

# Időkésés és mintavételezés hatása egy autó sávtartó szabályozásában

## The effect of time delay and sampling on the lane keeping control of a car

*BÁRTFAI András*<sup>1</sup>, *PhD hallgató*, *TAKÁCS Dénes*<sup>2</sup>, *PhD, egyetemi docens*,  
*VÖRÖS Illés*<sup>3</sup>, *PhD hallgató*

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék, Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463-1369,

E-mail cím: andras.bartfai@mm.bme.hu, Honlap: <https://www.mm.bme.hu/>

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék, Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463-1369,

E-mail cím: takacs@mm.bme.hu, Honlap: <https://www.mm.bme.hu/>

<sup>3</sup>MTA-BME Gépek és Járművek Dinamikája Kutatócsoport, Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463-1369, E-mail cím: illes.voros@mm.bme.hu, Honlap: <https://gjd.mm.bme.hu/>

### Abstract

*The lane keeping control in autonomous vehicles has non-negligible time delay, because it requires calculating the location of the vehicle and the required measurement equipment has low frequency sampling. Therefore, time delay is essential when choosing the right control parameters. This study investigates the theory of an autonomous car's lane keeping control, with an emphasis on the effect of the occurring time delay and sampling.*

**Keywords:** digital control, discrete time delay, lane keeping control, bicycle model, autonomous vehicle.

### Kivonat

*Az önvezető járművek sávtartó szabályozásához szükséges lokalizációt jelentős időkésés terheli az alkalmazott mérőrendszerek alacsony mintavételezési frekvenciájának köszönhetően. Ennek következtében az időkésés meghatározó szerephez jut a szabályozási paraméterek helyes megválasztásánál. A tanulmány egy önvezető autó sávtartó szabályozásának elméleti vizsgálatával foglalkozik, külön hangsúlyt fektetve a rendszerben fellépő időkésés és mintavételezés hatására.*

**Kulcsszavak:** digitális szabályozás, diszkrét időkésés, sávtartó szabályozás, bicikli modell, önvezető jármű.

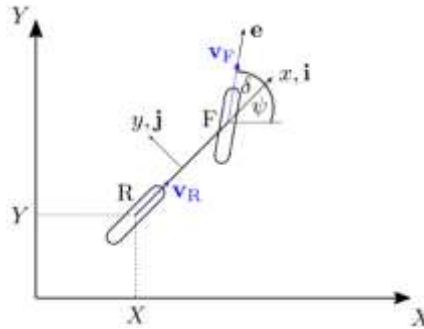
## 1. BEVEZETŐ

Az elmúlt időszakban a járműdinamikai kutatások fókuszába a vezetőtámogató rendszerek és az önvezető autók fejlesztése került, mind az ipari, mind az akadémiai kutatásokban. Egyértelműen meghatározó szerep jut ezeknek a rendszereknek a jövő kor járműveiben, mivel jelentősen csökkenthetik a baleseti kockázatot és kényelmi szempontból is sok előnnyel kecsegtetnek. Habár számos tanulmány foglalkozik önvezető autókkal és ezek mozgásszabályozásával, beleértve a sávtartó szabályozásokat is [1, 2], a szabályozás időkésésének hatását ritkán vizsgálják ilyen rendszerekben. Mindemellett, a modern digitális szabályozók mintavételezett jelekkel dolgoznak, aminek következtében a fellépő időkésés a valós rendszerekben változik két mintavételi idő között. A digitális hatásokat rendszerint elhanyagolják a vizsgálatok során, holott ezek hatással lehetnek az önvezető járművek stabilitására.

Tanulmányunkban az önvezető járművek mozgásszabályozásával foglalkozunk. Ezen belül is a jármű oldalirányú, úgynevezett sávtartó szabályozását vizsgáljuk. Mivel az önvezető jármű mozgásszabályozásához szükséges lokalizációt jelentős időkésés terheli – köszönhetően az alkalmazott mérőrendszerek (GPS, kamera képfeldolgozás) alacsony mintavételezési frekvenciájának –, az időkésés meghatározó szerephez jut a szabályozási paraméterek helyes megválasztásánál [3].

## 2. JÁRMŰ MODELL

Az általunk vizsgált négykerékű, elsőkerék kormányzású, hátsókerék meghajtású jármű mozgásának leírásához az úgynevezett kinematikai bicikli modellt használjuk [4], amelyben a kerék-talaj kapcsolatot pontszerűnek tekintjük. A modellt az 1. ábra illusztrálja.



1. ábra. Bicikli modell pontszerű kerék-talaj kapcsolat esetén.

A jármű síkbeli helyzetét három általános koordinátával adhatjuk meg: a hátsó kerék középpontjának  $X$  és  $Y$  koordinátájával, illetve a jármű legyezési  $\psi$  szögével. A jármű síkbeli mozgását három kinematikai kényszer írja le. A hátsó kerék sebességének iránya az  $\mathbf{i}$  egységvektor irányával megegyező, az első kerék sebességének iránya az  $\mathbf{e}$  egységvektor irányával megegyező és a hátsó kerék sebességének nagysága konstans:

$$\mathbf{v}_R \parallel \mathbf{i}, \quad \mathbf{v}_F \parallel \mathbf{e}, \quad |\mathbf{v}_R| = v. \quad (1)$$

Ezekkel a feltételekkel a mozgást leíró differenciálegyenlet rendszert az alábbi alakban kapjuk:

$$[\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{\psi}]^T = \left[ v \cos \psi \quad v \sin \psi \quad \frac{v}{L} \tan \delta \right]^T, \quad (2)$$

ahol  $L$  a jármű tengelytávja és  $\delta$  az időben előírt kormányyszöget jelöli. A járművet az  $X$  tengelyen való egyenes vonalú egyenletes mozgásra szeretnénk a későbbiekben szabályozni, ezért a rendszert a  $\psi = 0$  legyezési szög és  $\delta = 0$  kormányyszög körül linearizáljuk. Az első egyenlet leválasztásával az  $X$  tengely menti kis mozgásokat az alábbi kettő elsőrendű differenciálegyenlettel írhatjuk le:

$$[\dot{Y} \quad \dot{\psi}]^T = \left[ v \psi \quad \frac{v}{L} \delta \right]^T. \quad (3)$$

## 3. PROPORCIONÁLIS SZABÁLYOZÁS

Ebben a fejezetben a jármű sávtartó szabályozását proporcionális tagokon keresztül valósítjuk meg. A kormányyszöget szabályozzuk egy proporcionális taggal az  $Y$  elmozdulásra és egy proporcionális taggal a  $\psi$  legyezési szögre. A visszacsatolás  $\tau$  időkésséssel történik, így a szabályozási törvény:

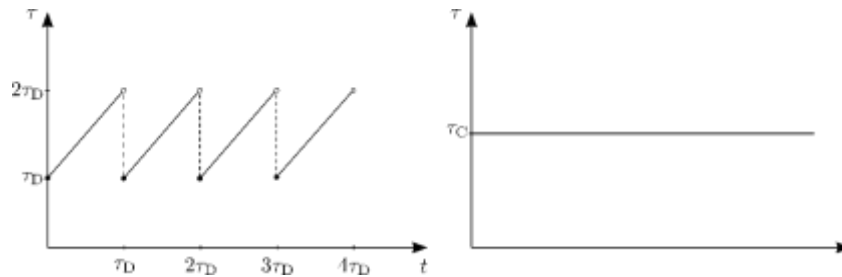
$$\delta(t) = -k_Y Y(t - \tau) - k_\psi \psi(t - \tau), \quad (4)$$

ahol  $k_Y$  a proporcionális tag az  $Y$  irányú elmozdulásra és  $k_\psi$  a proporcionális tag a  $\psi$  szögelfordulásra. A (4) egyenletet a (3) egyenletbe visszahelyettesítve a mozgásegyenlet:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(t) &= v\psi(t), \\ \dot{\psi}(t) &= \frac{v}{L} \left( -k_Y Y(t - \tau) - k_\psi \psi(t - \tau) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

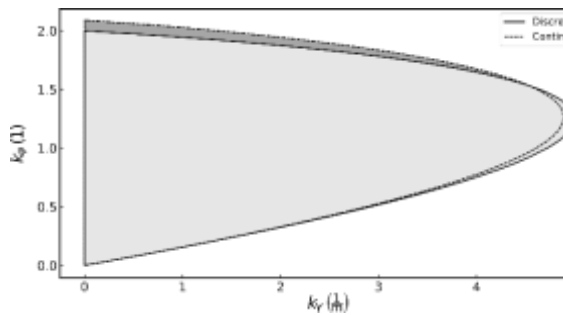
Az alkalmazott lineáris szabályozó stabilitásvizsgálatát mind folytonos, mind pedig digitális szabályozó esetére elvégezzük. A folytonos képlettel a rendszer vizsgálatára a D-szeparáció [5] módszerét használjuk. A mintavételezett, diszkrét rendszert pedig szemidiszkrétizációval elemezzük [5]. A folytonos és diszkrét rendszerekben megjelenő időkésségek összehasonlításánál figyelemmel kell lenni rá, hogy a mintavételezett rendszer esetén az időkésséget egy fűrészfogszerű periodikus függvénnyel lehet leírni. Az időkésség így tehát  $\tau_D$

időkéséstől  $2\tau_D$  időközéig változik lineárisan két mintavételezés között a diszkrét rendszerben. Így a folytonos rendszerrel való összehasonlításkor az egy periódus időre vett átlagot kell választani, azaz  $\tau_C = 1.5\tau_D$ . A továbbiakban  $\tau_D$  a diszkrét rendszer mintavételi idejét,  $\tau_C$  pedig a folytonos rendszer időközét jelöli, ld. 2. ábra.

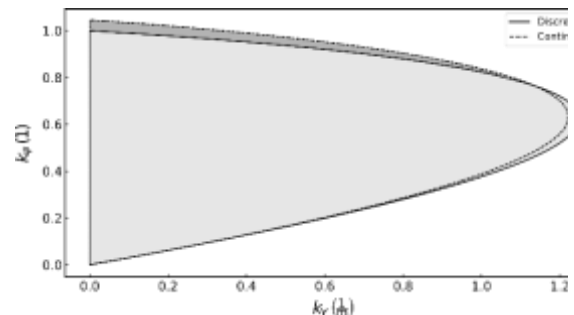


2. ábra. A diszkrét és folytonos rendszerekben megjelenő időközösszehasonlítása.

A stabilitási térképet különböző adatokkal a proporcionális szabályozási paraméterek síkjában a 3. és 4. ábra mutatja. A szürke zóna jelöli a stabil zónát. A folytonos görbe a stabil tartomány határait mutatja a mintavételezett rendszer esetén, a szaggatott pedig folytonos rendszer esetén.



3. ábra. Stabilitás proporcionális szabályozással és  $v = 10 \frac{m}{s}$ ;  $L = 0,2 \text{ m}$ ;  $\tau_D = 0,01 \text{ s}$ ;  $\tau_C = 0,015 \text{ s}$  adatokkal.



4. ábra. Stabilitás proporcionális szabályozással és  $v = 10 \frac{m}{s}$ ;  $L = 0,2 \text{ m}$ ;  $\tau_D = 0,02 \text{ s}$ ;  $\tau_C = 0,03 \text{ s}$  adatokkal.

A 3. és 4. ábra alapján elmondható, hogy a proporcionális szabályozással a stabil tartományban nincs nagy különbség a diszkrét és folytonos rendszerek között. Továbbá az időközössé változtatásával a stabil tartományok ugyanolyan mértékben változnak mindkét esetben.

## 4. PROPORCIONÁLIS-DERIVÁLÓ SZABÁLYOZÁS

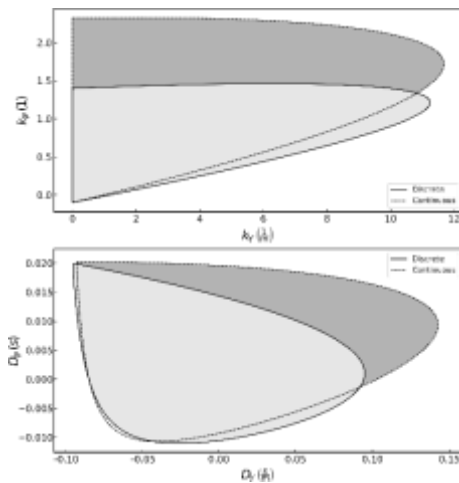
Ebben a fejezetben a jármű sávtartó szabályozását proporcionális és deriváló tagokon keresztül valósítjuk meg. A  $\delta$  kormánysszögét szabályozzuk egy proporcionális és deriváló taggal az  $Y$  elmozdulásra és egy proporcionális és deriváló taggal a  $\psi$  szögelfordulásra. A visszacsatolás időközése  $\tau$ , így a kormánysszög:

$$\delta(t) = -k_Y Y(t - \tau) - k_\psi \psi(t - \tau) - D_Y \dot{Y}(t - \tau) - D_\psi \dot{\psi}(t - \tau), \quad (6)$$

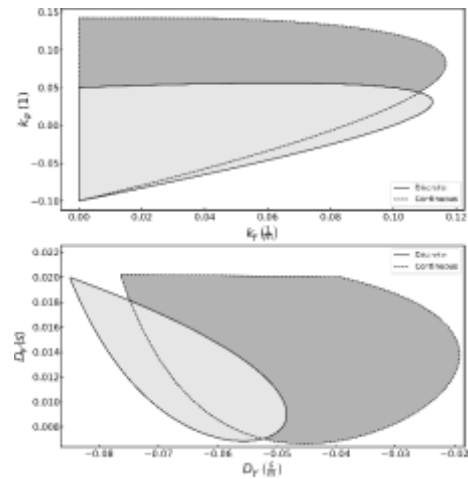
ahol  $D_Y$  a deriváló tag az  $Y$  irányú elmozdulásra és  $D_\psi$  a deriváló tag a  $\psi$  szögelfordulásra. A (6) egyenletet a (3) egyenletbe visszahelyettesítve, a mozgásegyenlet:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(t) &= v\psi(t), \\ \dot{\psi}(t) &= \frac{v}{L} \left( -k_Y Y(t - \tau) - k_\psi \psi(t - \tau) - D_Y \dot{Y}(t - \tau) - D_\psi \dot{\psi}(t - \tau) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

A stabilitási térképet különböző adatokkal a proporcionális ( $k_Y$  és  $k_\psi$ ) és a deriváló ( $D_Y$  és  $D_\psi$ ) szabályozási paraméterek síkjában az 5. és 6. ábra mutatja.



5. ábra. Stabilitás proporcionális-deriváló szabályozással és  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ;  $L = 0,2 \text{ m}$ ;  $k_Y = 1 \frac{1}{\text{m}}$ ;  $k_\psi = 1$ ;  $D_Y = 0,01 \frac{\text{s}}{\text{m}}$ ;  $D_\psi = 0,01 \text{ s}$ ;  $\tau_D = 0,01 \text{ s}$ ;  $\tau_C = 0,015 \text{ s}$  adatokkal.



6. ábra. Stabilitás proporcionális-deriváló szabályozással és  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ;  $L = 0,2 \text{ m}$ ;  $k_Y = 1 \frac{1}{\text{m}}$ ;  $k_\psi = 1$ ;  $D_Y = 0,01 \frac{\text{s}}{\text{m}}$ ;  $D_\psi = 0,01 \text{ s}$ ;  $\tau_D = 0,03 \text{ s}$ ;  $\tau_C = 0,045 \text{ s}$  adatokkal.

Az 5. és 6. ábrán kapott eredmények alapján elmondható, hogy a proporcionális-deriváló szabályozással a stabil tartományban jelentős különbség van a diszkrét és folytonos rendszerek között, mind a proporcionális szabályozási paraméterek, mind a deriváló szabályozási paraméterek síkjában. Az időkézés változtatásával a stabil tartományok ugyanolyan mértékben változnak a proporcionális tagok síkjában, azonban a deriváló tagok síkjában jelentős különbség lép fel.

## 5. ÖSSZEGZÉS

A tanulmány önvezető jármű sávtartó szabályozásának elméleti stabilitását vizsgálta proporcionális és proporcionális-deriváló szabályozással, hangsúlyt fektetve az időkézés hatására. Az eredményeket összefoglalva, elmondható, hogy a proporcionális szabályozással kapott stabilitási tartomány elhanyagolható mértékben különbözik a diszkrét és folytonos időkézések esetében, illetve az időkézés változtatásával a stabil tartományok ugyanolyan mértékben változnak. A proporcionális-deriváló szabályozás vizsgálatával kapott eredmény azt mutatja, hogy itt a diszkrétizáció hatására jelentős eltérés tapasztalható a stabil tartományokban mind a proporcionális, mind a deriváló szabályozási paraméterek síkjában. Továbbá az időkézés változtatása jóval nagyobb mértékben változtatja a stabil tartományt a diszkrét és folytonos rendszer esetén a deriváló szabályozási paraméterek síkjában, mint a proporcionális szabályozási paraméterek síkjában. Tehát a deriváló tagok megválasztásánál különösen tekintettel kell lenni a rendszerben lévő időkézésre.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki az NFKI-128422 keretében kapott támogatásért. A szerzők részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] R. Marino, S. Scalzi, M. Netto *Nested PID steering control for lane keeping in autonomous Vehicles*. Control Engineering Practice. Elsevier, 2011, 19(12), 1459-1467.
- [2] V. Cerone, M. Milanese, D. Regruto *Combined automatic lane-keeping and driver's steering through a 2-dof control strategy*. IEEE Transactions on Control Systems Technology. IEEE, 2008, 17(1), 135-142.
- [3] S. Beregi, D. Takács, C. R. He, S. S. Avedisov, G. Orosz *Hierarchical steering control for a front wheel drive automated car*, IFAC-PapersOnLine. Elsevier, 2018, 51(14), 1-6.
- [4] P. Polack, F. Altché, B. d'Andréa-Novet, A. de La Fortelle *The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles?* 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2017, 812-818.
- [5] T. Insperger, G. Stépán *Semi-Discretization for Time-Delay Systems*. Springer-Verlag New York, New York 2011