

# **ROBUSZTUS HIBADETEKTÁLÓ SZŰRŐ ÉS HIBAKORRIGÁLÓ IRÁNYÍTÁS TERVEZÉSE**

KULCSÁR BALÁZS

Tézisek

Témavezető:  
DR. BOKOR JÓZSEF

BUDAPESTI MŰSZAKI  
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

BUDAPEST,  
December, 2005

# KIVONAT

Napjainkban az irányítási rendszerekkel szemben támasztott követelmények eredményeként a szabályzóval egyre összetettebb feladatkört lát el. A rendszer stabilitásán túl, robusztussági és zajelnyomási tulajdonságok mellett a szabályzónak a névleges minőségi követelményeket is ki kell elgítenie. A disszertáció témája az irányításelmélet egyik legizgalmasabb kutatási területe, a hibadetektálás.

A meghibásodások valósidejű detektálása mind nyílthurkú, mind zárthurkú irányítási rendszerek esetében bonyolult és összetett feladat a mérnök számára. Jóllehet a hiba helye általában ismert, nagysága és a meghibásodás ideje ismeretlen. A hibadetektálás tárgykörén belül a robusztusság olyan kiegészítő tulajdonság, amely a hibajel biztosabb detektálását teszi lehetővé modell-bizonytalanságok és külső, a rendszerre ható zavarások esetén is. A detektált és becsült hibainformáció, amennyiben rendelkezésre áll, az irányítási algoritmus módosítását jelentheti. A rekonfigurálás a zárt szabályozási kör zavarokkal értelmezett változtatását jelenti. Időnként a hibadetektálás során becsült jel a zárt körben korrekciós célzattal is felhasználható. Jelen doktori értekezés hibakorrigáló irányítás tervezését mutatja be csatolt hibadetektáló szűrő-szabályzó struktúra felhasználásával. Az értekezés különös hangsúlyt fektet a gyakorlati alkalmazási lehetőségekre.

A disszertáció célja kettős. Egyrésztől modell-alapú, megbízható robusztus hibadetektáló szűrő algoritmust mutat be hibakritikus rendszerek esetében. Másrésztől gyakorlati és biztonság-orientált alkalmazási háttérrel mutat rá annak felhasználására az automatizált repülőgép-irányítási rendszerek tervezése során. A légiforgalom növekedése következtében egyre nagyobb szükség van nagymegbízhatóságú automatizált repülőgép-irányítási rendszerekre. A disszertáció a repülőgép-dinamika irányításának biztonsági vonatkozásaival foglalkozik.

Az értekezés a hibadetektálási feladat robusztus alapokon való kezelését mutatja be zárthurkú irányítási rendszerek hibakorrekciójára. A dolgozat főként biztonságkritikus rendszerek tervezésével foglalkozó mérnökök számára lehet hasznos, mert a leírt módszerek szakítanak a szakirodalomban fellelhető robusztussági leírási módokkal. Végezetül, az értekezés minden automatizálással foglalkozó mérnöknek ajánlott, hiszen a repülőgép dinamikai irányítása nem az egyetlen lehetséges alkalmazási terület.

# MOTIVÁCIÓ

Az irányításelmélet olyan multidiszciplináris tudományág, amely számos kutatási területet foglal magában.

Az irányítási rendszerek tervezése során stabil rendszereket hozunk létre, minőségi tulajdonságokat, korlátozásokat fogalmazunk meg bizonytalan rendszerekre is. Sokféleképpen tervezhetjük irányítási rendszert. A szabályozáselmélet klasszikus aspektusaitól a modern megfogalmazáson át, egészen a posztmodern technikákig számos módszert használhatunk. A mérnök feladata, hogy az igen széles palettáról kiválassza az alkalmazni kívánt módszert. Következésképp a szabályzó alkalmazása egyfajta kompromisszumot jelent.

Nem kizárólagosan az esődleges szabályozási célok fontosak, hanem a bonyolultabbak is. Mindazonáltal, az optimalitás és a robusztusság két olyan alapvető tulajdonság, amelyeket figyelembe kell venni. Noha a tervezéskor a névleges modellel dolgozunk, a zárt körnek a valós rendszeren kell működnie, ugyanakkor egyértelműen tisztában kell lennünk azzal, hogy a modellezés során mindig pontatlanul írjuk le a valós rendszerünket. Általában véve a modellezés során egyszerűsítjük a valóságot, illetve a modellezéskor használt tényleges rendszer mindig tartalmaz eltéréseket, és ez utóbbi mindig a bonyolultabb. Összeségében elmondható, hogy az egyszerűsítés információvesztést eredményez. A névleges rendszerekre való irányítás tervezése mellett egyéb érvek is szólnak, így például az, hogy a szabályzás egyszerűsített (pl. linearizált) leírások esetén könnyebben fogalmazható meg, számítható ki. Amennyiben a névleges modell csak korlátozott módon írja le a rendszert, az irányításnak kell tartalmaznia mindazon (a priori) információkat, amelyek a valóságos rendszerre való implementációt követően szükségessé válnak. Ekkor beszélünk robusztusságról. Mitöbb, mivel az irányítás során felhasznált bemeneti energia, bizonyos állapotok vagy kimenetek korlátosak, többnyire ismert maximum és minimum értékek között változhatnak, a tervezés során ezeket figyelembe vehetjük.

Az irányítási rendszerek feladatköre ennek alapján bővül, valahányszor kiegészítő funkcióval látjuk el őket. Mivel a rendszerben mindig felmerülhetnek hibák, értelemszerűen ezen komponensek felismerése az egész struktúra szempontjából fontos lehet, kiváltképp biztonságkritikus rendszerek esetében. Az irányításelméletben hibatűrő irányítási rendszereknek nevezzük ezeket. Az értekezés célja robusztus hibatűrő rendszerek tervezése.

A hibatűrő irányítások tervezése során biztosítani kell a fellépő hibakomponens detektálását és egyértelmű elkülönítését. A disszertáció középpontjában az a fokozatosan fejlődő tudományág áll, amit hibadetektálásnak és izolálásnak nevezünk (FDI). A dolgozat egyik legfontosabb hozzájárulása e tudományághoz a robusztusság maga. Sokféleképpen megfogalmazható a hibadetektálással szemben támasztott robusztussági követelményrendszer. Jelen mű szerzője szakít a hagyományos értelmezésű robusztussági felfogással, és a zajelnyomási tulajdonságot a hibadetektáló szűrőn magán értelmezi. A hibadetektálás megközelíthető a szabályzótervezés oldaláról is, mivel a szűrők nagy része állapotbecslés alapján detektál. Ebben az összefüggésrendszerben a hibadetektáló szűrő egy (nem feltétlenül teljes rendű) állapotmegfigyelő. Az irányítás és a megfigyelőtervezés közötti kapocs maga a dualitás.

A rendszerek nemlineáris leírására létrehozott módszer az a paraméterváltozós technika, amelyet lineáris paraméterfüggő rendszer (LPV) osztálynak nevezünk. Egy összetett, nemlineáris rendszer leírásának LPV módon való megfogalmazása számos tervezési előnnyel jár, ezért a disszertáció a robusztus hibadetektálási algoritmust paraméterváltozós rendszer osztályokra is kiterjeszti. A zavarás, zaj matematikai megfogalmazása eltérő lehet. A dolgozat mind a determinisztikus, mind a sztochasztikus leírási módra hoz példát. Továbbá a detektálás minőségi tulajdonságai befolyásolhatók előzetes információk figyelembevételével. Ilyen előzetes tulajdonság lehet maga a változó értékeihez tartozó szélsőérték. Számos esetben az állapottér szerkezete igényli a változókra megfogalmazott feltételek figyelembevételét. Máskor az állapotok, bemenetek vagy kimenetek szélsőértékei igénylik ezt.

A hibadetektálás nem öncélú. A hibadiagnosztika ugyanis információforrás a fellettes, ún. supervisory szint felé, ahol a detektált hibának megfelelően a beavatkozásról döntenek. Egyes hibakritikus rendszerek a fellépő hibák egy részét tolerálhatják, azaz egy előre meghatározott biztonsági szint teljesítése során bizonyos hibák mellett működőképesek maradnak. Az értekezés utolsó, érdemi fejezete a korábbiakban kidolgozott hibadetektáló szűrő zárt szabályzási körben való alkalmazását tárgyalja. A csatolt szűrő-szabályzó struktúra képes a feladat során megfogalmazott korlátozások figyelembevételére is.

Végül, a dinamikus hibadetektáló szűrő és hibatoleráns szabályzó tervezésének lehetséges alkalmazási területét tekinti át a szerző. A gyakorlati felhasználás több okból a repülésdinamika tématerületéhez kapcsolódik. Mindenek előtt azért, mert a szerző közel áll a repülésdinamikához. Másrészt egy külföldi kutatási együttműködés keretében tudományos kooperációra nyílt alkalma a minnesotai Department of Aerospace Engineering-gel. Ezen túlmenően számos nemzetközi kutatási projektben való részvételével a szerző a magyar repüléstudomány és irányításelmélet fejlődéséhez kíván hozzájárulni.

# A FELHASZNÁLT MÓDSZEREK

## HIBADETEKTÁLÁS

Megbízhatóság, hatékonyság és rendelkezésre állás olyan kiegészítő feladatkörök, amelyek egyre nagyobb funkcionalitással ruházzák fel az irányítási rendszert. Ezen túlmenően a speciálisan biztonság-orientált rendszerekkel szemben megfogalmazott elvárások (mint például a repülés, a közúti közlekedési rendszerek és az atomerőművek) alapján a biztonság fogalmkörét ki kell terjeszteni, és számos esetben zárt szabályozási körbe kell illeszteni. Ennek érdekében biztonságkritikus rendszereket hibadiagnosztikai egységgel kell ellátni. Mivel ilyen esetekben a meghibásodás az egész struktúra biztonságát fenyegeti (rendszerleállás, katasztrófa, sérülések), egy állandó dinamikus diagnosztikai rendszerre van szükség azért, hogy az emberi életet és a gépet óvjuk, vagy éppen a termelés kiesést megakadályozzuk.

Következésképpen a hiba felismerése fontos, de nem elegendő. Míg a hibakritikus rendszerek irányítása során a detektált meghibásodást minden esetben figyelembe kell venni (még akkor is, ha közvetlen beavatkozás nem történik ennek következtében), nem biztonságkritikus rendszereknél a hibadiagnosztika elsősorban a rendelkezésre állást befolyásolja. A rendszerben felmerülő és detektált hibák hatásának zárt körben való figyelembe vétele automatizálható. Általánosan, zárt szabályozási körben a hiba hatása az irányítás módosításával figyelembe vehető, és esetenként kiküszöbölhető. Az ilyen irányú módosítás a rendszer átkonfigurálása. Az átkonfigurálás többféleképpen valósítható meg az egyszerű redundancia váltástól egészen az összetett kapcsolási logikáig. Tekintettel arra, hogy a biztonsági rendszereket egy fellépő hiba károsan befolyásolja, a mérnöknek kell gondoskodnia ezen hibák felismeréséről, és az esetleges beavatkozásról. A hibadetektálás hasznos lehet a rendszer fenntartási, javítási költségeinek csökkentésére is.

Számos esetben a fellépő hiba ellenére a (szabályozott) rendszernek működnie kell. A hiba hatásának megjelenését követően biztonsági szempontok szerint a következő lépés a rendszer alapfeladatainak biztonságos fentartása, még akkor is, ha a rendelkezésre álló redundanciákból veszítünk. A hibatűrés lényege: a rendszer azonnali leállítása lehetetlen vagy nagyon költséges. Mindazonáltal a rendszer maga is képes a hibák egy részének tolerálására, de ezen meghibásodási típusok száma és természete egyértelműen definiált, adott biztonsági szinthez való rendeltetést tesz le-

hetővé. A repülés maga is ilyen rendszer, és a biztonság a legfontosabb szempont; meghibásodás eseményt vagy katasztrófát ne okozzon. A hibatűrő rendszerek irányítása valamilyen redundancia, többlet jelenlétét igényli. Amennyiben a rendszer meghibásodik, a redundancia egy részét felhasználjuk. A maximálisan megengedhető hibák száma, azaz a meghibásodás maximális szintje, előre megállapítható és pontosítható. A hibatűrő irányítási rendszerek alkalmazása során a hibák felfedése nem elegendő, mert a rendszer - esetleges további meghibásodása miatt is - beavatkozást igényel. Számos irányításméleti hivatkozás ezen rendszereket az automatizáltság egy magasabb fokára helyezi.

Másrészről a hibabiztos elv egy másik szemléletmódot képvisel. Ebben az esetben a meghibásodás egyáltalán nem engedhető meg. A hibabiztos leírás mögött a hibanélküliség filozófiája húzódik meg. Ha meghibásodás következik be, a hibamentes szint nem tartható, és a rendszer más biztonsági szintre kerül át.

A hibák hatásának kiküszöbölésére a rendszerbe többletet, redundanciát juttatunk. A redundancia két nagyobb csoportra bontható. Beszélhetünk első közelítésben hardver/fizikai/párhuzamos redundanciáról, ennek során számos függetlenített fizikai csatornát használunk (érzékelők, beavatkozó szervek, számítógépek, stb.). Abban az esetben, ha az adatgyűjtő és feldolgozó egységek függetlenítettek, egy döntési logika segít a többszörözött információk közötti választásban. Szavazólogikát alkalmaznak a redundanciák közötti választásban.

Esetenként a fizikai redundanciák előállítása meglehetősen költséges, vagy egyszerűen nincs elegendő hely elhelyezésükre (például repülésben az önsúly kérdése). Továbbá, sok esetben pusztán hardver redundancia alkalmazása nem elegendő, ezért szoftver/funkcionális többlet alkalmazása válik szükségessé. Az analitikus redundancia a feldolgozási algoritmusban bekövetkezett változást, eltérést, többszörözést jelenti eltérő feldolgozási módszerekkel. Ebben az esetben külön hardverelem beillesztése nélkül is rendelhető többlet a rendszerhez pusztán a feldolgozási módszer (szoftveres) megváltoztatásával. Az analitikus redundancia alkalmazása a modell alapú hibadetektálás során válik egyértelművé a rendszer eltérő modellezési sémákkal való leírása során.

Dinamikus hibadetektálási algoritmusok ún. reziduál információ előállítását jelentik. Olyan maradékképzést valósít ez meg, amelynek során a rendszer dinamikai válaszaiból következtetünk a fellépő hibák idejére és nagyságára. A reziduál dinamikusan figyeli a rendszer válaszait és jelez, ha a hiba bekövetkezik. A reziduál létrehozására számos módszer létezik.

Az olvasó általános leírást talál a reziduál képzés lehetőségeiről a [17].

Bármennyire is pontosan írjuk le a rendszerünket, a valósághoz képest eltéréseket tapasztalhatunk. Kizárólag robusztus hibadetektáló algoritmus esetén kaphatunk pontos reziduál információt [25],[50].

Legyen adott a következő hibával és zajjal terhelt folytonos idejű, lineáris dina-

mikus időinvariáns rendszer:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + [B_1 \ B_2] \begin{bmatrix} d(t) \\ u(t) \end{bmatrix} + \sum_i L_i m_i(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

ahol  $\mathcal{X}$ ,  $\mathcal{Y}$ ,  $\mathcal{U}$ ,  $\mathcal{M}_1$  és  $\mathcal{B}_1$  valós lineáris vektorterek a megfelelő dimenziókkal,  $x(t) \in \mathcal{X}$  az állapotvektor,  $y(t) \in \mathcal{Y}$  a kimeneti vektor,  $u(t) \in \mathcal{U}$  a bemeneti vektor  $d(t) \in \mathcal{B}_1$  a zavarás bemenet,  $m_i \in \mathcal{M}_1$  komponensek a hibák. Az  $L_i$  hibairányok a megfelelő hibajelekhez tartozó vektorok, lineáris additív módon jellemezve a hibát az állapotdinamika egyenletben. A hibadetektálási cél ebben az esetben a hiba felismerése és elkülönítése, figyelembe véve a zavarás hatását is.

A geometriai hibadetektálási megközelítéseket a 70-es évek elején Beard fejlesztette ki Jones elméleti alapjain, de mint új analitikus modell alapú eszközrendszert. Ezt BJDFP-nek nevezték el. Az algoritmus végeredményeként egyetlen reziduál kimenetet állítanak elő, amelyben az összes lehetséges hibairány valamilyen vetülete megjelenik. A geometriai megközelítések másik fő csoportjába az FPRG [44] tartozik, ahol a hibajelek számának megfelelő reziduál kimenetet hozunk létre úgy, hogy az adott kimeneten csak a megfelelő hibahatás jelenjen meg. Ebben az esetben a reziduálok csak adott hibairányokra érzékenyek. Ezt a módszert később ismét felhasználták [63],[1]. Az ún. nem-megfigyelhető bemenetek becslésének detektálása, azaz a hibadetektálástól eltérő módon való alkalmazása megtalálható a **[16]** is. A lineáris hibadetektáló szűrő állapotbecslő formában a következő módon írható fel:

$$\dot{w}(t) = Fw(t) - Ey(t) + Gu(t) \quad (3)$$

$$r(t) = Mw(t) - Hy(t). \quad (4)$$

A geometriai módszereken túlmenően [46] sztochasztikus hibadetektálási problémát oldott meg innovációs zajfolyamatok segítségével Kalman szűrési feladatként, a hibákat a hozzájuk tartozó statisztikákkal jellemezve. [64] hibadetektálási célzattal dolgozta ki a GLR módszert. A rendszer paramétereiben bekövetkező változás detektálására Baseville korai publikációiban találunk megoldást [2], később Nikiforov [3] publikált. Fontos, hogy az ún. MM eljárást is használhatjuk a hibák hatásának becslésére, ebben az esetben egy egész sor Kalman szűrő bankot kell terveznünk [12]. A sztochasztikus hibadetektáló szűrő irányvonala a ún. principal component keresés. A detektálás állapotbecslést is jelenthet, [20] mutat erre példát. Többek között Frank írásai között találunk erre példát.

Az ún. parity space megközelítés paritás vektorok keresését jelenti, és általuk reziduál generálható, amelyet először Mironovski (1979) publikált, később számos kutató követte ezt az irányvonalat [19], [28], [18]. A legújabb eredmények ebben az irányban a [31, 29, 30] találhatóak.

A sztochasztikus hibadetektáló algoritmusok között paraméterbecslő eljárásokat is találunk. Ezek a főleg identifikáció alapú eljárások a 80-as évektől kezdődően

jelentek meg. Isermann és számos kutató nem-megfigyelhető bemeneti paraméterek becslésére identifikációs algoritmusokat dolgoztak ki [34],[35], [36].

A [19] referencia kétlépcsős módszert javasol a hibadetektálás lebonyolítására. Ezek szerint az első lépés a reziduál, azaz a becsült hibajel létrehozása, a második lépés a hibajel alapú döntés. E módszer világszerte használt megközelítéssé vált.

A dinamikus, hibacélzatú invertálási módszer egy új irányvonal, amely a nem-megfigyelhetőségi bemenetre felírt invertálással képezi a reziduál információt [11, 59], amelynek robusztussági kiterjesztése folyamatban van.

A hibadetektáló szűrő robusztussága alapvető fontosságú, mivel külső zavarások és modell bizonytalanságok terhelik a rendszert. Robusztus nem- megfigyelhetőségi állapotbecslők kiterjesztésével Frank [25] foglalkozott.

[50] a robusztussági hibadetektálást sajátérték allokációs feladatként oldotta meg, Frank, Gertler, Kunwer a parity space eljárás robusztus kiterjesztését javasolta. Frekvenciatartománybeli hibadetektálási feladatot oldott meg Frank, Patton és Edelmayer és mások [22]. A hibadetektálás eszközrendszerében külön meg kell említeni az ún. adaptív küszöb és a gyors szűrés eljárásokat is.

Az egyre fejlődő hibadetektálás megvalósítható nemlineáris rendszer struktúrákra is. A nemlineáris technikák egy részének gyökere a lineáris megvalósításokból ered. A lineáris megoldás kizárólag a munkapont környezetében értelmezhető. Amikor a munkaponttól nagyon eltérünk, a lineáris és nemlineáris modellek közötti különbség miatt a hibadetektálás pontatlan lesz.

A következő lépés a nemlineáris becslések esetében a speciális alakú bilineáris leírásokra megoldott detektálási feladat volt a 90-es évek közepén.

A nemlineáris becslési elméletek egyik legígéretesebbike a lineáris paraméterfüggő rendszerek (LPV) [1].

Az LPV rendszerek egy speciális osztályának leírása az affin paraméterváltozós rendszerleírás, amely során a paramétervektor  $\rho(t) \in \mathcal{P}$ , tetszőleges időfüggő paraméter:

$$\dot{x}(t) = A(\rho)x(t) + [B_1(\rho)B_2(\rho)] \begin{bmatrix} d(t) \\ u(t) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^l L_i(\rho)m_i(t) \quad (5)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (6)$$

ahol  $m_j$  a hibajeleket jelzi, amelyek becslése a detektálás végcélját jelenti,  $d(t)$  a zavarásvektor,  $x(t)$  az állapotvektor,  $u(t)$  a szabályozási bemenet,  $y(t)$  a mért kimeneti érték.

A legújabb nemlineáris referenciák [66, 65].

Az értekezés harmadik és negyedik fejezetében az FPRG módszer robusztus kiterjesztése olvasható lineáris és lineáris paraméterfüggő rendszer osztályok tekintetében.



## MODELL PREDIKTÍV IRÁNYÍTÁS ÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

A Modell Prediktív Irányítás (MPC) stratégiája megbízható és hatékony eszközt jelent a többváltozós korlátozások mellett megoldani kívánt szabályozások terén. Az MPC technológia széles körben alkalmazott az iparban, fontosabb publikációk [24, 7, 5, 4, 16, 41, 42, 51].

A zavarás, vagy hiba teljesmértékű eltűntetése zárt szabályozási körök esetében a zavaró jel pontos ismeretét igényli. Ekkor a szabályzás előrecsatolással való kiegészítése a jel hatásának anulálását teszi lehetővé. Abban az esetben, ha nem áll rendelkezésünkre a zavaró jel a szabályzó kör visszacsatolása csökkenti a meghibásodás hatását [41].

A csatolt hibadetektáló szűrő - szabályzó rendszert átkonfiguráló struktúrának tekinthetjük. Az átkonfigurálás a szabályzási struktúra módosítását jelenti minden olyan esetben amikor hiba lép fel [13, 15, 14], [3]. A nemzetközi kutatás is egyre többet foglalkozik az LPV átkonfiguráló irányítási rendszerekkel [43, 58].

A hibabecslés implementációja zárt szabályozási kör esetében hibakorrigáló lehet, melyet az értekezés 6. fejezetében találunk meg. Bizonyos szempontok alapján a hibakorrigáló irányítás állandó szabályozási bemenőjel korrekciót jelent előrecsatolás felhasználásával, és nem az irányítási struktúrát módosítom vele. A korrekció az előzetesen becsült és nem mért jelek előállításával valósítható meg.

Az előrecsatoló szabályzási ág, azaz a nem mért jelek becslését követő korrekciós célzatú jelek felhasználása a szabályzási bemenő jelet módosítja, hogy a rendszerben megjelenő jel hatását kiejtse, de legalább csökkentse. [54] Lipschitz nemlineáris szabályozási körök során alkalmazza a korrekciót, de korlátozásokat a szabályzásba nem fogalmaz meg. A disszertációban bemutatott módszer alapján lehetőség nyílik a nem mért zavaró jel becslésének korrekciós tagként való figyelembe vételére, korlátozó feltételek mellett. A bemutatott csatolt struktúra az MPC szabályzó állandó korrekciójaként értelmezhető, ahol a hibadetektáló szűrő a nem mért jelekből becsült és a szabályzó szempontjából mért zavarásként értelmezhető.

Az értekezésben mind a robusztus hibadetektálási, mind a hibakorrekciós feladat légi járművek dinamikai modelljén kerül bemutatásra.

A repülésben a dinamika irányítására (főleg automatizálásra) először a 40-es években került sor a Második Világháborúban, főleg Németországban, az Egyesült Királyságban és Amerikában. Ebben az időben a szabályozási feladatokat csatornákra bontva Nyquist és Bode fázistartalékolási elvei alapján próbálták megoldani. A PID szabályozási körök mellett grafo-analitikus módszereket alkalmaztak. A kor legfontosabb eredményeit a [10] és [56] foglalja össze.

Az 50-es évektől fokozatosan a repülésben előtérbe került a MIMO rendszerek szabályozása, mely rámutatott a csatornák kereszt hatásaira. A probléma még bonyo-

lultabbá vált minőségi tulajdonságok figyelembe vételével.

A megoldás a 60-as években R. E. Kalman nevéhez fűződik, aki állapotter elméletével teret biztosított az optimális irányítási problémák megoldására. A 70-es évekig pólus allokációs és LQ optimális tervezéssel biztosították a légijárművek stabilizálását is. 20 évvel később az irányításelmélet a robusztusság felé fordult, ekkor alkalmazták a repülésben az LQG/LTR valamint LQ Servo struktúrákat. A 80-as évek technikáját a [45] foglalja össze.

A 90-es évektől fokozatosan a jelek és operátorok minimalizálásával kezdtek foglalkozni, a probléma a robusztusság. Számos leírás foglalkozik a  $\mathcal{H}_\infty$  irányítási feladatok többek között VSTOL megvalósításával [33, 53, 52, 32]. Számos alkalmazási példát találunk LPV rendszerekre is, [38, 27, 26, 57], melyek között a legújabbak a [27, 26] és

A harcászati alkalmazások mellett légitársaságok is érdeklődnek a korszerű irányítási algoritmusok iránt, valamint számos UAV felhasználási lehetőség is adódik. A robusztus MPC irányítás alkalmazása repülés irányítás céljából aktuális kutatási tématerület [39].

## ÁLLAPOTBECSLÉS

A korlátozások mellett megoldott optimális prediktív szabályozási feladat duális megfogalmazása a feltételek mellett végrehajtott állapotbecslés véges horizonton. Állandó igény fogalmazódott meg ezen eljárásokkal szemben. Mivel számos hibadetektáló szűrő állapotbecslőként, megfigyelőként működik, a következőkben áttekintjük az állapotbecslés azon részét, mely az értekezéshez szorosan kapcsolódik.

Lineáris esetben a mozgó ablakú állapotbecslési eljárás hasonló az adaptív korlátozott memóriájú szűrőkhöz (Jazwinski, 1970).

A korlátozások nélküli mozgó ablakú becslési eljárást a 70-es évek közepén Thomas [60], később Kwon, Bruckstein és Kailath javasolta [40].

A mozgó ablakos becslési eljárást először nemlineáris rendszerek kezdeti értékének meghatározására alkalmazták, zajmentes korlátozások nélküli esetre [37]. Ezt követően számos kutató foglalkozott a korlátozások melletti becsléssel köztük megemlíthető de Souza, Gevers, Goodwin [21]. [8] megmutatta az egyértelmű megfeleltetést a korlátos becslési és szabályozási feladat között. [9] statisztikai alapon nyugvó optimális nemlineáris becslést írt le. Muske, Rawlings és Lee [49] a mozgó ablakos eljárás rekurzív módon való megfogalmazását mutatta meg. Továbbá Muske és Rawlings [48] a stabilitást a dualitás segítségével bizonyította be. Marquardt [47] skálázási lehetőségeket vizsgált korlátozások mellett. [62] általános stabilitási problémát fogalmazott meg és mutatott be a mozgó ablakos becslés tekintetében. Számos gyakorlati felhasználás született főleg a vegyipari alkalmazások területén [61]. Findeisen [23] az ablakok közötti váltást mutatja be, Bemporad, Morari, Mignone, Tyler

[6], [61] hibrid rendszerek tekintében alkalmazza. Rao összefoglaló munkájában sztochasztikus módon is összefoglalja a módszert [55].

A disszertáció a feltételek mellett megoldott állapotbecslést hibadetektálási céllal mutatja be és alkalmazza. Két irodalmi hivatkozás foglalkozik a témával [6] és [61].

# ÁTTEKINTÉS

A következőkben a disszertáció főbb fejezetei és szerkezete kerül ismertetésre.

A dolgozat bevezetője az 1. fejezet. A bevezető röviden kitér a motivációra, áttekinti az irányítási rendszer, állapotbecslés valamint hibadetektálás témaköreit.

A második fejezet a dolgozat megértéséhez szükséges matematikai alapfogalmakat foglalja össze. Nemcsak a szimbolumrendszert, hanem a tárgykör alapösszefüggéseit is megtaláljuk itt. Továbbá a függelék kitér a dolgozatban használt kulcsszavak leíróbb magyarázatára.

Az első rész a hibadetektálás és izolálás robusztusságával foglalkozik lineáris időinvariáns és lineáris paraméter-változós rendszerosztályok esetében. A geometriai alapú tervezési eljárás alkalmas a külső zavaró jelekkel szembeni robusztusságra, a hibafelfedés minőségi tulajdonságainak befolyásolására. A tézis első részében kidolgozott lineáris robusztus hibadetektáló szűrő a *Robust Fundamental Problem in Residual Generation, RFPRG* nevet viseli. A hibadetektáló szűrő robusztus tulajdonsága  $\mathcal{H}_\infty$  szűrési technikával biztosítható. Az *RFPRG* szűrő hatékonyságát és érzékenységére vonatkozó vizsgálatokat a fejezet - példán keresztül - külön részben tárgyalja. A robusztus hibadetektáló algoritmust a jelölt a negyedik fejezetben kiterjeszti paraméter-változós modellosztályokra. Ebben az esetben a javasolt megoldás az indukált  $\mathcal{L}_2$  norma reziduál kimeneten értelmezett minimalizálása. A téziskör ezen fejezetét tervezési példa zárja.

A hibadetektáló szűrők egy része állapotbecslési eljáráson alapszik, melyet a dolgozat 5. fejezetében találunk meg. Az állapotbecslő a dinamikus rendszer állapotát reprodukálja. A második téziskör legfontosabb hozzájárulása a korlátozások mellett végzett állapotbecslési eljárás, hibadetektálási céllal. A *Moving Horizon* eljárás segítségével, amely a múlt adatainak mindig egy állandó szegmensét használja, lehetőség nyílik a hibadetektálás minőségi paramétereinek befolyásolására egyenlőtlenségi és egyenlőségi feltételek megfogalmazásával.

Az utolsó téziskör, a 6. fejezet a zárthurkú hibadetektálást vizsgálja. A megjelenő hiba felismerése mellett a kapcsolt hibadetektáló szűrő - szabályzó rendszer képes a szabályzás állandó átkonfigurálására. A irányítás során lehetőség nyílik korlátozások figyelembe vételére.

# ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

## 1. Tézis.

*Tételezzük fel hogy teljesülnek az alábbi feltételek:*

1. A (1)-(2). rendszer  $S_i$  faktorterén értelmezett projekciója detektálható, azaz  $(M_i, A_{0i})$  detektálható;
2. az ún. bemeneti megfigyelhetőség, mint megoldhatósági feltételt teljesül a zajmentes esetre, azaz  $S_i^* \cap \mathcal{L}_j = \emptyset$ ;
3.  $S_i^* \cap [\mathcal{L}_j \mathcal{B}_1] \neq \emptyset$  ahol  $\mathcal{B}_1$  a zavarás képterével dilatált altér.

*Ekkor létezik a (3)-(4). formában felírt hibadetektáló szűrő  $\gamma_i > 0$  esetben és a  $d(t) \in \mathcal{L}_2$  zaj hatása  $\mathcal{H}_\infty$  értelemben elnyomható a reziduálkimeneten  $r_i(t)$ -n, a Módosított Filter Algebrai Ricatti Egyenlet megoldásával [4,6,9].*

A zaj hatása minimalizálható a  $D_{1i}$  megválasztásával, ahol

$$F_i := A_{0i} + D_{1i}M_i.$$

A  $B_1$  hibairányban fellépő  $\|d\|_2 < \infty$  jel hatása  $\mathcal{H}_\infty$  értelemben elnyomható a Módosított Filter Algebrai Ricatti Egyenlet megoldásával:

$$\begin{aligned} A_{0i}Q_i + Q_iA_{0i}^T - Q_i\left(\frac{1}{\rho_i}M_i^T M_i - \frac{1}{\gamma_i^2}M_{1i}^T M_{1i}\right)Q_i + \\ + P_i B_1 B_1^T P_i^T &= 0 \\ D_{1i} &= -\frac{1}{\rho_i}Q_i M_i^T. \end{aligned}$$

## 2. Tézis.

*Tételezzük fel hogy teljesülnek az alábbi feltételek:*

1. A (5)-(6). affine lineáris paraméterváltozós rendszer  $S_i$  faktorterén értelmezett projekciója detektálható, azaz  $(M_i, A_{0i}(\rho))$  detektálható;
2. az ún. bemeneti megfigyelhetőség, mint megoldhatósági feltételt teljesül a zajmentes esetre, azaz  $S_i^* \cap \mathcal{L}_j = \emptyset$ ;

3.  $\mathcal{S}_i^* \cap [\mathcal{L}_j \mathcal{B}_1] \neq \emptyset$  ahol  $\mathcal{B}_1$  a zavarás képterével dilatált altér.

Ekkor létezik a (3)-(4). formában felírt hibadetektáló szűrő lineáris paraméterfüggő formája és  $\gamma_i > 0$  esetben a  $d(t) \in \mathcal{L}_2$  zaj hatása indukált  $\mathcal{L}_2$  értelemben elnyomható a reziduálkimeneten  $r_i(t)$ -n, paraméterter szélsőpontjain felírt lineáris mátrixegyenlőtlenségek megoldásával [5,9,10].

Affin LPV leírás esetében az indukált  $\mathcal{L}_2$  norma minimalizálása a következőt jelenti:

$$\sup_{\rho} \sup_d \frac{\|\tilde{G}(\rho)_{dr}d\|_2}{\|d\|_2} \rightarrow \min_{D_1 \subset \mathcal{D}_{stab}}$$

A hiba hatása indukált  $\mathcal{L}_2$  norma értelemben a szűrő kimenetén elnyomható a paraméterter sarokpontjain megoldott LMI rendszer segítségével:

$$L(X, \gamma) = \begin{bmatrix} X > 0 \\ F^T(\rho)X_1 + F(\rho)X - M^T M & XPB_1(\rho) & M_1^T \\ PB_1(\rho)X & -\gamma I_m & 0 \\ M_1 & 0 & -\gamma I_m \end{bmatrix} < 0.$$

### 3. Tézis.

Tételezzük fel, hogy teljesülnek az alábbi feltételek:

1. A (1)-(2). rendszer diszkrét idejű megfelelője az  $\mathcal{S}_i$  faktorteren értelmezett projekcióval detektálható, azaz  $(M_i, A_{0i})$  detektálható;
2. az ún. bemeneti megfigyelhetőség, mint megoldhatósági feltételt teljesül a zajmentes esetre, azaz  $\mathcal{S}_i^* \cap \mathcal{L}_j = \emptyset$ .

Ebben az esetben az ún. Mozgó Ablakos eljárás alkalmazásával, a  $\Psi_k$  funkcionál minimalizálásával, a becsült állapotokon, kimeneten és zajokon egyenlőségi és egyenlőtlenségi korlátozások mellett állapotbecslési feladat oldható meg, csökkentve az állapothiba hatását  $l_2$  értelemben [7,8,11,12,13,14,15].

A minimális, nemmegfigyelhetőségi és az adott hibairány képterét is magában foglaló faktorteren, a hibadetektáló szűrő stabilitása feltételekhez kötött Mozgó Ablakos eljárással biztosítható. Ebben az esetben lehetőség adódik korlátozások figyelembe vételére.

A Mozgó Ablakos eljárás során feladat a következő funkcionál minimalizálása:

$$\begin{aligned} & \min_{(\bar{x}_{k-N-1}, \hat{w}_{k-N-1|k}, \dots, \hat{w}_{k-1|k})} \Psi_k \\ \Psi_k = & \hat{w}_{k-N-1|k}^T Q_0^{-1} \hat{w}_{k-N-1|k} + \sum_{j=k-N}^{k-1} \hat{w}_{j|k}^T Q^{-1} \hat{w}_{j|k} + \\ & + \sum_{j=k-N}^k \hat{v}_{j|k}^T R^{-1} \hat{v}_{j|k} + \Psi_0, \end{aligned}$$

kiegészítve a dinamikai feltétellel:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k-N|k} &= \bar{x}_{k-N} + \hat{w}_{k-N-1|k} \\ \hat{x}_{j+1|k} &= A\hat{x}_{j|k} + G\hat{w}_{j|k} + Bu_j \\ j &= k-N-1, \dots, k-1 \\ y_j &= C\hat{x}_{j|k} + \hat{v}_{j|k} \quad j = k-N-1, \end{aligned}$$

valamint egyéb, a becsült állapoton, zajokon előírt egyenlőségi és egyenlőtlenségi feltételek megfogalmazásával:

$$\begin{aligned} w_{lower} &\leq \hat{w}_{j|k} \leq w_{upper} \\ v_{lower} &\leq \hat{v}_{j|k} \leq v_{upper} \\ x_{lower} &\leq \hat{x}_{j|k} \leq x_{upper}. \end{aligned}$$

#### 4. Tézis.

Tejesüljenek az alábbi feltételek:

1. A (1)-(2). rendszer diszkrét idejű megfelelője az  $S_i$  faktorteren értelmezett projekcióval detektálható, azaz  $(M_i, A_{0i})$  detektálható;
2. az ún. bemeneti megfigyelhetőség, mint megoldhatósági feltételt teljesül a zajmentes esetre, azaz  $S_i^* \cap \mathcal{B}_{1u} = \emptyset$ .
3. A (1)-(2). leírás stabilizálható, azaz  $(A, B_2)$  stabilizálható.

Ekkor hibakorrigáló és optimális modell prediktív szabályozás tervezhető előzetesen definiált és a minőségi tulajdonságokon, szabályozási bemeneteken, kimeneteken értelmezett korlátozások mellett, ahol a nem mért zavarás becslését FPRG hibadetektáló szűrő biztosítja. [1,2,3]

A modell prediktív szabályzó nemmért zavaró bemeneteit hibadetektáló szűrővel becsülve lehetőség van a predikció módosítására, annak érdekében hogy a referencia

jelkövetést pontosítsuk:

$$Z_k = \Psi \hat{x}_{k|k} + \Upsilon u_{k-1} + \Theta \Delta \mathcal{U}_k + \Xi \mathcal{D}_{mk} + \Omega \mathcal{D}_{uk}.$$

ahol

$$\mathcal{D}_{uk} = \begin{bmatrix} \hat{d}_k^u \\ \hat{d}_{k+1|k}^u \\ \hat{d}_{k+2|k}^u \\ \vdots \\ \hat{d}_{k+H_p-1|k}^u \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} C_z B_{1u} & 0 & \dots & 0 \\ C_z A B_{1u} & C_z B_{1u} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_z A^{H_p-1} B_{1u} & C_z A^{H_p-2} B_{1u} & \dots & C_z B_{1u} \end{bmatrix}.$$

A módszer további előnye a prediktív szabályozást felhasználva az optimalizálás során megfogalmazott feltételek figyelembe vételével érhető meg, miközben minimalizáljuk a:

$$V_k = \sum_{i=H_w}^{H_p} (\hat{z}_{k+i|k} - r_{k+i})^T Q_i (\hat{z}_{k+i|k} - r_{k+i}) + \sum_{i=0}^{H_u} (\Delta \hat{u}_{k+i|k})^T R_i (\Delta \hat{u}_{k+i|k}).$$



# PUBLIKÁCIÓK

[1] B. Kulcsár: LQG/LTR Controller Design for an Aircraft. *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.*, 2000, 28, (1-2), p. 131-142.

[2] I. Szászi and B. Kulcsár: Robust Control and Fault Detection Filter Design for Aircraft Pitch Axis. *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.*, 2001, 29, (1-2), p. 83-100.

[3] I. Szászi and B. Kulcsár and G. J. Balas and J. Bokor: Design of FDI filter for an aircraft control system. In *Proceedings of American Control Conference, Alaska, USA, 2002*, p. 4232-4237.

[4] B. Kulcsár and I. Szászi and J. Bokor: Robust Extension of Fundamental Problem in Residual Generation. In *Proceedings of 8th Miniconference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies, 2002*, p 557-567.

[5] Kulcsár B.: Robusztus hibadetektáló szűrő tervezése replógépmódel esetében. *XIV. Magyar Repüléstudományi Napok, 2003*.

[6] B. Kulcsár and I. Szaszzi and J. Bokor:  $\mathcal{H}_\infty$  Disturbance Rejection on Residual Output. In *Proceedings of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 2003*, p. 519-524.

[7] B. Kulcsár and I. Varga: Simulation of turning rates in traffic systems. In *Proceedings of IEEE European Simulation Symposium, 2004*, LOG38.

[8] I. Varga and B. Kulcsár and J. Bokor: General Moving Horizon Estimation of Traffic Systems. In *Proceedings of 12th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2004*, 1125.

[9] B. Kulcsár and J. Bokor: Robust LPV detection filter design using geometric approach. In *Proceedings of 12th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2004*, 1123.

[10] B. Kulcsár and J. Bokor: Robust fault detection filter design method for LPV

systems. In Proceedings of 9th Miniconference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies, 2004, under printing.

[11] B. Kulcsár and I. Varga and J. Bokor: Traffic light control using moving horizon estimation. In Proceedings of 9th Miniconference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies, 2004, under printing.

[12] B. Kulcsár and T. Bécsi and I. Varga: Estimation of dynamic origin destination matrix of traffic systems. Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng., 2004, 33, (1-2), p 3-14.

[13] B. Kulcsár and I. Varga and J. Bokor: Modern közúti forgalomirányítás 1. A forgalmi paraméterek becslése. Városi Közlekedés, 2005, XLV, (1), 23-26.

[14] B. Kulcsár and I. Varga and J. Bokor: Constrained split rate estimation by moving horizon. In Proceedings of 16th IFAC World Congress, 2005, 3276.

[15] B. Kulcsár and J. Bokor: Unknown input detection using receding horizon approach. In Proceedings of Joint 2005 International Symposium on Intelligent Control and 13th Mediterranean Conference on Control and Automation (2005 ISIC-MED), 2005, MoM06.6.

[16] J. Bokor and J. Shinar and B. Kulcsár: On the detection of unknown input in positional control problems with noisy measurements, Proceedings of 16th IFAC World Congress, 2005, 3809.

[17] Szászi I. és Kulcsár B.: F-16 hosszirányú mozgásának irányítása  $\mathcal{H}_\infty/\mu$  szabályzóval, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, Hungary, XIV., VOL. 1. 2002/1 p. 65-77.

[18] B. Kulcsár and E. Korody: Pull up from a Dive. Future Aviation Technologies, 1st international symposium on Future Aviation Technology, April, 12-13., 2001 Szolnok, Hungary, April, XIV., VOL. 1, 2002 p. 115-120.

[19] B. Kulcsár: LQ Servo and LQG/LTR Controller Design for an Aircraft Model. A XX. század haditechnikai forradalmának hatása a XXI. század katonai repülésére c. konferencia, Szolnok, április 21., 2002, Hungary, Repüléstudományi Közlemények, XIV., VOL. 1, 2002/Különszám p. 102-115 .

[20] Kulcsár Balázs: Repülőgép mozgásának szabályozástechnikai vizsgálata és tervezési lehetőségei. A megújuló magyar repülőszakember képzés c. konferencia, 2000. április 15. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, Hungary, XII., VOL 1

2000/1 p. 91-101.

[21] B. Kulcsár: Discretization of Continuous Dynamic Systems. Lecture notes with example for the Modern Control Theory II. PhD course, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Automation, Budapest, 2003, p.6., <http://www.kka.bme.hu/irtech/mie2.htm>.

[22] B. Kulcsár: Singular Value and Singular Value Decomposition. Lecture notes with example for the Modern Control Theory II. PhD course, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Automation, Budapest, 2003, p. 7., <http://www.kka.bme.hu/irtech/mie2.htm>.

[23] B. Kulcsár: Robust Control design for F16. Lecture notes with example for the Modern Control Theory II. PhD course, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Transport Engineering, Department of Transport Automation, Budapest, 2002, p.9., <http://www.kka.bme.hu/irtech/mie2.htm>.

[24] Kulcsár B.: Logikai hálózatok szimulációja MATLAB SIMULINK alkalmazásával, Segédlet a BME Közlekedésmérnöki Kar, Közlekedésautomatikai Tanszék által oktatott Irányítástechnika I. c. tárgy laboratóriumi méréséhez, Budapest, 2002, p.16., <http://www.kka.bme.hu/irtech>.

[25] Kulcsár B.: Robusztus stabilitás vizsgálata MATLAB alkalmazásával. Segédlet az BME Közlekedésmérnöki Kar, Közlekedésautomatikai Tanszék által oktatott Irányítástechnika I. c. tárgy laboratóriumi méréséhez, Budapest, 2002, p.15., <http://www.kka.bme.hu/irtech>.

# Irodalomjegyzék

- [1] G. J. Balas, J. Bokor, and Z. Szabó. Failure detection for LPV systems - a geometric approach. *In Proceedings of American Control Conference*, 2002.
- [2] M. Bassville. Detecting changes in signals and systems-a survey. *Automatica*, 3(24):309–326, 1998.
- [3] M. Bassville and I. V. Nikiforov. *Detection of abrupt changes. Theory and application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [4] A. Bemporad. A predictive controller with artificial Lyapunov function for linear systems with input/state constraints. *Automatica*, 34(10):1255–1260, 1998.
- [5] A. Bemporad, A. Casavola, and E. Mosca. Nonlinear control of constrained linear systems via predictive reference management. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(3):340–349, 1997.
- [6] A. Bemporad, D. Mignone, and M. Morari. Moving horizon estimation for hybrid systems and fault detection. *In Proceedings of American Control Conference*, 1999.
- [7] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos. The explicit linear regulator for constrained systems. *Automatica*, 38:3–20, 2002.
- [8] B. W. Bequette. Nonlinear predictive control using multirate sampling. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69:136–143, 1991.
- [9] L. T. Biegler. Efficient solution of dynamic optimization and nmpc problems. *International Symposium on Nonlinear Model Predictive Control*, 1998, Ascona.
- [10] John H. Blakelock. *Automatic Control of Aircraft and Missiles*. John Wiley & Sons, New York/London/Sidney., 1965.
- [11] J. Bokor and G. J. Balas. Detection filter design for LPV systems - geometric approach. *Automatica*, 40:511–518, 2004.

- [12] J. Bokor, P. Gáspár, M. Tanyi, and A. Edelmayer. Change detection in signals and systems: experiences using the multiple model and the generalized likelihood ratio approach. *In Proceedings of Advanced Information Processing in Automatic Control*, 2:13–18, 1989.
- [13] J. D. Boskovic and R. K. Mehra. A multiple model-based reconfigurable flight control system design. *In Proceedings of 37th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4503–4508, 1998.
- [14] J.J. Burken, P. Lu, and Z. Wu. Reconfigurable flight control designs with application to the x-33 vehicle. *NASA/TM*, (206582):1–20, 1999.
- [15] Nasa Dryden Flight Research Center. Self-repairing flight control systems. *Technology Facts*, 11:1–3, 2004.
- [16] H. Chen and F. Allgower. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability. *Automatica*, 34(10):1205–1217, 1998.
- [17] J. Chen and R. J. Patton. *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer, Boston/Dordrecht/London., 1999.
- [18] J. Chen and H. Y. Zhang. Parity vector approach for detecting failures unknown input observers. *International Journal of Systems and Sciences*, 21(4):765–770, 1990.
- [19] E. Y. chow and A. S. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on Automotic Control*, AC-29(7):603–613, 1984.
- [20] R. N. Clarck. The dedicated observer approach to instrument failure detection. *In Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, pages 237–241, 1979.
- [21] C. E. de Souza, M. Gevers, and G. C. Goodwin. Riccati equations in optimal filtering of nonstabilizable systems having singular state transition matrices. *IEEE Transactions on Automotic Control*, 31:831–838, 1986.
- [22] A. Edelmayer, J. Bokor, and L. Keviczky. An  $\mathcal{H}_\infty$  filtering approach to robust detection of failures in dynamical systems. pages 3037–3039. *In Proceedings of 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 1994.
- [23] P. K. Findeisen. Moving horizon state estimation of discrete time systems. Master’s thesis, U. of Wisconsin-Madison, 1997.

- [24] R. Findeisen and F. Allgower. An introduction to nonlinear model predictive control. Technical report, Institute for system theory in engineering, 2002.
- [25] P. M. Frank. Enhancement of robustness in observer based fault detection. *In Proceedings of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process*, 1:275–287, 1991.
- [26] A. Packard J. Renfrow C. Mullaney G. Balas, I. Fialho. On the design of lqv controllers for the f-14 aircraft lateral-directional axis during powered approach. *Proceedings of American Control Conference*, pages 123–127, 1997.
- [27] J. Renfrow C. Mullaney R. M’Closky G. Balas, A. Packard. Control of the f-14 aircraft lateral-directional axis during powered approach. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 21:899–908, 1998.
- [28] J. Gertler. Survey of model based failure detection and isolation in complex plants. *IEEE Control system magazine*, 8(6):3–11, 1988.
- [29] J. Gertler. Residual generation from principal component models for fault diagnosis in linear systems. part i. review of stochastic systems. *In Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1:628–633, 2005.
- [30] J. Gertler. Residual generation from principal component models for fault diagnosis in linear systems. part ii. extension to optimal residuals and dynamic systems. *In Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1:634–639, 2005.
- [31] J. Gertler and M. M. Kunwer. Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis. *International Journal of Control*, 61(2):395–421, 1995.
- [32] R. A. Hyde.  $\mathcal{H}_\infty$  Aerospace Control - A VSTOL Flight Application. Advances in Industrial Control Series, Springer, 1995.
- [33] R. A. Hyde. The vaac harrier design srudy. *Cambridge Control Ltd., AIAA-99-4278*, 1999.
- [34] R. Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey. *Automatica*, 20(4):387–404, 1984.
- [35] R. Isermann. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - a tutorial paper. *Automatica*, 29(4):815–835, 1993.
- [36] R. Isermann and P. Ballé. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 5(5):709–719, 1997.

- [37] S. S. Jang, B. Joseph, and H. Mukai. Comparison of two approaches to on-line parameter and state estimation of nonlinear systems. *Industrial Engineering in Chemical Process*, 25:809–814, 1986.
- [38] Alpay M. Kaya Jong-Yeob Shin, Gary J. Balas. Blending methodology of linear parameter varying control synthesis of f-16 aircraft system. *NASA-CR-2001-211237*, 2001.
- [39] T. Keviczky, F. Borrelli, and G. J. Balas. Model predictive control for decoupled systems: A study of decentralized schemes. *Proceedings of American Control Conference, Boston*, 2004.
- [40] W. H. Know, A. M. Buckstein, and T. Kailath. Stabilizing state-feedback design via the moving horizon method. *International Journal of Control*, 37(3):631–643, 1983.
- [41] J. M. Maciejowski. *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, 2002.
- [42] L. Magni and R. Sepulchre. Stability margins of nonlinear receding horizon control via inverse optimality. *System and Control Letters*, 32:241–245, 1997.
- [43] A. Marcos. *Aircraft applications of fault detection and isolation techniques*. PhD thesis, Department of Aerospace and Engineering Mechanics, University of Minnesota, USA, 2004.
- [44] M. A. Massoumnia. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters,. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-31(9):839–846, 1986.
- [45] D. Mc-Lean. *Automatic Flight Control Systems*. Prentice Hall Int., 1990.
- [46] R. K. Mehra and J. Peschon. An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamical systems. *Automatica*, 7:637–640, 1971.
- [47] A. M'hambdi, A. Helbig, O. Abel, and W. Marquardt. Newton-type receding horizon control and state estimation. *In Proceedings of IFAC WorldCongress*, pages 121–126, 1996.
- [48] K. R. Muske and J. B. Rawlings. Model predictive control with linear models. *AIChE Journal*, 39(2):262–287, 1993.
- [49] K. R. Muske, J. B. Rawlings, and J. H. Lee. Receding horizon recursive state estimation. *In Proceedings of American Control Conference*, pages 900–904, 1993.
- [50] R. J. Patton and J. Chen. Observer based fault detection and isolation: robustness and application. *Control Engineering Practice*, 5(5):671–682, 1997.

- [51] A. J. Primbs and V. Nevistic. Feasibility and stability of constrained finite receding horizon control. *ETH*, 1999.
- [52] G. T. Shanks R. A. Hyde, K. Glover. Vstol first flight of an h-infinity control law. *IEEE Computing and Control Engineering Journal*, 6(1):11–16, 1995.
- [53] K. Glover R. A. Hyde. The application of scheduled h-infinity controllers to vstol aircraft. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-38(7), 1993.
- [54] R. Rajamani. Observer design for lipschitz nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(3):397–401, 1998.
- [55] V. C. Rao. *Moving Horizon strategies for the constrained Monitoring and Control of Nonlinear Discrete-Time Systems*. PhD thesis, U. of Wisconsin-Madison, 2000.
- [56] Jan Roskam. *Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*. DAR Corporation, Lawrence Kansas, 2003.
- [57] J.-Y. Shin. *Worst Case Analysis and Linear Parameter Varying Control of Aerospace Systems*. PhD thesis, University of Minnesota, 2000.
- [58] I. Szászi. *Design of fault detection and isolation filters for reconfigurable control systems*. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2004.
- [59] F. Szigeti, C. E. Vera, J. Bokor, and A. Edelmayer. Inversion based fault detection and isolation. *IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.
- [60] Y. A. Thomas. Linear quadratic optimal estimation and control with receding horizon. *Electrical Letters*, 11:19–21, 1975.
- [61] M. Tyler, K. Asano, and M. Morari. Application of moving horizon estimation based fault detection to cold tandem steel mill. *ETH Technical Report*, (AUT96-06), 1996.
- [62] M. Tyler and M. Morari. Stability of constrained moving horizon estimation schemes. *Automatica*, 17:1410–1425, 1996.
- [63] J. E. White and J. L. Speyer. Detection filter design: spectral theory and algorithms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-32:593–603, 1987.
- [64] A. S. Willsky. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, 12:601–611, 1976.



- [65] P. Zhang and S. X. Ding. A model free approach to fault detection of periodic systems. *In Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1:843–848, 2005.
- [66] P. Zhang and S. X. Ding. A simple fault detection scheme for nonlinear system. *In Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1:838–842, 2005.