

Irányításelméleti modellek alkalmazása Formula Student versenyautó autonom kormányzásának fejlesztéséhez

1. BEVEZETÉS

Az autóipari fejlesztések egyik központi eleme a rendszerek és folyamatok szabályozása. Ezek a szabályozások rendszerint előre megfogalmazott követelmények alapján valósulnak meg. Annak érdekében, hogy az adott rendszer megfeleljen az előírt követelményeknek, fontos a fejlesztés során alkalmazott módszerek és folyamatok alapos vizsgálata több szempontból is. Szabályozástechnika területén ilyen szempontok például a megvalósított irányítás számítási kapacitás igénye, ami nagyban befolyásolja azt, hogy milyen erős hardver alkalmazását teszi szükségessé. Mindemellett fontos a rendszer rugalmassága, és hogy lehetőleg egyszerű legyen megvalósítani.

Az autók kormányzása a szabályozástechnika egy szemléletes példája, mivel az autó kerekeinek állása nagyban befolyásolja az autó mozgását, mindemellett biztonságkritikus szerepe is van, így nagy jelentősége van a megfogalmazott követelmények betartásának. A napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvendő önvezető autók fejlesztésében is fontos szerepet vállal a kormányzási modell és logika megalkotása, ami lehetővé teszi a számítógépes algoritmus által meghatározott trajektória pontos követését.

Számos irányításelméleti megoldás érhető el jelenleg a szabályozástechnika területén. A kutatás tárgya ezeknek a megközelítéseknek a megismerése, alkalmazhatóságának megvizsgálása és összehasonlítása három fő szempont alapján: real-time megvalósíthatóság (számítási kapacitás igény), robosztusság és komplexitás. A kutatás célja egy olyan logika kiválasztása, amely optimális választást jelent egy önvezető Formula Student versenyautó kormányzásának megvalósításához.

2. CÉLKITŰZÉS

A kutatás célja korábban megfogalmazottakkal összhangban olyan irányításelméleti módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata, amelyek hatékonyan képesek

[1] Angol nyelvű Járműmérnök MSc képzés, Audi Hungaria Járműmérnöki kar, Témavezető: Dr. Kuczmann Miklós, egyetemi tanár, Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Automatizálási Tanszék.

irányítani az autót nagy változási sebességű környezetben. A megvizsgálandó módszerek:

- Hagyományos megközelítés,
- Egzaktlinearizáció,
- Lineáris szabályozó,
- Lyapunov-szabályozás,
- Periodikus szabályozási módszer,
- Négy állapotváltozós hiba modell,
- Fuzzy szabályozás,
- Model Prediktív Szabályozás (MPC),
- Részecske-raj Optimalizációs módszer (PSO),
- Kombinált MPC és PSO.

Ezeknek a módszereknek a megvalósíthatóságát úgy lehetséges megvizsgálni, hogy figyelembe vesszük az algoritmus komplexitását, rugalmasságát, érzékenységet és a hibáját adott körülmények között. Ezek a paraméterek egy 1-10-es skálán kerülnek kiértékelésre.

3. A SZABÁLYOZÁSI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A hagyományos megközelítés a trajektóriát változó referencia pozícióként veszi figyelembe, így minden egyes iterációban új referencia bemenetet kap a szabályozó algoritmus. Ennek a módszernek az egyik hátránya, hogy a referencia pozíciónak és az aktuális pozíciónak közel kell lennie egymáshoz, különben a szabályozó jel zajossá és a szabályozás agresszívvé válik. Ebből kifolyólag a helymeghatározás pontatlanságára is fokozottan érzékeny az algoritmus, mivel alacsony sebesség esetén a GPS pontatlanságából kifolyólag előfordulhat, hogy az aktuális pozíció a referencia pozíció elé kerül. Ennek a problémának a kezelése lehetséges egy frissített szabályozási módszer segítségével. A módszerre mindemellett jellemző, hogy a visszacsatolásnak, és az ezzel járó esetleges hibáknak, zajoknak meglehetősen nagy súlya van, így viszonylag magas arányos tagokat kell alkalmazni a szabályozási hiba alacsonyan tartásához.

A rendszerek irányíthatóságával kapcsolatban érdemes kiemelni a Brockett-tételt, amely a három fő feltételből álló rendszer segítségével megállapítja a szabályozhatóságot egy folyamatosan differenciálható zárt hurkú visszacsatolás aszimptotikus stabilizálásával a nemlineáris rendszer egyensúlyi helyzetének környezetében.^[2] Ezt átvezetve nem holonomikus rendszerekre megállapítható, hogy az aszimptotikus pozíció-szabályozás nem lehetséges időfüggetlen visszacsatolással.^[3]

[2] HUANG, CHENZI – RÖBENACK, KLAUS: *Brockett's condition and local controllability in the context of under actuated mechanical systems*, 2017, 265–268.

[3] MICHOT, MARC: „Brockett's necessary conditions and the stabilization of nonlinear control systems”, in: *Master's Theses*, 2011, 3946.DOI: 10.31979.

A nemlineáris rendszerrel kapcsolatban fontos megállapítás mindemellett, hogy egy rendszert differenciálisan laposnak nevezünk, ha létezik egy sor lapos kimenet, és a rendszer összes állapota és bemenete átírható e lapos kimenetek és véges számú időbeli deriváltjuk függvényeként. Ezt alapul véve előreccsatolt szabályozások esetén lehetséges a szabályozó bemenetek meghatározása analitikus módon, integrálás nélkül.

Az egzaktlinearizáció módszere a korábban bemutatott definíciókat alapul véve olyan transzformációkat vezet be, amely segítségével a rendszer a kimenet és a bemenet között lineárisnak tekinthető, így a hagyományos lineáris szabályozási módszerekkel kombinálva lehetséges a jármű irányítása, amely lépései a következők:

- megfelelő kimenetek kiválasztása úgy, hogy a kimenetek és bemenetek száma megegyezzen,
- a kiválasztott kimenetek deriválása addig, amíg az összefüggésekben a bemenetek egymástól függetlenül megjelennek,
- a rendszeregyenletek megoldása a bemenetek legmagasabb fokú deriváltjára,
- a rendszer lineáris szabályozásának megvalósítása.

Ennek a módszernek az alkalmazásánál elvárás, hogy az összes állapot ismert legyen. Járművek esetén az x és y pozíció meghatározása általában mérésen alapul, azonban annak deriváltjai, a sebesség és a gyorsulás már becsült érték, azonban a numerikus deriválási módszerek alkalmazása felerősíti a mérési zajt, így kifejezetten érzékennyé válhat a rendszer a helymeghatározás (GPS) zajára. A numerikus deriválásból adódó zaj elkerülése érdekében a megmért orientáció felhasználásával lehetséges a sebességkomponensek alternatív meghatározása.

A nemlineáris hibamodell felhasználása lehetséges a linearizálási módszerek alkalmazásával is. Járművek trajektória szabályozása esetén a linearizáláshoz szükséges munkapont a jármű egyensúlyi pontja. A származtatott rendszer idő-variáns állapotteres szabályozhatóságának megállapítása az irányíthatósági mátrix rangjának figyelembevételével lehetséges.^[4] Linearizálással történő szabályozási módszerek alkalmazásánál fontos figyelembe venni, hogy a linearizált modell csak a munkapont, jelen esetben egyensúlyi pont jelenlétében lehetséges és a szabályozó teljesítménye nagy hibaértékek esetén eltérést mutathat. A fentiek figyelembevételével egy relatíve egyszerű és robosztus szabályozó megvalósítása lehetséges.

A Lyapunov-féle módszer nemlineáris szabályozást tesz lehetővé, ami a jelen esetben a hiba modell aszimptotikus stabilitását vizsgálja különböző szabályozási törvények jelenlétében. Lyapunov második módszere meghatározza

[4] BISWA NATH DATTA, CHAPTER 6 – Controllability, Observability, and Distance to uncontrollability, Editor(s): BISWA NATH DATTA, Numerical Methods for Linear Control Systems, Academic Press, 2004, Pages 159–199, ISBN 9780122035906, <https://doi.org/10.1016/B978-012203590-6/50010-0>.

az elégséges feltételeket a nemlineáris rendszer aszimptotikus stabilitásához az egyensúlyi pont körül. Lyapunov módszerének egy klasszikus alkalmazása a rendszer energiája alapján történik. Ez a definíció kimondja, hogy ha a rendszer energiáját Lyapunov-függvényként használjuk, és a rendszer disszipatív, akkor a rendszer energiája nem növekedhet (a függvény deriváltja nem pozitív). Ebből következtetésképp az összes értékhatáron belül marad és a rendszer stabilnak mondható. Fontos megállapítani azonban, hogy nemlineáris rendszerek esetén a rendszer stabilitása nem, csak az egyensúlyi pontok stabilitása határozható meg. A Lyapunov módszerének segítségével megvalósított jármű szabályozás esetén a referencia sebesség, illetve szögsebesség behatárolásával lehetséges a fentebb említett konvergencia elérése, ennek eredményeként a kezdő pozíciótól függetlenül lehetséges a stabilitás biztosítása.^[5]

A trajektória-követés egy másik megközelítése az orientáció változásának periodikus jellegének figyelembevétele. Ebben az esetben a szabályozó jel periodikus jellegének segítségével lehetséges a stabilitás, illetve konvergencia. Ezeknél a módszereknél a korábbiakhoz hasonlóan alkalmazzák a Lyapunov definícióit annyi kiegészítéssel, hogy a függvények periodikus jellege a cél.

Az irányított rendszer négy állapotváltozós hibamodelle úgy alkalmazható, hogy az orientációt két változóra bontjuk, s -re és c -re az alábbiak szerint:

$$s(t) = \sin(\varphi(t))$$

$$c(t) = \cos(\varphi(t))$$

Illetve ezek deriváltjai:

$$\dot{s}(t) = \cos(\varphi(t))\dot{\varphi}(t) = c(t)\omega(t)$$

$$\dot{c}(t) = -\sin(\varphi(t))\dot{\varphi}(t) = -s(t)\omega(t)$$

A Takagi-Sugeno féle modellt gyakran alkalmazzák a nemlineáris rendszerek dinamikájának leírására. Ennek a segítségével lehetséges a párhuzamos eloszlású kompenzációs szabályozó (PDC) alkalmazása a lineáris mátrixegyenlőtlenség (LMI) keretrendszerében. A Takagi-Sugeno féle Fuzzy logika esetén a rendszer akkor irányítható, ha referencia sebesség nem nulla, illetve az orientációs hiba abszolút értéke nem éri el π értékét, vagy a referencia szögsebesség nem egyenlő nullával. Mivel a valóságban a referencia szögsebesség értéke gyakran keresztezi a nulla értéket, így a korábbi két feltételnek való megfelelés esetén lehetséges a jármű irányítása.^[6]

[5] CLARKE, FRANCIS: *Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control*, Professeur à l'Institut Universitaire de France, Institut Desargues, Université de Lyon 1, 69622 Villeurbanne, France. clarke@igd.univ-lyon1.fr

[6] LENDEK, Z. – GUERRA, T. M. – BABUŠKA, R. – DE SCHUTTER B.: Takagi-Sugeno Fuzzy Models, in: *Stability Analysis and Nonlinear Observer Design Using Takagi-Sugeno Fuzzy Models, Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2010, Vol. 262., Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16776-8_2

Modell-prediktív szabályozás, ismertebb nevén Model Predictive Control (MPC) egy fejlettebb módszer, amely alkalmazása széles körben lehetséges és központi eleme az előre ismert trajektória. A módszer lényege, hogy a lineárizált, vagy nemlineáris kinematikai vagy dinamikai modell ismeretében előre jelzi a rendszer állapotváltozóinak értékét. Ennek ismeretében kerül optimalizálásra a szabályozás költségfüggvénye. A szabályozó algoritmus számítási kapacitás igénye csökkenthető analitikus szabályozási módszer alkalmazásával. A modell-prediktív szabályozás alkalmazásának feltétele, hogy a referencia útvonalnak sima, kétszeresen deriválható függvénynek kell lennie.^[7]

A modell-prediktív szabályozáshoz hasonló módon a járművek irányítása értelmezhető optimalizációs problémaként is, ahol a keresési térben található összes lehetséges megoldás közül a legjobb megoldást kell megtalálni minden egyes mintavételi időben. Ennek a megvalósítása egy iteratív módon, például Newton-módszer vagy genetikus algoritmus segítségével történik. Ezt az elméletet használja fel a részecske-raj optimalizációs módszer (PSO – Particle Swarm Optimization-Based Control), amely módszer az apró állatok viselkedésének vizsgálatából származik. A módszer egy ponthalmazt határoz meg, ahol minden egyes pont egy lehetséges megoldás. Az optimalizáció során ezek közül a pontok közül kerül ki az optimális megoldás iteratív módon.^[8]

A korábban bemutatott MPC, illetve PSO módszer kombinációjával ugyanakkor lehetséges a számítási komplexitás csökkentése a módszerek előnyeinek megtartása mellett.^[9]

4. KONKLÚZIÓ

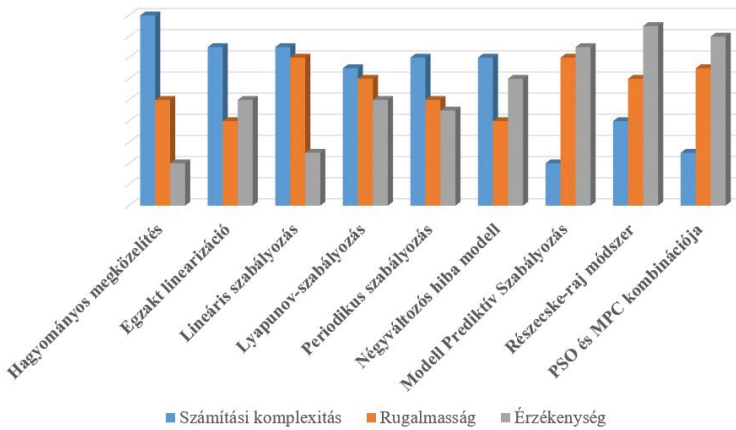
A járművek irányítási módszereinek alkalmazhatóságának vizsgálata egy összehasonlító diagrammal zárul, amelyben az irányítási módszerek tulajdonságai vannak vizualizálva. Konklúzióként elmondható, hogy a három fő tulajdonság (számítási komplexitás, rugalmasság, érzékenység) figyelembevételével a részecske-raj módszer alkalmazása a leginkább kedvező, amelyet a Lyapunov módszere követ a lineáris szabályozás és a négyváltozós hibamodel alkalmazása mellett.

[7] CARLOS, E. GARCÍA – DAVID M. PRETT – MANFRED MORARI: Model predictive control: Theory and practice – A survey, in: *Automatica*, Vol. 25., Issue 3., 1989, Pages 335-348, ISSN 0005-1098, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2).

[8] KENNEDY, J. – EBERHART, R.: „Particles warmoptimization”, in: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*, 1995, Vol.4. 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

[9] ZOU, Q. – JI, J. – ZHANG, S. – SHI, M. – LUO, Y.: „Model predictive control based on particles warmoptimization of greenhouse climate for saving energy consumption”, in: *2010 World Automation Congress*, 2010, 123–128.

1. ábra: Alkalmazhatósági vizsgálat eredménye



FELHASZNÁLT IRODALOM

- BISWA NATH DATTA, Chapter 6 – Controllability, Observability, and Distance to uncontrollability, Editor(s): BISWA NATH DATTA, Numerical Methods for Linear Control Systems, Academic Press, 2004, Pages 159–199, ISBN 9780122035906, <https://doi.org/10.1016/B978-012203590-6/50010-0>.
- CARLOS, E. GARCÍA – DAVID M. PRETT – MANFRED MORARI: Model predictive control: Theory and practice – A survey, in: *Automatica*, Vol. 25., Issue 3., 1989, Pages 335-348, ISSN 0005-1098, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2).
- CLARKE, FRANCIS: *Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control*, Professeur à l'Institut Universitaire de France, Institut Desargues, Université de Lyon 1, 69622 Villeurbanne, France. clarke@igd.univ-lyon1.fr
- HUANG, CHENZI – RÖBENACK, KLAUS: *Brockett's condition and local controllability in the context of under actuated mechanical systems*, 2017, 265–268.
- KENNEDY, J. – EBERHART, R.: „Particle swarm optimization”, in: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*, 1995, Vol. 4., 1942–1948, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- KLANČAR, GREGOR – ZDEŠAR, ANDREJ – BLAŽI, SAŠO – ŠKRJANC, IGOR: „Control of Wheeled Mobile Systems”, in: *Wheeled Mobile Robotics*, 2017, 61–159.
- LENDEK, Z. – GUERRA, T. M. – BABUŠKA, R. – DE SCHUTTER, B.: Takagi-Sugeno Fuzzy Models, in: *Stability Analysis and Nonlinear Observer Design Using Takagi-Sugeno Fuzzy Models, Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2010, Vol. 262., Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16776-8_2.

- MICHOT, MARC: „Brockett’s necessary conditions and the stabilization of non-linear control systems”, in: *Master’s Theses*, 2011, 3946. DOI: 10.31979.
- ZOU, Q. – JI, J. – ZHANG, S. – SHI, M. – LUO, Y.: „Model predictive control based on particles warm optimization of greenhouse climate for saving energy consumption”, in: *2010 World Automation Congress*, 2010, 123–128.