

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



MISKOLCI
EGYETEM

**Fuzzy szabály-interpolációs következtetési és
tudásreprezentációs formák beágyazott
rendszerekben**

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Doktori iskola vezetője:

Prof. Dr. Szigeti Jenő DSc.

Tézisfüzet

Témavezető: Dr. habil. Vásárhelyi József

Név: Bartók Roland

Neptun: AQCCRH

2023

Tartalomjegyzék

1. A TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉS.....	1
2. ELŐZMÉNYEK, A FIVE MÓDSZER	3
3. UFRI KÖNYVTÁR.....	5
3.1. CÉLKITŰZÉS.....	5
3.2. A KÖNYVTÁR ELEMEI	5
3.3. ÚJ EREDMÉNYEK	7
3.4. GYAKORLATI FELHASZNÁLÁS.....	7
3.5. ÖSSZEGZÉS.....	7
4. A FIVE MÓDSZER PÁRHUZAMOS SZÁMÍTÁSI SEBESSÉGÉNEK GYORSÍTÁSA	8
4.1. CÉLKITŰZÉS.....	8
4.2. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	9
4.3. ÚJ EREDMÉNYEK	10
4.4. GYAKORLATI FELHASZNÁLÁS.....	10
4.5. ÖSSZEGZÉS.....	10
5. A FIVE MÓDSZER HARDVERES IMPLEMENTÁLÁSA.....	11
5.1. CÉLKITŰZÉS.....	11
5.2. SZÁMÍTÁSI ADATFOLYAM	12
5.3. ÚJ EREDMÉNYEK.....	13
5.4. GYAKORLATI ALKALMAZÁS	14
5.5. ÖSSZEGZÉS.....	14
6. A FIVE MÓDSZER, MINT OSZTÁLYOZÓ ELJÁRÁS ALKALMAZÁSA	15
6.1. CÉLKITŰZÉS.....	15
6.2. EREDMÉNYEK.....	16
6.3. ÚJ EREDMÉNYEK.....	16
6.4. GYAKORLATI ALKALMAZÁS	17
6.5. ÖSSZEGZÉS.....	17
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI.....	18
8. ÖSSZEFOGLALÁS	20
9. IRODALOMJEGYZÉK.....	23
10. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	28

1. A téma ismertetése, célkitűzés

Az autonóm robotok egyik fő problémája a változó környezethez való alkalmazkodás. Az ipari együttműködő robotok, kobotok (collaborative robot, cobot) [1] állandó környezetben dolgoznak, meghatározott feladatot ellátva. A társrobotok viszont változó környezetben működnek, ahol számukra ismeretlen helyzet is kialakulhat. A különféle helyzetekhez való alkalmazkodást segíti a viselkedés alapú irányítás etológiai modellek alapján. [2] és [3]

Az etológiai modellek élőlények viselkedésének megfigyelése alapján készültek. Például kutya viselkedése alapján [8]. A modellek alapján elkészített viselkedések bizonyos helyzetekben mind érvényesek, de különböző mértékben. A viselkedések leírását az FBDL (Fuzzy Behavior Description Language) segíti, amely segítségével, szabályokkal adható meg az adott viselkedés minta. Az FBDL-ben leírt viselkedést a FIVE (Fuzzy Interpolation in Vague Environment) módszer segítségével számítható [28] és [32]. A fuzzy jelleget kihasználva a fuzzy állapotgép a meglévő viselkedések kiszámításával és azoknak a környezetnek megfelelő egyesítésével hozza létre a robot pillanatnyi mozgását, akcióját.

A disszertáció célja a viselkedések leírására alkalmazott FIVE módszer vizsgálata többek között mobil robotok irányításában alkalmazható beágyazott rendszereken. A vizsgálat célja főként a számítási hatékonyság javítását segítő adatok gyűjtése. Ennek érdekében elkészítettem a μ FRI C nyelvű könyvtárat, amely a FIVE módszer megvalósítása főként beágyazott rendszerekre. Megvizsgáltam a μ FRI könyvtár párhuzamosíthatóságát a jelenleg elérhető és népszerű többprocesszoros „rendszer a chip”-en megoldásokon (SoC – System on Chip), a sok szabálybázist tartalmazó leírások optimális rendszerkihasználása szempontjából. Megvizsgáltam, hogy az adott többprocesszoros környezetben hogyan érdemes szétosztani a szabálybázisokat úgy, hogy az a lehető legnagyobb számítási sebességnövekedéssel járjon. Továbbá a dolgozat módszert mutat a gyors végrehajtást igénylő alkalmazások esetén a FIVE módszer áramkörü

megvalósíthatóságára FPGA-n (Field Programmable Gate Array). A kutatás tartalmazza a FIVE módszerhez tartozó számítások megvalósítását és mintát a tudásbázis tárolására szolgáló adatbázisra. Végül megoldást javasolok annak kapcsán, hogy a FIVE módszer nem csak a viselkedések leírására alkalmas, hanem szenzoradatok elemzésével a robotot körülvevő akadályok érzékelésére is felhasználható osztályozó eljárásként. Az eredmények összevetésre kerülnek az ismert feltételes valószínűséget és nagy mennyiségű tanító mintát alkalmazó Naiv-Bayes osztályozóval.

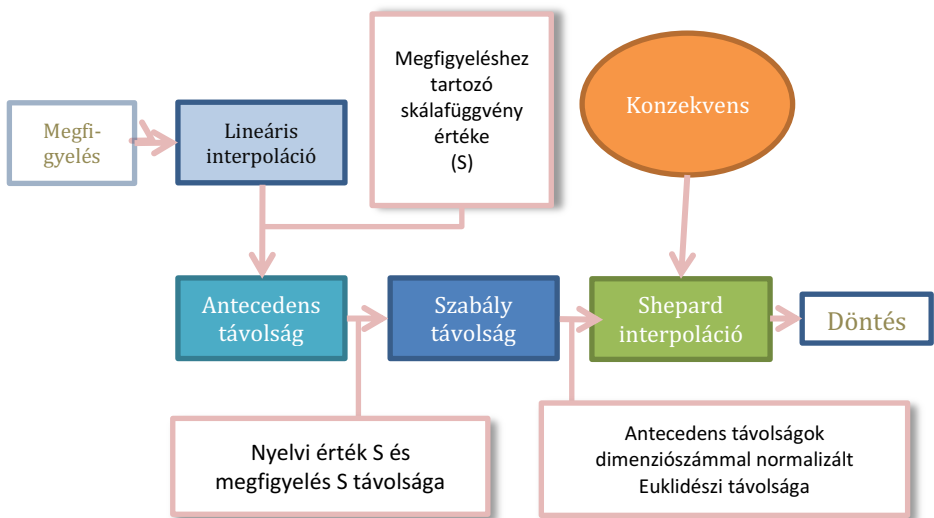
2. Előzmények, a FIVE módszer

Az autonóm robot többféle érzékelőből származó információ és a saját belső állapota alapján hozza meg a döntéseit, alakítja a viselkedését. Ezek a bemeneti adatok alkotják a fuzzy szabályok megfigyeléseit, antecedenseit. A fuzzy szabályok kimenetei pedig a konzekvensek. Egy fuzzy szabály felírható egy „HA ... AKKOR ...” formájú implikáció formájában. Az azonos kimenetet befolyásoló fuzzy szabályok összessége a fuzzy szabálybázis. [23], [28], [32] és [36]

A fuzzy esetén a rendszer stabilitása érdekében a szabályokat úgy kell kialakítani, hogy minden lehetséges bemeneti kombinációhoz tartozzon egy szabály, a szabályok teljesen fedjék le az állapotteret. Ez a megoldandó feladat méretének növekedésével akár exponenciálisan növekvő szabálysámszámot is okozhat, amely a számítási igény növekedését is fokozza. A nagyszámú szabály további problémát is jelent, mégpedig a megoldandó feladat részleges ismeretét. Vagyis a szabályokat alkotó szakértő nem biztos, hogy minden lehetőséget képes lefedni a probléma matematikai bonyolultsága vagy információhiány miatt. Emiatt alakul ki a teljesen fedő szabályrendszer helyett egy ritka szabálybázis. Ritka szabálybázis esetén van olyan megfigyelés, amelyhez nem tartozik szabály, ilyenkor bizonytalan a rendszer kimenete. [23], [28], [32] és [36]

A ritka szabályrendszer gyakoribb, mint a teljes, fedő szabályrendszer. A fuzzy interpolációs módszerek jelentenek megoldást a ritka szabályrendszerek problémájára. Az interpolációs módszerek lényege, hogy a hiányzó szabályokhoz tartozó döntést a meglévő szabályok alapján számítják ki. Ennek köszönhetően a szakértőnek elég a legfontosabb szabályokat megadni a rendszer működéséhez. Ezzel csökkenthető a szabályok száma, a szabályrendszer bonyolultsága és interpolációs módszertől függően a számítási igény is. [23], [28], [32] és [36]

A FIVE módszer a szabályokat egy homályos térbe helyezi, ahol értelmezhető a szabályok közötti *Euklidészi távolság*. A szabályok távolság alapján megkülönböztethetők egymástól: a nagyobb szabálytávolság nagyobb különbözőséget jelent két szabály között, míg a kisebb távolságra elhelyezkedő szabályok egymáshoz hasonlóbbak. A szabálytávolsággal súlyozott konzekvenseket felhasználva a *Shepard-interpoláció* inverz távolságokkal számítva hozza létre a szabálybázis döntését. A FIVE módszer számítási lépéseit az 1. ábra mutatja. A *Megfigyelés* a környezetből vagy belső állapotból származó információ. A *Lineáris interpoláció* segítségével rendeli hozzá a megfigyeléshez azt az értéket, amely megadja, hogy az adott fuzzy halmaznak milyen mértékben tagja a megfigyelés értéke, melynek jele: μ . A szabályhoz tartozó antecedens és a *Megfigyelés* μ értékének a különbsége adja meg az *Antecedens távolságot*. Az *Szabály távolság* az *Antecedens távolságok Euklidészi távolsága*. A Shepard interpoláció a *Szabály távolságot* használja fel a *Döntés*, konzekvens előállításához. [23], [28], [32] és [36]



1. ábra A FIVE módszer számítási lépesei

3. μ FRI könyvtár

3.1. Célkitűzés

A FIVE módszer már meglévő implementációi mellé elkészítettem egy minimális, C nyelvű megvalósítást, amely beágyazott rendszerek korlátozott erőforrásait figyelembe véve végzi el a FIVE számítási lépéseit és helytakarékosan tárolja paramétereiket. Eddig a FIVE módszer implementációja a következő nyelveken létezik: C++, Python, JavaScript, Matlab. A Python és JavaScript változatok tartalmazzák a nyelvi értelmezőt is, a többi változat az tudásbázisát egy állományból tölti fel. A μ FRI könyvtár ezzel szemben *egy futás közben, dinamikusan módosítható struktúrát használ a paraméterek tárolására*. Ez lehetővé teszi, hogy futás közben már teljesen új szabálybázissal végezze a számítást. Továbbá a C nyelvű megvalósítással lehetővé válik Java, C#, Python nyelveken is a FIVE használata, külső könyvtárként történő betöltésével.

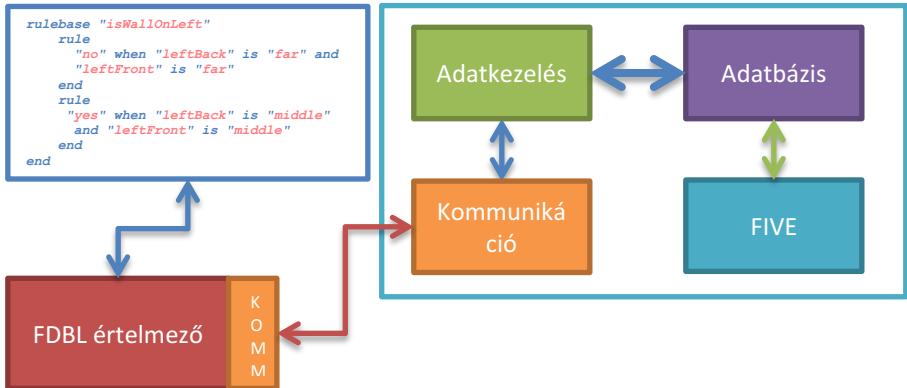
3.2. A könyvtár elemei

A μ FRI (mikro FRI, Fuzzy Rule Interpolation, további jelölése: uFRI) könyvtár egy könnyűsúlyú, kis memória igényű megvalósítása a FIVE módszernek. Adatstruktúrái a viselkedés leíró nyelv (FBDL – Fuzzy Behavior Description Language) elemeivel kerültek összhangba. A megvalósítás támogatja a dinamikus és statikus adatbázis feltöltést illetve a szabálybázisok hangolását paraméterek változtatásával vagy a szabálystruktúra módosításával.

A μ FRI részei (2. ábra):

- *Adatbázis*: az univerzumok és szabálybázisok paramétereinek tárolására.

- *Adatkezelés*: az adatbázis feltöltése, univerzumok és szabálybázisok hozzáadása, törlése, paramétereinek kezelése. Dinamikus memóriafoglalást nem támogató rendszerek esetén ez a rész kikapcsolható.
- A *FIVE* módszer számítási lépései.
- *Kommunikáció*: az adatbázis módosítását segítő bináris és szöveges parancsértelmező, amely külső modul. Segítségével az FBDL-ből vagy egy hangolási módszerből tetszőleges kommunikációs csatornán feltölthető a tudásbázis az *Adatbázis*ba. Továbbá a tudásbázis exportálható a rendszerből. A *KOMM* és a *Kommunikáció* jelölés ugyan azt a modult jelöli.
- *FBDL értelmező*: a leírnyelv értelmezését végzi és előállítja a megfelelő adatokat a kommunikációs blokknak. Az *FBDL értelmező* nem a könyvtár része.



2. ábra A μFRI könyvtár részei

3.3. Új eredmények

A μ FRI könyvtár lehetővé teszi a FIVE alapú viselkedés leírás használatát beágyazott rendszerekben úgy, hogy a szabálybázisok futás közben dinamikusan megváltoztathatók. Ezzel lehetővé válik alacsony energiaigényű, komplex viselkedést megvalósító rendszerek létrehozása a FIVE segítségével.

A μ FRI könyvtár adatstruktúrája az FBDL nyelvet veszi alapul. Egy fordító segítségével az [S8] cikkben bemutatott üzenetmintával a μ FRI-t futtató rendszer viselkedése megváltoztatható vagy valós időben hangolható.

3.4. Gyakorlati felhasználás

A μ FRI könyvtár felhasználásával az alábbi eszközök vezérlése került megvalósításra:

- Inga elvű gömbrobot stabilizálása: [33],
- Fordított inga elvű robot stabilizálása: [34],
- Micromouse robot akadály felismerése: [S8] és [S10],
- Holonomikus robot (KR1) játék a labdával viselkedés: [S5] és [S7].

3.5. Összegzés

Ebben a fejezetben bemutattam az általam készített C nyelven készített minimális memóriaigényű FIVE változatot, amelyet felhasználtam a kutatások során elvégzett tesztek elvégzéséhez.

A részletes működés és használata az [S8] és [S10] cikkekben került ismertetésre. A témához kapcsolódóan az I. tézis született.

4. A FIVE módszer párhuzamos számítási sebességének gyorsítása

A FIVE módszernek a μ FRI könyvtár egy alacsony számítási-, és memóriaigényű megvalósítása. Az eddigi gyakorlati alkalmazások és Q-tanulás eredményei alapján a szabálybázisok száma egy-egy problémára 2-3 szabálybázistól egészen 1000-2000 darabra tehető. [31], [35] és [36].

4.1. Célkitűzés

A vizsgálat célja, hogy a jelenleg használatos, népszerű többmagos beágyazott rendszerek esetén hogyan lehet a számítási hatékonyságon javítani esetleg meghatározni egy optimális értéket arra nézve, hány processzormag vegyen részt a számításban. Ehhez a könyvtár memóriaigénye alapján kerül vizsgálatra számítás hatékonysága a rendszer cache memória méretéhez viszonyítva. Illetve az egyprocesszoros végrehajtáshoz képest elért gyorsulás mértéke Amdahl összefüggése alapján meghatározva a számítási időkből.

Mivel a μ FRI számítási lépései önmagukban viszonylag rövid időt vesznek igénybe, az algoritmus nem kerül további felbontásra. Egy szabályhalmaz egy egységként kerül kezelésre a tesztek során.

A számítási hatások növelésének eredménye, hogy főként a szimulációk és a tanítási eljárások időigénye csökkenthető nem csak kicsi, hanem nagy szabálmennyiség esetén is.

4.2. Vizsgálati módszerek

1. táblázat Vizsgálati módszerek összefoglalója

Vizsgálat címe	Cél	Eljárás
Cache vizsgálati eredmények	Mekkora a cache gyorsító hatása? Mekkora adatmennyiségnél éri el a 0 gyorsítást?	Üres cache-el és cache-el t adattal végzett számítások idejének aránya.
Számítási idők összehasonlítása	Hol van jelentős változás a számítási időben vagy azok arányában?	Teljes számítási idők és azok arányának vizsgálata cache-el t és nem cache-el t esetben.
Gyorsítás vizsgálata	Gyorsítás vizsgálata	Amdahl képletének használata. 1 processzorhoz képest számított gyorsítás. Összes számítási idők aránya alapján 1 processzorhoz képest számított gyorsulás 2 és 3 processzor esetén. A processzorok hasznos számítással töltött idejének vizsgálata.

4.3. Új eredmények

A fejezetben a μ FRI könyvtár különböző tárigények esetén vizsgáltam meg a cache gyorsító hatását és a többmagos processzors rendszerek (ARM A53/A72) viselkedését a számítás által igényelt adatmennyiség esetén.

A vizsgálatok során kiderült, hogy a μ FRI könyvtárat több processzormagon futtatva főként a rövid számítási ideje miatt sebességcsökkenés figyelhető meg illetve nincs jelentős gyorsulás az 1 processzoros végrehajtáshoz képest szorosan csatolt többprocesszoros rendszer esetén.

4.4. Gyakorlati felhasználás

A FIVE módszer μ FRI C nyelvű implementációja beágyazott rendszereken történő felhasználásra készült. Az eredmények segítségével megspórolható a többprocesszoros implementáció alacsony szabálysám esetén kivéve, amikor a rendszer gyors válaszüzeje szükséges és lazán csatolt többprocesszoros rendszeren kerül alkalmazásra.

4.5. Összegzés

A μ FRI könyvtár számítási idejének vizsgálatát végeztem el abból a célból, hogy a különböző adatmennyiségek esetén a cache méretet figyelembe véve mekkora szabálybázis méretnél érdemes több processzorra bízni a számítást. Az eredmények alapján kiderült, hogy szorosan csatolt többprocesszoros rendszerek esetén nem javul a hatékonyság, ha több processzor végzi a számításokat. Illetve az ütemező megszakításai okozhatnak jelentős, korábbi tesztek alapján akár 30%-os növekedését a számítási időnek, ha a számítások hosszabb időt vesz igénybe, mint az ütemező által kiosztott időszlet. A témához kapcsolódóan a II. tézis született.

5. A FIVE módszer hardveres implementálása

A FIVE interpolációs eljárás könnyűsúlyú, jól alkalmazható beágyazott rendszer környezetben. A további gyorsítása indokolt a szimulációs és öntanulási eljárások időigényének csökkentése mellett a gyors beavatkozást igénylő folyamatok szabályozása miatt is. Ennek egy lehetséges megoldása a FIVE módszer hardveres implementációja, amely lehetővé teszi a számítás egy egyszerűsített formájának rendkívül gyors végrehajtását. Az ehhez kialakított adatstruktúrák pedig lehetővé teszik a hardveresen megvalósított szabálybázisok dinamikus konfigurálását és hangolását.

5.1. Célkitűzés

A FIVE módszer számítási lépéseinek hardveres megvalósítása hardverleíró nyelven úgy, hogy a szabálybázisok, univerzumok paraméterei rendszerleállítás nélkül megváltoztathatóak legyenek.

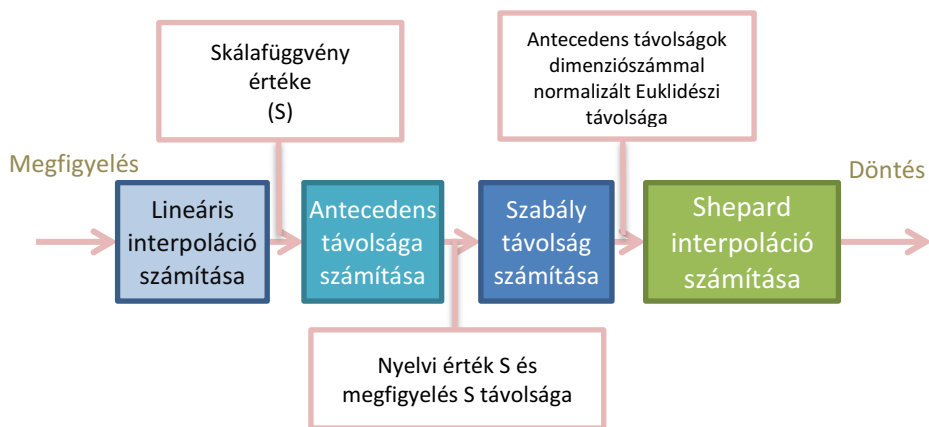
Az áramkörrel szemben támasztott követelmények:

- működés közben hangolható, vagyis a szabálybázis paraméterei megváltoztathatók,
- egyszerű kapcsolódási lehetőség a külvilággal,
- skálázható felbontás,
- hordozhatóság, többfajta FPGA-n is implementálható megvalósítás,
- az áramkör előállítható az FBDL-ből.

5.2. Számítási adatfolyam

A FIVE módszer 4 számítási lépéssel képes az eredmény előállítására, amely 2 interpolációs számításból és 2 távolságszámításból áll.

A 3. ábra szerinti adatfolyam feldolgozás ábrázolása egy szabálybázis számítási lépéseit tartalmazza. Ahol a *Shepard interpolációs* modul kivételével az egyes modulok száma függ attól, hogy hány darab szabályt illetve antecedenst és megfigyelést tartalmaz a szabálybázis. A *Lineáris interpoláció számítások* számát a megfigyelések száma határozza meg, az *Antecedens távolság* számítások száma az egyes szabályokban található antecedensek száma alapján változik. A *Szabály távolság* számítása modulból minden szabályhoz egy darab tartozik. A *Shepard interpoláció számításából* egy szabálybázis egyetlen darabot tartalmaz.



3. ábra A FIVE IP modul részei

2. táblázat A FIVE FPGA moduljainak kapcsolódásai

FBDL elem	FIVE FPGA modul	Átvitt paraméterek	Összeköttetés
universe nyelvi értékekkel	Universe modul	A nyelvi értékek darabszáma és paraméinfterei	A blokk bemenete, érzékelők felé. Kimenet a hivatkozott AntecedentDistance felé
„antecedent0” is „p0” formájú predikátum	AntecedentDistance modul	A predikátumban megjelölt nyelvi érték skálafüggvény értéke (második paraméter)	Bemenet a kapcsolódó Universe felé. Kimenet a RuleDistance felé
A szabályt alkotó predikátumok	RuleDistance modul	Nincs	Bemenetei a kapcsolódó AntecedentDistance felé. Kimenet a Consequent felé.
Rulebase kimeneti universe és a rule első paramétere	Consequent modul	Az rulebaseben megadott universe nyelvi elemeinek mindkét paramétere	Bemenetei a RuleDistance modulok felé. Kimenete a rendszer kimenete

5.3. Új eredmények

A FIVE módszer FPGA-n történő használatához elkészítettem egy vázat Verilog hardver leíró nyelven, amely alkalmas arra, hogy a FBDL (Fuzzy Behavior Description Language) alapján generálható egy hardver elem, amely a FIVE módszer számítását gyorsítja. Alkalmazható önállóan vagy CPU-val társítva

gyorsító segédáramkörként. A FRI_FIVE modulok összekapcsolásával létrehozható összetett viselkedést megvalósító fuzzy viselkedés automata.

A FIVE IP struktúrája lehetővé teszi a Xilinx Adaptive Platformon történő megvalósítását is, mint egy szoftveres környezet hardveres gyorsító egységként. Ekkor számítási egységként vagy a teljes FIVE IP AXI vagy PCIe sínrendszeren csatlakozik a processzoros rendszerhez és a szoftveres modul az adatgyűjtést és a vezérlési feladatot látja el.

Jelenleg nincs általam ismert FPGA-n megvalósított fuzzy interpolációs módszer vagy adaptív fuzzy interpolációs módszer. Klasszikus fuzzy illetve neurofuzzy módszerek FPGA megvalósításai léteznek.

5.4. Gyakorlati alkalmazás

A FIVE IP segítségével viselkedés alapú irányítás valósítható meg áramkör szinten FPGA segítségével. Az egyszerű csatoló felületnek köszönhetően beágyazott mikrovezérlőhöz vagy AXI sínen keresztül alkalmazás processzorhoz is csatolható. Közvetlen felhasználásra is lehetőség van az adatok megfelelő skálázásával. Az irányítási feladatokon kívül viselkedések hangolását is gyorsíthatja a szoftveres megvalósításhoz képest az egyes iterációk gyorsabb végrehajtásával. Viszont a szabálysám a FIVE IP-ben nem növelhető tetszőlegesen csak a hardver által megadott kereteken/korlátokon belül. A paraméterek (univerzumok értékei, megfigyelések és konzekvensek értékei) korlátlanul átírhatóak, a paraméterek átírása egy órajelet igényel, a következő órajelnél már az új paraméterrel elvégzett eredmény jelenik meg a kimeneten.

5.5. Összegzés

Elkészítettem a FIVE implementációját IP formájában Verilog nyelven, amely adatstruktúrája lehetővé teszi a szabálybázis hangolását valós időben. A témához kapcsolódóan a III. tézis született. Kapcsolódó cikkek: [S1], [S2], [S8] és [S13].

6. A FIVE módszer, mint osztályozó eljárás alkalmazása

A megfigyelésekből származó adatok osztályozása, címkézése fontos azok további feldolgozása, mobil robot vagy mesterséges intelligencia esetén a döntési fa előállításában. Az osztályozó eljárások felügyelt válogatási folyamatok, amelyek statisztikai vagy szakértői adatbázist vesznek alapul a megfigyelések címkézésére. A hagyományos osztályozó eljárások általában crisp halmazokba válogatják a bemenő adatokat. A fuzzy osztályozóval azonban az is megadható, hogy az egyes adatok milyen mértékben tartoznak az egyes osztályokhoz. Az ilyen módon akár szakértői adatbázis alapján működő osztályozó kimenetét akár több fuzzy alapú viselkedés leírás használhatja fel. A gyakorlatban ez finomabb átmenetet képez majd a viselkedések közötti váltás esetén.

A fuzzy osztályozó módszer felhasználható olyan mintafelismerő eljárásként, amely arról is számot ad, hogy a legjobban illeszkedő mintán kívül mely mintázatokra illeszkedik még bemenő adatsor.

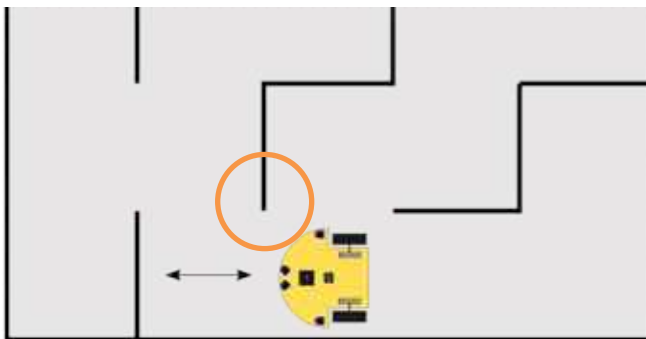
6.1. Célkitűzés

A FIVE eljárás szabály alapú osztályozóként történő alkalmazása a μ FRI könyvtár használatával. Az elért eredményeket összevetem Naiv Bayes osztályozóval.

Az osztályozó vizsgálatában egy labirintusban közlekedő robot számára számítja ki, hol találhatóak a falak a robot aktuális tartózkodási pontjában.

6.2. Eredmények

A leírás alapján létrehozott két osztályozó eljárás a teszteléshez használt labirintus, különböző pontjain helyesen ismerték fel a robotot körülvevő falak formáját. Az tesztelés során figyeltem arra, hogy főként olyan helyeken végezzen a robot mérést, ahol adatgyűjtés nem történt a tanítómintához. A két osztályozó eredményei egymásnak megfelelőek és helyesek voltak. Egyetlen eltérés jelentkezett, amely pozíciót az 4. ábra mutat. Ahol a bekarikázott résznél FIVE alapú osztályozó mutatott téves érzékelést folyosó mintázatra.



4. ábra Fals folyosó érzékelé a FIVE alapú osztályozónál

6.3. Új eredmények

A FIVE fuzzy interpolációs módszerrel kialakítható fuzzy osztályozó. Fuzzy logikán alapuló osztályozó előnye, hogy az osztályozó dimenziószáma csökkenthető, ahogy az ismertetett példában is látható volt. Interpolációs módszerrel kialakított fuzzy osztályozók az alábbi cikkekben találhatóak: [70], [71], [72] és [73], amelyek a KH módszeren alapulnak.

A FIVE módszerrel kialakított osztályozó előnye a Bayes-osztályozóhoz képest a tanító minta méretében látható. A néhány ezres nagyságrendű mintából számolt előfordulási valószínűségek helyett használható az szakértői (emberi)

tapasztalat és néhány mért adatsorból létrehozható a működő szabályrendszer. A szabályrendszer esetenként igényel finomítást, de még ez is szakértő által elvégezhető. Az FBDL segítségével a szabályrendszer könnyen létrehozható.

Az μ FRI könyvtár és az FIVE IP, FPGA megvalósítás is támogatja a gépi tanulással létrehozott szabálybázist vagy a már meglévő szabálybázis hangolását [31], [35], [36] és [74].

A FIVE módszer esetén elhagyható az adatok klaszterezése, amelyre szükség volt a Bayes-osztályozó esetén az tanítóminta tömörítése céljából.

A μ FRI és a FIVE IP segítségével kialakítható beágyazott rendszereken is használható osztályozó eljárás.

6.4. Gyakorlati alkalmazás

A μ FRI segítségével mikrovezérlőn szoftveres és a FIVE IP segítségével FPGA-n hardveres környezetben implementálható szabály alapú gyors osztályozó. A szabály alapú megoldás előnye, hogy szakértői tudásbázis alapján is felépíthető az osztályozó. Alkalmazható IoT (Internet of Things) rendszerekben viselkedések, minták felismerésében, korai hibafelismerés vagy karbantartás előrejelzésében. FPGA megvalósítással olyan nagy sebességet igénylő alkalmazás is lehetséges, mint számítógépes hálózat forgalomfigyelése valós időben.

6.5. Összegzés

A FIVE módszerrel kialakított szabály alapú osztályozó eredményeit összehasonlítottam a népszerű Naiv Bayes osztályozó eredményeivel azonos körülmények között. Az eredmények alapján a FIVE módszer is alkalmas arra, hogy osztályozó eljárásként működjön. Előnye a kisebb mennyiségű gyűjtendő adat és a szakértői tudásbázis alkalmazhatósága a Naiv Bayes osztályozóval szemben. A témához kapcsolódóan a IV. tézis született.

7. Az értekezés tézisei

- I. A μ FRI könyvtár alkalmas a FIVE FRI mikrovezérlőkön való implementációjára. Lehetőséget biztosít a tudásbázis rendszerleállítás nélküli dinamikus paraméter megváltoztatására, beágyazott rendszerbeli adaptív alkalmazások kialakítására.

Kapcsolódó cikkek: [S5], [S7], [S8] és [S10].

- II. A μ FRI könyvtár szorosan csatolt ARM A72 párhuzamos architektúrán való implementációja esetén a dinamikusan változó elosztott fuzzy tudásbázis összesen 1720 kB memóriaigényig hatékonyan allokálható 1 processzormagon.

Tetszőleges szabálybázis memória igénye kiszámítható a következő képlettel:

$$T = 8N_{UE} + 12N_U + 12N_A + 14N_R + 12N_{RB}$$

ahol az N_{UE} az összes univerzum elem száma, N_U az összes univerzumok száma, N_A az összes antecedens száma a szabályokban, N_R a szabályok száma, N_{RB} a szabálybázisok száma, T pedig a teljes szükséges tárterület mérete byte-ban. Ez alapján a legkisebb elfoglalt memóriaterület 58 byte, amikor $N_{UE}=N_U=N_A=N_R=N_{RB}=1$.

Kapcsolódó cikkek: [S3], [S4] és [S6].

III. A FIVE IP könyvtár moduljai alkalmasak a FIVE FRI FPGA-n való FPGA erőforrás hatékony implementációjára. A könyvtár felhasználásával a létrehozott rendszer képes a tudásbázis rendszerleállítás nélküli dinamikus megváltoztatására, beágyazott rendszerbeli adaptív alkalmazások kialakítására.

Kapcsolódó cikkek: [S1], [S2], [S8] és [S13].

IV. A létrehozott μ FRI könyvtár vagy a FIVE IP modulok felhasználásával, a FIVE FRI módszer alkalmazásával hatékony osztályozó algoritmus alakítható ki. Az így kapott osztályozó algoritmus alkalmas beágyazott rendszerekben történő közvetlen használatra.

Kapcsolódó cikkek: [S5], [S7], [S8] és [S10].

8. Összefoglalás

A FIVE (Fuzzy Interpolation in Vague Environment) módszerrel etológiai viselkedésmoდეlek és viselkedés alapú irányítás valósítható meg úgy, hogy a rendszer működését szabályok halmaza írja le. A FIVE módszer egy fuzzy interpolációs módszer, amely a fuzzy halmazokat az interpolációhoz egy többdimenziós, úgynevezett homályos környezetbe helyezi. A FIVE módszer egy könnyűsúlyú interpoláció, amely alkalmas beágyazott rendszereken történő használatra is. A viselkedések, szabályok leírását az FBDL (Fuzzy Behavior Description Language) segíti.

A dolgozatban a FIVE módszerhez kapcsolódóan elkészítettem a már meglévő megvalósítások mellé a C nyelvű beágyazott rendszerekre optimalizált változata, a μ FRI (mikro Fuzzy Rule Interpolation) könyvtár. Alacsony memóriaigénye miatt eredményesen alkalmazható mikrovezérlőkön való használatra is. A μ FRI könyvtár továbbá alapját képezi a FIVE módszer FPGA (Field Programmable Gate Array) megvalósításának. A könyvtár segítségével különféle robotok viselkedése került elkészítésre a kutatási idő alatt ARM mikrovezérlőre és alkalmazás processzoros rendszerekre. A μ FRI könyvtár adatszerkezete felhasználja az FBDL nyelv szerkezetét a könnyebb átírás segítésére. A μ FRI könyvtár lehetővé teszi a paraméterek működés közbeni dinamikus megváltoztatását, dinamikus memóriefoglalást támogató rendszerek esetén a futás közbeni a teljes szabálybázis megváltoztatását.

A μ FRI könyvtárat megvizsgáltam hogyan viselkedik többprocesszoros rendszeren. A nem gyorsítótárazott és a gyorsítótárazott adatokkal végzett számítási időket vizsgáltam 1, 2 és 3 processzormagon szorosan és lazán csatolt rendszeren. Bár a μ FRI könyvtár lehetővé teszi, hogy az egyes szabálybázisokat a rendszer egymástól függetlenül számítsa, de a rövid számítási idő és az alacsony memóriaigény miatt hatékonyabban működik a vizsgált 1 és 1000 szabálybázisszám között (20000 szabály), ha egy processzormag végzi a

számítást. Megmértem, hogy mennyivel gyorsabb a végrehajtás több processzormagon az egy processzormagos számításokhoz képest. A számítási idők hányadosa alapján és Amdahl képletével vizsgáltam meg. A vizsgálatokhoz a kutatás ideje alatt elterjedt ARM A53 és ARM A72 architektúrákat használtam.

A FIVE módszer további gyorsítása érdekében elkészítettem a hardveres megvalósítását FPGA-ra Verilog hardverleíró nyelven. A 4 MHz maximális működési frekvenciájú hardver alapértelmezetten 8 bites, de paraméterezhető módon tetszőleges bitszélességgel generálható. A hardver előjel nélküli egész számokkal képes műveletet végezni. Az elkészült megvalósítás hardverigényét összevettem a Xilinx High Level Synthesis nevű eszközével, amely speciálisan átalakított C kódból képes leíró nyelvre fordítani. Sikerült elérni, hogy a saját megvalósításom kevesebb hardveres erőforrást használjon az FPGA-n. Az általam készített hardveres megvalósítás lehetővé teszi a paraméterek működés közbeni dinamikus megváltoztatását.

A FIVE módszert a μ FRI könyvtár segítségével egyéb alkalmazások mellett osztályozó eljárásként is felhasználtam. Egy valós, labirintusban közlekedő robot érzékelő adatait feldolgozva határoztam meg szabályokkal, hogy a robot körül milyen falmintázat található az adott négyzet alakú labirintus cellában. A roboton 4 darab egyszerű infravörös érzékelő helyezkedett el és ezek segítségével érzékelt a falakat, akadályokat. Az FIVE alapú osztályozót összevettem a klasszikus Naiv-Bayes osztályozóval, végeredményben a két megoldás egyforma valószínűséggel találta el a falak helyzetét a robot körül.

A kutatás további lépései közé tartozik a szabályrendszer előállítás a 7. fejezetben szerzett ismeretek alapján, statisztikai módszerekkel, segítve a gépi tanulás kialakítását a már meglévő Q-tanulás mellett. A cél, hogy szakértő által bemutatott viselkedésből generáljon a rendszer szabálybázisokat, amelyeket aztán egy Q-tanulás módszer finomíthat. Továbbá a hardveres megvalósítás dinamikus módosíthatóságának továbbfejlesztése a cél a modern, Xilinx által biztosított megoldásokhoz igazítva.

A kutatás során tehát elkészítettem olyan megoldásokat, amelyek lehetővé teszik a FIVE módszer hatékony használatát beágyazott rendszereken processzoros és hardveres rendszereken egyaránt illetve lehetővé teszik a szabálybázisok dinamikus paraméterezhetőségét, hangolását.

9. Irodalomjegyzék

- [1] Szilveszter Kovács, Dávid Vincze, Márta Gácsi, Ádám Miklósi, and Péter Korondi, "Ethologically inspired robot behavior implementation," in *2011 4th International Conference on Human System Interactions, HSI 2011*, May 2011, pp. 64–69.
- [2] Michiel P. De Looze, Tim Bosch, Frank Krause, Konrad S. Stadler, and Leonard W. O'sullivan, "Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load," *Ergonomics*, vol. 59, pp. 671–681, 2016.
- [3] Universal Robots, "www.universal-robots.com," Tech. rep. 2020.
- [4] Stuart Shepherd and Alois Buchstab, "Kuka robots on-site," in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*: Springer, 2014, pp. 373–380.
- [5] Simon Blackmore, Bill Stout, Maohua Wang, Boris Runov, and others, "Robotic agriculture—the future of agricultural mechanisation," in *Proceedings of the 5th European conference on precision agriculture*, 2005, pp. 621–628.
- [6] Richard Bloss, "Mobile hospital robots cure numerous logistic needs," *Industrial Robot: An International Journal*, 2011.
- [7] Bence Kovács et al, "Ethologically Inspired Robot Design," in *The 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom2011)*, 2011, pp. 7-9.
- [8] Péter Korondi, Ádám Miklósi, Szilveszter Kovács, and Antal Dóka, "Ethologically inspired models for human-robot interaction-state of the art," 2009.
- [9] Dávid Vincze and Szilveszter Kovács, "Using fuzzy rule interpolation based automata for controlling navigation and collision avoidance behaviour of a robot," in *2008 IEEE International Conference on Computational Cybernetics*, 2008, pp. 79–84.
- [10] Hongwei Mo, Qirong Tang, and Longlong Meng, "Behavior-based fuzzy control for mobile robot navigation," *Mathematical problems in engineering*, vol. 2013, 2013.
- [11] Paolo Pirjanian, "Multiple objective behavior-based control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 31, pp. 53–60, 2000.
- [12] Michael Dooley, Nikolai Romanov, Paolo Pirjanian, Lihu Chiu, and Enrico Di Bernardo, "Robotic game systems and methods," January 2014, US Patent 8,632,376.
- [13] Lotfi A. Zadeh, "Information and control," *Fuzzy sets*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [14] Johanyák Zsolt Csaba and Dr. Tóth Tibor, "Fuzzy szabály-interpolációs módszerek és mintaadatok alapján történő automatikus rendszergenerálás," Ph. D. értekezés, Miskolci Egyetem, Hatvány József Informatikai Tudományok, Ph.D. dissertation 2007.
- [15] Kovács Szilveszter, "Fuzzy logic control," Technical University of Budapest, Faculty of Informatics and Electrical Engineering, Master's thesis 1993.
- [16] Szilveszter Kovács, "Extending the fuzzy rule interpolation" FIVE" by fuzzy observation," in *Computational Intelligence, Theory and Applications*: Springer, 2006, pp. 485–497.

- [17] LászlóT Kóczy and Kaoru Hirota, "Approximate reasoning by linear rule interpolation and general approximation," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 9, pp. 197–225, 1993.
- [18] LászlóT Kóczy and Kaoru Hirota, "Interpolative reasoning with insufficient evidence in sparse fuzzy rule bases," *Information Sciences*, vol. 71, pp. 169–201, 1993.
- [19] Domonkos Tikk et al., "Stability of interpolative fuzzy KH controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 125, pp. 105–119, 2002.
- [20] Gy Vass, L. Kalmár, and L. T. Kóczy, "Extension of the fuzzy rule interpolation method," in *Proc. Int. Conf. Fuzzy Sets Theory Applications*, 1992, pp. 1–6.
- [21] Péter Baranyi, László T. Kóczy, and Tamás D. Gedeon, "A generalized concept for fuzzy rule interpolation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, pp. 820–837, 2004.
- [22] Suman Das, Debjani Chakraborty, and László T. Kóczy, "Linear fuzzy rule base interpolation using fuzzy geometry," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 112, pp. 105–118, 2019.
- [23] Szilveszter Kovács, Márta Gácsi, Dávid Vincze, Péter Korondi, and Ádám Miklósi, "A novel, ethologically inspired HRI model implementation: Simulating dog-human attachment," in *2nd International Conference on Cognitive Infocommunications*, 2011, pp. 1–4.
- [24] Szilveszter Kovács and László T. Kóczy, "Application of interpolation-based fuzzy logic reasoning in behaviour-based control structures," in *2004 IEEE international conference on fuzzy systems (IEEE Cat. No. 04CH37542)*, vol. 3, 2004, pp. 1543–1548.
- [25] Szilveszter Kovács and László T. Kóczy, "Application of the approximate fuzzy reasoning based on interpolation in the vague environment of the fuzzy rulebase in the fuzzy logic controlled path tracking strategy of differential steered AGVs," in *International Conference on Computational Intelligence*, 1997, pp. 456–467.
- [26] Szilveszter Kovacs and Laszlo T. Koczy, "Approximate fuzzy reasoning based on interpolation in the vague environment of the fuzzy rulebase," in *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, 1997, pp. 63–68.
- [27] Szilveszter Kovács, "New aspects of interpolative reasoning," in *Proceedings of the 6th. International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, Granada, Spain*, 1996, pp. 477–482.
- [28] Imre Piller, Dávid Vincze, and Szilveszter Kovács, "Declarative language for behaviour description," in *Emergent trends in robotics and intelligent systems.*: Springer, 2015, pp. 103–112.
- [29] Dávid Vincze and Szilveszter Kovács, "Incremental rule base creation with fuzzy rule interpolation-based Q-learning," in *Computational Intelligence in Engineering.*: Springer, 2010, pp. 191–203.
- [30] Dávid Vincze and Szilveszter Kovács, "Fuzzy rule interpolation-based Q-learning," in *2009 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2009, pp55–60
- [31] Tamás Tompa and Szilveszter Kovács, "Applying expert heuristic as an a priori knowledge for FRIQ-learning," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 17, pp. 27–45, 2020.

- [32] Imre Piller and Szilveszter Kovács, "FBDL: A Declarative Language for Interpolative Fuzzy Behavior Modeling," in *2019 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 2019, pp. 000295–000300.
- [33] Balázs Pónya and László Czup, "Gömbrobot stabilizálása viselkedés leíró nyelvvel," in *ENELKO 2017 XVIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2017 XXVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár 2017. október 12-15.*, Cluj-Napoca, Románia, 2017.
- [34] Gergő Lengyel, "Egysúlyozó robot megvalósítása Fuzzy szabály interpolációval (FRI)," Miskolci Egyetem, Master's thesis 2017.
- [35] Tamás Tompa and Szilveszter Kovács, "Clustering-based fuzzy knowledgebase reduction in the FRIQ-learning," in *2017 IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, 2017, pp. 000197–000200.
- [36] Tamás Tompa, Szilveszter Kovács, Dávid Vincze, and Mihoko Niitsuma, "Demonstration of expert knowledge injection in Fuzzy Rule Interpolation based Q-learning," in *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2021, pp. 843-844.
- [37] Gene M. Amdahl, "Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities," in *Proceedings of the April 18-20, 1967, spring joint computer conference*, 1967, pp. 483–485.
- [38] Cypress. (2020) PSoC Products. [Online]. <https://www.cypress.com/products/microcontrollers-mcus>
- [39] Xilinx. (2020) Products. [Online]. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc.html>
- [40] S. T. Microelectronics. (2020) Products. [Online]. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7-series.html>
- [41] Atul P. Godse and Deepali A. Godse, *Microprocessors & Microcontrollers*.: Technical publications, 2021.
- [42] János Végh, Péter Molnár, and József Vásárhelyi, "A figure of merit for describing the performance of scaling of parallelization," *arXiv preprint arXiv:1606.02686*, 2016.
- [43] János Végh, József Vásárhelyi, and Dániel Drótos, "The performance wall of large parallel computing systems," in *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication*, 2018, pp. 224–237.
- [44] STMicroelectronics, "STM32F4 datasheet," p. 80, Tech. rep.. [Online]. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00031020-stm32f405-415-stm32f407-417-stm32f427-437-and-stm32f429-439-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [45] Dávid Vincze and Szilveszter Kovács, "Performance Optimization of the Fuzzy Rule Interpolation Method" FIVE", *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics*, vol. 15, pp. 313–320, 2011.
- [46] Ulrich Drepper, "What every programmer should know about memory," *Red Hat, Inc*, vol. 11, p. 2007, 2007.

- [47] Haohuan Fu and Robert G. Clapp, "Eliminating the memory bottleneck: an FPGA-based solution for 3D reverse time migration," in *Proceedings of the 19th ACM/SIGDA international symposium on Field programmable gate arrays*, 2011, pp. 65–74.
- [48] Andreas Nowatzky, Fong Pong, and Ashley Saulsbury, "Missing the memory wall: The case for processor/memory integration," in *23rd Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA'96)*, 1996, pp. 90–90.
- [49] Digilent Inc. (2017) Zybo reference manual. [Online]. https://reference.digilentinc.com/_media/reference/programmable-logic/zybo/zybo_rm.pdf
- [50] RaspberryPi.org. (2020) Raspberry Pi 4 B. [Online]. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- [51] Broadcom. (2021) BCM5871 adatlap. [Online]. <https://docs.broadcom.com/doc/1211168571391>
- [52] Kernel.org. (2020) Scheduler. [Online]. <https://docs.kernel.org/scheduler/>
- [53] József Vásárhelyi and János Végh, "Clock Around Embedded Systems and Reconfigurable Systems," 2013.
- [54] Xilinx. (2022) Xilinx Unified Software Platform. [Online]. <https://www.xilinx.com/products/design-tools/vitis.html>
- [55] Kovács Szilveszter Tompa Tamás, "Heuristically accelerated FRIQ-learning," *IEEE 20th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2022)*, Szabadka, Szerbia : IEEE (2022), p. 6, 2022.
- [56] Daniele Bagni, A. Di Fresco, J. Noguera, and F. M. Vallina, "A zynq accelerator for floating point matrix multiplication designed with vivado hls," *Application note, January*, 2016.
- [57] Xilinx. (2013) Xilinx, Introduction to High-Level Synthesis with Vivado HLS. [Online]. www.xilinx.com
- [58] Xilinx, "UltraFast High-Level Productivity Desing Methodology Guide, UG1197," , 2016.
- [59] Xilinx, "Vivado Design Suite - High Level Synthesis, UG902," , 2012, 07. 25.
- [60] Xilinx, "High-Level Synthesis with Vivado HLS, heterogen_xilinx_hls.pdf," , 2012.
- [61] Daniel T. Larose, *Data mining and predictive analytics.*: John Wiley & Sons, 2015.
- [62] Irina Rish and others, "An empirical study of the naive Bayes classifier," in *IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence*, vol. 3, 2001, pp. 41–46.
- [63] Farzad Zafarani and Chris Clifton, "Differentially private naive bayes classifier using smooth sensitivity," *arXiv preprint arXiv:2003.13955*, 2020.
- [64] Manuel Baltieri, "A Bayesian perspective on classical control," in *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2020, pp. 1–8.
- [65] Baosheng He, *New Bayesian methods for quality control applications.*: The University of Iowa, 2018.

- [66] Rainer Deventer, Joachim Denzler, and Heinrich Niemann, "Bayesian control of dynamic systems," in *Innovations in Intelligent Systems*: Springer, 2004, pp. 21–50.
- [67] Pedro A. Ortega. Bayesian Control Rule. [Online].
<https://www.adaptiveagents.org/lib/exe/fetch.php?media=bayesiancontrolrule.pdf>
- [68] Pedro Alejandro Ortega, Daniel Alexander Braun, and Simon Godsill, "Reinforcement learning and the Bayesian control rule," in *International Conference on Artificial General Intelligence*, 2011, pp. 281–285.
- [69] Hably Alexandra, "Szériában gyártható half-size MicroMouse robot tervezése," in *Konzulens: Szayer Géza, Tajti Ferenc*, BME-MOGI, Budapest TDK dolgozat, 2014, p. 35.
- [70] Ferenc Lilik, Szilvia Nagy, and László T. Kóczy, "Wavelet based fuzzy rule bases in pre-qualification of access networks' wire pairs," in *AFRICON 2015*, 2015, pp. 1–5.
- [71] Ferenc Lilik, Szilvia Nagy, Melinda Kovács, Szonja Krisztina Szujó, and László T. Kóczy, "Interpolative decisions in the fuzzy signature based image classification for liver CT," in *2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2021, pp. 1–6.
- [72] Szilvia Nagy, Ferenc Lilik, and László T. Kóczy, "Entropy based fuzzy classification and detection aid for colorectal polyps," in *2017 IEEE AFRICON*, 2017, pp. 78–82.
- [73] Szilvia Nagy, Ferenc Lilik, and László T. Kóczy, "Applicability of various wavelet families in fuzzy classification of access networks' telecommunication lines," in *2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2017, pp. 1–6.
- [74] Tamás Tompa and Szilveszter Kovács, "Determining the minimally allowed rule-distance for the incremental rule-base construction phase of the FRIQ-learning," in *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2018, pp. 480–483.
- [75] Xilinx, "High-Level Synthesis with Vivado HLS," 2012, `heterogen_xilinx_hls.pdf`.
- [76] Paolo Pirjanian, "Behavior coordination mechanisms-state-of-the-art," Technical report, University of Southern California, Institute for Robotics & Tech. rep. 1999.
- [77] Pedro A. Ortega and Daniel A. Braun, "A bayesian rule for adaptive control based on causal interventions," *arXiv preprint arXiv:0911.5104*, 2009.
- [78] Andreas Olofsson, Tomas Nordström, and Zain Ul-Abdin, "Kickstarting high-performance energy-efficient manycore architectures with epiphany," in *2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2014, pp. 1719–1726.
- [79] Amin Shaka Aunali and D. Venkatesan, "Bayesian Approach in Control Charts Techniques," *Int. J. Sci. Res. in Mathematical and Statistical Sciences Vol*, vol. 6, p. 2, 2019.
- [80] Kovács Szilveszter. FIVE jegyzetek.

10. Saját publikációk

- [S1] *Bartók, Roland; Vásárhelyi, József: Design of a FPGA Accelerator for the FIVE Fuzzy Interpolation Method*, INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER APPLICATIONS IN TECHNOLOGY, 68: 4 pp. 321-331. Paper: 11 , 11 p. (2022)
- [S2] *Bartók, Roland: Fuzzy szabály interpolációs eljárás HLS-el történő hardveres megvalósíthatóságának vizsgálata*: Analysis of hardware implemented fuzzy rule interpolation, implemented with HLS In: Dr. Sebestyén-Pál, György; Dr. Szabó, Loránd; Dr. Biró, Károly-Ágoston (szerk.) ENELKO 2019 SzámOkt 2019 : XX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, XXIX. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2019) pp. 115-118. , 4 p.
- [S3] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: Examining Cache Handling of the FIVE Method on Multicore Systems* In: Szakál, Anikó (szerk.) SAMI 2019 : IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics Herlany, Szlovákia : IEEE, (2019) pp. 141-146. Paper: 24_sami2019 , 5 p.
- [S4] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: A FIVE módszer párhuzamosíthatóságának vizsgálata Parallella mikroszámítógépen*: Examining the parallelism of FIVE method on Parallella microcomputer In: Biró-Károly, Ágoston; Sebestyén-Pál, György; Szabó, Lóránd (szerk.) ENELKO 2018 XIX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia SzámOkt 2018 XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2018) p. 134 , 6 p.
- [S5] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: Fuzzy Rule Interpolation Based Object Tracking and Navigation for Social Robot* Lecture Notes In Mechanical Engineering 2018 pp. 370-375. , 6 p. (2018)

- [S6] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: **Parallelization of FIVE method on multicore embedded system*** In: Drótos, Dániel; Vásárhelyi, József; Czap, László; Ivo, Petráš (szerk.) Proceedings of the 19th International Carpathian Control Conference (ICCC 2018) Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok : IEEE, (2018) pp. 400-403., 4 p.
- [S7] *Bartók, Roland ; Korcsok, Erika ; Vásárhelyi, József: **Fuzzy szabály interpoláció alapú objektumkövetés megvalósítása Robot Operációs Rendszerben:*** Implementation of Fuzzy Rule Interpolation Based Object Tracking in Robot Operating System In: Bíró, Károly-Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) ENELKO 2017 : XVIII. Energetika-Elektrotechnika Konferencia : SzámOkt 2017 : XVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, (2017) pp. 123-126. , 4 p.
- [S8] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: **Two Methods for Autonomous Robot Obstacle Sensing and Application Programming Interface for Fuzzy Rule Interpolation*** In: Dan, Popescu; Dorin, Şendrescu; Monica, Roman; Elvira, Popescu; Lucian, Bărbulescu (szerk.) 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC) Craiova, Románia: IEEE, (2017) pp. 87-92. Paper: 7970376 , 6 p.
- [S9] *Bartók, Roland ; Pintér, Judit Mária: **Beszéd alapú ember-gép interfész fejlesztése szociális robothoz: Development of Speech-based Human-machine Interface for Social Robot*** In: OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia : 25th International Conference on Mechanical Engineering Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2017) pp. 67-70., 4 p.
- [S10] *Bartók, Roland ; Ahmed, Bouzid ; Vásárhelyi, József; L Kiss, Márton: **Wall and Object Detection with FRI and Bayes-Classifier for Autonomous Robot*** Lecture Notes In Mechanical Engineering F12 pp. 383-389. , 7 p. (2017)

- [S11] *Bartók, Roland ; L, Kiss Márton ; Dr. Vásárhelyi, József ; Dr. Kovács, Szilveszter ; Ahmed, Bouzid: **Embedded behavioral model implementation*** In: Ivo, Petráš; Igor, Podlubny; Ján, Kačur (szerk.) Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC) [s. l.] - Nemzetközi, Nemzetközi : IEEE, (2016) pp. 35-40., 6 p.
- [S12] *Bartók, Roland ; L, Kiss Márton ; Vásárhelyi, József ; Ferenczi, István: **Holonomikus hajtású robot vezérlése Fuzzy alapú viselkedés leírással*** In: Biró, Károly-Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) ENELKO 2015 XVI Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika konferencia; SzámOkt 2015 XXV. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Arad, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2015) pp. 185-188. , 4 p.
- [S13] *Bartók, Roland ; Vásárhelyi, József: **A fuzzy rule interpolation base algorithm implementation on different platforms*** In: Ivo, Petras; Igor, Podlubny; Jan, Kacur; Vásárhelyi, József (szerk.) Proceedings of the 16th International Carpathian Control Conference Miskolc, Magyarország : IEEE IAS/IES/PELS, (2015) pp. 37-40. , 4 p.