

Mozgásszabályozási algoritmusok vizsgálata prototípus autó önvezető rendszeréhez

1. BEVEZETÉS – SZABÁLYOZÁSI PROBLÉMÁK

Az autonóm járműirányítási rendszerek jellemzően réteges architektúrára épülnek. Ennek értelmében a teljes irányítási feladat olyan komponensek láncolatára osztható fel, amelyek más-más absztrakciós szinten kezelik a mozgás megvalósítását. Fontos tisztázni a jelen dokumentumban tárgyalt szabályozók szerepét és a kutatás célját. A legfontosabb komponensek – a teljesség igénye nélkül –:

- Szabad terület kijelölés,
- Trajektória tervezés (akár több szinten),
- Járműszintű szabályozás,
- Aktuátor szintű szabályozás.

Jelen kutatás témája a jármű mozgásszabályozása, azaz nem foglalkozom az alacsonyabb szintű, megvalósító jellegű irányítással. Ezen a szinten a feladat, hogy egy előre megtervezett pályán a jármű végighaladását biztosítsuk a lehető legkisebb hibával és a legnagyobb stabilitással. Nem témája a dolgozatnak, azonban fontos megemlíteni, mely mennyiségekkel lehet egy ilyen szabályozás minőségét legjobban leírni. Jellemzően a jármű pozíciója és orientációja az a két mennyiség, melyek hibáját egyszerre szeretnénk eliminálni. Mindemellett fontos az is, hogy ez a lehető legkisebb oldalirányú gyorsulással, vagy gyorsulásváltozással, azaz rántással (angolul jerk) történjen meg. Ezzel ellentétes az igény, miszerint a hibákat szeretnénk minél gyorsabban nullára csökkenteni, ami azonban nagy oldalirányú sebességgel és gyorsulással jár. Ez a két mennyiség képezi általában a szabályozás és a lokális trajektória optimalizálásának alapját. A választott struktúrától függetlenül szükség van egy referenciagörbére, melyet a járművel lekövetünk. Ezt a görbét egy magasabb szintű tervező biztosítja, azonban lokálisan szükség lehet ennek a görbének a megváltoztatására. Ennek két fő oka lehet: az eredeti görbe kinematikailag nem jól kondicionált, nem folytonos. A másik jellemző ok, hogy a szabályozó nem képes ezt a görbét lekövetni megfelelően. Ez akkor áll fent, amikor a hiba a görbéhez képest túl nagy (például távol van a jármű a célállapottól). Ebben az esetben némelyik szabályozó hajlamos túl nagy beavatkozó jelet előállítani, ami túllendüléshez, oszcillációhoz, szélsőséges esetben instabilitáshoz is vezethet. Ez

[1] Széchenyi István Egyetem Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Győr – Járműmérnök MSc hallgató; témavezető: Pup Dániel egyetemi tanársegéd – Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki kar, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék.

jellemző például a hagyományos PID szabályozókra. Ebben az esetben egy lokális tervezővel olyan görbét állítunk elő, amely rávezeti a járművet a globális referenciagörbére. Jelen cikkben a következő pontokon haladok végig: röviden összefoglalom, milyen megoldásokat találni az irodalomban a fentebb említett problémára, majd bemutatok két, saját fejlesztésű architektúrát, kitérek ezek validációjának módjára, végül ismertetem a szimulációval elért eredményeket.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az irányításelméletben a cikkemben tárgyalt megoldások hosszas múltra tekintenek vissza. Azonban a járműirányításban az automatizált és autonóm funkciók megjelenésével váltak szükségessé ezek a szabályozások, melyek közül sok a mai napig nem honosodott meg az iparban. Az összehasonlító cikkekből kiderül, hogy nincs általánosan jó megoldás járműirányítási problémákra, továbbá az is látszik: az utcai járművekre jellemző manőverek széles skálája miatt nehéz átfogó összehasonlítást végezni.^[2] Eredményeit kör alakú pályán végrehajtott manőverekre, illetve az ISO 3888-2:2002 szabvány szerinti dupla-sávváltás manőverre alapozza. A választott sebességtartomány 5–15 m/s. Az összehasonlításból kiderül, hogy az alkalmazott modell prediktív szabályozó (MPC) mindaddig a legjobb eredményt adja, amíg a szabályozó tervezéséhez használt modell összefüggései megállják a helyüket: 10 m/s sebesség felett a dinamikai hatások már nem elhanyagolhatóak, így az MPC-hez használt kinematikai modell már nem érvényes. Az összehasonlítás alapja egy geometriai szabályozó (pure pursuit). A Z. Lu, S. Barys, B. Boulaïd, S. Van Aalst és H. Riender Performance benchmark of state-of-the-art lateral path-following controllers-ben^[3] elvégzett összehasonlításban geometriai (Stanley) szabályozót, egy PID szabályozót előre csatolt ággal, továbbá modell alapú szabályozókat: MPC és megfigyelővel ellátott állapot szabályozás összehasonlítása történt meg. Ennek alapja egy tetszőleges alakú pálya, amelyen három különböző zavaró hatást modelleztek: oldalirányú széllekeések, súrlódás csökkenése és lokalizációs bizonytalanság. Az eredmény, hogy a modell alapú szabályozók némiképp jobban teljesítenek, azon belül is a megfigyelővel ellátott állapot szabályozás teljesített a legjobban. A PID szabályozó szintén jól teljesített, de a zavarásokra érzékenyebb volt, míg a geometriai szabályozó messze a legrosszabb teljesítményt nyújtotta.

3. PID SZABÁLYOZÓ AZ OLDALIRÁNYÚ JÁRMŪIRÁNYÍTÁSBAN

A PID szabályozók talán a legismertebb és legrégebbi zárthurkú szabályozók. Ennek megfelelően számos felhasználását találhatjuk meg az iparban. Az autó-

[2] XING, Y. – LU, X. – BO, L. – DEQUAN, Z. – GUIRONG, Z.: Design, Validation and Comparison of Path Following Controllers for Autonomous Vehicles, in: *Sensors*, 24 October 2020.

[3] LU, Z. – BARYS, S. – BOULAÏD, B. – VAN AALST, S. – RIENDER, H.: Performance benchmark of state-of-the-art lateral path-following controllers, in: *15th International Workshop on Advanced Motion Control*, 2018.

ipar is előszeretettel használja a járműirányítás területén, hiszen egyszerű, jól érthető megoldásról van szó. Általában a szabályozó paraméterek behangolása nehéz feladat, továbbá másod- vagy magasabb rendű rendszerek esetében nehezen elkerülhető az oszcilláció. Emellett a ki- és bemenetek korlátosságát csak nehezen tudjuk figyelembe venni úgy, hogy a szabályozó minősége ne csökkenjen túlságosan. Munkám során egy PID szabályozót készítettem és vizsgáltam, mely a jármű oldalirányú mozgásszabályozásának célját látja el. Ehhez Moritz, W. – Julius, Z. – Sören, K. – Sebastian, T. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame-ben részletezett lokális trajektória tervezőt használtam. Ezt követi a Christian, R. – Franz, W. – Dirk, O. – Steffen, M. Lateral trajectory tracking control for autonomous vehicles alapján elkészített PID szabályozó.^[4] A tervező alapja, hogy nagymértékű hibák esetén egy olyan lokális trajektóriát tervezünk, amely a globális referencia görbére vezeti a járművet. A lokális trajektória egy ötödfokú polinom a megtett távolság függvényében megadva. Ennek a fokszámnak az oka, hogy a pozíció szerinti harmadik derivált, ami a görbület megváltozása, a sebességgel megszorozva pedig az oldalirányú rántás másodfokú függvényt ad, így alkalmas az optimalizáció alapjának. Emellett ez a fokszám több deriváltig is folytonos görbét eredményez, ez biztosítja a kinematikai megvalósíthatóságot. A görbe megtervezéséhez összesen hat darab együtthatót kell meghatároznunk (1) szerinti formában.

$$d(s)=a_0+a_1s+a_2s^2+a_3s^3+a_4s^4+a_5s^5 \quad (1)$$

Az együtthatók meghatározásához hat darab peremfeltételre van szükségünk. Ezeket a kezdő- és végpontokban felírt deriváltakra adom meg (2) szerint. Az így felírt peremfeltételeket az ún. Frenét koordinátarendszerben adom meg.^[5]

$$\begin{aligned} [d_0 \ d_0' \ d_0'' \ s_0] &= [D_0 \ \theta_0 \ \kappa_0 \ 0] = [D_0 \ \theta_0 \ \frac{1}{L} \operatorname{tg}(\delta_{f_0}) \ 0] \\ [d_1 \ d_1' \ d_1'' \ s_1] &= [0 \ 0 \ 0 \ S_1] \end{aligned} \quad (2)$$

A peremfeltételeken kívül szabad paraméter a tervezett görbe hossza. Számításokkal is igazolható, de az olvasó intuitíve is beláthatja, hogy a hossz megválasztásával épp a B) pontban említett két mennyiség: az oldalirányú rántás (vagy gyorsulás) és a hibák eliminálásának ideje befolyásolható, egymással ellentétesen. Azaz minél hosszabb egy tervezett trajektória, annál lassabban érjük el a kívánt állapotot, viszont annál kisebb lesz az oldalirányú rántás, míg fordítva

[4] CHRISTIAN, R. – FRANZ, W. – DIRK, O. – STEFFEN, M.: Lateral trajectory tracking control for autonomous vehicles, in: *European Control Conference (EEC)*, 2015.

[5] Lásd: MORITZ, W. – JULIUS, Z. – SÖREN, K. – SEBASTIAN, T.: Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010.

nagyobb dinamikai hatások ébrednek, viszont hamarabb érjük el a célállapotot. Ezt a megfontolást használhatjuk ki a lokális görbék megtervezéséhez. A tervező ciklikusan fut, azonban csak akkor használjuk fel az aktuálisan megtervezett trajektóriát, amennyiben annak költsége kisebb az aktuális trajektóriánál avagy az aktuális trajektória végéhez értünk. A költségfüggvény alakját (3) adja meg.

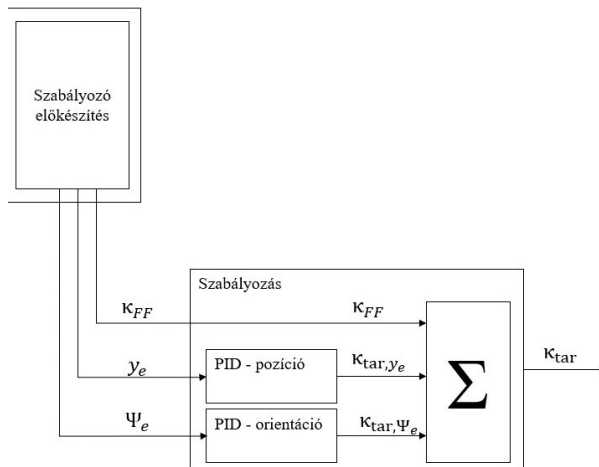
$$C_i(j(s(t)), s_1) = k_j \int_{s_0}^{s_1} j_i^2(\sigma(t)) d\sigma + k_s (s_1 - s_0) \quad (3)$$

Ahol

- az i . vizsgált görbe avagy együttható halmaza költsége az intervallumon,
- a görbe kezdőpontja a megtett út szerint (általában),
- a görbe végpontja a megtett út szerint,
- a görbe hossza,
- tetszőlegesen megválasztott súlyok, ezáltal a megtervezett trajektória karakterisztikája megváltoztatható; általában:

A tervezett trajektóriát egy PID szabályozóval követem le. Ennek a szabályozónak a bemenete a jármű pozíció és orientáció hibája, továbbá a befutni kívánt görbe görbülete, mint előrecsatolt tag. A szabályozó kimenete a jármű által befutni kívánt pálya görbülete, amelyet a kinematikai bicikli modell alapján átszámolhatunk cél út-kerék szögé. A szabályozó struktúráját az 1. ábra mutatja.

1. ábra: A lekövető szabályozás felépítése; a kimenet a befutni kívánt pálya görbülete



A szabályozó paramétereit egy sávváltás jellegű manőveren keresztül, szimulációban hangoltam be. Ez automatikusan történt egy Matlabszkript segítségével. A kalibráció során vizsgált indikátorok a maximális túllendülés, integrált négyzetes hiba és a beállási idő volt.

4. MODELL PREDIKTÍV SZABÁLYOZÓ A JÁRMŰIRÁNYÍTÁSBAN

A szabályozók másik nagy csoportja a PID szabályozók mellett a modell alapú szabályozások. Ezen belül az egyik legkomplexebb, ugyanakkor legígéretesebb irányítási megoldás a modell prediktív szabályozás (MPC). Ennek legnagyobb előnye, hogy hasonlóképp az LQR szabályozókhoz futásidőben zajlik az optimalizáció egy előre meghatározott predikciós és szabályozó horizonton, azonban ellentétben az LQR szabályozókkal az MPC algoritmus a korlátok figyelembevételével is képes meghatározni az optimális bemeneti halmazt, ezzel kiváló teljesítményt tud elérni szélsőséges esetekben is. A modell megválasztása nagyban befolyásolja a szabályozás minőségét. Nagyobb sebességen (>40kph) már nem elhanyagolhatók a kerék rugalmasságából adódó dinamikai hatások, ezért ezen sebességtartományon a jármű kinematikai modellje csak kompromisszumokkal alkalmazható. Ugyanakkor alacsony sebességeken a dinamikai modell numerikusan instabillá válhat, ezért itt jellemzően a kinematikai járműmodellt érdemes használni. A modell alapú szabályozók esetén a modell megválasztásának helyessége a szabályozó teljesítményének kulcskérdése. A jól megválasztott modell segítségével megvalósított szabályozó behangolása egyszerű. Munkám során a Wang, L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB-ban részletezett modell prediktív szabályozót valósítottam meg.^[6] Ehhez a Dieter, S. – Manfred, H. – Roberto, B. Vehicle Dynamics-ban megadottak szerint a jármű kinematikai, nem lineáris modelljét használtam.^[7] A modell egyenleteit (4) szerint írtam fel.

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= A(t)x_k + B(t)u_k \\y_k &= Cx_k + Du(k)\end{aligned}\tag{4}$$

Ahol:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ v_{\xi r} \\ \theta \end{bmatrix} \quad u_k = \begin{bmatrix} a_{\xi r} \\ tg(\delta_{r0}) \end{bmatrix}$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_s \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & T_s \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ T_s & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} v_{\xi r} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Az optimalizációs négyzetes problémát Wang szerint a Hildreth-féle iterációs algoritmussal oldottam meg. A korlátot a bemeneti jelek abszolút értékeire adtam meg, (5) szerint.

[6] WANG, L.: *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, 2009, Advances in Industrial Control: Springer-Verlag London.

[7] DIETER, S. – MANFRED, H. – ROBERTO, B.: *Vehicle Dynamics*, 2014. London: Springer Heidelberg New York Dordrecht London.

$$\begin{bmatrix} a_{\xi,r,max} \\ a_{\xi,r,min} \\ \delta_{\xi,max} \\ \delta_{\xi,min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \frac{m}{s^2} \\ -8 \frac{m}{s^2} \\ 0.35 \text{ rad} \\ -0.35 \text{ rad} \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. VALIDÁCIÓS KONCEPCIÓ

A munkám során vizsgált szabályozókat teljesen önállóan, Matlab/Simulink segítségével valósítottam meg. Ezen döntésnek több oka van: a legfontosabb, hogy olyan fejlesztői környezetet kerestem, melyben egyszerre valósítható meg a szabályozó, építhető szimulációs környezet és ezzel együtt lehetőség van az eredmények rugalmas kiértékelésére. Másrésztől az így megvalósuló szabályozókat több projekt keretében is szeretném felhasználni a jövőben. A Formula Student bajnokság Driverless (önvezető) kategóriájának versenyéhez továbbá a Járműipari Kutatóközpont önvezető rendszeréhez. A Simulink platform lehetőséget ad beágyazott rendszerekre kódot fordítani. Ez nagyban megkönnyíti a fejlesztési folyamatot. A cikkben bemutatott eredmények kizárólag szimuláción alapulnak, a teljes megvalósítás és a valódi autóval történő mérések a cikk megírásának idején még folyamatban vannak.

A szimuláció során a jármű dinamikai modelljét használtam fel, melyet [6] szerint valósítottam meg. Az eredmények megvilágítják, mi a hatása annak, ha a szabályozó által használt modell és a szabályozott szakasz modellje (a valóságban a szabályozott szakasz maga) különbözik. Várhatóan 40 kph feletti manőverek esetén a dinamikai hatások miatt nagyobb eltéréseket tapasztalhatunk, mint alacsonyabb sebesség esetén.

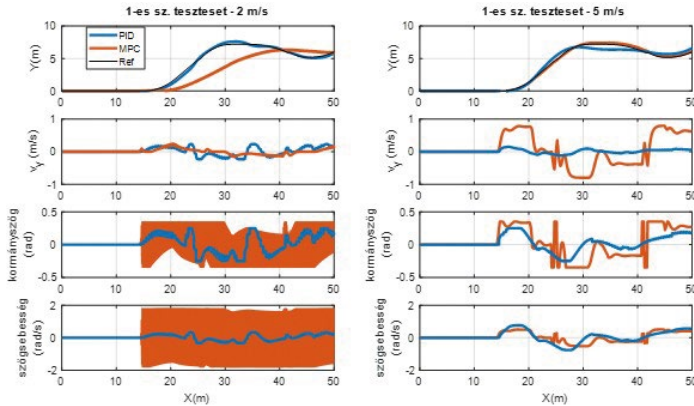
6. EREDMÉNYEK

Az eredményeket az előző pontban említett dinamikai járműmodellen keresztül szimuláltam le. 3 tesztesetet vizsgálók, melyek összefoglalóját az 1. sz. táblázat mutatja.

1. táblázat: Tesztesetek összefoglaló táblázata

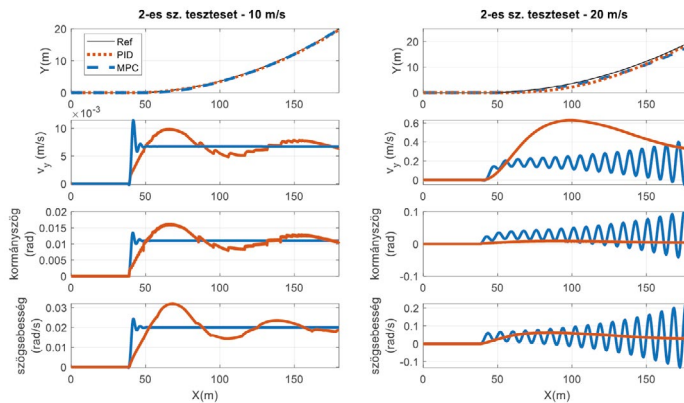
1. sz. teszteset	2. sz. teszteset	3. sz. teszteset
15m – egyenes	40m – egyenes	R30m – kör bal
R10m – kanyar	R500m – kanyar bal	R30m – kör jobb
3m – egyenes		
R8m – kanyar jobb		
R15m – kanyar jobb		
R5m – kanyar bal		

2. ábra: 1-es sz. teszteset eredményei. Bal oldalon 2 m/s, jobb oldalon 5 m/s sebességgel végrehajtva



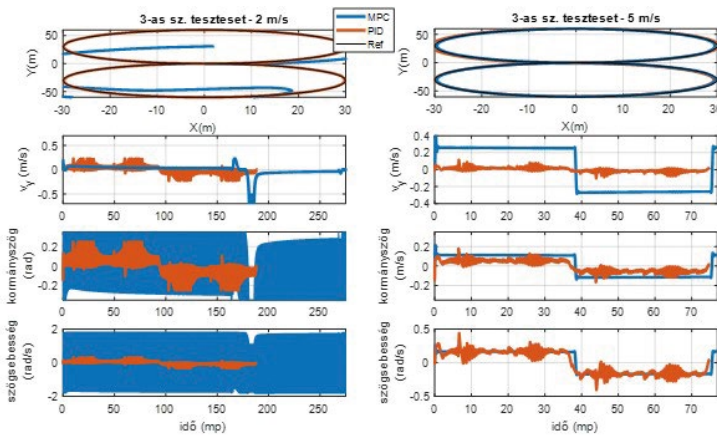
Az 1-es sz. teszteset eredményeit a 2. ábra mutatja. A manővert két különböző sebességen – 2 m/s (7.2kph) és 5 m/s (18kph) – hajtottam végre. A legkisebb kanyar sugara 5 m, így a magasabb sebességen várhatóan centripetális gyorsulás is kialakulhat. Ez közel van a jármű csúszáshatárához, így 5 m/s feletti sebességeken nincs értelme a szimulációt elvégezni. Az eredményekből az látszik, hogy míg 5 m/s sebességen a PID szabályozó szignifikáns, de még elfogadható hibával, az MPC pedig szinte tökéletesen követi le a referenciagörbét, addig 2 m/s alacsony sebességen az MPC teljesítménye nagyban leromlik. Ezt a kormányzószög és szögsebesség ábrákon is látni. A dinamikai modell numerikus instabilitása ilyen alacsony sebességen és a tény, hogy az MPC a kinematikai modell alapján készült el szinte teljesen értékelhetetlen járműviselkedést eredményezett. A PID szabályozó kevésbé érzékeny a dinamikai modell alacsony sebességen vett instabilitására.

3. ábra: 2-es sz. teszteset eredményei. Bal oldalon 10 m/s, jobb oldalon 20 m/s sebességgel végrehajtva



A 2-es sz. tesztet eredményeit a 3. ábra mutatja. Itt egy nagyobb sebességű, 500 méter sugarú köríven történő haladást modelleztem. Ez megfelelhet például egy autópályás haladás körülményeinek. A bal oldali oszlopban a 10 m/s sebességgel végzett eredmények láthatók. Mindkét szabályozó igen jó pontossággal követi le a referenciavonalat, ugyanakkor az MPC által elért kormánysszög, szögsebesség és oldalirányú sebességgörbék nagyszerű dinamikát mutatnak. Míg a PID szabályozó erőteljes túllendülés és oszcillációt eredményez, addig az MPC stabil és gyors felfutással, oszcilláció nélkül képes a járművet irányítani. Nagyobb sebességen (20m/s) az MPC instabillá válik. Itt a kerék csúszásából adódó hatások olyan erőteljesek, hogy az MPC alapjául szolgáló kinematikai modell nem megfelelő a stabil szabályozás eléréséhez. A PID szabályozó nagy túllendüléssel ugyan, de kevésbé érzékeny ezen dinamikai hatásokra.

4. ábra: 3-as sz. tesztet eredményei. Bal oldalon 2 m/s, jobb oldalon 5 m/s sebességgel végrehajtva



A 4. ábra mutatja a 3. sz. tesztet eredményeit. A csúszópadnak is nevezett tesztet két sebességen, 30 méteres sugarú körökben hajtottam végre. Először egy teljes bal, majd egy teljes jobb fordulatot hajtottam végre a jármű. Az 1-es sz. teszt esetén tapasztalt instabilitás az MPC használatával itt is megjelenik. Alacsony sebességen a PID szabályozó elfogadható eredményt produkált. Nagyobb sebességen azonban az MPC – ahogy várható – kiváló dinamikával és közel nulla hibával képes lekövetni a referencia vonalat. Nagyobb túllendüléssel ugyan, de a PID itt is elfogadható eredményt ad.

7. ÖSSZEGZÉS

Az Új Nemzeti Kiválóság Program 2020 őszi félévében végzett munkám során az autonóm járművek mozgásszabályozásával kapcsolatos problémákat vizsgáltam

meg, két különböző alapon nyugvó szabályozó megoldást valósítottam meg és hasonlítottam össze szimuláció segítségével. A szimuláció azt mutatta, hogy a hagyományos PID szabályozón alapuló járműirányítás a zavarokkal és a dinamikai hatásokkal szemben ellenállóbb, ugyanakkor minden esetben csak kompromisszumokkal tudja ellátni a vonalkövetés feladatát. A modell prediktív szabályozó ezzel ellentétben kiváló dinamikával képes a járművet irányítani, viszont kifejezetten érzékeny a megtervezéséhez használt modell pontatlanságával szemben. Érdemesnek tartom ezt a problémát tovább vizsgálni, így a jövőben szeretném a megkezdett kutatásomat doktori programként folytatni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- CHRISTIAN, R. – FRANZ, W. – DIRK, O. – STEFFEN, M.: Lateral trajectory tracking control for autonomous vehicles, in: *European Control Conference (EEC)*, 2015.
- DIETER, S. – MANFRED, H. – ROBERTO, B.: *Vehicle Dynamics*, 2014. London: Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- DOMINA, Á. – TIHANYI, V.: Comparison of path following controllers for autonomous vehicles, in: *17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Herl'any, Slovakia, 2019.
- KAI, L. – JIANWEI, G. – SHUPING, C. – YU, Z. – HUIYAN, C.: Model Predictive Stabilization Control of High-Speed Autonomous Ground Vehicles Considering the Effect of Road Topography, in: *Applied Sciences*, 19 May 2018.
- Lu, Z. – Barys, S. – Boulaïd, B. – Van Aalst, S. – Riender, H.: Performance benchmark of state-of-the-art lateral path-following controllers, in: *15th International Workshop on Advanced Motion Control*, 2018.
- MORITZ, W. – JULIUS, Z. – SÖREN, K. – SEBASTIAN, T.: Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010.
- PATNAIK, A. – MANTHAN, P. – MOHTA, V. – SHAH, H. – AGRAWAL, S. – RATHORE, A. – RITWIK, M. – CHAKRAVARTYC, D. – BHATTACHARYAA, R.: *Design and Implementation of Path Trackers for Ackermann Drive based Vehicles*, 2020.
- WANG, L.: *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, 2009*, Advances in Industrial Control: Springer-Verlag London.
- XING, Y. – LU, X. – BO, L. – DEQUAN, Z. – GUIRONG, Z.: Design, Validation and Comparison of Path Following Controllers for Autonomous Vehicles, in: *Sensors*, 24 October 2020.