

## **Alkalmazásorientált Fuzzy szabály-interpolációs módszerek (OTKA K77809)**

*Szakmai záró beszámoló*

A kutatási program a munkatervben kitűzött céloknak megfelelően három fuzzy interpolációs modellekkel kapcsolatos tématerülethez, hatékony alkalmazásorientált következtetési módszerek kidolgozásához, fuzzy interpolációs modellek paraméter optimalizálási eljárásokkal való kiegészítéséhez, valamint alkalmazási körök bővítéséhez kötődött.

A fuzzy interpolációs modellek (Fuzzy Rule Interpolation, FRI) „ritka”, csak a lényegi összefüggéseket tartalmazó szabályrendszere hatékony tudásábrázolási forma. A klasszikus fuzzy kompozíció alapú modellek (Zadeh, Mamdani, Takagi-Sugeno) bemeneti dimenziószámmal exponenciálisan növekvő szabályszáma alapvető korlátja lehet a fuzzy modellek több egyébként lehetséges gyakorlati alkalmazáskörének. A hatékonyabb szabályrendszernek köszönhetően csökkenthető a következtetés számítási és tárigényessége, illetve a kisebb keresési tér miatt a paraméter-optimalizálási eljárások is lényegesen felgyorsíthatók.

A célul kitűzött „alkalmazásorientált” FRI következtetési módszerek olyan módszerek kidolgozását jelentik, amelyek akár számítási hatékonyságukkal, akár valamely speciális problématerületre való alkalmazhatóságával bővítik az fuzzy interpolációs modellek közvetlen felhasználási körét.

A gyakorlati alkalmazások népszerűsítése, a szabály alapú FRI modell alkalmazások kialakításának egyszerűsítése érdekében célja volt még a kutatásnak egy olyan bárki számára szabadon hozzáférhető fuzzy interpolációs programkönyvtár (FRI Toolbox) létrehozása, mely egységes keretben támogatja a Matlab és C++ nyelvű alkalmazásfejlesztést (az eddig elkészült támogató oldal az fri.gamf.hu címen érhető el).

### **A támogatott kutatási program során az FRI eljárások fejlesztése kapcsán az alábbi eredmények születtek:**

A kutatási program támogatásával egy új fuzzy szabály-interpolációs módszert (Fuzzy Rule Interpolation based on Subsethood Values, FRISUV) dolgoztunk ki, aminek alap gondolata az, hogy az aktuális megfigyelés és az ismert szabályok közötti hasonlóságot két tényező figyelembevételével határozzuk meg. Ezek a referencia pontok távolsága és az egymásra fektetett halmazalakok hasonlósága. Ez utóbbit a fuzzy részalmaz jelleggel (fuzzy subsethood value) jellemezzük. A fenti módon meghatározott hasonlóság mértékekkel az ismert szabály-konzekvensek helyzetének súlyozott átlagaként határozzuk meg a következmény referencia pontjának helyzetét.

Az implementáció a munkatervben megfogalmazottaknak megfelelően az FRI Toolbox-ba integráltan történt. Egy eljárásrészletet dolgoztunk ki melyben implementáltuk a leggyakrabban alkalmazott tagsági függvény típusokat. Az eljárásgyűjtemény segítségével gyorsan és hatékonyan meghatározhatók az alfa-vágatok végpontjai.

A FRISUV számítások gyorsítása érdekében egy új, vektor-alapú fuzzy rendszer modellezési formát vezettünk be, ami a korábbi struktúra alapú tárolásnál hatékonyabbnak bizonyult. A tesztek során a számítási idő jelentősen, negyedére-tizedére csökkent.

A következtetés gyorsítása érdekében a Fuzzy Rule Interpolation by the Least Squares Method (LESFRI) eljárás vektor-alapú fuzzy rendszer modellezési formát alkalmazó változatát is elkészítettük. A továbbfejlesztett LESFRI-t a hallgatók fuzzy értékelését támogató eljárás részeként publikáltuk két folyóiratcikk és több konferencia cikk formájában.

Az ismert FRI módszerek hatékonyságának növelése érdekében feltártuk a FIVE FRI módszer teljesítményéhes részeit, valamint ezek optimalizálási lehetőségeit. A feltárt lehetőségeket kihasználva, az eredeti implementációhoz képest számottevő teljesítményjavulást sikerült elérni. A teljesítményjavulás egyes esetekben csak minimális funkcionalitás csökkenést eredményezett (nincs lehetőség tetszőleges felbontású alaphalmazok használatára, kizárólag fix felbontású alaphalmazok használhatóak). Az elért eredményeket a kutatási program támogatásával a „Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (JACIII)” folyóiratban publikáltuk.



szabályrendszert keressük. A legjobb illeszkedést adó paraméterek megkeresésére szolgáló optimalizálási algoritmusok közül a cross-entropy (CE) alapú optimalizálási módszert választottuk ki részletes elemzésre. A módszer alkalmazásának egyik előfeltétele, hogy megalkossunk egy analitikus modellt a keresett mennyiségre, majd a modell paramétereinek fokozatos hangolásával meghatározzuk az optimális elhelyezkedést. A kísérletek a módszer gyors konvergenciáját tanúsítják.

A fuzzy halmazok közötti távolság illetve hasonlóság fontos szerephez jut többek között a fogalmak reprezentálásban is. Az éles fogalomhatár helyett alkalmazott fuzzy fogalomhatár jelentősen növeli a fogalomértelmezés pontosságát. A fogalmak együttesének leírására szolgáló mechanizmusok egyik fontos képviselője a fogalomháló eszköze. A kidolgozott javaslatban megadjuk a klasszikus fogalomháló (FCA) kiterjesztését többszintű fogalomhálókra, melynek segítségével a fogalomreprezentációs szintjében is megjelenhet az eltérő absztrakciós szint. A háló kialakításában fontos szerepet kap az elemek közötti távolságfüggvény is.

Az elvégzett vizsgálatok egyik további területe az összetett szabályrendszerek vizsgálatának elemzésére irányult. Ennek keretében a Context-Free Grammar (CFG) nyelvtanok szabályrendszerének generálási módszereit vizsgáltuk meg részletesebben.

Eredményeinket egy folyóirat cikk és több konferencia cikk formájában tettük közzé.

#### *A kutatási program hosszabbítása idején elért eredmények:*

További eredményeket értünk el az általános metrikus terekben értelmezett fuzzy halmazok interpolációjával kapcsolatban. A gyakorlati feladatok egy speciális osztályában (komplex objektumok esetén), nem alkalmazható ugyanis a klasszikus vektor modell reprezentáció. Ezen esetekben a domain halmaz elemei között csak egy metrika határozható meg. A klasszikus interpolációs módszerek csak megfelelő adaptáció után alkalmazhatóak. A projekt keretében kidolgozásra került a metrikus tér alapú domain elemek mátrix alapú reprezentációs módszere. Ezen struktúrához egy dinamikus közelítési új módszer került kidolgozásra a számítások gyorsítását eredményező vágási feladatok elvégzésre. A fuzzy halmazok közötti interpoláció algoritmusánál kidolgozásra került egy új entrópia alapú távolság értelmezés, melyre építve generálható az eredő fuzzy halmaz. A javasolt metrika a fuzziság egy újszerű értelmezésének tekinthető. A javasolt interpolációs eljárás elsődlegesen a bizonyosságra, fuzziságra épülő feladatoknál játszik szerepet. A vizsgálatok során meghatározásra kerültek a metrikus tér interpolációs tulajdonságainak korlátai, illetve kidolgozásra került egy távolság-optimum elvű interpolációs módszer is. A kifejlesztett fuzzy interpolációs módszerek és entrópia alapú távolság értelmezések egyik potenciális alkalmazási területe a természetes nyelvi interfész környezete. Ezen területen a fogalmak, mint objektumok egy általános metrikus térben jeleníthetők meg. A fogalmak halmazán értelmezett osztályozási feladat megoldására egy NNS alapú, az objektumok távolság mátrixán vett optimalizálására épülő eljárás került kidolgozásra. A létrejött módszer előnye, hogy lehetővé teszi fogalmak közelítésen alapuló aggregálását, mint például az átlagképzés. Az általános metrikus terekben nem volt lehetőség korábban ilyen típusú aggregáció értelmezésére. Az alkalmazási mintarendszerek kidolgozásánál a másik fő irány az automatikus kérdésgenerálási rendszerekben alkalmazott fogalom szelekció témaköre volt. Kidolgozásra került a multiválasztós kérdések esetére egy fogalom szelekciós módszer, amely az említett entrópia alapú távolságot használja fel. A kidolgozott távolság alkalmas a fogalmak közötti azonossági/különbözőségi kérdések eldönthetőségének a nehézségét mérni. A javasolt módszer lehetővé teszi a könnyűnek és nehéznek tartott jelöltek csoportba rendezését.

A témához kapcsolódó eredményeinket két folyóirat cikk és egy konferencia cikk formájában tettük közzé.

#### **A támogatott kutatási program során az FRI modell alkalmazások fejlesztése kapcsán az alábbi eredmények születtek:**

Jelentősen bővítettük az FRI Toolbox programkönyvtárat és a hozzá kapcsolódó támogatói oldalt ([fri.gamf.hu](http://fri.gamf.hu)).

Az FRI ToolBox megvalósításának egyik kulcskérdése a fuzzy modell tárolásának megtervezése. Első változatként a Matlab Fuzzy Logic ToolBox (FLTB) által alkalmazott formát adaptáltuk kiegészítve azt egy újabb jellemzővel, ami lehetővé tette a tagsági értékek megadását a halmazalak töréspontjaiban, aminek különösen szubnormális halmazok és nem trapéz sokszög alakú halmazok esetében van jelentősége. A memóriabeli ábrázolásként az FLTB egymásba ágyazott struktúrákon alapuló megközelítést használtuk fel, míg a háttértárolóra történő mentésnél két lehetőséget, egy egyszerű szöveges állományt és egy XML alapú megoldást dolgoztunk ki. Bár ez a megoldás lehetővé tette a felülről kompatibilitást az eredeti FLTB megoldásával, és jól átlátható egyszerű programozást biztosított, de az elkészült implementációk lassúságát eredményezte. Ezt felismerve kidolgoztunk egy vektor alapú megközelítést, ami körülbelül négyszeres gyorsulást eredményezett a számításokban.

Az FRI ToolBox-ban eddig a következő ismert FRI eljárásokat implementáltuk: KH módszer, MACI, IMUL, GM, LESFRI, FIVE, FRIPOC, VEIN, FRISUV.

Az FRI ToolBox-ba integrált fuzzy szabály-interpolációs eljárások be-kimeneti mintákból felépülő Fuzzy modellezésre alkalmazása érdekében két modell-paraméterbecslő módszert dolgoztunk ki. Mindkét módszer fuzzy klaszterezéssel kialakított kezdeti szabálybázisból indul ki. Az egyik egy klasszikus hegymászó megközelítésű algoritmus, a második a cross-entropy módszert alkalmazza. Mindkét eljárást implementáltuk, és számos adatsoron teszteltük. Jelenlegi változatukban a hegymászó algoritmus minden vizsgált mintapélda esetén jobb teljesítményt eredményezett.

A fuzzy szabály-interpolációs eljárások gyakorlati alkalmazhatóságának elősegítése érdekében SFMI (Sparse Fuzzy Model Identification) Toolbox néven egy Matlab eljárásgyűjteményt dolgoztunk ki, amely képes mintaadatok alapján automatikusan fuzzy rendszert előállítani az FRI Toolboxban implementált szabály-interpolációs következtetési eljárásokhoz.

Fejlesztettük és teszteltük az FRI toolbox egyes elemeit. Az SFMI toolboxhoz klónszelektív eljáráson alapuló modult dolgoztunk ki. Különböző paraméter optimalizálási eljárásokat vizsgáltunk meg, hasonlítottunk össze és teszteltünk.

Az FRI ToolBox-ba integrált fuzzy szabály-interpolációs eljárások gyakorlati alkalmazhatóságának igazolására fuzzy modellt állítottunk fel a talajszintű ózonkoncentráció előrejelzése érdekében. Ez nagyobb pontosságú előrejelzést tett lehetővé, mint a korábban készített modellek. A modellt portugál kollégáktól kapott mérési eredmények alapján állítottuk fel, és az eredményeket az általuk korábban több különböző módszerrel készített modellekkel elért eredményekhez hasonlítottuk.

Számítógépes hálózati útválasztó algoritmusokat vizsgáltunk és elemeztünk, különös tekintettel a fuzzy következtetés alapú döntéshozatalra. Ez egy előkészítő munka volt annak érdekében, hogy ezen a területen is bizonyítsuk az FRI módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát.

Ígéretesnek mutatkoznak az FRI alapú fuzzy automata modellek verbális, etológiai indíttatású viselkedésmoделlek leírására. Az ELTE Etológia Tanszék, BME Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék (MOGI) és a SZTAKI Kognitív Informatikai Kutatócsoport (jelenleg 3DICC) együttműködéséhez kapcsolódva elkészítettük egy FRI fuzzy automata alapú ember-kutya kötődés modell kezdeti változatát. (A kutatócsoportunk által készített kötődés modell működteti a több népszerű publikációban is szereplő MOGI-ROBI robotot.)

*A kutatási program hosszabbítása idején elért eredmények:*

Megkezdttük az FRI Toolbox keretrendszer és eljárások C nyelvű portálását, hogy az bármely népszerű (C, C++, Java, C#) programkódból egyszerűen, minimális programozói tudás birtokában is használható legyen. Eddig a keretrendszer alapjai és a KH, VKK, MACI és FEAT-P FRI

módszerek portálása készült el. Továbbá elkészült a FIVE módszer Python nyelvre portolt változata is.

Az FRI módszerek gyakorlati alkalmazhatóságának igazolására olyan fuzzy modellt dolgoztunk ki amely kompozitok szakítószilárdságát modellezte az alkotóanyagok százalékos arányából kiindulva. A modell kialakításának alapjául a Kecskeméti Főiskola GAMF Karán a Műanyagtechnológiai szakcsoportnál végzett kísérletek eredményei szolgáltak.

Eljárást dolgoztunk ki hallgatók értékelésére fuzzy szabály-interpoláción alapuló következtetéssel. Példaként FRI modellt alkalmaztunk a hálózati adminisztráció című tantárgy teljesítési arányának előrejelzésére.

Folytattuk az etológiai indíttatású viselkedés modell (kutya-ember kötődés modell) FRI alapú fuzzy automatákkal való leírásának pontosítását. Többek között bevezetésre került a korábban már említett FIVE módszer optimalizált változata, jelentős gyorsulást eredményezve a modell prototípus implementációjában. (Ez a kötődés modell több interfészhez is kapcsolható, mint pl. VirCA 3D rendszerhez, MOGI-ROBI robot hardverhez (lásd publikációk)). Az elért eredményeinket egy folyóirat cikk és több konferencia cikk formájában tettük közzé.

A konkrét etológia mérések elvégzésének érdekében az ELTE Etológia Tanszék, BME Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, valamint a tokiói Chuo Egyetemmel együttműködve elkezdtuk az etológiai indíttatású FRI automata viselkedésmoდეllek valós robotrendszerekre való adaptálását. Ennek eredményeként születtek robot technológiával, illetve RT Middleware-el (Robot Technology Middleware) kapcsolatos publikációink.

### **A kutatási programmal kapcsolatos változások:**

#### *Személyi változások:*

Répási Tibor és Berecz Antónia Klára PhD hallgatók felfüggesztették PhD tanulmányaikat ezért az OTKA kutatást sem folytatták. Feladataikat a munkaterv megváltoztatása nélkül a projektben továbbra is kutató PhD hallgatók vették át.

#### *Munkatervvel kapcsolatos változások:*

Az eredetileg három évre tervezett kutatás során a fuzzy szabályinterpolációs módszerek újabb ígéretes alkalmazási irányai merültek fel (etológiai modellezés, dupla fuzzy pontos szabály ábrázolás, természetes nyelvfeldolgozás), ezért a kutatási programot a Műszaki- és Természettudományi Kollégium hozzájárulásával egy évvel, majd egy jelentős konferencián való részvétel lehetősége (FUZZ-IEEE 2013) indokával az OTKA Bizottság előzetes engedélyével még egy fél évvel meghosszabbítottuk. A hosszabbítás nem jelentett újabb költségeket, a szükséges anyagi forrásokat a fel nem használt napidíj konferencia költségekre való átcsoportosításával fedeztük.

A kutatás során tartottuk az eredeti munkatervet, a hosszabbítás során a munkatervben foglalt tématerületeken az eredetileg tervezettek kiegészítéseként újabb eredményeket értünk el.

#### *Pénzügyi változások:*

A Műszaki- és Természettudományi Kollégium hozzájárulásával a nemzetközi konferencia költségekre szánt összeg egy részét folyóirat megjelenés költségekre, illetve hazai szervezésű jelentős nemzetközi konferenciákon való részvétel költségeire, a napidíjra szánt összeget pedig a nemzetközi konferencia költségekre csoportosítottuk át.