

Mozgástervezés Előzési Manőverekhez Közúti Környezetben

Losonczy Dániel* Fehér Árpád**

*Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratórium, HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI),
Kende utca 13-17., H-1111~Budapest, Magyarország (e-mail: losonczy.daniel@sztaki.hun-ren.hu)

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedés-és Járműirányítás Tanszék, Műegyetem rkp. 3., H-1111~Budapest, Magyarország(e-mail: feher.arpad@kjk.bme.hu)

Kivonat: Ez a cikk egy olyan lokális mozgástervezési módszert mutat be, amely kifejezetten előzési manőverekre lett kifejlesztve közúti környezetben. A megközelítés többféle vezetési stratégiát integrál az utasok kényelmének és biztonságának növelése érdekében. A leggyorsabb és a legkisebb oldalirányú gyorsulással járó trajektóriákat határozza meg a megoldás Frenet koordináta-rendszerben, amely hatékonyan veszi figyelembe a valós forgalmi helyzeteket, kanyarokat és mozgó objektumokat. Átfogó elemzések készültek a jármű viselkedéséről, az egyes költségfüggvény-összetevőkről, valamint a tervezési és a javasolt módszerek teljesítményének és számítási hatékonyságának értékelése érdekében. A szimulációs eredmények rávilágítanak a megközelítés erősségeire a dinamikus megvalósíthatóság fenntartása, a biztonság garantálása és az utasok kényelmének növelése terén, miközben azonosításra kerültek a potenciális fejlesztési területek, például a számítási többletköltségek összetett manőverek esetén.

1. BEVEZETÉS

Az autonóm járműveknek megbízhatóan és pontosan kell útvonalat tervezniük valós időben, egy dinamikus és változó környezetben, figyelembe véve az akadályokat és a mozgó célpontokat. Ennek elérése érdekében átfogó, hierarchikus szoftverrendszerre van szükség, amely több réteget integrál (Paden és társai, 2016), és ezek mindegyike nélkülözhetetlen ahhoz, hogy a jármű biztonságosan és hatékonyan navigálhasson. A mozgástervezési folyamat első lépéseként elengedhetetlen a jármű környezetének megfigyelése és annak ábrázolása egy térképen (Bresson és társai, 2017). Ezt követően a járműnek egy globális útvonalat kell meghatároznia, amely elkerüli a statikus akadályokat, miközben figyelembe veszi a különböző korlátozásokat, mint például a jármű kinematikai korlátai és az út geometriája. A globális útvonal követése közben a járműnek meghatározott időközönként döntéseket kell hoznia, majd meg kell terveznie a lokális trajektóriákat (Schwartzing és társai, 2018). Eközben a járműnek létre kell hoznia és rendszeresen frissítenie kell egy lokális útvonalat, amely a globális útvonalat követi referenciaként, figyelembe véve a valós idejű korlátokat, a jármű dinamikáját és a dinamikus mozgó objektumokat. A "lokális" kifejezés arra utal, hogy ez az útvonal rövid távú, és a tervezés a jármű helyi koordináta-rendszerében történik. A járműnek a tervezett lokális trajektóriát kell követnie a vezérlő algoritmusok segítségével, amelyek meghatározzák a hosszanti és oldalirányú vezérlési bemeneteket. Mindezt valós időben kell végrehajtani, figyelembe véve a bizonytalanságokat és a jármű folyamatosan változó

környezetét.

Ez a cikk egy módszert mutat be a lokális mozgástervezésre a Frenet koordináta-rendszerben, amelyet sávtartásra és előzési manőverek trajektóriájának megtervezésére alkalmazható.

1.1 Kapcsolódó munkák

A trajektóriatervezés és -szabályozás problémája az autonóm járművek esetében, különösen előzési forgatókönyvek során, különböző innovatív megközelítésekkel került feldolgozásra. Ezek az erőfeszítések több célt is egyensúlyban tartanak, mint például a biztonság, a folytonosság és a hatékonyság, miközben figyelembe veszik a gyakorlati korlátokat és a dinamikus környezetet. Számos módszertan illusztrálja ezeket a koncepciókat. Például (You és társai, 2015) egy kooperatív jármű-infrastruktúra-rendszert javasol a sávváltási manőverek javítására, valós idejű kiigazításokkal a járműdinamika alapján. Hasonlóképpen (Palatti és társai, 2021) egy kockázatértékelési és döntéshozatali keretrendszert használ egy véges állapotú géppel, hogy javítsa az előzési biztonságot. A mozgástervezés során előzési helyzetekben a szerzők egy gráf-alapú módszert alkalmaznak (Hegedűs és társai, 2020), amely klaszterezéssel csökkenti a komplexitást, és sűrűségfüggvények segítségével előre jelzi a környező járművek mozgását, biztosítva ezzel a biztonságos és kényelmes pályát.

A megerősítéses tanulás (RL) egy másik fejlett módszertan. A folyamatos megerősítéses tanulás módszert fejlesztették ki a pálya meghatározására a kettős sávváltási manőver során (Fehér és társai, 2020). A valós idejű megoldást összevetették

az emberi járművezetők teljesítményével. (Lelekó és Németh 2024) tanulmányukban egy olyan szabályozási keretrendszert mutatnak be, amely a robusztus H_∞ szabályozót és egy megerősítéses tanulási (RL) ágenszt kombinál az autonóm járművek biztonságos mozgásának biztosítása érdekében.

A modell predictive szabályozást (MPC) széles körben alkalmazták az autonóm járművek előzési manővereihez. A (Li és társai, 2023) és a (Batkovic és társai, 2022) által végzett tanulmányok bemutatják az MPC valós idejű pályaoptimalizálását a dinamikus útviszonyok figyelembevételével. Ezen túlmenően, (Dixit és társai, 2020) integrált potenciálmezőket és elérhetőségi halmazokat az MPC-vel a nagy sebességű autópályás előzésekhez.

1.2 A tanulmány kontribúciója

Ez a tanulmány egy olyan módszert javasol, amely lehetővé teszi egy optimális lokális trajektória megtervezését a sávtartáshoz és előzési manőverekhez közúti környezetben. Minden egyes tervezési lépésnél a tervező több alternatív pályát generál a megvalósítható tartományban, és mindegyikhez költséget rendel. Az optimalizálási cél többféle is lehet, és a költségfüggvények súlyozásával érhető el. A módszert úgy tervezték, hogy könnyedén integrálható legyen a járművek döntéshozatali és hierarchikus irányítási struktúrájába. A módszer demonstrálása és tesztelése céljából egy lokális tervező megoldást integráltak egy saját fejlesztésű szimulációs környezetbe.

A 2. szekció részletesen ismerteti a problémát és az alapvető topológiai információkat, amelyek szükségesek a feladat megoldásához. A 3. szekció bemutatja a Hierarchikus Irányítási Struktúrát, amelyet a rendszerünkben alkalmazunk. Ezt követően a 4. szekció részletezi a Frenet koordinátarendszerben végzett lokális trajektória generálási folyamatot, amelyet a szimulációs környezetben teszteltünk. Végül, a 6. szekció tárgyalja a sikeres manőver eredményeit, kiemelve a költségfüggvény-alapú vezetési stíluskezelést, valamint a döntéshozatali és irányítási stratégiákat, amelyek a manőverek kezelését szolgálják.

2. LOKÁLIS MOZGÁSTERVEZÉS ÉS A FRENET KOORDINÁTARENDSZER

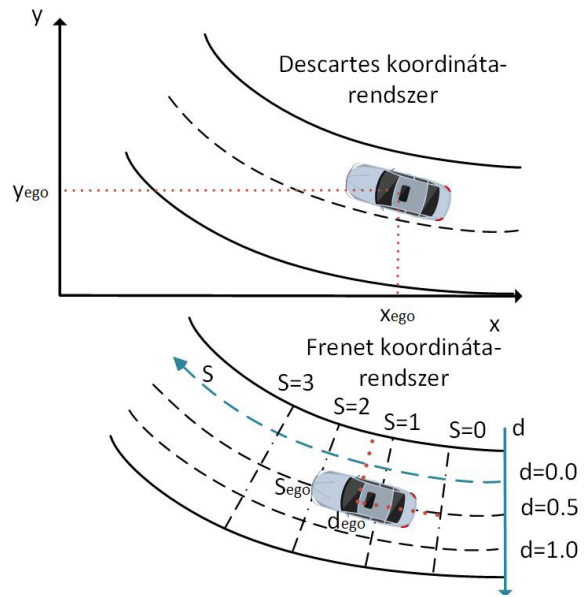
A lokális (trajektória) mozgástervezés célja egy megvalósítható és biztonságos trajektória generálása egy jármű számára rövid idő alatt, tipikusan a jármű dinamikusan változó környezetére adott válaszként. Ez magában foglalja a tervezett trajektória folyamatos frissítését az új szenoradatok és a jármű aktuális állapota alapján. Az útvonaltervezéstől eltérően, amely pontok statikus sorozatát adja meg, a trajektóriatervezés sebességprofilokat is tartalmaz.

Ezen tervezés dinamikus környezetben eredendően összetett feladat, és PSPACE-nehéznek tekinthető (Paden és társai, 2016). Ez a komplexitás különösen nyilvánvaló dinamikus környezetekben, ahol a korábban kezelhető problémák megoldhatatlanná válhatnak. Mivel a pontos algoritmusok az autonóm vezetéshez szükséges

trajektóriatervezéshez nem triviálisak, gyakran numerikus módszereket alkalmaznak. Ezek a módszerek a tervezést variációs módszerek alkalmazásával oldják meg az időtartományban, vagy a problémát átalakítják egy útvonaltervezési feladattá a konfigurációs térben, amely magában foglalja az idődimenziót is. A pályatervezési megoldás figyelembe veszi a differenciális korlátokat, majd visszaalakítja azt egy trajektóriává.

A Frenet-Serret (FS) koordinátarendszer (Werling és társai, 2010) egy hatékony matematikai eszköz, amelyet a járműdinamikában és pályatervezésben is használnak, hogy a jármű mozgását a tervezett pálya mentén kövessék. Ez a koordinátarendszer egy mozgó vonatkoztatási rendszert határoz meg, amely érintőleges és normál vektorokat alkalmaz egy görbe egy bizonyos pontján, amit középvonalnak nevezünk. Ez a középvonal lehet egy ideális pálya egy szabad úton, az út középpontja, vagy egy algoritmus által generált útvonal. Ebben a tanulmányban a referenciavonal a jobb oldali sáv közepe lesz. Az 1. ábrán látható, hogy az s -tengely a sáv vonalával párhuzamosan fut, míg a d -tengely merőleges a referenciavonalra. Ez az egyszerűsítés megkönnyíti a tervezést a javasolt koordinátarendszerben, mivel a helyi koordinátarendszer a járművel együtt mozog, és az olyan korlátok, mint a sávhatárok és az akadályok, könnyebben kezelhetők.

A jármű adott kezdeti és végső állapota mentén



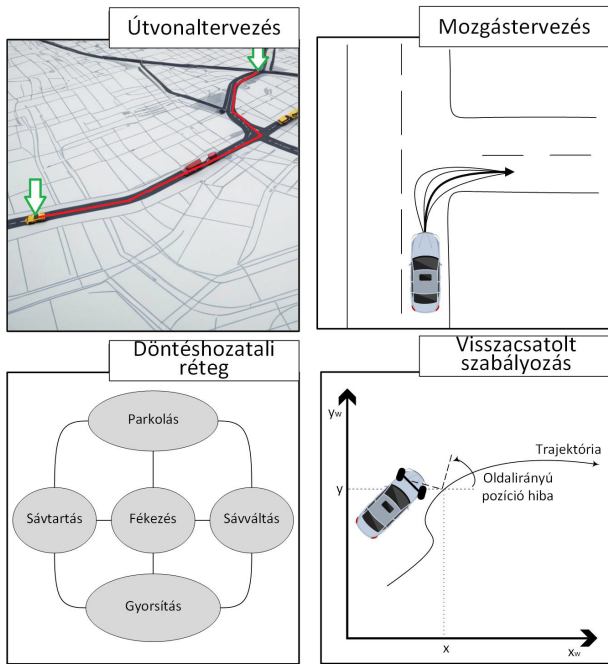
1. Ábra: Frenet koordinátarendszer

$(d_s, \dot{d}_s, \ddot{d}_s, d_i, \dot{d}_i, \ddot{d}_i)$ hat egyenlet állítható fel a polinom együtthatóinak meghatározására, hogy a d -tengelyes pályát kvintikus polinommal ábrázoljuk. Az s -tengely esetében a kezdő- és végállapotok felhasználásával $(s_s, \dot{s}_s, \ddot{s}_s, \dot{s}_i, \ddot{s}_i)$ egy kvartikus polinom reprezentálja a pályát. A tervezési időszak $t = 0$ és T között van, ami egy $[0, \Delta t, \dots, T]$ idősorozatot eredményez, amelyet mindkét tengely pályaequációjára alkalmazva kiszámíthatjuk az egyes útvonalpontok

koordinátáit. Ez a folyamat a 4. szekcióban van tárgyalva bővebben.

3. HIERARCHIKUS IRÁNYÍTÁS MEGKÖZELÍTÉS

A közelmúltban számos fejlett módszert dolgoztak ki a nagymértékben automatizált járművek vezérlésére, amelyek közül az egyik legelterjedtebb a hierarchikus struktúra (Paden és társai, 2016). Ez a megközelítés négy szintből áll, ahogy a 2. ábrán is látszik, amelyek mindegyike meghatározott szerepet tölt be a jármű működésében.



2. Ábra: Hierarchikus irányítás struktúra

Az első szinten az autonóm járművek megtervezik a globális útvonalat egy adott úthálózatban, hogy elérjék a célállomásukat az aktuális pozícióból. Az úthálózatot irányított gráfként ábrázolják, ahol a súlyozott élek meghatározzák az útvonalon való áthaladás költségét. Ezek a súlyok különböző tényezőket képviselhetnek, mint például a távolság, az utazási idő, a forgalmi sűrűség és az útviszonyok. A globális útvonaltervezéshez általában a Dijkstra algoritmust vagy az A* keresési algoritmust alkalmazzák.

Miután kiválasztásra került a globális útvonal, a járműnek ezen kell navigálnia, és kölcsönhatásba kell lépnie a többi úthasználóval, figyelembe véve a közlekedési feltételeket és szabályokat. A viselkedési réteg felelős a megfelelő vezetési viselkedés kiválasztásáért, figyelembe véve a többi úthasználó cselekedeteit, az útviszonyokat és az infrastruktúra jelzéseit. Ez a döntéshozatali folyamat automatizálható véges állapotú gépek és valószínűségi tervezési formalizmusok, például a Markov-féle döntési folyamatok (MDP-k) és azok általánosításai segítségével.

Miután a viselkedési réteg eldöntötte a viselkedést, a lokális

mozgástervező réteg határozza meg a jármű pályáját. Ennek a pályának dinamikusan megvalósíthatónak kell lennie, biztosítva az utasok kényelmét és elkerülve a fedélzeti érzékelők által észlelt akadályokat. Numerikus közelítő módszereket alkalmaznak a mozgástervezési probléma megoldására. A jelen cikkben tárgyalta megoldás erre a rétegre összpontosít.

Végül, a negyedik szinten a tervezett pálya és a trajektória végrehajtásra kerül. A visszacsatoló szabályozó kiszámítja a megfelelő aktuátor bemeneteket a vezetéshez, kormányzáshoz és fékezéshez, hogy végrehajtsa a tervezett mozgást, és csökkentse a követési hibákat. Ez a réteg jól bevált algoritmusokra épít, amelyek biztosítják a robusztusságot és a stabilitást.

4. LOKÁLIS MOZGÁSTERVEZÉS FRETET KOORDINÁTARENDSZERBEN

A lokális mozgástervezés és trajektóriakövetés folyamata egy szimulációs környezetben zajlik, amely követi a valós világ forgalmi korlátozásait. A globális útvonal meghatározása az út jobb oldali sávjának középvonalán történik, amely a Fretet koordinátarendszeren belüli referenciaútvonalunkként szolgál, ahogyan azt korábban tárgyaltuk. A Fretet koordinátarendszerében az oldalirányú elmozdulás akkor nulla, amikor a jármű a referenciaútvonalon halad. A d értéke nő, ahogy a jármű az út bal oldala felé halad, és csökken (negatívvá válik), ahogy közeledik a jobb széléhez. Az s hosszirányú pozíció a jármű helyzetét jelzi a lokális útvonal mentén, és nullázódik minden tervezési intervallumban. A járművet ezen a globális pályán inicializálják induláskor, és a tervezési intervallum $T = 3$ másodperc, amely lehetővé teszi a jármű számára, hogy 41,6 métert tervezzen előre 50/3.6 m/s célsebesség mellett. Ez a sebesség biztonságosnak tekinthető a dinamikus akadályérzékeléshez és az elkerüléshez.

4.1 A tervezési folyamat

A lokális mozgástervezési folyamata során, amint azt a 4a. ábra mutatja, több lehetséges útvonal-alternatívát kell megvizsgálni és tervezni. A pályákat különböző polinomokkal lehet leírni az oldalirányú és hosszirányú irányban, amelyek a globális pályától való eltérést mutatják. Először az oldalirányú jellemzők ötöd fokú polinomillesztéssel kerültek meghatározásra, ahol az 1., 2., 3. és 4. deriváltak határozzák meg az oldalirányú pálya jellemzőit minden egyes időlépésnél. A polinom a következőképpen fejezhető ki:

$$d(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (1)$$

ahol $d(t)$ az oldalirányú helyzetet jelenti az adott időpontban. Az a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 és a_5 együtthatókat a peremfeltételek határozzák meg, például a kezdeti és véghelyzet, sebességek és gyorsulások alapján. Az első derivált a változás mértékét jelenti az oldalirányú helyzet idő függvényében, jelezve, hogy a jármű milyen gyorsan mozog

oldalirányban egy adott pillanatban. A második derivált az oldalirányú sebesség változásának mértékét számítja ki, ami információt szolgáltat a járműre ható oldalirányú erőkről. A harmadik derivált az oldalirányú gyorsulás változásának mértéke, amely fontos a menetkomfort meghatározásához.

A hosszirányú jellemzők minden egyes időlépésnél negyedfokú polinom segítségével kerültek meghatározásra:

$$s(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 \quad (2)$$

ahol $s(t)$ a hosszirányú pozíciót jelenti az adott t időpontban. Az első derivált a hosszirányú helyzet időbeni változásának mértékét jelzi. A második derivált a hosszirányú sebesség változásának mértékét méri, míg a harmadik derivált a hosszirányú gyorsulás változásának mértékét mutatja.

4.2 Profilok és költségek kombinálása funkció

Miután a hossz- és oldalprofilok elkészültek, kombinálni kell őket. Egy költségfüggvény lett alkalmazva az adott célkitűzésnek megfelelő trajektória kiválasztásához. A függvény tartalmazza az oldalirányú gyorsulás derivált (jerk), a referenciapályától való eltérés, a sávváltás és a leggyorsabb útvonal és a legrövidebb útvonal súlyozásért felelős költségeket. E tényezők különböző súlyozásával különböző trajektóriák tervezése valósíthatók meg. Az eredmények a következő szekciókban kerülnek bemutatásra. Az egyes trajektóriát költségeit kombináljuk és normalizáljuk, és a legalacsonyabb összköltséggel rendelkező pálya kerül kiválasztásra. Az akadályfelismerés esetében a tényleges akadályba ütköző trajektóriák tilta vannak. ahelyett, hogy a költségek alapján büntetve lennének. A költségfüggvény elemei a következőképpen számíthatók:

$$J(t) = \sum_{t=0}^T (d'''(t))^2 \quad (3)$$

A jerk költség $J(t)$ fentiek szerint számítandó ki. Ez az oldalirányú helyzet harmadik deriváltjainak négyzeteinek összegzésével adódik idő függvényében, és a kumulatív oldalirányú gyorsulás változását jelenti a tervezési horizont alatt.

$$D_{\text{ref}} = \sum_{t=0}^T (d(t) - x_{\text{target}})^2 \quad (4)$$

A referenciától való eltérés D_{ref} az oldalirányú helyzet $d(t)$ és a célsáv középpontja x_{target} közötti négyzetes különbségek összegzésével adódik a tervezési horizonton.

$$\text{Dist} = \sqrt{(\text{GlobalRouteEnd}_{xy} - \text{TrajectoryEnd}_{xy})^2} \quad (5)$$

A távolság költsége Dist az euklideszi távolságként számítandó ki, ez a tervezett trajektória végpontja és a globális útvonal végpontja közötti távolság.

$$L_{\text{change}} = |d_i - x_{\text{target}}| \quad (6)$$

A sávváltási költség L_{change} , ez az abszolút értéke a di oldalirányú elmozdulás és a célsáv középpontja x_{target} közötti különbségnek.

Költségfüggvény paraméterei		
Költség súlyok	Komfort Stílus	Sport Stílus
Jerk	10.0	1.3
Gyorsaság	1.3	10.0
Ref. útv. eltérés	3.0	3.0
Távolság	0.01	0.01
Sávváltás	3.0	3.0

1. Táblázat: Költségfüggvény paraméterek

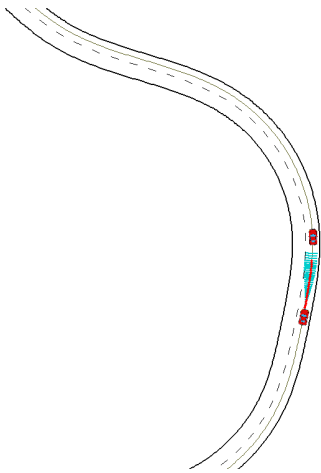
Végül az így kapott trajektóriákat átalakítjuk a Frenet-rendszerből a globális koordináta-rendszerbe a vizualizáció és a nyomon követés érdekében. Az átalakítás a Frenet-koordinátákból a globális koordinátákba a következőket foglalja magában: a helyi pozíció meghatározása a referencia útvonalon a hozzá tartozó globális pozíciók szerint, amelyet az adott görbe hossza és a laterális eltolások számításával, valamint az orientációból meghatározott görbület segítségével lehet elérni.

5. SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

A fejlesztéshez és teszteléshez egy egyedi szimulációs környezet került kifejlesztésre, amely a következő komponensekből áll:

- Egy útgenerátor, mely megfelel a szabványos úttervezési irányelveknek. Az útvonalat egyenesekből, kanyarokból és klotoid átmeneti ívekből építi fel. A közúti környezetet két sávval hoztuk létre. A globális útvonal a menetirány szerinti jobb oldali sáv középvonala.
- Nemlineáris síkbeli egysávos járműmodell: Ez egy dinamikus kerékmodellt tartalmaz (Hegedűs és társai, 2020) és EGO járműként alkalmazzuk, hogy pontos viselkedés-előrejelzést biztosítsunk.
- Oldalirányú MPC vezérlő: Ez a vezérlő egy lineáris dinamikus modellt használ. A modell szerint a követési hibákat a szabályozó minimalizálni kívánja. A görbületi sebesség profilja kényszerfeltételként van meghatározva.

- Hosszirányú PID szabályozó: A sebességreferenciát a sebességprofil határozza meg.
- Transzformációs megoldások: A tervezést megkönnyítendő, transzformációs megoldásokat alkalmazunk a Frenet koordinátarendszerben. Egyszerűsített forgalmi szimuláció is része a rendszernek.
- 2D grafikus felület: A szimuláció vizualizációjára szolgál: 3. ábra.



3. Ábra: Szimulációs környezet

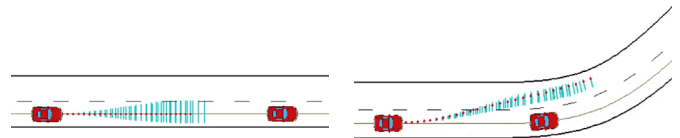
6. EREDMÉNYEK

E tanulmány eredményeképpen bemutatunk egy mozgástervezési módszert, amely közúti környezetben végzett előzési manőverekre összpontosít. Egy átfogó szoftverarchitektúrát használtunk a validáláshoz, amely tartalmazza a globális útvonaltervezést, a döntéshozatali réteget, a lokális mozgástervezést és a visszacsatolós vezérlést.

Amint azt a 4. szekcióban említettük, a globális útvonalat a referenciáútvonalhoz igazítottuk és illesztettük. A manőverezési forgatókönyvek tesztelésére szimulációs környezetben került sor. A döntéshozatali folyamatot egy véges állapotú gép irányította, amely a MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane changes) modell (Kesting és társai, 2007) egyszerűsített változatán alapul. Ez a modell a sávváltási algoritmusok egyik típusa, amely értékeli az előnyöket és a sávváltás következményeit az egó járműre és a környező járművekre nézve. A modell két kritériumot tartalmaz: egy ösztönző kritériumot, amely támogatja az autósok számára előnyös sávváltásokat, és egy biztonsági kritériumot, amely megakadályozza a sávváltások olyan kockázatát, amely veszélyeztetné a többi járművet.

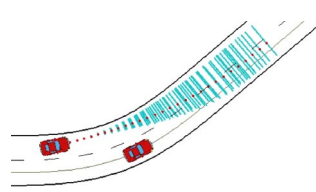
A MOBIL-modell három állapotot határoz meg, amelyek a következők:

- Szabadon vezető állapot: Az EGO jármű továbbra is ebben az állapotban marad, vagy visszatér ide, ha nincs előtte jármű. Az elsődleges feladatok közé tartozik a sebesség és a referenciáútvonal követése a meghatározott vezetési stílusnak megfelelően.
- Követési állapot: Ez az állapot akkor lép életbe, amikor egy másik jármű az egó jármű előtt halad, ami megakadályozza a biztonságos előzést. Ebben az állapotban az adaptív sebességtartó automatika (ACC) működik, amely lehetővé teszi az egó jármű számára, hogy alkalmazkodjon az előtte haladó jármű sebességéhez, és biztonságos távolságot tartson. Az intelligens vezető modell (IDM) (Kesting és társai, 2010) kerül felhasználásra a kívánt gyorsulás kiszámításához az aktuális sebesség, távolság és relatív sebesség alapján.
- Előzési állapot: Ez az állapot akkor aktiválódik, amikor a döntéshozatali folyamat az előzést megvalósíthatónak ítéli, és a járművezető jóváhagyja azt. Az érintett lépések a kitérés, az előzés és a visszatérés az eredeti sávba.

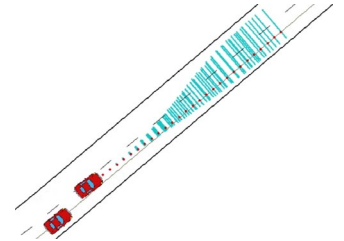


a, Szabadon vezetés/követés

b, Kitérés



c, Előzés



d, Visszatérés

4. Ábra: Lokális trajektóriák a manőverek során

6.1 Költségfüggvényen alapuló állapotmenedzsment

A tervezési folyamat során két különböző beállítást alkalmaztunk a döntés-alapú állapotok mellett: a jerk minimalizálását (komfort beállítás) és a leggyorsabb pálya végrehajtást (sport beállítás). A kényelmi beállításban a költségfüggvény nagymértékben súlyozza az oldalirányú gyorsulást, míg a sportos beállításban a végrehajtási idő kerül előtérbe, ahogy az 1. táblázat paraméterei is bemutatják. A különböző beállítások hatását az 5. ábrán látható költségfüggvény-diagramok szemléltetik.

A vezetési stílus testre szabható a költségparaméterek segítségével. Például alacsonyabb oldalirányú gyorsulással rendelkező pályák választhatók a simább vezetés érdekében, míg a sportosabb beállítás gyorsabb végrehajtást eredményez, amely nagyobb jerk-kel járhat, ami kevésbé komfortos az utasok számára. Ez a testreszabás tükröződik a döntéshozatali rétegben is, ahol a sportosabb beállítás kockázatosabb döntésekhez vezethet a rövidebb pálya végrehajtási ideje miatt. Ehhez részletes maximális oldalirányú csúszási értékek állnak rendelkezésre, amelyek különböző útagonosítókhoz és görbület-szintekhez kapcsolódnak, a komfortos és sportos vezetési stílusokra lebontva, amint azt a 2. táblázat mutatja.

6.2 Vezérlési Stratégiák

A tervezett pályák pontos és biztonságos oldalirányú követését egy MPC végzi, amely kezeli az oldalirányú szöghibát. A sebességet egy PID (arányos-integrális-derivált) szabályozó tartja fenn. A célsebességet a PID-szabályozó számára a mozgástervező határozza meg, és a döntéshozatali réteg maximalizálja. A sebességprofilok az optimális trajektória minden egyes időlépésénél hozzárendelésre kerülnek a vezérléshez, és a követés a trajektória 75%-áig tart, míg nem újabb tervezés következik be.

A jármű alapértelmezés szerint szabadon tervez és halad a pálya mentén az egyik kapcsolható vezetési stílusban (komfortos vagy sportos). Ha a jármű biztonságos féktávolságon belül észlel egy előtte haladó járművet, a viselkedés réteg átvált a követési állapotba, és a jármű adaptívan hozzáigazítja sebességét az előtte lévő járműhöz, miközben biztonságos távolságot tart az előzés előtt.

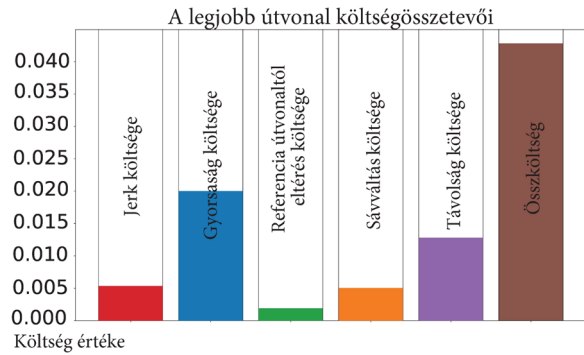
Aktiváláskor a jármű előzési állapotba lép, növeli a sebességét, és olyan trajektóriákat választ, amelyek lehetővé teszik a gyors és biztonságos előzést. A manőver befejezése után a jármű visszatér az előző állapotba, és folytatja a szabadon haladást a saját útvonalán.

Út ID	Komfort stílus	Sport stílus
1	0.00772	0.01056
2	0.00171	0.01195
3	0.00746	0.01466
4	0.00838	0.01706
5	0.00996	0.01192

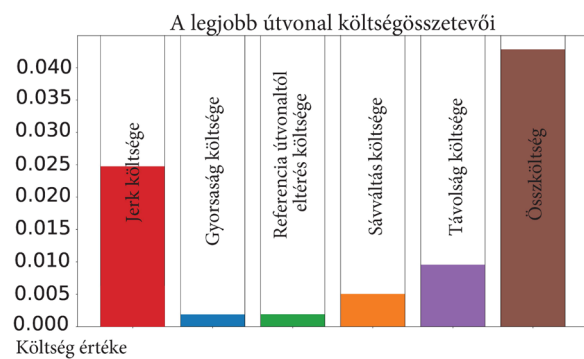
2. Táblázat: Maximális oldalirányú csúszási értékek a kényelmi és sportos stílusok esetén különböző nehézségű útszakaszokon

A vezetési stílus befolyásolja az oldalirányú és hosszirányú manőverek jellemzőit. Ezeket a pályákat a tervező választja ki a kapcsolódó költségfüggvények segítségével, biztosítva,

hogy a jármű viselkedése összhangban legyen a kívánt teljesítmény- és biztonsági kritériumokkal.



a, Költségfüggvény diagram a kényelmi beállítás esetén



b, Költségfüggvény diagram a sportos beállítás esetén

5. Ábra: Különböző vezetési stílusok azonos tervezési feltételek mellett

7. KONKLÚZIÓ

Ebben a tanulmányban egy átfogó megközelítést mutattunk be az autonóm járművek lokális mozgástervezésére, különös figyelmet fordítva az előzési manőverekre közúti környezetben. Módszerünk hatékonyságot, biztonságot és megbízhatóságot mutatott, valamint könnyen alkalmazható különböző vezetési stílusokhoz.

Jelenleg szimulációnk két járművet tartalmaz, és célunk a forgalmi forgatókönyvek bővítése, hogy lehetővé tegyük az előzéseket összetettebb környezetben is. Közvetlen célunk, hogy valós járműteszteket végezzünk egy ismert környezetben, hogy tovább validáljuk a megközelítésünket. Emellett célunk, hogy a polinomiális illesztéses tervezést klasszikus pályatervezési módszerrel váltsuk fel. Ez az átmenet lehetővé teszi a görbületi pontok és a pálya orientációjának pontos meghatározását, ami egyedi, parameterezhető pályák létrehozását teszi lehetővé.

Az ilyen előrelépések elősegítik az optimalizált pályák kialakítását, beleértve a görbék speciális csúcspontjait is, így növelve a sokoldalúságot és a teljesítményt az autonóm járművek mozgástervezésében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikációban szereplő kutatás az Európai Unió támogatásával valósult meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002)

HIVATKOZÁSOK

- Batkovic, I., Zanon, M., and Falcone, P. (2022). Model predictive control for safe autonomous driving applications. In *AI-enabled Technologies for Autonomous and Connected Vehicles*, pages 255–282. Springer.
- Bresson, G., Alsayed, Z., Yu, L., and Glaser, S. (2017). Simultaneous localization and mapping: A survey of current trends in autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2(3):194–220.
- Dixit, S., Montanaro, U., Dianati, M., Oxtoby, D., Mizutani, T., Mouzakitis, A., and Fallah, S. (2020). Trajectory planning for autonomous high-speed overtaking in structured environments using robust mpc. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21.
- Fehér, Á., Arádi, S., and Bécsi, T. (2020). Hierarchical evasive path planning using reinforcement learning and model predictive control. *IEEE Access*, 8:187470–187482.
- Hegedűs, T., Németh, B., and Gáspár, P. (2020). Design of a low-complexity graph-based motion-planning algorithm for autonomous vehicles. *Applied Sciences*, 10(21):7716.
- Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2007). General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record*, 1999:86–94.
- Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2010). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 368:4585–4605.
- Lelkó, A. and Németh, B. (2024). Optimal motion design for autonomous vehicles with learning aided robust control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Li, G., Zhang, X., Guo, H., Lenzo, B., and Guo, N. (2023). Real-time optimal trajectory planning for autonomous driving with collision avoidance using convex optimization. *Automotive Innovation*, 6(3):481–491.
- Paden, B., Čáp, M., Yong, S. Z., Yershov, D., and Frazzoli, E. (2016). A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1):33–55.
- Palatti, J., Aksjonov, A., Alcan, G., and Kyrki, V. (2021). Planning for safe abortable overtaking maneuvers in autonomous driving. In *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pages 508–514. IEEE.
- Schwartz, W., Alonso-Mora, J., and Rus, D. (2018). Planning and decision-making for autonomous vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1(1):187–210.
- Werling, M., Ziegler, J., Kammel, S., and Thrun, S. (2010). Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 987–993. IEEE.
- You, F., Zhang, R., Lie, G., Wang, H., Wen, H., and Xu, J. (2015). Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system. *Expert Systems with Applications*, 42(14):5932–5946.
- Zhang, Y., Sun, H., Zhou, J., Hu, J., and Miao, J. (2019). Optimal trajectory generation for autonomous vehicles under centripetal acceleration constraints for inlane driving scenarios. In *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*.