

# Kisméretű járműplatformok modellezése és irányítása

## Modeling and control of small-scale vehicle platforms

*FLOCH Kristóf* hallgató<sup>1</sup>, fejlesztő<sup>2</sup>, *Dr. PÉNI Tamás* tud. főmunkatárs<sup>2</sup>,  
*Dr. TÓTH Roland* tud. főmunkatárs<sup>2</sup>, *Dr. BUDAI Csaba* adjunktus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék,  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3  
mogi.bme.hu

<sup>2</sup>Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet,  
Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratórium,  
1111 Budapest, Kende u. 13-17.  
sztaki.hu

Email: floch.kristof@sztaki.hu, peni.tamas@sztaki.hu, toth.roland@sztaki.hu, budaicaba@mogi.bme.hu

### Abstract

*In recent years there has been a growing interest in small-scale vehicle platforms. With the help of these platforms, autonomous navigation and control algorithms can be efficiently tested and evaluated. This paper presents modelling and control techniques specifically designed for small-scale autonomous ground vehicles. The introduced model accurately describes the motion dynamics of the vehicle and the designed low-level control algorithms can provide precise trajectory tracking.*

**Keywords:** dynamic modeling, parameter estimation, trajectory-tracking, LPV model, gain-scheduled control

### Kivonat

*Az elmúlt években egyre nagyobb az érdeklődés a kisméretű járműplatformok iránt. Ezen platformok segítségével az autonóm navigációs- és irányítási algoritmusok hatékonyan tesztelhetők és kiértékelhetők. Jelen cikk olyan modellezési és irányítási módszereket mutat be, amelyek kifejezetten kisméretű autonóm földi járművekhez lettek tervezve. A bemutatott modell pontosan leírja a jármű mozgásdinamikáját, a fejlesztett alacsony szintű szabályozási algoritmusok pedig precíz pályakövetést tudnak biztosítani.*

**Kulcsszavak:** dinamikus modellezés, paraméterbecslés, pályakövetés, LPV modell, gain-scheduled szabályozás

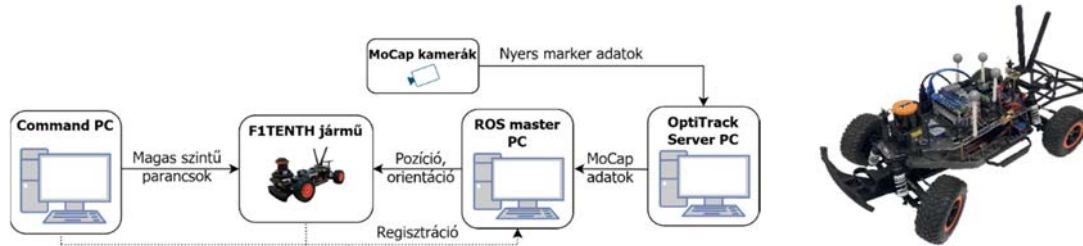
## 1. Bevezetés

Az autonóm rendszerek folyamatos fejlődésének köszönhetően az intelligens mobil robotok a tudomány és az ipar területén is egyre nagyobb szerepet kapnak. Annak érdekében, hogy megfelelően ki tudjuk aknázni az ezekben az eszközökben rejlő lehetőségeket hatékony irányítási algoritmusok tervezésére van szükség. A kutatási és fejlesztési folyamatok elősegítése érdekében egyre nagyobb az érdeklődés a kisméretű járműplatformok [1] iránt, amelyeken az ilyen algoritmusok tesztelhetők és megfelelően kiértékelhetők. Ezen cikk a kisméretű autó alapú platformok modellezését és irányítását tárgyalja.

A járművek mozgását egy nemlineáris dinamikus modell [2] segítségével írjuk le, melyben külön szerepet kap a hajtáslánc, valamint a kerekek viselkedésének modellezése [3]. Annak érdekében, hogy a bemutatott modell paraméterei egyszerűen meghatározhatók legyenek, könnyen kivitelezhető paraméterbecslő eljárások kerülnek bemutatásra. Ezután, a kapott modellre építve, olyan alacsony szintű pályakövető szabályozást ismertetünk, amely hatékony manőverezést tesz lehetővé, kis helyigénnyel. A bemutatott modellezési és irányítási módszerek célja, hogy megfelelő alapot nyújtsanak magasszintű irányítási és navigációs algoritmusok fejlesztéséhez és kiértékeléséhez.

## 2. Tesztkörnyezet

A kutatás hardveres hátterét a SZTAKI mobil robotokkal foglalkozó AIMotionLab tesztarénája biztosította. A tesztkörnyezet fő elemei az 1/10 méretarányú elektromos FITENTH [1] RC autók, amelyek kifejezetten kutatási és oktatási célokra lettek kifejlesztve. Az autók beépített motorvezérlővel rendelkeznek az autonóm működést pedig egy Nvidia Jetson TX2 teszi lehetővé, amely vezeték nélküli hálózaton keresztül kommunikál a környezetével. Emellett rendelkezésre áll egy nagypontosságú beltéri pozíciórendszer, amely 14 darab OptiTrack Prime X 13 infravörös kamerából és egy központi szervergépből áll. A járművekre helyezett markerek segítségével azok pozícióját a kamerák érzékelné tudják, amit a szervergép feldolgozást követően kiközzvetít a lokális hálózaton. A hálózati kommunikáció ROS infrastruktúrára épül, amelyet a ROS Master PC kezel. A járművek magas szintű irányítását és felügyeletét a Command PC végzi. A teljes tesztkörnyezetet az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Az AIMotionLab tesztkörnyezet (bal) és az FITENTH platform (jobb)

### Járműmodell

A jármű mozgásdinamikáját a dinamikus bicikli modell [2] írja le. Ennek a nemlineáris állapotér reprezentációnak bemenete az autó kormánysszöge, valamint a kerekeken ható erők. Annak érdekében, hogy a kerekeken ható erőket meg tudjuk határozni kiegészítő modellek szükségesek. A kerekeken ható longitudinális kerékerőt egy hajtáslánc modell segítségével határoztuk meg, amely kapcsolatot teremt a szabályozók által aktuált motorbemenet és a ható erő közt. Az általunk bevezetett hajtáslánc egy módosított változata a korábban alkalmazott megoldásoknak [4, 5]. A kerekeken ható laterális erőket egy lineáris kerékmodell segítségével határoztuk meg, amely kielégítőnek bizonyult az általunk használt működési tartományban. A teljes modellt a következő egyenletek írják le:

$$\dot{x} = v_{\xi} \cos(\varphi) - v_{\eta} \sin(\varphi), \quad (1.1)$$

$$\dot{y} = v_{\xi} \sin(\varphi) + v_{\eta} \cos(\varphi), \quad (1.2)$$

$$\dot{\varphi} = \omega, \quad (1.3)$$

$$\dot{v}_{\xi} = \frac{1}{m} (F_{\xi} + F_{\xi} \cos(\delta) - F_{f,\eta} \sin(\delta) + m v_{\eta} \omega), \quad (1.4)$$

$$\dot{v}_{\eta} = \frac{1}{m} (F_{r,\eta} + F_{\xi} \sin(\delta) + F_{f,\eta} \cos(\delta) - m v_{\xi} \omega), \quad (1.5)$$

$$\omega = \frac{1}{I_z} (F_{f,\eta} l_f \cos(\delta) + F_{\xi} l_f \sin(\delta) - F_{r,\eta} l_r), \quad (1.6)$$

$$F_{\xi} = C_{m1} d - C_{m2} v_{\xi} - C_{m3} \text{sign}(v_{\xi}), \quad (1.7)$$

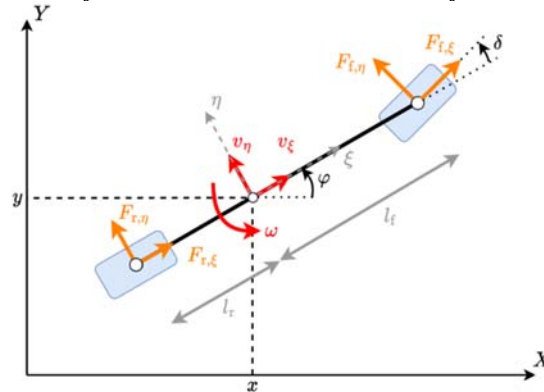
$$F_{r,\eta} = C_r \alpha_r = C_r \left( \frac{-v_{\eta} + l_r \omega}{v_{\xi}} \right), \quad (1.8)$$

$$F_{f,\eta} = C_f \alpha_f = C_f \left( \delta - \frac{v_{\eta} + l_f \omega}{v_{\xi}} \right), \quad (1.9)$$

ahol  $(x, y)$  a jármű tömegközéppontjának pozíciója,  $\varphi$  az orientációja az X tengelytől mérve,  $v_{\xi}$  és  $v_{\eta}$  a longitudinális és laterális sebesség a járműköz rögzített mozgó koordináta rendszerben,  $\omega$  pedig a szögsebességet jelöli. A modell bemenetei  $d$  motor referencia és  $\delta$  kormánysszög. A modell fizikai paramétereit  $m$  tömeg  $I_z$  tehetetlenségi nyomaték, valamint  $l_r$  és  $l_f$  amelyek a hátsó és az első tengely tömegközépponttól számított távolságát jelöli. Továbbá a kerékmodellnek paramétere  $C_r$  és  $C_f$  kanyarodási együtthatók, illetve

$C_{m1}, C_{m2}, C_{m3}$  a hajtáslánc paraméterek. A modellt, valamint annak paramétereit és változóit a 2. ábra mutatja be.

2. ábra. A jármű dinamikus bicikli modellje.



### 3. Paraméterbecslés

A bevezetett járműmodell rendelkezik mind fizikai, mind pedig empirikusan bevezetett paraméterekkel. Míg a fizikai paraméterek ( $m, l_r, l_f, I_z$ ) egyszerűen mérhetők, illetve számíthatók addig a kerékmódel ( $C_r, C_f$ ) és a hajtáslánc ( $C_{m1}, C_{m2}, C_{m3}$ ) paraméterértékeit csak kísérletek útján tudjuk meghatározni.

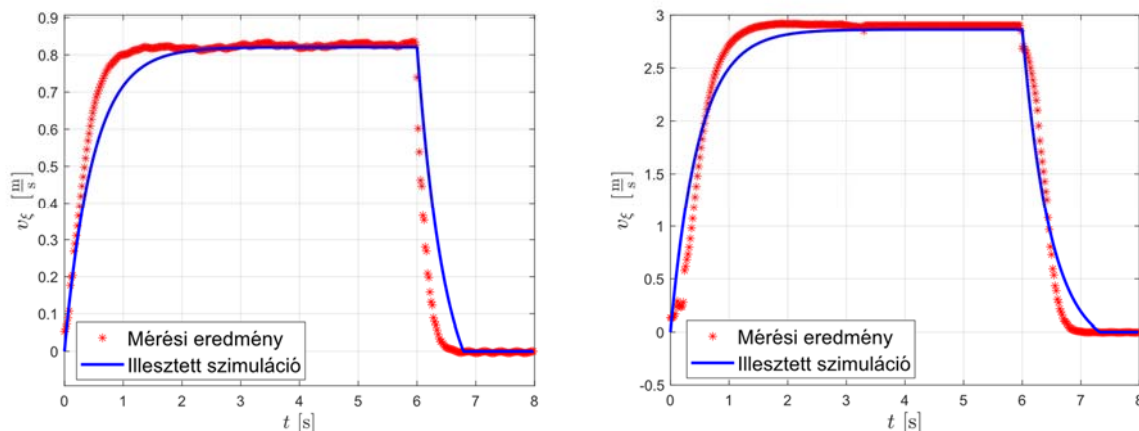
#### Hajtáslánc identifikáció

A hajtáslánc paramétereinek meghatározáshoz egyenes vonalú gyorsulási és lassulási kísérleteket végeztünk, különböző motorreferencia bemenetek mellett, ahogy azt [4] mutatja be. Ennek a kísérletnek a fő előnye, hogy a laterális dinamika teljes mértékben elhanyagolható, így a longitudinális sebességprofil a következő egy dimenziós LTI rendszerre egyszerűsödik:

$$\dot{v}_\xi = -\frac{2C_{m2}}{m} v_\xi + \left[ \frac{2C_{m1}}{m} \quad -\frac{2C_{m3}}{m} \right] \begin{bmatrix} d \\ \text{sign}(v_\xi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

amit zérusrendű tartó segítségével diszkrétizáltuk  $f_s = 25$  Hz mintavételi frekvencián.

A mérések során a járműre ugrásszerűen adtuk a rá a  $d$  motor referenciát, amelyet állandó értéken tartottunk adott ideig majd visszaállítottuk 0-ra, amíg az autó meg nem állt. A kísérlet során az autó pozíciójának változását az OptiTrack rendszer követte, majd numerikus differenciálással  $f_s = 25$  Hz lépésközzel előállítottuk a sebességprofil. Ezután egyenlet által definiált sebességprofil azonos bemenetekkel szimulálva ráillesztettük a mért adatokra, nemlineáris legkisebb négyzetek optimalizációval. A kísérletet és a sebességprofil illesztést  $d = 0,05$  és  $d = 0,2$  értékek között végeztük el 0,025 lépésként. A paraméterbecslés eredményét a 3. ábra mutatja különböző referencia értékek esetén.



3. ábra: A mért sebességprofil és az illesztett szimuláció  $d=0,06$  (bal) és  $d=0,15$  (jobb) referencia esetén

#### Kerékmódel identifikáció

A kerékmódel identifikáció során a cél az empirikusan bevezetett kanyarodási együtthatók meghatározása. A szakirodalomban számos módszer ismert, melyek segítségével komplex kerékmódellek

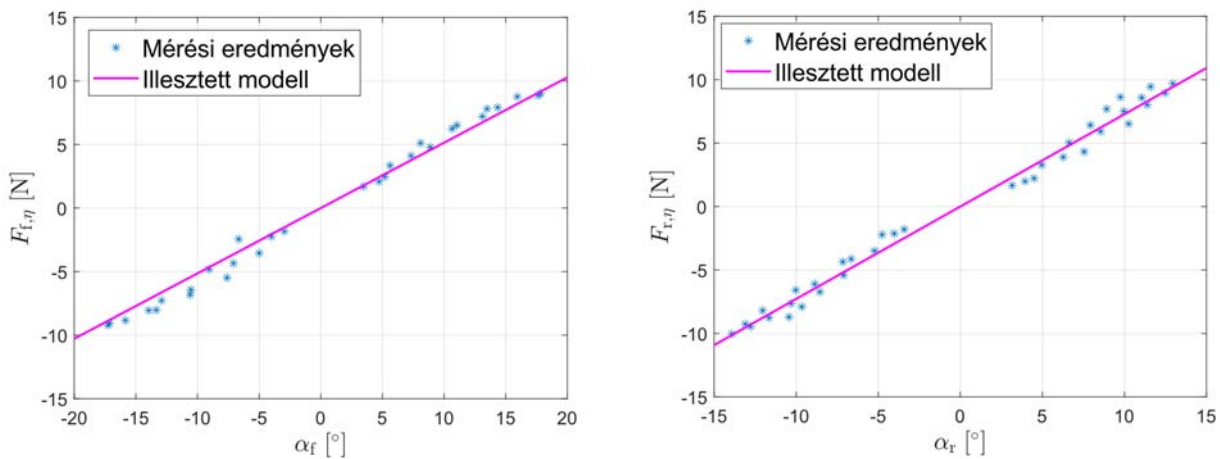
identifikálhatók [3]. Ezen megoldások azonban a korábban ismertett tesztkörnyezetben nem alkalmazhatók ugyanis a mérések kivitelezéséhez nagy térre van szükség. Jelen cikkben egy olyan megoldást mutatunk be, amelynek mérései kis helyigénnyel végrehajthatók zárt, illetve korlátozott térben. A módszer alapját a nagysebességű állandósult körpályán végrehajtott mérések adják, melyet már korábban sikerrel alkalmaztak kisméretű RC autók driftelésének vizsgálatakor [6].

Állandósult körpályán történő mozgás esetén a laterális kerékerők a következő egyenletekkel közelíthetők:

$$F_{f,\eta} = \frac{ml_r}{(l_f + l_r) \cos(\delta)} v_\xi \omega, \quad (3.1)$$

$$F_{r,\eta} = \frac{ml_f}{l_f + l_r} v_\xi \omega. \quad (3.2)$$

A laterális erők tehát kifejezhetők a modell állapotainak függvényeként így, mivel az állapotokat a motion-capture rendszernek köszönhetően tudjuk becsülni, az erők kiszámíthatók. A modellben szereplő  $\alpha_f$  és  $\alpha_r$  kúszási szögek szintén az állapotok, valamint a bementetek függvényei, így ezek is meghatározhatók. A 4. ábrán jól látható, hogy a laterális erő-kúszási szög kapcsolat lineáris, így egy egyenes illesztésével meghatározható a kanyarodási együttható mind az első mind a hátsó kerékre.



4. ábra. Illesztett modell az első (bal) valamint a hátsó (jobb) kerékre

## 4. Pályakövető irányítás

Annak érdekében, hogy a jármű hatékonyan tudjon navigálni kis helyigénnyel, precíz pályakövetésre van szükség, melynek megvalósítására a szakirodalomban számos módszer ismert [7]. Jelen cikk egy modell alapú teljes állapotvisszacsatolást mutat be.

Mivel az előző fejezetben identifikált modell erős nemlinearitásokat tartalmaz, klasszikus LTI szabályozási módszerek nem alkalmazhatók. Annak érdekében, hogy ezt a problémát kiküszöböljük, a teljes nemlineáris dinamikát, két külön részrendszerre csatoltuk szét, melyek rendre a jármű laterális és longitudinális viselkedését írják le. Ezt követően a szétcsatolt részrendszerekre egymástól függetlenül terveztünk állapotvisszacsatolást, melyek közül előbbi a kormányzószöget, utóbbi a motor referenciát szabályozza. Azért, hogy a két független részrendszer egymásra gyakorolt hatását figyelembe tudjuk venni, laterális és longitudinális dinamikát lineáris változó paraméterű (LPV) [8] reprezentációban írtuk le. Az LPV keretrendszer ugyanis lehetőséget ad arra, hogy komplex, nemlineáris viselkedést kezelni tudjunk, miközben megőrizzük a lineáris modellek kedvező tulajdonságait.

Az állapotvisszacsatolást egy diszkrét idejű gain-scheduled lineáris kvadratikuss regulátor (LQR) szabályozóval valósítottuk meg. Ennek a módszernek az alapja, hogy a modellek változó paramétereinek tartományán egy adott beosztást felvéve az LPV rendszert véges számú LTI rendszerre bontjuk fel. Ezekre a rendszerekre diszkrét idejű LQR szabályozó [9] tervezhető, amely megadja az adott munkapont optimális visszacsatolási mátrixát. Ezt követően a visszacsatolási mátrixok elemei a teljes paramétertartományon polinomokkal interpolálhatók, aminek eredményeként egy paraméterfüggő polinomiális visszacsatolást kapunk.

A jármű **laterális** viselkedése pályamenti linearizálást és az orientációs dinamika elhanyagolását követően a következő differenciálegyenletekkel írható le:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ e_\eta \\ \dot{e}_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -(C_r + C_f) \\ & & mv_\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ e_\eta \\ \dot{e}_\eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_f \\ m \end{bmatrix} \delta, \quad (4)$$

ahol az állapot  $x = [q \ e_\eta \ \dot{e}_\eta]^T$  a laterális hibát, annak integráltját és deriváltját tartalmazza. A modellben  $v_\xi$  longitudinális sebesség változó paraméterként szerepel. Az általunk alkalmazott algoritmus a következő egyenlettel fejezhető ki:

$$\delta[k] = -\theta_e - K_{lat}(v_\xi)x[k], \quad (5)$$

ahol a modellből elhanyagolt  $\theta_e$  orientációs hibát előreccsatolással, a hibadinamikát pedig az LQR visszacsatolással kompenzáljuk.

A **longitudinális** dinamika LPV reprezentációja a következő:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s \\ v_\xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & p \\ 0 & -\frac{2C_{m2}}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ v_\xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{m1}}{m} \end{bmatrix} d - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{m3}}{m} \end{bmatrix} \text{sign}(v_\xi), \quad (6)$$

ahol az állapot  $x = [s \ v_\xi]^T$  a pályamenti elmozdulást, valamint a laterális dinamikát tartalmazza,  $p$  változó paraméter pedig a laterális dinamika hatását írja le. A longitudinális rendszer stabilizálásához a következő szabályzóalgoritmust alkalmazzuk:

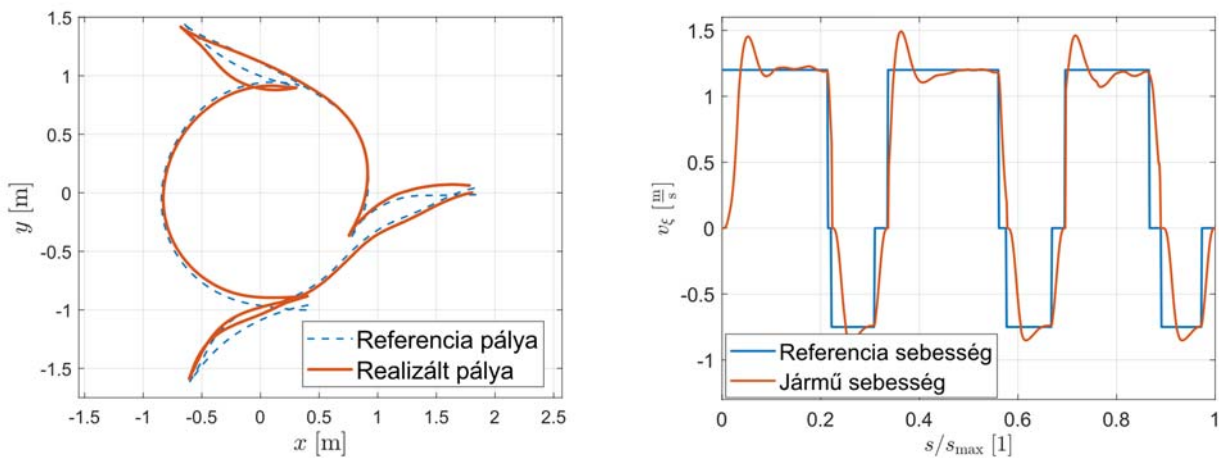
$$d[k] = \frac{C_{m2}}{C_{m1}} v^r[k] + \frac{C_{m3}}{C_{m1}} \text{sign}(v_\xi[k]) - K_{long}(p)x[k], \quad (7)$$

ahol  $v^r$  a pályamenti referencia sebesség.

## 5. Valós kísérletek

A tervezett szabályozók performanciáját a SZTAKI AIMotionLab tesztkörnyezetben vizsgáltuk. Annak érdekében, hogy a jármű manőverezőképessége kellőképpen bemutatásra kerüljön egy komplex 6 szakaszból álló referenciapályát írtunk elő a járműnek, melyben megtalálhatóak előremeneti, valamint tolatás szakaszok is. A pályák mellett az előírt sebességprofil szakaszonként konstans volt  $v^r = 1,2$  m/s előremenetben és  $v^r = -0,75$  m/s hátramenetben. A kísérletekről videófelvétel is készült, amely online megtekinthető: [https://youtu.be/X\\_GDFcN\\_bQE](https://youtu.be/X_GDFcN_bQE).

Az útvonal és sebességprofil követést az 5. ábra szemlélteti. Jól látható, hogy az előző fejezetben bemutatott szabályzóalgoritmusok hatékony pályakövetést tettek lehetővé, így precíz manőverezést biztosítva a jármű számára. A jármű végső pozícióhibája 5 cm alatt maradt az mind a hat pályaszakaszon. A kísérleteket előremenetben 1,5 m/s hátramenetben 0,9 m/s maximális sebességig sikerült kivitelezni. Ennél nagyobb értékek esetén az előírt pályagörbület már túl nagy így az autó oldalcsúszása szignifikánsá válik, ami nagyobb deviációt eredményez az előírt pályától.



5. ábra. Pályakövetési kísérletek eredménye: referencia útvonal és a jármű által bejárt útvonala (bal), referencia és mért sebességprofil (jobb)

A járművek irányításához készített szoftveres keretrendszer elérhető az AIMotionLab Github oldalán, a következő linken: <https://github.com/AIMotionLab-SZTAKI/aimotion-fleet1>tenth.

## 6. Konklúzió

Jelen cikk modellezési és alacsony szintű pályakövető irányítási módszereket mutatott be kisméretű járműplatformok számára. Bemutatásra került egy olyan nemlineáris dinamikus modell, amely képes a járművek mozgásának pontos leírására, így az mind szimulációs mind pedig irányítási célra alkalmazható. Ezen felül bemutatásra került egy modell alapú pályakövető szabályzóalgorithmus, amely precíz navigációt tesz lehetővé kis helyigénnyel, ezzel megfelelő alapot nyújtanak magasszintű irányítási és navigációs algoritmusok fejlesztéséhez és kiértékeléséhez.

## Köszönetnyilvánítás

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

## Irodalmi hivatkozások

- [1] Agnihotri A., O’Kelly M., Mangharam R., Abbas H., *Teaching autonomous systems at 1/10th-scale: Design of the f1/10 racecar, simulators and curriculum*, in Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education, ser. SIGCSE ’20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, p. 657–663
- [2] Althoff M., Koschi M., Manzingger S., *Commonroad: Composable benchmarks for motion planning on roads*, in 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2017, pp. 719–726
- [3] Bakker E., Nyborg L., Pacejka H. B., *Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies*, SAE Transactions, vol. 96, pp. 190–204, 1987
- [4] Zahradka D., *Optimization-based control of the f1/10 autonomous racing car*, Master’s thesis, Czech Technical University in Prague, 2020.
- [5] Liniger A., Domahidi A., Morari M., *Optimization-based autonomous racing of 1:43 scale RC cars*, Optimal Control Applications and Methods, vol. 36, no. 5, pp. 628–647, 2014.
- [6] Ravizzoli C., *Identification and control of an rc car for drifting purposes*, Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2017
- [7] Yao Q., Tian Y., Wang Q., Wang S., *Control strategies on path tracking for autonomous vehicle: State of the art and future challenges*, IEEE Access, vol. 8, pp. 161 211–161 222, 2020
- [8] den Boef P., Cox P. B., Tóth R., *Lpycore: Matlab toolbox for lpy modelling, bidentification and control*, IFAC-PapersOnLine, vol. 54, no. 7, pp. 385–390, 2021, 19th IFAC Symposium on System Identification SYSID 2021.
- [9] Kwakernaak H., Sivan R., *Linear optimal control systems*. New York: Wiley Interscience, 1972. 49