Lineáris rendszerek strukturált bizonytalansági modelljének és robusztus szabályozásának iteratív tervezése

című Ph.D. disszertáció tézisei

Szerző:
RÖDÖNYI GÁBOR

Konzulensek:
Dr. Bokor József Dr. Lantos Béla

Villamosmérnöki Tudományok Doktori Iskola
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest

Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium
Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet
Magyar Tudományos Akadémia

Budapest

2010

1. Motiváció

Biztonság-kritikus alkalmazásoknál elvárható, hogy a szabályozott rendszer minden lehetséges zavarás és a rendszerben bekövetkező változás esetén garantált stabilitási és minőségi (performancia) tulajdonságokkal rendelkezzen. A lineáris idő-invariáns (LTI) rendszerosztályra kidolgozott robusztus szabályozások elmélete ([16, 17, 6]) bevezette a bizonytalan rendszer fogalmát, melyet egy korlátos $\mathcal{H}_\infty$ normájú rendszerekből álló halmazként definiál. A bizonytalan rendszerből és a szabályozóból álló zárt körre külső jelek hatnak (zavarások, referencia jelek), melyek hatását a zárt rendszeren definiált performancia kimeneteken szeretnénk elnyomni. A *robusztus stabilitás* (RS) egy bizonytalan rendszer minden elemének stabilitását, a *robusztus performancia* (RP) a legnagyobb $\mathcal{H}_\infty$ normáját jelenti. A robusztus szabályozótervezés célja olyan szabályozó tervezése, amely a zárt kör robusztus performanciáját minimalizálja.

A bizonytalan rendszert egy névleges modell és egy ismeretlen rendszer visszacsatolásaként definiáljuk. Az ismeretlen rendszer lehet strukturálatlan, azaz egyetlen teljes LTI mátrix, vagy *strukturált*, azaz egy blokk-diagonális mátrix, ahol az egyes blokkok lehetnek LTI, lineáris időben változó (LTV) rendszerek vagy állandó paraméter blokkok. A modellezés során érdemes a bizonytalanságot strukturálni, így minél több információt vinni a modellbe. Ezzel csökkenthetjük azt a rendszer halmazt, amelyre a szabályozónak stabilitást és performanciát kell garantálnia, így a szabályozók nagyobb halmazából válogathatunk és jobb performanciát érhetünk el.

A strukturált bizonytalansági modellt fizikai megfontolások alapján szokás felállítani. A külső zavarások és az egyes blokkok méretét frekvencia-függő *súlyfüggvényekkel* jellemezzük, melyek megválasztása erősen befolyásolja a rendszer megbízhatóságát, ugyanis a túl kicsi súlyok instabilitáshoz, a túl nagyok rossz performanciához vezethetnek. A már megtervezett bizonytalan modellt mérési adatok alapján invalidálni lehet ([11, 13, 3]), az ilyen eljárások azonban nem adnak útmutatást a súlyfüggvények megválasztására.

A tervezés tehát sok kísérletezést és heurisztikán alapuló alapos mérnöki megfontolást igényel. Nem létezik olyan módszer, amely a strukturált bizonytalansági modell súlyfüggvényeit a specifikált performancia figyelembevételével és a rendszerről gyűjtött adatok felhasználásával automatikusan megtervezné annak érdekében, hogy a lehető legjobb robusztus performanciát érhessük el.

Téziseimmel erre a problémára szeretnék egy megoldást javasolni.

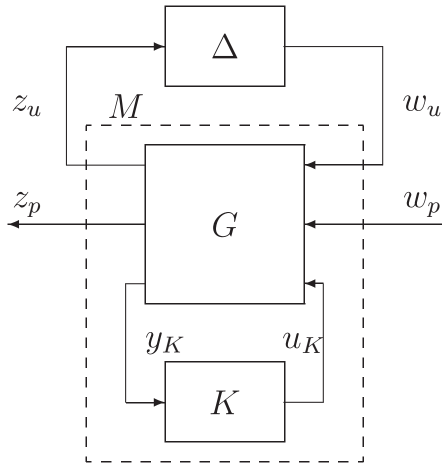
2. Alapfogalmak és felhasznált módszerek

Az alábbiakban röviden felsoroljuk a rendszer- és irányításelmélet azon módszereit és eszközeit, melyek szükségesek voltak a tézisekben megfogalmazott eredmények kidolgozásához. Több bemenetű és több kimenetű rendszerekkel foglalkozunk, a dimenziókat az áttekinthetőség kedvéért a tézisfüzetben nem jelöljük, de minden jelet vektor értékűnek kell tekinteni.

Egy A mátrix legnagyobb szinguláris értékét $\bar{\sigma}(A)$ jelöli. Az A_1, A_2, ... A_n mátrixokból álló blokk-diagonális mátrix: $\mathrm{diag}\{A_1, A_2, ..., A_n\}$. A valós és a komplex számtestet $\mathbb{R}$ ill. $\mathbb{C}$ jelöli. $\mathcal{R}$ a valós együtthatójú racionális átviteli függvények tere. $\mathcal{RL}_\infty$ jelöli az olyan $H \in \mathcal{R}$ átviteli függvényeket, amelyekre teljesül, hogy $\|H\|_\infty := \sup_{\omega \in \mathbb{R} \cup \infty} \bar{\sigma}(H(j\omega)) < \infty$. Ennek egy altere $\mathcal{RH}_\infty$, a nyílt jobb félsíkon analitikus átviteli függvényeket tartalmazza. $\mathcal{L}_2$-vel jelöljük a véges energiájú frekvenciatartományi $f : j\mathbb{R} \mapsto \mathbb{C}$ jelek terét. Az $\mathcal{L}_2$ téren értelmezett norma: $\|f\|_2 := \int_{-\infty}^{\infty} f(j\omega)^* f(j\omega) d\omega$.

2.1. Strukturált szinguláris érték

Az LTI rendszerekre kidolgozott robusztus szabályozások elmélete az 1. ábrán látható rendszerből indul ki. Δ-val jelöljük az ismeretlen dinamikát, mely egy $\mathcal{S}_{\Delta_u} := \{\Delta \in \mathcal{RH}_\infty \mid \Delta = \mathrm{diag}\{\Delta_1, \ldots, \Delta_\tau\}\}$ halmaznak az eleme lehet: azaz Δ egy τ darab valós együtthatójú racionális és stabil átviteli mátrixból álló blokk-diagonális mátrix. A bizonytalansági modell és a performancia specifikáció súlyfüggvényeit, a névleges modellt és ennek a bizonytalansággal ill. a szabályozóval történő összekötését tartalmazó általánosított modellt G-vel jelöljük. K egy LTI szabályozó, z_p a zárt kör performancia kimenete, w_p a performancia bemenete (zavarások, referencia jelek, stb.). A szabályozót és az



1. ábra. Robusztus irányításelmélet alapfeladata

általánosított modellt is tartalmazó rendszert $M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$-mel jelöljük, mely a szabályozó és a G rendszer alsó lineáris tört transzformációjaként írható: $M = \mathcal{F}_L(G, K) := G_{11} + G_{12}K(I - G_{22}K)^{-1}G_{21}$, ahol $G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$ a dimenzióknak megfelelő particionálás. A szabályozott bizonytalan rendszer átviteli függvényét $\mathcal{F}_U(M, \Delta) := M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}$ jelöli.

Az 1. ábrán látható rendszer robusztus stabilitását és performanciáját a strukturált szinguláris értékkel (μ) vizsgálhatjuk. A $\mu_\Delta(M_{11}) : \mathcal{RH}_\infty \mapsto \mathbb{R}$ függvény az $M_{11}(j\omega)$ átviteli függvényhez minden frekvencián hozzárendel egy valós számot, amelynek reciproka azt mutatja meg, hogy mekkora az a legkisebb strukturált Δ bizonytalanság, amely instabillá teheti a rendszert.[1] Ha a bizonytalanságra $\Delta \in \mathcal{S}_{\Delta_u}$: $\|\Delta\|_\infty \leq \beta^{-1}$ igaz, akkor az 1. ábrán látható rendszer akkor és csak akkor robusztusan stabil, ha $\mu_\Delta(M_{11}) < \beta$. A RP egy általánosított RS teszttel vizsgálható: minden $\Delta \in \mathcal{S}_{\Delta_u}$: $\|\Delta\|_\infty \leq \beta^{-1}$ bizonytalanságra $\|\mathcal{F}_U(M, \Delta)\|_\infty \leq \beta$ akkor és csak akkor teljesül, ha minden ω frekvencián $\mu_{\Delta_a}(M(j\omega)) < \beta$, ahol $\Delta_a = \mathrm{diag}\{\Delta, \Delta_p\}$, és $\Delta_p \in \mathcal{RH}_\infty : z_p \longmapsto w_p$ egy fiktív bizonytalansági blokk.

A μ függvény számítása NP-teljes nehézségű feladat, ezért egy felső

[1] A kis erősítések tételének általánosításaként kimondható, hogy a RS elégséges feltétele: $\forall\omega$: $\mu_\Delta(M_{11})\bar{\sigma}(\Delta) < 1$.

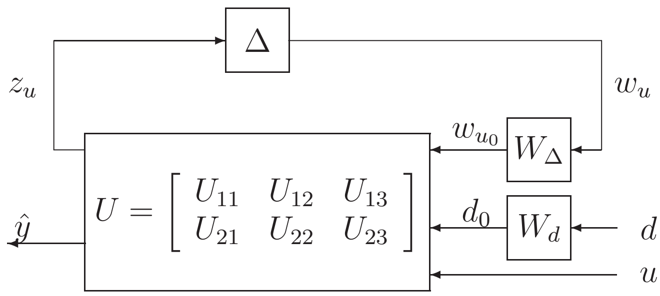
korlátját számítjuk:

$$\mu_{\Delta_a}(M(j\omega)) \leq \inf_{D_L, D_R} \bar{\sigma}(D_L(j\omega)M(j\omega)D_R(j\omega)^{-1}),$$

ahol D_L, D_R blokk-diagonális mátrixokra teljesül, hogy $D_L^{-1}\Delta_a D_R = \Delta_a$. Szabályozó tervezésekor a jobb oldali kifejezést minimalizáljuk a D_L, D_R skálázó mátrixokkal és a K szabályozóval mint változókkal. Ezt a feladatot rendszerint az ún. D-K iterációval oldjuk meg [17].

Analízis jellegű feladatokban alkalmazni szokták a ferde (skew) μ fogalmát ([4, 5, 8]), mellyel a robusztus performancia szintje (β) és a bizonytalanság mérete (β^{-1}) külön is megadható: minden $\Delta \in \mathcal{S}_{\Delta_u}$, $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ bizonytalanságra $\|\mathcal{F}_U(M, \Delta)\|_\infty \leq \gamma$ akkor és csak akkor teljesül, ha minden ω frekvencián $\mu_{\Delta_a}(M(j\omega)\text{diag}\{\gamma I_{w_u}, I_{w_p}\}) < \gamma$.

2.2. Strukturált bizonytalansági modell konzisztencia vizsgálata a frekvencia-tartományban



2. ábra. Bizonytalan rendszer

Tekintsük a 2. ábrát, mely egy $\mathcal{T} : u \mapsto y$ rendszer bizonytalan modelljét ábrázolja. Az elhanyagolt dinamikát és az ismeretlen zavarásokat $W_\Delta = \text{diag}\{W_{\Delta,1}I, ..., W_{\Delta,\tau}I\}$ ill. $W_d = \text{diag}\{W_{d,1}, ..., W_{d,n_d}\}$ súlyfüggvények normalizálják. A modell be- ill. kimenete u és $\hat{y}$. Legyenek adottak $(u(j\omega_k), y(j\omega_k))$ mérési adatok az ω_k diszkrét frekvencia pontokban. A bizonytalan modell *konzisztens* az adatokkal, ha létezik olyan $\Delta \in \mathcal{S}_{\Delta_u}$, $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ és $d \in \mathcal{L}_2$, $\|d\|_2 \leq 1$, hogy $\hat{y}(j\omega_k) = y(j\omega_k)$ teljesül [13, 9]. Ennek elégséges feltétele, hogy létezzen olyan $\theta_k \in \mathbb{C}$ szabad paraméter vektor, amely a w_{u0}, d_0 változóknak azt az alterét jelöli ki, amelyben $\hat{y}(j\omega_k) = y(j\omega_k)$ teljesül, és amellyel igaz, hogy

$$|W_{\Delta,i}(j\omega_k)| \geq \frac{|w_{u0,i}(j\omega_k,\theta_k)|}{|z_{u,i}(j\omega_k,\theta_k)|}, \qquad i = 1,\ldots,\tau \tag{1}$$

$$|W_{d,i}(j\omega_k)| \geq |d_{0,i}(j\omega_k,\theta_k)|, \qquad i = 1,\ldots,n_d \tag{2}$$

2.3. Analízis és szintézis kvadratikus integrál formulák felhasználásával

Kvadratikus integrál korlátozásoknak (a továbbiakban: IQC) nevezzük az olyan egyenlőtlenségeket, amelyekben

$$\Sigma(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} x(j\omega)^*\Pi(j\omega)x(j\omega)d\omega$$

alakú függvények szerepelnek. Az IQC-t a $\Pi(j\omega) : j\mathbb{R} \mapsto \mathbb{C}^{m\times m}$ hermitikus ($\Pi(j\omega)^* = \Pi(j\omega)$) függvény jellemzi. IQC-k segítségével a fent tárgyaltaknál általánosabb nemlineáris bizonytalan rendszereket vizsgálhatunk általánosabb performancia kritériumok szerint. Példaként tekintsük az alábbi absztrakt performancia tételt.

Tétel: (absztrakt performancia jellemzése) *Adott egy $\mathcal{S}_\Delta$ bizonytalansági halmaz, egy $\Sigma(x)$ függvény a $\Pi(j\omega)$ szorzóval és egy performancia specifikáció*

$$\Sigma_p\left(\begin{bmatrix} w_p \\ z_p \end{bmatrix}\right) \leq -\epsilon\|w_p\|_2^2 \quad \textit{minden } w_p \in \mathcal{L}_2 \tag{3}$$

alakban, ahol Σ_p egy tetszőleges $\Sigma_p : \mathcal{L}_2 \mapsto \mathbb{R}$ leképezés, mely kielégíti az $\Sigma_p\left(\begin{bmatrix} 0 \\ z_p \end{bmatrix}\right) \geq 0$ egyenlőtlenséget. Tegyük fel, hogy az 1. ábrán látható rendszerben minden $\Delta \in \mathcal{S}_\Delta$ kielégíti a

$$\Sigma\left(\begin{bmatrix} w_u \\ z_u \end{bmatrix}\right) \geq 0 \tag{4}$$

alakú IQC-t és hogy létezik egy $\epsilon > 0$ szám, amellyel

$$\Sigma\left(\begin{bmatrix} w_u \\ z_u \end{bmatrix}\right) + \Sigma_p\left(\begin{bmatrix} w_p \\ z_p \end{bmatrix}\right) \leq -\epsilon\left(\|w_u\|_2^2 + \|w_p\|_2^2\right) \tag{5}$$

teljesül minden $w_u, w_p \in \mathcal{L}_2$ esetén. Ekkor a rendszer robusztusan stabil és kielégíti a (3) *robusztus performancia feltételt.*

Adott $\mathcal{S}_\Delta$ bizonytalansági halmaz esetén a RP teljesülését úgy ellenőrizhetjük, hogy megpróbálunk minél több olyan IQC-t felírni, amely a (4)-et teljesíti $\mathcal{S}_\Delta$ minden elemére, majd ezek között kell találnunk egyet, amely kielégíti az (5) egyenlőtlenséget.

Amennyiben Δ egy szabályozás közben mérhető LTV paraméter mátrix és a G modell egy LTI rendszer, akkor *lineáris tört alakú lineáris változó-paraméterű* (LFT-LPV) rendszerről beszélünk (LFT: linear fractional transformation, LPV: linear parameter-varying). Ha a szabályozót is LFT-LPV alakban keressük, akkor a szabályozótervezési feladat az absztrakt performancia tétel segítségével *lineáris mátrix egyenlőtlenség*ek (LMI) megoldására vezet [12, 1, 2, 15].

3. Új tudományos eredmények

1. TÉZIS
LTI rendszerek strukturált bizonytalansági modelljének és robusztus szabályozójának együttes tervezése

Célunk egy olyan algoritmus létrehozása, amely a 2. ábra W_Δ és W_d súlyfüggvényeit megtervezi úgy, hogy a bizonytalan modell konzisztens legyen a mérési adatokkal és a bizonytalan modell alapján tervezett szabályozó a lehető legjobb performanciát érje el a valódi rendszeren (szakaszon).

Mivel nem rögzítjük a bizonytalanság súlyfüggvényeit, a performancia fogalmát is definiálnunk kell. A $\mathcal{H}_\infty$ szabályozások elmélete szerint ugyanis a performanciát a $w_p \mapsto z_p$ rendszer $\mathcal{H}_\infty$ normájaként definiáltuk. Most azonban a performancia csatornát a zavarójelek W_d súlyfüggvényein keresztül megváltoztatjuk, így a performancia nem lenne egy előre rögzített abszolút kritérium.

A szakaszról csak annyit tételezünk fel, hogy stabil és minden véges hosszúságú kísérletben az (u, y) mérési adatai leírhatók a 2. ábra modelljével. A

$$y = \mathcal{T}(\bar{d}, u), \quad \mathcal{T} \in \mathcal{S}_\mathcal{T}, \quad \bar{d} \in \mathcal{S}_{\bar{d}} \subset \mathcal{L}_2 \tag{6}$$

szakaszra ható $\bar{d}$ fizikai zavarás egy véges $\mathcal{S}_{\bar{d}}$ halmaz eleme. A $\mathcal{T}$ rendszer is egy véges $\mathcal{S}_{\mathcal{T}}$ halmazból veheti fel értékeit.

Ha a szakaszt a szabályozási körbe helyezzük és megfelelő súlyfüggvényekkel definiáljuk a performancia kimeneteket ($\bar{z}_p$), akkor felírhatjuk az általánosított $G_{\mathcal{T}}$ szakaszt, mellyel a performancia kimenetek $\bar{z}_p = \mathcal{F}_L(G_{\mathcal{T}}, K)(\bar{d}, \bar{r})$ alakban írhatók. Az ismert (mérhető) zárt-köri jeleket (pl. referencia jeleket) $\bar{r}$ tartalmazza. A $G_{\mathcal{T}}$ általánosított szakasz magában foglalja a $\mathcal{T}$ szakaszt és a performancia súlyfüggvényeket. Segítségével definiálhatjuk a szabályozás robusztus performanciáját:

$$\bar{\gamma}(K) := \sup_{\mathcal{T}\in\mathcal{S}_{\mathcal{T}}, \bar{d}\in\mathcal{S}_{\bar{d}}, \bar{r}\in\mathbf{B}\mathcal{L}_2} \|\bar{z}_p\|_2, \quad \bar{z}_p = \mathcal{F}_L(G_{\mathcal{T}}, K)(\bar{d}, \bar{r}), \tag{7}$$

azaz a fizikai zavarások és egyéb változások mellett tapasztalható legrosszabb $\|\bar{z}_p\|_2$ értéket. A modell alapján is felírható a RP kritérium:

$$\bar{\gamma}_s(K, W) := \sup_{w_p\in\mathbf{B}\mathcal{L}_2, \Delta\in\mathbf{B}\mathcal{S}_{\Delta_u}} \|z_p\|_2 = \|\mathcal{F}_L(\mathcal{F}_U(G_0 W, \Delta), K)\|_\infty,$$

ahol $W = \mathrm{diag}\{W_\Delta, W_d, I\}$, $G = G_0 W$ és $\mathcal{F}_L(\mathcal{F}_U(G_0 W, \Delta), K)$ a bizonytalan zárt kör átviteli függvénye. Az alábbi lemma kapcsolatot teremt a két kritérium között.

Lemma: (egy felső becslés) *Ha a W-vel jellemezhető modell minden olyan kísérlet adatával konzisztens, amely a K szabályozóval elvégezhető, akkor $\bar{\gamma}_s(K, W) \geq \bar{\gamma}(K)$.*

A lemma azt sugallja, hogy zárt körben gyűjtsünk adatokat a rendszerről és keressük meg azt a W súlyfüggvényt, amely a modell alapján számítható performanciát minimalizálja. A lemma konzisztencia feltétele a *szakaszról szóló előzetes információ nélkül* nem garantálható. Ez egyébként minden validációs feladat problémája is: egy későbbi adatsor mindig invalidálhatja a modellt. Ami a súlyfüggvények hangolását illeti, ezt a konzisztencia korlátozások mellett vett optimalizálási feladatot összeköthetjük a szabályozótervezés feladatával, így, mintegy a D-K iteráció kiterjesztéseként, a D-K-W iterációhoz jutunk. Ez a kiterjesztés érinti a D (skálázó mátrixok keresése) és a K ($\mathcal{H}_\infty$ szabályozó tervezése) lépéseket is, ha a modellezéssel összhangban $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ feltételre szeretnénk tervezni. Ekkor a ferde μ analízis $\mathrm{diag}\{\gamma I, I\}$-vel skálázott kritériuma szerint kell optimalizálni.

A D-K-W iterációt egy külső, zárt-köri kísérletekkel kiegészített iterációba helyezve az 1. tézisben javasolt algoritmushoz jutunk:

1. algoritmus
A. **Inicializáció**
B. **D-K-W iteráció**
  1) Skálázott $\mathcal{H}_\infty$ szabályozó tervezése (K)
  2) Súlyfüggvények hangolása (W)
  3) Ferde μ analízis (D)
C. **Zárt-köri kísérletek**
D. **Konzisztencia vizsgálat**

Ferde μ kritérium alkalmazása esetén kimondható az alábbi tétel, melyből a javasolt algoritmus fontos tulajdonságai következnek.

Tétel: *Adottak N kísérlet adatai E^N-nel jelölt halmazban. Az adatok alapján D-K-W iterációval megterveztük a K^N szabályozót és a W^N súlyfüggvényeket. A modell alapján garantált ferde μ performancia $\bar{\gamma}_s(K^N)$. Ezután egy új kísérletet végzünk a K^N szabályozóval. A gyűjtött adatokkal kiegészített halmazt E_{N+1}-gyel jelöljük. Az új kísérlet során mérhető (tapasztalt) performancia $\bar{\gamma}_s^{N+1} := \|\bar{z}_{p,N+1}\|_2$. Ekkor az alábbi következtetéseket tehetjük:*

1. *W^N konzisztens az E_{N+1} adathalmazzal $\Longrightarrow \bar{\gamma}_s^{N+1} \leq \bar{\gamma}_s(K^N)$*
2. *$\bar{\gamma}_s^{N+1} > \bar{\gamma}_s(K^N) \Longrightarrow W^N$ nem konzisztens a E_{N+1} adathalmazzal.*

Tehát konzisztens modell esetén a performancia nem haladhatja meg a garantált értéket. Ha a performancia meghaladja a garantált értéket, akkor a modell biztosan nem konzisztens, így az algoritmus folytatódik. Az algoritmus ezért a robusztus performancia javulását eredményezi.

A tételből az is következik, hogy az instabil vagy rossz performanciájú kísérletek adatai felhasználhatók a modell javítására. Feltételezzük, hogy bizonyos jelek monitorozásával az instabilitás detektálható. Ekkor a szabályozót kikapcsoljuk vagy egy ismert stabilizáló szabályozóra kapcsolunk. Az ilyen kísérlet szükségszerűen rosszabb performanciát mutat a garantált performanciánál, ezért az adatok a meglévő modellt (amelyre tervezett szabályozóval stabilitást vártunk) invalidálják. Az algoritmus megnövelt súlyfüggvényekkel folytatódni fog.

Összefoglalásként kimondható az alábbi tézis:

1. tézis

Lineáris idő-invariáns rendszerek robusztus szabályozójának tervezésére kidolgoztam egy iteratív eljárást, mely mérési adatokra támaszkodva, a robusztus performancia kritérium minimalizálásával meghatározza mind a szabályozót, mind pedig az adatokkal konzisztens strukturált bizonytalansági modell súlyfüggvényeit. Az eljárás kezeli az instabil zártköri kísérleteket, azok adatait is felhasználva biztosítja a szabályozott rendszer garantált robusztus performanciájának javítását. Additív bizonytalansági struktúrák esetére az eljárást LMI-optimalizálási feladatok sorozataként írtam fel. Az eljárás részeként kidolgoztam az ún. ferde (skew) μ szintézis lépéseit. Az eljárásról bebizonyítottam, hogy ha a valódi rendszeren mérhető performancia a tervezés alapján garantált performanciát meghaladja, akkor a modell szükségképpen inkonzisztens, ami a modell és a szabályozó újratervezését vonja maga után.

Az 1. tézishez kapcsolódó publikációk: [RB05b, RB06b, RB06a, RGSB08, Röd09, RBar, RG10]. A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 4. fejezetében.

2. TÉZIS
LPV rendszerek strukturált bizonytalansági modelljének és robusztus szabályozójának együttes tervezése

Nemlineáris rendszerek széles skálája jól közelíthető LPV modellekkel, így LPV szabályozókkal a nemlineáris rendszerekre is stabilitási és performancia garanciák érhetők el. Az utóbbi két évtizedben ezért egyre több LPV alkalmazás jelent meg főleg a járműiparban (lásd pl. [7, 10, 14]). Az LTV hangoló paraméterekkel kapcsolatos modellezési többlet feladatok és a szabályozótervezés nagyobb számításigénye miatt a bizonytalansági modell súlyfüggvényeinek heurisztikus megválasztása az LTI esethez képest még fáradságosabb feladat. Ezért LPV modellek esetén talán még hasznosabb lehet a súlyfüggvények konzisztencia-feltételek melletti automatikus optimalizálása.

LPV rendszereknek nincs frekvencia-tartományi reprezentációjuk. Kézenfekvő lenne a konzisztencia feltételeket az időtartományban megadni. Ez viszont az adathosszal arányos méretű változók és mátrixok egyidejű kezelését vonná maga után, tehát csak nagyon rövid kísérleteket lehetne elvégezni a jelenlegi számítási kapacitás mellett. Az (1)-(2) frekvencia-tartományi konzisztencia feltételek előnye, hogy a teszt sok kisméretű feladatra esik szét, melyekben az U_{23} névleges modell nem szerepel. Ezért azzal a megkötéssel, hogy a bizonytalanság nem függ a hangoló paraméterektől, a frekvencia-tartományi konzisztencia korlátok LPV rendszerekre is alkalmazhatók. A súlyfüggvények frekvencia-tartományi hangolásának van még egy feltétele: a RP kritérium frekvencia-tartományi létezése. Belátható, hogy LFT-LPV rendszerekre az (5) feltétel a frekvencia-tartományban is megadható.

A teljes súlyfüggvény- és robusztus szabályozótervezési eljárás az alábbi algoritmusban foglalható össze.

2. algoritmus

A. **Inicializáció**

B. **D-K-W iteráció**

1) LPV szabályozó tervezése (K)
2) Súlyfüggvények hangolása (W)
3) Ferde μ analízis (D)

C. **Zárt-köri kísérletek**

D. **Konzisztencia vizsgálat**

Az LPV szabályozó tervezése Scherer módszerével [12] az időtartományban elvégezhető. A súlyfüggvények hangolása és a D skálázó mátrixok keresése a frekvencia-tartományban történik. Annak érdekében, hogy a 3. fejezet lemmái és tételei érvényesek legyenek itt is, a ferde μ kritériumnak megfelelően kellett az IQC-k Π szorzóit paraméterezni.

Összefoglalásként kimondható az alábbi tézis:

2. tézis

Lineáris változó-paraméterű (LPV) rendszerek robusztus szabályozójának tervezésére kidolgoztam egy iteratív eljárást, mely mérési adatokra támaszkodva, a robusztus performancia kritérium minimalizálásával meghatározza mind az LPV szabályozót, mind pedig az adatokkal konzisztens strukturált dinamikus bizonytalanság súlyfüggvényeit. A lineáris tört alakban (LFT) megadott rendszerre kvadratikus integrál korlátozások (IQCs) segítségével idő- és frekvencia-tartományban is meghatároztam a robusztus performancia optimalizálási feladatot, így a szabályozó és a modell is a numerikusan kedvezőbb feltételek mellett számítható. Additív bizonytalansági struktúrák esetére az eljárást LMI-optimalizálási feladatok sorozataként írtam fel. Az algoritmus kedvező tulajdonságai, hogy kezeli az instabil zárt-köri kísérleteket és biztosítja a robusztus performancia javítását a valódi, ismeretlen rendszeren.

A 2. tézishez kapcsolódó publikációk: [RLB07, MKD$^+$09, RGB09]. A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 5. fejezetében.

3. Tézis Tehergépkocsik vészhelyzeti kormányzása az első kerekek fékezésével

A kutatás célja az volt, hogy vizsgáljuk meg, milyen minőséggel kormányozható egy teherautó csupán a fékrendszer használatával[2]. Ez a probléma olyan esetekben merülhet fel, amikor a vezető elalszik, rosszul lesz, stb. és a szabályozás számára elérhető egyetlen beavatkozási

[2]A 3. tézisben bemutatott irányítási feladat motiválta az első két tézis célkitűzéseit. Adott egy bonyolult *valódi* rendszer, melyre egyszerű struktúrájú robusztus szabályozót kell tervezni, de sejtelmünk sincs róla, hogy az identifikált nominális modell hibáját hogyan kellene szétosztani az elhanyagolt dinamikák és a külső zavarások között, amelyek pontos azonosítása sem egyszerű.

lehetőség az elektronikus fékrendszer, melyet szoftveres úton alkalmassá lehet tenni a kormányzási feladat ellátására.

Természetesen a fékrendszer kormányzási képessége korlátos, ezért a szabályozót ún. normál vezetési körülményekre (oldalgyorsulás $< 4.2\frac{m}{s^2}$) és száraz aszfaltra tervezzük. Feltételezzük, hogy a jármű el van látva valamilyen navigációs rendszerrel, amely meghatározza a jármű kívánt pályáját és azt a szabályozónak legyezési szögsebesség alapjel formájában átadja.

A jó referencia-követés mellett az is cél, hogy a fékpofákat kímélve minél kisebb fékezéssel kormányozzunk. Egy megterhelt MAN teherautón végzett kísérletsorozat tapasztalataiból megállapítottuk, hogy sem a hátsó, - és lefogott kormánykerék esetén - sem az első kerekek egyoldali, erős fékezésének nem volt érezhető hatása a legyezési dinamikára. Viszont elengedett kormánykerék esetén a kormánymű nagyon kicsi (10%) féknyomásokkal is elfordítható és a jármű széles sebességtartományban jól kormányozható.

Az implementálhatóság kedvéért alacsony fokszámú lineáris szabályozókat szeretnénk tervezni egyszerű névleges modell alapján, mely a szabályozási feladat szempontjából kielégítően közelíti a kerekek, a kormánymű és a jármű legyezési dinamikáját. A külső zavarások, modellezési egyszerűsítések és ismeretlen paraméterek miatti bizonytalanság, valamint a szigorú megbízhatósági előírások miatt a $\mathcal{H}_\infty/\mu$ tervezési módszert választjuk. A szabályozót egy nagy megbízhatóságú szimulációs programon teszteljük.

A feladat megoldására az alábbi tézisben összefoglalható eredmény született:

3. tézis

Valós járművön végzett kísérletek tapasztalatai alapján kidolgoztam egy eljárást tehergépjárművek elsőkerék-fékezéssel történő vészhelyzeti kormányzására, mely a feladatkitűzéstől a modellezésen át a szabályozótervezésig a teljes tervezési ciklust felöleli, és amely a következő lépésekből áll:

I. Sebességgel modulált lineáris modell tervezése

1. Fizikai egyenletek alapján levezettem egy folytonos-idejű állapot-

tér modellt, amely a jármű legyezési dinamikáját, valamint a kormánymű és a kerekek dinamikáját írja le.

2. *Fizikai megfontolások alapján egyszerűsítő feltételeket vezettem be, melyekkel a jármű különböző dinamikai komponenseit lehet elhanyagolni. Kidolgoztam egy paraméter-identifikáción és a rendszer pólusainak elemzésén alapuló modell-redukciós kritériumot, mellyel meghatároztam a jármű névleges modelljét.*

II. *Robusztus szabályozó tervezése*

1. *A bizonytalansági modell számára egy numerikusan jól kezelhető, multiplikatív dinamikából és additív zavarásból álló struktúrát javasoltam. Lineáris mátrix-egyenlőtlenségek segítségével megadtam az összes, mérési adatokkal konzisztens modell halmazát.*
2. *Szabályozót terveztem a legyezési szögsebesség referencia követésére: a robusztus performanciát a súlyfüggvények hangolásával és μ szintézis segítségével minimalizáltam.*

Megmutattam, hogy 1.) az első kerekek aszimmetrikus fékezésével, normál vezetési körülmények között, a jármű kis féknyomás alkalmazásával is jól kormányozható 2.) összehasonlítva a μ szintézissel, a kidolgozott szabályozótervezési eljárás javítani képes a robusztus performancián.

A 3. tézishez kapcsolódó publikációk: [Röd03, RB04b, RB04a, RB05b, RB05a, Röd07, RGSB08, Röd09, RBar, RGB10]. A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 6. fejezetében.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

[MKD+09] A. Marcos, M. Kerr, G. De Zaiacomo, L.F. Penín, Z. Szabó, G. Rödönyi, and J. Bokor. Application of LPV/LFT modeling and data-based validation to a re-entry vehicle. *In AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Chicago, US*, 2009.

[RB04a] G. Rödönyi and J. Bokor. Identification of LPV steering models of a truck. *5th International PhD Workshop on*

Systems and Control, a Young Generation Viewpoint, Balatonfüred, Hungary, ISBN 963 311 359 8, page on CD, 2004.

[RB04b] G. Rödönyi and J. Bokor. Identification of LPV vehicle models for steering control involving asymmetric front wheel braking. *6th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, NOLCOS-2004, Stuttgart, Germany*, pages 663–668, 2004.

[RB05a] G. Rödönyi and J. Bokor. Identification of an LPV vehicle model based on experimental data for brake-steering control. *16th IFAC World Congress, Prague*, page on CD, 2005.

[RB05b] G. Rödönyi and J. Bokor. Uncertainty identification for a nominal LPV vehicle model based on experimental data. *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference CDC-ECC'05, Seville, Spain*, pages 2682–2687, 2005.

[RB06a] G. Rödönyi and J. Bokor. Integrated uncertainty model identification and robust control synthesis for linear time-invariant systems. *14th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ancona, Italy*, pages WM4–6, 2006.

[RB06b] G. Rödönyi and J. Bokor. A joint structured complex uncertainty identification and mu-synthesis algorithm. *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Control Applications, Munich, Germany*, pages 2927–2932, 2006.

[RBar] G. Rödönyi and J. Bokor. Uncertainty remodeling for robust control of linear time-invariant plants. *Periodica Politechnica, Elect. Eng*, to appear.

[Röd03] G. Rödönyi. Vehicle models for steering control. Technical report, System and Control Laboratory, Computer and Automation Research Institute, SCL-4-2003, 2003.

[Röd07] G. Rödönyi. A dynamic model of a heavy truck. Technical report, System and Control Laboratory, Computer and Automation Research Institute, SCL-1-2007, 2007.

[Röd09] G. Rödönyi. Iterative design of uncertainty model and robust controller based on experiment data. *European Control Conference, ECC'09, Budapest, Hungary*, pages 802–807, 2009.

[RG10] G. Rödönyi and P. Gáspár. Iterative design of structured uncertainty models and robust controllers based on closed-loop data. *Accepted in IET Control Theory and Applications*, 2010.

[RGB09] G. Rödönyi, P. Gáspár, and J. Bokor. Robust LPV controller synthesis with uncertainty modelling. *17th Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece*, pages 815–820, 2009.

[RGB10] G. Rödönyi, P. Gáspár, and J. Bokor. The emergency steering of a heavy truck by front-wheel braking. *Appears in International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2010.

[RGSB08] G. Rödönyi, P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor. Uncertainty remodeling for robust control of linear time-invariant plants. *16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, France*, pages 232–237, 2008.

[RLB07] G. Rödönyi, B. Lantos, and J. Bokor. Uncertainty modeling and robust control of LTI systems based on integral quadratic constraints. *11th International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES07, Budapest, Hungary*, pages 207–212, 2007.

További publikációk

[ECR+06a] B. Erdélyi, B. Csákány, G. Rödönyi, A. Soumelidis, Zs. Lang, and J. Németh. Dynamics of ocular surface topography in healthy subjects. *Ophthalmic and Physiological Optics, IF: 0.925 in 2006*, 26:419–425, 2006.

[ECR+06b] B. Erdélyi, B. Csákány, G. Rödönyi, A. Soumelidis, Zs. Lang, and J. Németh. A könnyfilm dinamika vizsgálata nagy sebességű videotopográfiával. *Szemészet*, 143:83:87, 2006.

[FSP+05] Z. Fazekas, A. Soumelidis, T. Péni, G. Rödönyi, and J. Bokor. An inexpensive indoor self-positioning system for mobile platforms with web-camera. *Joint Hungarian-Austrian Conference on Image Processing and Pattern Recognition, Veszprém, Hungary*, pages 33–40, 2005.

[G.02] Rödönyi G. Nemlineáris dinamikus rendszerek LPV irányítása. *MicroCAD Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, Magyarország*, pages 175–180, 2002.

[PR00] T. Péni and G. Rödönyi. Soft computing modeling and real time model based adaptive control. *IFAC Symposium on Artificial Intelligence in Real Time Control, AIRTC, Budapest, Hungary*, pages 257–262, 2000.

[RBL02] G. Rödönyi, J. Bokor, and B. Lantos. LQG control of LPV systems with parameter-dependent lyapunov function. *10th Mediterranean Conference on Control and Automation, Lisbon, Portugal*, pages WP5–2, 417.pdf on CD, 8 pages, 2002.

[Röd01] G. Rödönyi. LPV control of an inverted pendulum. Technical report, Computer and Automation Institute Hungarian Academy of Sciences, Systems and Controls Laboratory, SCL-3-2001, 2001.

[Röd02] G. Rödönyi. Linear parameter-varying LQG control design with parameter-dependent lyapunov function. *6th International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES'02, Opatija, Croatia*, pages 429–434, 2002.

[Röd03] G. Rödönyi. Nonlinear plain model of a car. Technical report, Computer and Automation Research Institute HAS, Systems and Controls Laboratory, SCL-2-2003, 2003.

[RGB07] G. Rödönyi, P. Gáspár, and J. Bokor. Vehicle stability enhancement by a robust cascade control of the brake system. *Proceedings of the European Control Conference ECC07, Kos, Greece*, pages 638–643, 2007.

Hivatkozások

[1] P. Apkarian and P. Gahinet. A convex characterization of gain-scheduled $\mathcal{H}_\infty$ controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40, no. 5:853–864, 1995.

[2] G. Becker. Additional results on parameter-dependent controllers for LPV systems. *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, G:351–356, 1996.

[3] J. Chen. Frequency-domain tests for validation of linear fractional uncertain models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42:748–760, 1997.

[4] M.K.H. Fan and A.L. Tits. A measure of worst-case $\mathcal{H}_\infty$ performance and of largest acceptable uncertainty. *System and Control Letters*, 18(6):409–421, 1992.

[5] G. Ferreres and V. Fromion. Computation of the robustness margin with the skewed mu tool. *System and Control Letters*, 32:193–202, 1997.

[6] B. A. Francis. *A Course in H-infinity Control Theory.* Lecture Notes in Control and Information Science, vol. 88, Springer-Verlag, Berlin, 1987.

[7] P. Gáspár, I. Szászi, and J. Bokor. Rollover avoidance for steer-by-wire vehicles by using linear parameter varying methods. *Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2003.

[8] R. Holland, P.M. Young, and C. Zhu. Development of a skew μ upper bound. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 15, No. 18:905–921, 2005.

[9] K. B. Lim and D. P. Giesy. Parameterization of model validating sets for uncertainty bound optimizations. *AIAA report*, 98-4135, 1998.

[10] A. Marcos and G. Balas. Linear parameter varying modeling of the boeing 747-100/200 longitudinal motion. In *AIAA Guidance Navigation and Control Conference No. AIAA-01-4347, Montreal, Canada*, 2001.

[11] K. Poolla, P. Khargonekar, A. Tikku, J. Krause, and K. Nagpal. A time-domain approach to model validation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39:951–958, May 1994.

[12] C. Scherer and S. Weiland. *Lecture notes DISC course on linear matrix inequalities in control, Version 2.0.* 1999.

[13] R. S. Smith and J. C. Doyle. Model validation: a connection between robust control and identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37, No 7:942–952, July 1992.

[14] M. S. Spillman. Robust longitudinal flight control design using linear parameter-varying feedback. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 23, No 1:101–108, January-February 2000.

[15] F. Wu. Control of linear parameter varying systems. *PhD dissertation, UC Berkeley, CA*, 1995.

[16] G. Zames. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms and approximate inverses. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26:301–320, July 1981.

[17] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover. *Robust and optimal control.* Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996.