

# ROBOT MANİPÜLATÖRÜN KARTEZYEN-ÖZGÜL DENETİMİ

**Hikmet KOCA, Mustafa DOĞAN\* ve M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara

\*Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara

[hkoca@gazi.edu.tr](mailto:hkoca@gazi.edu.tr), [mudogan@baskent.edu.tr](mailto:mudogan@baskent.edu.tr), [taplam@gazi.edu.tr](mailto:taplam@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.12.2007; Kabul/Accepted: 18.04.2008)

## ÖZET

Robot manipülatörün eksen sayısının artmasıyla birlikte, robotun hareket yeteneği de artmaktadır, fakat bununla beraber robotun denetimi de zorlaşmakta ve denetim algoritması daha karmaşık hale gelmektedir. Bu çalışmada endüstride kullanılan kartezyen-özümlü robot denetim yöntemi uygulanmıştır. DSP uygulamaları için geliştirilmiş bir FPGA kullanılarak üç eksenli robotun kartezyen denetimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem, manevra kolundan gelen sinyalleri yorumlayarak robotun hangi yönde hareket edeceğini saptar ve yeni x, y değerlerini bularak çözümlenmesi için kinematik bloğuna gönderir. Gerçekleştirilmiş olan kinematik bloğunun içerisinde, robotun ucunun konumlanması istenilen x, y değerlerine karşılık gelen eklem açıları robotun ters kinematik denklemlerinin çözülmesi ile elde edilir. Bulunan açılar, sistemde yer alan açı-sinyal genişliği bloğuna gönderilir. Açı-sinyal genişliği bloğu girişindeki açı değerlerini okuyarak, robotun eklemlerinde yer alan servo motorların bu açılarda konumlanması için gerekli olan darbe genişliklerini hesaplar ve bu genişlik değerlerini ilgili eksen denetleyicilerine gönderir. Eksen denetleyicileri girişlerindeki sinyal genişlik değerlerini okurlar ve bu genişlik değerlerine sahip kare dalgaları çıkışlarında üretirler robotun eklemlerinde yer alan motorların denetim uçlarına göndererek robotu istenilen koordinatlarda konumlandırır. Sistemin çözümü, denetimi doğru ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiş olur.

**Anahtar Kelimeler:** Robot manipülatör, FPGA, manevra kolu, denetim.

## CARTESIAN-SPECIFIC CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR

### ABSTRACT

As the number of robot joints increases in parallel with the robot dexterity. But, control of the robot manipulator also gets difficult and complex. In this study, cartesian-specific robot manipulator control method is implemented which is common well-known method in industry. Cartesian-specific control of a three axes robot manipulator is implemented on a FPGA board which is developed for DSP applications. The developed system evaluates signals which are taken from the joystick, and finds the direction of motion of the manipulator, and finds the new coordinate x, y values, then sends them to the kinematic block. In the kinematic block, joint angles, which are necessary for the desired coordinates (x and y) values, are obtained by solving inverse kinematic equations of the robot. These obtained joint angles are put into direct kinematics equations of the robot to check if the final gripper position is in the work space of the manipulator. If it is in the work space of the robot manipulator then the required joint angles for achieving the desired motion are kept correctly and rapidly. Thus, obtained joint angles are sent to the angle-pulse width block. The angle-pulse width block reads the input values of the angles, calculates the necessary pulse widths for allocating the servo motors at the desired angles, and then sends the obtained pulse widths to the axis controllers. The axis controllers reads the input values of the pulse widths, and generates necessary PWM signals to drive the corresponding axis motor.

**Keywords:** Robot manipulator, FPGA, joystick, control

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gerçek zamanlı robot denetimi zor ve uğraştırıcı bir araştırma konusudur. Literatürde robot sistemlerinin

çeşitli sayısal tekniklerle denetimi konusunda çalışmalar bulunmaktadır [1-5]. Eğer robot manipülatörün hareketi çalışma uzayı değişkenleri (örneğin robotun ucunun konum vektörü) cinsinden

bildirilmek istenirse, bilinen eklem uzayı değişkenleri (örneğin eklem açıları) kendilerine karşılık gelen çalışma uzayı değişkenlerine düz kinematik yöntemi kullanılarak dönüştürülebilir. Eğer manipülâtörün hareketi eklem uzayı değişkenleri cinsinden bildirilmek istenirse, bilinen çalışma uzayı değişkenleri kendilerine karşılık gelen eklem uzayı değişkenlerine ters kinematik yöntemi kullanılarak dönüştürülebilir.

Çalışma uzayı denetim projeleri istenilen yerde konumlanmayı başarıyla gerçekleştiren sıradan PID (Orantılı integral türev) ve PD (Orantılı türev) denetimleri üzerine kurulmuştur [6-8]. PD denetimi basit ve kararlı olduğu için robot manipülâtörlerde en çok kullanılan stratejidir. Buna ek olarak, daha ileri denetimler sıklıkla kendi denetim döngülerinde PD algoritmalarını istenilen sonucu elde etmek için kullanırlar [9]. Örneğin, hesaplanmış tork gibi model tabanlı robot denetleyicileri PD+ ile [10-13], lineer olmayan PDE denetimi PD ile [14] ve PD denetimi hesaplanmış ileri besleme ile [15] beraber kullanılmaktadır.

Alan programlanabilir mantık dizileri (FPGA) hafızasına veri akışı (bit stream) yüklenerek konfigüre edilebilir mantık kapılarından oluşan bir dizidir. Sıradan teknolojilerle karşılaştırıldığında FPGA yüksek hız, düşük güç, kısa geliştirme zamanı ve düşük fiyat gibi artı özelliklere sahiptir. Mikroişlemci/DSP ve ASIC (uygulamaya özgül tüm devre) arasında bir imkân sunmaktadır. Mikroişlemci/DSP'den daha iyi performans, ASIC'ten daha kısa geliştirme zamanına ve daha ucuz fiyata sahiptir [16].

Bu çalışma [17-18] çalışmalarında yer alan robot (Lynx-6) kullanılarak yapılmıştır ve onların devamı niteliğindedir. Yapılan çalışmada DSP (Sayısal İşaret İşleme) uygulamaları için geliştirilmiş bir FPGA kullanılarak üç eksenli robotun kartezyen-özümlü denetimi gerçekleştirilmiştir. Kartezyen-özümlü denetim ile anlatılmak istenilen robotun ucunun denetimidir. Tasarlanılan sistemde kullanıcı, robotun hangi yöne doğru hareket etmesini istiyorsa manevra kolunu o yöne doğru itirir. FPGA içerisinde yer alan sayısal tasarım girişindeki manevra kolundan gelen sinyalleri kontrol eder ve robotun istenilen hareketi yerine getirmesi için gerekli olan kare dalgaları ilgili eksenlere göndermek üzere üretir.

## 2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Robot manipülâtörün geometrisi Şekil 1'de görülmektedir. Robotun sahip olduğu her bir ekleme birer koordinat sistemi atanmaktadır. Kullanılan robot 3 serbestlik dereceli ve düzlemseldir. Robotun konumunu ve yerini hesaplamak için kullanılacak olan düz kinematik denklemleri Eş.1'de görülmektedir.  $\theta_i$  değerleri eklem açılarını,  $l_i$  uzun

uzunluklarını ifade etmektedir.  $x_0y_0$  referans koordinat sistemini,  $x_4y_4$  robotun ucuna atanmış koordinat sistemini göstermektedir.  $(x, y)$  robotun ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı konumunu  $h, k, m, n$  ise robotun referans koordinat sistemine göre yönünü göstermektedir.

$$A = \begin{bmatrix} h & k & x \\ m & n & y \end{bmatrix}$$

$$h = -\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$k = \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)$$

$$m = -\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)$$

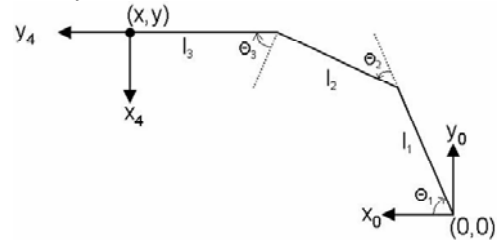
$$n = -\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)$$

$$x = l_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1)$$

$$y = -l_3 \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin(\theta_1)$$

### 2.1. Ters Kinematik (Inverse Kinematics)

Ters kinematik problemi robotun ucunun bilinen konum ve yön bilgilerinden eklem değişkenlerinin saptanmasıdır. Robotun çalışma uzayında tanımlanmış olan görevini eklem uzayı hareketine çevirebilmek için önem taşımaktadır. Ters kinematik problemi birden fazla çözüm veya ulaşılamayan tekil (singular) noktaların bulunması nedeniyle komplekstir. Birden fazla çözümü ya da ulaşılamayan noktaları gidermek için bu çalışmada, ters kinematik denklemleri çözülerek elde edilen eklem açılarının robotun çalışma uzayında olup olmadığını denetleyen bir denetim mekanizması yer almaktadır. Eş.2'de sistemin ters kinematik denklemleri verilmiştir. Bu eşitlikte görülen  $a$ 'nın değeri 100'dür, FPGA içerisinde ondalıklı işlemlerden kurtulmak için kullanılmıştır.



Şekil 1. Robot manipülâtörün geometrisi (Geometry of the robot manipulator)

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{ya}{x - l_3a}\right) + \frac{\theta_2}{2}$$

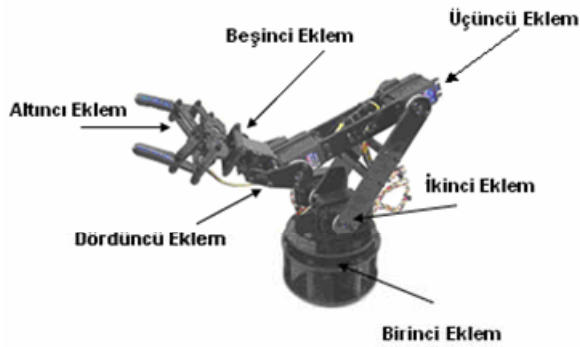
$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{(x - l_3a)^2 + y^2}{2l_1^2a} - a\right) \quad (2)$$

$$\theta_3 = 90 + \theta_2 - \theta_1$$

### 3. DENEYSSEL DÜZENEK (EXPERIMENTAL SETUP)

#### 3.1. Lynx-6 Manipülâtörünün Özellikleri (Properties of the Lynx-6 Robot Manipulator)

Lynx-6 manipülâtörü hızlı, doğru ve tekrarlanabilir hareket yeteneğine sahiptir. Robot; tabansal dönme, omuz, dirsek, bilek hareketi, bilek dönmesi ve fonksiyonel bir kavrayıcıya sahiptir. Lynx-6 robot manipülâtörü dayanıklı, uzun çalışma ömrüne ve ekonomik bir fiyata sahiptir. Lynx-6, dört adet Hitec HS-475, bir adet Hitec HS-422, bir adet HS-85 ve bir adet HS-81 servo motoruna sahiptir. Lynx-6 beş eksen ve bir kavrayıcıdan oluşan toplam altı bağımsız ekleme sahiptir. Robot manipülâtörü Şekil 2'de görülmektedir.

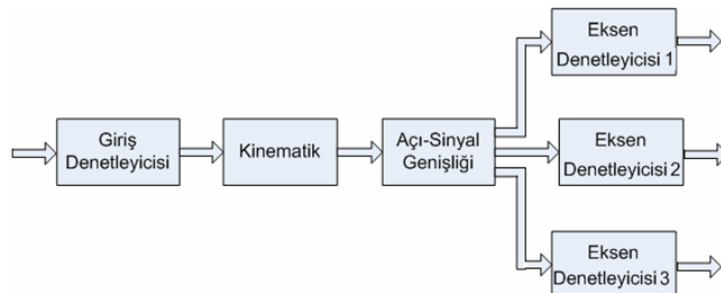


Şekil 2. Lynx-6 robot manipülâtörü (Lynx-6 robot manipulator)

#### 3.2. Servo Motorlar (Servo Motors)

Robotun hareketi doğru akım servo motorlar tarafından sağlanmaktadır. Servo motorlar üç kabloya sahiptir; toprak, besleme ve denetim sinyali. Denetim sinyali bir kare dalgadır. Genişliği 0.9ms ile 2.1ms arasında değişmektedir, merkezi 1.5ms'dir. Denetim sinyalinin frekansı 50Hz'tir. Motor milinin 0 derecede konumlanması için denetim sinyalinin genişliği 0.9ms, motor milinin 180 derecede konumlanması için denetim sinyalinin genişliği 2.1ms olması gerekmektedir. Denetim sinyalinin genişliği ve motor milinin açısı arasındaki ilişki Eş. 3'te görülmektedir. Bu eşitlikte Sg sinyal genişliği ve açı motor milinin açısıdır.

$$Sg = \frac{1,2 \times \text{açı}}{1000 \times 180} + \frac{0,9}{1000} \quad (3)$$



Şekil 4. Sayısal tasarımın blok şeması (Block diagram of the digital design)

#### 3.3. Denetim Kartı (Control Board)

Bu çalışmada Virtex-4 ML402 SX kartı kullanılmıştır (Şekil 3). Bu kart Virtex-4 SX35 tabanlıdır ve standart endüstriyel çevresel ara yüz ve bağlantıları desteklemektedir. Bu kart birçok farklı uygulama alanına hitap etmektedir. Virtex-4 SX35 200000 adet mantıksal hücreye ve çok sayıda IP'ye (Intellectual Property) sahiptir.



Şekil 3. Denetim kartı (Control board)

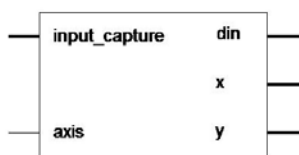
### 4. DENETLEYİCİ TASARIMI (CONTROLLER DESIGN)

Bu çalışmada bahsedilen düz ve ters kinematik denklemlerini çözmek için kullanılan Virtex SX35 isimli FPGA DSP işlemlerinde kullanılmak için tasarlanan 192 adet XtremeDSP dilimine sahiptir. Bu dilimler genel matematiksel işlemleri donanımsal olarak yerine getirmektedirler ve maksimum 500MHz'te çalışmaktadırlar. Bu çalışmada XtremeDSP dilimleri paralel olarak kullanılarak ters kinematik problemi hızlı bir şekilde çözülmektedir. FPGA'nın çalışma frekansı 100MHz olarak seçilmiştir. Bu sayısal tasarım Verilog donanım tanımlama dili kullanılarak Xilinx ISE Foundation programı ile sentezlenmiş ve tasarımın benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Bütün çalışma uzayı denetleme tasarımları önemli ölçüde hesaplama işi gerektirmektedir, özellikle de ters kinematik hesaplamaları. Bu çalışmada bahsedilen problemlerin bütün matematiksel işlemleri ve denetleme algoritması FPGA içerisinde tasarlanarak uzun zaman alan işlemlerin kısa zamanda gerçekleştirilmeleri sağlanmıştır. FPGA içerisinde yer alan sayısal tasarımın blok şeması Şekil 4'te görülmektedir. Sayısal tasarım Giriş Denetleyicisi, Kinematik, Açı-Sinyal Genişliği ve Eksen Denetleyicisi bloklarından oluşmaktadır.

Sayısal tasarım çalışmaya başladığında eksen denetleyicilerinin ürettiği kare dalgalar ile robot önceden tanımlanmış olan başlangıç pozisyonunda konumlandırılır. Daha sonra giriş denetleyicisi manevra kolundan gelen sinyalleri okur ve hareketin hangi yönde olacağını bulur. Örneğin hareket  $x+$  yönünde olacaksa  $x$  değerini 1 artırır ve yeni  $x$ ,  $y$  değerlerini çözümlenmesi için kinematik bloğuna gönderir. Kinematik bloğunun içerisinde, robotun ucunun konumlanması istenilen  $x$ ,  $y$  değerleri için gerekli olan eklem açıları robotun ters kinematik denklemlerinin çözülmesi ile elde edilir. Bulunan eklem açıları robotun düz kinematik denklemlerinde yerine koyularak elde edilen sonuçların robotun çalışma alanı içinde olup olmadığı denetlenir. Eğer elde edilen sonuçlar robotun çalışma alanı içinde ise robotun eklemlerinin istenilen koordinatlarda konumlanması için gerekli açılar bulunmuş olur. Bulunan açılar, açı-sinyal genişliği bloğuna gönderilir. Açı-sinyal genişliği bloğu girişindeki açı değerlerini okur, robotun eklemlerinde yer alan servo motorların bu açılarda konumlanması için gerekli olan darbe genişliklerini hesaplar ve bu genişlik değerlerini ilgili eksen denetleyicilerine gönderir. Eksen denetleyicileri girişlerindeki sinyal genişlik değerlerini okurlar ve bu genişlik değerlerine sahip kare dalgaları çıkışlarında üretirler. Bu sinyaller robotun eklemlerinde yer alan motorların denetim uçlarına gönderilir ve robotun denetimi gerçekleştirilir. Bundan sonraki bölümlerde kinematik isimli denetleyicinin alt bölümleri hakkında sırasıyla bilgi verilecektir.

#### 4.1. Giriş Denetleyicisi Donanımı (Input Controller Hardware)

Giriş denetleyicisi Şekil 5'te görülmektedir, girişleri `input_capture` ve `axis` sinyalleridir, çıkışları ise `din`,  $x$  ve  $y$  isimli sinyallerdir. Manevra kolunun çıkış sinyalleri, `input_capture` giriş sinyalleri tarafından alınır. Kullanıcı, manevra kolundan robotu hareket ettirmek için 4 farklı komut verebilir. Manevra kolunun 1. ekseninin ileri itilmesi  $x+$ , geri çekilmesi  $x-$ , manevra kolunun ikinci ekseninin sola itilmesi  $y+$ , sağa itilmesi  $y-$  komutları olarak tanımlanmıştır. Diğer giriş sinyali olan `axis` eksen denetleyicisi 1'in çıkış sinyali. Giriş denetleyicisi, `axis` sinyalinin alçalan kenarında `input_capture` değerini okur ve manevra kolu ile verilmek istenilen komutu bulur. Eğer komut  $x+$  ise robotun ucunun konumlanması istenilen  $x$  değerini 1 artırır, komut  $x-$  ise  $x$  değerini 1 azaltır, komut  $y+$  ise  $y$  değerini 1 artırır, komut  $y-$  ise  $y$  değerini 1 azaltır. Bulunan yeni  $x$  ve  $y$  değerleri

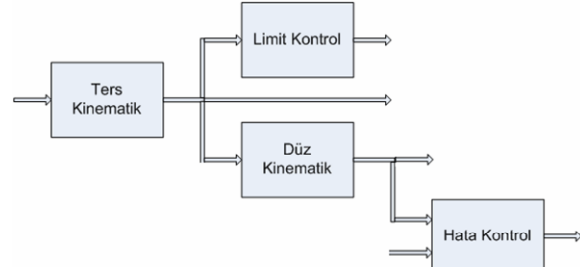


Şekil 5. Giriş denetleyicisi donanımı (Input controller hardware)

aynı isme sahip çıkışlardan dışarı gönderilir. `din` isimli çıkış ise kinematik bloğu tarafından kullanılacak bir sabit sayıdır.

#### 4.2. Kinematik Donanımı (Kinematics Hardware)

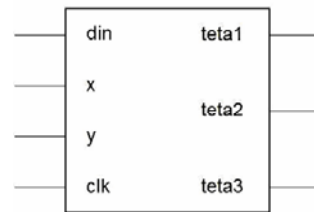
Kinematik donanımının blok şeması Şekil 6'da görülmektedir. Bu donanım, ters kinematik, limit kontrol, düz kinematik ve hata kontrol bloklarından meydana gelmektedir. Kinematik donanımını meydana getiren alt denetleyiciler hakkında detaylı bilgi bu başlığın alt bölümlerinde verilmiştir.



Şekil 6. Kinematik donanımının blok şeması (Block diagram of the kinematics hardware)

#### 4.3. Ters Kinematik Donanımı (Inverse Kinematics Hardware)

Bu donanımın girdileri saat sinyali, robot manipülâtörün ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı olan  $(x, y)$  koordinat değerleri ve `din` isimli ters kinematik denklemlerin çözümünde kullanılan bir sabit değerdir. Ters kinematik donanımının çıktıları ise  $(x, y)$  koordinat değerlerine karşılık gelen robot manipülâtörün eklem açıları olan (`teta1`, `teta2`, `teta3`) açı değerleridir. Ters kinematik sisteminin sentezlenmesi sonucu Şekil 7'de görülen donanım elde edilmiştir. Bu donanımda Eş.2'de verilen robot manipülâtörün ters kinematik denklemleri çözülmektedir.



Şekil 7. Ters kinematik donanımı (Inverse kinematics hardware)

Ters kinematik donanımı 14 alt elemandan oluşmaktadır. Bunlar 3 tane çıkarıcı, 3 tane toplayıcı, 3 tane çarpıcı, 3 tane bölücü, bir tane ters kosinüs değerlerini bulan tablo ve bir tane ters tanjant değerlerini bulan tablodur.

#### 4.4. Düz Kinematik Donanımı (Direct Kinematics Hardware)

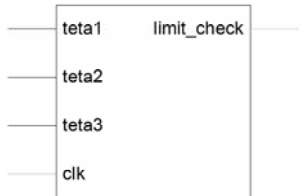
Bu donanımın girdileri saat sinyali ve ters kinematik donanımının çıktıları olan robot manipülâtörün (teta1, teta2, teta3) eklem açısı değerleridir. Düz kinematik donanımının çıktıları ise (teta1, teta2, teta3) eklem açısı değerlerine karşılık gelen robot manipülâtörün ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı olan (x2, y2) koordinat değerleri ve yine referans koordinat sistemine göre robotun ucunun yönünü bildiren sin23\_out değeridir. sin23\_out değeri Eş.1’de verilen k değeridir. Düz kinematik tasarımının sentezlenmesi sonucunda elde edilen donanım Şekil 8’de görülmektedir. Düz kinematik donanımı 18 tane alt elemandan oluşmaktadır. Bunlar 2 tane çıkarıcı, 4 tane toplayıcı, 6 tane çarpıcı, 3 tane kosinüs değerlerini bulan tablo ve 3 tane sinüs değerlerini bulan tablodur.



Şekil 8. Düz kinematik donanımı (Direct kinematics hardware)

#### 4.5. Limit Kontrol Donanımı (Limit Check Hardware)

Bu donanımın girdileri saat sinyali ve ters kinematik donanımının çıktıları olan robot manipülâtörün (teta1, teta2, teta3) eklem açılarıdır. Limit kontrol donanımının çıktısı ise limit\_check sinyalidir. Limit kontrol tasarımının sentezlenmesi sonucunda oluşan donanım Şekil 9’da görülmektedir. Robotun mekanik yapısından dolayı teta1 ve teta3 0 ile 180 derece arasında, teta2 ise 0 ile 150 derece arasında değerler alabilir. Limit kontrol donanımı, girdileri olan teta1, teta2 ve teta3 değerlerinin bu aralıkta olup olmadığını kontrol eder ve üç değerinde istenilen aralıktaysa çıkış sinyali olan limit\_check 1 değerini alır. Limit kontrol donanımı 10 tane alt elemandan oluşmaktadır. Bunlar 6 tane karşılaştırıcı (comparator) ve 4 tane VE (and) kapısıdır.

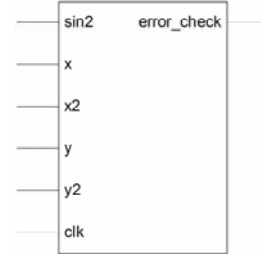


Şekil 9. Limit kontrol donanımı (Limit check hardware)

#### 4.6. Hata Kontrol Donanımı (Error Check Hardware)

Bu donanımın girdileri saat sinyali, robot manipülâtörün ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı (x, y), (x2, y2) koordinat değerleri ve sin2 yön değeridir. Hata kontrol donanımının çıktısı

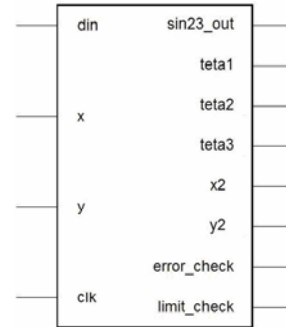
ise error\_check (hata kontrol) sinyalidir. Hata kontrol tasarımının sentezlenmesi sonucunda elde edilen donanım Şekil 10’da görülmektedir. Hata kontrol donanımı 25 tane alt elemandan oluşmaktadır. Bunlar 12 tane karşılaştırıcı, 3 tane çıkarıcı, 7 tane VE kapısı ve 3 tane VEYA (or) kapısıdır.



Şekil 10. Hata kontrol donanımı (Error check hardware)

Hata kontrol donanımı, robotun ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı (x, y) koordinat değerlerinden düz kinematik donanımının çıktısı olan (x2, y2) değerlerini çıkartır. Robotun ucunun yönü bu çalışmada sabit kalacak şekilde işlem yapılmıştır yani referans koordinat sistemine göre yön değeri önceden tanımlanmıştır. Hata kontrol donanımı bu yön değerinden düz kinematik donanımının çıktısı olan sin23\_out değerini çıkartır. Sonuç olarak (x-x2), (y-y2), (sin2-sin23\_out) işlemlerini yapar, eğer farklar istenilen hata değeri içindeyse çıkış sinyali olan error\_check değeri 1 olur.

Şekil 6’da blok şeması verilen kinematik denetleyicisini meydana getiren alt denetleyiciler hakkında detaylı bilgi geçtiğimiz bölümlerde verilmişti. Kinematik denetleyicisinin sentezlenmesi sonucunda Şekil 11’de görülen donanım elde edilmiştir.



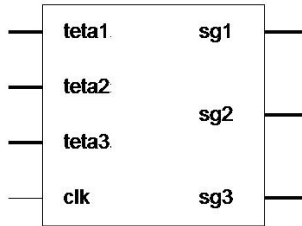
Şekil 11. Kinematik donanımı (Kinematics hardware)

Sistem dört ana bloktan meydana gelmektedir. Bunlar ters kinematik donanımı, düz kinematik donanımı, limit kontrol donanımı ve hata kontrol donanımıdır. Sistemin girdileri saat sinyali, robot manipülâtörün ucunun referans koordinat sistemine göre tanımlı olan (x, y) koordinat değerleri ve din isimli sabit sayıdır. Sistemin çıktıları ise error\_check (hata kontrolü), limit\_check (sınır kontrolü), (teta1, teta2, teta3) eklem açıları, (x2, y2) koordinat değerleri ve sin23\_out yön değeridir. Kinematik donanımı, kendisine girdi olarak verilen, robotun referans koordinat sistemine göre

tanımlı olan (x,y) değerlerini ve robotun ucunun referans koordinat sistemine göre önceden tanımlanmış olan yön bilgisini alarak yukarıda bahsedilen donanım yapılarından geçirir. Sonuçta elde edilen teta1, teta2, teta3 değerleri, eğer error\_check değeri 1 ise ve limit\_check değeri 1 ise, robotun verilen koordinat ve yön bilgilerine karşılık gelen doğru eklem açılarıdır. Eğer error\_check ya da limit\_check sinyallerinden herhangi birinin değeri 1 değilse elde edilen açı değerleri yanlıştır.

#### 4.7. Açı-Sinyal Genişliği Donanımı (Angle-Signal Width Hardware)

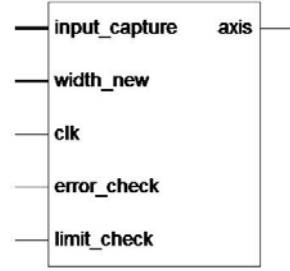
Açı-sinyal genişliği donanımı Şekil 12’de verilmiştir. Bu donanımın girdileri, teta1, teta2, teta3 ve clk sinyalleridir. Çıktıları ise sg1, sg2, sg3 sinyalleridir. teta1, teta2 ve teta3 değerleri robotun istenilen x ve y koordinatlarında konumlanması için gerekli olan eksen açılarıdır. clk sinyali ise sistemin saat sinyalidir. Açı-sinyal genişliği donanımı girişindeki açı değerlerine karşılık gelen sinyal genişlik değerlerini Eş. 3’ü kullanarak hesaplar ve bulunduğu sinyal genişlik değerlerini sg1, sg2, sg3 çıkışlarına verir.



Şekil 12. Açı-sinyal genişliği donanımı (Angle-signal width hardware)

#### 4.8. Eksen Denetleyicisi Donanımı (Axis Controller Hardware)

Eksen denetleyicisi donanımı Şekil 13’te görülmektedir. Bu donanımın girdileri input\_capture, width\_new, clk, error\_check, limit\_check sinyalleridir. Çıktısı ise axis sinyalidir. input\_capture sinyali manevra kolundan gelen giriş sinyalidir, width\_new sinyali açı-sinyal genişliği donanımının çıktısı olan sg sinyalıdır, clk sinyali sistemin saat sinyalidir. error\_check ve limit\_check sinyalleri kinematik donanımının çıktısı olan aynı isme sahip sinyallerdir. Şekil 4’te sayısal tasarımın blok şemasından görüldüğü üzere 3 adet eksen denetleyicisi bulunmaktadır ancak bunların içyapıları aynı olduğu için sadece birisi anlatılacaktır. Eksen denetleyicisi girişindeki sinyalleri yorumlayarak çıkışında robotun ilgili eklemde bulunan servo motoru denetlemek için gerekli olan kare dalga sinyalini üretir. Önceden de belirtildiği gibi kare dalganın periyodu 20ms’dir. Sinyalin genişliği ise 0.9ms ile 2.1ms arasında değişmektedir. Eksen denetleyicisi 20ms’lik periyodun başında axis sinyalini 1 yapar ve sinyal genişliği kadar zaman süresince bu sinyalin değeri 1 olarak kalır, bu zaman



Şekil 13. Eksen denetleyicisi donanımı (Axis controller hardware)

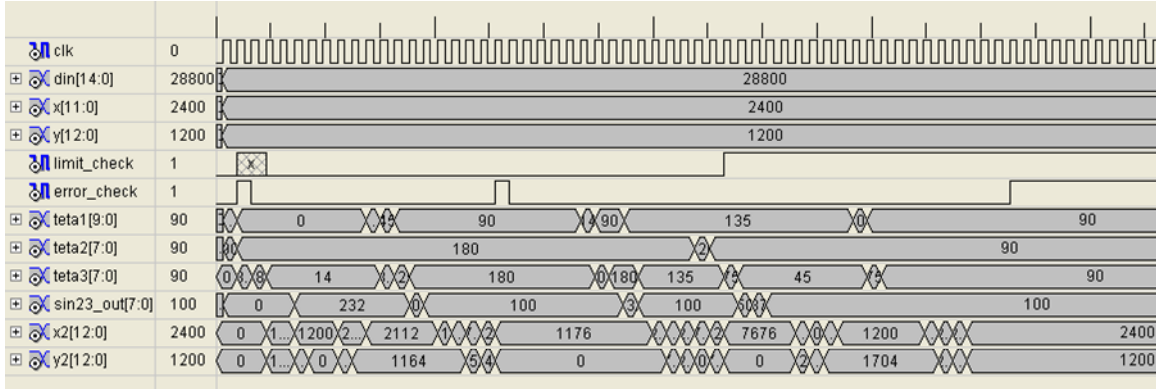
dolduktan sonra axis’in değerini 0 yapar. Eksen denetleyicisi axis sinyalini 0 yaptığı zaman girişindeki sinyalleri okur. Eğer input\_capture sinyalinin değeri 0 değilse yani manevra kolundan bir komut geliyorsa, error\_check ve limit\_check sinyallerinin değerleri 1 ise, yani kinematik donanımının hesapladığı açı değerleri istenilen hata sınırları ve mekanik sınırlar içinde ise, girişindeki sinyal genişliği değerini okur ve bir sonraki periyotta bu değeri kullanarak yeni kare dalgayı üretir.

#### 5. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

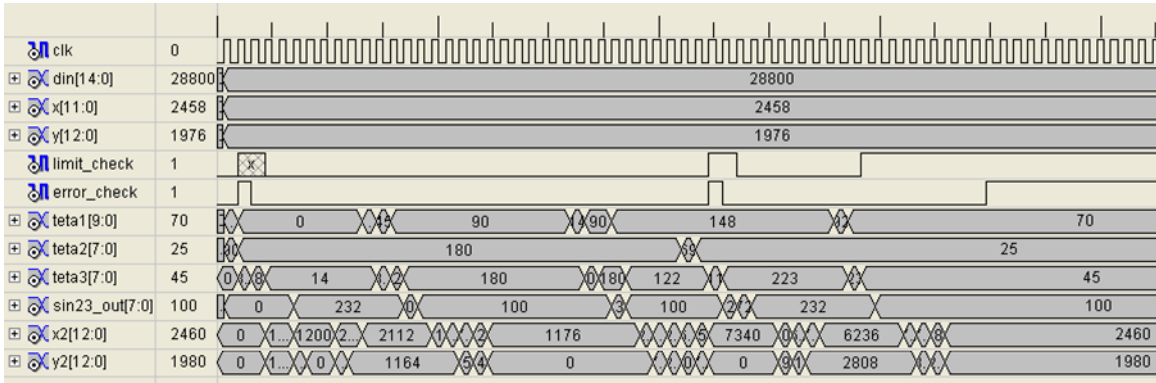
Kinematik donanımının Xilinx ISE programı kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan birinci benzetimde x için 2400, y için 1200, din için 28800 değerleri girilmiştir. 60 saat darbesinden az bir zaman sonucunda kinematik donanımının çıkışında beklenen çıkış değerleri elde edilmiştir. Bunlar sırasıyla, limit\_check için 1, error\_check için 1, teta1 için 90, teta2 için 90, teta3 için 90, sin23\_out için 100, x2 için 2400 ve y2 için 1200 değeridir. Sonuçta elde edilen error\_check ve limit\_check sinyallerinin her ikisinin de değeri 1 olduğu için elde edilen açı değerleri robotun ucunu istenilen pozisyonda ve yönde konumlandırmak için kullanılabilir. Elde edilen benzetim sonucu Şekil 14’te görülmektedir.

Kinematik donanımı ile yapılan ikinci benzetimde x için 2458, y için 1976, din için 28800 değerleri girilmiştir. 60 saat darbesinden az bir zaman sonucunda sırayla verilen çıkış değerleri elde edilmiştir. limit\_check için 1, error\_check için 1, teta1 için 70, teta2 için 25, teta3 için 45, sin23\_out için 100, x2 için 2460 ve y2 için 1980 değeridir. Sonuçta elde edilen error\_check ve limit\_check sinyallerinin her ikisinin de değeri 1 olduğu için elde edilen açı değerleri robotun ucunu istenilen pozisyonda ve yönde konumlandırmak için kullanılabilir. Elde edilen benzetim sonucu Şekil 15’te görülmektedir.

Kinematik donanımı ile yapılan üçüncü benzetimde x için 1200, y için 2400, din için 28800 değerleri girilmiştir. 60 saat darbesinden az bir zaman sonucunda sırayla verilen çıkış değerleri elde edilmiştir.



Şekil 14. Kinematik donanımının benzetim sonucu 1 (Simulation result of the kinematics hardware 1)



Şekil 15. Kinematik donanımının benzetim sonucu 2 (Simulation result of the kinematics hardware 2)

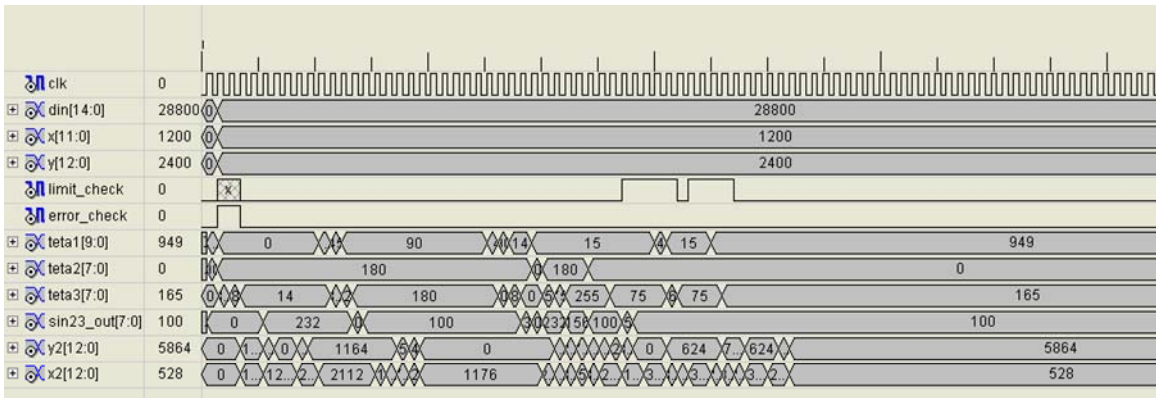
limit\_check için 0, error\_check için 0, teta1 için 949, teta2 için 0, teta3 için 165, sin23\_out için 100, x2 için 528 ve y2 için 5864 değeridir. Sonuçta elde edilen error\_check ve limit\_check sinyallerinin her ikisinin de değeri 0 olduğu için elde edilen açı değerleri robotun ucunu istenilen pozisyonda ve yönde konumlandırmak için kullanılamaz. Benzetim sonucunda bu değerlerin elde edilmesinin sebebi Eş.2'de yer alan  $\theta_1$  eşitliğinin paydasında ki  $x-l_3$  değerinin 0 olmasıdır. Bu nokta ulaşılmaayan nokta (singular point) olarak adlandırılır. Elde edilen benzetim sonucu Şekil 16'da görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

FPGA'lar, kart boyutunu düşürmek ve uygulamaları

hızlandırmak için kullanılacak genel amaçlı hesaplama araçlarıdır. FPGA'ların başlıca avantajları: yeni mimarilerin uygulanmasına, hızlı denetleme algoritmalarının geliştirilmesine, dinamik donanım yapılandırmasına ve uzaktan donanım tanımlanmasına imkân vermeleridir. FPGA'ların yoğunlukları, performansları, kullanım kolaylıkları artmaya devam etmekte ve fiyatları düşmekte olduğundan robotik uygulamalarında tercih sebebi olmaya devam edeceklerdir.

TOK-05'te sunulmuş olan robot manipülâtörün eksen-ölgül denetlenmesinde [17] geliştirilen ve uygulanan denetim algoritmasının basit olduğu görülmektedir. Ancak bu tip denetim yönteminde robotun eksenleri tek tek kontrol edildiği için robotun ucunun istenilen konum ve yönde konumlanması uğraştırıcı bir iş



Şekil 16. Kinematik donanımının benzetim sonucu 3 (Simulation result of the kinematics hardware 3)

olmaktadır.

Robot manipülâtörün kartezyen özgül denetiminde geliştirilen denetim algoritmasının eksen özgül denetim algoritmasına göre daha karmaşık olduğu görülmektedir. Ancak bu denetim yönteminde ise robotun ucunun konum ve yönünün istenilen şekilde ayarlanabilmesi ise eksen özgül denetime göre çok daha kolaydır. Kullanılan kartezyen-özgül yöntemin diğer bir amacı da sistemi mümkün olduğunca basit tutmak ve güvenilir bir denetleyici tasarlamaktır. Denetleme algoritması FPGA içerisinde uygulandığı için matematiksel denklemlerin çözümü mikro saniyeler mertebesinde tamamlanmaktadır. Sistemin bu kadar hızlı olmasında FPGA içerisinde bulunan hazır donanımsal yapıların kullanılmasının büyük etkisi vardır.

Günümüzde endüstride bu çalışmada kullanılan eksen özgül ve kartezyen özgül denetim uygulamaları kullanılmaktadır. Her iki denetim algoritmasının tercih edildiği uygulama alanları farklıdır yani bu iki algoritma da önem taşımaktadır. Bu çalışmada geliştirilen kartezyen özgül denetim algoritması daha fazla ekleme sahip olan bir robotta uygulanırsa daha fazla serbestlik derecesi olan ve daha kabiliyetli bir sistem geliştirilebilir.

Hem eksen özgül denetimde hem de kartezyen özgül denetimde robotun daha kesin ve doğru denetiminin sağlanabilmesi için geri besleme elemanı olarak sensörler kullanılarak robotun verilen işi daha az hatayla ve daha güvenli yapması sağlanabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kabuka, M., Glaskowsky, P., Miranda, J., "Microcontrollerbased Architecture for Control of a Six Joints Robot Arm", **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, 35 (2):217-221 (1988).
2. Sage, H.G., De Mathelin, M.F., Ostertag, E., "Robust control of robot manipulators: a survey", **International Journal of Control**, 72(16), 1498-1522 (1999).
3. Moreno, J., Kelly, R., "Velocity control of robot manipulators: analysis and experiments", **International Journal of Control**, 76(14):1420-1427 (2003).
4. Cervantes, I., Garrido, R., Alvarez-Ramirez, J., Martinez, A., "Vision-Based PID Control of Planar Robots", **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 9(1), 132-136 (2004).
5. Jatta, F., Legnani, G., Visioli, A., Ziliani, G., "On the use of velocity feedback in hybrid force/velocity control of industrial manipulators", **Control Engineering Practice**, 14:1045-1055 (2006).
6. Craig, J.J., "Introduction to robotics: Mechanics and control", **MA: Addison-Wesley**, 20-27 (1989).
7. Lewis, F.L., Abdallah, C.T., Dawson, D. M., "Control of robot manipulators", **NY: MacMillan Publishing Company**, 40-45 (1993).
8. Sciavicco, L., Siciliano, B., "Modeling and control of robot manipulators", **2nd edition, London: Springer-Verlag**, 30-40 (2000).
9. Reyes, F., Rosado, A., "Polynomial family of PD-type controllers for robot manipulators", **Control Engineering Practice**, 13(4):441-450 (2005).
10. Paden, B., Panja, R., "Globally asymptotically stable PD controller for robot manipulator", **International Journal of Control**, 47(6):1697-1712 (1988).
11. An, C.H., Atkeson, C.G., Griffiths, J.D., Hollerbach, J.M., "Experimental evaluation of feedforward and computed torque control", **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 5(3):368-373 (1989).
12. Tarn, T.J., Bejczy, A.K., Marth, G.T., Ramadorai, A.K., "Performance comparison of four manipulator servo schemes", **IEEE Control Systems**, 22-29 (1993).
13. De Jager, B., Banens, J., "Experimental evaluations of robot controllers", **Proceedings of the 33rd conference on decision and control**, Lake Buena Vista, 363-368 (1994).
14. Doğan, M., Morgül, Ö., "Nonlinear PDE Control of Two-Link Flexible Arm with Nonuniform Cross Section", **Proceedings of the 2006 American Control Conference**, Minneapolis, 400-405 (2006).
15. Slotine, J.J., Li, W., "On the adaptive control of robot manipulators", **The International Journal of Robotics Research**, 6(3):49-59 (1987).
16. Long, P.H.W., Tsoi, K.H., "Field Programmable Gate Array Technology for Robotics Applications", **Robio05**, 70-76 (2005).
17. Koca, H., Ertas Y., Bilge, H., Taplamacıoğlu C., "Altı Eksenli Robot Kolunun FPGA Tabanlı Kontrol Örneği", **TOK 05**, 560-566 (2005).
18. Koca, H., Erdem H., "Microcontroller Based Control of a 6-Axes Robot Manipulator", **Mechatronics and Robotics**, Student Forum (2004).