VISSZACSATOLÁS-TERVEZÉSI MÓDSZEREK KOOPERATÍV ÉS KORLÁTOZÁSOKAT TARTALMAZÓ IRÁNYÍTÁSI PROBLÉMÁKRA

A Ph.D. disszertáció tézisei

Szerző:
PÉNI TAMÁS

Konzulensek:
Dr. Bokor József
Dr. Lantos Béla

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

Budapest

MTA SZTAKI

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

Budapest

2009

Motiváció

Az utóbbi években a számítógépes rendszerek teljesítményének növekedése és a hozzá kapcsolódó szoftvertechnológia gyors fejlődése lehetővé tette összetett irányítási algoritmusok valós idejű végrehajtását, akár alacsony költséggel felépíthető, kisméretű, beágyazott platformon is. Ez a technológiai fejlődés adja a motivációt ahhoz, hogy a meglévő irányítási módszereket felülvizsgáljuk és kiterjesszük olyan komplex problémákra is, melyek korábban, a jelentős számításigényük miatt nem voltak megoldhatóak. Új kutatási irányok jelentek meg, mint például az autonóm rendszerek kooperatív irányítása, miközben számos klasszikus kutatási terület (pl. modell prediktív irányítás) újra nagy figyelmet kapott. Jelen dolgozat is ehhez a fejlődési irányt kívánja követni, eredményei a kooperatív irányítás (1. tézis), modell prediktív szabályozás (2. tézis) és a $\mathcal{H}_\infty$ irányítások (3. tézis) területéhez kapcsolódnak.

Alapfogalmak, felhasznált módszerek és eszközök

Az alábbiakban röviden felsoroljuk a rendszer- és irányításelmélet azon módszereit és eszközeit, melyek szükségesek voltak a tézisekben megfogalmazott eredmények kidolgozásához.

Lineáris Változóparaméterű (LPV) rendszerek [1],[13]. Olyan diszkrét vagy folytonos időben definiált rendszerek, melyek felírhatók az alábbi alakban:

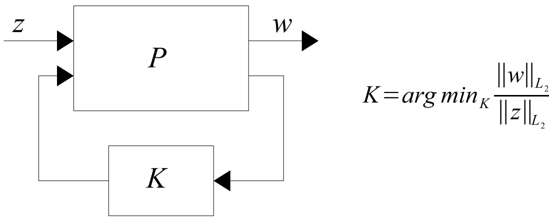
$$x_+ = A(\rho)x + B(\rho)u \qquad y = C(\rho)x + D(\rho)u$$

ahol $\rho \in \mathbb{R}^p$ időtől függő, változó paraméter és $()_+$ jelöli diszkrét idejű változó 'következő értékét' ($x_+ \doteq x_{k+1}$ a k-adik időpillanatban), vagy a folytonos idejű változó idő szerinti deriváltját ($\dot{x}$). Ha a rendszermátrixok *affin* függvényei a paraméternek és ismertek a ρ-beli paraméterek alsó illetve felső korlátai, az LPV rendszer ún. politópikus alakba írható:

$$x_+ = A(t)x + B(t)u \qquad y = C(t)x + D(t)u$$

ahol $[A(t), B(t)] \in \text{co}\{[A_1, B_1], \ldots, [A_{2^p}, B_{2^p}]\}$ megfelelő dimenziójú, konstans mátrixok.

$\mathcal{H}_\infty$ irányítás [19]. Alkalmasan megtervezett kimenet- vagy teljes állapotvisszacsatolás (output feedback, state feedback), amely minimalizálja egy dinamikus rendszer adott bemenetei és kimenetei közötti indukált $\mathcal{L}_2$ (vagy diszkrét időben ℓ_2) normát. (Lásd 1 ábra).



1. ábra. Irányítási struktúra P szabályozott rendszerrel és K szabályozóval. K minimalizálja a w bemenet and z kimenet közötti indukált $\mathcal{L}_2$ normát.

Lineáris mátrixegyenlőtlenség (LMI) [1],[13]. $F(x) := F_0 + x_1 F_1 + \ldots + x_m F_m > 0$ formában definiált konvex korlátozás az $x \in \mathbb{R}^m$ változóra. $F_0, \ldots, F_m$ valós, szimmetrikus mátrixok.

Passzív rendszer [17]. Az általános alakban felírt $\dot{x} = f(x, u), y = h(x, u)$ rendszer *passzív*, ha létezik $S : X \to \mathbb{R}^+$ tárolófüggvény, amely kielégíti a $S(x(t_1)) \leq S(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} y(t)^T u(t) dt$ disszipációs egyenlőtlenséget minden $t_1 \geq t_0$ értékre és minden u bemeneti függvényre. Könnyen belátható, hogy a passzivitás maga után vonja az irányítatlan ($u \equiv 0$ mellett értelmezett) rendszer stabilitását; továbbá passzív rendszerek negatív visszacsatolásával nyert dinamika szintén passzív, és ennek következtében stabil lesz.

Dinamikus inverz [14],[5]. Az általános alakban adott $\dot{x} = f(x) + g(x)u,\ y = h(x)$ rendszer dinamikus inverze egy olyan, ugyancsak dinamikus rendszer, amelyen keresztül az eredeti rendszer kimenetét (állapotát) negatívan visszacsatolva az eredeti rendszer integrátorsorrá transzformálható. Ahhoz, hogy a dinmikus inverzet megkapjuk – SISO esetben – a $T(x) = [h(x) = y, L_f h(x) = \dot{y}, \ldots, L_f^{r-1} h(x), z(x)]^T$ nemlineáris állapottranszformációt kell elsőként végrehajtanunk.

Ennek eredményeképp az alábbi rendszert kapjuk:

$$
\begin{aligned}
\dot{\xi}_i &= \xi_{i+1} \quad i = 1 \ldots r-1 \\
\dot{\xi}_r &= b(\xi, \eta) + a(\xi, \eta) u \\
\dot{\eta} &= p(\xi, \eta) + q(\xi, \eta) u
\end{aligned}
$$

Ha a $\dot{\eta} = p(\xi, \eta)$ alrendszer stabil a dinamikus inverz képezhető az alábbi formában:

$$
\begin{aligned}
u &= \frac{-b(\xi, \hat{\eta}) + w}{a(\xi, \hat{\eta})} \\
\dot{\hat{\eta}} &= p(\xi, \hat{\eta}) + q(\xi, \hat{\eta}) \frac{-b(\xi, \hat{\eta}) + w}{a(\xi, \hat{\eta})}
\end{aligned}
$$

Ahhoz, hogy a fenti inverz rendszert szabályozótervezésnél használni tudjuk, biztosítanunk kell továbbá a becsült $\hat{\eta}$ állapot konvergenciáját a valódi η trajektóriához.

Modell prediktív irányítás (MPC) [8], [9]. Olyan numerikus optimalizáción alapuló irányítási módszer, amelynél – diszkrét időt feltételezve – a beavatkozójel jövőbeli értékeit (véges időhorizonton előretekintve) minden diszkrét időlépésben egy előírt költségfüggvény minimalizálása révén határozzuk meg. A költségfüggvény függ a rendszer jövőbeli állapotaitól, melyeket a rendszer alkalmas modellje alapján, a beavatkozójelek és a kezdőállapot függvényében számolni tudunk. Az optimális beavatkozójel-szekvencia meghatározása után, annak első elemét ráadjuk a rendszer bemenetére. A következő időpillanatban megmérjük (becsüljük) az állapotváltozókat és a folyamat kezdődik elölről.

Legyen tehát, az irányítandó rendszer $x_{k+1} = F(x_k, u_k)$ alakban adott. Feltesszük, hogy az x_k állapotot ismerjük (mérjük, becsüljük). A beavatkozójel meghatározásához a k-adik időpillanatban az alábbi optimalizálási feladatot oldjuk meg:

$$\begin{aligned} & \arg\min_{U,K} J(X_k, U_k) \\ \text{subject to} \quad & x_{k+i+1|k} = F(x_{k+i|k}, u_i) \\ & H(X_k, U) \leq 0 \\ & x_{k|k} = x_k \end{aligned}$$

ahol $U_k = u_0, u_1, ..., u_{N-1}$, $X_k = x_{k|k}, x_{k+1|k}, ..., x_{k+M-1|k}$, J a költségfüggvény, $x_{k+i|k}$ a k időpontbeli mérés alapján prediktált állapotot a $k+i$-edik időpillanatban, továbbá N and M jelöli az irányítási és prediktálási horizontot. Az optimális U_k^* meghatározása után, annak első elemét tekintjük a k-adik időpillanatban érvényes beavatkozójelnek, azaz $u_k = u_{k|k}^*$.

Zavarás-invariáns halmaz [6], [11]. Legyen adott az $x_+ = F(x, u, w)$ diszkrét idejű rendszer az alábbi korlátozásokkal: $x \in X$ és $u \in U$. Tegyük fel, hogy a w zavarás csak a zárt W halmazból vesz fel értékeket. Ekkor az S halmaz a $u = K(x)$ szabályozó által generált zavarás-invariáns halmaz, ha minden $x \in S$ értékre $K(x) \in U$, $x \in X$ és $F(x, u, w) \in S$ teljesül minden $w \in W$ zavarás mellett.

1. TÉZIS
Dinamikus inverzen és passzivitáson alapuló formáció irányítás

A számítógépes rendszerek teljesítményének növekedése, valamint a kommunikációs és szenzortechnológia gyors fejlődése az utóbbi években utat nyitott olyan automatizált, vezető mélküli járművek létrehozása felé, melyek együttműködve egymással olyan összetett feladatok megoldására is alkalmasak, amely már túlmutat az egyéni járművek képességein. Habár a kooperatív irányítások alkalmazási területei sokfélék és nagyon külnbözőek lehetnek, a vezető nélküli repülőgépektől a mobil szenzor hálózatokig, az irányítástervezésben számos közös pont fedezhető fel. [10],[3],[18].

Az autonóm járművek irányítási rendszere szinte mindig hierarchikus, ahol az alacsonyabb szinteken lévő szabályozók feladata a járműdinamika egyszerűsítése a magasabb szinteken lévő, a kooperatív irányítási feladatokat ellátó komponensek számára. Így a kooperatív irányítás megtervezése lényegesen egyszerűbbé válik, miközben maga az irányítás függetleníthető az egyedi járműdinamikától.

Természetesen a teljes rendszer stabilitása kulcsfontosságú a szabályozási rendszer alkalmazhatósága szempontjából. Ennek ellenére az irodalom leginkább a felsőszintű szabályozók megtervezésére koncentrál és nem vizsgálja a rendszer egészének viselkedését. Ennek az analízisnek a jól érzékelhető hiánya adta a motivációt, hogy olyan szabályozási rendszert tervezzünk, amelyben az egyes komponensek egymástól függetlenül tervezhetők úgy, hogy közben a teljes rendszer stabilitása megmarad.

1. Tézis *Hierarchikus, formációt stabilizáló szabályozási rendszert javasoltam autonóm járműcsoportok számára. A szabályozó egy mesterséges potenciálfüggvény alapú felsőszintű, és egy dinamikus inverzen alapuló alsószintű szabályozási körből áll. Külső, passziváló visszacsatolást terveztem, melynek révén a teljes rendszerre érvényes Lyapunov függvény tervezhető és ezáltal a globális stabilitás garantálható.*

Dinamikus inverz alapú alacsony szintű szabályozást terveztem közúti járművek számára, az egyszerűsített ún. single-track dinamika alapján. Megmutattam, hogy a zéró-dinamika a jármű fizikai paramétereitől függetlenül mindig stabil.

A linearizált járműmodellt mesterséges potenciálfüggvényre épülő felsőszintű szabályozóval kötöttem össze. Passzivitáson alapuló külső visszacsatolást terveztem, melynek révén a teljes rendszerre érvényes Lyapunov függvény tervezhető.

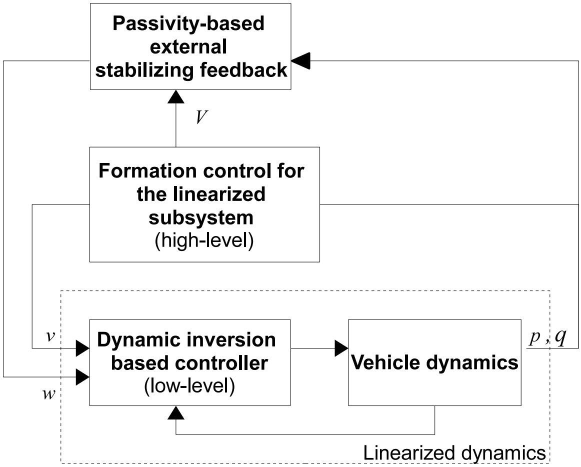
Megvizsgáltam az irányított rendszer robosztussági tulajdonságait és a kis erősítések tétele alapján meghatároztam a bizonytalansági modellnek azt a maximális $\mathcal{L}_2$ erősítését (a bizonytalanság felső határát), amely mellett a rendszer stabilitása még nem sérül.

Szimulációk segítségével megmutattam, hogy az általam javasolt módszer alkalmas közúti járműformációk stabilizálására.

Az 1. Tézishez kapcsolódó publikációk [PSBH04],[PB04],[PB05],

[PB06], [Pén08a],[Pén08b].

A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 2. Fejezetében.



2. ábra. A dinamikus inverzen és passzivitáson alapuló irányítási rendszer egyszerűsített blokkdiagrammja. (p, q jelöli a járművek sebességét és pozícióját, V jelöli mindazt a felsőszintű szabályozótól származó információt, amelyre a külső stabilizáló visszacsatolás számításához szükség van.)

2. TÉZIS Bizonytalan LPV rendszerek robusztus modell prediktív irányítása

A modell prediktív irányítás népszerű eszköz korlátozásokat tartalmazó irányítási feladatok megoldására. Az MPC optimális (adott költséget minimalizáló) megoldást nyújt, a korlátozásokat – természetes módon –

közvetlenül epíti be az aktuális beavatkozójelet meghatározó optimalizálási feladatba. Azonban, mint minden módszernek, ennek is vannak korlátai:

1. Habár a számítógépes rendszerek gyors fejlődése lehetővé tette összetett numerikus módszerek hatékony és gyors végrehajtását, a numerikus optimlazálás on-line végrehajtása még sok esetben mindig, a rendszer mintavételi idejéhez képest, nagy időt igényel.

2. Az MPC, működési jellegéből adódóan, hatékonyan csak lineáris, szakaszonként lineáris, illetve affin rendszerekre alkalmazható.

3. A prediktív irányítás tervezése előtt az eredetileg folytonos rendszert diszkretizálni kell. Ha a rendszer eltér a lineáris, időinvariáns modelltől nincs általánosan használható diszkretizálási eljárás. A nemlineáris, LPV rendszerekre alaklamazható módszerek általában megváltoztatják a modell struktúráját és stabilitási tulajdonságait is, ami nem elhanyagolható a szabályozás megtervezése szempontjából. [15]

Bizonytalan lineáris rendszerekre, politópikus vagy normakorlátos bizonytalanság esetére, Kothare et.al. a [7] dolgozatban LMI alapú model prediktív irányítást javasolt. A tézis ezt az algoritmust fejleszti tovább annak érdekében, hogy az MPC fentebb felsorolt korlátait megszűntesse.

Két eredmény született, mindkettő diszkrét idejű, változóparaméterű rendszerekre. Az első lehetővé teszi az eredeti MPC algoritmus valós idejű alkalmazását, biztosítja a megoldhatóság és robosztus stabilitás feltételeit olyan esetben is, amikor a mintavédeli idő összemérhető az on-line számítási idővel. A második eredmény kiterjeszti az MPC algoritmust szakaszonként politópikus modellel leírható, diszkrét idejű, bizonytalan LPV rendszerekre. A modellstruktúra választását a paramétereiben nemlineáris, folytonos LPV rendszer diszkretizálásaként adódó rendszerstruktúra indokolja.

2. Tézis *a) Lineáris mátrixegyenlőtlenségen alapuló, valós időben realizálható modell prediktív irányítási módszert dolgoztam ki diszkrét idejű LPV rendszerekre. Az eredeti MPC algoritmust alkalmasan megválasztott LMI korlátozásokkal kiegészítve elértem, hogy a stabilitás és megold-*

hatóság feltételei akkor is teljesüljenek, ha az on-line számítási idő összemérhető a mintavételi idővel.

b) A lineáris, időinvariáns rendszerekre kidolgozott algoritmusokból kiindulva az LMI alapú modell prediktív irányítást kiterjesztettem bizonytalan, szakaszonként politópikus LPV rendszerekre. Az eredeti algoritmushoz hasonló tervezési eljárást követve új LMI korlátozások bevezetésével biztosítottam a robosztus stabilitást és a megoldhatóságot.

A javasolt módszerek alkalmazhatóságát autonóm jármű sebességkövető szabályozásán, és a Paksi Atomerőmű primer köréhez kapcsolódó irányítási feladatok megoldásán keresztül mutattam meg.

A 2. Tézishez kapcsolódó publikációk: [PSB07],[PB07],[PS08]

A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 3. Fejezetében.

3. Tézis
Előírt korlátozásokat betartó $\mathcal{H}_\infty$ irányítás tervezése interpolációval, diszkrét LPV rendszerekre

Az indukált $\mathcal{L}_2$ (or ℓ_2) norma minimalizálásán alapuló $\mathcal{H}_\infty$ szabályozás általános, széles körben alkalmazott irányítási módszer. Leginkább a robosztus irányítástervezés meghatározó eszköze, mivel az irányítási feladatok jelentős része (úgymint stabilizálás, trajektóriakövetés) bizonytalan rendszer esetén is könnyen átfogalmazható alkalmas $\mathcal{H}_\infty$ feladattá.

A klasszikus $\mathcal{H}_\infty$ elmélet nem kezeli a beavatkozójelre és az állapotokra előírt korlátozásokat, habár ezek fontosak a valós realizálhatóság szempontjából. A korlátozásokat is betartó $\mathcal{H}_\infty$ szabályozó tervezése még nem megoldott feladat. LPV rendszerek esetén például a javasolt módszerek zöme nagyon időigényes (MPC), numerikusan nehezen megoldható (nemkonvex optimalizáláson vagy nemlineáris mátrixegyenlőtlenségeken alapuló eljárások) vagy túlságosan konzervatív, és ezért a gyakorlatban nehezen használható megoldást ad (LMI alapú módszerek) ([4],[2]).

Mindez motivációt ad ahhoz, hogy az eddigiektől eltérő megközelítést válasszunk a korlátozásokat betartó $\mathcal{H}_\infty$ probléma megoldására. A választott megközelítés a szabályozók interpolációján ([12],[11]) alapuló eljárás. Az általam javasolt irányítási módszer valós időben implementálható, jórészt előre, off-line számítható elemeket tartalmaz, továbbá megnöveli a zárt körre számított zavarás-invariáns ([6]) halmazt. Ez utóbbi azért fontos, mivel a zavarás-invariáns halmaz határozza meg a szabályozó alkalmazhatósági tartományát.

3. Tézis *Hatékony, lineáris programozáson alapuló eljárást dolgoztam ki diszkrét idejű LPV rendszeren konstans állapotvisszacsatolás által generált, zavarás-invariáns halmaz közelítő számítására. A módszer felhasználásával kontroller-inerpoláción alapuló olyan $\mathcal{H}_\infty$ szabályozást javasoltam, ugyancsak LPV rendszerekre, amely betartja az előírt szigorú korlátozásokat és lényegesen nagyobb állapothalmaz fölött alkalmazható, mint bármely konstans állapotvisszacsatolás. (Lásd 3. ábra).*

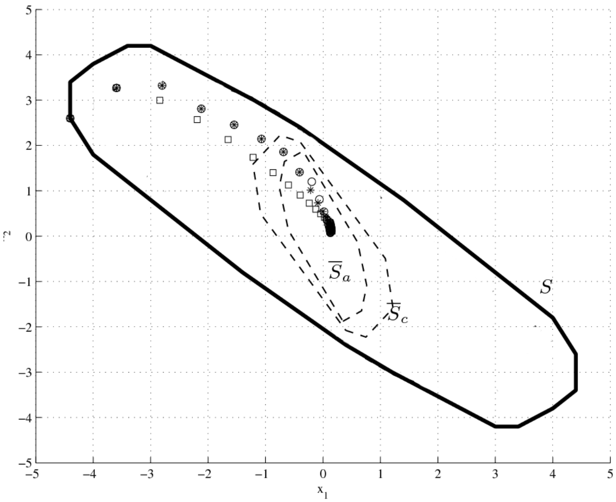
Az invariáns halmazt meghatározó algoritmus a korlátozások által meghatározott konvex halmazból indul ki. Ezt a halmazt iteratív lépésekben addig szűkíti, amíg a maximális zavarás invariáns halmaz, vagy annak kellően jó approximációja előáll.

A javasolt irányítás előre megtervezett $\mathcal{H}_\infty$ szabályozók közötti online interpolációra épül. Ehhez $\mathcal{H}_\infty$ állpotvisszacsatolásokat kell terveznünk a rendszerhez úgy, hogy a korlátozásokra a tervezés során nem vagyunk tekintettel. Egyedül arra kell ügyelni, hogy a szabályozók zöme oldja meg a $\mathcal{H}_\infty$ feladatot, azaz a választott bemenetek és kimenetek között biztosítson az előírtnál kisebb ℓ_2 indukált normát. Ezek a szabályozók, a bemenetekre előírt korlátozások miatt, önmagukban csak szűk állapothalmaz fölött lesznek alkalmazhatók. Ezt ellensúlyozandó olyan szabályozókat is a halmazhoz adunk, amelyek nem tartják be az előírt minőségi követelményeket, de alkalmazhatósági tartományuk nagyobb. Megmutattuk, hogy az egyes szabályozók által alkotott zárt köri dinamikákból felépített kiterjesztett rendszer véges ℓ_2 normával rendelkezik, amely a szabályozók alkalmas megválasztásával az előírt performancia szintre, vagy az alá vihető, azaz a kiterjesztett rendszer, illetve az abból származtatható interpolációs szabályozó megoldja a $\mathcal{H}_\infty$ feladatot. Megmutattam, hogy az interpolációs szabályozó alkalmazhatósági tartománya a kiterjesztett rendszer zavarás-invariáns halmazából projekcióval számítható, a zavarás- invariáns halmaz pedig a fentebb javasolt algoritmussal hatékonyan meghatározható. Példákon keresztül megmutattam, hogy az interpolációs szabályozó lényegesen nagyobb tartományon alkalmazható, mint bármely önállóan használt állapotvisszacsatolás (Lásd 3. ábra).

A javasolt algoritmusokat numerikus mintapéldán és a Paksi Atomerőmű nyomáskiegyenlítő rendszerének modelljén teszteltem.

A 3. Tézishez kapcsolódó publikációk [PKBV08], [PKB09b], [PKB09a].

A tézis eredményei részletesen megtalálhatók a disszertáció 4. Fejezetében.



3. ábra. Konstans $\mathcal{H}_\infty$ ($\overline{S}_a, \overline{S}_c$) és az interpolációs szabályozó (S) által generált maximális zavarás-invariáns halmazok (alkalmazhatósági tartományok) a dolgozatban vizsgált példában.

A tézis eredményeinek továbbfejlesztési lehetőségei

A tézisek eredményei három kutatási területhez kapcsolódnak: kooperatív irányítás, modell prediktív irányítás, korlátozásokat betartó $\mathcal{H}_\infty$ szabályozások.

Az első tézisben passzivitás alapú eljárást javasoltam, mint lehetséges megoldást autonóm járműformációk stabilizálására. A módszert közúti járművek egyszerűsített modelljére dolgoztam ki, formációirányításra mesterséges potenciálfüggvény alapú módszert használtam. Az alapötlet, azaz passzivitás alapú szabályozóval stabilizálni a teljes rendszert, könnyen kiterjeszthető más járművekre is, például mobil robotokból álló formációkra vagy mobil szenzorhálózatokra. Habár a módszernek számos előnyös tulajdonsága van, például teljesen decentralizált, a potenciálfüggvények alkalmazása sok esetben leszűkíti a megoldható formációirányítási feladatok körét. Összetett feladatok esetén megoldást jelenthet a probléma kisebb, a javasolt módszerrel megoldható részproblémákra bontása. A jövőbeli kutatások egyik lehetséges iránya olyan 'top-level' szabályozó fejlesztése, amely a kooperatív irányítási feladatból kiindulva, automatikusan képes a részfeladatokat és az azok megoldásához szükséges potenciálfüggvényeket meghatározni.

A második tézis modell prediktív irányítások tervezésére koncentrál, elsősorban a valós idejű megvalósítás lehetőségeit és a diszkretizálás hatásait vizsgálja. A kutatás mindkét irányban folytatható. A valós idejű implementációra javasolt irányítási struktúra továbbfejleszthető, ha nemcsak a számítási teljesítményt, de az adattovábbításban résztvevő kommunikációs hálózat tulajdonságait is figyelembe vesszük. Egy valós kommunikációs hálózatban számítani lehet adatátviteli késleltetésekre és akár adatvesztésre is. Mindkettő az irányítás minőségének romlásához vagy akár stabilitásvesztéshez is vezethet.

Diszkrét szabályozások esetében a kutatás tovább folytatódhat a különböző diszkretizálási algoritmusok tulajdonságainak részletesebb feltárásával és ezen tulajdonságoknak az irányítástervezésbe történő beépítésével. A 2. tézisben javasolt módszerek és Toth et.al. eredményei az LPV diszkretizálás területén ([16], [15]) jó kiindulási pontot adnak ehhez.

A harmadik tézis praktikus eljárást javasol korlátozásokat betartó $\mathcal{H}_\infty$ szabályozó tervezésére. Más eljárásokkal szemben az interpolációs elven működő irányítás hatékonyabban számolható, kevésbé konzervatív megoldást ad és lényegesen nagyobb tartományon alkalmazható. A dolgozatban a módszert zajelnyomási problémákra alkalmaztuk. Célunk, hogy az eljárást kipróbáljuk összetettebb $\mathcal{H}_\infty$ feladatokon is, úgymint trajektória követés vagy bizonytalan LPV rendszerek irányítása.

A javasolt algoritmus jelenleg feltételezi az összes állapot mérhetőségét. A gyakorlati esetek jelentős részében azonban az állapotvektor csak részlegesen mérhető, a nem mérhető állapotváltozókat becsülni kell. Éppen ezért gyakorlati szempontból hasznos lenne az algoritmust állapotbecslővel kiegészíteni és állapotvisszacsatolás helyett, kimenet visszacsatolást (output feedback) alkalmazni. A kutatás tehát ebben az irányban is folytatható.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

[PB04] T. Péni and J. Bokor. Trajectory tracking control for a class of lpv systems based on dynamic inversion and passivity. In *WSEAS International Conference on Applied Mathematics*, Corfu, Greece, 2004.

[PB05] T. Péni and J. Bokor. Formation stabilization of nonlinear vehicles based on dynamic inversion and passivity. In *16th IFAC World Congress*, number CD:Tu-M18-TO/2-03165, Prague, Czech Republic, 2005.

[PB06] T. Péni and J. Bokor. Formation stabilization based on dynamic inversion and passivity. In *Workshop on system identification and control systems*, pages 216–228, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary, 2006.

[PB07] T. Péni and J. Bokor. Robust model predictive control for a class of linear parameter varying systems. In *European Control Conference*, number CD:TuB12.6/0264, pages 1076–1081, Kos, Greece, 2007.

[PKB09a] T. Péni, B. Kulcsár, and J. Bokor. An alternative formulation of the interpolation based constrained $\mathcal{H}_\infty$ control of discrete-time lpv systems. In *European Control Conference*, 2009. (submitted).

[PKB09b] T. Péni, B. Kulcsár, and J. Bokor. Induced ℓ_2 norm improvement by interpolating controllers for discrete-time LPV systems. *European Journal of Control*, 2009. (in press, no. 08PF2R).

[PKBV08] T. Péni, B. Kulcsár, J. Bokor, and M. Verhaegen. Constrained $\mathcal{H}_\infty$ control for discrete-time LPV systems using interpolation. In *Conference on Decision and Control*, number CD: ThTA11.3, Cancun, Mexico, 2008.

[Pén08a] T. Péni. Formation control of road vehicles based on dynamic inversion and passivity. *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering*, 36(1-2):79–85, 2008.

[Pén08b] T. Péni. Robustness properties of the hierarchical passivity based formation control. *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering*, 36(1-2):87–92, 2008.

[PS08] T. Péni and G. Szederkényi. Model predictive control for the hybrid primary circuit dynamics of a pressurized water nuclear power plant. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering*, 2008. (in press).

[PSB07] T. Péni, G. Szederkényi, and J. Bokor. Model predictive control of the hybrid primary circuit dynamics in a pressurized water nuclear power plant. In *European Control Conference*, volume CD:ThC13.6/0301, pages 5361–5367, Kos, Greece, 2007.

[PSBH04] T. Péni, G. Szederkényi, J. Bokor, and K. M. Hangos. Dynamic inversion based velocity tracking control of road vehicles. In *NOLCOS, 6th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Suttgart, Germany, 2004.

További publikációk

[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. In *Joint Hungarian-Austrian Conference on Image Processing and Pattern Recognition*, pages 33–40, Veszprém, Hungary, 2005.

[PB01] T. Péni and J. Bokor. Differential algebraic elimination and its application. Technical report, Systems and Control Laboratory, Computer and Automation Research Institute, 2001. (in Hungarian).

[PB06] T. Péni and J. Bokor. Robust Model Predictive Control for controlling fast vehicle dynamics. In *14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ancona, Italy, 2006.

[PHB03] T. Péni, K.M. Hangos, and J. Bokor. Nonlinear state estimator design for fermentation processes. In *microCAD, International Scientific Conference*, pages 63–68, Miskolc, Hungary, 2003. (in Hungarian).

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

[PSH02] T. Péni, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Nonlinear dynamic output feedback control of bioreactors. Technical Report SCL-1-2002, Systems and Control Laboratory, Computer and Automation Research Institute, 2002.

[PSH03] T. Péni, G. Szederkényi, and K.M. Hangos. Nonlinear dynamic output feedback control of fermentation processes. In *14th. International Conference on Process Control*, number CD:130, Strbske Pleso, Slovakia, 2003.

[PVSH06] T. Péni, I. Varga, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Robust model predictive control of a nuclear power plant pressurizer subsystem. In *The 25th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control*, Lanzarote, Canary Islands, Spain, 2006.

[VPBB05] B. Vanek, T. Peni, J. Bokor, and G. Balas. Practical approach to real-time trajectory tracking of uav formations. In *American Control Conference*, volume 1, pages 122–127, Portland, Oregon, 2005.

Hivatkozások

[1] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory.* SIAM, 1994.

[2] H. Chen and C. W. Scherer. Moving horizon $\mathcal{H}_\infty$ control with performance adaptation for constrained linear systems. *Automatica*, 42:1033–1040, 2006.

[3] J. Alex Fax. *Optimal and Cooperative Control of Vehicle Formations.* PhD thesis, California Inst. of Technology, 2001.

[4] É. Gyurkovics and T. Takacs. Quadratic stabilisation with $\mathcal{H}_\infty$ norm bound of non-linear discrete-time uncertain systems with bounded control. *Systems & Control Letters*, 50:277–289, 2003.

[5] A. Isidori. *Nonlinear control systems.* Springer, Berlin, 1995.

[6] I. Kolmanovsky and E. G. Gilbert. Theory and computation of disturbance invariant sets for discrete-time linear systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 4:317–367, 1998.

[7] M. V. Kothare, V. Balakrishnan, and M. Morari. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 32(10):1361–1379, 1996.

[8] J. M. Maciejowski. *Predictive Control with Constraints.* Prentice Hall, 2002.

[9] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. M. Scoakert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(3):789–814, 2000.

[10] R. Olfati-Saber and R. M. Murray. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions. In *The 15th IFAC World Congress , Barcelona, Spain,*, 2002.

[11] B. Pluymers, J.A.Rossiter, J.A.K.Suykens, and B. De Moor. The efficient computation of polyhedral invariant sets for linear systems with polytopic uncertainty. In *American Control Conference*, 2005, Portland.

[12] B. Pluymers, J.A.Rossiter, J.A.K. Suykens, and B. De Moor. Interpolation based MPC for LPV systems using polyhedral invarinat sets. In *American Control Conference*, 2005, Portland.

[13] C. Scherer and S. Weiland. *Linear Matrix Inequalities in Control.* http://www.cs.ele.tue.nl/ SWeiland/ lmi.pdf, 2000. vers. 3.0.

[14] Z. Szabó, J. Bokor, and G. Balas. Inversion of LPV systems. *Mediterranean Control Conference*, 2003. CD: T7-083.

[15] R. Toth, F. Felici, P. S. C. Heuberger, and P. M. J. Van den Hof. Discretization of LPV state-space and I/O system representations. *in prep.*, 2008.

[16] R. Toth, F. Felici, P. S. C. Heuberger, and P. M. J. Van den Hof. Crucial aspects of zero-order hold LPV state-space system discretization. *IFAC World Congress*, 2008 Seul, Korea.

[17] Arjan van der Schaft. *L2-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control.* Springer, Berlin, 2000.

[18] P. Varaiya. Smart cars on smart roads: Problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2):195–207, 1993.

[19] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover. *Robust and Optimal Control.* Prentice Hall, 1996.