

Bir FPGA Platformunun Kontrol Sistemi Simülatörü Olarak Kullanılması

Use of an FPGA Platform as a Control System Simulator

Handan Gürsoy^{1,2}, Mehmet Önder Efe³

^{1,3}Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Otonom Sistemler Araştırma Laboratuvarı
Hacettepe Üniversitesi, Beytepe, Ankara
{[hgursoy.onderefe](mailto:hgursoy.onderefe@cs.hacettepe.edu.tr)}@cs.hacettepe.edu.tr}

² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, Hatay

Özetçe

Bu çalışmada robot manipülatörünü denetlemek amacıyla FPGA platformu üzerinde çalışacak bir denetleyici tasarlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla denetleyici olarak doğrusal olmayan sistemlerde iyi performans sergilemesi ile dikkatleri üzerine çeken kayan kipli denetim (KKD) yaklaşımı seçilmiştir. Denetleyici Matlab/Simulink ortamında geliştirilip daha sonra Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi kullanılarak FPGA platformu üzerinde çalışması hedeflenen ikinci bir tasarım yapılmıştır. Gürbüzlük ve yörünge takip sonuçları açısından sonuçların başarılı şekilde elde edildiği görülmüştür. Ayrıca FPGA platformu için modellenen tasarım sonuçlarının Matlab/Simulink ortamında tasarlanan denetleyici sonuçlarıyla uyum içinde olduğu görülmüştür.

Abstract

In this work, a controller running on an FPGA platform is designed to control a robot manipulator. Due to its prominent features on nonlinear systems, sliding model control is chosen for prototyping. The design is first done on Matlab/Simulink environment then Xilinx System Generator library is used in the second stage of the implementation. It is seen that the trajectory tracking and robustness properties are obtained. Further, the results obtained via FPGA based simulator are in good compliance with those obtained in Matlab/Simulink environment.

1. Giriş

Kayan kipli denetim uzun yıllardan beri üzerinde yoğun olarak çalışılan ve bilimsel yazında sıkça karşılaşılan gürbüz bir denetim metodudur. Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde istenen performansı sağlamasıyla son yıllarda araştırmacıların gözdesi haline gelmiş, çok çeşitli kontrol problemleri için farklı şekillerde uygulanmıştır [1-3].

Kayan kipli denetim ilk defa 1950'lerde ortaya atılmış bir yaklaşım olsa da dünyanın bu yaklaşımdan haberdar olması 1970'li yılları bulmuştur. Yöntemi ilk öneren kişi Profesör Vadim Utkin olmamasına karşın dünya çapında bu yöntem onun adıyla birlikte anılmaktadır [4]. Ortaya çıkışından beri KKD yaklaşımı robotik, elektromekanik sistemler, kimyasal süreçler gibi geniş bir yelpazede yer alan uygulamalarda denetim yaklaşımı olarak kullanılmıştır.

Kayan kipli denetim yaklaşımı sistem hatasını kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzey üzerine itmeyi ve hatayı o yüzey üzerinde tutmayı amaçlamaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda bu denetim kuralı kurgulanırken iki temel aşama vurgulanır. Bu aşamalardan ilki evrensel bir çeker olan kayma alt uzayının tespiti, ikincisi ise hata vektörünü bu yüzey üzerinde tutabilmek için gerekli olan denetim sinyalinin ifade edilmesidir.

KKD denetleyicisinin uygulamada karşılaşılan en büyük dezavantajı çatırdama problemi [5,6]. Denetim sinyali, sıfır etrafında küçük değişimler gösteren bir değişkenin işaretine bağlıdır. O halde bu değişkene eklenecek gürültü terimleri denetim sinyalinde ani değişimlere sebep olabilecektir. Bu durum ise çatırdama olarak isimlendirilen olayın ortaya çıkmasına sebep olur. Kayma rejiminde kayma alt uzayı etrafında anlık sapmalar meydana gelir ve bu da denetim sinyalinde yüksek frekanslı bileşenlerin görünmesine sebep olur. Çatırdama problemi kayma kipli denetim ile ilgili üzerinde durulan en önemli çalışma alanlarından birini oluşturmuştur ve bu problemi ortadan kaldırmak için birçok yöntem önerilmiştir [7,8]. Çünkü bu problem mekanik sistemlerde tahribata, elektrik sürücülerinde daha fazla güç tüketiminin meydana gelmesi gibi sorunlara yol açmaktadır. Doyma fonksiyonun kullanılması, işaret fonksiyonun farklı yaklaşımları ile yumuşatma veya bulanık mantıkla indirgeme geçmişten günümüze bu problemi ortadan kaldırmak için önerilen yöntemlerden bazılarıdır.

Robot manipülatörü denetim yaklaşımlarında en fazla tercih edilen uygulama alanlarından biri olmuştur. Doğrusal olmayan dinamiklere sahip olan robot manipülatörleri denetim sistemlerinin performanslarının gözlemlenebilmesi için iyi bir uygulama alanı oluşturmuştur.

Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA) son zamanlarda diğer teknolojilere oranla daha fazla ilgi çeken bir platform olmuştur. Gerçek zamanlı uygulamalarda FPGA'nın tasarımcılara sunduğu birçok avantaj vardır. Bu avantajların ilki ve en önemlisi paralel işlem yapabilme yeteneğidir. Böylece sistem donanımında çalışma sayesinde önemli ölçüde hız kazanmaktadır. Bu ise çok büyük tasarımlarda zaman ve yer açısından tasarımcının daha verimli uygulamalar gerçekleştirmesine olanak sağlamaktadır, [9,10].

Bu bildiri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde robot manipülatörü ve dinamik modeli verilmiş olup, üçüncü bölümde kayan kipli denetim yaklaşımı anlatılmış ve robot manipülatörüne uygulanması verilmiştir. Dördüncü bölümde FPGA platformu için yapılan tasarımlar sunulmuştur. Beşinci bölümde simülasyon sonuçları verilmiş olup, altıncı bölümde sonuçlar ve hedefler sunulmuştur.

2. Robot Manipülatörü ve Dinamiği

Robot manipülatörü belirlenen görevleri yapması için programlanabilen mekanik sistemler olup çok çeşitli şekilde sınıflandırılmışlardır. Bu çalışmada serbestlik derecelerine göre sınıflandırılmış bir robot manipülatörünün dinamik modeli kullanılarak bir denetleyici tasarlanmıştır. 3 ekleme sahip bu robot manipülatörünün ilk iki eklemi dönel, üçüncü eklemi ise prizmatiktir ve bilimsel yazında RRP robot manipülatörü olarak yer almaktadır.

Bir robot manipülatörünün mekanik düzenleşimi Şekil 1'de, dinamik modeli ise (1)'de verilmiştir.

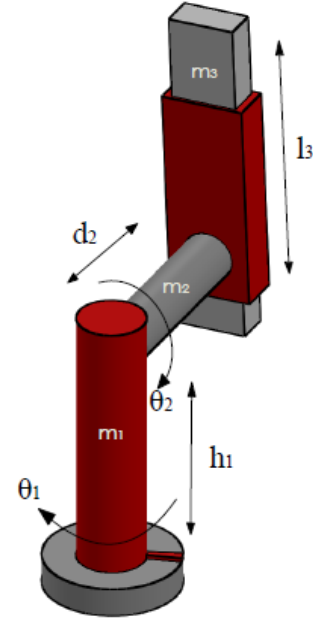
$$\tau = M(q)\ddot{q} + B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}]^2 + G(q) \quad (1)$$

Bu denklemde yer alan parametreler aşağıdaki şekildedir.

- τ : Denetim girişleri,
 $M(q)$: $n \times n$ boyutlu kütle matrisi,
 $B(q)$: $n \times 1$ boyutlu Coriolis matrisi,
 $C(q, \dot{q})$: $n \times 1$ boyutlu merkezkaç matrisi,
 $G(q)$: $n \times 1$ boyutlu yerçekimi matrisi,
 q, \dot{q}, \ddot{q} : Eklemlere ait konum, hız, ivme vektörleri.

Şekil 2'de görülen ve denetim sisteminin uygulanacağı RRP robot manipülatörünün dinamik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + B(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 & \dot{q}_3 \\ \dot{q}_2 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} + C(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 \\ \dot{q}_2^2 \\ \dot{q}_3^2 \end{bmatrix} + G(q) \quad (2)$$



Şekil 1: RRP robot manipülatörü

Denklem 3, 4, 5'de yer alan m_1, m_2, m_3 parametreleri robot kollarına ait kütle bilgilerini verirken, $h_1, d_2,$ ve l_3 parametreleri robotun bağ uzunlukları bilgisini vermektedir.

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \left[I_{zz_1} + \frac{1}{4}m_2d_2^2 \right. \\ & + s^2\theta_2 \left(I_{xx_2} \right. \\ & + I_{xx_3}m_3 \left(\frac{1}{4}l_3^2 - l_3d_3 + d_3^2 \right) \\ & \left. \left. + c^2\theta_2(I_{yy_2} + I_{zz_3}) + m_3d_2^2 \right] \ddot{\theta}_1 \right. \\ & + \left[d_2m_3c\theta_2 \left(\frac{1}{2}l_3 - d_3 \right) \right] \ddot{\theta}_2 \\ & - [d_2m_3s\theta_2] \ddot{\theta}_3 \\ & + 2s\theta_2c\theta_2 \left[I_{xx_2} + I_{xx_3} - I_{yy_2} - I_{zz_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4}l_3^2 - l_3d_3 + d_3^2 \right) \left. \right] \dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \\ & - \left[d_2m_3s\theta_2 \left(\frac{1}{2}l_3 - d_3 \right) \right] \dot{\theta}_2^2 \\ & - [2d_2m_3c\theta_2] \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ & + m_3s^2\theta_2(-l_3 + 2d_3)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \left[d_2 m_3 c \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \right] \ddot{\theta}_1 \\ & + \left[I_{zz_2} + I_{yy_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) \left. \right] \ddot{\theta}_2 \\ & - s \theta_2 c \theta_2 \left[I_{xx_2} + I_{xx_3} - I_{yy_2} - I_{zz_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) \left. \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + [m_3(-l_3 + 2d_3)] \dot{d}_3 \dot{\theta}_2 \\ & + g m_3 s \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_3 = & -[d_2 m_3 s \theta_2] \ddot{\theta}_1 + m_3 \ddot{d}_3 + \left[m_3 s^2 \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + \left[m_3 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \right] \dot{\theta}_2^2 + g m_3 c \theta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Eşitlik (2)'de kullanılan kütle matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & d_2 m_3 c \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) & -d_2 m_3 s \theta_2 \\ d_2 m_3 c \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) & D_{22} & 0 \\ -d_2 m_3 s \theta_2 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Burada yer alan D_{11} ve D_{22} değişkenleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} D_{11} = & I_{zz_1} + \frac{1}{2} m_2 d_2^2 \\ & + s \theta_2^2 \left(I_{xx_2} + I_{xx_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) \left. \right) \\ & + c^2 \theta_2 (I_{yy_2} + I_{zz_3}) + m_3 d_2^2 \\ D_{22} = & m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) + I_{zz_2} + I_{yy_3} \end{aligned}$$

Eşitlik (2)'de yer alan Coriolis ve yer çekimi matrisinin her bir elemanı RRP robot manipülatörü için aşağıdaki gibidir.

$$[B + C](q) = \begin{bmatrix} [B + C]_{11} \\ [B + C]_{21} \\ [B + C]_{31} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [B + C]_{11} = & 2s \theta_2 c \theta_2 \left[I_{xx_2} + I_{xx_3} - I_{yy_2} - I_{zz_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) \left. \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \\ & - d_2 m_3 s \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \dot{\theta}_2^2 \\ & - 2d_2 m_3 c \theta_2 \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 \\ & + m_3 s^2 \theta_2 (-l_3 + 2d_3) \dot{d}_3 \dot{\theta}_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [B + C]_{21} = & -s \theta_2 c \theta_2 \left[I_{xx_2} + I_{xx_3} - I_{yy_2} - I_{zz_3} \right. \\ & + m_3 \left(\frac{1}{4} l_3^2 - l_3 d_3 + d_3^2 \right) \left. \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + [m_3(-l_3 + 2d_3)] \dot{d}_3 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [B + C]_{31} = & \left[m_3 s^2 \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + \left[m_3 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \right] \dot{\theta}_2^2 \end{aligned}$$

Ayrıca Denklem 2'de yer alan yerçekimi matrisi ise Denklem 8'deki gibi ifade edilir.

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ g m_3 s \theta_2 \left(\frac{1}{2} l_3 - d_3 \right) \\ g m_3 c \theta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. Kayan Kipli Denetim

Kayan kipli denetim doğrusal olmayan sistemler için sıkça tercih edilen geri beslemeli bir denetim yaklaşımıdır. Sistem parametrelerindeki belirsizlikler ve dış bozucu etkiler sistem denetiminin sağlanması aşamasında ciddi sorunlar teşkil etse de kayan kipli denetim bu problemlerle başa çıkmayı başaran ve bu özelliğiyle de tasarımcıların dikkatini çeken bir denetim yaklaşımıdır.

KKD yaklaşımı sistemi denetlerken iki temel cevabın ortaya çıkmasını sağlar. Bunlar erişme kipi ve kayma kipi olarak adlandırılır. Sistem durumları veya değişkenleri kayma yüzeyine ulaştığı anda belirsizliklere ve dış bozucu etkenlere karşı duyarısız hale gelir.

KKD yaklaşımında kayma yüzeyi olarak adlandırılan s değişkeni aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \alpha \right) \tilde{x} = (\dot{x} - \dot{x}_d) + \alpha(x - x_d) \quad (10)$$

Burada α kayma yüzeyinin eğimini belirleyen pozitif sabit bir sayıdır. Ayrıca, $\tilde{x} = x - x_d$ izleme hatasını ve x_d değişkeni referans konumunu temsil eder. Burada önemli olan α parametresinin değerinin belirlenmesidir. Bu parametre ne kadar büyük seçilirse izleme hatasının azalması o kadar hızlanır ancak bu durum sistemin gürbzlük özelliğinden ödün verilmesine sebep olabilir. Bu çalışmada üzerinde durulan sistem için $s(x, t)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S := \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Bu aşamada önemli olan denetim kuralının sisteme uygun şekilde belirlenmesidir. Denetim kuralı tasarımı için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Lyapunov eşdeğer denetim kuralı bu yöntemlerden bir tanesidir ve bu çalışmada denetim kuralı bu yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem için öncelikle Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir.

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (12)$$

Burada kararlılık için fonksiyonun kendisi pozitif tanımlı ($V > 0$) iken fonksiyonun türevi negatif tanımlı ($\dot{V} < 0$) olmalıdır. Fonksiyonun türevi (13)'deki gibi olsun.

$$\frac{dV(S)}{dt} := -S^T K \operatorname{sgn}(S) \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan $\operatorname{sgn}(S)$ fonksiyonu

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(s_1) \\ \operatorname{sgn}(s_2) \\ \operatorname{sgn}(s_3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıda yer alan K matrisi pozitif tanımlı köşegen bir matristir. Lyapunov kararlılık ölçütüne göre sistem orijin noktasında kararlılık noktasındadır. Burada yer alan K parametresinin de sisteme uygun olarak seçilmesi KKD yaklaşımında önem arz etmektedir. Çünkü K 'nin çok büyük seçilmesi çatırdama problemi ile sistemi karşı karşıya bırakırken, gereğinden çok daha küçük seçilmesi durumunda denetleyici gürbüzlük özelliğinden yoksun kalabilmektedir. Yukarıda anlatılanlar ışığında KKD'nin denetim kuralı

$$U = U_{eq} + U_N \quad (15)$$

şeklinde ifade edilir. Denetim kuralında bulunan U_{eq} hata vektörünü kayma yüzeyine doğru yönlendirirken, U_N 'nin görevi ise hata vektörünün kayma yüzeyi üzerinde kalmasını sağlamaktadır.

Bu bilgiler ışığında, RRP robot manipülatörü için denetim kuralı aşağıdaki şekilde türetilebilir.

$$U_{eq} = [M^{-1}(B + C + G) - \dot{S}]M \quad (16)$$

$$U_N = K \operatorname{sgn}(S) \quad (17)$$

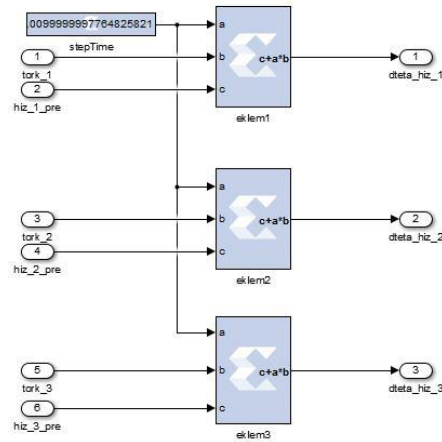
$$U = [M^{-1}(B + C + G) - \dot{S}]M + K \operatorname{sgn}(S) \quad (18)$$

4. FPGA üzerinde Kayan Kipli Denetim Tasarımı

Bu çalışmada FPGA tabanlı denetleyici tasarlamak için Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane simülasyon ve kod üretimi için Xilinx platformlarına özgü bloklar ile tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır. Donanım üzerinde denetleyicinin nasıl sonuçlar vereceğini bu kütüphane aracılığıyla oluşturulan

tasarım çıktılarında gözlemlemek mümkündür. Bir sonraki aşamada tasarlanan bloklar kullanılacak FPGA modeli için sentezlenip, donanım tanımlama dili (İng. Kıs. HDL) kodları otomatik olarak elde edilir. Kullanılan Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ve izlenen bu süreç tasarımcıya zaman ve işlem kolaylığı açısından birçok avantaj sunmaktadır.

Robot manipülatörünün denetimini sağlayacak olan KKD denetleyicisinin Matlab/Simulink üzerinde yapılan blok tasarımları donanım için Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ile adım adım tekrar tasarlanmıştır. FPGA platformunun mimarisi işlemlerin mantık blokları ile yapılmasına imkân vermektedir. Bu anlamda Matlab/Simulink kısmında yapılan tasarımlarda tek bir blokla elde edilebilecek işlemler burada çok daha küçük ve temel bloklar ile yapılmaktadır.



Şekil 2: İntegrator bloğunun Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ile tasarımı

Şekil 2'te verilen tasarımda ise robot manipülatörüne ait hız ve konum bilgilerini elde edebilmek için kullanılan integrator bloğunun tasarımı verilmiştir. Sürekli zamanlı İntegrator bloğunu Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ile tasarlamak mümkün olmadığından dolayı tasarım ayrıık zamanda yapılmıştır.

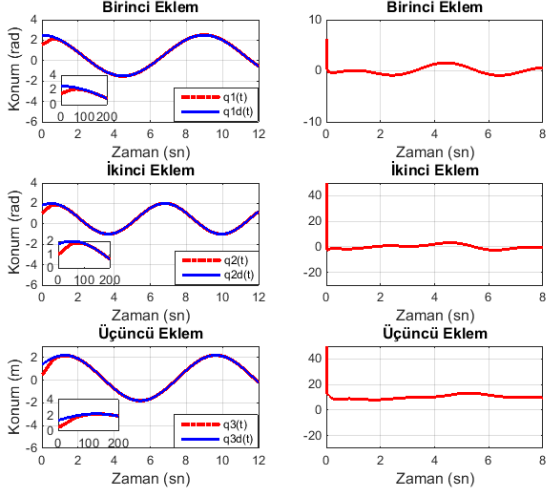
5. Simülasyon Sonuçları

RRP robot manipülatörü için KKD yaklaşımının geri beslemeli denetleyici tasarımları Matlab/Simulink ve Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi kullanılarak modellenmiş ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

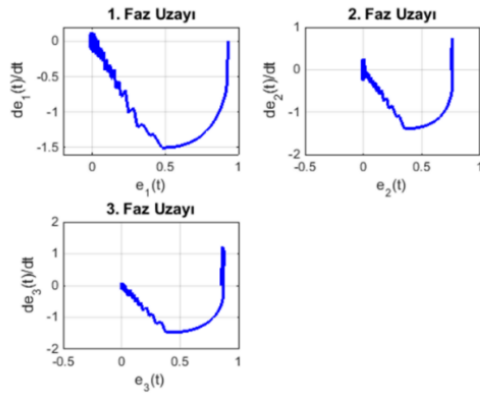
Denetimi sağlayacak olan robot manipülatörünün kol kütleleri $m_1, m_2, m_3=1$ kg olarak belirlenmiş, kol uzunlukları ise $h_1, l_3=1$ m ve $d_2=0.5$ m olarak belirlenmiştir. Ayrıca tasarımlarda yerçekimi ivmesi (g) 9.81 m/s^2 olarak alınmıştır.

İlk olarak KKD denetleyicisinin tasarımları Matlab/Simulink üzerinde yapılmıştır. Tasarımlarda en iyi performansları elde edebilmek için parametreler $\alpha=4$ ve $K=5$ olarak seçilmiştir. Öncelikle tasarlanan sistem üzerinde

gürültünün etkisini gözlemleyebilmek için sıfır ortalamalı varyansı $1e-8$ olan rastgele gürültü eklenmiştir. Gürültülü sistemin sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4'de görülmektedir. Bu sonuçlarda sistemin KKD denetleyicisinin en büyük dezavantajı olan çatırdama problemiyle karşılaştığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 3'te eklemelerin yörünge takip sonuçları ve her bir ekleme ait kontrol işaretinin değişimleri görülürken, Şekil 4'de robot manipülatörünün eklem değişkenlerine ait faz uzayı davranışları verilmiştir.



Şekil 3: Gürültü eklenmiş robot manipülatörüne ait eklemelerin takip sonuçları ve kontrol işaretleri

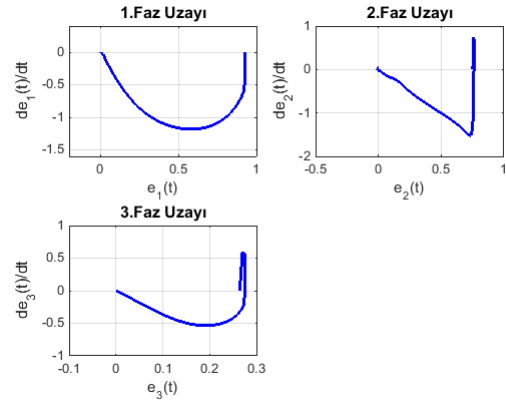


Şekil 4: Gürültü eklenmiş robot manipülatörünün eklem değişkenlerinin faz uzayı davranışı

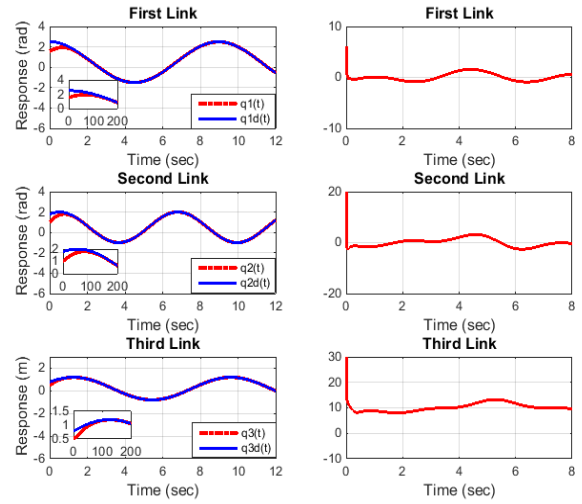
KKD denetleyicisinin dezavantajı olarak karşımıza çıkan çatırdama problemi başarım açısından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle robot manipülatörünün denetiminde meydana gelen bu problemin etkisini azaltmak amacıyla işaret fonksiyonunu daha yumuşak geçişi yapabilmek için eşitlik (17)'de verilen $sgn(s)$ fonksiyonunda aşağıdaki gibi değişiklik yapılmıştır.

$$sgn(s) \cong \frac{s}{\varepsilon + |s|} \quad \varepsilon > 0 \quad (19)$$

Bu denklemde $\varepsilon = 0.2$ olarak seçilmiştir. Bu değer büyüdükçe işaret fonksiyonunun orijin etrafındaki dikliği azalır, küçüldükçe diklik artar. Şekil 5 ve Şekil 6'da bu değişiklik sonucunda elde edilen tasarımın simülasyon sonuçları sunulmuştur. Şekil 5'de robot manipülatörüne ait eklem değişkenlerinin faz uzayı davranışları verilmiştir. Burada hatanın sıfıra yakınsadığı ve KKD denetleyicisinin temel amacının yerine getirildiği görülmektedir. Şekil 6'da ise manipülatöre ait yörünge takip sonuçlarının başarılı şekilde elde edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 6'da her bir ekleme ait kontrol işaretinin değişim çizgeleri verilmiştir.



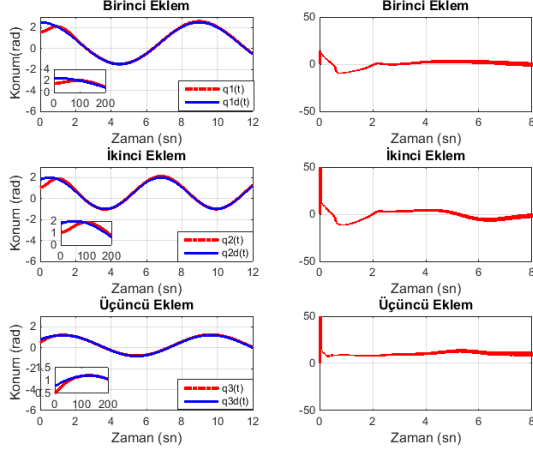
Şekil 5: Robot manipülatörüne ait eklem değişkenlerinin faz uzayı davranışı



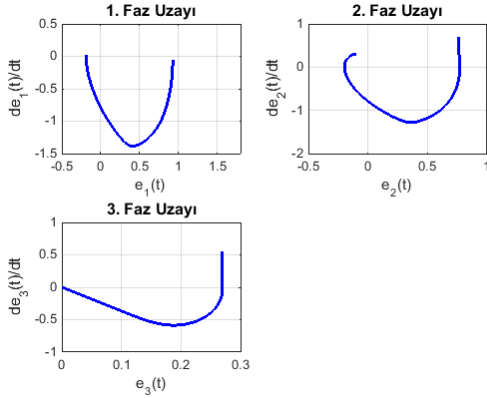
Şekil 6: Robot manipülatörüne ait eklemelerin takip sonuçları ve kontrol işaretleri

Önerilen KKD denetleyicinin FPGA platformu üzerinde nasıl sonuçlar vereceğini gözlemleyebilmek için Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ile tasarlanan denetleyicinin sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 7'de verilen yörünge

takip sonuçlarının verilen referans konumlarını başarılı şekilde takip ettiği görülmektedir. Sonuçlara göre FPGA platformu için tasarlanan denetleyici sonuçlarının Matlab/Simulink ortamında elde edilen sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmektedir. Şekil 8'de ise robot manipülörünün eklem değişkenlerinin faz uzayı davranışı verilmiştir. Burada bu çalışmada sunulan denetleyicinin KKD denetiminin amacına uygun şekilde sonuçlar verdiği ve hatanın orijine yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 7: Robot manipülörüne ait eklemlerin takip sonuçları ve kontrol işaretleri



Şekil 8: Robot manipülörüne ait eklem değişkenlerinin faz uzayı davranışı

6. Sonuçlar

Bu çalışmada bir robot manipülörünün denetimini sağlamak için bir KKD denetleyicisi tasarlanması hedeflenmiştir. Çalışmada üç eklemleri RRP robot manipülörü için tasarımlar yapılmıştır. İlk olarak tasarımlar Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup iki farklı tasarım yapılmıştır. Çatırdama problemini gözlemleyebilmek için ölçümlere gürültü sinyali eklenmiştir. Daha sonra gürültünün etkisini azaltmak ve çatırdama problemini indirmek için tekrar bir düzenleme

yapılmıştır. Bu ortamda yapılan tasarımlar esas alınarak FPGA platformu üzerinde koşturulabilecek şekilde Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi kullanılarak yeni bir denetleyici tasarımı yapılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde Matlab/Simulink ortamında ve Matlab Xilinx Sistem Üretici Kütüphanesi ile tasarlanan denetleyici sonuçlarının örtüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Yukarıda anlatılanlar ışığında FPGA platformunun gerçek zamanlı uygulamalar için iyi bir simülasyon alternatifi olabileceği görülmüştür.

Teşekkür

Bu bildiri TÜBİTAK-ARRS (Slovenya) 2508 programında 114E954 referans numaralı proje kapsamında yapılan çalışmalardan üretilmiştir.

Kaynakça

- [1] S. Rao, H. Brandtstädter, M. Buss, ve V. I. Utkin, "Sliding Mode Control in Mechanical Systems with Electric Actuators," *In Proceedings of the 8th Int. Workshop on VSS*, İspanya, s:1-4, 2004.
- [2] M.U. Salamcı ve G.S. Tombul, "Sliding Mode Control Design with Time Varying Sliding Surfaces for a Class of Nonlinear Systems," *IEEE Int. Conf. on Control Applications*, Almanya, s: 996-1001, 2006.
- [3] A. Nowacka-Leverton ve A. Bartoszewicz, "Sliding Mode Control of Second Order Dynamic System with State Constraints," 2011.
- [4] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. Autom. Control*, Cilt: AC-22, No: 2, s: 212-222, 1977.
- [5] M. Roopaei, J. M. Zolghadri, "Chattering-free Fuzzy Sliding Mode Control in MIMO uncertain systems," *Nonlinear Analysis*, 2009.
- [6] V. I. Utkin, "Chattering Problem," *18th IFAC World Congress*, 2011.
- [7] I. Bendaas ve N. Farid "A new method to minimize the chattering phenomenon in sliding mode control based on intelligent control for induction motor drives." *Serbian Journal of Electrical Engineering*, No: 10.2, s:231-246, 2013.
- [8] M. Roopaei, M. Jahromi ve Zolghadri "Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems", *Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications*, No: 71(10), s: 4430-4437, 2012.
- [9] N. Sulaiman, Z. A. Obaid, M. H. Marhaban, ve M. N. Hamidon, "Design and implementation of FPGA-based systems-a review." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, No: 3.4, s: 3575-3596, 2009.
- [10] F. Piltan, N. Sulaiman, M. H. Marhaban, A. Nowzary ve M. Tohidian, "Design of FPGA based sliding mode controller for robot manipülör," *International Journal of Robotic and Automation*, No: 2.3, s: 183-204, 2011.