

Nemlineáris kormány szabályozás állapot-visszacsatoláson alapuló linearizálással

Nonlinear steering control based on state feedback linearization

HUNYADY Gergely¹, SZALAY István², FODOR Dénes²

- 1) Arrabona Járműfejlesztő Egyesület, 9026 Győr, Egyetem tér 1, gergely.hunyady@arrabonaracing.hu
2) Széchenyi István Egyetem, Teljesítményelektronika és Villamos Hajtások Tanszék, fodor.denes@ga.sze.hu

Abstract

The aim of this article is to define a Lie-algebraic method for controlling the lateral motion of a racecar based on nonlinear transformation. This enables the accurate use of linear control algorithms for controlling the lateral motion of a vehicle. The input of the system is the trajectory of the racetrack and the output is the trail of the racecars center of gravity, which are compared in order to evaluate the performance of the control system.

Keywords: lie-algebra, lateral control, feedback linearization, trajectory tracking, linear control

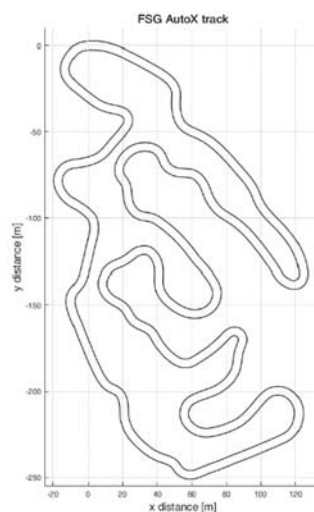
Kivonat

A dolgozatban alkalmazott módszer alapja egy olyan Lie-algebrán alapuló módszer megalkotása, amely lehetővé teszi az autó mozgásának szabályozását nemlineáris transzformációval. Ennek segítségével lehetővé válik a keresztirányú modell pontos lineáris szabályozása. A rendszer bemenete egy versenypálya trajektóriája, kimenete pedig az autó középpontja által leírt nyomvonal, amely összehasonlításra kerül a referenciával, így megkapható a szabályozott modell hibája.

Kulcsszavak: lie-algebra, kormány szabályozás, egzakt linearizáció, trajektória, lineáris szabályozás

1. Bevezetés

A dolgozat célja egy önvezető autó irányítási rendszerének vezérlő algoritmusának fejlesztése, ami a nemlinearitások figyelembevételével lehetővé teszi a megadott útvonal pontos követését. A hangsúly a nemlinearitások figyelembevételén, illetve ennek a segítségével a pálya nyomvonalának lehető legpontosabb lekövetésén van (1. ábra).



1. ábra: A versenypálya nyomvonala (FSG AutoX)

1.1. Irodalomfeldolgozás

A mozgásszabályozás különböző módszerei már régóta központi témái a kutatási munkáknak. Járművek és robotok nemlineáris szabályozásával foglalkozik általánosságban Lantos Béla és Lőrincz Márton [1]. A könyvben a nemlineáris rendszerek osztályozása mellett sor kerül a részletes modellek levezetésére és az általános szabályozási logikák alkalmazására is. A könyv 5. fejezetében részletesen bemutatásra kerül autók nemlineáris szabályozása kinematikai modell esetén. Drexler Dániel András a "Nemlineáris és robosztus irányítások" című könyvében egy bevezetést követően részletezi az egyensúlyi állapotok és stabilitás feltételeit, majd kitér a sodrásmentes és sodrással rendelkező rendszerek irányíthatóságára [2]. Ezt követően kidolgozásra kerül az egzakt linearizálás témaköre és a pályakövető szabályozás. A "Wheeled Mobile Robotics" sorozat második könyve részletesen foglalkozik a különböző kerekes robotok kinematikai és dinamikai modelljeinek levezetésével [3]. Mindemellett tisztázásra kerül a kinematikai modell definíciói mellett a holonomikus és nem holonomikus kényszerek eredete is. A harmadik könyv az előzőekben levezetett modellekre alkalmazza a két szabadságfokú irányítási modellt [4]. Mindemellett a nemlineáris irányítások terén meghatározó szerepe van Alberto Isidori "Nonlinear Control Systems" című könyvének is, amely széles körben foglalkozik az nemlineáris irányítási rendszerek dekompozíciójával, az egy, illetve több be- és kimenetű (rendre SISO illetve MIMO) rendszerek nemlineáris visszacsatolással történő irányításával is [5]. Alessandro De Luca az ipar elvárásaira reflektálva tapasztalati úton közelíti meg a kerekes robotok (WMR - Wheeled Mobile Robots) irányításának területét [6]. Mindemellett általánosságban is foglalkozik a nem holonomikus rendszerek modellezésével és szabályozásával [7]. A "Feedback Control of a Nonholonomic Car-Like Robot" című könyvében konkrétan az autók irányításával is foglalkozik. A fentebb említett könyvekre alapulnak az alábbi kutatások is, amelyek a visszacsatolt linearizációt alkalmazzák a pályakövető szabályozás megvalósításához: S. Bacha [8], Flavia E. Felicioni [9], Xiaoping Yun [10] és Paulo Coelho [11] mellett Lantos Béla és Bodó Zsófia [12] is aktívan foglalkozott a témával.

2. Modell

Egy jármű állapotvektora felírható az alábbi általános alakban:

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ahol x és y az abszolút pozíció és θ az orientáció a globális (abszolút) koordinátarendszerben. Az autó saját koordinátarendszere és a globális koordinátarendszer közötti összefüggést (külső kinematika) a forgatómátrix írja le.

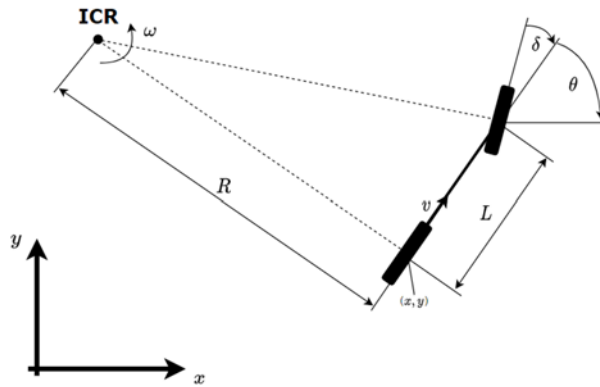
2.1. Egy nyomvonalú jármű (bicikli) modell

Autók kinematikáját tekintve az egy tengelyeken elhelyezkedő kerekek modellezhetőek a tengelyközépen elhelyezett virtuális kerékekkel, így az autó kinematikai modellje egy bicikli modelljére egyszerűsödik, amely az x és y tengely mentén, egy sík mentén képes helyzetet változtatni (2.ábra). Az ábrán L a tengelytáv, x , y a hátsó tengely pozíciója és v a jármű sebessége. A pillanatnyi forgásközéppont (ICR - Instantaneous Center of Rotation) a két tengely vonalának metszéspontjában helyezkedik el, amely ezáltal L tengelytávától és a kormányzott kerék szögétől függ. A jármű a forgásközéppont körül ω szögsebességgel fordul:

$$\omega = \dot{\theta} = \frac{v(t)}{L} \tan(\delta(t)) \quad (2)$$

A 2. egyenletet és a mozgásegyenleteket felhasználva megkapjuk az alábbi összefüggést:

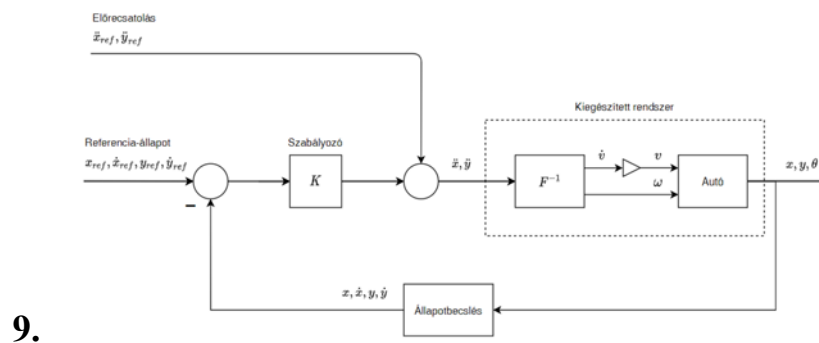
$$\delta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{L\dot{\theta}}{v(t)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{L(\dot{x}(t)\dot{y}(t) - \dot{y}(t)\dot{x}(t))}{(\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t))^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3)$$



2. ábra: Az egy nyomvonalú (bicikli) modell ábrázolása

3. Egzakt linearizáció

7. Az egzakt linearizáció előnye, hogy a rendszer modelljét felhasználva figyelembe veszi a nemlineáris jellegét, azonban ennek a megvalósításához szükséges a nemlineáris rendszerrel kapcsolatos alapvető összefüggések ismerete. Az egzakt linearizáció lényege, hogy egy olyan transzformáció kerüljön bevezetésre a rendszer bemenetére, amely lehetővé teszi, hogy a rendszer az új bemenet és kimenet között lineáris legyen, így alkalmazni lehet a jól ismert lineáris szabályozási módszereket. Ennek lépései a következők [4]:
- A megfelelő kimenetek kiválasztása. A kimenetek és bemenetek számának meg kell egyeznie
 - A kiválasztott kimenetek összefüggéseit deriválni kell annyiszor, hogy egymástól függetlenül megjelenjenek a bemenetek
 - A rendszeregyenletek megoldása a bemenetek legmagasabb fokú deriváltjára. A tényleges bemenetek meghatározásához integrátor-sor alkalmazása szükséges
 - Az újonnan megkapott rendszer most már lineáris, így lehetséges a lineáris szabályozási törvények alkalmazása
8. A fentebb leírtaknak megfelelően meghatározható egy $[u_1 \ u_2]^T = [\ddot{x} \ \ddot{y}]^T$ bemenetű és $z = [x \ y \ \dot{x} \ \dot{y}]$ állapotvektorú rendszer, amely felírható $\dot{z} = Az + Bu$ alakban. Ez a rendszer szabályozható, ha a rendszer maximális relatív fokszámú, tehát adott zárt szabályozási hurokra értelmezett karakterisztikus polinomhoz létezik állapotteres szabályozási törvény. A szabályozása célja egy trajektória követése, melyből meghatározható a jármű z_{ref} referencia-állapota. Az állapotteres lineáris szabályozási módszert alkalmazó a nemlineáris szabályozás blokkdiagramja a 3. ábrán látható.



9.

3. ábra: Az egzakt linearizáció blokkdiagramja

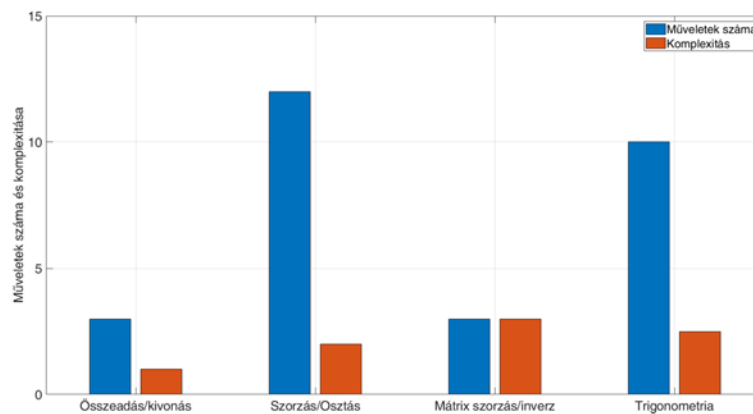
4. Eredmények, konklúzió

A szimuláció kiértékeléséhez megvizsgálásra kerül az algoritmus külső zavar nélküli teljesítménye,

továbbá a paraméter-érzékenység az arányos tagok (K mátrix) terén, ami a trajektória diszkrétizált jellegéből adódóan átlagosan 0.15 m eltéréshez vezetett. A szimuláció során alkalmazásra került egy mozgó átlagolással történő szűrés, amely lehetővé teszi a zaj nagy részének effektív szűrését, azonban ennek az átlagolásnak a hátránya, hogy megváltozik a referencia érték, így nem a valós pálya kerül betáplálásra. Az átlagolás mellett alkalmazható az interpoláció (görbeillesztés) módszere is, amely a diszkrét értékek között is biztosít visszatérési értéket, így nő a pálya folytonossága, viszont jelentősen növeli az algoritmus műveletigényét is. Mindemellett érdemes figyelembe venni a szimuláció érzékenységét a GPS szórásából adódó zajra, amely a helymeghatározás során juttat be zavart a rendszerbe. Ennek értelmében a szimuláció során 10 cm-es szórás feltételezve a GPS működése során a pályakövetés átlagos hibája jelentős, 0.8 m. Ennek értelmében javasolt lehet a későbbiekben Kálmán szűrő és valós idejű kinematikus mérési módszer (RTK) alkalmazása.

4.1. A szabályozás műveletigénye

A kutatási munka egy fontos aspektusa a szabályozó algoritmus műveletigénye, illetve, hogy az adott részegységek változtatása, komplexitása milyen hatással van a sebességre. Ezek a paraméterek azért fontos jellemzői egy algoritmusnak, mert ezek segítségével megalapozott döntést lehet hozni az alkalmazandó vezérlő hardver teljesítményigényével kapcsolatban [13]. Ennek segítségével a kutatás elősegíti a szimuláció valós körülmények között történő alkalmazásának technikai feltételeinek megvalósítását. A szimulációban az adott műveletek számának reprezentációja a 4. ábrán látható. A 4. ábra alapján jól látható hogy a művelet komplexitásának és számának a szorzás illetve osztás esetén van a legnagyobb súlya, így az algoritmus sebességének növeléséhez ennek a csökkentésére érdemes fókuszálni.



4. ábra: Az alkalmazott matematikai műveletek száma és komplexitása

4.2. Konklúzió

A szabályozás megvalósításához szükséges matematikai modell meghatározása és a transzformációk megvalósítása komoly matematikai háttértudást igényel. Mivel minden változtatás esetén újra le kell vezetni az egzakt linearizálás módszerét, így robusztus módszerek ezen a téren sokkal effektívebben alkalmazhatók. Amennyiben fix modellel kell dolgozni, és a matematikai levezetésen nem szükséges nagy módosításokat végezni, akkor az egzakt linearizáció módszere egyszerűen és gyorsan alkalmazható a szabályozáshoz.

Az autó állapotváltozói ($q = [x \ y \ \theta]^T$) közvetlenül nem mérhetők, ezért megfigyelő alkalmazása szükséges, amely a modell segítségével közelítőleg meghatározza azok értékét. Az x és y pozíció GPS adatok illetve odometria segítségével, míg az orientáció meghatározása külön erre a célra kialakított szenzor illetve gyorsulásmérő segítségével lehetséges. Fontos megjegyezni, hogy az ehhez szükséges számolások is extra műveletigényt jelentenek a vezérlő modul számára, így a hardver választása során figyelemmel kell kísérni az ehhez szükséges műveletek számítási komplexitását is. A jármű x és y irányú gyorsulására történő szabályozása részlegesen lehetséges, mivel az x irányú gyorsulásnak az autó tényleges gyorsulása felel meg, amire a motor segítségével könnyen lehetséges a szabályozás, azonban az oldalirányú gyorsulásra történő szabályozás korlátozott körülmények között lehetséges, így érdemes lehet megfontolni a modell módosítását úgy, hogy a bemenő jel például az autó x és y irányú sebessége legyen, amelyre egy fokkal könnyebb a szabályozás megvalósítása. Ahogy az a kiértékelés során is bemutatásra került, a szabályozás a zajra fokozottan érzékeny, és mindenképp további szűrő algoritmusok alkalmazása szükséges a minimális hiba elérése érdekében, amelyek tovább növelik a megvalósított szoftver futási idejét.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2021-NKTA-48 számú projekt a Technológiai és Ipari Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

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

Irodalmi hivatkozások

- [1] Márton L., Lantos B.: *Nonlinear Control of Vehicles and Robots*. Advances in Industrial Control, 2011, 6.
- [2] Drexler D. A.: *Nemlineáris és robusztus irányítások*, BME IIT tananyag, 2015.
- [3] Klancar G., Zdesar A., Blazic S., Skrjanc I.: *Motion Modeling for Mobile Robots*, Wheeled Mobile Robotics, 2017, 13–59.
- [4] Klancar G., Zdesar A., Blazic S., Skrjanc I.: *Control of Wheeled Mobile Systems*, Wheeled Mobile Robotics, 2017, 61–159.
- [5] Isidori A.: *Nonlinear Control Systems*. Springer, 2000.
- [6] De Luca A., Oriolo G., Vendittelli M.: *Control of Wheeled Mobile Robots: An Experimental Overview*, Ramsete 2001, 181–226.
- [7] De Luca A., Oriolo G.: *Modeling and Control of Nonholonomic Mechanical Systems*, Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems, 1995, 277–342.
- [8] Bacha S., Ayad M. Y., Saadi R., Kraa O., Aboubou A., Hammoudi M. Y.: *Autonomous Vehicle Path Tracking Using Nonlinear Steering Control and Input-Output State Feedback Linearization*, CISTEM, 2018.
- [9] Junco S. J., Felicioni F. E.: *A Lie Algebraic Approach to Design of Stable Feedback Control Systems with Varying Sampling Rate*, IFAC Proceedings Volumes, Elsevier, 2008, 41(2), 4881–4886.
- [10] Yamamoto Y., Xiaoping Yun X.: *On Feedback Linearization of Mobile Robots*, The International Journal of Robotics Research, 1995, 543–559.
- [11] Nunes U., Coelho P.: *Lie algebra application to mobile robot control: a tutorial*. Robotica 21, 2003, 483–493.
- [12] Bodó Zs., Lantos B.: *High Level Kinematic and Low Level Nonlinear Dynamic Control of Unmanned Ground Vehicles*, Acta Polytechnica Hungarica, 2019.
- [13] Devi S.G., Selvam K., Rajagopalan S. P.: *An abstract to calculate big O factors of time and space complexity of machine code*. Second International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System, 2011.
- [14] Akhtar A.: *Dynamic path following controllers for planar mobile robots*. diploma thesis, University of Waterloo, 2011.