

MEMS érzékelők alkalmazása sportolók mozgásának vizsgálatára

Készítette:

Kolits Márton

Témavezető:

Tihanyi Attila



Pázmány Péter Katolikus Egyetem

Információs Technológiai Kar

2012

“Alulírott Kolits Márton, a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Karának hallgatója kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a szakdolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem. Ezt a Szakdolgozatot más szakon még nem nyújtottam be.”

Tartalomjegyzék

1	Ábrajegyzék	2
2	Absztrakt	3
3	Bevezetés.....	5
4	Előzmények	6
5	Elméleti ismertető	6
5.1	Ütéstechnikák	6
5.1.1	Adogatás	7
5.1.2	Fonák ütés.....	7
5.1.3	Nyesett fonák.....	8
5.1.4	Tenyeres ütés	8
5.2	Fizikai összefoglaló.....	10
5.2.1	Egyenes vonalú egyenletes mozgás	10
5.2.2	Gyorsulás	10
5.2.3	Perdület.....	11
5.2.4	Mágnesség	13
6	Mások hasonló megoldásai	14
7	Saját rendszer kialakítása	17
7.1	Eszközleírás	19
7.1.1	Gyorsulásmérő.....	19
7.1.2	Magnetométer	20
7.1.3	Giroszkóp.....	22
8	Célok	24
9	Megvalósítás	25
9.1	Euler – szögek	30
9.2	Transzformációs mátrix.....	32
9.2.1	DCM Mátrix	32
9.2.2	Szögsebesség	35
9.2.3	A giroszkóp és a szögsebesség kapcsolata.....	37
9.2.4	Algoritmus	39
10	Értékelés, Eredmények	46
11	Továbbfejlesztés	47
12	Köszönetnyilvánítás.....	48
13	irodalomjegyzék.....	49

1 Ábrajegyzék

1. ábra - adogatás mozdulatsor.....	7
2. ábra - fonák mozdulatsor	8
3. ábra - tenyeres mozdulatsor	9
4. ábra – Perdület.....	12
5. ábra - felállított tengelyek.....	15
6. ábra - szenzor elhelyezés	17
7. ábra - Szenzorok elhelyezkedése a hardveren	18
8. ábra - a hardver kapcsolási rajza	18
9. ábra - Giroszkóp.....	22
10. ábra - koordinátarendszer.....	28
11. ábra - x tengely körüli forgatás - gyorsulásmérő.....	29
12. ábra - x tengely körüli forgatás - magnetométer	29
13. ábra - x tengely körüli forgatás - giroszkóp	30
14. ábra - Euler - szögek	31
15. ábra - Definiált két koordinátarendszer	33
16. ábra - vektorok elhelyezkedése	35
17. ábra - a globális és a test koordinátarendszere	39
18. ábra - gyorsulásmérőre felállított koordinátarendszer	39
19. ábra - hiba korrekció	42
20. ábra – 3. eset korrigálása	44
21. ábra - LabVIEW Blokkdiagram	45
22. ábra - LabVIEW Frontpanel	46

2 Absztrakt

In the 21th century, scientific accomplishments can be noticed in almost every field of science. The use of scientific devices also became important in the case of sports. It can represent a very useful feedback in many cases for both the sportsmen and their trainer. The improvement of the physical skills is not enough to obtain superiorly performance, it is also necessary to improve the technique. They get feedback on their movements, and their hits and in the long run it is possible to determine whether their performance is steady or it is improving continuously.

My thesis analyses tennis, precisely the movement of a tennis player. The electronic solution, discussed in the dissertation helps in the examination of the moves which are made during a hit. With that, it promotes the training plans that can improve the movement of the sportsman with great efficiency. I measure and analyze the movement of the racquet and the ball with sensors attached to the tennis racquet. The goal of my dissertation is the development of a system that can represent the hits and moves of a player and can render help both for amatures and advanced players. My objective is to be able to determine the speed and the direction of the ball before and after the hits and also to recognize the types of shots. I gather data with the hardware device, which is placed on the racquet and I analyze it on the computer. With the help of accelerometer, magnetometer and gyroscope I calculate the moves of the tennis racquet and my goal is to illustrate it in three dimensions. For further analysis the data storage is important and also the ability of real-time data gathering and analysis. The data storage inside the hardware would be necessary, because that way the trainer could analyze the whole game immediately and with that help to improve the players technique.

A 21. században, szinte minden területen megfigyelhető a technikai vívmányok fejlődése. A sportban is előtérbe került a tudományos eszközök használata. Ez sok esetben nagyon hasznos eredményeket, visszajelzéseket reprezentál mind a sportolók, mint pedig felkészítőjük számára is. Ahhoz hogy egy sportoló kimagaslóan jó eredményt érjen el, nem elég csak fizikai képességét növelni, a mozgás technikáját is fejleszteni kell. Ezen eszközök segítségével tudják javítani, tökéletesíteni a technikájukat. Visszajelzést kapnak a mozgásukról, mikor ütöttek jól, mikor hajtották végre az ütést hibás technikával, emellett hosszabb távon látható, hogy a teljesítményük egyenletes, vagy folyamatosan fejlődik.

Dolgozatomban, a teniszezés sportját elemzi, pontosabban egy teniszező mozgásának vizsgálata történik. A dolgozatban tárgyalt elektronikus megoldás segít az egyes ütések kivitelezése során alkalmazott mozdulatok vizsgálatában, így segítve elő a megfelelő edzőmunka kialakítását, mely nagy hatékonysággal fejleszti a sportoló mozgását. Egy teniszütőre szerelt érzékelőkkel mérem és elemzem az ütő és labda mozgását. Dolgozatomban célja, hogy reprezentálni tudjam egy játékos ütéseit, mozgásait és egy olyan rendszert kialakítsak, ami kezdő és haladó játékosok számára is egyaránt segítséget nyújtson az edzések során. Célom, hogy a mérések segítségével meg tudjam mondani, milyen sebességű és irányú a labda az ütés előtt, illetve után. Az adatokból megállapítható legyen, milyen ütéstípust hajtott végre a teniszező. Az ütőn elhelyezett 3 szenzort tartalmazó hardver segítségével gyűjtök adatot a mozgásról, amit számítógépen elemzek. A gyorsulásmérő, magnetométer és giroszkóp segítségével kiszámítom az ütő mozgását, és célom ezt a mozgást térben ábrázolni. Későbbi elemzéshez fontos, hogy az adatokat tárolni tudjam, illetve hogy valós időben kezeljem az adatgyűjtést és az elemzést. Adattárolásra azért lenne szükség a hardveren belül (pl. memória) hogy az edző a játék után, az egész játékot tudja elemezni, és a mért eredmények segítségével tudja segíteni a teniszező technikájának javítását.

3 Bevezetés

A 21. században, szinte minden területen megfigyelhető a technikai vívmányok fejlődése, segítvén ezzel a munkát. Minden háztartás tele van műszaki eszközökkel, amik segítik, könnyebbé teszik a mindennapokat. Nagyon sok eszköz tartalmaz szenzorokat, amik érzékelik a körülötte történő változásokat. Például sütőben van hőmérsékletmérő, páratartalom mérő szenzor, autókban a légzsák működtetését is szenzorok végzik. Ugyanígy a sportban is előtérbe került a tudományos fejlődés. Ahhoz hogy egy sportoló kimagaslóan jó eredményt érjen el, nem elég csak fizikai képességét növelni, a mozgás technikáját is fejleszteni kell. A mozgás fejlesztéséhez különböző eszközök lehetnek segítségére. Például, egy hegymászónak légnyomásmérő óra, futóknak gyorsulásmérő, pulzusmérő műszer. Emellett különböző számítógépes elemzések is segítségére lehetnek a sportolóknak. Akár az edzők, akár a sportolók ezt fel tudják használni technikájuk fejlesztésére, javítására. Látják, mikor mit végeztek nem megfelelően, látják, hol lehet pontosítani a mozgulatsort.

Dolgozatom, a teniszezők mozgásával foglalkozik. A teniszező célja, hogy a felé érkező labdát nagy sebességgel és nagy pontossággal úgy üsse vissza, hogy az ellenfél azt nehezen vagy egyáltalán ne érje el, és ne tudja visszaütni. Mivel mindkét játékos hasonló célok megvalósításán fáradozik, az van előnyösebb helyzetben, aki a nehezen elérhető labdákat is pontosan meg tudja játszani. Ahhoz, hogy a nehezen visszaüthető labdákat a játékos elérje, azaz időben megfelelő közel legyen a sportoló reakció idejét és gyorsaságát kell javítani, ahhoz viszont, hogy az elért labdát esetleg már kiszorított helyzetből is pontosan jól tudja megjátszani az ütés, labda kezelés technikáját kell fejleszteni. A dolgozatban tárgyalt elektronikus megoldás segít az egyes ütések kivitelezése során alkalmazott mozdulatok vizsgálatában, így segítve elő a megfelelő edzőmunka kialakítását, mely nagy hatékonysággal fejleszti a sportoló mozgását.

Egy teniszütőre szerelt érzékelővel mérem és elemzem az ütő mozgását. A mérés és elemzés során vizsgálom az ütő hosszú távú átlag mozgását valamint azokat a rövid idejű elmozdulásokat, melyet az ütő és a labda találkozásakor tapasztalunk. Hosszabb távon szeretném szétválogatni az egyes ütéstípusokat és ütéstípusonként elemezni azokat. A felhasználó munkájának megkönnyítésére az edzésről készített videofelvétellel is szeretném összevetni az eredményeket. Ha sikerül közel megközelítenem a valós mozgást, azzal már lehet olyan eredményeket számolni, mint az ütő és labda sebessége, iránya.

4 Előzmények

Az iskola számos projektkutatásban részt vesz. Eddigi legnagyobb, és legsikeresebb projekt a bionikus szemüveg. Egy olyan eszköz, ami segítséget nyújt látássérült embereknek, segít számukra a hétköznapi helyzetekben való eligazodásban. A bionikus szemüveg a felhasználó környezetében található dolgokról ad visszajelzést előre definiált feladatokat hajtva végre (pl.: színfelismerés, bankjegyfelismerés, táblák észlelése és felismerése, kijelzők észlelése és leolvasása stb.)

Helymeghatározási projektek szintén fontos részét képezik az iskola kutatásainak. Különböző eszközökkel BlueTooth, ultrahang, GSM alapú helymeghatározások voltak a fő témák. Ezek a témák most is aktuálisak. Törekednek a minél pontosabb helymeghatározáson különféle eszközök segítségével. Korábbi dolgozatokat visznek tovább, fejlesztik tovább a diákok, minden évben egy –egy újabb eredménnyel, felfedezéssel, algoritmussal javítják működését a rendszernek.

A mozgáselemzés, amiről az én tanulmányom is szól, szintén előkerült különböző megoldásokban. Gerber Balázs Kajakozással foglalkozó elemzést hajtott végre, Nyers Szabina pedig teniszütő mozgását elemezte. Ezeket a projekteket későbbi fejezetben (mások hasonló megoldásai) elemzem részletesebben.

5 Elméleti ismertető

Minden tanulmánynak fontos része az irodalomkutatás. Az irodalom segítségével tud az kutató hozzálátni, hozzákezdeni a kitűzött feladatnak. Itt szerez tudomást a témakör háttéranyagáról, ismereteiről. Dolgozatom elején én is irodalomkutatást végeztem. Mivel témám a teniszezőkkel és azok mozgásával foglalkozik, kitekintést teszek a mozdulatsorok ismertetésével. A mozgáselemzés fizikai törvényeken, fizikai összefüggéseken alapszik, így ismertetem az általános mozgási törvényeket, egyenleteket.

5.1 Ütéstechnikák

A modern teniszben a legfontosabb és a legtöbbet használt ütések:

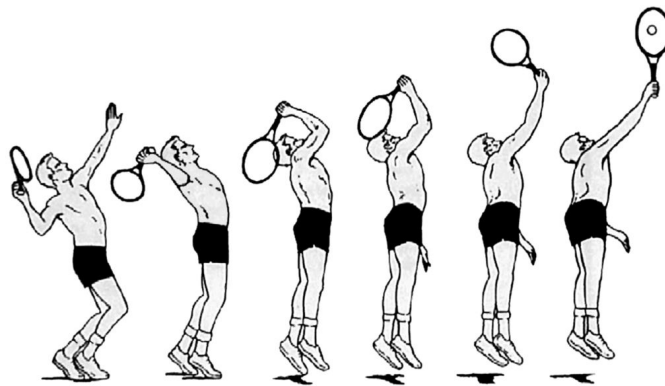
- Szerva
- Tenyeres
- Fonák

Melyek összefoglalva az alapütések [1]. Ha egy játékos uralja ezeket az ütéseket, akkor pontokat szerezhet és mérkőzéseket nyerhet. A labdamentet szervával, vagy más néven adogatással kezdődik, így a jó adogatónak jobbak a nyerési esélyei.

Az alap ütéstípusokat általában az alapvonal közelében állva, a labda lepattanása után alkalmazzák a játékosok. Az alapütéseket több módon meg lehet pörgetni, a pörgetett és a nyesett labda a legtöbbet használt ütések.

5.1.1 Adogatás

A szerva, más néven adogatás indítja a játékmenetet. Az adogatójátékos feldobja a labdát, magasan a levegőben megüti az ütőjével: a labda a háló érintése nélkül az ellenfél térfelén található átellenes adogatóudvarban pattan le. Az ütőt a test mögül, a játékos hátától indítja, a labdát feldobja, és mikor az a legmagasabb pozícióban van, a játékos megüti, miközben az ütő nyújtott kézzel előrendül a feje fölött (1. ábra). A labda találkozásakor még csuklóval rásegít, így pontosabban tud célozni.



1. ábra - adogatás mozdulatsor

5.1.2 Fonák ütés

Egy jobbkezes játékos az ütést baloldaltól indítja, a test előtt keresztben folytatódik, miközben érinti a labdát, majd a test jobb oldalán fejeződik be (2. ábra). Az ütés közben lehet egy kézzel, vagy két kézzel fogni az ütőt. A fonák ütés lehet (előre) pörgetett vagy nyesett (visszapörgetés). A nyesett fonák a gyors pályákon a legeredményesebb, amikor a labda sebesen repül át a másik térfélre.

5.1.3 Nyesett fonák

A játékos oldalra viszi az ütőt a fonákhoz, úgy hogy fentről lefelé üthesse meg a labdát a visszapörgetéshez. Közben az ütés irányához képest oldalasan helyezkedik el. Az ütő „U” alakban lentől felfelé irányuló mozgást tesz meg úgy, hogy az ütő fonákjával felfelé néz.



2. ábra - fonák mozdulatsor

5.1.4 Tenyeres ütés

A tenyeres a legtöbbet használt ütés a teniszben, a teniszezők többsége ezt sajátítja el elsőként. A fő alapütés kezdők és haladók számára egyaránt lehetővé teszi, hogy a pálya végéből uralják a játékot. Tenyeressel többnyire felül pörgetik meg a labdát a játékosok, de nyeseve és oldalt pörgetve is eltalálhatják.

A játékos arra törekszik, hogy a lehető legmagasabban találja el a labdát, ezzel adva neki előre pörgetést. Egy jobbkezes játékos az ütest jobb oldalról indítja, a labda érintése után elhalad a test előtt, és bal oldalt végződik az ütés (3. ábra). A játékos az ütőt a labda szintje alatt tartja, majd miközben alulról felfelé lendíti, folyamatosan gyorsítja. Amikor az ütő a labdához ér, kissé megemeli, ezzel irányítva a labdát.



3. ábra - tenyeres mozdulatsor

Ahogy látható, a különböző alapütések, különböző mozdulatsorokat követelnek. Az adogatás a fej fölött történik, az ütő hátulról a test fölé emelkedik, majd onnan a test előtt érkezik le. A tenyeres jobb oldalról balra történik, a fonák balról jobbra (jobbkezes ütőjátékost tekintve). Az ütő állása a labdával való találkozás pillanatában és a mozdulat iránya megmutatja, hogy az ütés pörgetett, nyesett, vagy egyenes ütés volt.

5.2 Fizikai összefoglaló

Ebben a fejezetben a mozgásokat leíró alapvető fizikai összefüggések, valamint a magnetométer által mért mágnesség kerül áttekintésre. [10][12].

Egy test elmozdulását, egy egyenes vagy egy görbe mentén, három paraméterrel jellemezhetünk: pillanatnyi helyzet, sebesség és gyorsulás az adott pillanatban.

5.2.1 Egyenes vonalú egyenletes mozgás

Az egyenes vonalú egyenletes mozgás a kinematika tárgykörébe tartozó legegyszerűbb mozgásforma. Jellemzője, hogy a test egyenes pályán, változatlan irányban úgy mozog, hogy egyenlő idők alatt egyenlő utakat fut be, bármilyen kicsik is ezek az időközök. A test által megtett s út és a megtételéhez szükséges t idő egyenesen arányosak, azaz hányadosuk állandó. Ezt a hányadost a test sebességének (v) nevezzük.

1.Egyenlet
$$v = \frac{s}{t}$$

A sebesség-idő grafikon a vízszintes t -tengellyel párhuzamos egyenes, a grafikon alatti terület a test által megtett út.

A hely-idő grafikon egyenes, melynek meredeksége a test sebessége. Az út-idő grafikon az origóból kiinduló, az előzővel párhuzamos egyenes.

Az egyenes vonalú egyenletes mozgást végző (vagy nyugalomban levő) pontszerű test kölcsönhatás hiányában nem változtatja meg mozgásállapotát (Newton 1. axiómája), ezt a tulajdonságot tehetetlenségnek nevezzük. Ugyancsak egyenes vonalú egyenletes mozgást végez a pontszerű test akkor, ha a rá ható erők vektori összege nulla.

5.2.2 Gyorsulás

A fizikában a gyorsulás (jele: a) a sebesség változási gyorsasága (idő szerinti deriváltja). A gyorsulás egy vektormennyiség, amelynek a dimenziója **hosszúság/idő²**. Az SI mértékegységrendszerben az egysége **méter/másodperc²**. A gyorsulás időegységre eső sebességváltozás.

Ha görbe vonalú mozgásom van, akkor a gyorsulást vektorként kell tekinteni, mely a sebességvektor idő szerinti deriváltja:

2.Egyenlet $a = \frac{dv}{dt}$

Ahol a a gyorsulásvektor, v a sebesség **m/s**-ban kifejezve és t az idő másodpercben. Ennek a képletnek az alapján a gyorsulás mértékegysége **m/(s·s)** vagy **m/s²**.

Görbe vonalú mozgásnál a gyorsulás felbontható érintőirányú (tangenciális) gyorsulásra (a_t), és arra merőleges, úgynevezett centripetális gyorsulásra (a_{cp}), melyek nagysága a következőképp számolható:

3.Egyenlet $a_t = \frac{dv}{dt}$ (a sebességnagyság változásából származik).

4.Egyenlet $a_{cp} = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$ (a sebességirány változásából származik).

Ahol v a sebesség nagyságát, ω a szögsebességet, r a simulókör sugarát jelöli.

5.2.2.1 Gravitációs gyorsulás

Egyik legismertebb gyorsulási állandó a g , egy g a Föld gravitációja által okozott gyorsulás a tengerszinten a 45° szélességi fokon (Párizs környékén) mennyiségileg körülbelül 9,81 m/s².

5.2.2.2 A gyorsulás és erő kapcsolata

A klasszikus mechanikában az a gyorsulás az erő (F) és a tömeg (m) függvénye, amit Newton második törvénye fejez ki:

5.Egyenlet $F = m \cdot a$

5.2.2.3 A gyorsulás változása

A gyorsulás megváltozását, vagyis az idő szerinti deriváltját, tehát a sebesség idő szerinti második deriváltját rándulásnak nevezzük.

5.2.3 Perdület

A perdület, szögmomentum (más néven anguláris mozgási momentum vagy forgási momentum), vagy ritkán forgásmennyiség, általában véve egy test azon törekvése, hogy

fenntartsa forgómozgásának állapotát. Mértéke arányos a tehetetlenségi nyomatékkal és a szögsebességgel.

Jele L . Mértékegysége $kg \cdot \frac{m^2}{s}$, vagy az ezzel ekvivalens $N \cdot m \cdot s$. Egy test perdületének megváltozása a szögimpulzus (ΔL). A két, elvben különböző, de a gyakorlatban egyként kezelhető fogalmat legtöbbször szinonimaként használják.

Egy mozgó tömegpont perdületét az alábbi kifejezés adja meg:

6.Egyenlet $L = r \times p$

Ahol r a tömegpont valamely vonatkoztatási ponttól vett helyvektora, p a lendülete.

Több tömegpontra a teljes perdület a részek perdületeinek eredője:

7.Egyenlet $L = \sum_i L_i = \sum_i r_i \times p_i$

Kiterjedt testek esetén hasznos a tehetetlenségi nyomaték segítségével kifejezni L -t:

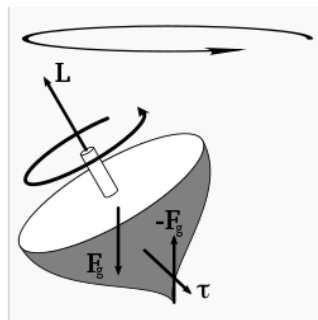
8.Egyenlet $L = \bar{I} \omega$

Ahol ω a test (előjeles) szögsebessége, $\bar{I}$ a tehetetlenségi nyomatéka.

Megmaradó mennyiség, azaz zárt rendszer összes perdülete állandó. Ez a perdületmegmaradás törvénye.

5.2.3.1 Perdületmegmaradás törvénye

A perdületmegmaradás törvénye kimondja, hogy zárt rendszer perdületösszege állandó. Ez a törvény a tér folyamatos irányszimmetriájának a matematikailag levezetett következménye. (4. ábra)



4. ábra – Perdület

Mivel a forgatónyomaték a perdület idő szerinti deriváltja, a két ellentétes irányban ható, F_g és $-F_g$ erők által okozott forgatónyomaték megváltoztatja az L perdület nagyságát ezen forgatónyomaték irányában. (A precesszió ennek a következménye.)

A perdület idő szerinti deriváltját forgatónyomatéknak nevezzük:

$$\text{9.Egyenlet} \quad M = \frac{dl}{dt} = r \times \frac{dp}{dt} = r \times F$$

Mivel „zárt” rendszerről van szó, ez matematikailag azt jelenti, hogy a rendszerre ható forgatónyomaték értéke zérus:

$$\text{10.Egyenlet} \quad L = \text{const.} \leftrightarrow \sum M = 0$$

Ahol M a részecskerendszerre ható bármilyen forgatónyomaték.

Egy keringési pályán a perdület eloszlik a bolygó perdülete (spin) és annak keringési pályája által okozta perdület között:

$$\text{11.Egyenlet} \quad L_{total} = L_{spin} + L_{orbit}$$

5.2.4 Mágnesség

A mágnesség fizikai fogalom, mely bizonyos testek egymás közötti vonzó és taszító képességére utal [11].

Mágneses pólusok meghatározása

A mágneses térben szabadon mozgó rúd-mágnes a vonzó erőhatás következtében meghatározott irányba áll be. A földrajzi északi sarok irányába mutató pólust északi pólusnak, a földrajzi déli sarok irányába mutatót déli pólusnak nevezzük. A földrajzi északi sarok irányába mutató mágnespólus az eddigiek szerint valójában a mágneses déli pólus.

5.2.4.1 Állandó mágnes, mint energiatároló

Az állandómágnes statikus mágneses teret hoz létre. A mágnesben elraktározott energia és az általa keltett tér a benne lejátszódó elektromágneses folyamatok hatására változatlan marad. Egyetlen feltétel, hogy a folyamatok ne okozzanak olyan nagy térerősséget, amely az állandómágnes munkapontjának irreverzibilis megváltozásához (lemágnesezéshez) vezet.

Ha az ilyen statikus mágneses teret a gravitációs térrel hasonlítjuk össze, az a különbség, hogy a gravitációs tér hatása a benne lévő test tömegétől függ, amíg a mágneses térben csak a test mágneses tulajdonságai befolyásolják a hatást.

A mágnesesség egyik keletkezési módja, amikor egy irányba mozgó elektronok hatására, vagyis elektromos áram által átvitt vezető körül keletkezik mágneses erőter. A mágnesesség az elektromágneses kölcsönhatás egyik megjelenési formája.

A mágneses mező poláris, mindig két ellentétes pólus létezik, önmagában csak az egyik nem. Az ellentétes pólusok vonzzák, az azonosak taszítják egymást. Az egyik pólust északinak, a másikat déli pólusnak nevezzük. A vastárgyak a közelükben lévő mágneses mező hatására maguk is mágnesként viselkednek, a mező hatására ugyanis a bennük lévő részecskék "vonalba" rendeződnek, és a hatásuk összeadódik. A külső mágneses mező megszűnésekor a részecskék ismét rendezetlenné válnak, és az egyes részecskék mágneses hatásai kioltják egymást. Az acél azonban megtartja a mágnesességét, a mező megszűnésekor a részecskék rendezettek maradnak.

Fontos különbség a mágnesesség és az elektromosság között, hogy az elektromos töltéseket szét lehet választani, a mágneses mező pólusait azonban nem.

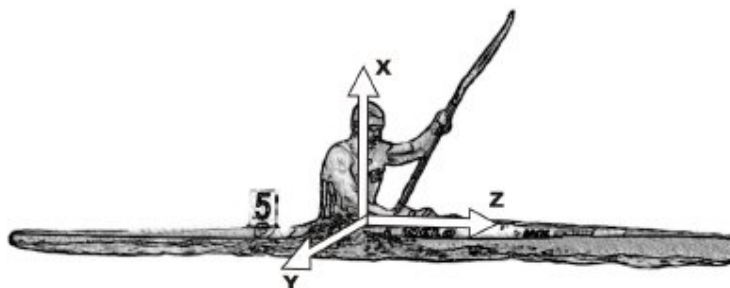
6 Mások hasonló megoldásai

A mindennapjainkban gyakran találkozunk és használunk olyan eszközöket, amik létfontosságú eleme egy- egy MEMS érzékelő. Egyik ilyen fő terület a MEMS mint oszcillátor. A chip felületén kialakított, mechanikus mozgást végző eszköz minden tekintetben kapcsolatban áll a jelét feldolgozó elektronikával. Hordozható médialejátszóban 2-4, laptopokban 4-10, középkategóriás személyautókban akár 15-35 oszcillátor-, óragenerátor-, rezonátor – áramkör is megtalálható. Telefonokban is fontos szerepe van a mikroelektronikának. Mivel törekednek minél kisebb készülékek elkészítésében, az antenna se lehet nagy, így viszont csökken a teljesítménye. MEMS technológia segítségével az antenna sugárzóelemének hosszát elektronikus úton a használni kívánt frekvenciához lehet igazítani, így kisebb jelszint is elegendő. Egy okostelefon GPS segítségével meg tudja mondani hol is vagyunk, de a közeljövőben már akár szintkülönbségeket is tudnak majd mutatni légnyomásmérő szenzor segítségével. A légnyomás ingadozását mérő barométer változások alapján fogja tudni gépünk, milyen magasan is vagyunk, vagy például melyik emeleten egy épületben.

A 2010-es években egyre több, hasonló megoldást lehet találni az interneten. Mostanra jutott el a szenzorok fejlesztése, fejlődése arra a szintre, hogy emberi áron is megvásárolható legyen. Kezdetben, mint minden technikai fejlesztés a hadiparban alakult ki. Különböző szenzorok segítségével egy adott területen történő környezeti változásokat néztek. Például leszórtak sok kis szenzort egy területre, majd azok figyelték, hogy milyen környezeti hatások érik őket. Tank megy át rajta, emberek, hó változások, stb. Később, mint minden ilyen fejlesztést tovább vittek a hétköznapi élet segítésére. Így lett elfogadható ára. Sok segítséget nyújt, mivel könnyű vele dolgozni, programot írni rá.

Mozgáselemzés céljára több megvalósítást is találtam, különböző területeken. Egyik ilyen megvalósítás az iskolához köthető, méghozzá egy kajakozó mozgását figyelő program készítése MEMS eszközzel.

Gerber Balázs, az információs technológia kar volt diákja, egy kajakozást segítő műszert készített [3]. Hajóra szerelhető szenzor, ami figyeli a hajó, és ez által a kajakosok mozgását. Ez a szenzor csak egy gyorsulásmérő volt, ami szintén három tengelyű (X, Y, Z). Elhelyezett rajta egy kijelzőt is, hogy a sportoló mozgás közben lássa, hogyan dolgozik. A hajó mozgásirányának (előre/hátra) a Z tengely felelt meg, de emellett az X Y koordinátát is figyelte, hiszen ezek segítségével tudta megállapítani a hajó billegését, oldal irányú kitérését (5. ábra). A nemkívánatos jeleket egy IIR (Infinite Impulse Response = végtelen impulzusválaszú) szűrő megfelelő méretezéssel kiszűri, és megkeresi a gyorsulásgörbe maximumait. Két egymás követő maximális érték között eltelt időből számítható a csapásszám. Rendelkezik a műszer memóriával is, ami több mint negyedórányi anyagot képes tárolni. A rögzített adatokból később számítógép segítségével további elemzések végezhetők. A mért adatokból grafikon készíthető, ami hasznos információkkal látja el az elemzőt a kajakos technikájáról: melyik karral húz erősebbet, mennyire egyenletes erővel húz, mennyire billegtetni oldalra a hajót, mennyire változik a húzás-technika az edzés során, és még számos egyéb apróság megállapítható, amelyek segíthetik a sportolót technikája javításában.



5. ábra - felállított tengelyek

Másik ilyen tanulmány, ami szintén az egyetem egyik diákja, Nyers Szabina készített a teniszezésről [2]. Az én dolgozatom is a tenisz mozgását írja le, viszont Szabina számára csak egy g-szenzor volt elérhető, és ezzel mérte a lehetséges mozgásokat. egy 3 tengelyű szenzor segítségével nem lehet beazonosítani a helyét az ütésnek, csak a mozgást lehet vizsgálni. Az én megoldásom 3 darab 3 tengelyű szenzorral dolgozik, így növelve a feladat komplexitását, pontosságát, és javít a helymeghatározáson.

Távirányítású repülő mozgásánál is foglalkoznak MEMS elemekkel, szintén helymeghatározásra, mozgáselemzésre. Egy repülőnek létfontosságú a pontos helymeghatározás a földhöz viszonyítva, illetve, a saját rendszerében is, hiszen tudnia kell, hogy most milyen szögben dőlnek a szárnyak.

Egy amerikai egyetem egyik hallgatója, lépéselemzést készített. A cipőjére felszerelte a szenzort, szintén 9 szabadsági fokú (3 szenzor- mindhárom 3 tengelyű) MEMS elemek, majd különböző lépéseket tett. egyenesen előre, lépcsőn fölfelé, váltott lábú lépések, mellé zárt lépések vizsgálata, csigalépcsőn felfelé lépegetés. Majd ezeket megjelenítette tengelyes megjelenítésben három dimenzióban. A képi megjelenítésnél jól látszott az adott mozgás.

Végül fontos megemlíteni, hogy a híres Babolat teniszütő és egyéb kiegészítőket gyártó cég, a dolgozatom témáját, az ütőre/ütőbe szerelt érzékelők segítségével mozgást mérő programot, ütőt tervez készíteni [8]. Szintén valós idejű megjelenítést, és elraktározható adatokat terveztek megvalósítani, a helyszíni vizsgálathoz, és az otthoni elemzéshez. A cég, mivel piacképes terméket szeretne kidobni, már a szenzor és az őt elemző számítógép közötti vezeték nélküli kapcsolódást is kifejlesztette, így a szenzor az ütő nyelében helyezkedik el.

7 Saját rendszer kialakítása

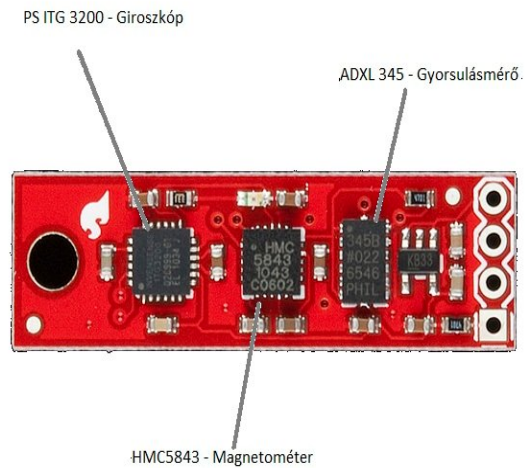
A mérőrendszer kialakítása a következőképp zajlott:

Először felragasztottam a szenzort az ütő „szívére”. Választásom azért esett erre a pontra, mert normális használat közben a labda itt nem érinti a szenzort, nem tud benne kárt tenni, viszont ez a pont van legközelebb az ütőfejhez, így itt tudom mérni a legpontosabban a mozgásokat, rezgéseket. A chipen található három szenzor: gyorsulásmérő, magnetométer és giroszkóp. A hardverből kábelen lehet adatot mérni, ami USB porton csatlakozik a számítógéphez (6. ábra). Dolgozatom nem foglalkozik a szenzor elhelyezkedésének javításával, viszont előretekintve, az ütő nyelében elhelyezve tudom elképzelni az adatfelvevő egységet, és a kommunikációt vezeték nélkül megoldani (pl. Bluetooth, ZigBee), hiszen így nem fog akadályozni a játékban és az edzésben sem a kábel, sem pedig az ütőre rászerelt hardver.



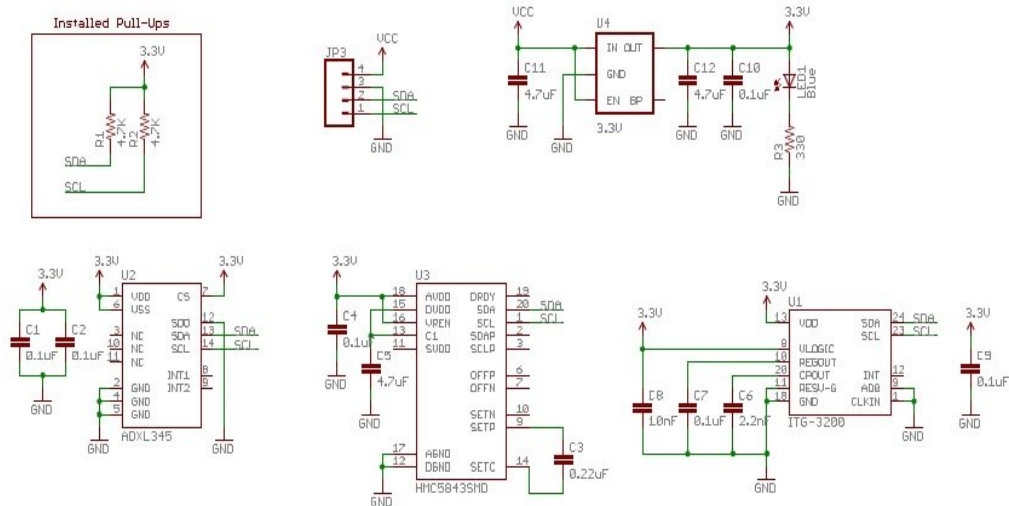
6. ábra - szenzor elhelyezés

Munkám során egy 9 szabadságfokú chippel dolgoztam. (9 Degrees of Freedom - Sensor Stick (Old-School) SEN-10321). Ezen az eszközön található három szenzor: gyorsulásmérő, giroszkóp és magnetométer (iránytű). Mindhárom szenzor három szabadsági fokkal rendelkezik, tehát háromtengelyű, így jön össze a 9 szabadsági fok (Degree of Freedom – röviden DOF).



7. ábra - Szenzorok elhelyezkedése a hardveren

A képen látható a hardver kinézete (7. ábra). Látható a három szenzor elhelyezkedése, alább pedig a kapcsolási rajza a szenzoroknak és az őket összekötő lap (8. ábra).



8. ábra - a hardver kapcsolási rajza

Mielőtt ismertetem a méréseket, kitekintést teszek a szenzorok működésére, felépítésére.

7.1 Eszközleírás

Mivel napjainkban minden egyre kisebb és digitális, így egyre kevesebb mód nyílik arra, hogy nagyméretű alkatrészekkel tervezzünk, dolgozzunk. A kisebb méretekre és alacsonyabb energiafelhasználásra való törekvés a MEMS-ek áttörését hozta. A mikro-elektro-mechanikai rendszerekben mikrotechnológiai megoldások alkalmazásával egyetlen szilíciumchipen (lapka) valósul meg mechanikai elemek, érzékelők, beavatkozók és a jelfeldolgozó elektronika integrálása. Az egyes komponensek 1-100 mikrométer nagyságúak, míg az egész készülék körülbelül 20 mikrométer és 1 milliméter közötti mérettel rendelkezik. A két fő vonala a MEMS-eknek a Bulk és a Surface micromachining vagyis a tömbi és a felületi mikromechanika. A tömbi mikromechanika esetében a szilícium szeletben alakítjuk ki a kívánt struktúrát anizotróp marás segítségével. Ezzel a nedves maratással szabályos és akár nanométer pontosságú mikromechanikai szerkezetek készíthetők. A felületet többnyire kémiai marással alakítják, de ez nem kizárólagos. A maszkolás után a felesleget eltávolítják. Membránok, szelepek és cantileverek megmunkálásánál alkalmazzák például a tömbi mikromechanikát. Ezek nem forognak, nem mozognak, csak megfeszülnek és maximum elmozdíthatóak valamelyik irányba. Előállítása olcsó, nyomásérzékelőket, gázszenzorokat készítenek felhasználásukkal.

Ezzel szemben a felületi mikroelektronikánál alapjait tekintve nem bele marunk, hanem ráépítünk. Rétegek egymás utáni sorozata. Szerkezeti anyagok - ami lehet például szilícium is - és az áldozati réteg (SiO_2) jönnek létre. Az áldozati réteget szelektív marással távolítjuk el. A struktúra kialakítása a szelet felületén, litográfiai úton keletkezik. A fő különbség a tömbi mikroelektronikától, hogy ezzel a módszerrel mozgatható részeket gyárthatunk.

7.1.1 Gyorsulásmérő

A gyorsulásmérő egy olyan elektromechanikai eszköz, ami gyorsulási erőket mér. Ezek az erők lehetnek statikusak, mint a gravitációs erő, vagy lehetnek dinamikusak, például, ha mozog vagy rezeg a gyorsulásmérő. Azáltal hogy méréd a gravitációs erőt, meg lehet állapítani, hogy milyen helyzetben van a földhöz képest. A dinamikus mérésekkel analízálni lehet az utat, ahogy mozgott a mérő eszköz.

1. Táblázat ADXL 345 adatai [4]

paraméter	körülmények	Min	typical	Max	mértékegység
<i>energiaellátás</i>					
feszültség (Vs)		2.0	2.5	3.6	V
<i>Bemenet:</i>	tengelyenként				
mérési határ	változtatható				g
nemlinearitás	teljes skála százaléka				%
<i>kimeneti felbontás:</i>	tengelyenként				
Összes g skála	10-bites felbontás		10		bit
	teljes felbontás		10		bit
	teljes felbontás		11		bit
	teljes felbontás		12		bit
$\pm 16g$	teljes felbontás		13		bit
érzékenység	tengelyenként				
érzékenység az X_{out}, Y_{out} Z_{out} -ben	összes g skála, teljes felbontás	230	256	282	LSB/g
	, 10-bites felbontás	230	256	282	LSB/g
	10-bites felbontás	115	128	141	LSB/g
	10-bites felbontás	57	64	71	LSB/g
	$\pm 16g$, 10-bites felbontás	29	32	35	LSB/g

7.1.2 Magnetométer

A mágneses tér erősségét, egyes esetekben az irányát is mérő műszer. Az abszolút magnetométerek önmagukban mérik a mágneses mezőt, anélkül, hogy referenciaként standard mágneses eszközt használnának. A leggyakrabban használt magnetométerek a vibrációs magnetométer, az elfordulás-galvanométer és a modernebb nukleáris magnetométer. Vibrációs eszközt Gauss készített elsőként 1832-ben, amely egy vízszintesen felfüggesztett kis mágnesrúd (vagy -tü) rezgési idejére támaszkodik. Ugyanezt a mágnest ezt követően

rögzítették és egy másik hasonlóan felfüggesztett mágnes kitérítését vizsgálták az előző mágnes terében. A kitérés-galvanométer ismert méretű Helmholtz-tekercekre épül, amelynek közepébe egy kis mágnest függesztenek fel. A kis mágnes elfordul, és a nyugalmi helyzetét a Föld mágneses tere, a tekercsek mágneses tere és az a szög határozza meg, amellyel a tekercseket el kell fordítani ahhoz, hogy a mágnes iránya a tekercsek tengelyébe essen. Az érzékeny nukleáris magnetométerek egy vízmintában precesszáló protonok által valamely tekercsben keltett audiófrekvenciás feszültségjelek mérésére épülnek. Használatosak még különböző relatív magnetométerek, a Föld mágneses terének mérésére, továbbá egyéb berendezések kalibrálására. Ezzel az eszközzel már meghatározható a föld mágneses terének erőssége és iránya is.

Az iránytű egyszerű irány meghatározó műszer, amelyben egy függőleges tengelyen elhelyezett szabadon lengő mágneses acéltű a földmágnesesség hatására közel az észak-déli irányba áll be.

Létezik olyan speciálisan kialakított giroszkópot tartalmazó műszer, amivel ténylegesen megtalálható a Föld északi és déli sarka. Ez az eszköz a giroszkopikus iránytű, amely a Föld forgástengelye által kijelölt valódi északra mutat, nem pedig a mágneses észak felé, tehát a kijelzés nem tartalmazza a mágneses deklinációt. Ebből következik, hogy a giroszkopikus iránytűre sincs hatással a földmágnesesség, így érzéketlen a fémtestek és elektromos alkatrészek mágneses zavaróhatásaira is. A többnyire hajókon használatos „gyrocompass” neve ellenére tehát más műszert takar, mint a repülőgépeken használatos pörgettyűs iránytű, de az közös bennük, hogy mindkettőben giroszkóp található és egyik sem a Föld mágneses mezejét használja ki működése során. A Föld forgásából adódó erő fordítja a giroszkópot észak-déli irányba, mivel a giroszkóp forgástengelyén ekkor lesz a Coriolis-erő forgatónyomatéka nulla, amire a szabadon felfüggesztett forgó testek törekednek.

2. Táblázat HMC5843 adatai [5]

Karakterisztika	körülmények	min	typical	max	mértékegység
<i>energiaellátás</i>					
feszültség	AVDD Referenced to AGND ¹	2.5		3.3	Volt
	DVDD Referenced to DGND ²	1.6	1.8	2.0	Volt
<i>teljesítmény</i>					
mezőtartomány	Teljes skála (FS) - összesen alkalmazott mező	-4		+4	gauss
Sávszélesség	-3dB pont		10		kHz
felbontás	AVDD=3.0V, GN		7		milli-gauss
mérési periódus	output rate = 50Hz (10Hz typ.)		-	10	msec
Mag Dynamic Range	3-bit gain control	±0.7	±1.0	±4.0	gauss

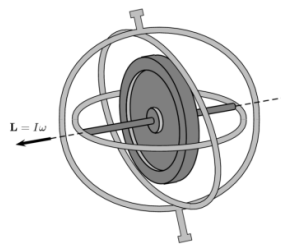
¹ AGND -- Analog Supply Ground/Return. AVDD -- Analog Positive Supply

² DGND -- Digital Supply Ground/Return. DVDD -- Digital Positive Supply

7.1.3 Giroszkóp

A giroszkóp (más néven pörgettyű) a fizikából ismert perdületmegmaradás törvényét demonstráló eszköz.

A legegyszerűbb változata egy tengely körül szabadon forgó lendkerékből áll. Amikor a kerék forgása közben az eszközt a tengelyre merőleges erőhatás éri, az eszköz „meglepő módon” a tengelyre és a külső erőhatásra egyaránt merőleges irányban fordul el.



9. ábra - Giroszkóp

A giroszkópot (9. ábra) Léon Foucault francia fizikus találta fel és nevezte el 1852-ben, amikor egy, a Föld forgását igazolandó kísérletén dolgozott.

Giroszkópokat gyakran alkalmaznak iránytűk helyett vagy azok kiegészítéseként (hajókon, repülőkön, űreszközökön). Ha ugyanis az eszközt további két tengellyel látjuk el úgy, hogy a három tengely egymásra kölcsönösen merőleges legyen, hogy a giroszkóp tetszőleges irányba szabadon el tudjon fordulni, akkor a pörgő kerék megőrzi forgási tengelyének eredeti irányát, függetlenül attól, hogy a kerete hogyan fordul el (ld. 9. ábra.)

A giroszkóp használható a stabilitás fokozására is. A legközismertebb ilyen előfordulása a kerékpár kereke, amelynek forgása megakadályozza, hogy a bicikli feldőljön. Minél gyorsabban forog a kerék, annál stabilabb a jármű. Minden biciklista tudja, hogy ha a kerékpár megdől, akkor a pörgettyűhatás a kormányt elfordítja: azaz a kerék tengelye az erőhatásra merőleges irányban fordul el. Hasonló funkciót látnak el a giroszkópok precíziós műszerekben és más járműveken is.

A giroszkóp viselkedését leíró alapegyenlet a következő:

1.Egyenlet
$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I\alpha$$

Ahol τ a kifejtett külső erőhatás forgatónyomatéka, L a perdület vektora, ω a szögsebesség vektora, α pedig a szöggyorsulásé. A skaláris I érték a tehetetlenségi nyomaték.

A képletből következik, hogy ha a nyomaték merőleges a forgás, és így a perdületvektor tengelyére, akkor az eredő forgatónyomaték mindkét vektorra merőleges lesz, ez a precesszió jelensége. A precesszió nagysága az Ω_p szögsebességgel jellemezhető:

2.Egyenlet
$$\tau = \Omega_p \times L$$

3. Táblázat ITG3200 adatai [6]

Paraméter	körülmények	Min	Typical	Max	mértékegység
<i>gyro érzékenység</i>					
Full-Scale Range	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyro ADC Word Length			16		bit
érzékenység skála faktor	FS_SEL=3		14.374		LSB/(°/s)
<i>GYRO mechanikus frekvenciák</i>					
X- tengely		30	33	36	kHz
Y- tengely		27	30	33	kHz
Z- tengely		24	27	30	kHz
frekvencia elkülönítés	bármely két tengely között	1.7			kHz

8 Célok

Dolgozatom céljaként azt tűztem ki, hogy sikerüljön elemezni az ütő és labda mozgását egy ütés során. Tudjam megállapítani, milyen ütésformával ütött a felhasználó, milyen sebességgel mozdította a karját, milyen pörgetéssel halad tovább a labda az ütés után.

Dolgozatom megírása kezdetén, főleg irodalomkutatót végzek, és elsajátítom a szenzorok működésének gyakorlatát. Az adott hardver elemzése és ismertetése után, a megismert tudás alapján kialakítom a mérési eljárásokat. A mérési eljárás alapján elemzem csak az ütő mozgását, majd a labda és ütő találkozásának mozdulatát is. Ahhoz, hogy ezt értelmezni és kivitelezni lehessen, a mozgásokat leíró fizikai és matematikai összefüggéseket meg kell ismerjem. Ezek segítségével térbeli megjelenítést is teszek a jobb szemléltetés céljából. Végző

célom, hogy közel valós idejű legyen a megjelenítés és az mozgáselemzés, és rendes játékkörülmények között is használható legyen a kialakított rendszer.

A mérési eredményekből a teniszező számára is érthető nyelven megjelenítem és leírom a mozgást, amivel szemléltetni tudom a játékos egyes ütéstípusait, hibáit.

Ha a helymeghatározás, és a mozgáselemzés már sikerült, utána igazából a szenzor elhelyezésétől függően, az élet más területein is be lehet vetni, például sétálás mérés (ahogy korábban már említettem), fejmozdulat mérés, ha a fejünkre szereljük a műszert. Későbbiekben, ha már a mozgáselemzés a lehető legjobban megy, lehet még foglalkozni a szenzor vezeték nélküli kapcsolatának kiépítésével.

9 Megvalósítás

A munkám kezdetén, megismerkedtem az eszközzel, és a programmal, ami rögzíti az adatokat. A program saját fájlformátumban menti az adatokat. Ha szövegszerkesztő programmal megnyitjuk, ezt látjuk benne (sokkal több mérési eredmény van a fájlban, ezt csak bemutatás céljából emeltem ki):

```
ADXL345: -129, 5, -2
HMC5843: -101, -176, 67
PSITG3200: 65497, 38, 65452
SEQ: 1
ADXL345: -129, 9, -4
HMC5843: -95, -177, 80
PSITG3200: 65500, 42, 65489
SEQ: 2
ADXL345: -127, 8, -8
HMC5843: -101, -180, 78
PSITG3200: 65515, 26, 65510
SEQ: 3
ADXL345: -128, 9, -2
HMC5843: -106, -176, 82
PSITG3200: 8, 1, 65455
SEQ: 4
ADXL345: -127, 9, 0
HMC5843: -100, -175, 76
PSITG3200: 6, 65509, 65474
SEQ: 5
```

Amint látható, mindhárom szenzor 3 koordinátáját mutatja a szenzor saját mértékegységében. Első lépésként, írtam egy java programot, ami ebből a fájlból létrehoz 3 másik fájlt, ami az egyes szenzorok saját koordinátáit tartalmazza csak. A java kód alább látható:

```
public class meres {
public static void main(String[] args) throws FileNotFoundException {
    // TODO Auto-generated method stub
    String fajlnev = "forgatas3 ";
    File f = new File(fajlnev);
    try {
        BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(f));
        while (f.exists()) {
            String sor = br.readLine();
            String[] tomb = sor.split(",");
            String[] tomb2 = tomb[0].split(" ");
            if (tomb2[0].equals("ADXL345:")) {
                FileWriter fstream = new FileWriter("ADXL345.txt", true);
                PrintWriter out = new PrintWriter(fstream);
                out.println(tomb2[1] + " " + tomb[1] + " " + tomb[2] + " ");
                out.close();
            } else if (tomb2[0].equals("HMC5843:")) {
                FileWriter fstream = new FileWriter("HMC5843.txt", true);
                PrintWriter out = new PrintWriter(fstream);
                int xMagnetoe = Integer.parseInt(tomb2[1]);
                out.println(tomb2[1] + " " + tomb[1] + " " + tomb[2] + " ");
                out.close();
            } else if (tomb2[0].equals("PSITG3200:")) {
                FileWriter fstream = new FileWriter("PSITG3200.txt", true);
                PrintWriter out = new PrintWriter(fstream);
                String ystring = tomb[1].trim();
                String zstring = tomb[2].trim();
                int x = Integer.parseInt(tomb2[1]);
                int y = Integer.parseInt(ystring);
                int z = Integer.parseInt(zstring);
                if (x >= 32768) // gyroscope számbázolása
                    // többi, így át kellett alakítani
                {
                    x -= 65536;
                    tomb2[1] = Integer.toString(x);
                }
                if (y >= 32768) {
                    y -= 65536;
                    tomb[1] = Integer.toString(y);
                }
                if (z >= 32768) {
                    z -= 65536;
                    tomb[2] = Integer.toString(z);
                }
                out.println(tomb2[1] + " " + tomb[1] + " " + tomb[2]
                    + " ");
                out.close();
            }
        }
    } catch (IOException e) {
        e.printStackTrace();
    }
}
```

A kód lefuttatása után, létrejött három fájl: ADXL345.txt, HMC5843.txt, PSITG3200.txt. Mindhárom szöveges állományban már csak a számhármassok vannak, soronként egy mérés három koordinátája. Egy kis részletet kiemeltem a fájlokból, bemutatás céljából (4. Táblázat):

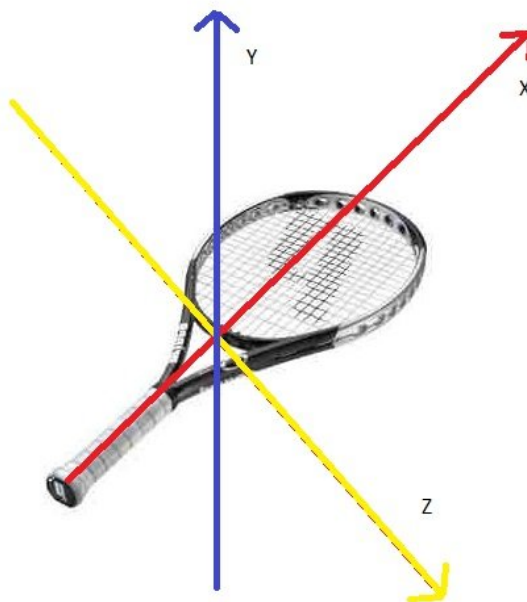
4. Táblázat fájlok tartalma

ADX345.txt	HMC5843.txt	PSITG3200.txt
-129 5 -2	-101 -176 67	-39 38 -84
-129 9 -4	-95 -177 80	-36 42 -47
-127 8 -8	-101 -180 78	-21 26 -26
-128 9 -2	-106 -176 82	8 1 -81

A giroszkóp mérési adatainak formátuma különbözik a többitől. Külön számbázolást használ, csak 0 és 65536 közötti értékekben méri az eredményt, ezért egy egyszerű algoritmussal ezeket az adatokat is a többihez hasonló, és használható eredményre alakítottam.

A mérési eljárást azon a gondolatmenet alapján alakítottam ki, miszerint először az ütő mozgását kell elemezni, mivel ennek ismerete elengedhetetlen lesz a későbbiekben, és ha ez az elemzés elég pontos, akkor lehet foglalkozni az ütő és labda találkozásának elemzésével. A mérési adatokból és azok számításából nem lehet könnyen meghatározni, hogy milyen mozgás történt, így az ábrázolásnak és megjelenítésnek fontos szerepe van. Különböző megjelenítési módszereket alkalmaztam.

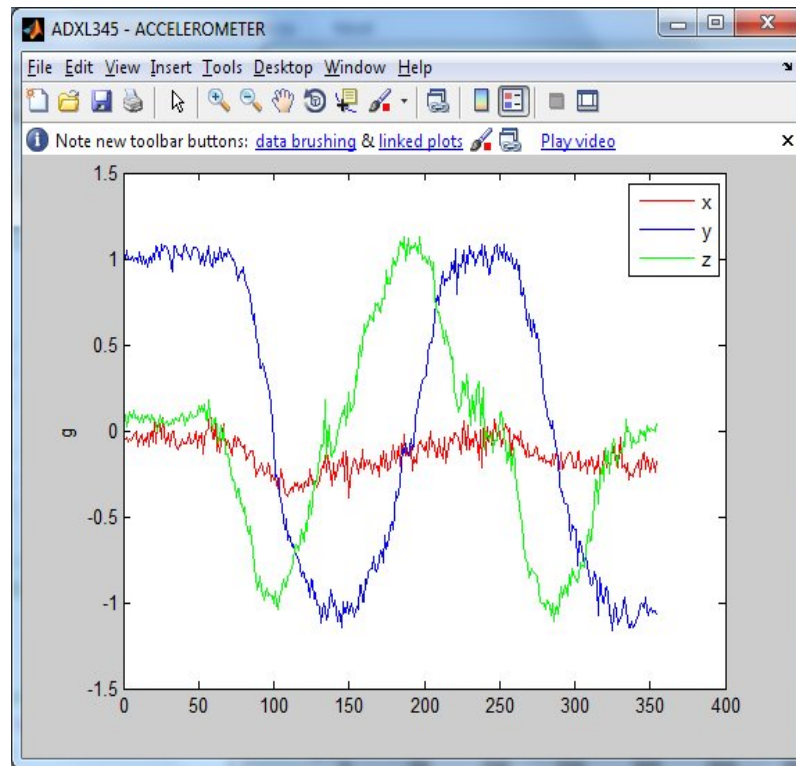
Első megközelítésben, a Matlab program segítségével törekedtem a megjelenítésre. Írtam egy Matlab kódot, ami a kapott fájlokból beolvassa az adatokat, és végrehajtja a normalizálásokat. Erre azért van szükség, mert a szenzorok a saját mértékegységben mérik az adatokat, a mozgáselemzést viszont mindhárom szenzor azonos együttes eredményeiből számíthatjuk, így viszont elengedhetetlen a szenzorok egymáshoz való kalibrálása. Ennek módszere a normalizálás. Miután megkaptam a használható értékeket, megjelenítettem szenzoronként a mért adatokat. Mivel a szenzorokat nem egy cég gyártotta, nem is törekedtek a közös tengelyek szerinti elhelyezésről. Ez külön probléma volt, hogy a három szenzor x y z tengelye ugyan abba az irányba mutasson. Ezért fölállítottam egy általam elképzelt tengelyrendszert, és a szenzorok tengelyeit ehhez állítottam. (10. ábra)



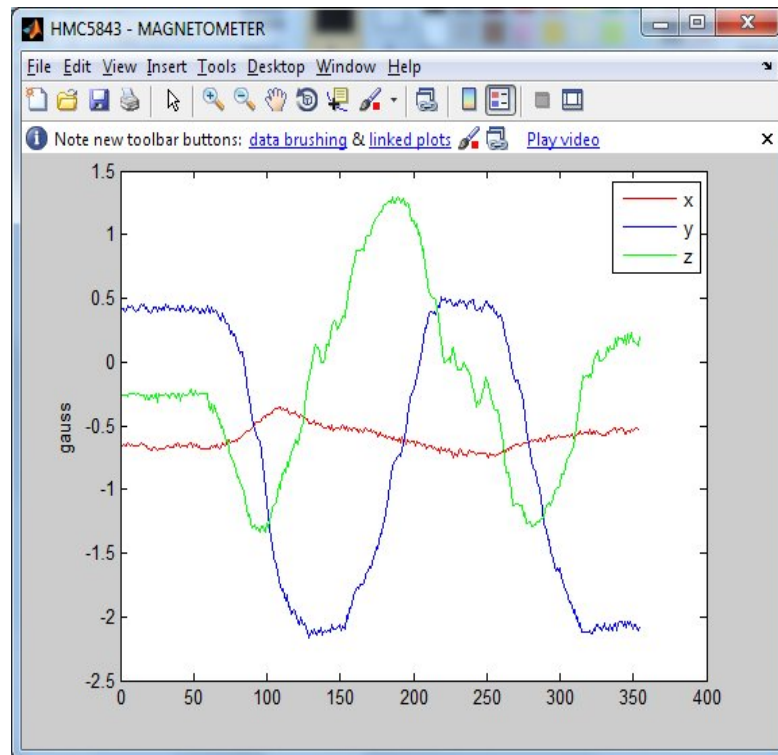
10. ábra - koordinátarendszer

Megvalósításban ez nem volt nehéz feladat, hiszen csak meg kellett cserélnem a tömbök sorrendjét a fájlbeolvasásnál.

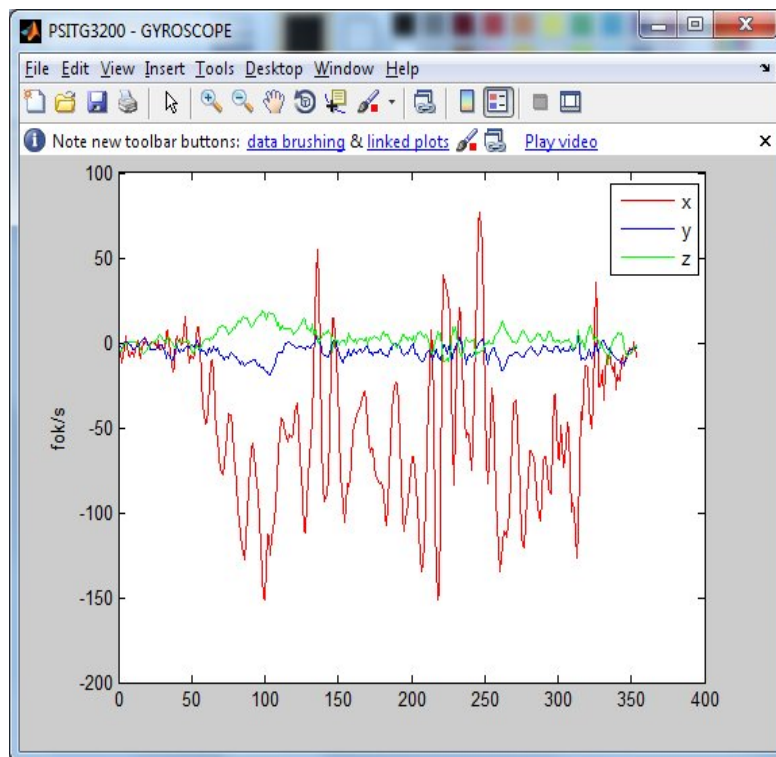
Miután megtörtént a tengelyek belövése jó irányba, elvégeztem különböző méréseket az ütő mozgásával x y z tengelyek mentén. Kiemeltem három mérést, amikor a teniszütőt a felállított x y z tengelyek mentén mozgattam. Ennek célja, hogy látható eredményt kapjak a tengelyek jó beállításáról és az értékek normalizált megjelenítéséről. A gyorsulásmérő diagramján látható volt, hogy az adott tengely körüli forgatásnál a tengely 0 közeli értéket mutatott, a másik két tengely pedig szinusz és koszinusz görbét rajzolt ki, hiszen forgás történik (11. ábra). A magnetométer rajza nagyon hasonlít a gyorsulásmérőhöz, hisz funkcióban is hasonló. Azért nem 0 körül mozog az adott tengely körüli érték, mivel a 0 akkor lenne, ha a föld mágneses északja felé nézne (12. ábra). Magyarország elhelyezkedése miatt, ez az érték kicsit nulla alatt van. A giroszkópnál viszont, ami szögsebességet mér, látható, hogy csak az adott tengely körüli értékek változtak, és a másik két tengely értékei közel 0 maradt. (13. ábra)



11. ábra - x tengely körüli forgatás - gyorsulásmérő



12. ábra - x tengely körüli forgatás - magnetométer



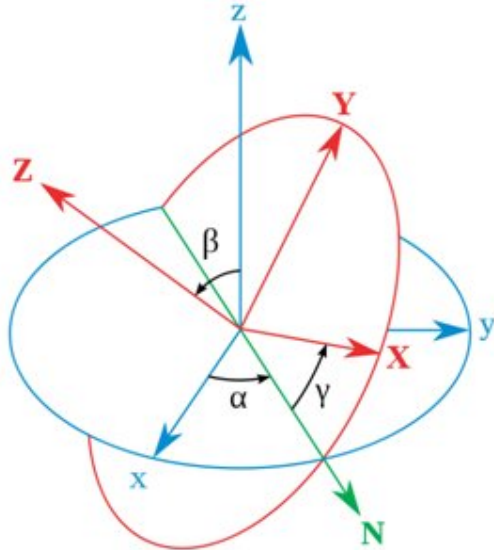
13. ábra - x tengely körüli forgatás - giroszkóp

A kirajzolás csak 2 dimenziós volt és tengelyenként külön szedve, így látható hogy az adott szenzorok jó mérési határon vannak beállítva, nincsenek túlvezérelve, emellett a normalizálások is helyesnek bizonyultak, mivel nincsenek méretbeli különbségek az eredmények között. A probléma, hogy így nem lehet jól ábrázolni a tényleges térbeni mozgást, nem látható a mozgás iránya. Miután mélyebben kutattam a témában, rájöttem, hogy ez forgási mátrix és az Euler-szögek nélkül nem lehet megjeleníteni.

9.1 Euler – szögek

Az Euler- szögek célja hogy leírja a merev testek helyzetét egy euklideszi térben rögzített háromdimenziós koordináta-rendszerhez képest. Egy objektum tetszőleges térbeli helyzetbe hozásához három egymást követő forgatásra van szükség, amelyet az Euler –szögek írnak le [13] [14].

A képen látható (14. ábra) rögzített koordináta- rendszert kis betűvel (x, y, z) jelölöm, az elforgatott koordináta-rendszert pedig nagy betűvel (X, Y, Z). Az xy és XY síkok metszéspontja az úgynevezett csomópont, jelölése N. Az Euler- szögek így definiálhatók (különböző konvenciók vannak, most a z-x-z konvenciót ismertetem):



14. ábra - Euler - szögek

- α (vagy φ) az x tengely és az N csomóvonal közötti szög.
- β (vagy θ) a z tengely és a Z tengely közötti szög.
- γ (vagy ψ) az X tengely és az N csomóvonal közötti szög.

Definiáljunk három közös origójú közbenső koordináta-rendszert, melyek mindegyike az előzőtől egy elemi forgatásban különbözik. Így minden véghelyzetet három egyszerű forgatással lehet előállítani: az első két forgatás meghatározza az új Z tengelyt, a harmadik forgatás pedig az összes lehetséges helyzetet megadja, melyet ez a Z tengely lehetővé tesz. Ezeket a koordináta-rendszereket a rögzített koordináta-rendszer, az elforgatott koordináta-rendszer és a csomóvonal segítségével lehet definiálni.

A végeredmény mátrixos alakját a három egyszerű forgatást megvalósító mátrix szorzataként kaphatjuk:

1. Egyenlet
$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ahol

- a bal oldali mátrix az eredeti rögzített koordináta-rendszer 'z' tengelye körüli forgást jelöli.
- a középső mátrix a közbenső 'x' tengely (ez a csomóvonal) körüli forgást jelöli.
- a jobb oldali mátrix a végső koordináta-rendszer 'Z' tengelye körüli forgást jelöli.

A mátrixszorzásokat végrehajtva (szinusz függvényeket s-el, koszinus függvényeket c-vel jelölöm):

$$\text{1.Egyenlet} \quad [R] = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\gamma - s_\alpha c_\beta s_\gamma & -c_\alpha s_\gamma - s_\alpha c_\beta c_\gamma & s_\beta s_\alpha \\ s_\alpha c_\gamma + c_\alpha c_\beta s_\gamma & -s_\alpha s_\gamma + c_\alpha c_\beta c_\gamma & -s_\beta c_\alpha \\ s_\beta s_\gamma & s_\beta c_\gamma & c_\beta \end{bmatrix}$$

Ez a kapcsolat a forgási mátrix és az Euler –szögek között. Ez a mátrix változik, ha más konvenciót adunk meg a szögek definiálásánál.

A cél az tehát, hogy egy kezdeti állapotot fölveszek egy x, y, z tengellyel, majd minden mérési eredmények segítségével kiszámítom a forgási mátrixot, és Euler –szögeket (pitch – hajlás/dőlés, roll - forgatás, yaw – oldal irányú elmozdulás). Ezek a szögek fogják megmondani, hogy milyen szöggel kell elforgatni az ütőt. Ezt végzem minden egyes mérési eredményre. A megjelenítés pedig úgy történik, hogy egy sima téglalapot, ami az ütőt szimbolizálja, mindig kirajzoltatok az x y z koordinátatengelyre. Ahogy a tengelyek elmozdulnak, úgy fog mozdulni vele a téglalap is, így látható lesz a mozgás, amit mértünk.

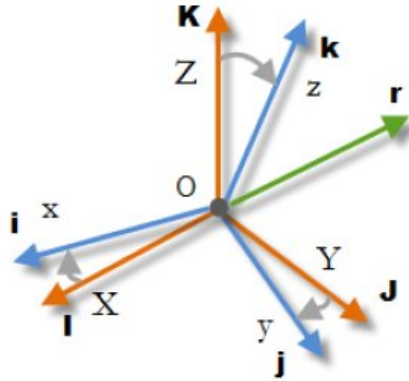
Az irodalomkutatásom során találtam nagyon sok hasonló megoldást, így azok segítségével létrehoztam a saját C++ kódot [9], amivel a mért adatok segítségével, különböző korrigálások, és javítások után, létrehozza a DCM mátrixot, és kiszámolja az Euler-szögeket. A program megértése céljából egyszerű fizikai és matematikai kifejezésekkel bemutatom a tengelyek transzformációit, és a transzformációs mátrix létrehozását 9 szabadsági fokkal általános esetben.

9.2 Transzformációs mátrix

*Jelölés: B felső/alsó index – test (Body) koordináta rendszer, G felső/alsó index – globális koordináta rendszer, A alsó index- gyorsulásmérő (Accelerometer), M alsó index – magnetométer, g alsó index – giroszkóp. Vektorokat félkövéren fogom jelölni. Például „**v**” egy vektor, míg „v” egy skalár.*

9.2.1 DCM Mátrix

[7] Általánosságban bázistranszformáció történik a test koordináta rendszere és a globális koordináta rendszer között. Definiáljuk a test koordinátarendszerét Oxyz névvel, és egy másikat, a globális koordináta rendszert, OXYZ.(14. ábra)



15. ábra - Definiált két koordinátarendszer

Mindkettőnek közös az origója. Defináljuk $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ egységvektort, ami egyirányú az x, y, z tengelyekkel. Ugyanígy az $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}$ egységvektort, ami az XYZ tengelyekkel egyirányú.

A definíció alapján, a globális koordináta vektorok $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}$ kifejezhetők így:

$$\mathbf{I}_G = \{1, 0, 0\}^T, \mathbf{J}_G = \{0, 1, 0\}^T, \mathbf{K}_G = \{0, 0, 1\}^T$$

Hasonlóan, a test koordináta vektorok $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ kifejezhetők így:

$$\mathbf{i}_B = \{1, 0, 0\}^T, \mathbf{j}_B = \{0, 1, 0\}^T, \mathbf{k}_B = \{0, 0, 1\}^T$$

Látható, hogy le tudjuk írni az $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ vektorokat a globális koordináta rendszerben. Vegyük az $\mathbf{i}$ koordinátát példaként, és írjuk le a globális koordinátáit:

$$\mathbf{i}^G = \{i_x^G, i_y^G, i_z^G\}^T$$

A példa alapján vizsgáljuk meg az X koordinátát i_x^G , kiszámítható, mint az $\mathbf{i}$ vektor az x tengelyre vett vetületének a hossza.

$$i_x^G = |\mathbf{i}| \cos(X, \mathbf{i}) = \cos(\mathbf{I}, \mathbf{i})$$

Ahol $|\mathbf{i}|$ az $\mathbf{i}$ egységvektor normája (hossza), $\cos(\mathbf{I}, \mathbf{i})$ pedig a $\mathbf{I}$ és $\mathbf{i}$ vektor közti szög koszinusza. Mivel $|\mathbf{i}| = 1$ és $|\mathbf{I}| = 1$ (egységvektorok), így írhatjuk a következőt:

$$i_x^G = \cos(\mathbf{I}, \mathbf{i}) = |\mathbf{I}| |\mathbf{i}| \cos(\mathbf{I}, \mathbf{i}) = \mathbf{I} \cdot \mathbf{i}$$

Ahol $\mathbf{I} \cdot \mathbf{i}$ skalárszorzata $\mathbf{I}$ és $\mathbf{i}$ vektoroknak. A skalár szorzat két vektora mindegy melyik rendszerben van, amíg mindkettő ugyan abban a koordináta rendszerben van, mivel a forgás nem módosítja a két vektor közötti szöget, így: $\mathbf{I} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{I}^B \cdot \mathbf{i}^B = \mathbf{I}^G \cdot \mathbf{i}^G = \cos(\mathbf{I}^B \cdot \mathbf{i}^B) = \cos(\mathbf{I}^G \cdot \mathbf{i}^G)$, tehát, ezentúl a felső indexeket el lehet hagyni, nem befolyásol semmit.

Hasonlóan:

$$i_y^G = \mathbf{J} \cdot \mathbf{i}$$

$$i_z^G = \mathbf{K} \cdot \mathbf{i}$$

Így már le tudjuk írni $\mathbf{i}$ vektort a globális koordináta rendszerben:

$$\mathbf{i}^G = \{\mathbf{I} \cdot \mathbf{i}, \mathbf{J} \cdot \mathbf{i}, \mathbf{K} \cdot \mathbf{i}\}^T$$

Továbbá:

$$\mathbf{j}^G = \{\mathbf{I} \cdot \mathbf{j}, \mathbf{J} \cdot \mathbf{j}, \mathbf{K} \cdot \mathbf{j}\}^T$$

$$\mathbf{k}^G = \{\mathbf{I.k}, \mathbf{J.k}, \mathbf{K.k}\}^T$$

A kapott adatokat egy mátrixba szervezzük, így meg is kapjuk a DCM mátrixot (Directional Cosine Matrix), más néven forgási mátrix:

$$\text{1.Egyenlet } [\mathbf{i}^G, \mathbf{j}^G, \mathbf{k}^G] = \begin{bmatrix} \mathbf{I.i} & \mathbf{I.j} & \mathbf{I.k} \\ \mathbf{J.i} & \mathbf{J.j} & \mathbf{J.k} \\ \mathbf{K.i} & \mathbf{K.j} & \mathbf{K.k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{I,i}) & \cos(\mathbf{I,j}) & \cos(\mathbf{I,k}) \\ \cos(\mathbf{J,i}) & \cos(\mathbf{J,j}) & \cos(\mathbf{J,k}) \\ \cos(\mathbf{K,i}) & \cos(\mathbf{K,j}) & \cos(\mathbf{K,k}) \end{bmatrix} = DCM^G$$

Észrevehető, hogy ha kicseréljük a két koordináta rendszer bázisvektorait, hasonló eredményt kapunk.

$$\mathbf{I}^B = \{\mathbf{I.i}, \mathbf{I.j}, \mathbf{I.k}\}^T, \mathbf{J}^B = \{\mathbf{J.i}, \mathbf{J.j}, \mathbf{J.k}\}^T, \mathbf{K}^B = \{\mathbf{K.i}, \mathbf{K.j}, \mathbf{K.k}\}^T$$

Mátrixba rendezve:

$$\text{2.Egyenlet } [\mathbf{I}^B, \mathbf{J}^B, \mathbf{K}^B] = \begin{bmatrix} \mathbf{I.i} & \mathbf{J.i} & \mathbf{K.i} \\ \mathbf{I.j} & \mathbf{J.j} & \mathbf{K.j} \\ \mathbf{I.k} & \mathbf{J.k} & \mathbf{K.k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{I,i}) & \cos(\mathbf{J,i}) & \cos(\mathbf{K,i}) \\ \cos(\mathbf{I,j}) & \cos(\mathbf{J,j}) & \cos(\mathbf{K,j}) \\ \cos(\mathbf{I,k}) & \cos(\mathbf{J,k}) & \cos(\mathbf{K,k}) \end{bmatrix} = DCM^B$$

Könnyen látható, hogy $DCM^B = (DCM^G)^T$ vagy $DCM^G = (DCM^B)^T$

$$DCM^B \cdot DCM^G = (DCM^G)^T \cdot DCM^G = DCM^G \cdot (DCM^B)^T = \mathbf{I}_3$$

Ahol $\mathbf{I}_3$ egy 3x3-as egységmátrix. Másrészt a DCM Mátrixok ortogonálisak.

A DCM mátrix nagyon fontos az orientációs kinematikában, mivel ez definiálja a forgást két relatív rendszer között. Emellett, ez alapján meg tudjuk állapítani a globális koordinátáit egy tetszőleges vektornak, ha tudjuk a hozzá tartozó koordinátákat a saját rendszerében (és vice versa).

Nézzünk rá egy példát:

$\mathbf{r}^B = \{r_x^B, r_y^B, r_z^B\}^T$ egy tetszőleges vektor a test koordinátáit ismerve. Határozzuk meg a globális koordinátáit, ha ismerjük a DCM^G .

$$\mathbf{r}^G = \{r_x^G, r_y^G, r_z^G\}^T$$

Elemezzük az első koordinátát, az r_x^G -t.

$r_x^G = |\mathbf{r}^G| \cos(\mathbf{I}^G, \mathbf{r}^G)$, mert r_x^G az $\mathbf{r}^G$ vetülete az x tengelyre, ami egy irányú az $\mathbf{I}^G$ -vel.

vektort ugyan azzal a forgással fordítottunk el, ugyanígy, a normája és a vektor hossza sem fog változni.

$|\mathbf{r}^G| = |\mathbf{r}^B|$, $|\mathbf{I}^G| = |\mathbf{I}^B| = 1$ és $\cos(\mathbf{I}^G, \mathbf{r}^G) = \cos(\mathbf{I}^B, \mathbf{r}^B)$ tehát írhatjuk azt, hogy:

$$r_x^G = |\mathbf{r}^G| \cos(\mathbf{I}^G, \mathbf{r}^G) = |\mathbf{I}^B| |\mathbf{r}^B| \cos(\mathbf{I}^B, \mathbf{r}^B) = \mathbf{I}^B \cdot \mathbf{r}^B = \mathbf{I}^B \cdot \{r_x^B, r_y^B, r_z^B\}^T, \text{ használva a két}$$

skalár szorzat két definícióját.

Mivel $\mathbf{I}^B = \{\mathbf{I.i}, \mathbf{I.j}, \mathbf{I.k}\}^T$, ezért:

3.Egyenlet $r_x^G = \mathbf{I}^B \cdot \mathbf{r}^B = \{\mathbf{I} \cdot \mathbf{i}, \mathbf{I} \cdot \mathbf{j}, \mathbf{I} \cdot \mathbf{k}\}^T \cdot \{r_x^B, r_y^B, r_z^B\}^T = r_x^B \mathbf{I} \cdot \mathbf{i} + r_y^B \mathbf{I} \cdot \mathbf{j} + r_z^B \mathbf{I} \cdot \mathbf{k}$

Hasonlóan a másik két koordinátára:

4.Egyenlet $r_y^G = r_x^B \mathbf{J} \cdot \mathbf{i} + r_y^B \mathbf{J} \cdot \mathbf{j} + r_z^B \mathbf{J} \cdot \mathbf{k}$

5.Egyenlet $r_z^G = r_x^B \mathbf{K} \cdot \mathbf{i} + r_y^B \mathbf{K} \cdot \mathbf{j} + r_z^B \mathbf{K} \cdot \mathbf{k}$

Ezt mátrixba rendezve:

5.Egyenlet $\mathbf{r}^G = \begin{bmatrix} r_x^G \\ r_y^G \\ r_z^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{I} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{I} \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{J} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{J} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{J} \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{K} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{K} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{K} \cdot \mathbf{k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x^B \\ r_y^B \\ r_z^B \end{bmatrix} = DCM^G \mathbf{r}^B$

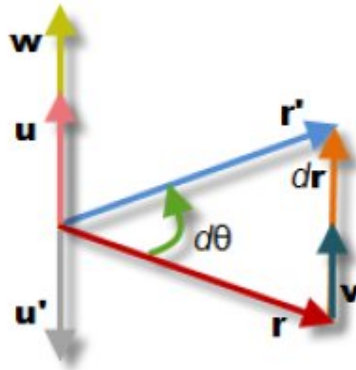
Így lehetséges egy tetszőleges vektort másik rendszerbe transzformálni a DCM mátrix segítségével.

Hasonlóan:

6.Egyenlet $\mathbf{r}^B = DCM^B \mathbf{r}^G$

9.2.2 Szögsebesség

Ebben a fejezetben, analizáljuk a forgatást az idő függvényében, ami segít megalapozni a DCM mátrix frissítésének szabályait. Ez a szögsebesség. Legyen egy tetszőleges forgási vektor $\mathbf{r}$ és definiáljuk a koordinátáit az időben $\mathbf{r}(t)$. (15. ábra) Használjuk a következő jelöléseket: kis idő intervallum dt , $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, $\mathbf{r}' = \mathbf{r}(t+dt)$, $d\mathbf{r} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}$:



16. ábra - vektorok elhelyezkedése

Jegyezzük meg, hogy egy kis időintervallum alatt, $dt \rightarrow 0$, az $\mathbf{r}$ vektor az $\mathbf{u}$ egységvektor tengelye körül elfordul a $d\varphi$ szöggel, és végződik $\mathbf{r}'$ pozícióban. Mivel $\mathbf{u}$ a mi forgási tengelyünk merőleges a forgatott síkra ($\mathbf{r}$ és $\mathbf{r}'$ által kifeszített sík), tehát $\mathbf{u}$ ortogonális $\mathbf{r}$ -re és $\mathbf{r}'$ -re is. Két egységvektor $\mathbf{u}$ és $\mathbf{u}'$ is ortogonális $\mathbf{r}$ és $\mathbf{r}'$ által kifeszített síkra a keresztszorzat miatt, viszont jobbkezes koordináta-rendszer szabályt alkalmazva $\mathbf{u}$ egységvektor lesz a mi irányunk.

7.Egyenlet
$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} \times \mathbf{r}'|} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{r}'}{|\mathbf{r}||\mathbf{r}'| \sin(d\theta)} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{r}'}{|\mathbf{r}|^2 \sin(d\theta)}$$

Mivel a forgás nem módosítja a vektor hosszát így $|\mathbf{r}'| = |\mathbf{r}|$.

A vektor egyenes vonalú egyenletes sebességét (lineáris sebességét) definiáljuk, mint vektor:

8.Egyenlet
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{(\mathbf{r}' - \mathbf{r})}{dt}$$

Mivel dt közelít 0-hoz, tehát $dt \rightarrow 0$, így az $\mathbf{r}$ és $d\mathbf{r}$ közötti szög (hívjuk α -nak) egy egyenlő szárú háromszöget alkot $\mathbf{r}$ el és $\mathbf{r}'$ -vel:

9.Egyenlet
$$\alpha = \frac{\pi - d\theta}{2}$$

És mivel $d\varphi \rightarrow 0$, így $\alpha \rightarrow \pi/2$

Ebből következik, hogy $\mathbf{r}$ merőleges $d\mathbf{r}$ -re mikor $dt \rightarrow 0$, és ezért $\mathbf{r}$ merőleges $\mathbf{v}$ -re, mivel $\mathbf{v}$ és $d\mathbf{r}$ egyirányú.

10.Egyenlet
$$\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$$

Ezekkel az ismeretekkel már definiálhatjuk a szögsebességet. Alapvetően egy vektornak a változását meg lehet határozni a szögből, és a fordulás tengelyéből, tehát:

11.Egyenlet
$$\mathbf{w} = \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \mathbf{u}$$

Valójában $\mathbf{w}$ normája $|\mathbf{w}| = (d\varphi/dt)$ és $\mathbf{w}$ iránya egybeesik a forgási tengellyel, $\mathbf{u}$ -val. Az előző egyenleteket felhasználva, nézzük meg milyen kapcsolat van az egyenes vonalú egyenletes sebességgel $\mathbf{v}$ -vel:

12.Egyenlet $\mathbf{w} = \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \mathbf{u} = \left(\frac{d\theta}{dt}\right) (\mathbf{r} \times \mathbf{r}') / (|\mathbf{r}|^2 \sin(d\theta))$

Mivel $dt \rightarrow 0$, így $d\theta \rightarrow 0$ és ezért kicsi $d\theta$ esetén, $\sin(d\theta) \approx d\theta$. Ezeket figyelembe véve ezt kapjuk:

13.Egyenlet $\mathbf{w} = \frac{(\mathbf{r} \times \mathbf{r}')}{(|\mathbf{r}|^2 dt)}$

Most, mivel $\mathbf{r}' = \mathbf{r} + d\mathbf{r}$, $d\mathbf{r}/dt = \mathbf{v}$, $\mathbf{r} \times \mathbf{r} = 0$ és a keresztszorzat disztributivitását kihasználva:

14.Egyenlet $\mathbf{w} = \frac{(\mathbf{r} \times (\mathbf{r} + d\mathbf{r}))}{|\mathbf{r}|^2 dt} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{r} + \mathbf{r} \times d\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2 dt} = \mathbf{r} \times \frac{(d\mathbf{r})}{|\mathbf{r}|^2 dt}$

Végül:

15.Egyenlet $\mathbf{w} = \mathbf{r} \times \mathbf{v} / |\mathbf{r}|^2$

Ez az egyenlet mutatja meg, hogyan számítható ki a szögsebesség, ha ismert a lineáris sebesség $\mathbf{v}$.

Könnyen be lehet bizonyítani az egyenletet visszafelé:

16.Egyenlet $\mathbf{v} = \mathbf{w} \times \mathbf{r}$

Ez könnyen belátható a $\mathbf{w} = \mathbf{r} \times \mathbf{v} / |\mathbf{r}|^2$ a hármas szorzási szabályt használva $(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c} = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})\mathbf{a}$.

Kihasználjuk azt a tényt, hogy $\mathbf{v}$ és $\mathbf{r}$ merőleges egymásra, tehát $\mathbf{v} \cdot \mathbf{r} = 0$

17.Egyenlet $\mathbf{w} \times \mathbf{r} = \left(\mathbf{r} \times \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{r}|^2}\right) \times \mathbf{r} = (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \times \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} = \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})\mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} = (|\mathbf{r}|^2 \mathbf{v} + 0) / |\mathbf{r}|^2 = \mathbf{v}$

Ezzel be is bizonyítottuk, hogy a $\mathbf{v} = \mathbf{w} \times \mathbf{r}$ igaz. A képen ez látszik is, mivel $\mathbf{v}$ irányát a $\mathbf{w} \times \mathbf{r}$ kereszt szorzatból kaptuk és a jobb kéz szabályt használjuk, tehát $\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$ és $\mathbf{v} \perp \mathbf{w}$, mert egy síkban van $\mathbf{r}$ -el és $\mathbf{r}'$ -vel.

9.2.3 A giroszkóp és a szögsebesség kapcsolata

A 3 tengelyű MEMS giroszkóp az a műszer, ami érzékeli a forgást 3 tengelyen a saját koordináta-rendszerében. Ha ehhez hozzávesszük a globális – pl. a föld – koordináta-rendszerét, például $\mathbf{K}$ vektor mutat a zenithbe, vagy az $\mathbf{I}$ vektor Északra mutat – akkor egy megfigyelőnek látszik, hogy a készülék belsejében ezek a vektorok forognak a szenzor középpontja körül. Legyen W_x , W_y , W_z a giroszkóp mért adatai rad/s - ban (a mért forgások az x, y, z tengelyek körül).

Ha kicsi az időintervallum dt , akkor a giroszkóp kimenete megmutatja nekünk, hogy az adott idő alatt mennyit forgott a föld a giroszkóp x tengelye körül $d\alpha_x = w_x dt$ szögben, az y tengelye körül $d\alpha_y = w_y dt$ szögben és a z tengelye körül $d\alpha_z = w_z dt$ szögben. Ezeket a forgásokat karakterizálni lehet a szögsebesség vektorokkal: $\mathbf{w}_x = w_x \mathbf{i} = \{w_x, 0, 0\}^T$, $\mathbf{w}_y = w_y \mathbf{j} = \{0, w_y, 0\}^T$, $\mathbf{w}_z = w_z \mathbf{k} = \{0, 0, w_z\}^T$, ahol $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ a lokális koordináta-rendszer bázisvektorai (egyirányúak a test x, y, z koordinátaival). Ezek a forgások lineáris elmozdulást eredményeznek, amit a $\mathbf{v} = \mathbf{w} \times \mathbf{r}$ egyenletből kifejezhetünk:

$$d\mathbf{r}_1 = dt \mathbf{v}_1 = dt(\mathbf{w}_x \times \mathbf{r}) ; d\mathbf{r}_2 = dt \mathbf{v}_2 = dt(\mathbf{w}_y \times \mathbf{r}) ; d\mathbf{r}_3 = dt \mathbf{v}_3 = dt(\mathbf{w}_z \times \mathbf{r}).$$

A kombinált hatás a három elmozdulásból:

18.Egyenlet

$$d\mathbf{r} = d\mathbf{r}_1 + d\mathbf{r}_2 + d\mathbf{r}_3 = dt(\mathbf{w}_x \times \mathbf{r} + \mathbf{w}_y \times \mathbf{r} + \mathbf{w}_z \times \mathbf{r}) = dt(\mathbf{w}_x + \mathbf{w}_y + \mathbf{w}_z) \times \mathbf{r}$$

(a keresztszorzat disztributív szabálya miatt)

Ebből a 3 transzformációból kifejezhető a lineáris sebesség:

19.Egyenlet

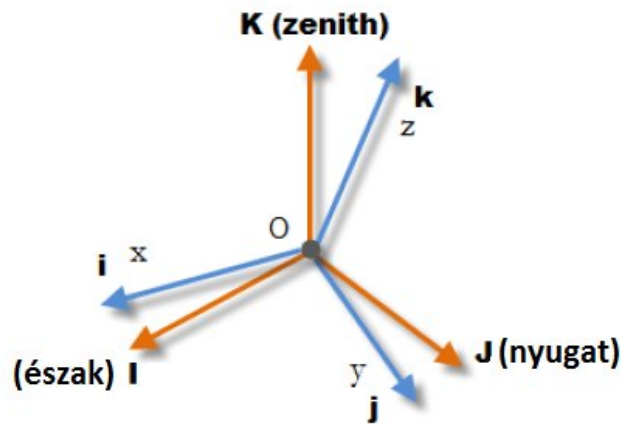
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = (\mathbf{w}_x + \mathbf{w}_y + \mathbf{w}_z) \times \mathbf{r} = \mathbf{w} \times \mathbf{r}$$

Ahol $\mathbf{w} = \mathbf{w}_x + \mathbf{w}_y + \mathbf{w}_z = \{w_x, w_y, w_z\}$.

Fontos megjegyezni, hogy ezek az egyenletek és kifejezések csak nagyon kicsi időintervallumon érvényesek. Kicsi dt -hez, kis $d\alpha$ és a lineáris elmozdulás $d\mathbf{r}$ is nagyon kicsi. Gyakorlatban ez azt jelenti, hogy ha nagy az időintervallum, akkor hibák keletkeznek, amiket korrigálni kell (erre az algoritmus megalkotásánál kitérünk). Tehát w_x , w_y , w_z a giroszkóp kimenete, és eljutottunk arra következtetésre, hogy a 3 tengelyes giroszkóp megmutatja a föld szögsebességét a szenzor középpontja körül.

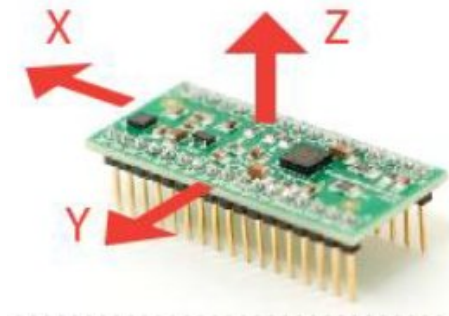
9.2.4 Algoritmus

Legyen a jobbkezes globális koordinárendszer a föld rendszere, tehát **I** bázisvektor mutasson Észak felé, **K** mutasson a Zenith (tetőpont) felé, és mivel ez a két vektor fixált, a harmadik **J** bázisvektor Nyugat felé mutat. (16. ábra)



17. ábra - a globális és a test koordinárendszer

Emellé vegyük föl a szenzor koordináta rendszerét, például egy gyorsulásmérőt véve alapul. (17. ábra)



18. ábra - gyorsulásmérőre felállított koordinárendszer

Gyorsulásmérő méri a gravitációt. A gravitációs vektor a föld középpontja felé mutat, tehát ellentétes irányú a $\mathbf{K}^B$ vektorral. Ha a gyorsulásmérő 3 tengelyű mért eredménye $\mathbf{A} = \{A_x, A_y, A_z\}$, akkor, ha nem mozog a szenzor, akkor nyugalmi helyzetben a gravitációs erőt méri. Tehát $\mathbf{K}^B = -\mathbf{A}$.

Magnetométer hasonlóan mér a gyorsulásmérőhöz, csak itt a gravitáció helyett a föld mágneses északi pontját mutatja nyugalmi helyzetben. $\mathbf{M}=\{M_x, M_y, M_z\}$ a 3 tengelyű magnetométer mért eredménye, észak felé mutat, tehát $\mathbf{I}^B=\mathbf{M}$.

Tudjuk $\mathbf{I}^B$ és $\mathbf{K}^B$ -t, így ki tudjuk fejezni $\mathbf{J}^B = \mathbf{K}^B \times \mathbf{I}^B$. Így csak a gyorsulásmérő és magnetométer elég lenne, hogy létrehozzuk a DCM mátrixot, viszont a giroszkóp sokkal precízebb mint a gyorsulásmérő vagy a magnetométer, ezért hozzávesszük a giroszkóp mérési eredményeit is.

A Giroszkóp nem tudja mérni az abszolút irányokat, tehát nem tudja, merre van észak vagy a zenith, viszont képes a test elmozdulását t időben mérni, kifejezve a forgási mátrixszal $DCM(t)$. Még pontosabb elmozdulást a $DCM(t+dt)$ vel tudjuk mérni.

((A 3 szenzor (gyorsulásmérő, magnetométer, giroszkóp) segítségével meg tudjuk becsülni az eszköz elhelyezkedését a térben.))

Tehát nézzük az algoritmust:

A föld bázisvektoraiból képzett DCM mátrixszal fogunk dolgozni.

20.Egyenlet

$$DCM^G = [i^G, j^G, k^G] = \begin{bmatrix} I.i & I.j & I.k \\ J.i & J.j & J.k \\ K.i & K.j & K.k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(I,i) & \cos(I,j) & \cos(I,k) \\ \cos(J,i) & \cos(J,j) & \cos(J,k) \\ \cos(K,i) & \cos(K,j) & \cos(K,k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I^{BT} \\ J^{BT} \\ K^{BT} \end{bmatrix}$$

Ha megnézzük a DCM^G sorait, megkapjuk az $\mathbf{I}^B, \mathbf{J}^B, \mathbf{K}^B$ vektorokat. A $\mathbf{K}^B$ és az $\mathbf{I}^B$ vektorokat közvetlenül a gyorsulásmérő és a magnetométer segítségével meg tudjuk becsülni, és a $\mathbf{J}^B$ vektort pedig a keresztszorzat segítségével tudjuk megkapni $\mathbf{J}^B = \mathbf{K}^B \times \mathbf{I}^B$, mivel a másik két vektor ortogonális.

t_0 időben kifejezhető a zenith koordinátája a test rendszerében, nevezzük el $\mathbf{K}^B_0$. A giroszkóp által mért szögsebesség $\mathbf{w}=\{w_x, w_y, w_z\}$. Giroszkópot használva, szeretnénk megtudni a zenith vektorunk pozícióját kis idő elteltével $\mathbf{K}^B_{1G}$:

21.Egyenlet $\mathbf{K}^B_{1G} \approx \mathbf{K}^B_0 + dt \mathbf{v} = \mathbf{K}^B_0 + dt(\mathbf{w}_g \times \mathbf{K}^B_0) = \mathbf{K}^B_0 + (d\Theta_g \times \mathbf{K}^B_0)$

Ahol $d\Theta_g=dt \mathbf{w}_g$. Mert a szöggyorsulást a giroszkóp méri. $d\Theta_g$ a szögmozdulás. Fontos megjegyezni, hogy ezek az egyenletek, csak akkor érvényesek, ha az idő egy kis periódusáról van szó, és az elmozdulás is kicsi.

Másik megoldás, hogy megkapjuk a $\mathbf{K}^B$ -t úgy, hogy a gyorsulásmérőnek még egy mérési adatát vizsgáljuk, és ebből számoljuk ki $\mathbf{K}^B_{1A}$. Gyakorlatban ez a két érték, $\mathbf{K}^B_{1G}$ és $\mathbf{K}^B_{1A}$ eltér egymástól.

Most visszafelé, fejezzük ki a szöggyorsulást $\mathbf{w}_a$ vagy a szög elmozdulást $d\theta_a = dt \mathbf{w}_a$ az új gyorsulásmérő adatával $\mathbf{K}_{1A}^B$.

$$\text{22.Egyenlet} \quad \mathbf{w}_a = \mathbf{K}_0^B \times \mathbf{v}_a / |\mathbf{K}_0^B|^2$$

Most $\mathbf{v}_a = (\mathbf{K}_{1A}^B - \mathbf{K}_0^B) / dt$, egyenes vonalú egyenletes sebessége a $\mathbf{K}_0^B$ vektornak, és $|\mathbf{K}_0^B|^2 = 1$, mivel $\mathbf{K}_0^B$ egységvektor.

$$\text{23.Egyenlet} \quad d\theta_a = dt \mathbf{w}_a = \mathbf{K}_0^B \times (\mathbf{K}_{1A}^B - \mathbf{K}_0^B)$$

Kiszámítjuk mindkét módon a $\mathbf{K}_{1A}^B$ -et $\mathbf{K}_{1A}^B$ és $\mathbf{K}_{1G}^B$ -ből, első becslésre $d\theta$, mint súlyozott átlaga a $d\theta_a$ és $d\theta_g$.

$$\text{24.Egyenlet} \quad d\theta = (s_a d\theta_a + s_g d\theta_g) / (s_a + s_g)$$

$\mathbf{K}_1^B$ hasonlóan számolható, mint $\mathbf{K}_{1G}^B$:

$$\text{25.Egyenlet} \quad \mathbf{K}_1^B \approx \mathbf{K}_0^B + (d\theta \times \mathbf{K}_0^B)$$

Ugyanígy tudjuk kiszámolni a többi koordinátát is:

$$\text{26.Egyenlet} \quad \mathbf{I}_1^B \approx \mathbf{I}_0^B + (d\theta \times \mathbf{I}_0^B)$$

$$\text{27.Egyenlet} \quad \mathbf{J}_1^B \approx \mathbf{J}_0^B + (d\theta \times \mathbf{J}_0^B)$$

Dióhéjban így lehet megállapítani a DCM₁ Mátrixot t_1 időben az előző számított DCM₀ mátrix t_0 időből. Itt még nem tettünk említést a magnetométerről. Vegyük bele ezt is. A módszer nagyon hasonlít a gyorsulásmérőhöz, az egyetlen különbség hogy nem a $\mathbf{K}^B$ vektorral dolgozunk, ami a zenith irányába néz, hanem az $\mathbf{I}^B$ vektorral, ami Észak felé mutat. Az előző logikát követve:

$$\text{28.Egyenlet} \quad d\theta_m = dt \mathbf{w}_m = \mathbf{I}_0^B \times (\mathbf{I}_{1M}^B - \mathbf{I}_0^B)$$

Vegyük bele a súlyozott átlagba ezt a számított eredményt is:

$$\text{29.Egyenlet} \quad d\theta = (s_a d\theta_a + s_g d\theta_g + s_m d\theta_m) / (s_a + s_g + s_m)$$

Összegezve, eddig ugyan azon az úton ki számítottuk a frissített DCM₁ Mátrixot

30.Egyenlet $I_1^B \approx I_0^B + (d\theta \times I_0^B)$

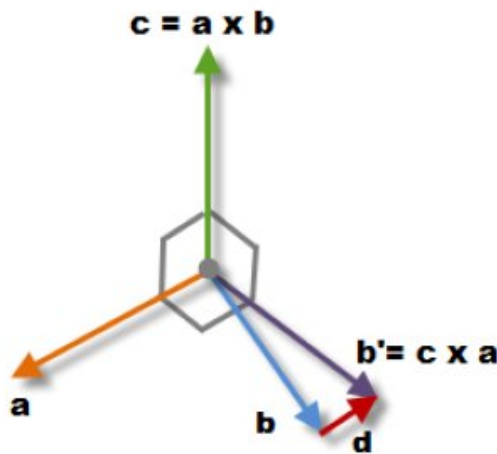
31.Egyenlet $J_1^B \approx J_0^B + (d\theta \times J_0^B)$

32.Egyenlet $K_1^B \approx K_0^B + (d\theta \times K_0^B)$

Gyakorlatban kiszámoljuk kereszt szorzattal a harmadik vektort $J_1^B = K_1^B \times I_1^B$, miután korrigáltuk K_1^B és I_1^B , hogy újra merőlegesek legyenek. Hozzá kell tenni, hogy kicsi dt mellett számolunk, viszont ha nagyobb a dt, nagyobb az eltérés, a hiba is.

Ha az I_0^B , J_0^B , K_0^B vektorformáció érvényes DCM mátrixot ad, és ezek ortogonálisak egymásra, és egységvektorok, ugyanez nem mondható el a I_1^B , J_1^B , K_1^B számított vektorokra, mivel semmi nem garantálja hogy ezek is ortogonálisak lesznek, igaz mivel kis dt-vel dolgoztunk a hiba is kicsit, viszont ezt minden iteráció után korrigálni kell.

Először nézzük meg, hogyan lehet két vektorról biztosítani, hogy újra ortogonálisak legyenek. Vegyünk két egységvektort $\mathbf{a}$ -t és $\mathbf{b}$ -t, amik majdnem ortogonálisak, tehát a két vektor által bezárt szög közel 90°, de nem pontosan 90°. keressük $\mathbf{b}'$ ami ortogonális $\mathbf{a}$ -ra és $\mathbf{a}$ és $\mathbf{b}$ által kifeszített síkban van. Először keressük meg $\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$ a kereszt szorzat szabálya miatt, ez ortogonális $\mathbf{a}$ -ra és $\mathbf{b}$ -re egyaránt, és ezért merőleges $\mathbf{a}$ $\mathbf{b}$ síkjára. Ezután, $\mathbf{b}' = \mathbf{c} \times \mathbf{a}$ kiszámítjuk $\mathbf{c}$ és $\mathbf{a}$ keresztszorzatából. Ugyanígy a keresztszorzat definíciójából következik, hogy $\mathbf{b}'$ ortogonális $\mathbf{a}$ -ra és ortogonális $\mathbf{c}$ -re. Ezért $\mathbf{b}'$ a javított vektor amit mi keresünk, ami ortogonális $\mathbf{a}$ -ra és az $\mathbf{a}$ és $\mathbf{b}$ síkjában helyezkedik el. (18. ábra)



19. ábra - hiba korrekció

A hármas skalár szorzás szabályát használva:

3 eset lehetséges:

1. **a** vektor fix, **b** korrigált:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = |\mathbf{a}|^2 = 1$$

33.Egyenlet

$$\mathbf{b}' = \mathbf{c} \times \mathbf{a} = (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{a} = -\mathbf{a} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) + \mathbf{b} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}) = \mathbf{b} - \mathbf{a} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) = \mathbf{b} + \mathbf{d}$$

Ahol $\mathbf{d} = -\mathbf{a} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$

Látható, úgy korrigáltuk $\mathbf{b}'$ -t, hogy a **b** vektorhoz hozzáadtuk a korrigáló **d** vektort. **d** párhuzamos **a**-val, iránya pedig függ az **a** és **b** közti szögtől. Például ha $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \cos(\mathbf{a}, \mathbf{b}) > 0$, az **a** és **b** közötti szög kisebb mint 90° , akkor a **d** ellentétes irányú **a**-val, nagysága pedig $\cos(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sin(\mathbf{b}, \mathbf{b}')$.

2. **b** vektor fix, **a** vektor korrigált:

34.Egyenlet $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{b}(\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}) = \mathbf{a} - \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) = \mathbf{a} + \mathbf{e}$

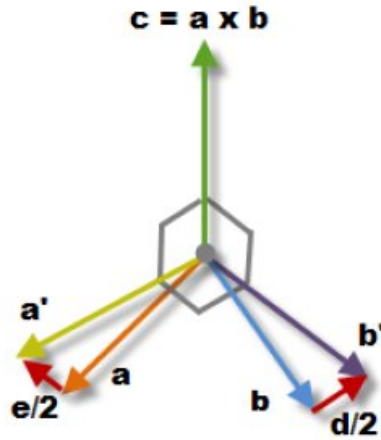
Ahol $\mathbf{e} = -\mathbf{b} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$.

3. **a** és **b** is korrigált (19. ábra) :

Ilyenkor az első és második esetet használjuk, mindkettőt megfelezzük, így kapjuk a legközelebbi becslést, amivel tudunk korrigálni.

35.Egyenlet $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})/2$

36.Egyenlet $\mathbf{b}' = \mathbf{b} - \mathbf{a}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})/2$



20. ábra – 3. eset korrigálása

Tehát a hiba:

37.Egyenlet $Err = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})/2$

38.Egyenlet $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - Err * \mathbf{b}$

39.Egyenlet $\mathbf{b}' = \mathbf{b} - Err * \mathbf{a}$

Ezzel még nem bizonyítottuk, hogy $\mathbf{a}'$ és $\mathbf{b}'$ ortogonálisak a 3. esetben, viszont látható hogy közel 90° lesz a szög $\mathbf{a}'$ és $\mathbf{b}'$ között a korrekció után.

Visszatérve a frissített DCM mátrixunkra, ami 3 vektorból $\mathbf{I}_1^B$, $\mathbf{J}_1^B$, $\mathbf{K}_1^B$ áll. A fent leírt korrekció segítségével a ciklus minden lépésénél el kell végezni ezeket a lépéseket:

40.Egyenlet $Err = (\mathbf{I}_1^B \cdot \mathbf{J}_1^B)/2$

41.Egyenlet $\mathbf{I}_1^{B'} = \mathbf{I}_1^B - Err * \mathbf{J}_1^B$

42.Egyenlet $\mathbf{J}_1^{B'} = \mathbf{J}_1^B - Err * \mathbf{I}_1^B$

43.Egyenlet $\mathbf{I}_1^{B''} = \text{Normalize}[\mathbf{I}_1^{B'}]$

44.Egyenlet $\mathbf{J}_1^{B''} = \text{Normalize}[\mathbf{J}_1^{B'}]$

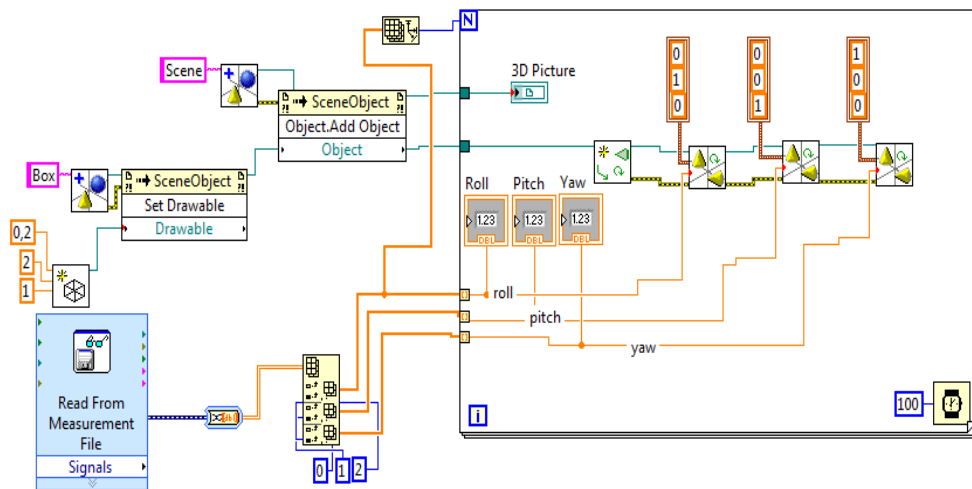
45.Egyenlet $\mathbf{K}_1^{B''} = \mathbf{I}_1^{B''} \times \mathbf{J}_1^{B''}$

Ahol $\text{Normalize}[\mathbf{a}] = \mathbf{a} / |\mathbf{a}|$, az $\mathbf{a}$ vektor normalizálása.

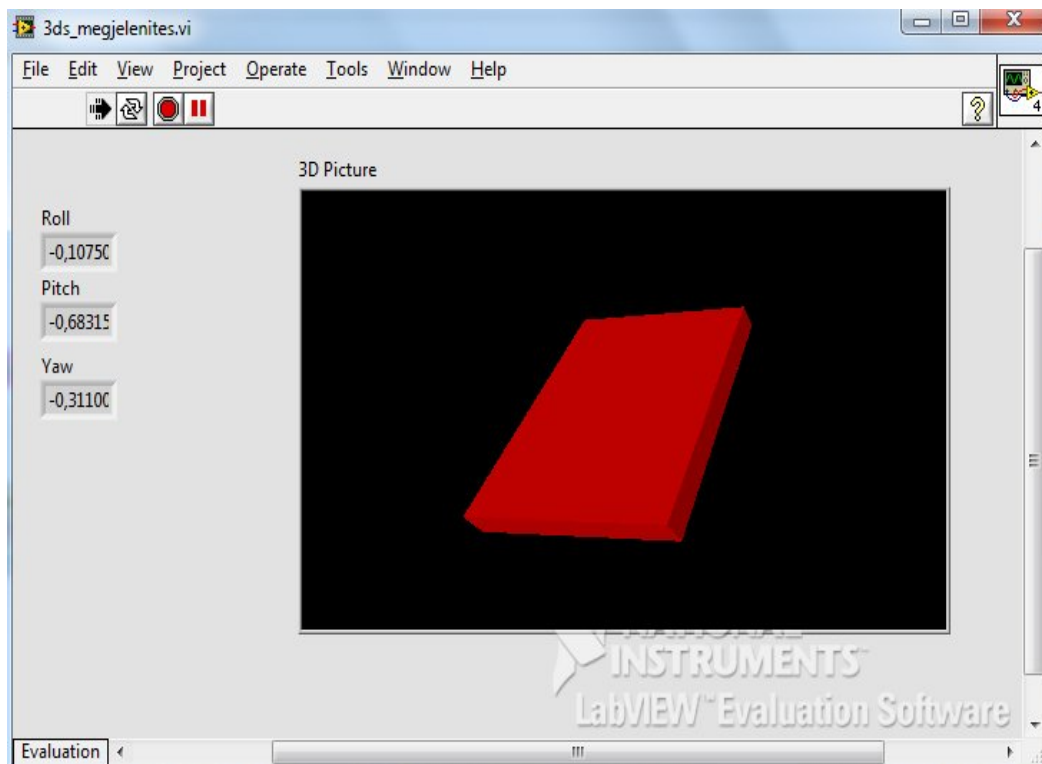
Tehát végül így kapjuk meg a DCM₁ mátrixot a $\mathbf{I}_1^{B''}$, $\mathbf{J}_1^{B''}$, $\mathbf{K}_1^{B''}$ vektorokból, amik ortonormáltak.

A mellékletben megtalálható forráskód, az előbb látható gondolatmenet alapján számítja ki a forgási mátrixot, és az euler szögeket.

A háromdimenziós megjelenítést a LabVIEW program segítségével végeztem. A C++ kód segítségével megkapott 3 szöget mérésenként (roll, pitch, yaw) egy fájlba mentettem. Különböző fájlkonverziók után, olyan fájlformátumot alakítottam ki, amit be tudtam olvasni a LabVIEW-al. A képen (20. ábra) látható a program blokk diagramja. Read From Measurement File felel a szögeket tartalmazó forráskód beolvasásért, ennek kimenete egy kétdimenziós tömb. A tömböt 3 oszlopra szedtem, hogy elkülönítsem a 3 különböző szöget. Egy forciklus segítségével megyek végig a 3 tömb minden elemén és a forgási függvényekkel kirajzoltatom egy piros téglalapot, ami az ütőt szimbolizálja. A SceneObject függvény felel a háromdimenziós kirajzoltatásért. A jobb szemléltetés miatt, egy 100 ms – es várakozási időt adtam a forciklusnak minden iteráció között.



21. ábra - LabVIEW Blokkdiagram



22. ábra - LabVIEW Frontpanel

10 Értékelés, Eredmények

A szakirodalom kiterjedt vizsgálata eredményeként a dolgozatban bemutatásra került a teniszezők leggyakoribb mozgástípusai, és az általános fizikai összefüggések, amik a mozgás meghatározásában szerepet játszanak. Kitekintést tettem a MEMS érzékelők felépítésére és felhasználásának fontosságára a mai világban. Ismertettem a szenzorok működését, és felvázoltam a mások által készített hasonló mozgáselemzési rendszereket.

A dolgozatomban ismertetésre került az ütő mozgásának ábrázolása. Ennek háttéréként bemutattam a mozgáshoz tartozó fizikai összefüggéseket. Az ábrázolás megvalósítása céljából LabVIEW programkód elkészítése is látható. A teniszütőn elhelyezett szenzor által mért adatok feldolgozására egy java kód készült a nyers adat feldolgozására, és egy C++ program a szögek kiszámítására, ami alapján lehetett a háromdimenziós ábrázolást megvalósítani. A megvalósított képi reprezentálás nem tükrözi kellőképpen az ütő mozgását, így további mérésekre, pontosításokra, akár új megoldásra szükség van. Fontos mérőkövető a végső mozgáselemzésben, a merev testek mozgására vonatkozó fizikai leírás, ami szintén bemutatásra került a dolgozatban. Későbbiekben, több irányban lehet javítani, fejleszteni a rendszert. A Továbbfejlesztés fejezetben az esetek részletesebb leírása látható.

A dolgozat elért eredményei:

- Célzott irodalomkutatás eredményeként a dolgozat ismerteti a MEMS érzékelők és a szenzorok felépítését, működését és fizikai hátterét, valamint a teniszező leggyakoribb mozgásait.
- Bemutatja a MEMS eszközök fontosságát a mindennapi életben, és konkrét rendszereket mutat be, amik mozgáselemzés különböző megoldásait vizsgálják.
- A mozgáselemzés matematikai és fizikai összefüggéseit ismerteti, és programkód segítségével meg is valósítja konkrét adatokra.
- képi reprezentálást ad az ütő mozdulatsoráról.

11 Továbbfejlesztés

Dolgozatom jelen állásban kiszámítja a fordulási szögeket és az ütő megjelenítését mutatja be, viszont ez még nem elég pontos érték. Ez még csak az első lépés a mozgás meghatározásához. Így, hogy látjuk, merre mozdul az ütő, tudjuk milyen ütéstípust hajtott végre a felhasználó, tudunk következtetni a labda irányára, viszont ez még csak becslés. A pontos méréshez figyelni kell majd az ütés mozdulat folyamán történő változásokra, és ezekből kiszámítani az ütő sebességét és állását. Következő lépésként, ha az ütő mozgása elég pontos, lehet foglalkozni a labda és ütő találkozásának vizsgálatával. Amikor a labda találkozik az ütővel, mindenképpen lassulni fog, és a labda irányával megegyező erő fog hatni az ütőre. Az ütő sebességéből, irányából, állásából a rá ható labda általi erőből pontos mérések segítségével, ki lehet számolni a labda sebességét, az ütő állásából pedig meg lehet mondani, hogy milyen irányban távozott a labda az ütőről.

Másik fejlesztési irány a hardver fejlesztése. A hardver adatvételi frekvenciája lassú, jelenleg másodpercenként 30-35 értéket tud rögzíteni. A pontos, értékelhető eredményekhez, ezt az érték legalább el kell érje a 100-at. Ahhoz, hogy ez használható termék legyen, gondoskodni kell arról, hogy ne csak a tesztelésen, hanem az éles játékban is használható legyen. Tehát a szenzor elhelyezése, és a vezeték nélkül kommunikáció megvalósítása külön feladat lesz a továbbiakban. A szenzort mindenképp elzártan kell elhelyezni, erre viszont csak az ütő nyelének belsejében van lehetőség. Vezeték nélküli kapcsolathoz, a mostani szenzorhoz kell párosítani egy kommunikációs eszközt, akár ZigBee, akár Bluetoothon keresztüli kommunikációra. Ennek megvalósítása akár egy új projektként is felfogható, hiszen, itt nem kell törődni a számításokkal, csak azzal, hogy a szenzorból érkező adatokat továbbítsuk a közelben elhelyezkedő vevő egységre (pl. számítógép, laptop, okostelefon). Ami nehézséget

okozhat, az az adatküldési sebesség. Nagyon fontos része a feladatnak, ha valós idejű megjelenítést szeretnénk, hogy mennyi adatot képes küldeni a szenzor a feldolgozó egységnek. Ezen múlik a megjelenítés pontossága, hogy minél közelebbi eredményt adjon az igazi mozdulatsorhoz.

Ha sikerül a teljes mozdulatsort reprodukálni, és kiszámítani a mozgásokat, onnantól el lehet vonatkoztatni a tenisztől. Föl lehet használni más sportokban is, például labdarúgás, futás és minden ütővel végzett sport, de akár a sporton kívül is, a hétköznapi életben történő mozgásokat is tudunk ezzel a módszerrel elemezni.

12 Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szüleimnek és családomnak szeretnék köszönetet mondani, amiért rendületlenül segítettek, támogatták a tanulásomat. Bízattak a nehéz helyzetekben, hogy ne hagyjam abba, ne adjam föl. Másrészt, szeretnék köszönetet mondani Tihanyi Attila Tanár Úrnak, a laborvezetőmnek, aki bemutatta a projektet, felhívta figyelmemet a témakör fontosságában, lehetőségeiben, és mindvégig nagy mértékben segítette és támogatta munkámat!

13 irodalomjegyzék

- [1] Márkus András Kovács Lajos, *Sportok könyve*.: Mérték kiadó, 2009.
- [2] Nyers Szabina, "Mozgáselemzés MEMS alapú gyorsulásmérő adatai alapján," Budapest, PPKE-ITK, 2011.
- [3] Gerber Balázs, "Kajakozási technika komplex elemzése gyorsulásmérés segítségével," Budapest, PPKE-ITK, 2007.
- [4] (2009) www.analog.com. [Online]. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [5] (2009, Február) www.honeywell.com. [Online]. <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Magneto/HMC5843.pdf>
- [6] (2010, Március) www.invensense.com. [Online]. <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf>
- [7] (2011) <http://www.starlino.com/>. [Online]. http://www.starlino.com/wpcontent/uploads/data/dcm_tutorial/Starlino_DCM_Tutorial_01.pdf
- [8] Charles Murray. (2012, Június) <http://www.designnews.com>. [Online]. http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=245244&cid=Newsletter+-+Sensors&dfpPPParams=ind_184,industry_consumer,aid_245244&dfpLayout=article&dfpPPParams=ind_184,industry_consumer,aid_245244&dfpLayout=article
- [9] Jose Julio Doug Weibel. (2010, Február) 9 Degree of Measurement Attitude and Heading Reference System.
- [10] Budó Ágoston, *Kísérleti fizika I*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1986.
- [11] Michael Fowler. galileoandeinstein.physics.virginia.edu. [Online]. http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/E&M_Hist.html
- [12] Ifj. Zátonyi Sándor, *Fizika 9*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [13] Eric W. Weisstein. MathWorld. [Online]. <http://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>
- [14] L. C. Biedenharn and J. D. Louck, *Angular Momentum in Quantum Physics*, 9780201135077th ed.: Addison–Wesley, 1981.