

Válasz Dr. Vajk István egyetemi tanár

Szabó Zoltán "Kapcsolt és LPV rendszerek irányítása geometriai megközelítésben"

című dolgozatához készített opponensi véleményére

Elöljáróban szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Vajk István egyetemi tanárnak a gondos és alapos munkáért, amivel dolgozatomat átnézte és azt fontos megjegyzésekkel látta el.

Az opponensi véleményben megfogalmazott kérdésekre és megjegyzésekre adott válasz a következőképp tagozódik: először a feltett kérdésekre kísérek meg választ adni, majd ezt követően válaszolok az egyes megjegyzésekre.

I. VÁLASZOK A BÍRÁLÓI KÉRDÉSEKRE

1. A 9.1 - 9.3 fejezetekkel kapcsolatban a bírálónak számos fenntartása van. A 9.1 fejezet és a 9.1 ábra nem konzisztens. A 9.1 ábrán megjelenik szaggatott vonallal a "stabilizing controller" blokk, ezzel kapcsolatosan a szöveges részben nem találtam utalást. Az olvasó nem érti, hogy a főbb jelhatások az ábrán miért nincsenek jelölve. A szabályozó függ a ξ állapotváltozóktól is. A szabályozóban található η alrendszer nem biztosítja a rendszer visszacsatolásos linearizálását. A 9.1 fejezetben nincs szó az alapjel követéséről. Az ábrán megjelenik az y_d alapjel, s az ehhez kapcsolódó irányítási alrendszer. Valós alkalmazásoknál nem az alapjel r -edik deriváltját szokás megadni. Ez elméletileg lehet, hogy szépnek tűnik, de a gyakorlatban nem szokásos (például egy egységugrás jellegű alapjelváltozást nem szokás így előállítani).

A bíráló fenntartásai a 9.2 ábrán bemutatott irányítási stratégiára is vonatkoznak. A bíráló valószínűleg valamint teljesen félreért a 78.-80. oldalak környékén, illetve nem látja az átalakítások gyakorlati jelentőségét. A jelölt által bemutatott szabályozási stratégia a kimenőjelek relatív fokszám szerinti deriváltjait is felhasználja. Könnyen belátható, hogy már egyszerű egy egy-bemenetű és egy-kimenetű egytárolós állandó paraméterű lineáris dinamikus rendszerre is a 9.2 és 9.3 fejezetben bemutatott szabályozó nem realizálható visszacsatolást tartalmaz. A 9.2 ábra jelöléstechnikai szempontjából további érdekességeket is takar, van olyan blokk, amelynek a kimenete nem függ a bemenetétől. A 9.3 fejezetben zavaró, hogy a sapkás jelek nincsenek definiálva. A 82. oldalon lévő példában megjelenik v sapka. Ilyen jel a fejezetben korábban nem szerepelt.

Az LPV rendszerek invertálásán alapú szabályozótervezés során az olvasó kíváncsi lett volna

- a zérus dinamika kérdésének részletesebb taglalására;
- hogy a folyamat bemenőjele hogyan alakul, a szabályozási algoritmus mekkora túlvezérlést eredményez, hiszen minden szabályozás esetén kezelni kell a bemenőjel telítéseit;

- *hogy a kimenőjelre szuperponálódó additív zaj - a kimenőjelek 1-től r_i -ig terjedő deriváltjainak előállítási kényszere következtében - hogyan befolyásolja a szabályozás minőségét;*
- *hogyan lehet mintavételes rendszerre használni az algoritmust, mivel másodrendűnél magasabb fokszámú lineáris dinamikus rendszerek esetén a belső dinamika labilis?*

A 9.1-9.3 fejezetek kapcsán az olvasó számára az lehet zavaró – és félreértések forrása, hogy a dinamikus inverziót tárgyaló irodalomban a probléma bemenő adatai között implicit szerepelnek a szükséges deriváltak is. Bár explicit kimenetnek az y van feltüntetve, ismertnek tételezzük fel a $\dot{y}$, $\ddot{y}$ deriváltakat is. Ezt valóban célszerű lett volna a dolgozatban külön is hangsúlyozni.

Az ábrákkal csak a szabályozási kör sematikus vázlatát szerettem volna megadni, sajnos az első ábra (9.1) talán túl sematikusra sikeredett: a szabályozóban a ξ változó $\tilde{y}$, η pedig (9.2 ábrán már helyesen) $\hat{\eta}$.

A stabilizáló blokk jelenlétére a fejezet bevezetőjében utalok. Valóban célszerű lett volna ennek a blokknak a szerepét részletesen is kifejteni. Mivel a rendszer zéró-dinamika állapota nem ismert, a szabályozóban/szűrőben megjelenő megfelelő dinamika ennek csak egy (zéró állapotból induló) becslését tartalmazza. Erre utal a kalapos jelölés. Az adott kimenetekre nézve a zéró-dinamika nem megfigyelhető, ezért a módszer alkalmazhatóságát tekintve kulcsfontosságú, hogy a rendszer minimum fázisú legyen, azaz az η zéró-dinamikának stabilnak kell lenni. A bemutatott sémában a jelkövetési hibát (és annak deriváltjait) felhasználó visszacsatolás jelenti a "stabilizáló" blokkot, azonban a gyakorlatban más lehetőség is lehet ennek megválasztására. Például, ha van olyan kimenet, amit nem használtunk az invertálás során, akkor meg lehet a lehetőség egy parciális (a zéró-dinamika komponenseire vonatkozó) megfigyelő tervezésére. Ekkor sokkal tágabb lehetőség nyílik a szabályozó tulajdonságainak a befolyásolására, például zavarelnyomásra.

A téma kifejtése során terjedelmi okokból sem volt mód az inverziós alapú tervezések minden részletének bemutatására. A dolgozat ezen fejezete csak azokra az aspektusokra koncentrált ami a bevezetett robusztus invariáns alterek szerepét illusztrálta a probléma megoldása során. Célszerű lett volna a dolgozatban ezt a tényt hangsúlyozni.

A (jobb) invertálhatóság kérdése azt vizsgálja, hogy adott $\dot{y}(t) = Cx(t)$ jelekre előírható-e trajektória, annak legalább milyen simának kell lenni és igenlő válasz esetén hogyan kapunk meg egy (nem feltétlenül egyértelmű) bemenetet ami az adott pályát generálja. A bemutatott jelkövetési szabályozó tipikusan sima jelek esetén használandó: ilyenek például járművek esetén a pályakövetési feladatok. Ezekben az applikációkban a szükséges deriváltak ténylegesen rendelkezésre állnak (sebességek és gyorsulások).

Mintavételezett rendszer: az inverziós séma diszkrét rendszerek esetén igen előnyös – ilyenkor a deriváltak helyét a kimenetek előző értékei veszik át. Az idézett probléma akkor lépne fel, ha a folytonos idejű rendszert diszkrétizálnám – zero-order hold módszerrel. Ekkor ugyanis általában megjelennek nem-minimumfázisú zérusok/a zéró-dinamika instabillá válik. Fontos megjegyezni, hogy egy általános diszkrétizációs séma során a relatív fokok – tehát a probléma teljes szerkezete – is változnak.

LPV rendszerek esetén modellezési szempontból eleve a folytonos idejű kontextus az életszerű, a diszkrétizálás pedig a fent vázoltak miatt általában elrontja az invertálhatóságot/ az inverz szerkezetét.

A bemenőjel telítettsége minden szabályozási sémában problémát okoz. Ennek kezelésére további eszközökre – például anti-windup technikák, van szükség, amit az inverziós sémával kombinálva lehet alkalmazni.

2. *Kapcsolt rendszerek esetén az olvasó elgondolkozik azon, hogy a reléket tartalmazó rendszerek esetén esetlegesen fellépő prellégés jelensége itt is felléphet-e. Továbbá, hogy az értekezésben bemutatott algoritmusok kiterjeszthetők-e a módusok között finomabb, pl. adott tartományban lineárisan változó átmenetek kezelésére, hiszen számos olyan folyamat létezik, ahol nem ugrásszerűen változik a rendszer dinamikája.*

A dolgozat az irányíthatóság kérdését tárgyalja – ami alapvetően egy nyílthurkú fogalom. Ebben a vonatkozásban fontos eredmény, hogy irányítható rendszerek esetén ha mérhető irányító jelekkel teljesül az irányíthatóság, akkor eléggé sima bemenő jelekkel is teljesülni fog. Ezért a prellégés jelensége itt érdektelen, mert ha prellégő jellel össze tudok kötni két pontot akkor nem prellégővel is (irányítható rendszer esetében). Más a helyzet a stabilizálással – ami zárt hurokban történik. Ott a jelenség felléphet és ezért implementáláskor külön figyelmet kell annak szentelni, hogy a prellégés ne lépjen fel. A probléma minden hibrid/kapcsolásos irányítási sémát érint.

Ami a nem kapcsolás típusú átmeneteket illeti: az irányíthatóság szempontjából a dolog érdektelen, az eredmények érvényesek ezekre az esetekre is. A kérdést az dönti el, hogy van-e egy eléggé bő vektorrendszer, ami által generált kúp a teljes tér legyen (lásd a differenciáltartalmazás konvexifikációjára vonatkozó általános megfontolásokat).

2. VÁLASZOK AZ EGYES BÍRÁLÓI MEGJEGYZÉSEKRE

- *Érdekes, hogy a tézisek kimondásának sorrendje eltér az értekezés fejezeteinek sorrendjétől,*

A dolgozatban az applikációs rész is a kapcsolt rendszerek irányíthatósága/LPV geometria felosztást követi. A bimodális rendszerek irányíthatóságának kifejtésekor azonban a dinamikus rendszerinverzeknél előforduló fogalmakat és bizonyos dekompozíciókra vonatkozó tulajdonságra történik utalás. Ezért a tézisek kimondásakor a bimodális rendszerek irányíthatósága lett utolsóként megfogalmazva. Mivel a téziszfüzetnek önmagában is érthetőnek kell lenni, úgy gondoltam, hogy, ebben az esetben logikailag így áttekinthetőbb szerkezetet kapok.

- *Az értekezést mindenképpen érdemes lett volna egy jelölésrendszerrel kezdeni. Ez jelentősen megkönnyítette volna a geometriai megközelítésben kevésbé jártas olvasók dolgát...*

A dolgozatban az egyes témakörök tárgyalásánál igyekeztem a vonatkozó – szakirodalomban használt – jelöléseket alkalmazni. A jelölésrendszer ezért nem homogén. Valóban, az olvasást megkönnyítette volna és az esetleges félreértéseket elkerülhetővé tette volna egy fejezetenkénti jelölésrendszer beiktatása.

- *Az algoritmus mátrix egyenlőtlenségek kezelését igényli. A rendszerleírásnak ezen váltása megtöri az értekezés logikus felépítését. Az értekezésnek csak ezen alfejezetében találkozhatunk diszkrét leírással, ezen túlmenően a bizonytalanság bevezetése egyébként sem tekinthető kellően előkészítettnek. A bíráló jobban örült volna, ha – a korábbi fejezetek logikáját követve – a folytonos rendszerleírás melletti stabilizálhatósági feladat megoldását látja ezen a helyen.*

Az olvasó ugyanakkor sajnálja, hogy a fejezet nem tartalmaz egyetlen demonstratív példát sem.

Proposition 9 valóban diszkrét rendszerekre van kimondva a lehető legerősebb formában. Itt nem volt célom és helyem a bizonytalanság kezelésével bővebben foglalkozni.

A diszkrét rendszerekre való hivatkozás azonban technikai jellegű, a folytonos rendszerekre vonatkozó eredmény (Proposition 10) bizonyításához kell. Így a Proposition 9-beli eredmény

alkalmazható nominális folytonos kapcsolt rendszerekre is, erre mutat egy alkalmazást a 47. oldalon levő Példa. Ezt a tényt valóban szerencsés lett volna még jobban hangsúlyoznom.

Az LMI-k (lineáris mátrixegyenlőtlenségek) használata ezen a ponton azt szemlélteti, hogy a stabilizáló erősítéseket tényleges numerikus eljárással hatékonyan ki is lehet számolni.

- *Az értekezésben több zavaró elírás található. Pl. az értekezés 99. és a tézislevelezet 15. oldalán az y hullám definiálásának jobb oldala hibás, a 47. oldalon a példában B_2 nincs megadva,?*

Az említett helyeken az exponens más betűvel (γ_i) van jelölve. A zavart az okozza, hogy a jelölés ($\gamma_i = r_i - 1$) nem lett feloldva. A példában $B_2 = 0$ (homogén alrendszer), ezért nem lett explicit jelölve.

- *Az irodalomban általában (A, C) invariáns altérrel találkozom, és nem (C, A) invariánssal. (A függelékben (A, C) található, de az értekezésben (C, A) .)*

Sajnos az irodalomban mindkét alak használatos. A (C, A) alak (A, B) -vel összevetve a dualításra utal. Valóban célszerűbb lett volna kizárólag az egyik alakot használni.

A dolgozat megírásakor igyekeztem lehetőleg minden elírást és jelölésszerű következtetlenséget kiküszöbölni, azonban minden igyekezetem ellenére maradtak a dolgozatban bosszantó, zavaró pontatlanságok amelyeknek felderítését külön is köszönöm.

Budapest, 2011. március 25.

Szabó Zoltán