

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



Fuzzy szabály-interpolációs módszerek és mintaadatok alapján történő automatikus rendszer generálás

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

JOHANYÁK ZSOLT CSABA

OKLEVELES MÉRNÖK-INFORMATIKUS

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

A DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

DR. TÓTH TIBOR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

Dr. Kovács Szilveszter.

Miskolc, 2007.

Bíráló bizottság

Elnök: Szigeti Jenő CSC

Tagok: Csáki Tibor CSC
Erdélyi Ferenc CSC
Kóczy T. László DSC
Várlaki Péter DSC

Titkár: Dudás László CSC

Bírálok: Baranyi Péter DSC
Radeleczki Sándor PhD

Tartalomjegyzék

Bíráló bizottság	2
Tartalomjegyzék	3
1. Bevezetés	4
2. Tudományos előzmények	4
3. Kutatási célok	7
4. Alkalmazott módszerek és eszközök, az elvégzett kutatómunka összefoglalása	7
5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására	9
5.1. Új fuzzy halmaz-interpolációs módszerek kidolgozása	9
5.1.1. Polár-vágaton alapuló halmaz-interpoláció (FEAT-p)	10
5.1.2. Legkisebb négyzetek elvén alapuló halmaz-interpoláció (FEAT-LS)	10
5.1.3. Bizonytalan környezetben végzett halmaz-interpoláció (VESI)	10
5.2. Szabálmódosításon alapuló új egyszabályos következtetési módszerek kidolgozása	11
5.2.1. Polár-vágaton alapuló egyszabályos következtetés (SURE-p)	11
5.2.2. Legkisebb négyzetek elvén alapuló egyszabályos következtetés (SURE-LS)	12
5.2.3. Bizonytalan környezetben alapuló szabálmódosítási elv (REVE)	12
5.2.4. Új szabály-interpolációs módszerek	13
5.3. Alkalmazási keretrendszer szabály-interpolációval dolgozó fuzzy következtető rendszerek megvalósítására és összehasonlítására	13
5.4. Új módszerek mintaadatok alapján történő automatikus fuzzy modell-identifikációra és gyakorlati alkalmazások	15
5.4.1. Szabálybázis kiterjesztésen alapuló fuzzy modell-identifikáció	16
5.4.2. Klaszterezésen alapuló fuzzy modell-identifikáció	17
5.4.3. Automatikus rendszergenerálást támogató szoftver	17
5.4.4. Fuzzy modellezési feladatok megoldása	18
6. Az elért eredmények hasznosíthatósága	19
7. További kutatási irányok és feladatok	19
8. Az értekezés témakörében megjelent saját tudományos közlemények	20
9. Hivatkozott irodalom	22

1. Bevezetés

A hétköznapi életben gyakran találkozunk olyan helyzettel, amikor egy fogalmat, egy tárgyat, egy értéket, stb. nem tudunk egyértelműen egyik vagy másik kategóriába besorolni, így vagy úgy minősíteni. Úgy érezzük, hogy többé-kevésbé ide is, oda is tartozik, ilyen is, olyan is. A klasszikus példa erre a személyek életkoruk alapján fiatal, középkorú és idős korcsoportba történő besorolása. Egy húszévesnél egyértelmű a helyzet, de egy 35 vagy 55 éves személy esetében már nem az.

A probléma oda vezethető vissza, hogy az emberi gondolkodásban nincs egyértelmű éles határvonal egyes fogalmak között. A kategóriák közötti éles határvonal meghúzése bár egyértelművé teszi a döntéshozatalt, de igen gyakran szembesülünk azzal az érzéssel, hogy nem vagyunk biztosak döntésünk helyességében. Egy dolgozat pontszámának értékelése során sokszor nincs lényegi különbség aközött, amit a határvonal alatti utolsó vagy a határvonal feletti első pontszámmal minősítenek.

Egy kategóriába történő besorolást gyakran követ egy következő lépés, ami valamilyen szabály alkalmazásával az értékelés tárgyát képező személy vagy bármely más objektum jövőjét hosszabb vagy rövidebb távon befolyásolja. Például korosztály alapján egy film megtekinthetőségének megállapítása, egy vizsgajegy vagy akár egy alkalmassági vizsga kimenetelének meghatározása.

A fenti, első látásra nehezen kezelhetőnek tűnő helyzetek, azaz a nyelvi fogalmakban rejlő bizonytalanság (pontatlanság) kezelésére teremtette meg L. A. Zadeh 1965-ben a fuzzy (homályos, életlen) [H26] fogalmat és a ráépülő logika alapjait. A fuzzy megközelítésen alapuló megoldások széleskörű elterjedését az iparban E. H. Mamdani és S. Assilian sikeres gőzgép szabályozási kísérletei [H13] alapozták meg.

Az elméleti háttér alapos kidolgozásával párhuzamosan és annak eredményeképpen a fuzzy logika széleskörű alkalmazást nyert hétköznapi életünk sok területén is (mosógép, vízmelegítő, porszívó, stb.), ahol több, esetenként homályosan megfogalmazott szempont által befolyásolt döntés meghozatala szükséges, vagy a vizsgált rendszer matematikai modelljének megalkotása és az optimális megoldás megtalálása túl bonyolult, illetve a modell pontatlansága miatt a kapott eredmény használhatatlan.

A fuzzy megközelítés segítségével irányíthatóvá válnak olyan folyamatok, amelyek a klasszikus elméletekkel csak igen körülményesen lennének kezelhetők. Ezek általában ember által jól kézben tarthatóak, azonban matematikai modelljük hiányos vagy túl komplikált, esetleg pontatlan volta miatt a klasszikus irányítástechnikai módszerek hatékonyan rájuk nem alkalmazhatók.

Értekezésem olyan fuzzy rendszerek következtetési módszereivel és automatikus generálásával foglalkozik, amelyek ritka szabálybázis esetében is képesek értelmezhető eredmények előállítására.

Az értekezés témakörében megjelent saját tudományos közlemények és a kutatómunka során fejlesztett szoftverek szabadon hozzáférhetőek és letölthetőek az [S31] címről.

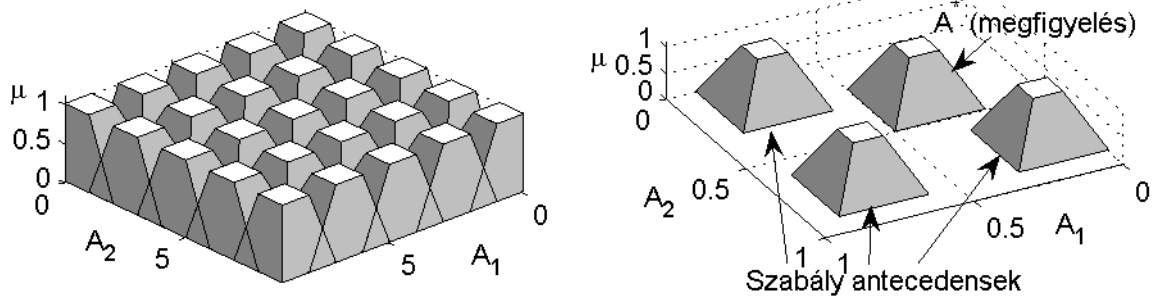
2. Tudományos előzmények

A hagyományos fuzzy következtetéssel (Zadeh [H27], Mamdani [H13], Larsen [H12], Takagi-Sugeno [H16], stb.) működő fuzzy rendszerek a szabály antecedensek és a megfigyelést leíró nyelvi értékek illeszkedése alapján a szabály konzekvensek súlyozott kombinációjaként határozzák meg a következményt, ami az adott módszernek megfelelően egyaránt lehet fuzzy halmaz vagy éles érték.

Működésükből következően ezen eljárások alkalmazásának előfeltétele a szabálybázis fedő (sűrű) jellege (ld. 1.a. ábra), azaz bármely bemenő adat esetén léteznie kell legalább egy olyan szabálynak, amelynek antecedense legalább ε mértékben fedi a megfigyelést a bemeneti tér minden dimenziójában

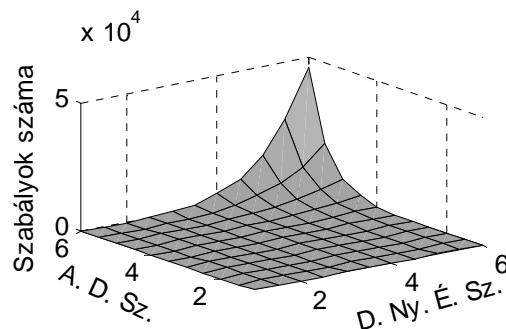
$$\arg \max_{\varepsilon} \left(\min_{i=1}^N \left\{ \max_{j=1}^{n_i} \left\{ t(A_{i,j}, A_i^*) \right\} \right\} \right) \geq \varepsilon, \forall A_i^* \subset X_i, \varepsilon \in [0, 1], \quad (1)$$

ahol U_i az antecedens tér i -edik dimenziója, A_i^* a megfigyelést az i -edik antecedens dimenzióban leíró halmaz, $0 < \varepsilon \leq 1$ a feladat függvényében választott konstans, A_{ij} a i -edik antecedens dimenzió j -edik nyelvi értéke, t tetszőleges t-norma, n_i az i -edik antecedens dimenzió nyelvi értékeinek száma, N az antecedens dimenziók száma és $\arg \max_{\varepsilon}(\cdot)$ azt az ε értéket jelenti, amelyre a zárójelben szereplő kifejezés felveszi maximális értékét.



1.a. ábra. Sűrű szabálybázis antecedens tere 1.b. ábra. Ritka szabálybázis antecedens tere

A bemeneti nyelvi változók és a dimenziónkénti nyelvi értékek számának növekedése a teljes lefedettség biztosításához szükséges szabályok mennyiségének és a szabálybázisra épülő fuzzy rendszer számításigényének robbanásszerű növekedését eredményezi. A probléma egyik lehetséges megoldása olyan szabálybázis kialakítása, amely nem fedő, de tartalmazza a feladat megoldásához szükséges releváns tudást [H8], azaz a lényeges szabályokat. Az ilyenkor előálló szabálybázist ritkának (nem fedőnek) nevezzük (ld. 1.b. ábra).



2. ábra. Szabályok számának alakulása az antecedens dimenziók számának (A. D. Sz.) és a dimenziónkénti nyelvi értékek számának (D. Ny. É. Sz.) függvényében

A szándékos komplexitás csökkentés mellett még további két ok vezethet ritka szabálybázis kialakulásához. Egyrészt megtörténhet, hogy nem áll rendelkezésre a szükséges ismeretanyag, másrészt a hangolási folyamat során egyes fuzzy halmazok helyzete és alakja megváltozhat, ami lefedetlen területek kialakulásához vezethet az antecedens térben.

Mivel a hagyományos fuzzy következtetési módszerek megkívánják a szabálybázis sűrű jellegét, ezért a ritka szabálybázisú alkalmazásokban indokolt lehet valamely fuzzy közelítő

következtetési technika használata. Az erre a célra kifejlesztett eljárások a legtöbb esetben valamely fuzzy szabály-interpolációs módszer segítségével határozzák meg a következményt. Ezen eljárásokat két csoportba oszthatjuk aszerint, hogy közvetlenül állítják-e elő a következményt vagy először egy segéd szabályt interpolálnak, és annak felhasználásával számítják a következményt.

Az első csoport legfontosabb képviselője a Kóczy és Hirota által kidolgozott lineáris szabály-interpoláció [H8] (KH módszer), ami elsőként kínált megoldást a ritka szabálybázisban történő következtetés feladatára. A csoport további fontos tagja a Tikk és Baranyi által javasolt MACI [H18], ami az abnormális eredményt kizáró koordináta-transzformációra épül, a Kovács és Kóczy által kifejlesztett FIVE [H11], ami szabály-interpoláció feladatát az ún. bizonytalan környezetbe helyezi, a Kóczy, Hirota és Gedeon által javasolt CRF [H9], ami a relatív fuzzy jelleg megőrzésén alapul, valamint a Wong, Gedeon és Tikk által javasolt IMUL [H23].

A második csoportba tartozó módszerek a Baranyi, Kóczy és Gedeon [H1] által publikált általánosított fuzzy szabály-interpolációs módszertant követik. Ezen eljárások családjába tartozó fontosabb elvárások a Baranyi és szerzőtársai által javasolt technikák [H1], a Yan, Mizumoto és Qiao által kifejlesztett ST [H25], ami a megfigyelés és a szabály antecedens közti hasonlóság megőrzésén alapul, valamint Huang és Shen általános reprezentatív értéket alkalmazó IGRV [H4] eljárása. Az általam kidolgozott LESFRI [S11], FRIPOC [S10] és VEIN [S24] módszerek szintén ebbe a csoportba tartoznak.

A jelenleg ismert, ritka szabálybázist is kezelni képes fuzzy következtetési módszerek gyakorlati alkalmazhatósága általában korlátozott. Az ismert eljárások jellegzetesen gyenge pontjai az alábbiak.

- A legtöbb módszer csak egydimenziós bemenet esetére lett kidolgozva.
- Egyes módszerek csak bizonyos halmazalakok (tagsági függvény típusok) esetén használhatóak.
- Az extrapolációs képesség hiánya. A legtöbb módszer megköveteli legalább két olyan szabály meglétét, amelyek antecedensei minden dimenzióban közrefogják a megfigyelést.
- Különböző magasságú halmazok kezelésének hiánya a legtöbb módszernél.
- Az egyes következtetési eljárások leírása a fellelhető irodalomban gyakran nem eléggé részletes, csak bizonyos esetekre kidolgozott.
- Nem áll rendelkezésre hozzáférhető szoftveres implementáció, ami lehetővé tenné az egyes módszerek könnyű gyakorlati alkalmazását és összevetését.

A megfelelő következtetési módszer választása mellett a fuzzy rendszerek kialakításának jelentős szereppel bíró témaköre a mintaadatok alapján történő automatikus rendszergenerálás. A ritka szabálybázis adatokból történő előállítására szolgáló jelenleg ismert módszerek nehézkesek, bonyolultak, illetve gyakran csak igen hosszadalmas hangolási folyamat után eredményeznek olyan fuzzy rendszert, ami elfogadható pontossággal képes modellezni az összetartozó be- és kimenő adathalmazok által leírt jelenséget.

Összegésként megállapítható, hogy a tématerület jelentős elméleti háttere és a publikációk nagy száma ellenére is szükséges lehet további kutatás, újabb szabály-interpolációs következtetési módszerek illetve automatikus szabálybázis generálási eljárások kidolgozása.

3. Kutatási célok

A ritka szabálybázisra épülő fuzzy rendszerek gyakorlati megvalósításának kulcskérdése a megfelelő következtetési módszer választása, illetve a rendszer paramétereinek „tanító” mintaadathalmaz alapú meghatározása. Ezen követelmények figyelembevételével határoztuk meg témavezetőmmel a kutatási célkitűzéseket, amelyek az alábbi pontokban foglalhatók össze.

- Új fuzzy következtetési módszerek kidolgozása az eddigi eljárásokkal nem, vagy nehezen kezelhető esetekhez (pl. eltérő magasságú halmazok egy partíción belül vagy partícióra jellemző halmazalak megőrzése).
- Olyan módszerek kidolgozása, amelyek alkalmasak ritka szabálybázis létrehozására az összetartozó be- és kimenetet leíró mintaadatok alapján.
- Szoftverrendszer fejlesztése, amely lehetővé teszi a különböző fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetési módszerek egységes keretek között történő alkalmazását és összevetését.
- A kidolgozott következtetési és modellgenerálási módszerek gyakorlati feladatokra történő alkalmazhatóságának példákon keresztüli igazolása.

4. Alkalmazott módszerek és eszközök, az elvégzett kutatómunka összefoglalása

Kutatómunkám a fuzzy következtetéssel kapcsolatos irodalom és ismeretek összegyűjtésével és szintetizálásával kezdődött. Itt elsősorban a ritka fuzzy szabálybázis fogalomkörének, jelölésrendszerének, sajátosságainak, valamint az ilyenkor alkalmazható következtetési módszerekkel kapcsolatos elvárások vizsgálata volt a fő cél. Ezt követően a jelenleg használatos szabály-interpolációs módszerek és kapcsolódó segéd eljárások irodalmának összegyűjtésébe és elemzésébe kezdtem.

A kutatómunka eme szakaszának eredményeként született a fuzzy halmazok közötti hasonlóság mérésének lehetőségeit áttekintő két konferencia cikk [S7] [S18], valamint az [S15], [S3], [S4] és [S22] cikkek, amelyekben egy elvárás-rendszert megfogalmazva néhány ismert fuzzy szabály-interpolációs módszer fontosabb tulajdonságait elemeztem. Ezen publikációk eredményeként merült fel az igény arra, hogy a Miskolci Egyetem Általános Informatikai Tanszéke, a Kecskeméti Főiskola Informatika Tanszéke, a Budapesti Műszaki és Közgazdasági Egyetem Távközlési és Médiainformaticai Tanszéke, valamint a Murdoch Egyetem (School of Information Technology, Perth, Ausztrália) együttműködésével kialakított munkacsoportban készítsünk egy mélyebb és szélesebb körű összehasonlító elemzést a jelenleg ismert fuzzy szabály-interpolációs eljárásokról.

A témához kapcsolódóan elkészítettem egy fuzzy szabály-interpolációval foglalkozó web portált [S30], amelyen tematikusan rendszerezve közzétettem egy bibliográfiai listát a témával és a kapcsolódó területekkel foglalkozó szakirodalomról. A felsorolt publikációk nagy része a web portálon keresztül szabadon hozzáférhető.

A szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetési módszerek egységes keretrendszerben történő tanulmányozásának és összevetésének támogatására Matlab platformon egy eljárásgyűjteményt (FRI ToolBox) fejlesztettem, aminek első változata nyolc módszert implementált [S28][S26]. A későbbiekben ezt három teljesen saját fejlesztésű módszerrel egészítettem ki. A ToolBox fejlesztése során nyilvánvalóvá vált, hogy néhány módszer esetén a szakirodalomban fellelhető leírás nem terjed ki minden részletre vagy csak bizonyos speciális esetekre vonatkozik. Emiatt a szoftverfejlesztés során a hiányzó részek

kidolgozására is ki kellett térnem. Az eljárásgyűjteményt a feladat sajátosságaira való tekintettel az inkrementális fejlesztési modellt [H6] követve készítettem, illetve fejlesztem jelenleg is.

A létező fuzzy szabály-interpolációs módszerek implementálása és az eljárásgyűjtemény fejlesztése során több ötlet is megfogalmazódott bennem, hogy hogyan lehetne olyan újabb következtetési módszereket kialakítani, amelyek a fuzzy szabály-interpoláció általánosított módszertanát [H1] követik, és egy vagy több szempontból kibővítik, kiegészítik az ismert módszerek családját.

Az elsőként kidolgozott módszeremben (FRIPOC [S10]) a polár-vágat fogalmát és a nyelvi értékek eltolásának elvét bevezetve olyan halmaz-interpolációs (FEAT-p [S14][S17][S10]) és egyszabályos következtetési (SURE-p [S10]) eljárásokat alakítottam ki, amelyek poláris koordináta-rendszer és poláris távolság segítségével, egy könnyen áttekinthető és kezelhető algoritmusra épülnek.

A második módszeremben (LESFRI [S11]) olyan α -vágat alapú halmaz-interpolációs (FEAT-LS [S1][S13]) és egyszabályos következtetési eljárásokat (SURE-LS [S11]) hoztam létre, amelyek szintén alkalmazzák a nyelvi értékek eltolásának elvét, és az új halmazok létrehozásakor megőrzik a partícióra jellemző tipikus halmazalakot a legkisebb négyzetek elvén alapuló számítással.

A Klawonn által bevezetett [H5] és szabály-interpolációs célokra elsőként [H11] témavezetőm által alkalmazott bizonytalan környezet eddig kihasználatlan lehetőségeit felismerve alakítottam ki harmadik módszeremet (VEIN [S24]). A VEIN eljárás a bizonytalan környezetben a fuzzy partíció leírására szolgáló skálafüggvény segítségével oldja meg a halmaz-interpoláció (VESI [S2]) feladatát és a skálafüggvények transzformálásán alapuló szabály-módosítással (REVE [S21] [S24]) határozza meg a következményt.

Az új szabály-interpolációs módszerek és az FRI ToolBox kidolgozása után természetes lépésnek tűnt egy vagy több gyakorlati alkalmazási lehetőség keresése. Itt elsősorban olyan feladatokkal találkoztam, ahol a modellezni kívánt jelenség leírása összetartozó be- és kimeneti adatok formájában állt rendelkezésre. Az automatikus szabálygenerálási módszerek tanulmányozása során a [H3], [H7], [H15], [H20] és [H24] irodalmak szolgáltatták a kiinduló alapot. A feladat megoldására elsőként egy olyan eljárást és rá épülő szoftvert fejlesztettem [S23] (ACP – Automatic fuzzy system generation based on fuzzy Clustering and Projection), ami a [H2], [H3], [H15], [H20] és [H24] irodalmakban közzétett eljárások egyes elemeinek és gondolatainak felhasználásával, főképpen a PRE módszerre [H3] támaszkodva készült. Az ACP eljárás fuzzy klaszterezésen alapszik, és hegymászó megközelítésű iteratív algoritmust alkalmaz paraméter-azonosításra.

A kezdeti eredményeket egy indiai egyetemmel (Sri Venkateswara College of Engineering) történő együttműködés is motiválta, ahonnan azzal a kéréssel kerestek meg, hogy készítsem el az általuk fejlesztett anaerob kúpos szuszpendált ágy reaktor működésének fuzzy modelljét. A feladat megoldását az [S27] cikkben publikáltuk. Később a [H3]-ben közölt hangolási eljárást továbbfejlesztve az ACP módszer több változatát is kidolgoztam, amelyek más-más nyelvi érték paraméterezési módszereket és megkötéseket alkalmaztak, valamint kidolgoztam egy összefüggést a lépésköz dinamikus változtatására a hangolás során. Az eljárásokat szintetikus példákon teszteltem [S23].

Mivel a szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetés és a ritka szabálybázisok alkalmazásának egyik lehetséges indoka a rendszer komplexitás csökkentése iránti igény, ezért a továbbiakban olyan automatikus rendszergenerálási módszerek kidolgozását tűztem ki célul, amely a korábban alkalmazott ACP módszernél alacsonyabb szabályszámmal képes

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására

azonos vagy jobb teljesítménymutatóval rendelkező fuzzy rendszert előállítani. Ez az igény vezetett egy olyan megoldás gondolatához, amelyben a kezdeti nyers rendszer csak két szabályt tartalmaz, amelyek illeszkednek a minimális és a maximális kimenethez, majd egy iteratív rendszerhangolási folyamat keretében fokozatosan újabb szabályokkal bővül a kívánt teljesítménymutató érték eléréséig.

A fenti gondolatmenet alapján kidolgozott két módszeremet (RBE-DSS és RBE-SI [S20]) valós adatokon is teszteltem, ahol jelentős szabálysám csökkenés mellett (pl. [S9]) sikerült jobb eredményeket elérni a szakirodalomban korábban publikáltaknál [H22]. Az automatikus fuzzy rendszergenerálás céljára kifejlesztett grafikus felületű szoftver kétféle nyers rendszer generálást és hatféle hangolást támogat. A rendszer értékelése során hétfajta teljesítménymutató közül választhat a felhasználó a szakirodalomban közzétett más módszerekkel elért eredményekkel való összehasonlíthatóság érdekében.

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására

Az alábbiakban röviden bemutatom kutatási eredményeimet, és az azok alapján megfogalmazott téziseket.

5.1. Új fuzzy halmaz-interpolációs módszerek kidolgozása

A fuzzy halmaz-interpoláció célja egy új fuzzy halmaz előállítása egy alaphalmaz egy megadott pontjában (interpolációs pont) úgy, hogy az új halmaz referencia ($RP(A^i)$) pontja essen egybe az interpolációs ponttal (x^i).

A továbbiakban először ismertetem a témakörhöz kapcsolódó téziscsoportomat, majd áttekintem az általam kidolgozott három eljárás alapgondolatait és fontosabb jellemzőit.

1. tézis. *Új halmaz-interpolációs eljárásokat vezettem be a fuzzy szabályinterpoláció általánosított módszertanához és ritka szabálybázissal rendelkező fuzzy modellek identifikációjához.*

1.1. altézis. *Igazoltam, hogy az általam kidolgozott, polár-vágaton (FEAT-p), legkisebb négyzetek elvén (FEAT-LS) és bizonytalan környezetben (VESI) alapuló halmaz-interpolációs eljárások alkalmazhatók a szabály-interpoláció általánosított módszertanában az új szabály antecedens és konzekvens halmazainak előállítására minden olyan esetben, amikor a partíció ismert halmazai konvexek és tartójuk korlátos.*

1.2. altézis. *Igazoltam, hogy az általam kidolgozott halmaz-interpolációs eljárások alkalmazhatók a szabálybázis kiterjesztés elvén alapuló (RBE-DSS és RBE-SI) fuzzy modell-identifikációban új fuzzy halmazok előállítására, amikor a partíció ismert halmazai konvexek és tartójuk korlátos.*

1.3. altézis. *Elkészítettem a FEAT-p, FEAT-LS és VESI halmaz-interpolációs módszereket megvalósító számítógépes eljárásokat és az őket implementáló szoftvert, amely a FEAT-p esetében sokszög és Gauss görbe alakú, a FEAT-LS és VESI esetében trapéz alakú tagsági függvények esetén alkalmas halmaz-interpolációs feladat megoldására.*

A téziscsoport tartalmi része publikálásra került az [S1], [S2], [S5], [S10], [S11], [S13], [S14], [S17], [S19] és [S24] kiadványokban.

5.1.1. Polár-vágaton alapuló halmaz-interpoláció (FEAT-p)

A FEAT-p (Fuzzy sEt interpolAtion based on linguistic Term shifting and polar cuts) eljáráshoz bevezettem a polár vágatok fogalmát. Ennek érdekében egy poláris koordináta-rendszert illeszték a halmazhoz úgy, hogy a középpont essen egybe a referencia pontnak megfelelő halmazelemmel. A polár-vágat ($[A]_{\theta} = \{\rho, \theta\}$) egy érték pár, ami a halmazalak egy pontját írja le annak poláris távolságával (ρ) és poláris szögével (θ).

A FEAT-p eljárás első lépéseként a partíció összes ismert fuzzy halmazát vízszintesen eltolom úgy, hogy referencia pontjuk essen egybe az interpolációs ponttal. A mag középpontját alkalmazom referencia pontként.

Ezt követően egy poláris koordináta-rendszert helyezek a közös referencia pontba, és polár-vágatonként haladva határozom meg az ismert halmazok alapján az új halmazalakot. Az új halmaz poláris távolságait az ismert halmazok azonos poláris szög alatt elhelyezkedő pontjai poláris távolságainak súlyozott átlagaként számítom. A súlyozás alapja az ismert halmazok referencia pontjai és az interpolációs pont közötti távolság.

Az eljárás lényeges előnyös tulajdonsága, hogy bármilyen konvex és korlátos tartójú halmazalak esetén alkalmazható, valamint nem szükséges, hogy az ismert fuzzy halmazok azonos alakúak és magasságúak legyenek, azaz egy vagy több halmaz szubnormális is lehet. Továbbá az eljárás egyaránt alkalmazható interpolációra és extrapolációra is.

A módszer részletes ismertetése az értekezés 4.2. szakaszában olvasható.

5.1.2. Legkisebb négyzetek elvén alapuló halmaz-interpoláció (FEAT-LS)

A FEAT-LS (Fuzzy sEt interpolAtion based on the method of Least Squares) eljárás célja egy olyan halmazalak meghatározása halmaz-interpolációval, amely a partíció többi halmazával azonos alakzattípusú. Ennek érdekében a partíció összes nyelvi értékét vízszintesen eltolom úgy, hogy referencia pontjuk essen egybe az interpolációs ponttal.

A halmazalakokat a referencia pontnál két részre (élre), egy bal oldalra és egy jobb oldalra bontom úgy, hogy mindkét él tartalmazza a referencia pontot és az alakzatot a saját oldalán definiáló töréspontokat. Ezután a két élre külön-külön, csak az adott oldal töréspontjainak megfelelő α -szinteken végzem el a számításokat. Ezután az új halmaz alakzatának paramétereit úgy állapítom meg, hogy az ismert halmazok α -vágatai végpontjainak súlyozott négyzetes eltérése az alakzattól minimális legyen. A súlyozás alapja az ismert halmazok referencia pontjai és az interpolációs pont közötti távolság.

A módszer kis számításigényű, egyaránt alkalmazható interpolációs és extrapolációs feladatokra is. Bár alapvetően arra az esetre lett kidolgozva, amikor a partíció minden fuzzy halmaza azonos alakzat típusba tartozik, de mivel a módszer α -vágat alapú, így vegyes alakzatok esetén is képes értelmezhető eredmény előállítására. Az egyetlen megkötés az, hogy minden halmaz magassága azonos kell legyen. Az eredményül kapott fuzzy halmaz mindig érvényes és a partícióra jellemző alakzattípusba tartozik.

A módszer részletes ismertetése az értekezés 4.3. szakaszában olvasható.

5.1.3. Bizonytalan környezetben végzett halmaz-interpoláció (VESI).

A VESI (Vague Environment based Set Interpolation) eljárás alapja az, hogy a Klawonn [H5] által bevezetett bizonytalan környezetben egy fuzzy partíció leírható egy egységes skálafüggvény és egy ún. reprezentatív pontsor segítségével. Míg a skálafüggvény a nyelvi értékek alakját jellemzi, addig a reprezentatív pontok a fuzzy halmazok elhelyezkedését és magasságát írják le.

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására

A skálafüggvény a bizonytalan környezetet szakaszonként írja le állandó vagy nem állandó skálafaktorok segítségével. A szakaszok végpontjait az alaphalmaz alsó és felső korlátai, valamint a prototípus pontok határozzák meg. Minden egyes szakasz skálafaktorát csak az adott szakaszban jelen levő él(ek) befolyásolják [H10][H11].

A bizonytalan környezet segítségével halmaz-interpoláció végezhető úgy, hogy az interpolációs pontot reprezentatív pontként értelmezzük, és a skálafüggvény segítségével kiszámítjuk az adott pontra jellemző halmazalakot.

A VESI eljárás mindig érvényes halmazalakot eredményez, bármilyen konvex és korlátos tartójú halmazalak esetén alkalmazható. Továbbá egyaránt képes interpolációs és extrapolációs feladatok megoldására.

A módszer részletes ismertetése az értekezés 4.4. szakaszában olvasható.

5.2. Szabáymódosításon alapuló új egyszabályos következtetési módszerek kidolgozása

A fuzzy szabály-interpoláció általánosított módszertanán [H1] alapuló következtetés a következményt az interpolációval előállított segéd szabály konzekvensének módosításával számítja egy ún. egyszabályos következtetési módszer segítségével. Az egyszabályos következtetési módszerek a szükséges módosítás mértékét a szabály antecedens halmazok és a megfigyelés halmazok közötti eltérés alapján határozzák meg.

A továbbiakban először ismertetem a témakörhöz kapcsolódó téziscsoportomat, majd áttekintem az általam kidolgozott három eljárás alap gondolatait és fontosabb jellemzőit.

2. tézis. *Igazoltam, hogy az általam kidolgozott, polár-vágaton (SURE-p), legkisebb négyzetek elvén (SURE-LS) és bizonytalan környezetben (REVE) alapuló egyszabályos következtetési eljárások alkalmazhatók a szabály-interpoláció általánosított módszertanában a következmény számítására minden olyan esetben, amikor a partíció ismert halmazai konvexek és tartójuk korlátos.*

2.1. altézis. *Elkészítettem a SURE-p, SURE-LS és REVE egyszabályos következtetési módszereket megvalósító számítógépes eljárásokat és az őket implementáló szoftvert, amely trapéz alakú tagsági függvények esetén alkalmas a következmény számítására.*

A téziscsoport tartalmi része publikálásra került az [S10], [S11], [S21] és [S24] kiadványokban.

5.2.1. Polár-vágaton alapuló egyszabályos következtetés (SURE-p)

A SURE-p (Single rUle REasoning based on polar cuts) eljárás polár-vágatonként haladva határozza meg az új halmaz alakját. Minden polár-vágat esetén az összes bemeneti dimenzióban kiszámítom a megfigyelés és az antecedens halmaz polár távolságai különbségének a partíció terjedelméhez viszonyított mértékét, majd ezek átlagának segítségével határozom meg a konzekvens oldalon szükséges módosítás mértékét. Ezután két megköthetés alkalmazásával biztosítom azt, hogy az eredmény érvényes, konvex halmaz legyen.

Az eljárás jelentős előnyös tulajdonsága, hogy bármilyen érvényes halmazalak esetén alkalmazható, valamint a számítások során felhasznált fuzzy halmazok nem szükségesek, hogy azonos alakúak és magasságúak legyenek, azaz egy vagy több halmaz szubnormális is lehet. Amennyiben a megfigyelés azonos valamely szabály antecedensével, a SURE-p módszer nem módosítja a szabály konzekvensét, így teljesül a szabálybázissal való kompatibilitás iránti igény. Az eljárás egy- vagy többdimenziós antecedens univerzum esetén is egyaránt

alkalmazható, azonban nem alkalmas a partícióra jellemző alakzattípus megőrzésére. A megfigyelés fuzzy jellegének csökkenése a következmény fuzzy jellegének csökkenését vonja maga után.

Szabály-interpolációs feladatoknál a SURE-p módszert a FEAT-p halmaz-interpolációs eljárással párosítva célszerű alkalmazni. A módszer részletes ismertetése az értekezés 5.1. szakaszában olvasható.

5.2.2. Legkisebb négyzetek elvén alapuló egyszabályos következtetés (SURE-LS)

A SURE-LS (Single rUle REasoning based on the method of Least Squares) eljárás célja egy olyan következmény halmaz előállítása, amelynek alakja azonos típusú a partíció többi nyelvi értékének alakjával. Ennek érdekében α -vágatonként az összes bemeneti dimenzióban kiszámítom a megfigyelés és az antecedens pontok referencia ponthoz mért távolságai különbségének a partíció terjedelméhez viszonyított mértékét, majd ezek átlagának segítségével határozom meg a konzekvens oldalon szükséges módosítás nagyságát úgy, hogy ezen pontoknak a végső halmazalakhoz mért vízszintes irányú távolságaiból számított súlyozott négyzetösszeg minimális legyen.

A módszer értékeléseként elmondható, hogy mindig érvényes halmazalakot eredményez, és megőrzi a konzekvens partíció jellegzetes halmazalak típusát. Amennyiben a megfigyelés azonos valamely szabály antecedensével, az eljárás nem módosítja a szabály konzekvensét, így biztosított a szabálybázissal való kompatibilitás iránti igény kielégítése. Az eljárást alapvetően arra az esetre dolgoztam ki, amikor a konzekvens partíció minden nyelvi értéke azonos alakzat típusú.

A SURE-LS az α -vágat alapú technikának köszönhetően egyes alakzatoknál is alkalmazható, amennyiben egy kellően általános befoglaló alakzat típust tudunk definiálni és az összes fuzzy halmaz úgy antecedens, mint konzekvens oldalon azonos magasságú. A módszer egy- és többdimenziós antecedens tér esetén egyaránt használható. A következmény fuzzy halmaz egyértékű lesz, amennyiben a konzekvens partíció minden nyelvi értéke egyértékű. Egyéb esetekben a megfigyelés fuzzy jellegének csökkenése a következmény fuzzy jellegének csökkenését eredményezi.

Szabály-interpolációs feladatoknál a SURE-LS módszert a FEAT-LS halmaz-interpolációs eljárással párosítva célszerű alkalmazni. A módszer részletes ismertetése az értekezés 5.2. szakaszában olvasható.

5.2.3. Bizonytalan környezetben alapuló szabálmódosítási elv (REVE)

A REVE (Revision mEthod based on the Vague Environment) eljárás a bizonytalan környezetbe helyezi a szabálmódosítás feladatát. Alapgondolata a skálafüggvények arányának megőrzése. Ehhez minden antecedens dimenzióban kiszámolom a megfigyelés és a szabály antecedensek bizonytalan környezetét jellemző skálafüggvények arányát, majd harmonikus átlagolással meghatározom ezek eredő értékét.

A következmény bizonytalan környezetét leíró skálafüggvényt az antecedens oldali eredő arányszám segítségével számítom ki. A skálafüggvény ismeretében a referencia pontból kiindulva határozom meg a halmazalakot.

A REVE szabálmódosításon alapuló következtetési eljárás egyik legfontosabb előnyös tulajdonsága az alacsony számítási bonyolultság és az ebből következő gyorsaság. További pozitív jellemzője, hogy egyaránt alkalmazható egy- és többdimenziós antecedens univerzumok esetén, valamint minden érvényes halmazalak kezelésére képes. A harmonikus

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására

átlag aggregációs operátorként történő alkalmazása egyértékű fuzzy halmaz következményt eredményez, amennyiben a megfigyelés minden dimenzióban egyértékű halmaz.

A skálafüggvényarány megőrzési elvének köszönhetően a következmény fuzzy jellegének változása ugyancsak követi a megfigyelés fuzzy jellegének változását. A következmény skálafüggvénye minden esetben azonos a szabály konzekvensének skálafüggvényével, ha a megfigyelés skálafüggvénye is megegyezik a szabály antecedens skálafüggvényével

Szabály-interpolációs feladatoknál a REVE módszert a VESI halmaz-interpolációs eljárással párosítva célszerű alkalmazni. A módszer részletes ismertetése az értekezés 5.3. szakaszában olvasható.

5.2.4. Új szabály-interpolációs módszerek

Bár az első két tézisben bemutatott fuzzy halmaz-interpolációs és egyszabályos következtetési módszerek bármilyen párosításban alkalmasak a saját kategóriájukon belül szükséges számítások elvégzésére, azonban egyértelműen meghatározható egy ideális pár illetve kiegészítő mindegyikük esetében. Ez annak köszönhető, hogy a szabálmódosítási eljárások nem a halmaz-interpolációs módszerektől teljesen függetlenül lettek kifejlesztve, hanem úgy, hogy megfelelő párosítás esetén a halmaz-interpoláció során keletkező adatok egy része az egyszabályos következtetés során is hasznosítható legyen.

A fentiek figyelembevételével három szabály-interpolációs eljárást dolgoztam ki. Ezek közös jellemzője, hogy az általánosított fuzzy szabály-interpolációs módszertant (GM) [H1] követik, és a Shepard interpoláció [H14] egy adaptált változatával számítják ki az új szabály konzekvens halmazának helyzetét.

1. *FRIPOC*. A Polár-vágat alapú szabály-interpoláció [S10] (FRIPOC – Fuzzy Rule Interpolation based on POLar Cuts) az interpolált szabály antecedens és konzekvens fuzzy halmazainak meghatározására polár-vágat alapú halmaz-interpolációt (FEAT-p) használ. A következtetési folyamat második lépésében a SURE-p eljárás segítségével határozom meg a következményt.
2. *LESFRI*. A legkisebb négyzetek elvén alapuló szabály-interpoláció [S11] (LESFRI - LEast Squares based Fuzzy Rule Interpolation) az interpolált szabály antecedens és konzekvens nyelvi értékeinek meghatározására a legkisebb négyzetek elvén alapuló halmaz-interpolációt (FEAT-LS) alkalmazza. A következtetési folyamat második lépésében a SURE-LS eljárás segítségével határozom meg a következményt.
3. *VEIN*. A bizonytalan környezetben végrehajtott kétlépéses fuzzy szabály-interpoláció [S24] (VEIN - Vague Environment based two-step fuzzy rule INterpolation) az interpolált szabály antecedens és konzekvens nyelvi értékeinek meghatározására bizonytalan környezet alapú halmaz interpolációt (VESI) alkalmaz. A következtetési folyamat második lépésében a bizonytalan környezet fogalmára épülő szabálmódosítási eljárás (REVE) segítségével határozom meg a következményt.

5.3. Alkalmazási keretrendszer szabály-interpolációval dolgozó fuzzy következtető rendszerek megvalósítására és összehasonlítására

A szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetési módszerek értékelésének, összehasonlításának és gyakorlati alkalmazásának hasznos segédeszköze lehet egy olyan keretrendszer, amely lehetővé teszi az egyes eljárások azonos feltételek közötti kipróbálását, a kapott eredmények összevetését és azonos teljesítménymutatók segítségével történő

értékelését. Ezen szempontok által vezérelve terveztem meg és implementáltam az FRI Matlab ToolBoxot.

A továbbiakban először ismertetem a témakörhöz kapcsolódó téziscsoportomat, majd áttekintem az általam kidolgozott keretrendszer fontosabb jellemzőit.

- 3. tézis.** *Egy fuzzy szabály-interpolációs alkalmazási keretrendszert terveztem meg, dolgoztam ki és implementáltam (FRI ToolBox), valamint megmutattam, hogy a keretrendszer alkalmas szabály-interpolációval dolgozó fuzzy következtető rendszerek megvalósítására, összehasonlítására és értékelésére.*
- 3.1. altézis.** *Egységes adatszerkezetet dolgoztam ki fuzzy rendszerek és megfigyelések számítógépes ábrázolására és tárolására egyszerű szöveges és XML alapú formátumban.*
- 3.2. altézis.** *Számítógépes eljárásokat dolgoztam ki és implementáltam tíz szabály-interpolációs módszerhez singleton, háromszög és trapéz alakú tagsági függvények esetére.*
- 3.3. altézis.** *Megmutattam, hogy az FRI ToolBox részeként elkészített TestIt és FRIT szoftverek alkalmasak éles és fuzzy bemenetű fuzzy rendszerek értékelésére és a különböző következtetési módszerek által adott eredmények összehasonlítására.*

A téziscsoport tartalmi része publikálásra került az [S26] és [S28] kiadványokban.

Az általam kidolgozott keretrendszer az első olyan közös platform és egységes adatábrázolási mód, amely támogatja a különböző fuzzy szabály-interpolációs módszerek közvetlen összevetését és az ugyanazon feladat esetén generált következtetések összehasonlítását. A keretrendszer kidolgozása és az egyes eljárások implementálása során egy olyan adatszerkezetet alakítottam ki fuzzy rendszerek leírásának számítógépes ábrázolására, amely a Matlab szabványos Fuzzy Logic Toolbox FIS adatstruktúrájának kiterjesztése. Ezáltal a szubnormális fuzzy halmazalakok kezelése mellett továbbra is lehetséges a szabványos Matlab FIS modellek közvetlen alkalmazása. A rendszerleírás tárolására egyszerű szöveges és XML alapú megoldást is kialakítottam. Ez utóbbi elősegíti a más alkalmazások általi feldolgozhatóságot is. A megfigyelések leírására olyan egyszerű szöveges és XML alapú megoldásokat dolgoztam ki, amelyek jól illeszkednek a rendszerleíráshoz.

A keretrendszerben megvalósított eljárásgyűjtemény jelenleg 11 szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetési módszer implementációját tartalmazza. Ezek a következők: KH [H8], stabilizált KH [H19], MACI [H18], IMUL [H23], CRF [H9], FIVE [H11], VKK [H21], GM [H1] (SCM+FERI+FPL), LESFRI [S11], FRIPOC [S10] és VEIN [S24]. A FIVE-hoz szükséges számításokat végző függvényeket témavezetőm készítette, ezen kívül minden más rész saját fejlesztés eredménye.

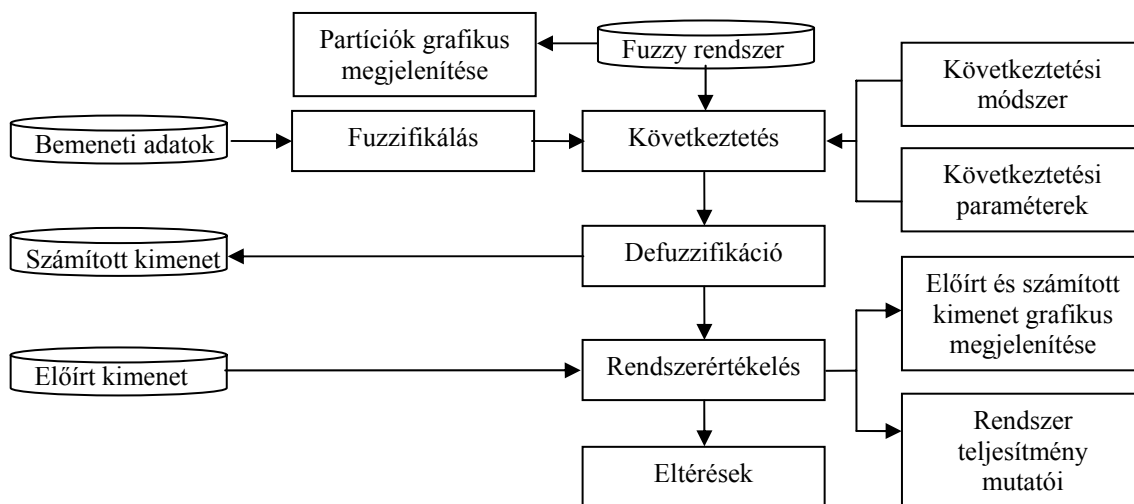
A fuzzy szabály-interpolációs módszereket implementáló, illetve a részfeladatokat megoldó függvények Matlabban közvetlenül meghívhatóak, így más alkalmazásba is beépíthetők. Továbbá a szoftver által nyújtott szolgáltatások két grafikus felületű alkalmazás segítségével is igénybe vehetők. Ezek a TestIt és a FRIT.

TestIt

A TestIt program egy fuzzy rendszert tesztel éles (nem fuzzy) bemeneti és kimeneti értékek sorozatával. A menüből kiválasztott következtetési módszer segítségével minden bemeneti adatra kiszámolja a kimenetet és az előírt kimenettől való eltérést. Az eredmények alapján hétfajta teljesítménymutatóval értékeli a rendszert, és méri a számítások időigényét, így az

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására

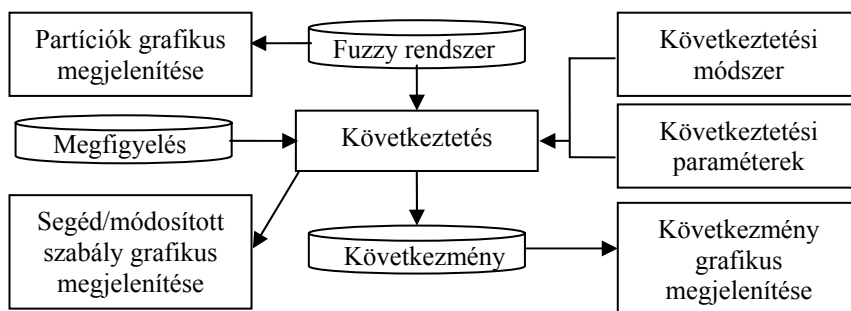
egyres módszerek az eltelt idő szempontjából is összehasonlíthatóak. A program grafikus megjeleníti az egyes partíciókat, valamint a számított és az előírt kimeneti adatokat. A következtetés paraméterei grafikus felületen állíthatóak. A program belső struktúráját a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. A TestIt szoftver belső struktúrája

FRIT

A FRIT program egy fuzzy rendszer esetén fuzzy halmaz(ok) formájában megadott megfigyelésre különböző következtetési módszerekkel előállítja a következmény halmaz(oka)t. A be- és kimeneti partíciók grafikus megjelenítése mellett a kétlépéses módszerek által előállított segéd- illetve módosított szabályok antecedens és konzekvens halmazai is megjeleníthetők. A következtetés paraméterei grafikus felületen állíthatóak. A program belső struktúráját a 4. ábra mutatja be.



4. ábra. A FRIT szoftver belső struktúrája

A kidolgozott eljárásgyűjtemény, keretrendszer és adatstruktúra részletes ismertetését az értekezés 7. fejezete tartalmazza.

5.4. Új módszerek mintaadatok alapján történő automatikus fuzzy modell-identifikációra és gyakorlati alkalmazások

A témakörhöz kapcsolódó kutatómunkám során olyan módszerekkel foglalkoztam, amelyek segítségével éles be- és kimeneti adatok formájában rendelkezésre álló mintaadathalmaz alapján alacsony szabályszerű és általában ritka szabálybázisú fuzzy modell állítható elő automatikusan.

Az alábbiakban először ismertetem az eredményeket összefoglaló téziscsoportomat, majd ezt követően áttekintem az általam kifejlesztett eljárások fontosabb gondolatait.

- 4. tézis.** *Új eljárásokat javasoltam ritka szabálybázisú fuzzy modellek mintaadatok alapján történő automatikus identifikációjára, és megmutattam, hogy segítségükkel az irodalomban közzétettnél kedvezőbb tulajdonságú fuzzy rendszer generálható.*
- 4.1. altézis.** *Kifejlesztettem a szabálybázis kiterjesztés elvét (RBE), és kidolgoztam két, azon alapuló fuzzy modell-identifikációs módszert (RBE-DSS és RBE-SI). Számítógépes eljárást és implementációt dolgoztam ki az RBE-DSS és RBE-SI módszerekhez trapéz alakú tagsági függvények esetére.*
- 4.2. altézis.** *Számítógépes eljárást és implementációt dolgoztam ki a fuzzy klaszterezésen alapuló (ACP) modell-identifikációs módszerhez trapéz alakú tagsági függvények esetére.*
- 4.3. altézis.** *Szintetikus úton (ismert függvénnyel) előállított mintaadathalmazból RBE-DSS és RBE-SI módszerekkel olyan fuzzy rendszereket generáltam, amelyek az első két tézis eljárásait alkalmazó szabály-interpolációs módszerek (FRIPOC, LESFRI és VEIN) segítségével állítják elő a következményt. Kimutattam, hogy az irodalomban közzétettnél kedvezőbb teljesítménymutató érhető el ezen eljárásokkal.*
- 4.4. altézis.** *Egy anaerob kúpos szuszpendált ágy reaktor működésének fuzzy modellezéséhez készített fuzzy rendszerek segítségével igazoltam az ACP és a FRIPOC módszerek alkalmazhatóságát.*
- 4.5. altézis.** *Kőolajkutatás során végzett fúrások mérési eredményei közötti összefüggés modellezésére készítettem LESFRI és FRIPOC következtetéssel dolgozó fuzzy modelleket az RBE-DSS rendszergenerálási módszer segítségével. Kimutattam, hogy ezen eljárásokkal az irodalomban korábban közzétettnél kedvezőbb teljesítménymutatók érhetőek el.*

A tézis tartalmi része publikálásra került az [S9], [S20], [S23], [S25] és [S27] kiadványokban.

5.4.1. Szabálybázis kiterjesztésen alapuló fuzzy modell-identifikáció

Az szabálybázis kiterjesztésen alapuló módszerek alapgondolata az, hogy a mintaadathalmaz alapján először egy-egy olyan szabályt generálok, amely illeszkedik a kimenet alsó és felső szélsőértékeire, majd ezután az ily módon kapott rendszert egy iteratív módszerrel hangolni kezdem. Amennyiben a hangolás során a rendszer értékelésére alkalmazott teljesítménymutató (pl. átlagos négyzetes hiba) lokális minimumához érünk, akkor az eljárás egy új szabályt hoz létre ott, ahol a legnagyobb az eltérés a mintaadathalmaz által előírt és a rendszer által előállított kimenet között (automatikus szabálybázis bővítés). A két módszer alapvetően az új halmazok alakjának meghatározási módjában tér el egymástól.

1. *Szabálybázis kiterjesztés alapértelmezett halmazalak használatával (RBE-DSS).* Az eljárás alapgondolata az, hogy az új szabály létrehozásakor a szabályban szereplő halmazokat előre definiált alakokkal és mérettel hozom létre. Az eljárást az értekezés 8.1. fejezetében ismertetem.
2. *Szabálybázis kiterjesztés halmaz-interpoláció alkalmazásával (RBE-SI).* Az eljárás alapgondolata az, hogy az új szabály létrehozásakor a szabályban szereplő halmazokat a partíció sajátosságaira, szabályszerűségeire alapozva halmaz-interpolációval hozom létre. Az eljárást az értekezés 8.1. fejezetében ismertetem.

5. Új módszerek és eszközök a fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetés és a mintaadatokon alapuló automatikus modell-identifikáció támogatására
-

5.4.2. Klaszterezésen alapuló fuzzy modell-identifikáció

A [H2], [H3], [H15], [H20] és [H24] irodalmakban közzétett fuzzy klaszterezésen alapuló modell-identifikációs eljárások egyes elemeinek és gondolatainak felhasználásával egy saját módszert alakítottam ki ACP (Automatic fuzzy system generation based on fuzzy Clustering and Projection) néven.

Az ACP eljárás az optimális klaszterszám meghatározása után a mintaadathalmaz kimeneti értékein végrehajtott egydimenziós FCM klaszterezés alapján képezi a trapéz alakú konzekvens fuzzy halmazokat Ruspini típusú partíciót kialakítva. Ezt követően minden konzekvens halmaz esetén megvizsgálja, hogy milyen bemeneti adatok vezethetnek hozzá a mintaadathalmazban, majd ezeket az adatokat dimenzióként klaszterezzi, és a különböző konzekvenséktől származtatott antecedens oldali klaszterközéppontokat antecedens dimenzióként összefésüli. Az összefésült antecedens klaszterközéppontok alapján becslési meg az eljárás a szintén trapéz alakú antecedens fuzzy halmazokat Ruspini típusú partíciókat kialakítva minden dimenzióban.

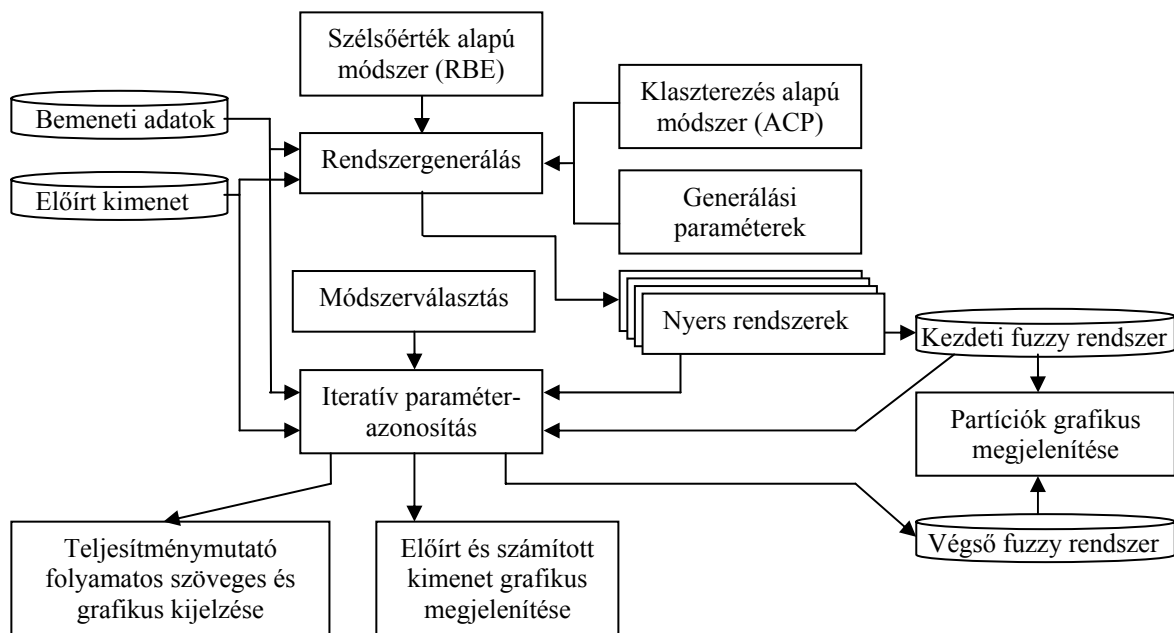
Az eljárás második lépésében egy, az RBE módszereknél alkalmazotthoz hasonló iteratív módszerrel hangolom a halmazok paramétereit. Itt nem hozok létre új szabályokat a paraméterazonosítási folyamat során.

5.4.3. Automatikus rendszergenerálást támogató szoftver

Az adatok alapján történő automatikus rendszergeneráláshoz egy ToolBox-ot fejlesztettem Matlab környezetben RuleMaker néven, amely szervesen kapcsolódik az FRI ToolBox szabály-interpolációs eljárásgyűjteményhez. A szoftver egyes függvényei külön-külön meghívhatók akár más alkalmazásból is, de készítettem egy grafikus felületű programot is, ami az eljárásgyűjtemény által nyújtott szolgáltatásokat kényelmesen elérhetővé teszi. A szoftver funkcionalitását alapvetően két témakörre bonthatjuk. Ezek a következők.

- Nyers fuzzy rendszer előállítás be- és kimeneti adatok alapján menüből választható módon klaszterezésen (ACP) vagy a kimeneti szélsőértéken alapuló (RBE-DSS és RBE-SI) módszerek segítségével. Több kimenettel rendelkező adatsorok esetén minden kimeneti dimenzióhoz egy külön fuzzy rendszer keletkezik.
- Egy vagy több bemenettel és egy kimenettel rendelkező kiinduló (nyers) fuzzy rendszer iteratív hangolása hatféleképpen választható módon három különböző módszer (RBE-DSS, RBE-SI és ACP) és négy paraméterezési technika felhasználásával, és a választható hét teljesítménymutató valamelyikének figyelembevételével.

A programban a paraméter-azonosítás során az összes olyan fuzzy következtetési módszer használható, amelynek implementációját tartalmazza a FRIT keretrendszer. A hangolási és következtetési paraméterek párbeszédpanelek segítségével állíthatók be. A szoftver képes a partíciók grafikus megjelenítésére, továbbá a hangolás folyamata során a numerikus kijelzése mellett grafikonon is követhető a teljesítménymutató alakulása. Az előírt és a számított kimeneti értékek is folyamatosan nyomon követhetők. A program belső struktúráját az 5. ábra mutatja be.



5. ábra. A rendszergeneráló program belső struktúrája

5.4.4. Fuzzy modellezési feladatok megoldása

Az általam megoldott fuzzy modellezési feladatok három pontban foglalhatók össze.

1. A FRIPOC, LESFRI és VEIN szabály-interpolációs fuzzy következtetési módszerekkel dolgozó fuzzy modelleket hoztam létre és optimalizáltam az RBE-DSS és RBE-SI eljárások segítségével egy bemenő és egy kimenő változós (SISO), valamint két bemenő és egy kimenő változós (MISO) függvények approximációjára szintetikus (ismert függvénnyel) előállított mintaadatok alapján. A kísérletek eredményei igazolták a módszerek alkalmazhatóságát. A MISO rendszer esetében a teljesítménymutatók kissé elmaradnak az irodalomban közzétett hatféle megközelítéssel kapott hat teljesítménymutató legjobbikától, de jobbak, a közzétett másik öt eredmény A modellazonosítással kapcsolatos eredményeket az értekezés 9.1. szakaszában ismertetem.
2. Egy anaerob kúpos szuszpendált ágy reaktor működésének fuzzy modellezésére (négy bemenet és öt kimenet MIMO) alkalmaztam az első és második tézisben bemutatott három következtetési módszerrel dolgozó fuzzy modelleket, amelyeket az ACP módszer segítségével azonosítottam és optimalizáltam. A szennyvíztisztítás-modellezési feladat keretében további két fuzzy modellt generáltam RBE-DSS módszerrel a LESFRI típusú következtetéshez. A modell-identifikációval kapcsolatos eredményeket az értekezés 9.2. szakaszában ismertetem.
3. Kőolajkutatás során végzett fűrészek mérési eredményei közötti összefüggés modellezésére készítettem fuzzy modelleket az RBE-DSS rendszergenerálási módszer segítségével. Az egyik modell a LESFRI, míg a másik FRIPOC szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetési eljárást alkalmazza. Sikerült az irodalomban korábban publikálnál jobb teljesítménymutatót elérni kisebb szabályszám mellett mindkét esetben. A modell-identifikációval kapcsolatos eredményeket az értekezés 9.3. szakaszában ismertetem.

Az első pontban szereplő több bemenetű függvény approximációs feladatot és a harmadik pontban ismertetett feladatot validálás céljából választottam. Azt kívántam igazolni, hogy az

általam kidolgozott módszerekkel lehetséges az irodalomban fellelhető eredményeknél jobb teljesítménymutatóval rendelkező fuzzy modellt generálni

6. Az elért eredmények hasznosíthatósága

Mesterségesen előállított és mérésekből származó adatokkal végrehajtott futtatások eredményei azt mutatják, hogy az általam kifejlesztett automatikus fuzzy rendszergenerálási és –hangolási módszerek alkalmasak fuzzy rendszerek előállítására olyan esetekben, amikor a modellezett jelenségre vonatkozó tudás összefüggő be- és kimeneti adatok formájában áll rendelkezésre.

A feladatot megoldó szoftver szabadon hozzáférhető és letölthető az általam üzemeltetett [S30] webhelyről Matlab eljárásgyűjtemény formájában, így könnyen beépíthető más alkalmazásokba, vagy meghívható más alkalmazásokból. A könnyen kezelhető grafikus felülettel rendelkező program önállóan, Matlabtól függetlenül telepíthető formában is rendelkezésre áll.

A saját fejlesztésű három halmaz-interpolációs eljárás alapvetően két területen alkalmazható. Az egyik feladattípus az RBE-SI fuzzy rendszergenerálási módszer használata esetén az iteratív szabálybázis bővítés során az új nyelvi értékek előállítása. A másik feladattípus a szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetés.

A saját fejlesztésű halmaz-interpolációs és egyszabályos következtetési módszerek felhasználásával kialakított három szabály-interpoláción alapuló fuzzy következtetési eljárás ritka szabálybázison alapuló fuzzy rendszer következtető motorjaként is alkalmazható.

A 3. tézis keretében kidolgozott eljárásgyűjtemény fuzzy szabály-interpolációs módszerek konkrét implementációját tartalmazza. A kifejlesztett keretrendszer, mint segédeszköz számos fuzzy szabály-interpolációs eljárás vizsgálatát és összevetését biztosítja.

Az általam kialakított és üzemeltetett, a fuzzy szabály-interpoláció témakörére összpontosító webhely [S30] célja, hogy széleskörű és folyamatosan frissülő információt nyújtson a fuzzy szabály-interpoláció témaköréhez kapcsolódó módszerekről és gyakorlati alkalmazásokról. Mindemellett számos a témával foglalkozó cikk és szoftver szabad hozzáférését biztosítja. A webhely támogatja az FRI témával kapcsolatos kutatást és az eredmények népszerűsítését. Ugyanakkor segédeszközként is hasznosítható a mesterséges intelligencia oktatás, illetve a témához kapcsolódó TDK, és diplomamunkák, szakdolgozatok készítése során.

7. További kutatási irányok és feladatok

Az értekezés elkészítésével nem tekintem lezártnak a fuzzy szabály-interpoláció témaköréhez kapcsolódó kutatási munkámat. A továbbiakban tervezett kutatási célkitűzéseim az alábbi pontokban foglalhatók össze.

- A keretrendszerben rendelkezésre álló fuzzy következtetési módszerek körének bővítése.
- Az egyes módszerek tulajdonságainak vizsgálata, összevetése.
- A mintaadatok alapján történő automatikus fuzzy rendszergenerálási módszerek finomítása és továbbfejlesztése, különös tekintettel a paraméter-azonosítási algoritmus hatékonyságára.
- Egy webszolgáltatás alapú osztott architektúrán alapuló fuzzy rendszergeneráló megoldás kifejlesztése.
- A gyakorlati alkalmazási lehetőségek bővítése és további alkalmazáspéldák kidolgozása.

8. Az értekezés témakörében megjelent saját tudományos közlemények

- [S1] Johanyák, Zs. Cs.: Fuzzy halmaz-interpoláció legkisebb négyzetek módszerével, *Gép* 2006/10, pp. 51-57.
- [S2] Johanyák, Zs. Cs.: Vague Environment Based Set Interpolation, *A GAMF Közleményei, Kecskemét, XXI. évfolyam (2006-2007)*, pp. 33-44.
- [S3] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: A brief survey and comparison on various interpolation based fuzzy reasoning methods, in *Proceedings of the 6th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence, Budapest, Hungary, 2005*, pp. 323-334.
- [S4] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: A brief survey and comparison on various interpolation based fuzzy reasoning methods, in *Acta Politechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences at Budapest Tech Hungary, Vol. 3(1), 2006*, pp. 91-105.
- [S5] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: A brief survey on fuzzy set interpolation methods, in *Proceedings of "Doktoranduszok Fóruma", Miskolc, Hungary, 2006*, pp. 72-77.
- [S6] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: A fuzzy tagsági függvény megválasztásáról, *A GAMF Közleményei, Kecskemét, XIX. évfolyam (2004)*, pp. 73-84.
- [S7] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Distance based similarity measures of fuzzy sets, in *Proceedings of the 3rd Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence (SAMI 2005), Herl'any, Slovakia, 2005*, pp. 265-276.
- [S8] Johanyák Zs. Cs. and Kovács Sz.: Fuzzy következtetés sűrű és ritka szabálybázisok esetén, *Magyar Tudomány Ünnepe, Bács-Kiskun Megyei Tudományos Fórum, Kecskemét, 2005, ISSN: 1586-846x*, pp. 201-206.
- [S9] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Fuzzy modeling of Petrophysical Properties Prediction Applying RBE-DSS and LESFRI, in *Proceedings of the International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (Lindi 2007), Wildau, Germany, 2007*, pp.87-92.
- [S10] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Fuzzy Rule Interpolation Based on Polar Cuts, in *Computational Intelligence, Theory and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2006*, pp. 499-511.
- [S11] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Fuzzy Rule Interpolation by the Least Squares Method, in *Proceedings of the 7th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence (HUCI 2006), Budapest, Hungary, 2006*, pp. 495-506.
- [S12] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Fuzzy set approximation based on linguistic term shifting, *MicroCad 2006, Section N: Applied Information Engineering, Miskolc, Hungary, 2006*, pp. 123-128.
- [S13] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Fuzzy Set Approximation by Weighted Least Squares regression, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara 2006, Tome IV, Fascicule 1*, pp. 27-34.
- [S14] Johanyák, Zs. Cs., Kovács, Sz.: Fuzzy set approximation using polar co-ordinates and linguistic term shifting, *4rd Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence (SAMI 2006), Herl'any, Slovakia, 2006*, pp. 219-227.

- [S15] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Intepolation-based Fuzzy Reasoning - a comparison, MicroCAD 2005, International Scientific Conference, Section N:Applied Information Engineering, Miskolc, Hungary, 2005, pp. 189-194.
- [S16] Johanyák Zs. Cs. and Kovács Sz.: Következtetés fuzzy szabálmódosítással, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XI., International Scientific Conference, Kolozsvár, 2006, pp. 165-168.
- [S17] Johanyák Zs. Cs. and Kovács Sz.: Polár-vágat alapú fuzzy halmaz-interpoláció, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XI., International Scientific Conference, Kolozsvár, 2006, pp. 169-172.
- [S18] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Similarity measurement in interpolative fuzzy reasoning, in Proceedings of the 6th International Carpathian Control Conference (ICCC 2005), Lillafüred, Hungary, 2005, Vol. I., pp. 317-322.
- [S19] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Single Rule Reasoning Methods in Fuzzy Rule Interpolation, in Proceeding of the „Doktoranduszok Fóruma”, Miskolc, Hungary, 2005, pp. 75-80.
- [S20] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Sparse Fuzzy System Generation by Rule Base Extension, in Proceedings of the 11th IEEE International Conference of Intelligent Engineering Systems (IEEE INES 2007), Budapest, Hungary, 2007, pp. 99-104.
- [S21] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Survey on three single rule reasoning methods, A GAMF Közleményei, Kecskemét, XXI. évfolyam (2006-2007), pp. 75-86.
- [S22] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Survey on various interpolation based fuzzy reasoning methods, in Production Systems and Information Engineering, 2006, Vol. 3, pp. 39-56.
- [S23] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: The effect of different fuzzy partition parameterization strategies in gradient descent parameter identification, in Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (IEEE SACI 2007), Timisoara, Romania, 2007, pp. 141-146.
- [S24] Johanyák, Zs. Cs. and Kovács, Sz.: Vague Environment-based Two-step Fuzzy Rule Interpolation Method, in Proceedings of the 5th Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2007), Poprad, Slovakia, 2007, pp. 189-200.
- [S25] Johanyák Zs. Cs., Kovács Sz.: Fuzzy rendszer generálása szabálybázis bővítéssel, AGTEDU 2007, 2007, ISSN: 1586-846x ,Kecskemét, pp. 241-246.
- [S26] Johanyák Zs. Cs., Kovács Sz., Tikk D. and Wong, K. W.: Fuzzy szabály-interpolációt támogató eljárásgyűjtemény fejlesztése Matlab rendszerben, AGTEDU 2006, Kecskemét, 2006, ISSN: 1586-846x, pp. 177-182.
- [S27] Johanyák, Zs. Cs., Parthiban, R, and Sekaran, G.: Fuzzy Modeling for an Anaerobic Tapered Fluidized Bed Reactor, Scientific Bulletin of “Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on Automatic Control and Computer Science, 2007, Vol. 52(66), pp.67-72.
- [S28] Johanyák, Zs. Cs., Tikk, D., Kovács, Sz. and Wong, K. W: Fuzzy rule interpolation Matlab toolbox – FRI toolbox, in Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'06), 15th Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'06), 2006, Vancouver, BC, Canada, pp. 1427-1433.

- [S29] Tikk, D., Johanyák, Zs. Cs., Kovács, Sz. and Wong, K. W.: Overview of Fuzzy Interpolation Techniques in Multidimensional Spaces, 8th International Conference on Fuzzy Set Theory and Applications (FSTA 2006), Liptovský Ján, Slovak Republic, 2006, pp. 104-105.
- [S30] <http://fri.gamf.hu>, Fuzzy szabály-interpolációval foglalkozó webhely, bibliográfiai és cikkgyűjtemény, az FRI ToolBox közzétételi helye.
- [S31] http://www.johanyak.hu/?q=PhD_Kutatas, Az értekezés témakörében megjelent saját tudományos közlemények és a kutatómunka során fejlesztett szoftverek webhelye.

9. Hivatkozott irodalom

- [H1] Baranyi, P., Kóczy, L. T. and Gedeon, T. D.: A Generalized Concept for Fuzzy Rule Interpolation, in IEEE Transaction on Fuzzy Systems, ISSN 1063-6706, Vol. 12, No. 6, 2004. pp 820-837.
- [H2] Chong, A.: Constructing Sparse and Hierarchical Fuzzy Rulebases, PhD Thesis, Murdoch University, Perth, W.A., 2004.
- [H3] Chong, A., Gedeon, T. D. and Kóczy, L. T.: Projection Based Method for Sparse Fuzzy System Generation, in Proceedings of 2nd WSEAS International Conference on Scientific Computation and Soft Computing, Crete, Greece, 2002, pp. 321-325.
- [H4] Huang, Z. H. and Shen, Q.: Fuzzy interpolation with generalized representative values, in Proceedings of the UK Workshop on Computational Intelligence, 2004, pp. 161-171.
- [H5] Klawonn, F.: Fuzzy Sets and Vague Environments, in Fuzzy Sets and Systems, Vol. 66, 1994, pp. 207-221.
- [H6] Kondorosi K., László Z., Szirmay-Kalos L.: Objektum-orientált szoftverfejlesztés!, ComputerBooks, 2007, Budapest, <http://www.hik.hu/tankonyvtar/site/books/b10110/index.html>
- [H7] Kóczy, L. T. and Botzheim, J.: Fuzzy rule base model identification techniques, in Proceedings of the 3rd International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence, Budapest, 2002, pp. 13-24.
- [H8] Kóczy, L. T. and Hirota, K.: Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation, in International Journal of Approximative Reasoning, Vol. 9, 1993, pp. 197–225.
- [H9] Kóczy, L.T., Hirota, K. and Gedeon, T. D.: Fuzzy rule interpolation by the conservation of relative fuzziness, in Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol. 4/1, 2000, pp. 95-101.
- [H10] Kovács, Sz.: Extending the Fuzzy Rule Interpolation "FIVE" by Fuzzy Observation, Theory and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 485-497.
- [H11] Kovács, Sz. and Kóczy, L. T.: Application of an approximate fuzzy logic controller in an AGV steering system, path tracking and collision avoidance strategy, Fuzzy Set Theory and Applications, in Tatra Mountains Mathematical Publications, Mathematical Institute Slovak Academy of Sciences, Vol. 16, Bratislava, Slovakia, 1999, pp. 456-467.
- [H12] Larsen, P. M.: Industrial application of fuzzy logic control, in International Journal of Man Machine Studies, Vol. 12(4), 1980, pp. 3-10.

- [H13] Mamdani, E. H. and Assilian, S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, in *International Journal of Man Machine Studies*, Vol. 7, 1975, pp. 1-13.
- [H14] Shepard, D.: A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data, *Proc. 23rd ACM Internat. Conf.*, (1968) 517-524.
- [H15] Sugeno, M. and Yasukawa, T.: A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 1, 7-31, 1993.
- [H16] Takagi, T. and Sugeno, M.: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. on SMC*, 15:116-132, 1985.
- [H17] Tikk, D.: Investigation of fuzzy rule interpolation techniques and the universal approximation property of fuzzy controllers, Ph. D. dissertation, TU Budapest, Budapest, 1999.
- [H18] Tikk, D. and Baranyi, P.: Comprehensive analysis of a new fuzzy rule interpolation method, In *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, pp. 281-296, June 2000.
- [H19] Tikk, D., Joó, I., Kóczy, L. T., Várlaki, P., Moser, B. and Gedeon, T. D.: Stability of interpolative fuzzy KH-controllers. *Fuzzy Sets and Systems*, 125(1):105-119, January 2002.
- [H20] Tikk, D., Gedeon, T. D., Kóczy, L. T. and Bíró, G.: Implementation details of problems in Sugeno and Yasukawa's qualitative modeling, Research Working Paper RWP-IT-02-2001, School of Information Technology, Murdoch University, Perth, W.A., pp. 1-17, 2001.
- [H21] Vass, G., Kalmár, L. and Kóczy, L. T.: Extension of the fuzzy rule interpolation method, in *Proc. Int. Conf. Fuzzy Sets Theory Applications (FSTA '92)*, Liptovsky M., Czechoslovakia, 1992, pp. 1-6.
- [H22] Wong, K. W. and Gedeon, T.D.: Petrophysical Properties Prediction Using Self-generating Fuzzy Rules Inference System with Modified Alpha-cut Based Fuzzy Interpolation, *Proceedings of The Seventh International Conference of Neural Information Processing ICONIP 2000*, November 2000, Korea, pp. 1088 - 1092.
- [H23] Wong, K. W., Gedeon, T. D. and Tikk, D.: An improved multidimensional α -cut based fuzzy interpolation technique, In *Proc. Int. Conf. Artificial Intelligence in Science and Technology (AISAT'2000)*, Hobart, Australia, 2000, pp. 29-32.
- [H24] Wong, K. W., Kóczy, L. T., Gedeon, T. D., Chong, A. and Tikk, D.: Improvement of the Cluster Searching Algorithm in Sugeno and Yasukawa's Qualitative Modeling Approach, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2206, pp. 536-549, 2001.
- [H25] Yan, S., Mizumoto, M. and Qiao, W. Z.: An Improvement to Kóczy and Hirota's Interpolative Reasoning in Sparse Fuzzy Rule Bases, in *International Journal of Approximate Reasoning*, 1996, Vol. 15, pp. 185-201.
- [H26] Zadeh, L. A.: *Fuzzy Sets*, *Inf. Contr.*, 8, 1965, pp. 338-353.
- [H27] Zadeh, L. A.: Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. on SMC*, 3:28-44, 1973.