



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY



Mérnöki Szimpózium a Bánkiban
(ESB 2025)



TEB alapú útvonaltervezés és MPC alapú adaptív sebességszabályozás autószerű önvezető járműhöz

TEB based trajectory planning and MPC based adaptive cruise control for car-like autonomous vehicle

¹Kádár Alex

¹Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
alex.kadar@edu.bme.hu

Összefoglalás

A cikk egy autószerű önvezető jármű hierarchikus irányítási architektúráját mutatja be, amelyben a laterális pályakövetést Timed Elastic Band (TEB) alapú lokális trajektóriatervezés és Pure Pursuit geometriai kormányzóg-szabályozás, míg a hosszirányú mozgást modell prediktív irányításon (MPC) alapuló adaptív sebességszabályozó (ACC) valósítja meg. A TEB ütközésmentes, sima referenciapályát generál, amelyet a Pure Pursuit algoritmus követ, míg az MPC ACC a követési távolságot, a sebességprofil és a gyorsulási korlátokat veszi figyelembe. Az architektúra viselkedését többféle szcenárióban vizsgálom, és összehasonlítom a MATLAB Path Following Control System (PFCS) referenciamodeljével. Az eredmények azt mutatják, hogy a TEB+Pure Pursuit+MPC ACC rendszer hasonló sávtartási pontosság mellett kisebb szimulációs futási időt és nagyobb manőverezési rugalmasságot biztosít.

Kulcsszavak: autonóm jármű, Timed Elastic Band, kormányzóg szabályozás, modell prediktív irányítás, adaptív sebességszabályozó

Abstract

This paper presents a hierarchical control architecture for a car-like autonomous vehicle, in which lateral path tracking is achieved by Timed Elastic Band (TEB) based local trajectory planning and Pure Pursuit geometric steering control, while longitudinal motion is governed by a Model Predictive Control (MPC) based Adaptive Cruise Control (ACC). The TEB planner generates a smooth, collision-free reference path, which is tracked by the Pure Pursuit controller, whereas the MPC ACC enforces desired time headway, speed profile, and acceleration constraints. The architecture is evaluated in various scenarios and is compared against the MATLAB Path Following Control System (PFCS) reference model. Results show that the TEB + Pure Pursuit + MPC ACC setup achieves comparable lateral tracking accuracy with lower simulation runtime and higher maneuvering flexibility.

Keywords: autonomous vehicle, Timed Elastic Band, steering control, model predictive control, adaptive cruise control

1 Bevezetés

Az autonóm járművek egyik központi feladata a biztonságos, ütközésmentes és komfortos közlekedés megvalósítása összetett forgalmi környezetben. Ehhez a járműnek a sávgeometria, az

akadályok és a forgalmi szabályok figyelembevételével fizikailag követhető referenciapályát kell generálnia, miközben a kormányzó és a gyorsulás olyan bemeneteit állítja elő, amelyek a laterális és hosszirányú pályakövetési hibát minimalizálják és tiszteletben tartják a dinamikai korlátokat.

A korszerű vezetéstámogató és önvezető rendszerekben elterjedt megoldás a hierarchikus architektúra, ahol a felsőbb szintű lokális trajektóriatervező referenciapályát készít, az alsóbb szintű szabályozók pedig ezt valósítják meg. A laterális irányítást tipikusan geometriai vagy optimalizálásalapú kormány szabályozó végzi, míg a hosszirányú irányítás külön modulban valósítja meg a sebesség- és követési távolság szabályozását, szabad haladási és követési üzemmódok között váltva.

Jelen cikk egy ilyen hierarchikus architektúrát mutat be, amelyben a laterális oldalon Timed Elastic Band (TEB) alapú lokális pályatervező és Pure Pursuit geometriai kormány szabályozó, a hosszirányú oldalon pedig modell prediktív irányításon alapuló adaptív sebességszabályozó (MPC alapú ACC) működik. A TEB ütközésmentes, sima referenciapályát ad, a Pure Pursuit ezt követi, az MPC ACC pedig a sebesség- és követési távolság követelményeket érvényesíti. Az architektúra értékeléséhez referenciaként a MathWorks Path Following Control System (PFCS) [7] Simulink modelljét használok, amely integrált módon valósítja meg a sávközép követését és az adaptív sebességszabályozást.

2 Irodalmi áttekintés kormányzó és gyorsulás szabályozására

A laterális pályakövetés leírására a járműdinamika irodalma egységesen a kerékpármodellt használja, az ISO 8855 szerinti járműkoordináta-rendszerben [1][3]. A klasszikus sávtartó algoritmusok közé tartozik a Pure Pursuit és a Stanley szabályozó, amelyek geometriai alapon számítják a kormányzót [4], míg a lineáris állapotter-modellekre épülő LQR/LQI/LQG (Linear-Quadratic Regulator/Integral/Gaussian) megoldások kvadrátikus költség minimalizálásával biztosítanak stabil pályakövetést [2]. Nagyobb sebességű, tapadáskorlát közeli manőverekhez nemlineáris és MPC alapú laterális vezérlőket alkalmaznak. A lokális pályatervezésre az Elastic Bands, a Timed Elastic Band (TEB), a mesterséges potenciálmező módszerek és az MPC alapú trajektóriaoptimalizálás terjedtek el, amelyek a sávgeometria, az akadályok és a jármű kinematikai-dinamikai korlátai mellett generálnak ütközésmentes, sima referenciapályát [5].

A hosszirányú szabályozás hagyományos kiindulópontja a PID alapú tempomat és az időrekszabályt alkalmazó adaptív sebességszabályozó (ACC), amelyek a sebességreferenciát és a követési távolságot tartják. Korszerű megoldásoknál egyre gyakoribb az MPC alapú ACC, amely az ego és a lead jármű relatív kinematikáját állapotter-modellemben írja le, a célfüggvényben a távolság- és sebességhiba, valamint a gyorsulás és a rántás minimalizálásával, kemény korlátok mellett [5].

Az integrált laterális és hosszirányú vezérlési architektúrák célja, hogy a kormányzót és a gyorsulást közös optimalizálási probléma részeként kezeljék. A nemlineáris MPC alapú megoldások a pályakövetési hibákat és a hosszirányú állapotokat együttes állapotter-modellemben írják le. Ezzel párhuzamosan elterjedtek a hierarchikus struktúrák is, ahol felső szinten globális vagy lokális trajektóriatervező, alsó szinten külön laterális és hosszirányú szabályozók működnek. A jelen cikkben bemutatott architektúra ebbe a hierarchikus csoportba tartozik: TEB alapú lokális pályatervező és Pure Pursuit kormány szabályozó látja el a laterális feladatot, míg a hosszirányú mozgást MPC alapú ACC vezérli, amely a hosszirányú korlátokat és komfortkritériumokat már prediktív módon kezeli.

3 Módszertan és szimulációs környezet

A vizsgálatot MATLAB–Simulink környezetben végeztem, az Automated Driving Toolbox és a Driving Scenario Designer eszközeire támaszkodva. A Driving Scenario Designer biztosítja a

közúti környezet, a sávgeometria és a többi közlekedő jármű mozgásának definiálását.

A Simulink modell hierarchikus felépítésű. Felső szinten a Driving Scenario Designer által generált pozíció- és sebességadatok érkeznek az ego blokkjához, erre épül rá a TEB trajektóriatervező, a Pure Pursuit alapú laterális szabályozó és az MPC alapú ACC hosszirányú szabályozó. A járműkinematikai blokk a kerékpármodellt és a hosszirányú mozgást tartalmazza, a visszacsatolt állapotok minden mintavételi időlépésben frissülnek. A scenáriók kettő típusba sorolhatók: egyenes pályás követés vezető járművel, valamint komplex, többjárműves, többsávos helyzet sávváltási lehetőségekkel. Minden esetben azonos járműparamétereket és mintavételi időt használok, így az architektúra viselkedése közvetlenül összehasonlítható.

3.1 Járműmodell

A jármű mozgásának leírására kinematikai kerékpármodellt alkalmazok, ahol a járművet egy első kormányozható és egy hátsó rögzített orientációjú kerék reprezentálja. Az állapotvektor a globális pozíciót (hátsó kerék pozíciója) (x, y) , az orientációt θ és a hosszirányú sebességet v tartalmazza, a bemenetek a kormánysszög δ és a hosszirányú gyorsulás a [3]. Ezeken kívül a tengelytávot is figyelembe kell venni. A kormánysszöget $|\delta| \leq 40^\circ$, a gyorsulást $-8 \leq a \leq 5 \text{ m/s}^2$ tartományra korlátozom, ami a jármű kormánygeometriájának, fékezési-gyorsítási képességeinek és az utaskomfort szempontjainak megfelel.

3.2 TEB alapú laterális pályatervezés

A Timed Elastic Band (TEB) [5] egy dinamikus lokális útvonaltervező algoritmus, amely az útpályán vagy sávváltási manőver során végrehajtandó mozgást diszkrét trajektóriapontok sorozataként írja le. Egy fix számú pont kerül elhelyezésre egy kezdeti referencia-görbe mentén, ezt a „szalagot” az optimalizáló iteratívan módosítja úgy, hogy a kezdő állapot rögzített marad, és a pontok az ego járműhöz viszonyított lokális koordinátákban értelmezettek. A TEB így egyszerre kódolja az útvonal geometriai alakját és időbeli parametrizációját, és visszagörgetett horizontú módon (receding horizon), minden irányítási ciklusban az aktuális állapottól kiindulva frissül.

Az optimális TEB szalag egy költségfüggvény minimalizálásával áll elő, amely a különböző célokat (akadályelkerülés, sávtartás, pályasimaság) leíró célfüggvények súlyozott összege. Az akadályelkerülést és a sávhatárok figyelembevételét sima, folytonosan differenciálható büntetőfüggvények biztosítják, amelyek a trajektóriapontok távolságától függően növekvő költséget rendelnek az akadályhoz vagy sávhatárhoz túlságosan közeli pályaszakaszokhoz. A költségfüggvény hiperparamétereit úgy választottam meg, hogy a jármű ütközésmentesen, kis laterális hibával kövesse a sáv középvonalát, miközben a szükséges kormánysszög-beavatkozás mértéke a komfort szempontjából elfogadható maradjon.

3.3 Pure Pursuit alapú kormánysszög képzés

Az implementált struktúrában a TEB minden időpillanatban az ego koordináta-rendszerében definiált, előre mutató útvonalpont-készletet ad, amelyhez a kormányzási parancsot Pure Pursuit algoritmussal állítom elő [4]. A módszer lényege, hogy a jármű a pályán egy előre kijelölt look-ahead ponthoz igazodik, és úgy választja a kormánysszöget, mintha egy olyan sugarú körön haladna, amely ezen a ponton halad keresztül. A jármű koordináta-rendszerében a look-ahead pont (x, y) koordinátái és a tengelytáv b alapján a kívánt görbület és kormánysszög egyszerűen számítható, majd a számított δ értéket a megengedett maximális kormánysszög szerint korlátozom. Így a Pure Pursuit geometriai ütkövető szabályozó a TEB által generált diszkrét pontsoron biztosítja a sima, fizikailag megvalósítható laterális pályakövetést.

3.4 MPC alapú adaptív sebességszabályozó

Az MPC alapú ACC célja az ego jármű sebességének és a lead járműtől mért követési távolságának szabályozása úgy, hogy egyszerre teljesüljenek a biztonsági és komfort követelmények [6]. Minden mintavételi időpontban egy véges horizontú optimalizálási feladat oldódik meg, amely a jövőbeli állapotok előrejelzésére támaszkodva határozza meg az optimális gyorsítási parancsot.

A követési módban az állapotvektor

$$x_k = [gap_k \quad v_{ego,k} \quad z_k]^T \quad (1)$$

ahol a gap a két jármű közötti követési távolság, v_{ego} az ego sebessége, z pedig integrátor állapot a maradó hiba kompenzálására. A vezérlőjel ($u_k = a_{ego,k}$) az ego jármű hosszirányú gyorsulása. A diszkrét idejű állapotter modellt pedig:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Ev_{lead,k} \quad (2)$$

alakban írható fel, ahol $v_{lead,k}$ a lead jármű sebessége. Szabad (cruise) módban a modell egy egyszerűbb, kétállapotú rendszerre redukálódik, amely az ego sebességét és egy sebességhiba integrátor állapotot tartalmaz, a referencia v_{set} sebesség környezetében.

A költségfüggvény kvadrátikus, és a horizonton a következő komponenseket tartalmazza:

- követési távolság hiba a referencia távolsághoz képest,
- sebességhiba a v_{ref} értékhez képest (követési módban tipikusan a lead jármű sebessége, szabad módban a beállított v_{set}),
- integrátor állapot büntetése a maradó hibák elkerülésére,
- gyorsítás nagyságának büntetése a túl nagy gáz/fék parancsok elkerülésére,
- rántás (gyorsulásváltozás) büntetése a sima gyorsítási profil érdekében,
- terminális integrátor büntetés a horizont végén a statikus hiba csökkentésére.

A vezérlő ezen felül lineáris korlátokat is figyelembe vesz: a gyorsítás $[a_{min}, a_{max}]$ tartományra korlátozott, a követési távolságra pedig minimális biztonsági határ $gap_k \geq d_0$ érvényes. Így az MPC nem tervezhet olyan gyorsítási profilt, amely ütközéshez vagy a jármű fizikai korlátait meghaladó manőverhez vezetne. A tervezés során 3 másodperces időrestet alkalmaztam, így az ACC célja, hogy körülbelül három másodperces követési távolságot tartson a lead járműhöz képest.

Az optimalizálási feladat YALMIP keretrendszerben kerül megfogalmazásra, amely a döntési változókat, költségfüggvényt és korlátokat deklaratív módon írja le, majd automatikusan kvadrátikus programozási problémává alakítja. A súlytényezők hatását célzott paramétervizsgálattal elemeztem, a követési távolság gyors beállítása, a sebességprofil simasága és a gyorsulási jel oszcillációmentessége közötti kompromisszumot keresve. A cikkben bemutatott végső ACC beállítások azt a súlyvektort használják, amely ezen szempontok között a legkiegyensúlyozottabb viselkedést adta.

4 Szimulációs eredmények

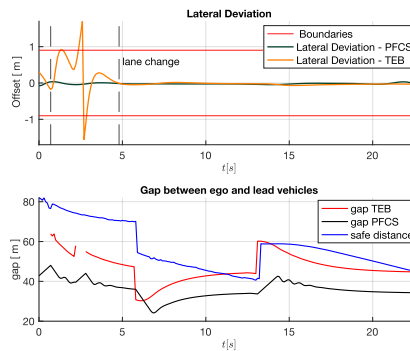
A fejezet célja az integrált rendszer viselkedésének igazolása kontrollált, reprodukálható szimulációkban. Kettő esetípust vizsgálók: hosszirányú követés egyenes pályán, valamint komplex többsávos forgalmi helyzet. A javasolt TEB+Pure Pursuit+MPC ACC architektúrát és a Path Following Control System (PFCS) referenciamodellt azonos útgeometria és vezető járműtrajektória mellett futtattam, így a laterális pályakövetés és a hosszirányú követési viselkedés közvetlenül összehasonlítható [7]. A szimulációk egy Apple MacBook Pro M3 Pro laptopon futottak. A futási idő alatt egy szimulációs futás teljes idejét értem, amely magában foglalja a szcenárió inicializálását és a szabályozó algoritmusok végrehajtását, de nem tartalmazza a modell lefordításának idejét.

4.1 Távolságtartó tempomat tesztelése

Az ACC vizsgálata hosszú, egyenes, záróvonalas útszakaszon történt, ahol a sávváltás tiltott. Az ego járművet az MPC alapú ACC vezérli, amely 3 másodperces időrésszel tartja a lead járműtől mért követési távolságot. A vezető jármű előre definiált, lassítási és gyorsítási szakaszokat tartalmazó sebességprofilot követ. A biztonságos követési távolság a szimuláció során végig tartva volt, a sebességprofil jól követi a lead jármű változásait, a gyorsulásjel pedig túlnyomórészt kis amplitúdójú és sima. A végső vészfékezés során, amikor a lead jármű nullára lassít, az ACC a dinamikai korlátokon belül fékez, az ego jármű ütközés nélkül áll meg, a végső távolság körülbelül 5 méter marad.

4.2 A TEB+MPC és a Path Following Control System összehasonlítása komplex környezetben

A Path Following Control System egy MATLAB Simulink referenciamodellel, amely nemlineáris MPC segítségével integráltan valósítja meg a sávközép követését és az adaptív sebességszabályozást, azonban önálló lokális akadályelkerülő pályatervezést és sávváltási manővereket nem végez. A két irányítási architektúra összehasonlítását azonos komplex szcenárión, ötszöri futtatás után, az átlagos futási idő és a sávtartási pontosság alapján végeztem. A TEB+MPC rendszer átlagos futási ideje 10,193 másodperc, míg a PFCS esetében 13,355 másodperc, vagyis a javasolt architektúra mintegy 24 százalékkal rövidebb szimulációs futásidőt igényel. A laterális pályakövetési pontosság RMSE (Root Mean Square Error) értéke TEB+MPC esetén 0,026 m, PFCS esetén 0,021 m, ami milliméteres különbség, gyakorlati szempontból elhanyagolható. A PFCS kizárólag sávközép követésre és távolságtartásra képes, míg a TEB+MPC architektúra sávváltási manővereket is végre tud hajtani, így kedvező futási idő mellett közel azonos sávtartási pontosságot és nagyobb manőverezési rugalmasságot biztosít. Emellett a TEB+MPC architektúra a sávváltás tiltott eseteiben a vezető jármű mögötti követési távolságot is következetesebben, a biztonsági határhoz közelebb tartotta, mint a PFCS. Az ábra felső panelje a TEB+MPC és PFCS laterális eltérését mutatja a sávközéptől. A függőleges szaggatott vonalak a sávváltási manőver kezdetét és végét jelölik, amit csak a TEB+MPC szabályozó hajtott végre. Az alsó panelen a járműközi távolság látható. A teljes szakaszon mindkét szabályozónál teljesül, hogy a mért követési távolság a safe distance felett vagy annak közvetlen közelében marad, így a vizsgált szcenárióban nem alakul ki ütközésveszélyes helyzet.



1. ábra: A TEB+MPC és PFCS szimulációs eredményei

5 Konklúzió

A szimulációs eredmények alapján a TEB alapú lokális pályatervező és a Pure Pursuit geometriai kormányászóg szabályozó párosa autószerű jármű laterális irányítására jól alkalmazható. A kanyarodó útszakaszon az ego jármű végig a sávhatárokon belül maradt, a maximális laterális hiba körülbelül 0,034 m volt, a kormányzási jel pedig a fizikai korlátok közelítése nélkül biztosította a sima pályakövetést. A hosszirányú mozgásra kialakított MPC alapú ACC megbízhatóan betartotta a 3 másodperces időrésszabályt, a követési távolság a tranziensek után stabilan a referencia környezetében maradt, a sebességprofil jól illeszkedett a vezető jármű dinamikájához, a vészfékezési scenárióban pedig az ego jármű ütközés nélkül állt meg, körülbelül 5 m végső állókövetési távolsággal. A komplex, többsávos scenárióban az integrált architektúra konzervatív, de koherens viselkedést mutatott: a TEB laterális oldalon agresszívan kereste a sávváltási lehetőségeket, az MPC ACC ugyanakkor betartotta a követési távolságot és gyorsulási korlátokat.

A bemutatott struktúra a hierarchikus megközelítések csoportjába tartozik, ugyanakkor konkrét kombinációja a szakirodalomban kevésbé részletezett: TEB alapú lokális pályatervezés kapcsolódik egy egyszerű, jól érthető Pure Pursuit kormányzási szabályozóhoz és egy MPC alapú ACC hosszirányú szabályozóhoz, egységes Simulink környezetben. A PFCS referenciamodellhez viszonyítva a TEB+MPC architektúra mintegy 24 százalékkal rövidebb szimulációs futási időt eredményezett, miközben a sávtartási RMSE csak néhány miniméterrel haladta meg a PFCS értékét. Figyelembe véve, hogy a PFCS kizárólag sávközép követésre és távolságtartásra képes, míg a TEB alapú megoldás sávváltási manővereket és explicit akadálykerülést is támogat, a javasolt architektúra kedvező kompromisszumot kínál számítási igény, pályakövetési pontosság és funkcionális komplexitás között, és hidat képez a tisztán geometriai, illetve a teljesen integrált MPC alapú megoldások között.

A további kutatási irányok közül kiemelhetők: a TEB időbeli kiterjesztése, közös laterális–hosszirányú MPC megfogalmazás és a valós járműves vagy HIL (Hardware-in-the-Loop) tesztek.

6 Hivatkozások

- [1] International Organization for Standardization. (2011). *Road vehicles: Vehicle dynamics and road-holding ability: Vocabulary (ISO Standard No. 8855:2011)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [2] Kwakernaak, H., & Sivan, R. (1972). *Linear optimal control systems*. New York, NY: Wiley-Interscience.
- [3] Rajamani, R. (2012). *Vehicle dynamics and control* (2nd ed.). New York, NY: Springer.
- [4] Coulter, R. C. (1992). *Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm* (Technical Report CMU-RI-TR-92-01). Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, Robotics Institute.
- [5] Martin Keller, Frank Hoffmann, Carsten Hass, Torsten Bertram, Alois Seewald, *Planning of Optimal Collision Avoidance Trajectories with Timed Elastic Bands*, IFAC Proceedings Volumes, Volume 47, Issue 3, 2014, Pages 9822-9827, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823625
- [6] Naus, G. J. L., Vugts, R. P. A., Ploeg, J., van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2010). *String-stable CACC design and experimental validation: A model predictive approach*. In Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 759–764). Piscataway, NJ: IEEE.
- [7] MathWorks. (2024). Path Following Control System. In MATLAB & Simulink documentation. Natick, MA: MathWorks.