

PID Tabanlı Robot Kolu Kontrolü: Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Metotlarının ODE45 Deneysel Çözümleme ile Karşılaştırılması

Ahmet NALBANT¹, Murat AYDOS²

^{1,2} Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
Beytepe, 06000 Ankara
Mart_2015

Keywords: PID Denetleyici, Robot kol denetimi, ODE45, Z-N yöntemi, Tyreus-Luyben

ABSTRACT: *Speed and accuracy are certainly the most important kontrol parameters of a robotic arm. In order to achieve the optimum values both of speed and accuracy when tracking a path in a robotic arm system, the controller type and parameters are quite important. The control parameters selected that are P-I-D Proportional, Integral and Derivative and tuned experimentally using Matlab Ode45 tool. Results compared with Ziegler-Nichols and Tyreus-Luyben frequency domain calculation methods. To do this, the 3 degree of freedom robotic arm modelled and its dynamics calculated. Same robot arm and parameters used for each methods comparison.*

Özet-Bu makalede, birden fazla hareketli eklem ve uzuvu sahip robot kollarında planlanan yörünge boyunca robot kolun hareketini düzenleyen P-I-D (Proportional, Integral, Derivative- oransal-integral-türevsel) denetleyici parametrelerinin, robot kolun hızı ve takip ettiği yörüngeye doğruluğu dikkate alınarak optimum değerlere ulaşmada Matlab Ode45 deneysel yöntem ile Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Teorileri kıyaslanarak sonuçlar elde edilmiştir. Modelleme amacıyla 3 DOF (Degrees Of Freedom) serbestlik alanına sahip bir kol tasarlanarak üzerinde çalışılmıştır. Üç ve daha fazla serbestlik alanına sahip dönele eklemli tasarımlar için fikir vermesi ve fayda sağlaması hedeflenmiştir.

1.Giriş

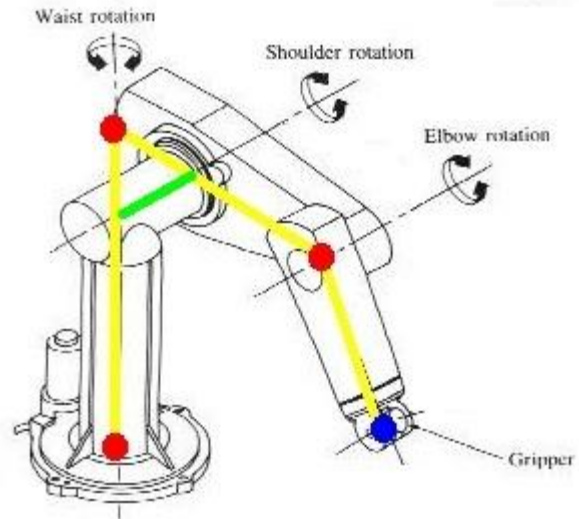
Robot kolu, eklemlerle birbirine bağlı uzuvlardan oluşur. Bu yapılar eğilmeyen mukavemeti yüksek ancak genellikle hafif malzemelerden imal edilmeye çalışılır. Kütleli harekete geçirip moment kazandırmak ve tekrar durdurmaya çalışırken gereksiz güç harcanmasının önlenmesi, frenleme durumunda en az salınım, çabuk ivmelenme gibi parametreler hafif malzemelerde daha iyi sonuçlarla birlikte daha az enerji ile kontrol olanağı sunabilmektedir. [1]

Testlerin uygulanacağı PID denetleyici ile kontrol edecek olan model robot kolun tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla, hem silindirik hem de Kartezyen koordinat eksenlerinde hareket yetenekleri olan ve birden fazla eklem ile uzaysal bir çalışma alanına sahip robot kolun matematiksel modellenmesi ve kontrolü yapılarak önceden planlanan bir çalışma yörüngesinde, belli bir süre içinde yörüngeyi takibi ve doğruluk değerleri

kıyaslanmıştır. Modellemede kullanılan üç serbest dereceli robot kolu örneği için bir PID denetleyici tasarlanmış ve bu denetleyici parametrelerinin yörünge doğruluğuna etkisi çalışma kapsamında üç farklı yöntem çıktılarıyla kıyaslanmıştır.

2. Robot Kolun Tasarımı

Çalışmada, 3 DOF (Degrees Of Freedom) serbestlik alanına sahip bir kol tasarlanmıştır. Kolun, verilen komutlara (yer değişim istekleri) olan cevap süresinin (Transient Response and Settling Time) kısa olması amacıyla hafif alaşımli metaller, dayanıklı plastik materyaller, içi boş metal boru veya prizmatik malzemelerden tasarlanması gerektiği düşünülmüştür. Bu amaçla saf alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Hesaplamalarda uzuvların orta noktası ağırlık merkezi olarak dikkate alınmıştır.[2]



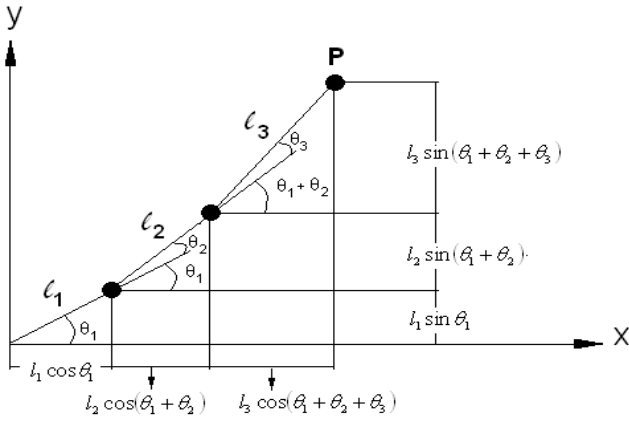
Şekil 1: Örnek robot kol modeli.

İleri Kinematik Hesaplama:

Robot kolun sabit ağırlıktan yani zemin, tavan, herhangi bir oynamaz yüzeye monte edilen kütesinden başlayarak hareketli olan en uç noktasına ulaşmak için yapılan hesaplamalardır. Bu hesaplamalar için Denavit Hartenberg Matrisi oluşturulmuştur.[3]

Denavit Hartenberg Matrisi ve Dört Parametresi:

Bu metot iki komşu katı mekanik link arasındaki uzaysal ilişkiyi tarif etmek için 4x4 homojen bir transformasyon matrisini kullanır ve el koordinat çerçevesiyle referans koordinat çerçevesi arasındaki uzaysal yer değiştirmeyi ifade eden eşdeğer 4x4 homojen transformasyon matrisi bulma amaçlı direkt kinematik problemini kolaylaştırır.[4]



Şekil 2: Robot kolun geometrik modellenmesi.

Tablo 1: Denavit-Hartenberg değişkenleri tablosu.

| Eksen No | D-H Değişkenleri | | | | Eklemler Değişkeni |
|----------|------------------|--|-------|------------|--------------------|
| i | α_{i-1} | a_{i-1} | d_i | θ_i | θ_i |
| 1 | 0 | 0 | 0 | θ_1 | θ_1 |
| 2 | 0 | l_1 Z ₁ ile Z ₂ arası | 0 | θ_2 | θ_2 |
| 3 | 0 | l_2 | 0 | θ_3 | θ_3 |
| 4 | 0 | l_3 | 0 | 0 | 0 |

Dönüşüm matrisi genel ifadesini kullanarak,

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ F & 1_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tabloya uygun olarak dönüşüm matrislerini oluşturalım.

Sonuç dönüşüm matrisi şu şekilde elde edilir;

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} c(\theta_1+\theta_2)\theta_3 - s(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 & -s(\theta_1+\theta_2)c\theta_3 - c(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 & 0 & l_3c(\theta_1+\theta_2)c\theta_3 - s(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 + l_2c(\theta_1+\theta_2) + l_1c\theta_1 \\ s(\theta_1+\theta_2)c\theta_3 - c(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 & c(\theta_1+\theta_2)c\theta_3 - s(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 & 0 & l_3s(\theta_1+\theta_2)c\theta_3 + c(\theta_1+\theta_2)s\theta_3 + l_2s(\theta_1+\theta_2) + l_1s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrisin dördüncü kolonunda yer alan konum vektöründen x,y ve z konumları için ifadeler aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} P_x &= l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos \theta_1 \\ P_y &= l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \sin \theta_1 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Ters Kinematik Hesaplama:

İlk hesaplama yönteminin tersine, yani hareketli en uç noktadan başlayarak sabit noktaya ulaşmaya çalıştığımız hesaplama yöntemidir.[5] Birinci uzuv yere dik olarak monte edilmiş olup zeminle 90 derecelik sabit açıyla durmaktadır. Bu kabullenme ile robot kolun ters kinematik hesaplamalarını çıkaralım;

İleri kinematik konum vektörlerini tekrar kullanarak robot kolun uç noktasının koordinatlarını $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ cinsinden bulmaya çalışalım. Eşitlikleri düzenleyerek, her iki tarafının karesini alıp kısaltmalardan faydalanalım. [2]

$$\begin{aligned} P_x &= l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos \theta_1 \\ P_y &= l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_1 = \gamma + \cos^{-1} \left(\frac{-(x'^2 + y'^2 + l_1^2 - l_2^2)}{2l_1 \sqrt{x'^2 + y'^2}} \right)$$

durumuna dönüşür ki burada,

$$\gamma = a \tan 2 \left(\frac{-y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}, \frac{-x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \text{ dir.}$$

θ_1 değeri bulunduktan sonra, θ_1 yerine konularak θ_2 bulunabilir.

$$\theta_2 = a \tan 2 \left(\frac{y' - l_1 \sin \theta_1}{l_2}, \frac{x' - l_1 \cos \theta_1}{l_2} \right) - \theta_1 \quad (4)$$

benzer şekilde buradan θ_1 ve θ_2 ye bağlı olarak θ_3 bulunur.

$$\theta_3 = \theta_1 + \theta_2 \text{ dir.} \quad (5)$$

Robot Kolun Dinamikleri:

Kolun dinamik çözümlemesinde kütle, boyu, doğrusal ve açılmalık yer değişimleri, kinetik enerjisi, açılmalık kinetik enerjisi (inertia faktörü) ve yer çekimi enerjisi hız ve ivme parametreleri altında

ifadelendirilir. Bunlara bağılı olarak kola etkiyen tork şu şekilde ifade edilir;

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (6)$$

Figür 3'ü kullanarak temel tork ve enerji denklemleri yardımıyla ifadelerimizi yazmak istersek,

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \sin \theta_1 \\ y_1 &= l_1 \cos \theta_1 \\ x_2 &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (7)$$

Kinetik enerjileri bulmak için;

$$\text{Kinetik enerji : } K = \frac{1}{2} MV^2 \quad (8)$$

$$\text{Açısal kinetik enerji: } K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{burada } \omega = \dot{\theta}$$

ve $I = Ml^2$ olarak inertia' dir.

Kinetik enerjileri uzuvlar için tekrar düzenleyerek yazarsak,

$$\begin{aligned} KE &= \frac{1}{2} (M_1 + M_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + M_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ &\frac{1}{2} M_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \end{aligned}$$

Potansiyel enerjileri bulmak için;

$$P = mgh \quad \text{genel ifadesinden yararlanarak,} \quad (9)$$

$$PE = M_1 g l_1 \cos \theta_1 + M_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))$$

Lagrangian kuralını uygulayarak kinetik ve potansiyel enerji ifadelerimiz tekrar düzenlersek,

$$L = KE - PE \quad (10)$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} (M_1 + M_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + M_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ &+ \frac{1}{2} M_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \\ &- M_1 g l_1 \cos \theta_1 + M_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned}$$

$$\tau_{\theta_{1,2}} = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{1,2}} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_{1,2}} \quad (11)$$

Birinci eklem için tork ifadesi,

$$\begin{aligned} \tau_{\theta_1} &= ((M_1 + M_2) l_1^2 + M_2 l_2^2 + 2M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + \\ &(M_2 l_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 - M_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \\ &- (M_1 + M_2) g l_1 \sin \theta_1 - M_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

Benzer şekilde, ikinci eklem için tork ifademiz,

$$\begin{aligned} \tau_{\theta_2} &= (M_2 l_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 \\ &+ M_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 - M_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - M_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

Olarak bulunur. Böylece, sistem dinamik analizi sonucu hareket tanımlamaları elde edilmiş olur.

Genel tork ifademizi oluşturan matrisler elde edilmiş olurlar.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{\theta_1} \\ \tau_{\theta_2} \end{bmatrix} \quad \text{Uzuvlara etkiyen torklar,}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad \text{Eklem açıları,}$$

$$M \begin{bmatrix} ((M_1 + M_2) l_1^2 + M_2 l_2^2 + 2M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) & (M_2 l_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2) \\ M_2 l_2^2 + M_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & M_2 l_2^2 \end{bmatrix}$$

Kütle matrisi,

$$V = \begin{bmatrix} M_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ M_2 l_1 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad \text{Coriolis matrisi,}$$

$$G = \begin{bmatrix} -(M_1 + M_2) g l_1 \sin \theta_1 - M_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -M_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

Gravite, yerçekimi matrisi.

3. Robot kolun PID kontrol sisteminin tasarlanması:

Girişte de ifade edildiği gibi robot kolumuzun denetleme sisteminde **PID** denetleyicisi kullanılmıştır.

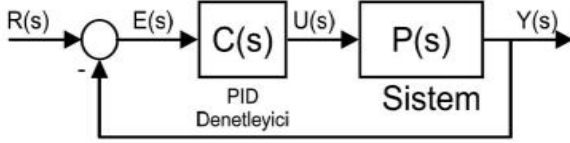
PID (Proportional, Integral, Derivative) oransal-integral-türevsel denetleyici PID kontrol döngüsü yöntemi, yaygın endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan genel bir kontrol döngüsü geribildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici ölçülü bir süreç içinde değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı olarak bir "hata" değerini hesaplar. Kontrolör proses kontrol girişini ayarlayarak hatayı en aza indirir ve istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır.

PID algoritması üç ayrı sabit parametreyi içerir ve buna göre bazen üç aşamalı kontrol denir: oransal P ile gösterilir, integral I ile gösterilir, türev değerleri D ile gösterilir

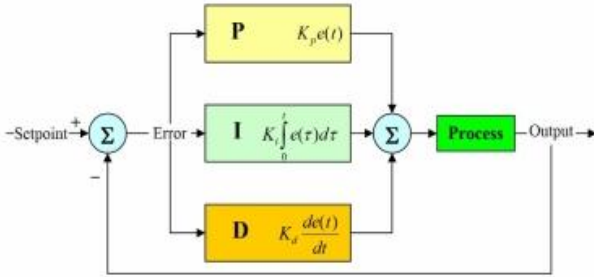
Sezgisel olarak, bu değerler mevcut değişim göz önüne alınarak zaman açısından şu şekilde yorumlanabilir; P mevcut hataya bağlıdır, I geçmiş hataların toplamı ve D gelecekteki hataların bir tahminidir.[6]

Bu üç eylemin ağırlıklı toplamı yoluyla kontrol edilen süreç istenilen seviyeye ayarlamak için kullanılır. Geçmişte istatistik değerleri olmayan bir sürecin ve bilginin olmadığı durumlarda, PID denetleyici algoritması en iyi denetleyici olarak kabul edilmektedir. PID kontrol algoritması üç parametre ile, özel proseslerin gereksinimleri için kontrol eylemini gerçekleştirir. Denetleyicinin tepkisi hatanın denetlenerek yanıtlanması olarak tarif edilebilir.[7] Dikkat edilmesi gereken konu; PID algoritmasının kullanımı ile, sistemin veya sistem stabilizasyonunu optimal olarak kontrolünün sağlanabilmesidir, çoğu zaman kontrol değişkenlerinde uygulama sonrasında yeniden düzeltmeler gerekebilir. Bu çalışmamızın ana konusu da hız ve doğruluk açısından optimal değerlere ulaşmaktır.

Bazı uygulamalarda, uygun bir sistem kontrolü sağlamak için sadece bir veya iki denetleyici tipi kullanmak gerekebilir. Bu, diğer parametrelere sıfır değeri verilmek suretiyle elde edilebilir. Bu durumda PID, ilgili denetim eylemlerinin yokluğuna göre PI, PD, P veya I olarak tanımlanır. Türevsel eylem, ölçüm gürültüsüne hassas olduğundan PI kontrolörleri, oldukça yaygındır. [8]



Şekil 3: PID denetleyici kontrol blok gösterimi.



Şekil 4: PID blokların açık olarak gösterilişi.[9]

PID transfer fonksiyonu ifadesi şu şekilde elde edilebilir,

$$U(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right) E(s)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (12)$$

Robot kolun hareketinin son noktası ile başlangıç noktası arasındaki hatayı ifade etmek için,

$$e(\theta_1) = \theta_{1son} - \theta_{1ilk}$$

$$e(\theta_2) = \theta_{2son} - \theta_{2ilk} \text{ dersek,}$$

$$f_1 = K_{p1}(\theta_{1son} - \theta_{1ilk}) - K_{d1} \dot{\theta}_1 + K_{i1} \int e(\theta_1) dt$$

$$f_2 = K_{p2}(\theta_{2son} - \theta_{2ilk}) - K_{d2} \dot{\theta}_2 + K_{i2} \int e(\theta_2) dt$$

Toplam sistem denklemi şu şekilde elde edilir ki;

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = M(\theta)^{-1} [-V(\dot{\theta}, \theta) - G(\theta)] + \begin{bmatrix} K_{p1}(\theta_{1son} - \theta_{1ilk}) - K_{d1} \dot{\theta}_1 + K_{i1}(\theta_{1son} - \theta_{1ilk}) \\ K_{p2}(\theta_{2son} - \theta_{2ilk}) - K_{d2} \dot{\theta}_2 + K_{i2}(\theta_{2son} - \theta_{2ilk}) \end{bmatrix}$$

sisteme uygulanan tork ifadesine PID denetim de eklenerek bulunmuş olur.

PID Denetleyici tasarımında üç yöntemle ilişkin çalışmalar 3.1. Ziegler-Nichols yöntemi, kapalı çevrim frekans domain

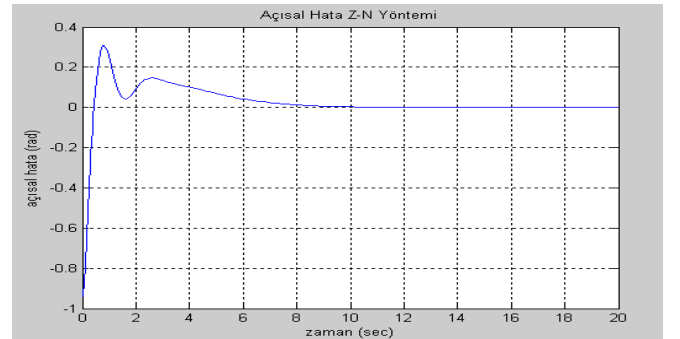
Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metodu ile sistemin cevap eğrisinin osilasyona girmesi sağlanır. PID kontrolörün I,D katsayıları 0 yapılır. P değeri sistem osilasyona gidene kadar yavaş yavaş artırılır. Sistemin osilasyona gittiği andaki P değerine Kc, osilasyon frekansına Tc dersek Tablo 2'ye göre PID katsayıları hesaplanabilir. [10]

Tablo 2: Z-N Kapalı çevrim PID değişkenleri katsayı tablosu.

| Denetleyici Tipi | Kp | Ti | Td |
|------------------|--------|--------|----------|
| P | 0.5*Kc | | 0 |
| PI | 0.4*Kc | 0.8*Tc | |
| PID | 0.6*Kc | 0.5*Tc | 0.125*Tc |

Teorinin getirdiği kurallar uygulandığında sistemin çıktısı Kc=40 ve Tc= 1.2 olarak tespit edilir. Buna göre PID denetleyici katsayıları;

Kp=24, Kd=6 ve Ki=14 olarak bulunur. Sistemin cevabı şekil 5 de görülmektedir.



Şekil 5: Sistemin Z-N PID cevabı.

3.2. Tyreus-Luyben yöntemi

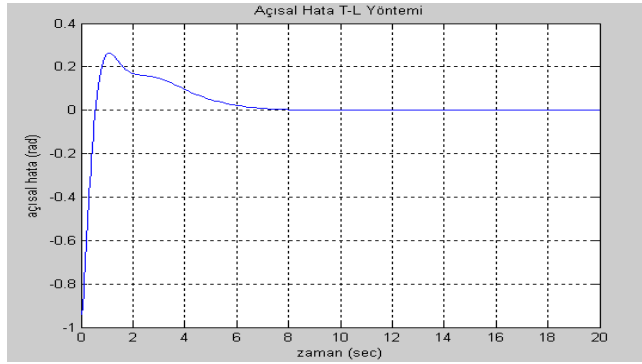
Tyreus-Luyben ayarlama yönteminde tıpkı Ziegler-Nichols yönteminde olduğu gibi kapalı çevrimde sadece orantısız (P) kazanç katsayısı artırımı ile sistemin osilasyona girdiği çıkış cevabı bulunur. Benzer şekilde sistemin osilasyona gittiği andaki P değerine K_c , osilasyon frekansına T_c dersek Tablo 3'e göre PID katsayıları hesaplanabilir.

Tablo 3: Tyreus-Luyben Kapalı çevrim PID değişkenleri tablosu.

| Denetleyici | K_p | T_i | T_d |
|-------------|-------------|-----------|-------------|
| PI | $K_c / 3.2$ | $2.2 T_c$ | |
| PID | $K_c / 2.2$ | $2.2 T_c$ | $T_c / 6.3$ |

Metoda ilişkin kurallar uygulandığında sistemin çıktısı $K_c=40$ ve $T_c= 1.2$ olarak tespit edilir. Buna göre PID denetleyici katsayıları;

$K_p=18.18$, $K_d=7.62$ ve $K_i=15.15$ olarak bulunur. Sistemin cevabı şekil 6 da görülmektedir.



Şekil 6: Sistemin T-L PID cevabı.

3.3. Matlab ODE45 modülü ile iteratif deneysel yöntemle PID ayarı

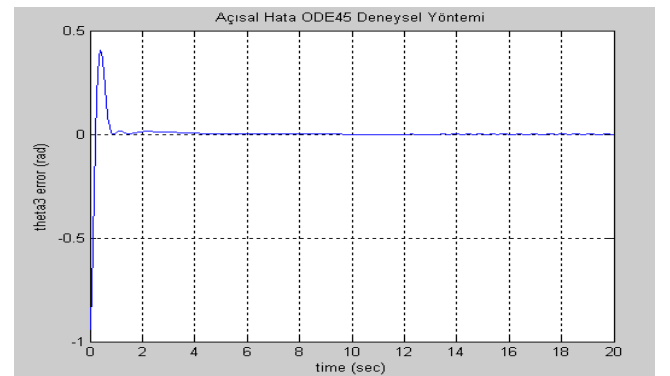
Bu modül Matlab bünyesinde Ordinary Differential Equations çözümü için geliştirilmiş bir hesaplayıcı modüldür. Diğer metodlarda kullanılan robot kol parametrelerinde hiçbir değişiklik yapılmadan deneysel olarak PID katsayıları ayarlanmıştır. Deneysel ayar çıktıları alınırken basamak cevabın en yüksek tepe değerinin düşürülmesi (Maximum Overshoot), yükseliş zamanı (rise time) süresinin kısaltılması ve sistemin $\pm 2\%$ lik kararlılık (settling time)[2] bandına en hızlı şekilde yerleşmesi için çaba harcanmıştır. Bu öncelikler göz önüne alınarak elde edilen değerler tablo 4' de gösterilmiştir.

Tabloda görüldüğü üzere iteratif olarak girilen ve çıkış eğrisi analiz edilerek ayarlanmaya çalışılan PID değerleri için şekil 7 ve şekil 8 de verilen çıkış eğrileri için ayar kriterlerine yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 7 ile elde edilen çıkış cevabında çok keskin bir "maksimum overshoot" tepesi görülmektedir. Bunun dışında sistem cevabı iyidir denilebilir. Daha sonraki

deneysel değerler ile bu tepe düzeltilmeye çalışılmış ve şekil 8 de görülen sistem cevabı elde edilmiştir.

Tablo 4: Deneysel Ode45 PID değişkenleri katsayı tablosu.

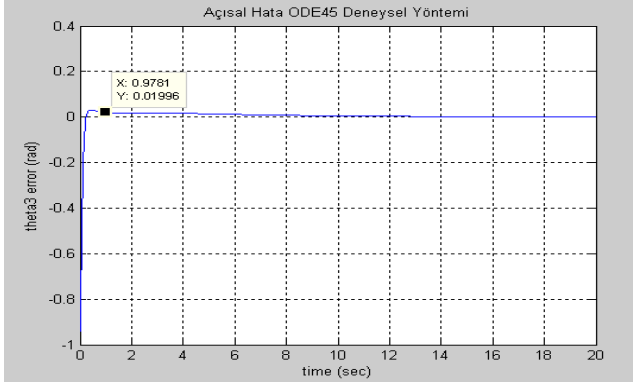
| Kp | Kd | Ki | Açısal Hata (settling time)saniye | | | | |
|--------------|------------|-----------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | 10% | 5% | 2% | 0% | |
| 1 | 0 | 0 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 1 | 1 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 2 | 1 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 2 | 2 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 2 | 3 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 3 | 3 | sistem kararsız | | | | |
| 2 | 3 | 4 | sistem kararsız | | | | |
| 3 | 3 | 4 | sistem kararsız | | | | |
| 4 | 3 | 4 | sistem kararsız | | | | |
| 5 | 3 | 4 | kararsızdan çıkıyor | | | | |
| 6 | 4 | 5 | yarı kararlı | | | | |
| 7 | 4 | 5 | yarı kararlı | | | | |
| 7 | 4 | 5 | 8,93 | 9,29 | 11,75 | 19,25 | |
| 7 | 4 | 5 | 8,27 | 9 | 11,56 | 18,9 | |
| 8 | 5 | 5 | 7,33 | 10,87 | 12 | 14 | |
| 8 | 5 | 5 | 7,3 | 10,79 | 12,2 | 14,28 | |
| 9 | 5 | 5 | 7,68 | 8 | 13,43 | 14,2 | |
| 9 | 6 | 5 | 7,39 | 10,5 | 12,3 | 13,87 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 15 | 10 | 10 | 6,26 | 6,91 | 7,4 | 11,7 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 90 | 10 | 70 | 2,59 | 3,6 | 4,91 | 5,73 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Şek.7 | 100 | 10 | 190 | 0,68 | 0,72 | 0,75 | 4,9 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Şek.8 | 600 | 50 | 120 | 0,16 | 0,19 | 0,95 | 12,8 |



Şekil 7 : Ode45, P=100 D=10 I=190 cevabı.

Deney girdileri tablosunun son satırındaki verilerle elde edilen çıkış cevabı ayarlamak istediğimiz ideale yakın değerler içindedir. (setup parameters) Neredeyse tüm sistem cevabı $\pm 2\%$ kararlı bant içindedir. Ayrıca 12,8 saniye sonra sistem tam kararlı durumdadır. Deneyle seçilen PID katsayıları iyi sonuç vermiştir.

Buna ek olarak, maksimum tepe oluşumunu düzeltici çalışmalar sonucu şekil 8 de verilen sistem cevabı elde edilebilmiştir.



Şekil 8 : Ode45, P=600 D=50 I=120 cevabı.

4. Sonuçlar ve Yorumlar

Tasarlanan robot koluna ilişkin, ileri kinematik, ters kinematik, dinamik modeller ve hesaplamalar yapılarak Matlab/Simulink ortamında simülasyonlar için kodlar üretilmiştir.

Modellemesi tamamlanan robot kolun kontrolünde PID denetleyici seçilmiştir. Denetleyici katsayılarında optimum değerlere ulaşmak için Matlab Ode45 deneysel yöntem ile Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Metodları kıyaslanarak sisteme uyumu analiz edilmiştir. Tüm karşılaştırmalarda robot kolun kütlesi, ağırlık merkezi, takip ettiği yörünge ve örnekleme süresi (20 saniye), hız, ivme parametreleri aynı tutulmuştur. Bu çalışma sonunda;

1. Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Metodları sistem cevabı olarak birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Tyreus-Luyben daha kabul edilebilir bir cevap sunmuştur.

2. Ode45 deneysel yöntemiyle elde edilen sistem cevaplarından şekil 7 ile elde edilen katsayılar kabul edilebilir ancak maksimum tepe değerinin düzeltilmesi gerekmektedir.

3. Ode45 deneysel yöntemiyle elde edilen sistem cevaplarından şekil 8 ile elde edilen sistem cevabı oldukça tatminkardır ve sistem 0,95 saniye içinde % ± 2 kararlı band içine oturmakta ve 12,8 saniye sonra tam kararlı olmaktadır.

4. Z-N ve T-L Teoremleriyle elde edilen osilasyon kazancı ve periyoduna ait başlangıç değerleri, teorilerle sunulan tablolardaki çarpım katsayıları ile çarpılarak sisteme uygulandı. Bu değerlerin sistemle tam uyum sağlamadığı görüldü. Deneysel yöntemle elde edilen değerler ise sisteme özgü iteratif ayarlamalar yapılarak elde edildi. Deneysel olarak bulunan PID katsayıları ile beklenen sistem çıkış parametrelerine ulaşıldı.

Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben teorik PID denetim katsayıları belirleme yöntemi sistem başlangıç değerleri için olumlu sonuçlar vermektedir. Ancak, sistem çıktısı olarak maksimum tepe değer, cevap süresi, kararlılık süresi gibi parametrelerde istenen değerlere ulaşmak için yeterli değildir, tekrarlı deneysel yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Rigid body Dynamics simulation for robot motion planning. Alan ETTLIN. Suisse,2006.
- [2] Introduction to robot geometry and kinematics. V.Kumar. University OF Pennsylvania.2012.
- [3] Robot arm tutorials. Societyofrobots.com.2014
- [4] Robot dinamiği ve kontrolü. Z.Bingül. S. Küçük. Sakarya Üniversitesi.2012
- [5] Scara robot kolu için kinematik yazılım geliştirilmesi. C.Közkurt. GOP Üniversitesi.2011
- [6] Otomatik Kontrol Sistemleri. Prof.Dr.M.Önder EFE. Seçkin yayın. July 2012 (ISBN: 978-975-02-1990-0)
- [7] Modeling, Simulation and Control Issues for a Robot ARM; Education and Research (III). Farhan A. Salem Mechatronics sec., Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Taif University.2014
- [8] Comparing PI Tuning Methods in a Real Benchmark Temperature Control System Finn Haugen Telemark University College, Kjoelnes Ring 56, N-3918 Porsgrunn, Norway
- [9] Feedback Control Systems Prentice-Hall C.Philips, R.Harbor Int.Ed.(ISBN:0-13-307927)
- [10] Position Control Of Robot Arm Using Genetic Algorithm Based PID Controller Majed D. Electronics Engineering / University of Mosul. 2013