

FPGA Tabanlı Üç Eksenli Robot Kol KontrolüAbdülkadir ÇAKIR¹, Faruk AYATA^{1,2}¹ Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Isparta² Yüzüncü Yıl Üniversitesi Başkale Meslek Yüksekokulu Van
farukayata@yyu.edu.tr

Özet: Teknolojideki hızlı gelişmelere paralel olarak yeniden yapılandırılabilir mimarilere olan ihtiyaç artmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array-FPGA) adında sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler binlerce kapıdan oluşmakta, paralel işlemlere ve karmaşık sistemlerin yeniden programlanabilir mimariler ile gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır.

Tasarımcılar için esnek bir platform sunan FPGA'lar günümüzde popüler hale gelmiştir. FPGA'ların en önemli uygulama alanları; görüntü işleme, telekomünikasyon, tıbbi görüntüleme ve otomotiv sanayi sayılabilir. Bu çalışmada FPGA mimarisi ile endüstriyel işlerde kullanılan bir robot kolun kontrolü sağlanmıştır. Yapılan uygulama bilgisayardan bağımsız bir sistem olduğundan robot kolunun kontrol kartına ihtiyaç duyulmaksızın FPGA, PWM (Pulse-Width Modulation) üretici olarak kullanılmıştır. Bu sayede kontrol kartının bilgisayar sistemlerine olan bağımlılığı ortadan kaldırılmıştır. Bu kapsamda robot kol üzerinde bulunan beş adet servo motor FPGA geliştirme kartı üzerindeki anahtarlar kullanılarak açılarının değiştirilebildiği bir uygulama geliştirilmiştir.

Tasarlanan robot koldaki servo motorların, FPGA üzerindeki GPIO (General Purpose Input Output) birimine bağlantıları yapılmış ve Verilog HDL (Hardware Description Language) kodu yazılarak servo motorların dönüş yönü ve açısı belirlenip board üzerindeki anahtarlar aracılığıyla robot kolun hareketi sağlanmıştır.

Son olarak Verilog donanım tanımlama dili kullanılarak hazırlanan kod parçaları birleştirilip işlevsel bir modül haline getirilmiştir. Bu modüller kullanılarak board üzerindeki switchlerin her bir bitlik hareketiyle robot kola 9°'lik bir açı yaptırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: FPGA, HDL, Servo Motor, GPIO birimi.

FPGA Based Three–Axis Robot Arm Control

Abstract: The need of reconstructive architectures is increasing in accordance with the fast technological developments. The systems named FPGA were improved along with these needs. FPGA consists of thousands of gates, and enables complex systems to be formed through reprogrammable architectures.

Today, FPGAs that provides designers with a flexible platform have become popular. The most important areas of usage are image processing, telecommunication, medical imaging and auto-industry. In this study, the control of a robotic arm that is used in industrial work is provided along with FPGA architecture. Since this application runs independently from the computers, it has been used as the FPGA, PWM (Pulse-Width Modulation) generator without having resorted to the robotic arm's control card. Thus, control cards' dependence on computer systems is removed. Within this scope, an application has developed to be able to change the angles through usage of the buttons on the five of servo motor FPGA development cards that are placed on the robotic arm.

Servo motors on the robotic are connected to the GPIO (General Purpose Input Output) unit on FPGA, and Verilog HDL (Hardware Description Language) is coded, servo motors' direction of rotation and angle are determined and the robotic arm is enabled to move through the buttons on the board.

Finally, bits of codes prepared using Verilog definition language are united and turned into a functional module. Using these modules, robotic arm is forced to move an angle of 9 degrees through one-bit- motion of switches on the board.

Keywords: FPGA, HDL, Servo Motor, GPIO unit.

Giriş

Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Arrays, FPGA) serbest olarak programlanabilen mantık-yapı taşları olarak tanımlanabilir. FPGA'lar yeni ürünlerin fonksiyonlarını simule edebilirler. Mevcut anahtarlama sistemlerini taklit ederek mikro işlemcilerin fonksiyonlarını üstlenebilirler. Tipik bir FPGA birçok mantık hücresi içerir (Brown, 1993). İstenildiği takdirde bu hücrelerin her birine belli fonksiyonlar atanabilir. Bu hücrelerin tamamı bir matris üzerinde yer alan bağlar ve programlanabilir hücreler ile birbirlerine bağlanırlar. İşlem hızları oldukça yüksektir ve çok ucuza mal edilmektedirler.

Son yıllarda geleneksel tahrik sistemlerinin yerini programlanabilme ve hassas hareket kontrolü gibi özelliklere sahip servo ve adım motorları almaya başlamıştır. Servo motorlar, geri beslemeli, yüksek hassasiyet ve tork kapasiteli motorlardır. Bu yönüyle robot projelerinde çok kullanılmaktadır. Robot teknolojilerinin en popüler alt sınıflarından biride robot kollarıdır. Günümüzde hemen hemen her fabrikanın üretim bandında insanların yerini robot kollar almaktadır (Güzel, 2008).

Hız ve maliyet avantajları göz önüne alındığında FPGA'lar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan bir kaç; Toker (2012), Rüzgâr türbinleri üzerinde FPGA tabanlı – GPRS haberleşme protokollü uygulaması ve benzetimi gerçekleştirmiştir. Peker (2013), FPGA geliştirme kartı üzerinde üç farklı veri gizleme örneği gerçekleştirmiş ve uygulama sonuçları LCD ekran üzerinde göstermiştir. Yıldız (2013), full-HD 1080p@60 video görüntülerini işleyebilen gelişmiş bir gerçek zamanlı sayısal CNN (Cellular Neural Networks- Hücresel Sinir Ağları) mimarisi önermiştir, VHDL dilinde kodlamış ve iki farklı FPGA üzerinde gerçekleştirmiştir. Tuncer (2013), otonom bir gezgin robot için yol bulma problemi Genetik Algoritmalar (GA) kullanılarak çözmüştür ve bir

bilgisayar üzerinde çalıştırılan GA, daha sonra FPGA üzerinde donanımsal olarak gerçekleştirmiştir. Temür (2013), Yapay Sinir Ağları (YSA)'ların otomatik olarak FPGA çipine uygulanması için bir denetleyici tasarım aracı olan ANNCNT (Artificial Neural Network Controller) ve var olan YSA veri yolu ile birleştirerek YSA sistemini oluşturan ANNSYS (Artificial Neural Network System) geliştirmiştir. Az (2014), iki farklı noktada bulunan kullanıcılar arasında şifreli mesaj, resim ve ses verisi gönderip alabilen düşük güçlü ve maliyet-etkin FPGA tabanlı kablosuz haberleşme sistemi tasarımı yapmıştır.

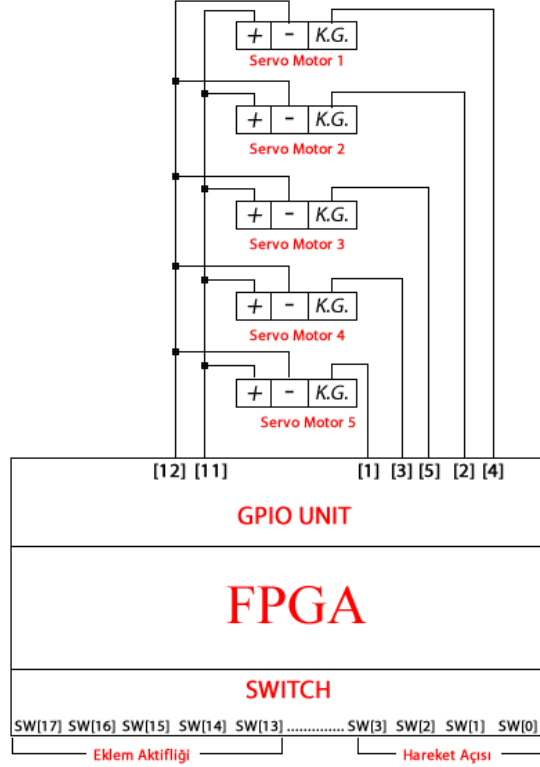
Bu çalışmada, süper bilgisayarların yapılmasına imkân tanıyan FPGA mimarisi ile endüstriyel işlerde kullanılan, beş adet servo motorun bağlı olduğu, bir robot kolun kontrolü Verilog donanım tanımlama dilinde yazılan programla gerçekleştirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Yapılan çalışmada iki ayrı işlem basamağı uygulanmıştır. Bunlar;

- Mekanik kol tasarımı
- Robot kolun kontrolünde kullanılan, sürücü yazılımının hazırlandığı Quartus II derleyicisinin kullanımı.

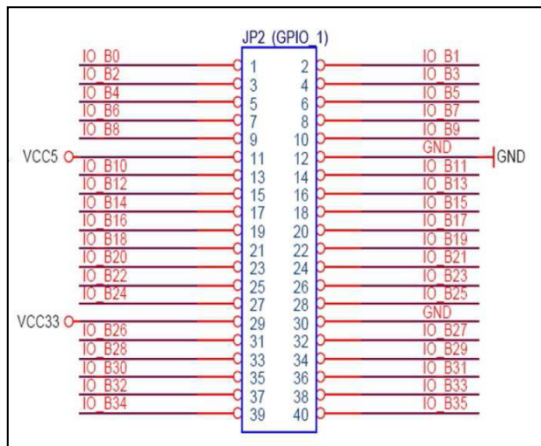
Robot kol sistemi: Gövde, kol ve bileğin fiziksel olarak inşa edilmesi ile ilgilidir. Robot kol beş işlevsel ekleme sahiptir. Bunlar sırasıyla taban, omuz, dirsek, bilek ve tutaçtır. Robot kolun yerel koordinat sistemi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 4. Gerçekleştirilen sistemin blok şeması

Gerçekleştirilen sistemde servo motor üzerindeki güç, toprak ve kontrol kabloları Altera DE2-115 Eğitim Boardunun GPIO birimlerine bağlanmıştır. Board üzerindeki GPIO birimi Şekil 5’de gösterilmiştir. Board üzerinde iki adet GPIO birimi

bulunmaktadır ve her GPIO biriminde bir adet 5 V, bir adet 3.3 V, iki adet toprak ve otuz beş adet giriş/çıkış birimi olmak üzere toplamda kırk adet bağlantı ucu bulunmaktadır.

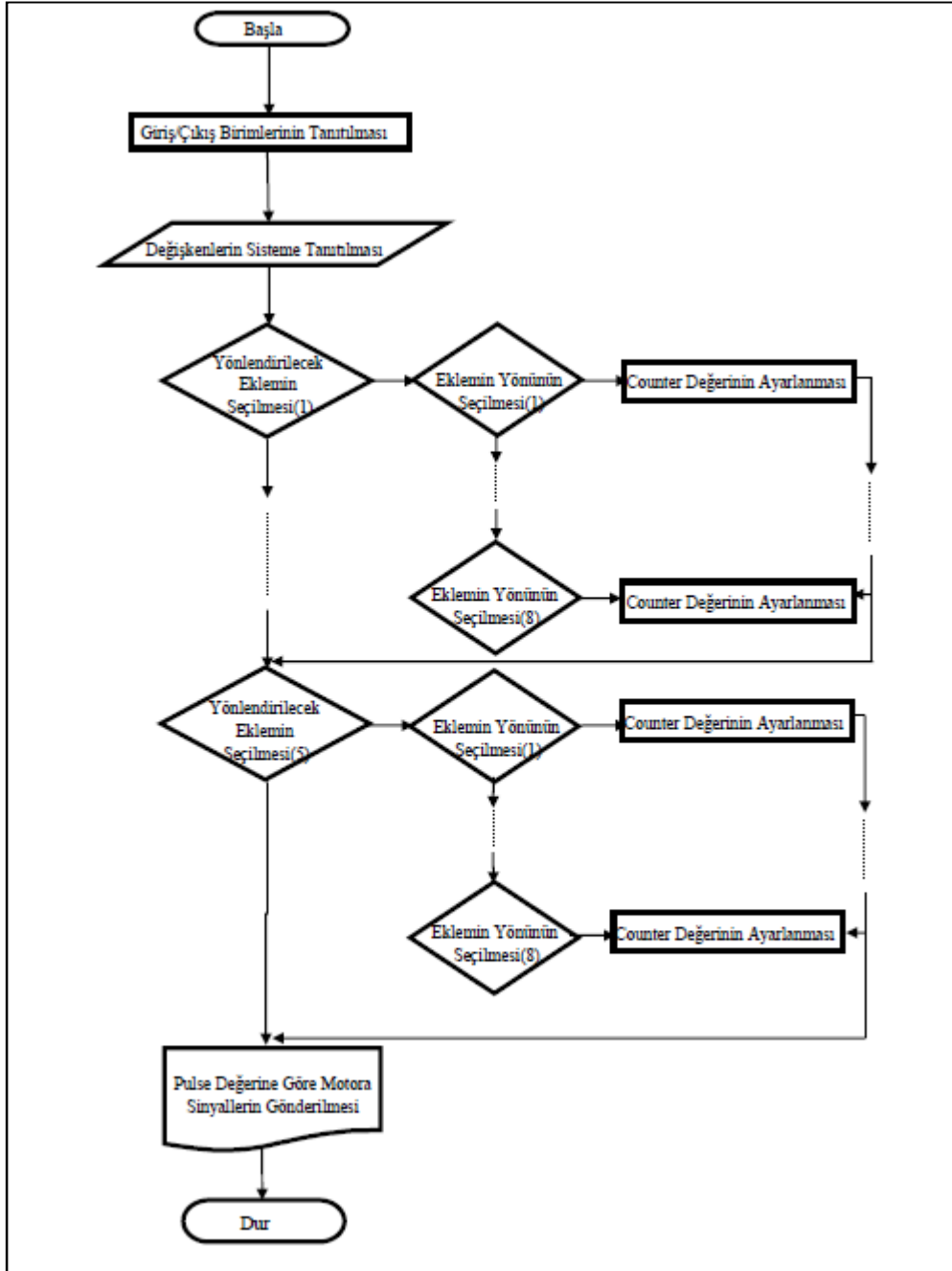


Şekil 5. Altera DE2-115 GPIO birimi

Gerçekleştirilen robot kol üzerinde kullanılan beş adet servo motorun güç ve toprak bağlantıları GPIO birimlerine paralel olarak yapılmıştır. Üç adet servo motoru paralel bağlayıp birinci GPIO birimine takarken bu motorlara ait kontrol uçlarının da aynı GPIO birimine bağlandığına dikkat edilmelidir. Kontrol sinyalinden gelecek olan PWM (PulseWidthModulation- Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyaline göre güç değeri ayarlanır ve motorun dönmesi sağlanır.

Robot kol sürücü devresi yazılımının hazırlanması: Hazırlanan yazılımın akış şeması Şekil 6’da gösterilmiştir. Gerçekleştirilen sistemin çalışmasına yönelik işlem basamakları şunlardır:

- Giriş – Çıkış birimlerinin tanıtılması,
- Kullanılacak değişkenlerin sisteme tanıtılması,
- Hangi motorun (eklemin) çalışacağını belirlenmesi,
- Seçilen motorun (eklemin) kaç derece açıyla, hangi yöne döneceğinin belirlenmesi,
- Dereceye göre sayaç değerinin belirlenip fonksiyona gönderilmesi,
- Üretilen pulsa göre motorun döndürülmesi (robot kolun hareketi) sağlanır.



Şekil 6. Robot kol sürücü devresi programının akış şeması

Robot kol tasarımında kullanılan servo motorların pozisyon kontrolü için PWM kullanılmıştır. PWM sinyal periyodu 20 ms, DutyCycle'ı (çalışma aralığı) ise 1 ile 2 ms arasında değişmektedir. 1 ms ve 2 ms motorun en son pozisyonlarını, 1,5 ms ise merkez pozisyonunu gösterir. Çizelge 1'de 1ms-2 ms servo motorların darbe sürelerine göre açıları gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1-2 msservo motorların darbe sürelerine göre açıları

Süre (ms)	Açı (derece)
1,0	135
1,1	126
1,2	117
1,3	108
1,4	99
1,5	90
1,6	81
1,7	72
1,8	63
2,0	45

Altera DE2-115 Eğitim Boardunda 50 MHz'lik sinyal kullanılmıştır. PWM oluşturmak ve servoyu kontrol edebilmek için 20 ms periyoda sahip bir sinyalin üretilmesi gerekecektir. Altera DE2-115 Eğitim Boardunda çıkış 50 MHz (20 ns) olduğundan, CLOCK_50 sinyal çıkışını oluşturulması gereken periyot değerine oranı eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$\text{Sayaç Değeri} = \frac{20 \text{ ms}}{20 \text{ ns}} \quad (1)$$

Gerekli olan sinyali oluşturabilmek amacıyla eşitlik 1'in sonucuna göre 1.000.000'a kadar sayacak bir sayaç değeri gerekecektir. Servo motor 20 ms periyoda sahip bir sinyali 0,5 ms ve 2,5 ms'lik görev süreleri ile sürebilir. Bu değerler aşağıdaki kod bloğuyla bulunmuştur.

```
case(SW[8:0])
9'b0:pulse_width5<=32'd50000;
9'b1:pulse_width5<=32'd55000;
9'b10:pulse_width5<=32'd60000;
9'b11:pulse_width5<=32'd65000;
```

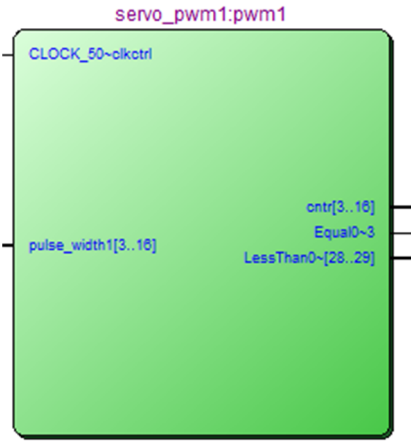
```
9'b100:pulse_width5<=32'd70000;
9'b101:pulse_width5<=32'd75000;
9'b110:pulse_width5<=32'd80000;
9'b111:pulse_width5<=32'd85000;
9'b1000:pulse_width5<=32'd90000;
9'b1001:pulse_width5<=32'd100000;
endcase
```

Bu kod bloğunda case ile 9 adet switchin ilk dört bitini değiştirerek pulse_width değerlerinin ne olacağı yazılmıştır. İlk 9 switch kapalı durumda iken (0000_0000_00) pulse_width değişkenine 32 bitlik decimal 50.000 sayısı atanmıştır. Böylelikle periyodu 1 ms'lik bir pulse üretilir. Aynı teknikte gönderilmiş decimal değerler ile 1 ms ile 2 ms'lik pulseler elde edilmiş olur.

Yazılan aşağıdaki kod bloğu ile 32 bitlik bir cntn tanımlanmıştır. Başlangıç değeri olarak 0 ataması yapıldıktan sonra sayaç bir bit artırılarak sayacın tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra result çıkışı daha önce 3 bitlik switchlerin ON/OFF durumlarına göre pulse_width'in sabit değerlerine ve cntn değişkenine atanmıştır. Buradaki amaç cntn sayarken switchlerden girdiğimiz bitlerle pulse_width değerlerini cntn değişkeninin o andaki değeriyle karşılaştırmaktır. Pulse_width değerleri servonun istenilen konuma gelmesi için gerekli olan 1 ms ve 2 ms'lik sinyalleri üretmeyi sağlayacaktır.

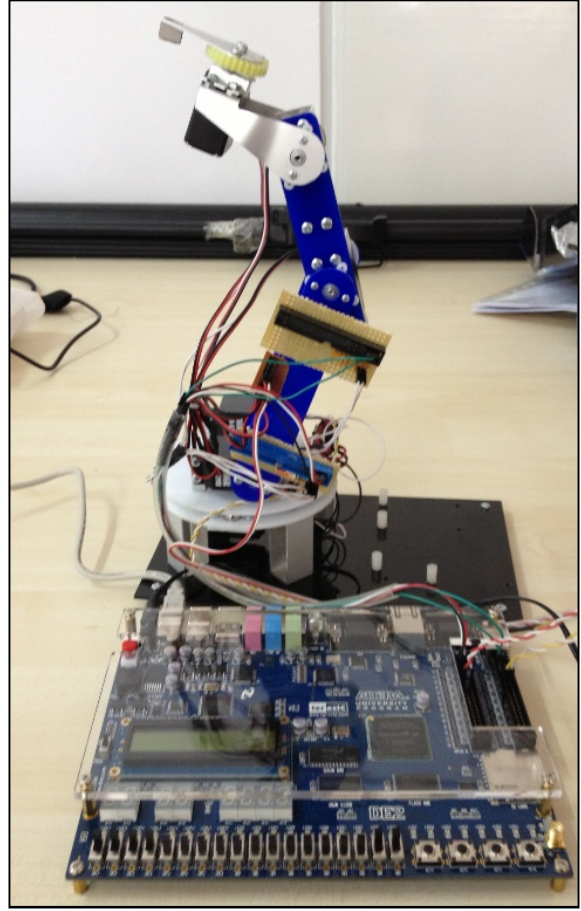
```
always@(posedgeclk)
begin
if(cntn == 32'd999_999)
begin
cntn<= 32'd0;
end
else
begin
cntn<= cntn + 32'b1;
end
end
assignresult = cntn< pulse_width1;
endmodule
```

Bir adet servo motoru sürmek için gerekli modül (Şekil 7) hazırlanıp compile edildikten (hatalardan arındırıldıktan) sonra servo motor üzerindeki kabloları Şekil 5’de gösterilen GPIO birimlerine bağlanır. Servo motorun faz kablosu GPIO birimi üzerindeki 11. veya 29. bacaklardan birine, nötr kablosu GPIO birimi üzerindeki 12. veya 30. bacaklardan birine ve kontrol sinyali kablosu ise Şekil 4’de belirtilen bacağına bağlanarak iletişime hazır hale getirilir.



Şekil 7. Servo motor için hazırlanan servo_pwm1 modülü

Çalışmanın yazılım kısmı Altera firmasının ürettiği Quartus II derleyicisinde donanım tanımlama dillerinden biri olan Verilog kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan yazılım Altera DE2-115 Eğitim Boarduna yüklendikten sonra board üzerindeki switchler yardımıyla robot kolun hareketi sağlanır. Altera DE2-115 Eğitim Boardu üzerinde on sekiz adet switch bulunmaktadır. Bu switchlerden son beşi robot kol üzerindeki eklemlerden hangisinin aktif olacağını belirlemektedir, ilk dördü ise seçilen eklemden servo motorun kontrolünde kullanılmaktadır. Tasarlanan sistem Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Tasarlanan sistemin genel görünümü

Sonuç

FPGA’lar hızlı işlem gerektiren uygulamalarda ve paralel işlem gerektiren özel işlemler için kullanılmaktadır. Bu çalışmada dijital haberleşme, network ağları, video ve resim işleme gibi alanlarda, yüksek performans sağlayan FPGA mimarileri ile robotik sistemlerinde çok kullanılan servo motorların kontrolü sağlanmıştır. Servo motorun sürücü devresi olarak Altera DE2-115 Eğitim Boardu kullanılmıştır. Sürücü devresi için gerekli olan yazılım Verilog donanım tanımlama dili kullanılarak Quartus II derleyicisinde hazırlanmıştır.

Verilog donanım tanımlama dilinde bir servo motor için hazırlanan sistem modül haline getirilerek beş servo motor için uygulanabilir hale getirilmiştir. Robot kol, FPGA boarduna bağlandıktan sonra board

üzerindeki switchlerin her bir bitlik hareketiyle 9°'lik açı yapması sağlanmıştır.

Robot bilimi; Endüstriyel, Makine, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar bilimlerini kapsayan geniş bir alanda çalışmayı gerektirmektedir. Bu tez ile servo motorlar, robot kollar ve FPGA mimarisi konusunda temel bilgi ve beceriler edinilmiştir. Edinilen bu tecrübeler ışığında; FPGA mimarilerini kullanarak ileride yapılacak çalışmalarda makine mühendisliği ile işbirliğine gidilerek daha işlevsel veya daha çok eksenli mekanik düzeneklerledaha ileri düzey robot kollar tasarlanabilir.

Kaynaklar

- Brown, S. D., Rose, J., Vranesic, Z.G., (1993) A Stochastic Model to Predict the Routability of Field-Programmable Gate Arrays. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on Volume 12.
- Güzel, S.M., 2008. Altı Eksenli Robot Kolun Hareketsetel Karakteristiğinin Görsel Programlanması ve Gerçek Zamanlı Uygulamalar. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Ankara.
- Az, I., 2014, FPGA Tabanlı Şifreli Kablosuz Haberleşme Sistemi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinler Arası Programlar Anabilim Dalı Savunma Teknolojileri Programı, Yüksek Lisans Tezi, 81s, İstanbul.
- Temür, G., 2013, Yapay Sinir Ağlarının Otomatik Olarak FPGA Çipine Uygulanması İçin Denetleyici Tasarım Aracı, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Düzce.
- Tuncer, A., 2013, Otonom Araçlar İçin Yol Bulma Probleminin Genetik Algoritmalar Ve FPGA ile Çözümü ve Gerçekleştirilmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 141s, Kocaeli.
- Yıldız, N., 2013, Bir Hüresel Sinir Ağı Emülatörünün Tasarlanması ve FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 79s, İstanbul.
- Yılmaz, E., 2013, FPGA ile Veri Gizleme Uygulamaları, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Bursa.
- Toker, K., 2012, Değişken Hızlı Rüzgâr Enerji Çevrim Sisteminin Yenilikçi FPGA Kontrol Uygulaması, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 218s, İzmir.