



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

FPGA BASED IMPLEMENTATION OF MEMBERSHIP FUNCTIONS FOR REAL TIME FUZZY LOGIC APPLICATIONS

Fatih KARATAŞ
İsmail KOYUNCU

Murat ALÇIN
Afyon Kocatepe University

Murat TUNA
Kırklareli University

Abstract

In this study, FPGA-based triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership function units are designed for real-time Fuzzy Logic applications in accordance with the 32-bit IEEE-754-1985 floating-point number standard by referring to the mathematical model of triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership functions. The design was coded in VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) and synthesized using Xilinx ISE Design Suite program. Testbench files were created in order to test the designed units. The results obtained from this test data were compared with Matlab-based numerical results and error values were calculated. Following the Place&Route operation, the maximum operating frequencies of the units belonging to FPGA based triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership functions were obtained. After the Place&Route operation, the maximum operating frequency of FPGA based triangular membership function unit was achieved as 245.031 MHz, the maximum operating frequency of FPGA based trapezoidal membership function unit was obtained as 599.664 MHz and the maximum operating frequency of FPGA based generalized bell-shaped membership function unit was got as 185.086 MHz.

62

Keywords: Fuzzy Logic, Fuzzification, Membership Functions, FPGA, VHDL

GERÇEK ZAMANLI BULANIK MANTIK UYGULAMALARI İÇİN ÜYELİK FONKSİYONLARININ FPGA TABANLI GERÇEKLENMESİ

Özet

Bu çalışmada, gerçek zamanlı Bulanık Mantık uygulamaları için triangular (üçgen), trapezoidal (yamuk), generalized bell-shaped (genelleştirilmiş çan eğrisi) üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA-tabanlı üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language-Çok Yüksek Hızlı Tümleşik Devre Donanımı Tanımlama Dili) ile kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

testbench dosyaları oluşturulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri hesaplanmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Üçgen, Yamuk ve Çan eğrisi üyelik fonksiyonlarına ait ünitelerin maksimum çalışma frekansları elde edilmiştir. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Üçgen üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 245.031 MHz, Yamuk üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 599.664 MHz ve Çan eğrisi üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 185.086 MHz olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık, Bulanıklaştırma, Üyelik Fonksiyonları, FPGA, VHDL

GİRİŞ

Günümüzde, Bulanık Mantıkla ilgili araştırmaların odak noktası, kullanıcı konforunu en üst düzeye çıkarmak ve enerji tüketimini en aza indirmek için yenilikçi tahmin ve optimizasyon tekniklerinin sürekli olarak geliştirilmesidir. Bununla birlikte, kontrol doğruluğu ve hızı sistem performansına katkıda bulunan ancak araştırmacılar tarafından büyük ölçüde göz ardı edilen en kritik kısımlardan biridir (Khokhar vd., 2020). Bulanık mantık; bilgi tabanı, bulanıklaştırma, karar verme ve durulaştırma birimleri olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır (Elmas, 2003). Bulanıklaştırma ünitesi sistemden alınan denetim giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemi yapmaktadır. Bu ünite çeşitli üyelik fonksiyonları mevcut olup en yaygın kullanılan üçgen, trapezoidal (yamuk), generalized bell-shaped (genelleştirilmiş çan eğrisi), gauss ve sigmoidal üyelik fonksiyonlarıdır (Altaş, 1999). Kontrol doğruluğu ve hızını etkileyen parametrelerden birisi olan aktivasyon fonksiyonları bu çalışmada ele alınmış ve paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk üretim, yüksek kapasite gibi özellikleriyle diğer sayısal platformlara göre ön plana çıkan FPGA çiplerinde (Koyuncu, 2018) uygulanmak üzere tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bulanık Mantığın kullanıldığı bazı önemli uygulamalar; helikopterler için bulanık tabanlı uçuş desteği (Sugeno, 1985), raylı metro sistemlerinde bulanık mantık tabanlı sürüş rahatlığı, duruş mesafesinin kesinliğinin ve ekonomikliğinin geliştirilmesi (Yasunobu vd., 2002), el yazısı sembollerin çevrimiçi tanınmasında bulanık mantık uygulanması (Fitzgerald vd., 2004), hidroelektrik güç üniteleri için kullanılan baraj kapılarının otomatik kontrolü (Karaboğa vd., 2004), yapay sinir ağları ile birlikte bulanık mantık tabanlı ses tanıma sistemleri (Melin vd., 2006), sağlık alanında bulanık mantık tabanlı kanser teşhisi çalışmaları (Zadeh H., 2011), depremlerin önceden bilinmesi için bulanık mantık tabanlı tahmin sistemi (Dutta vd., 2012), stok değerlendirme ve portföy inşası için bulanık kural tabanlı uzman sistemler (Avcı ve Selim, 2013), bulanık mantık tabanlı biyomedikal sistemler (Patel vd., 2013), otomobiller için bulanık mantık kullanarak “Cruise-control” uygulamaları (Cholis vd., 2014), çelik sanayiinde makina hızı ve ısısının bulanık mantık tabanlı kontrolü (Singhala vd., 2014), bulanık mantık kullanılarak üretilen fotoğraf makineleri ve kameralar (otomatik odaklama yapan makinelerden daha net bir görüntü vermekte ve sarsıntılardan doğan görüntü bozukluklarını asgariye indirmektedir) (Fayaz ve



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

Kim, 2017) ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi strateji ile elektrikli ve hibrit araçların yakıt ekonomisinde artış (Danapalasingam vd., 2018) uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

FPGA tabanlı bazı bulanık mantık uygulamaları; robotik uygulamalar için gömülü bulanık denetleyicilerin FPGA tabanlı uygulaması (Sanchez-Solano vd., 2007), FPGA üzerinde bulanık mantık kullanılarak gerçek zamanlı dc motor hız kontrolü (Sulaiman vd., 2009), FPGA tabanlı gerçek zamanlı uyarlanabilir bulanık mantık denetleyicisi (Abu-Khudhair vd., 2010), harici analog-dijital dönüştürücü yokken boost dönüştürücü için tek girişli bulanık mantık denetleyicisinin FPGA uygulaması (Taeed vd., 2012), FPGA ve bulanık mantık kullanarak gerçek zamanlı akıllı konum izleme sistemi (Ferreira ve Santos, 2014), bulanık mantığa dayalı FPGA stereo eşleme uygulaması (Pérez-Patricio vd., 2016), çok yönlü robot sistemi için Bulanık-PI (açılımı yazılabilir) denetleyicisinin tasarımı ve FPGA uygulaması (Masmoudi vd., 2017), FPGA ile bulanık mantık tabanlı objektif görüntü kalitesi değerlendirmesi (Tchendjou vd., 2018), gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için gauss üyelik fonksiyonunun FPGA tabanlı tasarımı (Katırcıoğlu vd., 2018) ve iki eksenli güneş takibi için FPGA üzerinde bulanık mantık kontrolü (Cruz-Alejo vd., 2019) çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamalarında kullanılmak üzere üçgen, trapezoidal, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA-tabanlı tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarım VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla testbench dosyaları oluşturulmuş ve performans analizleri yapılarak çip istatistikleri sunulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri hesaplanmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı üyelik fonksiyonlarına ait ünitelerin maksimum çalışma frekansları elde edilmiştir.

64

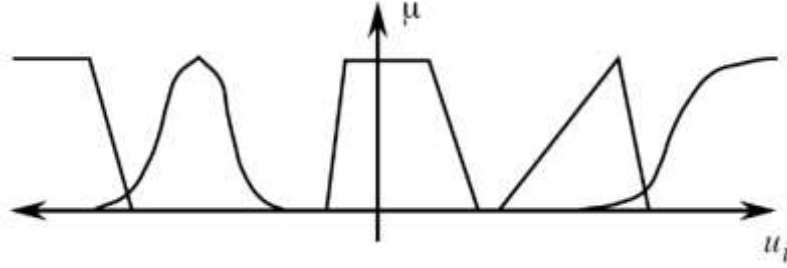
BULANIK MANTIK VE ÜYELİK FONKSİYONLARI

Bilgilerin nitelik özelliklerinin kompleks, modellenmesi güç, belirsiz veya kesin olmadığı durumlarda dilsel ifadelerle desteklenerek netleştirilmesi kavramına Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) denilmektedir (Klir ve Yuan, 1995). Bulanık denetleyici aşağıdaki dört öğeden oluşur: (Zadeh, 1965)

- *Bulanıklaştırma (Fuzzification)*, dışarıdan alınan gerçek sayısal bir değeri üyelik fonksiyonları tarafından dilsel ifadelerle dönüştürülmesi işlemidir. Uygulamalarda sıklıkla kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 1'de gösterildiği gibi Üçgen, Yamuk, Çan Eğrisi, Gauss ve Sigmoidal'dir (Elmas, 2003).



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ



Şekil 1. Bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyon tipleri

- *Durulaştırma (Defuzzification)*, bulanık çıkarım motoru ünitesinden aktarılan bulanık kümenin kesin bir değere dönüştürülmesi işlemidir. Sıklıkla kullanılan durulaştırma metotları ağırlık merkezi, en büyük üyelik ilkesi, ortalama en büyük üyelik, ağırlıklı ortalama, en büyüklerin en küçüğü ve en büyüklerin en büyüğü şeklindedir (Şen, 2012).
- *Bulanık kural tabanı (Rule-base)*, uzman kişinin bilgi, beceri kontrol stratejisini karakterize eden kontrol kurallarının dilsel olarak ifade edildiği kısımdır. Veri tabanındaki girişlerin çıkış değişkenleri ile mantıksal bağ kurulduğu “Eğer-İse (If-Then)” türünde yazılabilen kurallar bütünüdür (Kaur ve Kaur, 2009).
- *Bulanık çıkarım motoru (Inference mechanism)*, kurallar üzerinde bulanık mantık yürütülür ve bulanık kural tabanını kullanarak giriş ve çıkış uzayı arasında bir bağlantı kurar. Bu üniteye bilgi genellikle Mamdani ve Sugeno yöntemleri aracılığı ile modellenir (Lokman, 2011).

65

FPGA-TABANLI ÜYELİK FONKSİYONLARI TASARIMLARI

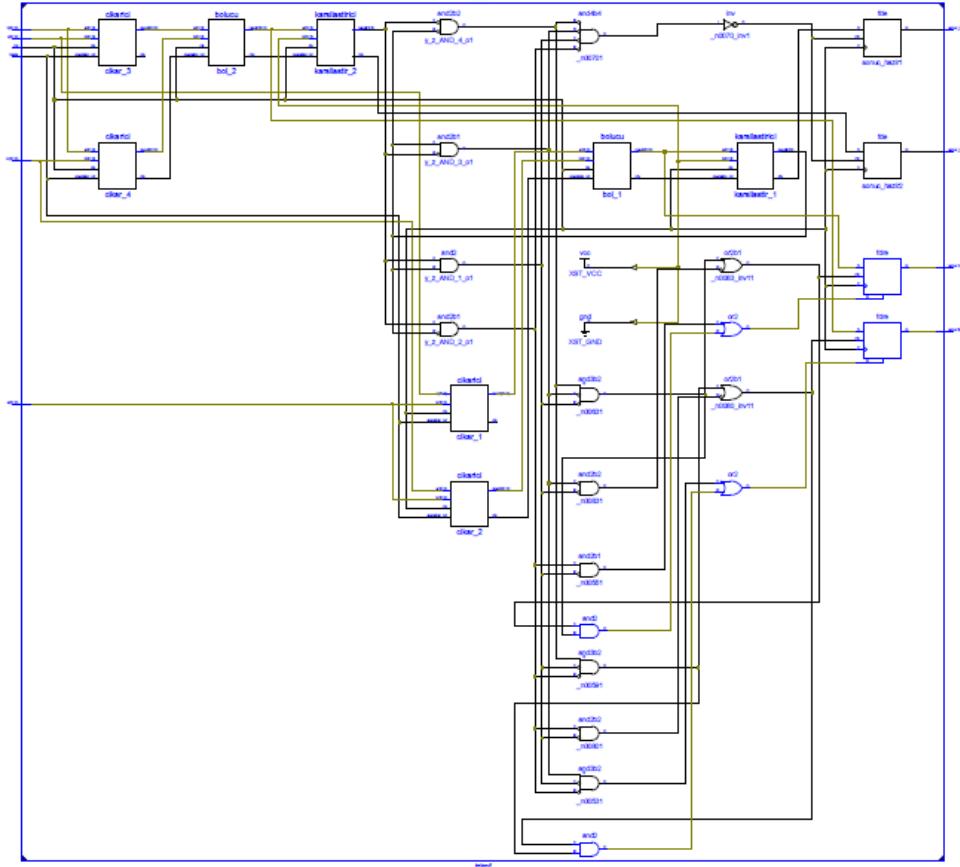
FPGA (Field Programmable Gate Array- Alan Programlanabilir Kapı Dizileri) çipleri ilk üretim aşamasından sonra kullanıcının istediği sistem tasarımına göre donanım yapısı kullanıcı/tasarımcı tarafından değiştirilebilen, tekrar tekrar programlanabilme özelliğine sahip dijital tüm-devrelerdir (Tuna vd., 2018). FPGA çiplerinde sıklıkla VHDL ve Verilog programlama dilleri ile tasarımlar gerçekleştirilmektedir. Bu çipler paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk üretim ve yüksek kapasite gibi özellikleriyle diğer sayısal platformlara göre ön plana çıkmaktadır (Alçın vd.,2016). Günümüzde yapay sinir ağları, osilatör tasarımı, uzay, havacılık ve savunma sanayi, ses, otomotiv, video ve görüntü işleme ASIC gibi amaca özel tasarlanmış entegre prototiplerinde ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Koyuncu vd., 2018).

Bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için üçgen, yamuk, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı (floating point number) standardına uygun FPGA-tabanlı üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite 14.7 programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin en üst seviye RTL şemaları ve ikinci seviye RTL şemaları çıkartılmıştır (Katırcıoğlu vd., 2018). FPGA-tabanlı üçgen üyelik fonksiyonuna ait ikinci seviye RTL şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.



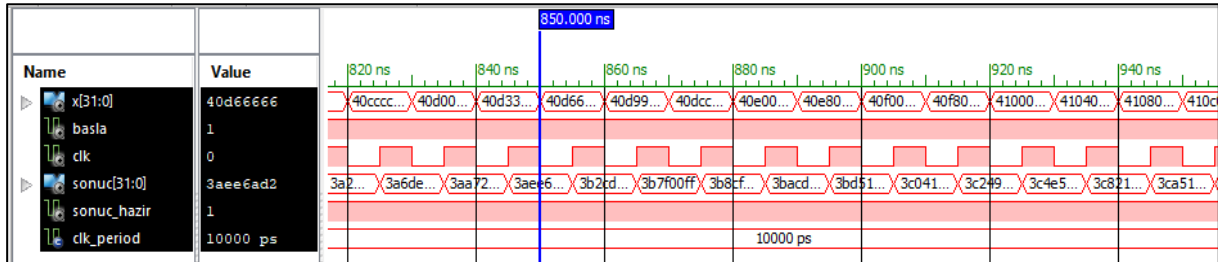
3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

Örnek sunulan RTL şemasında görüldüğü üzere ünite 32-bit a , b , c , d , x giriş ve 32-bit $sonuc1$, $sonuc2$, $sonuc3$ çıkış sinyallerine sahiptir. Ünitelerin çalışmaya başlayabilmesi için $basla$ giriş sinyal değeri '1' olmalıdır. 1-bit clk sinyali ünite içerisindeki alt birimlerin senkron bir şekilde çalışabilmesi için kullanılmaktadır. Ünite ilk sonucunu üretmeye başlamadan önce $sonuc_hazir$ sinyali '0' olmaktadır. Ünite sonucunu ürettiği durumlarda $sonuc_hazir$ sinyal değeri '1' olmaktadır.



Şekil 2. Üçgen üyelik fonksiyonunun ikinci seviye RTL şeması

Yapılan FPGA-tabanlı üyelik fonksiyonlarının test edilebilmesi amacı ile toplamda 105 adet test verisi oluşturulmuştur. Bu test verileri öncelikle nümerik olarak işlenmiştir. Ardından Xilinx ISE Design Suite 14.7 programı kullanılarak testbench dosyaları oluşturulmuştur. Her bir üyelik fonksiyonu için Xilinx ISE Design Suite programından test sonuçları elde edilmiştir. Örnek olarak Genelleştirilmiş Çan Eğrisi üyelik fonksiyonunun test sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Genelleştirilmiş Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonunun Test Sonuçları



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

SONUÇLAR

Sunulan bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA-tabanlı üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL ile kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla toplam 105 adet test verisi ile 6 ayrı testbench dosyası oluşturulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri maksimum 6.4×10^{-5} olarak elde edilmiştir. Bu test verileri kullanılarak nümerik tabanlı üyelik fonksiyonu ünitelerinin veri işleme hızı ile FPGA-tabanlı üyelik fonksiyonu ünitelerinin veri işleme hızı karşılaştırılmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Üçgen üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 245.031 MHz, Yamuk üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 599.664 MHz ve Çan eğrisi üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 185.086 MHz olarak elde edilmiştir.

TARTIŞMA

Bu çalışmada Bulanık Mantık Kontrolcüsünde bulunan Bulanıklaştırıcı ünitesindeki üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonları FPGA çiplerinde uygulanmak üzere modellenmiştir. İleriki çalışmalarda FPGA üzerinde gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları gerçekleştirebilmek amacıyla bulanık çıkarım motoru ve durulaştırma üniteleri gerçekleştirilebilir.

67

REFERANSLAR

- Abu-Khudhair A, Muresan R, Yang SX 2010. FPGA based real-time adaptive fuzzy logic controller. IEEE International Conference on Automation and Logistics, Hong Kong and Macau, 2010, pp. 539-544.
- Alçın M, Pehlivan İ, Koyuncu İ 2016. Hardware design and implementation of a novel ANN-based chaotic generator in FPGA. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 127(13), 5500-5505.
- Avcı MG, Selim H 2013. A fuzzy rule based expert system for stock evaluation and portfolio construction: An application to Istanbul Stock Exchange. Expert Systems with Applications 40(3):908-920
- Cholis N, Kuspriyanto K, Saefudin D, Nugraha IK 2014. Developing Adaptive Cruise Control Based on Fuzzy Logic Using Hardware Simulation. International Journal of Electrical and Computer Engineering 4(6)
- Cruz-Alejo J, Antonio-Méndez R, Salazar-Pereyra M 2019. Fuzzy logic control on FPGA for two axes solar tracking. Neural Comput & Applic 31, 2469-2483
- Danapalasingam KA, Sabri MFM, Rahmat MF 2018. Improved Fuel Economy of Through-the-Road Hybrid Electric Vehicle with Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy. International Journal of Fuzzy Systems 20(8)
- Dutta P, Mishra OP, Naskar MK 2012. Decision analysis for earthquake prediction methodologies: fuzzy inference algorithm for trust validation. International Journal of Computer Applications 45:13-20
- Elmas Ç 2003. Bulanık mantık denetleyiciler. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Fayaz M, Kim D 2017. An Effective Control Method of IP Camera Based on Fuzzy Logic and Statistical Moments. International Journal of Control and Automation 10(4):97-108



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

- Ferreira JAF, Soares dos Santos MP 2014. Novel intelligent real-time position tracking system using FPGA and fuzzy Logic. ISA Transactions, Volume 53, Issue 2, Pages 402-414, ISSN 0019-0578
- Fitzgerald JA, Geiselbrechtlinger F, Kechadi T 2004. Application of fuzzy logic to online recognition of handwritten symbols. Conference: Frontiers in Handwriting Recognition, 2004. IWFHR-9 2004. Ninth International Workshop on.
- Karaboğa D, Bağış A, and Haktanır T 2004. A new method for reservoir control of dams. Hydrological Processes, Vol. 18/13, pages 2485- 2501.
- Katircioğlu F, Koyuncu İ, Kelek MM, Oğuz Y, Şen M 2018. FPGA-Based Design of Gaussian Membership Function for Real-Time Fuzzy Logic Applications. Conference: V. International Multidisciplinary Congress Of Eurasia At: Barcelona, Spain.
- Kaur DA, Kaur K 2009. Fuzzy expert systems based on membership functions and fuzzy rules. IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, AICI'09. Vol. 3, pp. 513-517.
- Khokhar S, Peng Q, Asif A, Noor MY, Inam A 2020. A Simple Tuning Algorithm of Augmented Fuzzy Membership Functions. IEEE Access, vol. 8, pp. 35805-35814
- Klir GJ, Yuan B 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications, Prentice Hall.
- Koyuncu İ 2018. Implementation of High Speed Tangent Sigmoid Transfer Function Approximations for Artificial Neural Network Applications on FPGA. Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.18, no.3, pp.79-86
- Koyuncu İ, Tuna M, Alçın M 2018. FPGA tabanlı farklı nümerik algoritmalar ile kaotik osilatör tasarımları. International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology. November 22-23, 2018 Ankara, Turkey.
- Lokman G 2011. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ile Bulanık Kontrolör Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp.36-37.
- Masmoudi MS, Krichen N, Koesdwiady AB, Karray F, Masmoudi M 2017. Design and FPGA Implementation of a Fuzzy-PI Controller for Omnidirectional Robot System. In: Kim JH, Karray F, Jo J, Sincak P, Myung H (eds). Robot Intelligence Technology and Applications 4. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 447. Springer, Cham
- Melin P, Urías J, Castillo O 2006. Voice Recognition with Neural Networks, Type2 Fuzzy Logic and Genetic Algorithms. Engineering Letters 13(2):108-116
- Patel A, Gupta SK, Rehman Q, Verma MK 2013. Application of Fuzzy Logic in Biomedical Informatics. Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. Vol. 4, No. 1, ISSN 2079-8407
- Pérez-Patricio M, Aguilar-González A, Arias-Estrada M, Hernández-de León H, Camas-Anzueto J 2016. An FPGA stereo matching unit based on fuzzy logic. Microprocessors and Microsystems: Embedded Hardware Design (MICPRO), 42, pp.87-99.
- Sanchez-Solano S, Cabrera AJ, Baturone I, Moreno-Velo FJ, Brox M 2007. FPGA Implementation of Embedded Fuzzy Controllers for Robotic Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 4, pp. 1937-1945
- Singhala P, Shah DN, Patel B 2014. Temperature Control using Fuzzy Logic. International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS) Vol.4, No.1
- Sugeno M 1985. An introductory survey of fuzzy control. Information sciences, 36(1-2), 59-83.
- Sulaiman N, Obaid ZA, Marhaban MH, Hamido MN 2009. FPGA-Based Fuzzy Logic: Design and Applications- a Review. IACSIT International Journal of Engineering and Technology Vol.1, No.5, ISSN: 1793-8236
- Şen Z 2012. Fuzzy Philosophy of Science. Journal of Higher Education and Science, 2, 20-24.



3.ULUSLARARASI ASYA MODERN BİLİMLER KONGRESİ

- Taeed F, Salam Z, Ayob S 2012. FPGA Implementation of a Single-Input Fuzzy Logic Controller for Boost Converter With the Absence of an External Analog-to-Digital Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 1208-1217
- Tchendjou GT, Simeu E, Alhakim R 2018. Fuzzy logic based objective image quality assessment with FPGA implementation. Journal of Systems Architecture, Volume 82, Pages 24-36, ISSN 1383-7621
- Tuna M, Koyuncu İ, Alçın M 2018. Fixed and Floating point-Based High-Speed Chaotic Oscillator Design with Different Numerical Algorithms on FPGA. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 7, Issue 7, ISSN: 2278 – 8875
- Yasunobu S, Miyamoto S, Ihara H 2002. A Fuzzy Control for Train Automatic Stop Control. Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.E-2, No.1, 1/9
- Zadeh HG 2011. Diagnosing Breast Cancer with the Aid of Fuzzy Logic Based on Data Mining of a Genetic Algorithm in Infrared Images. Middle East Journal of Cancer 3(4):119-129
- Zadeh LA 1965. Fuzzy Algorithms. Information and Control, 8, 338-353.