

# **Járműorientált irányításelméleti kutatások**

(2016. október 18-án elhangzott akadémiai  
székfoglaló előadás)

**Dr. Gáspár Péter**  
Az MTA levelező tagja

## **Tartalomjegyzék**

<b>1</b>	<b>Bevezetés</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Járműfunkciók modell alapú irányítástervezése</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modell alapú robusztus irányítástervezés elméleti háttere</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Integrált járműirányítás tervezése</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Az autonóm járműirányítás tervezése: kitekintés</b>	<b>32</b>
	<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>40</b>

# 1 Bevezetés

A járművekkel szemben megfogalmazott egyéni és társadalmi elvárások állandóan növekednek. A feladatok sokrétűek: a menetstabilitás, kényelem, megbízhatóság, biztonság, hatékonyság, környezetkímélés, gazdaságosság javítása. A megoldások szintjén ezek gyakran kölcsönhatásban vannak egymással. Az igények prioritása jelentősen eltérhet attól függően, hogy magántulajdonban lévő személygépkocsiról, vagy egy flottatulajdonos haszongépjárművéről van szó. A fenti elvárások teljesítése hagyományosan a jármű valamely komponensének, illetve funkciójának korszerűsítésével történik.

A járműirányítás nagy vonalakban magában foglalja az érzékelők kiválasztását, az irányítási módszer és algoritmus kidolgozását, valamint a beavatkozás megvalósítását. A felsorolt elemek mindegyike összetett feladatokra vezet. Az érzékeléshez többféle szenzort tudunk alkalmazni, melyek információt szolgáltatnak a járműdinamikai jellemzőkről. Amennyiben mód van különféle érzékelt jelek együttes felhasználására, akkor az irányításhoz használt jel megbízhatósága jelentősen növekszik. A beavatkozáshoz különböző aktuátorok állnak rendelkezésre, amelyek különféle hatást érnek el a járműdinamikai jellemzőkre nézve. Ugyanakkor a beavatkozók működését korlátozzák a fizikai határok és a működés közben óhatatlanul fellépő hatékonyság vesztesékek. Egy korszerű irányítástervezési megoldásban ezért több beavatkozó együttes hatására építenek, ami a beavatkozás hatékonyságát növeli, s így módon a körülményekhez jobban alkalmazkodó megoldást biztosít.

Az irányítástervezés feladata a specifikált minőségi követelmények teljesítése, az érzékelők és beavatkozók egymáshoz és a célokhoz való hangolása. Az irányítástervezés során figyelembe kell venni az aktuátorok elsődleges feladatait, azaz a beavatkozók között prioritást kell biztosítani, továbbá tekintetbe kell venni a különféle korlátozásokat és működés közbeni hatékonyság veszteségeket. Az erőforrások felhasználásának összehangolása és így kihasználásuk növelése, a prioritások kezelése, a rekonfigurációs képesség kihasználása alapvető jelentőségű. Az integrált irányítástervezés során nagy jelentőséggel bír az egyes komponensek közötti kommunikáció, ami a tervezés szempontjából további dinamikai hatást jelent.

A járművekkel szemben megfogalmazott összetett irányítási feladatok megoldása három pilléren alapszik. Egyrészt az elektronikai és automatizálási hardver elemek alkalmazhatósága jelentősen megnövekedett, másrészt az információs és kommunikációs technológiák látványos fejlődésen mentek keresztül, harmadrészt a rendszer és irányítástechnika tudomány eredményeinek alkalmazása alapvető jelentőségűvé vált.



A székfoglaló felépítése a következő. A második fejezet járműfunkciók modell alapú irányítástervezését mutatja be néhány illusztráción keresztül. A harmadik fejezet az LPV alapú irányítástervezés módszereinek elveit foglalja össze. A negyedik fejezet a korszerű integrált járműirányítás tervezésére kidolgozott módszereket mutatja be. Végül az ötödik fejezet az autonóm járművekkel kapcsolatos kutatási és alkalmazási trendeket foglalja össze.

## 2 Járműfunkciók modell alapú irányítástervezése

A fejezet járműkomponensek és funkciók tervezési esetein keresztül áttekintést nyújt a modell alapú robusztus irányításelmélet elveiről és módszereiről.

A járművek dinamikai modelljeinek felírásakor a gyakorlatban az általánosított elmozdulás ( $q$ ) és sebesség ( $\dot{q}$ ) alkalmazásával a Newton, Lagrange, Hamilton modellezési formalizmust alkalmazzuk, aminek eredményei az

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial D(\dot{q})}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial U(q)}{\partial q} = f, \quad (1)$$

alakú egyenletek, ahol  $T(q, \dot{q})$  a kinetikai (mozgási) energia,  $U(q)$  a potenciális (helyzeti) energia,  $D(\dot{q})$  a disszipációs (csillapítás által elnyelt) energia és  $f$  egy külső erő.

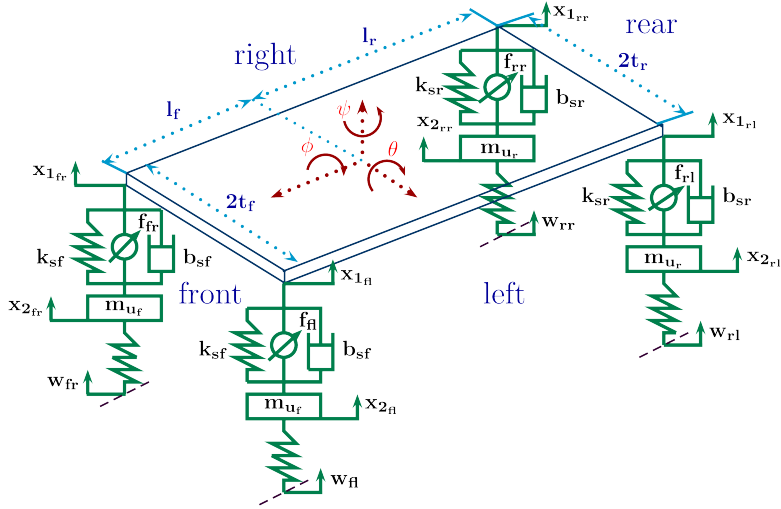
Célszerűen a modellt az egyensúlyi helyzet körüli lineáris időinvariáns (LTI) állapottér reprezentációban írjuk fel, amelyet az (1)-ben szereplő energiafüggvények alapján a rendszer állapotvektorának alkalmas definiálásával az alábbiak szerint vezethetünk be:

$$\dot{x} = Ax + B_1 d + B_2 u \quad (2)$$

ahol  $x$  az állapotokat tartalmazó vektor,  $d$  a zavarás,  $u$  a beavatkozási jel, míg  $A$ ,  $B_1$  és  $B_2$  konstans mátrixok.

### Felfüggesztéstervezés

Tekintsük a *függőleges dinamika irányítására* alkalmazott 1. ábrán látható járműmodellt.



1. ábra: A felfüggesztési rendszer illusztrációja

A függőleges dinamikát leíró egyenletrendszerben a rugózott tömeg (a kocsiszekrény) középpontjának és a rugózatlan tömegek (a futómű) négy sarokpontjának függőleges gyorsulásai ( $\ddot{z}_s$ ,  $\ddot{z}_{u,ij}$ ), valamint a hossztengety körüli távolgyási (vagy forgási) szöggyorsulása ( $\ddot{\phi}$ ) és a keresztirányú tengely körüli bólintó szöggyorsulása ( $\ddot{\theta}$ ) a rugó- és csillapítási erőkön kívül a függőleges irányú zavarásoktól és az x,y tengelyek körüli zavaró nyomatékoktól egyaránt függ. Az ezt leíró egyenletek a következők:

$$\ddot{z}_s = -(F_{z,fl} + F_{z,fr} + F_{z,rl} + F_{z,rr} + F_{dz})/m_s \quad (3)$$

$$\ddot{z}_{u,ij} = (F_{z,ij} - F_{t,ij})/m_{u,ij}, i \in \{f, r\}, j \in \{l, r\} \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = ((F_{z,rl} - F_{z,rr})t_r + (F_{z,fl} - F_{z,fr})t_f + mha_y + M_{dx})/I_x \quad (5)$$

$$\ddot{\phi} = ((F_{z,rr} + F_{z,rl})l_r - (F_{z,fr} + F_{z,fl})l_f - mha_x + M_{dy})/I_y \quad (6)$$

A vertikális erők a rugóerőkön és csillapító erőkön kívül a szabályozott csillapító erőt is tartalmazzák:  $F_{z,ij} = k_{s,ij}(z_{u,ij} - z_{s,ij}) + b_{s,ij}(\dot{z}_{u,ij} - \dot{z}_{s,ij}) + f_{d,ij}$ , ahol  $f_{d,ij} = c_{ij}(\cdot)(\dot{z}_{u,ij} - \dot{z}_{s,ij})$  szabályozza a vertikális dinamikát.

A modell alapú irányítástervezésben ezt a modellt kiegészítjük azokkal a minőségi követelményekkel, amelyeket az irányítással szemben megfogalmazunk. Az aktív/félaktív felfüggesztés tervezésének minőségi követelményei felsorolásszerűen a következők: utazási kényelem javítása, dinamikus kerékterhelés csökkentése, felfüggesztési munkatér korlátozásának biztosítása, bólintási és dőlési dinamika javítása, továbbá a fizikai korlátozások betartása. A minőségi jellemzőket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: A felfüggesztéstervezés minőségi jellemzői

Minőségi jellemző	
Lengéskényelem	$z_1 =  \ddot{x}_{1,ij}  \rightarrow \min$
Dinamikus kerékterhelés	$z_2 =  x_{2,ij} - w_{ij}  \rightarrow \min$
Munkatér	$z_3 =  x_{1,ij} - x_{2,ij}  \rightarrow \min$
Támolygás	$z_4 =  \ddot{\theta}  \rightarrow \min$
Bólintás	$z_5 =  \ddot{\phi}  \rightarrow \min$
Beavatkozás	$z_6 =  u_{ij}  \rightarrow \min$

Ezek a követelmények mind a menetstabilitás, mind kényelem szempontjából lényegesek. Például az utazási kényelem javítása azt jelenti, hogy az útgerjesztésnek, mint zavarásnak a rugózott tömeg gyorsulására való hatását ( $z_1$ ) kell minél kisebb értéken tartani, ami úgy érhető el, hogy ezt a tagot büntetjük a többihez képest. A dinamikus kerékterhelés ( $z_2$ ) és a felfüggesztési munkatér ( $z_3$ ) a menetstabilitással függ össze. Ez utóbbi tényezőknek a csökkentése biztonsági szempont.

A felsorolt tagok mindegyikét szimultán módon minimalizálni fizikai okok miatt nem tudjuk. Az utazási kényelem és a menetstabilitás együttes javítása csak extrém nagy külső erő befektetésével lehetséges. Az irányítástervezés lényege az, hogy a szimultán minimalizálandó komponensek között kompromisszumos megoldást kell keresnünk és garantálnunk. Ez pedig a minőségi jellemzőkre alkalmazott, megfelelően választott büntető súlyokkal érhető el.

Ebben a többkritériumos optimalizáción alapuló irányítástervezési feladatban azt a szabályozót keressük, ami a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását - indukált  $\mathcal{L}_2$  operátor norma értelemben - az előírt  $\gamma$  értékén belül tartja, azaz

$$\inf_K \sup_{\|d\|_2 \neq 0, d \in \mathcal{L}_2} \frac{\|z\|_2}{\|d\|_2} < \gamma \quad (7)$$

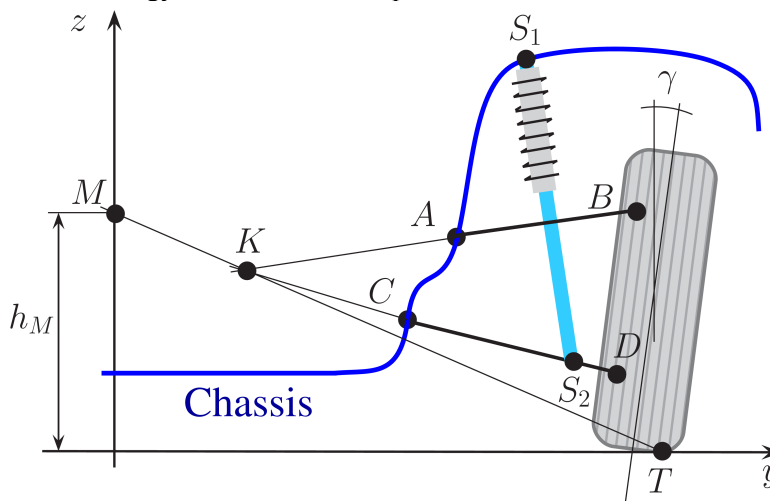
Az irányítási feladat megfogalmazásakor arra törekszünk, hogy a megoldás során lehetőleg alkalmazhatók legyenek a standard elemzési és tervezési eszközök. A kihívás abban van, hogy a többkritériumos optimalizációs mérnöki feladatot és követelményeket úgy kell megfogalmazni, hogy azt összekapcsoljuk a standard módszerekkel. A felfüggesztéstervezéssel kapcsolatos további

információk megtalálhatók a [9], [10], [22], [32] irodalomban.

## Változtatható geometriájú futómű tervezése

Tekintsük ezután a változtatható geometriájú futóművet. Ebben a konstrukcióban egy elektronikusan mozgatott mechanizmus alkalmazásával a *kerékdőlés módosítását* érjük el. A járműre ható oldalirányú erő a kerék  $\alpha$  oldalkúszási szögétől és a  $\gamma$  kerékdőlés szögétől egyaránt függ. Emiatt a kerék dőlési szögének megfelelő szabályozásával a jármű nyomvonalát módosítani tudjuk.

A futóművel négyféle minőségi jellemzőre tudunk hatni, mégpedig a trajektória követésre, a támo­lygási szögre, a beavatkozási energiára, továbbá a nyomtáv változására. Az előírt trajektória követése ( $z_1$ ) az úttartással, azaz a menetstabilitással függ össze, a támo­lygási dinamika ( $z_2$ ) a lengéskényelemmel, míg a nyomtáv­változtatás ( $z_3$ ) a trajektória követéssel és a gumikopással függ össze. A minőségi jellemzőket a 2 táblázat mutatja. Ezekből adódóan az irányítástervezés egy többkritériumos optimalizációs feladathoz vezet.



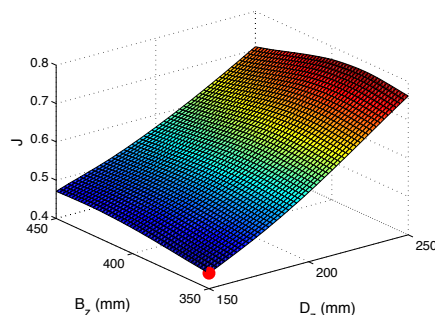
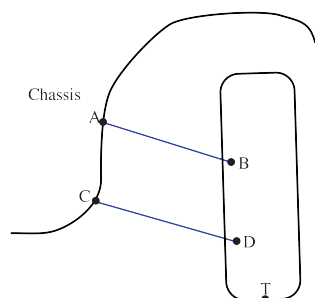
2. ábra: A változtatható geometriájú futómű illusztrációja

A változtatható geometriájú futómű *konstrukciós tervezését és az irányítástervezését szimultán módon* kell végrehajtani a közöttük fennálló szoros kölcsönhatás miatt. Három szabályozást tervezünk, melyek mindegyikének alapfeladata a trajektória követés teljesítése. Ezenkívül az első szabályozásban a támo­lygási szög minimalizálását, a másodikban a nyomtáv­változás minimalizálását, míg a harmadikban az irányítójel minimalizálását tűzzük ki célul.

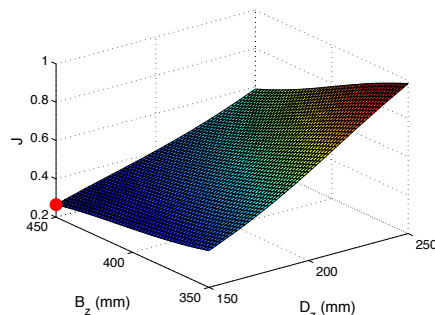
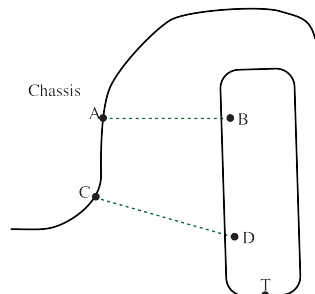
2. táblázat: A változtatható geometriájú futómű minőségi jellemzői

Minőségi jellemző	
Trajektória követés	$z_1 =  \psi_{ref} - \psi  \rightarrow \min$
Támolygási szög csökkentése	$z_2 =  \Delta h_M  \rightarrow \min$
Beavatkozás csökkentése	$z_3 =  a_y  \rightarrow \min$
Nyomtáv változás csökkentése	$z_4 =  \Delta B  \rightarrow \min$

A keréken lévő B és D bekötési pontok függőleges értékeinek függvényében kiszámítjuk a költségfüggvényeket és megkeressük a költségfüggvény kétdimenziós terében a minimumot. A 3. ábrán jól látható, hogy az egyes feladatok eltérő bekötési pontok elrendezését eredményezhetik. Ez alapján illusztrálható, hogy az eltérő elrendezések valóban megoldják a számukra előírt feladatot.



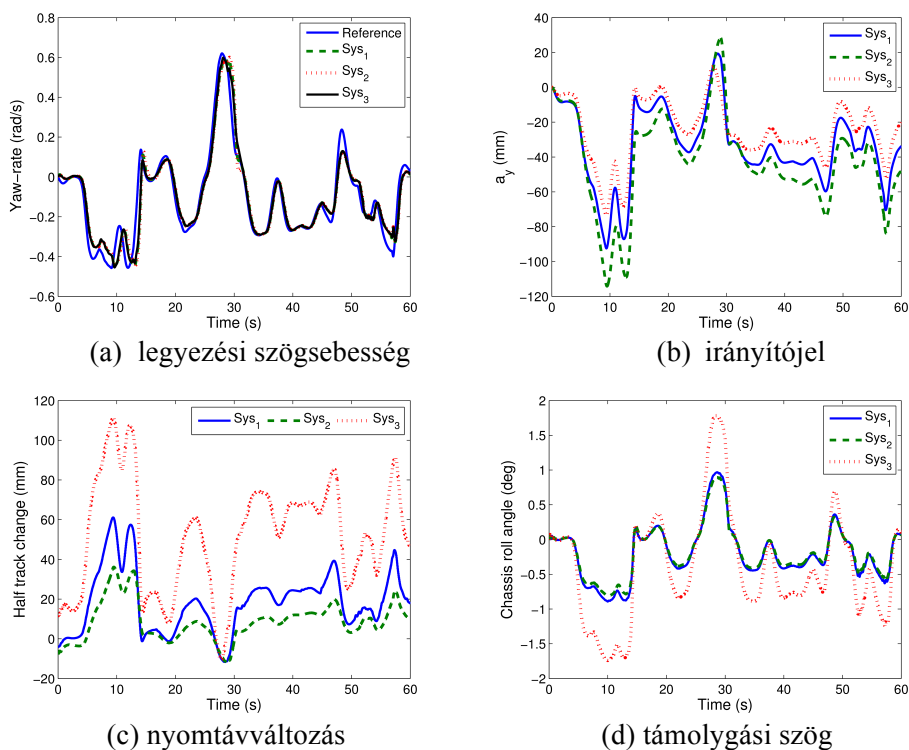
(a)  $Sys_1$ : támolygási szög minimalizálás ( $B_z = 350 \text{ mm}$ ,  $D_z = 150 \text{ mm}$ )



(b)  $Sys_2$ : nyomtávváltozás minimalizálás ( $B_z = 450 \text{ mm}$ ,  $D_z = 150 \text{ mm}$ )

3 ábra: A konstrukciós tervezés és az irányítástervezés összhangja

Az 4. ábra illusztrálja az eltérő konstrukciós elrendezések és az irányítástervezés közötti kölcsönhatást. A legyezési szögsebesség valamennyi elrendezés esetén jól követi a referencia jelet. A támoalgási szög a  $Sys_1$  elrendezésnél a legkisebb, a nyomtávvaltozás a  $Sys_2$ -nél, míg az irányítójel a  $Sys_3$ -nál, ahogy az a tervezésből várható volt. Ezek az ábrák jól illusztrálják a konstrukcióstervezés és irányítástervezés közötti összhangot, valamint az irányítás minőségi jellemzői közötti kompromisszumos megoldás szükségességét.



4. ábra: Minőségi jellemzők különféle konstrukciós elrendezéseknél

A különféle minőségi követelmények közötti összhang megteremtése érdekében a következő megoldást dolgoztuk ki. Bevezetünk egy változót, ami az útviszonyoktól és a jármű manővereitől függően kerül kiszámításra. Ezt a változót ütemezési változónak nevezzük és  $\rho$ -val jelöljük. A manőver és az útviszonyok monitorozása a feladat megoldása során alapvető fontosságú. Az ütemezési változót kis értéken tartjuk mindaddig, amíg a manőver könnyű (pl. egyenes úton haladunk, vagy kis ívben kanyarodunk), illetve az útviszonyok megfelelőek (pl. a tapadási tényező magas, nincs megcsúszás és kipörgés veszély). Ellenkező esetben az ütemezési változó értékét megnöveljük és a fenti

kritikus szituációkban magas értéken tartjuk. Az irányítástervezési feladat formalizálásakor a különféle minőségi jellemzőkhöz súlyozó függvényeket választunk. A súlyozó függvényekbe beépítjük a fentiekben definiált  $\rho$  ütemezési változó értékét.

*A súlyozó függvényekbe beépített ütemezési változóval elérjük, hogy a tervezett szabályozó paraméterfüggő lesz, azaz az ütemezési változó függvényében a feladathoz igazodóan fog a megfelelő minőségi jellemzőkre fókuszálni.*

Természetesen ebben az esetben az állapottér reprezentáció nem maradhat lineáris időinvariáns alakú, helyette lineáris változó paraméterű (LPV) modellt kell alkalmaznunk:

$$\dot{x} = A(\rho)x + B_1(\rho)d + B_2(\rho)u \quad (8)$$

ahol  $\rho$  jelöli az ütemezési változót és  $A(\rho)$ ,  $B_1(\rho)$  és  $B_2(\rho)$  paraméterfüggő mátrixok lesznek. Az ütemezési változóval kapcsolatban feltételezzük, hogy az egy közvetlenül mért, vagy a mért jelekből származtatott, jel.

A fenti többkritériumos optimalizáción alapuló irányítástervezési feladatban azt a szabályozót keressük, ami a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását - indukált  $\mathcal{L}_2$  operátor norma értelemben - az előírt  $\gamma$  értékén belül tartja, miközben a  $\rho$  ütemezési változó  $\mathcal{P}$  működési tartományát figyelembe veszi:

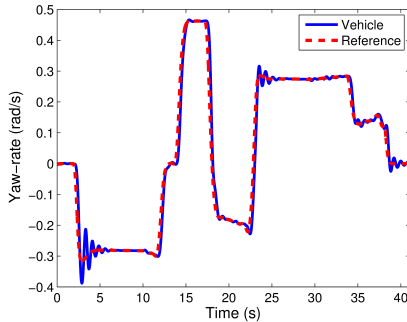
$$\inf_K \sup_{\rho \in \mathcal{P}} \sup_{\|d\|_2 \neq 0, d \in \mathcal{L}_2} \frac{\|z\|_2}{\|d\|_2} < \gamma \quad (9)$$

A trajektória követési tervezés eredményt az 5. ábra illusztrálja. Változtatható geometriájú futómű tervezésével kapcsolatos további információk találhatók a [13], [14], [17] irodalomban.

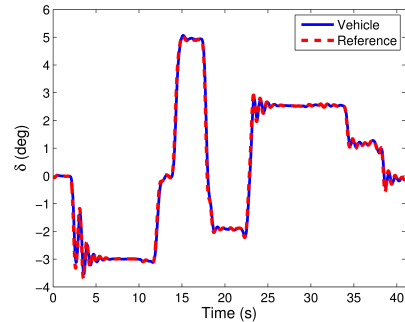
A bemutatott tervezési feladatokban a minőségi követelményeket erő segítségével biztosítottuk. Valójában a szükséges erőt egy beavatkozó állítja elő a saját működési mechanizmusával, például egy szelep megfelelő irányú és nagyságú mozgatásával. A jármű irányítástervezése a gyakorlatban hierarchikusan történik. A felsőszintű irányítás tervezésekor virtuális szabályozási erőket számítunk ki a minőségi specifikációk alapján, míg az alsószintű irányítás tervezésekor a megtervezett virtuális erőket állítjuk elő a beavatkozók fizikai tulajdonságainak figyelembe vételével.

Egy hidraulikus rendszer által létrehozott erő dinamikus kialakulását két egyenlettel írhatjuk le. Az egyik a nyomáskülönbség dinamikájára vonatkozik,

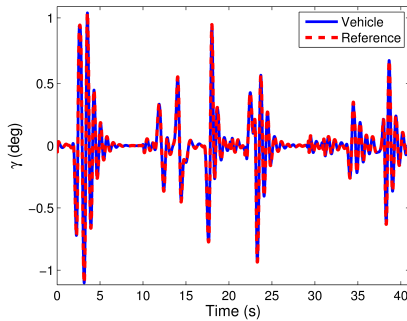
ami a végpontok közötti sebességkülönbségtől és a hidraulikus áramtól függ, a másik pedig a szelepelmozdítás dinamikáját veszi figyelembe. Az alsósíntű irányítástervezést a gyakorlatban egy jelkövetési feladat megoldásával azonosíthatjuk, melynek során valós fizikai jelekkel - szelepelmozdítással - kívánjuk a felső szinten előírt virtuális jeleket - beavatkozó erőt - követni. Hierarchikus irányítástervezéssel kapcsolatos további információk találhatóak a [8], [20] irodalomban.



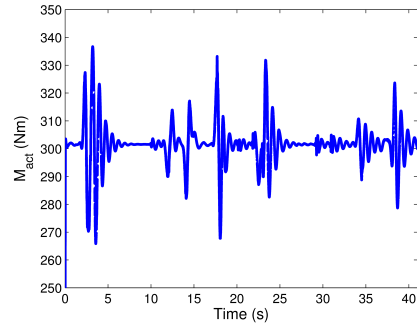
(a) Szögsebesség



(b) Jobb oldali kormányzás



(c) Jobb oldali kerékdöntés



(d) Jobb oldali nyomaték

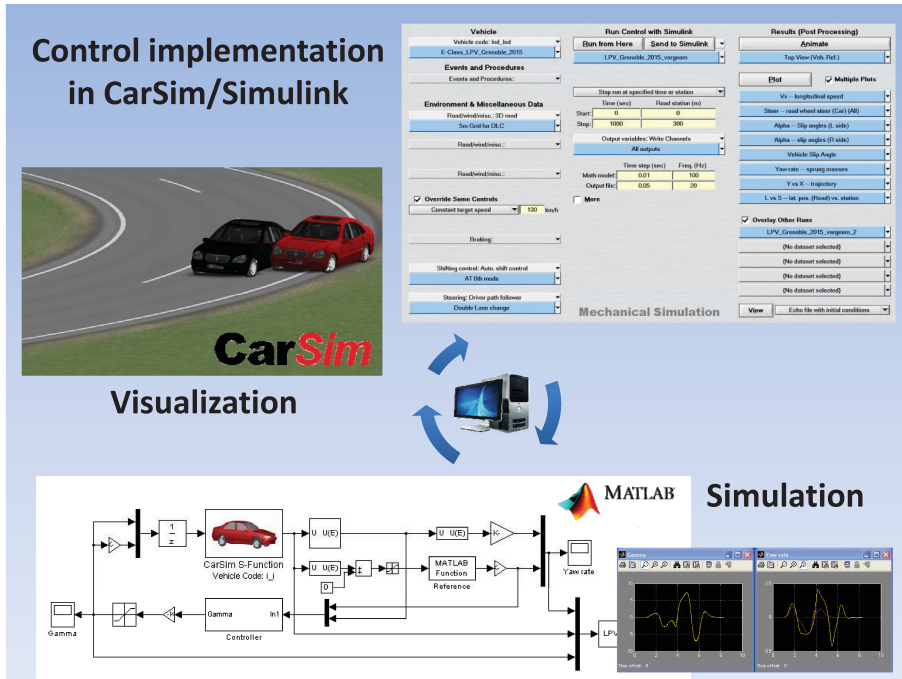
5. ábra: Trajektória követése változtatható geometriájú futóművel

## Borulási kockázat csökkentése

Az alábbiakban a járművek borulási kockázatának csökkentésére irányuló eredményeket említjük. A *jármű távolgási szöge* jelentősen megnövekszik és így borulásközeleli helyzet áll elő, ha egy kanyarodási manőver közben a kerekek és az út közötti kölcsönhatás szignifikánsan lecsökken. Az irányítástervezés alapjául szolgáló modell a jármű függőleges tengely körüli elfordulásának (legyezési dinamika) és a hossz tengely körüli elfordulásának (távolgási/dőlési dinamika) mozgásegyenletein alapszik. Ebben a modellben az oldalirányú gyorsulást, a tengelyterhelések oldalirányú komponenseit és a szabályozási



energiát vesszük figyelembe minőségi mutatóként. A haszonjárművek borulási kockázatának csökkentésére irányuló kutatások gyakorlati haszna inspirálta a témában írt [11], [12], [28] publikációkat.



6. ábra: Tervezési, szimulációs és vizualizációs környezetek az irányítástervezésben

A kutatási feladatok tervezéséhez, teszteléséhez és elemzéséhez különféle szimulációs környezeteket alkalmazunk a konkrét valós megvalósítások előtt. Az irányítástervezés és egyszerű tesztelések Matlab/Simulink környezetben történnek, míg az implementáció CarMaker/CarSim/TruckSim szimulációs és vizualizációs környezetben történik. Ezt illusztrálja a 6. ábra.

### 3 Modell alapú robusztus irányítástervezés elméleti háttere

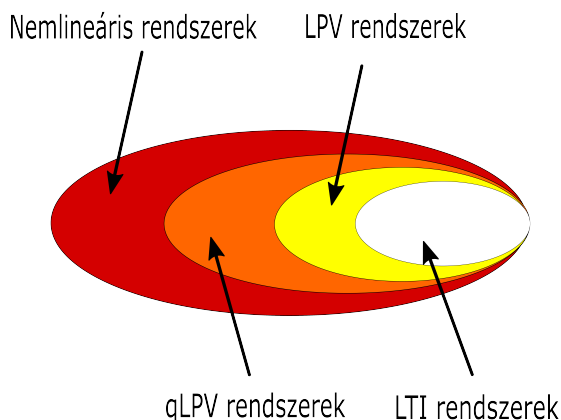
A modell alapú járműirányítási elemzési és tervezési feladatok megoldása során általában LPV modellosztályt alkalmazunk, amelynek állapottér reprezentációjának állapotegyenletében szereplő  $A(\rho)$ ,  $B_1(\rho)$  és  $B_2(\rho)$  rendszermátrixok a  $\rho$  ütemezési változótól függenek:

$$\dot{x} = A(\rho)x + B_1(\rho)d + B_2(\rho)u \quad (10)$$

ahol  $x$  az állapotokat tartalmazó vektor,  $d$  a zavarás, míg  $u$  a beavatkozójel.

Megjegyezzük, hogy ha a  $\rho$  változó konstans, akkor a lineáris időinvariáns modellosztályhoz jutunk, amit (2) állapottér reprezentációban írtunk fel. Ha a  $\rho$  ütemezési változó függ az állapottól ( $\rho = \rho(x)$ ), akkor kvázi-lineáris változó paraméterű (qLPV) modellosztályt fogalmazzunk meg. Ezen modellosztályok egymásba ágyazását a 7. ábra illusztrálja. Ebben a fejezetben az LPV modellosztállyal fogunk foglalkozni. Fontos hangsúlyozni, hogy az LPV és qLPV modellek a bizonytalanságon kívül nemlineáris hatások kezelésére is alkalmasak lehetnek.

Ez utóbbi esetben az LPV modellezés különbözik a klasszikus linearizációs eljárástól. A klasszikus linearizáláson alapuló modell csak az egyensúlyi pontok közelében érvényes, míg az LPV rendszermodell a nemlineáris modellnek egy olyan átírása, ami egy teljes operatív tartományon érvényes, globális modell. Az eljárás lényege, hogy a nemlinearitásokat alkalmasan választott időben változó (állapot/mért jel függő) ütemezési változók segítségével elrejtjük, azaz a nemlineáris rendszert beágyazzuk a lineáris időben változó rendszerek osztályába, feltételezve, hogy az ütemezési változó egy külső jel, lásd [24], [27]. Hangsúlyozni kell továbbá, hogy az egyes rendszerek LPV reprezentációi nem egyértelműek, valamint a megfelelő modell kiválasztása gyakran függ az aktuális tervezési és implementációs módszerektől.



7. ábra: Modellosztályok egymásba ágyazódása

A járműirányítás tervezése során a jármű állapottér reprezentációját az irányítási feladattal összefüggő egyenletekkel is kiegészítjük. Az irányítási célú modellben az előírt minőségi specifikációkat és a bizonytalanságokat, valamint a mért jelekre vonatkozó összefüggéseket is figyelembe vesszük. A teljes állapottér reprezentációs leírás a (10) egyenletet egészíti ki a minőségi specifikációkat

reprezentáló  $z$  egyenlettel és a mért jelek  $y$  egyenletével:

$$z = C_1(\rho)x + D_{11}(\rho)d + D_{12}(\rho)u \quad (11)$$

$$y = C_2(\rho)x + D_{21}(\rho)d + D_{22}(\rho)u \quad (12)$$

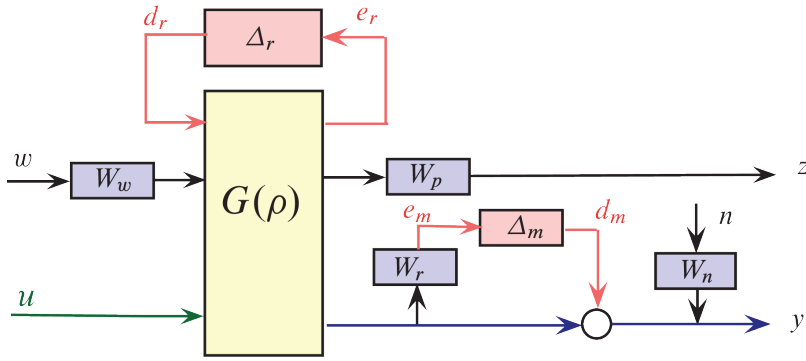
ahol  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{21}$ ,  $D_{22}$  paraméterfüggő mátrixok.

Az előírt útvonal minél pontosabb követése, a menetstabilitás garantálása, a kormányozhatóság javítása, a borulási kockázat csökkentése, az utazási kényelem javítása, vagy a meghibásodások hatásainak csökkentése egyaránt a minőségi specifikációkkal függ össze. Az irányítási feladat megkonstruálásakor állapotfüggő súlyozó függvényeket tervezünk a minőségi specifikációk közötti összhang megteremtése érdekében.

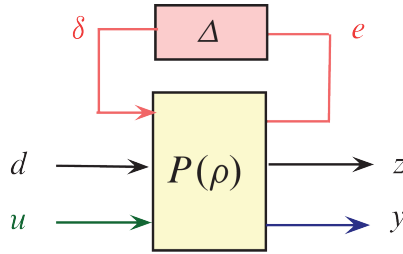
A pályakövetésre alkalmazott súlyfüggvényt frekvencia tartományban úgy tervezzük meg, hogy alacsony frekvenciákon magas értékei legyenek, amivel állandósult állapotban pontos jelkövetés elérése a feladat. Az utazási kényelemre alkalmazott súlyfüggvényt úgy tervezzük meg, hogy az útgerjesztés hatását az emberi szervezetre káros frekvencia tartományokban csökkentsük.

A súlyozás másik indoka az, hogy a minőségi tényezők együttesen nem javíthatók a gyakorlatban, ezért közöttük *kompromisszumos megoldást* kell keresni. A menetstabilitás és az utazási kényelem együttes javítása egy felfüggesztési rendszer tervezésével nem garantálható. Az egyik tényező javításával a másik tényező minőségi jellemzője gyakran romlik és fordítva. A problémaorientált mérnöki feladatokban ezért kritikus feladat az egyes kritériumokhoz kapcsolódó állapotfüggő súlyozó függvények megtervezése, valamint ezek egymáshoz való viszonyának feltérképezése. Ezek szisztematikus tervezési lépések alkalmazását igénylik.

A valós rendszer és az irányítástervezéshez használt modell közötti eltéréseket a  $\Delta$  bizonytalanságok írják le. Ezzel a módszerrel állítjuk elő az úgynevezett  $P - \Delta$  struktúrát, amelyben  $P$  tartalmazza a  $G$  járműmodellt, a  $W_p$  blokkokban definiált súlyokkal módosított minőségi jellemzőket, valamint a mért jeleket.  $\Delta_m$  blokk reprezentálja  $W_r$  súlyozással az elhanyagolt dinamikát és  $\Delta_r$  blokk a parametrikus bizonytalanságot. A struktúra részleteit a 8.(a) ábra, míg az egyszerűsített ábrázolását a 8.(b) ábra illusztrálja. Az ábrán szerepelnek még a külső zavarások és érzékelő zajok is, amelyek kedvezőtlen hatását az irányítás során szintén csökkenteni szükséges  $W_w$  és  $W_n$  súlyok alkalmazásával.



(a) Bővített rendszermodell

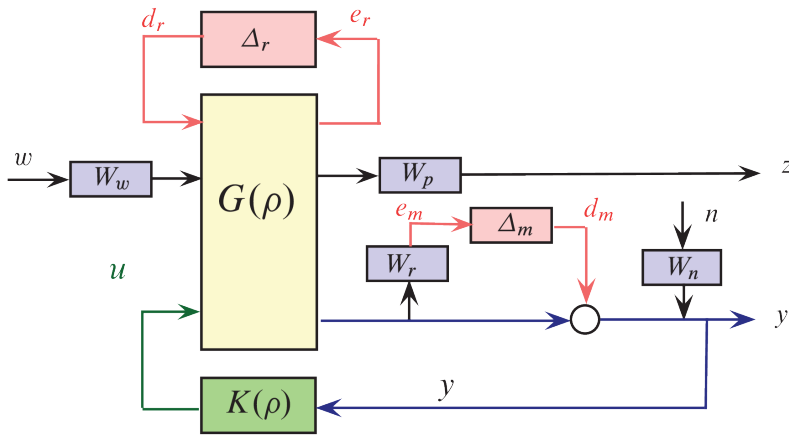


(b)  $P - \Delta$  struktúra

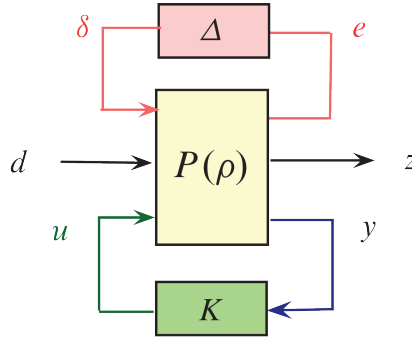
8. ábra:  $P - \Delta$  struktúra a  $G$  modell súlyozásával

A robusztus irányítástervezés az úgynevezett  $P - K - \Delta$  struktúrán alapul, ami a  $P - \Delta$  struktúra  $K$  szabályozóval való bővítésével jön létre. A tervezés a  $K$  szabályozó megkonstruálására irányul, ami a mért jelek alapján generálja a rendszer működése által megkövetelt irányítójelet, miközben elnyomja a rendszer külső zavarásainak minőségi jellemzőkre való hatását.

A stabilitás és a minőségi követelmények biztosítása központi kérdés az irányításelméleti feladatokban, [2]. Az irányítástervezés során azt a szabályozót keressük, ami a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását egy előírt véges  $\gamma$  értéken belül tartja, lásd a (9) összefüggést.



(a) Bővített rendszermodell



(b) P - K - Δ struktúra

9. ábra: P - K - Δ struktúra a G modell súlyozásával és a K irányítással

Tekintsük az alábbi LPV rendszert:

$$\dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)d \quad (13)$$

$$z = C(\rho)x + D(\rho)d \quad (14)$$

Gyakorlati szempontból egyszerűségénél fogva gyakori a kvadratikusan Lyapunov függvényen alapuló elemzés és tervezés. A rendszer kvadratikusan stabil, ha létezik egy kvadratikusan  $V(x(t)) = x^T(t)Px(t) > 0$  Lyapunov függvényt meghatározó konstans  $P = P^T > 0$  mátrix, amire az alábbi lineáris mátrix egyenlőtlenség (LMI) teljesül, [1], [25]:

$$A^T(\rho)P + PA(\rho) < 0, \quad \forall \rho \in \mathcal{P}. \quad (15)$$

A rendszer performanciájára a következő mondható. Ha létezik egy  $P = P^T > 0$  konstans mátrix az alábbi LMI-vel:

$$\begin{bmatrix} A^T(\rho)P + PA(\rho) & PB(\rho) & C^T(\rho) \\ B^T(\rho)P & -\gamma I & D^T(\rho) \\ C^T(\rho) & D(\rho) & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad \forall \rho \in \mathcal{P}, \quad (16)$$

akkor az  $x(0) = 0$  zérus kezdeti feltétel esetén az LPV rendszer  $\mathcal{L}_2$  erősítése kisebb  $\gamma$ -nál.

A kvadratikus Lyapunov függvényen alapuló stabilitásra és performanciára vonatkozó fenti elégséges feltételek gyakran konzervatív megoldást eredményeznek. Ugyanakkor az is gond, hogy a feladatok numerikusan gyakran nem oldhatók meg még stabil rendszerek esetén sem. A megoldás konzervatív voltának csökkentése érdekében a Lyapunov függvényben szereplő  $P$  mátrix konstans értékű feltételezésének relaxálásával jutunk el a paraméterfüggő módszerekhez.

A  $\rho \in \mathcal{P}$  paraméterek dinamikus változása a gyakorlatban nem tetszőleges, hanem korlátos, azaz az ütemezési változók deriváltjára  $\beta$  korlátozást alkalmazunk:  $|\dot{\rho}_i| \leq \beta_i, i \in \{1, s\}$ . Tekintsük az alábbi LPV rendszert korlátos paraméterváltozások figyelembe vételével:

$$\dot{x} = A(\rho, \dot{\rho})x + B(\rho, \dot{\rho})d \quad (17)$$

$$z = C(\rho, \dot{\rho})x + D(\rho, \dot{\rho})d \quad (18)$$

A *stabilitásra* vonatkozó tétel a következő megállapításból indul ki. Ha létezik  $\delta > 0$  és egy paraméterfüggő  $P(\rho) = P^T(\rho) > 0$  mátrix úgy, hogy

$$A^T(\rho, \dot{\rho})P(\rho) + P(\rho)A(\rho, \dot{\rho}) + \frac{dP}{dt} < -\delta I_n, \quad \forall \rho \in \mathcal{P} \quad (19)$$

akkor az  $A$  rendszer paraméterfüggő stabil a  $\mathcal{P}$  kompakt halmazra nézve.

Ha egy LPV rendszer  $A$  paraméterfüggő stabil, akkor a rendszert is paraméterfüggő stabil LPV rendszernek nevezzük.

A paraméterfüggő stabil LPV rendszer *performanciájára* vonatkozik a következő tétel, [21], [29], [30]. Ha létezik egy kompakt halmaz  $P: \mathcal{R}^s \rightarrow \mathcal{R}^{n \times n}$  úgy, hogy paraméterfüggő  $P(\rho) > 0$  és amelyre

$$\begin{bmatrix} A^T(\rho, \beta)P(\rho) + P(\rho)A(\rho, \beta) + \sum_{i=1}^s (\beta_i \frac{\partial P}{\partial \rho_i}) & P(\rho)B(\rho, \beta) & C^T(\rho, \beta) \\ B^T(\rho, \beta)P(\rho) & -\gamma I_{n_d} & D^T(\rho, \beta) \\ C(\rho, \beta) & D(\rho, \beta) & -\gamma I_{n_c} \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

minden  $\rho \in \mathcal{P}$  és  $|\beta_i| \leq \nu_i, i \in \{1, s\}$  esetén, akkor az  $A$  rendszer paraméterfüggően stabil a  $\mathcal{P}$  halmazra nézve és létezik egy  $\delta$  amire  $0 \leq \delta < \gamma$  úgy, hogy  $\|G_{\mathcal{F}_P^\gamma}\|_{i,2} \leq \delta$ .

A tétel feltételei konvexek ugyan, de végtelen dimenziós feladathoz vezetnek. A gyakorlatban a végtelen dimenziós függvényeket egy véges dimenziós paraméterezéssel közelítve kapunk véges LMI feladatot. Sokszor a paraméterter megfelelő diszkretizálásával (griddelésével) kapunk numerikusan is kezelhető feladatot, [30].

A paraméterfüggő módszerekben az ütemezési változók és azok deriváltjainak figyelembe vétele miatt bonyolultabb lineáris mátrixegyenlőtlenségekhez vezetnek a paraméterváltozós Lyapunov mátrixon alapuló stabilitás és performancia tételek, hiszen a  $P$  mellett annak idő szerinti deriváltjai is megjelennek az összefüggésekben. Az irányítás tervezése és az implementált szabályozó működése szempontjából viszont kedvező, hogy a szabályozó paraméterfüggő lesz, ami a szabályozás konzervatívizmusát csökkenti.

## 4 Integrált járműirányítás tervezése

Az egyes járműirányítási feladatokat hagyományosan általában egymástól függetlenül tervezik meg. A függetlenül tervezett, de szimultán módon alkalmazott szabályozók a jármű minőségi jellemzőire eltérő módon hatnak. Következésképpen a szabályozók együttes működése során a jármű dinamikai tulajdonságaiban egymást zavaró hatások jelenhetnek meg, de akár konfliktushelyzetek is keletkezhetnek, [4]. Az együttesen alkalmazott fékezés és kormányzás a jármű színjén kölcsönhatást eredményez. Például a fékezés a jármű sebességén kívül - különösen manőverek során - a jármű legyezési szögének dinamikájára is hat, s ennek következtében egy járműmanőver közben alkalmazott fékezés a jármű irányát jelentősen megváltoztathatja, ily módon a fékezés közvetve hat a kormányzási funkcióra. Ugyanakkor a specifikált minőségi követelmények fizikai realizálása a beavatkozók működési korlátaiba ütközhet.

A jármű haladása közben általában több aktív irányítórendszer és beavatkozó működik egyidőben. Például egy manőver során a motor, a kormány, a felfüggesztés, esetleg a fék is egyidejűleg működik és hat a jármű különböző irányú dinamikájára. Az integrált járműirányítás célja a dinamikát befolyásoló aktív beavatkozók összehangolt irányítása az előírt minőségi követelmények garantálása érdekében, valamint a biztonság és a megbízhatóság növelése érdekében. Az integrált járműirányításra mutat illusztrációt a 10. ábra.

Az irányítórendszerek funkcionális integrációjának elérését három különböző *irányítási architektúrával* biztosíthatjuk: centralizált, decentralizált és többszintű irányítással, lásd [7], [31].

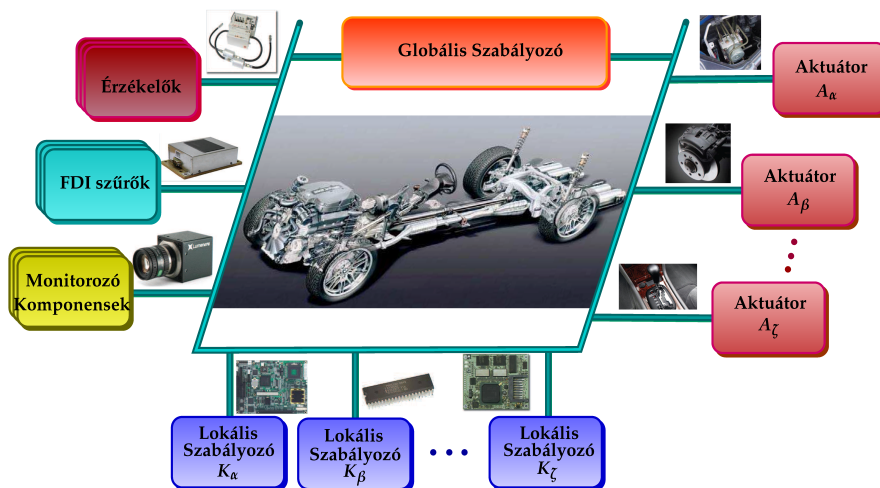
A centralizált architektúrát alkalmazó irányításban valamennyi járműinformáció rendelkezésre áll, azaz az érzékelők, az állapotbecslők és a beavatkozók jelei egyaránt felhasználhatók. Az architektúra előnye az irányítórendszerek együttes tervezéséből fakadóan a tökéletes összehangolás biztosítása. A megoldandó irányítási célok nagy számából fakadóan az architektúra hátránya, hogy túlságosan komplex feladathoz és gyakran numerikus gondokhoz vezet.

A decentralizált architektúrában a járműirányítási alrendszerek viszonylag függetlenül működnek, miközben fedélzeti hálózati csatornákon kommunikálnak egymással saját irányítási céljaik elérése érdekében. Ez az architektúra nem teszi lehetővé globális irányítási feladatok megfogalmazását. Biztosítja azonban az érzékelők és beavatkozók információcseréjét, ami a komplex, több rendszer együttes működését igénylő célok megoldását teszi lehetővé.

A többszintű architektúrában a *felsőszintű (supervisor) irányítás* a járműirányítás igényei, valamint az aktuális járműállapotok alapján meghatározza azokat a



jeleket, amik az irányítórendszerek összehangolt működését biztosítják, mégpedig az interakciók és prioritások figyelembe vételével. Napjainkban a többszintű architektúrák tervezése intenzíven kutatott terület.



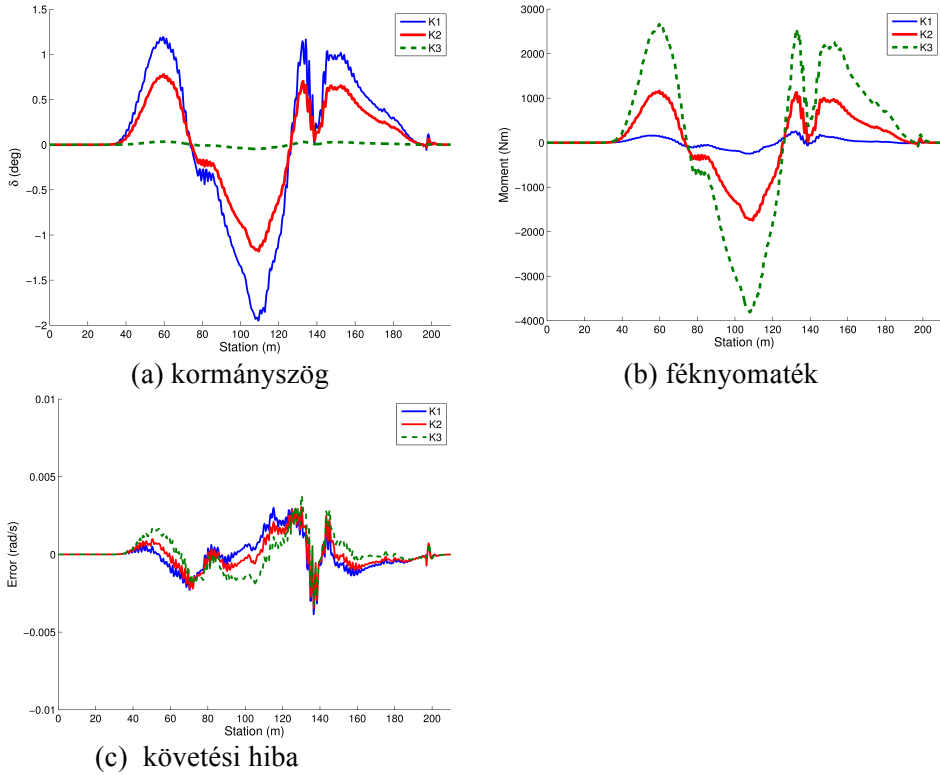
10. ábra: Korszerű integrált irányítástervezés illusztrációja

### Integrált járműirányítás

Az alábbiakban az integrált járműirányításra mutatunk illusztrációt. A referencia legyezési szögsebesség követését a kormányszög és a differenciális fékezés szimultán alkalmazásával kívánjuk megoldani. A követési hiba minimalizálására eltérő súlyozó függvények alkalmazásával, valamint az egyes beavatkozók megfelelő büntetésével három szabályozást terveztünk. A szabályozók működését a 11. ábra kormányszög, féknyomaték és követési hiba jelei illusztrálják. A  $K_1$  szabályozó esetén nagy kormányszöggel és hozzá tartozó kis differenciális fékezéssel, a  $K_2$  szabályozó esetében kis kormányszöggel és hozzá tartozó nagy differenciális fékezéssel, míg a  $K_3$  szabályozó esetében a két beavatkozó szimultán működtetésével oldjuk meg a szabályozási feladatot. Mindhárom esetben a trajektória követés hibája elfogadhatóan kis értékű.

Az integrált járműirányítás tervezésekor több szempontot kell figyelembe venni. Ez nem egyszerűen egy többváltozós irányítástervezési feladat, hiszen az egyes funkciók teljesítése során a beavatkozók között prioritás van, a közöttük fennálló hierarchiát biztosítani kell. Habár egy kanyarodás akár a kormányval, akár a differenciális fékezéssel megvalósítható, a gyakorlati esetek jelentős részében mégis a kormányt alkalmazzuk. Fékezéskor ugyanis a jármű sebessége lecsökken, s a jármű felgyorsítása többletenergia ráfordítást igényel. Az integrált járműirányítás megteremti a rekonfiguráló és hibatűrő irányítás alapjait is.

Ezekben az esetekben ugyanis azt használjuk ki, hogy a megkívánt járműdinamikai mozgást akár különböző beavatkozóval is képesek vagyunk elérni.



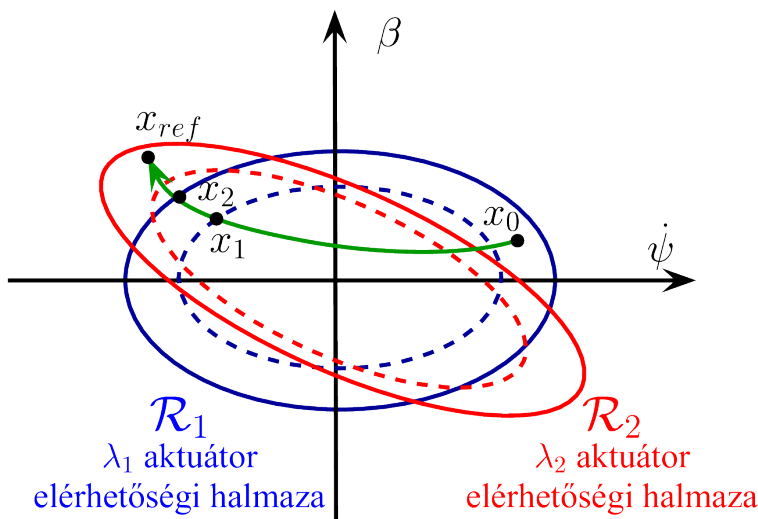
11. ábra: Beavatkozó jelek és követési hiba a trajektória követési feladatban

## Rekonfigurálható irányítás

A rekonfigurálható irányítás célkitűzése, hogy a külső vagy belső tényezők miatt szükségképpen megváltoztatott minőségi specifikációkhoz adaptálódjon és garantálja azokat. Egy rekonfigurációs stratégiát illusztrál a 12. ábra. A feladat szerint az aktuális  $x_0$  kezdeti állapotból  $x_{ref}$  referencia állapotot kell elérni. Az aktív  $\lambda_1$  aktuátor az  $x_0$  állapotnak megfelelő beavatkozást biztosítja ugyan, de az ábráról jól láthatóan nem képes a referencia állapot elérésére, hiszen az  $x_{ref}$  az elérhető állapotok tartományán kívül esik. Ugyanakkor ez az állapot a  $\lambda_2$  aktuátor által elérhető állapotok tartományán belül van, emiatt a feladatot az aktuátorok közötti rekonfigurálással lehet csak megoldani.

A hibatűrő irányítás célkitűzése, hogy egy komponens (érzékelő, beavatkozó) részleges meghibásodása esetén is teljesítse az előírt minőségi specifikációkat.

Az integrált irányítási architektúra nemcsak elosztott, hanem hierarchikus felépítésű. A felsőszintű felügyelő (supervisor) irányítás az alsószintű irányítórendszerek és beavatkozók összehangolását és a feladatok elosztását biztosítja. A lokális irányítások a specifikus irányítási feladatok végrehajtásáért felelnek.

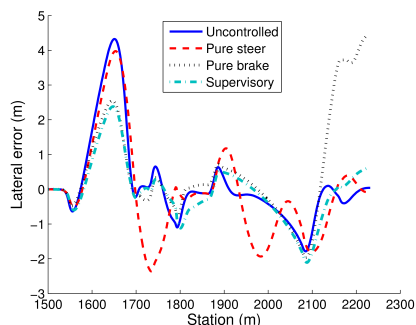


12. ábra: A rekonfigurációs irányítás illusztrációja

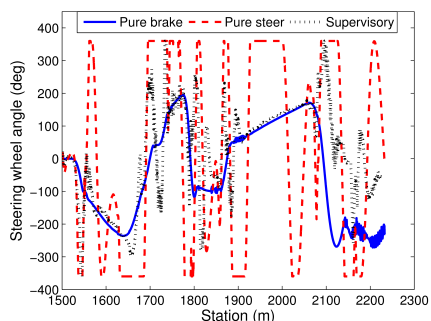
### Trajektóriakövetés integrált irányítással

A következőkben egy trajektória követési feladatot hajt végre a járművezető. A manőverek és a megválasztott sebesség azonban nem teszi lehetővé számára a manőverek végrehajtását és letér az útról. Különböző vezetőtámogató rendszereket vizsgálunk, amelyek hatását az 13. ábrán látható jelek illusztrálják.

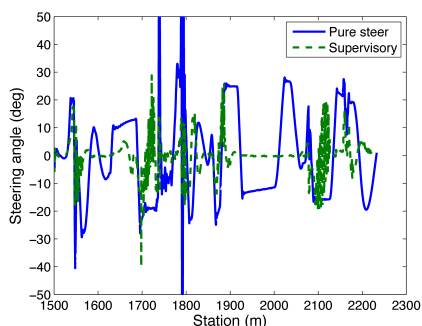
Ha a vezető támogató rendszerben kizárólag addicionális kormányszöveget alkalmazunk, akkor az oldalirányú hiba rögtön az első kanyarban elfogadhatatlanul nagy értékű, amit a 13.(a) ábra illusztrál. Ennél a megoldásnál a vezetőnek a kormánykerék teljes tartományában kell kormányoznia 13.(b) ábrán látható módon, ami nemcsak veszélyes művelet, de egy átlagos vezető nem is képes annak megvalósítására. A 13.(c) és 13.(d) ábrák a szabályozó rendszerek beavatkozásait mutatják, azaz a kormányszöveget és a féknyomatékot. Ha kizárólag aszimmetrikus fékezést alkalmazunk, akkor a féknyomaték megoldja a feladatot egészen az utolsó manőverig, amikor elfogadhatatlanul nagy nyomatékigény keletkezik. Ennek oka, hogy a hátsó kerékre eső tapadási slip jelentősen megnövekszik és a jármű megpördül. Ezt illusztrálják az ábrán látható kerekenkénti slip értékek. Az integrált irányítás a kormányszög és a féknyomaték közötti összhang megteremtésével oldja meg az előírt trajektória követési feladatot, miközben a menetstabilitást mindvégig garantálja.



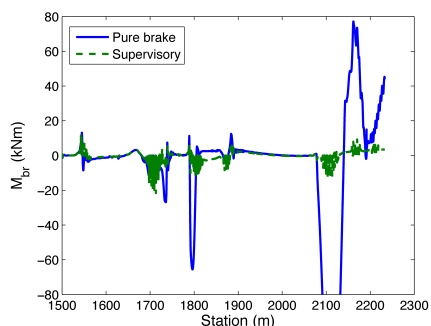
(a) oldalirányú hiba



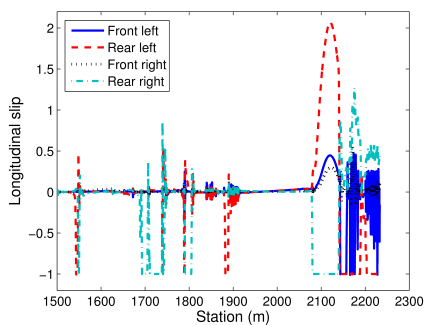
(b) kormánykerék szöge



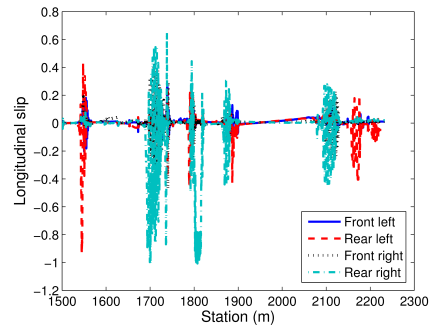
(c) kormányszög



(d) féknyomaték



(e) hosszirányú slip (tisztá fékezés esetén)



(f) hosszirányú slip (integrált irányítás esetén)

13. ábra: Vezetőtámogató rendszerek hatása a trajektória követési feladatban

Az integrált járműirányítás garantálja a kormány és fék rekonfiguráló és hibatűrő irányítását is. A kormány működésében kialakult teljesítmény veszteség esetében a vezető csak korlátozottan képes kormányozni, viszont az integrált szabályozás esetén a féknyomaték intenzívebb beavatkozására van lehetőség. Ebben az esetben a megfelelő kerekre kiadott féknyomások eredményeként keletkező intenzívebb féknyomaték fogja a pályakövetést garantálni. Ha a fékkörök egyikében hiba következik be, akkor a féknyomaték szabályozására csak korlátozott lehetőség van, azaz a differenciális fékezés miatt vagy a balra, vagy a jobbra kanyarodás végrehajtása okoz gondot. Ilyenkor az addicionális kormányszög növelése segít.

Fentiek alapján kijelenthető, hogy az integrált irányítás valamely komponense legalább részben képes egy másik komponens helyettesítésére. A hibatűrő irányítástervezésnek két előfeltétele van. Az első feltétel, hogy a hiba detektálása FDI (hibadetektáló és azonosító) szűrővel biztosítva legyen, míg a második feltétel, hogy a hibainformáció a tervezésbe beépített legyen. Ez utóbbi azt jelenti, hogy az integrált irányítás komponenseit fel kell készíteni arra, hogy alapfeladatukon kívül más feladatokat is el kell látniuk.

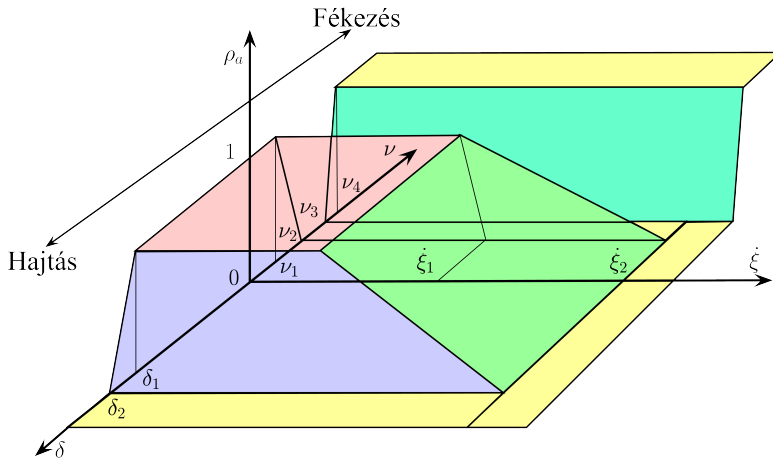
*A rekonfiguráló és hibatűrő irányítás a különféle hibainformációknak a tervezési súlyfüggvényekbe való beépítésével érhető el.*

A rekonfiguráló és hibatűrő irányításokkal kapcsolatban további információk találhatóak a [5], [6] publikációban.

### **Beavatkozók az integrált járműirányításban**

Az irányítástervezés során a beavatkozók aktiválása kapcsán különféle követelményeket kell teljesíteni, amelyek kapcsolatban vannak a beavatkozók konstrukciós korlátaival, energiaigényeivel, valamint azok dinamikájával. A mérnöki alkalmazásokban különféle intuitív módszerek terjedtek el az adott feladattal összhangban álló beavatkozó kiválasztására. Az alábbiakban a differenciális fékezésen és a kormányzáson alapuló menetstabilizáló rendszerek közötti prioritás kezelését mutatjuk be. Az 14. ábra szerint különböző menetdinamikai paraméterek alapján történik a megfelelő beavatkozó kiválasztása. A  $\delta$  kormányszög, a  $v$  hosszirányú slip és a  $\xi$  sebesség függvényében választjuk ki a beavatkozók súlyfüggvényeiben alkalmazott  $\rho_a$  ütemezési változó értékét.

Hajtáskor menetstabilizálás szempontjából a kormányzásnak van prioritása a fékező nyomatékkal szemben. Ennek biztosítása úgy történik, hogy a kormányaszög teljes működési tartományában egy előírt sebesség tartományig a kormányaszögre alkalmazott ütemezési változót nagyra választjuk. A kormányaszög működési tartományán kívül, valamint extrém nagy sebesség tartományában az ütemezési változót kis értékre csökkentjük, ezáltal a differenciális fékezést helyezzük előtérbe. Fékezéskor a fékező nyomatéknak van prioritása a kormányzással szemben, de ennek a megcsúszási érték szab határt. Ebben a tartományban a kormányzást is alkalmazzuk a menetstabilitás garantálása érdekében.



14. ábra: Beavatkozó logikai elvű kiválasztása

A szabályozás tervezése során a kormányzás és a fékező nyomaték beavatkozáira alkalmazott súlyfüggvényekbe beépítjük a  $\rho_a$  ütemezési változó értékét:

$$W_{act,st} = (1 - \rho_{st})/\delta_{max}, \quad (21)$$

$$W_{act,Mbr} = \rho_{br}/M_{brmax}, \quad (22)$$

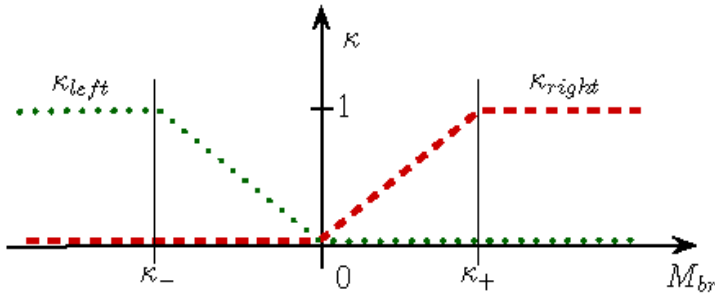
ahol  $\delta_{max}$  és  $M_{brmax}$  a beavatkozók konstrukciós korlátai.

Az alábbi trajektória követési feladatban a kormány és a fék rekonfiguráló és hibatűrő irányításban való kooperatív működésének elvét mutatjuk be. Abban az esetben, ha a beavatkozók megfelelő működését monitorozó komponens teljesítmény veszteség vagy hibát detektál, a hibamentes beavatkozók működési módját módosítani szükséges. Ez a következő forgatókönyv szerint történik:

- Ha a kormányzás működésében van teljesítmény veszteség, akkor a szerepét a fékező nyomatéknak kell átvennie. Fatális hiba esetén a

kormány tervezésére alkalmazott súlyfüggvényben az ütemezési változó értékét módosítjuk:  $\rho_{st,new} = 0$ .

- Ha teljesítményvesztés következik be a fékkörök valamelyikének működésében, akkor a kormányzást kell megfelelően módosítani. Fontos megjegyezni, hogy a fékkörök valamelyikében bekövetkezett hiba aszimmetrikus féknyomatékot eredményez. Például a bal hátsó fékkör hibája esetén a jármű függőleges tengely körül óramutató járásával ellentétes fékező nyomatékot nem tud létrehozni. Következésképpen a fékrendszer valamelyik körében bekövetkezett hiba esetén a fékezésre alkalmazott súlyozásban  $\rho_{br}$  függ az  $M_{br}$  igényelt fékező nyomatéktól és egy  $\kappa_i$  erősítéstől. Az 15. ábrán illusztrált erősítést  $\kappa_{left}$  vagy  $\kappa_{right}$  értékekkel kell beállítani a detektált hibával összhangban. Az ábrán látható  $\kappa_-$  és  $\kappa_+$  változók szerepe a beavatkozók közötti túlságosan gyakori kapcsolások elkerülése.



15. ábra: Fékkör hibákra alkalmazott súlyfüggvény

A fékező nyomaték tervezésére alkalmazott súlyfüggvényben az ütemezési változó értékét a következőképpen módosítjuk:  $\rho_{br,new} = \kappa_i \rho_{br}$ , ahol figyelembe vesszük az igényelt nyomaték irányát. Példaként

$$\kappa_{right} = \begin{cases} 0 & \text{ha } M_{br} \leq 0 \\ 1 - (\kappa_+ - M_{br})/\kappa_+ & \text{ha } 0 < M_{br} < \kappa_+ \\ 1 & \text{ha } M_{br} \geq \kappa_+ \end{cases} \quad (23)$$

Két - egyidőben bekövetkező - hiba esetén a fékező nyomatékot célszerű maszkolni:  $\rho_{br,new} = 0$ . A rekonfiguráló és hibatűró irányítással kapcsolatos további részletek találhatóak az [5] hivatkozásban. .

A beavatkozók kiválasztásának fentiekben bemutatott heurisztikus jellege azt sugallja, hogy elméletileg megalapozott módszert dolgozzunk ki a fékezésen és a kormányzáson alapuló menetstabilizáló rendszerek közötti prioritás kezelésére.

A járműdinamikai modell állapotter reprezentációjában az egyes irányítások által elérhető halmazokat számítjuk ki annak érdekében, hogy az irányítások képességeit, azaz lehetőségeit/korlátait meghatározzuk. Illusztrációként megmutatjuk, hogy az  $\mathcal{R}$  elérhetőségi halmazok lineáris időinvariáns rendszerek esetén egysége energiájú bemenetekre a következőképpen számíthatók:

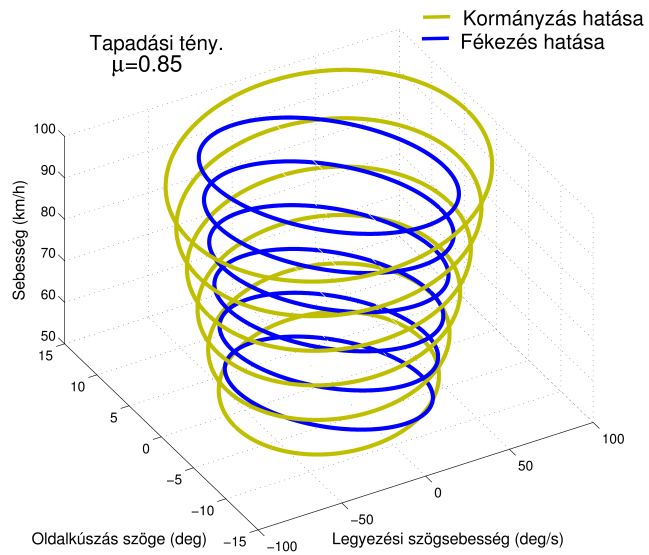
$$\mathcal{R} \triangleq \left\{ x(T) \begin{array}{l} x, u \text{ kielégíti } \dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)u, \quad x(0) = 0 \\ \int_0^T u^T u dt \leq 1, \quad T \geq 0 \end{array} \right\}. \quad (24)$$

Az összefüggés sokkal bonyolultabb abban az esetben, ha LPV modellt alkalmazunk és az út-jármű közötti kapcsolatot nemlineáris összefüggéssel vesszük figyelembe. Részletes elemzés található a [19] hivatkozásban.

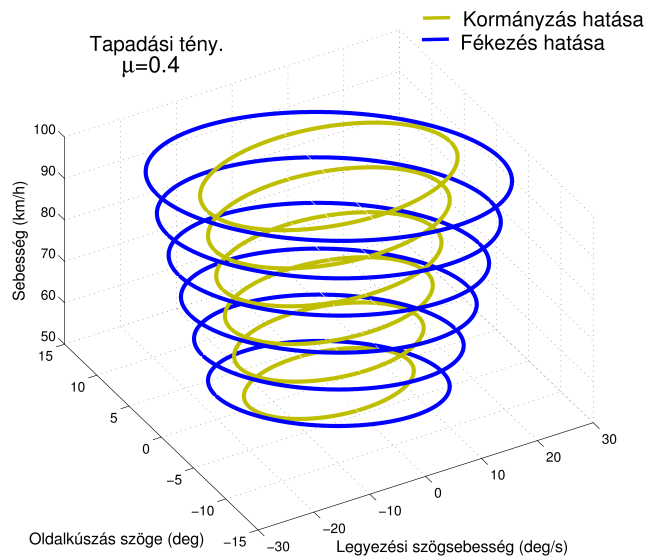
Fentiek alapján kormányzás és differenciális fékezés járműállapotokra való hatását elérhetőségi halmazokkal számítjuk ki. Az 16. ábrán ellipszoidok illusztrálják az elérhetőségi halmazokat az oldalkúszás szög és a legyezési szögsebesség állapotterében különböző járműparaméterek, mégpedig a sebesség és az út-jármű közötti tapadási tényező függvényében. A világos színű ellipszoidok által burkolt tér a kormányzás, míg a sötét színű ellipszoidok által burkolt tér a fékezés elérhetőségi halmazát mutatják különböző tapadási tényezővel jellemezhető eltérő minőségű úton. Az ábrák jól mutatják, hogy külső paraméterek függvényében az elérhető állapotter halmazok mind alakban, mind méretben eltérnek egymástól. Ez rámutat arra, hogy külső tényezők függvényében a beavatkozók közötti prioritást biztosítani tudjuk. Ez a rekonfigurációs stratégia alapja.

*Az integrált irányítás tervezésekor a beavatkozók összehangolását, a járműjellemzőktől függő prioritások kezelését ütemezési változóktól függő súlyfüggvényekkel biztosítjuk. A tervezés eredményétől elvárt követelmények a minőségi jellemzők interakcióját kihasználva súlyfüggvényekkel érhetők el.*





(a) tapadási tényező:  $\mu = 0.85$

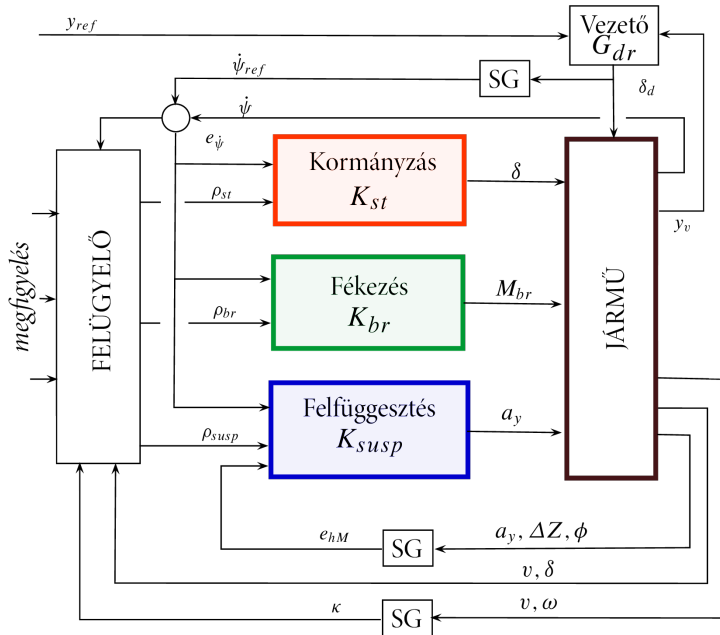


(b) tapadási tényező:  $\mu = 0.4$

16. ábra: Kormányzás és fékezés járműállapotokra való hatása különböző járműparaméterek függvényében

## Súlyozási stratégia az integrált járműirányításban

Az alábbiakban három irányítórendszert, mégpedig a kormányt, a féket és a változtatható-geometriájú felfüggesztést fogjuk integráltan alkalmazni a 17. ábra szerint. Egy trajektória követési feladatban megadott sebességgel kívánjuk az előírt pálya követését megoldani, miközben a menetstabilitást és kényelmes utazást is előírjuk.



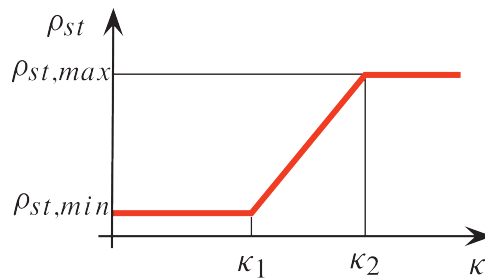
17. ábra: Kormány, fék és felfüggesztés szimultán irányítása

A kormánysszöggel alapvetően a jármű irányát módosítjuk, a fékkel a sebesség csökkentését és a jármű irányát korrigáljuk, a változtatható-geometriájú felfüggesztéssel a menetstabilitást és az utazási kényelmet tudjuk biztosítani. Az irányítórendszerek integrálása során az elosztott irányító rendszerek összehangolását és a beavatkozók prioritásának kezelését is biztosítani kell. Például az irányt alapvetően kormányval módosítjuk, viszont ha a szükséges kormánysszög értéke túl nagy, vagy a pályakövetés hibája megnő, akkor differenciális fékezéssel és a változtatható geometriájú futóművel módosítjuk a jármű irányát.

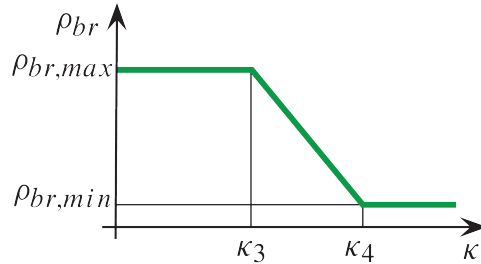


tervezésekor a követés pontossága és a kormányaszög szerepel a minőségi kritériumok között. Az egyes irányítórendszerek tervezését egymástól függetlenül fogalmaztuk meg. Az elosztott irányításban a szabályozók közötti összhangot és egyszersmind a prioritást az egyes kritériumokra tervezett és a súlyozó függvényekbe beépített ütemezési változók alkalmas megválasztásával biztosítjuk.

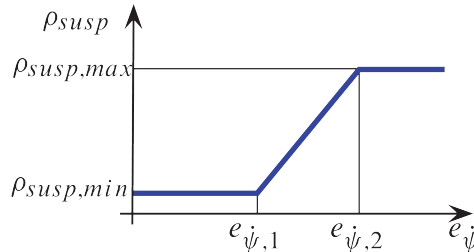
A hosszirányú slip függvényében a 19. ábrán illusztrált ütemezési változókat számítottunk a kormányaszögre, a differenciális fékezésre és a változtatható-geometriájú futóműre majd ezeket a tervezés során alkalmazott súlyfüggvényekbe építjük be.



(a)  $\rho_{st}$  ütemezési változó a  $\kappa$  hosszirányú szlip függvényében a kormányaszögre



(b)  $\rho_{br}$  ütemezési változó a  $\kappa$  hosszirányú szlip függvényében a féknyomatékon



(c)  $\rho_{susp}$  ütemezési változó az  $e_{\psi}$  követési hiba függvényében a változtatható-geometriájú futóművön

19. ábra: Paraméterfüggő súlyozás az elosztott irányítástervezésben

A slip kis értékeinél a kormányzóget nem büntetjük, viszont a differenciális fékezést igen. Ezzel azt érjük el, hogy alapértelmezésben a kormányt alkalmazzuk, viszont a hosszirányú slip növekedésekor az irányítás átkonfigurál a differenciális féknyomatékkal való beavatkozásra. A változtatható-geometriájú futóművel a jármű követési hibáját csökkenteni kívánjuk. Ez az irányítás mindaddig nem avatkozik be, amíg a követési hiba egy előírt értéket nem ér el, amit a 19.(c) ábra illusztrál.

Az így felírt ütemezési változókat ezután beépítjük a szabályozástervezésben alkalmazott súlyozó függvényekbe, s ezáltal a paraméterek megfelelő beállításával a kormány, a fék és a futómű összehangolt működését érjük/érhetjük el. A gyakorlati alkalmazásokban természetesen elkerüljük a töréspontokat és a függvények sem ennyire egyszerűek. A súlyfüggvények gyakorta több tényezőtől függnnek egyidejűleg, amit még a tervezés során figyelembe kell venni.

Az integrált irányítástervezés különböző megoldásaira mutatnak további megoldásokat a [3], [23] publikációk.

## 5 Az autonóm járműirányítás tervezése: kitekintés

Az autonóm járműfunkciók járműirányításban való térhódítása manapság könnyen tetten érhető. A vezető támogató rendszerek a járművön, illetve a jármű környezetében végzett mérések alapján önállóan hoznak döntéseket és a vezető tudta nélkül szükség szerint módosítják a jármű működését. Ezáltal csökkentik a kritikus járműállapotok és helyzetek kialakulását, ami a jármű üzemének hatékonyságát javítja, a vezető terhelését csökkenti és a megbízhatóságot növeli. A járműgyártók, a járműipari beszállítók, de az alaptevékenységükben infokommunikációval foglalkozó vállalatok is egyaránt autonóm járműveket építenek, illetve hagyományos járművet autonóm funkciókkal bővítenek. Ugyanezt teszik az akadémiai szektor résztvevői kutatási és oktatási tevékenységükkel összefüggésben.

Az autonóm jármű megalkotásához technológiai szempontból két fő tématerület kutatásán keresztül vezet az út. Az első téma a környezet megfelelő érzékelése, a közlekedési szituáció felmérése és értékelése, amely kellő információval látja el a járművet ahhoz, hogy mindenkor megfelelő döntéseket tudjon hozni. Ehhez a feladathoz korszerű alakfelismerési-, szenzorfüziós-, lokalizációs- és tanulóalgoritmusok kutatása szükséges. A második téma a jármű autonóm irányítása, ami magában foglalja a szituáció és cél alapú döntéseket, a trajektória tervezési feladatokat és az intelligens beavatkozást, a csoportos döntési algoritmusok kutatását.

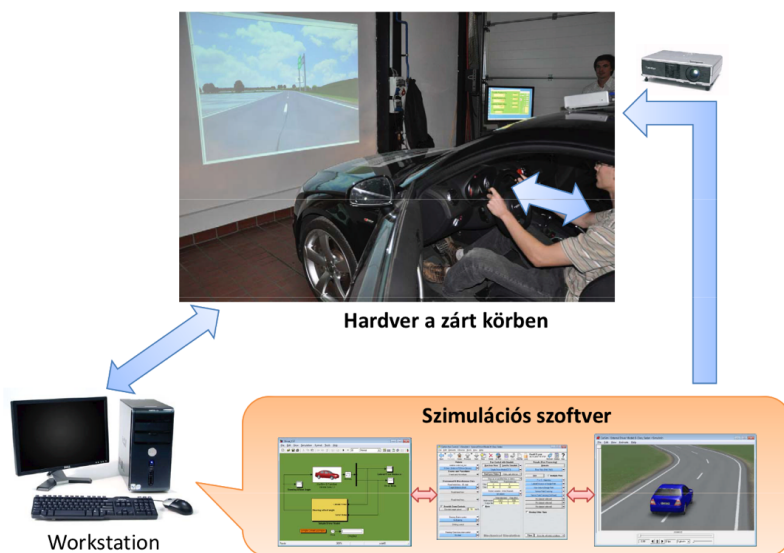
### A járművezető modellezése

Fentiek miatt a járművezető, a környezet és a jármű közötti összefüggések vizsgálata felértékelődött. A járművezető modellje az érzékelést, helyzetértékelést, döntést és beavatkozást leíró komponensek összekapcsolásával fogalmazható meg. Egy vezető támogató rendszerben a járművezető modelljének ismerete nagy fontosságú, hiszen ez biztosítja, hogy az irányítás során a vezető igényeihez alkalmazkodjunk.

A különféle trajektória követési feladatokban - ami az útvonalra és a sebességre vonatkozó előírást foglalja magában - a referencia jel meghatározása kritikus. Például a jármű manőverezése során a vezető az oldalirányú hibát a kormánykerék elfordításával csökkenti. Az így létrehozott kormányzóegység alapján a referencia legyezési szögsebesség számítható a jármű egyéb paramétereinek, így a sebesség, a jármű geometriája és a kormányzás dinamikájában lévő késleltetések figyelembe vételével. A járművezető stílusa, manőverek közbeni reakciói, viselkedése járműdinamikai jelek mérésével, valamint járműbe szerelt további érzékelők (belső kamera, pozíció érzékelő) felhasználásával elemezhető. A különféle hossz és oldalirányú gyorsulások, a biztonsági rendszerek aktivitásának sűrűsége, fékezési jellemzők, üzemanyag fogyasztás, a manőverek

végrehajtásának módja, de a fáradékonyság is jól jellemzik a járművezető vezetési stílusát.

A járművezető modellezésének céljából egy járműre alapozott oktatási és kutatási célokra egyaránt alkalmas járműszimulátort építettünk, aminek felépítését a 20. ábra mutatja. A jármű egy laboratóriumban van ugyan, de a vezető a kabinban ülve ugyanúgy vezeti, mintha az úton haladna. Kormányval manőverez, a gázpedál/fékpédál lenyomásával gyorsíthat és lassíthat. A háttérben egy szimulációs szoftver fut, ami a jármű dinamikai mozgásának leírására képes, valamint egy virtuális környezetet alakít ki úttal, járművekkel és látványelemekkel. A szimuláció során különféle külső és belső paraméterek módosíthatók, így az útpálya geometriai viszonyai, a jármű és a kerék közötti tapadási tényező. A jármű vezetője látja az utat, a műszerfalat, hallja a motorhangot és a kerékzajt. A kutatás célja, hogy a vezetési stílus beépüljön a jármű irányítástervezésébe, s ily módon az autonóm járműirányítás közelítsen az emberi igényekhez. Ennek érdekében különféle vezetési modellek kerültek kidolgozásra, amik beépültek a jármű modelljébe és irányításába.



20. ábra: Járművezető modellezésére felépített szimulációs környezet

### Prediktív sebességtervezés

*A jármű irányítórendszereit nemcsak a járműszinten egymással, hanem globálisan a környezettel is össze kell hangolni. A következő példában a jármű sebességét kívánjuk oly módon megválasztani, hogy figyelembe vesszük a jármű haladására és környezetére jellemző globális és lokális információkat. Globális*

információk lehetnek az előírt menetidő/szállítási idő, a jármű fogyasztása, az út domborzati viszonyai, az útra vonatkozó előírások, sebességkorlátozások, a jármű menetstabilitása. Pillanatnyi információknak tekintjük a környezetünkben lévő járművek sebességét, torlódásokat, de a haladási sebességet befolyásoló útépitéseket is.

A jármű sebességének megtervezése egy többkritériumos tervezési feladathoz vezet, amivel a szükséges erőigény minimalizálása érhető el, miközben a szállítási idő betartható. A megoldás elve az, hogy a jármű haladása során az előtte lévő 2 – 3 km távolságot nem feltétlenül azonos hosszúságú  $n = 5 - 10$  szakaszra bontjuk. Az egyes szakaszokra  $v_{r,i}, i \in \{1, n\}$  referencia sebességeket írunk elő az útra vonatkozó előírásokkal, illetve azok változásával összhangban. A jelenlegi és a következő referencia sebességekre  $Q, \gamma_i$  súlyokat adunk, melyekre érvényes a  $Q + \sum \gamma_i = 1$  összefüggés. Következésképpen a  $Q = 1$  választás a hagyományos sebességtartó szabályozásnak felel meg, míg azonos súlyozást alkalmazva egy azonos súlyozást alkalmazó prediktív szabályozást kapunk. Mivel az útvonal geometriai viszonyainak és a menetszélnek az ismeretét feltételezzük, ezért a jármű haladása során fellépő zavarásokban szélereőből és emelkedőből adódó része becsülhető  $F_{d,i}$ . A jármű sebessége, a gyorsulása, az emelkedési viszonyok, az előírt referencia sebességek és a súlyok alapján kiszámítható:

$$\lambda = \sqrt{\vartheta - 2s_1(1 - Q - W)(\ddot{\xi}_0 + g \sin \alpha)} \quad (25)$$

ahol  $\vartheta$  paraméter a következő:

$$\vartheta = Qv_{ref,0}^2 + \sum_{i=1}^n \gamma_i v_{ref,i}^2 + \frac{2}{m} \sum_{i=1}^n s_i F_{d,i,r} \sum_{j=i}^n \gamma_j. \quad (26)$$

Az erőigény és a menetidő szempontjainak optimalizációs kritériumai a következőképpen fogalmazhatók meg. Az első optimalizáció célja a jelen pillanatban szükséges hosszirányú erő minimalizálása:

$$F_{l1}^2 \rightarrow Min! \quad (27)$$

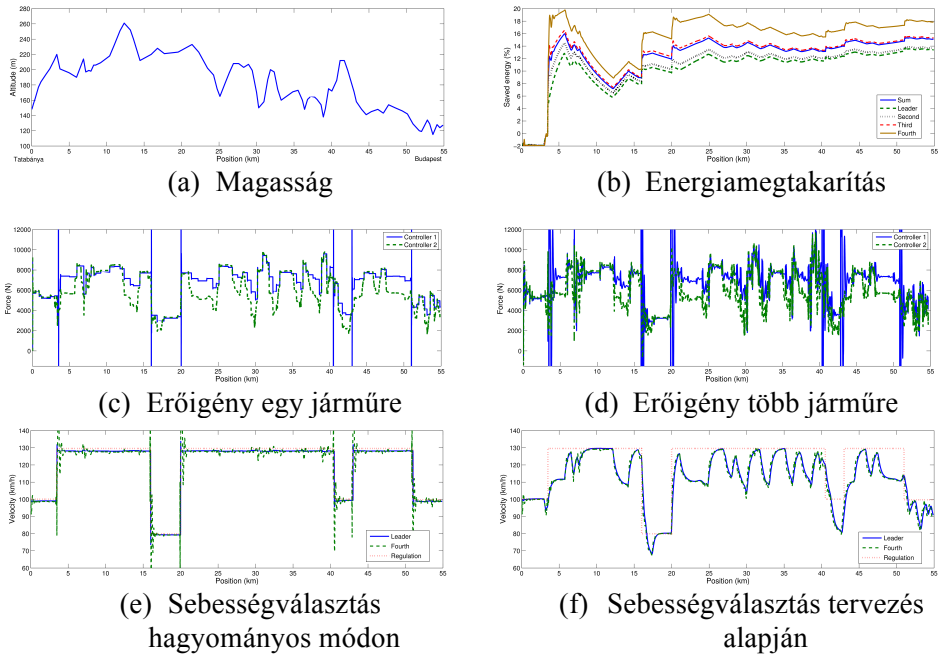
Az utazási idő minimalizálása az előírt referencia sebességek tartásával a következő:

$$|v_{ref0} - \dot{\xi}_0| \rightarrow Min! \quad (28)$$

A fenti optimalizációk természetesen eltérő eredményekhez vezetnek. Emiatt vezetjük be az  $R_1$  súlyt a hosszirányú erő minimalizálására és az  $R_2$  súlyt az utazási idő minimalizálására, melyekre  $R_1 + R_2 = 1$ . Az  $R_1$  növelésével a

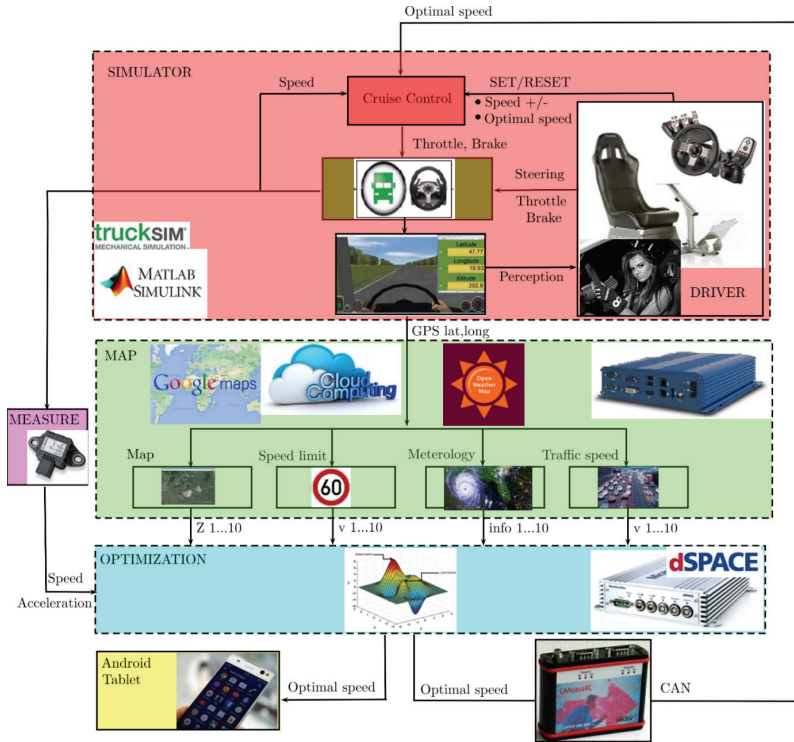


hosszirányú erő növelésére helyezük a hangsúlyt és az utazási időt kevésbé vesszük figyelembe.



21. ábra: Sebességtervezés a Budapest-Tatabánya útvonalon

A Budapest-Tatabánya útvonalon végzett szimulációs eredmények láthatók az 21. ábrán. Az ábrák a magassági viszonyokat, az energiamegtakarítást, a hagyományos módon megválasztott sebességeket, a megtervezett sebességeket, valamint az erőigényt mutatják. Az 21(b) ábra a járművek energiamegtakarításait mutatják az út függvényében. Az ábráról leolvasható, hogy az 55 km távolságon közel 15%-os energiamegtakarítást értünk el, miközben az utazási idő csak 2 perccel növekedett meg. A kidolgozott sebességtervezési módszer elemzésére szolgáló szimulációs környezet felépítését illusztrálja a 22. ábra.



22. ábra: Paraméterfüggő súlyozás az elosztott irányítástervezésben

## Járműoszlop sebességtervezése

A sebességtervezés módszerének járműoszlopban való alkalmazása komoly előnyökkel jár. Mivel az oszlopban minden jármű azonos sebességgel halad, ezért azt a közös  $\bar{\lambda}_1$  sebességet kell megtervezni, amivel az egész járműoszlop együttes energiaigénye minimalizálható. A módszerben úgy járunk el, hogy minden járműre egymástól függetlenül kiszámítjuk a  $\lambda_j, j \in \{1, N\}$  optimális sebességet. Ezután megbecsüljük az egyes járművek sebességei közötti összefüggést, ami a  $j$ -edik járműre a következő:  $\dot{\xi}_{0,j} = \hat{G}_{j-1} \dot{\xi}_{0,j-1}$ . Végül a közös sebességet számítjuk ki, ami valamennyi jármű sebességének figyelembe vételével minimális, azaz optimális a teljes járműoszlop szempontjából:

$$\sum_{j=1}^n |\lambda_j - \dot{\xi}_{0,j}|^2 \rightarrow 0, \quad (29)$$

ahol az oszlop járműveinek sebességei között összefüggés:  $\dot{\xi}_{0,j} = \prod_{k=1}^{j-1} \hat{G}_k \bar{\lambda}_1$ .

## Autonóm járművek a forgalomban

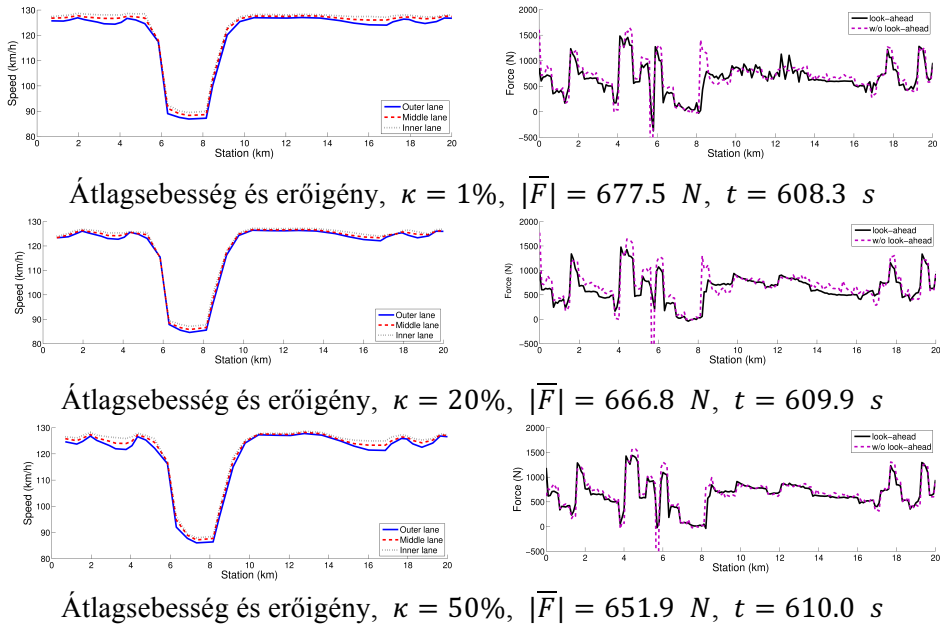
*A megtervezett sebességet alkalmazó jármű a közlekedés résztvevője, ezért sebességével befolyásolja a környezetében lévő járművek haladását, de a többi jármű is befolyásolja a sebesség megválaszthatóságát.* Mivel az autonóm járművek megjelenésekor még lesznek hagyományos járművek is a közutakon, ezért vizsgálatokat végeztünk az autonóm jármű közlekedési körülményekhez való adaptív alkalmazkodásával kapcsolatban. Fontos szempont, hogy ne zavarja és semmiképpen se veszélyeztesse a közlekedésben részt vevő többi jármű haladását. Az autonóm járművet különféle hatások érik, amiket figyelembe kell venni a haladás során. Néhány esetet említve: az előttünk lassabban haladó jármű sebességét, a mögöttünk nagyobb sebességgel érkező jármű zavartalan haladását, a közlekedési torlódásokat, továbbá a jelzőlámpás kereszteződéseket és az egyenrangú/alárendelt útkereszteződéseket. A sebességtervezéssel kapcsolatos további információk találhatók a [15], [16] publikációkban.

Az autonóm járművek jelentős hatással lesznek a forgalomra, így a közlekedésben résztvevő hagyományos járművek haladására is, lásd a [18] cikket. Az alábbiakban azt elemezzük, hogy a megtervezett sebességgel haladni akaró autonóm járművek milyen hatással lesznek a forgalomra, benne a hagyományosan vezetett járművekre. Egy háromsávós, 20 km hosszú autópályán átlagosan  $q_{in} = 3000$  számú jármű halad, s az  $R_1 = 0.7$  energiahatékonyságú autonóm járművek arányát a forgalomban résztvevő járművekhez képest  $\kappa = 1\%$ ,  $\kappa = 20\%$  és  $\kappa = 50\%$  módon változtattuk. Az autonóm járművek arányának növekedésével az összes jármű figyelembevételével számolt hosszirányú átlagos erő és az üzemanyag megtakarítása szignifikánsan csökkenő tendenciát mutat, ugyanakkor az átlagos utazási idő kismértékben növekszik. Erre mutatnak illusztrációkat a 23. ábra esetei. Hasonló tendencia figyelhető meg az  $R_1$  energiahatékonysági paraméter növekedésével is. Következésképpen az útvonal átbocsátó képessége az  $R_1$  és  $\kappa$  paraméterek növekedésével csökken.

## Környezet érzékelés és a szituáció értékelés

Az autonóm járművek irányításában a környezet érzékelés és a szituáció értékelés alapvető szerepet kap, hiszen a járműnek komplex döntéseket kell hoznia. Monitorozni kell a jármű úton való elhelyezkedését, a jármű körüli objektumok tulajdonságait és mozgásállapotát, továbbá a közlekedés szereplőinek járműhöz viszonyított helyzetét. Az érzékelés a jelenleg kizárólag a jármű önálló érzékelésére támaszkodó architektúra bővülésével fog megvalósulni. A további jelek és információk egyrészt a járművek közötti (V2V), másrészt a jármű-infrastruktúra (V2I) kommunikációiból származnak. Következésképpen a kezelni szükséges információ mennyisége ugrásszerűen növekszik. Új feladatok jelentek meg, mint az adatok elemzése és szűrése, lényeges elemeinek

kiemelése, vagy az adatbányászat. A biztonságos kommunikáció oldaláról a valós idejű hihetőség vizsgálat, valamint a jogosultság ellenőrzése szintén nagy kihívást jelentenek.



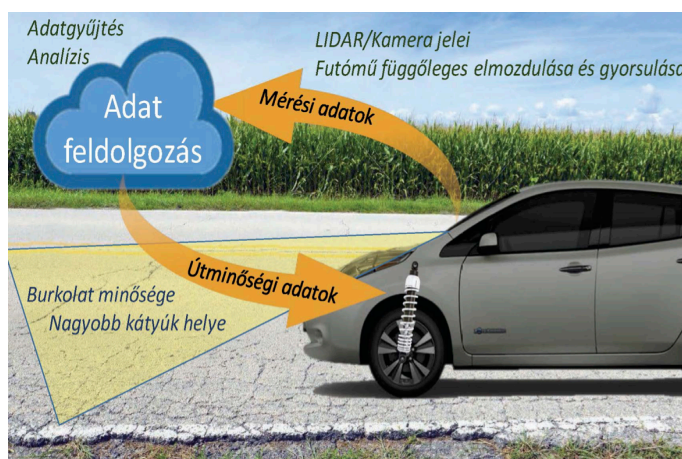
23. ábra: Autonóm járművek hatása a forgalomra  
( $q_{in} = 3000 \text{ veh/h}$ ,  $R_{1,max} = 0.7$ )

Az érzékelt adatok alapján a járműnek a mindenkori forgalmi szituációban kell döntéseket hoznia, melyeknek végrehajthatónak kell lennie. Ennek érdekében szükséges a trajektória tervezése a környezet jelenlegi és becsült jövőbeli alakulásának figyelembe vételével. Az irányítás alacsonyabb szintjén a tervezett trajektóriát olyan algoritmussal kell megvalósítani, ami figyelembe veszi a szenzorok információit és a jármű beavatkozó rendszerét összehangoltan irányítja. A szituációk értelmezése és értékelése csak nagyon egyszerű, speciális esetekben - autópálya forgalom esetén - kezelhető klasszikus módszerekkel. A bonyolult, jellemzően városi forgalomban történő szituációk értelmezése mesterséges intelligencia módszerek, továbbá komplex, intuitív és tanuló algoritmusok bevonását igénylik.

A jármű-infrastruktúra-felhő kommunikációban is óriási lehetőségek rejlenek. Az interneten keresztül elérhető felhő jelentős erőforrásával és elosztott számítási kapacitásával biztosítással költséghatékony módon látja el a járművet további információkkal. Megemlíthető a jármű-flotta felügyelete, a környezettudatos vezetés támogatása, vagy a kooperatív navigáció. A 24. ábra a

felfüggesztési rendszer felhő információkon alapuló adaptív felhasználását illusztrálja. Az útterjesztés aktuális értékeinek az interneten keresztül elérhető térképi adatbázisok és alkalmazások felhő adatbázisaiból való periodikus lekérdezésével prediktív irányításra van lehetőség, ami a jármű menetstabilitásának, lengéskényelmének és biztonságának összehangolását garantálja.

Megjegyezzük, hogy a korábban említett sebességtervezési módszerek is különféle szerverek adatbázisait és alkalmazásait használhatják annak érdekében, hogy a hatékonyságot és a megbízhatóságot javítsák. Néhány példát említve: térképi adatbázis szükséges a topografikus információk eléréséhez és a navigációhoz, mobil szolgáltatók adhatnak információkat az úton lévő járművek aktuális sebességviszonyairól, továbbá az útépitést és karbantartást végző vállalatok adhatnak információkat az ideiglenes sebességhatárolásokról és az esetleges elterelésekről.



24. ábra: Paraméterfüggő súlyozás az elosztott irányítástervezésben

Az autonóm járműirányítás feladatai kibővülnek azoknak az eseteknek a kezelésével, melyek a környezetérzékelési rendszerek hiányosságait, vagy kimaradásait képesek áthidalni robusztus tervezéssel és biztonságos végrehajtással. A jelenlegi félautonóm megoldások ilyen esetekben az irányítást visszaadják a jármű vezetőjének, akinek a korábbi nyugalmi és passzív állapotából aktiválódva kellene a kritikus helyzetre reagálnia. A járművezető kritikus helyzetekhez való hatékony adaptálódása jelenleg kutatási fázisban van és több tudományterület együttes alkalmazását igényli. Az autonóm járműirányítási kutatások hálózati szintű becslési és irányítási módszerek tervezésére irányulnak, amelyekkel a forgalom multikritériumos optimalizálásán keresztül a forgalmi helyzet kezelhető, az energiafogyasztás csökkenthető és a

szállítási idő betartható.

Végezetül megemlítjük, hogy az irányításméleti és specifikusan a járműdinamikai és irányítási kutatások eredményeivel, trendjeivel kapcsolatban további részletek olvashatók a [7], [26] könyvekben.

## Irodalomjegyzék

- [1] G. Becker, A. Packard, D. Philbrick, and G. Balas. Control of parametrically dependent linear systems: A single quadratic Lyapunov approach. *American Control Conference, San Francisco*, pages 2795–2799, 1993.
- [2] J. Bokor and G. Balas. Linear parameter varying systems: A geometric theory and applications. *16th IFAC World Congress, Prague*, 2005.
- [3] M. Doumiati, O. Sename, J. Martinez, L. Dugard, P. Gáspár, and Z. Szabo. Integrated vehicle dynamics control via coordination of active front steering and rear braking. *European Journal of Control*, 19(2):121–143, 2013.
- [4] P. Gáspár. Model-based control design of integrated vehicle systems. *Towards Intelligent Engineering and Information Technology (Eds. Rudas, I. and Kacprzyk, J.)*, pages 103–119, 2009.
- [5] P. Gáspár and B. Németh. Integrated control design for driver assistance systems based on LPV methods. *International Journal of Control*, 89(12):2420–2433, 2016.
- [6] P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor. LPV design of fault-tolerant control for road vehicles. *Int. J. Applied Mathematics and Computer Science*, 22(1), 2012.
- [7] P. Gáspár, Z. Szabó, J. Bokor, and B. Németh. *Robust Control Design for Active Driver Assistance Robust Control Design for Active Driver Assistance Systems: A Linear-Parameter-Varying Approach*. Springer, 2017.
- [8] P. Gáspár, Z. Szabó, G. Szederkényi, and J. Bokor. Design of a two-level controller for an active suspension system. *Asian Journal of Control*, 14(3):664–678, 2012.
- [9] P. Gáspár, I. Szászi, and J. Bokor. Active suspension design using linear parameter varying control. *Int. J. Vehicle Autonomous Systems*, 1:206–221, 2003.
- [10] P. Gáspár, I. Szászi, and J. Bokor. Active suspension design using the mixed  $\mu$  synthesis. *Vehicle System Dynamics*, 40(4):193–228, 2003.
- [11] P. Gáspár, I. Szászi, and J. Bokor. The design of a combined control structure to prevent the rollover of heavy vehicles. *European Journal of Control*, 10(2):1–15, 2003.
- [12] P. Gáspár, I. Szászi, and J. Bokor. Reconfigurable control structure to prevent the rollover of heavy vehicles. *Control Engineering Practice*, 13(6):699–711, 2005.
- [13] B. Németh and P. Gáspár. Mechanical analysis and control design of

- McPherson suspension. *Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing*, 7(2):173–193, 2012.
- [14] B. Németh and P. Gáspár. Control design of variable-geometry suspension considering the construction system. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 62(8):4104–4109, 2013.
- [15] B. Németh and P. Gáspár. Design of vehicle cruise control using road inclinations. *Int. J. Vehicle Autonomous Systems*, 11(4):313–333, 2013.
- [16] B. Németh and P. Gáspár. Optimised speed profile design of a vehicle platoon considering road inclinations. *IET Intelligent Transport Systems*, 8:200–208, 2014.
- [17] B. Németh and P. Gáspár. Nonlinear analysis and control of a variable-geometry suspension system. *Control Engineering Practice*, 61(1):279–291, 2017.
- [18] B. Németh and P. Gáspár. The relationship between the traffic flow and the look-ahead cruise control. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 18(5):1154–1164, 2017.
- [19] B. Németh, P. Gáspár, and T. Péni. Nonlinear analysis of vehicle control actuations based on controlled invariant sets. *Int. J. Applied Mathematics and Computer Science*, 26(1):31–43, 2016.
- [20] B. Németh, B. Varga, and P. Gáspár. Hierarchical design of an electro-hydraulic actuator based on robust LPV methods. *International Journal of Control*, 88(8):1429–1440, 2015.
- [21] A. Packard and G. Becker. Quadratic stabilization of parametrically dependent linear systems using parametrically dependent linear feedback. *Advances in Robust and Nonlinear Control Systems*, 43:29–36, 1992.
- [22] C. Poussot-Vassal, O. Sename, L. Dugard, P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor. A new semi-active suspension control strategy through LPV technique. *Control Engineering Practice*, 2008.
- [23] C. Poussot-Vassal, O. Sename, L. Dugard, P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor. Attitude and handling improvements through gain-scheduled suspensions and brakes control. *Control Engineering Practice*, 19(3):252–263, 2011.
- [24] W.J. Rugh and J.S. Shamma. Research on gain scheduling. *Automatica*, 36:1401–1425, 2000.
- [25] C. Scherer, P. Gahinet, and M. Chilali. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization. *IEEE Trans. Automatic Control*, 42(7):896–911, 1997.
- [26] O. Sename, P. Gáspár, and J. Bokor. *Robust Control and Linear Parameter Varying Approaches*. Springer Verlag, Berlin, 2013.
- [27] J.S. Shamma and M. Athans. Guaranteed properties of gain scheduled control of linear parameter-varying plants. *Automatica*, 27:559–564, 1991.
- [28] T.V. Vu, O. Sename, L. Dugard, and P. Gaspar. Enhancing roll stability of heavy vehicle by LQR active anti-roll bar control using electronic servovalve hydraulic actuators. *Vehicle System Dynamics*, 55(9):1405–1429, 2017.

- [29] F. Wu. A generalized LPV system analysis and control synthesis framework. *International Journal of Control*, 74(7):745–759, 2001.
- [30] F. Wu, X.H. Yang, A. Packard, and G. Becker. Induced  $L_2$  norm controller for LPV systems with bounded parameter variation rates. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 6:983–988, 1996.
- [31] F. Yu, D.F. Li, and D.A. Crolla. Integrated vehicle dynamics control: State-of-the art review. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China*, 2008.
- [32] A. Zin, P. Gáspár, O. Sename, L. Dugard, and J. Bokor. An LPV/Hinf active suspension control for global chassis technology: Design and performance analysis. *Vehicle System Dynamics*, 46:889–912, 2008.