

Mikromobilitási eszközök mozgáselemzése az autonóm közúti járművek szemszögéből

Neukum Csanád

2024. november 7.

Tudományos Diákköri Dolgozat

Konzulens: Dr. Németh Balázs c. egyetemi docens, BME KJIT tudományos főmunkatárs,
HUN-REN SZTAKI

A publikációban szereplő kutatást a HUN-REN SZTAKI az Európai Unió támogatásával
valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében.
(RRF-2.3.1-21-2022-00002).

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Modellkészítés mérések alapján	7
2.1. Hosszirányú szabályozás	7
2.1.1. Gyorsítási manőver	8
2.1.2. Fékezési manőver	9
2.2. Keresztirányú irányítás	18
2.2.1. Mérési protokollok	18
2.2.2. Kikerülési manőverek	20
2.2.3. Legkisebb görbületi sugár meghatározása	22
2.3. Arctangens model	23
2.4. Az MMD meghajtásának hatása a kinematikus karakterisztikára	25
3. Mozgáselemzés szimulációk alapján	26
3.1. Bicikli modell	26
3.2. Roller modell	28
3.3. Szimulációk	29
3.3.1. A szimulációk felépítése	29
3.3.2. A szimulációk eredményei	30
4. Következtetések	34

Kivonat

A mikromobilitási eszközök (MMD – micro mobility device) kifejezése számos járműre vonatkozhat ezen felül maga a fogalom többféle módon definiálható. Egyik definíció alapján az MMD eszközök olyan személyi közlekedési eszközökként is leírhatóak, amelyek tömege nem haladja meg a 350 kg-ot és energiaellátásuk – ha egyáltalán rendelkeznek vele – egy bizonyos sebességhatár fölött jelentős mértékben csökken, majd végül teljesen kikapcsolásra is kerül (ez nem haladja meg a 45 km/h-t). Kardinális az, hogy a mikromobilitási eszközök közé tartoznak a kizárólag emberi erővel hajtott járművek is, például a biciklik, gördeszkák és görkorcsolyák és rollerek [OEC20].

Az MMD eszközök viselkedésének megértése, az ezekkel kapcsolatos adatgyűjtés, valamint viselkedésüket prediktáló modellek létrehozása a jövőben kulcsfontosságú lehet, ugyanis a járművek autonómiája egyre nagyobb szerepet tölt be mindennapi életünkben. A teljesen autonóm vezetés esetében elengedhetetlen a környezetünk megértése, és ebben kiemelkedő szerepet játszik az MMD eszközök megismerése, különösen városi környezetekben. Számtalan kutatás témáját képezi a gyalogosok és az önvezető járművek közötti kölcsönhatás, azonban csak kevés kutatás foglalkozik az autonóm járművek és MMD eszközök interakciójával, holott ezek az interakciók különösen veszélyesek lehetnek az MMD-k sebessége, mozgékonyága, valamint a tapasztalatlan felhasználók számára való könnyű hozzáférhetőségük miatt.

Az MMD-k viselkedését tesztelésen alapuló vizsgálatokkal és matematikai modellek alapján készített szimulációkkal egyaránt meg lehet érteni. Mivel mindkét módszernek megvannak a maga előnyei és hátrányai, úgy vélem, fontos, hogy mindkettőt alkalmazzuk az adatgyűjtés során. A tesztelésekhez több alanyra van szükség, és csak korlátozott mennyiségű adatot szolgáltatnak, míg a szimulációk szinte korlátlan mennyiségű adatot képesek generálni a beállított paraméterek függvényében. Ugyanakkor a szimulációk könnyen szolgáltathatnak érvénytelen információkat, ezért elengedhetetlen egy olyan módszer kidolgozása, amely helytálló eredményeket nyújt egy szimuláció után.

A fent említett okok végett ebben a projektben megpróbálom alkalmazni mindkét felvetett módszert, az MMD eszközök elemzéséhez. Pár publikáció eredményét figyelembe véve kerültek lebonyolításra és értelmezésre a terepen elvégzett tesztek, amelyek célja különböző manőverek és MDD eszközök vizsgálata. A tesztek tartalma magába foglalja a hossz- és oldalirányú irányítást, a különböző kikerülési manővereket, kiemelt figyelmet fordítva a különböző MMD eszközök limitációjának meghatározására. A szimulációkat érintve számos publikáció témáját képezték olyan matematikai modellek, amelyek a biciklik mozgását írják le. Sajnos csekély számban fordult elő olyan kutatás, mely további MMD eszközök mozgását jellemzi, bár célom volt a biciklik mellett a rollerek mozgására is készíteni egy szimulációt.

1. Bevezetés

A mikromobilitási eszközök (MMD-k) mozgásmodelljeinek kifejlesztését elsősorban az motiválja, hogy megértsük, miért olyan magas az ilyen járműveket érintő balesetek száma. Ezek a balesetek általában olyan területeken következnek be, ahol az MMD stabilitása megváltozik, és a sebesség növekedésével egyre nehezebbé válik ezen eszközök irányítása, és az ehhez szükséges készségeket a tapasztalatlan felhasználók gyakran még nem sajátították el [GVSGA20]. Ez a tulajdonság több MMD-n is megfigyelhető, köztük a onewheel-en is [VOTS23] (a onewheel egy speciális gördeszka aminek egy nagy kereke van középen és a felhasználónak az egyik lábát a kerék elé a másikat meg a kerék mögé kell helyeznie). A balesetek elkerülése különösen nehéz, mivel az MMD-k nem rendelkeznek megfelelő fékezési képességekkel [LKD23]. Nagy pontosságú multibody modellek fejlesztése nem újdonság elektromos rollerek stabilitásának a vizsgálatára [AGVF24], de ezen modellek készítéséhez nagyon pontos információkra van szükségünk a rollerek felépítéséről és nagyon érzékenyek a paraméterek változására. Az MMD-k vertikális dinamikájának nagy hatása van az utazás közbeni kényelemérzetre és ennek a hatását az úttartásra széleskörűen elemezték egyszerűsített modellek felhasználásával [AVB22]. Az MMD-k oldalirányú dinamikájáról készült modellek többnyire csak bizonyos korlátozásokkal felhasználhatóak [LJL24]. Annak ellenére, hogy az adat vezérelt megközelítésekben rejlik lehetőség az MMD modellek javítására, ezeket jelenleg csak az MMD mozgásának validálására használják [DVR22].

Az MMD modellek készítésének a legfőbb célja nem más, mint pontos mozgáspredikciók készítése, ezek ugyanis különösképpen fontosak az autonóm járművek biztonságos irányításához. A legfőbb kihívás ebben az, hogy az MMDk mozgása számos körülménytől függ, többek között az útburkolat minőségétől, tisztaságától és a rajta felhalmozódott víz mennyiségétől [VTM⁺23]. Kutatások igazolták, hogy a különböző e-roller megosztó szolgáltatóktól kölcsönözhető járműveknek sokkal jobb fékezési teljesítményük van, mint a többi forgalomban lévőnek [Li24]. Egy kinematikus predikciós modellt publikáltak [PBG22], de ez csak a veszélyes esésekre fókuszál. Ezeken kívül még az is kihívást jelent, hogy megjósoljuk az MMDket irányító felhasználó szándékait. Egy kutatás [LKD23] ugyan ad arctangens modelleket az MMDk mozgáspályájának megjóslásához, míg egy másik [LJSP22] szociális modellek alapján próbálja megjósolni az MMDk és gyalogosok interakcióját. Ezek a modellek akár segíthetik is a több járműből álló forgalom megértését ahogy ez meg is figyelhető a [VC23] kutatásban. Ámbár egyet sem lehet ezek közül közvetlenül alkalmazni autonóm járművek irányításához, ugyanis ezek vagy analízis célra vagy egy bizonyos eset prediktálására készültek.

Annak ellenére, hogy számtalan kutatás és publikáció készült autonóm elektromos járművekről (AEVk-ről), ezek interakciója MMDk-vel egy viszonylag új, nem igazán kutatott téma csak viszonylag kevés elérhető publikációval. Egy elsőrangú kutatás az AEVk viselkedéséről és mozgáspredikciójáról ugyan elérhető [SSP21], itt különböző megközelítéseket hasonlítanak össze a megvalósíthatóság, a dinamikus megkötések kezelése, az akadályok és az utazási kényelem szempontjából. Részletes leírással szolgál számunkra a különféle, jelenleg létező feltérképező, mozgástervező és pályakövető

algoritmusokról, amelyek az autonóm járművek szoftverének részegységeit képzik. De mindezek ellenére, és hogy általános felhasználást ír le, egyáltalán nem fordít figyelmet az MMDk-re.

Egy széleskörű kutatás megtalálható a lehetséges AEV és MMD interakciókról [SK23]. Ez részletezi a jelenlegi állását mindkét technológiának, illetve katalogizálja a lehetséges következményeit ezek interakciójának, a köztük zajló kommunikáció, a jelenlegi elvárások és a rizikós viselkedések szempontjából, ezáltal egy alapot adva későbbi kutatásoknak. Egy másik kutatás [RMGI22] elemzi az úgy nevezett sebezhető közlekedőkkel (VRUk-kal) kapcsolatos interakciókat, ebbe bele értve az MMD felhasználók és AEV-k közötti interakciókat is. Különösen figyelmet fordít a tanulás alapú technológiákra a VRU-k felismerésével, kategorizálásával és mozgásuk predikciójával kapcsolatban. Mindezek mellett egy javaslat már született arra vonatkozóan, hogy felülvizsgálják a járművek és VRU-k közti baleseteket a limitált hozzáférésű utakon [MAM22], ezzel is az AEV-k biztonságos fejlesztését elősegítve.

Az MMD felhasználókkal való interakciók egyik legfontosabb eleme, hogy az AEV-k felismerjék őket [MC18]. Egy kutatásban [KOVA21] bemutatták a VRU-k érzékeléséhez köthető különböző problémák megközelítéseit, itt részletezik és összehasonlítják a jelenlegi megoldásokat a valós idejű VRU felismeréshez, beleértve a szenzorbeli elvárásokat és ezek limitációit. Mindazok ellenére, hogy a kutatók megvizsgálták az MMD-k felismerése és osztályozásával kapcsolatos problémákat, csak nagyon kevés kutatás foglalkozik a balesetek elkerüléséhez nélkülözhetetlen irányításbéli problémákkal. Egy általános jármű és MMD modell alapú szimulációs keretrendszert elkezdtek fejleszteni, hogy analizálják a különböző rizikó faktorokat a jármű - e-roller interakciók során kereszteződésekben és egyenes útszakaszokon egyaránt, a különböző vezetési stílusokat figyelembe véve (például normál, agresszív). Meglehet ez a keretrendszer alapja lesz az ütközés elkerülő algoritmusok fejlesztésének a jövőben.

Egy másik megközelítés, ami tovább növelné a VRU-k biztonságát, ebbe beleértve az MMD felhasználókat is a kooperatív ütközésselkerülő rendszerek alkalmazása. Ezek a rendszerek az MMD-k mozgásáról gyűjtenek adatokat, hogy azokból különböző paramétereket határozzanak meg, mint például az MMD sebessége oly módon ahogy ez részletezve van a [BAG+22]-ban. Annak ellenére, hogy az ilyen adatok gyűjtése adatvédelmi kockázatokkal járhat, az ütközés érzékelő és elkerülő rendszerek megbízhatóságát nagyban javítaná. A jármű-MMD kommunikáció, mint összekapcsolt járműrendszerek, szintén növelik a biztonságot [BLK22, GAGG24].

Ahogy az elektromos biciklik egyre nagyobb részét képezik az utakon előforduló MMDk-nek, javaslatot tettek ütközésselkerülő módszerről AEV-k számára, ami megerősítéses tanulást alkalmaz a jelzőlámpa nélküli kereszteződésekben, hogy csökkentsék az ütközések valószínűségét [ZQLG23]. Ez modellezi az e-kerékpárok konfliktuskerülő viselkedését, és kifejleszt egy többcélú jutalomfüggvényt, amely figyelembe veszi az e-kerékpár vezetőjének a sérülési súlyosságát, valamint az AEV-k vezetési biztonságát és kényelmét.

2. Modellkészítés mérések alapján

Az elmúlt években egyre több és több ember kezdett el MMD-ket használni. A végtelenül erősödő forgalom hatására egyre kedvezőbb utazási forma kezd lenni ezek használata a városi környezetben. Manapság nem csak magán tulajdonban lévő MMD-ket találunk az utakon, de egyre több megosztó szolgáltatás is keletkezik, ami könnyen elérhetővé teszi ezeket egyaránt a turisták és a helyiek számára is. A növekvő számuk hatására, a mozgásuk megértése és a mozgáspályájuk hatékony és pontos prediktálása egyre sürgetőbb problémává kezd válni ahhoz, hogy teljesen önvezető rendszereket fejleszthessünk.

Olyan matematikai modellt készíteni, ami pontosan leírja minden MMD mozgását szinte lehetetlen, minden egyes MMD-ről modellt készíteni meg más jellegű problémát szülne, ilyen például az is, hogy hatékony algoritmusokra lenne szükségünk az MMD típusok felismeréséhez, a mozgásdinamikájuk nagyban függene a felhasználtól, mivel például a tömegük sokszor elhanyagolható a felhasznált tömegéhez képest. Ezen problémák elkerüléséhez különböző mérések eredményeiből lehet következtetni az MMD-k mozgására. A cél az lenne, hogy ezek alapján hasonlóságokat figyeljünk meg a különböző MMD-k között ezzel is csökkentve a paraméterek számát.

2.1. Hosszirányú szabályozás

Jelenleg nincsen sok cikk, ami megbízható információt adna az ilyen jellegű mérésekről, a legjobb hármat, amit találtam, megpróbálom összefoglalni és a részeit kategorizálni. Annak ellenére, hogy ezen cikkeknek nem volt nagy mintavételi tartománya, úgy véltem az eredményeik kellőképpen reprezentálják a valóságot. Néhány cikk tartalmaz méréseket a keresztirányú irányításról is, azok majd a későbbiekben kerülnek összefoglalásra.

Az első cikkben [DLB⁺23] a méréseket egy tradicionális és elektromos kerékpáron (Monark Karin 3-VXL) (a mérés során ugyanazt a kerékpárt használták elektromos meghajtással és nélküle), egy e-rolleren (Ninebot ES2) és egy segway-en (Ninebot S) végezték el. Ez a kutatás egyedülálló volt abból a szempontból, hogy a többi meglévővel ellentétben nem csak az MMD-k fékezésére koncentráltak, hanem a gyorsulási manővereit is vizsgálták. Az adatgyűjtési módszert egy korábbi cikkből [DVR22] vették át. Ehhez egy Raspberry Pi 3 model B-t, IMU-t (PhidgetSpatial3/3/3 1044 B) és egy LiDAR-t (HOKUYO UXM 30LAHEWA) használtak. Mielőtt bármiféle manővert végrehajtottak volna felmérték a résztvevők milyen gyakran szoktak közlekedni a kutatásban használt eszközökkel. Ennek az eredményét az 1-es táblázat tartalmazza.

A kutatás során az eszközök és feladatok sorrendje minden résztvevő számára randomizálva lett, de az összes résztvevő az összes feladatot teljesítette mielőtt egy másik MMD-vel kezdték volna el a feladatokat (a feladatok a későbbiekben kerülnek majd részletezésre).

A második cikkben [TLJ⁺23] a méréseket sokkal több fajta MMD-n végezték el, mint az elsőben,

	Bicikli	E-bicikli	E-roller	Segway
Soha	2	27	12	24
Évente néhány alkalommal	7	4	7	0
Havonta néhány alkalommal	8	2	8	1
Hetente néhány alkalommal	9	1	4	0
Napi szinten	8	0	3	0

1. táblázat. A résztvevők különböző MMD használati szokásai, forrás: [DLB⁺23]

de csak fékezési manőverekkel foglalkoztak. Ennek ellenére azt találták, hogy azok az általánosítások, amiket az első cikk [DLB⁺23] az összes MMD-re talált csak az általuk vizsgált MMD típusokra igaz. Ebben a kutatásban használtak elektromos biciklit (Vivibike C26 250W City Cruiser), tradicionális kerékpárt (Trek FX 7.2 - 24 inch), e-rollert (Ninebot KickScooter G30P), tradicionális rollert (Swagtron K8 Titan). Továbbá végeztek méréseket különböző gördeszkákon: elektromos gördeszkán (Caroma37 Inch 350W), sima gördeszkán (Element Seal Skateboard), longboard-on (Apollo Longboard Bali) (a longboard egy hosszított testű gördeszka); továbbá onewheel-en is ((Future Motion Onewheel Pint).

Az előző kutatással ellentétben itt a résztvevőket a tapasztalati szintjüknek megfelelően osztották be különböző MMDk-hez. Az volt a feltevés, hogy a legtöbb MMD felhasználó rutinosan használja már ezeket, hiszen napi szinten ezzel az eszközzel közlekedik. Az ezt megelőző cikkhez [DLB⁺23] hasonlóan a mérés itt is egy "bemelegítéssel" kezdődött, azzal a céllal, hogy a résztvevők megszokják a nekünk adott eszközöket és ezzel minimalizálják az eszköz szokatlanságából adódó pontatlanságokat.

Az adatgyűjtéshez itt kamerákat (Alied MAKO G319C-t, Computar a4z2812cs lencsével) és IMU-t (APDM Opal V2R) használtak. A kamerákat a résztvevők fölé helyeztek el és a bukósisakjukra fényvisszaverő matricákat ragasztottak, hogy jobban láthatóak legyenek. Az IMU szenzorokat pedig a derekukhoz rögzítették.

A harmadik cikkben [LKD23] a másodikhoz hasonlóan csak az MMD-k fékezési képességeit vizsgálták, de itt hangjelzések helyett vizuális jeleket használtak. A teszteket itt olyan biciklin hajtották végre, ami képes volt tradicionális és elektromos kerékpárként is funkcionálni (MONARK Karin 3-VXL), továbbá egy kis e-rolleren (Ninebot ES2) és egy nagy e-rolleren (Voiager 5). Az első cikkhez [DLB⁺23] hasonlóan az adatgyűjtési módszert itt is [DVR22] kutatásból vették át.

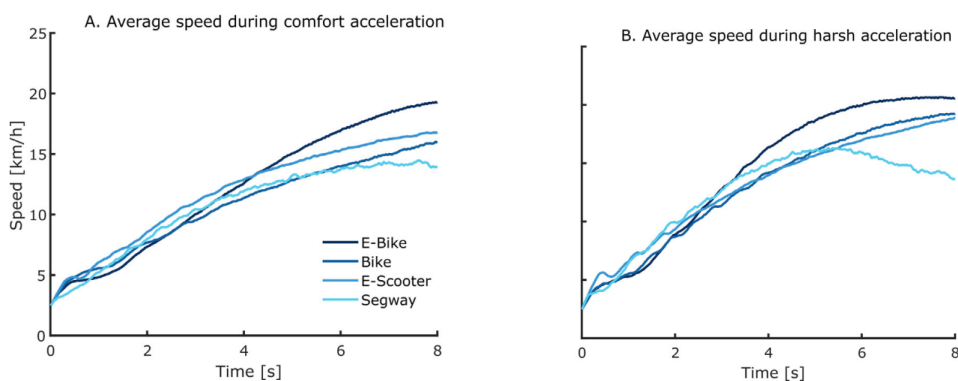
2.1.1. Gyorsítási manőver

Gyorsítással csak az első cikk [DLB⁺23] foglalkozott. Itt a protokoll szerint a résztvevőknek két feladatot kellett teljesíteniük, de előtte még kaptak egy kis időt, hogy kipróbálják a mérés során használandó MMD-ket, hogy megszokják őket. Mindkét esetben a feladat állóhelyzetből indult

és az volt, hogy gyorsítsák fel a járműveket $17\text{--}20\text{km/h}$ -s sebességre. Az első feladat során ezt kényelmesen kellett megtenni, a másodiknál meg az volt a cél, hogy minél gyorsabban elérjék a kijelölt sebességet.

Az elemzés során a gyorsítási manőver kezdetét úgy definiálták, hogy amikor átlépik a $2,5\text{km/h}$ -s sebességet a végét pedig úgy amikor meghaladják a 16km/h -s sebességet (a segway esetében a 12km/h -s sebességet).

A kutatás eredményeként az volt megfigyelhető, hogy ugyan a résztvevők képesek voltak kétszer olyan gyorsan gyorsítani amikor arra utasították őket, de a gyorsulás nagysága nagyban függött az MMD típusától. Ezzel is megerősítve azt, hogy a pontos predikciókhoz szükséges meghatározni, hogy milyen eszközről beszélünk. A gyorsítási adatok az 1-es ábrán láthatóak.



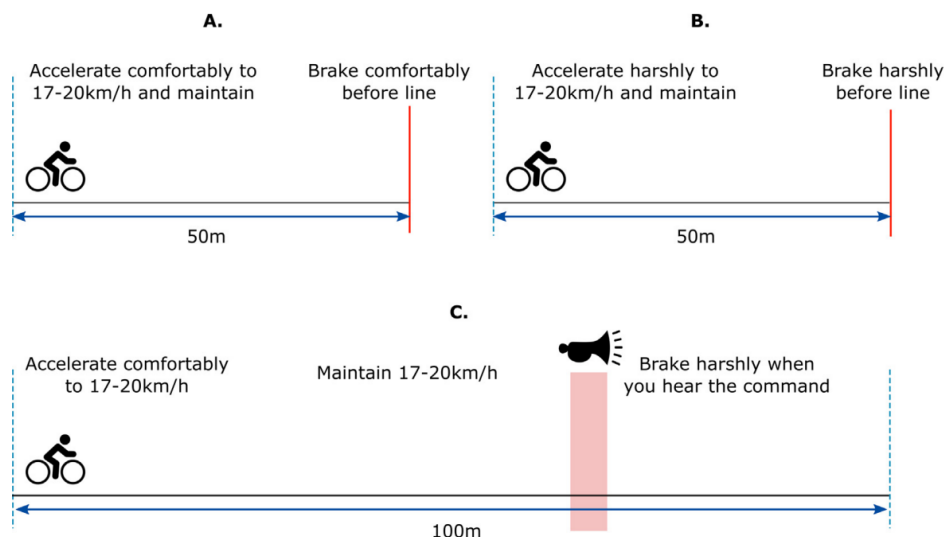
(a) Átlagsebességek a kényelmes gyorsítási manőver során (b) Átlagsebességek az erős gyorsítási manőver során

1. ábra. MMD-k átlagsebessége gyorsítás közben, forrás: [DLB⁺23] (vízszintes tengelyen az idő [s], függőleges tengelyen a sebesség [km/h])

2.1.2. Fékezési manőver

Az első cikk [DLB⁺23] mérése során a résztvevők három fékezési feladatot teljesítettek. Mindhárom feladatra igaz, hogy $17\text{--}20\text{km/h}$ -s sebességről kellett teljesen lefékezniük a járművet. Az első teszt során kényelmesen kellett fékezniük és megállni egy kijelölt vonal előtt. A második során szintén a vonal előtt kellett megállniuk, de úgy, hogy olyan későn és erőteljesen fékeznek ahogy csak tudnak. A harmadik feladat során a résztvevőknek egy hangjelzés után kellett elkezdniük fékezni és olyan hamar meg kellett állniuk, amilyen hamar csak tudtak. Ezekkel a feladatokkal azt szerették volna felmérni a kutatók, hogy milyen különbségek vannak a manőverek között amikor a résztvevő számított arra, hogy fékeznie kell és milyen, amikor nem. A fékezési feladatokat a 2-es ábra tartalmazza.

A fékezési manővert kezdetét úgy definiálták, hogy az a pont amikor az MMD sebessége 16km/h (a segway esetében 12km/h) alá csökkent a vége pedig az a sebesség amikor $2,5\text{km/h}$ alá csökkent. A váratlan fékezési manőver (harmadik feladat) során a manőver kezdőpontja a hangjelzés volt a

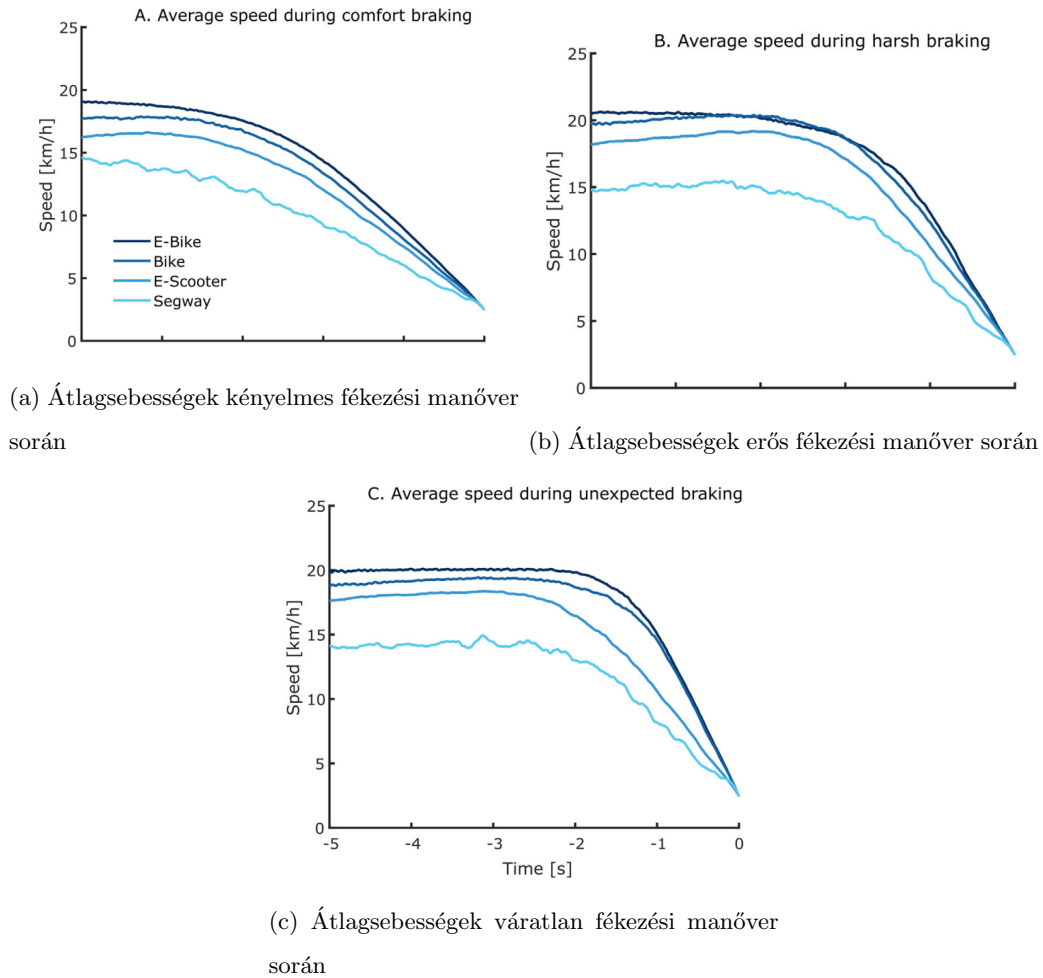


2. ábra. Fékezési protokollok, A: kényelmes; felgyorsulás $17 - 20\text{km/h}$ -ra utána a sebesség tartása majd kényelmesen fékezni a vonal előtt, B: erős fékezés; felgyorsulás $17 - 20\text{km/h}$ -ra, utána a sebesség tartása majd erősen fékezni a vonal előtt, C: erős fékezés hangjelzésre; felgyorsulás $17 - 20\text{km/h}$ -ra utána a sebesség tartása majd sípszóra erőteljesen fékezni, forrás: [DLB+23]

végpontja pedig amikor a jármű sebessége 1km/h alá csökkent. Hasonlóan a gyorsítási manőverhez a fékezési manőverekről is elmondható, hogy ugyan az erős fékezés során kétszer jobb fékezési teljesítményt nyújtottak a résztvevők, ez a fékezési teljesítmény is nagyban függ az MMD fajtájától. A kutatás során kiderült, hogy a résztvevőknek jobb fékezési teljesítménye volt a váratlan fékezés során, mint a többi esetben, de ennek okára semmilyen bizonyíték nincsen. A fékezési adatok a 3-mas ábrán láthatóak.

A fékezési tesztek betekintést nyújtottak az MMD-k stabilitásába is. Míg a kutatás nem talált lényeges különbséget a tradicionális és elektromos kerékpárok fékezési teljesítménye között, addig elmondható, hogy a rollerek és a segway fékezési teljesítménye nem csak szignifikánsan rosszabb volt, mint a bicikliké, de a stabilitásuk is. Mivel a feladatok során a résztvevők többsége (61%), nem tudott megállni a vonal előtt mert nagyobb volt a reakcióidejük. Ezek a problémák ugyan csak az MMD-k hosszirányú mozgására igazak és elképzelhető, hogy a keresztirányú mozgásával kompenzálják ezeket. Ráadásul a tesztek előtt kitöltött kérdőívek szerint a résztvevők tisztában voltak ezen eszközök limitációival, ami segíthet kompenzálni ezek gyengébb fékezőképességet azzal, hogy hamarabb elkezdnek fékezni vagy más ütközésselkerülő stratégiákat alkalmaznak ezért.

Annak ellenére, hogy a kutatás rámutat, hogy minden egyes MMD-nek megvan a saját gyorsítási és fékezési karakterisztikája, arra is felhívja a figyelmet, hogy az MMD-k hosszirányú mozgása nagy mértékben kiszámítható. Mivel az emberek általában közel állandó gyorsulás értékkel gyorsítják, lassítják őket. Annak eredményeképpen a predikciónknak nem a fékezés módjára (kényelmes, erős, váratlan) kell koncentrálnia, mivel ezek változnak minden egyes esetben, hanem a gyorsulás állandóságára. Ez lehetőséget adhat arra, hogy egyfajta predikciós modellt alkalmazzunk az összes MMD hosszirányú mozgására.

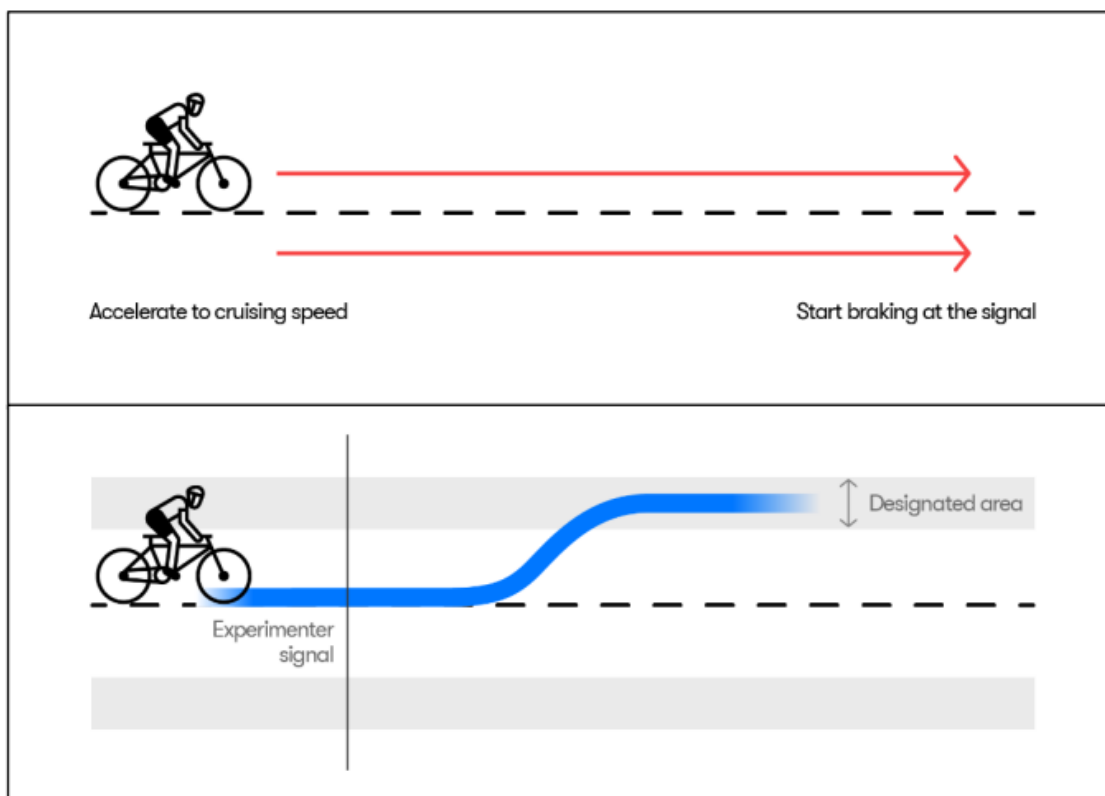


3. ábra. Átlagsebességek a manőverek során (vízszintes tengelyen az idő [s], a függőlegesen a sebesség [km/h] van megjelenítve), forrás: [DLB+23]

A második cikkben [TLJ+23] a fékezési manőver a következőképpen zajlott: a résztvevőket megkérték, hogy érjenek el egy előre meghatározott sebességet, majd, amikor a távolban egy piros lámpa felvillant fékezzenek olyan erősen ahogy csak tudnak, úgy, hogy közben nem veszítik el az uralmat a járművük fölött. Ez látható a 4-es ábra tetején.

Ahogy az első cikkben [DLB+23], itt is minden randomizálva lett. Az MMD-k sorrendje (elektromos vagy tradicionális), a manőverek sorrendje (fékezési vagy kikerülési (kikerülési manőverek a keresztirányú részben lesznek tárgyalva, a 2.2-es fejezetben), de a résztvevők először kis sebességgel hajtották végre a manővereket, és csak utána gyorsabban. Minden egyes sikeres teszt után megkérték a résztvevőket, hogy értékeljék a teljesítményüket egy 1-től 10-ig terjedő skálán. Ha az értékelésük kisebb volt mint 7 megkérték őket, hogy ismételjék meg a manővert.

Ez a cikk szerint az elektromos, tradicionális biciklik és az elektromos rollernek hasonló volt a lassulása, sokkal nagyobb értékeket ért el, mint a többi eszköz (2-es táblázat). Ennek ellenére a tradicionális roller az egyetlen olyan kormány alapú eszköz volt, aminek gyengébb a fékezési teljesítménye, ami inkább hasonlított a gördeszkákéhoz és a onewheel-éhez. A gördeszkák közel azonos, még a onewheel valamivel jobb fékezési teljesítményt nyújtott ezeknél, bár elmaradt a



4. ábra. Fékezési (felső) és kikerülési (alsó) manőverek, (accelerate to cruising speed: felgyorsítani utazó sebességre; start braking at the signal: fékezés megkezdése a jelzésre; experiment signal: kísérleti jelzés; designated area: kijelölt terület), forrás: [TLJ⁺23]

biciklikről és az elektromos rollertől. Utoljára ez a mérés gyalogossal lett elvégezve, aki ugyan átlagos lassulás értéket mutatott. De kimagaslóan magas volt a jerk értéke (a gyorsulás deriváltja), ami valószínűleg annak köszönhető, hogy folyamatos fékezés, helyett periodikusan fékez a nagy impulzusú talaj- cipő kapcsolata miatt.

A kísérletek után a kutatók megpróbálták a fékezési profilokat szakaszos lineáris modellekkel ábrázolni. Egy olyan implicit feltételezés, amelyet a szakirodalomban nem tárgyaltak kifejezetten, az, hogy az elkerülő fékezési manőverek csak egyetlen fékezési műveletből állnak. Ez igaz minden emberre, akik személygépjárművet vagy teherautót vezet [MEL⁺16]. Ez a model nagyon jól illeszkedett a biciklikre, a rollerekre és a onewheel-re is (lényegében azokra az eszközökre, amik fékének a működése hasonlít az autóéhoz), ezeknek a járművek a fékezéshez csak egy impulzusra volt szükségük (5a ábra). Azonban ez nem volt igaz a gördeszkásokra és a gyalogosra. A gyalogosoknak általában meg kell tenniük több lépést fékezés közben ahhoz, hogy teljesen megálljanak (5b ábra). Ehhez hasonlóan a gördeszkásoknak is, akik általában úgy fékeznek, hogy többször végig húzzák a lábukat a földön(5c ábra), vagy leugranak a deszkáról és gyalogoshoz hasonlóan több lépés alatt állnak meg teljesen. Megfigyelték, hogy ugyan az elektromos gördeszkának van fékezőképessége, de a legtöbben (16-an a 19-ből) a hagyományos módon fékeztek.

Továbbá, a többszöri fékezési lejtők teljesen megbuktathatják a szakaszos lineáris modellt, mivel az túlbecsülheti vagy alábecsülheti a jerk nagyságát, amikor a modell kiegyenlíti a végső állandósult

	Átlagos hosszanti gyorsulás. $[m/s^2]$	Átlagos hosszanti jerk $[m/s^3]$
E-bicikli	-2.6 ± 0.6	-6.5 ± 2.2
T-bicikli	-2.5 ± 0.7	-7.7 ± 3.3
E-roller	-2.8 ± 0.5	-6.8 ± 2.3
T-roller	-1.2 ± 0.3	-1.5 ± 2.0
E-gördeszka	-1.4 ± 0.5	-6.3 ± 4.4
T-gördeszka	-1.4 ± 0.3	-6.9 ± 8.7
T-longboard	-1.4 ± 0.3	-9.9 ± 14.0
onewheel	-1.9 ± 0.3	-3.4 ± 1.7
Gyalogos	-1.7 ± 0.7	-26.0 ± 26.2

2. táblázat. Statisztikák (Átlagos érték $\pm$ Normál eltérés) a második cikk [TLJ⁺23] lassulási értékeiről.

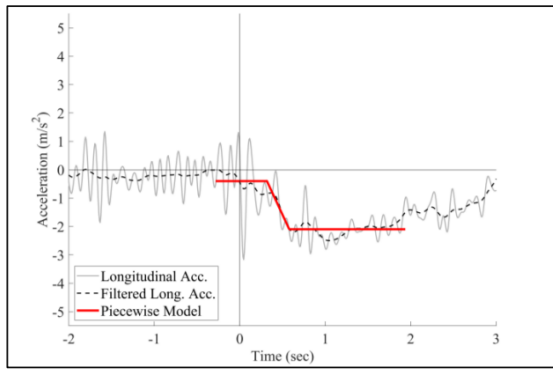
állapotú fékezést (5c, ugrás a piros vonalban). Ezért a gyalogos és gördeszkások fékezési manőverei nem kerültek felhasználásra a szakaszos lineáris modellhez. A többi MMD eredménye látható a 3-mas táblázatban.

	A végső állandósult gyorsulás átlaga $[m/s^2]$	Átlagos jerk $[m/s^3]$
E-bicikli	-3.6 ± 0.6	-17.2 ± 6.6
T-bicikli	-3.9 ± 0.7	-20.6 ± 7.0
E-roller	-4.3 ± 0.6	-17.0 ± 11.1
T-roller	-1.8 ± 0.3	-14.8 ± 12.2
onewheel	-2.5 ± 0.5	-7.2 ± 2.4

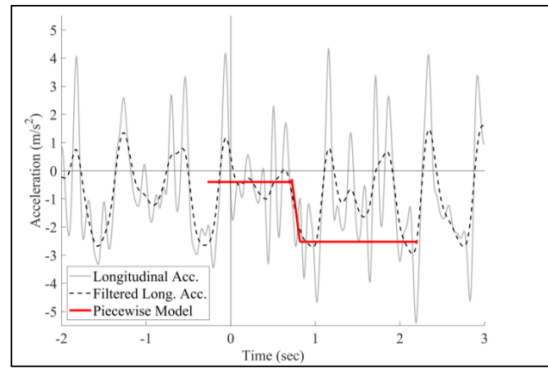
3. táblázat. Átlagos értéke $\pm$ normál eltérése a végső állandósult gyorsulás átlagának és a jerk átlagának a legjobban illeszkedő szakaszos lineáris model alapján

A cikk [TLJ⁺23] szerint egy statisztikai összehasonlítás a model és a mérés eredményei között alátámasztotta a model hatékonyságát a fékteljesítmény különbségek rögzítését a különböző MMD-k között. A model hatékonyan rögzítette az MMD-k különböző hosszanti gyorsulási tendenciáit, azonban szignifikáns eltérést tapasztaltak az e-bicikli és e-roller értékei és a mérési eredmények között. Hasonlóan a hosszanti jerk-re is igaz, hogy a model ugyanazt a jelentősegmintát emelte ki, mint a mérési eredmények, a T-roller kivételével, ami statisztikailag hasonlított a többi kormány alapú MMD-hez a model alapján.

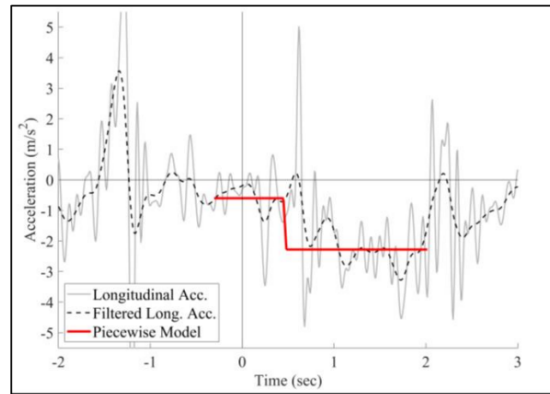
A harmadik cikk [LKD23]fékezési manővere hasonlított a második cikkéhez [TLJ⁺23], azzal a kivétellel, hogy itt a résztvevőknek egy kartonpapír autó előtt kellett megállniuk. A résztvevőknek legalább egy kényelmes és egy erős fékezési manővert kellett végrehajtaniuk. Az előzőekhez hasonlóan a kutatás azzal kezdődött, hogy hagytak időt a résztvevőknek megismerkedni a járművekkel. Ezek után minden egyes MMD-vel 4 manővert kellett végrehajtaniuk, szóval összesen tizenhat



(a) Példa arra, hogy a szakaszos lineáris model megfelelően illeszkedik a onewheel fékezési manőveréhez



(b) Példa arra, hogy a szakaszos lineáris model nem megfelelően illeszkedik a futó fékezési manőveréhez



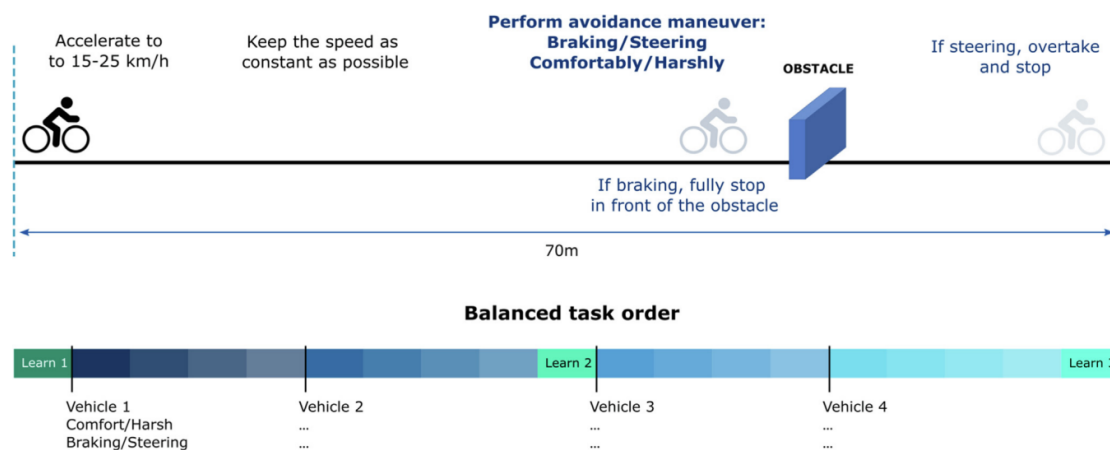
(c) Példa arra, hogy a szakaszos lineáris model nem megfelelően illeszkedik a gördeszka fékezési manőveréhez

5. ábra. Példák a szakaszos lineáris modellekre (Longitudinal Acc.: Hosszirányú Gyorsulás, Filtered Long. Acc.: Szűrt Hosszirányú Gyorsulás, Piecewise Model: Szakaszos Model), forrás: [TLJ+23]

manővert. Kettő fékezési és kettő kikerülési manővert (kikerülési manőver majd a későbbiekben lesz tárgyalva, a 2.2-es fejezetben).

Egy kartonpapír autó helyeztek a pálya végére, ami egy akadályként szolgált, ezt kellett elkerülniük a résztvevőknek. Az összes mérés alatt a résztvevőknek fel kellett gyorsítaniuk az MMD-t legalább 15km/h -ás sebességre és itt olyan egyenletesen tartaniuk ahogy csak tudják. A sebességet egy kijelzőn megjelenítették a résztvevők számára. Mindenkitől MMD-nként két fékezési manőver teljesítését várták el, egy kényelmeset és egy durvát. A kényelmes fékezés során a cél az volt, hogy álljanak meg az akadály előtt miközben kényelmesen csökkentik a jármű sebességét. Az erős fékezési manővernél azt várták el a résztvevőktől, hogy olyan keményen fékezzenek amennyire csak tudnak, olyan későn kezdjék el azt amennyire csak lehetséges és kerüljék el az összeütközést (6-os ábra). Az előzőekhez hasonlóan az MMD-k és a feladatok sorrendje randomizálva volt, de minden feladatot teljesítettek egy MMD-vel mielőtt tovább léptek volna.

A tizenhat elsődleges feladat mellett a résztvevőket megkérték úgynevezett ismétlési feladatokra is, ami azt jelentette, hogy meg kellett ismételniük három korábbi feladatukat. Meg kellett ismételniük



6. ábra. Kísérlet protokollja: Minden jármű esetében a négy feladatot – kényelmes és erős fékezést, valamint kormányzást – véletlenszerű sorrendben végeztették el minden résztvevővel. Az 1., a 10. és a 19. próbát, amelyek minden résztvevőnél azonosak voltak, használták a tanulási hatás ellenőrzésére., forrás:[LKD23]

az első, a tizedik és a tizenkilencedik feladatukat. Tizenegy résztvevő teljesítette a kényelmes kikerülési manővert a tradicionális biciklivel és nyolc a nagy elektromos rolleren. A célja ezeknek az ismétlési feladatoknak az volt, hogy felmérjék az esetleges tanulási hatásokat. Az ismétlési feladatok során csak a kényelmes manőverek kerültek megismétlésre és csak a tradicionális biciklit és a nagy elektromos rollert használták, ezeket random sorsolták ki a résztvevők között. Összesen tizenkilenc feladatot hajtottak végre a résztvevők (ahogy az a 6-os ábra alján látható).

A mérés során a vezető észleléséhez majd ebből a jármű sebességének megállapításához LiDAR-os DBSCAN csoportosítást használtak [EKS⁺96]. Majd ezekből az adatokból kiszámolták a járművek pályáit, ami alapján elkészítették a mozgásmodelleket. A fékezési utakat is kiszámították. A fékezési manővert úgy definiálták, hogy akkor kezdődik amikor a jármű lassulása átlépte a $0,5m/s^2$ -et és akkor ért véget amikor kisebb lett mint $0,5m/s^2$ -et. Továbbá a kényelmes és erős fékezési manőverek során, ha a jerk-nek az értéke meghaladta a $20m/s^3$ -öt az eredményt érvénytelennek nyilvánították. Négy együtthatót használtak fel az így kapott adatokból, hogy a tanulás lehetséges hatásait tanulmányozzák (4-es táblázat).

Kényelmes fékezés	Kényelmes kikerülés
Kezdősebesség fékezéskor	Kezdősebesség kanyarodáskor
Hosszirányú távolság a kartonpapír autótól a fékezési manőver kezdetekor	Hosszirányú távolság a kartonpapír autótól a kikerülési manőver kezdetekor
Legnagyobb gyorsulás a fékezés hatására	Oldalirányú távolság a kartonpapír autótól a kikerülési manőver kezdetekor
Hosszirányú távolság a kartonpapír autótól a fékezési manőver végén	Oldalirányú távolság a kartonpapír autótól az előzés pillanatában

4. táblázat. együtthatók a tanulás lehetséges hatásainak vizsgálatához, forrás:[LKD23]

A kijelölt tizenkilenc feladatot minden résztvevő teljesítette. Négyen nekimentek a nagy e-rollerrel a kartonpapír autónak, ketten pedig a kis e-rollerrel. Minden esetben ez az erős fékezési manőver közben következett be. A biciklivel senki sem ütközött neki az akadálnak. Azokat, akik nekimentek megkérték, hogy ismételjék meg a feladatot addig amíg sikeresen végre nem hajtották a manővert és a sikertelen próbálkozásokat nem használták fel a kiértékelésnél. A résztvevők tapasztaltságát az MMDk-kel kapcsolatban egy rövid kérdőívvel mérték fel, ennek az eredménye a 5-ös táblázatban látható.

	Bicikli/E-bicikli	E-rollerek
Soha	1	10
Évente néhány alkalommal	9	11
Havonta néhány alkalommal	9	10
Hetente néhány alkalommal	9	4
Napi szinten	8	1

5. táblázat. Résztvevők száma, akik különböző tapasztalattal rendelkeznek a használt MMDk-kel kapcsolatban, forrás: [LKD23]

Résztvevők a nagy rollerrel statisztikailag magasabb kezdeti sebességeket értek el a többi MMD-hez képest, a fékezési (6-os táblázat) és a kikerülési (8-es táblázat) manőverek során egyaránt. Ez megmutatja a lassulás értékét és a jerk értékét az arctangens illesztési modellből (2.3-as bekezdés).

		Bicikli	E-Bicikli	Kicsi roller	Nagy roller
Kényelmes	Minták száma(N)	35	36	35	35
	Gyorsulás $[m/s^2]$	-1.66 ± 0.68	-1.69 ± 0.55	-1.65 ± 0.56	-1.98 ± 0.59
	Jerk $[m/s^3]$	-1.19 ± 1.64	-0.99 ± 0.80	-0.98 ± 0.91	-1.15 ± 0.84
	Kezdeti sebesség $[km/h]$	18.81 ± 2.31	20.51 ± 2.50	20.03 ± 2.31	23.40 ± 2.49
Erős	Minták száma(N)	28	34	34	33
	Gyorsulás $[m/s^2]$	-3.93 ± 1.55	-4.24 ± 1.69	-2.92 ± 1.00	-4.04 ± 1.24
	Jerk $[m/s^3]$	-6.22 ± 4.74	-6.83 ± 5.60	-3.17 ± 2.69	-4.97 ± 3.30
	Kezdeti sebesség $[km/h]$	18.93 ± 2.21	20.31 ± 1.42	19.95 ± 2.61	23.54 ± 2.48

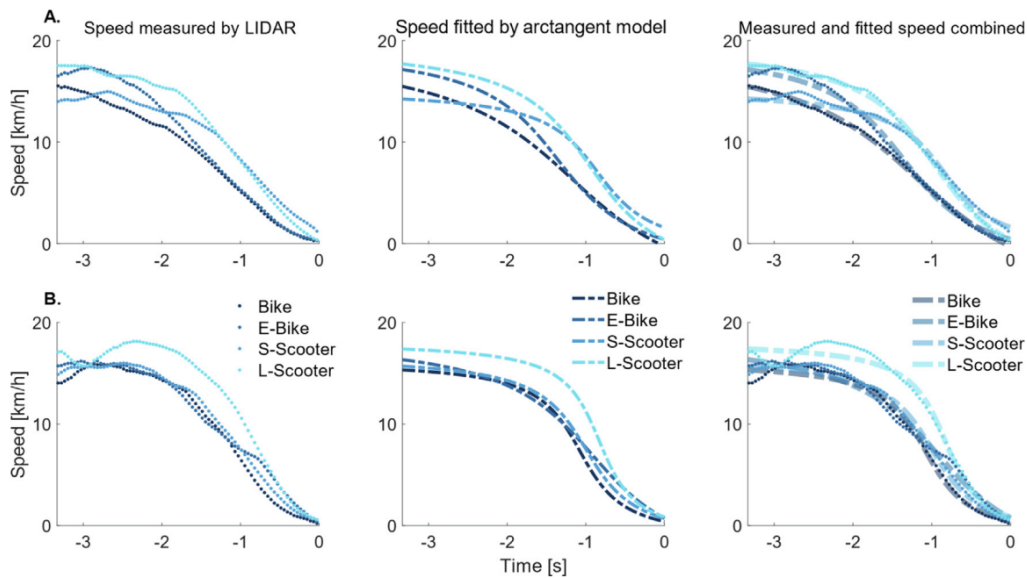
6. táblázat. Átlagos fékezési gyorsulás(m/s^2), jerk(m/s^3) és a kezdeti sebesség amikor a résztvevők elkezdtek a manővert normál eltéréssel. N mutatja meg a rendelkezésre álló próbálkozások számát, amikből az átlagokat számították. Forrás: [LKD23]

Az átlagos sebesség értékei az eszközöknek láthatóak a 7-es ábrán, kényelmes és erős manőverek

során. Számszerű adat pedig a 6-os táblázatban található.

Miközben a kis rollernek volt a legkisebb a lassulása, meglepő módon a nagy rolleré volt a legnagyobb a kényelmes fékezés során, és a második legnagyobb az erős fékezésnél. Annak ellenére, hogy a nagy roller érte el a legnagyobb lassulást, a tanulmány szerint nem volt statisztikailag szignifikáns különbség a nagy roller és a kerékpárok fékezési teljesítménye között. A lassulási jerk tekintetében, hasonlóan a fékezési teljesítményhez, a kis roller teljesített a legrosszabbul, és a többi jármű között szinte nem volt különbség.

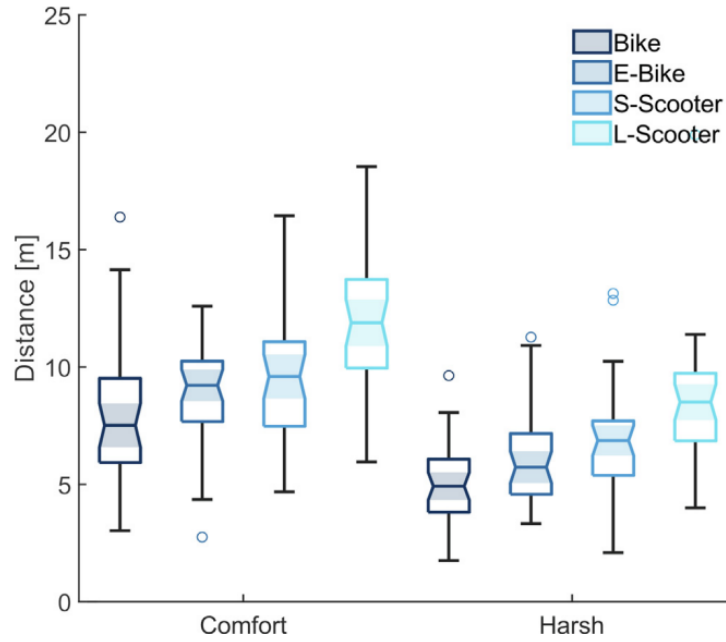
Ahogy várható volt, az erős fékezés során a lassulás és a lassulási jerk értékei magasabbak voltak, mint a kényelmes fékezés során. Meglepő eredmény volt, hogy a nagy roller érte el a legnagyobb lassulást és jerk-nek értékét a kényelmes fékezés alatt. Nem találtak statisztikailag szignifikáns hatást a nem vagy az életkor tekintetében sem a fékezési lassulásra, sem a jerk-re.



7. ábra. Átlag sebességek kényelmes (A) és erős (B) fékezési manőverek alatt az összes járműre; bal oldali oszlop LiDAR által mért sebességek, középső oszlop arctanges modellel illesztett sebességek, jobb oldali oszlop mért és illesztett sebességek átlaga; Forrás:[LKD23]

A féktávok a 8-as ábrán láthatóak. A féktáv úgy lett definiálva, hogy az a távolság, amelyet a jármű megtett a fékezés elkezdése és befejezése között. Ahogy várható volt, a féktávok sokkal rövidebbek lettek az erős fékezési manőver során. A tradicionális bicikli féktávja valamivel hosszabb volt az elektromosénál, de ennek ellenére is még jelentősen rövidebb volt, mint a rollerek féktávja, különösképpen az erős manőver közben.

Mivel a járművek kezdeti sebessége változott, így sokatmondóbb egy MMD-nek a kényelmes és erős fékezési manővereit összehasonlítani. Ráadásul a fékezési manőverek során egy kis keresztirányú elmozdulást ($0,54 - 0,57m$ -t átlagosan) is megfigyelhettünk. Ez azt jelenti, hogy a résztvevők hajlamosak voltak elkormányozni a fékezési manőverek során annak ellenére, hogy kifejezetten kérték őket, hogy egyenesen haladjanak.



8. ábra. A négy jármű fékútjai a kényelmes (comfort) és erős (harsh) fékezési manőverek során. A körök a kilógó értékeket jelölik, a szárazak pedig a nem kilógó minimumokat és maximumokat mutatják az eloszlásban, míg a középső vízszintes vonal a mediánt jelzi. A doboz vízszintes szélei a 25 és 75 százalékokat mutatja. Az árnyékolással kiemelt bevágások a megbízhatósági intervallumokat mutatják. Forrás:[LKD23]

2.2. Keresztirányú irányítás

2.2.1. Mérési protokollok

Az oldalirányú irányítási rész legfőképpen a kikerülési manőverekre fókuszált a [TLJ⁺23] cikkben. A hosszirányú manővereken kívül fontos megbízható predikciók készítése az MMD-k oldalirányú mozgásáról is. Hiszen egy ütközésselkerülési vagy akadálykikerülési manőver nem csak fékezésből, vagy csak kikerülésből áll, hanem a legtöbb esetben ezek a manőverek egyszerre vannak jelen. Ez a rész egy összefoglalása a [TLJ⁺23] kikerülési manővereit.

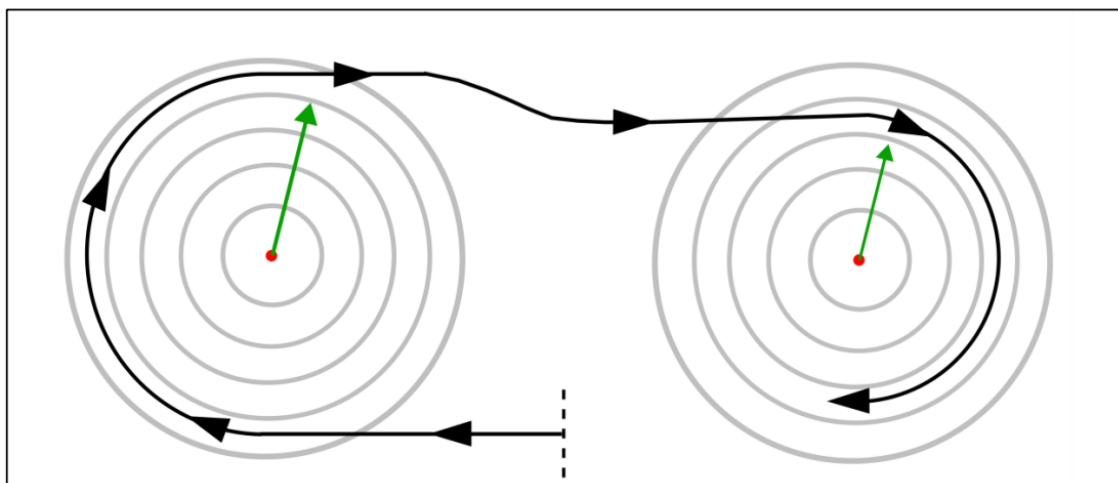
Mivel az a kutatás párhuzamosan folyt a fékezési manőverekkel így az általános információk erről, mint például a használt MMD-k az adatgyűjtési eljárások és a résztvevők tapasztaltsága az általuk használt MMD-ről megtalálhatóak a 2.1-es bekezdésben.

A mérési protokoll a kikerülési manőverek során a következő volt: A résztvevőknek egy egyenes vonalban kellett haladniuk egy vonalon miközben egy állandó sebességet tartanak. Jelzésre végre kellett hajtaniuk egy kikerülési manővert a jelzett irányban, olyan gyorsan ahogyan csak tudták, de közben nem veszíthették el az uralmukat a járművük felett, illetve egy előre kijelölt területen belül kellett maradniuk oldalirányban. A manővert jól ábrázolja a 4-es ábra alsó képe. A kikerülési irányok randomizálva voltak, hogy a kikerülési iránynak az ismerete miatt ne jussanak esetleges előnyhöz a résztvevők, amivel befolyásolnák a mérési eredményeket. A többi faktor tárgyalásra

került a 2.1-es bekezdésben. A mérések ezen elvek alapján kerültek végrehajtásra. A résztvevőknek mindkét irányba végre kellett hajtaniuk a kikerülési manővereket és addig ismételték őket amíg elfogadható pontot nem adtak rájuk.

A kikerülési manőverek mellett volt egy kutatás, aminek a célja az volt, hogy meghatározza a legkisebb görbületi sugarat, amin az egyes MMD-k végig tudnak haladni a lehető legkisebb sebességgel. Ehhez MMD-nkét három tapasztalt résztvevőt választottak ki, akiknek végig kellett haladniuk a kör alakú területeken a járművükkel (9-es ábra ábrázolja).

A mérés folyamata a következő volt: a résztvevők a szaggatott vonaltól indultak, majd megtettek egy 180°-os fordulatot a két legnagyobb átmérőjű kör között. Utána egy nagyjából egyenes vonalon átmentek a szemközti körökhöz és megismételték a fordulást a következő két kisebb kör között. És így tovább ismételték a fordulásokat kisebb és kisebb körök között amíg a résztvevők nem tudták megfelelően végrehajtani a manővert (vagy lerakták a lábukat, vagy nem tudták végrehajtani a manővert a kijelölt területen belül). A résztvevőknek a lehető lelassabban, de olyan sebességgel, amivel végre tudták hajtani a manővert a lehető legkisebb körök között.



9. ábra. A kör alakú területek, amiket a legkisebb görbületi sugár kiméréséhez használtak, forrás: [TLJ+23]

A harmadik cikkben [LKD23] a kikerülési manővereket hasonló módon hajtották végre, mint az előző kutatásban, azzal a kivétellel, hogy itt a manőver kezdetét vizuálisan (egy kartonpapír autóval) jelölték hangjelzés helyett (ahogy ez látható a 6-os ábrán a fékezési manőverrel együtt). A mérés során a résztvevőknek először fel kellett gyorsítaniuk az MMDk-et 15 – 20km/h-s sebességre majd ezt kellett olyan pontosan tartaniuk amilyen pontosan csak tudták (az MMD sebességét egy kijelzőn láthatták a résztvevők), majd ezután végre kellett hajtaniuk a kikerülési manővert. A résztvevőknek kettő manővert kellett végre hajtaniuk, egyet kényelmes és egy durva kikerülési manővert. A kényelmes manőver során arra kérték a résztvevőket, hogy kényelmesen kerüljék ki az akadályt, míg a durva manőver során a lehető légkésőbb kellett elkezdeniük a manővert, úgy, hogy közben nem veszíthették el az uralmukat a jármű felett. Mivel a második cikkhez [TLJ+23] hasonlóan ez is párhuzamosan futott a fékezési manőverekkel így az felhasznált MMDk

és az adatgyűjtési megoldások megtalálhatóak a 2.1-es fejezetben.

2.2.2. Kikerülési manőverek

A kísérlet eredményei és statisztikai analízise (részletes eredmények a 7-es táblázatban találhatóak) azt mutatta, hogy a gyalogosok sokkal nagyobb oldalgyorsulást és jerket értek el, mint az MMDk. Egyedül a T-rollernek voltak statisztikailag ehhez hasonlítható értékei a kikerülési manőver kezdeti szakaszán.

Habár a T-rollernek voltak a legmagasabbak az értékei az összes MMD közül, ezek statisztikailag nem voltak szignifikánsan kiemelkedőek. Ellenben a kormány nélküli eszközöknek - a három gördeszkának és az onewheel-nek voltak a legkisebbek a gyorsulás értékei a manőver kezdeti szakaszán. Ráadásul a T-gördeszkának és az onewheel-nek voltak a legrosszabbak a gyorsulás értékei a manőver visszatérési szakaszán (ellenkormányzás során). Oldalirányú jerk tekintetében a gyalogos esetében voltak a legmagasabbak az értékek, ez magasan meghaladta az MMDk értékeit. Az MMDk közül a gyorsuláshoz hasonlóan a T-rollernek voltak a legmagasabb jerk értékei, ugyanakkor ezek szintén nem voltak statisztikailag jelentősek.

A tanulmány megállapította, hogy az MMD meghajtásának hatása van a kikerülési képességükre. A tradicionális biciklinek és rollernek magasabb oldalgyorsulás és oldalirányú jerk értékei voltak, mint az elektromos változatuknak. Ugyanakkor a fékezési manőverek során ennek pont az ellenkezőjét figyelték meg. Ezek közül kivételt képez a gördeszka, aminél az oldalirányú gyorsulás értéke az elektromosnak volt magasabb a manőver kezdeti szakaszán, ugyanakkor praktikus szempontból ez a különbség elhanyagolható (részletesebben a 2.4-as fejezetben kerül tárgyalásra).

A harmadik cikkben [LKD23] a gyorsulások és jerk értékek helyett az oldalirányú elmozdulást mérték. Az eredmények a 8-es táblázatban láthatóak, amiket a 10-es ábrán látható grafikonok egészítenek ki. A táblázat a résztvevők átlagos oldalirányú elmozdulását mutatja amikor megelőzték (amikor a hátsó kerekük elhaladt) a kartonpapír autót és a legnagyobb kormánysszögüket a manőver során. Az oldalirányú ofsztet a kényelmes manőverek során lényegesen nagyobb volt, mint a durva manőverek során. Ez jól mutatja, hogy a résztvevők megértették a feladatot és olyan későn kezdték csak el a manővert amilyen későn csak tudták. Továbbá a kutatás nem talált semmilyen szignifikáns különbséget a nemek vagy a különböző korcsoportok között az oldalirányú ofsztet tekintetében.

Az elektromos rollerekkel a résztvevők hasonló laterális ofsztetet értek el. Ugyanakkor az elektromos bicikli laterális ofsztet értéke jelentősen nagyobb volt, mint a tradicionálisé. Ezt leszámítva a tanulmány nem talált más eltérést a négy eszköz között sem a laterális ofsztetel sem a maximális kormánysszöggel kapcsolatban, függetlenül attól, hogy durva vagy kényelmes manővereket hasonlítottunk össze. Annak ellenére, hogy megkérték a résztvevőket, hogy tartsanak egy konstans sebességet a manőverek során, mégis lelassultak kormányzás közben. Az a lassulás jelentősen

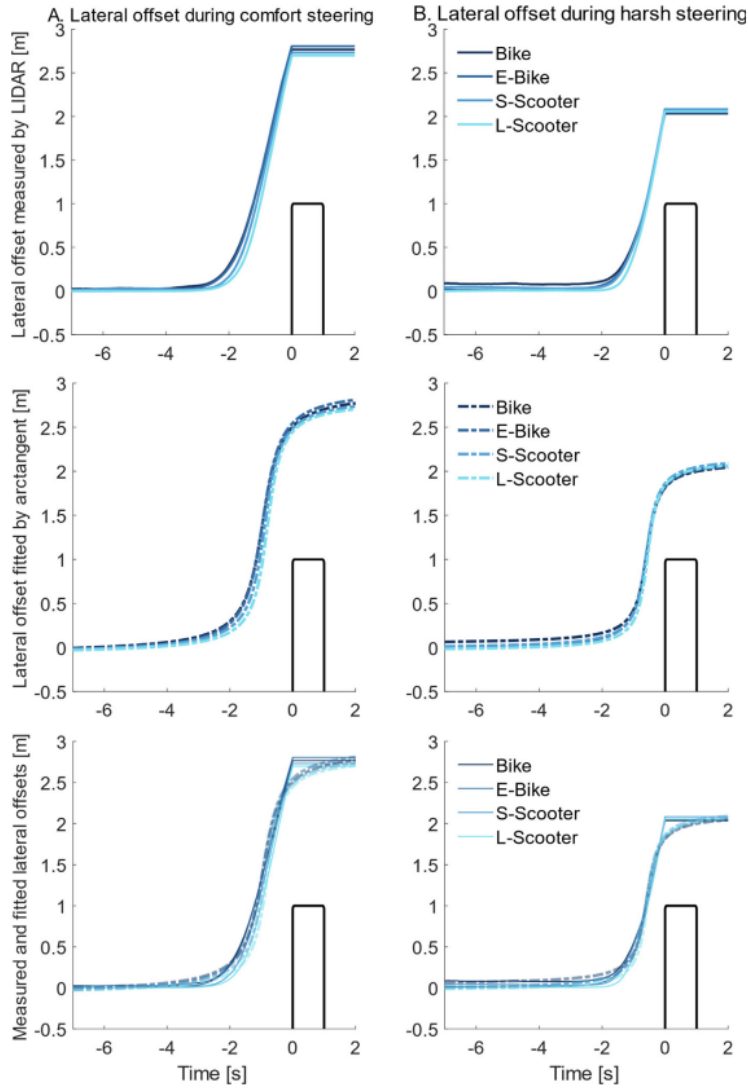
	Közepes ol- dalgyorsulás a manőver kez- detén $[m/s^2]$	Közepes ol- dalgyorsulás az ellen- kormányzás során $[m/s^2]$	Közepes olda- lirányú jerk az első nagy ol- dalgyorsulásig $[m/s^3]$	Közepes olda- lirányú jerk két nagy ol- dalgyorsulás között $[m/s^3]$	Közepes olda- lirányú jerk a második nagy oldalgyorsulás után $[m/s^3]$
E-bicikli	1.2 ± 0.4	0.7 ± 0.3	5.1 ± 2.9	3.9 ± 2.1	1.4 ± 1.4
T-bicikli	1.4 ± 0.3	0.6 ± 0.3	6.4 ± 3.9	4.5 ± 2.1	1.5 ± 1.3
E-roller	1.5 ± 0.6	0.6 ± 0.4	7.9 ± 8	5.5 ± 4.3	1.4 ± 1.9
T-roller	1.8 ± 0.7	0.6 ± 0.3	11.6 ± 9.3	6.7 ± 3.7	1.9 ± 1.7
E-gördeszka	1.1 ± 0.4	0.6 ± 0.3	4.4 ± 4.8	4.2 ± 2.5	1.5 ± 1.3
T-gördeszka	1.1 ± 0.5	0.5 ± 0.2	8.1 ± 13.5	4.3 ± 2.6	1.5 ± 1.7
T-longboard	1.0 ± 0.4	0.5 ± 0.3	5.8 ± 6.8	4.4 ± 3.3	1.2 ± 0.9
Onewheel	1.2 ± 0.3	0.5 ± 0.2	4.5 ± 2.8	3.8 ± 1.4	1.2 ± 1.1
Gyalogos	2.1 ± 0.8	0.8 ± 0.4	20.9 ± 20.1	28.5 ± 26.8	7.4 ± 8.1

7. táblázat. Leíró statisztikák (Átlagos érték $\pm$ normál eltérés) a kiértékelés utáni eredmények, hogy a különböző MMDk-nek milyen hatása van a kikerülési manőverre; Nagy oldalgyorsulások: a manőver során az oldalgyorsulás nagyságának kétszer van szélsőértéke először (első nagy oldalgyorsulás) amikor a kormányzás célja az akadály kikerülése (jelenlegi egyenes pályáról letérés), másodszor (második nagy oldalgyorsulás) amikor a kormányzás célja, hogy az MMD pályája párhuzamos legyen az eredetivel; forrás: [TLJ⁺23]

nagyobb volt az e-roller esetében.

			Bicikli	E-Bicikli	Kicsi roller	Nagy roller
Kényelmes	Laterális of- szet $[m]$		2.80 ± 0.84	2.81 ± 0.82	2.73 ± 0.75	2.73 ± 0.86
	Kormányyszög $[^\circ]$		30.72 ± 16.05	29.64 ± 12.83	32.58 ± 14.53	32.10 ± 18.71
	Kezdeti se- besség $[km/h]$		15.81 ± 4.72	17.07 ± 4.62	19.95 ± 5.13	18.69 ± 4.24
erős	Laterális of- szet $[m]$		1.94 ± 1.06	1.97 ± 0.93	2.10 ± 0.90	2.11 ± 0.90
	Kormányyszög $[^\circ]$		30.37 ± 12.89	29.44 ± 13.11	33.64 ± 22.03	32.93 ± 16.75
	Kezdeti se- besség $[km/h]$		17.76 ± 5.49	17.65 ± 5.29	21.50 ± 4.95	19.97 ± 3.64

8. táblázat. Átlagos keresztirányú ofszet (m) amikor a résztvevők megelőzték a kartonpapír autót, maximum kormányyszög ($^\circ$) és kezdeti sebességek (km/h) normál eltéréssel. A mintavételi szám mindig egyenlő harminchattal. Forrás:[LKD23].



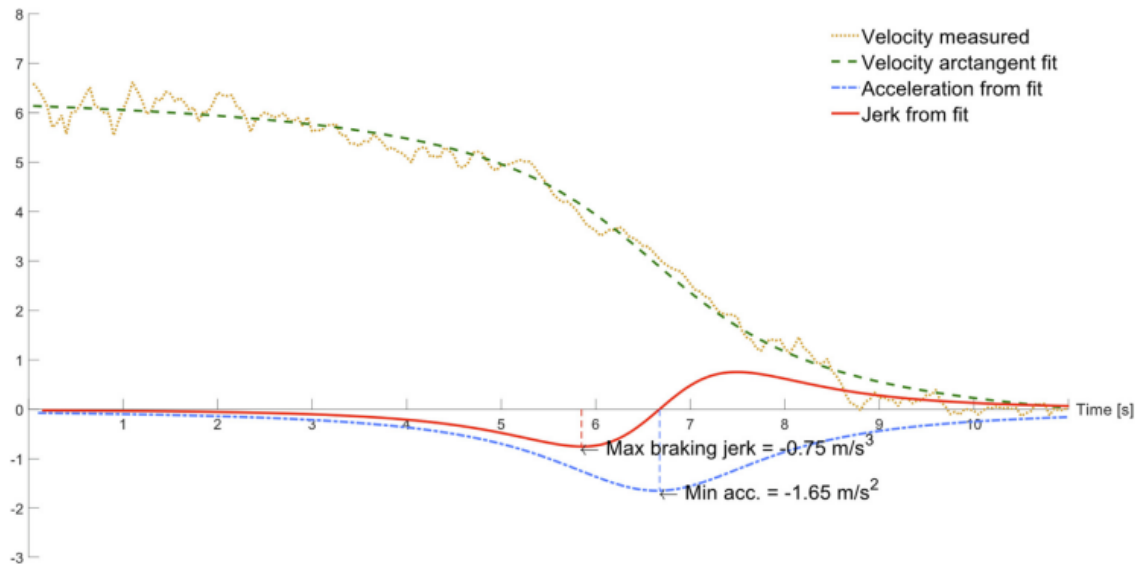
10. ábra. Átlagos oldalirányú ofszet a különböző MMDk-re (Bike - bicikli; E-bike - elektromos-bicikli; S-scooter - kis-roller; L-scooter - nagy-roller) a kényelmes (A oszlop) és durva (B oszlop) kikerülési manőverek során. Az első sor a LiDAR által mért ofszetet, a második az arctangens modellel illesztett ofszetet a harmadik pedig egyszerre az előző kettőt mutatja, ahol a szaggatott vonal az arctangens illesztés eredményét mutatja a négyszög az ábrák bal oldalán pedig a kartonpapír autó oldalirányú pozícióját jelzi, forrás:[LKD23]

2.2.3. Legkisebb görbületi sugár meghatározása

A mérések arra a megállapításra jutottak, hogy a legkisebb görbületi sugarat az onewheel-el lehetett elérni, míg a vizsgált MMDk közül a legnagyobb görbületi sugara az elektromos gördeszkának volt. A sebességek ezen értékek eléréséhez 1.2 és 1.7 m/s között változtak. A részletes adatok a 9-es táblázatban láthatóak.

	Legkisebb görbületi sugár [m]	átlagos közepes sebesség[m/s]
E-bicikli	1.2	1.7
T-bicikli	0.9	1.3
E-roller	1.2	1.5
T-roller	0.6	1.4
E-gördeszka	2.1	1.7
T-gördeszka	1.2	1.4
T-longboard	1.5	1.6
onewheel	0.3	1.2

9. táblázat. MMD-k legkisebb görbületi sugarai és a hozzájuk tartozó átlagos sebességek



11. ábra. Példa egy fékezési manőver hosszirányú sebességére illesztett arctangens függvényről (Velocity measured: Mért sebesség, Velocity arctangent fit: Sebesség az arctangens modellel illesztve, Acceleration from fit: Illesztett gyorsulás, jerk from fit: Illesztett jerk), Forrás:[LKD23]

2.3. Arctangens model

Mivel a fékezési jerk a biztonság szempontjából egy kulcsfontosságú együtttható, ugyanis használni lehet veszélyértékeléshez, agresszív sofőrök azonosításához és pályatervezéshez is. Az arctangens illesztési modell használatával a kutatók hatékonyan képesek voltak meghatározni a hosszanti lassulást és a jerk-et a fékezési manőverek során. A 11-es ábra egy példát mutat arra, hogyan illesztették az arctangens függvényt egy kényelmes fékezési manőver sebességéhez egy e-kerékpár esetében. Az illesztéshez négy együttthatóra van szükség, amelyeket a következő egyenletből lehet meghatározni:

$$y = a \cdot \arctan(b \cdot t + c) + d \quad (1)$$

A kikerülési manőverekhez hasonló módon meg lehet határozni a laterális sebességet, lassulást és jerk-et. A négy együtthatót az arctangens modellben ((1)-es egyenletben) a következőképpen lehet értelmezni: 'a'-közelíti azt, hogy mennyit változtak a mért értékek (az y-tengely léptéke). Fékezési és kikerülési manővereknél megbecsülhető a kezdeti sebesség és a kikerüléskor az oldaltávolság a következő egyenlettel:

$$\Delta y = a \cdot \Pi \approx 2 \cdot d(y_{\text{kezdeti/végső}} = 0) \quad (2)$$

Ha a kezdeti/végső érték nulla (az akadály középvonalától elkormányzunk / a kezdeti sebességről nullára fékeziünk) akkor (2)-es egyenlet értéke megközelítőleg $2 \cdot d$ lesz. Hasonlóan az 'a'-hoz, a 'b' együttható megmutatja a változás arányának a mért értékét (az x tengely léptéke). A mi esetünkben, amikor az x tengely az időt reprezentálja, minél nagyobb a 'b' együttható értéke, annál gyorsabban változik a mért érték nagysága (ebben az esetben a jármű sebessége vagy laterális ofszete). Az 'a' együtthatóval együtt meg lehet a legkisebb lassulás értékét az (1)-es egyenletből kiindulva:

$$\text{lassulás}_{\min} = a \cdot b \quad (3)$$

Továbbá az (1)-es egyenlet alapján a jerk minimumát is könnyen meg lehet határozni:

$$jerk_{\min} = -\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{8} \cdot |a \cdot b^2| \quad (4)$$

Megjegyzendő, hogy egy csökkenő jel esetén (például egy jármű sebessége fékezés közben) 'a' és 'b' előjelének ellentétesnek kell lennie. Amikor az x-tengely az időt reprezentálja, egy nagyobb együttható 'c', egy hamarabbi változást mutat a mért értékben, és fordítva. A 11-as táblázat megmutatja a kezdeti sebességet, a lassulást, a jerk-et és a manőver hosszát, amik együtthatók segítségével lettek kiszámolva. Mivel 'b' és 'c' határozza meg az arctangens függvény nulla értékét ezért értékük nagyban függ egymástól. A mi esetünkben mindennek, ami a nulladik időpillanat után történik 'b' és 'c' előjelének ellentétesnek kell lennie, amíg 'a' és 'c' előjelének meg kell egyeznie amennyiben a mért érték csökken és ellentétesnek kell lennie amennyiben nő (például a sebességnek gyorsításkor vagy az oldalirányú távolságnak kikerüléskor). Végül a 'd' együtthatót arra lehet használni, hogy megadjuk a kezdeti- vagy a végértéket a (1)-es egyenlet alapján:

$$y_{\text{kezdeti/vég}} = d - a \cdot \Pi/2 \quad (5)$$

Alternatív megoldásként, ha egy MMD lassulási és/vagy jerk teljesítményének a paraméterei ismertek, gyorsan közelíteni lehet az MMD pályáját veszélyértékeléshez a szükséges lassulás és jerk meghatározásával.

Arctangens	mo-			Lineáris model
del				
1.180.54	a_0	Első együttható (a)	a_1	-1.800.31
-0.800.37	b_0	Második együttható (b)	b_1	5.702.50
1.901.04	c_0	Harmadik együttható (c)	N/A	-
2.830.31	d_0	Negyedik együttható (d)	N/A	-

10. táblázat. Az arctangens és a lineáris modell összehasonlítása. A kinematikus paraméterek az együtthatók és azok kombinációjából számolva

Arctangens	mo-			Lineáris modell
dell				
-1.690.55	$a_a \cdot b_a$	Min. gyorsulás $[m/s^2]$	a_a	-1.800.31
5.660.62	$2 \cdot d_a$	Kezdeti sebesség m/s	b_a	5.702.50
-0.990.80	$-3\sqrt[3]{3}/8 \cdot a_a \cdot b_a^2 $	Min. jerk m/s^3	N/A	-
4.791.42	$-2 \cdot c_a/b_a$	Időtartam s	$-b_a/a_a$	3.250.63

11. táblázat. Az arctangens modell együtthatói (a_a, b_a, c_a, d_a) összehasonlítva a lineáris modell együtthatóival $(y = a_l \cdot t + b_l)$ az elektromos bicikli átlagos kényelmes fékezési manővere során. A sebességet, lassulást és jerk értékei rendre m/s , m/s^2 , és m/s^3 meghatározásra kerültek. Az időtartam a manőver kezdete és befejezte között eltelt időt mutatja másodpercben.

2.4. Az MMD meghajtásának hatása a kinematikus karakterisztikára

A legtöbb kutatás nem foglalkozik az MMDk meghajtásának a hatására a kinematikus karakterisztikára addig a második cikkben [TLJ+23], megfigyelték a hatását a fékezési és kikerülési manőverekre. ugyan léteznek tanulmányok, ahol tradicionális és elektromos bicikliket hasonlítanak össze, de elektromos és tradicionális rollerekről szinte nem is léteznek ilyen jellegű tanulmányok ezzel is azt mutatva mennyi lehetőség van még ebben a témában is. Ugyan ebben a cikkben az ezzel kapcsolatos megfigyelések száma csekély, egy megfelelő alapot adhat további kutatásoknak, amikben jelentősebb figyelmet fordítanak a meghajtás hatásaira.

Ebben a cikkben arra a megállapításra jutottak, hogy fékezés során az e-roller és az e-bicikli fékezési teljesítménye felülmulta a tradicionális párjuk fékezési teljesítményét. Az e-MMDk hatékonyabb fékezése részben az elektromos (regeneratív) fékezésnek tudható be, ami kiegészíti a hagyományos súrlódás alapú fékezési rendszert az e-MMDk-en. Ez a megfigyelés kellő alapja lehet további

kutatásoknak, ahol az elektromotor paraméterei és a fékezési teljesítmény kapcsolatát próbálják kideríteni, ezáltal a jövőben esetleg olyan modellek forgalomba hozatalát elősegítve, amiken az elektromotorok fékezési teljesítmény az optimumukon van.

Mindennek ellenére a kikerülési manőverek során ennek az ellenkezője került megfigyelésre. A tradicionális MMDk nagyobb laterális gyorsulási és jerk értékeket értek el, mint az elektromos változatuk. A tanulmány arra a megállapításra jutott, hogy az a kisebb súlyuknak köszönhető, amit az akkumulátorok és a motor hiánya okoz. Ugyanakkor a rollerek esetében az elektromosnak volt a legnagyobb oldalgyorsulása a manőver visszatérési vagy ellenkormányzási szakaszában. Ez feltehetőleg annak tudható be, hogy a biciklikkel és rollerekkel ellentétben a gördeszakáknak kifejezetten alacsonyan van a súlypontjuk, és így a megnövekedett tömegüknek nincsen jelentős hatása az eszköz kikerülési képességére. Az általánosan jobb manőverezési képessége a tradicionális meghajtású MMDk-nek megmagyarázza, hogy miért értek el a résztvevők kisebb görbületi sugarat ezen eszközökkel az elektromosokhoz képest.

3. Mozgáselemzés szimulációk alapján

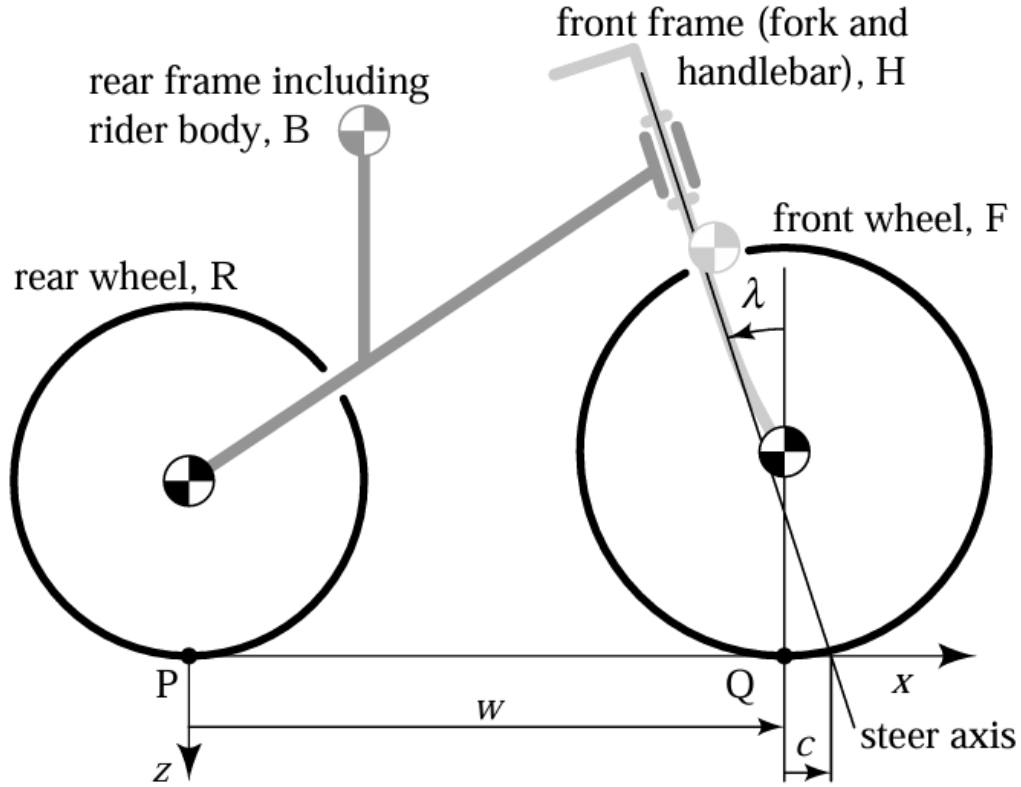
Napjainkban egyre nagyobb teret nyernek a tanulás alapú algoritmusok a járműirányításban. Ezek betanításához elengedhetetlenül fontos nagy mennyiségű pontos adatot szolgáltatni számukra. Bár mérésekkel kellő pontosságú adat előállítható, de a mennyiségük általában korlátozott. Ennek a problémának egy megoldása lehet kinematikai vagy dinamikai modellek alapján szimulációkkal előállítani a kellő mennyiségű adatot. Ugyan egy szimuláció nem feltétlenül reprezentálja a valóságot, mérésekkel validálni lehet azt és így megfelelő mennyiségű és minőségű adat állítható elő. Kétségtelenül biciklik és a rollerek a legnagyobb számban megtalálható MMDk az utakon, így a szimulációknál is ezen eszközökre koncentráltam.

A szimulációk az említett MMDk laterális irányítására koncentrálnak. A legfőbb céljuk meghatározni a két eszköz felépítéséből adódó irányítás béli különbségeket azonos bemenetek hatására. A modellek és a szimuláció Matlab - Simulink környezetben készült. Az MMDk-et leíró egyenletek a következő fejezetekben (bicikli modell a 3.1-es fejezetben a roller modell a 3.2-es fejezetben), a szimuláció bemenetei és eredménye pedig a 3.3-as fejezetben kerülnek tárgyalásra.

3.1. Bicikli modell

A szimulációhoz a Whipple-Carvallo bicikli modell került felhasználásra. Ugyan ez egy viszonylag egyszerűbb modell, de hitelesen leírja egy bicikli mozgását és képes stabilitását megtartani bármilyen vezérlő bemenet nélkül. Bár a modellt a XX. század elején állította fel Whipple és Carvallo a modellt csak 2007-ben validálta [JMS07], ahol a validálás mellett referencia értékeket is adtak a modellhez. A modellt a 12-es ábra ábrázolja. Jól látható, hogy négy részre osztották fel a

biciklit: R - a hátsókerék (rear wheel); B - a felhasználó és a bicikliváz (rear frame including rider body); H - kormány és a villa (front frame (fork and handlebar)); F - első kerék (front wheel). Az ábrán látható, illetve az egyenletekben felhasznált paraméterek egy az egyben a [JMS07]-ben megtalálhatóak mivel azok kerültek validálásra és így a megbízhatóságukat nem kellett ellenőrizni.



12. ábra. A modell elkészítéséhez használt bicikli ábrája, forrás: [JMS07]

A modellt leíró lineáris mozgásegyenlet [JMS07] a következő:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{q}} + v^2\mathbf{C}_1\dot{\vec{q}} + [g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2]\vec{q} = \vec{F} \quad (6)$$

ahol

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \phi & \delta \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} T_\phi & T_\delta \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

”Az egyenletben megtalálható $\mathbf{M}$ a szimmetrikus tömeg mátrix, ami megadja a rendszer kinetikus energiáját. A $\mathbf{C}$ egy a csillapításhoz hasonló (valós csillapítás nincsen) mátrix, $\mathbf{C} = v\mathbf{C}_1$, itt a v a lineáris hosszirányú sebesség a $\mathbf{C}_1$ a kormányzási és dőlési sebességekből eredő aszimmetrikus giroszkópos nyomatékokat rögzíti. További $\mathbf{C}_1$ -ben megjelennek a kormányzási szögsebességből adódó tehetetlenségi reakciók: ez részben a hátsó kerék legyezési szögsebességéből adódó oldalgyorsulás, részben a rendszer legyezési szöggyorsulás következménye. A merevségi mátrix $\mathbf{K}$ két részből áll, a sebességfüggetlen szimmetrikus $g\mathbf{K}_0$, ami arányos a gravitációs gyorsulással és segítségével lehet meghatározni a potenciális energia megváltozását, és a $v^2\mathbf{K}_2$, ami a hosszirányú sebességgel négyzetesen arányos giroszkópos és centrifugális hatások miatt.” [JMS07]

Ez alapján lett elkészítve a rendszer állapotterez leírása

$$\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \quad (9)$$

alakban, ahol a rendszer állapot vektora:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \phi & \delta & \omega & \beta \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

és a rendszer bemenete:

$$\vec{u} = \vec{F} \quad (11)$$

A rendszer állapotai és bemenetei jelölésének a magyarázata megtalálható a 12-es táblázatban.

Jel	Magyarázat	Mértékegység
ϕ	dőlésszög	<i>rad</i>
δ	kormányoszög	<i>rad</i>
$\omega = \dot{\phi}$	dőlési szögsebesség	<i>rad/s</i>
$\beta = \dot{\delta}$	kormányzási szögsebesség	<i>rad/s</i>
T_ϕ	bedőlési nyomaték	<i>Nm</i>
T_δ	kormányzási nyomaték	<i>Nm</i>

12. táblázat. Az egyenletben található változók

3.2. Roller modell

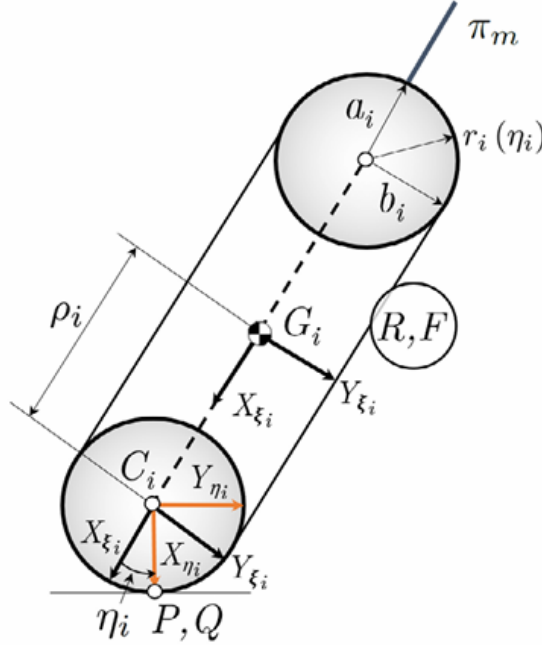
A roller modell a [GVSGA20] cikk alapján készült. Az itt felhasznált egyenletek megegyeznek 3.1-es fejezetben felhasznált egyenletekkel. Csak a 25 paraméter, ami szükséges a roller mozgásának leírásához, mint például az egyes elemek (a roller esetében is 4 darab van: első-; hátsó kerék; kormányoszlop és a roller 'test' a vezetővel) súlypontjának helyzete, inerciája vagy a tömege. A szükséges paramétereket az [AGVF24] cikkből lettek átvéve. Itt ugyan egy multibody szimulációt készítettek, de amellett, hogy az általuk használt paraméterek validálásra kerültek, megerősítették azt is, hogy a [JMS07]-ben lévő, biciklikre létező és validált modell megfelelő paraméterekkel pontosan leírja a rollerek mozgását is.

Ugyan a [AGVF24] cikkben a rollereken megtalálható rugókkal és csillapításokkal is számoltak, de itt eltekintünk ezektől ugyanis a bicikli modell készítésénél se használtuk ezeket, illetve mert sokkal nagyobb hatásuk van a vertikális dinamikára, mint a laterálisra. A roller modell annyival komplexebb a bicikli modellnél, hogy itt a tórusz alakú kerekek inerciája is kiszámításra került, az inerciaértékek átvétele helyett. Az ehhez szükséges egyenletekben megtalálható változókat, több változóval együtt a 13-as ábra tartalmazza. Az egyenletek a [AGVF24] cikk alapján pedig a következők:

$$I_{ixx} = I_{izz} = \frac{1}{8}m_i(4\rho_i^2 + 3a_i^2 + 2b_i^2), \quad (12)$$

$$I_{iyy} = \frac{1}{4}m_i(4\rho_i^2 + 3a_i^2), \quad (13)$$

ahol $i = [R, F]$ (R - a hátsó kerékhez tartozó értékek; F - az első kerékhez tartozó értékek)



13. ábra. A modellhez felhasznált tórusz kerék metszeti ábrája, forrás: [AGVF24]

A szimuláció során felhasznált a_i és b_i értékeket azonosnak vettem és értékük megegyezik az r_i sugárral. Ezek alapján a ρ_i érték a kerék külső átmérőjének ismeretében a $\rho_i = D - 2a_i$ képlettel könnyen számítható. Így ugyan a kerék deformációból adódó változások nem kerülnek felhasználásra, de ez a változás inerciát tekintve elhanyagolható pontatlanságot okoz, de az egyenletek felhasználásával helyet hagyunk a modell esetleges későbbi pontosításának.

3.3. Szimulációk

3.3.1. A szimulációk felépítése

A szimuláció négy nagyobb Simulink-ben használható MATLAB function-ból (Matlab függvényből) áll: Az első függvény a [JMS07] cikkben és a 3.1-es bekezdésben tárgyalt, a modellek elkészítéséhez elengedhetetlen tömeg, csillapítás jellegű és merevségi ($\mathbf{M}$; $\mathbf{C}_1$; $\mathbf{K}_0$ és $\mathbf{K}_2$) mátrixokat a 25 bicikli vagy roller paraméter alapján számolja. Majd továbbadja az így kapott értékeket a második függvénynek.

A második függvény a 3.1-es részben leírt mozgásegyenlet, (6)-os egyenlet alapján a rendszer állapotainak a deriváltját számolja ki. Ennek bemenetei a jármű sebessége, a kormányzásból származó nyomaték, a bedőlésből származó nyomaték (ennek a három bemenetnek az értékei a 3.3.2-es részben kerülnek tárgyalásra), az első függvényben számolt mátrixok, illetve a jármű állapotai, ami a kimenet integrálása után kerül visszavezetésre. Az itt található integrátorban az ω bedőlési szögsebességnek az értékét nullától különbözőnek, de elhanyagolhatóan kicsinek választottam meg, hogy a harmadik függvényben számolásra kerülő legyezési szögsebesség számításánál a nullával való osztás miatt ne szálljon el a legyezési szögsebesség értéke a végtelenbe.

Mint említettem a harmadik függvény a legyezési szögsebességet számítja ki. Ennek bemenetei: v - járműsebesség; δ - kormányszög; ω - bedőlési szögsebesség; és a $\dot{\delta}$ - kormányzási szögsebesség. Itt még két konstansra, a kormánytengely dőlésére a függőlegeshez képest: λ és a kerék-föld érintéspontjának és a kormánytengely meghosszabbításának a földel való metszéspontjának a távolságára: c -re volt szükségünk. A két konstans jól látható a 12-es ábrán. Ezekből a legyezési szögsebességet, $\dot{\psi}$ -ot a következőképpen tudjuk kiszámolni:

$$\dot{\psi} = \frac{v\delta + c\dot{\delta}}{\omega} \cos \lambda \quad (14)$$

A negyedik függvény a jármű globális koordináta rendszerhez viszonyított v_x - x tengely irányú és v_y - y tengely irányú sebességeit számolja ki. Az ehhez szükséges bemenetek a jármű hosszirányú sebessége - v és a jármű állásszöge a globális koordináta rendszerben - ψ amit a legyezési szögsebesség integrálásával kapunk meg. Így a tengely irányú sebességeket a következőképpen számolhatjuk:

$$v_x = v \cdot \cos \psi \quad (15)$$

$$v_y = v \cdot \sin \psi \quad (16)$$

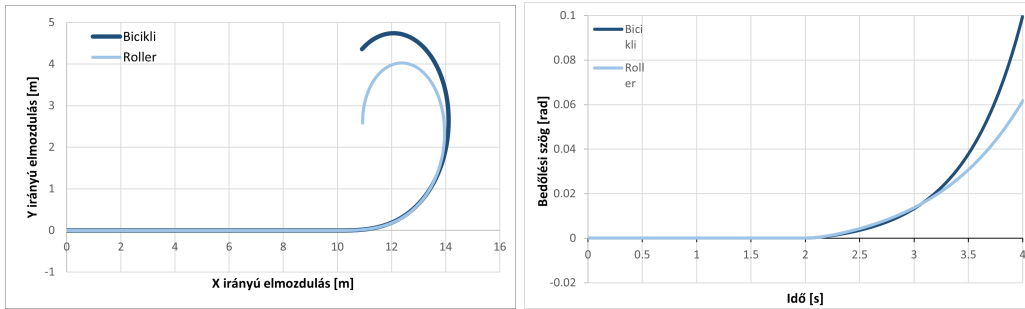
Végül ezen sebességek integrálásával megkapjuk a jármű pozícióját a globális koordináta rendszerben. Így többek között össze tudjuk vetni egymással az MMDk elmozdulását, sebességeit, elfordulásukat és bedőlésüket is például.

3.3.2. A szimulációk eredményei

Öt különböző szimulációt futtattam le. A szimulációk hossza négy másodperc. Ezt az értéket két okból kifolyólag választottam meg ennek: az első, hogy egy kikerülési manőver sem tart sokkal tovább; a második, ami sokkal fontosabb, hogy a kormányszög és a bedőlési szög értékei nagyjából ilyen időtartamig maradnak a valóságot kellően reprezentáló értékűek.

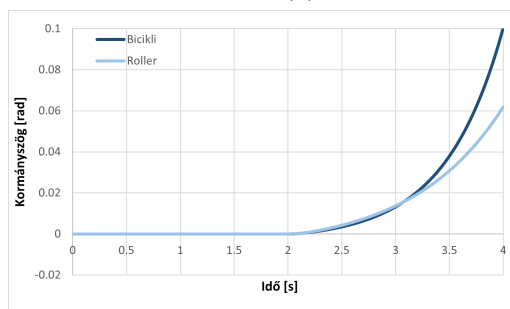
Az elsőben a sebességet (v -t) konstans $5m/s$ -nak változtattam meg a kanyarodási nyomaték (T_δ) és a bedőlésből származó nyomaték (T_ϕ) értéket pedig egy egység ugrás függvényével két másodperc

után 0.1 Nm-re növeltem meg. Az MMDk által így megtett pályát a 14a ábrán lehet látni. Jól szemlélteti a rollernek jobb irányíthatóságát és hogy kisebb sugáron kisebb kormánysszög mellett tud fordulni. Erre az eredményre jutottak a [TLJ⁺23] cikkben is, aminek az eredményét a 9-es táblázatban mutatja..



(a) MMDk pályája az első szimuláció során

(b) MMDk bedőlése az első szimuláció során



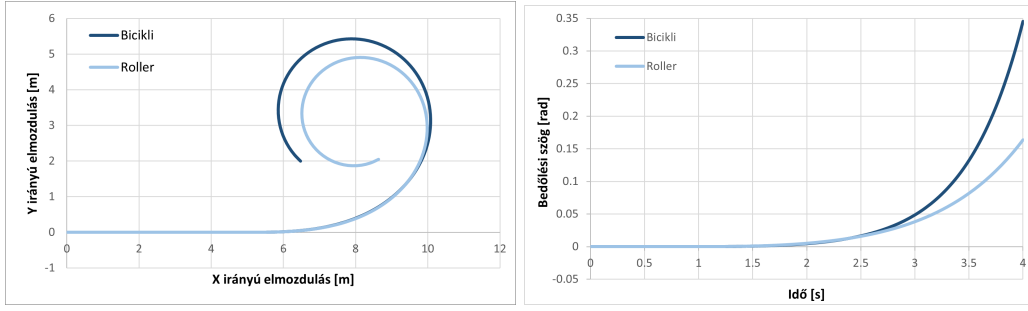
(c) MMDk kormánysszöge az első szimuláció során

14. ábra. Az első szimuláció eredménye

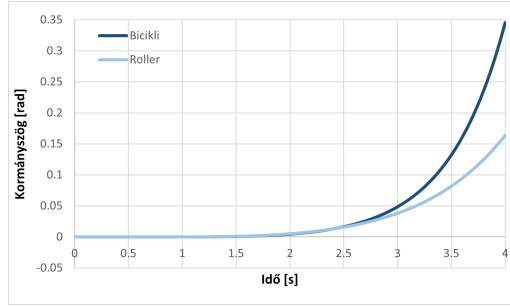
Meg lehet figyelni, hogy a kormánysszög (δ , 14c ábra) és a bedőlési szög (ϕ , 14b ábra) értéke a manőver elején nagyobb a roller esetében, mint a biciklinél, majd később ugyan a biciklihez tartozó értékek jócskán felülmúlják a rollerhez tartozókat, mégis a roller kisebb ívben fordul. Ez jól demonstrálja a bicikli felépítéséből adódó hátrányát a rollerrel szemben ebben az esetben.

A második szimulációban a sebesség az elsőhöz hasonlóan konstans $5m/s$ volt. A T_δ és a T_ϕ most egy rámpa függvényével változtattam. A rámpa kezdeti értéke, a szimuláció első másodpercében nulla volt majd 0.1-es meredekséggel növeltem mind a két nyomaték értékét. A 15a látható, hogy az előző manőverhez hasonlóan, a manőver kezdeti szakaszán a két jármű pályája között az eltérés nagyon kicsi, majd egy negyed fordulat után a roller sokkal kisebb íven kezd el kanyarodni, mint a bicikli. Megfigyelhető, hogy az egyre inkább növekvő nyomatékok miatt a roller végső pozíciója sokkal messzebb van a biciklitől, mint az első szimuláció során.

Itt a ϕ (15b ábra) és a δ (15c ábra) értékek nagysága egyszer sem lesz nagyobb a roller esetében a bicikliénél. Mivel az előző bemenettel egy durva kikerülést ezzel meg egy kényelmeset szimulálhattunk például, elmondható, hogy még a durva esetben sokkal jobban reagált a roller az addig a kényelmesnél eleinte nincsen különbség a roller és a bicikli között. Így a rollernek csak durva manővereknél van meg az ilyen jellegű előnye.



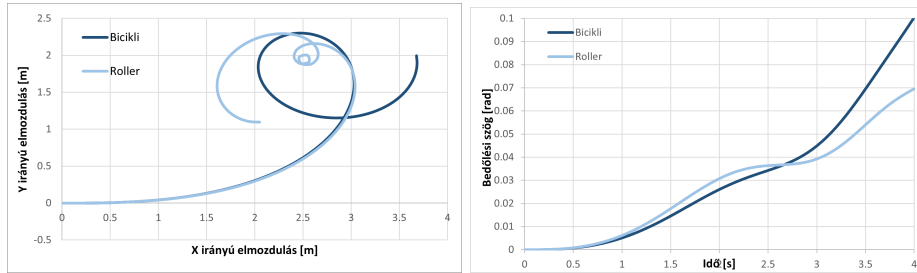
(a) MMDk pályája a második szimuláció során (b) MMDk bedőlése a második szimuláció során



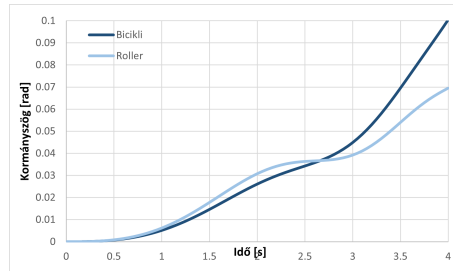
(c) MMDk kormánysszöge a második szimuláció során

15. ábra. A második szimuláció eredménye

A harmadik szimuláció során egy úgy nevezett 'chirp' jelet használtam a T_ϕ és T_δ bemenetekhez. Ez a jel gyakorlatilag egy szinuszos hullám, aminek a frekvenciája folyamatosan nőtt. A kezdeti frekvencia 0,1Hz volt és a szimuláció végére ez 1Hz-re nőtt. Az itt használt jelek amplitúdója 0,1Nm volt és a sebesség értéke pedig konstans 2m/s volt.



(a) MMDk pályája a harmadik szimuláció során (b) MMDk bedőlése a harmadik szimuláció során

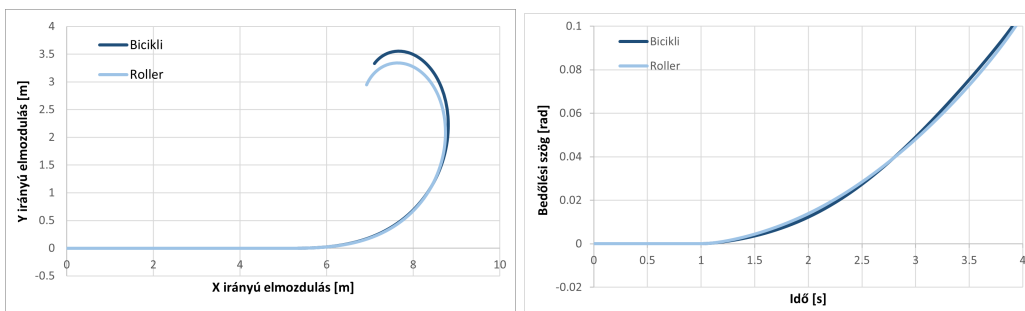


(c) MMDk kormánysszöge a harmadik szimuláció során

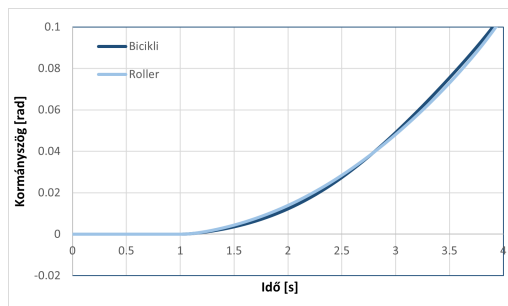
16. ábra. A harmadik szimuláció eredménye

Az összes szimuláció közül talán ez hozta a legérdekesebb eredményeket. Kezdsnek az MMDk által leírt pályákon (16a ábra) jól látszik a roller fölénye a biciklihez képest. Míg a bicikli nagyjából másfél fordulatot tett meg addig a roller olyan két és felet. Bár, ha legkisebb kör átmérőjét megnézzük a roller esetében arra jutunk, hogy az átmérője valahol 10 és 20 cm között van, és ilyen íven megfordulni fizikailag biztosan lehetetlen, így ez az érték nem helytálló ebben a szimulációban.

Viszont ami feltételezésem szerint valós lehet ebben a szimulációban és másokban nem sikerült előállítani az a ϕ (16b ábra) és a δ (16c ábra) értékek. Ezeken nagyon jól látszik, hogy a rollert mennyivel könnyebb irányítani alacsony sebességen a biciklihez képest. Míg a rolleren az ellentétes irányú, de azonos nagyságú bemenetek a szögek növekedését teljesen megállították (jól látható, hogy olyan 2,5 másodperc körül ellaposodnak a rollerhez tartozó grafikonok), addig a bicikli esetében továbbra is nőnek ezek az értékek.



(a) MMDk pályája a negyedik szimuláció során (b) MMDk bedőlése a negyedik szimuláció során



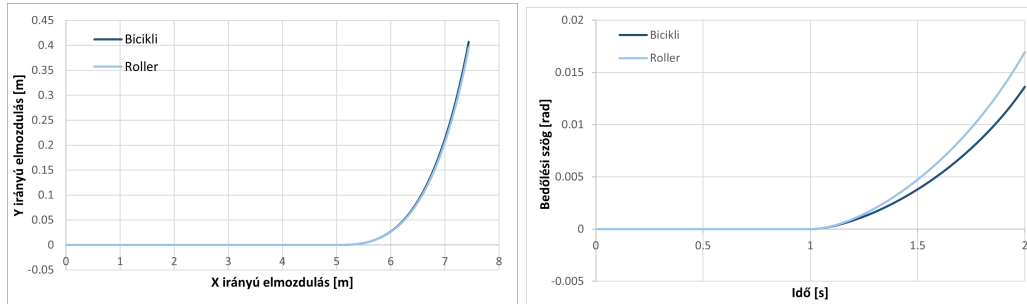
(c) MMDk kormányzószöge a negyedik szimuláció során

17. ábra. A negyedik szimuláció eredménye

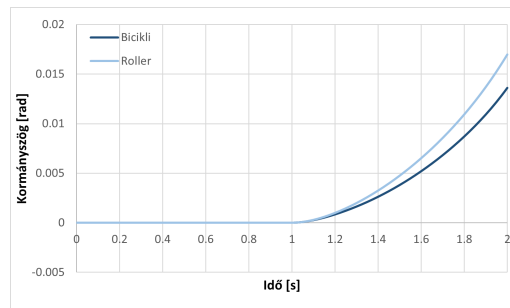
Az utolsó két szimulációban egy fékezéssel egybekötött kormányzást szerettem volna szimulálni. Az első esetben a sebességet kényelmesen a második esetben pedig gyorsan csökkentettem. Mindkét esetben a sebesség $5m/s$ -ról indult, a kényelmes esetben a 3 másodperc a durva esetben 1 másodperc alatt álltak meg a járművek. A sebességeket rámpa függvény használatával csökkentettem a kívánt mértékben. A T_δ és T_ϕ értéke minket esetben egyaránt $0,1Nm$ volt. A lassú fékezés során a szimuláció hossza maradt a szokásos négy másodperc gyors fékezés esetén a szimulációs hosszt levettem két másodpercre mivel ennyi idő alatt teljesen megállt mind a két jármű.

A negyedik szimuláció első ábráján (17a ábra) jól látható, hogy a megállás előtti pillanatokban a roller elkezd kisebb ívben kanyarodni, mint a bicikli, de erős fékezés során, ahogy az a 18a ábrán

is látható elveszti ezt az előnyét a biciklivel szemben. A két MMD ϕ és δ értékei a negyedik szimulációban (17b és 17c ábrák) szinte alig térnek el egymástól. Az ötödik szimuláció során (18b és 18c ábrák) ugyan első ránézésre nagy az eltérés az értékek között, de a negyedik szimulációban is nagyjából ilyen méretű eltérések voltak, csak mivel az ötödik sokkal kisebb tartományt ábrázol ezért sokkal jelentősebbek az eltérések.



(a) MMDk pályája az ötödik szimuláció során (b) MMDk bedőlése az ötödik szimuláció során



(c) MMDk kormányzási szöge az ötödik szimuláció során

18. ábra. Az ötödik szimuláció eredménye

Az utolsó két szimuláción jól látható, hogy a modell csak laterális mozgást szimulál, a fékezésnek nem volt különösebb hatása a kormány vagy bedőlési szögekre. A sebesség megváltozása a járművek pályáján viszont jól látható, hogy alacsonyabb sebesség mellett kisebb ívben tudnak fordulni.

4. Következtetések

A mérésekhez hasonlóan a szimulációk is rávilágítottak arra, hogy nem lehet az összes MMD mozgását egy modellel kellően reprezentálni. Jelen esetben mind a bicikli mind a roller modell paramétereit egy kutatás alapján választottuk meg. Mivel a paraméterek értékei gyártónként és felhasználónként változnak ezért pontos pályát prediktálni szinte lehetetlen egyetlen bicikli vagy roller paramétere alapján. Valós MMDk-ról készített, mérésekkel validált modellekkel, tanulás alapú algoritmusok tanítására kellő mennyiségű információt lehet szimulációkkal szolgáltatni. Ugyan ezeket a szimulációkat nem csak a lehető legtöbb fajta MMD-re, de azoknak minél több változtatára érdemes lenne elvégezni. Ezek mellett fontos megemlíteni, hogy ugyan a mozgáselemzése ezen eszközöknek elengedhetetlen autonóm járművek szempontjából, de ez csak az egyik fele az MDDk-kel kapcsolatosan megoldandó problémáknak. Bár most erről nem esett szó, de az MMDk észlelése

és felismerése valamilyen szenzorjelekből (például: kamera vagy LiDAR) és kategorizálása elengedhetetlenül fontos a velük való vegyes forgalomban való közlekedéshez.

Hivatkozások

- [AGVF24] A.G. Agúndez, D. García-Vallejo, and E. Freire. An electric kickscooter multibody model: equations of motion and linear stability analysis. *Multibody System Dynamics*, 2024.
- [AVB22] Michele Asperti, Michele Vignati, and Francesco Braghin. Modelling of the vertical dynamics of an electric kick scooter. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7):9266–9274, 2022.
- [BAG⁺22] Marek Bachmann, Luca Hernández Acosta, Johann Götz, Delphine Reinhardt, and Klaus David. Collision avoidance for vulnerable road users: Privacy versus survival? In *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pages 1–6, 2022.
- [BLK22] Mohammad Baqer, Michael Lowry, and Axel Krings. Reliability of vehicle-to-micromobility safety communication. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 148, 11 2022.
- [DLB⁺23] Marco Dozza, Tianyou Li, Lucas Billstein, Christoffer Svernlöv, and Alexander Rasch. How do different micro-mobility vehicles affect longitudinal control? results from a field experiment. *Journal of Safety Research*, 84:24–32, 2023.
- [DVR22] Marco Dozza, Alessio Violin, and Alexander Rasch. A data-driven framework for the safe integration of micro-mobility into the transport system: Comparing bicycles and e-scooters in field trials. *Journal of Safety Research*, 81:67–77, 2022.
- [EKS⁺96] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd*, volume 96, pages 226–231, 1996.
- [GAGG24] Sukru Yaren Gelbal, Bilin Aksun-Guvenc, and Levent Guvenc. Vulnerable road user safety using mobile phones with vehicle-to-vru communication. *Electronics*, 13(2), 2024.
- [GVSGA20] Daniel García-Vallejo, Werner Schiehlen, and Alfonso García-Agúndez. Dynamics, control and stability of motion of electric scooters. In Matthijs Klomp, Fredrik Bruzelius, Jens Nielsen, and Angela Hillemyr, editors, *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, pages 1199–1209. Springer International Publishing, 2020.
- [JMS07] Andy Ruina J.P Meijaard, Jim M Papadopoulos and A.L Schwab. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463, 2007.
- [KOVA21] Esraa Khatab, Ahmed Onsy, Martin Varley, and Ahmed Abouelfarag. Vulnerable objects detection for autonomous driving: A review. *Integration*, 78:36–48, 2021.

- [Li24] Tianyou Li. *Modelling E-scooterist Braking and Steering for Collision Avoidance*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, 2024.
- [LJL24] Yun-Hao Lin, Alireza Jafari, and Yen-Chen Liu. Dynamic modeling and stability analysis of balancing in riderless electric scooters. In *American Control Conference (ACC)*, Toronto, Canada, 2024.
- [LJSP22] Yen-Chen Liu, Alireza Jafari, Jae Kun Shim, and Derek A. Paley. Dynamic modeling and simulation of electric scooter interactions with a pedestrian crowd using a social force model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9):16448–16461, 2022.
- [LKD23] Tianyou Li, Jordanka Kovaceva, and Marco Dozza. Modeling collision avoidance maneuvers for micromobility vehicles. *Journal of Safety Research*, 87:232–243, 2023.
- [MAM22] Husam Muslim and Jacobo Antona-Makoshi. A review of vehicle-to-vulnerable road user collisions on limited-access highways to support the development of automated vehicle safety assessments. *Safety*, 8(2), 2022.
- [MC18] Swadesh Kumar Maurya and Ayesha Choudhary. Deep learning based vulnerable road user detection and collision avoidance. In *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 1–6, 2018.
- [MEL⁺16] Gustav Markkula, Johan Engström, Johan Lodin, Jonas Bärgman, and Trent Victor. A farewell to brake reaction times? kinematics-dependent brake response in naturalistic rear-end emergencies. *Accident Analysis & Prevention*, 95:209–226, 2016.
- [OEC20] OECD/ITF. Safe micromobility. https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/safe-micromobility_1.pdf, 2020.
- [PBG22] Pasinee Posirisuk, Claire Baker, and Mazdak Ghajari. Computational prediction of head-ground impact kinematics in e-scooter falls. *Accident Analysis & Prevention*, 167:106567, 2022.
- [RMGI22] Angélica Reyes-Muñoz and Juan Guerrero-Ibáñez. Vulnerable road users and connected autonomous vehicles interaction: A survey. *Sensors*, 22(12), 2022.
- [SK23] T. Sanders and E. Karpinski. Implications for interactions between micromobility and autonomous vehicles. *Connected and Automated Vehicles*, 6(2):185–197, 2023.
- [SSP21] Omveer Sharma, N.C. Sahoo, and N.B. Puhan. Recent advances in motion and behavior planning techniques for software architecture of autonomous vehicles: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 101:104211, 2021.
- [TLJ⁺23] Paolo Terranova, Shu-Yuan Liu, Sparsh Jain, Johan Engstrom, and Miguel Perez. Kinematic characterization of micro-mobility vehicles during evasive maneuvers, 2023.

- [VC23] Yeltsin Valero Camarena. *Microscopic modeling of Personal Mobility Devices (PMDs), in mixed traffic and share space conditions*. PhD thesis, Université Gustave Eiffel, 2023.
- [VOTS23] Máté Benjámín Vizi, Gábor Orosz, Dénes Takács, and Gábor Stépán. Steering control of an autonomous unicycle, 2023.
- [VTM⁺23] David Vetturi, Monica Tiboni, Giulio Maternini, Benedetto Barabino, and Roberto Ventura. Kinematic performance of micro-mobility vehicles during braking: experimental analysis and comparison between e-kick scooters and bikes. *Transportation Research Procedia*, 69:408–415, 2023. AIIT 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems (TIS ROMA 2022), 15th-16th September 2022, Rome, Italy.
- [ZQLG23] Delei Zhang, Liang Qi, Wenjing Luan, and Xiwang Guo. Collision avoidance of autonomous vehicles with e-bike at un-signalized occluded intersections based on reinforcement learning. In *2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pages 2946–2951, 2023.