

# FPGA TABANLI 5 EKSENLİ MOBİL ROBOT KOLU TASARIMI VE UYGULAMASI

Hasan KARCI<sup>1</sup>, Ali TANGEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü - Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Kocaeli Üniversitesi

hsnkarci06@hotmail.com

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi - Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Kocaeli Üniversitesi

atangel@kocaeli.edu.tr

## Özet

Bu çalışmada mobil arabanın üzerine yerleştirilmiş 5 eksenli robot kolu ile cisimleri ultrasonik sensör aracılığı ile tanıyıp boyutlarına göre ayırt edebilen bir mobil robot kolu sistemi gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik sensörden alınan veriye göre mobil aracın hız ve konum kontrolü ile robot kolunun konum kontrolüne ait sayısal tasarım tek bir FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mobil robot kolu üzerindeki DC motor ve DC-servo motorların sürücü devreleri ayrıca tasarlanarak, motorların hız ve konum kontrolü VHDL kodu ile oluşturulan PWM sinyalleri aracılığıyla sağlanmıştır. Bu çalışmada PWM sinyallerini üretmede frekans bölme tekniği kullanılmıştır. FPGA'nın paralel işlem yapabilme yeteneği yardımıyla mobil robot kolu üzerindeki ünitelerin aynı anda durumları kontrol edilebilmektedir. VHDL ile oluşturulan kod Modelsim simülasyon programı aracılığıyla test edilmiştir. Testte istenilen sonuçlar elde edilerek, yapılan tasarım Xilinx ISE paket programı aracılığı ile Spartan-3 FPGA geliştirme kiti üzerinde gerçekleştirildi. FPGA geliştirme kiti, gerçekleştirilen mobil robotun donanımının bir parçası olarak üzerine monte edildi. Mobil robot kolunun beklenen tüm işlevlerini sorunsuz bir şekilde yerine getirdiği testlerle gözlemlendi.

## Abstract

In this study, A mobile 5-DOF robot arm, which can distinguish objects according to their dimensions using an ultrasonic sensor module is designed and implemented. Digital hardware design of speed and position control of the vehicle carrying the robot arm and the position control of the robot arm is implemented on a single FPGA chip. The driver circuits of the DC motors and the RC motors mounted on the mobile robot arm system are also realized, and the motor speed and position controls are handled through the PWM signals obtained by a specific VHDL module. Frequency division technique is used to produce the PWM signals. The concurrent controls of the units mounted on the arm are possible due to parallel execution ability of FPGAs. Modelsim program is used for VHDL code

simulations. Then, the real FPGA implementations are done on a Spartan-3 FPGA evaluation board using Xilinx ISE tools. This evaluation board is also mounted on the vehicle as a part of the mobile robot arm system. The test results show that the robot arm is able to accomplish all expected functions successfully.

## 1. Giriş

Günümüz teknolojisinde robotların önemi giderek artmakta ve birçok endüstriyel, askeri ve diğer uygulamalarda insanın yerini almaktadır. Robotlar, özellikle robot kolları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Robotların çalışabilmesi için elektronik bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu elektronik sistem içerisinde genelde işlemci, algılayıcılar ve sürücü devreleri yer alır. Donanımın genel hatlarını değiştirmeden sistemin güncellenmesi maliyeti oldukça düşürür. Maliyetin yanında zaman tasarrufu için hızlı yazılım ve donanım adaptasyonu gereklidir. Geleneksel devre tasarımında herhangi bir uygulamada kullanılacak devreler üretim esnasında yapılandırılır iken, alan programlanabilir teknolojisinde ise üretimden sonra kapı seviyesinde ara bağlantılar yazılımsal olarak yeniden yapılandırılabilirler [1]. Alan programlama teknolojisi, esnekliği sayesinde tekrar programlanmaya ve uygulama geliştirmeye olanak sağlamaktadır.

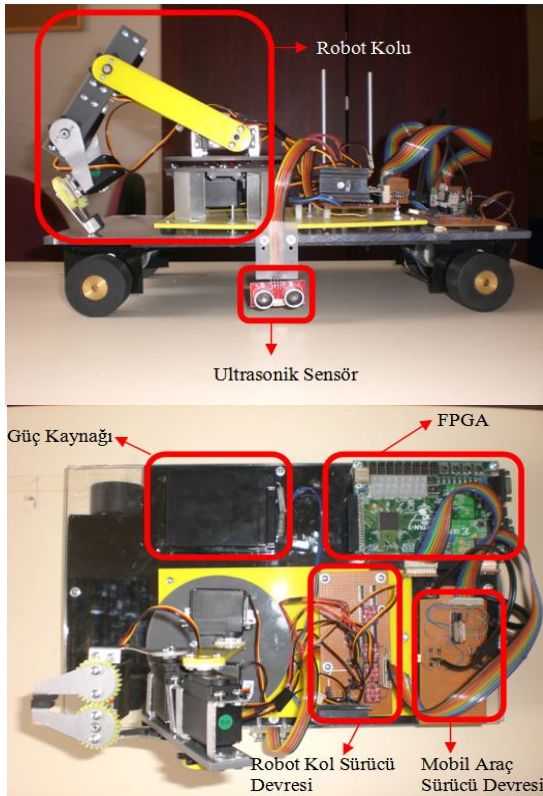
Robot teknolojisinde ise robotun yapacağı işler esneklik kazandıkça robotun kullanılabilirliği artmaktadır. FPGA'nın yeniden yapılandırılması ile robotik sistemlerdeki esneklik ihtiyacı giderilebilmektedir. Genellikle robotik sistemlerin mikro denetleyici veya DSP ile kontrol edildiği göze çarpmaktadır [2]. Mikrodenetleyici ve DSP ile oluşturulan robot kontrol sistemleri büyük kapasite ve hızlı yapılandırılabilme olanağını yeterince sağlayamamaktadır [3]. Robot kolu ile birlikte mobil araç ve bu aracın algılayıcılarla birlikte karar verdiğini düşündüğümüzde, önümüze hem karmaşık hem de esneklik isteyen bir tasarım problemi çıkmaktadır. Bu da tasarımın çok sayıda bileşen içermesini gerektirmektedir. Birçok modülün eşzamanlı olarak kullanılmasıyla modüller

robotlar kontrol edilebilirlik açısından daha karmaşık hale gelebilmektedir. Bu nedenle tekdüze çalışan mimariler, birçok bileşen içeren robot tasarımında, robotların çeşitli fonksiyonları gerçekleştirmesinde yeterli olamamaktadır [4].

Bu çalışmada FPGA tabanlı esnek tasarım örneği olarak çok eksenli mobil bir robot uygulaması ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Makalede tasarım adımları detaylı olarak anlatılmakta, benzetim ve test sonuçları verilmektedir.

## 2. Mobil Robot Kolu

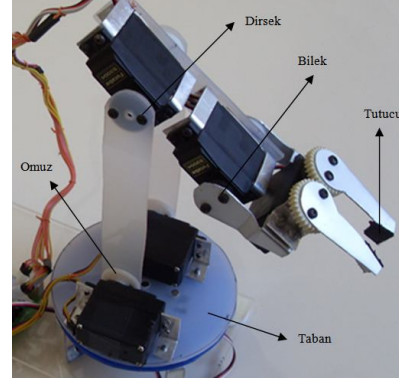
Mobil robot kolu, 5 serbestlik derecesine sahip robot kolu ve ultrasonik sensör monte edilmiş mobil araçtan oluşmaktadır. Robot kolu kiti hazır olarak alınmıştır ve tarafımızca gerçekleştirilen dört bağımsız tekerlekli bir mobil platform üzerine monte edilmiştir. Şekil 1 de görüldüğü gibi mobil araç platformu üzerine ayrıca FPGA, motor sürücü devreleri ve bir adet akü yerleştirilmiştir. FPGA yapılandırılarak, yapılandırma kablosu FPGA kitinden çıkartılır, böylece serbest bir şekilde hareket sağlanmış olunur. Motorların, devrelerin ve FPGA kitinin güç gereksinimi ise araç platformuna yerleştirilen aküden sağlanmaktadır. Mobil araç harekete başladıktan sonra otonom hareket etmektedir.



Şekil 1: Mobil robot kolunun yandan ve üstten görünümü

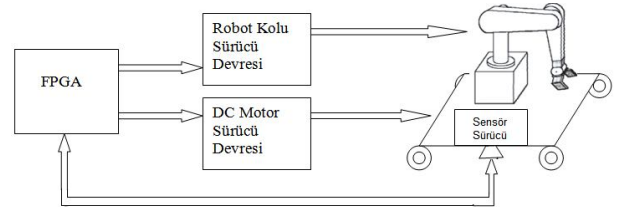
Robot kolu RC servo motora bağlı 180° dönebilen bir taban üzerindedir. İnsan koluna benzetirsek, robot kolu omuz, dirsek

bilek ve tutucudan oluşmaktadır (Bknz. Şekil 2). Kolu oluşturan bileşenlerin geniş açı ile hareket etmeleri sayesinde robot kolu esneklik kazanmıştır. Robot kolu, ucundaki tutucusu yardımıyla cisimleri tutup kaldırabilmektedir.



Şekil 2: Robot Kolu Eksen Gösterimi

Şekil 3'te verilen mobil robot kolunun genel blok diyagramından görüldüğü gibi, tasarlanan robot kolu, mobil araçla birlikte hareket edebilmekte ve ultrasonik sensör yardımıyla yanından geçtiği cisimleri boyutlarına göre ayırtıp cisimleri üzerine alma veya yerlerini değiştirme gibi işlevleri yapabilmektedir. Mobil aracın hareketi, birbirinden bağımsız sürülen 4 adet DC motorlara bağlı tekerleklerle yapılmaktadır. Aracın hızı ve yönünün kontrolü PWM (Pulse Width Modulation) sinyali ile yapılmaktadır. Mobil aracın yan tarafına yerleştirilen bir tane ultrasonik sensör modülü aracılığıyla hem aracın konumunun kontrolü hem de cismin boyutu tespit edilebilmektedir. Cismin konumuna ve boyuna göre, robot kolu cismi tutup kaldırmak amacıyla hareket edebilmektedir.

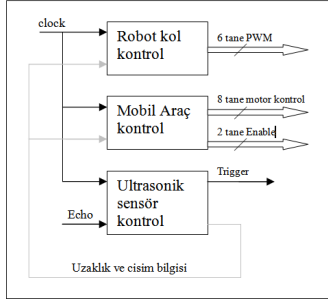


Şekil 3: Mobil Robot Kolu Blok Diyagramı

## 3. FPGA Kontrol Blokları

Mobil robotun kolunun kontrolü için FPGA üzerinde gerçekleştirilen donanım tasarımı kullanılmıştır. FPGA'nın yüksek kaynak kapasitesi, hızı ve esnekliği uygulama geliştirme için oldukça elverişlidir. Bu mobil robot kolu da FPGA kullanılarak tasarlanan robotik uygulamalarına güzel bir örnek oluşturmaktadır. Mikro denetleyiciler ve DSP'ler yıllarca motor kontrolünde kullanıldı. Bu aygıtlar tasarımıyla tümleşik oluyordu ve sadece yazılımsal bazı güncellemelere olanak sağlıyordu. Fakat özel uygulamalar için sınırlı olanakları vardı [5]. FPGA'ların sağladığı esneklik ile motor çeşitlerine göre kontrol stratejileri kolaylıkla tekrar ayarlanabilmektedir [6].

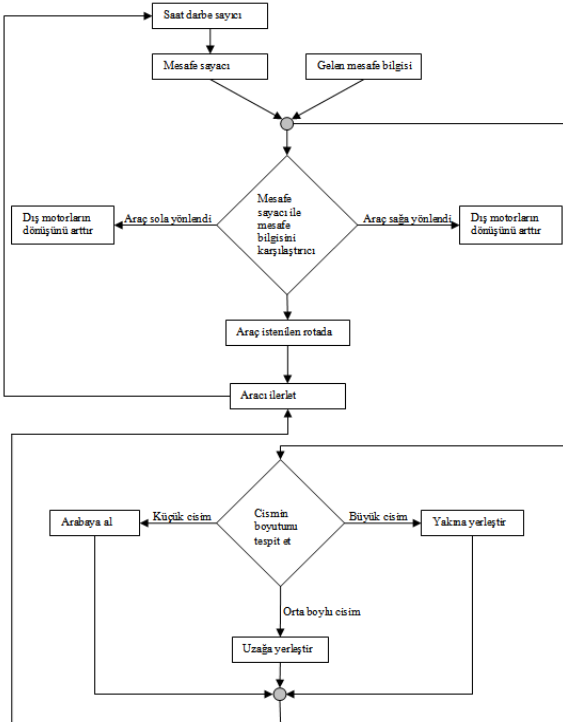
Motor kontrolü için seri işleyen kod oluşturulur ama FPGA'nın paralel işlem yapma özelliğinden dolayı aynı anda çok sayıda prosesi paralel olarak çalıştırabilme üstünlüğü vardır.



Şekil 4: Kontrol kodu blok diyagramı

Şekil 4'da verilen diyagramdan anlaşıldığı üzere toplam 17 adet sinyal aynı anda kontrol edilmektedir. Bu sinyallerden 6 tanesi robot kolunu oluşturan RC servo motorlar için PWM, 8 tanesi mobil araçtaki 4 adet DC motor için kontrol ve enable sinyali ile birlikte ultrasonik sensörün çalışması için "trigger" tetikleme sinyali üretilmektedir.

Mobil robot kolunun genel çalışma prensibi akış şeması Şekil 5'de verilmiştir. Hareket halinde olan mobil araç, konumunu ultrasonik sensörden gelen bilgiye göre ayarlar. Tasarım mimarisi içinde yer alan mesafe sayacı ile gelen mesafe bilgisi sürekli karşılaştırılır ve tekerleklerin dönüş hızı belirlenir. Tekerlek dönüş hızları ise PWM sinyaline göre ayarlanır.



Şekil 5: Mobil robot kolu kontrol akış şeması

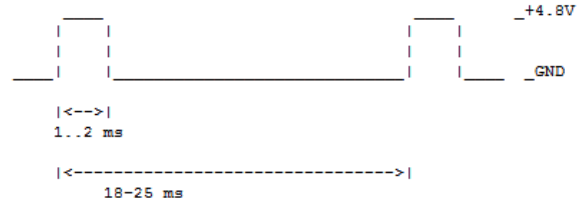
Mobil robot hareket esnasında cisim algılayıcı cismin boyu tespit edilir ve robot kolu pozisyon komutları bu bilgiye göre şekillenir. Aynı zamanda cismin arabaya olan uzaklığına göre de robot kolu cisme uzanır. Mesafe bilgisi, tasarım algoritmasında çeşitli matematiksel işlemler yardımıyla robot kolunun konumunu belirlemede kullanılır. Mobil robot, robot kolu, mobil araç ve ultrasonik sensörden oluşmaktadır. Bu çalışmada tasarımın genel bileşenleri de üç ana kısımda incelenebilir:

- Robot kolu kontrol bloğu
- Mobil araç üzerindeki DC motor kontrol bloğu
- Ultrasonik sensör kontrol bloğu
- Cisim boyutu algılama bloğu

Ultrasonik sensör kontrol bloğundan gelen veriye göre diğer blokların akış algoritması şekillenir. Araç mobil olarak hareket halinde iken sürekli olarak mesafe ölçümleri değerlendirilir ve cisim algılandığında cismin üzerinde işlem yapılır. Cisim mobil araca alınır veya cismin yeri değiştirilir. Mobil araç, çalışma güzergâhında cisimler bitene kadar bu işlemleri yapabilir.

### 3.1. Robot Kolu Kontrol Bloğu

RC servo motor kontrolü için saniyede 50 defa tekrar eden ve 1 ile 2 ms arasında doluluk boşluk oranına sahip olan PWM sinyali kontrol edilir (Bknz. Şekil 6). 5 eksenli robot kolu için 5 farklı PWM, FPGA üzerinde kolayca üretilebilir. Servo motorlar için gerekli olan sinyalin periyot çerçevesi 20 ms olmalıdır. FPGA'nın çalışma frekansı 50 MHz olduğu için kontrol bloğu içinde sayıcı yardımıyla 20 ms'lik yerel saat darbesi oluşturulmalıdır.



Şekil 6: RC servo motor için PWM sinyali

PWM sinyali ise 8 bitlik çözünürlüğe sahip ikili sayıcı kullanarak oluşturulur. PWM sinyali için gerekli matematiksel eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilebilir [7]:

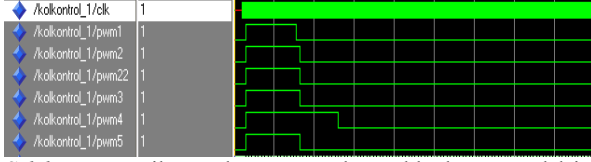
$$Frame\_Period = T_{CLK} \times 2^n \quad (1)$$

$$Mark\_Period = T_{CLK} \times Mark\_Value \quad (2)$$

$$Duty\_Cycle = \frac{Mark\_Value}{2^n} \quad (3)$$

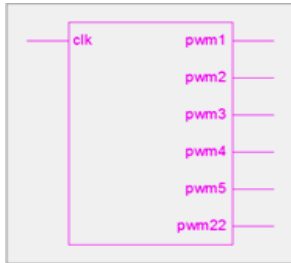
Duty cycle olarak ifade edilen PWM sinyalinin doluluk boşluk oranıdır. Bu orana göre servo motorlar konum alırlar. İfadelerde geçen Mark\_Value PWM sinyalinin doluluk miktarını

belirlemekte kullanılan onluk tabandaki sayıdır. Bu sayı mesafe bilgisinden hesaplanarak bulunabilir. Aracın cisme olan uzaklığına göre *Mark\_Value değeri* değişerek motorların konumu belirlenebilir.



Şekil 7: VHDL ile tasarlanan PWM kontrol kodunun Modelsim çıktıları

Modelsim simülasyon programı kullanılarak VHDL ile yapılan yazılımsal tasarım analiz yapılmıştır. Şekil 7'deki gibi, verilere bağlı olarak robot kolu kontrolü için gerekli PWM'ler üretilmiştir. Üretilen PWM sinyalleri detaylı bir şekilde burada kontrol edilmektedir.

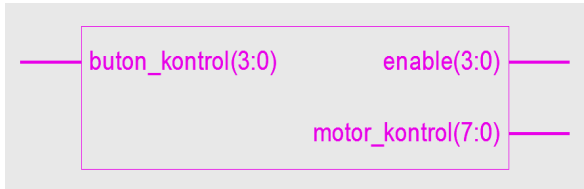


Şekil 8: Robot Kol Kontrol Bloğu

Şekil 8'deki kontrol bloğu sayısal kontrol devresinin genel görünümüdür. Devrenin şematik tasarımı Xilinx ISE programında *View RTL Schematics* prosesini çalıştırarak görülebilir. Bu proses yazılan VHDL kodunun şematik tasarımını oluşturmasını sağlamaktadır, böylece tasarımda FPGA'da oluşturulan lojik blokların çalışması analiz edilebilmektedir.

### 3.2. Mobil Araç Üzerindeki DC Motor Kontrol Bloğu

Robot kolunun gezgin olmasını sağlamak için DC motorlara bağlı tekerleklerle hareket edebilen platform kullanılmıştır. Motorun dönme hızı ve yönü girişlere verilen sinyale göre ayarlanabilir. Giriş sinyalleri FPGA'da tasarlanan *mobil araç motor kontrol bloğu* ile kolaylıkla takip edilmekte ve mesafe bilgisine göre aracın konumu ayarlanabilmektedir.



Şekil 9: Mobil araç motor kontrol bloğu

FPGA'nın bize sağladığı kolaylıklardan biri de bol miktarda giriş çıkış portunun olmasıdır. Şekil 9'da görüldüğü gibi mobil

aracın motorlarını kontrol etmek için toplam 12 tane sinyal oluşturulmuştur. Bu sinyallerden 8 tanesi motorlara giden giriş uçları, 4 tanesi ise *enable* yani yetkilendirme uçlarıdır. Robot kolu kontrolü için PWM sinyali oluşturulduğu gibi mobil aracın kontrolü için de PWM sinyalleri oluşturulmuştur. Ultrasonik sensörden gelen mesafe bilgisine göre motorlar, aracın konumunu belirlemek için konum alırlar.

### 3.3. Ultrasonik Sensör Kontrol Bloğu

Mobil robot kolunun ilerleme esnasındaki dengesini yani düz gitmesini sağlamak için ultrasonik sensörden gelen bilgiler kullanılır. Robot kolunun tutacağı cisimlerin boyutunu ölçmek için de aynı sensörden yararlanır. Bir ultrasonik sensör ortama ses dalgası gönderir, gönderilen dalga cisme çarpıp geri döner. Dalganın gidip gelme süresi yardımıyla cisimlerin uzaklığı hesaplanır. Yapılan bu çalışmada 3 cm ile 300 cm arasında sağlıklı ölçülebilen sürücü devresi üzerinde bulunan ultrasonik sensör modülü kullanıldı. Sensörle ölçüm yapılan mesafenin hesabı şu şekildedir:

$$Mesafe = \frac{Toplam\_süre \times ses\_huz}{2} \quad (4)$$

Gönderilen ses sinyali engelle çarpıp döneceği için ölçülen mesafe iki kat olur. Bunun için formülde ikiye bölme yer almaktadır. Toplam süre ise FPGA'nın çalışma frekansı ile ilgili olarak değişebilir. Spartan XC3S200 FPGA'nın çalışma saat frekansı 50 MHz'dir.

Bu uygulamada DYP-ME007 ultrasonik sensörü kullanıldı. Sensörün çalışması için trigger yani tetikleme ucuna 10 uS'lik darbe uygulanmalıdır. Uyarılan sensör 8 tane ses dalgasını gönderir ve bekler. Echo ucu yani yansıma ucu ses dalgası gönderilir gönderilmez lojik 1 olur ve dalga gelene kadar bekler, geri dönen dalga algılanınca echo ucu lojik 0 olur. Echo ucunun 1 olduğu zamanı hesaplayarak mesafenin ölçümü yapılabilir.

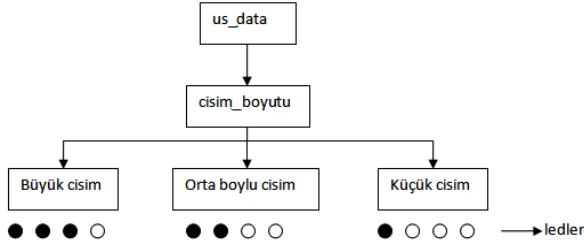
### 3.4. Cisim Boyutu Algılama Bloğu

Ultrasonik sensör mobil aracın konumunu belirlerken, cisimleri tespit edebilmekte ve cisimlerin boylarını ölçmede de kullanılmaktadır. Mobil robot kolu akış şemasının bir bileşeni olarak ultrasonik sensörle, cisimlerin boyu Şekil 10'da verilen blok diyagram yardımıyla ölçülerek gruplanabilir.

Spartan XC3S200 FPGA üzerinde yer alan 8 tane led kullanılarak cisimlerin boyları ölçülmüştür. Bu çalışmada sadece üç tane farklı boyutta cisim kullanıldığı için; cisimlerin boyları ledlerle ifade edildi. Cisimlerin boylarını ölçüm tekniği olarak genel hız-konum eşitliğinden yararlanıldı.

$$cisim\_boyutu = araba\_hizi \times zaman \quad (5)$$

Bu eşitlikte arabanın hızına göre zaman ayarı yapılarak cisim boyu ölçülmektedir. Spartan XC3S200 FPGA'nın çalışma frekansı kullanılarak yeni bir sayıcı modülü tasarlandı ve bu sayıcının frekansına göre zaman ayarı yapıldı.



Şekil 10: Cisim boyutu algılama işlemi

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 5 eksenli mobil bir robot kolunun, üzerine monte edildiği mobil araçla birlikte kontrolü, VHDL donanım programlama dili yardımı ile yapılan tasarım yoluyla FPGA üzerinde donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde Modelsim programı kullanıldı. Tasarlanan sistemde bileşen sayısının artmasına rağmen FPGA'nın sağladığı esneklikle sistemler arası uyum kolaylıkla sağlandı. Sonuç olarak, donanım programlama dilleri yardımıyla yapılacak olan tasarımlarla, gelecekteki uygulama ve geliştirmeler için de örnek teşkil edecek çok eksenli esnek bir mobil robot kolu prototipi oluşturmuş oldu. Literatürde fonksiyonel olarak bu çalışmadaki robot kolu sistemi ile birebir örtüşen bir mobil robot kolu mekanizmasına henüz rastlanmadığından, sadece performansa ve donanımsal kaynak kullanımına dayalı bir karşılaştırma yapılamamıştır. Ancak bu çalışma, tasarım teknolojisi, mobil olup olmama durumu, kol serbestlik derecesi, cisim veya konum algılama tekniği gibi kriterler açısından, literatürdeki bazı örnek çalışmalarla aşağıdaki tablo üzerinde karşılaştırılmıştır.

Tablo 1: Karşılaştırma tablosu

Yapılan Çalışmalar	Motor konumlarının belirlenmesi	Serbestlik Derecesi (DOF)	Robot Serbestliği	Kullanılan teknoloji
Bu çalışma	Ultrasonik sensör	5	Mobil	FPGA
[8]	Dönen kodlayıcı	5	Sabit	FPGA
[9]	Dönen kodlayıcı, PID, ters kinematik	4	Sabit	FPGA
[10]	Ultrasonik sensör, infrared sensör	yok	Mobil	FPGA
[4]	Kablosuz olarak yeniden yapılandırma	4	Mobil	FPGA+ARM

#### Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Şube Müdürlüğü BAP-2009/40 (Mikroelektronik Lab.) Nolu proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Kumar, S., Shuklay,A., Duttaz, A. ve Beherax, L., "Technique for Visual Motor Coordination of a 6 DOF robot manipulator", *Intelligent Control Part of IEEE Multi conference on Systems and Control*, 2007, 544-549.
- [2] Kung, Y-S., Shu, G-S., "FPGA-based Motion Control IC for Robot Arm", *ICIT IEEE International Conference*, 2005, 1397-1402 .
- [3] Meshram, U., Bande, P., Dwaramwar, P.A., Harkare, R.R., "Robot Arm Controller Using FPGA", *Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies International Conference*, 2009, 8-11.
- [4] Xu, M., Zhu, W. ve Zou, Y., "Design of a Reconfigurable Robot Controller Based on FPGA", *Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing*, 2008, 216-222.
- [5] Monmasson, E. ve Cirstea, M., "FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems – A review," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 54(4), 1824-1842, 2007.
- [6] Meshram, U. ve Harkare, R.R., "FPGA Based Five Axis Robot Arm Controller" *International Journal of Electronics Engineering*, 2(1), 209-211, 2010.
- [7] Lawman,G., "Pulse-Width Modulation in Xilinx Programmable Logic", *Application Brief*, 1-3, 1995.
- [8] Meshram, U., Bande, P., Harkare, R. R. "Hardware and software co-design for robot arm position control using VHDL&FPGA" *IEEE Computer Society, International conference on advances in recent technologies in communication and computing*, 780, 2009.
- [9] Cho, J. U., Le, Q. N., Jeon, J. W., "An FPGA- Based Multiple- Axis motion control chip" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3), 856-870, 2009.
- [10] Samuelsen, D., Graven, O. H., "Low cost robots used for practical assignments in programming modules" *IEEE-ICELIE '09*, 80-85 2009.