

# Elektromos roller dinamikájának kísérleti vizsgálata

## Experimental analysis of electric scooter dynamics

MAGYARI Zsombor<sup>1</sup>, ZANA Roland Reginald<sup>1</sup>, TAKÁCS Dénes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék,  
1111 Budapest Műegyetem rkp. 5., mzsombor@outlook.hu, zana\_r@mm.bme.hu, takacs@mm.bme.hu

### Abstract

*In recent years, electric micromobility vehicles (e.g., electric scooters, unicycles, skateboards, one-wheels, and segways) have gained significant popularity. From both traffic and environmental perspectives, micromobility vehicles have benefits, as users can avoid traffic jams while they can also easily carry them on public transport. Furthermore, electric micromobility vehicles do not pollute the city's air. Controlling these vehicles poses a much more significant challenge for users. On the one hand, we mainly deal with tasks related to the control of spatial dynamical problems. On the other hand, the complex motion coordination of the human body is required for control. As a result, the spread of micromobility vehicles has also led to an increased number of road accidents involving personal injuries. Therefore, exploring the dynamics of the vehicle-human system is essential for making micromobility vehicles safer.*

*In our research, we managed to determine the physical quantities that need to be measured in order to experimentally gather information about the motion state of an electric scooter, and we also implemented this measurement in practice. Due to the small size of the vehicle, the rider's movement significantly influences the motion of the vehicle. Therefore, it is essential to gather information on how the riders move on the vehicle and how they pose their center of mass in different situations. In this study, we examine how accurately a neural network-based algorithm can determine the position of the rider's center of mass based on footage recorded by a camera.*

**Keywords:** micromobility, center of mass, state of motion, neural network, sensor, camera

### Kivonat

Az elmúlt években az elektromos mikromobilitási járművek komoly népszerűsége tettek szert kis tömegűeknek és kis méretűeknek köszönhetően. Mind forgalomtechnikai, mind környezetvédelmi szempontból előnyösek, mivel esetenként elkerülhetők velük a forgalmi dugók, míg más esetben könnyen szállíthatók a tömegközlekedési eszközökön. Elektromos mivoltuk miatt pedig a város levegőjét sem szennyezik. Irányításuk komoly feladat elé állítja a felhasználókat. Egyrészt többnyire térbeli gördülési feladatok szabályozásáról beszélünk, másrészt a szabályozási feladatban az emberi test összetett mozgáskoordinációjára van szükség. Ennek köszönhetően elterjedésükkel a személyi sérülésekkel járó közúti balesetek száma is megnőtt. Ezért a jármű-ember rendszer dinamikájának feltérképezése nélkülözhetetlen a mikromobilitási járművek biztonságosabbá tételében.

Kutatásunkban azzal foglalkozunk, hogy milyen fizikai mennyiségek mérése szükséges ahhoz, hogy kísérleti úton információt gyűjtsünk egy elektromos roller mozgásállapotáról, és ez hogyan valósítható meg a gyakorlatban. A jármű kis méretének köszönhetően az ember mozgása jelentősen befolyásolja a jármű mozgását. Ezért elengedhetetlen információt gyűjteni arról, hogy az ember milyen mozgást végez a járművön, hova helyezi a súlypontját különböző helyzetekben. Cikkünkben megvizsgáljuk, hogy egy kamera által rögzített felvétel alapján neurális háló alapú algoritmusokkal mennyire pontosan lehet meghatározni az ember súlypontjának helyzetét.

**Kulcsszavak:** mikromobilitás, súlypont, mozgásállapot, neurális háló, szenzor, kamera

## 1. BEVEZETÉS

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 sokszor azt is eredményezi, hogy kevésbé tapasztalt és/vagy a közlekedési szabályokkal kapcsolatban hiányos ismeretekkel rendelkező rolleresek jelennek meg az utakon. A felhasználók sokszor

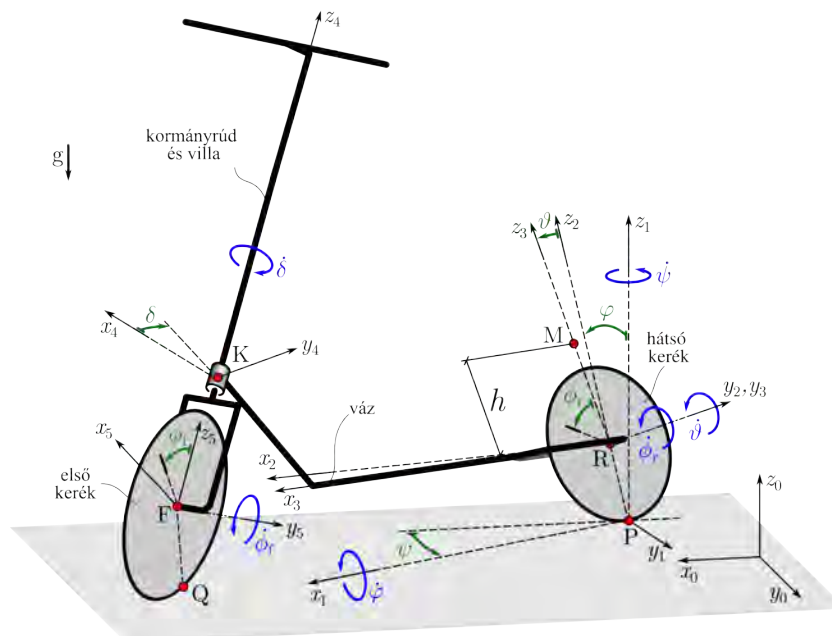
elszenvedői, sokszor okozói közötti baleseteknek, ezért több európai nagyvárosból már ki is tiltották ezeket az eszközöket. Éppen ezért azonban ezen járművek dinamikájának mélyebb megismerése hozzájárulhat ahhoz, hogy mind a járművek konstrukciós kialakítására, mind az őket érintő közlekedési szabályokra fejlesztési javaslatokat tegyünk. Ezen kívül kutatásunk támogathatja az autonóm közlekedési rendszerek fejlesztését is, hiszen az ilyen rendszerekben a kis méretű, de ahhoz képest nagy sebességgel közlekedő mikromobilitási eszközök mozgásának érzékelése nagy kihívást jelent.

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.

Cikkünkben egy elektromos roller mechanikai modelljén keresztül mutatjuk 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. Tehát az elektromos roller dinamikájának kísérleti vizsgálata nagy segítséget nyújthat a jármű-ember rendszer leírásában.

## 2. A ROLLER MECHANIKAI MODELLJE

A mechanikai modellünkben egy merev talajon gördülő rollert vizsgálunk, ld. 1. ábra. A térbeli mechanikai modell alapjául a Whipple-féle bicikli modell [1] szolgált, amely a szakirodalomban már sok helyen feldolgozásra került [2], így jelen cikkben csak röviden foglaljuk össze. A modellt alkotó dinamikai rendszer négy merev testből áll: első kerék, hátsó kerék, a kormányrúd/villa összeállítás, valamint a roller váza. Utóbbi kettőhöz kapcsolódik a roller mozgását szabályozó ember. A rollert alkotó négy merev test összesen  $4 \cdot 6 = 24$  szabadsági fokú a geometriai- és kinematikai kényszerek nélkül. Minden a modellben szereplő síksukló (az F, R és K pontokban) 3 transzlációs és 2 rotációs szabadsági fokot köt le, emiatt a rendszer a geometriai kényszerek alapján  $24 - 3 \cdot 5 = 9$  szabadsági fokkal rendelkezik.



1. ábra. Az elektromos roller térbeli mechanikai modellje [2] axonometrikus nézetben, az általános koordináták feltüntetésével.

A szakirodalmi modell feltételezi, hogy sík vízszintes talajon gördül a roller. Figyelembe véve a modellben emiatt jelenlévő kényszereket, az általános koordináták vektora:

$$\mathbf{q} = [X_R \ Y_R \ \psi \ \varphi \ \delta \ \phi_f \ \phi_r]^T, \quad (1)$$

ahol  $X_R$ ,  $Y_R$  a roller hátsó kerekének koordinátái a talajhoz rögzített koordináta-rendszerben,  $\psi$  a legyezési szög,  $\varphi$  a dőlési szög,  $\delta$  a kormánysszög,  $\phi_f$  és  $\phi_r$  pedig az első és hátsó kerekek saját forgástengelyeik körüli elfordulási szögei.

### 3. A ROLLER MOZGÁSÁLLAPOTÁNAK MÉRÉSE

Esetünkben, valós környezetben, a roller változatos útfelületen haladhat, így a Whipple-féle modell sík talajra vonatkozó feltételezései nem helytállóak. Így a  $q$  általános koordináta vektorból hiányzó  $Z_R$  koordináta és  $\vartheta$  bólintási szög 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. Az általános koordináták vektorát kiegészítve a fent leírt megfontolások alapján a

$$\mathbf{q}_m = [X_R \ Y_R \ Z_R \ \psi \ \varphi \ \vartheta \ \delta \ \phi_f \ \phi_r]^T \quad (2)$$

mérendő mennyiségek vektorát kapjuk.

#### 3.1. Pozíciómérés

A roller globális pozíciójának meghatározásához RTK GPS eszközt alkalmaztunk. A valós idejű kinematikán alapuló technológiával akár 5 cm-es pontosság is elérhető, amennyiben a folyamatos vezeték nélküli adatátvitel biztosított a rolleren található eszköz és a bázisállomás között, amely a pozíciókorrigálásához szükséges referencia adatokat szolgáltatja. Manapság a legtöbb alkalmazásban ez a kommunikáció már mobil interneten keresztül kerül megvalósításra. Mi is ezt a megoldást alkalmaztuk a járművön, melyre egy Taoglas EL20A típusú eszközt rögzítettünk az 1. ábrán látható M pontba helyezve annak antennáját. Az adatok elemzése során a roller geometriai jellemzőinek, valamint az orientáció ismeretében számítottuk ki az R pont pozícióját.

#### 3.2. Sebességmérés

A roller hosszirányú sebességét Hall-effektus alapú szenzor segítségével mértük, amely kifejezetten elterjedt a mikromobilitási járművek körében, mivel olcsó, könnyen megvalósítható, és ehhez képest nagy pontosságú megoldás. Az általunk használt rollert (Mi Electric Scooter 3) kefe nélküli elektromos motor működteti, így a szenzor már eleve beépítésre került a gyártó által. A motor szabályozásához felhasznált szenzor egyben a sebességadatok járművezető felé történő szolgáltatásáért is felel. Mi ennek a beépített szenzornak a jelét vezettük ki a saját adatrögzítő egységünkbe.

#### 3.3. A kormány szögelfordulásának mérése

A kormány szögelfordulása kulcsfontosságú információ a roller mozgásának előrejelzésének szempontjából. A kormány alapvető szerepet tölt be a roller irányításában, a rolleres többek között ezen keresztül végzi a jármű-ember rendszer irányítását. Tehát a kormány szögelfordulásának mérése nem csupán a mozgásállapot pillanatnyi helyzeteinek megállapításához vezet, hanem lehetőség arra, hogy következtessünk az ember szabályozási stratégiájára.

Kísérleti rollerünkön nem közvetlenül a kormányrúd szögelfordulását mérjük, hanem egy fogasszíf, és ehhez tartozó 1:1 áttételű fogasszíf tárcsák segítségével a szögelfordulást egy másik, párhuzamos tengelyre vezettük át az eredeti roller dizájnt minimálisan megváltoztatva. Itt került beépítésre a szenzor, ami egy a tengelyhez rögzített mágnesből és a mágnes fölé elhelyezett elektronikai egységből áll. Ebben Hall-effektus alapú elemek találhatók, így a mágneses mező elfordulása nagy pontossággal meghatározható. Az általunk használt Novotechnik RFD-4000, RFD-4021-736-223-411 típusú szenzor 0 – 360° tartományon mér 12 bites felbontással, azaz összességében  $360/1024 = 0.352^\circ$ -os pontosság érhető el vele.

#### 3.4. Szöghelyzetmérés

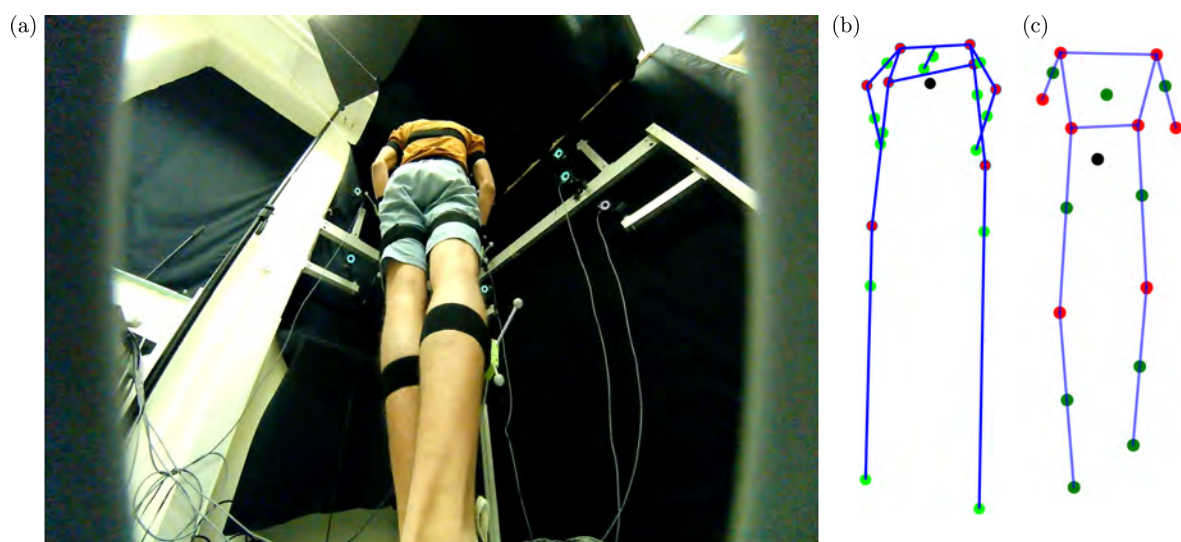
A mozgásállapot egyértelmű megállapítása végett szükséges mérni a roller vázának térbeli orientációját. Ehhez fontos definiálni a térbeli forgatások sorrendjét. Ahogy a mechanikai modell (ld. 1. ábra) is mutatja, az első forgatás a  $\psi$  legyezési szöggel történő forgatás. Ezt követi a  $\varphi$  dőlési szöggel történő forgatás, majd a  $\vartheta$  bólintási szöggel végrehajtott forgatás. Az általunk használt szenzor ennek a sorrendnek megfelelően szolgáltatja a váz szöghelyzetét leíró szögértékeket. A méréshez használt Bosch BNO085 típusú inerciális mérőegység (IMU) magnetométert, gyorsulásmérőt, és giroszkópot is tartalmaz. A legyezési szög mérését a magnetométer végzi a Föld mágneses terében, míg a dőlési szög, és a bólintási szög mérése a giroszkóp és a nehézségi erő irányának mérésének segítségével történik. Az adatlap alapján az IMU pontossága  $0.01^\circ$ .

#### 4. A ROLLERES MOZGÁSÁLLAPOTÁNAK DETEKCÍÓJA

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 stabilizálódjon. De a roller megkívánt mozgásának elérése érdekében (pl. adott pálya követése) is alkalmazzuk a tapasztalatszerzések során betanított emberi szabályozásunkat.

A rolleres alapvetően két különböző módon tud beavatkozni a roller irányításába. Az első szabályozási lehetőség a kormányzó szög változtatása, amelyet a kormányra kifejtett nyomaték segítségével tehetünk meg. A második beavatkozási lehetőség a lábak és a roller váza között fellépő belső erők/nyomatékok kifejtése. Ez egyúttal a rolleres súlypontjának pozíciójának és egyes testrészeinek helyzetének megváltoztatásával jár. Azért is különösen fontos ez, mivel a mikromobilitási eszközök esetében az ember tömege sokszorosa a jármű tömegének, így annak helyzete és mozgása erőteljesen befolyásolja a jármű mozgását. Tehát minél részletesebb 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. A kamera kiválasztásánál a legfontosabb szempont a széles látószög volt, mivel a rollereshez viszonylag közel tudtuk csak elhelyezni. Ez alapján végül egy 126°-os látószöggel rendelkező USB kamerát választottunk. Az általunk megvalósított alkalmazásban a kamera jelenleg 30 képkocka/másodperc sebességgel rögzít  $640 \times 480$  képpont felbontású képeket.

Az így keletkező képanyagból képelemző módszerek segítségével próbáljuk meg a számunkra értékes információt kinyerni. Az emberi mozgás teljes körű modellezése és analízise rendkívül bonyolult lenne ahhoz képest, hogy célunk csupán annak vizsgálata, hogy az ember dinamikai viselkedése milyen hatást gyakorol a jármű mozgására. Az egyik legegyszerűbben megfogható információ a súlypont helyzete, így ennek detekcióját tűztük ki célul. Ahhoz, hogy a súlypont helyzetét kellő pontossággal határozzuk meg képfelvételek alapján, neurális háló alapú képelemző algoritmusokat vizsgáltunk meg. Az elmúlt években elterjedtek azok az modellek, amik képesek különböző tárgyakat és élőlényeket felismerni képeken, illetve jellemzően ezek továbbfejlesztésével megszülettek azok a hálók, amik már az emberi pózról is információt adnak. Egy ilyen modell általában a csuklópontokat (bokák, térdék, csípők, vállak, könyökök, csuklók, fej) detektálja és azok összekötésével hoz létre egy csontvázmodellt. Ha már egy ilyen csontvázmodell rendelkezésre áll, akkor kiszámítható a teljes test súlypontjának pozíciója az alábbi módon. A csuklópontok alapján meghatározhatók az egyes tagok súlypontjainak pozíciói, illetve közelíthetők a tagok teljes testhez viszonyított tömegarányai, ld. [3]. A teljes csontvázmodell súlypontja így egyszerűen számítható az egyes tagokhoz tartozó súlyponti pozícióvektorok tömegarányval való súlyozott átlagaként.



2. ábra. (a) A rollerre szerelt kamerával készített pillanatkép, melyen az OptiTrack kamerarendszer és egy testrésze helyezett markercsoport is látható. (b) Az OptiTrack mozgáskövető rendszerével végzett mérés alapján létrehozott csontvázmodell. (c) A YOLOv8 model által prediktált csontvázmodell, és az ez alapján számolt súlypont.

Ahhoz, hogy az általunk vizsgált neurális háló alapú képfeldolgozás pontosságát ellenőrizhessük, OptiTrack mozgáskövető rendszerrel [4] is végeztünk méréseket, ld. 2a. ábra. Ehhez a rolleres egyes testrészeit merev



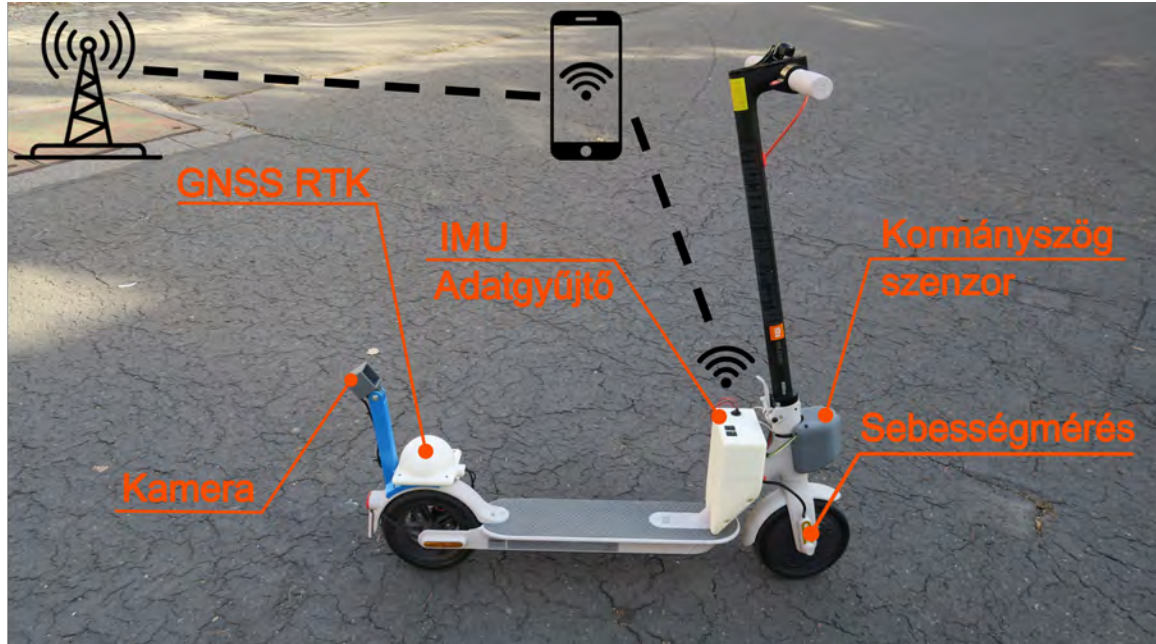
test marker csoportokkal láttuk el, a [6] irodalomban található megoldáshoz hasonlóan. Így század milliméter pontossággal tudtuk megállapítani az ember csuklópontjainak koordinátáit, majd ebből a fent leírt módon számítottuk ki a súlypont három koordinátáját, ld. 2b. ábra. Ezt a mérést statikus helyzetben végeztük, a roller rögzített helyzetében, mivel első sorban a rolleres rollerhez képest végzett mozgására voltunk kíváncsiak. Tehát az OptiTrack mozgáskövető rendszerével és a rollerhez rögzített kamera segítségével egyidejűleg készítettünk felvételt (ld. 2a. ábra). A felvételeket a YOLOv8 [5] neurális hálóval értékeltük ki, mivel ez egy nyílt forráskódú modell, ami ráadásul nagyon jó eredményekkel képez csontvázmodelleket. Ez a modell azonban csak két dimenzióban helyezi el a csuklópontokat, tehát egy síkbeli csontvázmodellt szolgáltat. Az összehasonlítás érdekében az OptiTrack által mért adatainkat térbeli forgatási leképezések segítségével, és centrális vetítés alkalmazásával képeztük le a kamera síkjára. A számítások elvégzésével kapott eredményeket a 2b,c. ábra szemlélteti.

A 2. ábra egy olyan esetet szemléltet, amikor a kamera által nem látott testrészek csuklópontjait nem tudja detektálni a YOLOv8 algoritmus. De emellett nagy különbség állapítható meg a súlypont helyzetében is. Az eltérések magyarázataként fontos megemlíteni, hogy a YOLOv8 modell egy általános célra feltanított háló, a mi esetünkben pedig nagyon speciális nézőpontból készült a felvétel. Továbbá az is egy hibaforrás, hogy a modell a csuklópontok közepét detektálja, míg az OptiTrack-el történő mérés során a csuklópontokat azonosító markereket azok külső felületén helyeztük el, a pontos anatómiai pontok (ld. [6]) helyett.

Az eredmények tükrében elmondható, hogy már egy általános célokra feltanított neurális háló is a vártnál jobb eredményekre volt képes. Így bízhatunk abban, hogy egy speciálisan a feladatra betanított neurális háló még jobb eredményeket érhet el, hozzájárulva ezzel a mikromobilitási eszközök mozgásának és azok emberi szabályozásának megértéséhez, illetve előrejelezhetőségéhez.

## 5. AZ ADATGYŰJTÉSRE FELKÉSZÍTETT ROLLER

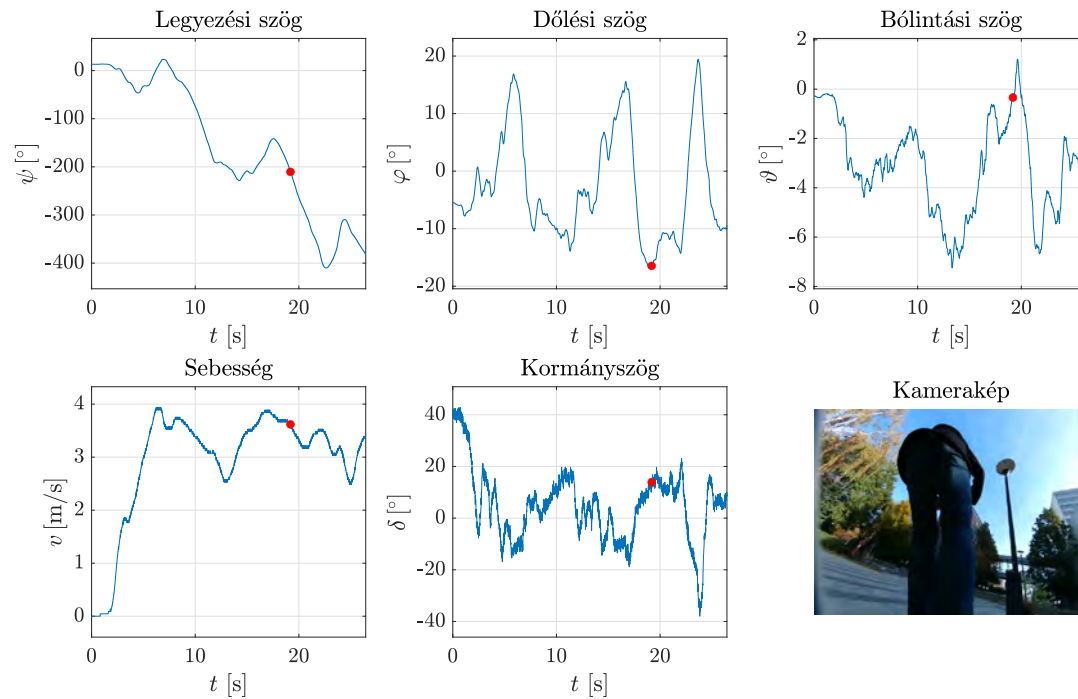
A szenzorokkal és mérésadatgyűjtő rendszerrel felszerelt rollert a 3. ábra szemlélteti, mellyel néhány próbamérést is elvégeztünk. Ennek eredményei közül a 4. ábrán látható egy rollerezés során rögzített adatsor. A pirossal jelölt adatponthoz tartozó kamerakép szintén látható.



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

## 6. KONKLÚZIÓ

A kutatás keretében elkészített szenzorokkal ellátott roller lehetőséget nyújt az ember-roller dinamikai rendszer mozgásáról való adatgyűjtésre, és egyedi lehetőséget biztosít az emberi szabályozás feltérképezéséhez, akár normál közúti forgalomban.



4. ábra. Mérési eredmények ábrázolása

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által megítélt NKFI-146201 számú projekt támogatásával készült.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Whipple, F.J.W. *The stability of the motion of a bicycle*, Quart. J. Pure Appl. Math. pp. 312–348, 1899.
- [2] Horváth H. Zs., Takács 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>
- [3] R. Hari Krishnan, V. Devanandh, Aditya Kiran Brahma, S. Pugaznenth *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
- [4] Mihályi L., Ji Xunbi A., Orosz G., Dénes T. *Data Collection for Learning the Dynamics and Control of an Electric Unicycle*, The Evolving Scholar - BMD 2023, 5th Edition (2023) pp. 1-2. , 2 p.
- [5] Ultralytics. (2023). YOLOv8: Real-Time Object Detection and Segmentation.
- [6] Nagymáté G., Kiss R. *Affordable gait analysis using augmented reality markers.*, Budapest, 2019, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319>