

Pályakövető szabályozó tervezése autonóm járműveken történő felhasználásra

Domina Ádám*, Tihanyi Viktor**

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest,
Magyarország (e-mail: adam.domina@gjt.bme.hu).

** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország (e-mail:
viktor.tihanyi@gjt.bme.hu)

Absztrakt: Az automatizált járművek térnyerése napjainkban növekvő tendenciát mutat. Az alacsony és a magas automatizáltsági szintű járművek esetén egyaránt szükséges az előírt trajektórián történő biztonságos végig haladás megvalósítása. Ehhez megfelelően redundánsan működő szabályozót szükséges tervezni. A cikkben megvalósításra kerül egy pure pursuit pályakövető szabályozó. A szabályozó beállítása egy háromállapotú járműmodellen történik, majd kiértékelésre kerülnek az eredmények, a trajektória követés pontossága.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években a járműgyártók az automatizált járművekre koncentrálnak. A járművezető rendkívül komplex feladatot lát el a vezetés során, a jelenleg vezetéssegítő rendszerek a vezető terheltségét igyekeznek csökkenteni. A jelenleg szériagyártásban lévő járművek legfeljebb az SAE besorolás szerinti 3 szintet érik el. Ezek a rendszerek javítják a közlekedésbiztonságot, csökkentik a környezetterhelést és az eljutási időket, valamint komfortosabbá teszik az utazást. Az automatizált járművek fejlesztésének mozgatórugói továbbá az urbanizációból adódó növekvő forgaloműrűség megfelelő kezelése, a balesetek számának és súlyosságának csökkentése, az energiahatékonyság növelése. Ezen célok eléréséhez az automatizált és hálózatba kapcsolt járműveken kívül intelligens közlekedési infrastruktúra kiépítésére és automatizált közlekedésszervezésre egyaránt szükség van. Ilyen például smart city és a V2X kommunikáció megjelenése, az utóbbi esetén a jármű másik járművekkel, illetve a közlekedési infrastruktúrával kommunikál.

A automatizált járművek egyre komplexebb szabályozástechnikai megoldásokat használnak annak érdekében, hogy az úton tartsák a járművet, ezek tesztelése az egyik legnagyobb kihívás az automatizált járművek fejlesztése terén (M. Zöldy (2018)), (H. Lengyel, Zs. Szalay (2019)). Az automatizált járművek irányítási rendszerének hierarchiája négy rétegből áll, ezek rendre a vezetői interfész réteg, a környezetérzékelési réteg, a parancs réteg és a végrehajtó réteg. A vezetői interfész réteg az ember-gép interakció lebonyolításáért felelős, a környezetérzékelési réteg monitorozza a folyamatosan változó környezeti körülményeket, felismeri a forgalmi szituációt, az objektumokat, a közlekedésben résztvevőket, az akadályokat, a horizontális és vertikális közlekedési jelzéseket. A parancs réteg a felsőbb rétegekből érkező adatokon alapuló döntéshozó és pályatervező feladatokat lát el. A végrehajtó

réteg a jármű hossz- és keresztirányú dinamikájának szabályozásáért felelős, az itt implementálásra kerülő trajektóriakövető szabályozó ebbe a rétegbe tartozik.

A cikkben először implementálásra kerül egy háromállapotú járműmodell, ami a jármű hossz- és keresztirányú dinamikáját is modellezi, majd a pályakövető szabályozó tervezése következik. Végül kiértékelésre kerülnek az adatok, számszerűen kifejezve a trajektóriakövetési feladat pontosságát.

A cikk megkülönbözteti a pályakövetés és a trajektóriakövetés fogalmát. A pályakövetés az adott pályán történő végig haladást jelenti, nem veszi figyelembe a jármű időbeli viselkedését, a pálya $[x,y]$ pontpárokkal van definiálva. A trajektóriakövetés során előírásra kerül, hogy a jármű melyik időpillanatban érje el az adott pontot, vagy azt, hogy az adott pontban milyen sebességgel haladjon. Ebben az esetben $[x,y,t]$, vagy $[x,y,v]$ formában van definiálva a trajektória. Az itt bemutatásra kerülő trajektóriakövető megoldás sebességet rendel az adott pontokhoz.

2. JÁRMŰMODELLEZÉS

A pályakövető szabályozó tervezéséhez a szabályozón kívül szükséges egy járműmodellt is implementálni valamilyen szoftveres környezetben, ezen a modellen tesztelhető ugyanis a szabályozó működése. Amennyiben a szabályozót valós járművön szeretnénk használni, úgy kulcsfontosságú a járműmodellt minél jobban a valós járműhöz illeszteni, így minimalizálható a szimulációs eredmények és a valós jármű viselkedése közötti eltérés. A járműmodell pontossága függ egyrészt a modell részletességétől, másrészt paraméterezésének pontosságától. A paraméterezést elvégezhetjük mérési adatok alapján, mely mérés célja a jármű paramétereinek identifikálása, vagy alkalmazhatók a gyártó által megadott értékek. Ebben az esetben a gyártói értékeket kerültek alkalmazásra.

2.1 Járműmodellek

A trajektóriakövetési feladatot ellátó szabályozó tervezéséhez különböző járműmodellek használatosak. Léteznek geometriai, kinematikai és dinamikai járműmodellek. A geometriai modellek a jármű legfőbb geometriai tulajdonságait veszik figyelembe, kevés járműparamétert használnak, meghatározzák a jármű pozícióját és orientációját. A kinematikai modellek a jármű pozícióján kívül a sebességét és gyorsulását is leírják, ez a két modell a leggyakrabban alkalmazott a szabályozótervezés terén. A dinamikai modellek nagyobb járműsebességek esetén, illetve határhelyzeti vizsgálatok végzésekor alkalmazandók. Ezek a modellek a járműre ható külső és belső erők leírásával határozzák meg a jármű viselkedését.

A geometriai és a kinematikai járműmodellek egyszerűen implementálhatók, kevés járműparamétert használnak, számítási igényük kicsi, jellemzően lineáris rendszerek, ami az irányítástervezési feladatokat lényegesen könnyebbé teszi. A dinamikai modellek jellemzően nagyobb számításigényű, nemlineáris modellek, melyek implementálásukhoz sok járműparaméter szükséges, az általuk szolgáltatott szimulációs eredmények azonban jóval pontosabbak, mint a másik két modell esetében.

A járműmodell választása mindig attól függ, hogy milyen célra szeretnénk azt használni. Ha kis sebességű, egyszerűbb mozgásokat szeretnénk modellezni, ahol nem lépnek fel nagy erők, nem fontos a jármű bólintása, dőlése, akkor az egyszerűbb, geometriai, esetleg a kinematikai modelleket szükséges alkalmazni, például targonca vezetésére egy raktárban, vagy automatizált parkolási manőverek esetén. Olyan feladatok esetén azonban, ahol a jármű valamilyen dinamikai határhelyzetben van, vagy annak közelébe kerül, a dinamikai járműmodelleket szokás alkalmazni. A pályakövetési feladat során éles kanyarvételre is sor kerül, ezért egy dinamikai járműmodell került implementálásra, egy háromállapotú biciklimodell, nemlineáris gumimodellekkel kiegészítve. A modell így alkalmas a jármű viselkedésének modellezésére a tapadási határon, illetve azt túllépve. A modell állapotait rendre az (1), (2), (3) egyenletek írják le (R. Hindiyeh, 2013).

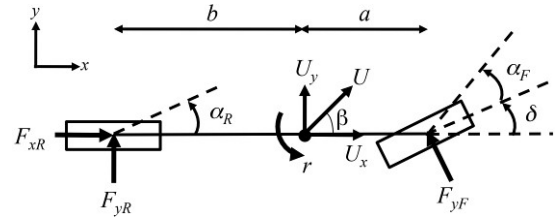
$$\dot{\beta} = \frac{F_{yF} + F_{yR}}{mU_x} - r \quad (1)$$

$$\dot{r} = \frac{aF_{yF} - bF_{yR}}{I_z} \quad (2)$$

$$\dot{U}_x = \frac{F_{xR} - F_{yF}\sin\delta}{m} + rU_x\beta \quad (3)$$

ahol β az oldalkúszási szög a jármű tömegközéppontjában, F_{yF} az oldalerő az első kerekeken, F_{yR} az oldalerő a hátsó kerekeken, m a jármű tömege, U_x a hosszirányú sebesség a jármű koordinátarendszerében mérve, r a legyezési szögsebesség, az első tengely és a tömegközéppont közti

távolság a , a hátsó tengely és a tömegközéppont közti távolság b . F_{xR} a vonóerő a hátsó kerekeken, hátsókerék-hajtású járműről lévén szó, az első kerekeken nincs vonóerő, a kormányaszög δ . Az 1. ábrán (R. Hindiyeh, 2013) α_R és α_F az egyes kerekekhez tartozó oldalkúszási szögek.



1. ábra: Biciklimodell az alkalmazott jelölésekkel

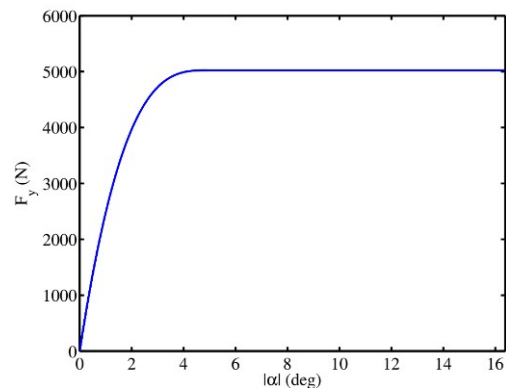
2.2 Gumimodellek

A járműmodell nemlineáris gumimodellekkel egészül ki, mind az első mind a hátsó keréken. Az első keréken alkalmazott Brush gumimodellt a (4), (5) egyenletek esetszétválasztással írják le.

$$F_y = \begin{cases} -C_\alpha \tan\alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\mu F_z} |\tan\alpha| \tan\alpha - \frac{C_\alpha^3}{27\mu^2 F_z^2} \tan^3\alpha, & |\alpha| \leq \alpha_{sl} \\ -\mu F_z \operatorname{sgn}\alpha, & |\alpha| > \alpha_{sl} \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_{sl} = a \tan \frac{3\mu F_z}{C_\alpha} \quad (5)$$

Amennyiben a gumi oldalkúszási szöge az számított α_{sl} értéknél kisebb, úgy a kifejethető oldalero egyre növekszik, mikor az oldalkúszási szög meghaladja ezt a szöveget, akkor egy adott értékhez aszimptotikusan tartó képlettel számol, ezt a 2. ábra (R. Hindiyeh, 2013) szemlélteti.

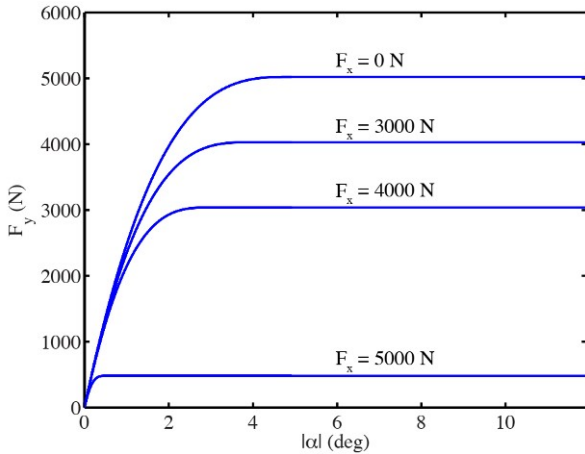


2. ábra: a Brush gumimodell karakterisztikája

A hátsó keréken egy módosított Brush gumimodell került alkalmazásra, ez alkalmas a megcsúszás modellezésére. A modell alapja a tapadási kör, ami figyelembe veszi a hossz- és keresztirányú erők együttes hatását az (6) egyenlet szerint, ahol F_z a normál irányú terhelőerő a keréken. Az F_x és F_y erők eredője nem haladhatja meg a gumiabroncs által átvihető maximális erőt, emennyiben maximális F_x erő

adódik a kerékre, úgy a modell szerint $F_y=0$ oldalért képes a gumi átvinni.

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu F_z \quad (6)$$



3. ábra: A módosított Brush gumimodell karakterisztikája

A módosított Brush gumimodell az (7), (8), (9) egyenletek írják le, az első keréknél alkalmazott modellel analóg módon, esetszétválasztással történő függvénymegadással.

$$F_y = \begin{cases} -C_\alpha \tan \alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\xi\mu F_z} |\tan \alpha| \tan \alpha - \frac{C_\alpha^3}{27\mu^2 \xi^2 F_z^2} \tan^3 \alpha, & |\alpha| \leq \alpha_{sl} \\ -\xi \mu F_z \operatorname{sgn} \alpha, & |\alpha| > \alpha_{sl} \end{cases} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{(\mu F_z)^2 - F_x^2}}{\mu F_z} \quad (8)$$

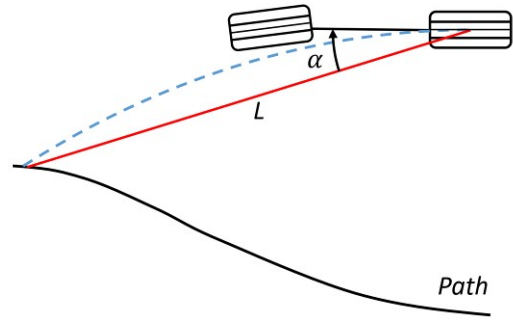
$$\alpha_{sl} = \operatorname{atan} \frac{3\xi\mu F_z}{C_\alpha} \quad (9)$$

3. TRAJEKTÓRIAKÖVETŐ SZABÁLYOZÓ

A trajektóriakövetés megvalósítására egy hossz- és egy keresztirányú járműkontrollt megvalósító szabályozó alkalmazása szükséges.

3.1 Keresztirányú járműkontroll

A jármű keresztirányú szabályozásához egy pályakövető szabályozó szükséges, ami a kormánysszög megfelelő megvalósításával avatkozik be. Különböző laterális kontrollt megvalósító, pályakövető szabályozók léteznek, a választás a pure pursuit szabályozóra esett, ami egy geometriai pályakövető szabályozó, geometria viszonyait a 4. ábra szemlélteti. A szabályozó egy kört illeszt úgy, hogy a körön rajta legyen a jármű hátsó tengelyének pontja, és a kiválasztott pályapont is, és egyúttal érintőleges legyen a jármű hossz tengelyére annak hátsó kerekének pontjában. Az illesztéshez felhasznált pályapontot az előretéktávolsággal választja ki, a 4. ábrán L. Ebben az esetben az előretéktávolság a jármű sebességével kerül súlyozásra, $k=0.4$ súllyal, tehát $L=0.4*v$, ahol v dimenziója [m/s].



4. ábra: A pure pursuit pályakövető szabályozó működési elve

Az így adódó α szög ismeretében kiszámítható az illesztett körön történő végighaladáshoz szükséges δ kormánysszög a (10) és (11) összefüggések szerint, ahol R az illesztett kör sugara, W a jármű tengelytávja.

$$R = \frac{L}{2\sin(\alpha)} \quad (10)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{W}{R} \right) \quad (11)$$

A jármű mozgása során a szabályozó folyamatosan illeszt a kört, majd számítja a szükséges kormánysszöget.

3.2 Hosszirányú járműkontroll

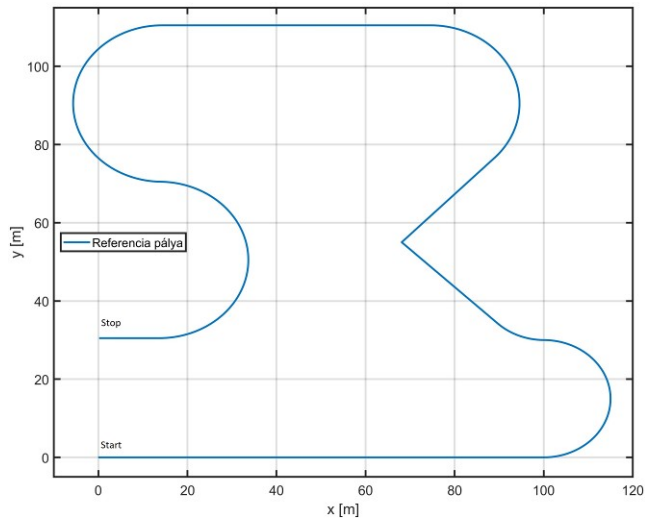
A jármű sebességének szabályozásához az F_x erő megfelelő megválasztása szükséges, ehhez egy PID szabályozóra esett a választás, a referencia és a valós sebességelek különbségét a valós sebességgel negatív visszacsatolásával számítja, majd az így kapott hibajel függvényében a PID szabályozó előállítja a beavatkozó jelet, amit a járműmodell F_x bemenetén alkalmaz. A PID szabályozó értékei: $P=4500$, $I=10$, $D=1$, az értékek szimulációk során kerültek meghatározásra, ezen paraméterek mellett mutatott minimális beállási időt és maximális jelkövetési pontosságot a szabályozó.

4. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

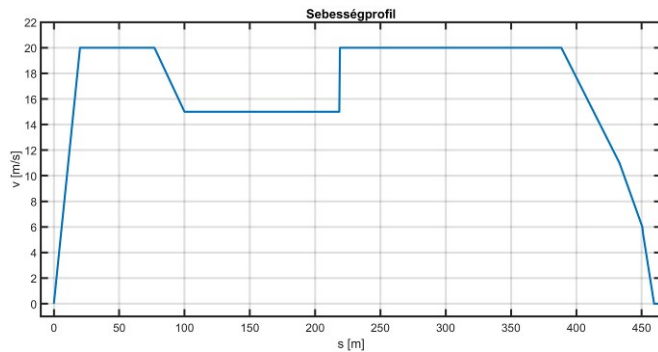
A trajektóriakövető szabályozó egy referencia útvonalon került tesztelésre, az útvonalat az 5. ábra mutatja. A pálya tartalmaz egyenes szakaszokat, melyek a végighaladás során az állandósult állapotban történő laterális hibát hatékonyan szemléltetik, a derékszögű kanyarban várható a legnagyobb oldalirányú eltérés, itt ugyanis a szabályozó túllendül. Ekkor a hirtelen történő visszakanyarodás miatt nagyobb ellenálláserő jelentkezik, ami a sebességgel követésében várhatóan hibát eredményez a szimuláció során. A pályához rendelt sebességprofil az ívhossz függvényében a 6. ábra szemlélteti. A szimulációs eredmények a 7. ábrán és a 8. ábrán láthatók.

A pure pursuit szabályozó pontos pályakövetést biztosít, a maximális laterális hiba 4.03 m, az átlagos laterális hiba 0.2 m. A derékszögű kanyarban az elvárások szerinti viselkedést mutatja, az előretéktávolság miatt már a kanyar elérése előtt megkezdődik a kanyarodás, azonban a kanyarban túllendül,

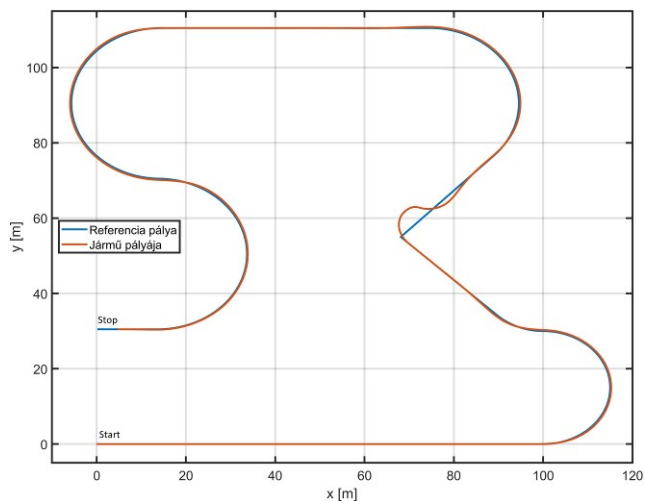
majd gyorsan stabilizálódnak. A pálya többi részén az egyenes szakaszokban zéró közeli laterális hibával működik.



5. ábra: A referencia útvonal



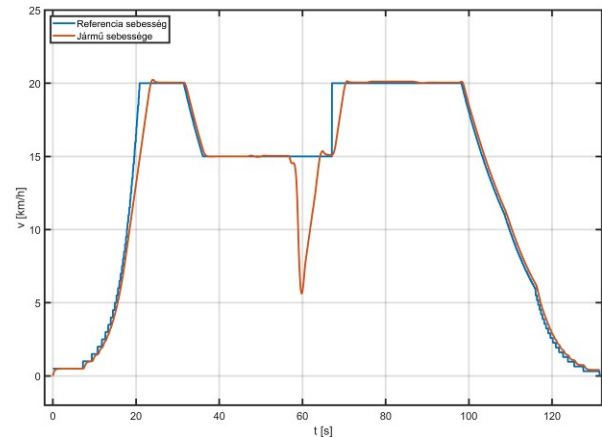
6. ábra: A pályához rendelt sebességprofil az ívhossz függvényében



7. ábra: A jármű által befutott pálya

A szimulációs eredmények a kanyarokban konstans laterális hibát mutatnak, ez a geometriai viszonyok eredménye, a 7. ábra ugyanis a jármű tömegközéppontjának helyzetét mutatja,

a szabályozó viszont a jármű hátsó kerekén átmenő kört illetve, így a hátsó kereket vezeti végig a pályán a legkisebb hibával.



8. ábra: A sebességprofil követése

A sebességjel követése kellően pontos, amikor a jármű megérkezik a derékszögű kanyarhoz, az ellenálláserő hirtelen növekedése miatt a sebesség csökken, ez a hatás a sebességjel kontroljában fellépő zavarás. A szabályozó gyorsan reagál a zavarásra, és rövid idő alatt gyorsítja a járművet a kívánt sebességértékre. A jelkövetésben enyhe túllendülések jelentkeznek.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy trajektóriakövető szabályozó került implementálásra, melyben két szabályozó egymástól függetlenül kezelte a jármű hossz- és keresztirányú mozgását. A két szabályozó együttes alkalmazása a szimulációs eredmények alapján alkalmasnak bizonyult a trajektóriakövetés feladatának ellátására.

A szabályozó továbbfejleszhető időben előretekintő algoritmusok alkalmazásával, melyek csökkenthetik a jelentkező túllendülést a laterális és a longitudinális kontrol esetén egyaránt.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projektet az Európai Unió és az Európai Szociális Alap támogatta és finanszírozta. EFOP-3.6.2-16-2017-00002.

IRODALOMJEGYZÉK

- M. Zöldy (2018). Legal Barriers of Utilization of Autonomous Vehicles as Part of Green Mobility. *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018)*, Vol. 4., 243-249.
- H. Lengyel, Zs. Szalay (2019). The Significance and Effect of the Traffic System Signaling to the Environment, Present and Future Traffic. *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering*, Vol. 4., 847-856.
- R. Hindiyeh, (2013) Dynamics and control of drifting in automobiles, *PhD dissertation, Stanford University*