

Elektromos roller és vezetőjének dinamikai modellezése

Dynamical modelling of an electric scooter and its rider

MAGYARI Zsombor¹, KÖPECZI-BÓCZ Ákos Tamás¹, TAKÁCS Dénes¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5., +36 1 463 1369

Abstract

In recent years, electric micromobility vehicles (e.g., electric scooters, unicycles, skateboards) have gained significant popularity. This is due to their low weight and compact size, making them particularly useful for urban transportation. Micromobility vehicles offer both logistical and environmental advantages, as their use helps avoid traffic congestion and they can be easily integrated with public transport. Furthermore, electric micromobility devices do not contribute to urban air pollution. However, it is important to note that controlling these vehicles is considerably more challenging for users compared to traditional transport modes. On one hand, we face tasks related to the control of complex spatial dynamical problems; on the other hand, operation requires the intricate movement coordination of the human body. Consequently, the proliferation of micromobility vehicles has led to an increase in the number of road accidents involving personal injury. Therefore, exploring and understanding the dynamics of the vehicle-human system is essential for enhancing the safety of micromobility devices and relevant traffic regulations. In our research, we examined mechanical models suitable for the dynamical analysis of electric scooters, with an emphasis on incorporating the rider's control strategies.

Keywords: micromobility, electric scooter, rider modelling

Kivonat

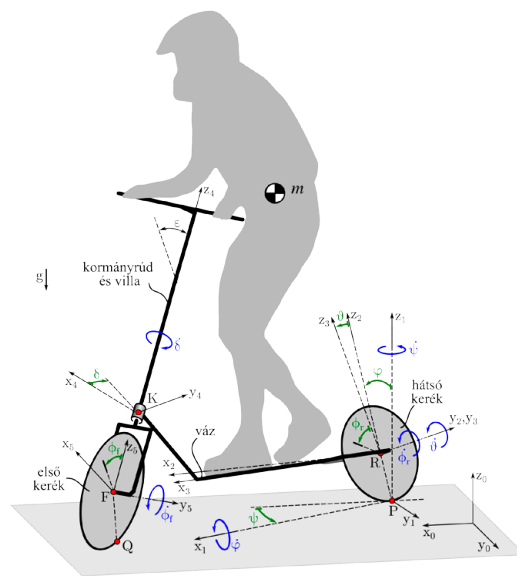
Az elmúlt években az elektromos mikromobilitási járművek (pl. elektromos rollerek, egykerekek, gördeszkák) jelentős népszerűsége tettek szert. Ez kis tömegüknek és méretüknek köszönhető, ami különösen hasznossá teszi őket a városi közlekedésben. A mikromobilitási járművek mind közlekedési, mind környezetvédelmi szempontból előnyösek, mivel használatukkal elkerülhetők a forgalmi dugók, ugyanakkor könnyen kombinálhatók tömegközlekedéssel is. Továbbá, az elektromos mikromobilitási eszközök nem szennyezik a város levegőjét. Fontos azonban megjegyezni, hogy ezen járművek irányítása a hagyományos járművekhez képest sokkal nagyobb kihívást jelent a felhasználók számára. Egyrészt főként térbeli dinamikai problémák irányításával kapcsolatos feladatokkal szembesülünk, másrészt az irányításhoz az emberi test összetett mozgáskoordinációjára is szükség van. Ennek következtében a mikromobilitási járművek elterjedése a személyi sérüléssel járó közúti balesetek számának növekedéséhez is vezetett. Ezért a jármű-ember rendszer dinamikájának feltárása és megértése elengedhetetlen a mikromobilitási eszközök és a vonatkozó közlekedési szabályozások biztonságosabbá tételéhez. Kutatásunkban megvizsgáltuk az elektromos rollerek dinamikai vizsgálatához használható mechanikai modelleket, hangsúlyt fektetve a vezető szabályozási stratégiájának figyelembevételére.

Kulcsszavak: mikromobilitás, elektromos roller, vezető modellezése

Általánosságban elmondható, hogy a mikromobilitási eszközök — mint például az elektromos rollerek — dinamikai szempontból kifejezetten instabil konstrukciók. A vezetőjük által kívánt mozgás megvalósításához elengedhetetlen valamilyen formájú aktív szabályozás (például egy adott pálya követéséhez). Mindezt tanult emberi irányítási stratégiák segítségével valósítja meg a vezető, ld. [1]. A vezető három fő módon befolyásolhatja a roller mozgását: a hajtott kerékre ható nyomaték segítségével, a kormányzott kerékre kifejtett kormányzási nyomatékkal, valamint vezető és a roller váza között átvitt erők és nyomatékok segítségével. Utóbbi hatás jelentősen befolyásolja a jármű irányítását, mivel egy elektromos roller esetében a vezető tömege nagyjából ötszöröse a járművének. Tehát a vezető beavatkozásainak feltérképezéséhez és irányítási stratégiájának megértéséhez elengedhetetlen információt gyűjtenünk az ember vezető járműhöz képesti mozgásáról.

1. MECHANIKAI MODELL

Az elektromos roller vezetőjének modellezése jelentős kihívást jelent, mivel az ember, mint biomechanikai rendszer, rendkívül összetett. Az emberi test részletes - akár komplex biomechanikai modellekkel történő - leírása mind analitikus számítások során, mind a numerikus szimulációkban nagyban bonyolítja a dinamikai rendszer vizsgálatát. Ezért a legtöbb dinamikai modellezés során törekszünk azon tulajdonságok megragadására, amelyek valóban meghatározóak a mozgás leírása szempontjából. A roller esetén az egyik ilyen jellemző a vezető tömegközéppontjának helyzete. A szakirodalomban a hasonló mikromobilitási eszközök vezetőjét gyakran egy rúd végén elhelyezett tömegpontként [2, 3], vagy több tömegpont elhelyezésével [4] modellezik. Így kutatásunkban, az 1. ábrán látható módon, a szakirodalomból ismert Whipple-féle dinamikai modellt [5] kiegészítettük a vezető tömegközéppontját reprezentáló tömegponttal. Annak érdekében, hogy megközelítésünk később alkalmas legyen szimulációs modellek validálására vagy a mozgás megbízható előrejelzésére, ezen tömegközéppont térbeli helyzetének rendkívül pontos ismerete szükséges. A tömegközéppont helyzetének precíz nyomon követése lehetővé teszi a vezető és a jármű közötti interakciók számszerűsítését, amelyeket az egyszerűbb modellek gyakran elhanyagolnak. Ezen adatok nélkül az analitikus modellek által meghatározott stabilitási kritériumok csupán becsléseken alapulnának, amelyek nem vennék figyelembe a vezető tömegelhelyezésének jelentős hatását.



1. ábra. Az elektromos roller és vezetőjének térbeli mechanikai modellje axonometrikus nézetben az általános koordináták feltüntetésével [6]

2. A ROLLER MOZGÁSÁLLAPOTA

A vizsgált mechanikai modell (ld. 1. ábra) alapján a roller négy merev testből áll (váz, kormány-villa egység, és két kerék), amelyek között síkcuklók teremtenek kapcsolatot. A sík talajon gördülés két geometriai kényszert és négy további kinematikai kényszert jelent a rendszerre nézve, azaz összességében a modell 7 általános koordináta segítségével írható le:

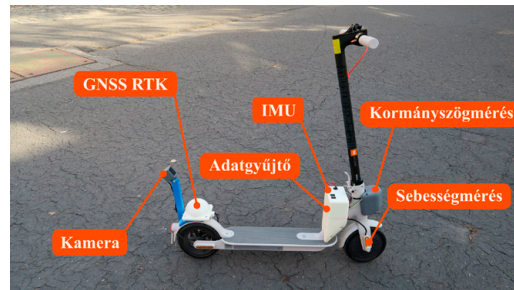
$$\mathbf{q} = [X_R \ Y_R \ \psi \ \varphi \ \delta \ \phi_f \ \phi_r]^T, \quad (1)$$

melyek jelentését az 1. ábra szemlélteti. Az elektromos rollerek valós környezetben való használata során azonban nem élhetünk a sík talajon való rollerezés feltételezésével, illetve a tiszta gördülés sem feltétlenül biztosított. Ezért a kutatásunkban tervezett kísérletek során a következő mennyiségek mérésére van szükség:

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

A hátsó kerék pozíciójának (X_R , Y_R , Z_R) méréséhez egy nagy pontosságú GNSS (Global Navigation Satellite System) és RTK (Real Time Kinematics) alapú modullal szereltük fel az elektromos rollert (ld. 2. ábra), így kevesebb mint 5 centiméteres hibával történhet a pozíciómeghatározás. A jármű vázának térbeli szöghelyzetét (ψ , φ , ϑ) egy IMU (Inertial Measurement Unit) segítségével van lehetőségünk mérni. Itt fontos megjegyezni, hogy a Euler-szögek sorrendjének definiálása elengedhetetlen; ez az 1. ábrán látható módon történt. A kormányzószög (δ) méréséhez egy Hall-effektus alapú szenzorokkal felszerelt egységet használtunk, ami körülbelül 0.35°

pontossággal rögzíti a kormányaszög értékeit. Végül az első kerék szögelfordulását (ϕ_f) szintén Hall-effektus alapú szenzor segítségével tudjuk mérni, azaz a szögelfordulás értéke jelszámlálással meghatározható (hasonlóan, mint a kereskedelemben kapható kerékpár sebességmérők többségénél). A hátsó kerék szögelfordulását nem mérjük, de amennyiben a gördülés feltételét elfogadjuk, vagyis ha nincsen szó csúszási jelenségről, akkor ennek szöghelyzete a bemutatott mért mennyiségek alapján kiszámítható. A pozíciómérés 10 Hz-es, minden egyéb mérés 100 Hz-es mintavételezési frekvenciával történik.



2. ábra. A szenzorokkal felszerelt elektromos roller.

3. A VEZETŐ TÖMEGKÖZÉPPONTJÁNAK POZÍCIÓJA

3.1. A vezető mozgásának megfigyelése

A rollerező megfigyelése rendkívül összetett feladat, mivel az emberi test egy sok szabadsági fokkal rendelkező, erősen tagolt rendszer. Emiatt különféle megközelítéseket fejlesztettek ki a vezetőre vonatkozó információk gyűjtésére (például nyomatékszenzor a kormányon, nyomásszenzorok a vázon), de ezek gyakran csak a mozgás korlátozott aspektusairól szolgáltatnak adatokat. Az elmúlt években a gépi látás és a gépi tanulási technikák fejlődésével új módszerek jelentek meg, amelyek lehetővé teszik az emberi mozgás átfogóbb megfigyelését.

Az egyik ilyen megközelítés a mélytanulás alapú pózbecslő (pose estimation) algoritmusok alkalmazása, amelyek képesek kapcsolatot teremteni a vezetőről készült kép és a testtartása között. Ezek az algoritmusok azonosítani tudják az emberi test kulcspontjait (például az ízületeket), és képesek rekonstruálni a rollerező testtartását 2D-s vagy 3D-s térben. Számos modellt fejlesztettek ki erre a célra, amelyek mindegyike rendelkezik saját erősségekkel és gyengeségekkel.

Esetünkben a fókusz a vezető tömegközéppontjának becslésén van, mivel ez dinamikai szempontból alapvető fontosságú. Természetesen a bemutatott modellek módosíthatók úgy, hogy alkalmasak legyenek erre a konkrét feladatra. A kutatás célja, hogy az elektromos rollerre szerelt kamera segítségével képi adatokat rögzítsünk a vezetőről, majd a rögzített képek megfelelő feldolgozásával meghatározzuk a rollerező tömegközéppontjának helyzetét.

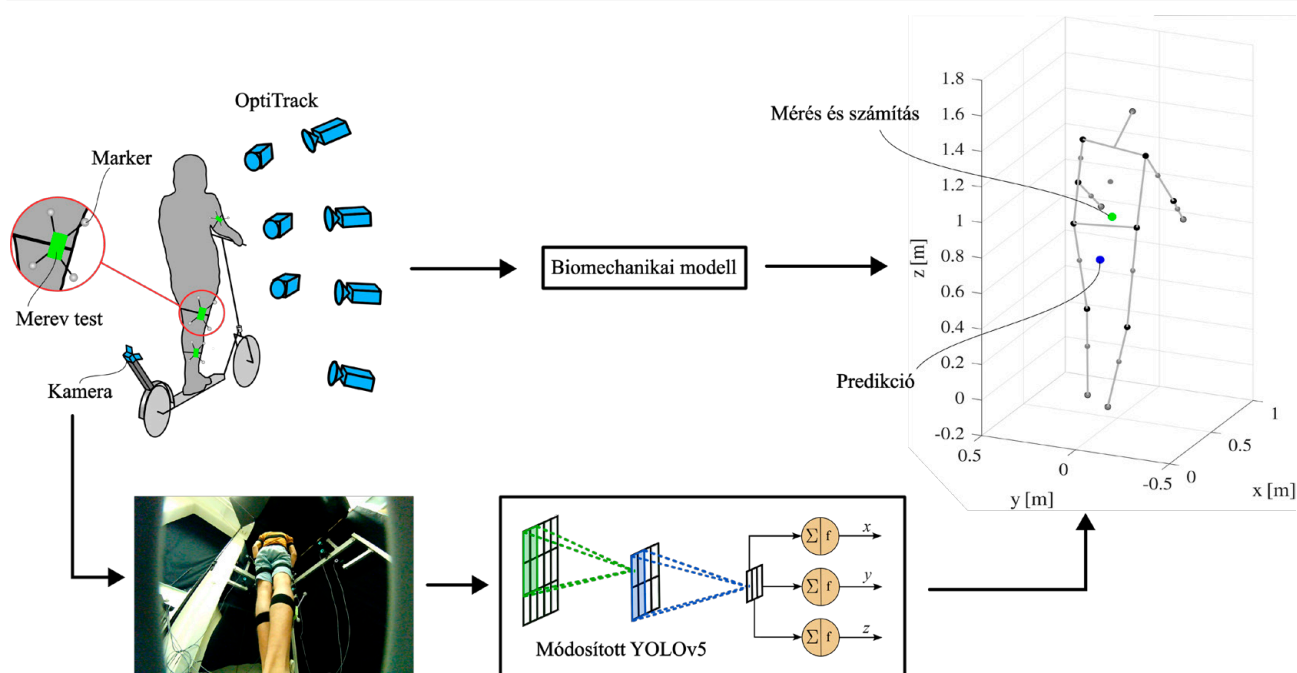
3.2. Neurális háló alapú képfeldolgozás

Kutatásunkban a YOLOv5 neurális háló architektúráját módosítottuk a saját célunknak megfelelően. Mivel ez a neurális háló kifejezetten gyakran használt objektum- és emberdetektálási feladatokban, így az architektúrája feltehetően alkalmas a mi célunkra is. Ezt későbbi eredményeink is igazolták.

A 3. ábra szemlélteti a neurális háló tanításának folyamatát. Az ábrán zölddel jelölt valódi tömegközéppontot az OptiTrack mozgáskövető rendszer által mért értékek és egy biomechanikai modell [7] segítségével határoztuk meg. Emellett a módosított neurális hálózat becslést ad a rollerre szerelt kamera által rögzített képek alapján. Célunk, hogy a tanítási folyamat végére a becslés egyre jobban megközelítse a valódi értéket.

A tanítás során alkalmazott ADAM optimalizáló algoritmus [8] a koszinusz alapú tanulási ráta ütemezéssel (learning rate scheduling) együtt hatékonyan járult hozzá a modell konvergenciájához és pontosságához.

Tapasztalataink azt mutatják, hogy a modell különféle fagyasztási (freezing) stratégiák mellett is jól teljesít, bár a legjobb eredményeket a teljes hálózat tanítása hozta. A különböző súlyinicializálások és adatkészletkeverések vizsgálata szintén azt mutatta, hogy a modell relatíve konzisztensen működik változó inicializálások mellett is. A hiperparaméter optimalizációra nem tértünk ki részletesen, de ezek finomhangolása tovább javítaná az eredményeket; ezt mindenképpen javasolt elvégezni, amint nagyobb adatkészlet áll majd rendelkezésre.



3. ábra. Az adathalmaz előállításának és a neurális háló tanításának folyamata

4. KONKLÚZIÓ

Az általunk elvégzett előzetes vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a módosított YOLOv5 neurális háló elfogadható pontossággal (kevesebb, mint 4 centiméteres átlagos távolság hibával) képes meghatározni a tömegközéppont helyzetét a rolleren elhelyezett kamera képéből. A kidolgozott módszer gyakorlatban történő alkalmazásához a következő lépés a rendelkezésre álló tanítási adathalmaz jelentős bővítése.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által odaítélt NKFI-146201 számú projekt, valamint az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP) támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Moore J. K. *Human control of a bicycle*. PhD thesis, University of California, 2012.
- [2] Wisse M., Schwab A. L. *Skateboards, bicycles, and three-dimensional biped walking machines: Velocity-dependent stability by means of lean-to-yaw coupling*. The International Journal of Robotics Research, 24(6), 417-429, 2005.
- [3] Várszegi B., Takács D. *Emberi egyensúlyozás gördeszkán*. Tavasz Szél Konferencia (TSZ 2016), Doktoranduszok Országos Szövetsége, 1-11, 2016.
- [4] Vizi M. B., Orosz G., Takács D., Stépán G. *Lateral and longitudinal control of an autonomous unicycle*. American Control Conference (ACC), 1-6, 2025.
- [5] Whipple F. J. W. *The stability of the motion of a bicycle*. Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics, 30, 312-348, 1899.
- [6] Horváth H. Z., Takács D. *Balancing riderless electric scooters at zero speed in the presence of a feedback delay*. Multibody System Dynamics, 64(4), 627-655, 2024.
- [7] Hari Krishnan R., Devanandh V., Brahma A. K., Pugaznenth S. *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, 2016, 11(2), 166-176.
- [8] Kingma D. P., Ba J. *Adam: A method for stochastic optimization*. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.