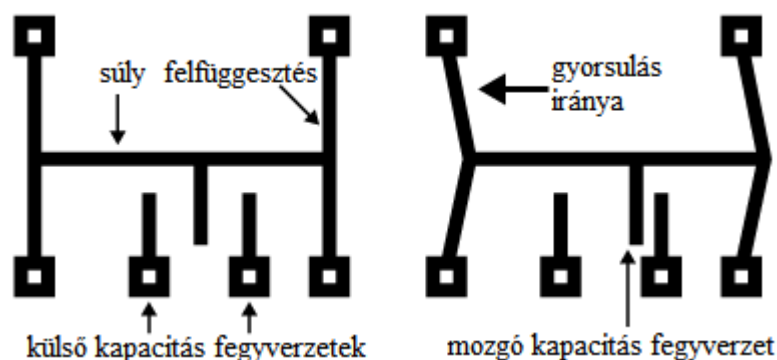


2.1 ábra Egy IMU-ban elhelyezkedő szenzorok tipikus orientációja

Az így ortogonálisan elhelyezett 3 tengelyű szenzorok 6 vagy 9 szabadsági fokot engednek meg, magnetométer nélkül, illetve magnetométerrel. A magnetométer nélküli IMU a bekapcsolás pillanatában lévő orientációját veszi a függőlegeshez képesti elfordulás referenciáirányának. A kapott orientáció így relatív, és nem abszolút, mert függ a szenzor kezdeti irányától.

2.1.1 Gyorsulásmérő

A leggyakrabban használt mikro-elektromechanikus gyorsulásmérő megvalósítás, változó kapacitás mérésen alapul. Egy egytengelyű gyorsulásmérő egyszerűsített vázlatát látható a 2.2 ábrán.



2.2 ábra Gyorsulásmérő belső felépítésének vázlatos rajza

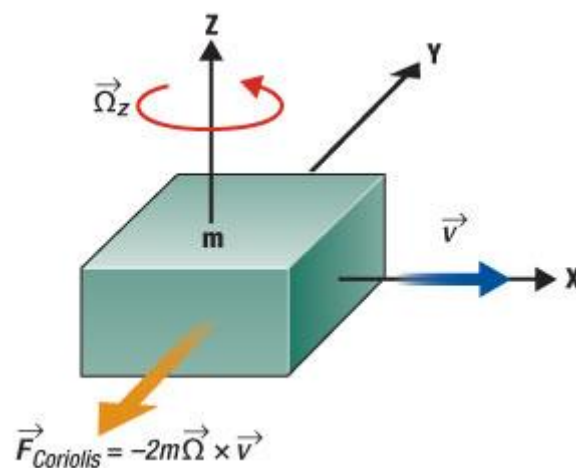
A rajzon látható két külső-, valamint a súlyra rögzített mozgó fegyverzetek között két kapacitás mérhető. Nyugalmi helyzetben a két mért kapacitás megegyezik. Gyorsulás hatására a felfüggesztett súly, tehetetlensége miatt, elmozdul nyugalmi pozíciójából. A fegyverzetek

között megváltozott távolság hatására változik az ezek között mért kapacitások értéke, mely mértékéből következtetni lehet az elmozdulás mértékére és irányára.

A gyorsulásmérő érzékeny a kis gyorsulásokra, így folyamatos zajjal van terhelve. Háromtengelyű gyorsulásmérő segítségével meghatározott gravitációs gyorsulás iránya rövid távon pontatlan értéket mutat, hosszú távon viszont pontos méréssel szolgál. Aluláteresztő szűrővel szűrve a jeleit, pontosítható a mérés.

2.1.2 Giroszkóp

A giroszkóp, a gyorsulásmérőhöz hasonló módon az elfordulás hatására bekövetkező kapacitás változást mér. Ha egy test egyenletes sebességgel halad, majd külső erő hatására a haladási irányra merőleges tengely körül elfordul, akkor a testre, erre a két tengelyre merőleges erő hat. Ez az úgy nevezett Coriolis erő.



2.3 ábra Coriolis erő bemutatása

Az áramkörben történő megvalósításban nincs mód az egyenletes egyirányú sebesség fenntartására, a tokozásban, a mozgó test fel van függesztve, oly módon, hogy a síkjában szabadon mozoghat. A felfüggesztett test ebben az irányban folyamatosan rezeg, míg erre merőleges irányba csak a Coriolis-erő hatására képes elmozdulni. A Coriolis-erőre merőleges síkban helyezkedik el, a rezgő súly alatt és felett egy fegyverzet. Ezen fegyverzetek és a súly közötti kapacitás mérésével határozható meg az elfordulás sebessége.

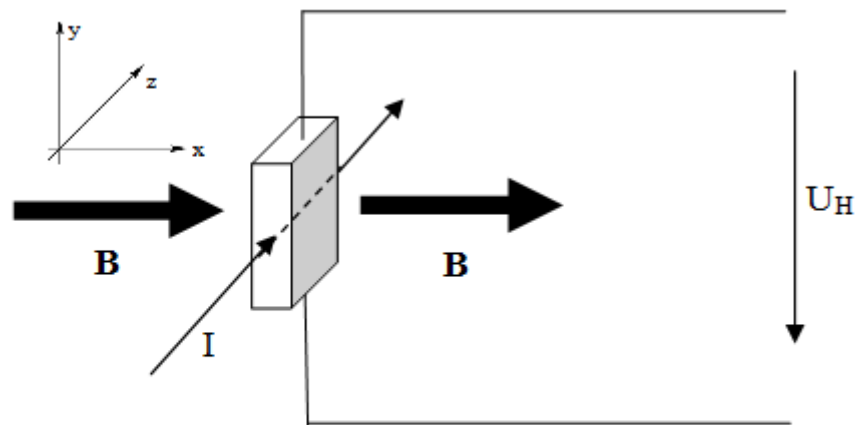
A giroszkóp hátránya, hogy tartalmaz egy mechanikusan mozgó tömeget, melynek ideális esetben tökéletesen egyenes pályán kell periodikusan mozognia. A gyártásból adódó pontatlanságok, a kis méret miatt nem tökéletes egyenes mentén mozog. Ez folyamatos zajjal

terheli a kimenetét, mely átlagértéke nem nulla. Továbbá, a mechanikusan mozgó alkatrész növeli az eszköz fogyasztását.

A gyorsulásmérő nem elég az eszköz függőlegeshez képesti orientációjának meghatározására, mert a testre a gravitációs gyorsuláson kívül más erők is hatnak a szenzorra, így kimenete zajos. A giroszkóp az elfordulásokra érzékeny, ám hosszútávon a hibájából adódóan az integrált elfordulás nagymértékben eltér a valóstól. A kettő szenzor kiegészíti egymást.

2.1.3 Magnetométer

A legtöbb magnetométer az úgynevezett Hall-effektus elvén működik. A 2.4 ábra szerint, egy z irányában áramjárta vezető x irányú mágneses térbe helyezve az áramló töltésekre Lorentz-erő hat, mely hatására a vezető két pontján potenciálkülönbség jelenik meg.



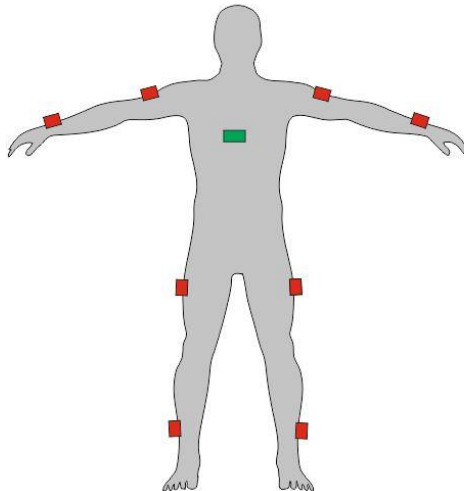
2.4 ábra Hall-effektus szemléltetése. I árammal átjárt, B mágneses indukciójú mágneses térbe helyezve, a vezetőn U_H feszültség mérhető

A magnetométer a vízszintes orientáció meghatározásához szükséges referenciairányt szolgáltatja, valamint kompenzálja a giroszkóp hibáját.

3.fejezet

A szenzorhálózat tervezése

Az emberi test mozgásának rögzítéséhez minden mozgó testrészre szükséges egy szenzor elhelyezése. Hierarchia szerint két csoportra oszthatók a szenzorok: központi- és perifériális egységre. A központi egység feladata a perifériális egységektől való adatok begyűjtése, majd vezeték nélküli adatkapcsolaton keresztüli továbbítása a megjelenítő eszköz felé. A végtagokon elhelyezkedő perifériális egységek méréseket végeznek a testrészek helyzetéről, majd továbbítják ezeket. A továbbításra vezeték nélküli interfészre van szükséges, mely kielégítő sávszélességet biztosít a központi egység felé.



3.1 ábra Szenzorhálózat szenzorainak elrendezése

Ebben a fejezetben a perifériális, központi egység felépítésével, valamint a vezeték nélküli interfésszel szemben támasztott elvárások és ezek alapján kiválasztott eszközök kerülnek részletezésre.

3.1 Perifériális egységek felépítése és feldolgozó algoritmusok összehasonlítása

Egy perifériális egység valamely végtaghoz rögzítve méri annak helyzetét, majd a mért adatokat vezeték nélküli interfészen továbbítja a központi egység felé. Felépítését tekintve egy ilyen egység három fő részre osztható: egy vezeték nélküli adóra, egy IMU szenzorra, valamint egy vezérlő mikrokontrollerre. A mikrokontroller feladata az adatok beolvasása az IMU felől, ezek

feldolgozása, majd továbbítása a vezeték nélküli adón keresztül. A kellően hosszú akkumulátoros üzemidő eléréséhez alacsony fogyasztású eszközök megválasztása szükséges.

3.1.1 IMU szenzor

Az IMU feladata az eszközre ható gyorsulások, elfordulások és az azt körülvevő mágneses tér mérése. Az emberi testrészek orientációjának meghatározására gyors és pontos eszköz szükséges.

A szenzorral szemben támasztott elvárások:

- 100Hz feletti mintavételi frekvencia: Képes legyen követni a gyors mozdulatokat sportok közben is.
- Magnetométer: A giroszkóp hibájának kompenzálására, abszolút orientáció meghatározásához.
- Alacsony fogyasztás: Hosszú üzemidő elérése akkumulátoros tápellátás mellett is.
- Kis méret
- Alacsony ár

Az elvárások alapján a prototípus megépítéséhez a választás, az InvenSense által gyártott MPU-9250 szenzorra esett. Ezen szenzor egy 3x3x1mm-es tokban két chipet tartalmaz, melyek fontosabb tulajdonságai a 3.1 táblázatban láthatók.

	Típus	Érzékenység	Felbontás	Áramfelvétel	Zaj
Gyorsulásmérő	MPU-6500	$\pm 16g$	16 bit	450 μ A	8mg-rms
Giroszkóp	MPU-6500	$\pm 2000^\circ/\text{sec}$	16 bit	3.2mA	0.1 $^\circ/\text{s}$ -rms
Magnetométer	AK8963	$\pm 4800\mu\text{T}$	16 bit	280 μ A	0.015 μT -rms

3.1 táblázat MPU-9250 szenzor felépítése és fontos tulajdonságai



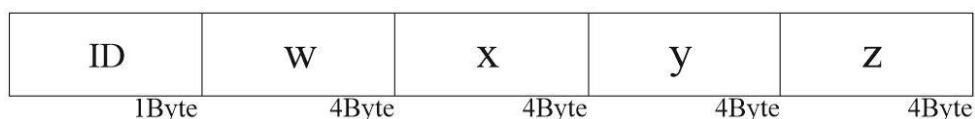
3.2 ábra MPU-9250 Breakout board képe

A giroszkóp 32kHz, a gyorsulásmérő 4kHz, míg a magnetométer 100Hz maximális mintavételi frekvenciára képes. Az IMU tartalmaz egy előfeldolgozó processzort, mely a nyers adatokat szűri. Az így feldolgozott, még nyers adatok kiolvasási sebessége regiszterek segítségével állítható, maximuma 1kHz. A mikrokontrollerrel való kommunikációra I2C protokoll kerül felhasználásra, ugyanakkor a szenzor SPI interfészen is képes kommunikálni.

Az MPU-9250 helyett jó alternatíva a Bosch által gyártott BNO55 eszköz. A szenzor hasonló paraméterekkel rendelkezik, igazi előnye azonban, hogy beépített mikrokontrollerrel rendelkezik. A beépített 32 bites mikrokontroller elvégzi a nyers adatok feldolgozását, így az abszolút orientációs adatok 100 Hz-es kiolvasási frekvenciával olvashatók. A prototípushoz nem erre esett a választás az MPU-9250 alacsonyabb ára miatt.

3.1.2 Vezeték nélküli adó

A szenzoron lévő vezeték nélküli adó feladata, a szenzor helyzetéről mért adatainak továbbítása a központi egység felé. Az átviteli csatorna és a központi egység terhelésének csökkentése érdekében, érdemes a nyers adatokon történő számításokat helyben, a mikrokontrolleren elvégezni. Az üzenet így már csak a megjelenítéshez szükséges orientációs adatokat, valamint a szenzor azonosítóját tartalmazza. Egy üzenet felépítése a 3.3 ábrán látható.



3.3 ábra A szenzor felől a központi egység felé továbbított üzenet felépítése

1Byte méretű ID a szenzor azonosítására szolgál, míg a fennmaradó 16Byte az orientációs adatokat tartalmazza. A felbontás csökkentésével csökkenthető az orientációs adatok mérete. Az Euler szögek helyett az adatok kvaterniók formájában kerülnek továbbításra, mely a pontosabb megjelenítéshez szükséges. A megjelenítéshez legalább 100Hz küldési frekvencia szükséges, így 13.6Kbit/s átviteli sebességre van szükség szenzoronként, nem számítva a csomagvesztés számontartására szolgáló azonosítót. A 3.1 ábra szerinti elrendezésben 8 szenzor esetén minimum 108.8Kbit/s sebesség szükséges az átvitelhez. Az átviteli sebesség mellett fontos szempont az alacsony ár és fogyasztás.

Nyilvánvaló választás, egy WIFI képes mikrokontroller, mely elegendő sáv szélességet biztosít a feladat elvégzésére, valamint automatikusan megoldja az ütemezést. Továbbá WIFI választásával központi egység nélkül is megoldhatóvá válik az adatok megjelenítő felé való továbbítása, ezzel csökkenthető a mellkason lévő szenzor mérete. Manapság népszerű ilyen szenzorok, az Espressif által gyártott ESP-8266 illetve a hasonló, Particle által gyártott Photon. Ezek előnye a nagy számítási kapacitásuk, így további mikrokontroller nem szükséges a szenzor adatainak beolvasására, valamint ezek feldolgozására. Ugyanakkor ezek adatlap szerinti áramfelvétele magas, az ESP-8266 170mA-t, míg a Photon 100mA-t vesz fel átlagosan. Az ESP-vel való korábbi tapasztalatok alapján olykor 300-400mA felvételére is képes, mely túlzottan megterhelné az akkumulátort.

A Bluetooth Low Energy modul áramfelvétele jelentősen kisebb. Az elterjedt, Texas Instruments által gyártott CC2540 chipen alapuló, HM-10 modul áramfelvétele átlagosan 18mA. A kis áramfelvétel mellett ezek a modulok broadcast üzenetszórásra is képesek, aminek segítségével egyszerűen továbbíthatók az adatok a központi egység felé. Elsősorban a már meglévő NRF24 modulok miatt nem a BLE modul lett felhasználva.

A specifikációk alapján, a hobbi elektronikusok körében közkedvelt, Nordic által gyártott NRF24L01P -re esett a választás.



Frekvenciasáv	2.4GHz ISM
Maximum átviteli sebesség	2Mbps
Áramfelvétel maximális sebesség mellett	11.3mA

3.4 ábra NRF24L01P képe és fontosabb tulajdonságai

Az NRF24 alacsony fogyasztás mellett nyújt 2Mbps átviteli sebességet 2.4GHz-es ISM sávban. Az eszköz GFSK modulációt használ, ezzel csökkenti a csatornák közti áthallást. Az eszköz 126 csatornát kezel, melyek közül a felső 20 a legtöbb WIFI csatornánál magasabb frekvencián helyezkedik el, ezzel tovább csökkenthető az interferencia. Az adó-vevő SMD kivitelének, valamint PCB antennájának köszönhetően kis méretű, felülete 12*18mm. Mikrokontrollerrel való kommunikációra SPI interfészt használ.

Az NRF24 rádió Enhanced ShockBurst adatkapcsolati réteget alkalmaz, mely magába foglalja az automatikus csomagkezelést és időzítést, automatikus csomag nyugtázást és újra küldést. Egy rádió maximum 6 másik rádióval képes kommunikálni. A rádió népes felhasználó tábornak örvend, így több megoldást is született erre a problémára[12][13]. Ezek a megoldások fa-, vagy háló topológiába szervezik a szenzorokat, így több száz szenzor összeköttetését megoldva.

3.1.3 Mikrokontroller

Mikrokontroller választásnál fontos szempont, hogy támogassa mind a rádió, mind az IMU által használt SPI és I2C interfészt. Sok perifériális egység miatt, a nyers adatok továbbítása túlzottan leterhelné a rádiós csatornát. Érdeemes gyors feldolgozó algoritmust alkalmazni, melyet a mikrokontroller képes futtatni. Ezen algoritmusok így is számításigényesek. A számítási kapacitás mellett fontos az alacsony fogyasztás a hosszú akkumulátoros üzemidő eléréséhez.

Az ATmega328P mikrokontroller, melyet az Atmel gyárt, alacsony fogyasztású, 20mA körüli áramfelvétellel működik. Arduino támogatásának köszönhetően rendkívül közkedvelt, így olcsó, valamint magas szinten programozható. Elérhető rá mind NRF24L01P-, mind MPU-9250 illesztő könyvtár. Az adatlap szerint 8 bites 8MHz-es CPU-val rendelkezik. Ez a számításigényes feladatokra nem teszi alkalmassá.

A választott STMicroelectronics által gyártott STM32F042F6P6, a fentebb bemutatott mikrokontrollerhez hasonlóan olcsó, ellentétben 48MHz-es 32 bites CPU-val rendelkezik. Mbed¹ kompatibilitása lehetővé teszi az egyszerű programozását. A mikrokontroller 32 Kbyte flash memóriával és 6kbyte SRAM-mal rendelkezik. A 20 lábás kiosztása miatt könnyen forrasztható, ezért prototípuskészítésre alkalmas. A kevés láb, valamint olcsósága miatt esett erre a mikrokontrollerre a választás.

¹ www.mbed.com – Az Arduino-hoz hasonló online alkalmazásfejlesztő IDE, Cortex-M típusú mikrokontrollerekhez.

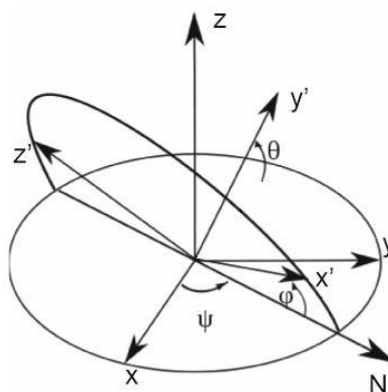
3.2 Mikrokontrolleren futó feldolgozó algoritmusok összehasonlítása

Az IMU-ból kiolvasott nyers adatok feldolgozására kis számításigényű algoritmus szükséges, melyet a választott STM32F042 mikrokontroller hatékonyan képes futtatni. A feldolgozás azért szükséges, mert a giroszkóp elfordulási szögsebességet mér, melyet kiintegrálva kapható meg az orientáció. A giroszkóp mérései nem determinisztikus zajjal vannak terhelve, mely hatására nyugalmi helyzetben is mér elfordulást. A giroszkóp hibájának kompenzálására felhasználhatók a gyorsulásmérő és a magnetométer mérései. A gyorsulásmérő adatai alapján kompenzálható a függőlegeshez képesti elfordulás hibája, és a magnetométer mérései segítségével a föld mágneses északi irányához képest korrigálható a szenzor vízszintes elfordulásának pontatlansága. A feldolgozást nehezíti a szenzorok különböző mintavételi frekvenciája. Az MPU-9250 maximum kiolvasási sebessége 1KHz, így a nagyobb mintavételi frekvenciájú giroszkóp és gyorsulásmérő adatai is ilyen gyakorisággal olvashatók ki. A magnetométer egy nagyságrenddel kisebb, 100 Hz-es mintavételi frekvenciával rendelkezik.

Egy test térbeli orientációjának leírására használhatók Euler-szögek, valamint kvaterniók. A kvaterniók használata előnyösebb a 3 dimenziós modellezőprogramok használata során. Ebben a fejezetben ismertetésre kerülnek a kvaterniók, a kvaterniók előnyei, valamint a szenzor adatokat feldolgozó algoritmusok és összehasonlításuk.

3.2.1 Euler-szögek

Egy test orientációjának leírására, 3 dimenziós térben, kézenfekvő ötlet az Euler-szögek használata. Az Euler-szög egy 3 dimenziós vektor, mely egy referencia irányhoz képest megadja a test orientációját. A 4.1 ábrán (x,y,z) a rögzített-, míg (x',y',z') az elforgatott koordináta-rendszert jelöli. Ezen síkok metszészvonala N. Az elforgatott koordináta-rendszer a



4.1 ábra Euler szögek szemléltetése

testhez rögzített lokális koordináta-rendszert jelenti, ezen rendszer orientációja 3 komponenssel adható meg.

$$r = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Az r vektor egyértelműen megadja a test orientációját. A vektor komponensei (φ, θ, ψ) megadják rendre az (x, y, z) tengelyek körüli elfordulást.

3 dimenziós tervezőprogramoknál megfigyelhető, az úgynevezett *Gimbal lock* nevű jelenség. Ez a jelenség akkor következik be, mikor két forgatási tengely egybe esik. Ilyenkor a 3 szabadsági fok 2-re csökken, az egy egyenesbe eső tengelyek körül forgatva a testet, ugyanazt az eredményt kapjuk. A Gimbal lock-ból kimozdítani a testet csak mind a három tengely körüli forgatással lehet. Ennek elkerülése érdekében a 3D tervezőprogramok kvaterniókat használnak.

3.2.2 Kvaterniók

A kvaterniók (vagy Hamilton-féle számok) a test orientációját 3 helyett 4 paraméterrel írják le. Szögek helyett komplex számok jelölik az elfordulásokat. Egy kvaternió általános felírását a 4.2 egyenlőség szemlélteti. Az első három tag a test tengelyének orientációját adja meg, míg a negyedik az, ez a tengely körüli elfordulást.

$$q = w + xi + yj + zk \quad (4.2)$$

Ahol i, j, k báziskvaterniók, melyekre teljesül a (4.3) egyenlőség. (w, x, y, z) valós együtthatók.

$$i^2 = j^2 = k^2 = i * j * k = -1 \quad (4.3)$$

$$\mathbb{H}\{(w, x, y, z) \in \mathbb{R}^4\} \quad (4.4)$$

A kvaterniók számunkra fontos információtartalma azok orientációja, így azok normalizálása szükséges (4.5). Az egység hosszú vektor így már alkalmas forgatásra.

$$q_u = \frac{q}{\|q\|} \quad (4.5)$$

Normalizált kvaternióval való szorzás, a komplex számokhoz hasonlóan forgatásnak felel meg. A szorzás a (4.3) egyenlet betartása mellett végezhető el. A művelet nem kommutatív, megkülönböztetünk jobboldali és baloldali szorzást.

3.2.3 Complementary filter

A legegyszerűbben implementálható szűrő a *Complementary filter*, mely elsősorban magnetométer nélküli szenzorokhoz használható. A gyorsulásmérő hosszútávon pontos, de rövidtávon zajos jeleket szolgáltat. A giroszkóp ezzel szemben jól reagál a gyors változásokra, de hosszútávon sodródik. Éppen ezért a gyorsulásmérő jeleit aluláteresztő szűrővel lehet pontosítani, míg a giroszkóp integrált adatait felüláteresztő szűrővel, a következő képpen:

$$\vartheta_{i+1} = \alpha * (\vartheta_i + \omega_{gyro} * \Delta t) + (1 - \alpha) * \vartheta_{accel} \quad (4.6)$$

Ahol α az aluláteresztő szűrő paramétere, mely a következő képpen határozható meg:

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \quad (4.7)$$

Az egyenletben Δt a mintavételi időt, ϑ_i orientációt az i időpillanatban, ω_{gyro} a giroszkóp által mért szöggyorsulást, míg ϑ_{accel} a gyorsulásmérő által mért orientációt jelenti. Az α együttható változtatásával állítható, mekkora részben hagyatkozzon a szűrő a giroszkóp-, és mekkora részben a gyorsulásmérő méréseire. Minél kisebb az α annál kisebb mértékben veszi figyelembe a giroszkóp sodródását, viszont annál zajosabb a kimenet a gyorsulásmérő zajossága miatt.

A *Complementary filter* nem veszi figyelembe a magnetométer adatait, így csak a függőlegeshez képesti elfordulást képes kellő pontossággal meghatározni. A függőleges tengely körüli elfordulásnál jelentkezik a sodródás jelensége, mely kompenzálható, de nem szüntethető meg teljesen.

3.2.3 Madgwick filter

Sebastian Madgwick 2010-ben kifejlesztett egy hatékony szenzor fúziós algoritmust[15]. Ezen algoritmus célja a kis kapacitású mikrokontrollereken való nyers IMU szenzoradatok feldolgozása, így az orientáció meghatározása. Az algoritmus előnye, hogy 6 és 9 szabadságfokú IMU szenzorok adatain is futtatható. Magnetométerrel kiegészített IMU esetén abszolút orientációt számol a föld mágneses irányához képest. A Madgwick és Mahony szűrők hasonló módon PI-szabályozón alapulnak, azonban a visszacsatoló ági korrekcióban különböznek.

A Madgwick filter, a Mahony filterrel ellentétben, valamivel alacsonyabb frissítési frekvencián, 734Hz-en fut a választott mikrokontrolleren. Frissítési frekvencia alatt a függvény futási idejének reciprokát értem. Dinamikus tulajdonságai mégis jobbak, kevésbé befolyásolják a nagy gravitációs gyorsulások, ezért ez az algoritmus került implementálásra.

3.2.4 Mahony filter

A Robert Mahony által fejlesztett szenzor fúziós algoritmus nagy előnye a gyorsasága. Kis számításigényű algoritmus, mely kellő pontossággal szolgál. Az algoritmust elsősorban magnetométer nélküli IMU adatainak feldolgozására használják.

A választott STM32F042 típusú mikrokontrolleren átlagosan 865Hz frissítési frekvencián képes üzemelni. Statikus helyzetben, illetve lassú mozgások során pontos, remegésmentes követést biztosít. Dinamikus mozgások esetén a követés pontatlanná válik. A szenzor kimeneti orientációjának nagy gyorsulások hatására sem szabad változnia. Ezen algoritmusnál mégis nagy kilengések figyelhetők meg, ennek oka a gravitációs vektor irányának eltévesztése a nagy gyorsulások hatására.

3.2.5 Kalman filter

A Kálmán-szűrő sorozatos mérésekkel optimális becslést képes adni változó, zajos rendszerek állapotáról. Előszeretettel alkalmazzák IMU-k esetén, kiterjesztve a magnetométeres korrigációra is. A szűrő pontos eredményeket szolgáltat, ám rendkívül számításigényes. Kálmán szűrő alkalmazása esetén, a valós idejű feldolgozás érdekében, a feldolgozás általában nem lokálisan történik. A nyers adatokat a mikrokontroller elküldi, s a feldolgozást egy nagyobb számítási kapacitású számítógép végzi. Nagyobb számítási kapacitású mikrokontrollereken hatékonyan alkalmazható a Kálmán-szűrő, ám a választott STM32f04, nem képes kellő gyorsasággal futtatni. A központi egység képes a Kálmán-szűrő használatára, ám a nyers adatok továbbítása túlzottan terhelné a rádiócsatornát.

3.3 Központi egység felépítése

A központi egység feladata a perifériás egységek felől érkező adatok megjelenítő felé továbbítása, valamint saját orientációjának mérése. A feladata összetettebb, mint a perifériális egységeké, így nagyobb számítási teljesítményt igényel. A megjelenítő felé történő adattovábbításra a WIFI interfészt alkalmaz, mely kellő sáv szélességgel szolgál és majdnem minden háztartásban előfordul.

Az egység feladatai:

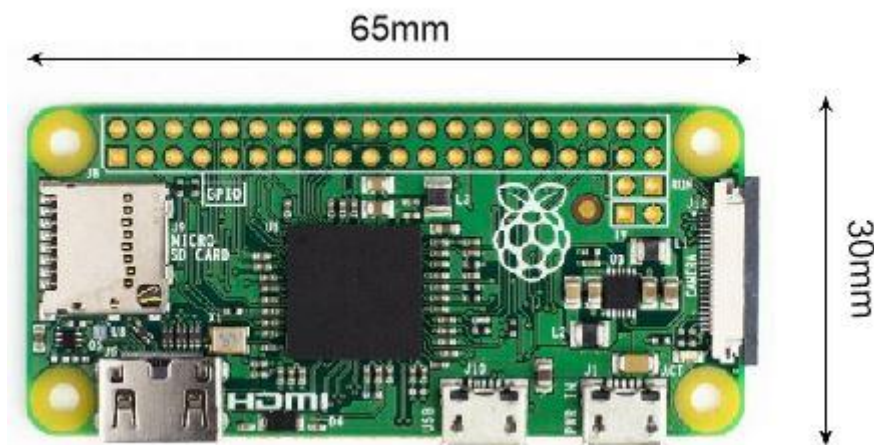
- NRF24L01P rádiómodul kezelése, ezen érkező adatok összegyűjtése
- MPU-9250 kezelése
- Az IMU-ból kiolvasott nyers adatok feldolgozása Madgwick filterrel
- MQTT bróker futtatása az adatok továbbítására
- Az érkező adatok tárolása, valamint továbbítása a megjelenítő felé

A feldolgozó egység feladata összetett, párhuzamosan kell kiszámolnia saját orientációját, beolvasni a rádió érkező adatokat és ezen adatokat megjelenítő felé továbbítani. Érdeemes olyan egységet választani, mely operációs rendszerrel rendelkezik, így automatikusan ütemezve a feladatokat. A viselhetőséget szem előtt tartva célszerű kisméretű és alacsony fogyasztású eszközt választani.

WLAN-on keresztül olyan adatátviteli protokoll szükséges, mely egyszerűvé teszi egy, esetleg több megjelenítő csatlakoztatását. Az internethez csatlakozó szenzorok kommunikációjára használt MQTT protokoll megfelelő választás.

3.3.1 Raspberry Pi Zero

A Raspberry Pi egy egyetlen áramkört lapkára integrált számítógép, mely különböző Linux-disztribúciókat képes futtatni. Alacsony ára ellenére rendkívül nagy számítási kapacitással rendelkezik. Ezekon túl általános felhasználású, úgynevezett GPIO(General Purpose Input-Output) csatlakozók is találhatóak rajta. Ezen portok támogatják a mikrokontrollerek körében használt legtöbb kommunikációs protokollt, így az SPI-t és I2C-t is. Számos Raspberry Pi verzió létezik, ezek közül méretben a legkisebb a Raspberry Pi Zero, mely a 3.5 ábrán látható.



3.5 ábra Raspberry Pi Zero felülnézetből

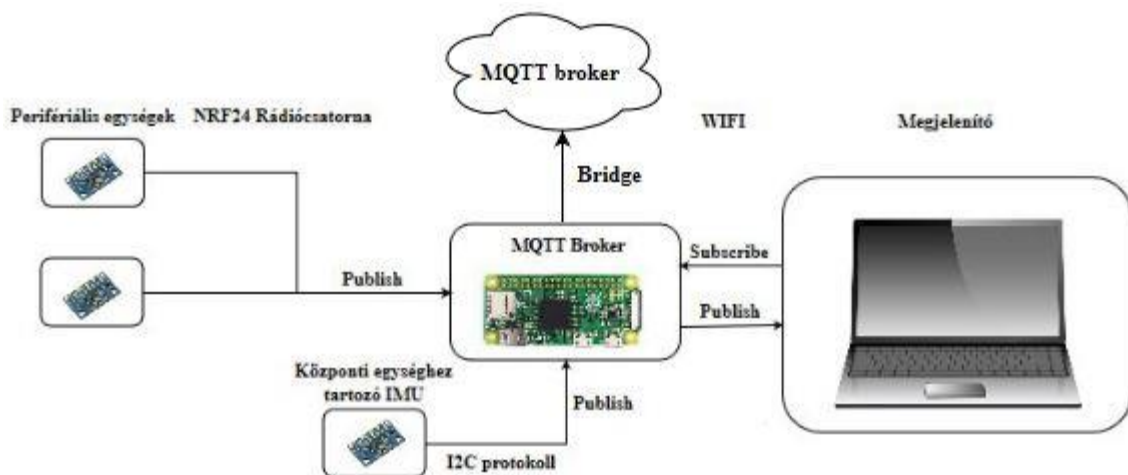
A Zero kis mérete ellenére, a Raspberry Pi-hez ajánlott linux disztribúciót, Raspbian operációs rendszert futtat. 1GHz-es 1 magos 32 bites processzor, valamint 512MB RAM található a lapkán. WIFI kapcsolatra önmagában nem képes, de USB porton könnyen illeszthető hozzá. A Zero programozható USB porton vagy WIFI-n keresztül, parancssorból. A modul további nagy előnye az alacsony, perifériák nélküli 100-150mA áramfelvétele, valamint alacsony ára. Perifériákkal az eszköz 300mA-t is fogyaszthat, így tápellátására a perifériális eszközöknél nagyobb kapacitású akkumulátorra van szükség

3.3.2 MQTT protokoll

Az MQTT egy üzenetsor alapú kommunikációt valósít meg, mely kifejezetten szűkös erőforrású eszközök (beágyazott rendszerek) közti kommunikációra lett szabványosítva. A szerveren futtatott bróker felelős a kliensek közötti adattovábbításért, a protokoll által támogatott publish/subscribe üzenetterjesztési módszert alkalmazva. A bróker által továbbított üzenetek topikokra vannak osztva, mely topikokba küldhetnek üzeneteket, vagy ezekre feliratkozhatnak kliensek. Az MQTT protokoll lehetővé teszi az egymással nem kompatibilis alkalmazások számára a központosított kommunikációt.

A bróker futtatható lokálisan a Raspberry Pi-n, internetelés esetén azonban felhőben futó brókerre is továbbíthatók az adatok. A legtöbb bróker képes automatikusan bridge-elni, továbbítani az érkező adatokat másik bróker felé. Felhőre feliratkozva, nem szükséges a megjelenítőnek és a központi egységnek azonos hálózathoz csatlakoznia. A felhő IP-címe gyakran statikus, így nem szükséges a központi egység lokális IP-címének megkeresése, mely a feliratkozáshoz elengedhetetlen. Felhő alapú összeköttetés lehetővé teszi a távoli megjelenítést, valamint az adatok további feldolgozását a felhőben.

Az adatfolyam szemléltetése a 3.6 ábrán látható. A Raspberry Pi a hozzá csatlakoztatott NRF24L01P rádióon veszi a perifériális egységek felől érkező adatokat, továbbá I2C porton hozzá illesztett MPU-9250 IMU nyers adatait beolvassa, valamint az abszolút orientáció meghatározására feldolgozza azokat. Az így kapott orientációkat szöveges üzenetté alakítja, majd továbbítja a lokális vagy felhőben lévő MQTT bróker felé. A brókerre feliratkozott megjelenítő, vagy megjelenítők, fogadják az üzeneteket, majd számadatokká való visszaalakítás után rendelik hozzá a megjelenített embermodell testrészeihez.



3.6 ábra Az adatfolyam felépítése a perifériális egységektől a megjelenítő eszközözig

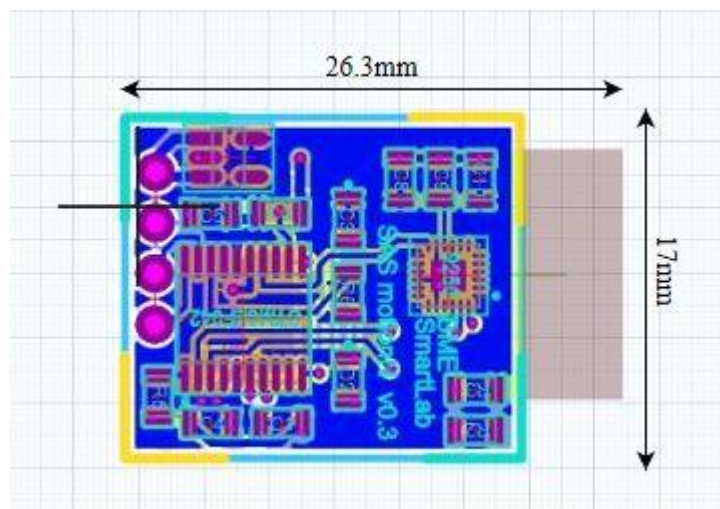
Az üzeneteket azonos topikba továbbítja a Raspberry Pi, ez alapján azonosítható a szenzorhálózat. Egy üzenet felépítése a 3.7 ábrán látható. A formázás lehetővé teszi az adatok könnyebb olvashatóságát. Az üzenet kvaternió szögadatokon kívül egy, a perifériális eszközök azonosítására szolgáló, egyedi azonosítóval van kiegészítve.

4.fejezet

Kivitelezés

4.1 Perifériális egységek

Egy perifériális szenzor nyomtatott áramköri terve és elkészült modul a 4.1 és 4.2 ábrán látható. A tervet Keszte Roland készítette.



4.1 ábra Perifériális egység nyomtatott áramköri terve



4.2 ábra Elkészült perifériális egységek

4.1.1 Szenzor kalibrálása

A gyártási pontatlanságok miatt a szenzorok kalibrálása szükséges. A gyorsulásmérő és giroszkóp kalibrálásához az eszközt vízszintes nyugalmi helyzetbe kell helyezni. Ebben a helyzetben a gyorsulásmérő két tengelye párhuzamos a vízszintes síkkal, ezek kimenetén ideális esetben „0” olvasható. A harmadik tengely erre merőleges, ezen „1” olvasható, mely 1 g gravitációs gyorsulásnak felel meg. A giroszkóp kimenetén mindhárom tengely irányában 0 az elfordulási szögsebesség. Valós esetben ezek kis mértékben eltérnek a várt értékektől. A mért adatok átlagolásával meghatározható az elvárthoz képesti különbség (ofszet) tengelyenként, melyet az ezt követő mérések során ki kell vonni a kiolvasott értékekből.

A magnetométer kalibrálásához nyolcas formában kell mozgatni az eszközt. Az eljárás lényege, hogy a forgatás során az föld mágneses északi iránya egy egyenesbe essen a magnetométer három tengelyével, pozitív és negatív irányba is. Ideális esetben a tengelyenként mért maximum és minimum megegyezik, ellentétes előjellel. A gyártásból adódó ofszetet ezek átlaga adja. Ezen kalibrálásokat minden szenzornál el kell végezni a pontos méréshez. Helytelen kalibrálást okozhat a szenzor nem nyugalmi helyzete vagy a vízszintestől eltérő orientációja. A magnetométer kalibrálását pontatlanná tehetik a környezetében lévő fém vagy mágneses tárgyak, esetleg nagy árammal átjárt vezetők.

4.1.2 Szenzor beállítása

Az MPU-9250 szenzor számos beállítással, előfeldolgozással szolgál. Ezek felhasználástól függő beállítása szükséges a mérés pontosságának növeléséhez. Ezen beállítások az 4.1 táblázatban láthatók.

	Gyorsulásmérő	Giroszkóp	Magnetométer
Mintavételi frekvencia	1kHz	1kHz	100Hz
Sávszélesség	99Hz	92Hz	100Hz
Érzékenység	8g	2000°/s	±4800μT

4.1 táblázat MPU-9250 szenzor beállításai

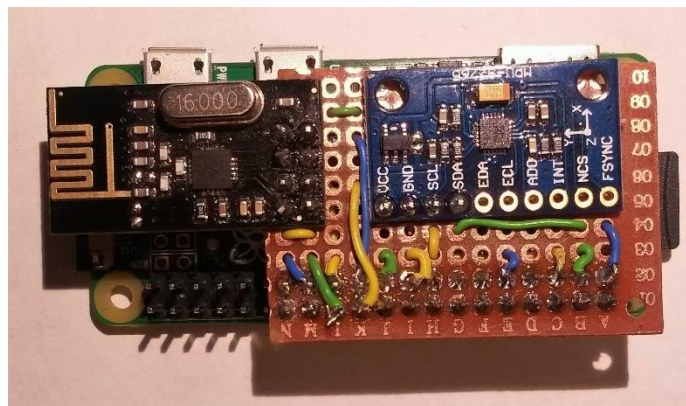
A táblázatban látható értékek a szenzor adatlapjában megjelölt értékek szerint állíthatók. Az emberi mozgás relatíve lassú, így megfelelő a 100Hz körüli sávszélesség, ami a szenzorba épített aluláteresztő szűrő törési frekvenciáját jelenti. Ezzel csökkenthető a jel zajossága. Az érzékenység a maximum gyorsulás, szögelfordulás, valamint mágneses tér mérhető értékét jelenti.

4.1.3 Rádió alapú hálózati réteg

Az adatok rádiócsatornán való átvitelére különböző megoldások találhatók. Egy NRF24L01P rádió egyszerre csak 6 eszközzel képes kommunikálni csomagütközések nélkül, mely nem elégíti ki a feltételeket. James Coliz által készített RF24Network egy hálózati réteget valósít meg NRF24 rádiókat használva. Ez a réteg segítségével fa topológiába szervezhető a rádiók. A megvalósítás automatikus csomagbontást és összerendelést tartalmaz. Minden egység egyedi azonosítóval van ellátva, mely egyértelműen azonosítja topológiában való elhelyezkedést, ezzel az útvonal is egyértelműen megadható. A hálózati réteg választásának az egyszerű implementálás mellett, az automatikus küldés ütemezés és csomagösszerendelés.

4.2 Központi egység

A központi egységnek választott Raspberry PI és a hozzá tartozó shield látható a 4.3 ábra. A shield-hez nem készült nyomtatott áramkör, ezért próba nyomtatott áramkörös kerültek elhelyezésre és bekötésre az alkatrészek.

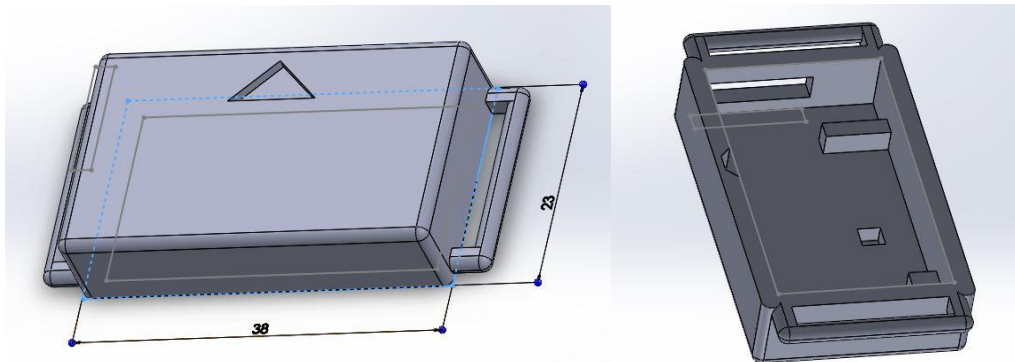


4.3ábra Központi egységhez készült shield

4.3 Szenzorok rögzítése

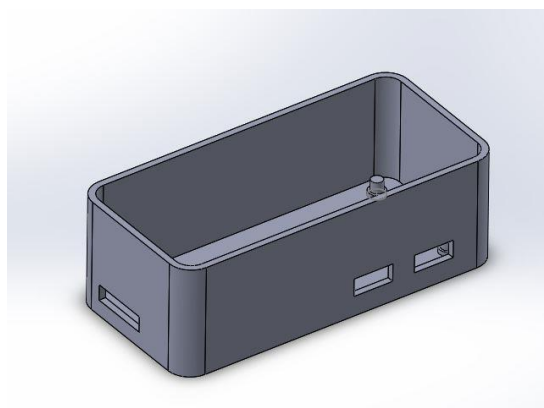
4.3.1 3D modellezés

A modellek a SolidWorks mérnöki modellezőprogramban kerültek megtervezésre. A 4.4 ábrán látható a perifériális egységekhez tervezett tok, mely mérete 36x23x8mm. Az akkumulátor a tokon kívül, a pánthoz került rögzítésre. A tokon láthatók tartóelemek, melyek az egység rögzítésére szolgálnak.



4.4 ábra A perifériális egységekhez készült tok modelljének felül és alulnézete

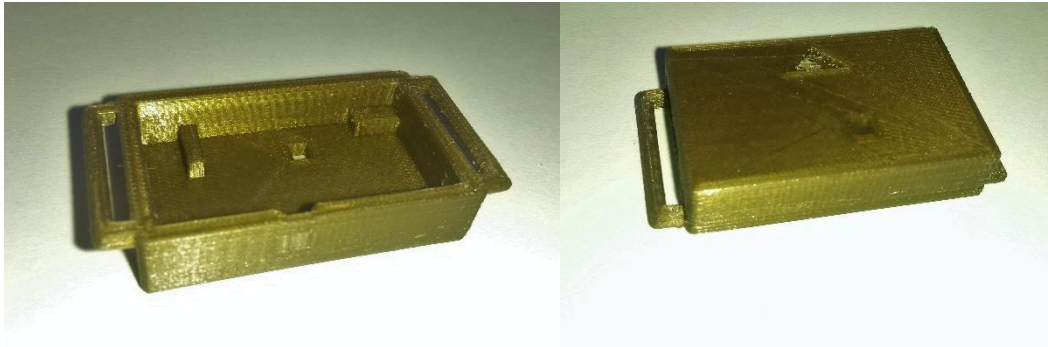
A központi egységhez készült tok modellje a 4.5 ábrán látható. A Raspberry Pi Zero a tok aljától 2mm-re megemelve helyezkedik el, erre a jobb hűtés miatt van szükség, valamint a tokot rögzítő pánt is alatta került elvezetésre. A tok mérete 73x35x24mm, valamint a falainak vastagsága 2mm.



4.5 ábra A központi egységhez készült tok modellje

4.3.2 Kész modellek 3D nyomtatása

Az elkészített perifériális és központi egységek testre való rögzítéséhez készített tokok a 4.6 ábrán láthatók. A rádiós körülmények javítása, valamint a magnetométer hibájának csökkentése érdekében az akkumulátor a tokon kívül, a pánthoz rögzítve kapott helyet, mely az 4.7 ábrán látható. A központi egység kinyomtatott tokja a 4.8 ábrán látható, a Raspberry Pi Zero-val valamint ehhez csatlakoztatott shield-el.



4.6 ábra Perifériális szenzorhoz készült 3D nyomtatott tok



4.7 ábra Elkészült pántra rögzített akkumulátor valamint perifériális egység.



4.8 ábra Központi egységhez elkészült 3D nyomtatott tok

4.4 Tesztelés és mérés

Az IMU-k esetében gyakori hiba a sodródás jelensége. A sodródás valamelyik tengely körüli lassú elfordulást jelenti. Ez általában a magnetométer nélküli szenzoroknál fordul elő a vízszintes referencia irány hiánya okán. A magnetométerrel ellátott MPU-9250 szenzor esetében a sodródás kevésbé jelentős. Érdeemes megvizsgálni a mozdulatlan helyzetben lévő stabilizálódott kimeneti értékek valóditól való eltérését. A szűrők, melyek az orientáció kiszámítására szolgálnak, a gyorsulásmérő által mért gravitációs vektor irányára hagyatkoznak, ehhez kalibrálják a giroszkóp hibáját. Sportolás során a hirtelen, dinamikus mozdulatok miatti nagy gyorsulások elfedhetik a gravitációs gyorsulást. Ebben a fejezetben a választott MPU-9250 statikus és dinamikus tulajdonságainak tesztelése kerül részletezésre.

4.4.1 Statikus hiba

Statikus hiba alatt a nyugalmi helyzetben lévő IMU mért és valós orientációjának különbsége értendő. A statikus és dinamikus hiba nagymértékben eltérhetnek egymástól, melynek oka, hogy dinamikus esetben nehezen határozható meg a gravitációs gyorsulás iránya, valamint a tengelyek nem pontos ortogonalitása miatt jelentkezik a tengelyek közti áthallás jelensége.

A statikus hiba méréséhez kvaternió helyett, fokba átszámított értékek láthatók a szemléletesség, valamint könnyű ellenőrzés kedvéért. Szögelfordulásba átszámolt értékek angol elnevezése a *yaw*, *pitch* és *roll*. A *yaw* a függőleges tengely, míg a *pitch* és *roll* az erre merőleges tengelyek körüli elfordulásokat jelenti. A *yaw* hibájának mérésére a következő fejezetben kerül sor. A 4.2 táblázatban a vízszintes tengelyek körüli elfordulások mérési eredményei láthatók. A mérések külön a két tengely szerint kerültek elvégzésre. A mérési elrendezések $\pm 2^\circ$ hibával kerültek beállításra.

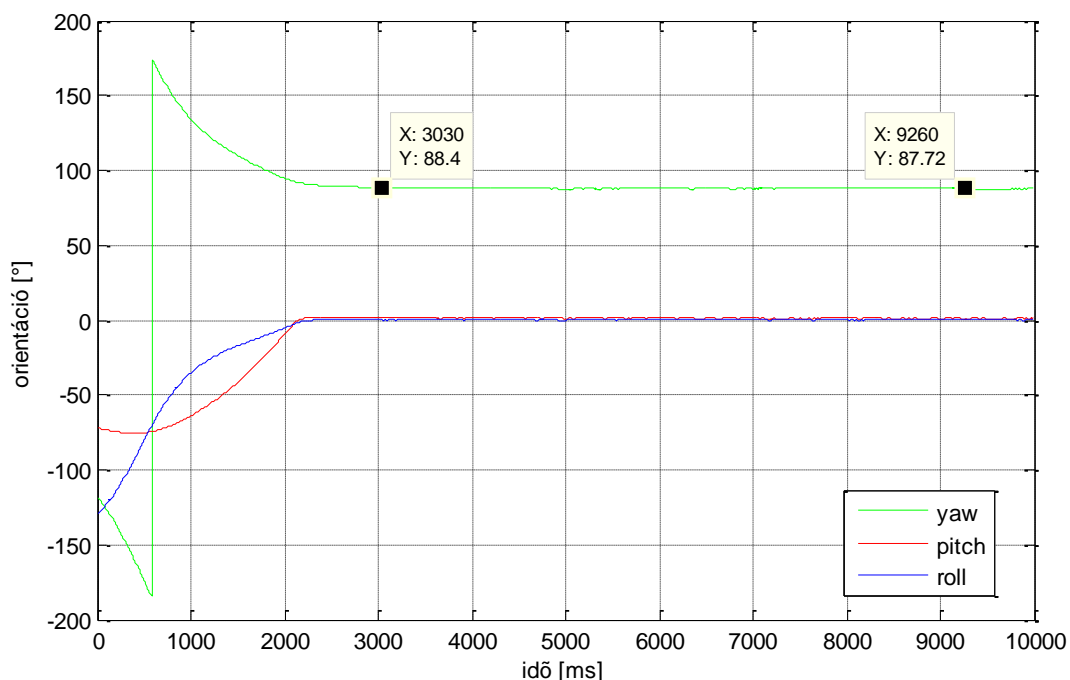
valódi\mért szögérték	pitch(y)	roll(x)
$^\circ -90^\circ$	-82.2265°	-85.2947
-45°	-40.0355°	-43.7639
-30°	-28.6996°	-31.5912°
0°	-0.16456°	-0.55668°
30°	28.25807°	25.8575°
45°	41.12156°	$38,34978^\circ$
90°	84.95251°	81.6165°

4.2 táblázat Valódi és a szenzor által mért szögadatok eredményei

A mérések elvégzése közben az eszköz végig nyugalmi állapotban volt, valamint legalább 1 perces beállási idő után került rögzítésre legalább 5000 minta. A táblázatban látható eredményeket ezen minták átlagolásával kapjuk meg. Az átlagos hiba számításához a vízszintes helyzetben mérthez képesti eltérést vesszük alapul. A 0° -on mért hiba kivonása után számolt RMS hiba értéke az y tengely körül 4.6831° , míg az x tengely körül 4.8857° .

A szenzor vízszintessel bezárt szögének növekedésével nő a hiba nagysága is. Ez azzal magyarázható, hogy a derékszöghöz közeli orientáció esetén a szenzor és a gravitációs gyorsulásvektor csaknem párhuzamos, mely az algoritmus hibájának mértékét növeli.

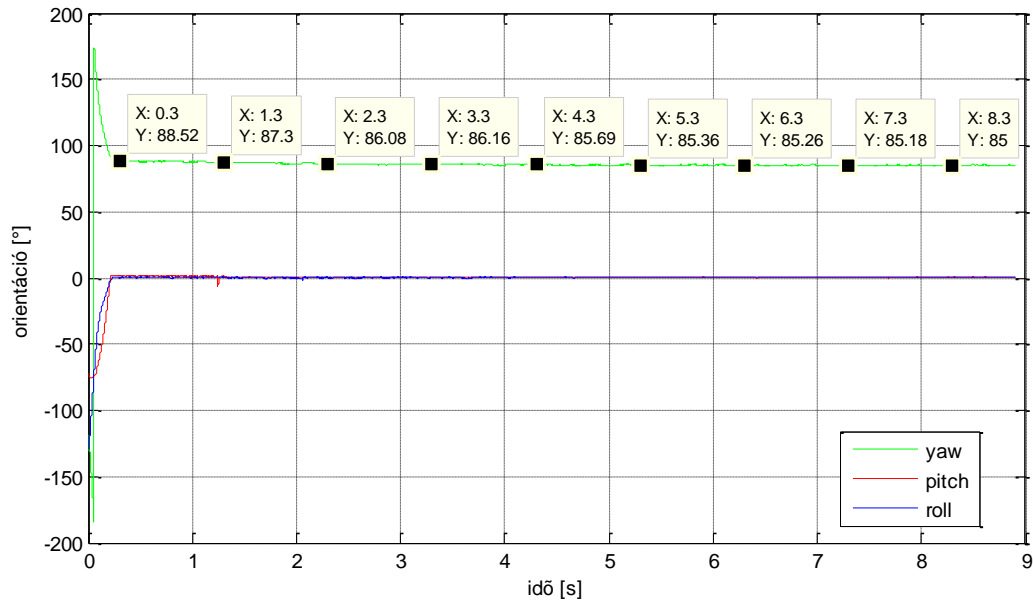
4.4.2 Sodródás



4.9 ábra MPU-9250 bekapcsolási tranziens Madgwick szűrővel

Elsősorban magnetométer nélküli IMU szenzoroknál megfigyelhető a sodródás jelensége, de érdemes megvizsgálni ebben az esetben is. A 6 szabadságfokú egységekkel ellentétben, az iránytű miatt a sodródás nem folyamatos, egy végértékhez konvergál. A 4.9 ábrán a 4.10 grafikon kinagyított bekapcsolási tranziense látható. A gyors gyorsulásmérő miatt a függőlegessel bezárt *pitch* és *roll* szögek tranziense gyorsan beáll a végértékükhöz, mely vízszintes esetén 0° . 3 másodperc után lassul a *yaw* függőleges körüli elfordulás sodródása is, ám végértékét több másodperc után éri el. Lassúságát a magnetométer 100Hz-es mintavételi frekvenciája okozza.

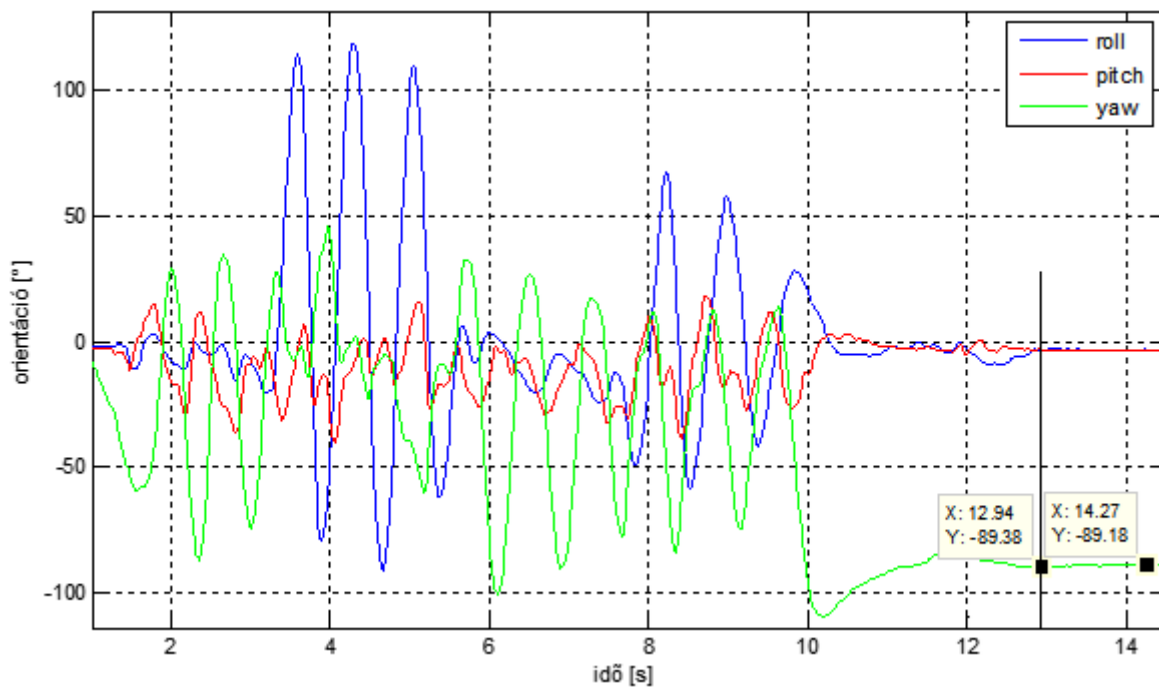
A 4.9 ábrán az előzővel azonos mérés látható nagyobb időintervallumban. 3 másodperc utáni első két másodpercben még jelentős 1.2° meredekségű csökkenés figyelhető meg. 5 másodperc után a csökkenés mértéke csekély tized fokos nagyságrendű.



4.10 ábra MPU-9250 kalibrációs tranziense a föld mágneses északi irányához

4.4.3 Dinamikus hiba

Dinamikus hiba alatt a hirtelen mozdulatok okozta valós orientációtól való eltérést értünk. Ennek oka lehet a gyorsulásmérő által mért nagy gyorsulások, ami miatt a szűrő nem képes



4.11 ábra MPU-9250 és Madgwick szűrő dinamikus hibájának vizsgálata

meghatározni a gravitációs gyorsulás irányát. A 4.11 ábrán látható, amint a nyugalmi helyzetből indított szenzor 10 másodpercig intenzív, mind 3 tengely körüli dinamikus forgatásnak, rángatásnak van kitéve. A dinamikus mozdulatok után, nyugalmi helyzetbe 12.94 másodpercnél került a szenzor. Megfigyelhető, hogy az egység nyugalmi helyzetbe kerülése után fél másodperccel már a függőleges tengely körüli *yaw* értéke is stabilizálódik, nem sodródik. A dinamikus mozgások közben mért szögek hibáját nagy sebességű kamerákkal, valamint a szenzorra rögzített markerekkel lehet hitelesíteni. Ezen mérések a jövőben kerülnek elvégzésre, a dolgozat nem tartalmazza a méréseket.

A szenzorból kapott orientációs adatok statikus hibája nagy, ugyanakkor megfelelő dinamikus tulajdonságokkal rendelkezik. Erős gyorsulások hatására sem sodródna egyik tengely irányában sem, az elvártaknak megfelelő gyorsasággal követi a mozdulatokat. A későbbiekben részletezett tesztelés során a megjelenített modellen nem érzékelhető a statikus hiba, így ennek oka az Euler-szögekbe való átváltás lehet.

4.4.4 NRF24 rádió átviteli sebesség és csomagvesztés mérése

Az NRF24 rádióhoz használt hálózati rétegnek köszönhetően a csomagvesztések száma nem jelentős. A hálózati réteg azonban csökkenti a felhasználói sáv szélességet. A csomagvesztések észlelése érdekében az üzenetek kiegészítésre kerültek egy sorszámmal. A tesztprogram külön tartja számon az egyes szenzoroktól várt csomagok sorszámát, a várt és az érkező csomag sorszáma közti eltérés csomagvesztést jelent. Az átviteli sebesség méréséhez az időegység alatt érkező csomagokat számolja meg a program. A 4.3 táblázatban látható eredmények 5 perc adatainak átlagolásából származnak.

	1db adó	2db adó
Átviteli sebesség	30 kbps	57 kbps
Frissítési frekvencia	92Hz	96Hz
Csomagvesztés	- %	2.9%

4.3 táblázat NRF24 rádió hálózati rétegének átviteli tulajdonságai

4.4.5 Akkumulátoros üzemidő becslése

Az adatlap szerint az MPU-9250 3.93 mA, az NRF24 11.3 mA áramot vesz fel. Az STM 32 bites mikrokontrollerekhez elérhető az STM CubeMX kiegészítőprogram. Ennek segítségével alap inicializáló kódok generálhatók. A CubeMX segítségével becsülhető a mikrokontroller áramfelvétele a különböző kommunikációs protokollok használata mellett. A program által

becsülve a mikrokontroller átlagos fogyasztása 13.68 mA. A teljes becsült áramfelvétel így 28.91mA. A használt akkumulátor 180mAh kapacitású, tehát egy szenzor becsült üzemidője 6 óra. Az üzemidő megnövelhető lassabb mintavételezéssel, valamint a feldolgozó algoritmus frissítési frekvenciájának csökkentésével, mely alkalmas hétköznapi viselésre, kevésbé dinamikus mozgás rögzítésére.

4.5 Megjelenítés

A megjelenítő eszközön ábrázolásra kerül egy 3 dimenziós embermodell, mely testrészeinek mozgása követi a szenzorhálózatot viselő személy testrészeinek mozgását. A modell forgathatósága lehetővé teszi a több szögből való megtekintést. A modell könnyen kiegészíthető további eszközökkel, például sporteszközökkel.

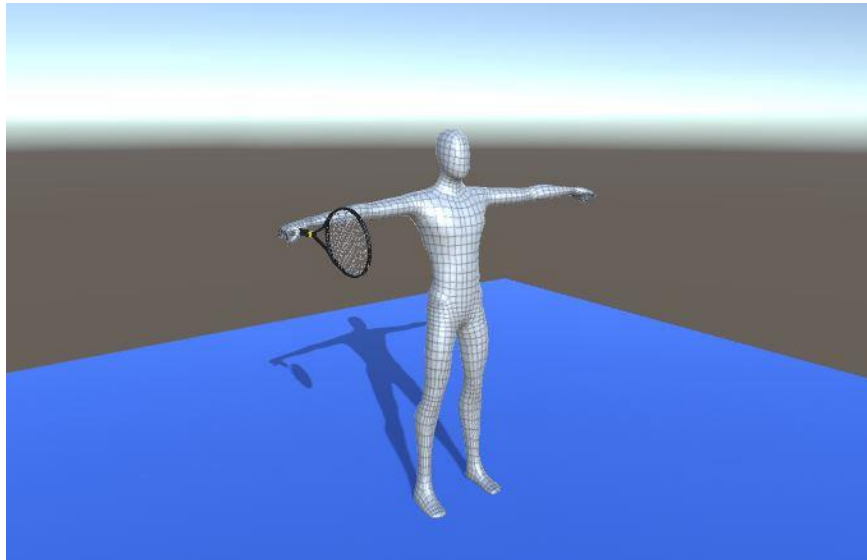
A megjelenítésre olyan keretprogram szükséges, mely valós időben képes frissíteni a testrészek helyzetét, valamint támogatja az MQTT protokollt az adatok egyszerű letöltéséhez. A gyorsan, minimum 100Hz-en érkező adatok megjelenítéséhez legoptimálisabb választás egy videojáték-motor. A Unity Technologies által fejlesztett Unity videojáték-motornak elérhető egy *Personal*, otthoni felhasználásra ingyenes változata. Nagy népszerűségének köszönhetően, rengeteg felhasználói kiegészítő tölthető le hozzá.

4.5.1 Unity game engine

A Unity Technologies által gyártott Unity videojáték-motor egy videojáték fejlesztő környezetet biztosít. A grafikus környezetben egyszerűbb alakzatok, testek hozhatók létre, megadható ezek kezdeti helyzete, mérete. Bonyolultabb modelleket nem képes létrehozni, így erre külső 3D modellező programra van szükség. A Unity támogatja a nyílt forráskódú Blender programot, melyből így könnyen importálhatók az elkészített modellek. A modellek közti kölcsönhatások, animációk C# vagy Javascript nyelveken programozhatók.

4.5.2 Embermodell

A Unity környezet tartalmaz egy *Asset Store* nevű áruházat, melyben többek között előre elkészített modelleket, helyszíneket szkripteket lehet vásárolni. A Unity áruházban elérhetőek ingyenes modellek, így a mozgásrekonstrukció tesztelésére egy ilyen, ingyenes, modellre esett a választás. A választott embermodell az 4.12 ábrán látható.



4.12 ábra Embermodell a Unity3D videojáték-motorban

Az embermodell kezében már látható egy ütő, amelyre a későbbi tesztelésnél lesz szükség.

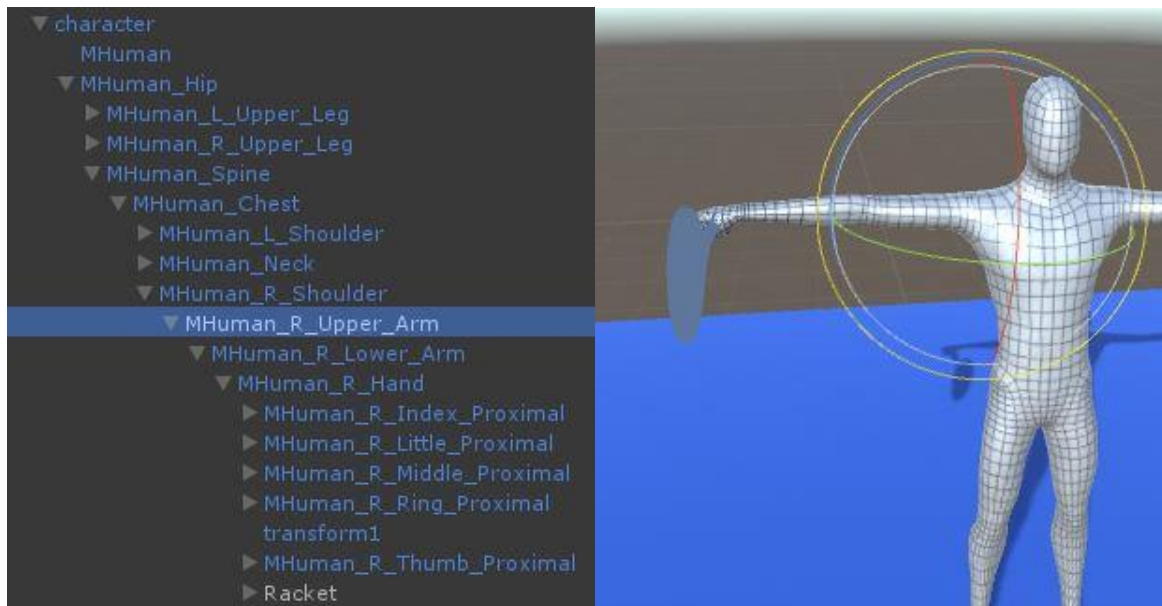
4.5.3 MQTT protokoll

A Unity3d valós idejű megjelenítőképessége miatt megjelent az igény a szenzorokkal való vezérlésre. Az MQTT protokollon keresztül való összeköttetés erre nyújt megoldást. Elérhető a Unity-hez teljes értékű MQTT kliens könyvtár, mely segítségével fel lehet iratkozni MQTT bróker topikjaira.

4.5.4 Embermodell mozgatása

A testrészek mozgatásához szükséges a testrészek közötti kapcsolat kialakítására. Ezen ízületek kialakításával nem esik szét a karakter az egyes testrészek orientációjának megváltoztatásával sem. A testrészek alárendeléssel vannak összekapcsolva, mely azt jelenti, hogy a hierarchiában fentebb álló felkar mozgatásával vele együtt mozog az alkar, kéz és az ujjak is.

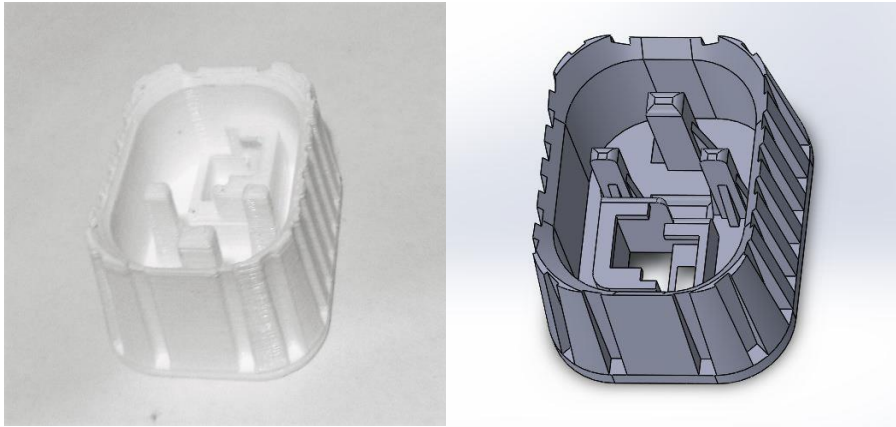
Unity-ben egy szkript futtatásához hozzá kell rendelni azt egy objektumhoz. Az ember mozgásához készített saját vezérlő szkript a modell hierarchiában legfentebb álló tagjához került hozzárendelésre. A program fogadja az orientációs adatokat az MQTT bróker felől, majd a szöveges üzenetből kinyert azonosító alapján meghatározza, melyik testrész helyzetét kell módosítani. A program megkeresi a testrész objektumot és hozzárendeli a szenzor által mért orientációs adatokat, melyek kvaterniók formájában érkeznek.



4.13 ábra Az embermodell hierarchikus felépítése Unity-ben valamint a kiválasztott testrész orientációjának módosítása a grafikus kezelői felületben.

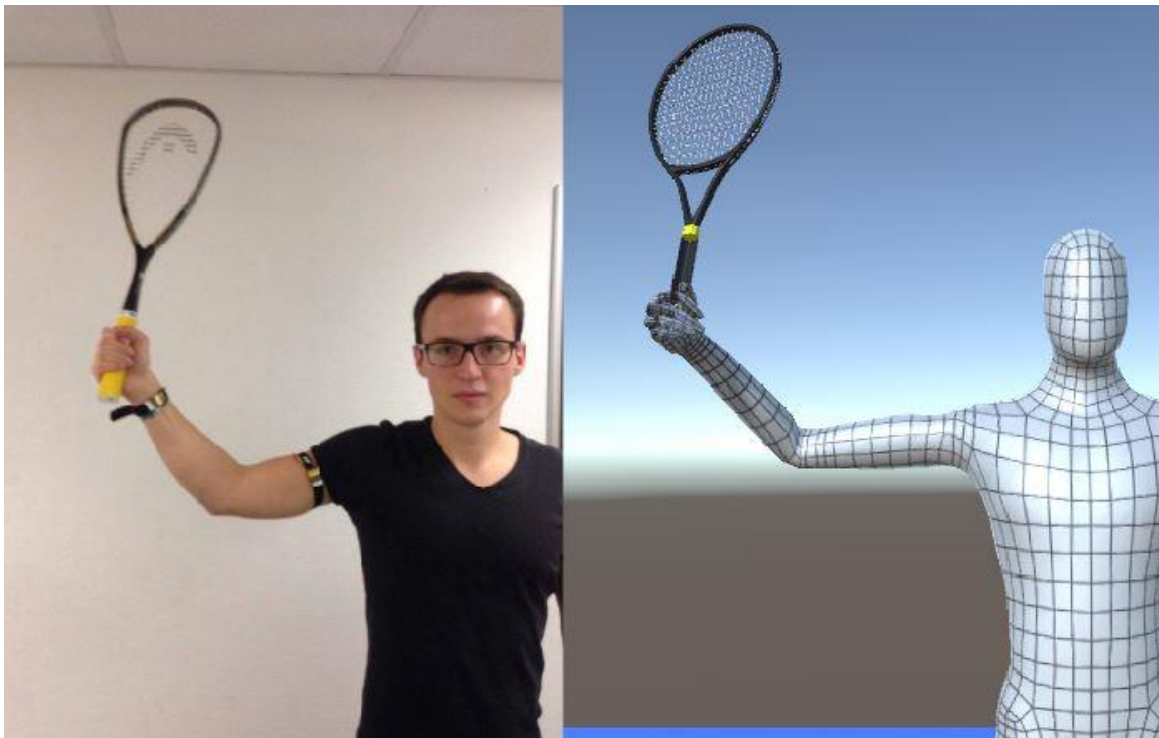
4.5.5 Tesztelés

A teszteléshez három perifériális egység készült el, melyek az alkaron és felkaron, valamint egy squash ütőben helyezkednek el. A squash ütő végén lévő tubus helyére egy saját tervezésű 3D nyomtatott tubus került, melyben rögzítésre került egy perifériális egység. A squash ütő üreges, szénszálal anyagból készült, ami lehetővé teszi a szenzor ütő belsejében való elhelyezését. A 4.14 ábrán látható a 3D nyomtatóval készült tubus, valamint a nyomtatáshoz készített modellje. A tubusban helyet kapott egy kapcsoló, valamint egy csatlakozó az újra programozáshoz. Az akkumulátor az ütő nyelében fentebb lett beszorítva, a rádiós körülmények javítása érdekében.

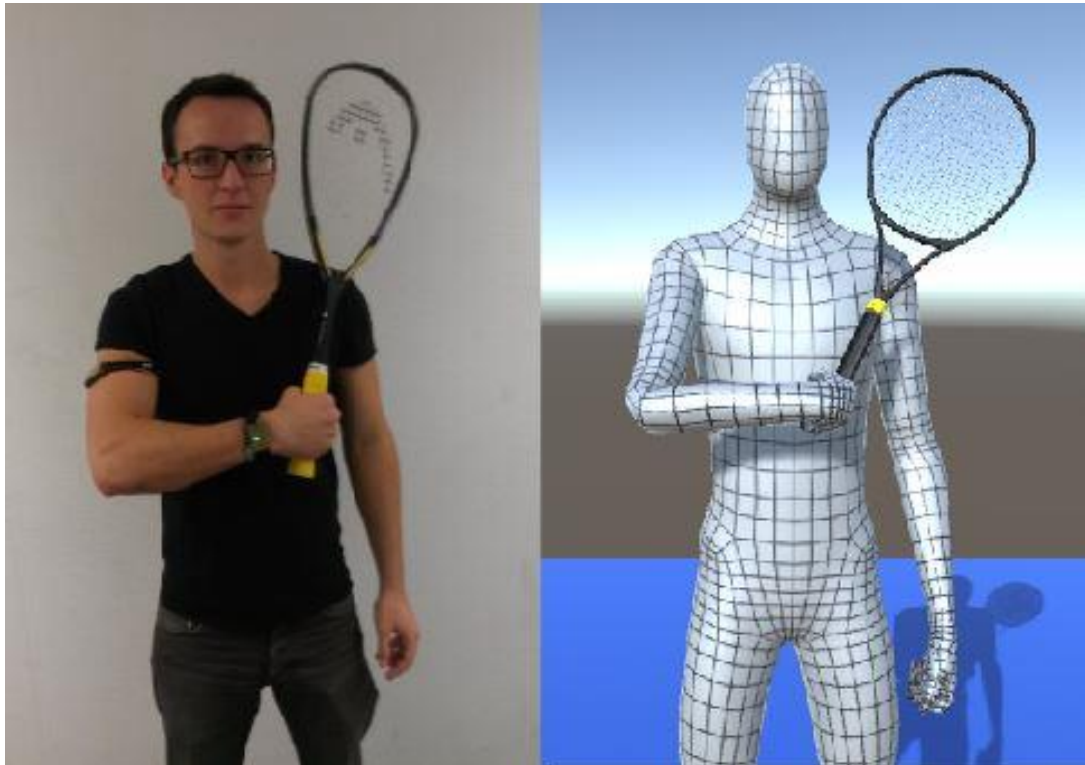


4.14 ábra A megtervezett modell és 3D nyomtatóval kinyomtatott tubus képe

A 4.15 valamint 4.16 ábrán látható a felkarra és alkarra felhelyezett szenzorok, valamint az ütő valódi helyzete és ezek megjelenítése Unity-ben. A teszteléshez a központi egység nem került felhelyezésre. A tesztelés során az ütő valamint a kar mozgása folyamatos, ütések során is pontos a megjelenítés, a kimért statikus hiba nem észlelhető a megjelenítés során. Az Euler-szögekbe átszámolt kvaternióknál megfigyelhető, hogy a mért szögek a szenzor függőleges helyzetében és e-körül mozgatva sosem éri el a vízszinteshez képesti 90° -ot. A kvaterniókkal történő megjelenítés esetén nem tapasztalható ez a hiba. Az ütő valamint a karok is minden irányba mozgatva akadálytalanul követik a szenzorok mozgását. A tesztelés során megfigyelhetők csomagvesztések, melyek elsősorban a WLAN hálózat terhelésének növekedésével arányosan nőnek.



4.15 ábra Felkarra és csuklóra, valamint ütőben lévő szenzorok elhelyezkedése és megjelenítése Unity-ben



4.16 ábra Felkarra és csuklóra, valamint ütőben lévő szenzorok elhelyezkedése másik pozícióban és megjelenítése Unity-ben

5. fejezet

Értékelés

5.1 Tapasztalatok

A dolgozatban ismertetett hálózatot felépítő szenzorok képesek követni az emberi mozgást, akár sportolás közbeni dinamikus mozdulatok során is. A Unity program kellő pontossággal jeleníti meg ezen mozdulatokat, könnyen hozzáadhatók további szenzorral rendelkező eszközök. Lassabb mozdulatok rögzítéséhez, csökkentett frissítési frekvenciával növelhető az üzemidő, ezzel alkalmassá válik hétköznapi viselésre, megfigyelésre.

5.2 Jövőbeli tervek

Az egységek közötti rádiós összeköttetés kellő sávszélességgel rendelkezik, ugyanakkor az átvitelre használt RF24Network hálózati réteg alkalmas több mint 6 rádióról érkező adatok fogadására, ugyanakkor nem használható ki az RF24 rádió által szolgáltatott teljes 2Mbps sávszélesség. A jövőben a hálózati réteg helyett saját adattovábbítási, ütemezési réteg kerül implementálására, aminek segítségével hatékonyabban kihasználható a sávszélesség.

A jelenleg használt mikrokontroller számítási kapacitása nem elegendő az IMU 1kHz-es maximális kiolvasási sebességének kihasználására. Gyorsabb mikrokontrollerre váltással növelhető a feldolgozó algoritmusok frissítési frekvenciája, ezzel növelhető a pontosság.

Egy több fős jövőbeli projekt keretein belül, az orientációs adatok mellett a test térbeli haladása is meghatározásra kerül. Ehhez alapul véve a gyorsulásmérő adatait, esetleges helymeghatározó szenzorral kiegészítve. A projekt része egy mozgás analitikai program elkészítése, mely az adatokat felhőben dolgozza fel és valós idejű visszajelzésekkel szolgál a felhasználó mozgásáról.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Dr. Fehér Gábor konzulensemét, aki szakmai tudásával hozzájárult a dolgozat elkészítéséhez, illetve Keszte Rolandot, aki a nyomtatott áramköri tervek megvalósításában segédkezett.

Ábrák jegyzéke

1.1	Emberi sziluett és csontváz becslés	1
1.2	Aktív jelölők testen való elhelyezkedése, valamint jobb oldalon a kamera által észlelt jelölők és ezek alapján rekonstruált csontváz.....	2
1.3	Xsens MVN szenzorhálózattal felszerelt ruha	4
2.1	Egy IMU-ban elhelyezkedő szenzorok tipikus orientációja	7
2.2	Gyorsulásmérő belső felépítésének vázlatos rajza	7
2.3	Coriolis erő bemutatása.....	8
2.4	Hall-effektus szemléltetése. I árammal átjárt, B mágneses indukciójú mágneses térbe helyezve, a vezetõn U_H feszültség mérhető	9
3.1	Szenzorhálózat szenzorainak elrendezése	10
3.2	MPU-9250 Breakout board képe.....	12
3.3	A szenzor felõl a központi egység felé továbbított üzenet felépítése	12
3.4	NRF24L01P képe és fontosabb tulajdonságai.....	13
4.1	Euler szögek szemléltetése	15
3.5	Raspberry Pi Zero felülnézetbõl.....	19
3.6	Az adatfolyam felépítése a perifériális egységektõl a megjelenítõ eszközözig	21
3.7	Egy MQTT üzenet felépítése	21
4.1	Perifériális egység nyomtatott áramköri terve.....	22
4.2	Elkészült perifériális egységek	22
4.3	Központi egységhez készült shield	24
4.4	A perifériális egységekhez készült tok modelljének felül és alulnézete	25
4.5	A központi egységhez készült tok modellje	25
4.6	Perifériális szenzorhoz készült 3D nyomtatott tok	26
4.7	Elkészült pántra rögzített akkumulátor valamint perifériális egység.....	26
4.8	Központi egységhez elkészült 3D nyomtatott tok	26
4.9	MPU-9250 bekapcsolási tranziens Madgwick szûrõvel	28
4.10	MPU-9250 kalibrációs tranziense a föld mágneses északi irányához	29
4.11	MPU-9250 és Madgwick szûrõ dinamikus hibájának vizsgálata.....	29
4.12	Embermodell a Unity3D videojáték-motorban	32

4.13	Az embermodell hierarchikus felépítése Unity-ben valamint a kiválasztott testrész orientációjának módosítása a grafikus kezelői felületben.....	33
4.14	A megtervezett modell és 3D nyomtatóval kinyomtatott tubus képe	34
4.15	Felkarra és csuklóra, valamint ütőben lévő szenzorok elhelyezkedése és megjelenítése Unity-ben.....	34
4.16	Felkarra és csuklóra, valamint ütőben lévő szenzorok elhelyezkedése másik pozícióban és megjelenítése Unity-ben.....	35

Táblázatok jegyzéke

3.1	MPU-9250 szenzor felépítése és fontos tulajdonságai	11
4.1	MPU-9250 szenzor beállításai.....	23
4.2	Valódi és a szenzor által mért szögadatok eredményei	27
4.3	NRF24 típusú rádió hálózati rétegének átviteli tulajdonságai.....	30

Irodalomjegyzék

- [1] MOESLUND, Thomas B.; GRANUM, Erik. A survey of computer vision-based human motion capture. *Computer vision and image understanding*, 2001, 81.3: 231-268.
- [2] KIRK, Adam G.; O'BRIEN, James F.; FORSYTH, David A. Skeletal parameter estimation from optical motion capture data. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. IEEE, 2005. p. 782-788.
- [3] ORRITE-URUNUELA, Carlos, et al. 2d silhouette and 3d skeletal models for human detection and tracking. In: *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*. IEEE, 2004. p. 244-247.
- [4] SCHWARZ, Brent. Mapping the world in 3D. *Nat. Photonics*, 2010, 4.7: 429-430.
- [5] ZHANG, Zhengyou. Microsoft kinect sensor and its effect. *IEEE multimedia*, 2012, 19.2: 4-10.
- [6] MAZZOLDI, A., et al. Smart textiles for wearable motion capture systems. *AUTEX Research Journal*, 2002, 2.4: 199-203.
- [7] FUJIMORI, Yuki, et al. Wearable motion capture suit with full-body tactile sensors. In: *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009. p. 3186-3193.
- [8] URL: <http://metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>
- [9] ROETENBERG, Daniel; LUINGE, Henk; SLYCKE, Per. Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. *Xsens Motion Technologies BV, Tech. Rep*, 2009.
- [10] MILLER, Nathan, et al. Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation. In: *Humanoid Robots, 2004 4th IEEE/RAS International Conference on*. IEEE, 2004. p. 547-565.
- [11] Xsens MVN Motion capture suit URL: <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn/>
- [12] RF24Network Library URL: <http://tmrh20.github.io/RF24Network/>
- [13] RF24Mesh Library URL: <http://tmrh20.github.io/RF24Mesh/>
- [14] R. Mahony, T. Hamel, and J.-M. P. imlin. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 53(5):1203-1218, June 2008.
- [15] Sebastian O.H. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, April 30, 2010

- [16] Tashev, "Recent Advances in Human-Machine Interfaces for Gaming and Entertainment," *Int'l J. Information Technology and Security*, vol. 3, no. 3, 2011, pp. 69-76.