

A FIVE fuzzy interpolációs módszer hardveres gyorsítása

Hardware accelerator for FIVE fuzzy interpolation method

BARTÓK Roland¹, Dr. habil. VÁSÁRHELYI József²

^{1,2}Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

¹qgeroli5@uni-miskolc.hu

²vajo@uni-miskolc.hu

Abstract

In addition to traditional control methods, behavior-based control can be used to control robots cooperating with humans. The best-known field of this is etorobotics, where the companion robot imitates the behavior of a known living being, for example the behavior of a dog. This makes the interaction between man and machine easier. The behavior of the robot can be described by rules using the FIVE fuzzy interpolation method. The calculations of the FIVE method are supported by a hardware accelerator for fast decisions. The paper presents the architecture of this IP implemented on the FPGA.

Keywords: fuzzy, fuzzy logic, FPGA, behavior based control, etorobotics

Kivonat

Az emberekkel együttműködő robotok irányítására a hagyományosnak mondható irányítási módszerek mellett használható a viselkedés alapú irányítás. Ennek a legismertebb területe az etorobotika, ahol a társrobot egy ismert élőlény viselkedését utánozza, például kutya viselkedését. Ezzel egyszerűbbé válik az interakció az ember és gép között. A robot viselkedését a FIVE fuzzy interpolációs módszer felhasználásával, szabályokkal lehet leírni. A gyors döntésekhez a FIVE módszer számításait egy hardveres gyorsító segíti. A cikk ennek az FPGA-ra megvalósított IP felépítését mutatja be.

Kulcsszavak: fuzzy, fuzzy logika, FPGA, viselkedés alapú irányítás, etorobotika

1. BEVEZETÉS

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. A modellek alapján elkészített viselkedések bizonyos helyzetekben érvényesek 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. A fuzzy jelleget kihasználva a fuzzy állapotgép a meglévő viselkedések kiszámításával és azoknak a környezetnek megfelelő egyesítésével hozza létre a robot pillanatnyi mozgását, akcióját. [4]

Abban az esetben, amikor az adott helyzetre nincs megfelelő viselkedésminta a FIVE módszer segítségével a meglévő viselkedések alapján interpoláció segítségével állítja elő a robot aktuális tevékenységét. [5]

2. SZABÁLYINTERPOLÁCIÓ ÉS 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. [3], [4], [5] és [6]

A klasszikus 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 szabályszámot 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. [3], [4], [5] és [6]

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. [3], [4], [5] és [6]

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 különbséget 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 lépései az 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. [3], [4], [5] és [6]



1. ábra A FIVE módszer számítási lépései [7]

3. FUZZY VISELKEDESLEÍRÓ NYELV

Az FBD nyelv az etológusok által használt leírnyelvhez hasonló formában jött létre. Célja, hogy a HA ... AKKOR ... formájú szabályok helyett egy ember által könnyebben olvasható és leírható eszközt biztosítson a viselkedésminták szabályokkal történő leírására. A nyelvről részletesen az alábbi cikk számol be: [4].

A nyelv az alábbi kötött nyelvi elemekből épül fel:

- **rulebase:** a viselkedésleírás alapvető elemei a szabálybázisok. Ezeknek van antecedens (bemeneti) és konzekvens (következmény) oldala, amely a következőkben kerül majd taglalásra. Mivel a viselkedés kiértékeléshez az FRI (Fuzzy Rule Interpolation) módszer kerül alkalmazásra, ezért a method (mint számítási mód definíció) rész megadása nem szükséges.
- **antecedent:** bemeneti tartomány. A leírás során ennek a megadásával tulajdonképpen az adott dimenzió értelmezési tartományát adjuk meg. Ebben adhatjuk meg, hogy a nyelvi szimbólumokhoz milyen valós értékek tartozzanak.
- **description:** opcionális elem, amely főként dokumentációs célokra használható.
- **consequent:** következtetés tartománya. Hasonlóan az antecedens oldal megadásához itt is a szimbólumok és az azokhoz tartozó értékek összerendelése történik meg.

- **rule, when, is, and:** szabály leírására használható szavak. Egy szabály a következő alakban adható meg: **rule** „kimeneti szimbólum” **when** „antecedens szimbólum” **is** „antecedens érték” **end**

A **consequent** és **antecedent** kulcsszavak helyett használható a **universe** kulcsszó. A következőkben bemutatott leírásban is ez a kulcsszó került felhasználásra.

3.1.A rendszer felépítéshez használt minta szabálybázis

A mintarendszerhez használt szabályrendszer FBDL nyelven az alábbi felépítésű:

```
universe "antecedent0"
```

```
"p0" 0 0
```

```
"p1" 127 127
```

```
"p2" 255 255
```

```
end
```

```
universe "antecedent1"
```

```
"p0" 0 0
```

```
"p1" 127 127
```

```
"p2" 255 255
```

```
end
```

```
universe "consequent"
```

```
"p0" 0 0
```

```
"p1" 255 255
```

```
end
```

```
rulebase "consequent"
```

```
rule
```

```
"p0" when "antecedent0" is "p0" and "antecedent1" is "p0"
```

```
end
```

```
rule
```

```
"p1" when "antecedent0" is "p2" and "antecedent1" is "p2"
```

```
end
```

```
end
```

Ahol az *antecedentX* a rendszer bemeneti értékeket tartalmazza, a *consequent* a döntéshez tartozó kimenő értékeket. Például felhasználható egy motor jeladó, mint bemeneti érték és a kimeneti érték egy PWM jel kitöltési tényezőjének. A gyorsító hardver 8 bites adatokat használ ezért kerültek a 0-255 közötti értékek a szabálybázisba. A *pX* a nyelvi elemeket jelenítik meg, amelyeket a szabályalkotáskor lehet felhasználni. A nyelvi elemeket követő első szám a megfigyelés, bemeneti vagy kimeneti adat értéke, a második szám pedig a nyelvi elem tagsági értéke az adott halmazban. A példában szereplő érték a [0;1] tartományról a [0;255] tartományra került átskálázásra. [7]

4. TERVEZÉSI KÖVETELMÉNYEK ÉS MEGOLDÁSUK

A hardveres megvalósítással szembeni legfontosabb követelmény, hogy működés közben hangolható, paraméterezhető legyen. Tehát az áramkör működése közben, annak leállítása nélkül lehessen a paramétereit (antecedens értékek, konzekvens értékek) megváltoztatni. Ennek eléréshez a paraméterek regiszterekben kerültek tárolásra, amelyekhez készült olyan felület, amely segítségével 1 órajel ciklus alatt megváltoztatható az egyes modulok belső adata.

Egyszerű kapcsolódás a külvilághoz, amely egy változtatható bitszélességű kimeneti és bemeneti busszal valósul meg. A busz segítségével akár AXI interfészre is illeszthető a FIVE hardver.

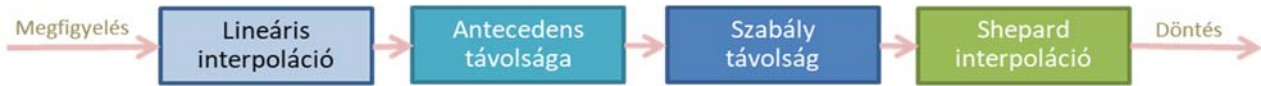
Skálázható felbontás, amely moduláris felépítéssel és paraméterezhető bitszélességgel került megoldásra. Az egyes modulok száma a szabályok által igényelt mennyiségben változtatható.

Hordozhatóság, amely a kód hordozhatóságára vonatkozik, nem került felhasználásra a Verilog nyelven írt kódban semmilyen gyártó specifikus elem.

Az áramkör generálható az FBD nyelvből. Ezt segíti a moduláris felépítés és paramétrezhetőség. A modulok kapcsolódása és paraméterei kinyerhetők az FBD nyelven leírt szabálybázisokból. [7]

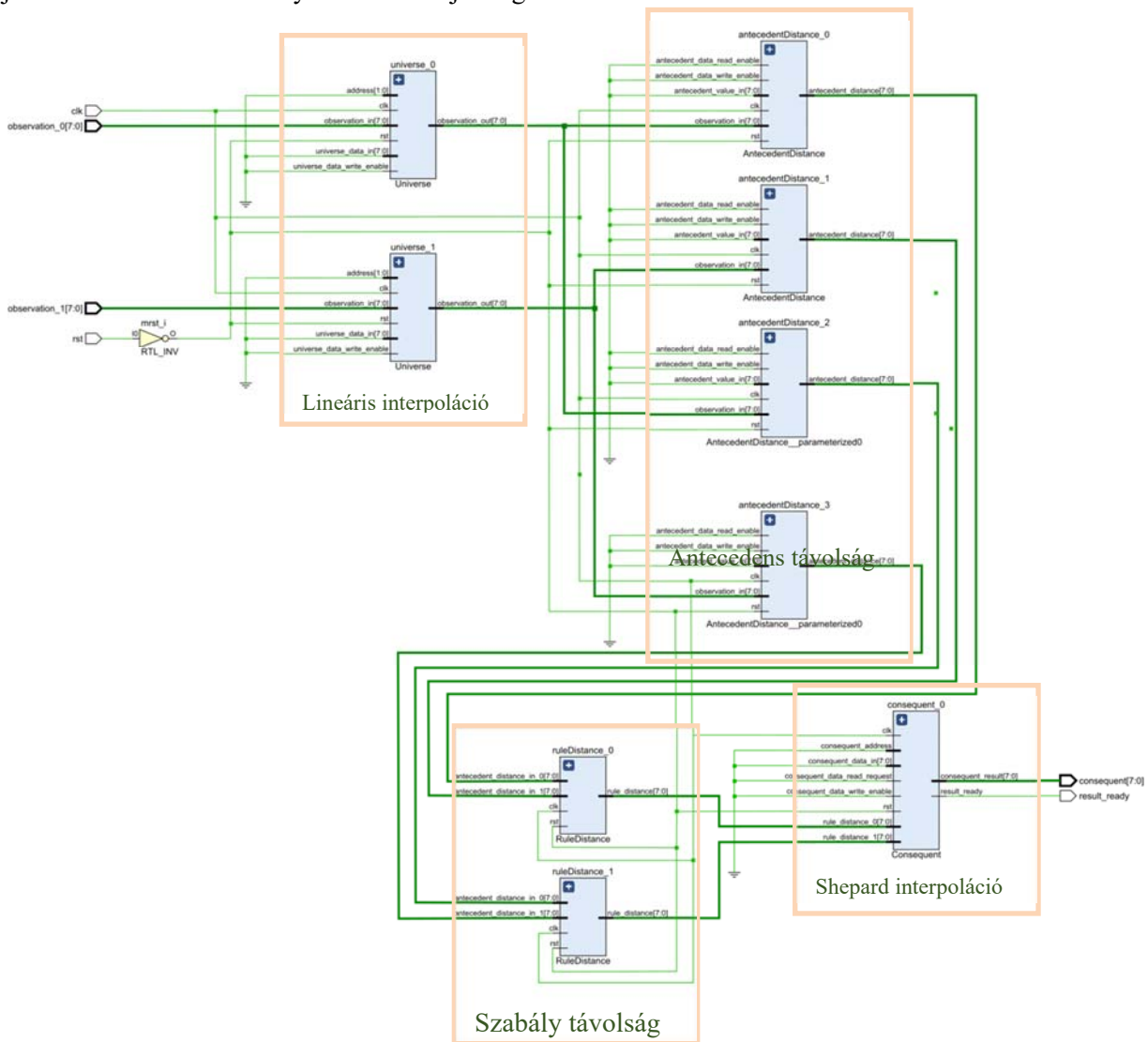
5. A MINTARENDSZER FELÉPÍTÉSE

A hardveres gyorsító IP adatfolyam vázlatja az 2. ábra mutatja. Az ábrán az egyes számítási lépések jelennek meg a végrehajtás sorrendjében.



2. ábra A FIVE hardveres gyorsító számítási lépései [7]

A hardveres gyorsítóban megvalósított adatfolyam felépítése a 3. ábrán látható, amely a 3.1-es fejezetben ismertetett szabálybázist valósítja meg.

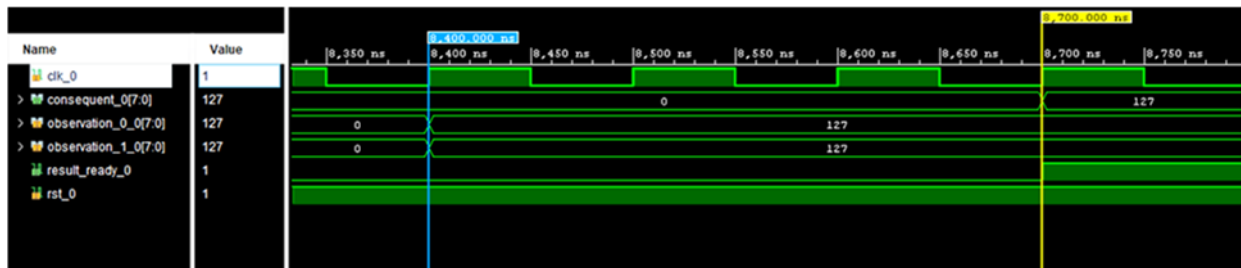


3. ábra A FIVE módszer 3.1-es fejezetben ismertetett szabálybázisnak megfelelő elvi összeállítása [7]

Az elvi összeállítás nem tartalmaz a kommunikációs blokkot, a modulokon a hozzá tartozó portok az inaktív állapotnak megfelelő jelszintre kerültek bekötésre. A sötétzöld vonalak az adatbuszokat jelölik míg a világoszöld vonalak az 1 bites vezetékeket. [7]

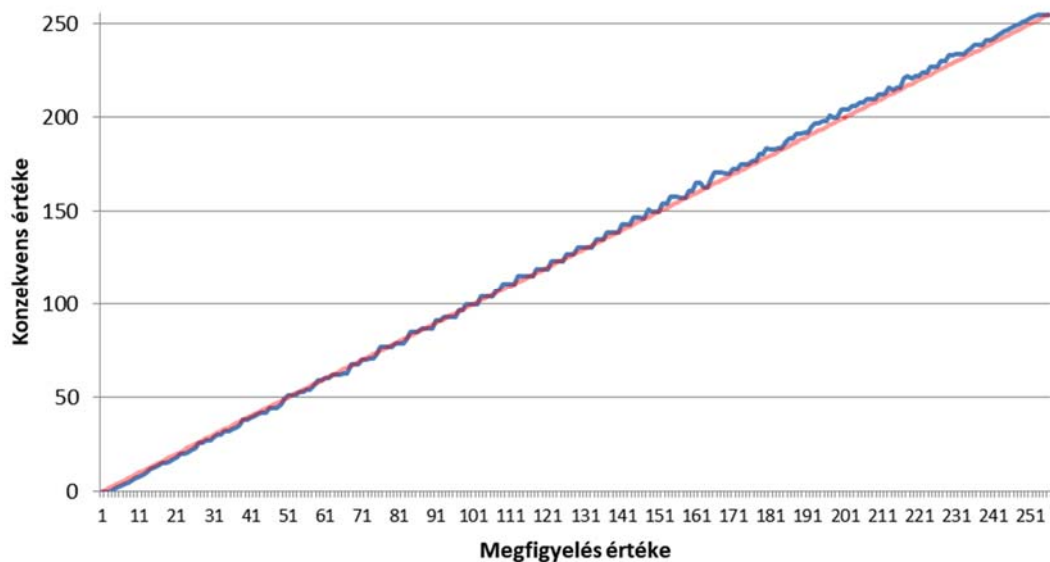
6. EREDMÉNYEK

A rendszer szimulációs eredményei a Xilinx Vivado 2018.1 verzióval kerültek előállításra. A teljes számítási lánc késleltetése 4 órajel (lásd 4. ábra), előjel nélküli egész számokkal képes működni. A maximális működési frekvenciája 4 MHz. A FIVE gyorsító képes pipeline működésre.



4. ábra A FIVE hardveres gyorsító késleltetése [7]

A FIVE gyorsító linearitási hibája az 5. ábrán látható. A szimuláció alapján a várt értéktől a legnagyobb abszolút értéke 6, amely a 8 bites tartományon 2,34%-nak felel meg. [7]



5. ábra A FIVE hardveres gyorsító linearitási hibája [7]

6.

ÖSSZEFOGLALÁS

A FIVE módszer FPGA-n történő használatához elkészült egy váz 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. A rendszerről részletes leírást a [7] cikk tartalmaz.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Universal Robots, "www.universal-robots.com," Tech. rep. 2020.
- [2] Hongwei Mo, Qirong Tang, and Longlong Meng, "Behavior-based fuzzy control for mobile robot navigation," *Mathematical problems in engineering*, vol. 2013, 2013.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Bartók, Roland, and József Vásárhelyi. "Design of a FPGA accelerator for the FIVE fuzzy interpolation method." *International Journal of Computer Applications in Technology* 68.4 (2022): 321-331.