Kerékpáros kanyarodás menetkísérletek - Precíziós Bolygóművek Méretcsökkentésének Interdiszciplináris Alkalmazásai

Kabai Domokos okl. közl.mérnök, dr. Kőfalvi Gyula, okl. közl. mérnök,

Emika Zrt.
(e-mail ibkcrash@gmail.com)

Abstract: A modern gépészeti tervezés során különös kihívást jelent a precíziós bolygóművek méretcsökkentése anélkül, hogy az átviteli pontosság és a működési megbízhatóság csökkenne. A jelen tanulmányban bemutatott kerékpáros kanyarodási menetkísérletek dinamikai adatai és azok elemzése elméleti és gyakorlati szinten is értékes adalékot nyújtanak a bolygóműves hajtóművek működési viszonyainak optimalizálásához, kiváltképp, ha a helyigény csökkentésének hatásait vizsgáljuk a mozgásdinamikára és a szerkezeti integritásra.

1. BEVEZETÉS

Kísérleti módszerek – Mérési és kiértékelési eljárások: A kísérletben korszerű, három tengelyes GPS érzékelővel, videoalapú mozgásrögzítéssel és fázisképes elemzéssel vizsgáltuk a kerékpáros különböző manővereit.

Ezek a módszerek kiváló alapul szolgálnak precíziós bolygóművek forgó alkatrészeinek hely- és sebességfüggő dinamikai elemzéséhez is.

Az adatok alkalmazásával a hajtómű kulcselemein (napkerék, bolygókerekek, koszorúkerék, tengelyek) jelentkező változások is modellezhetők, különösen méretcsökkentési koncepciók esetén.

2. TEMATIKUS INTEGRÁCIÓ – ANALÓGIÁK A BOLYGÓMŰVES KONSTRUKCIÓVAL

A kerékpáros súlypont- és pályaelemzése párhuzamba állítható a bolygómű belső erő- és mozgáslefolyásának áttekintésével, különös tekintettel a nyomatékátvitelre és a szűkített geometriai kivitelből eredő kihívásokra.

A kísérleti mérési eljárások (GPS, gyorsulás, szögelfordulás) közvetlenül alkalmazhatók bolygóműves hajtóművek belső mozgáselemzésénél, ahol különösen fontos a szerkezeti változások (pl. csapágyazási megoldások, tömegcsökkentést célzó anyaghasználat) hatásának objektív mérési validálása.

A méretcsökkentés megvalósításánál kiemelt jelentősége van a fogaskerék-geometriák optimalizációjának, a kenési rendszerek innovációjának, valamint a műanyag vagy kompozit elemek alkalmazásának, amelyekhez a kerékpáros kísérlet dinamikai eredményeiből vett modellezési sémák adaptálhatók.

Valós idejű mozgásparaméter mérések alkalmasak visszacsatolási modellek építésére precíziós bolygóművek vezérlési algoritmusainak fejlesztéséhez.

3. ÚJ ALKALMAZÁSOK ÉS JAVASLATOK

A kísérleti meneti pályaelemzések segítségével a bolygóművön belül kialakuló mikro-mozgásokat (például bolygókerekek axiális vagy sugárirányú elmozdulásai) is kvantitatív módon leképezhetjük, ami hozzájárul a kompakt méret és a magas hatásfok együttes biztosításához.

A fázisképes és időtartománybeli adatelemzés modellezési mintázatokat nyújt a fogazatok kontaktmechanikájának, egyenletes áramlású és impulzív terheléseinek méretezéséhez a szűkített bolygóműben.

Az integrált kísérleti és modellszámítási adatok segítségével a hajtómű dinamikai optimalizációja validált (empirikus) alapokon lehetséges, hozzájárulva a következő generációs precíziós bolygóművek fejlesztési irányaihoz.

A jövőbeli fejlesztések számára a mozgáselemzések kombinációja (kerékpár - bolygómű analógia) új vezérlési, szabályozási és életciklus-hosszabbító stratégiák kidolgozását teszi lehetővé.

Copyright 2025 Budapest, MMA.

A kísérletben a balesetivel azonos kialakítású és méretű női kerékpárral, azonos korosztályú és súlyú női kerékpárossal menetkísérleteket végeztünk, amely során az úttest szélétől 1

m oldaltávolságon megjelöltük az eredeti haladási irányt, valamint ettől balra 2,3 m távolságban a helyszínrajzban rögzített ütközéskori oldaltávolság síkját.

1. *ábra A kísérleti női kerékpár és a mérőműszer elhelyezése*

A kerékpáros az átlagos, korosztályos haladási sebességgel haladt, majd bal kezével irányjelzett és sávot váltott.

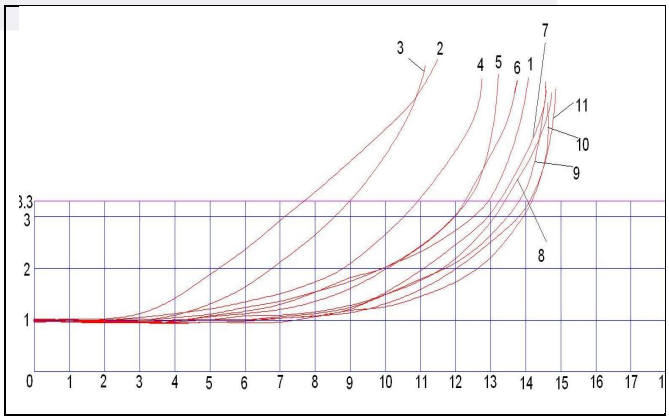
A kerékpárra korszerű PICDaq 2.0 (DSD Linz) típusú GPS érzékelésű, három tengelyben (x,y,z) történő adatrögzítést biztosító járműdinamikai paramétereket rögzítő mérőműszert helyeztünk el, valamint nagysebességű video kamerával (Casio EX F-1) is rögzítettük az egyes végrehajtott teszteket.

Az így meghatározott kerékpár, súlyponti pályaíveket a 2. ábra szemlélteti.
A kerékpáros irányjelzéseinek helye az összegzett pályaíveket tartalmazó méretarányos rajzban 1-3 m, a kormány elengedés és ismételt megfogása 5-8 m x-irányú tartományban volt.

A sávváltás során kismértékű sebességcsökkenést lehetett regisztrálni. (l. sebesség diagrammokat)

Az így meghatározott kerékpár, súlyponti pályaíveket a 2. ábra szemlélteti.

A kerékpáros irányjelzéseinek helye az összegzett pályaíveket tartalmazó méretarányos rajzban 1-3 m x-irányú tartományban.



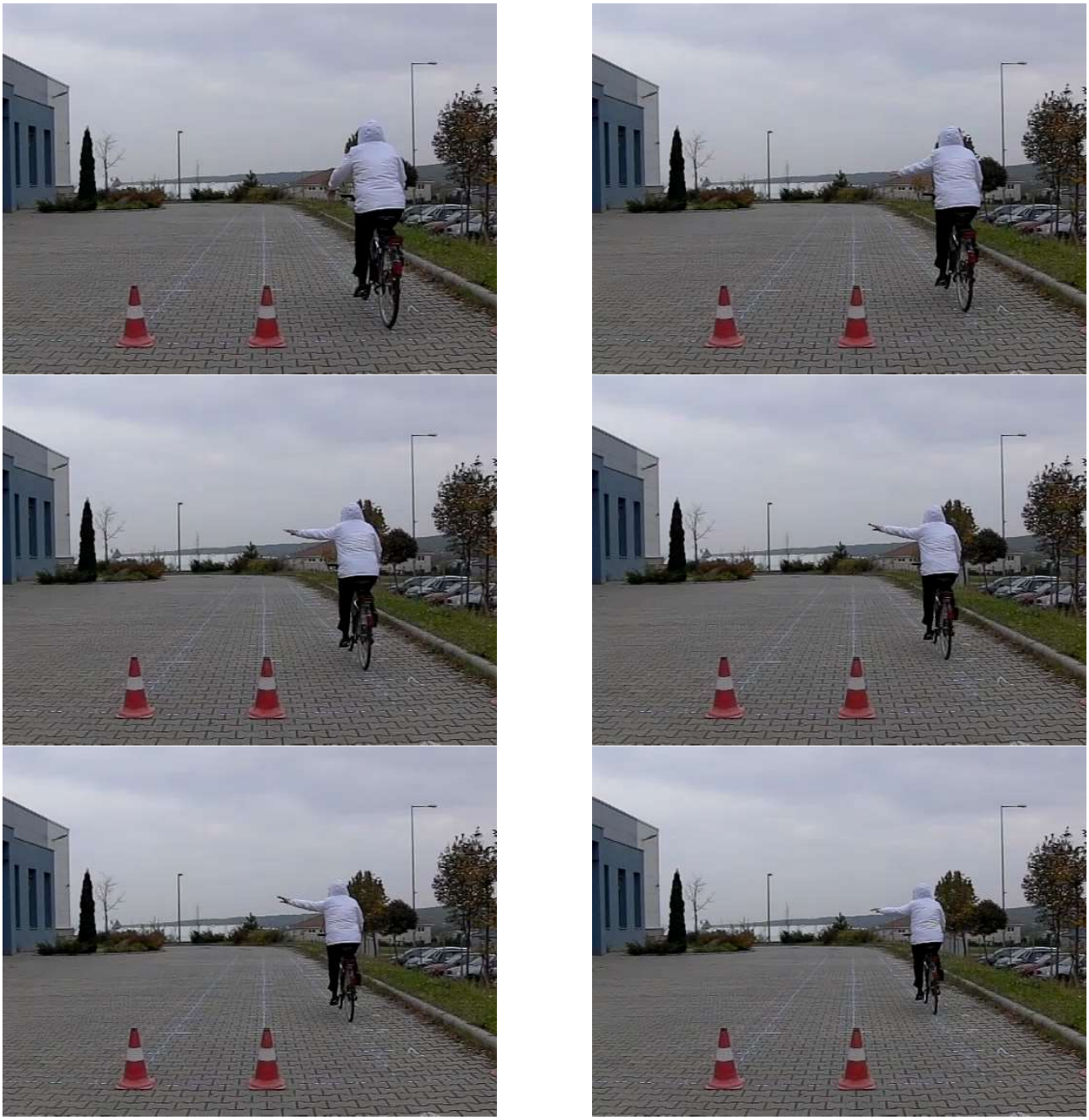
2. ábra: A kerékpár kanyarodási nyomvonalai (1-11. kísérlet)

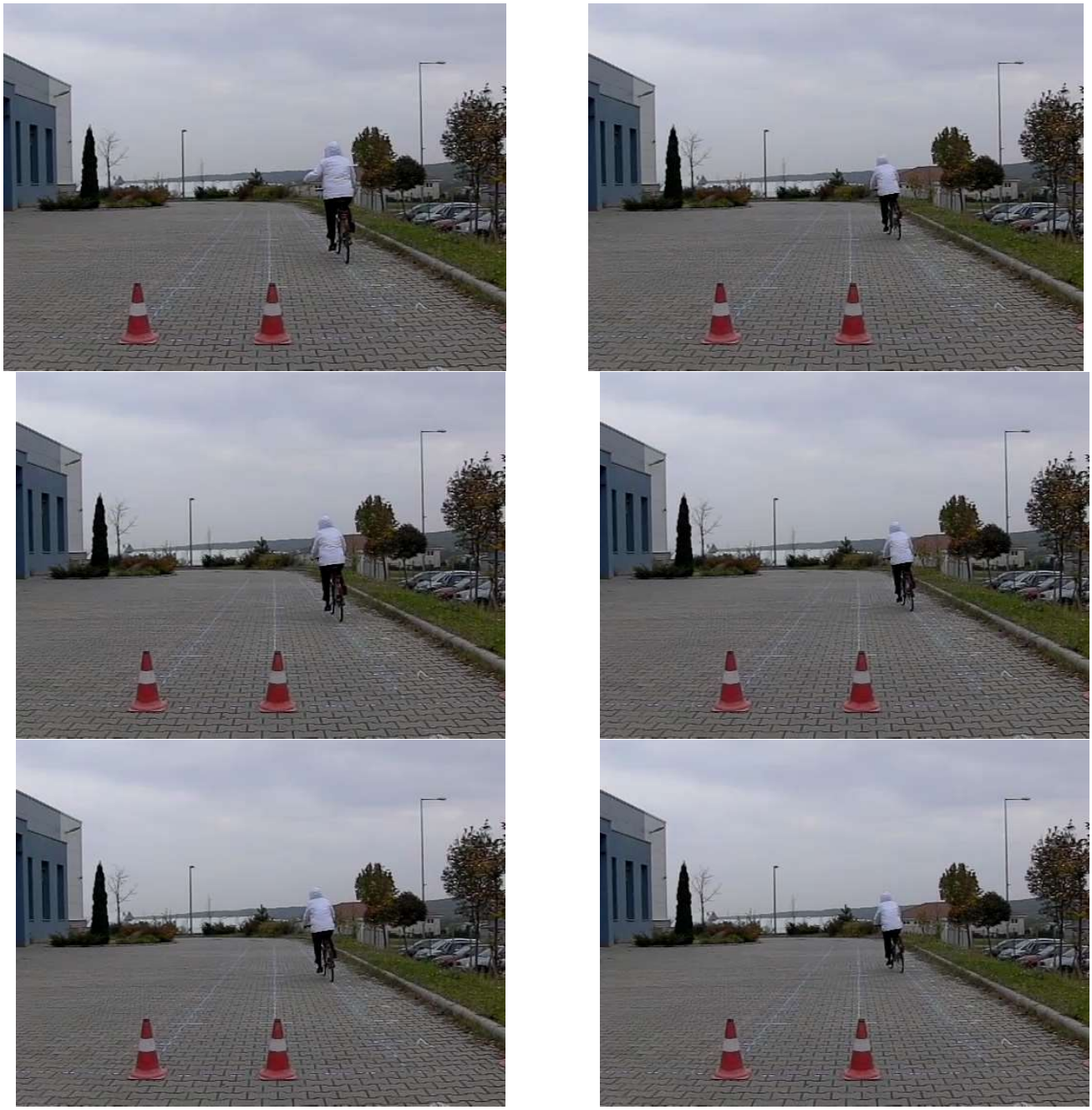
Sorsz.	Kezdeti sebesség (km/h)	Kanyarodási idő a baleset helyéig (s)	Max. oldalgyorsulás (m/s^2)
1	14,5	2,1	-
2	14,0	1,6	-
3	13,5	1,5	-
4	15,0	1,7	-
5	16,0	1,7	-
6	16,5	1,8	-
7	18,5	1,8	-
8	17,5	1,7	-
9	17,5	1,7	-
10	18,5	1,7	-
11	18,0	1,7	-
12	16,5	-	2,5
13	18,5	-	1,0
14	18,0	-	1,8
15	17,5	-	1,8
16	21,0	-	2,5
Min.	14,0	1,50	1,0
Max.	21,0	2,10	2,5
Átlag	16,9	1,7	1,9

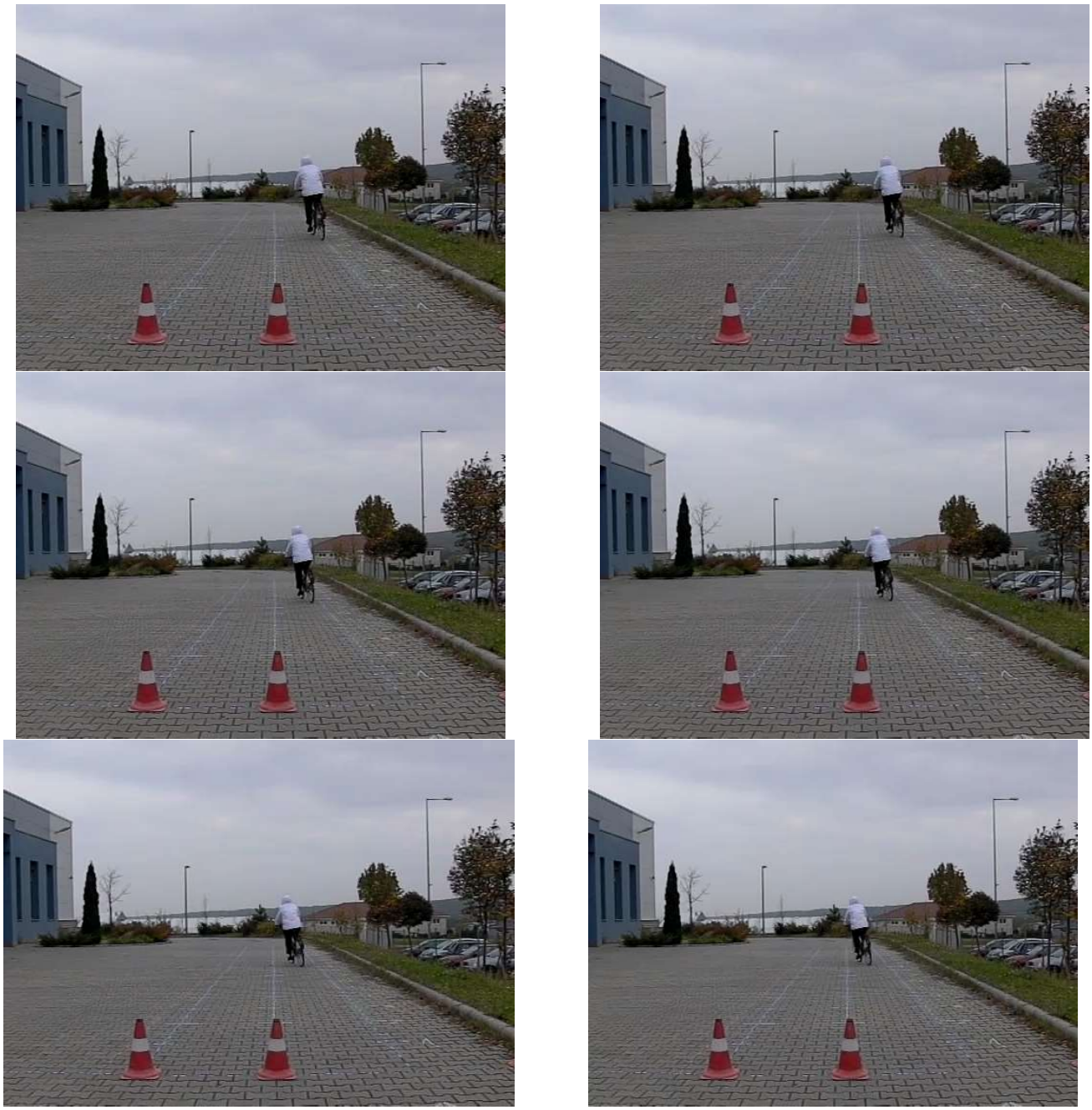
1. *Táblázat Kezdeti sebesség, kanyarodási idő a baleset helyéig és a maximális oldalgyorsulás*

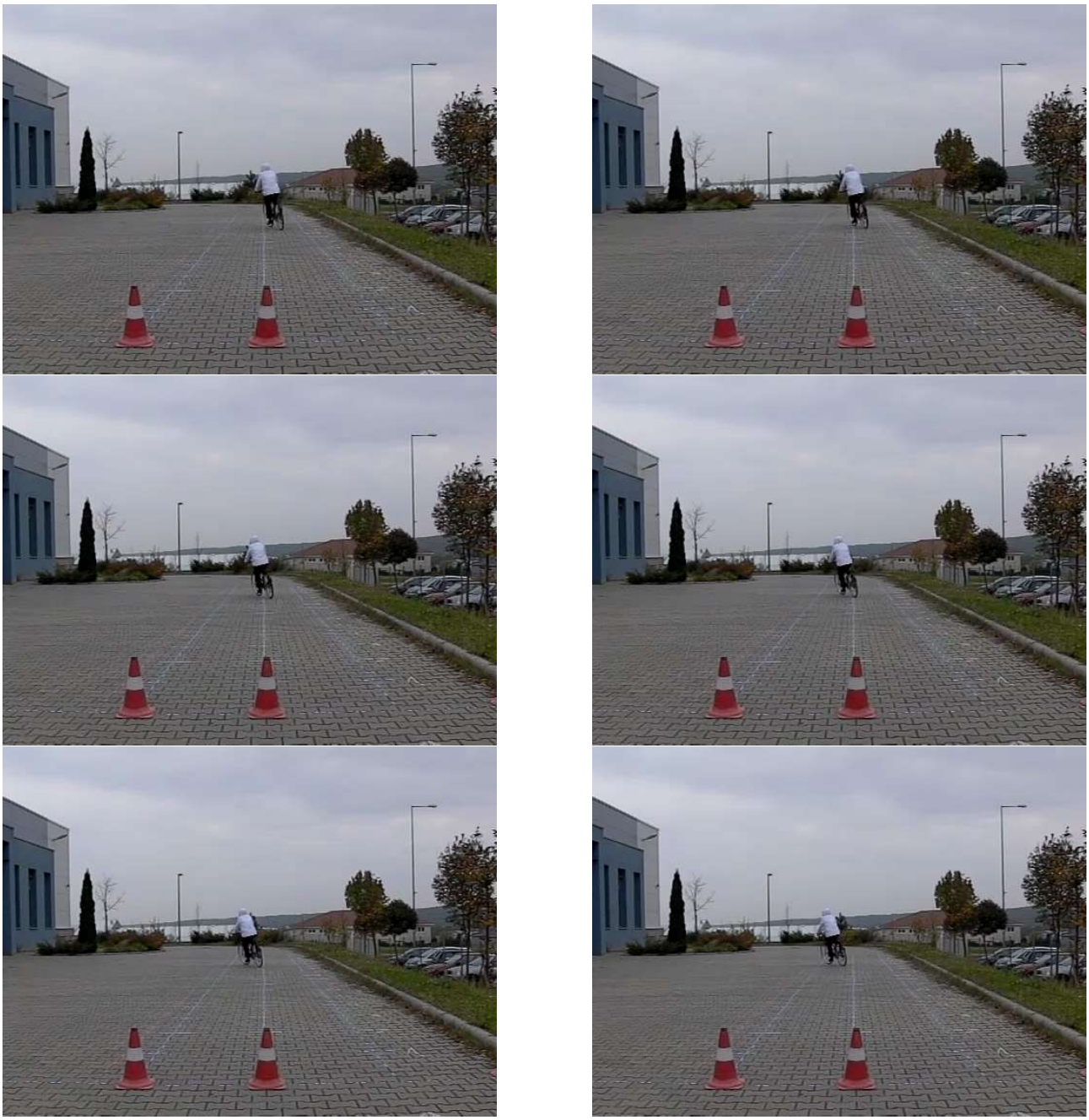
Jól érzékelhető, hogy a 2 és 3. sz. mérések kivételével a többi egy relatíve jól behatárolható, de a teljes oldalkitérés időpontjában ≈ 3,0 m-es x- tartományba volt sorolható.

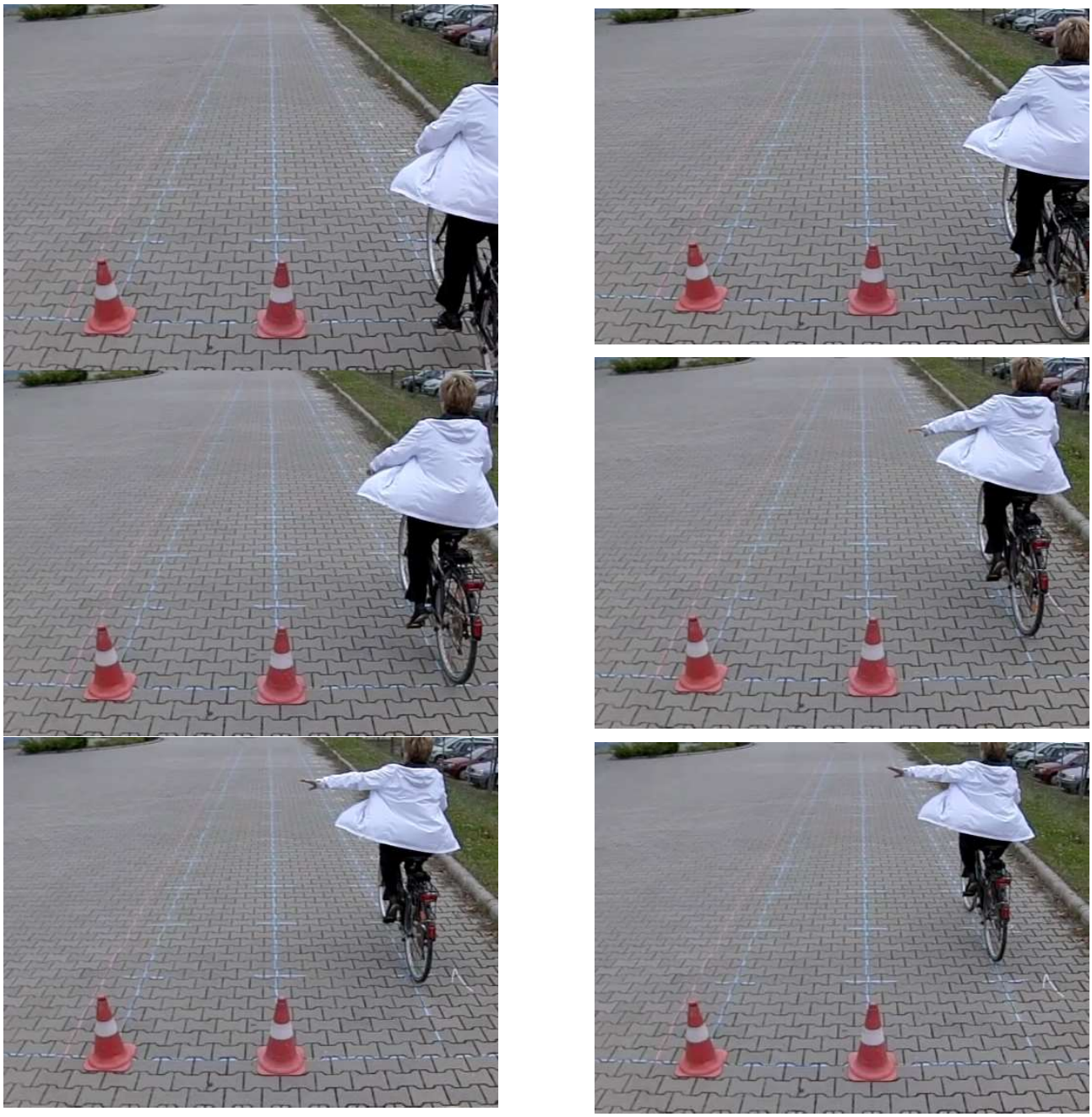
4. FÁZISKÉPEK ($\Delta t = 0{,}1s$) HÁTULNÉZET





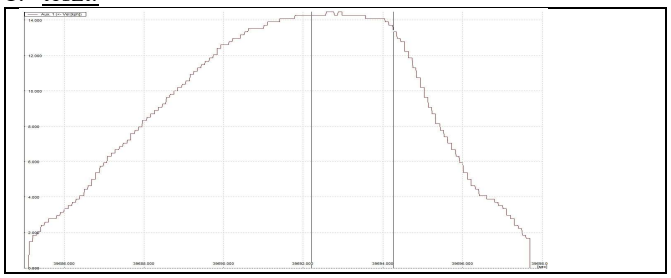




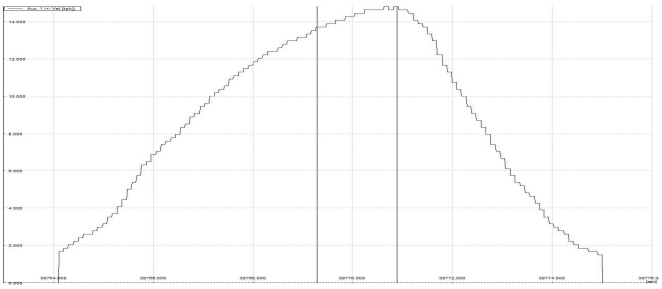


Mérési adatok

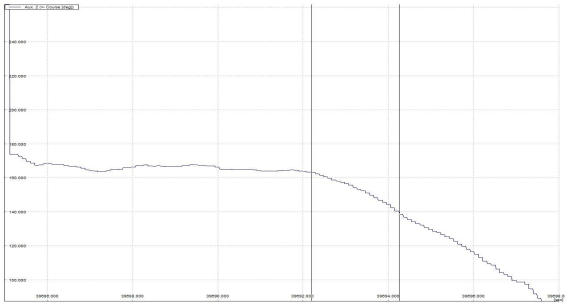
1. teszt:



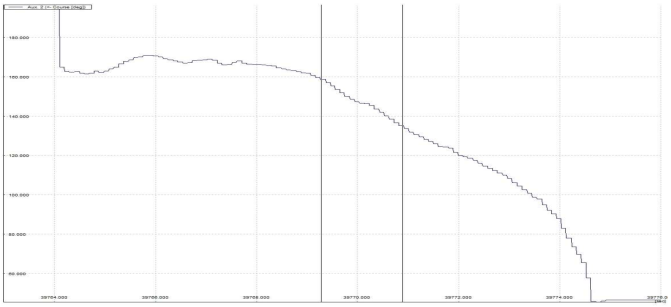
1. ábra: Sebesség – idő diagram (1. teszt)



1. ábra: Sebesség – idő diagram (2. teszt)

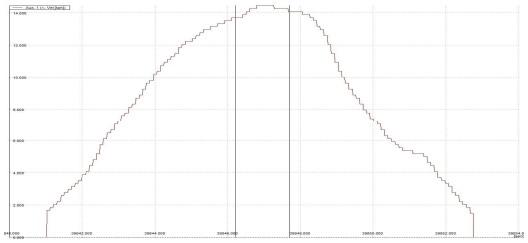


2. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (1. teszt)

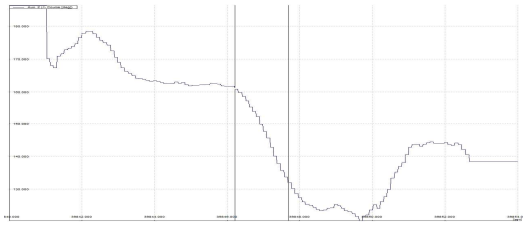


2. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (2. teszt)

Online: ISBN 978-615-82688-0-6
Paper 23
Copyright 2025 Budapest, MMA.
Editor: Dr. Péter Tamás

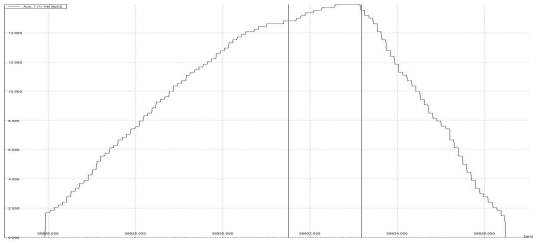


3. ábra: Sebesség – idő diagram (3. teszt)

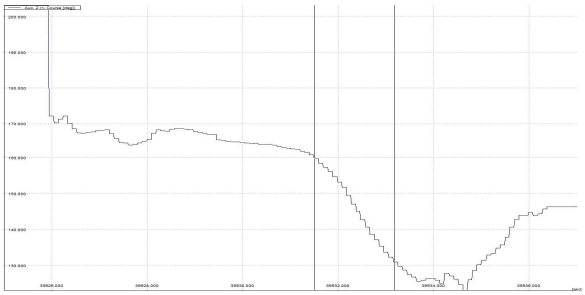


4. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (3. teszt)

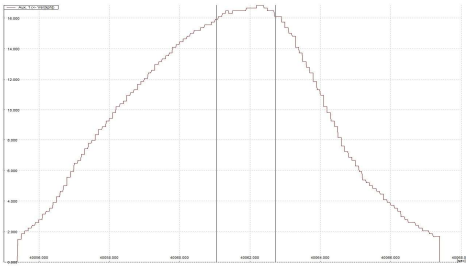
4. teszt:



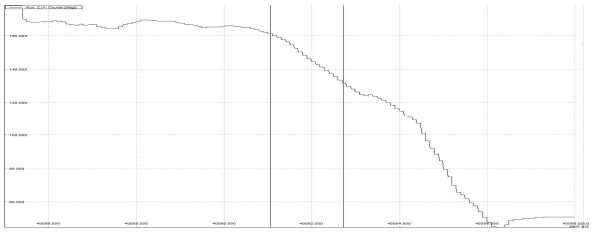
5. ábra: Sebesség – idő diagram (4. teszt)



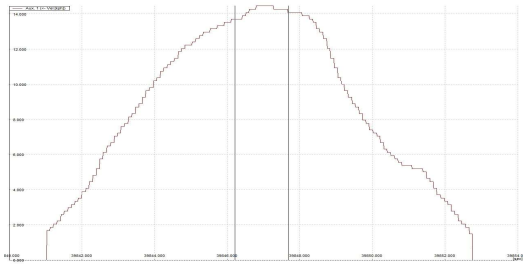
6. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (4. teszt)



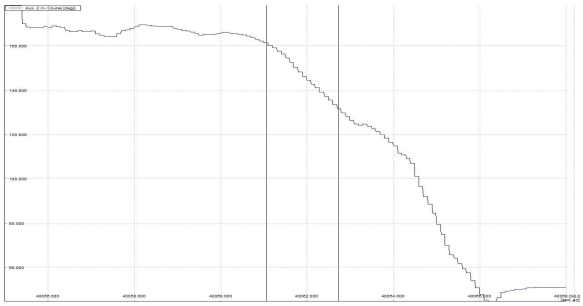
7. ábra: Sebesség – idő diagram (5. teszt)



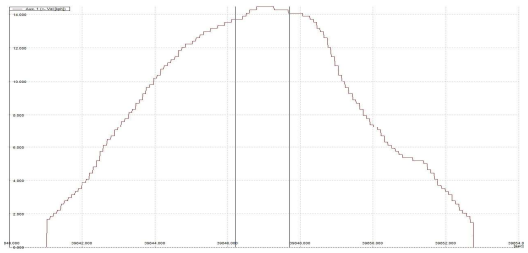
8. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (5. teszt)



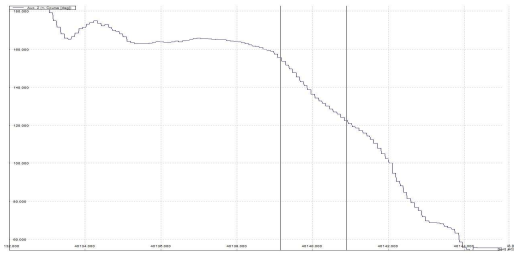
9. ábra: Sebesség – idő diagram (6. teszt)



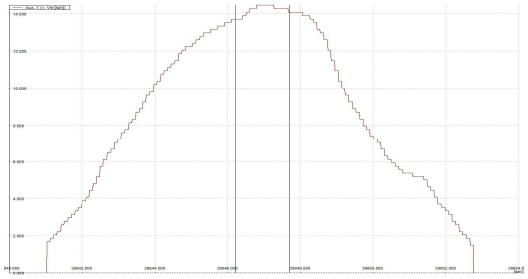
10. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (6. teszt)



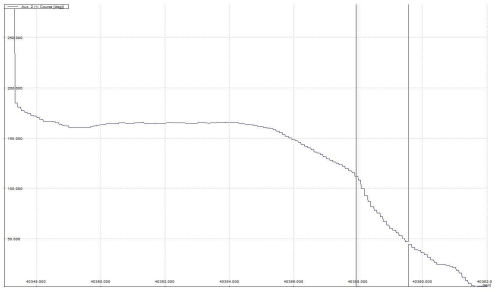
11. ábra: Sebesség – idő diagram (7. teszt)



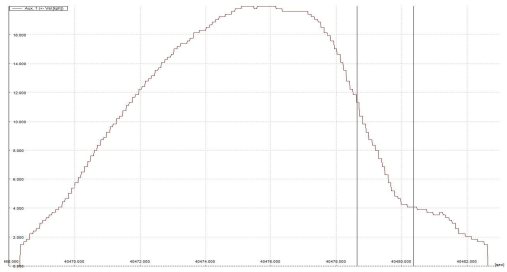
12. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (7. teszt)



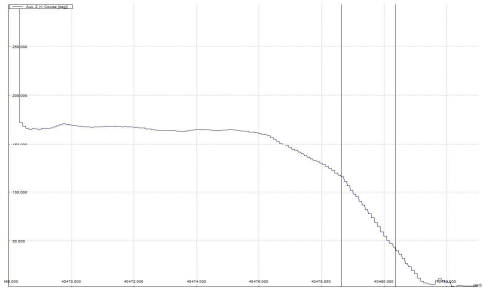
13. ábra: Sebesség – idő diagram (8. teszt)



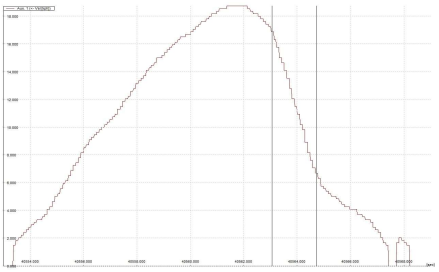
14. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (8. teszt)



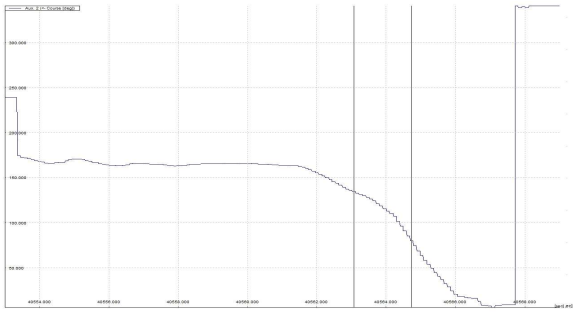
15. ábra: Sebesség – idő diagram (9. teszt)



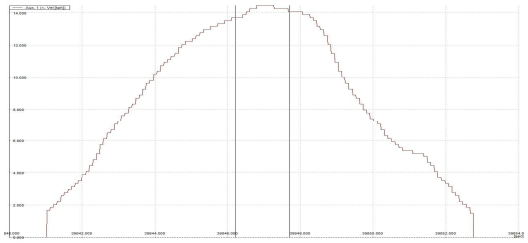
18. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (9. teszt)



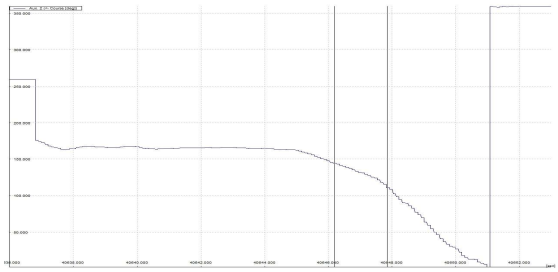
16. ábra: Sebesség – idő diagram (10. teszt)



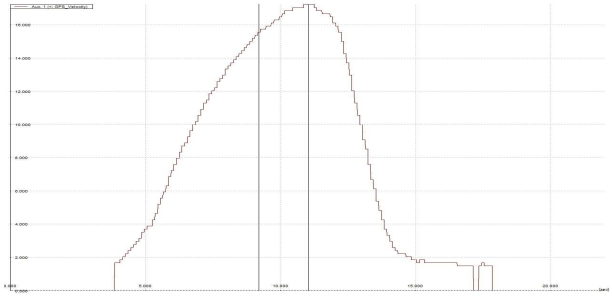
17. ábra: Szögelfordulás – idő diagram (10. teszt)



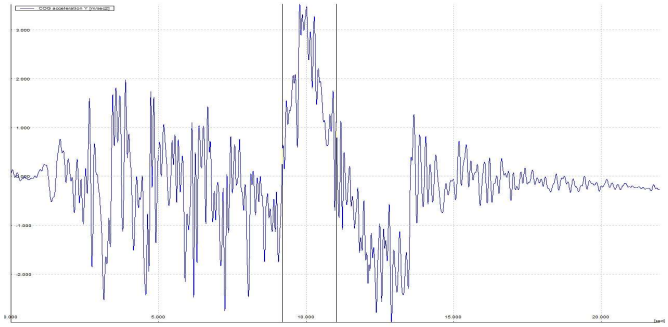
18. ábra: Sebesség – idő diagram (11. teszt)



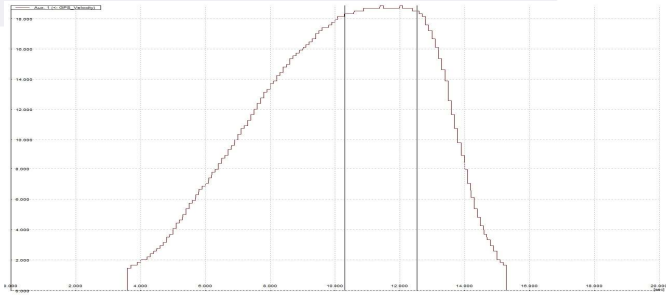
19. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (11. teszt)



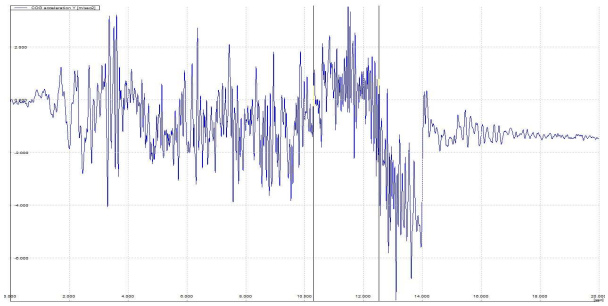
20. ábra: Sebesség – idő diagram (12. teszt)



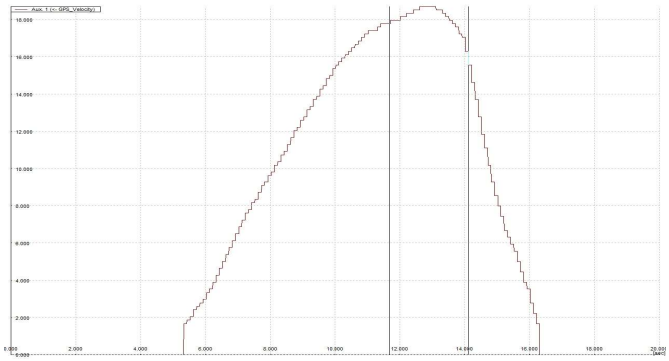
21. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (12. teszt)



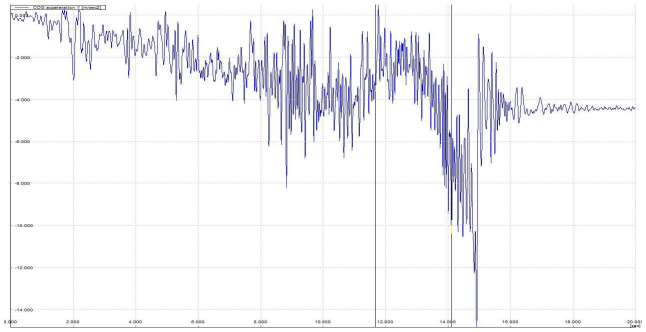
22. ábra: Sebesség – idő diagram (13. teszt)



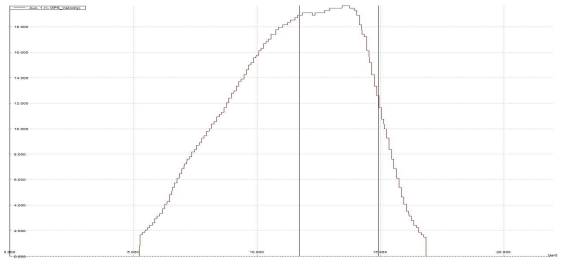
23. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (13. teszt)



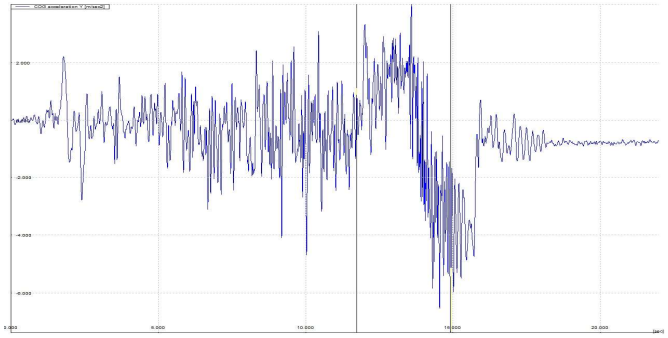
24. ábra: Sebesség – idő diagram (14. teszt)



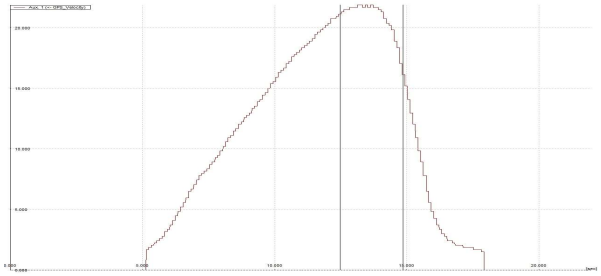
25. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (14. teszt)



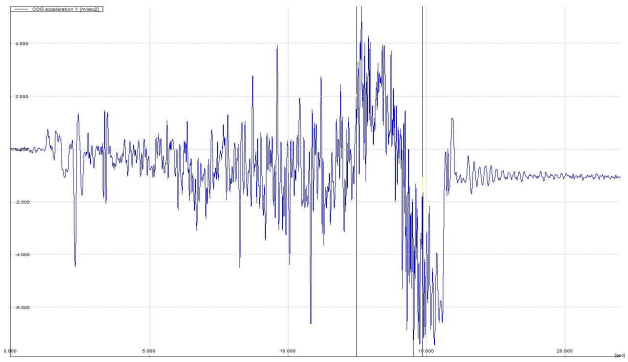
26. ábra: Sebesség – idő diagram (15. teszt)



27. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (15. teszt)



28. ábra: Sebesség – idő diagram (16. teszt)



29. ábra: Oldalgyorsulás – idő diagram (16. teszt)

Összefoglaló

Az eredeti kerékpáros kísérlet dinamikai mérési eredményei – megfelelő transzformációs és statisztikai elemzés mellett – hatékonyan adaptálhatók a precíziós bolygóművek méretcsökkentésének komplex mérnöki problémáiban. Az interdiszciplináris integráció révén mind a pályadiagramok, mind az összetett mérési rendszerek fejlesztésében új szinergiák jelennek meg a kompakt, nagy pontosságú bolygómű-kialakítások területén is.

Irodalomjegyzék

(A) Kerékpáros kanyarodás – menetkísérletek, modellezés, szenzorozás

1. Kooijman, J. D. G., Schwab, A. L., Meijaard, J. P. (2006–2008): Experimental validation of a model of an uncontrolled bicycle. *Multibody System Dynamics* + műszaki jelentések. (Instrumentált bicikli: dőlés-, yaw-, kormány- és kerékjeladók).
2. Schwab, A. L., Meijaard, J. P., Kooijman, J. D. G. (2006): *Experimental Validation of a Model of an Uncontrolled Bicycle* (Delft TU műszaki beszámoló).
3. Kooijman, J. D. G., et al. (2011): A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects. *Science*. (Alapelmélethez, kanyarodási stabilitási összefüggésekhez – háttér.)
4. Park, G. H. (2003): Estimation of vehicle cornering stiffness via GPS/INS (egyszerűsített „bicycle model”, sarokmerevség-becslés). *Korea Science Conf.* (módszertani analógia kerékpáros terepi mérésekhez).
5. Song, R., et al. (2021): Vehicle state estimation for INS/GPS aided by sensors (IMU+GNSS állapotbecslés, adaptálható kerékpáros mérésre). *Mechanical Systems and Signal Processing*.
6. Bini, G., et al. (2022): Assessing trajectories and bike handling abilities in road cycling with GPS. (Versenyhelyzeti pályagörbék, gyorsulások – időfutam adatelemzés).
7. Experimental validation of the lateral dynamics of a bicycle (2009): Futópadon végzett lateráldinamika-validáció; szenzorozás és azonosítás.

(B) Precíziós bolygóművek – méretcsökkentés, optimalizáció, gyárthatóság

8. Wang, X. (év nélkül/korábban): High power density design for planetary gear transmission system (PSO/SA optimalizáció, térfogat és veszteség minimalizálás).
9. Parmar, A., et al. (2020): Macro geometry multi-objective optimization of planetary gear sets (többcélú optimum: tömeg, hatásfok, megbízhatóság). *Mechanism and Machine Theory*.
10. Machine Design szerk. (2012): Planetary gears — review of basic design criteria and sizing options

(kompakt, nagy nyomatéksűrűség, alacsony holtjáték).

11. *Critical Review of Design of Planetary Gears and Gear Box* (összefoglaló irodalom – előnyök, tervezési szempontok).
12. Tallerico, T., et al. (2022): Genetic Optimization of Planetary Gearboxes Based on Mass and Efficiency (elektromos hajtásokhoz; GA-optimalizáló eszköz). NASA TM-20220008843.

(C) Interdiszciplináris alkalmazások (AM/3D-nyomtatás, aktorok, kísérleti hajtásláncok)

13. Berri, P. C., Dalla Vedova, M. D. L., Maggiore, P., Riva, G. (2020): Design and Development of a Planetary Gearbox for Electromechanical Actuator Test Bench through Additive Manufacturing. *Actuators*, 9(2):35. (FDM-alapú gyors prototípus, alacsony tömeg/költség).
14. *Planetary Gearbox Design and Development using Additive Manufacturing* (2023 körül): AM-szemlélet, bolygóművek oktatási/prototípus célú nyomtatása.