Válasz Dr. Rudas Imre professzor úr bírálatára

Megköszönöm Dr. Rudas Imre professzor úrnak az értekezésem gondos és részletekbe menő elemzését, valamint támogató bírálói véleményét. A bírálatban megfogalmazott kérdéseire részletes válaszaim a következők.

Kérdés: *Az első tézisben bemutatott adaptív modell prediktív ütemező eljárásról megemlíti, hogy általánosítható több háztartási eszközre is. Felteszem, hogy az eszköz dinamikájának hasonló viselkedésűnek kell lennie az itt bemutatott fagyasztóéhoz. Pontosan mely eszközökre alkalmazható az eljárás?*
Válasz: Az alkalmazott eljárás a szabályozott rendszer dinamikus modelljével kapcsolatban két feltételt támaszt:

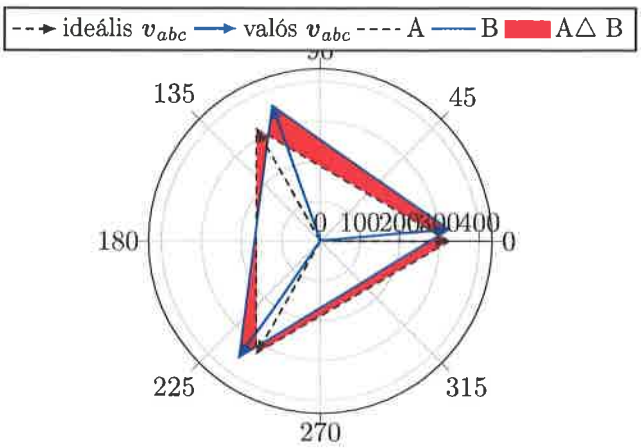
(i) A modell bemeneti jele bináris értékkészlettel rendelkezik.

(ii) A dinamikus modell átmeneti függvénye szigorúan monoton, tehát bekapcsolt bemenet esetén a hőmérséklet csökken, kikapcsolt bemenet mellett pedig növekszik.

Ezek értelmében például fagyasztóládákra hasonlóan alkalmazható a módszer, az értekezés A.1 Függelékében egy szimulációs esettanulmány be is mutatja a javasolt módszer fagyasztón történő alkalmazását. Csak részben hasonló a működése a fűtőberendezéseknek, pl. vízforraló, villanybojler, ahol a fenti (i) feltétel teljesül, de (ii) esetében a monotonitás iránya épp ellenkező. Ez azt jelenti, hogy a javasolt módszer alapjául szolgáló heurisztikus szabályban a hőmérséklet növekedést csökkenésre kell cserélni, ami az algoritmus implementációjában gyakorlatilag relációs jelek megfordítását jelentik csupán.

Egy harmadik, technikai feltétel az eszköz dinamikus viselkedésének időállandójára vonatkozik, nevezetesen a heurisztikus optimalizációnak le kell futnia két mintavételezési időpont között. Az értekezés 3.4-es ábrája mutatja az optimalizációra fordított t_{opt} időt a predikciós horizont függvényében, ami az ott szereplő számítási eszköz esetében 2 s alatti értékeket vesz fel. Tekintve, hogy azok a háztartási eszközök, amelyek esetén a javasolt technika felmerülhet mind lassabb dinamikával rendelkeznek, ez gyakorlatilag nem jelent szigorú korlátozást. Amennyiben mégis gyorsítani kellene az eljárást, explicit modell prediktív ütemezés formában kellene megfogalmazni a módszert, de ezidáig ilyen jellegű továbbfejlesztés nem történt.

Kérdés: *A második tézis (b) pontjában ismertetett szimmetrikus differencia alkalmazása aszimmetria normaként megköveteli a gyors számíthatóságot a valós idejű alkalmazások esetében. Mit tudunk ennek a komplexitásáról?*
Válasz: A norma számítása során gyakorlatilag háromszögek oldalainak metszéspontjait, majd az átlapolt síkidom területét határozzuk meg, ebből és a két háromszög területéből számítható a szimmetrikus differencia (lásd 1. ábra). A szimmetrikus differencia számítás komplexitása a síkidomok csú-

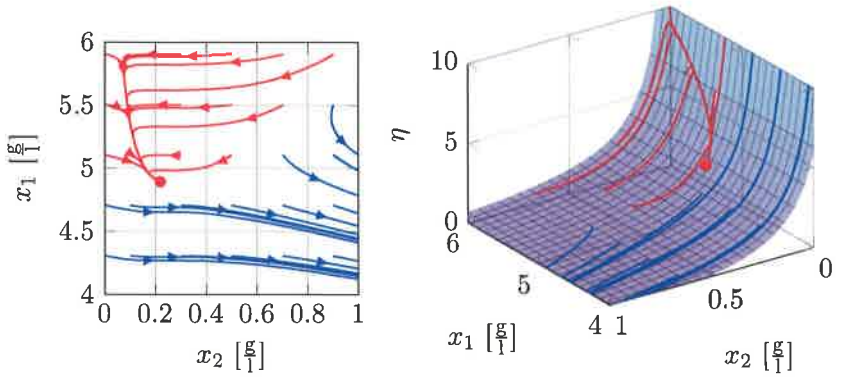


1. ábra. Az ideális és a valós feszültség fázisvektorok által kifeszített háromszögek. A hálózati feszültség aszimmetria a két háromszög szimmetrikus differenciájával (A△ B) is mérhető.

csainak számával növekszik, illetve több, nem összefüggő síkidom esetén azok számával. A probléma jellegéből adódóan a javasolt geometriai norma számítása során minden esetben két háromszög szimmetrikus differenciáját kell számolni, ezért a számítása számottevően nem változik a futás során. A gyakorlati kísérletek során alkalmazott C++ implementációkban az a tapasztalat, hogy a szimmetrikus differencia számítása egy átlagos Raspberry PI számítógépen 2-3 ms időt vesz igénybe, ami akár valós idejű alkalmazást is lehetővé tesz. Természetesen egy mérőórában vagy egyéb, kis számítási kapacitású hardverben ez az érték nagyobb lehet, de egy pl. egy FPGA alapú célhardveren akár csökkenhet is.

Kérdés: *Eredendően nem kvázipolinomiális rendszerek esetén a QP beágyazás megnöveli az állapottér dimenzióját. Nem ütközik-e akadályba ilyen esetben a harmadik tézisben bemutatott kvázipolinomiális reprezentáción alapuló szabályozótervezés?*
Válasz: Nem kvázipolinomiális alakban levő, de folytonosan differenciálható (sima) nemlinearitással rendelkező modellek beágyazásának alapja, hogy a nemlineáris kifejezések helyett egy-egy új rejtett algebrai változót vezetünk be. Az értekezés (A.4.) függelékében bemutatott fermentációs folyamat

példájából ideemelt 2. ábrán jól látszik, hogy az eredetileg kétdimenziós állapottérrel rendelkező nemlineáris fermentációs folyamat a kvázipolinomiális alakba történő beágyazás után egy háromdimenziós állapottérrel rendelkező rejtett differenciálalgebrai modell lesz.



2. ábra. Az értekezés (A.4.) függelékében bemutatott fermentációs folyamat trajektóriái (bal) valamint a fermentációs folyamat kvázipolinomiális alakjának trajektóriái (jobb). A különböző színű megoldások különböző egyensúlyi pontokba tartanak. A felület az η rejtett algebrai változó által definiált alacsonyabb dimenziós sokaságnak felel meg.

A beágyazott rendszer állapottrajektóriái ugyanakkor egy, az eredeti állapottérrel megegyező dimenziójú sokaságon mozognak. A beágyazott rendszer teljes irányíthatósága ezáltal elveszik, ami valóban jelent ranghiányból eredő numerikus problémákat a szabályozótervezés során. A kvázipolinomiális reprezentációba való beágyazás lényege azonban nem az, hogy a megnövekedett állapotteret kihasználjuk, vagy bejárjuk, hanem az, hogy a speciális rendszerosztály adta módszereket ki tudjuk használni. Tehát a valós problémák esetén kizárólag a beágyazás által meghatározott alacsonyabb dimenziós sokaságon szeretnénk irányítani a rendszert.

Végül ismét megköszönöm az alapos és részletes bírálatot, remélem, válaszaimat el tudja fogadni.

Veszprém, 2023. május 23.

Magyar Attila