



SZÉKFOGLALÓ ELŐADÁSOK
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN

GÁSPÁR PÉTER

JÁRMŰORIENTÁLT IRÁNYÍTÁSELMÉLETI KUTATÁSOK



Gáspár Péter

JÁRMŰORIENTÁLT
IRÁNYÍTÁSELMÉLETI KUTATÁSOK

Székfoglaló előadások a Magyar Tudományos Akadémián

Gáspár Péter

JÁRMŰORIENTÁLT
IRÁNYÍTÁSELMÉLETI KUTATÁSOK



Magyar Tudományos Akadémia, 2020

Az akadémiai székfoglaló előadás elhangzott 2016. október 18-án.

© Gáspár Péter, 2020

© Magyar Tudományos Akadémia, 2020

Magyar Tudományos Akadémia
1051 Budapest, Széchenyi István tér 9.
mta.hu

Kiadja: Magyar Tudományos Akadémia
A kiadásért felel: Lovász László, az MTA elnöke
Olvasószerkesztő: Szigeti László
Borító és tördelés: Ave Sophia | www.avesophia.hu
Nyomdai munkálatok: Prime Rate Kft.

ISSN 1419-8959

ISBN 978-963-508-937-6

ISBN 978-963-508-938-3 (PDF)

ISBN 978-963-508-939-0 (ePub)

DOI 10.36820/szekfoglalo.2020.gaspar

Minden jog fenntartva!

1. Bevezetés

A járművekkel szemben megfogalmazott egyéni és társadalmi elvárások állandóan növekednek. A feladatok sokrétűek: a menetstabilitás, a kényelem, a megbízhatóság, a biztonság, a hatékonyság, a környezetkímélés, a 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-e 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 hatékonyságvesztés. Egy korszerű irányítástervezési megoldásban ezért több beavatkozó együttes hatására építenek, ami a beavatkozás hatékonyságát növeli, s ily 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 a működés közben jelentkező hatékonyságvesztést. Az erőforrások felhasználásának összehangolása és így kihasználásuk növelése, a prioritások kezelése, a rekonfigurációs képesség kihasználása alapvető jelentőségű. Az integrált irányítástervezés során nagy

jelentőségű az egyes komponensek közötti kommunikáció, amely a tervezés szempontjából további dinamikai hatást jelent.

A járművekkel kapcsolatban megfogalmazott összetett irányítási feladatok megoldása három pilléren alapszik. Egyrészt az elektronikai és automatizálási hardverelemek 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 modellalapú 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 modellalapú irányítástervezése

A fejezet járműkomponensek és -funkciók tervezési esetein keresztül áttekintést nyújt a modellalapú 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

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

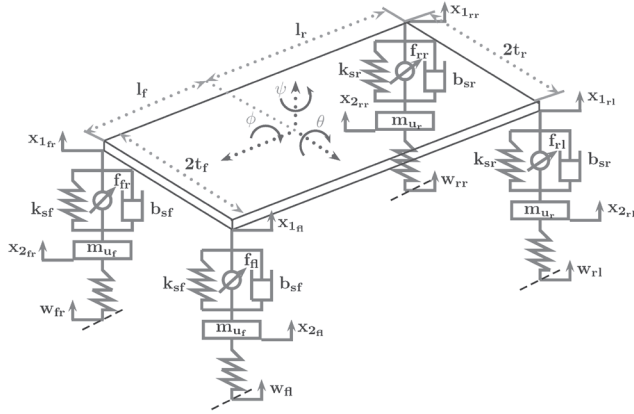
alakú egyenletek, ahol $T(q, \dot{q})$ a kinetikai (mozgási) energia, $U(q)$ a potenciális (helyzeti) energia, $D(\dot{q})$ a disszipációs (csillapítás által elnyelt) energia és f egy külső erő. Célszerűen a modellt az egyensúlyi helyzet körüli lineáris időinvariáns (LTI) állapotter-reprezentációban 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.

2.1. 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 kocsiszkekrény) középpontjának és a rugózatlan tömegek (a futómű) négy sarokpontjának függőleges gyorsulásai (\ddot{z}_s , $\ddot{z}_{u,ij}$), valamint a hossz tengely körüli támo­lygási (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 modellalapú irányítástervezésben ezt a modellt kiegészítjük azokkal a minőségi követelményekkel, amelyeket az irányítással szemben megfogalmazunk. Az aktív/félaktív felfüggesztés tervezésének minőségi követelményei felsorolásszerűen a következők: az utazási kényelem javítása, a dinamikus kerékterhelés csökkentése, a felfüggesztési munkatér korlátozásának biztosítása, a 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	$z_4 = \dot{\theta} \rightarrow \min$
Bólintás	$z_5 = \ddot{\phi} \rightarrow \min$
Beavatkozás	$z_6 = u_{ij} \rightarrow \min$

Ezek a követelmények mind a menetstabilitás, mind a 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, amely a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását – indukált L_2 operátor norma értelemben – az előírt γ értéken belül tartja, azaz

$$\inf_K \sup_{\|d\|_2 \neq 0, d \in L_2} \frac{\|z\|_2}{\|d\|_2} < \gamma \quad (7)$$

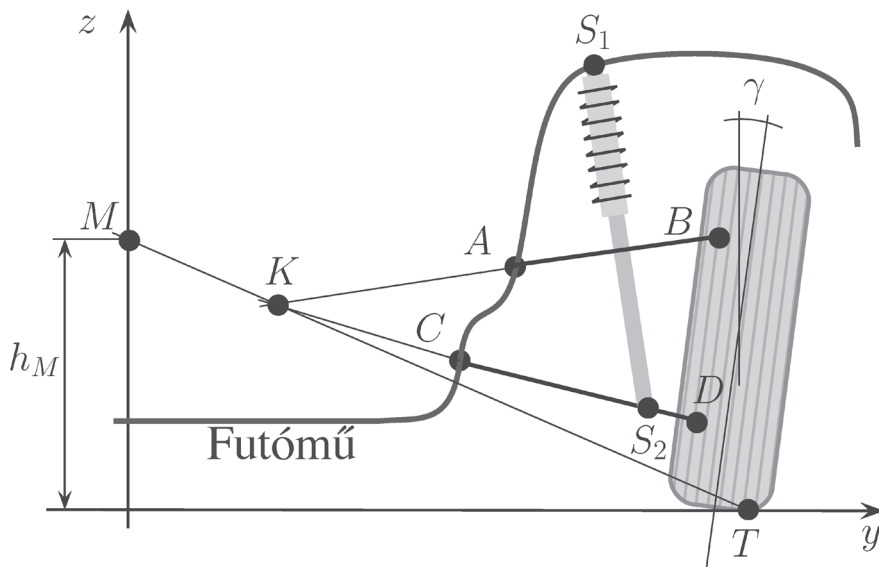
Az irányítási feladat megfogalmazásakor arra törekszünk, hogy a megoldás során lehetőleg alkalmazhatók legyenek a standard elemzési és tervezési eszközök. A kihívás abban van, hogy a többkritériumos optimalizációs mérnöki feladatot és követelményeket úgy kell megfogalmazni, hogy összekapcsoljuk őket a standard módszerekkel. A felfüggesztéstervezéssel kapcsolatos további információk: Gáspár–Szászi–Bokor 2003a; 2003b; Poussot–Vassal et al. 2008; Zin et al. 2008.

2.2. 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 α oldalkúszási szögétől és a γ

kerékdőlés szögétől egyaránt függ. Emiatt a kerék dőlési szögének megfelelő szabályozásával módosítani tudjuk a jármű nyomvonalát.

A futóművel négyféle minőségi jellemzőre tudunk hatni, mégpedig a trajektória követésére, 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 nyomtávvaltoztatás (z_3) a trajektóriakövetéssel és a gumikopással. A minőségi jellemzőket a 2. táblázat mutatja. Ezekből adódóan az irányítástervezés többkritériumos optimalizációs feladathoz vezet.



2. ábra: A változtatható geometriájú futómű illusztrációja

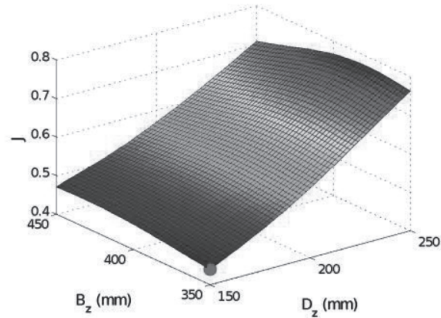
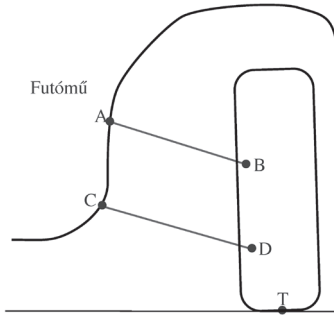
A változtatható geometriájú futómű **konstrukciós tervezését és irányítástervezését szimultán módon** kell végrehajtani a közöttük fennálló szoros kölcsönhatás miatt. Három szabályozást tervezünk, melyek mindegyikének alapfeladata a trajektóriakövetés teljesítése. Ezenkívül az első szabályozásban a támolygási szög

minimalizálását, a másodikban a nyomtávvaltozás minimalizálását, míg a harmadikban az irányítójel minimalizálását tűzzük ki célul.

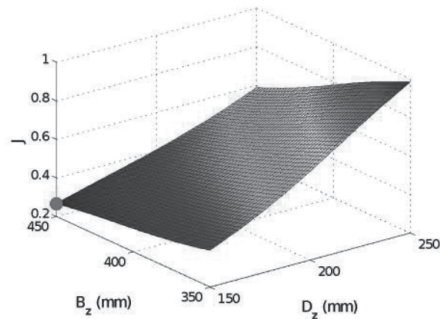
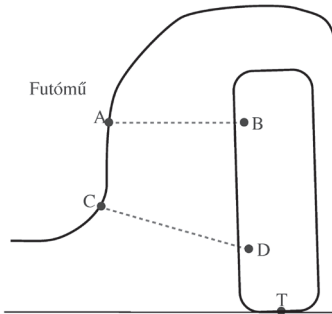
2. táblázat: A változtatható geometriájú futómű minőségi jellemzői

Minőségi jellemző	
Trajektóriakövetés	$z_1 = \psi_{ref} - \psi \rightarrow \min$
A támolygási szög csökkentése	$z_2 = \Delta h_M \rightarrow \min$
A beavatkozás csökkentése	$z_3 = a_y \rightarrow \min$
A nyomtávvaltozás 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.



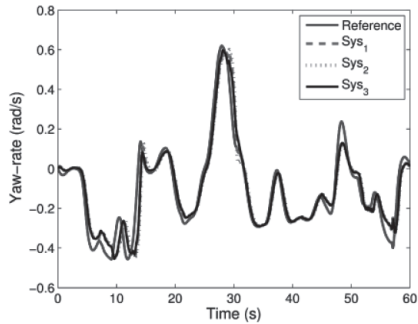
a) Sys_1 : a támolygási szög minimalizálása ($B_z = 350 \text{ mm}$, $D_z = 150 \text{ mm}$)



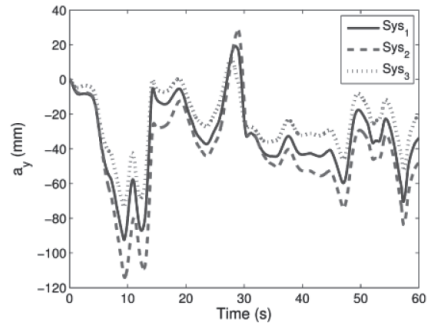
b) Sys_2 : a nyomtávváltozás minimalizálása ($B_z = 450 \text{ mm}$, $D_z = 150 \text{ mm}$)

3. ábra: A konstrukciós tervezés és az irányítástervezés összhangja

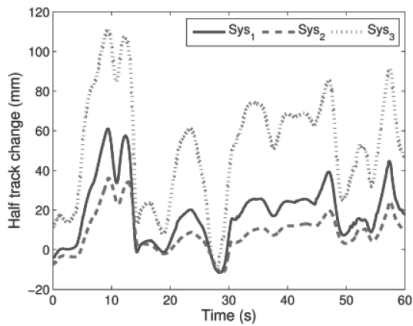
A 4. ábra illusztrálja az eltérő konstrukciós elrendezések és az irányítástervezés közötti kölcsönhatást. A legyezési szögsebesség valamennyi elrendezés esetén jól követi a referenciajelet. A támolygási szög a Sys_1 elrendezésnél a legkisebb, a nyomtávváltozás a Sys_2 -nél, míg az irányítójelet a Sys_3 -nál, ahogy az a tervezésből várható volt. Ezek az ábrák jól illusztrálják a konstrukciós tervezés és az irányítástervezés közötti összhangot, valamint az irányítás minőségi jellemzői közötti kompromisszumos megoldás szükségességét.



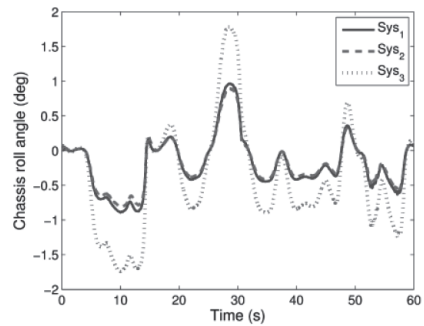
a) Legyezési szögsebesség



b) Irányítójel



c) Nyomtávvaltozás



d) Támolygási szög

4. ábra: Minőségi jellemzők különféle konstrukciós elrendezéseknél

A különféle minőségi követelmények közötti összhang megteremtése érdekében a következő megoldást dolgoztuk ki. Bevezetünk egy változót, amelyet az útviszonyoktól és a jármű manővereitől függően számítunk ki. Ezt a változót ütemezési változónak nevezzük, és ρ -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 kipörgésveszély). Ellenkező esetben az ütemezési változót

értékét megnöveljük, és a fenti kritikus szituációkban magas értéken tartjuk. Az irányítástervezési feladat formalizálásakor a különféle minőségi jellemzőkhöz súlyozófüggvényeket választunk. A súlyozófüggvényekbe beépítjük a fentiekben definiált ρ ütemezési változó értékét.

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

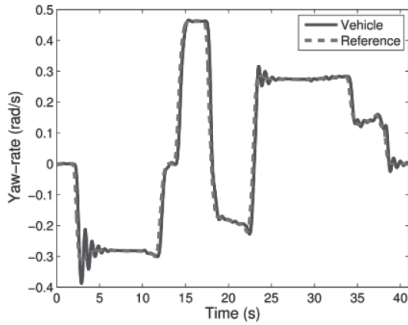
A fenti többkritériumos optimalizáción alapuló irányítástervezési feladatban azt a szabályozót keressük, ami a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását – indukált L_2 operátor norma értelemben – az előírt γ értéken belül tartja, miközben a ρ ütemezési változó P működési tartományát figyelembe veszi:

$$\inf_K \sup_{\rho \in P} \sup_{\|d\|_2 \neq 0, d \in L_2} \frac{\|z\|_2}{\|d\|_2} < \gamma \quad (9)$$

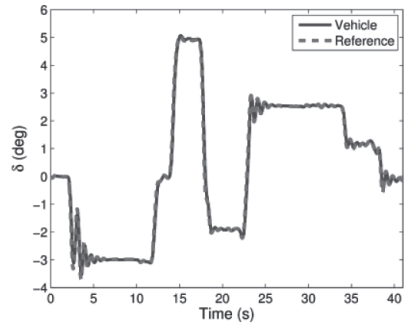
A trajektóriakövetési tervezés eredményét az 5. ábra illusztrálja. Változtatható geometriájú futómű tervezésével kapcsolatos további információk: Németh–Gáspár 2012; 2013a.

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 mozgásával. A jármű irányítástervezése a gyakorlatban hierarchikusan történik. A felső szintű irányítás tervezésekor virtuális szabályozási erőket számítunk ki a minőségi specifikációk alapján, míg az alsó szintű irányítás tervezésekor a megtervezett virtuális erőket állítjuk elő a beavatkozók fizikai tulajdonságainak figyelembevételével.

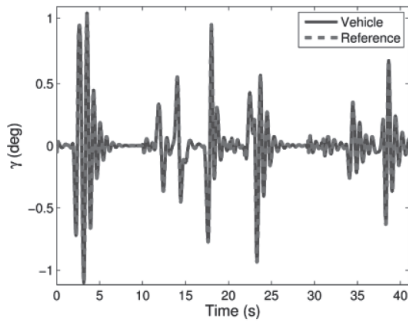
Egy hidraulikus rendszer által létrehozott erő dinamikus kialakulását két egyenlettel írhatjuk le. Az egyik a nyomáskülönbség dinamikájára vonatkozik, ami a végpontok közötti sebességkülönbségtől és a hidraulikus áramtól függ, a másik pedig a szelepelmozdítás dinamikáját veszi figyelembe. Az alsó szintű irányítástervezést a gyakorlatban egy jelkövetési feladat megoldásával azonosíthatjuk, melynek során valós fizikai jelekkel (szelepelmozdítással) kívánjuk a felső szinten előírt virtuális jeleket (beavatkozó erőt) követni. A hierarchikus irányítástervezéssel kapcsolatos további információk: Gáspár et al. 2012; Németh–Varga–Gáspár 2015.



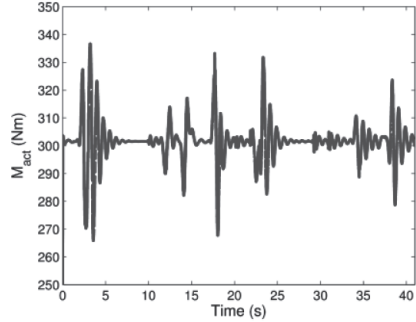
a) Szögsebesség



b) Jobb oldali kormányzás



c) Jobb oldali kerékdöntés



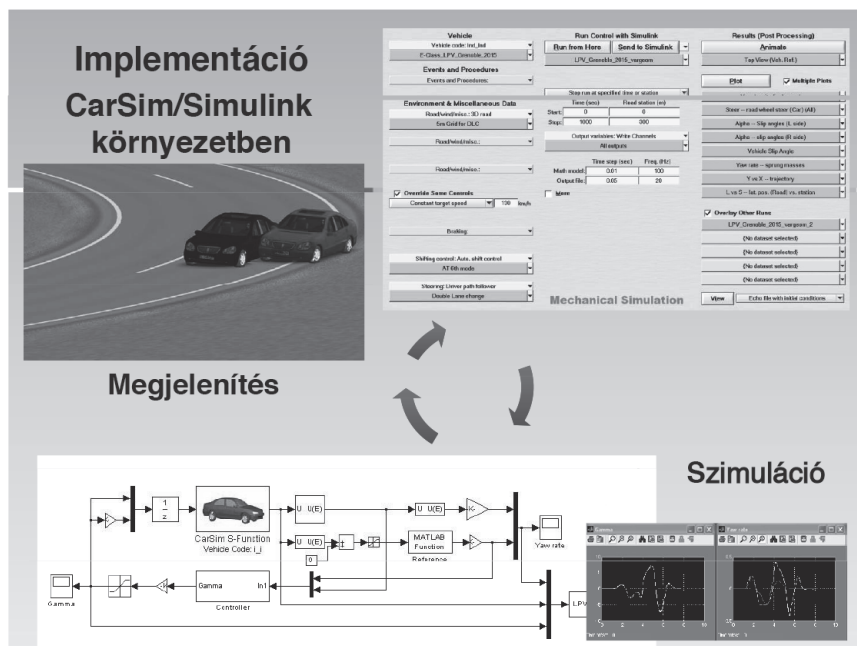
d) Jobb oldali nyomaték

5. ábra: Trajektória követése változtatható geometriájú futóművel

2.3. A borulási kockázat csökkentése

Az alábbiakban a járművek borulási kockázatának csökkentésére irányuló eredményeket említjük. A **jármű támo­lygá­si szö­ge** jelentősen megnövekszik, és így borulásközeli 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 hossztengety körüli elfordulásának (támolygási/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 következő publikációkat: Gáspár–Szászi–Bokor 2003c; 2005; Vu et al 2017.



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

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

3. A modellalapú robusztus irányítástervezés elméleti háttere

A modellalapú járműirányítási elemzési és tervezési feladatok megoldása során általában LPV-modellosztályt alkalmazunk. Az állapotér-reprezentációjának állapotegyenletében szereplő $A(\rho)$, $B_1(\rho)$ és $B_2(\rho)$ rendszerátrixok a ρ ütemezési változótól függnnek:

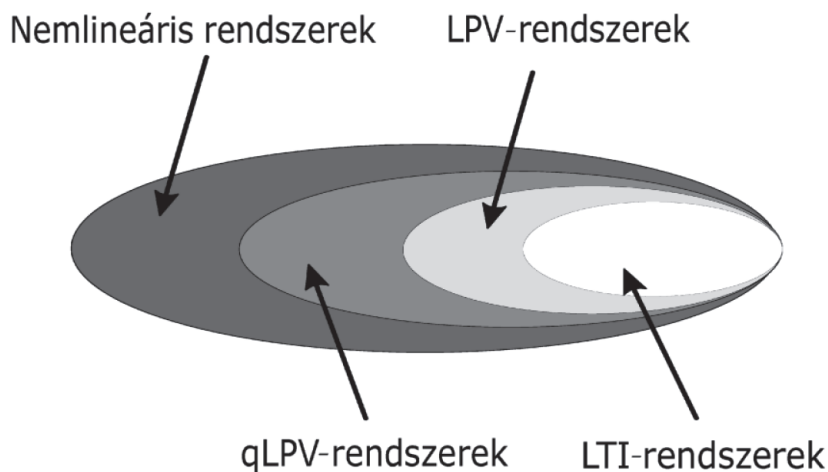
$$\dot{x} = A(\rho)x + B_1(\rho)d + B_2(\rho)u \quad (10)$$

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

Megjegyezzük, hogy ha a ρ változó konstans, akkor a lineáris időinvariáns modellosztályhoz jutunk, amelyet a (2) állapotér-reprezentációban írtunk fel. Ha a ρ ütemezési változó függ az állapottól ($\rho = \rho(x)$), akkor kvázilineáris 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 olyan átírása, amely egy teljes operatív tartományban érvényes, globális modell. Az eljárás lényege, hogy a nemlinearitásokat alkalmasan választott, állapot-, illetve mértjel-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 Rough–Shamma 2000; Shamma–Athans 1991). 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 állapotér-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 állapotér-reprezentációs leírás a (10) egyenletet egészíti ki a minőségi specifikációkat reprezentáló z egyenlettel és a mért jelek y egyenletével:

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

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

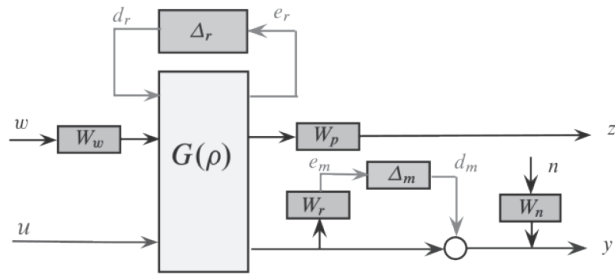
ahol $C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ paraméterfüggő mátrixok.

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 súlyozófüggvényeket tervezünk a minőségi specifikációk közötti összhang megteremtése érdekében.

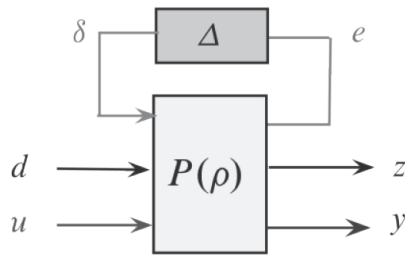
A trajektóriakövetésre alkalmazott súlyfüggvényt frekvenciatartományban úgy tervezzük meg, hogy alacsony frekvenciákon magas értékei legyenek, amivel állandósult állapotban pontos jelkövetés elérése a feladat. Az utazási kényelemre alkalmazott súlyfüggvényt úgy tervezzük meg, hogy az útgerjesztés hatását az emberi szervezetre káros frekvenciatartományokban 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 elem az egyes kritériumokhoz kapcsolódó állapotfüggő súlyozófüggvények megtervezése, valamint ezek egymáshoz való viszonyának feltérképezése. Ezek szisztematikus tervezési lépések alkalmazását igénylik.

A valós rendszer és az irányítástervezéshez használt modell közötti eltéréseket a Δ 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. A Δ_m blokk reprezentálja W_r súlyozással az elhanyagolt dinamikát és a Δ_r blokk a parametrikus bizonytalanságot. A struktúra részleteit a $\delta.a)$ ábra, míg az egyszerűsített ábrázolását a $\delta.b)$ ábra illusztrálja. Az ábrán szerepelnek még a külső zavarások és érzékelőzajok is, amelyek kedvezőtlen hatását az irányítás során W_w és W_n súlyok alkalmazásával szintén csökkenteni szükséges.



a) Bővített rendszermodell

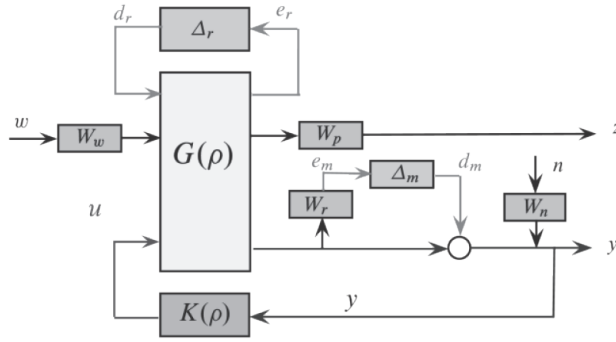


b) $P - \Delta$ struktúra

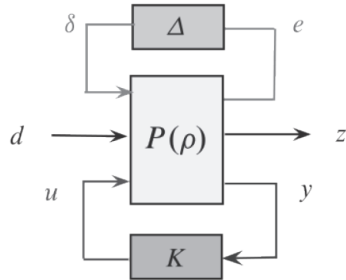
8. ábra: A $P - \Delta$ struktúra a G modell súlyozásával

A robusztus irányítástervezés az úgynevezett $P - K - \Delta$ struktúrán alapul, amely a $P - \Delta$ struktúra K szabályozóval való bővítésével jön létre. A tervezés a K szabályozó megkonstruálására irányul, amely 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 irányítás-elméleti feladatokban (Bokor–Balas 2005). Az irányítástervezés során azt a szabályozót keressük, amely a lehetséges legnagyobb zavarásnak a minőségi jellemzőkre való hatását egy előírt véges γ értéken belül tartja, lásd a (9) összefüggést.



a) Bővített rendszermodell



b) $P - K - \Delta$ struktúra

9. ábra: A $P - K - \Delta$ 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 kvadratus Ljapunov-függvényen alapuló elemzés és tervezés. A rendszer kvadratusan stabil, ha létezik egy kvadratus $V(x(t)) = x^T(t)Px(t) > 0$ Ljapunov-függvényt meghatározó konstans

$P = P^T > 0$ mátrix, amelyre az alábbi lineáris mátrix egyenlőtlenség (LMI) teljesül (Becker et al. 1993; Scherer–Gahinet–Chilali 1997):

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

A rendszer performanciájáról a következő mondható el. 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 L_2 erősítése kisebb γ -nál.

A kvadratikus Ljapunov-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 Ljapunov-függvényben szereplő P mátrix konstans értékű feltételezésének relaxálásával jutunk el a paraméterfüggő módszerekhez.

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

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

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

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

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

akkor az A rendszer paraméterfüggő stabil a 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 (Packard–Becker 1992; Wu 2001; Wu et al. 1996). Ha létezik egy kompakt halmaz $P: R^s \rightarrow R^{n \times n}$, 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 $\rho \in P$ és $|\beta_i| \leq v_i, i \in \{1, s\}$ esetén, akkor az A rendszer paraméterfüggően stabil a P halmazra nézve, és létezik egy δ , amire $0 \leq \delta < \gamma$ úgy, hogy $\|G_{F_p}^y\|_{i,2} \leq \delta$.

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 (Wu et al. 1996).

A paraméterfüggő módszerekben az ütemezési változók és azok deriváltjainak figyelembevétele miatt bonyolultabb lineáris mátrixegyenlőtlenségekhez vezetnek a

paraméterváltozós Ljapunov-mátrixon alapuló stabilitás- és performanciatételek, 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 paraméterfüggetlen 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 eltérő módon hatnak a jármű minőségi jellemzőire. Következésképpen a szabályozók együttes működése során a jármű dinamikai tulajdonságaiban egymást zavaró hatások jelenhetnek meg, de akár konfliktushelyzetek is keletkezhetnek (Gáspár 2009). Az együttesen alkalmazott fékezés és kormányzás a jármű szintjén kölcsönhatást eredményez. Például a fékezés a jármű sebességén kívül – különösen manőverek során – a jármű legyezési szögének dinamikájára is hat, s ennek következtében a 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 egy időben. 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, valamint a biztonság és a megbízhatóság növelése érdekében. Az integrált járműirányításra mutat illusztrációt a 10. ábra.

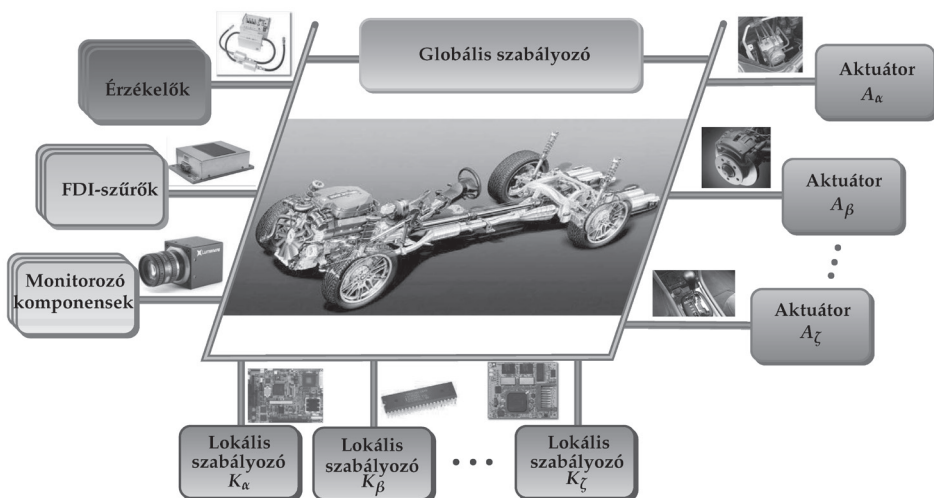
Az irányítórendszerek funkcionális integrációjának elérését három különböző **irányítási architektúrával** biztosíthatjuk: centralizált, decentralizált és többszintű irányítással, lásd (Gáspár et al. 2017; Yu–Li–Crolla 2008).

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 **felső szintű (supervisor) irányítás** a járműirányítás igényei, valamint az aktuális járműállapotok alapján meghatározza azokat a jeleket, amelyek az irányítórendszerek összehangolt működését biztosítják, mégpedig az interakciók és prioritások figyelembevételével. Napjainkban a többszintű architektúrák tervezése intenzíven kutatott terület.

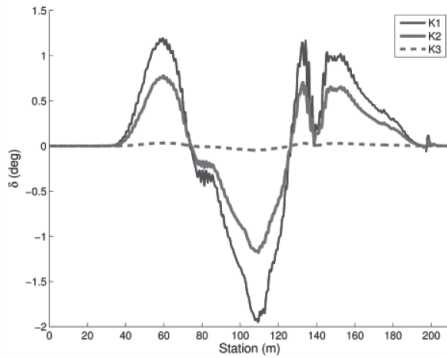


10. ábra: Korszerű integrált irányítástervezés illusztrációja

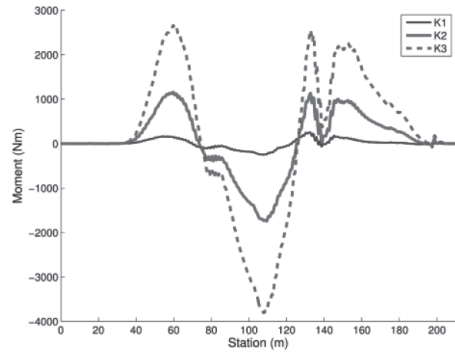
4.1. Az integrált járműirányítás

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 súlyozófüggvények 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 a hozzá tartozó kis differenciális fékezéssel, a K_2 szabályozó esetében kis kormányszöggel és a hozzá tartozó nagy differenciális fékezéssel, míg a K_3 szabályozó esetében a két beavatkozó szimultán működtetésével oldjuk meg a szabályozási feladatot. A trajektóriakövetés hibája mindhárom esetben elfogadhatóan kis értékű.

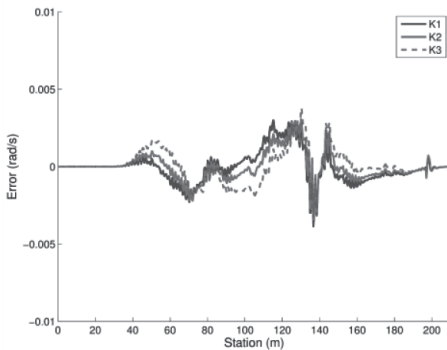
Az integrált járműirányítás tervezésekor több szempontot kell figyelembe venni. Ez nem egyszerűen többváltozós irányítástervezési feladat, hiszen az egyes funkciók teljesítése során a beavatkozók között prioritás van, a közöttük fennálló hierarchiát biztosítani kell. Habár egy kanyarodás akár a kormányval, akár a differenciális fékezéssel megvalósítható, a gyakorlati esetek jelentős részében a kormányt alkalmazzuk. Fékezéskor ugyanis a jármű sebessége csökken, s a jármű gyorsítása 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.



a) Kormányzó



b) Féknyomaték



c) Követési hiba

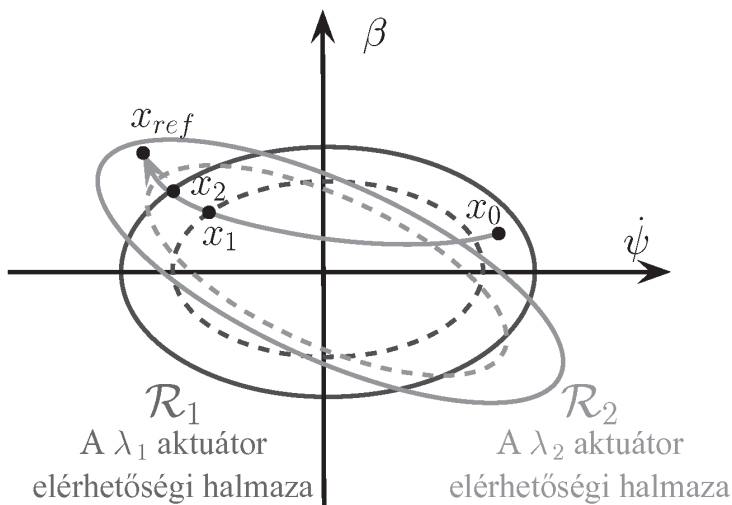
11. ábra: Beavatkozó jelek és követési hiba a trajektóriakövetési feladatban

4.2. 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} referenciaállapotot kell elérni. Az aktív λ_1 aktuátor az x_0 állapotnak megfelelő beavatkozást biztosítja ugyan, de az ábráról jól láthatóan nem

képes a referenciaállapot elérésére, hiszen az x_{ref} az elérhető állapotok tartományán kívül esik. Ugyanakkor ez az állapot a λ_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 is. A felső szintű felügyelő (*supervisor*) irányítás az alsó szintű irányítórendszerek és beavatkozók összehangolását és a feladatok elosztását biztosítja. A lokális irányítások a specifikus irányítási feladatok végrehajtásáért felelnek.

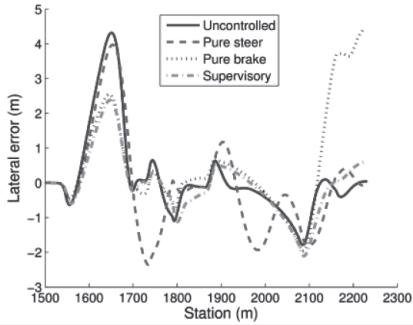


12. ábra: A rekonfigurációs irányítás illusztrációja

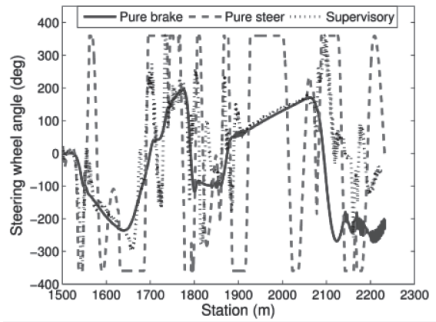
4.3. Trajektóriakövetés integrált irányítással

A következőkben egy trajektóriakövetési feladatot hajt végre a járművezető. A helytelenül megválasztott sebesség azonban nem teszi lehetővé a jármű számára a kívánt manőver végrehajtását, ezért az letér az útról. Különböző vezetőtámogató rendszereket vizsgálunk, amelyek hatását a 13. ábrán látható jelek illusztrálják.

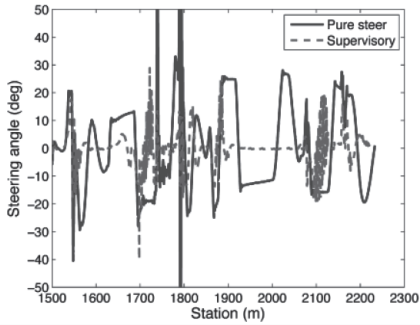
Ha a vezetőtámogató rendszerben kizárólag addicionális kormányszöveget alkalmazunk, akkor az oldalirányú hiba rögtön az első kanyarban elfogadhatatlanul nagy értékű lesz, amit a *13.a)* ábra illusztrál. Ennél a megoldásnál a vezetőnek a kormánykerék teljes tartományában kell kormányoznia a *13.b)* ábrán látható módon, ami nemcsak veszélyes művelet, de egy átlagos vezető nem is képes a megvalósítására. A *13.c)–d)* ábra a szabályozórendszerek 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 nyomatéki igény keletkezik. Ennek oka, hogy a hátsó kerékre eső tapadási slip jelentősen megnövekszik, és a jármű megpördül. Ezt illusztrálják az ábrán látható, kerekenként megadott slipértékek. Az integrált irányítás a kormányszög és a féknyomaték közötti összhang megteremtésével oldja meg az előírt trajektóriakövetési feladatot, miközben a menetstabilitást mindvégig garantálja.



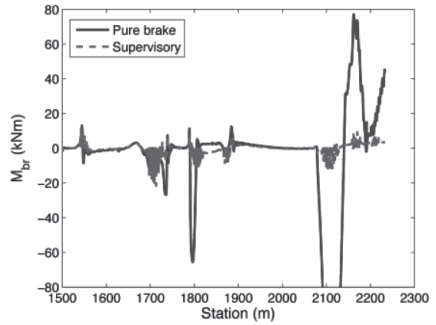
a) Oldalirányú hiba



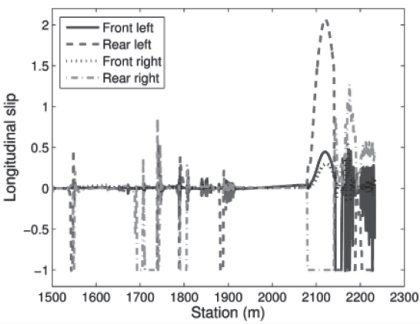
b) A kormánykerék szöge



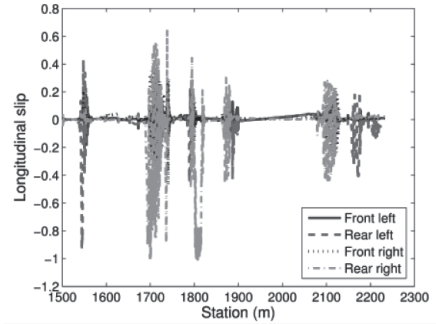
c) Kormányaszög



d) Féknyomaték



e) Hosszirányú slip
(tiszta fékezés esetén)



f) Hosszirányú slip
(integrált irányítás esetén)

13. ábra: Vezetőtámogató rendszerek hatása a trajektóriakövetési feladatban

Az integrált járműirányítás a kormány és a fék rekonfiguráló és hibatűró irányítását is garantálja. A kormány működésében kialakult teljesítményveszteség esetén a vezető csak korlátozottan képes kormányozni, viszont integrált szabályozás esetén a féknyomaték intenzívebb beavatkozására van lehetőség. Ebben az esetben a megfelelő kerekekre kiadott féknyomások eredményeként keletkező intenzívebb féknyomaték fogja garantálni a pályakövetést. 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 hibatűró 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 be legyen építve a tervezésbe. 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 hibatűró irányítás a különféle hibainformációknak a tervezési súlyfüggvényekbe való beépítésével érhető el.

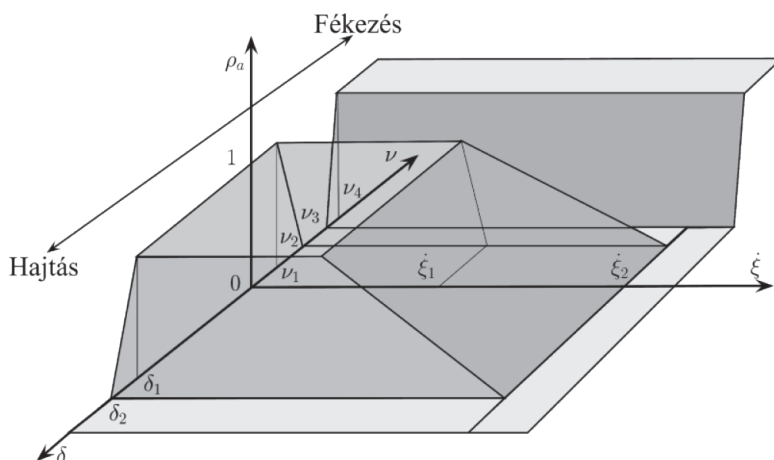
A rekonfiguráló és hibatűró irányításokkal kapcsolatban további információk: Gáspár–Németh 2016; Gáspár–Szabó–Bokor 2012.

4.4. 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 kezelést mutatjuk be. A 14. ábra szerint különböző menetdinamikai paraméterek alapján történik a megfelelő beavatkozó kiválasztása. A δ kormányaszög, a ν hosszirányú slip és a ξ sebesség függvényében választjuk ki a beavatkozók súlyfüggvényeiben alkalmazott ρ_a ütemezési változó értékét.

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



A szabályozás tervezése során a kormányzás és a fékezőnyomaték beavatkozóra alkalmazott súlyfüggvényekbe beépítjük a ρ_a ütemezési változó értékét:

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

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

ahol δ_{max} és M_{brmax} a beavatkozók konstrukciós korlátai.

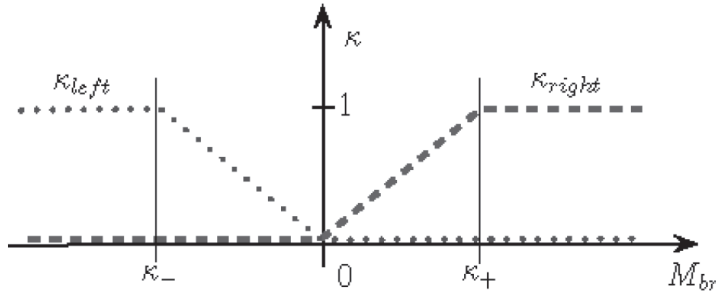
Az alábbi trajektóriakövetési feladatban a kormány és a fék rekonfiguráló és hibatűrő irányításban való kooperatív működésének elvét mutatjuk be. Abban az esetben, ha a beavatkozók megfelelő működését monitorozó komponens teljesítményvesztést vagy hibát detektál, a hibamentes beavatkozók működési módját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

- Ha a kormányzás működésében van teljesítményvesztés, akkor a szerepét a fékezőnyomatéknak kell átvennie. Fatális hiba esetén a kormány tervezésére alkalmazott súlyfüggvényben az ütemezési változó értékét módosítjuk:

$$\rho_{st,new} = 0.$$

- Ha a fékkörök valamelyikének működésében következik be teljesítményvesztés, akkor a kormányzást kell megfelelően módosítani. Fontos megjegyezni, hogy a fékkörök valamelyikében bekövetkezett hiba aszimmetrikus féknyomatékokat eredményez. Például a bal hátsó fékkör hibája esetén a jármű függőleges tengely körül az óramutató járásával ellentétes fékezőnyomatékokat nem tud létrehozni. Következésképpen a fékrendszer valamelyik körében bekövetkezett hiba esetén a fékezésre alkalmazott súlyozásban ρ_{br} függ az M_{br} igényelt fékezőnyomatéktól és egy κ_i erősítéstől.

A 15. ábrán illusztrált erősítést κ_{left} vagy κ_{right} értékekkel kell beállítani a detektált hibával összhangban. Az ábrán látható κ_- és κ_+ változók szerepe a beavatkozók közötti túlságosan gyakori kapcsolások elkerülése.



15. ábra: Félkörhibákra alkalmazott súlyfüggvény

A fékezőnyomaték tervezésére alkalmazott súlyfüggvényben az ütemezési változó értéket 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 – egy időben bekövetkező – hiba esetén a fékezőnyomatékot célszerű maszkolni: $\rho_{br,new} = 0$. A rekonfiguráló és hibatűró irányítással kapcsolatos további részletek: Gáspár–Németh 2016.

A beavatkozók kiválasztásának fent 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 állapotér-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 egységenergiájú bemenetekre a következőképpen számíthatók:

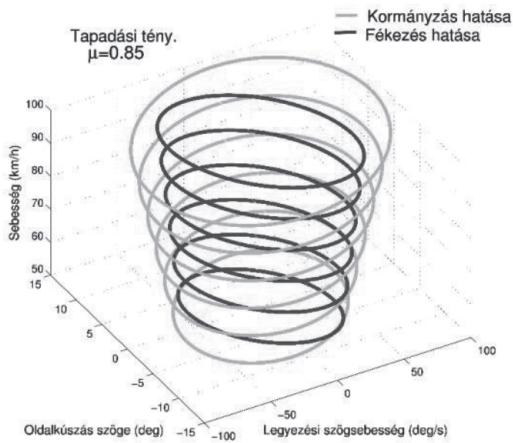
$$\mathcal{R} \triangleq \left\{ x(T) \mid \begin{array}{l} x, u \text{ kielégíti } \dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)u, \quad x(0) = 0 \\ \int_0^T u^T u dt \leq 1, \quad T \geq 0 \end{array} \right\}. \quad (24)$$

Az összefüggés sokkal bonyolultabb abban az esetben, ha LPV-modellt alkalmazunk, s az út és a jármű közötti kapcsolatot nemlineáris összefüggéssel vesszük figyelembe. (Részletes elemzés: Németh–Gáspár–Péni 2016.)

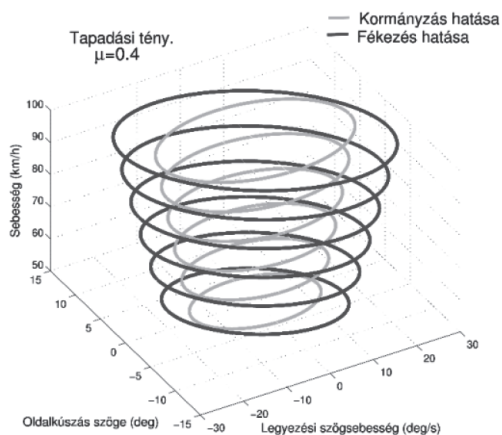
A fentiek alapján a kormányzás és a differenciális fékezés járműállapotokra való hatását elérhetőségi halmazokkal számítjuk ki. A 16. ábrán ellipszoidok illusztrálják az elérhetőségi halmazokat az oldalkúszásszög és a legyezési szögsebesség állapotterében, különböző járműparaméterek, mégpedig a sebesség s az út és a 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 mutatja különböző tapadási tényezővel jellemezhető, eltérő minőségű úton. Az ábrák jól mutatják, hogy a külső paraméterek függvényében az elérhető állapotérhalmazok mind alakban, mind méretben eltérnek egymástól. Ez rámutat arra, hogy a külső tényezők függvényében biztosítani tudjuk a beavatkozók közötti prioritást. Ez a rekonfigurációs stratégia alapja.

Az integrált irányítás tervezésekor a beavatkozók összehangolását, a járműjellemzőktől függő prioritások kezelését ütemezési változóktól függő súlyfüggvényekkel

biztosítjuk. A tervezés eredményének következményei a minőségi jellemzők interakcióját kihasználva súlyfüggvényekkel érhetők el.



a) Tapadási tényező: $\mu = 0,85$

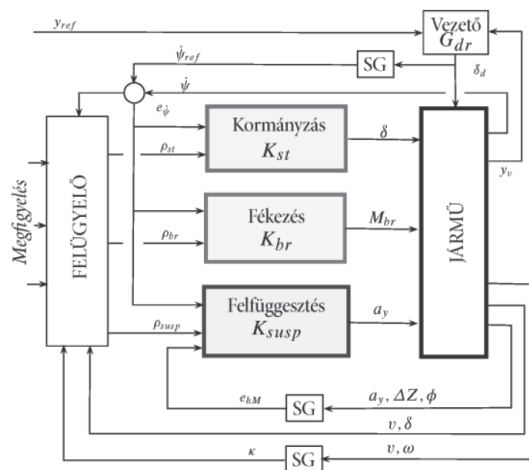


b) Tapadási tényező: $\mu = 0,4$

16. ábra: A kormányzás és a fékezés járműállapotokra való hatása különböző járműparaméterek függvényében

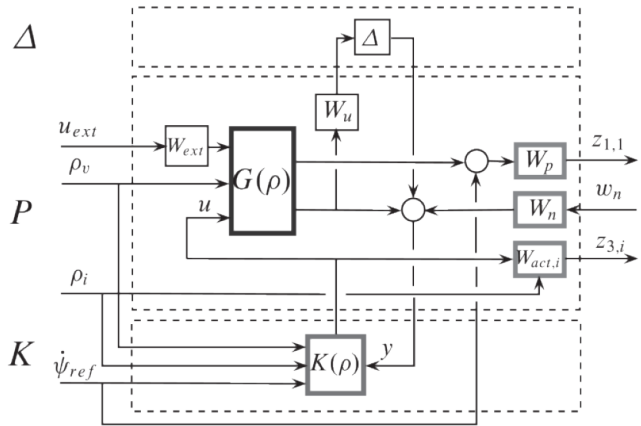
4.5. Súlyozási stratégia az integrált járműirányításban

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

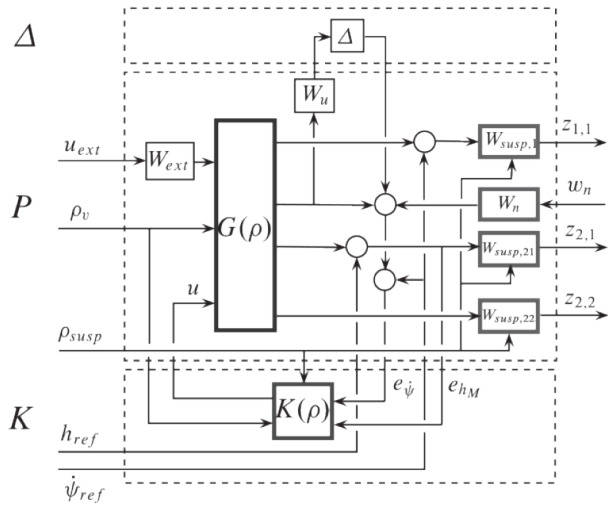


17. ábra: A kormány, a fék és a felfüggesztés szimultán irányítása

A kormánysszöggel alapvetően a jármű irányát módosítjuk, a fékkel a sebességet csökkentjük és a jármű irányát korrigáljuk, a változtatható geometriájú felfüggesztéssel a menetstabilitást és az utazási kényelmet tudjuk biztosítani. Az irányítórendszerek integrálása során az elosztott irányítórendszerek összehangolását és a beavatkozók prioritásának kezelését is biztosítani kell. Például az irányt alapvetően kormánnyal 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.



a) A változtatható geometriájú futómű tervezési módszere

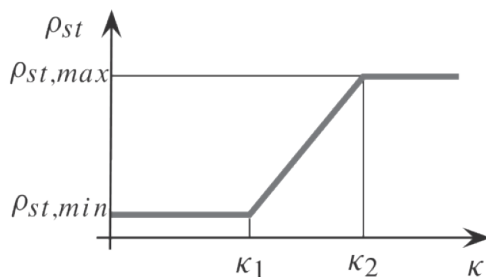


b) A kormány tervezési módszere

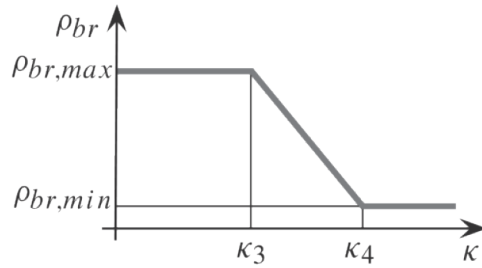
18. ábra: Két irányítórendszer tervezési sémája

Az integrált irányítást egyetlen szabályozóval nem lehet megoldani, mert a szabályozási feladat bonyolultsága ezt nem teszi lehetővé. Két irányítórendszer tervezési sémáját illusztráltuk a 18. ábrán. A változtatható geometriájú futómű tervezésekor a követési hiba minimalizálása és a kényelem (a támolygási szög minimalizálása) szerepel a minőségi kritériumok között. A kormányrendszer tervezésekor a követés pontossága és a kormányaszög szerepel a minőségi kritériumok között. Az egyes irányítórendszerek tervezését egymástól függetlenül fogalmazzuk meg. Az elosztott irányításban a szabályozók közötti összhangot és egyszersmind a prioritást az egyes kritériumokra tervezett és a súlyozófüggvényekbe beépített ütemezési változók alkalmas megválasztásával biztosítjuk.

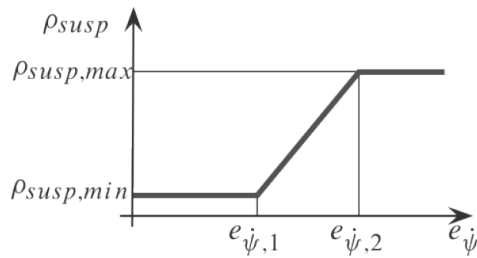
A hosszirányú slip függvényében a 19. ábrán illusztrált ütemezési változókat számítunk a kormányaszögre, a differenciális fékezésre és a változtatható geometriájú futóműre, majd ezeket a tervezés során alkalmazott súlyfüggvényekbe építjük be.



- a) ρ_{st} ütemezési változó a κ hosszirányú slip függvényében a kormányaszögön



- b) ρ_{br} ütemezési változó a κ hosszirányú slip függvényében a féknyomatékon



- c) ρ_{susp} ütemezési változó az e_{ψ} követési hiba függvényében a változtatható geometriájú futóművön

19. ábra: Paraméterfüggő súlyozás az elosztott irányítástervezésben

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

Az így felírt ütemezési változókat ezután beépítjük a szabályozástervezésben alkalmazott súlyozófüggvényekbe, s ezáltal a paraméterek megfelelő beállításával a kormány, a fék és a futómű összehangolt működését érzük/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: Doumiati et al. 2013; Poussot-Vassal et al. 2011.

5. Az autonóm járműirányítás tervezése: kitekintés

Az autonóm járműfunkciók járműirányításban való térhódítása manapság könnyen tetten érhető. A vezetőtámogató 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 autonóm járműveket építenek, illetve hagyományos járműveket 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, hogy mindenkor megfelelő döntéseket tudjon hozni. Ehhez a feladathoz korszerű alakfelismerési, szenzorfüziós, lokalizációs és tanulóalgoritmusok kutatása szükséges. A második téma a jármű autonóm irányítása, amely magában foglalja a szituáció- és célalapú döntéseket, a trajektóriatervezési feladatokat és az intelligens beavatkozást, a csoportos döntési algoritmusok kutatását.

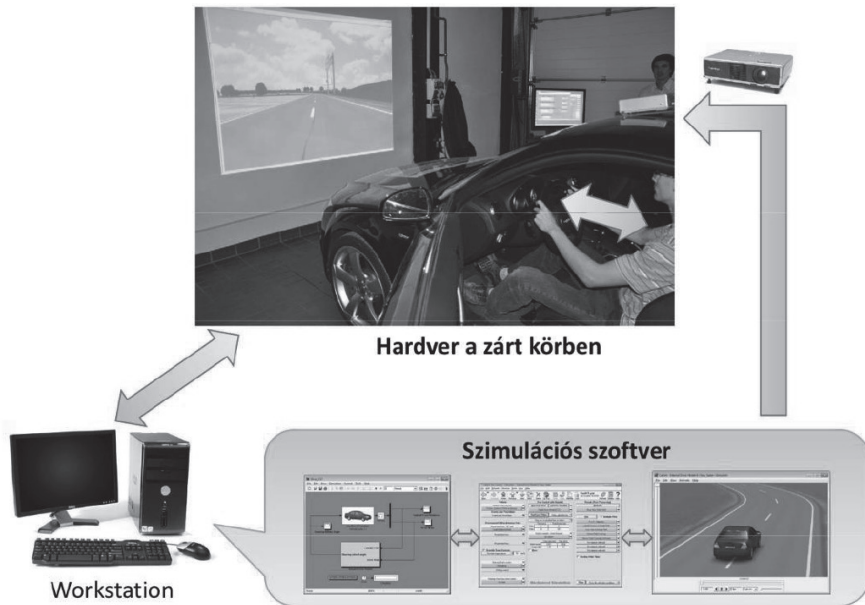
5.1. A járművezető modellezése

A fentiek miatt felértékelődött a járművezető, a környezet és a jármű közötti összefüggések vizsgálata. A járművezető modellje az érzékelést, a helyzetértékelést, a döntést és a beavatkozást leíró komponensek összekapcsolásával fogalmazható meg.

Egy vezetőtámogató rendszerben a járművezető modelljének ismerete nagy fontosságú, hiszen ez biztosítja, hogy az irányítás során a vezető igényeihez alkalmazkodjunk.

A különféle trajektóriakövetési feladatokban – amelyek az útvonalra és a sebességre vonatkozó előírást foglalják magukban – a referenciajel meghatározása kritikus. Például a jármű manőverezése során a vezető az oldalirányú hibát a kormánykerék elfordításával csökkenti. Az így létrehozott kormányoszög alapján a legyezési szögsebesség referenciaértéke számítható a jármű egyéb paramétereinek, így a sebesség, a jármű geometriája és a kormányzás dinamikájában lévő késleltetések figyelembevételével. A járművezető stílusa, a manőverek közben adott reakciói, viselkedése járműdinamikai jelek mérésével, valamint a járműbe szerelt további érzékelők (belső kamera, pozícióérzékelő) felhasználásával elemezhető. A különféle hossz- és oldalirányú gyorsulások, a biztonsági rendszerek aktivitásának sűrűsége, a fékezési jellemzők, az 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 készítettünk, amelynek felépítését a *20. ábra* mutatja. A jármű egy laboratóriumban van ugyan, de a vezető a kabinban ülve ugyanúgy vezeti, mintha az úton haladna. A kormányval manőverez, a gázpedál/fékpédál lenyomásával gyorsíthat és lassíthat. A háttérben egy szimulációs szoftver fut, amely a jármű dinamikai mozgásának leírására képes, valamint virtuális környezetet alakít ki úttal, járművekkel és látványelemekkel. A szimuláció során különféle külső és belső paraméterek módosíthatók, így például 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 így módon az autonóm járműirányítás közelítsen az emberi igényekhez. Ennek érdekében különféle vezetési modelleket dolgoztunk ki, amelyek beépültek a jármű modelljébe és irányításába.



20. ábra: A járművezető modellezésére felépített szimulációs környezet

5.2. Prediktív sebességtervezés

A jármű irányítórendszereit nemcsak a járműszinten egymással, hanem globálisan a környezettel is össze kell hangolni. A következő példában a jármű sebességét kívánjuk megválasztani oly módon, hogy figyelembe vesszük a jármű haladására és környezetére jellemző globális és lokális információkat. Globális információ lehet az előírt menetidő vagy szállítási idő, a jármű fogyasztása, az út domborzati viszonyai, az útra vonatkozó előírások, a sebességkorlátozások, a jármű menetstabilitása. Pillanatnyi információknak tekintjük a környezetünkben lévő járművek sebességét, a torlódásokat, de a haladási sebességet befolyásoló útépitéseket is.

A jármű sebességének megtervezése többkritériumos tervezési feladathoz vezet, amellyel a szükséges erőigény minimalizálása érhető el, miközben a szállítási idő

betartható. A megoldás elve az, hogy a jármű haladása során az előtte lévő $2 - 3 \text{ km}$ távolságot nem feltétlenül azonos hosszúságú $n = 5 - 10$ szakaszra bontjuk. Az egyes szakaszokra $v_{r,i}, i \in \{1, n\}$ referenciasebességeket írunk elő az útra vonatkozó előírásokkal, illetve azok változásával összhangban. A jelenlegi és a következő referenciasebességekre Q, γ_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 azonos súlyozást alkalmazó prediktív szabályozást kapunk. Mivel az útvonal geometriai viszonyainak és a menetszélnek az ismeretét feltételezzük, a jármű haladása során fellépő zavarások szélerőből és emelkedőkből adódó $F_{d,i}$ része becsülhető. A jármű sebessége a gyorsulása, az emelkedési viszonyok, az előírt referenciasebességek és a súlyok alapján kiszámítható:

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

ahol ϑ paraméter a következő:

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

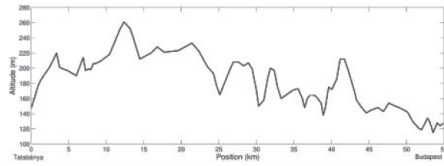
Az erőigény és a menetidő szempontjainak optimalizációs kritériumai a következőképpen fogalmazhatók meg. Az első optimalizáció célja a jelen pillanatban szükséges hosszirányú erő minimalizálása:

$$F_{11}^2 \rightarrow Min! \quad (27)$$

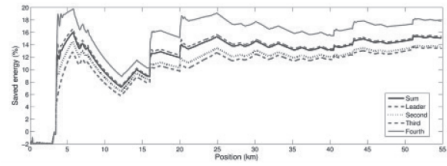
Az utazási idő minimalizálása az előírt referenciasebességek tartásával a következőképpen írható le:

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

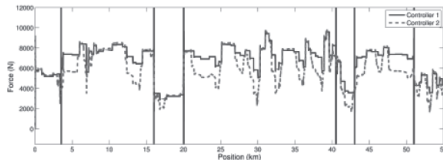
A fenti optimalizációk természetesen eltérő eredményekhez vezetnek. Emiatt vezetjük be az R_1 súlyt a hosszirányú erő minimalizálására és az R_2 súlyt az utazási idő minimalizálására, melyekre $R_1 + R_2 = 1$. Az R_1 növelésével a hosszirányú erő növelésére helyezük a hangsúlyt, és az utazási időt kevésbé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



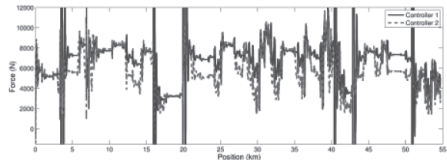
a) Magasság



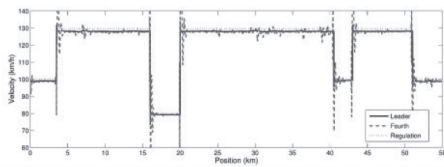
b) Energia megtakarítás



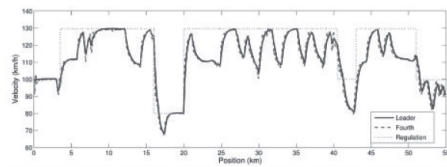
c) Erőigény egy járműre



d) Erőigény több járműre



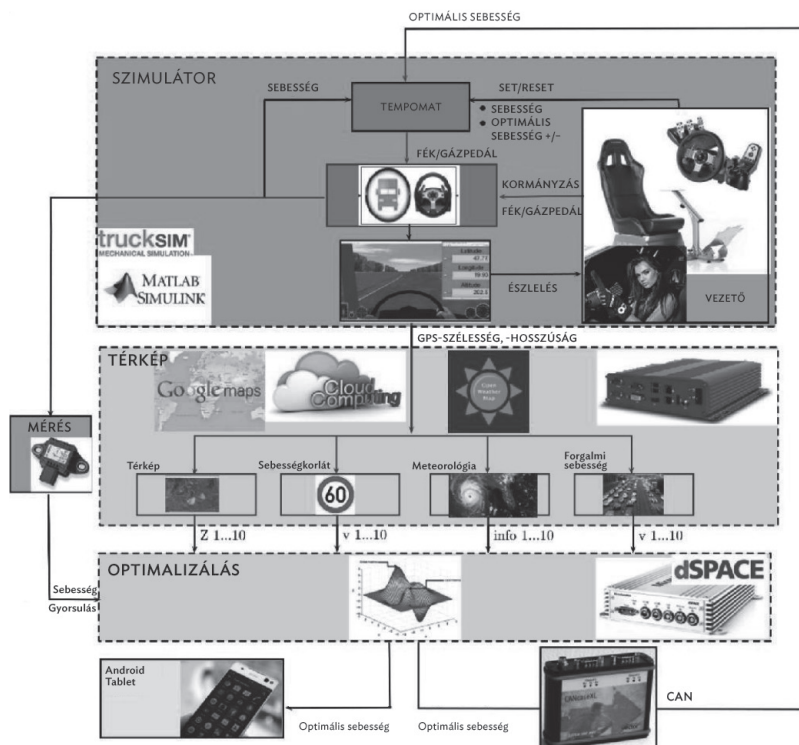
e) Sebességváltás hagyományos módon



f) Sebességváltás tervezés alapján

21. ábra: Sebességtervezés a Budapest–Tatabánya útvonalon

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



22. ábra: A sebességtervezésben használt szimulációs környezet

5.3. Járműoszlop sebességtervezése

A sebességtervezés módszerének járműoszlopban való alkalmazása komoly előnyökkel jár. Mivel az oszlopban minden jármű azonos sebességgel halad, azt a közös λ_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: $\xi_{0,j} = \hat{G}_{j-1} \xi_{0,j-1}$. Végül a közös sebességet számítjuk ki, amely valamennyi jármű

sebességének figyelembevételével minimális, azaz optimális a teljes járműoszlop szempontjából:

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

ahol az oszlop járműveinek sebességei között összefüggés: $\xi_{0,j} = \prod_{k=1}^{j-1} \hat{G}_k \lambda_{\underline{1}}$.

5.4. Autonóm járművek a forgalomban

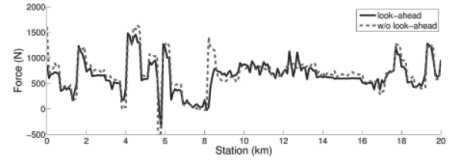
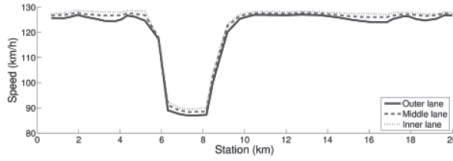
A megtervezett sebességet alkalmazó jármű a közlekedés résztvevője, ezért sebességével befolyásolja a környezetében lévő járművek haladását, de a többi jármű is befolyásolja a sebesség megválaszthatóságát. Mivel az autonóm járművek megjelenésekor még hagyományos járművek is lesznek a közutakon, vizsgálatokat végeztünk az autonóm jármű közlekedési körülményekhez való alkalmazkodásával kapcsolatban. Fontos szempont, hogy ne zavarja és semmiképpen se veszélyeztesse a közlekedésben részt vevő többi jármű haladását. Az autonóm járművet különféle hatások érik, amelyeket 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 keresztesződéseket és az egyenrangú/alárendelt útkeresztesződéseket. (A sebességtervezéssel kapcsolatos további információk: Németh–Gáspár 2013b; 2014.)

Az autonóm járművek jelentős hatással lesznek a forgalomra, így a közlekedésben részt vevő hagyományos járművek haladására is (lásd Németh–Gáspár 2017b). 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

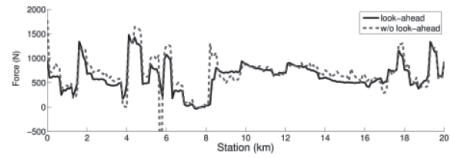
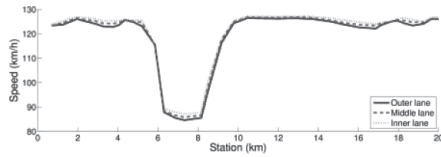
jármű halad, s az $R_1 = 0,7$ energiahatékonyságú autonóm járművek arányát a forgalomban részt vevő járművekhez képest $\kappa = 1\%$, $\kappa = 20\%$ és $\kappa = 50\%$ módon változtattuk. Az autonóm járművek arányának növekedésével az összes jármű figyelembevételével számolt hosszirányú átlagos erő 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 átbocsátóképessége az R_1 és κ paraméterek növekedésével csökken.

5.5. Környezetérzékelés és szituációértékelés

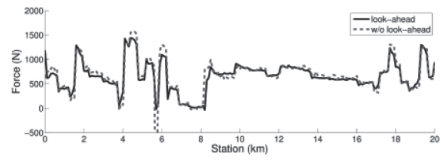
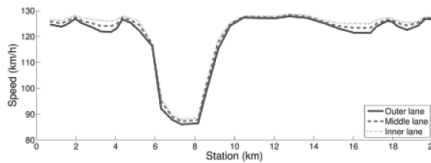
Az autonóm járművek irányításában a környezetérzékelés és a szituációértékelés alapvető szerepet kap, hiszen a járműnek komplex döntéseket kell hoznia. Monitorozni kell a jármű úton való elhelyezkedését, a jármű körüli objektumok tulajdonságait és mozgásállapotát, továbbá a közlekedés szereplőinek a 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 (V2V), másrészt a jármű és az infrastruktúra közötti (V2I) kommunikációból származnak. Következésképpen a kezelni szükséges információ mennyisége ugrásszerűen növekszik. Új feladatok jelentek meg, például az adatok elemzése és szűrése, lényeges elemeik kiemelése vagy az adatbányászat. A biztonságos kommunikáció oldaláról a valós idejű hihetőségvizsgálat, valamint a jogosultság ellenőrzése szintén nagy kihívást jelent.



Átlagssebesség és erőigény, $\kappa = 1\%$, $|F| = 677,5 \text{ N}$, $t = 608,3 \text{ s}$



Átlagssebesség és erőigény, $\kappa = 20\%$, $|F| = 666,8 \text{ N}$, $t = 609,9 \text{ s}$



Átlagssebesség és erőigény, $\kappa = 50\%$, $|F| = 651,9 \text{ N}$, $t = 610,0 \text{ s}$

23. ábra: Az 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 lenniük. Ennek érdekében szükséges a trajektória tervezése a környezet jelenlegi és becsült jövőbeli alakulásának figyelembevételével. Az irányítás alacsonyabb szintjén a tervezett trajektóriát olyan algoritmussal kell megvalósítani, amely figyelembe veszi a szenzorok információit, és a jármű beavatkozórendszerét összehangoltan irányítja. A szituációk értelmezése és értékelése csak nagyon egyszerű, speciális esetekben – autópálya-forgalom esetén – kezelhető klasszikus módszerekkel. A bonyolult, jellemzően városi forgalomban jelentkező szituációk értelmezése mesterségesintelligencia-módszerek, továbbá komplex, intuitív és tanuló algoritmusok bevonását igénylik.

A **jármű-, az infrastruktúra- és a felhőkommunikációban** is óriási lehetőségek rejlenek. Az interneten keresztül elérhető felhő jelentős erőforrásával és elosztott számítási kapacitásának biztosításával költséghatékony módon látja el a járművet további információkkal. Megemlíthető a járműflotta felügyelete, a környezettudatos vezetés támogatása vagy a kooperatív navigáció lehetősége is. A 24. ábra a felfüggesztési rendszer felhőinformációkon alapuló adaptív használatát illusztrálja. Az útgerjesztés aktuális értékeinek – az interneten keresztül elérhető térképi adatbázisok és alkalmazások felhőadatbázisaiból 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, mobilszolgáltatók adhatnak információkat az úton lévő járművek aktuális sebességviszonyairól, továbbá az útépitést és -karbantartást végző vállalatok adhatnak információkat az ideiglenes sebességkorlátozásokról és az esetleges elterelésekről.



24. ábra: A felhőinformáción alapuló beavatkozás illusztrációja

Az autonóm járműirányításból eredően új feladatok jelennek meg, melyek megoldása során a környezetérzékelési részrendszerek hiányosságait vagy kimaradásait kell 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 felismeréseinek együttes alkalmazását igényli. Az autonóm járműirányítással kapcsolatos 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 irányításelméleti és specifikusan a járműdinamikai és irányítási kutatások eredményeivel, trendjeivel kapcsolatban további részletek olvashatók a következő könyvekben: Gáspár et al. 2017; Sename–Gáspár–Bokor 2013.

Felhasznált irodalom

- Becker, G. – Packard, A. – Philbrick, D. – Balas, G. (1993): *Control of parametrically dependent linear systems. A single quadratic Lyapunov approach*. San Francisco: American Control Conference, 2795–2799.
- Bokor, J – Balas, G. (2005): Linear parameter varying systems. A geometric theory and applications. Prague: 16th IFAC World Congress.
- Doumiati, M. – Sename, O. – Martinez, J. – Dugard, L. – Gáspár, P. – Szabo, Z. (2013): Integrated vehicle dynamics control via coordination of active front steering and rear braking. *European Journal of Control*, Vol. 19, No. 2, 121–143.
- Gáspár, P. (2009): Model-based control design of integrated vehicle systems. In: Rudas, I. – Kacprzyk, J. (eds.): *Towards Intelligent Engineering and Information Technology*. Berlin: Springer, 103–119.
- Gáspár, P. – Németh, B. (2016): Integrated control design for driver assistance systems based on LPV methods. *International Journal of Control*, Vol. 89, No. 12, 2420–2433.
- Gáspár, P. – Z. Szabó, – J. Bokor, (2012): LPV design of fault-tolerant control for road vehicles. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 22, No. 1, 807–812.
- Gáspár, P. – Szabó, Z. – Bokor, J. – Németh, B. (2017): *Robust Control Design for Active Driver Assistance Robust Control Design for Active Driver Assistance Systems. A Linear-Parameter-Varying Approach*. Berlin: Springer.
- Gáspár, P. – Szabó, Z. – Szederkényi, G. – Bokor, J. (2012): Design of a two-level controller for an active suspension system. *Asian Journal of Control*, Vol. 14, No. 3, 664–678.
- Gáspár, P. – Szászi, I. – Bokor, J. (2003a): Active suspension design using linear parameter varying control. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, Vol. 1, No. 2, 206–221.

- Gáspár, P. – Szászi, I. – Bokor, J. (2003b): Active suspension design using the mixed μ synthesis. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 40, No. 4, 193–228.
- Gáspár, P. – Szászi, I. – Bokor, J. (2003c): The design of a combined control structure to prevent the rollover of heavy vehicles. *European Journal of Control*, Vol. 10, No. 2, 1–15.
- Gáspár, P. – Szászi, I. – Bokor, J. (2005): Reconfigurable control structure to prevent the rollover of heavy vehicles. *Control Engineering Practice*, Vol. 13, No. 6, 699–711.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2012): Mechanical analysis and control design of McPherson suspension. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 7, No. 2, 173–193.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2013a): Control design of variable-geometry suspension considering the construction system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 8, 4104–4109.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2013b): Design of vehicle cruise control using road inclinations. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, Vol. 11, No. 4, 313–333.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2014): Optimised speed profile design of a vehicle platoon considering road inclinations. *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 8, No. 3, 200–208.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2017a): Nonlinear analysis and control of a variable-geometry suspension system. *Control Engineering Practice*, Vol. 61, No. 1, 279–291.
- Németh, B. – Gáspár, P. (2017b): The relationship between the traffic flow and the look-ahead cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 5, 1154–1164.
- Németh, B. – Gáspár, P. – Péni, T. (2016): Nonlinear analysis of vehicle control actuations based on controlled invariant sets. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 26, No. 1, 31–43.

- Németh, B. – Varga, B. – Gáspár, P. (2015): Hierarchical design of an electro-hydraulic actuator based on robust LPV methods. *International Journal of Control*, Vol. 88, No. 8, 1429–1440.
- Packard, A. – Becker, G. (1992): Quadratic stabilization of parametrically dependent linear systems using parametrically dependent linear feedback. *Advances in Robust and Nonlinear Control Systems*, Vol. 43, 29–36.
- Poussot-Vassal, C. – Sename, O. – Dugard, L. – Gáspár, P. – Szabó, Z. – Bokor, J. (2008): A new semi-active suspension control strategy through LPV technique. *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 12, 1519–1534.
- Poussot-Vassal, C. – Sename, O. – Dugard, L. – Gáspár, P. – Szabó, Z. – Bokor, J. (2011): Attitude and handling improvements through gain-scheduled suspensions and brakes control. *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 3, 252–263.
- Rough, W. J. – Shamma, J. S. (2000): Research on gain scheduling. *Automatica*, Vol. 36, 1401–1425.
- Scherer, C. – Gahinet, P. – Chilali, M. (1997): Multiobjective output-feedback control via LMI optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 7, 896–911.
- Sename, O. – Gáspár, P. – Bokor, J. (2013): *Robust Control and Linear Parameter Varying Approaches*. Berlin: Springer.
- Shamma, J. S. – Athans, M. (1991): Guaranteed properties of gain scheduled control of linear parameter-varying plants. *Automatica*, Vol. 27, No. 3, 559–564.
- Vu, T. V. – Sename, O. – Dugard, L. – Gaspar, P. (2017): Enhancing roll stability of heavy vehicle by LQR active anti-roll bar control using electronic servovalve hydraulic actuators. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 55, No. 9, 1405–1429.
- Wu, F. (2001): A generalized LPV system analysis and control synthesis framework. *International Journal of Control*, Vol. 74, No. 7, 745–759.
- Wu, F. – Yang, X. H. – Packard, A. – Becker, G. (1996): Induced L_2 norm controller for LPV systems with bounded parameter variation rates. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 6, No. 9–10, 983–988.

- Yu, F. – Li, D. F. – Crolla, D. A. (2008): Integrated vehicle dynamics control. State-of-the art review. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 3-5 Sept. 2008.
- Zin, A. – Gáspár, P. – Sename, O. – Dugard, L. – Bokor, J. (2008): An LPV/Hinf active suspension control for global chassis technology. Design and performance analysis. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 46, No. 10, 889–912.



