

## Számítási intelligencia algoritmusok, rendszerek és modellek (összefoglaló zárójelentés)

Vezető kutató: Dr. Kóczy T. László

A projekt keretében folyó kutatás a fuzzy rendszerek, illetve ezek segítségével megvalósítható modellek, valamint a különböző tanulási-optimalizálási technikák (evolúciós, neurális és klasszikus módszerek, valamint ezek kombinációi) együttes vizsgálatai köré rendeződött. A kutatás gerincét a különböző fuzzy szabályalapú modellek mért vagy megfigyelt adatok alapján történő adaptív automatikus konstrukciója jelentette. Az 1980-as végétől foglalkozunk szabályalapú fuzzy modellekkel és meghatározó szerepet játszottunk a jelenleg legkorszerűbbnek számító modelltypusok (interpolatív, illetve hierarchikus interpolatív) megalkotásában, az ezek segítségével történő irányítási és következtetési algoritmusainak definíciójában, illetve ezen algoritmusok tulajdonságainak vizsgálatában. A jelen projektet megelőző OTKA projekt keretében javaslatot tettünk egy olyan kombinált evolúciós és gradiens alapú optimalizációs eljárásra, amely a sűrű „lapos” fuzzy szabályalapú modellek generálásában a korábbiakban publikált minden eljárásnál jobb eredményeket mutatott fel a más szerzők által használt egyes referenciaproblémák megoldása esetében. Ebben a projektben a fenti bevezetőben összefoglalt korábbi kutatási eredményekre közvetlenül építve, a felhasznált fuzzy modellek körét kiszélesítve, az eddigieknél is hatékonyabb és szélesebb körben alkalmazható modellkonstrukciós algoritmusokat kívántunk kifejleszteni.

A projekt keretében a korábban kialakított bakteriális memetikus alapalgoritmus továbbfejlesztésével és finomításával olyan új algoritmus-változatokat alakítottunk ki, amelyek a trapézalakú tagsági függvényekből felépített, gyakorlatban használatos fuzzy szabályalapú modellek eddigieknél jobb (gyorsabb és pontosabb) generálását teszik lehetővé. Az összehasonlítást a referenciaproblémák eddiginél szélesebb körén végeztük el. A fuzzy modellkonstrukciót kiterjesztettük az interpolatív lapos, sűrű hierarchikus és interpolatív hierarchikus fuzzy modellek körére is. E négy modellosztály elvileg tetszőleges folytonos probléma modellezésére, illetve, matematikailag ekvivalens módszerrel, többváltozós nemlineáris függvény-optimalizációra alkalmas. Az egyes modellek gyakorlati használhatóságának korlátját azok számítási bonyolultsága jelenti, ezért összpontosítottunk a kutatás későbbi szakaszában a komplexitásredukciót lehetővé tevő ritka és többszintes modellek konstrukciójára.

A folytonos modellek és optimalizáció mellett vizsgálatainkat kiterjesztettük a diszkrét optimalizációs feladatok egy meglehetősen széles körére is. Mind a folytonos, mind a diszkrét feladatoknál jellemző, az elméleti számítástudományi értelemben vett kezelhetetlenség (intraktabilitás), mely e problémák exponenciális bonyolultságára és NP-kemény voltára vezethető vissza. A kutatás során kifejlesztett algoritmusok a gyakorlati alkalmazás szempontjából elfogadhatóan „jó” (azaz, különböző hibakritériumok alapján kellően kis hibájú vagy magas fitness értékű) ugyanakkor elfogadhatóan rövid idő alatt kiszámolható szuboptimális közelítő megoldást adnak. Ezek a megoldások a későbbiekben felsorolt műszaki és alkalmazott problémák megoldásában az alkalmazási oldalról tekintve megfelelő eredményeket szolgáltatnak. A modellkonstrukció és optimalizáció megvalósítására célunk az evolúciós, evolúciós

memetikus és ezekkel rokon algoritmusok alkalmazása volt, különböző (klasszikus Mamdani, KH-interpolációs, hierachikus, illetve hierachikus-interpolatív) fuzzy szabálybázisos modellek identifikációjára. A kutatás a különböző algoritmusok approximációs tulajdonságainak, ezen belül elsősorban a konvergencia sebességének, illetve a globális és lokális optimum megtalálásának vizsgálatára összpontosított, melynek során a korábbi években már ismételt alkalmazott, a nemzetközi szakirodalomból jól ismert referenciaproblémák (pH titrálási adatok, hat-változós transzcendens függvény, ICT) segítségével hasonlítottuk össze az egyes eljárásokat. Az evolúciós technikák körében kiterjedt vizsgálatokat folytattunk a genetikus, a bakteriális és az ezekkel távolabbi rokon részecske-raj (particle swarm) és részben a hangyakolónia algoritmusokkal kapcsolatban; ezen módszereket opcionálisan kombinálva a Levenberg-Marquardt és a Steepest Descent klasszikus gradiens alapú optimalizálási eljárásokkal, ilyen módon memetikus algoritmusokat kialakítva. A felsorolt három evolúciós alapalgoritmus mindegyikével mindkét említett gradiens-típusú lokális kereső eljárást kombináltuk, illetve az eddigi paraméterszabályozási célok mellett a változó populációméretű algoritmusok bevezetésével struktúra-optimalizációs eljárásokat is létrehoztunk. Az előbbieket, kifejezetten struktúra-optimalizációs céllal, a genetikus programozás ötletének kiterjesztésével bakteriális programozási és részecske-raj programozási algoritmusokra is javaslatot tettünk. A diszkrét feladatoknál az említett gradiens típusú lokális keresés helyett korlátos méretű részproblémák kimerítő keresésű lokális vizsgálatát alkalmaztuk a diszkrét memetikus eljárások belső ciklusaként.

Jelentős mennyiségű szoftverimplementációs munkát végezve létrehoztunk egy olyan programgyűjtést, amelyik a fentiekben felsorolt összes algoritmus azonos referenciaproblémákon történő vizsgálatára, a konvergenciasebesség és –pontosság összehasonlítására, a különböző referenciaproblémák esetén mutatkozó különböző viselkedéstípusok jellemzésére egyaránt alkalmas. Széleskörű vizsgálatokat folytattunk a különböző szakirodalmi munkákban, illetve a nyilvánosan elérhető adattárakban megtalálható különböző bonyolultságú folytonos és diszkrét referenciadategyűttesek (pl. Taillard-adathalmazok), -problémák és –függvények az egyes eljárásokkal történő megoldásainak, illetve optimalizációjának elemzésére. A különböző referenciaproblémákon történő futtatások során megállapítottuk, hogy a problémák jelentős részénél, különösen a magasabb dimenziószámú és összetettebb feladatoknál az általunk javasolt új optimalizációs algoritmusok a korábban publikáltaknál kedvezőbb tulajdonságokat mutattak. Mindazonáltal az is megállapítható volt, hogy a modellkonstrukció, illetve az optimalizáció kezdeti szakaszában az egyes algoritmusok viselkedése jelentősen eltérhet a későbbi szakaszokétól. Miközben a bakteriális és részecske-raj algoritmusok minden esetben lényegesen jobb konvergenciatulajdonságokat mutattak a genetikus megfelelőikhez képest (a legjobb teljesítményt csaknem minden esetben a bakteriális algoritmusok nyújtották), a „tanulás” kezdeti szakaszában általában a tiszta evolúciós módszerek gyorsabb konvergenciát adtak, mint az általunk bevezetett memetikus hibrid eljárások. Ez utóbbiak a későbbi szakaszban azonban vagy abszolút értelemben is megelőzték az előbbieket, vagy a korlátozott futásidő miatt, nem előzték ugyan meg, de a becslés alapján később várható volt a jobb eredmény. (A memetikus eljárások ugyanis a későbbi szakaszban nagyobb meredekséggel konvergáltak.) Ezek a vizsgálatok vezettek el egy teljesen újfajta optimalizációs eljárás család bevezetéséhez, a többféle algoritmus váltakozó (kapcsolt) sorozatával megvalósított, minden korábbinál jobb tulajdonságú algoritmuscsaládhoz. A tipikus kapcsolt ütemezett algoritmus tiszta evolúciós eljárással kezd, majd memetikus változattal folytat.

(Elvileg többszöri kapcsolás is lehetséges.) Az ütemezés technikájára a hagyományos optimalizációból ismert mohó (greedy) algoritmust alkalmaztuk, annak igen kedvező viselkedése miatt (melyet a diszkrét optimalizációs vizsgálatok során más kontextusban már megvizsgáltunk). Javaslatot tettünk azonban ennek lényegesen gyorsított változatára (fast greedy), melynek segítségével a többfajta „versenyző” algoritmus összehasonlításából adódó overhead idővesztést is sikerült kompenzálni, minden esetben az ismert legjobb homogén (nem ütemezett) eljárásnál is szignifikánsan jobb eredményeket felmutatva.

A diszkrét optimalizációs feladatoknál közismerten igen jó hatékonyságúak a klasszikus, nem evolúciós jellegű heurisztikák. Ezek között kiemelkedik az iteratív mohó algoritmus. Vizsgálataink során megállapítottuk, hogy ehhez képest a legjobb evolúciós, illetve evolúciós memetikus algoritmusaink sem mutatnak fel lényegesen jobb optimalizációs teljesítményt. A konvergenciatulajdonságok további javítása érdekében ezért többszörös hibrid (iteratív mohó és bakteriális memetikus, illetve kapcsolt bakteriális típusú, vagy részecskealapú), valamint multipopulációs típusú újfajta algoritmusokra tettünk javaslatot. E hibrid algoritmusok között a referenciadatbázisok alapján olyan vegyes optimalizációs eljárásokat sikerült azonosítani, amelyek mind az evolúciós, mind az iteratív mohó módszert túlszárnyaló kedvező konvergenciatulajdonságokat mutattak fel.

A fenti eredményeinket összefoglalva: új kedvező tulajdonságú evolúciós memetikus eljárásokra tettünk javaslatokat, ezek felhasználásával kapcsolt (váltakozva ütemezett) vegyes evolúciós típusú algoritmusokat fejlesztettünk ki, melyek minden eddiginél jobb teljesítményűek. Diszkrét optimalizációs feladatokra új evolúciós memetikus eljárásokat javasoltunk (diszkrét lokális kereséssel); javaslatot tettünk továbbá teljesen újszerű hibrid (mohó és evolúciós) többszörös és multipopulációs optimalizációs módszerekre.

A kifejlesztett nagyszámú algoritmust különböző műszaki problémák megoldása kapcsán alkalmaztuk sikeresen. Ezek között említést érdemel a távközlő hálózatok hibakeresése valós peremfeltételek mellett, különféle erőforrás allokációs feladatok (karbantartó központok kapacitás optimalizálása, humán személyzet hozzárendelési problémája – CSP, útvonaloptimalizálás – TSP, permutációs munkafolyamat optimalizálás, neurális hálózatok paraméter-optimalizálása, stb.).

A hagyományosnak tekinthető egyszerű fuzzy tagsági függvényeket alkalmazó szabályalapú modellek mellett a projekt keretében kiterjedt vizsgálatokat folytattunk a már korábban általunk definiált újszerű strukturált hierarchikus fuzzy szignatúrák tulajdonságai és a modellezésben betöltött lehetséges szerepük tekintetében. E vizsgálatok elsődlegesen intelligens ágensek, kiemelten az intelligens mobil robotok egymás közötti nem explicit kommunikációja, e robotok autonóm környezetmodellezése, valamint a robotok együttműködésének adaptív tervezése és stratégiája területén történő alkalmazási lehetőségeire összpontosultak. A fuzzy szignatúrák egyes matematikai alapkérdéseinek tisztázása mellett javaslatot tettünk e szignatúrák térbeli geometriai struktúrával kiegészített kiterjesztésére, az ezekkel kapcsolatos műveletek definícióira, valamint ezen új eszköz alkalmazására szituációs térképek statikus és dinamikus leírásában. A robotok kommunikációja és együttműködése mellett ez a technika alkalmazható képi információk feldolgozására (például karakterfelismerésre) vagy térbeli elrendezések, illetve mozgások modellezésére. Az eredeti, nem geometrikus szignatúrák inverz fuzzy operációkkal történő kiegészítése segítségével olyan leíró modelleket hoztunk létre, melyek

komplex objektumpopulációk strukturált leírására alkalmasak (beleértve a hiányos és részben eltérő struktúrájú információk kezelését is), valamint lehetőséget adnak az ezekkel kapcsolatos döntéstámogatásra. E módszert sikeresen alkalmaztuk építmények statikai állapotának, illetve építészeti értékének felmérésére, rangsorolására.

A projekt lényeges elemét alkotta a fuzzy operátorokon alapuló újfajta neurális hálózatokkal kapcsolatos kutatás. Ennek keretében javaslatot tettünk különböző fuzzy műveletekből levezetett elemi tárolók visszacsatolásával létrehozott cellákból felépíthető újfajta neurális hálózatokra, ezek között teljesen új, az irodalomban nem ismert műveleteket is definiálva, és a referenciaproblémákon történő szimulációs futtatások során megállapítottuk, hogy az általunk javasolt újfajta neurális hálózatok elfogadható konvergenciasebesség mellett igen kedvező szűrési tulajdonsággal is bírnak, melynek eredményeképpen a hibás vagy zajos mérésből, megfigyelésből adódó úgynevezett „outlier” adatok hatása, az úgynevezett túlilleszkedés (overfitting) nagymértékben kiküszöbölhető. Az új fuzzy neurális hálózatok paraméter- és részben struktúraoptimalizációjára (rétegszám) a fentiekben részletezett evolúciós memetikus eljárásokat alkalmaztuk sikeresen. Kezdeti lépéseket tettünk a fuzzy neurális hálózatok hardver implementációjára, a létrehozott hardvert működési tulajdonságai szempontjából vizsgálva. A réteges szerkezetű fuzzy neurális hálózatok mellett vizsgálni kezdtük a klikkszerű gráffal modellezhető, az irodalomból már ismert fuzzy kognitív térkép (FCM) alkalmazásának lehetőségét soktényezős műszaki-gazdasági rendszerek stabil állapotának meghatározására. A paraméteroptimalizációban itt is alkalmaztunk evolúciós memetikus eljárást. E módszert a fenntartható hulladékgazdálkodás alapmodellezésére alkalmaztuk eredményesen.

A projekthez kapcsolódóan három sikeres PhD védés (Lovassy Rita, Gál László, Bukovics Ádám), egy pozitív eredményű munkahelyi vitát követő PhD értekezés benyújtása (Balázs Krisztián) és egy további doktorjelölti státusz (Ballagi Áron, benyújtás 2013-ban). További négy PhD hallgató tézisértékű eredményei kapcsolódnak a projekthez.

A kutatás részben nemzetközi együttműködés keretében is folyt, a társszerzők között ausztrál, portugál, román, namíbiai és dél-afrikai, valamint mexikói kollegák is szerepelnek.

Egyik kutatási eredményünk (hierarchikus interpolatív fuzzy szabálybázisos modellek konstrukciója bakteriális jellegű algoritmusokkal) az IEEE „legjobb tanulmány díját” nyerte el.

Budapest, 2013. július