

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA
2024

ELEKTROMOS ROLLER DINAMIKÁJÁNAK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

Magyari Zsombor

Konzulensek: Dr. Takács Dénes
Zana Roland Reginald

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A roller mechanikai modellje	3
2.1. A modell felépítése	3
2.2. A modellben használt koordináta-rendszerek	4
2.3. Általános koordináták	5
3. A roller mozgásállapotának mérése	5
3.1. Mérendő mennyiségek és származtatásuk	5
3.2. A pozíció mérése GNSS RTK segítségével	7
3.2.1. GNSS RTK rendszer működése	7
3.2.2. A GNSS RTK modul rögzítése	8
3.3. A sebesség mérése Hall-effektus alapú szenzorral	9
3.4. A kormány szögelfordulásának mérése	11
3.4.1. A kormányzög mérésének konstrukciós kialakítása	11
3.4.2. A kormányzög méréséhez használt szenzor	12
3.5. A szöghelyzet mérése	13
3.5.1. IMU-k tesztelése	13
3.5.2. Az IMU elhelyezése	17
4. A rolleres mozgásállapotának detekciója	17
4.1. A rolleres szerepe	17
4.2. A kamera kiválasztása és használata	18
4.3. Képelemző neurális hálók vizsgálata	20
4.4. A rolleres mozgásának OptiTrack rendszerrel történő mérése és feldolgozása	22
4.5. A jármű-ember rendszer modellezése	24
4.6. Lehetőségek súlypont prediktáló rendszer fejlesztésére	28
5. Adatgyűjtésre felkészített roller	28
6. Konklúzió	29

1. Bevezetés

Az utóbbi években nagy népszerűsége tettek szert a különböző mikromobilitási járművek, például segway-ek, elektromos rollerek, elektromos egykerekű járművek és elektromos gördeszkák. Elterjedésük aránylag kis méretűeknek és kis tömegűeknek köszönhető, hiszen emiatt a városi közlekedés egyik leggyorsabb módját kínálják, illetve könnyen szállíthatók is. Emellett környezetvédelmi szempontból előnyös, hogy, elektromos mivoltukból fakadóan, nem szennyezik a városok levegőjét.

Sok pozitív tulajdonságuk mellett fontos megjegyeznünk viszont, hogy irányításuk jelentősen igénybe veszi felhasználójuk dinamikai és szabályozási képességeit. Ebből kifolyólag a jármű-ember rendszer vizsgálata segíthet rámutatni arra, hogy mi jellemzi az emberi szabályozást. Ez kiemelten fontos lehet autonóm járművek tervezésénél.

A közelmúltban tanúi lehettünk, hogy hogyan kezdett el egyre több cég mikromobilitási járművek tervezésével és gyártásával foglalkozni. Sok városban már bárki számára gyorsan kölcsönözhető elektromos rollerek. Ez viszont azt is jelenti, hogy akik ilyen járműveket használnak, kevésbé tapasztaltak, és a közlekedési szabályokra vonatkozó ismereteik is hiányosak. Így a mikromobilitási járművek elterjedésével megnövekedett a személyi sérülésekkel járó közúti balesetek száma is. Ezen járművek dinamikájának mélyebb megismerése hozzájárulhat ahhoz, hogy mind a járművek konstrukciós kialakítására, mind az őket érintő közlekedési szabályokra fejlesztési javaslatokat tegyünk.

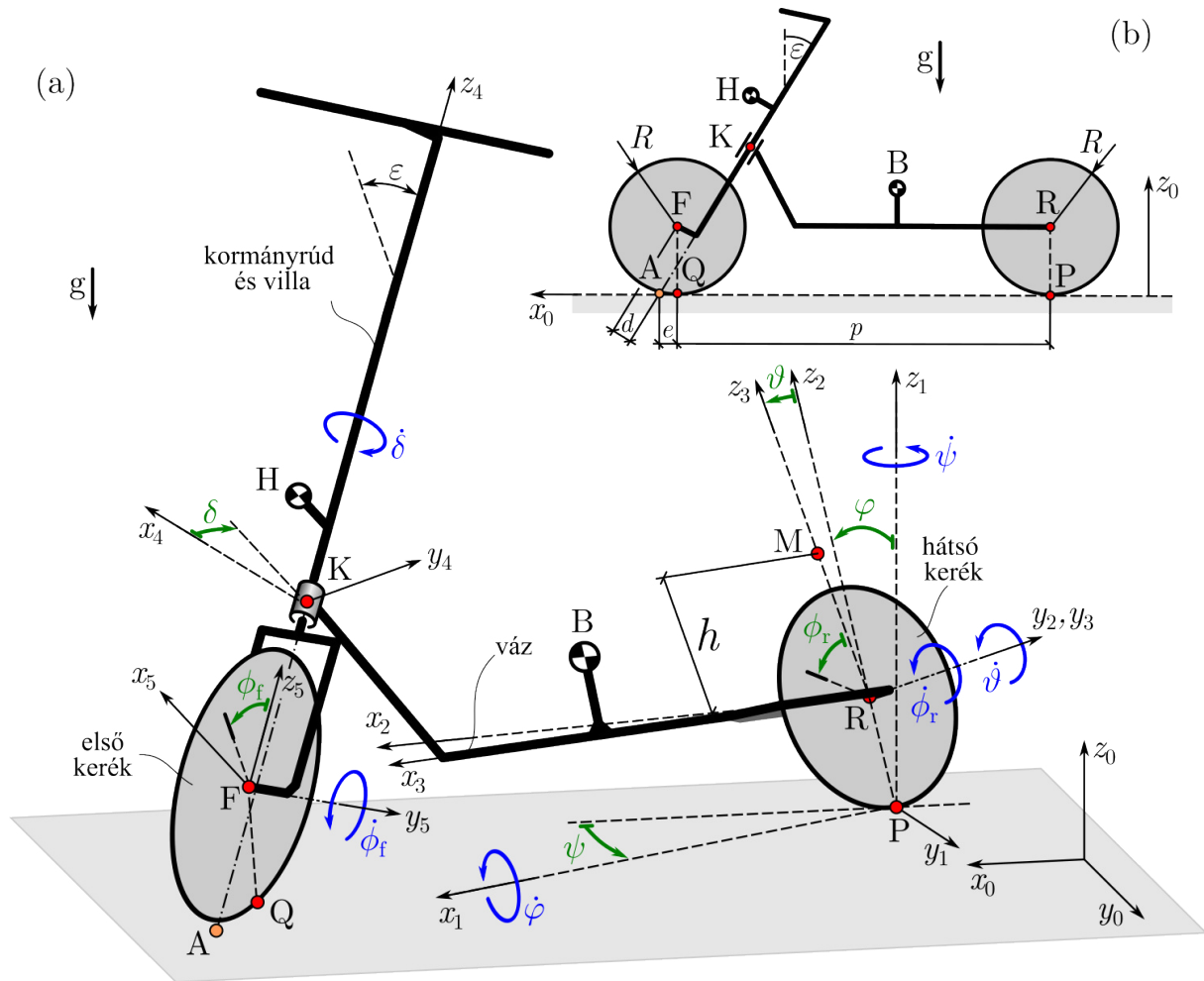
A mikromobilitási járműveken belül külön kategóriát képezhetünk az egy nyomon haladó járművekből, így a kerékpárból, rollerből, elektromos motorkerékpárból. A szakirodalom már régóta foglalkozik ezeknek a járműveknek a mechanikai modellezésével. Egyfelől ezek a járművek gyakorlatilag egymással teljesen megegyező módon modellezhetők. Másfelől, ha konkrét szimulációkat és számításokat szeretnénk végezni, már nagyobb szerep jut az eltérő geometriai méreteknél.

Dolgozatomban egy elektromos roller mechanikai modelljén keresztül mutatom be, hogy milyen általános koordináták segítségével tudjuk leírni a roller mozgását. A térbeli gördülési feladat, illetve a geometriai- és kinematikai kényszerek miatt meglehetősen bonyolult és analitikusan nehezen kezelhető egyenletekhez jutunk. Ez egészül ki a járművet irányító emberrel, akinek modellezése és a járművel való kapcsolatának leírása tovább bonyolítja az egyenleteket. Így tehát az elektromos roller dinamikájának kísérleti vizsgálata nagy segítséget nyújthat a jármű-ember rendszer leírásában. Dolgozatomban bemutatom, hogyan szereltünk fel egy elektromos rollert különböző szenzorokkal és mérőeszközökkel, és így milyen mérések kivitelezése vált lehetővé.

2. A roller mechanikai modellje

2.1. A modell felépítése

A mechanikai modellünkben egy merev talajon gördülő rollert vizsgálunk, ld. 2.1. ábra. A térbeli mechanikai modell a Whipple-féle bicikli modell [1] alapján készült el. Ez a mechanikai modell a szakirodalomban már sok helyen kidolgozott, így jelen dolgozatban csak a modell alapfeltevéseit foglaljuk össze egy szakirodalmi leírás alapján [6]. A modellt leíró többtest dinamikai rendszer négy merev testből áll: első kerék, hátsó kerék, a kormányrúd/villa összeállítás, valamint a roller váza. Ez utóbbin helyezkedik el az ember. Ez alapján a roller összesen $4 \cdot 6 = 24$



2.1. ábra. Az elektromos roller térbeli mechanikai modellje [6]. (a) Axonometrikus nézetben, az általános koordináták feltüntetésével. (b) Oldalnézet a $\psi = 0, \phi = 0, \vartheta = 0, \delta = 0$ esetben, a geometriai jellemzőkkel.

szabadsági fokú a geometriai- és kinematikai kényszerek nélkül. Minden modellben szereplő síkcukló (az F, R és K pontokban) 3 translációs és 2 rotációs szabadsági fokot köt le, emiatt a rendszer a geometriai kényszerek alapján $24 - 3 \cdot 5 = 9$ szabadsági fokkal rendelkezik.

2.2. A modellben használt koordináta-rendszerek

A mechanikai modellben 6 darab jobbsodrású koordináta-rendszert vettünk fel az ábrán látható módon. A koordináta-rendszereket $\mathcal{F}_k$ -val jelöljük, ahol $k = 0, 1, \dots, 5$. Ezekhez tartozó tengelyek rendre (x_k, y_k, z_k) . $\mathcal{F}_0$ a globális koordináta-rendszer. A z_0 tengely körüli ψ szöggel való forgatással és az origónak a P pontba helyezésével kapjuk az $\mathcal{F}_1$ -el jelölt koordináta-rendszert. Az x_1 tengely körüli φ szöggel való forgatással és az origónak az R pontba helyezésével kapjuk az $\mathcal{F}_2$ koordináta-rendszert. Ennek y_2 tengelye körüli ϑ szögű forgatásával kapjuk az $\mathcal{F}_3$ -al jelölt koordináta-rendszert, ami a roller vázához rögzített koordináta-rendszer lesz. Az $\mathcal{F}_4$ -el jelölt koordináta-rendszert az y_3 tengely körüli negatív irányú ε szögű forgatással kapjuk, origója a K pontban helyezkedik el. A z_4 tengely körüli δ szögű forgatással, továbbá az origó F pontba helyezésével kapjuk a kormányrúdhöz rögzített koordináta-rendszert, amit $\mathcal{F}_5$ -el jelölünk. Az itt leírt forgatások az alábbi rotációs mátrixok segítségével adhatók

meg:

$$\mathbf{T}_{0,1} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{1,2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{T}_{2,3} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{3,4} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{T}_{4,5} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

2.3. Általános koordináták

A szakirodalmi modell feltételezi, hogy sík vízszintes talajon gördül a roller. Figyelembe véve a modellben emiatt jelenlévő geometriai kényszereket, valamint kihasználva, hogy a hátsó kerék gördülésére felírt kinematikai kényszeregyenletek közül a függőleges sebességre vonatkozó komponens integrálható ($\dot{Z}_R = -R\dot{\varphi} \sin \varphi \Rightarrow Z_R = R \cos \varphi$), az általános koordináták vektora

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} X_R & Y_R & \psi & \varphi & \delta & \phi_f & \phi_r \end{bmatrix}^T. \quad (2.4)$$

X_R , Y_R a hátsó kerék középpontjának koordinátáit jelöli a talajhoz rögzített $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben, ψ a legyezési szög, φ a dőlésszög, δ a kormányaszög, ϕ_f az első kerék szögelfordulása az $\mathcal{F}_5$ koordináta-rendszer y_5 tengelye körül, ϕ_r a hátsó kerék szögelfordulása az $\mathcal{F}_2$ koordináta-rendszer y_2 tengelye körül. A hiányzó ϑ bólintási szög, sík talaj feltételezése esetén, kifejezhető a kormányaszög és dőlésszög, valamint további geometriai adatok segítségével.

Esetünkben, valós környezetben, a roller változatos útfelületen haladhat, így a Whipple-féle modell sík talajra vonatkozó feltételezései nem helytállóak. Így a $\mathbf{q}$ általános koordináta vektorból hiányzó Z_R és ϑ változók mérése is fontos a gyakorlatban. Emellett, a gördülés kinematikai kényszerének teljesülése sem garantált a valós környezetben, így a lehetőségekhez mérten (akár redundáns módon) előnyös minél több pozíció, sebesség és gyorsulás jellegű mennyiség mérése. A következő alfejezetekben ismertetésre kerül, hogy melyik mennyiségek milyen módon mérhetők az általunk fejlesztett adatgyűjtővel ellátott rolleren.

3. A roller mozgásállapotának mérése

3.1. Mérendő mennyiségek és származtatásuk

Célunk kísérleti úton is információt gyűjteni arról, hogy az egyes általános koordináták milyen értékeket vesznek fel egy mozgás során. A szenzorokkal felszerelt rollerrel lehetőség van speciális mozgásokat vizsgálni (pl. vonalkövetés, kanyarodás) és elméleti számításokat validálni, illetve pontosítani.

Az általános koordináták vektorát kiegészítve a fent leírt megfontolások alapján a

$$\mathbf{q}_m = \begin{bmatrix} X_R & Y_R & Z_R & \psi & \varphi & \vartheta & \delta & \phi_f & \phi_r \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

mérendő mennyiségek vektorát kapjuk. Belátható, hogy ha kihasználjuk a gördülésből származó kinematikai feltételeket, akkor akár a hat mennyiség ismert értékeiből kiindulva redukciós képletek használatával, illetve a megfelelő deriválásokat és integrálásokat elvégezve, kiszámítható a maradék három mennyiség is. Azonban a valóságban nem garantálhatjuk a tökéletes gördülést; emellett pedig a mérési zajok és hibák szűrése végett is előnyös minél több mennyiség közvetlen mérése. Az itt felsorolt mennyiségek közül közvetlenül mérjük a ψ legyezési szöget, φ dőlésszöget, ϑ bólintási szöget, valamint a δ kormánysszöget.

Az R pont X_R, Y_R, Z_R koordinátáit nincs lehetőségünk közvetlenül mérni, ezért az 2.1. ábrán M-el jelölt pont pozícióját mérjük az $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben. Ebből számíthatók az R pont koordinátái a következő módon. Először felírjuk M és R pontok helyvektorait az $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben:

$$\mathbf{r}_M = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_0} ; \quad \mathbf{r}_R = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_0} . \quad (3.2)$$

Az $\mathbf{r}_{MP}$ vektort az $\mathcal{F}_3$ koordináta-rendszerben célszerű felírni, de az $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben értelmezett alakja a kérdéses:

$$\mathbf{r}_{MR} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_3} = \begin{bmatrix} X_R - X_M \\ Y_R - Y_M \\ Z_R - Z_M \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_0} . \quad (3.3)$$

Ez előbbiből transzformációk segítségével képezhetjük az $\mathbf{r}_{MP}$ vektor $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben vett alakját. A transzformációs mátrixokban ψ , φ , és ϑ szögek szerepelnek, ezeket közvetlenül mérjük:

$$\begin{bmatrix} X_R - X_M \\ Y_R - Y_M \\ Z_R - Z_M \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_0} = \mathbf{T}_{0,1} \mathbf{T}_{1,2} \mathbf{T}_{2,3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_3} . \quad (3.4)$$

Így már számíthatók az R pont koordinátái az $\mathcal{F}_0$ koordináta-rendszerben:

$$\mathbf{r}_R = \mathbf{r}_M + \mathbf{r}_{MR} = \begin{bmatrix} X_M - h (\sin \vartheta \cos \psi + \cos \vartheta \sin \varphi \sin \psi) \\ Y_M - h (\sin \vartheta \sin \psi - \cos \vartheta \sin \varphi \cos \psi) \\ Z_M - h \cos \vartheta \cos \varphi \end{bmatrix}_{\mathcal{F}_0} . \quad (3.5)$$

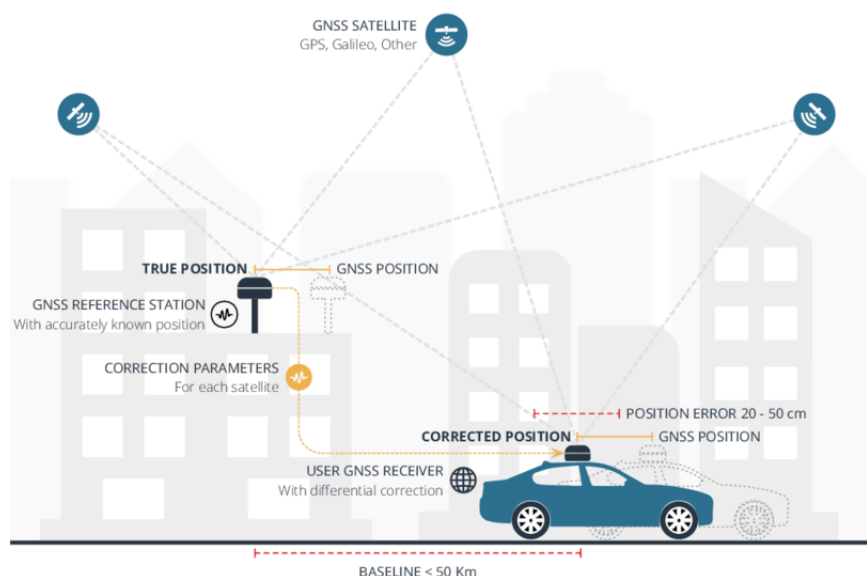
Az első kerék szögelfordulását ϕ_f szintén nem mérjük közvetlenül, de $\dot{\phi}_f$ szögsebességet származtatjuk a fordulatszám méréséből. Az általános felhasználásnak megfelelően pozitív $\dot{\phi}_f$ értékeket feltételezünk; ezzel a feltétellel elegendő egyszerűen a körülfordulásokat számolni, majd ebből integrálással számíthatjuk ϕ_f értékét. A hátsó kerék ϕ_r értékét egyáltalán nem mérjük.

3.2. A pozíció mérése GNSS RTK segítségével

3.2.1. GNSS RTK rendszer működése

A mechanikai modellben szereplő M pont pozícióját (X_M , Y_M , Z_M) GNSS (Global Navigation Satellite System) segítségével határozzuk meg. A hétköznapiakban gyakran találkozhatunk különböző GPS-ekkel (Global Positioning System), de ezek pontosságára gyakran csak több méteres szórást tud vállalni a gyártó, mivel a különböző elektromágneses zajok, a változó felhőzeti viszonyok, és az környező épületek is hatással vannak a műholdakkal való kommunikációra.

Léteznek azonban megoldások azzal a céllal, hogy lecsökkentsék ezt a bizonytalanságot. Ilyen megoldás a DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System), és az RTK (Real Time Kinematic) pozícionálás, amit gyakran használnak drónokban vagy automatizált mezőgazdasági gépekben. Ezek a technológiák a GNSS helymeghatározó technológiára épülnek, ami hasonló a GPS-hez, de annál több műholdrendszert foglal magában. E rendszer működésének lényege, hogy a vevő modul rendelkezik egy antennával, ami a különböző műholdak

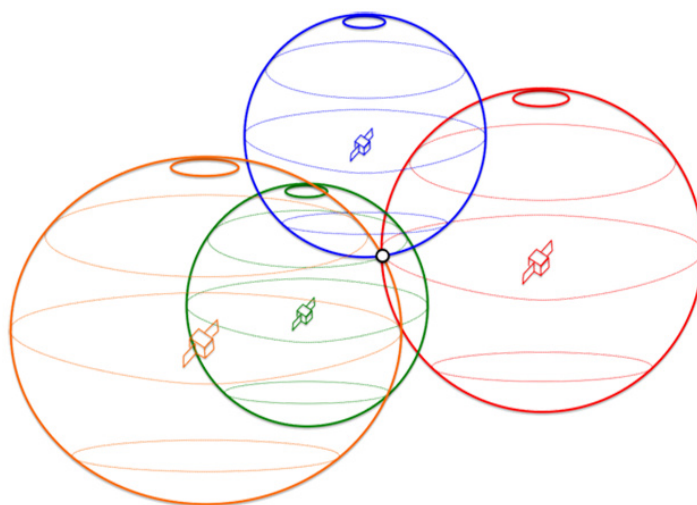


3.1. ábra. A DGNSS technológia működése (Forrás: [15])

vivőfrekvenciáját képes fogni. Minden műhold azonosítója és az általa mért globális idő megérkezik hozzá. Mivel saját maga is méri a globális időt, ezért az időkülönbségből kiszámítható, hogy milyen távol van a műholdtól, hiszen az elektromágneses hullám sebessége ismert. Pontosításképpen különböző módokon lehet modellezni az ionoszféra és troposzféra okozta késést, vagy akár az elektromágneses zaj mértékét is, azonban ezek jellemzően nem állandó értékek, így továbbra is csak bizonyos fokú pontosság érhető el. Ezért használják sok helyen a DGNSS technológiát (ld. 3.1. ábra), ami nagyon pontosan bemért lokalizációval rendelkező állomásokra épül. Ilyen állomások világszerte találhatók, de nagy pontosságú méréseknél, vagy olyan területen, ahol aránylag messze lenne a legközelebbi állomás, szokás saját állomásokat is bekalibrálni. Amikor a vevő fogadja a jeleket, azzal egy időben ugyanazon műhold jeleit a legközelebbi bázis állomás is megkapja. Az állomás ki tudja számítani, hogy az ő nagy pontosságú pozícióját adott pillanatban milyen pontossággal méri az adott műhold, és annak hibájából meg tudja állapítani a korrekciós értékeket. Ezeket az értékeket interneten keresztül eljuttatva a vevőhöz, az korrigálni tudja a mért értékeit. Ezzel a módszerrel akár fél méteres pontosság is elérhető; több frekvencia és műhold

használatával 5 cm-es szóródásig pontosítható, és az RTK technológiával ez akár 1 cm-es pontosságra is levihető. Ebben az esetben nem egyszerűen az időkülönbséget használják a távolság megállapítására, hanem a jel fázisát is mérik, és ezt is felhasználják arra, hogy korrekciót számoljanak. Itt egy referenciajelhez hasonlítjuk a beérkező vivőfrekvencia fázisát, és ebből számítjuk a további távolságkülönbséget egészértékű kétértelműség feloldásával (mivel nem tudjuk, hogy pontosan milyen távol vagyunk, ezért nem tudjuk azt sem, hogy hány hullámhossznyit a távolság, csak a fáziskülönbséget ismerjük).

Ahhoz, hogy egy pontról meg lehessen mondani, hogy hol helyezkedik el, legalább 4 műhold szükséges. Egy darab műhold esetén egy gömbfelületet tudunk meghatározni, amelyen megtalálható a pont. Két műhold esetén már két gömbfelületnek a metszésvonalán található a keresett helyzetű pont, vagyis egy körre tudtuk leszűketni a pozíció meghatározást. A harmadik műhold által meghatározott gömbfelület már két pontra szűkíti a lehetőségeket, a negyedikkel pedig már egyértelműen megmondható, hogy hol található a pont. Ezt szemlélteti a 3.2. ábra.



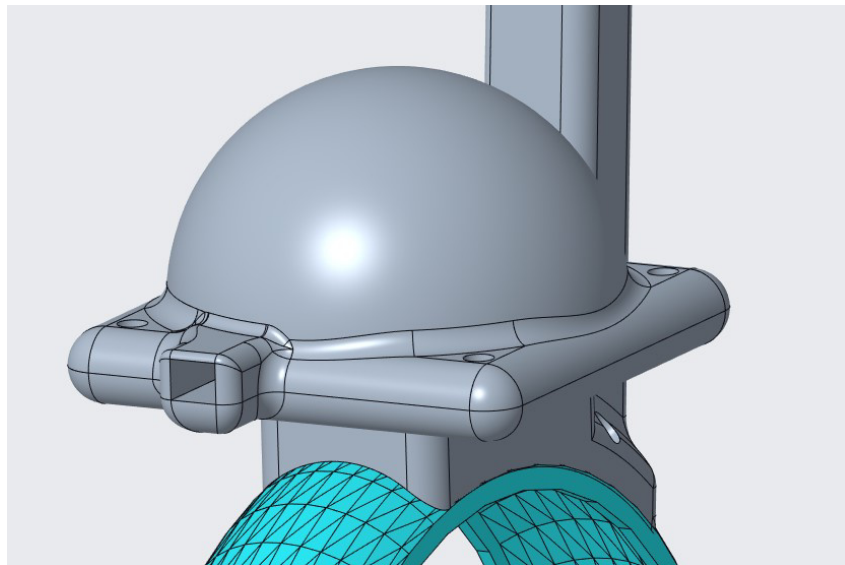
3.2. ábra. Egyértelmű pozíciómeghatározás 4 műhold segítségével (Forrás: [13])

3.2.2. A GNSS RTK modul rögzítése

A mechanikai modellben található M pontot fogjuk mérni a GPS segítségével, ehhez a sárvédő legfelső pontján helyeztük a GNSS RTK modult (ld. 3.3. ábra). Az időjárás behatások és mechanikai sérülések elleni védelem miatt lefedtük a modult, egy 3D nyomtatott alkatrészszel. Fontos volt azonban, hogy ez kellően vékony falú alkatrész legyen, és hogy kellően messze legyen a fala magától az antennától. Ennek megfelelően 2 mm vastag falú búrát terveztünk a GNSS RTK modul köré, amelynek belső felülete mindenhol legalább 20 mm távolságra van az antenna kerámia részétől. Ez az alkatrész ABS anyagból készült, mivel ez egy olyan polimer, ami nem torzítja és nem nyeli el az elektromágneses hullámokat, szemben sok más polimerrel (pl. poliuretán). A konstrukció a 3.4. ábrán látható.



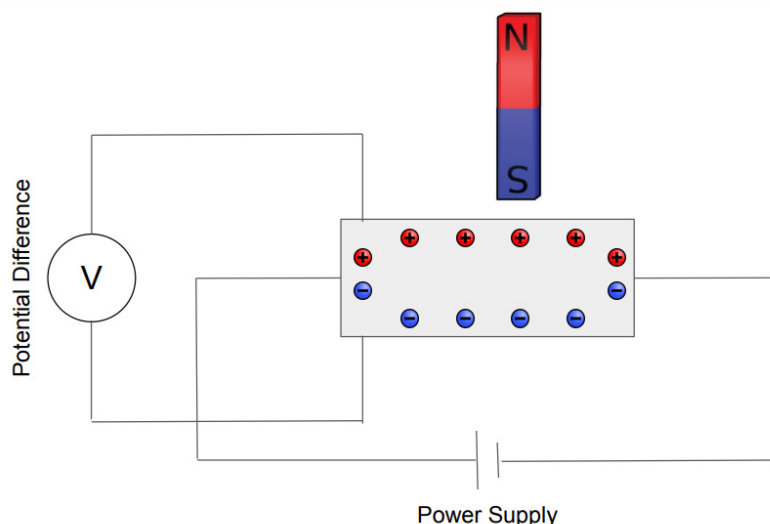
3.3. ábra. A GNSS RTK modul (Forrás: [10])



3.4. ábra. A GNSS RTK modul rögzítése

3.3. A sebesség mérése Hall-effektus alapú szenzorral

A Hall-effektus alapú szenzorok működésének lényegi eleme a Lorentz-erő. Az ilyen szenzorokban egy vezető lapka található, amelynek két szemközti oldala közé feszültséget kapcsolunk, a másik két oldala közti feszültségét pedig mérjük. Ha a lapka felületére és a rajta keresztül folyó áram irányára merőleges irányú mágneses tér van jelen, akkor az elektronokra erő hat, ennek köszönhetően haladási irányukra és a mágneses térre merőlegesen elmozdulnak. Ezzel feszültségkülönbséget okoznak a lapka azon két oldala között, amelyek között a feszültséget mérjük. Az összeállítást a 3.5. ábra szemlélteti.



3.5. ábra. Hall-effektus (Forrás: [14])

A roller kerekét elektromos motor hajtja, ennek köszönhetően állandó mágnesek is találhatók benne. Ezeknek a mágneseknek a szenzor előtt való elhaladása okoz változást a mágneses térben. A kerék forgása során mágnesek haladnak el a szenzorok előtt, létrehozva és megszüntetve ezzel a mágneses teret. A szenzorokban analóg-digitális konverzió is történik, ennek köszönhetően 3.3 V vagy 0 V feszültséget mérhetünk a szenzor kimenetén annak függvényében, hogy milyen irányú mágneses tér van jelen. Ezen értékek kimérését oszcilloszkóp segítségével végeztük el, a mérésről készült fénykép látható a 3.6. ábrán. A roller sebességének mérését a kerék fordulatszámának



3.6. ábra. Az első kerékben elhelyezkedő Hall-szenzorok kimeneti jelének mérése

mérésére vezettük vissza. Az iparban ez az eljárás általánosan bevett, mivel ez a módszer meglehetősen pontos, és aránylag egyszerűen megvalósítható.

Xiaomi Electric Scooter Mi 3 típusú rollerrel dolgoztunk, és már maga a gyártó beszerelt 3 darab Hall-effektus alapú szenzort az első kerékben található agymotorba. Ezek közül kiválasztottunk egyet, aminek a kimeneti jelét a saját mikrokontrollerünkkel is figyeltük.

Azért van szüksége a gyártónak több szenzor beszerelésére, mert nem csupán a fordulatszámot szeretnék mérni, hanem el kell dönteniük, hogy melyik irányba forog a kerék. Így szabályozzák azt is, hogy a kerék elektromos hajtása csak azután induljon, hogy a felhasználó megindította előre felé a rollert.

A roller első kerekébe összesen 30 állandó mágnes van beépítve, 15-nek az északi pólusa néz a szenzorok felé, a másik 15-nek pedig a déli pólusa. E kétféle elhelyezés felváltva követi egymást. A szenzor lapkáján

ennek megfelelően pozitív és negatív feszültségeket mérhetnénk, de az analóg-digitális konverziót megelőzően a feszültség értékeket a szenzoron belül megtalálható elektronika egy pozitív feszültség tartományra képi le. Ennek köszönhetően egy körülfordulás alatt 15 darab 0-3.3 V feszültségugrás fog történni a kimeneti jelben. Ezen kívül szükségünk van az idő mérésére, amit a mikrokontroller végez, 100 Hz-es frekvenciával olvassa a szenzor kimeneti jelét.

Ha tudjuk a mért jelugrások számát, és az időtartomot, ami alatt mértük őket, akkor számíthatjuk a kerék fordulatszámát:

$$n = \frac{N}{N_m \Delta t}, \quad (3.6)$$

ahol n a fordulatszám, N a jelugrások száma, amit begyűjtünk mielőtt elvégeznénk a fenti műveletet, Δt az ehhez tartozó időtartam, N_m pedig a mágnesek száma. Ezzel számítható a kerék szögsebessége:

$$\dot{\phi}_F = 2\pi n. \quad (3.7)$$

A gördülés során a kontakt pont sebessége megegyezik a talaj sebességével, tehát nulla. Felírható a sebességekre vonatkozó redukciós képlet a Q és F pontok között

$$\mathbf{v}_F = \mathbf{v}_Q + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{QF} \quad (3.8)$$

A kerék $\boldsymbol{\omega}$ szögsebességvektora a roller váz szögsebességének, a kormányrúd szögsebességének és a (3.7) ismeretében számítható. Így végül az F pont sebessége is meghatározható a roller geometriai adatait is felhasználva. Ezt követően a megfelelő koordináta transzformációkkal tetszőleges koordináta-rendszerben felírható az F pont sebessége.

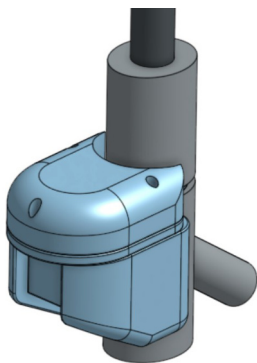
3.4. A kormány szögelfordulásának mérése

3.4.1. A kormányszög mérésének konstrukciós kialakítása

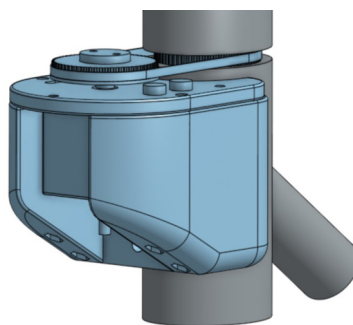
A roller kormányának szögelfordulását a δ jelöli. Ennek mérését szögelfordulás mérésre kifejlesztett érintés nélküli szenzorral végeztük. Az érintésmentes szenzorok közül az egyik legelterjedtebb az a technológia, amikor egy állandó mágneset helyezünk el a forgórészen, amelynek szögelfordulását mérni szeretnénk, és a forgás tengelyére merőlegesen, a mágnessel párhuzamosan pedig magát a szenzort szereljük be.

Mivel az állandó mágnes kormányon történő elhelyezése nehezen megvalósítható, illetve a szenzor azzal párhuzamos elhelyezése szintén bonyolult lenne, ezért a kormány szögelfordulását egy fogasszíf segítségével vezettük át a mérési konstrukcióba, ld. 3.7. és 3.8. ábrák. Ehhez a kormányrúdon egy fogasszíf tárcsát helyeztünk el, ezt kapcsolta össze a fogasszíf egy másik azonos méretű fogasszíf tárcsával. Ez utóbbinak a tengelye a roller vázához csatlakozó tartóban golyóscsapágyakkal került beágyazásra, ld. 3.9. ábra. E fogaskerék felső részébe építettük be az állandó mágneset és a fogaskerék fölé illeszkedő fedőelemhez rögzítettük magát a szenzort. Az elemeket CAD szoftver segítségével terveztük és 3D nyomtatással gyártottuk le őket. A fogaskerekek esetében különösen pontos technológiát választottunk, mivel nagyon apró fogakról van szó (kevesebb, mint 1 mm-es fogárok mély-

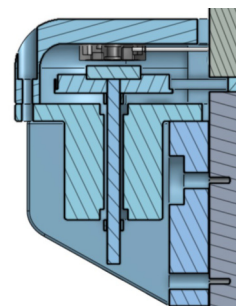
ség, és 2.5 mm-es profil). A szíj egy Optibelt Alpha Torque T2.5 – 290 típusú 4 mm szélességű fogasszíj, amely polimerből készül, de acél erősítő szálakat is tartalmaz. A szíjkerekek tehetetlenségi nyomatéka, kis méreteik és kis tömegük miatt, elhanyagolhatók a kormányrúd tehetetlenségéhez képest. Számottevő nyomaték ennek megfelelően nem adódik át a kormányrúdról a szíjkerekre, tehát a szíj megnyúlását is elhanyagolhatjuk. A szíj feszességének beállítása és szerelhetősége miatt egy mozgatható elem került elhelyezésre a mágneset hordozó elemmel együtt; ez az elem a megfelelő távolság beállítása után rögzíthető.



3.7. ábra. Kormányzög méréséhez tervezett modul



3.8. ábra. Kormányzög méréséhez tervezett modul a szenzor nélkül



3.9. ábra. Kormányzög méréséhez tervezett modul metszetben

3.4.2. A kormányzög méréséhez használt szenzor

Az általunk használt Novotechnik RFD-4000 szenzorban 4 Hall-effektus alapú szenzor található, egymáshoz képest rendre 90° -kal elforgatva. A mágneses tér irányának elfordulása az első Hall-elemben a szögelfordulásnak a szinuszával, a másodikban a koszinuszával, a harmadikban a mínusz szinuszával, a negyedikben pedig a mínusz koszinuszával lesz arányos. Ennek köszönhetően egyértelműen be lehet azonosítani a $[-\pi, +\pi]$ tartományon, hogy mekkora szöget zár be a mágneses tér iránya a szenzorral. Ehhez kettő Hall-elem is elegendő lenne, a további kettő beszerelésével a különböző elektromágneses és elektromos zajok szűrését valósítja meg a gyártó. Az általunk használt szenzor pontos típusa: RFD-4021-736-223-411. Ez a típus $0-360^\circ$ tartományon rögzít, 12 bites felbontással, azaz összességében $\frac{360}{1024} = 0.35156^\circ$ -os pontossággal érhető el vele.



3.10. ábra. A kormányzög mérésére használt Hall-effektus alapú RFD-4000 szenzor a hozzá tartozó mágnessel (Forrás: [11])



3.11. ábra. A kormányzög méréséhez használt szenzorhoz tartozó mágnes (Forrás: [11])

3.5. A szöghelyzet mérése

A szöghelyzet mérésére (ψ legyezési szög, φ dőlésszög, valamint ϑ bólintási szög) egy úgy nevezett IMU-t (Inertial Measurement Unit) használtunk. Egy ilyen egységben egy gyorsulásmérő, egy giroszkóp, és egy magnetométer található. A gyorsulásmérő három tengely mentén méri a gyorsulást, a giroszkóp három tengely mentén méri a szögsebességeket, a magnetométer pedig a föld mágneses teréhez képest történő szögelfordulás értéket érzékeli. A szögelfordulásokat így a szenzor egyrészt a szögsebesség integrálásával számítja. Másrészt pontosítja azokat a gyorsulásmérő által szintén mért nehézségi gyorsulás adat és a magnetométer jelei alapján. Utóbbi az egyetlen lehetőséget adja a legyezési szög korrekciójára.

Ilyen egységeket ma már rengeteg helyen használnak, nagyon gyakran különböző navigációs rendszerekben (autók, repülőket esetén), de az okos telefonokban is megtalálhatók, mivel sok alkalmazás és funkció alkalmazza az általa mért értékeket. Emiatt első lépésként felmértük, hogy egy telefonban található IMU-val mennyire pontosan mérhetjük a szöghelyzetet. Ez abból a szempontból lett volna előnyös, hogy könnyedén és gyorsan megismételhetővé tette volna a szöghelyzetmérést, akár különböző rollereken is, hiszen csupán a telefon deszkához való megfelelő rögzítést igényelte volna. A később bemutatott mérési eredmények alapján viszont ez az elképzelés nem tűnt célszerű megoldásnak.

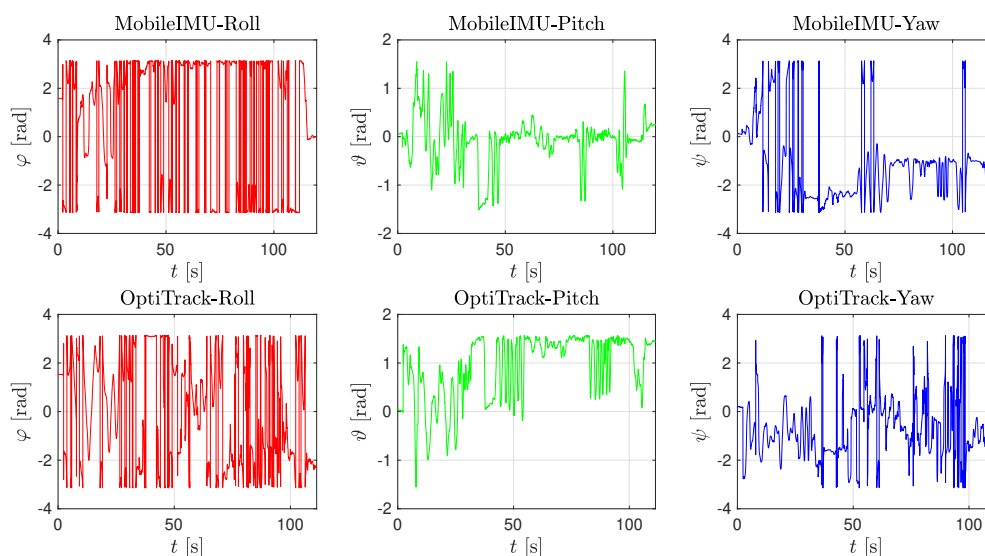
A szöghelyzet méréséhez és leírásához szükséges definiálnunk a forgatások sorrendjét, mivel ugyanazt a három szögeértéket felhasználva különböző sorrendű forgatásokat végezve más-más szöghelyzeteket kapunk. Az iparban elterjedt mód a legyezési szög (ψ_m), bólintási szög (ϑ_m), dőlési szög (φ_m) sorrend a leggyakrabban használt. Az általunk vázolt mechanikai modellben azonban a szögekkel való forgatás sorrendje: legyezési szög, dőlési szög, bólintási szög. Ezért szükség lenne arra, hogy mért szögek és azok sorrendje alapján definiált orientációt megfeleltessük a mechanikai modellben felvett szögek és azok sorrendjével definiált orientációnak. A számítás ebben az esetben azon a gondolatmeneten alapulna, hogy a mért szögekkel végzett, megadott sorrendű forgatási transzformációk eredménye megegyezzen a mechanikai modellben definiált szögekkel végzett, hozzájuk tartozó sorrendű forgatási transzformációk eredményével. Azonban ez a plusz számítás elkerülhető, ha a szenzort oly módon szereljük fel, hogy az általa mért bólintási szög a mechanikai modellben szereplő dőlési szög, illetve fordítva. A legyezési szög megegyezik. Ebben az esetben csak a mért szögek előjelén lehet szükséges változtatni attól függően, hogy melyik koordináta-tengelyek mentén van definiálva a legyezési-, dőlési-, valamint bólintási szög.

3.5.1. IMU-k tesztelése

A telefonban található IMU pontosságát az OptiTrack nevű cég mozgáskövető berendezésével vizsgáltuk. A vizsgálatunk lényege az volt, hogy összehasonlítottuk a telefon által rögzített-, és az OptiTrack rendszerrel mért szögelfordulás értékeket. A OptiTrack mozgáskövető rendszer olyan optikai berendezés, amely több kamerát foglal magába, amelyeken infravörös tartományban világító ledek vannak elhelyezve. A kamerák ugyanebben a tartományban képesek detektálni az elektromágneses hullámokat. A ledek által kibocsátott hullámok apró markerekről visszaverődve jutnak el a kamerákba. A markerek felülete és anyaga kifejezetten jól veri vissza az infravörös tartománybeli hullámokat. Ha ilyen módon egy markert legalább kettő kamera lát, akkor pontosan meg lehet mondani, hogy a marker hol található a mérés kezdetén definiált 3 dimenziós koordináta-rendszerben. Esetünkben 8 kamerával dolgoztunk. A mérés elején elvégeztük a OptiTrack rendszer kalibrációját, amellyel század milliméteres

pontosságot értünk el.

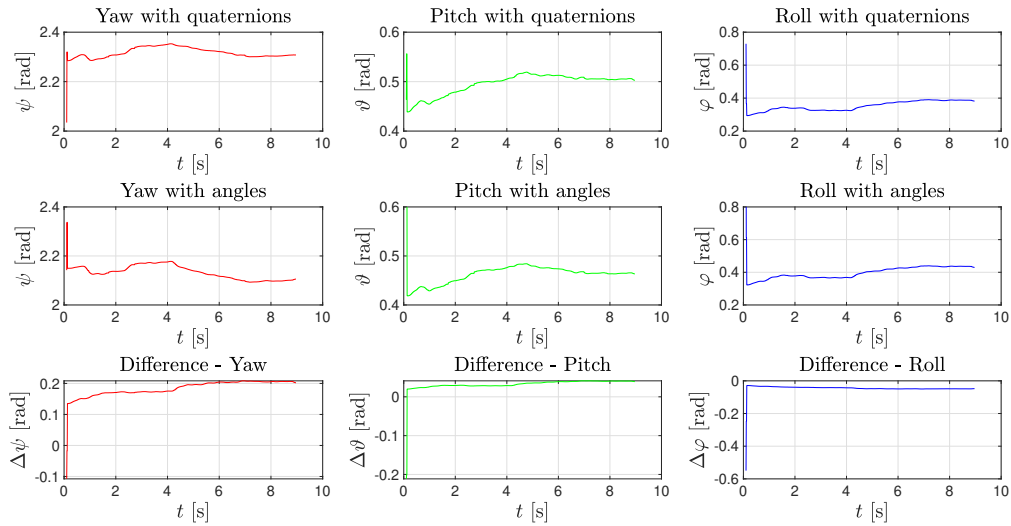
Az OptiTrack által fejlesztett szoftver (ami a szükséges számításokat is elvégzi, és azonnal a megfelelő koordinátaértékeket szolgáltatja) lehetőséget biztosít arra, hogy bizonyos markereket összekapcsoljunk benne, így egy merev testet definiálva az adott markerekből. Ez azt jelenti, hogyha készítünk egy merev testet, amelyen több marker található, és ezt a programban is definiáljuk, akkor a programban kiszámítható a pozíció értékekből a test szöghelyzete is. Egy ilyen merev testet rögzítettünk a telefonhoz, amelyet a koordináta-rendszerrel egy síkban helyeztünk el, hogy a telefonon elindított mérés és az OptiTrack rendszerrel végzett mérés ugyanabból a szöghelyzetből induljon. A mérés eredményeit a 3.12 ábra szemlélteti. Ránézésre is jól látszik, hogy a telefon által



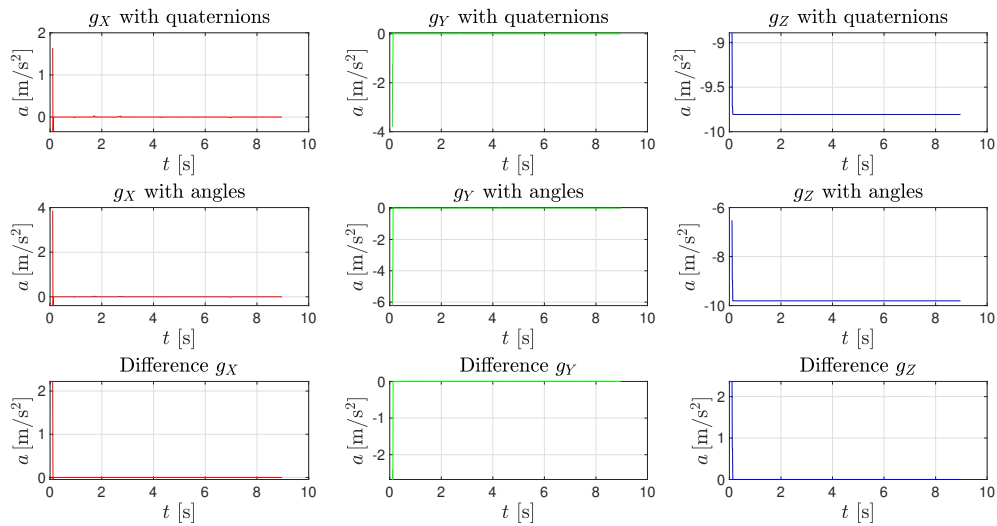
3.12. ábra. A telefon és az OptiTrack által rögzített szögefördülések

rögzített szögek jelentősen eltérnek az OptiTrack rendszerrel mért szögektől. Ennek oka az lehet, hogy a telefonban található IMU tulajdonságai rosszak: pontosságuk nem túl jó és valószínűsíthetően érzékenyek nagy és gyors szöghelyzetváltozásokra.

Végeztünk statikus vizsgálatot is, amikor a telefon álló helyzetben volt, és ekkor sem konstans értékeket kaptunk, ahogy ez a 3.13. ábra grafikonjain látszik is. A telefon által mért szöghelyzetet szögekben és kvaterniókban is lehet exportálni, ezekből pedig megfelelő matematikai transzformációkkal meg lehet határozni ugyanazokat a szögeket. A grafikonokon nem csak a telefon által mért szögeket ábrázoltuk, hanem a telefon által rögzített kvaterniók értékéből számolt szögeket is, illetve e kettő különbségét. Ezek között pedig számottevő különbség van. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a telefon IMU-jához tartozó számításokat végző egység sem működik kellő pontossággal. Ugyanebben a helyzetben az IMU rögzítette a nehézségi gyorsulás három komponensét is. Ha megfelelő sorrendben elvégezzük a forgatási transzformációkat a gyorsulás vektorra, akkor vissza kell kapnunk a $[0, 0, -g]^T$ vektort. Ennek komponenseit ábrázolom a 3.14. ábrán, szintén a kvaterniókból számolt szögek és a mért szögek alapján is kiszámítva, valamint ebben az esetben is ábrázoltam a különbségeket. Látható, hogy statikus esetben maga a nehézségi gyorsulás mérése meglehetősen pontos, még ha a szögekben szerepel is valamekkora pontatlanság. A grafikonok elején látható rövid idő alatt lejátszódó, nagy változás a mérés indításából fakadó hiba miatt jelenik meg.

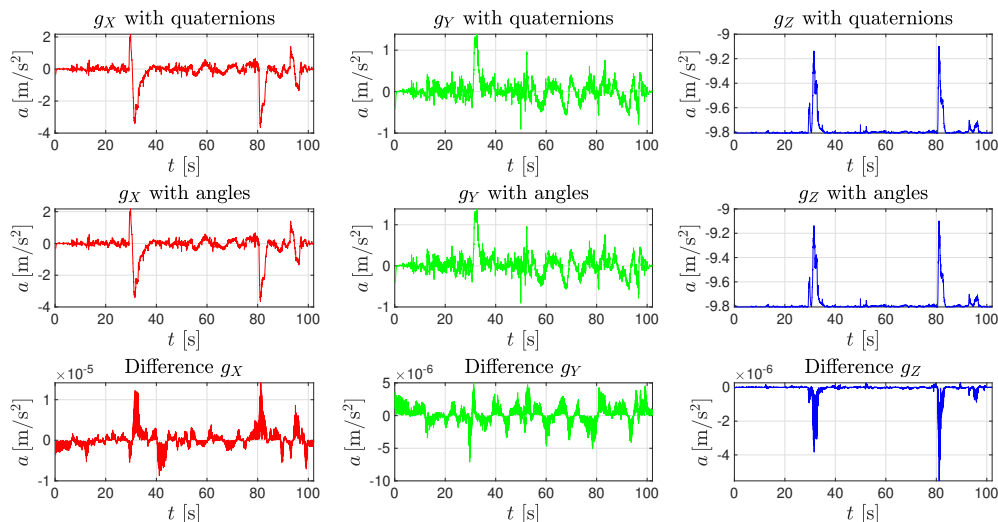


3.13. ábra. A telefon által mért szögelfordulások statikus helyzetben



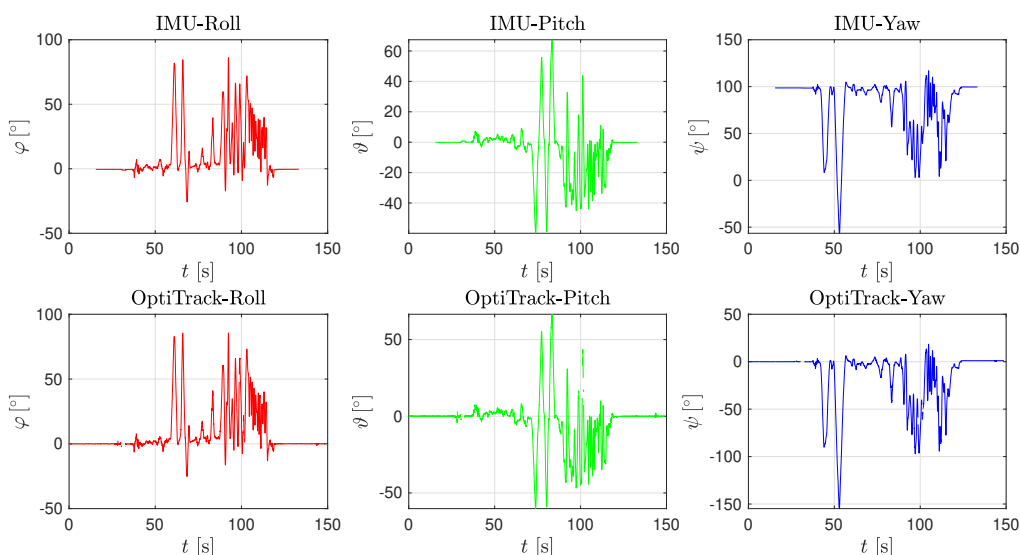
3.14. ábra. A telefon által mért nehézségi gyorsulás komponensek statikus helyzetben, a forgatási transzformációkat követően

Ugyanezt a transzformációt dinamikus esetben (mozgás közben) mért értékekre elvégezve már nagyon pontatlan eredményeket kapunk, ahogy ez a 3.15. ábrán látható. Észrevehető, hogy bizonyos hirtelen változások rövid időre nagyon nagy hibákat okoznak a mért értékekben vagy azok feldolgozásában.

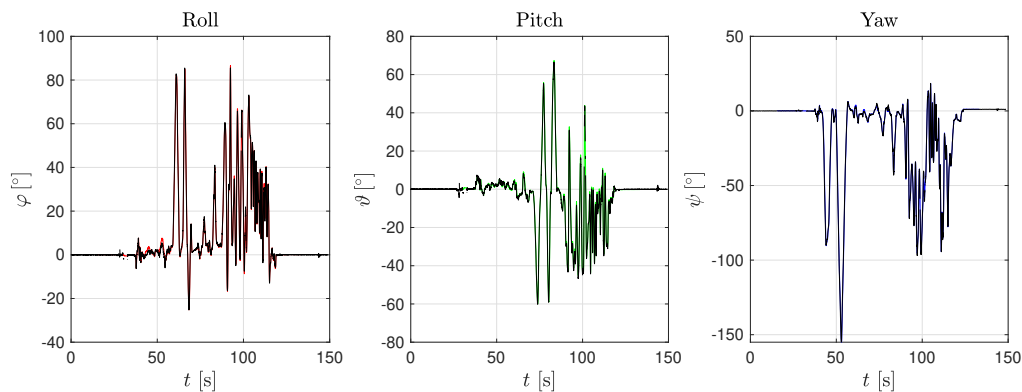


3.15. ábra. A telefon által mért nehézségi gyorsulás komponensek dinamikus esetben, a forgatási transzformációkat követően

Összességében azt a következtetést vonhatjuk le ezekből a mérésekből, hogy dinamikus esetben egyáltalán nem megbízható adatokat szolgáltat a mobiltelefonban található IMU. Ez alapján egy autópárházban is használt IMU-t választottunk, amit a Bosch nevű cég fejlesztett, típusa: BNO085. Ennek a mérési pontosságát is ellenőriztük a fent leírt OptiTrack rendszerrel való összehasonlításra alapuló módszerrel. Ugyanúgy, egy merev testet rögzítettünk az IMU-hoz, elindítottuk az IMU és az OptiTrack mérést, majd véletlenszerű mozgásoknak tettük ki az IMU-t. Ennek eredményeit az 3.16. és 3.17. ábrák mutatják. Jól látható, hogy gyakorlatilag hiba nélkül megegyeznek az IMU és az OptiTrack által mért szögelfordulás értékek.



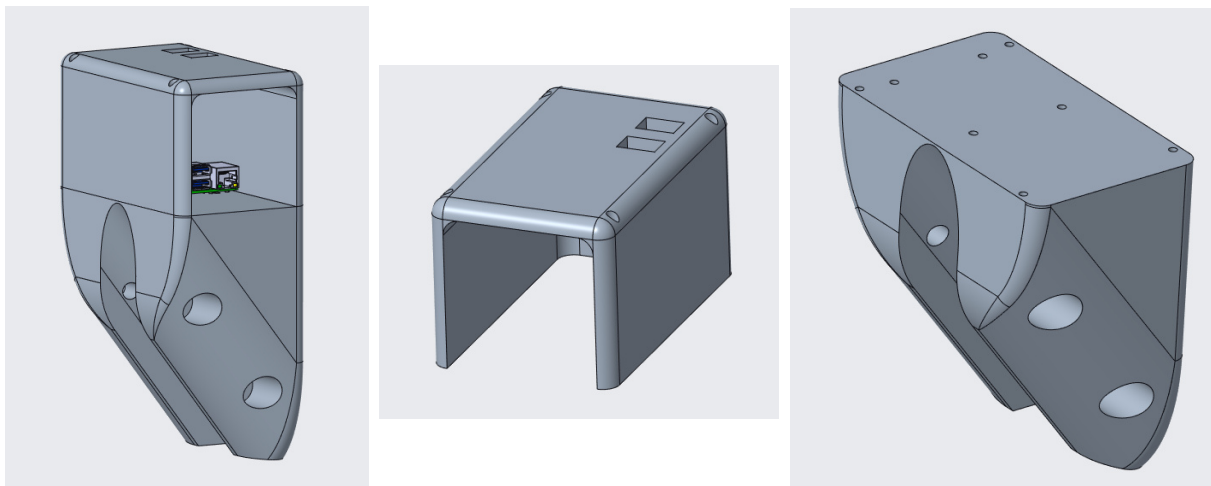
3.16. ábra. A BNO085 IMU és az OptiTrack rendszer által mért szögelfordulások



3.17. ábra. A BNO085 IMU és az OptiTrack rendszer által mért szögelfordulások közös grafikonon (színessel az OptiTrack-, feketével az IMU által mért adatok)

3.5.2. Az IMU elhelyezése

A IMU a további jelátalakításra és mérésadatgyűjtésre szolgáló eszközökkel együtt a roller vázának elején egy dobozban került elhelyezésre. A szenzor rögzítésénél kulcsfontosságú szempont volt, hogy a deszkához minél merevebben kapcsolódjon, és lehetőleg a lábtartó síkjával párhuzamos legyen, így biztosítva, hogy pontosan a roller deszkájának szögelfordulását mérjük vele. Emellett úgy helyeztük el, hogy a mechanikai modellben felvett szögek sorrendjének megfelelő sorrendben mérje az egyes koordináta tengelyeihez tartozó szögelfordulásokat. A tervezés ez esetben is CAD szoftverben történt, illetve a gyártásra 3D nyomtatással került sor. A konstrukció CAD modelljeit a 3.18. ábra szemlélteti.



3.18. ábra. Az IMU és a mérésadatgyűjtő elektronika rögzítése

4. A rolleres mozgásállapotának detekciója

4.1. A rolleres szerepe

Általánosan a mikromobilitási eszközök, így a roller esetén is elmondható, hogy mozgása során nem csak stabil, hanem instabil mozgások is felléphetnek. Utóbbi esetben elengedhetetlen valamilyen szabályozás használata,

annak érdekében, hogy a megkívánt mozgás stabilá váljon. Természetesen stabil esetben is, a roller megkívánt mozgásának elérése érdekében (pl. adott pálya követése) alkalmazzuk a tapasztalatszerzések során megtanult emberi szabályozásunkat [3].

A rolleres alapvetően kétféle módon tud beavatkozni a roller irányításába. Az első szabályozási lehetőség a kormánysszög változtatása, vagyis a rolleres két keze segítségével nyomatókat ad át a kormányrúdnak, ami ennek eredményeként szöggyorsulásra tesz szert; ezáltal válik szabályozhatóvá a kormánysszög. A második beavatkozási lehetőség a lábak és a deszka között átadódó nyomatékban rejlik. Ez a rolleres súlypontjának pozíciójától és egyes testrészeinek helyzetétől egyaránt függ; mindemellett a stabilitást nagy mértékben befolyásolja. Tehát minél összetettebb és pontosabb képet szükséges alkotnunk a rolleres mozgásáról. Erre a célra kamerával is felszereltük a rollert, így lehetővé válik olyan videóanyag rögzítése, amelyen a rolleres mozgása figyelhető meg. Ebből képelemző módszerek segítségével próbáljuk meg a számunkra értékes információt kinyerni. Ennek első lépéseit a következő fejezetekben fejtem ki.

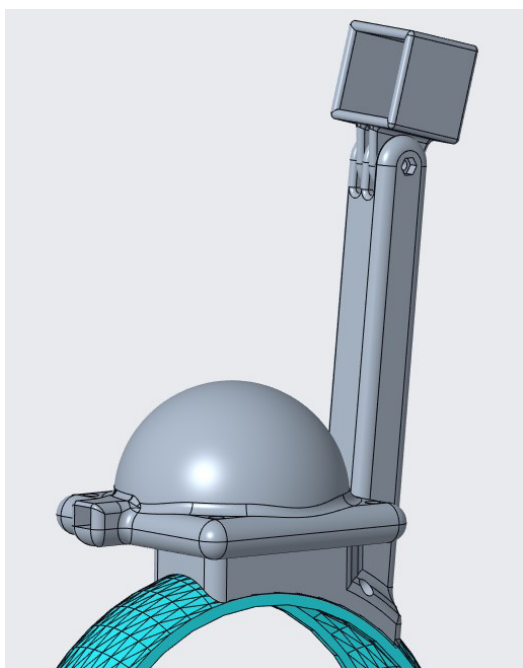
4.2. A kamera kiválasztása és használata

A kamera kiválasztásánál a legfontosabb szempont a látószög volt, mivel a rollereshez viszonylag közel tudjuk csak elhelyezni, és fontos, hogy minél több látszódjon a rolleresből. Ez alapján végül egy 126° -os látószöggel rendelkező USB kamerát választottunk (ld. 4.2. ábra), amit a roller sárvédőjére szereltünk fel. Azért ezt a pozíciót választottuk, mert így lehet a legtávolabb a kamera a rollerestől, tehát ez a látószög szempontjából a legelőnyösebb. Felmerült még opcióként, hogy a kormányon helyezzük el a kamerát, de ebben az esetben sokkal nagyobb látószögre lett volna szükség, és még ez sem biztosította volna, hogy a rolleres kezei, vagy előredőlés esetén akár egyéb testrészei látszódjanak a felvételen.

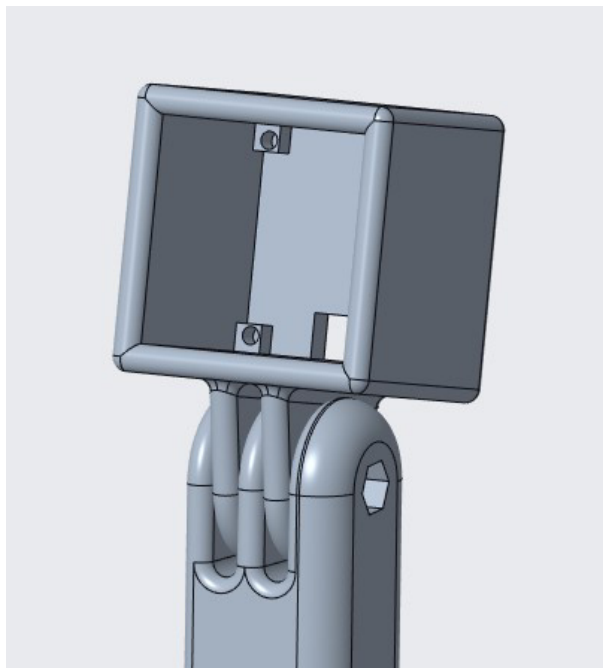


4.1. ábra. A kiválasztott USB kamera (Forrás: [12])

A kamera rögzítését megvalósító alkatrészek tervezése szintén CAD szoftverben történt, és 3D nyomtatási technológiával került legyártásra. A 4.2. és 4.3. ábrák mutatják az alkatrészeket és azok összeállítási modelljeit. A kialakításon látható, hogy egy oldható csavarkötésen keresztül lehetővé válik a kamera szögének változtatása, így beállítható az ideális helyzetbe.



4.2. ábra. A kamera rögzítésének kialakítása



4.3. ábra. A kamera tartómodulja

A kamerával rögzített felvétel 680×480 képpont felbontású, és 30 fps sebességű. A képrögzítést Python programozási nyelvben az OpenCV függvénykönyvtár használatával valósítjuk meg. A képanyag későbbi feldolgozásához hasznos korrigálni a kamera torzítását. Ehhez szükséges először kalibrálni a kamerát, amit a Matlab Camera Calibrator alkalmazásával végeztünk el egy úgynevezett "checkerboard" lapról készített fényképek alapján. A "checkerboard" gyakorlatilag egy sakktábla mintázat és egy hozzá tartozó koordináta-rendszer. A kalibrációs folyamat lényege, hogy egy képfeldolgozó algoritmus megkeresi a "checkerboard" négyzeteinek sarokpontjait, hozzájuk rendeli a koordináta értékeiket a "checkerboard"-on megjelenő x és y tengelyek rendszerében. A konkrét koordinátaértékek meghatározásához szükséges megadni a "checkerboard" négyzeteinek oldalhosszát, így már konkrét koordináta értékeket kapunk. A kalibrációs algoritmus lényege, hogy meghatározza a transzformációs mátrixot, ami a "checkerboard" koordináta-rendszer pontjait képzi le a kamera koordináta-rendszerébe, illetve ezt követően az így kapott pontokat a két dimenziós detektorra. Az első lépésben kapott paramétereket nevezzük a kamera külső (extrinsic) paramétereinek. Ez összesen 6 paramétert jelent, mivel a világ- és a kamera koordináta-rendszer közötti transzformáció meghatározásához szükség van a 3 elemű transzlációs vektorra, illetve az Euler-szögekre, azaz a 3 forgatás szögére a megfelelő sorrendben. A második lépésben kapjuk meg a kamera belső (intrinsic) paramétereit. Ez összesen 4 paramétert jelent, mivel ez esetben egy centrális vetítésről van szó, ahol a 2 elemű transzlációs vektort, illetve a két arányossági tényező értékét keressük (amennyiben a detektoron definiált koordináta-rendszer tengelyei nem merőlegesek egymásra, az általuk bezárt szög, mint paraméter, szintén a számítás részévé válik). Mindez összességében egy 12 lineáris egyenletből álló egyenletrendszer megoldását jelenti, ahol ismert a vizsgált pontok "checkerboard" koordináta-rendszerben értelmezett értéke, illetve a detektoron megjelenő koordináta-rendszerben értelmezett értéke, azaz maguk a konkrét pixelek. A mérési zajból és abból fakadóan, hogy a pixelek nem tökéletesen kicsi pontok, több egyenletre van szükség, mint ahány ismeretlen kell meghatároznunk. Ez alapján a legkisebb hibával rendelkező paraméter kombinációt keresi meg a program. A kalibráció eredményeként megkapjuk a kamerát jellemző belső és külső paramétereit. Ezt követően iteratív

módszerekkel becsülhető a radiális és tangenciális torzítás értéke is különböző nemlineáris függvények alapján. A radiális torzítás fakad, hogy a kamera lencséjének külső részeinél máshogyan módosul a fénysugarak útja, mint a lencse középső részénél. A tangenciális torzítás oka a detektor és a képsík párhuzamosságának hibája, azaz, hogy a kamera lencséjének optikai tengelye nem tökéletesen derékszöget zár be a detektorral. Mindezek segítségével tetszőleges képre elvégezhető a torzítás eltávolítása. Ezt szemlélteti a 4.4. ábra.

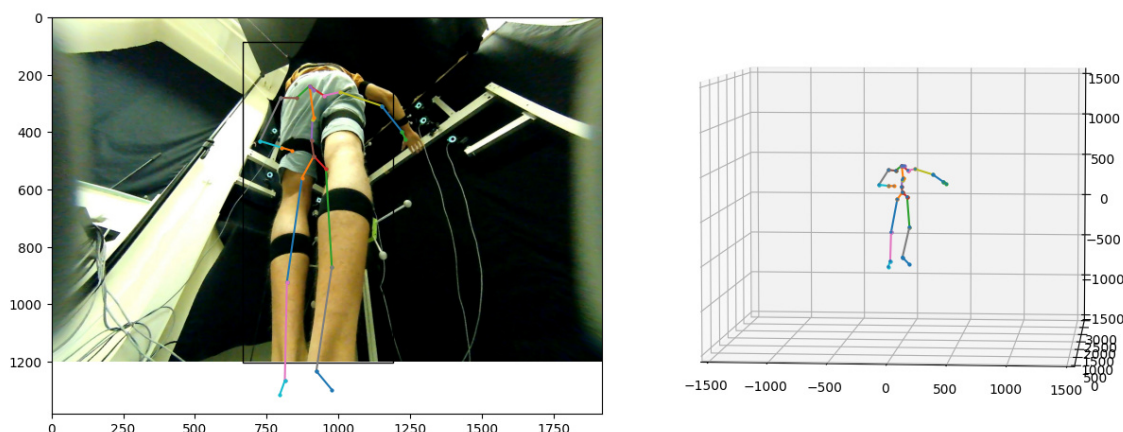


4.4. ábra. A kamera által rögzített nyers kép (balra), és a torzítás eltávolítása utáni kép (jobbra)

4.3. Képelemző neurális hálók vizsgálata

Egyre több betanított neurális hálóval találkozhatunk bármely tudományos területhez kapcsolódóan, így könnyen lehet találni olyan különböző képfeldolgozó neurális hálózatokat is, amelyek képesek csontváz modellt illeszteni az emberről készült képre. Ezeknek a modelleknek a lényege, hogy nem csupán felismerik az embert a képen, hanem megtalálják egyes csuklópontjaikat, és összekötik ezeket. Így jön létre a csontváz modell. Léteznek olyan modellek is, amelyek már képesek térben is elhelyezni a csontvázat. Ez azt jelenti, hogy egy 2 dimenziós fénykép alapján prediktálnak egy 3 dimenziós pózt az embernek. Ebben az esetben azért van szükség neurális hálózatra, mert csak egy nézet áll rendelkezésre, vagyis nincs információ arról, hogy az adott csuklópont milyen távol van a kamerától. A neurális háló ennek az információnak a hiányában megpróbálja a meglévő adatok alapján prediktálni, hogy hogyan helyezkedik el az ember 3 dimenzióban; hasonlóan ahhoz, ahogy mi emberek is el tudjuk helyezni térben azt, amit egy fényképen látunk. Az ilyen neurális hálók betanításához azonban szükséges a 3. (mélység) koordináta értéke, ami többféle módon előállítható. Az egyik legkézenfekvőbb megoldás, ha több kamerából álló rendszert alkalmazunk és több 2 dimenziós képet összehangolva állapítjuk meg a térbeli elhelyezkedést. Léteznek olyan algoritmusok is, amelyek betanítása hő térképeken alapul, és akár lehetne használni a már korábban említett OptiTrack rendszert is.

Az egyik ilyen elérhető modell a MeTRAbs: Metric-Scale Truncation-Robust Heatmaps for Absolute 3D Human Pose Estimation [7]. Ez a neurális háló hő térképek segítségével lett feltanítva és különböző összetett pozíciókra is pontos eredményeket ad. A fejlettebb verzióival már egészen összetett mozgások (pl. tánc vagy sport) közben kialakuló térbeli pózokat is pontosan generál egy kamerafelvétel alapján. Az ebből a modellből elérhető "demo" verziónak a képességei gyengébbek, de az általunk rögzített videoanyag egy-egy képkockájára elvégeztük vele a predikciót. Ennek eredményét a 4.5. ábra mutatja.

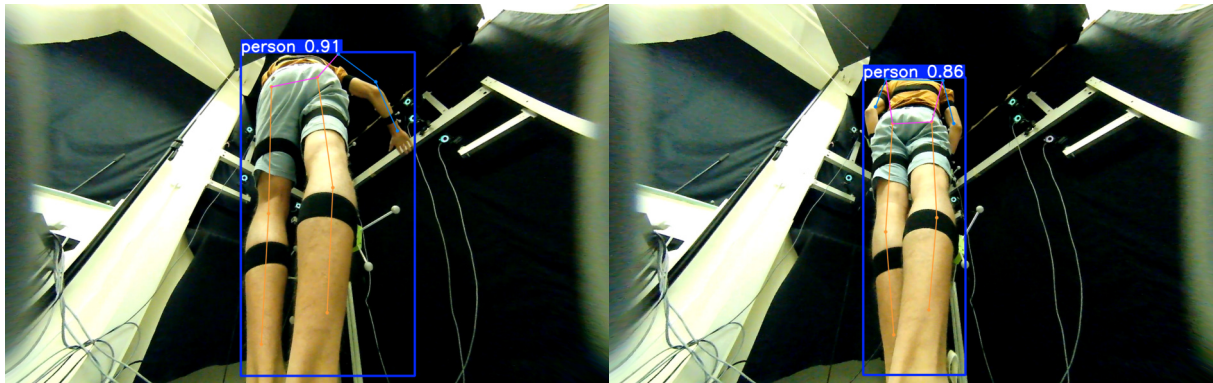


4.5. ábra. A MeTrabs neurális hálózat 3D póz predikciója

Ez alapján jól látható, hogy az általunk használt kameranézetből nehezen és pontatlanul ismeri fel az embert, és ennek megfelelően a térbeli póz meghatározása is meglehetősen pontatlan. A modell használata más kameranézetekből készült képek esetén jobb eredményeket ad. Ennek oka, hogy a betanítást alapvetően olyan hagyományosabb nézetekből készült felvételekkel végezték, amelyeken kisebb látószög alatt látszik az ember, és a végtagjai. Ez alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a mi problémánkra valószínűleg külön betanítást igényelne a modell, mivel nagyon speciális nézetből látható a rolleres. Felmerül az a megoldási lehetőség is, hogy a kamerát egy hosszabb, de továbbra is függőleges helyzetű rúd végén helyezzük el, így közelebb kerülve azokhoz a kameranézetekhez, amelyekkel maga a modell betanítása zajlott. Ebben az esetben azonban még nagyobb látószögű kamerára lenne szükség és egyre nagyobb mértékben befolyásolnánk a roller dinamikai tulajdonságait. Emellett számolnunk kellene a rúd rezgéseiből adódó problémákkal is, amik a felvétel minőségét rontanák, feldolgozhatóságát nehezítenék.

Mindebből kifolyólag egy más típusú neurális háló működését is megvizsgáltuk. Ez volt az Ultralytics YOLOv8 nevű modellje [9], amely egy rendkívül elterjedt képfeldolgozó neurális hálózat, számos lehetőséggel. Ezek egyike, hogy egy képen megkeresi az embereket, és csuklópontjaik felismerésével létrehoz egy csontváz modellt. Mindezt azonban csak 2 dimenzióban képes elvégezni, tehát nem helyezi el térben a csontváz modellt. Ennek ellenére hasznos eredményeket szolgáltat, hiszen a roller stabilitása és irányítása szempontjából a súlypont laterális irányú pozíciója az igazán számottevő, ennek kis mértékű elmozdulása is nagy hatással van a rollerrel való közlekedés irányára.

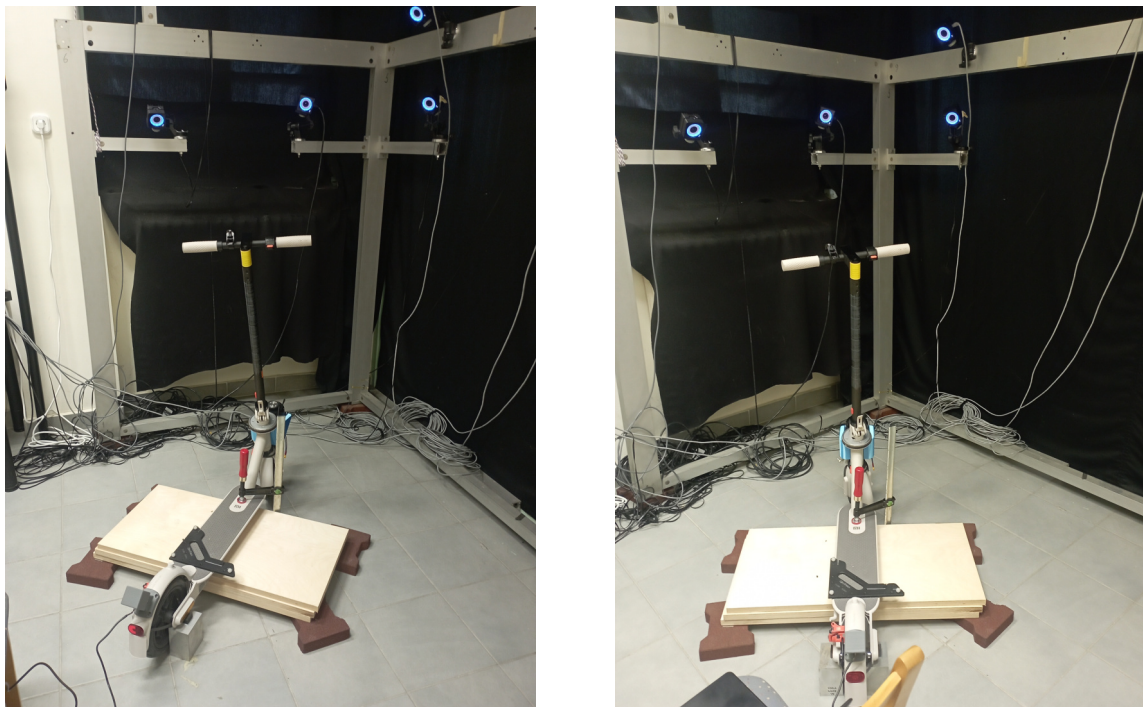
Ezzel is elvégeztük két különböző képkocka esetén a számítást, és a 4.6. ábrán látható eredményeket kaptuk. Az ábrákon látható, hogy a csuklópontokra vonatkozó eredmény valamivel pontosabb, mint a Metrabs esetén. Észrevehetjük azonban, hogy jelentősen függ a detekció pontossága attól, hogy épp milyen pozícióban van a rolleres, illetve megfigyelhető az is, hogy azok a tagok, amelyek nem látszanak, gyakorlatilag teljes egészében hiányoznak (pl. a bal oldali képen a bal kar teljes egészében), vagy nagy mértékű pontatlanságot okoznak a predikcióban (pl. a bokák).



4.6. ábra. A YOLOv8 modell predikciói

4.4. A rolleres mozgásának OptiTrack rendszerrel történő mérése és feldolgozása

A már korábban említett OptiTrack rendszert használtuk arra, hogy referencia adatot gyűjtsünk egy képfeldolgozó neurális hálózat működésének ellenőrzésére, és esetleges fejlesztési lehetőségeire. A rollert a 4.7. és 4.8. ábrákon látható módon rögzítettük az OptiTrack kamerarendszere által belátott térben. A rögzítést azért tehetjük meg, mert számunkra ebben a mérésben a rolleres rollerhez viszonyított pozíciója releváns.

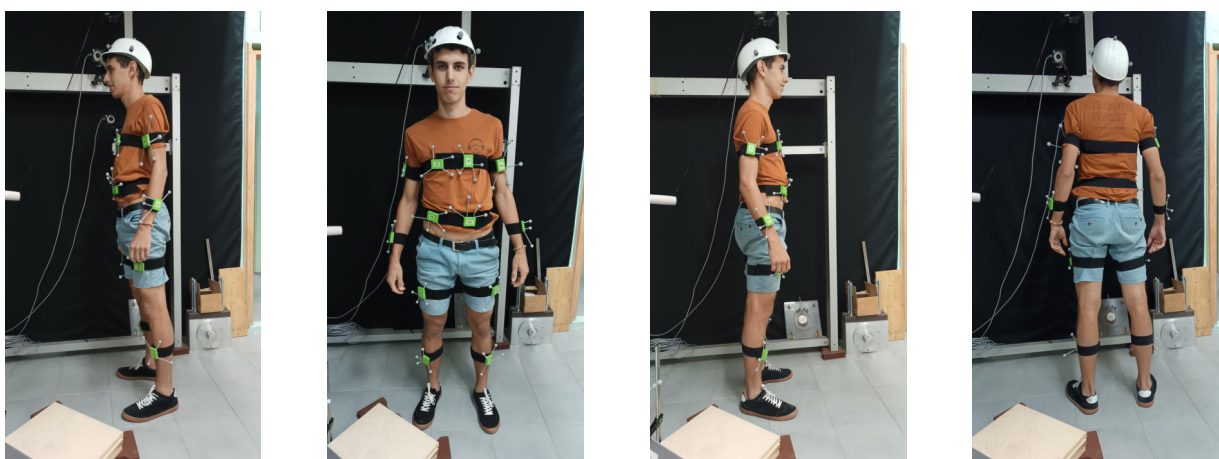


4.7. ábra. A roller elhelyezése



4.8. ábra. A roller rögzítése

Az előző alfejezetben láthattuk, hogy a mozgásdetektálásra használt neurális hálózatok valamilyen csontváz modellnek a pontjait generálják le, mint kimenet, mivel az a legkézenfekvőbb módja az emberi pózok leírásának. Ennek megfelelően a mérésünkben is arra törekedtünk, hogy a rolleres csuklópontjainak koordinátáit mérjük. A csuklópontokra nem tudunk markereket helyezni, mert a mozgás közben nagyon könnyen lemozdulnának, vagy ha rövid ideig nem látszanának a kamerák számára, akkor abban az idő intervallumban nem lenne információnk az adott csuklópont koordinátáiról. A csuklópontok felmarkerezése helyett 4 markerrel ellátott merev testeket helyeztünk el a rolleres tagjain, mivel esetünkben ezek a testrészek merev testnek tekinthetők. Összesen 13 merev testre volt szükség, mivel pontosan ennyi csuklópontot használhatunk ahhoz, hogy előállítsuk a csontváz modellt. A merev testek elhelyezése a 4.9 számú fotókon látható. Ezt követően egy markert sorra odatartottunk az egyes

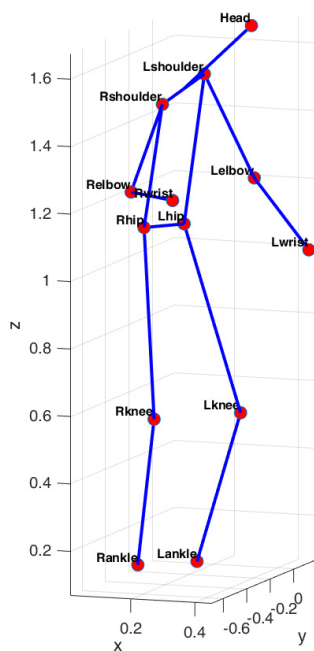


4.9. ábra. A merev testek elhelyezése a rolleresen

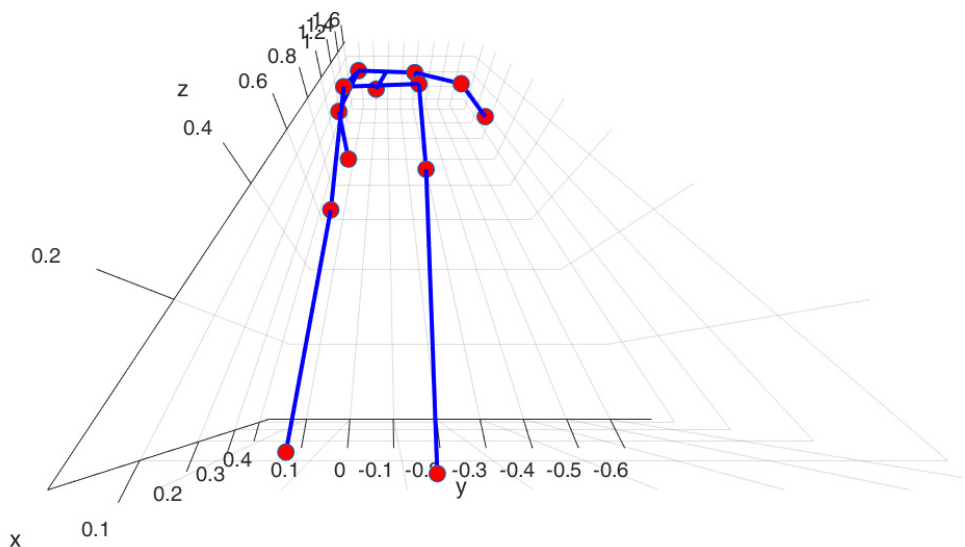
csuklópontokhoz, és a szoftverben összerendeltük a hozzá tartozó merev testtel. Tehát például a bal alkaron lévő merev testhez rendeltük hozzá azt a markert, amelyiket a bal csuklóhoz tartottunk. Az OptiTrack szoftvere rögzíti a merev testeket, és amennyiben nem elegendő számú markert látnak a kamerák, akkor ezeknek koordinátáiból ki tudja számítani, hogy hol található azok a markerek, amelyek épp nem látszanak. Az elegendő számú marker 3, amennyiben ezek nincsenek egy egyenesen. Azért érdemes 4 markert használni, mert könnyen előállhat, hogy valamelyik marker nem látszik adott pillanatban a kamerák számára (pl. kitakarja a rolleres vagy maga a merev

test). Miután elmentettük az adott merev testet, elvettük az adott csuklóponthoz tartott markert. Így ezeket később egyáltalán nem látta a kamerarendszer, de mivel hozzá volt rendelve egy testhez aminek markereit folyamatosan látta, ezért a szoftver minden pillanatban meg tudta határozni ezeknek három koordinátáját.

A mérés eredményeiből kiválasztottunk egy időpillanatot, és ábrázoltuk a csontvázmodellt. Ezt a 4.10. ábra mutatja. Ahhoz, hogy a kamera nézőpontját is meg tudjuk határozni, elhelyeztünk egy merev testet magán a kamerán is, így rendelkezésünkre állt a kamera pozíciójának és szöghelyzetének értéke az OptiTrack globális koordináta-rendszerében értelmezve. Ennek segítségével ki tudtuk rajzoltatni a csontvázmodellt abban a perspektivikus nézetben is, amit a kamera lát. Ezt mutatja a 4.11. ábra.



4.10. ábra. Az optitrack által rögzített csuklópontok alapján képzett 3 dimenziós csontváz modell



4.11. ábra. A csontváz modell a kamera nézőpontjából

4.5. A jármű-ember rendszer modellezése

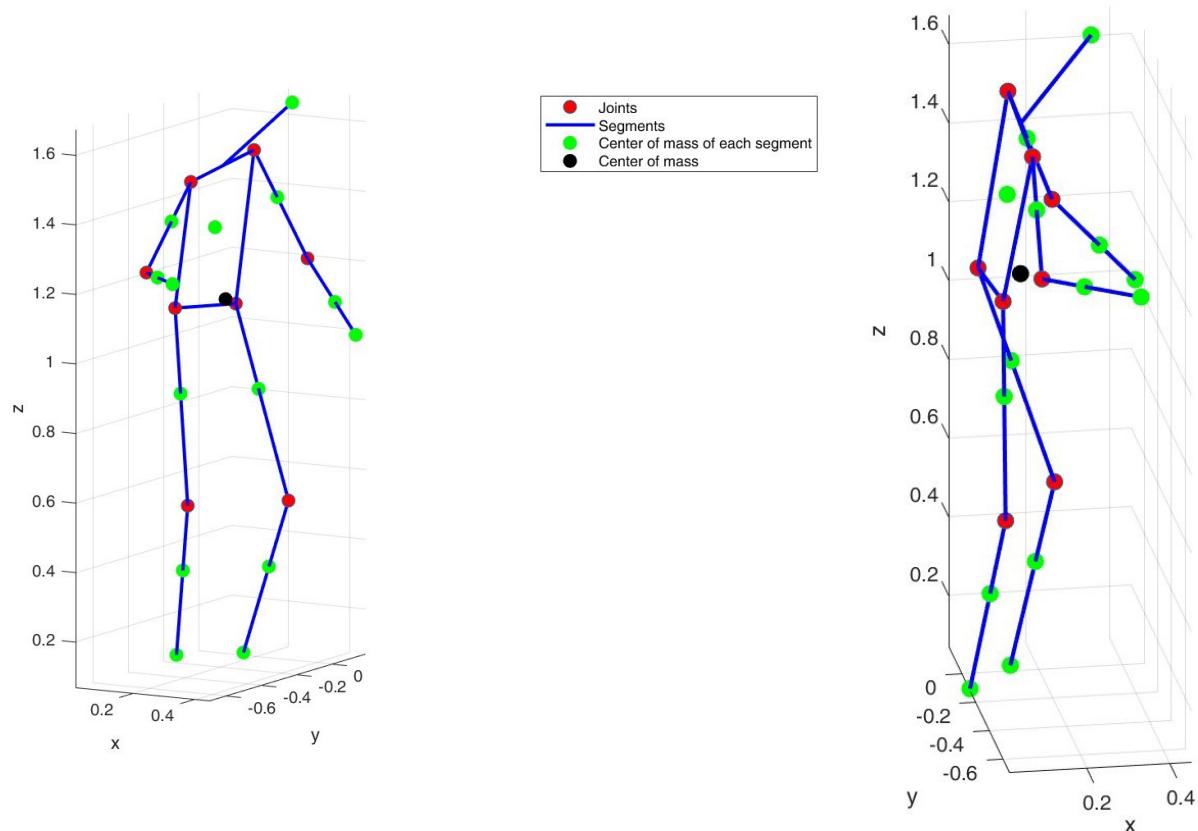
Az egyes csuklópontok pozíciójának és helyzetének adatai csak egy nagyon bonyolult mechanikai modell esetén lehetnének egyenként használhatók, amiben az embert egymáshoz csuklós kapcsolatokkal kapcsolódó merev testekkel kellene modellezni. Ennek egyszerűsítésére a súlypont helyzetén keresztül lehet megfogni azt, hogy a rolleres mozgása milyen hatással van a roller-rolleres dinamikai rendszer szabályozására.

A súlypont OptiTrack-mérés alapján történő meghatározására az egyes tagok tömege és távolsága alapján kerül sor:

$$\mathbf{r}_S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{r}_i, \quad (4.1)$$

ahol m_i az i -edik testrész tömege, α_i az i -edik testrész tömegaránya a teljes testtömeghez viszonyítva, $\mathbf{r}_i$ pedig

az i -edik testrész tömegközéppontjába mutató helyvektor. Az $\mathbf{r}_i$ vektort a megfelelő csuklópontok koordinátáinak súlyozott átlagolásával határoztuk meg. Az ehhez szükséges súlyozások pontosítják, hogy az adott testrész tömegközéppontja a testrész hosszának hány százalékánál található. Ezt, illetve az egyes tagok tömegarányát egy 2016-ban készült kutatásból [8] vettük át, amelyben több alanyon is meghatározták, hogy az egyes testrészeik mekkora tömegarányt képviselnek a teljes testsúlyban, illetve, hogy azok tömegközéppontja hol található. Ez alapján a meghatározott testrész-súlypontok, illetve a teljes test súlypontja látható a 4.12. ábrán.



4.12. ábra. Az egyes testrészek súlypontjai (zölddel), és a súlypont (feketével)

Az így történő súlypont meghatározást több okból is terhelheti hiba. Az első, hogy a kézfejet, lábfejet, és fejet illetően nem állt rendelkezésre több mérési pont, hogy előállítsuk a súlypontjukba mutató vektorokat, így a rendelkezésre álló csuklópontba összpontosítottuk a hozzájuk tartozó tömegjárulékot, és a csuklópont koordinátaival számoltunk. Újabb hibát okoz az a tény, hogy a csuklópontok nem a valódi csuklópontok középpontjában helyezkednek el, hanem azok peremén, ott, ahol a markert elhelyeztük az OptiTrack-mérés során. A harmadik hibaoknak pedig az az alapja, hogy szakirodalomból átvett értékekkel határoztuk meg a súlypont- és tömegarányokat, ezek az értékek pedig nem pontosan illeszkednek bármely emberre, tehát például ha egy felnőtt férfi esetében a felnőtt férfira kimért átlagos értékeket használjuk, akkor is keletkezik természetesen eltérés a valóságtól.

Ezek a hibák aránylag kicsinek tekinthetők, illetve az átlagszámítás során a különböző előjelű hibák egymás kiütésével akár csökkenhetik is az eltérést, tehát az így számolt tömegközéppont jó közelítésnek tekinthető.

A fent leírt Optitrack-méréssel egy időben kamerafelvételt is készítettünk a sárvédőre szerelt kamerával. Az

így rögzített videóból kerültek kiválasztásra a neurális hálók tesztelésénél használt képek. Ahhoz, hogy az így számított súlyponttal összehasonlíthassuk a 2 dimenziós csontváz modellt készítő YOLO neurális háló eredményét, szükséges a 3 dimenziós térben lévő pont leképezése a kamera detektorának síkjára. A leképezés első lépése egy forgatási és egy eltolási transzformáció, amivel az OptiTrack koordináta-rendszerében lévő pontokat a kamera koordináta-rendszerébe képezzük le:

$$\mathbf{r}_{P(x,y,z)} = \mathbf{T} \left(\mathbf{r}_{P(X,Y,Z)} - \mathbf{r}_{\text{cam}(X,Y,Z)} \right), \quad (4.2)$$

ahol $\mathbf{r}_{P(x,y,z)}$ egy tetszőleges P pont helyvektora a kamera koordináta-rendszerében, $\mathbf{r}_{P(X,Y,Z)}$ ugyanazon pont helyvektora az OptiTrack koordináta-rendszerében, $\mathbf{T}$ a fogatási mátrix (esetünkben egy tengely körül van csak elfogatva a kamera az OptiTrack koordináta-rendszerében), és $\mathbf{r}_{\text{cam}(X,Y,Z)}$ a kamera helyvektora szintén a (X, Y, Z) koordináta-rendszerben, ezzel végezzük az eltolást. Ezt követően ezeket a pontokat a detektor síkjára képezzük le centrális (perspektivikus) vetítéssel:

$$\mathbf{r}_{P(u,v,w)} = \mathbf{K} \mathbf{r}_{P(x,y,z)}, \quad (4.3)$$

ahol $\mathbf{K}$ a centrális vetítést megvalósító leképezés mátrixa, $\mathbf{r}_{P(u,v,w)}$ a leképzett pont helyvektora a detektor koordináta-rendszerében. Összesítve a (4.2) és (4.3) egyenleteket a teljes leképezés:

$$\mathbf{r}_{P(u,v,w)} = \mathbf{K} \mathbf{T} \left(\mathbf{r}_{P(X,Y,Z)} - \mathbf{r}_{\text{cam}(X,Y,Z)} \right) \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} u_P \\ v_P \\ w_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & C_u \\ 0 & f_v & C_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\gamma) & -\sin(-\gamma) & 0 \\ \sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{\text{cam}} \\ Y_{\text{cam}} \\ Z_{\text{cam}} \end{bmatrix} \right). \quad (4.5)$$

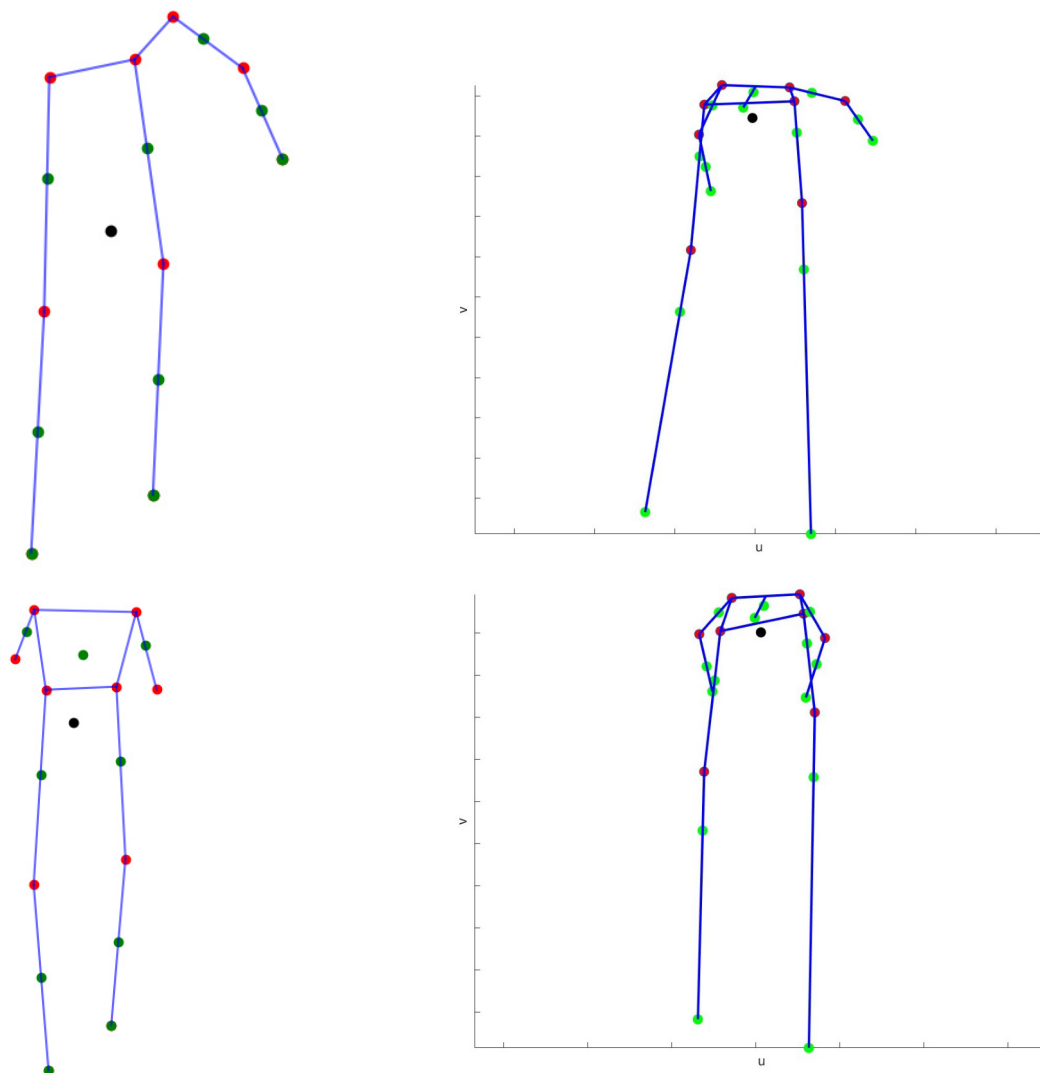
Az itt szereplő C_u és C_v paramétereket nullának vettük fel, mivel ezek csak az eltolásban játszanának szerepet, és ez jelenleg nem releváns. Az f_u és f_v fókusztávolságokat a kamera kalibráció során határoztuk meg. A γ szög a kamera Z tengely pozitív irányban történő elfordulásának szöge. Azért $(-\gamma)$ szerepel a mátrixban, mert koordináta-rendszer γ szöggel történő elforgatása a pontok koordinátáinak szempontjából ekvivalens a helyvektorok $(-\gamma)$ szöggel történő elforgatásával. Az így kapott $\mathbf{r}_{(u,v,w)}$ vektort a harmadik koordinátával lenormálva az

$$\mathbf{r}_{(u,v,w)}^* = \frac{\mathbf{r}_{(u,v,w)}}{w_P} = \begin{bmatrix} \frac{u_P}{w_P} \\ \frac{v_P}{w_P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

végleges vetített koordinátákat kapjuk. A harmadik koordináta csupán a transzformáció invertálhatóságát biztosítja, így ez elhagyható. Az első két koordináta felel meg a detektor síkján lévő koordinátáknak.

A YOLO neurális háló által generált csontváz modell alapján szintén meghatároztuk a súlypont koordinátáit, ugyanazzal a módszerrel ahogy az OptiTrack adatainál tettük. Kiszámítottuk az egyes testrészek tömegközéppontját, és összegeztük ezeket a teljes testre vonatkoztatott tömegarányokkal súlyozva. A 4.13. ábrán a 4.6. ábrán látható csontváz modellek, illetve a hozzájuk tartozó OptiTrack adatai alapján generált csontváz modellek figyelhe-

tők meg. Mindkét esetben megjelenítettük az egyes testrészek súlypontjait és a teljes csontváz modell súlypontját is. Az OptiTrack adatai alapján generált csontváz modell esetében a fent leírt forgatási és eltolási transzformáción, illetve a centrális vetítésen átesett pontokat mutatjuk, hogy valóban összehasonlíthatóak legyenek az eredmények, hiszen ez esetben mindkettő kép a detektor síkjában van. Az ábrákon jól látható, hogy a YOLO neurális háló



4.13. ábra. A súlypontok összehasonlítása két különböző idő pillanatban (balra: YOLO, jobbra: OptiTrack, a súlypontok feketével)

valóban egy 2 dimenziós csontváz modellt próbál az emberre illeszteni, és a kamera számára nem látszó csuklópontokat nem tudja detektálni. Azonban a csuklópontok elhelyezkedésében való eltérésért nem csak a neurális háló pontatlansága a magyarázat, hanem az a tény is, hogy az OptiTrack által rögzített pontok a valós csuklóponton kívül elhelyezett marker pozícióját ábrázolják, míg a YOLO neurális háló pedig a csuklópontok közepét detektálja. Az első esetben nagyon nagy eltérés látható, mivel a teljes csontváznak csak töredékét volt képes detektálni a neurális háló, és a súlypont számításához használt tömegarányokat ilyenkor a meglevő testrészek között osztjuk szét, a nekik megfelelő arányokban. Ez esetben tehát a lábak és a jobb kar alapján került meghatározásra a súlypont. A második ábrán viszont már egy sokkal pontosabb predikciót láthatunk, annak ellenére, hogy itt is hiányzik néhány testrész a predikcióból.

4.6. Lehetőségek súlypont prediktáló rendszer fejlesztésére

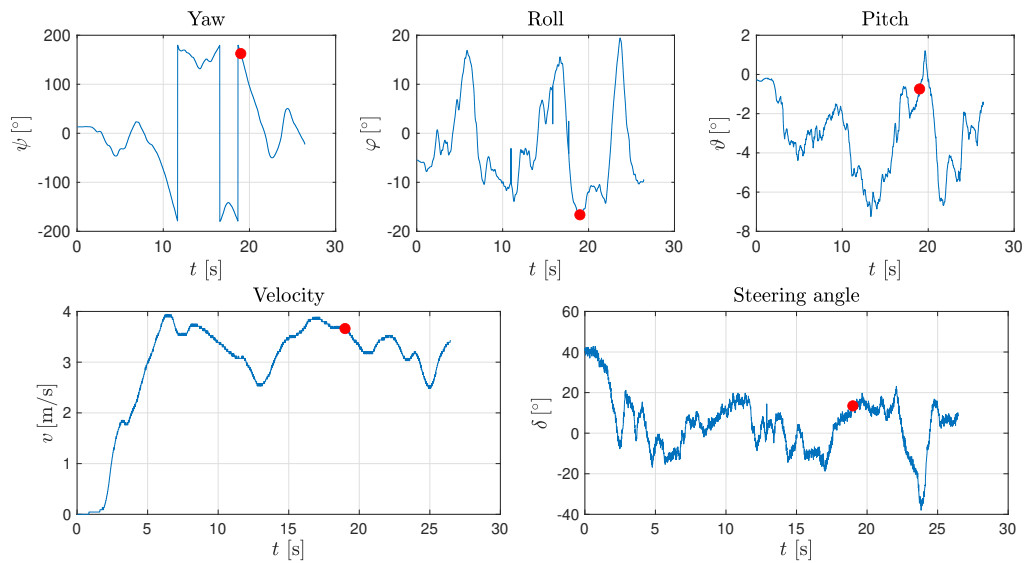
A bemutatott technikát alkalmazva nem csak a neurális hálózatok által generált csontváz modellt tudjuk összevetni a valósággal, de akár neurális hálózatok tanítását, fejlesztését is el tudjuk végezni. Ennek módja az lehetne, hogy a videó felvétel képeiből alkotnánk a neurális háló bemenetét, a várt kimeneti érték pedig a súlypont három koordinátája lenne. A referencia adatot szolgáltatathatnák az OptiTrack rendszerrel történő mérések eredményeivel. Továbbá specifikálhatnánk a neurális hálózatot olyan kényszerek megadásával, amelyek lerögzítenének néhány adatot, csökkentve ezzel a tanulás során felmerülő lehetőségek számát. Ilyen lenne a lábfejek fix helyzetének megadása, vagy a kormányoszög, mint plusz információ rendelkezésre bocsátása. Így a roller geometriai adatait felhasználva meg lehetne adni a kézfejek pontos helyzetét is, ami azért is fontos, mert ezek általában a hátul elhelyezkedő kamera szemszögéből nem látszanak, kitakart helyzetben vannak.

5. Adatgyűjtésre felkészített roller

A szenzorokkal és mérésadatgyűjtő rendszerrel felszerelt rollert a 5.1. ábra szemlélteti, mellyel néhány próbamérést is elvégeztünk. Ennek eredményei közül mutatunk néhány grafikont az 5.2. ábrán. A pirossal jelölt adatponthoz tartozó pillanatképet kivágtuk a kamera által rögzített felvételtől, ez látható az 5.3. ábrán.



5.1. ábra. A szenzorokkal és mérésadatgyűjtő rendszerrel felszerelt elektromos roller



5.2. ábra. Mérési eredmények ábrázolása (a mennyiségek: legyezési-, dőlés-, és bólintási szög, az F pont $\mathcal{F}_5$ koordináta-rendszerben vett x_5 irányú sebessége, kormányaszög)



5.3. ábra. Pillanatkép a mérésből

6. Konklúzió

Összességében az látható, hogy míg maga a roller mozgásállapotának kísérleti vizsgálata viszonylag könnyen megoldható, addig a rolleres beavatkozásairól és szabályozásának hatásairól meglehetősen nehéz információt gyűjteni. Annak érdekében, hogy mégis pontos adatok birtokába kerüljünk mind a mechanikai modellek pontosítása, mind a különböző neurális hálózatok és tanulási algoritmusok fejlesztése eszközként tárul elénk. A tanuló algoritmu-

sok önmagukban nehezen specifikálják az információt és jó modellek nélkül nagyon sok felesleges szempontot vizsgálnak, ugyanakkor ha önmagukban csak mechanikai modelleket elemzünk, akkor hamar nagyon összetett és bonyolult rendszerekben találjuk magunkat, amiket elengedhetetlen további kísérleti információval kiegészíteni. Így e kettő terület együttes használata elvezethet minket arra az optimumra, ahol a nehezen és bonyolultan modellezhető részletekből kiemelhető a lényeg és ezáltal kellően pontos, de nem túl bonyolult modell képezhető.

A jármű-ember rendszer vizsgálata nem csupán forgalomtechnikai szempontból lehet hasznos, hanem a szabályozástechnika terén is előrelépést jelenthet, ugyanis az ember szabályozása időkésést tartalmaz. Az időkésés számos gépészeti rendszerben elhanyagolható, mert az az idő, amit a számítások igényelnek, az informatikai rendszerek gyors fejlődésének köszönhetően, már milliszekundumokban mérhetők. Azonban az informatika fejlődésével párhuzamosan az különböző mérnöki problémák is egyre komplexebbé váltak, és egyre precízebb megoldásokat igényelnek, ahol már sok esetben elengedhetetlen az ennyire csekélynek tűnő időkésés figyelembevétele is. Az elektromos rollerrel való kísérletezés e terület új aspektusainak vizsgálatára is lehetőséget kínál.

A dolgozat keretében szenzorokkal és mérésadatgyűjtő rendszerrel felszerelt roller számos különböző mérés elvégzésére alkalmas. Lehetőség nyílik olyan emberi szabályozási feladatok kísérleti vizsgálatára, amelyekben a rolleresnek adott pályán kell haladnia járművel [4], különböző sebességek esetén kell stabilizálnia a rollert, vagy akár gyorsan bekövetkező változásokra kell reagálnia. Mindezek vizsgálata alapján jobban megérthetjük, hogy milyen lehetőségek és veszélyek rejlenek a mikromobilitási járművek használatában, és hogyan tudjuk az előbbieket minél inkább kihasználni, míg utóbbiakat minimálisra csökkenteni [2].

A neurális hálózatok további tanítása és fejlesztése a korábban említett specifikációk mellett akár oda is vezethet, hogy előrejelezhetővé válik a rolleres mozgása egy bizonyos idő ablakon belül. Ez lehetőséget biztosíthat arra, hogy a felhasználó számára visszajelzést küldjünk a mozgásállapotról, vagy akár aktuátorok segítségével avatkozzunk be esetleges veszélyhelyzetek elkerülése végett [5].

Hivatkozások

- [1] Whipple, F.J.W.: The stability of the motion of a bicycle. *Quart. J. Pure Appl. Math.* pp. 312–348 (1899)
- [2] Klinger, F., Klinger, M., Edelmann, J., Plöchl, M. (2022). Electric Scooter Dynamics – From a Vehicle Safety Perspective. In: Orlova, A., Cole, D. (eds) *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II. IAVSD 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_102
- [3] Moore, J.K.: Human control of a bicycle. Ph.D. thesis, University of California (2012)
- [4] Edelmann, J., Haudum, M., Plöchl, M.: Bicycle rider control modelling for path tracking. *IFAC-PapersOnLine* 48(1), 55–60 (2015). DOI 10.1016/j.ifacol.2015.05.070
- [5] Chen, CK., Dao, TS. Fuzzy Control for Equilibrium and Roll-Angle Tracking of an Unmanned Bicycle. *Multibody Syst Dyn* 15, 321–346 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11044-006-9013-7>
- [6] Horvath, H.Z., Takacs, D. Balancing riderless electric scooters at zero speed in the presence of a feedback delay. *Multibody Syst Dyn* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11044-024-10019-z>
- [7] I. Sárándi, T. Linder, K. O. Arras and B. Leibe, "MeTRAbs: Metric-Scale Truncation-Robust Heatmaps for Absolute 3D Human Pose Estimation," in *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, vol. 3, no. 1, pp. 16-30, Jan. 2021, doi: 10.1109/TBIOM.2020.3037257. <https://doi.org/10.1109/TBIOM.2020.3037257>
- [8] R. Hari Krishnan, V. Devanandh, Aditya Kiran Brahma, S. Pugaznenti Estimation of mass moment of inertia of human body, when bending forward, for the design of a self-transfer robotic facility, *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 11, No. 2 (2016) 166 - 176
- [9] <https://docs.ultralytics.com/models/>
- [10] <https://www.taoglas.com/product/edge-locate/>
- [11] https://www.novotechnik.com/resources/data-sheets/rotary-touchless/39_DS_120_RFD-4000_Ratiometric--enUS.pdf
- [12] <https://www.aliexpress.com/i/1005005891022509.html>
- [13] https://code7700.com/images/clipart/gps_satellite_4.png
- [14] <https://www.smlase.com/wp-content/uploads/2022/05/Hall-effect-Sensor.png>
- [15] <https://www.researchgate.net/profile/Cristiano-P/publication/342396504/figure/fig3/AS:905648120287233@1592934746419/Classic-Differential-GNSS-DGNSS.png>