APPLICATION OF OPTIMIZATION-BASED CONTROL METHODS IN AUTONOMOUS CARS

OPTIMALIZÁLÁS-ALAPÚ IRÁNYÍTÁSI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA AUTONÓM AUTÓKBAN

Ph.D. Tézisfüzet

Kovács Adorján

Témavezető: Vajk István, D.Sc.

MŰEGYETEM 1782

BUDAPESTI MőSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
AUTOMATIZÁLÁSI ÉS ALKALMAZOTT INFORMATIKAI TANSZÉK

2023. január

Ph.D. Tézisfüzet

Kovács Adorján

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2.
e-mail: adorjan.kovacs@aut.bme.hu
tel: +36-1-463-2857

Témavezető: Vajk István, D.Sc.

1 Bevezetés

Az autonóm személygépjárművek fejlesztésének elsődleges célja a közlekedésbiztonság növelése. Az autonóm járművek körül számos megoldandó feladatot találhatunk, melyek önálló kutatási területekként értelmezhetők. A számítási kapacitások fejlődésének köszönhetően egyre több lehetőség nyílik ezen feladatok megoldására. Kutatási területem egy szűk szegmense az autonóm járművek világának, a szabályozástechnikai kérdéseket vizsgálja. Témám a járművek alacsonyszintű irányítására, elsődlegesen a pályakövetésre, a vezérlés több beavatkozószerv közötti szétosztásának problémájára, valamint a pályatervezésre koncentrál.

Munkám során a ThyssenKrupp Components Technology Hungary Kft tevékenységébe kapcsolódtam be. A cég budapesti fejlesztőközpontjának alaptevékenysége a kormányrendszerek fejlesztéséhez kapcsolódik [Bar+20]. Ugyanakkor négy éve elindult a VMC (Vehicle Motion Control - Járműirányítás) nevű projekt is, mely a kormányrendszert, mint beavatkozó szervet használja, kiegészítve a kerekek meghajtásával, illetve a fékekkel. A kutatásomat a VMC csapat munkájához lazán kapcsolódva végeztem, mely által lehetőségem nyílt a céges infrastruktúra használatára (szimulációs környezet, tesztautó és tesztsofőr támogatás). Célom volt a céges irányokat kiegészítve a diverzitást megvalósító irányokat felkutatni és alaposan feltérképezni, végig járni.

A kutatásom alapját a járműdinamikai vizsgálatok nyomán létrejött fizikai modellek képezik [Pac05], melyek a járművek működésének átfogó megértését teszik lehetővé, a szabályozási stratégia alapját képezik. A vizsgálatok és a modellek segítségével olyan rendszerek alakíthatók ki, melyek képesek leképezni és minden személyautóba eljuttatni azt a tudást, mellyel adott esetben egy autóversenyző rendelkezik. Ha el tudjuk érni azt, hogy minden jármű magasz szintű vezérléstechnikára legyen képes, azaz jól tudja kezelni a szélsőséges eseteket, határhelyzeteket, akkor sok baleset megelőzhető, elkerülhető.

2 Kutatási módszertan

A szabályozástechnika alapkérdése az, hogy milyen elvárásokat támasztunk egy rendszer felé és azon elvárásokat milyen formában kezeljük. Ha a beavatkozó jelre vagy jelekre, valamint a kimenetekre és a kimenetek referenciakövetési tulajdonságaira matematikailag, célfüggvények formájában meg tudjuk megfogalmazni az elvárásokat, egy optimalizációs feladatot tudunk felírni a szabályozástechnikai kérdés megoldására. Az olyan feladatokat, melyek több elvárással, célfüggvénnyel rendelkeznek, multiobjektív optimalizációs feladatoknak nevezzük. Egy ilyen optimalizációs feladat a következőképpen írható fel $\boldsymbol{x}$ vektorra:

$$\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X}}(f_1(\boldsymbol{x}), f_2(\boldsymbol{x}), ..., f_k(\boldsymbol{x})), \tag{1}$$

ahol f_i a célfüggvényeket, $k \geq 2$ a minimalizálandó célfüggvények számát jelöli és $\boldsymbol{X}$ a lehetséges megoldások halmazát adja meg.

Ez egy SISO (egy bemenettel és egy kimenettel rendelkező) rendszerben is legalább két célfüggvényt jelent, de a rendszer komplexitásának növelésével a be- és kimenetek száma, és így a célfüggvények száma is nő. A feladat igazi nehézségét az adja, hogy a célfüggvények tipikusan ellentétes irányba mutatnak, így nem egyértelmű, hogy a minimumot hogyan lehet értelmezni, hiszen a kis beavatkozás nagy hibát, míg a kis hiba nagy beavatkozást eredményez. Ezen feladatok megoldására számos megközelítés létezik, melyek apriori (skalárizációs megoldások), vagy aposteriori (matematikai programozási feladatok, evolúciós algoritmusok) eszközök segítségével határozzák meg a Pareto-optimumot [HM12].

A modell-prediktív kontrol (MPC) egy olyan egyre népszerűbb szabályozástechnikai megközelítés, mely egyfajta megoldást ad a multiobjektív feladatokra [RL18]. A módszer alapját egy, az irányítani kívánt rendszerről alkotott modell képezi. Számos, különböző bonyolultságú (két-/négykerék, lineáris/nemlineáris, kinematikus/dinamikus stb.) modell áll rendelkezésre a jármű viselkedésének leírásához [Raj12]. A modell segítségével képesek vagyunk a rendszer jövőbeli állapotait megbecsülni. Általában diszkrét időben N darab jövőbeli állapotot kezelünk. Ez a szám adja meg a predikciós és a szabályozási horizont hosszát, ami alapvetően befolyásolja az MPC futási idejét. Kulcsfontosságú kérdés, hogy milyen bonyolultságú modellt alkalmazunk az egyes (rész-)feladatok megoldásához, ugyanis a számítási kapacitások végesek a valós idejű környezetben. Célom volt tehát olyan megoldásokat választani, melyek lineáris egyenlőség-, illetve egyenlőtlenség-típusú korlátozást, valamint konvex célfüggvényt tartalmaznak, így ezek felhasználásával az MPC probléma felírható konvex optimalizálási feladatként, mely valós időben egyértelmű megoldást ad.

A kutatásom célja volt az MPC kontrollerek két, annak struktúrájából fakadó hátrányára megoldást találni. Az első annak a következménye, hogy az MPC-k lineáris skalárizációt alkalmaznak a multiobjektív feladat megoldására, mely során kvadratikus célfüggvényt hoznak létre az egyes célfüggvények-értékek súlyozott összegzésével. Általános formában az alábbi módon adható meg ez a megoldás:

$$\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X}} \sum_{i=1}^{k} \omega^i f_i(\boldsymbol{x}), \tag{2}$$

ahol ω^i jelöli az adott célfüggvényhez rendelt súlyozó paramétert, valamint f_i célfüggvény kvadratikus. Ez a megközelítés azt eredményezi, hogy a célfüggvény értéke fizikai jelentés-

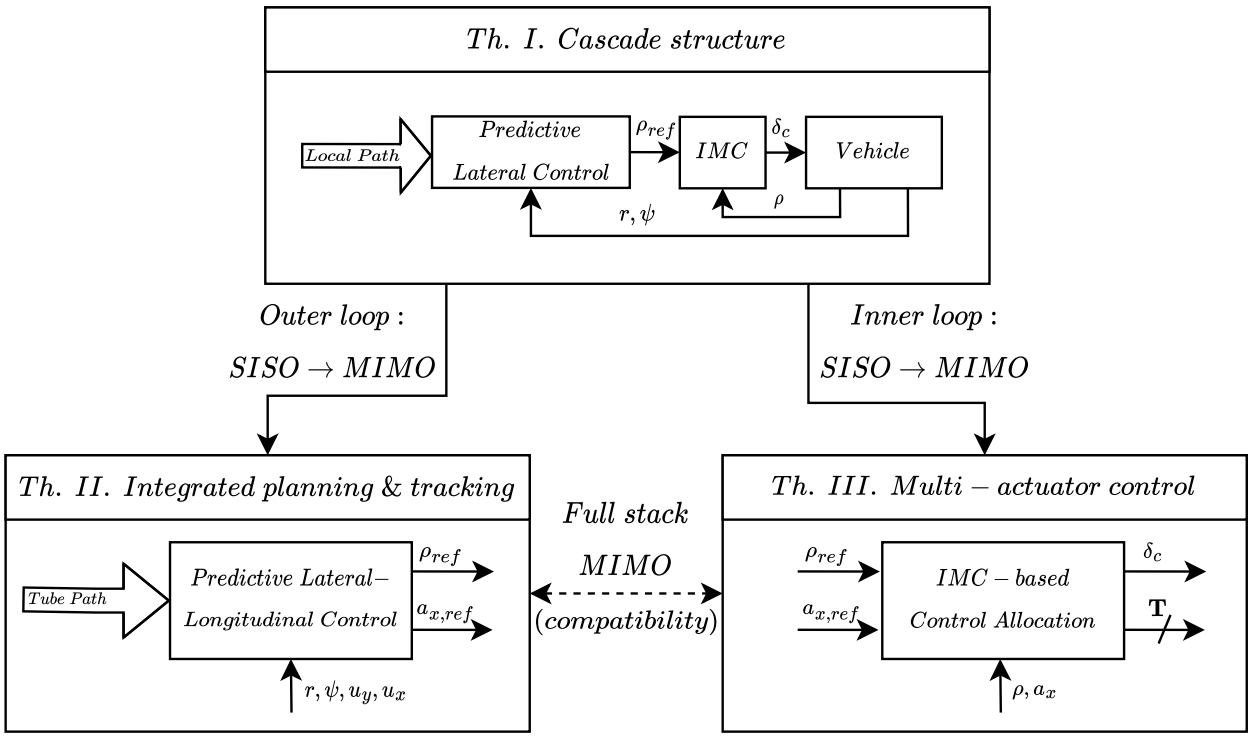
tartalommal nem bír és számos olyan paramétert alkalmaz, melyek behangolása intuíciót igényel. Célkitűzésem volt olyan megoldásokat alkotni, melyek különféle dinamikai megfontolások segítségével fizikai jelentéssel bíró célfüggvényt definiálnak, és nem tartalmaznak hangoló paramétereket.

A második fő hátrány oka az, hogy az MPC azzal az alapfeltételezéssel él, hogy az általa használt modell megfeleltethető a valóságnak. Ennek köszönhetően az alap MPC struktúra tulajdonképpen egy vezérlési algoritmust valósít meg. Erre a problémára számos megoldás létezik, melyek különféle állapotbecslők alkalmazásával oldják meg a modell illesztését, hangolását [Pup+20]. Ugyanakkor ezen megoldások további olyan hangolóparamétereket hoznak a rendszerbe, melyek meghatározását nem lehet egzakt módon elvégezni. A struktúrák, amelyeket létrehoztam az MPC-t belső modell alapú kontroller (Internal Model Control - IMC) kiegészítéssel alkalmazzák, mely megoldás egy kaszkád rendszerben valósítja meg a vezérlés és a szabályozás feladatait, intuitíven hangolandó paraméter nélkül.

Az értekezés első fejezete a téma bevezetésére szolgál. A második fejezetben a kutatás kiindulásául szolgáló irodalmak összefoglalója található, mely bemutatja a különböző MPC-, illetve IMC-alapú, valamint nemlineáris modell alapú megközelítéseket, vizsgálva a felhasznált célfüggvényeket. A harmadik fejezet bemutatja a felhasznált járműmodellezési, valamint analizálási módszereket, a szimulációs és a valós mérések tesztkörnyezetét, valamint a kiértékeléshez alkalmazott teszteseteket és módszereket. A negyedik fejezet bemutatja az új, MPC-IMC alapú kaszkád struktúrát, mely laterális szabályozást valósít meg. Ismertetésre kerül a paramétermentes optimalizálási feladat felírása, valamint a szabályozási hurkok részletes felépítése. A továbbiakban a fejezet kitér a struktúra dinamikai határhelyzetekre történő kiterjesztésére az új, envelope-alapú szabályozás bemutatásával. Az ötödik fejezetben a kaszkád struktúra külső köre kerül kiegészítésre, mely ezáltal laterális-longitudinális referenciát tud tervezni lokálisan a belső hurok számára. Az új, integrált tervező algoritmus a pályát nem középvonalként, hanem csőként kezeli, és a biztonságosságot helyezi a középpontba. A hatodik fejezet a belső kör módosításának leírása. A megvalósítás egy multiaktuátoros szabályozás segítségével történik, mely a jármű összes beavatkozó szervét egy rendszerben kezeli paramétermentes optimalizálás segítségével. A fejezetben olyan költségfüggvények kerülnek bemutatásra a kiterjesztett szabályozási struktúra mellett, melyek fizikai jelentéstartalommal bírnak. A hetedik fejezet összefoglalja a művet, meghatározza a továbbfejlesztési lehetőségeket, valamint itt kerülnek kimondásra az előző három fejezetben részletezett tézisek.

3 Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredményeket három fő tézisbe lehet sorolni, melyek egy logikus, egymásra épülő rendszert alkotnak. A tézisek rendszere az 1. ábrán tekinthető át. Az első tézis egy két hurkos kaszkád struktúrát mutat be MPC-IMC formátumban, mely a jármű laterális viselkedésének szabályozását valósítja meg. A második tézis kiterjeszti a struktúra külső körét a laterális-longitudinális viselkedésének, valamint a lokális referencia tervezési és követési feladatok integrált módon történő megoldásának érdekében. Így a külső kör egy több kimenetű, több bemenetű rendszerré válik (MIMO: multiple input, multiple output). A harmadik tézis a belső kört terjeszti ki a multiaktuátoros, alulhatározott rendszereket kezelő megoldással. Ez a kör integráltan valósítja meg a laterális-longitudinális szabályozást, így ez a hurok is MIMO-vá válik. Mindhárom tézis a multiobjektív problémakörrel foglalkozik, és a (2) összefüggés által bemutatott skalárizációs megoldást váltja ki olyan optimalizálási feladat megfogalmazással, mely nem tartalmaz intuitíven hangolandó paramétereket. A tézisek a következőkben ezen hármas csoportosítás szerint kerülnek kifejtésre.



1. ábra: A tézisek logikai rendszere

I. Tézis

Az első tézis egy szabályozási struktúrát ad meg. A struktúra magában foglal egy új, MPC-alapú optimalizálási feladatot, ötvözve azt az IMC struktúrával, ezáltal alkalmas a jármű laterális, pályakövető viselkedését szabályozni. Az első tézishez az alábbi publikációk tartoznak: [KV21d] [Kov19] [Kov20] [Kov22] [KV-a] [KV-b].

Létrehoztam egy kaszkád szabályozási struktúrát autonóm járművek laterális viselkedésének szabályozásához. A létrehozott struktúra optimalizálás- és predikció-alapú, paramétermentes megközelítést alkalmaz, mely fizikai jelentéstartalommal bíró költségfüggvényt alkalmaz, a beavatkozási energia minimalizálására. A struktúrában a hibakompenzációt dinamikus nemlineáris rendszermodell felhasználásával megvalósított visszacsatoló hurok végzi el. Jelen tézis három altézisből áll, melyek a paramétermentes optimalizálási algoritmust, a kaszkád struktúra felépítését, valamint a struktúra dinamikai határhelyzetek kezelésére kiegészített változatát mutatják be.

I.1 Altézis

Kidolgoztam egy algoritmust, mely segítségével a klasszikus modell prediktív kontroller (MPC) alapú járműirányítási feladat felírható úgy, hogy nem tartalmaz súlyozó paramétereket az optimalizálás célfüggvényében. Az algoritmus a pályakövetés feladatát korlátozásként kezeli, ezáltal egyedül a beavatkozásra szánt energia jelenik meg minimalizálandó mennyiségként, így a célfüggvény egy fizikai jelentéstartalommal bíró kifejezéssé válik. A feladat megoldhatóságát az biztosítja, hogy egy helyett három optimalizálási feladat új, hierarchikus formában történő végrehajtásával valósul meg az optimum meghatározása.

Ha van egy rendszer, amely egy adott modellel leírható, annak aktuális állapotváltozói, valamint a jövőbeli beavatkozójelek ismeretében meghatározhatók a rendszer jövőbeli állapotváltozói, illetve kimenetei. Amennyiben a modell, valamint a rendszer korlátozásai lineárisak és tetszőlegesen választunk egy konvex költségfüggvényt, az optimális jövőbeli jelsorozat meghatározható konvex optimalizálás segítségével. A járműirányításhoz alkalmazott MPC-k költségfüggvényei különböző súlyozó paraméterek segítségével vonnak össze több komponenst (laterális hiba, orientáció hiba, a beavatkozó jel energiája stb.). A súlyokat tartalmazó költségfüggvény legnagyobb hátránya az, hogy a paraméterek behangolására nem létezik egzakt megoldás. A létező intuitív hangolási módszerek használata esetén semmi sem garantálja azt, hogy egy adott szituációban behangolt paraméterekkel egy másik helyzetben is hasonló performanciát ér el a szabályzó.

A következőkben a hierarchikus, szekvenciális optimalizálási feladat lesz definiálva, mely

segítségével a laterális szabályozás esetében eliminálni lehet a hangolóparamétereket. A (2) egyenletben megadott megoldás így a következő formára alakítható át:

$$\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X}} f_1(\boldsymbol{x}) \;\rightarrow\; \min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X_1}} f_2(\boldsymbol{x}) \;\rightarrow\; \min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X_2}} f_3(\boldsymbol{x}), \tag{3}$$

ahol $\boldsymbol{X_1}, \boldsymbol{X_2}$ az egyes optimalizálási feladatok megoldásainak segítségével folyamatosan szűkített megoldhatósági tartományt jelentenek.

A fenti megoldási metódust a laterális szabályozásra a Frenet-koordinátarendszerben definiált egykerék-modellre vonatkozva lehet felírni, ahol a beavatkozó jel a jármű z tengely körüli szöggyorsulása ρ. A megközelítés lényege az, hogy fokozatosan, a hierarchia egyes szintjeit elérve vezeti be a pálya követésére vonatkozó korlátozásokat először minimalizálandó hibatagként, majd egyenlőségtípusú korlátozásként úgy, hogy a fizikai limitációk mindvégig betartásra kerülnek.

A feladat diszkrét időben a $\boldsymbol{\rho} = [\rho_1,\ \rho_2, \ldots, \rho_N]$ jelölésrendszer alkalmazásával (ahol N a horizont hosszát és az alsó index a mintavétel sorszámát jelöli), valamint az $\boldsymbol{x} = [r, d, \psi_p]^T$ állapotvektor segítségével (ahol r a jármű z tengely körüli szögsebessége, d a jármű tömegközéppontjának a pályától mért távolsága, ψ_p pedig a pályához viszonyított orientációhiba) írható fel. A hierarchikus megközelítésben az első optimalizálás az orientációhibát minimalizálja:

$$\begin{aligned} &\min_{\boldsymbol{\rho}} |\psi_{p_N}(\boldsymbol{\rho})| && \text{feltéve, hogy} \\ &|\rho_i| \leq \rho_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\ &|r_i(\boldsymbol{\rho})| \leq r_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N), \end{aligned} \tag{4}$$

ahol a jármű fizikai paraméterei által meghatározott szögsebesség és a szöggyorsulás limitációk jelentik a korlátozásokat. Amennyiben az orientációhiba nullává tehető, a pozícióhiba minimalizálása következik a zéró orientációhiba egyenlőség típusú korlátozásként történő bevezetésével:

$$\begin{aligned} &\min_{\boldsymbol{\rho}} |d_N(\boldsymbol{\rho})| && \text{feltéve, hogy} \\ &\psi_{p_N}(\boldsymbol{\rho}) = 0 && \\ &|\rho_i| \leq \rho_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\ &|r_i(\boldsymbol{\rho})| \leq r_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N). \end{aligned} \tag{5}$$

Végül a beavatkozási energia kerül minimalizálásra az előző két hibatag eliminálására

vonatkozó egyenlőség típusú korlátozások mellett:

$$
\begin{aligned}
&\min_{\boldsymbol{\rho}} \sum_{i=1}^{N} \rho_i^2, && \text{feltéve, hogy} \\
&\psi_{p_N}(\boldsymbol{\rho}) = 0 \\
&d_N(\boldsymbol{\rho}) = 0 \\
&|\rho_i| \leq \rho_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\
&|r_i(\boldsymbol{\rho})| \leq r_{max}, && (i = 1, 2, \ldots, N).
\end{aligned}
\tag{6}
$$

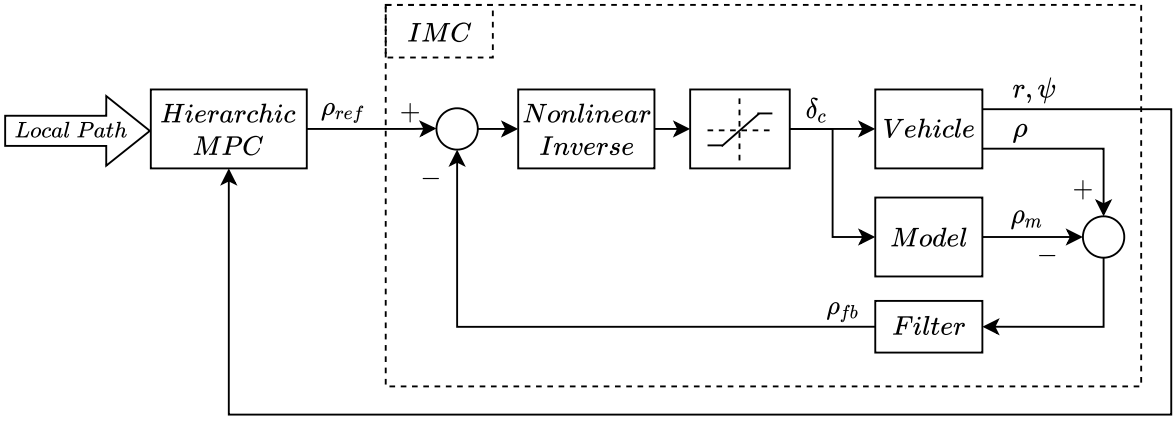
A hierarchikus megközelítésben a második, illetve a harmadik lépés akkor kerül végrehajtásra, ha az előző lépés célfüggvényének optimuma elérte a nullát, azaz a hibatagok eliminálásra kerültek. Amennyiben az algoritmus nem jut el a hierarchia tetejére, az aktuális szinten a minimális hibát elérő, a fizikai limitációknak eleget tevő megoldás lesz a kimenete.

I.2 Altézis

Létrehoztam egy új, kaszkád szabályozási struktúrát. A struktúra külső köre az előző altézisben bemutatott módszer segítségével konvex optimalizáláson alapuló modell prediktív vezérlést, míg a belső IMC alapú szabályozási kört valósít meg. A két komponens között a kapcsolatot a z tengely körüli szöggyorsulás teremti meg. A külső kör egy referenciát generál, melyet a belső kör szabályozója követ le. Az új, kaszkád MPC-IMC struktúra robusztus megoldást biztosít az additív és multiplikatív jellegű zajokkal szemben úgy, hogy képes kezelni a jármű fizikai korlátait is.

A létrehozott struktúra a 2. ábrán látható. Az előre vezető ágon a nemlineáris dinamikus bicikli modell statikus átvitelének inverze található, amely numerikus közelítés segítségével meghatározza a jármű elvárt kimenetéhez szükséges szabályzó jelet. Az inverz a modellel sorba kötve állandósult állapotban konstans egy átviteli függvényt realizál. Az inverzet követően jutnak érvényre a rendszerben levő nemlineáris limitek: a szaturáció, valamint a meredekség limit. A limitált jelet kapja meg bemenetként a szakasz, valamint az inverz számolására alkalmazott modell, amely párhuzamosan van kötve a szakasszal. A modell kimenetének, valamint a jármű mért állapotának különbsége visszacsatolásra kerül a kör elejére egy autoregresszív szűrőn keresztül.

A struktúra alkalmazásának köszönhetően az alapvetően vezérlés jellegű MPC szabályozássá alakul. A modell és a szakasz különbségének visszacsatolása kompenzálja a modellezési hibákat és a paraméterek pontatlanságát. A szűrő segítségével a valós környezetben fellépő zajos jelek hatását, külső zavarásokat lehet elnyomni.

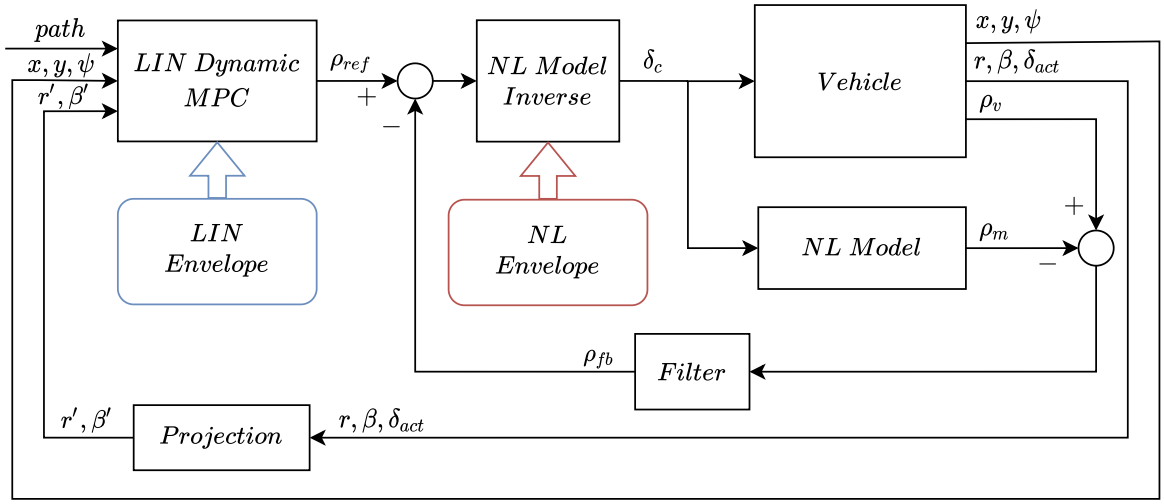


2. ábra: Az MPC-IMC struktúra

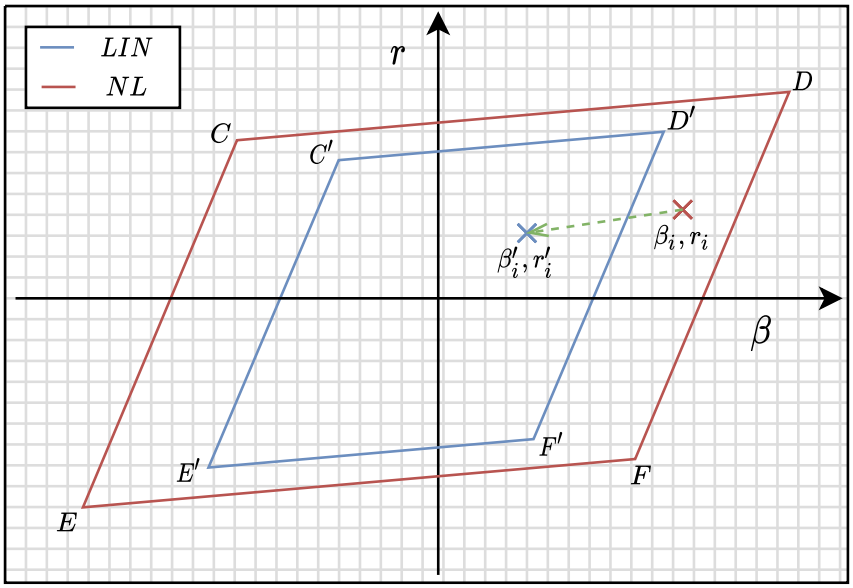
I.3 Altézis

A járműstabilitás garantálásának érdekében kiegészítettem az előző altézisben bemutatott kaszkád struktúra mindkét részét a envelope-alapú korlátozásokkal. Ezen korlátozások dinamikai megfontolások mentén biztosítják azt, hogy a jármű kerekei oldalirányban nem csúsznak ki. A továbbfejlesztett struktúra a külső körben lineáris modell alapú predikciót alkalmaz a hozzá tartozó envelope alkalmazásával, míg a belső körben nemlineáris modell alapján számol, a megfelelő envelope felhasználásával. A két komponens között a kapcsolatot egy nemlineáris-lineáris projekció hozza létre, mely garantálja az optimalizálási feladat megoldhatóságát.

Az envelope korlátozásokat az állandósult állapotot vizsgáló analízis segítségével lehet meghatározni két állapotváltozó, a β (jármű oldalcsúszási szög), valamint r (szögsebesség)



3. ábra: A kaszkád struktúra az envelope kiegészítéssel



4. ábra: A visszacsatolásban megvalósított nemlineáris-lineáris projekció

függvényében [BG13]. A stabilitási definíció a kerékmodell figyelembevételével került megfogalmazásra úgy, hogy az maximum akkora oldalcsúszás értéket vehet fel, amekkora a karakterisztika által megadott maximális laterális erőhöz tartozik.

A külső kör az MPC formulában a lineáris, dinamikus biciklimodellt használja a jármű leírására, így ott a lineáris, szaturációt tartalmazó kerékmodell segítségével lehet az envelope korlátokat érvényre juttatni a teljes predikciós horizonton. Ugyanakkor a belső kör a nemlineáris dinamikus biciklimodellt alkalmazza, így a nemlineáris kerékmodell alkalmazható a korlátok meghatározásához. Mivel a két kerékmodell nem ugyanott veszi fel a maximális értékét, a külső és a belső köröknek más-más envelope-ot kell használniuk, amint azt a 3. ábra is mutatja.

A struktúra állapotvisszacsatolást tartalmaz, mely az envelope-ok különbségéből fakadóan eleve nem megoldható kiindulási helyzetet hozhat létre a külső kör optimalizálásában. Ezen probléma áthidalására definiáltam egy nemlineáris-lineáris projekciót, mely a karakterisztikák monotonitásából fakadóan egyértelmű állapottranszformációt ír le. A 4. ábrán bemutatott megoldás segítségével az állapotvisszacsatolás konzisztens marad, a megoldhatóság biztosított.

Az envelope limitek határokat definiálnak a jármű számára az állapottérben. Ezek betartása megvalósítható a kaszkád MPC-IMC szabályzóban, egyenlőtlenségtípusú korlátozások bevezetésével. Az új szabályzóstruktúra kiegészítésre került tehát a limitációkkal, valamint a projekciós metódussal, melyek biztosítják a jármű laterális stabilitását a határhelyzetek

közelében.

Méréseket végeztem a javasolt kaszkád struktúra verifikálása céljából. Összehasonlítások segítségével bemutattam a paramétermentes optimalizációs algoritmus, valamint az IMC alapú visszacsatoló hurok előnyeit. Ezt követően egy, a MatLab által fejlesztett referencia szabályozóval hasonlítottam össze a megoldásomat, megerősítve a rész-összehasonlítások eredményeit. Végül a dinamikai határhelyzetek közelében végeztem méréseket a különböző limitációk összehasonlítása céljából. Ezzel támasztottam alá az általam javasolt megoldás előnyeit.

II. Tézis

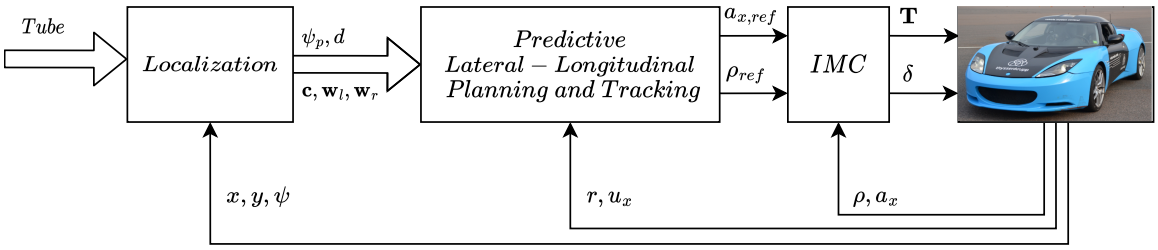
A második tézis a lokális pályatervezés és követés feladatának integrált módon történő megvalósítását mutatja be a jármű laterális, valamint longitudinális viselkedésének egyidejű figyelembevételével. Ez a megközelítés az első tézisben bemutatott struktúra külső körének kiterjesztése, amint az megfigyelhető az 5. ábrán. A feladat a Frenet-koordinátarendszerben [DOS98] megvalósított pályaleírást egészíti ki úgy, hogy a pálya cső formájában van definiálva egy folytonos görbületű középvonal, valamint jobb és bal pályahatárok segítségével. A feladat fő célkitűzése a minél nagyobb biztonság és stabilitás garantálása.

A jármű tömegközéppontjára felírható tapadási kör (friction circle) vizsgálatával lehet a jármű mindkét irányú dinamikájának működéséről információt szerezni. A laterális, valamint a longitudinális erők a jármű adottságaiból fakadó fizikai korlátok (maximálisan kikérhető motornyomaték, féknyomaték) érvényesítésével leegyszerűsíthetők úgy, hogy adott keretek között a két irány szeparálható dinamikai szempontból. Ezen dinamikai szétcsatolásnak köszönhetően egy szekvenciális algoritmus segítségével lehet megoldani az integrált laterális-longitudinális tervezést úgy, hogy a célfüggvényben mindvégig a beavatkozási teljesítmény jelenik meg.

A második tézis publikációi a következők: [Kov21] [KV21c] [KV22].

Létrehoztam egy szekvenciális algoritmust, mely a laterális-longitudinális lokális tervezési és irányítási feladatokat egymás után oldja meg. A longitudinális tervezési feladatot dinamikai megfontolások nyomán, a pálya görbületének ismeretében két, egymást követő optimalizáció segítségével valósítja meg. Ezen tervezés során a biztonságosság, mint elsődleges szempont lett figyelembe véve. A longitudinális viselkedés dinamikája bizonyos keretek között állítható a járműben utazók komfort- és teljesítményigényei szerint. A laterális problémát egyetlen optimalizáció oldja meg, felhasználva a longitudinális feladat megoldását.

A longitudinális szabályozás kettős célt szolgál, egyrészt a hatékonyságot, másrészt a



5. ábra: A kaszkád struktúra a laterális-longitudinális tervezésre létrehozott külső körrel

komfortot. Az idő szempontjából leghatékonyabb megoldás a járművet a limitjeire szabályozni (maximális gyorsulás és az elérhető legnagyobb sebesség). A sebesség felső korlátját három fő tényező befolyásolja: a görbület adta korlátozás (a kerekekben ébredő laterális erő limitált), a biztonságos megállás lehetőségének biztosítása által behozott korlátozás, valamint az érvényes sebességkorlátozás. A komfort érdekében ugyanakkor célszerű a manőverekbe fektetett energiát, azaz a gyorsulást minimalizálni. Az alapvető nehézség, hogy a két cél egymásnak ellentmond.

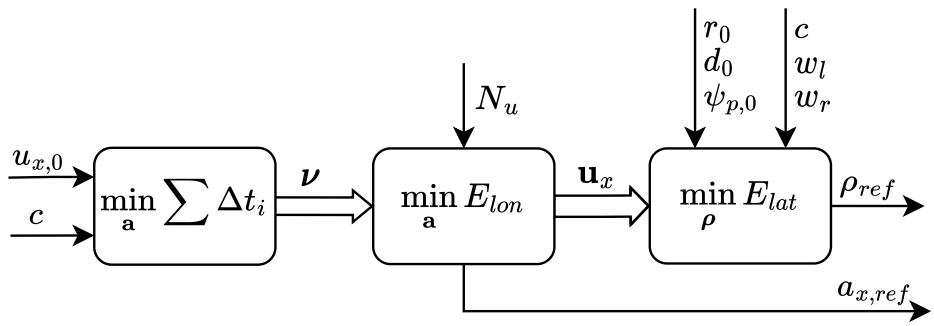
Paraméterként definiálható a beállási úthossz, melyet a rendszer tervezésekor kívülről kell megadni (pl.: az utasok igényei szerint), hogy feloldja az alap ellentmondást, definiálva azt, hogy melyik a fontosabb és mennyivel. Ez a paraméter a pálya alapú leírás számára ad egy megkötést, hogy milyen távolságon belül kell annak elérnie a korlátozások által definiált maximális sebességet. A beállási út minél rövidebb, annál dinamikusabb a jármű viselkedése, nő a hatékonyság. A beállási út növelésével az utasok komfortérzete nő a hatékonyság rovására. Fontos leszögezni, hogy a stabilitás és a biztonság a skála teljes tartományán biztosítva van az algoritmus által.

A szekvenciális algoritmus logikai felépítése a 6. ábrán látható. Ez a megközelítés a megadott multiobjektív optimalizálást először a longitudinális feladat két részben történő megoldásával végzi el, majd az eredmények felhasználásával a laterális feladatot oldja meg. A (2) egyenlet így a következő formára alakul át:

$$\min_{\boldsymbol{x_1} \in \boldsymbol{X_1}} f_{1,A}(\boldsymbol{x_1}) \;\rightarrow\; \min_{\boldsymbol{x_1} \in \bar{\boldsymbol{X}}_1} f_{1,B}(\boldsymbol{x_1}) \;\rightarrow\; \min_{\boldsymbol{x_2} \in \boldsymbol{X_2}} f_2(\boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_1^*}), \tag{7}$$

ahol $\boldsymbol{x_1}$ a longitudinális, $\boldsymbol{x_2}$ a laterális beavatkozás vektora, $\bar{\boldsymbol{X}}_1$ a sebességkorlátozásoknak eleget tevő megoldások halmaza és $\boldsymbol{x_1^*}$ az optimális longitudinális megoldás.

A longitudinális feladatrész felírásához a széles körben használt, pálya alapú paramete-



6. ábra: A szekvenciális laterális-longitudinális algoritmus logikai vázlata

rezést alkalmaztam, a tömegközéppontra vonatkoztatott állapotváltozókkal:

$$\begin{aligned} b_{x,i} &= u_{x,i}^2, \quad a_{x,i} = \dot{u}_{x,i}, \\ u_{x,i} &= \sqrt{u_{x,i-1}^2 + 2\Delta s a_{x,i}}, \\ \Delta t_i &= \frac{2\Delta s}{u_{x,i-1} + u_{x,i}}, \end{aligned} \tag{8}$$

ahol Δs az út szerinti paraméterezés ekvidisztáns mintavételi egysége és Δt az eltelt idő. A feladat megoldható lenne változó mintavételi hosszal is, ugyanakkor az ekvidisztáns felosztásnak köszönhetően a beállási úthossz helyett egy indexszám, N_u használható. Ez az index megmondja azt, hogy hányadik lépésben kell elérnie a megfelelő sebességet, így a feladat komplexitása jóval kisebb a folytonos felírásokhoz képest.

A longitudinális referencia előállítását így két, egymás után végrehajtott optimalizáció segítségével valósítottam meg. Elsőként egy minimális időre törekvő optimalizálás meghatározza a maximális elérhető sebességprofilt. Ezt követően egy második, minimális energiára törekvő meghatározza a tényleges elérni kívánt sebességprofilt a bevezetett paraméter segítségével.

A minimális időt elérő sebességprofilt meghatározó optimalizálási feladat megfogalmazása a következő:

$$\begin{aligned} &\max_{\boldsymbol{a_x}} \quad 2\sum_{i=1}^{N} b_{x,i} && \text{feltéve, hogy} \\ &b_{x,i+1} = b_{x,i} + 2a_{x,i}\Delta s, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\ &b_{x,i} \leq u_{y,max}^2, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\ &b_{x,i} \leq \frac{a_{y,max}}{c_i}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\ &b_{x,i} \leq 2s_w a_{x,max}, && (i = 1, 2, \ldots, N). \end{aligned} \tag{9}$$

Az első optimalizálás kimenetéből számolt sebességprofil ($\boldsymbol{\nu}$) bemenetként szolgál a második optimalizálás számára. A második minimalizálja a beavatkozási energiát és egyenlőség típusú korlátozásként veszi figyelembe a beállási úthossz indexéhez tartozó sebességértéket:

$$
\begin{aligned}
&\min_{\boldsymbol{a_x}} \sum_{i=1}^{N} a_{x,i}^2 && \text{feltéve, hogy} \\
&b_{x,i+1} = b_{x,i} + 2a_{x,i}\Delta s, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\
&b_{x,i} \leq u_{y,max}^2, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\
&b_{x,i} \leq \frac{u_{y,max}}{c_i}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\
&b_{x,i} \leq 2s_w a_{x,max}, && (i = 1, 2, \ldots, N) \\
&b_{x,N_u} = \boldsymbol{\nu}_{N_u}^2 \\
&b_{x,N} = \boldsymbol{\nu}_N^2.
\end{aligned}
\tag{10}
$$

A két optimalizálási feladat kimeneteként megkapható a gyorsulás referencia a belső kör számára, valamint a megtervezett sebességprofil a laterális rész számára. Ezt követően az előző tézisben megfogalmazott laterális feladat kerül megoldásra.

A bemutatott megoldást valós környezetben történt mérések formájában, tesztpályán teszteltem. A mérési eredmények alátámasztják az algoritmus hatékonyságát a kitűzött céloknak megfelelően.

III. Tézis

A harmadik tézis a járművek multiaktuátoros irányítását valósítja meg az első tézisben bemutatott struktúra belső hurkának a négykerekű járműmodellre történő kiterjesztése segítségével. Ezen modell a járműben rendelkezésre álló összes beavatkozó szervet (kormány, valamint függetlenül hajtott és fékezett kerekek) képes kezelni, így felhasználásával integrált laterális-longitudinális szabályozást lehet megvalósítani. Az így kapott MIMO rendszerben beavatkozó szervek száma nagyobb a referenciajelek számánál, tehát a feladat alulhatározott, így szükséges definiálni egy allokációs szabályt, mely segítségével meghatározható az egyes aktuátorokra jutó beavatkozó jel.

A tézishez tartozó publikációk: [KV21b],[KV21a].

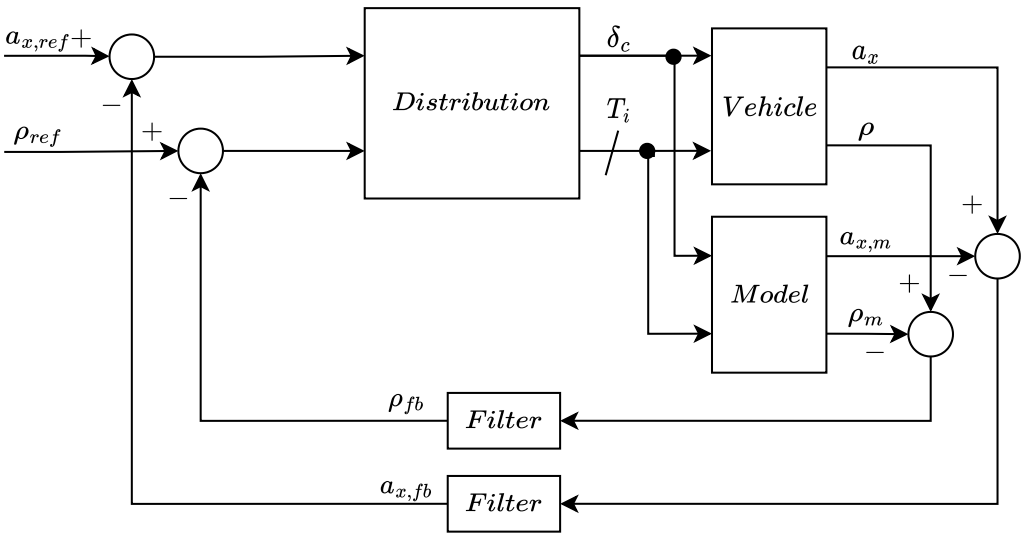
A kaszkád struktúra belső körét továbbfejlesztettem, mely így egyszerre kezeli a laterális és a longitudinális viselkedést. A kidolgozott optimalizálást alkalmazó allokációs algoritmus a járműmodell inverzét adja meg az IMC struktúrához. Ezen megközelítés fizikai jelenségre, a kerekekben ébredő erőre vagy a kerékben disszipált energia számítására alapozva

határozza meg a beavatkozójeleket. Az optimalizáláshoz új megközelítésű költségfüggvényeket definiáltam, melyek az általánosan elterjedt összegzéses megoldás helyett a maximum minimumának meghatározásával élnek. A négykerekű modellre bevezettem egy linearizálási metódust, mely segítségével a modell állapotváltozóira egyenlőség- és egyenlőtlenség-típusú korlátozásokat tudunk megadni. Így a beavatkozójel-allokálási probléma SOCP feladatként felírható, ami valós időben egyértelmű megoldást ad. A létrehozott optimalizálási feladatok a javasolt költségfüggvényekkel számos megközelítésben jobb teljesítményt nyújtanak az összegzés alapú megoldásoknál.

A továbbiakban definiáljuk az allokációs probléma célfüggvényeit. Az optimalizálás a négykerekű járműmodell alkalmazásával határozza meg az inverzet az I.2. altézisben bemutatott IMC struktúra kiterjesztett változatához, mely a 7. ábrán látható.

A beavatkozójelek megfelelő elosztásához létrehozott új célfüggvények közül a disszipáció alapú L1, míg az erő alapú L2 normán alapszik, követve az általuk meghatározott fizikai mennyiségek jellemzőit. A disszipáció az egyes elmozdulási irányok mentén számítandó az egyes kerekekre, míg az erő alapú a kerék erővektorának normalizált hosszával számol.

A (2) egyenlet jelen esetben a négy kerékben ébredő erő vagy a négy kerék disszipációja egyforma súlyokkal történő összegzésével ad megoldást a multiobjektív problémára. Ennek hátránya az, hogy nem garantálja a tényleges kiegyenlítettséget a kerekek között, így fizikailag torz kép alapján működik. A tézisben javasolt megközelítés a következő formára



7. ábra: IMC alapú belső kör az allokációs feladathoz

alakítja az optimalizálási feladatot:

$$\min_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{X}} \max(f_{fl}(\boldsymbol{x}), f_{fr}(\boldsymbol{x}), f_{rl}(\boldsymbol{x}), f_{rr}(\boldsymbol{x})), \tag{11}$$

ahol a négy kerékre külön-külön kiértékelt célfüggvényértékek kerülnek összehasonlításra. A disszipáció alapú célfüggvény a következő formátumban írható fel az egyes keréknyomatékokat és a kormányszöget tartalmazó bemeneti vektor szerint ($\mathbf{u} = [T_{fl}, T_{fr}, T_{rl}, T_{rr}, \delta]^T$, ahol az f az első, r a hátsó, valamint r a jobb, l a bal oldalon elhelyezkedő kereket jelenti):

$$g_{D,mm}(\mathbf{u}) = \max_i \left(|F_{x,i}(\boldsymbol{u})u_{x,s,i}| + |F_{y,i}(\boldsymbol{u})u_{y,i}|\right), \quad i \in \{fl, fr, rl, rr\}, \tag{12}$$

ahol $u_{x,s}$ a longitudinális szlip sebesség, u_y a laterális sebesség, F_x és F_y pedig egyes kerekekre ható laterális, valamint longitudinális erőket jelöli. Az erő alapú felírás az alábbi célfüggvényt alkalmazva számol:

$$g_{F,mm}(\boldsymbol{u}) = \max_i \sqrt{\frac{F_{x,i}^2(\boldsymbol{u}) + F_{y,i}^2(\boldsymbol{u})}{F_{z,i}^2}}, \quad i \in \{fl, fr, rl, rr\}, \tag{13}$$

ahol F_z a kerékre ható vertikális erő. A négykerekű járműmodell az aktuátorok limitációit figyelembe véve a jármű aktuális állapotvektora körül linearizálható.

Linearizálást követően a kikért erő (F_{x_r}) és a momentum (M_r) meghatározásra kerül a longitudinális- és a szöggyorsulás referenciákból ($a_{x,ref}$, ρ_{ref}), majd egyenlőség típusú korlátozásként, kényszerként kerül felírásra, így az optimalizálási feladat a következő:

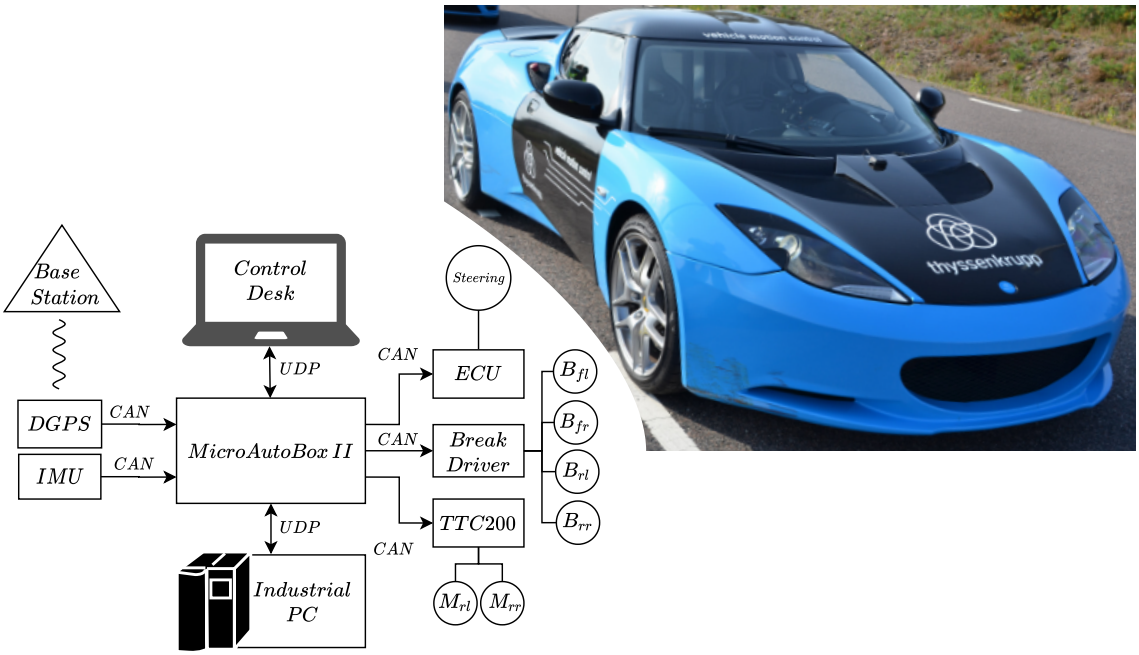
$$\begin{aligned}
\min_{\boldsymbol{u}} \quad & g(\boldsymbol{u}) && \text{feltéve, hogy} \\
F_x(\boldsymbol{u}) &= F_{x_r} \\
M(\boldsymbol{u}) &= M_r \\
|F_{y,i}(\boldsymbol{u})| &< F_{y,max}, && i \in \{fl, fr, rl, rr\} \\
F_{x,i}(\boldsymbol{u})^2 + F_{y,i}(\boldsymbol{u})^2 &< F_{z,i}^2, && i \in \{fl, fr, rl, rr\} \\
|\delta| &\leq \delta_{max} \\
|\Delta\delta| &\leq \Delta\delta_{max} \\
|T_i| &\leq T_{max}, && i \in \{fl, fr, rl, rr\} \\
|\Delta T_i| &\leq \Delta T_{max}, && i \in \{fl, fr, rl, rr\}.
\end{aligned} \tag{14}$$

Méréseket végeztem mind az erő-alapú, mind a disszipáció-alapú megközelítések esetén a min-max és az összegzés alapú megközelítések összehasonlítására. Összehasonlítottam továbbá az erő alapú és a disszipáció alapú megközelítéseket is, melynek eredménye alapján javaslatokat tettem mindkét megoldás valós szituációkban történő alkalmazására.

4 Alkalmazások

A bemutatott algoritmusokat a 8. ábrán látható, Lotus Evora elektromos tesztjármű platformra implementáltam. Mindegyik bemutatott megoldás a ThyssenKrupp által biztosított eszközökön valós időben történő futtatásra alkalmas. Teszteket hajtottam végre az egyes algoritmusok valós környezetben történő kipróbálására a tököli repülőtér tesztpályáján. A teszt eredményeket a ThyssenKrupp által fejlesztett Vehicle Test Framework szimulációs környezetben verifikáltam. A valós idejű mérések igazolják a konvex formára hozott megközelítések létjogosultságát, hiszen ott szigorú feltételeknek kell megfelelni a futási idő tekintetében. Egyúttal a rendszer zaj és hibatűrése is tesztelésre került. Mindezek alátámasztják, hogy robusztus működésű szabályozási struktúrát sikerült kialakítani.

A szimulációs környezetben a verifikáláson túl a valós időben nem végrehajtható méréseket és teszteket végeztem el. Egyes algoritmusokat teszteltem a külső (pl.: súrlódási együttható a jármű és az úttest között), illetve belső (pl.: jármű tömege, inerciája) paraméterek változásának hatására is. Emellett szimulációban a külső zavarások elhárításának képességét (rántópad-teszt) is teszteltem az algoritmuson.



8. ábra: Az elektromos tesztjármű a mérési konfiguráció blokkvázlatával

Az elkészített megoldások nagy előnye az, hogy nem tartalmaznak intuitíven hangolt paramétereket, így könnyen beüzemelhetők, és robusztus működést nyújtanak. Az algoritmusok, amelyeket implementáltam alternatív megoldásokat jelentenek a cég által fejlesztett algoritmusok mellett, mely adott esetben lehetőséget biztosít a szoftveres, illetve strukturális redundancia, valamint diverzitás megvalósítására, ami nagy fegyvertény az autóiparban.

Irodalomjegyzék

[BG13] Carrie G. Bobier and J. Christian Gerdes. "Staying within the nullcline boundary for vehicle envelope control using a sliding surface". In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 51.2 (2013), pp. 199–217.

[DOS98] A. De Luca, G. Oriolo, and C. Samson. "Feedback control of a nonholonomic car-like robot". In: *Robot Motion Planning and Control.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. Chap. 4, pp. 171–253. ISBN: 978-3-540-40917-5. DOI: 10.1007/BFb0036073.

[HM12] C-L Hwang and Abu Syed Md Masud. *Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey.* Vol. 164. Springer Science & Business Media, 2012.

[Pac05] Hans Pacejka. *Tire and Vehicle Dynamics.* Elsevier, 2005. ISBN: 980-0-750-66918-4.

[Pup+20] Dániel Pup, Ádám Kisari, Zsombor Vígh, Gábor Rödönyi, Alexandros Soumelidis, and József Bokor. "Characterization of Model Uncertainty Features Relevant to Model Predictive Control of Lateral Vehicle Dynamics". In: *2020 23rd International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR).* 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISMCR51255.2020.9263745.

[Raj12] Rajesh Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control.* Mechanical Engineering Series. Springer US, 2012. ISBN: 978-1-4614-1432-2.

[RL18] Saša V. Raković and William Levine. *Handbook of Model Predictive Control.* Springer, Sept. 2018. ISBN: 978-3-319-77488-6.

Tudományos publikációk

Folyóiratok

[KV-a] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "ACCEPTED PAPER: Internal Model-Based Robust Path-Following Control for Autonomous Vehicles". In: *International Journal of Automotive Technology* (-).

[KV-b] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "ACCEPTED PAPER: Tuning Parameter-free Model Predictive Control with Nonlinear Internal Model Control Structure for Vehicle Lateral Control". In: *Acta Politechnica Hungarica* (-).

[KV21b] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "Integrated Lateral and Longitudinal Control with Optimization-Based Allocation Strategy for Autonomous Electric Vehicles". In: *Journal of Advanced Transportation* 2021 (Nov. 2021), pp. 1–18. DOI: 10.1155/2021/1444396.

[KV22] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "Optimization-based Model Predictive Tube Control for Autonomous Ground Vehicles with Minimal Tuning Parameters". In: *Unmanned Systems* (Apr. 2022). DOI: 10.1142/s230138502350005x.

Konferenciák

[Kov19] Adorjan Kovacs. "Analysis of Vehicle Dynamics Using the Phase Plane Method". In: *Proceedings of the Automation and Applied Computer Science Workshop 2019: AACS'19*. 2019, pp. 16–27. ISBN: 978-963-313-336-1.

[Kov20] Adorjan Kovacs. "IMC-Based Robust Lateral Control". In: *Proceedings of the Automation and Applied Computer Science Workshop 2020: AACS'20*. 2020, pp. 33–44. ISBN: 978-963-421-816-6.

[Kov21] Adorjan Kovacs. "Integrated Path Planning and Tracking Algorithm for Autonomous Vehicles". In: *Proceedings of the Automation and Applied Computer Science Workshop 2021: AACS'21*. 2021, pp. 48–59. ISBN: 978-963-421-852-4.

[Kov22] Adorjan Kovacs. "Model Predictive Lateral Stability Envelope Control for Unmanned Vehicles Using Minimal Tuning Parameters". In: *Proceedings of the Automation and Applied Computer Science Workshop 2022: AACS'22*. 2022, pp. 169–180. ISBN: 978-963-421-875-3.

[KV21a] Adorjan Kovacs and István Vajk. "Optimization-based Multi-actuator Control for Autonomous Vehicles". In: *2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. 2021, pp. 49–54. DOI: 10.1109/INES52918.2021.9512906.

[KV21c] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "Integrated Path Planning and Lateral-Longitudinal Control for Autonomous Electric Vehicles". In: *2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*. 2021, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEITAUTOMOTIVE52815.2021.9662798.

[KV21d] Adorjan Kovacs and Istvan Vajk. "Internal Model-Based Lateral and Longitudinal Control for Autonomous Electric Vehicles". In: *2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. 2021, pp. 360–365. DOI: 10.1109/MMAR49549.2021.9528430.

Szabadalmak

[Bar+20] Zoltan Baranyai, Gergely Daloki, Laszlo Fekete, Gergely Racz, and Adorjan Kovacs. *Torque Sensor Having Inductively Coupled, Intermeshing Components*. Oct. 2020.