

Dinamikai Szempontból Megvalósítható Trajektória Tervezése Autonóm Közúti Járművek Számára

Hegedüs Ferenc^{*1)}, Bécsi Tamás^{**}

** Robert Bosch Kft., 1103 Budapest, Gyömrői út 104.
(e-mail: ferenc.hegedus@hu.bosch.com)*

*** BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék, 1111 Budapest, Stoczek u. 2.
(e-mail: becsi.tamas@mail.bme.hu)*

Kivonat: A jövőben a magas szinten automatizált közúti járművek trajektóriáit úgy kell megtervezni, hogy azok biztonságos, dinamikai szempontból megvalósítható, kényelmes és az egyén igényeinek megfelelően testre szabható mozgást eredményezzenek. Ezen igények kielégítésére egy nemlineáris feltételes optimalizáláson alapuló algoritmust fejlesztettünk ki, amely a jármű trajektóriáját a mozgás modell-alapú becsléssel állítja elő. A jármű modelljének a trajektóriakövető szabályozókkal együttesen, zárt hurokban történő szimulációja – mely a szakirodalomban egyedi – lehetővé teszi nem csak a jármű trajektóriájának, de a szabályozók referenciajeleinek közvetlen előállítását is. Megvizsgáltuk a kifejlesztett mozgástervezési módszer érzékenységet és robusztusságát, különös tekintettel a normál üzemi körülményektől való eltérések – pl. az útfelület gyors megváltozása – hatásaira. Ezek a vizsgálatok szintén gyakran hiányoznak a szakirodalomban, pedig a megkívánt megbízhatóság eléréséhez nélkülözhetetlenek. A tanulmányban először bemutatjuk a kifejlesztett trajektóriatervező algoritmust, majd szimulációkkal vizsgáljuk annak működését különböző jármű- és tervezési paraméterértékek esetén. A kapott eredmények alapján értékeljük az algoritmus érzékenységet és robusztusságát, és összefoglaljuk a következtetéseinket.

1. BEVEZETÉS

A magas szinten automatizált és autonóm közúti járművektől azt várjuk, hogy jelentős mértékben hozzájáruljanak a közúti közlekedés biztonságosabbá, energiahatékonyabbá, és környezetkímélőbbé válásához. Elterjedésükkel valószínűleg nagymértékben javulni fognak a különböző közlekedési paraméterek, illetve növekedni fog a mozgássérültek és idősök, valamint a gyengén vezetők mobilitása (Tettamanti, et al., 2016).

Az elmúlt évtizedekben a közúti járművek automatizáltságának foka folyamatosan növekedett. Az aktív biztonsági berendezésektől kezdve, mint amilyen az ESP (Electronic Stability Program, elektronikus menetstabilizátor), a fejlett vezetéstámogató rendszerekig, mint pl. a TJA (Traffic Jam Assist, forgalmi dugó asszisztens) az elektronikus szabályozóegységek használata elősegítette a halálos közúti balesetek számának 48%-kal történő csökkenését az Európai Unióban 2001 és 2015 között (European Commission, 2016). A további automatizálás értelemszerűen még egy ennél is magasabb szintre emelhetné a közlekedésbiztonságot. A biztonsági kérdések mellett az üzemanyagfogyasztás és a károsanyag-kibocsátás csökkentése szintén egyre fontosabb társadalmi elvárás, melynek megvalósításához az autonóm vezetés szintén hozzájárulhatna (Center for Urban Transportation Research, 2013).

A hatalmas fejlődési lehetőség és a növekvő társadalmi nyomás a közúti közlekedés automatizálását az egyik legfontosabb és legígéretesebb kutatási témává teszi mind a járműipar mind pedig a kapcsolódó egyetemek és tudományos intézetek számára. Az autonóm vezetés megvalósításához megoldandó egyik kulcs probléma a trajektóriatervezés. A trajektória- vagy más néven mozgástervezés a jármű mozgásának megtervezését jelenti, azaz hogy milyen útvonalon, milyen sebességgel és gyorsulással szeretnénk közlekedni.

Az elmúlt két évtizedben számos mozgástervezési módszert fejlesztettek ki. Ezek közül mindegyiknek megvannak a maga előnyei és hátrányai, a jelenleg használt módszerekről jó összefoglalást ad (Paden, et al., 2016).

A legegyszerűbb módszerek geometrián és a pontszerű test kinematikáján alapulnak, és leginkább egy-egy adott manőver, pl. sávváltás megtervezésére alkalmasak. Ezek az ún. geometriai módszerek, mint amilyen (You, et al., 2015) vagy (Ren, et al., 2011) geometriai görbék, pl. körívek, klotoidok, vagy spline-ok helyes paramétereinek megtalálását célozzák meg, geometriai (kezdeti és végpontok) és kinematikai (maximális oldalgyorsulás) korlátok figyelembe vételével.

Más, széles körben alkalmazott megközelítések, pl. a gráfkereséses módszerek, mint az A* (Montemerlo, et al., 2008), vagy véletlen mintavételezéses módszerek, mint az RRT (Rapidly-exploring Random Tree, „gyorsan felderítő véletlen fa”) (Kuwata, et al., 2009) diszkrétizálják a járművet körülvevő környezetet, és abban valamilyen heurisztikát alkalmaz-

va keresést hajtanak végre. Ezeknek az algoritmusoknak a kimenete általában az elérni kívánt, időbélyegekkal ellátott útpontok halmaza.

Az optimalizáláson alapuló módszerek, mint ahogyan az itt bemutatott algoritmus is optimális irányítási technikákat alkalmaznak, mint pl. az NLP (Non-Linear Programming, nemlineáris programozás) és az MPC (Model Predictive Control, modell prediktív irányítás), és sikerrel alkalmazhatóak dinamikai szempontból megvalósítható trajektóriák tervezéséhez. A mozgástervezési problémát (Howard & Kelly, 2007) és (Ferguson, et al., 2008) nemlineáris feltételes optimalizálási feladatként fogalmazzák meg, melyben a cél a járművet a megkívánt végállapotba eljuttató bemeneti jelek helyes paramétereinek megtalálása. Maga a trajektória a jármű dinamikai modelljének e bemeneti jelekre adott, numerikusan kiszámított válaszaként áll elő, így a modell érvényességi tartományán belül biztosítja a megvalósíthatóságot.

Jelen tanulmány felépítése a következő. A 2. bekezdésben megfogalmazzuk a trajektóriatervezési feladatot, mint matematikai problémát. A 3. bekezdésben bemutatjuk a kifejlesztett nemlineáris feltételes optimalizáláson alapuló mozgástervezési algoritmust és annak működését. Ezután a 4. bekezdésben vizsgáljuk a módszer érzékenységet és robusztusságát, majd az 5. bekezdésben összegezzük a következtetéseinket, és javaslatot teszünk a további kutatási irányokra.

2. PROBLÉMAFELVETÉS

2.1 A trajektóriatervezési probléma és jelen munka hozzájárulásai

A trajektóriatervezés célja a járműnek az aktuális kezdeti állapotból valamilyen megkívánt végállapotba történő eljuttatása, egy biztonságos, dinamikai szempontból megvalósítható, kényelmes és személyre szabható mozgás által. A jármű állapota, vagy más néven konfigurációja alatt minden, a kezdeti és végpontok megadásánál figyelembe veendő fizikai jellemzőt értünk, pl. a jármű pozícióját, orientációját, sebességét, és gyorsulását.

Mozgástervezési szempontból a biztonság azt jelenti, hogy a jármű környezetében jelen lévő minden statikus és dinamikus akadályt el kell kerülni. Az objektumelkerülés a probléma komplexitása miatt e munkának nem tárgya. Egy gyakran alkalmazott, a bemutatott algoritmus esetében is használható módszer az ún. mintavételes tervezés, ahol több alkalmas trajektória jelöltet generálnak, majd ezek közül a biztonságosakat egy későbbi lépésben választják ki (Althoff, et al., 2012).

Szintén a biztonságosság témaköréhez kapcsolódik a dinamikai megvalósíthatóság fogalma. Dinamikai szempontból megvalósítható trajektória alatt azt értjük, hogy az anholonom dinamikával rendelkező járműnek képesnek kell lennie a megtervezett mozgás megvalósítására. Habár a járművet soha nem szabad olyan manőverre kényszeríteni, mely a stabilitás és irányíthatóság elvesztéséhez vezet, képesnek kell lenni a dinamikai megvalósíthatóság határán lévő mozgások megtervezésére is, pl. egy hirtelen megjelenő akadály gyors kikerü-

léséhez. Jelen munka egyik fő célja egy a fentiekre követelményeknek megfelelni képes módszer bemutatása és működésének vizsgálata a jármű által egyáltalán elérhető dinamikai tartomány határán.

A mozgáshoz kapcsolódó kényelemérzet több tényezőtől függ. A kényelmetlenséget okozó fő hatások a nagy gyorsulás és lökés, hiszen ezek a jellemzők az utasra ható erőnek és annak változásának nagyságával vannak közvetlen kapcsolatban (Suzuki, 1998). Az elviselhető gyorsulás mértéke függ annak irányától is (Förstberg, 2000). Kényelmes trajektória megvalósításához tehát korlátozni szükséges, sőt a lehető legalacsonyabb szinten kell tartani a kialakuló gyorsulás és lökés nagyságát, figyelembe véve ezek irányát is. A kényelemérzet rendkívül szubjektív, így célszerű biztosítani a mozgástervezés személyre szabhatóságát a dinamikai megvalósíthatóság határain belül.

A tervezés után a trajektóriát végre is kell hajtani, a tervezett mozgást a járműnek valamilyen szabályozás segítségével követnie kell. Annak ellenére, hogy a legtöbb létező tervezési módszer ezt nem veszi figyelembe (egy szerencsés kivétel (Kuwata, et al., 2009)), a szabályozók számára a trajektória alapján valamilyen követendő referencia jelet is elő kell állítani. Bármilyen jó szabályozót is alkalmazunk, e referenciajelek és a rendszer valós válasza között minden esetben jelen lesz bizonyos mértékű késedelem. Az itt bemutatott módszer a szabályozók referenciajeleinek közvetlen és egyidejű tervezésével minimalizálja ezt az eltérést.

A szakirodalomban megtalálható munkák közül szinte egyik sem foglalkozik a javasolt módszerek érzékenységgel és robusztussággal. Ezzel szemben a környezeti tényezők és a járműparaméterek változásának vizsgálata elengedhetetlen, hiszen a valós jármű mindig eltér a tervezéshez használt nominális modelltől. Maga a tervezőalgoritmus is rendelkezhet olyan paraméterekkel, melyeknek jelentős hatása van a generált trajektóriákra. Ezen paraméterértékek változásának hatását is célszerű vizsgálni, hiszen a módszer robusztusságát csak így biztosíthatjuk.

2.2 Megközelítés nemlineáris programozási problémaként

A 2.1 bekezdésben leírt probléma matematikailag egy nemlineáris programozási feladatként fogalmazható meg. A cél az $u(p, t)$ paraméterezett bemeneti jelek helyes p paramétereinek megtalálása a járműdinamika adott $f(x(t), u(p, t), t)$ modellje esetén úgy, hogy a jármű $x(t)$ állapota kielégítse a $C(x(t), t)$ állapotkorlátokat:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(p, t), t), \quad (1)$$

$$C(x(t), t) = 0. \quad (2)$$

Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy megfelelő bemeneteket (pl. kormányzó, hajtó- és féknyomaték) szeretnénk találni, melyek a járművet az adott kezdeti állapotból pont az általunk megkívánt végállapotba vezetik.

A korlátozások mellett elvárjuk, hogy a trajektória optimális legyen az általunk választott, szintén a járműállapottól függő $z_i(x(t))$ minőségi jellemzőkből összeállított költségfüggvényre:

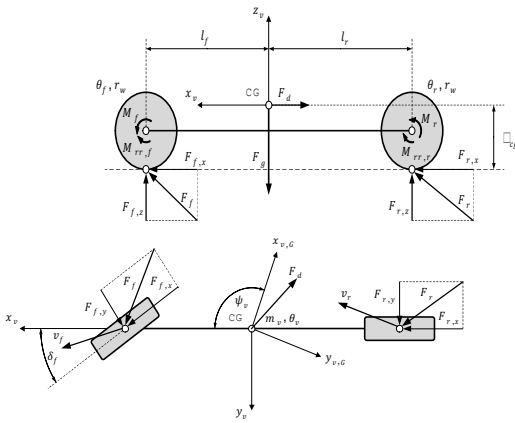
$$J(x) = \sum_i w_i z_i(x(t)) \rightarrow \min \quad (3)$$

ahol w_i az egyes jellemzőket súlyozó tényező. A (3) cél-függvénnyel lehetőség nyílik pl. az utazási idő minimalizálására, vagy a kényelmi szempontok figyelembe vételére.

3. DINAMIKAI SZEMPONTBÓL MEGVALÓSÍTHATÓ TRAJEKTÓRIA TERVEZÉSE

3.1 A járműdinamika modellje

A tervezett mozgás dinamikai megvalósíthatóságának eléréséhez egy pontos, nemlineáris, egynyomvonalú modellt használunk a jármű mozgásának leírásához (1. ábra). A merev, többtest-modell a kocsiszekrényből és a hozzá kapcsolódó első és hátsó virtuális kerekekké redukált tengelyekből áll. A modell 5 szabadságfokú, ezek a kocsiszekrény hosszirányú x_v és oldalirányú y_v elmozdulása, és a függőleges tengely körüli ψ_v elfordulása, valamint az első ρ_f és a hátsó ρ_r kerekek saját tengelyük körüli elfordulása.



1. ábra: Járműmodell

A modell paraméterei a jármű tömege m_v , függőleges tengely körüli tehetetlenségi nyomatéka θ_v , tömegközéppontjának magassága h_{cg} , az első és hátsó virtuális kerekek tehetetlenségi nyomatékai θ_f, θ_r , sugara r_w , és középpontjaiknak a jármű tömegközéppontjához mért vízszintes távolságai l_f, l_r .

A modell bemenete a következő vektor:

$$u_v = [\delta_f \quad M_v]^T, \quad (4)$$

ahol δ_f az első keréken mért kormányzög és M_v a járműre ható teljes hajtó- ($M_v > 0$) vagy fékezőnyomaték ($M_v < 0$).

A jármű állapotvektora:

$$x = [x_{v,c} \quad y_{v,c} \quad \psi_v \quad \dot{x}_v \quad \dot{y}_v \quad \dot{\psi}_v \quad \rho_f \quad \rho_r]^T, \quad (5)$$

ahol $x_{v,c}$ és $y_{v,c}$ a jármű tömegközéppontjának koordinátái a földhöz rögzített koordinátarendszerben, és a pont az időbeli deriváltakat jelöli.

A jármű mozgásegyenlete a következő formában fejezhető ki:

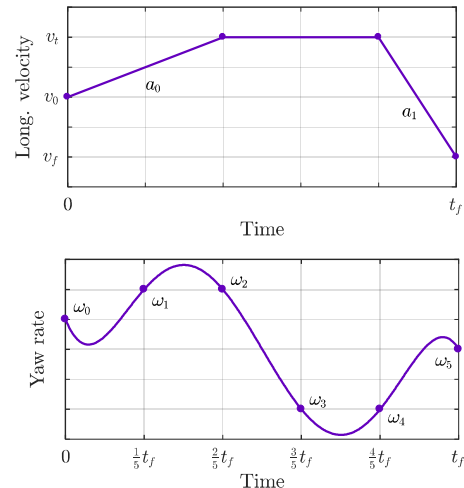
$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Gx = F \quad (6)$$

ahol $F_{f,x}$ és $F_{f,y}$ az első, $F_{r,x}$ és $F_{r,y}$ a hátsó kereken ébredő, valamint $F_{d,x}$ és $F_{d,y}$ a légellenállásból adódó hossz- és oldalirányú erők, továbbá M_f és $M_{rr,f}$ az első, M_r és $M_{rr,r}$ a hátsó kereket hajtó vagy fékező, illetve görbülési ellenállás nyomatékok.

A modellt leíró egyenletek részletei megtalálhatóak a (Schramm, et al., 2014) 10.2 bekezdésében, azzal a különbséggel, hogy a kocsiszekrény mozgásegyenletei a járműhöz rögzített koordinátarendszerben értendők, mivel az utasok ebben a rendszerben érzékelik a dinamikai mennyiségeket. A kerekeken ébredő erők a (Pacejka, 2006) 4.3 bekezdésében tárgyalt Magic Formula kerékmodell szerint számíthatók, a hossz- és oldalirányú kúszások szuperpozíciója pedig a (Jazar, 2014) 3.9 bekezdés szerinti súrlódási ellipszis alapján van értelmezve.

3.2 Paraméterezett bemeneti függvények

A (Howard & Kelly, 2007) tanulmányban a szerzők megmutatják, hogy a jármű trajektóriája hatékonyan (kevés paraméterrel) leírható a kocsiszekrény hosszirányú sebességének illetve a legyezési (függőleges tengely körüli) szögsebességének megadásával. A járműmozgás hossz- és oldalirányú komponenseinek ilyen módon történő szétválasztása gyakori megközelítés (Resende & Nashashibi, 2010).



2. ábra: Paraméterezett bemeneti függvények

A hosszirányú sebesség függvény leírása egy trapézprofilal (2. ábra, fent) történik, mely kisszámú paraméterrel is

biztosítja, hogy a mozgás megfelelően testreszabható legyen. A megfelelő paramétervektor a következő:

$$p_v = [v_0 \quad a_0 \quad v_t \quad a_1 \quad v_f \quad t_f]^T, \quad (7)$$

ahol v_0 , v_t , és v_f rendre a kezdeti, utazó és végső sebességek, a_0 és a_1 a kezdeti és végső gyorsulások, t_f pedig a trajektória bejárásához szükséges idő. A paraméterek megfelelő megválasztásával konstans, lineáris, vagy rámpa alakú profilok is könnyen megadhatók.

Mivel a jármű által bejárt pálya alakját döntően a legyezési szögsebesség határozza meg, az alkalmazott bemeneti függvény valamilyen sima görbe kell, hogy legyen a trajektóriák folytonos egymáshoz kapcsolhatóságának érdekében. A legyezési szögsebesség függvény leírása emiatt egy spline-görbe (2. ábra, lent) segítségével történik, melyhez a következő paramétervektor tartozik:

$$p_\omega = [\omega_0 \quad \omega_1 \quad \dots \quad \omega_n \quad t_f], \quad (8)$$

ahol az $\omega_0, \omega_1, \dots$ értékek a spline csomóponti értékei az időtengely egyenközi felosztása mellett.

3.3 Állapotkorlátok

A járművel elérni kívánt végállapot a feltételes optimalizálási feladat korlátaiként fogalmazhatók meg. A jármű végső pozícióját és orientációját nyilvánvalóan meg kell határoznunk. Célserű lehet továbbá a végső legyezési szögsebesség az út görbületének és a végső hosszirányú sebességnek megfelelő definiálása is. Az előírt végső állapot ennek megfelelően:

$$x_f = [x_{v,f} \quad y_{v,f} \quad \psi_{v,f} \quad \dot{\psi}_{v,f}]^T. \quad (9)$$

A jármű által elért végső állapot meghatározásához az adott bemeneti függvények esetén a zárt hurkú irányítás figyelembe vételével numerikusan meg kell oldani a jármű mozgásegyenleteit, mely feladat precízen valamilyen implicit differenciál-egyenlet megoldó módszerrel, pl. a visszafelé haladó Euler módszerrel valósítható meg. Az állapotkorlátok (2) szerinti megfogalmazása tehát a következő:

$$[C(x(t_f))] = x_f - [x(t_f)] = \mathbf{0}, \quad (10)$$

ahol $[x(t_f)]$ a jármű által ténylegesen elért végállapot.

3.4 A mozgástervezési feladat megoldása

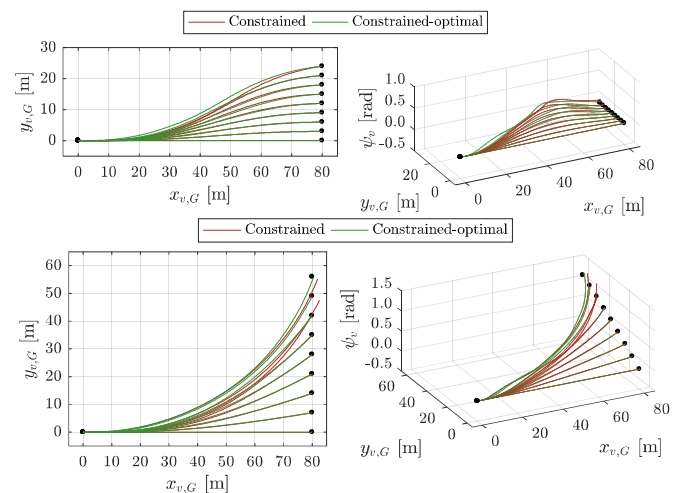
A szabad paraméterek számának csökkentése érdekében a jármű hosszirányú sebességét előre meghatározottnak tekintjük. Ez a megközelítés hiteles, hiszen a hosszirányú sebességet gyakran korlátozzák a különböző forgalmi tényezők vagy törvényi szabályozások. A mozgástervezési probléma megoldása többféle megközelítésben is lehetséges. A (10) állapotkorlát egyenlet direkt módon is megoldható numerikusan, négyzetes probléma esetén pl. a Levenberg-Marquardt algoritmus segítségével. A (3) egyenletben meghatározott, a trajektóriát leíró minőségi jellemzők szerinti optimális eredményt feltételes numerikus optimalizálás segítségével kaphatunk, pl. az IPM (Interior Point Method, belsőpontos módszer) vagy SQP (Sequential Quadratic Programming, szek-

venciális négyzetes programozás) segítségével. Az alkalmazott célfüggvény, mely a (11) egyenlettel írható le, az oldalirányú gyorsulás és lökés büntetésével a trajektória kényelmét biztosítja, miközben az eljutási időt is minimalizálja:

$$J(x) = w_\alpha \int_0^{t_f} \ddot{y}_v^2 + w_j \int_0^{t_f} \dot{y}_v^2 + w_t t_f, \quad (11)$$

ahol w_α , w_j , és w_t súlyozó tényezők, melyeket a $w = [w_\alpha \quad w_j \quad w_t]^T$ súlyvektorba rendezhetünk.

A 3. ábra egy sor az algoritmus által generált trajektóriát mutat be. Az ábra tetején sávváltás jellegű, míg alján sávtartás jellegű trajektóriák láthatók. A piros színű trajektóriákat az állapotkorlát egyenletek közvetlen megoldásával, míg a zöld színűeket feltételes optimalizálással kapott megoldással kaptuk. A tervezéshez az első esetben harmad-, a második esetben pedig ötödfokú polinom legyezési szögsebesség profilokat használtunk. Az egyszerűség kedvéért a hosszirányú sebességet konstans $25 \frac{m}{s}$ értékre választottuk.

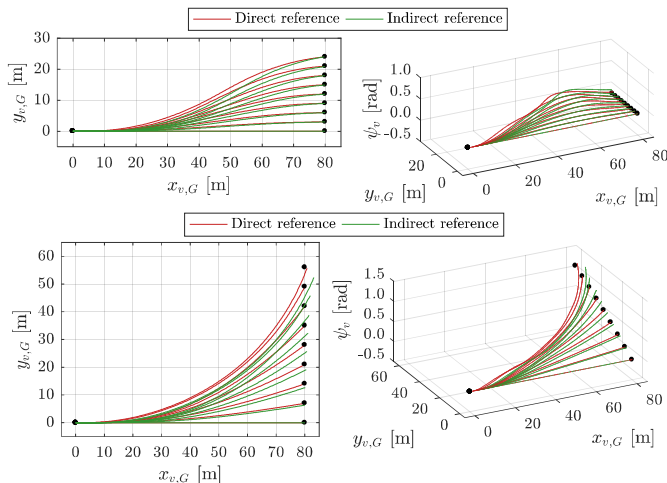


3. ábra: Az algoritmus által generált trajektóriák

A trajektória menti oldalirányú gyorsulás mértéke és így a keréken ébredő erők nagysága az oldalirányú kitéréssel együtt (alulról felfelé) növekszik. A viszonylag gyors hosszirányú mozgást figyelembe véve a legnagyobb görbületű szélső trajektóriák a dinamikai megvalósíthatóság határán helyezkednek el, mivel a kerék-út kapcsolaton átvihető erő eléri felső határát. Látható, hogy a feltételes optimalizációs megoldás esetén az oldalgyorsulás minimalizálása (zöld trajektóriák) lehetővé teszi az előírt végállapot pontosabb elérését a legszélsőségesebb esetben is. A két szélsőséges sávtartás jellegű trajektória esetén az állapotkorlát egyenletek közvetlen megoldásával az előírt végállapot kis hibával történő elérése az iterációk számának jelentős növelésével sem lehetséges. Fontos megemlíteni, hogy mind a közvetlen, mind az optimális megoldás dinamikailag megvalósítható trajektóriákat eredményez, mivel azokat a jármű mozgásának modell alapú szimulációja szolgáltatja.

3.5 A szabályozás referencijeleinek közvetlen előállítás

Amint az a jármű (5) egyenletben megadott állapotvektora alapján látható, a hosszirányú sebesség, valamint a legyezési szögsebesség a modellnek nem bemenetei, hanem állapotai. Ahhoz, hogy ezeket a trajektóriát jól leíró jellemzőket bemenként tudjuk alkalmazni, a jármű mozgásának meghatározása a követő szabályozókkal együtt, zárt hurokban történik. Ez azt jelenti, hogy az algoritmus a járműnek a számított trajektórián történő pontos végigvezetéséhez szükséges szabályozó referencijeleket közvetlenül és a trajektóriatervezéssel egyidőben generálja. Ez a megközelítés minimalizálja, sőt, a nominális rendszert tekintve meg is szünteti a tervezett és a végrehajtott trajektória közti eltérést. A tervezési algoritmus szempontjából a trajektóriakövető szabályozók tetszőleges típusúak lehetnek, jelen esetben a hosszirányú sebességkövetést PID, míg a legyezési szögsebességkövetést LQ-Servo szabályozóval valósítottuk meg. A szabályozók megtervezése egymástól független módon, a hossz- és oldalirányú járműdinamika irányítási célú lineáris modelljeinek alapján történt (Rajamani, 2012).



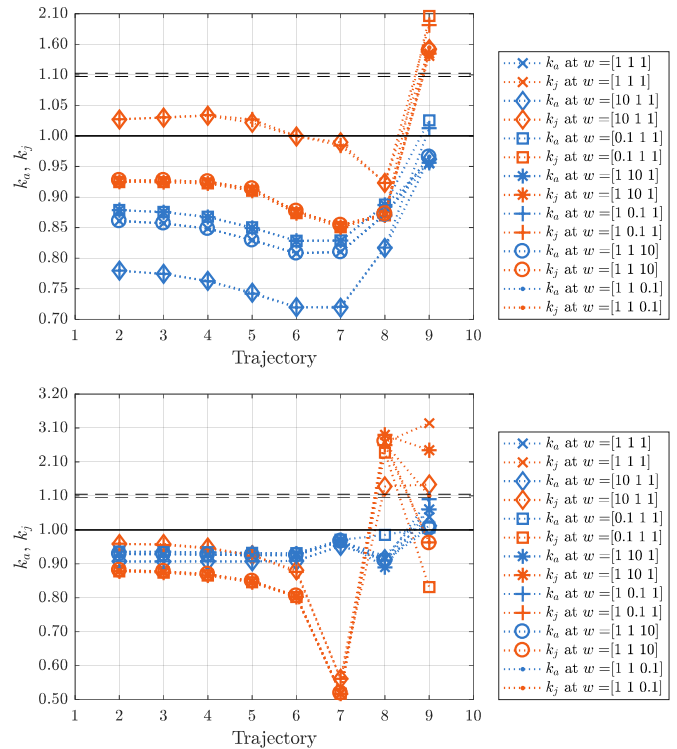
4. ábra: Trajektóriák közvetlen és utólagos referencijel generálás esetén

A közvetlen referencijel generálás előnyét mutatja be a 4. ábra. A piros trajektóriákat a javasolt közvetlen tervezési módszerrel kaptuk, míg az ezek alapján utólagosan generált referencijeleket alkalmazása esetén a jármű a zöld trajektóriákat futja be. Látható hogy a nominális rendszert tekintve a jármű közvetlen referencijel generálás esetén pontosan követi a tervezett trajektóriákat. Ezzel ellentétben az utólagosan kiszámított referencijel felhasználása esetén eltérések vannak a ténylegesen bejárt (zöld) és a tervezett (piros) trajektóriák között. Az eltérések különösen jelentősek a dinamikai megvalósíthatóság határán lévő szélső trajektóriák esetében.

4. AZ ALGORITMUS ÉRZÉKENYSÉGÉNEK ÉS ROBUSZTUSSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

4.1 A célfüggvény súlyozó tényezőire való érzékenység

Mivel az algoritmus működése függ a (11) költségfüggvényben található súlyozó tényezők megválasztásától, fontos az algoritmus teljesítményének vizsgálata e paraméterek különböző értékeinek esetén.



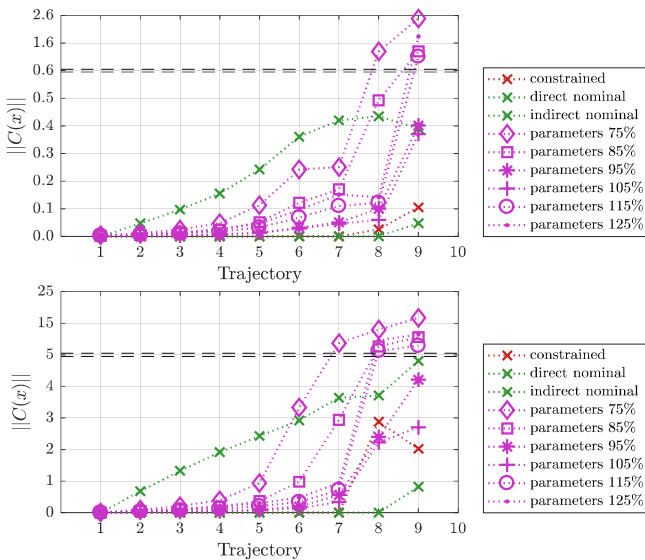
5. ábra: A legnagyobb oldalgyorsulás és -lökés arányának alakulása a súlyozó tényezők különböző értékei mellett

Vizsgáltuk az optimális megoldás esetén, különböző súlyozó tényezők mellett kialakuló maximális oldalirányú gyorsulás és lökés értékeknek az állapotkorlát egyenletek közvetlen megoldásával kapott értékekhez viszonyított k_{α} és k_{β} arányát. A sávváltás jellegű (5. ábra, felül), és a sávtartás jellegű (5. ábra, alul) trajektóriákat külön értékeltük ki, az indexelés a nagyobb oldalirányú végpozíció irányába (4. ábra trajektóriáit tekintve alulról felfelé) növekszik. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy az algoritmus működése hatékonyan befolyásolható a súlyozó tényezők megválasztásával. Fontos megemlíteni, hogy a dinamikai megvalósíthatóság határán lévő (8-9.) trajektóriák esetén a legnagyobb gyorsulás és lökés értéke azért nőhet meg, mert az optimális megoldás esetében a jármű képes elérni az előírt végállapotot, míg az állapotkorlátok közvetlen megoldása esetén a jármű kicsúszik, és egy kisebb görbületű pályán halad tovább.

4.2 Robusztusság a jármű- és környezeti paraméterek változásaival szemben

Szintén fontos a kifejlesztett módszer robusztusságának vizsgálata a jármű- és környezeti paraméterek értékeinek bizonytalanságával szemben, mivel a valós rendszer minden esetben

eltér a tervezéshez használt nominális modellettől. Az előírt és a ténylegesen elért állapotok közötti eltérés nagyságát (euklideszi normáját) mutatja be a 6. ábra, különböző járműparaméterek esetében. Az ábra felső része ismét a sávváltás, míg alsó része a sávtartás jellegű trajektóriákhoz tartozik, valamint a trajektóriák indexelése is megegyezik. A 125% paraméter jelölés jelentése, hogy a jármű tömegét és tehetetlenségi nyomatékát 25%-kal növeltük, míg az átvihető keréktalpi erők maximális nagyságát ezzel egyidőben 25%-kal csökkentettük, hiszen ezek a változtatások a rendszert ugyanabba az irányba mozdítják el. Az eredmények azt mutatják, hogy a nem a dinamikai megvalósíthatóság határain lévő (1-7.) trajektóriák esetében a paraméterváltozások által okozott eltérés alatta marad az utólagos referenciájel generálás esetén tapasztalt eltérésnek. Ez az algoritmus összteljesítményét tekintve azt jelenti, hogy a közvetlen referenciájel generálás hatékonyan képes ellensúlyozni a paraméterértékek megváltozásának hatását. A legnagyobb görbületű (8-9.) trajektóriák esetén az algoritmus már nem képes kompenzálni a vizsgált paraméterekben bekövetkező jelentős változásokat, mivel az általuk erősen befolyásolt kerék-út kapcsolat által átvihető erő eléri a határait.



6. ábra: Az előírt és elért végállapotok közti eltérés nagysága különböző modellparaméterek esetén

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A bemutatott tanulmányban egy nemlineáris feltételes optimalizáláson alapuló trajektóriatervezési módszert ismertettünk, mely a trajektóriakövető szabályozók számára szükséges referenciájel közvetlen és egyidejű előállításával képes dinamikaileg megvalósítható mozgás tervezésére szélsőséges körülmények között is. A szakirodalomban található munkák többségével ellentétben vizsgáltuk a kifejlesztett módszer érzékenységét és robusztusságát. Tanulmányoztuk az algoritmus viselkedését a tervezési, jármű- és környezeti paraméterek értékeiben bekövetkezett változások esetén a dinamikai megvalósíthatóság határain. Bemutattuk, hogy a kifejlesztett módszer nagyfokú robusztussággal rendelkezik e paraméterváltozásokkal szemben.

Az ismertetett módszer nyilvánvalóan jelentős számítási kapacitást igényel, a trajektóriák számítási ideje a jelenlegi MATLAB Simulink implementációval másodperces nagyságrendű, így nem használható valós idejű rendszerekben. Mivel az optimalizálási probléma megoldási ideje függ a megoldandó probléma komplexitásától, kívánatos lenne mind a futásidő csökkentése, mind annak garantálása, hogy determinisztikus időn belül álljon rendelkezésre megfelelő trajektória. A statikus és dinamikus környezet figyelembe vételének és az akadályok elkerülésének beépítése az optimalizálási problémába szintén fontos fejlesztési lehetőség. Jelen tanulmány alapjául szolgálhat más algoritmusoknak, melyek képesek az egyidejű trajektória és referenciájel robusztus módon történő előállítására.

HIVATKOZÁSOK

- Althoff, D. és mtsai., 2012. On-line Trajectory Generation for Safe and Optimal Vehicle Motion. *Autonomous Mobile Systems*, pp. 99-107.
- Center for Urban Transportation Research, 2013. *Contribution of Automated Vehicles to Reduced Fuel Consumption and Air Pollution*, Tampa: University of South Florida.
- European Commission, 2016. *Road Safety in the European Union*, Brussels: Mobility and Transport DG.
- Ferguson, D., Howard, T. M. & Likhachev, M., 2008. *Motion Planning in Urban Environments: Part I*. Nice, France, ismeretlen szerző, pp. 1063-1069.
- Förstberg, J., 2000. *Ride comfort and motion sickness in tilting trains*. hely nélkül: Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology.
- Howard, T. M. & Kelly, A., 2007. Optimal Rough Terrain Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots. *International Journal of Robotic Research*, 26(2), pp. 141-166.
- Jazar, R. N., 2014. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. New York: Springer.
- Kuwata, Y., Fiore, G. & Emilio, F., 2009. Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(5), pp. 1105-1118.
- Montemerlo, M., Becker, J. & Bhat, S., 2008. Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(9), p. 569-597.
- Pacejka, H. B., 2006. *Tyre and Vehicle Dynamics*. London: Elsevier.
- Paden, B. és mtsai., 2016. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving. *Computing Research Repository*.
- Rajamani, R., 2012. *Vehicle Dynamics and Control*. 2. szerk. New York: Springer.
- Ren, D., Zhang, J., Zhag, J. & Cui, S., 2011. Trajectory planning and yaw rate tracking control for lane changing of intelligent vehicle on curved road. *Science China*, 54(3), pp. 630-642.
- Resende, P. & Nashashibi, F., 2010. *Real-time Dynamic Trajectory Planning for Highly Automated Driving in Highways*. Madeira Island, Portugal, ismeretlen szerző

- Schramm, D., Hiller, M. & Bardini, R., 2014. *Vehicle Dynamics*. Berlin: Springer.
- Suzuki, H., 1998. Research trends on riding comfort evaluation in Japan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 212(1), pp. 61-72.
- Tettamanti, T., Varga, I. & Szalay, Z., 2016. Impacts of Autonomous Cars from a Traffic Engineering Perspective. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 4(44), pp. 244-250.
- You, F. és mtsai., 2015. Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system. *Expert Systems with Applications*, 42. kötet, pp. 5932-5946.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

¹⁾ Jelen tanulmány nem kötődik a Robert Bosch Kft-nél folytatott kutatási és fejlesztési tevékenységekhez.