

**SAYISAL SİNYAL İŞLEMCİ KULLANARAK
SCARA ROBOT DENETİMİ
Yener ÇELİKBAĞ**

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hasan ALLİ
İkinci Danışman: Doç. Dr. Servet SOYGÜDER
AĞUSTOS-2015**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAYISAL SİNYAL İŞLEMCİ KULLANARAK
SCARA ROBOT DENETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

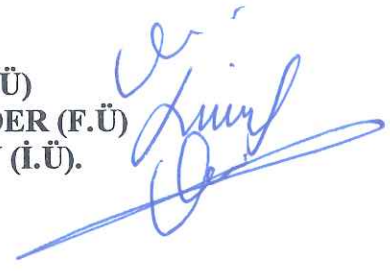
Yener ÇELİKBAĞ

(08120102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:28 Nisan 2015

Tezin Savunulduğu Tarih:4 Ağustos 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan ALLİ (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Servet SOYGÜDER (F.Ü)
Doç. Dr. Davut HANBAY (İ.Ü).



AĞUSTOS-2015

ÖNSÖZ

Bu çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı Prof. Dr. Hasan ALLİ'ye, Doç. Dr. Servet SOYGÜDER'e, Doç. Dr. Orhan ÇAKAR'a, Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI'ya, Doç. Dr. Davut HANBAY'a, Doç. Dr. Oğuz Yakut'a, Arş. Gör. S. Emre KARA'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince bana verdikleri tüm desteklerinden ötürü eşim Dr. Bahar ÇELİKBAĞ'a, Oğlum Mahmud Hüdayi ÇELİKBAĞ'a, Kızım Elif Beren ÇELİKBAĞ'a kardeşlerim Sibel ARSLAN ve Seval ÇELİKBAĞ'a, fedakârlıklarını ölçme ve ifade etme noktasında herşeyin çaresiz kalıp sükût ettiği ve üzerimde mukabili imkânsız emek ve hakka sahip kıymetli annem Melahat ÇELİKBAĞ'a teşekkür ederim.

Yener ÇELİKBAĞ
AĞUSTOS 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOLLER LİSTESİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 SCARA Robotu Hakkında Literatür Araştırması.....	1
2. SCARA ROBOTU.....	5
3. SCARA ROBOTUNUN KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ.....	8
3.1. Giriş.....	8
3.2. İleri Kinematik.....	9
3.3. Ters Kinematik.....	9
4. SAYISAL DENETİM KARTININ TANITIMI.....	12
4.1. Arduinio Sayısal Denetim Kartı.....	13
4.1.1. Arduino Mega 2560 Özellikleri.....	14
4.1.2 Arduino Mega 2560 Güç Özellikleri.....	15
5. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	16
5.1. Ziegler ve Nichols Yöntemi ile PID Katsayılarının Ayarlanması	16
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
7. KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	53

ÖZET

Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli Serpent 1 SCARA Robotu, gerçek zamanlı olarak denetlenmiştir. Bu kontrol çalışmasında, tasarım ve yazılım ortamı olarak MATLAB&Simulink programı kullanılmış olup, denetim programı bu ortamda blok şema halinde oluşturulmuştur. Veri kaydı, grafik çizimi işlemlerinin tamamı MATLAB&Simulink ortamında, gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. PID denetleyici ve Dalga Genlik Modülasyonu yöntemi sırasıyla kontrolünde ve DC Servo Motorların sürülmesinde kullanılmıştır. Ziegler ve Nichols yöntemi kullanılarak PID'nin sabit katsayıları bulunmasında kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Serpent 1, Scara Robot, PID, Ziegler ve Nichols, Arduino Mega 2560, Gerçek Zamanlı Denetim,

SUMMARY

Controlling of Scara Robot With Digital Signal Processor

In this study, 4 DOF Serpent 1 SCARA Robot has been controlled as reel time. In this controller study, MATLAB&Simulink program was used as a design and software media in which control program was built as bloc diagram. All of the work which are controlling, saving datas, drawing graphs has been done in the MATLAB&Simulink media as reel time. PID controller and Puls With Modulation were used in control action and driving DC Servomotors respectively. Ziegler ve Nichols method have been used to find the constant coefficient of the PID.

Keywords: Serpent 1, Scara Robot, PID, Ziegler ve Nichols, Arduino Mega 2560, Real Time Control,

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Serpent 1 Scara robotu.....	5
Şekil 2.2 Serpent 1 Scara robotu.....	6
Şekil 3.1 Serpent 1 Scara robotunun kartezyen kordinat sistemindeki gösterimi.....	8
Şekil 4.1. Serpent 1 Scara robotunun kontrol blok şeması.....	12
Şekil 4.2. Arduino Mega 2560 fotoğrafı.....	14
Şekil 5.1. PID kontrol blok şeması	16
Şekil 5.2. Ziegler ve Nichols %25 maksimum aşma grafiği.....	17
Şekil 5.3. Orantısal kontrol blok şeması.....	17
Şekil 5.4. Ziegler ve Nichols sabit genlikli sönümsüz salınımlar grafiği.....	17
Şekil 5.5. Geribeslemeli kontrol blok şeması.....	19
Şekil 5.6. PWM üretimi blok şeması.....	20
Şekil 5.7 Uzuv 1'in (Motor 1'in) P denetimi $K_{cr} = 21$ ve $P_{cr} = 31$ $S = -0.129$	21
Şekil 5.8 Uzuv 1'in (Motor 1'in) PID denetimi.....	23
Şekil 5.9 Uzuv 1'in (Motor 1'in) PID denetimi.....	24
Şekil 5.10 Uzuv 1'in (Motor 1'in) PID denetimi.....	25
Şekil 5.11 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) P denetimi $K_{cr2}=80$, $P_{cr2}=40$ s, $S=-0.1$	26
Şekil 5.12 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi	28
Şekil 5.13 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi	29
Şekil 5.14 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi	30
Şekil 5.15 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi.....	30
Şekil 5.16 Uzuv 1 ve 2'nin P denetimi.....	31
Şekil 5.17 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi.....	35
Şekil 5.18 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi.....	38
Şekil 5.19 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi.....	41
Şekil 5.20 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi.....	44
Şekil 5.21 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi.....	47

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Scara robotunun boyutları.....	7
Tablo 5.1. Ziegler ve Nichols PID katsayıları	18

SEMBOLLER LİSTESİ

R	:Bir eksen etrafında dönme
P	:Bir eksen üzerinde doğrusal öteleme
m_i	:i'ninci uzvun kütlesi (kg)
N_i	:i'ninci dişlinin dönüşüm oranı
r_i	:i'ninci uzvun uzunluğu (m)
T_i	:i'ninci motorun torku (Nm)
T	:Kinetik enerji (J)
L	:Lagrange denklemi
V	:Potansiyel enerji (J)
M_i	:Açık/kapalı sisteminde sabit değer
θ_i	:i'ninci uzvun açısal konumu ($^\circ$)
θ_{mi}	:i'ninci motor şaftının açısal konumu ($^\circ$)
$\dot{\theta}_i$	:i'ninci uzvun açısal hızı ($^\circ/s$)
$\dot{\theta}_{mi}$	:i'ninci motor şaftının açısal hızı ($^\circ/s$)
$\ddot{\theta}_i$	:i'ninci uzvun açısal ivmesi ($^\circ/s^2$)
$\ddot{\theta}_{mi}$	:i'ninci motor şaftının açısal ivmesi ($^\circ/s^2$)
$e(t)$	:Zaman tanım alanında hata sinyali
$E(s)$	:Karmaşık tanım alanında hata sinyali
$b(t)$	:Zaman tanım alanında geri besleme sinyali
$B(s)$	:Karmaşık tanım alanında geri besleme sinyali
$r(t)$	:Zaman tanım alanında referans giriş sinyali
$R(s)$	:Karmaşık tanım alanında referans giriş sinyali
$m(t)$	:Zaman tanım alanında denetim veya kontrol sinyali
$M(s)$	:Karmaşık tanım alanında denetim veya kontrol sinyali
$c(t)$	:Zaman tanım alanında sistem çıkış sinyali
$C(s)$	:Karmaşık tanım alanında sistem çıkış sinyali
$g(t)$	:Zaman tanım alanında tesisin transfer fonksiyonu
$G(s)$	:Karmaşık tanım alanında tesisin transfer fonksiyonu
$g_c(t)$	:Zaman tanım alanında denetleyicinin transfer fonksiyonu
$G_c(s)$	:Karmaşık tanım alanında denetleyicinin transfer fonksiyonu
$h(t)$	:Zaman tanım alanında geri besleme veya sensör transfer fonksiyonu
$H(s)$	:Karmaşık tanım alanında geri besleme veya sensör transfer fonksiyonu
R_{ai}	:i'ninci armatürün direnci birimi ohm sembolü (Ω)
L_{ai}	:i'ninci armatürün indüktansı birimi henry sembolü (H)
V_{ai}	:i'ninci armatür gerilimi birimi volt sembolü (V)
E_{bi}	:i'ninci armatür ters emk'sı birimi volt sembolü (V)
J_i	:i'ninci uzvun kütleli atalet momenti birim sembolü ($kg\ m^2$)
J_{mi}	:i'ninci motorun kütleli atalet momenti birim sembolü ($kg\ m^2$)
J_m	:Eşdeğer kütleli atalet momenti birim sembolü ($kg\ m^2$)
J_{gi}	:i'ninci eklemdeki dişlinin kütleli atalet momenti birim sembolü ($kg\ m^2$)
I_{ai}	:i'ninci armatür akımı birimi Amper sembolü (A)
K_{bi}	:i'ninci motorun ters emk sabiti birimi ($V/rad/s$)
K_{ti}	:i'ninci motorun tork sabiti birimi (Nm/A)
w	:Motor şaftının açısal hızı (rad/s)

φ	:Akı (Wb)
α	:Motor saftının açısal ivmesi (rad/s)
Q_i	:Genelleştirilmiş tork (Nm)
q_i	:Genelleştirilmiş kordinat
I_f	:DC Servo motorlarında alan akımı (A)
t	:Zaman (s)
$F_i(x)$	:i'ninci potansiyometre gerilim açısı dönüşüm fonksiyonu (°)
$\phi_i(x)$	:i'ninci potansiyometre gerilim açısı dönüşüm fonksiyonu (°)
X_B	:Robot bileğinin yatay eksene göre konumu
Y_B	:Robot bileğinin dikey eksene göre konumu
K_i	:İntegral kazanç sabiti
T_i	:İntegral zaman sabiti
K_p	:Orantısal kazanç sabiti
K_d	:Türev kazanç sabiti
T_d	:Türev zaman sabiti
P_{cr}	:Kritik periyod
K_{cr}	:Kritik orantısal kazanç sabiti
T_s	:PWM anahtarlama periyodu
f_s	:PWM anahtarlama frekansı
V_{st}	:Testere dişli gerilim sinyali
V_{ctrl}	:Testere dişli gerilim için sabit kontrol gerilim sinyali
t_{on}	:PWM iletim süresi
t_{off}	:PWM kesim süresi

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı Feedback firması tarafından 1985 yılında imal edilmiş olan Serpent 1 modelindeki SCARA robotunu açık mimari ile kontrol etmek ve daha sonra geliştirilecek kontrol algoritmaları için hazır bir düzenek oluşturmaktır. Gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilecek olan bu kontrol çalışmasında laboratuvarımızda mevcut olan Serpent 1 Scara robot iskeleti ve motorları, Matlab&Simulink yazılım ve tasarım ortamı, Arduino Mega 2560 sayısal denetim kartı ve DC Motor Sürücü devresi kullanılmıştır.

1.1 SCARA Robotu Hakkında Literatür Araştırması

Demirci (2013), Scara robot tasarımı ve analizi çalışmasında, Scara tarzı bir manipülatörün Solidworks programı ile tasarımı yapılmış ve aynı programın analiz eklentisi olan Simulation programı ile statik ve doğal frekans analizleri gerçekleştirmiş ve Solidworks programının eklentisi olan Motion Programı ile de hareket analizlerini tamamlamıştır. [2]

Özkarakoç (2009), SCARA robot manipulatör ile seçme ve yerleştirme uygulaması çalışmasında, bir SCARA Robot Manipulatör'ün konum kontrolü üzerine çalışılmıştır. Robotun konum kontrolü için ileri ve ters kinematik problemleri çözmüş, jakobiyen ve transformasyon matrislerini hesaplamıştır. Yazılan kontrol programında elde edilen konum ve açı değerleri, SolidWorks programında tasarlanan robot modeli ile doğrulanmıştır. [3]

Öztürk (2007), SCARA tipi robotun yapay sinir ağları ile eğitilmesi çalışmasında, dört serbestlik dereceli SCARA tipi robot kolunun yapay sinir ağı ile eğitilmesi konusunu ele almıştır. [4]

Şahin (2006), SCARA tipi bir robotun yörünge kontrolünde PID kontrol uygulaması çalışmasında, üç serbestlik derecesine sahip Scara tipi bir manipülatörün uç elemanının PID tekniği ile kontrolü yapılmıştır. [5]

Soygüder (2004), çalışmasında, programlanabilir lojik kontrolör kullanarak PID yöntemi ile bir scara robotun kontrolünü gerçekleştirmiştir. [6]

Daş (2003), çalışmasında, SCARA tipi robotun programlanabilir mantık denetleyicisiyle (PLC) hareket denetimini gerçekleştirmiştir. [7]

Tuncay (2005), çalışmasında, İki eklemlili doğrudan sürülebilir bir robot kolunun denetim algoritmalarının kıyaslamalı değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir. [8]

Ertürk (1997), Scara tipi robot kolunun hareketlerinin bilgisayar destekli programlarla kontrolünü gerçekleştirmiştir. [9]

Yamaçlı ve Canbolat (2008), PD ve Öğrenen Denetleyicilerle SCARA Robotunun Simülasyonu çalışmasında, öğrenen denetleyicilerin elektriksel dinamikten bağımsız olarak sadece konum ve hız ölçümlerine gereksinim duyduğunu ifade etmiştir. [10]

Er, Lim ve Lim (2001), SCARA Robotunun Gerçek Zamanlı Hibrid Adaptif Fuzzy Kontrolü çalışmasında, gerçek zamanlı endüstriyel uygulamalarla uyumlu Hibrid Adaptif Kontrolör geliştirilmesi ve uygulaması yapılmıştır.[11]

Beiner (1992), SCARA Robotları İçin Tekillikten Kaçınma çalışmasında, robotu kendi çalışma uzayında tekil noktalardan mümkün olduğunca uzak tutacak bir yöntem üzerinde çalışmıştır. [12]

Sisir K. Padhy (1992), SCARA Robot Dinamiği çalışmasında, birleştirme otomasyonunda kullanılan SCARA robotlarının performanslarını doğruluk, zaman ve maliyet açısından incelenmiştir.[13]

Santosh Ananthraman, Devendra P. Garg (1993), SCARA robot kontrolü için CMAC nöral network ve ters propagasyon öğretimi çalışmasında, robot manipulatörün yörünge takibi için tork hesabı ve tork üretimi ile robot kontrolü yapılmıştır. [14]

Z.B. Kang, T.Y. Chai, K. Oshima, J.M. Yang, S. Fujii (1997), SCARA tipi robot manipulatörü için robust titreşim kontrolü çalışmasında, SCARA tipi robot manipulatöründe robust titreşim kontrolü yapılmıştır.[15]

E.A. Puente, C. Balaguer, A. Barrientos (1991), kusursuz birleştirmelerde kullanılan bir scara robot için sensör tabanlı kuvvet-tork stratejisi çalışmasında, birleştirme çalışmalarında kullanılan SCARA robotu için yeni kuvvet tork stratejisi geliştirilmiştir. [16]

S.S. Ge, T.H. Lee, J.Q. Gong (1999), tek uzuvlu bir SCARA robotunun dağılık robust kontrolü adlı çalışmasında, SCARA robot için dinamik modelleme ve kontrolör tasarımı çalışması yapılmıştır. [17]

Dragan Milutinovic, R. Milacic (1996), micro SCARA robot evrensel adaptif esnemeli bilek çalışmasında, İyi bilinen SCARA robotu tabanında, yeni bir robot mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizma iki eklemlili uzuv yerine eksantrik yerleştirilmiş döner disk bulunmaktadır. [18]

R. Safaric, S. Uran, K. Jezernik (1992), İki serbestlik dereceli Scara robotu için parametrelerin kapalı devre tanımlanması öngörülmesi çalışmasında, İki serbestlik dereceli Scara robotu tanıtılmış ve her bir serbestlik derecesi için atalet, viskos sürtünme parametrelerinin bulunmasında en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. [19]

R.K. Jain, S. Majumder, A. Dutta (2013), SCARA tabanlı birleştirme işlerinde boşluk doldurulmasında micro tutucu olarak iyonik polimer metal bileşiğinin kullanılması çalışmasında, biribirinin eşi olan iki parçanın birleştirilmesinde konum hatasının her zaman mevcut olması nedeniyle robotik birleştirme işlemlerinde İyonik Polimer Metal Bileşiği tutucu parmaklar kullanılmış ve PD konum kontrolü yapılmıştır. [20]

Praveen Bhatia, Janarthanan Thirunarayanan, Nalin Dave (1998), Scara Robot Tasarımında Sistem Tabanlı İnceleme çalışmasını yapmıştır. [21]

S. Toyama, S. Hatae, S. Haga, N. Kinoshita (1991), Durum Sayıları ve Hata Çizgisi Yöntemini kullanılarak Scara robotunun kalibrasyonunu yapmıştır. [22]

Lau Wai Shing, Ng Kok Loon (1992), Bir Scara Robotu için önerilen spesifikasyonlar ve konum tekrarlanabilirliğinin statik ve deneysel olarak belirlenmesi çalışması yapmıştır. [23]

Dragan Milutinović, Veljko Potkonjak (1990), Dünyada kabul gören Scara konsepti temel alınarak çalışma uzayının tam daire yapılması ihtimali üzerinde çalışmıştır [24]

Josef Sulzer, Igor Kovač (2010), İyi Konum Modülü ile Endüstriyel robotların Konum Doğruluğunun Arttırılması adlı çalışmasında, micro nesnelerin tutulup kaldırılmasında yeni teknik ve yaklaşımlara uygun olarak konum geliştirme modül tasarımı yapılmıştır. [25]

Meng Joo Er, Chang Boon Low, Khuan Holm Nah, Moo Heng Lim, Shee Yong Ng (2002), Scara Robotunun Gerçek Zamanlı Dinamik Fuzzy Nöral Network İle Kontrolü çalışmasında, gerçek zamanlı endüstriyel uygulamalar için Dinamik Fuzzy Nöral Network'ün (D-FNNs) geliştirilmesi ve uygulanması yapılmıştır. [26]

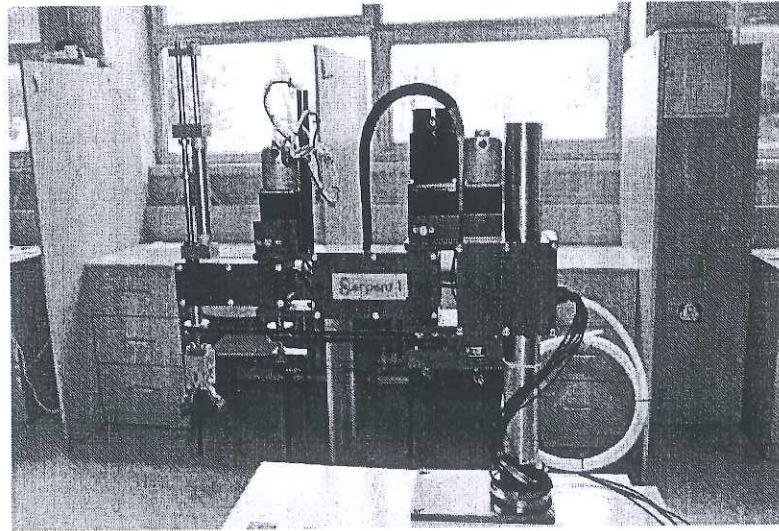
Dragan Milutinovic (1997), SCARA Konsepti Tabanında Evrensel Esnemeli Alet çalışmasında, belirli bir amaca uygun olarak evrensel adaptif esnemeli alet geliştirilmeye çalışmıştır. [27]

2. SCARA ROBOTU

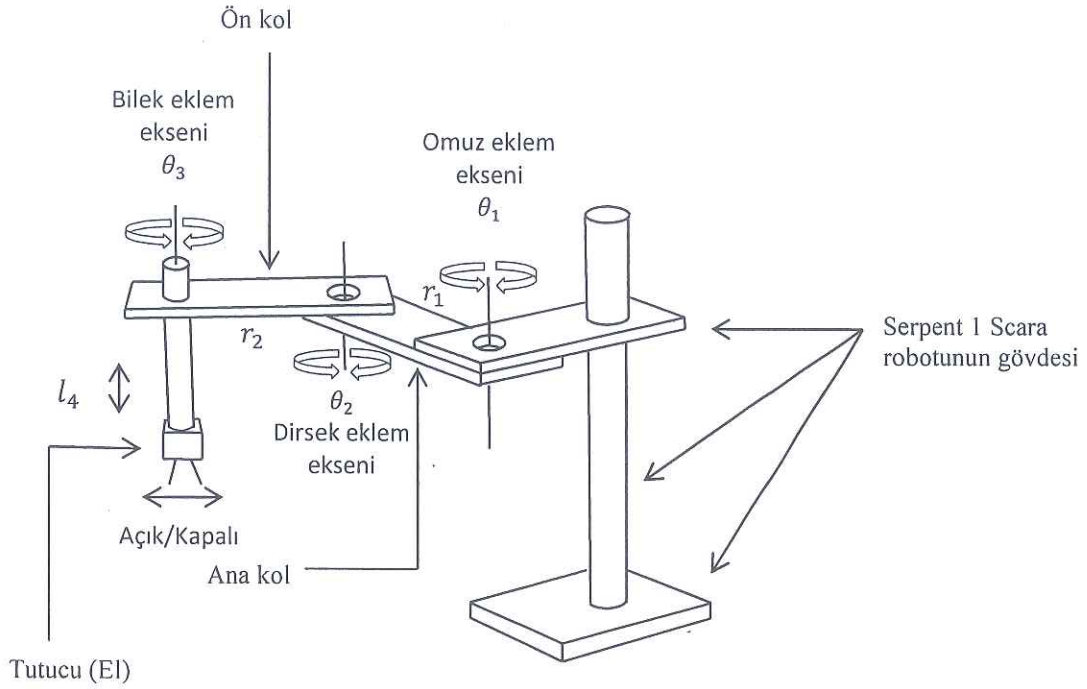
Yetmişli yıllarda Japonyada Yamamachi Üniversitesinde tasarlanmış olan SCARA robotunun adı Seçici Serbest Esnemeli Robot Kolu anlamına gelen Selectively Compliant Articulated Robot Arm kelimelerinin ilk harflerinin birleştirilmesi ile elde edilmiştir. SCARA robotları diğer robotlar içerisinde direk sürücüye sahip ilk ticari robottur.

Bir cismin bir noktadan başka bir noktaya taşınmasında ve sınırlı birleştirme işlemlerinde (elektronik devre kartları üzerine devre elemanlarının yerleştirilmesi, mikro işlemci imalatında yarı iletken katmanlarının oluşturulması... vb.) cisme dikey eksende yukarıdan aşağıya doğru yaklaşmak, yakalamak, dikey eksende yukarıya doğru kaldırmak, yatay (paralel) düzlemde istenilen konum ve rotasyonda tekrar dikey eksende indirmek bu robotun temel tasarım özelliğidir.

Çalışmada kullandığımız Robot, Feedback firması tarafından 1985'te Serpent-1 modelinde üretilmiştir. Bu robot, ilk üç eklemi döner (revolute), son eklemi doğrusal (Prismatic) hareket yapan, dört serbestlik dereceli bir robottur. Döner eklem eksenlerinin tamamı yatay düzleme dik Z eksenidir. Döner eklemlerdeki hareket, robot üzerinde konumlandırılmış üç adet 12V DC Servo Motor tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1. Serpent 1 SCARA Robotu



Şekil 2.2. Serpent 1 SCARA Robotu [31]

Robotun ana kolu (main arm) ile bilekte tutucu rotasyonu üreten bir ve üç numaralı motorlar robotun sabit gövdesi üzerinde konumlandırılmıştır. Ön kolun rotasyonu ise dirsek üzerinde bulunan iki numaralı motor tarafından sağlanmaktadır. Uzuvarların açısai dönme miktarları, ilk üç ekleme değışkeni olan θ_i ile tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla omuz ekleminde θ_1 ana kolun açısai dönme miktarını, dirsek ekleminde θ_2 ön kolun açısai dönme miktarını, bilekte θ_3 tutucunun roll eksenini etrafında dönme miktarını tanımlayan sembollerdir.

Dördüncü ekleme, tasarımcıları tarafından, tutucunun dikey eksen boyunca doğrusal kayma hareketini gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Tutucunun yaw ve pitch olarak adlandırılan eksenlerinde hareketi sınırlandırılmış, sadece roll eksenini boyunca rotasyonuna izin verilmiştir. Üç boyutlu uzayda Serpent 1 SCARA robotunun çalışma uzayı kendi erişim (strokuna) noktalarına bağlı olarak silindire benzemekte ancak robotun ekleme hareket kısıtlamaları veya tasarım kısıtlamaları nedeniyle çalışma uzayı silindirin sadece belirli bir kısmını teşkil etmektedir.

Dördüncü eklemden, tutucunu dikey eksen boyunca yaptığı doğrusal kayma hareketini pnömatik tahrik sistemi gerçekleştirmektedir. Bu tahrik sistemi on/off olarak çalışmaktadır. Serpent1 SCARA robotunun pnömatik sistemleri 5 – 8 bar arasındaki bir basınçla çalışmakta olup, bu basınç için ihtiyaç duyulan hava 1lt / sn debili küçük bir kompresörden sağlanmaktadır. Tutucu kol sadece aşağı yukarı ve açılıp kapanma hareketleri yapabilecek şekilde tasarlanmış olup, ara hareketleri yapamaz. Tutucunun açılması ise basıncın kesildiği durumda içerisinde bulunan bir yay vasıtasıyla meydana gelmektedir. Yukarıda Şekil 2.1'de çizimi verilen Serpent 1 Scara robotun temel yapısal özellikleri hakkındaki bilgiler aşağıda Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Scara robotunun boyutları WALLİ Serpent Manuel'den [35] alınmıştır

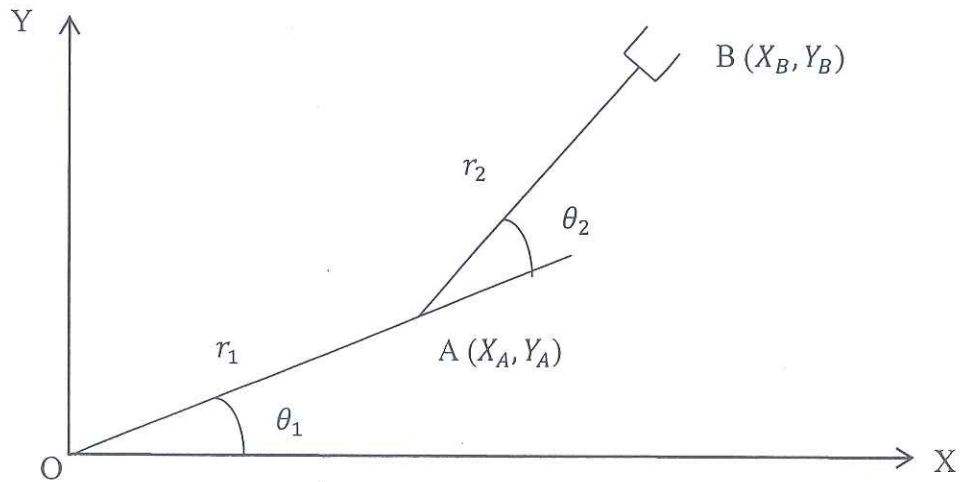
Uzuv Adı	Miktarı ve Birimi
Ana kol Uzunluğu (r_1)	250 mm
Ön Kol Uzunluğu(r_2)	150 mm
Omuz Eklem Eksen Z Etrafında, θ_1 'in Maksimum Dönme Kapasitesi	200°
Dirsek Eklem Eksen Z Etrafında θ_2 'nin Maksimum Dönme Kapasitesi	250°
Bilek Eksen Z Etrafında θ_3 'ün Maksimum Dönme Kapasitesi	450°
Bileğin Z eksen Boyunca Yapabileceği Maksimum Doğrusal Hareket Uzunluğu	75mm
Kendi Denetim Sistemi Bit Sayısı	12 Bit
Tekrarlanabilirlik Miktarı	1.0 mm
Dikey Kaldırma ve Yatay Taşıma Yüğü	2 kg
En Yüksek Tutucu Hızı	550mm/s

3.SACRA ROBOTUNUN KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ

3.1. Giriş

Serpent 1 SCARA robotunun ilk iki eksen için matematiksel dinamik modeli, Ağustos 2003’de, Gaziantep Üniversitesinde M. Taylan DAŞ’ın aynı robot üzerinde yaptığı Yüksek Lisans çalışmasında kullandığı matematiksel dinamik model sadece bilgi mahiyetinde verilecektir. [7]

Hesaplama ve formülasyonlarda toplam 12 adet sembol matematiksel ifadeler içinde kullanılmıştır. Bunlar, r_1 , r_2 sırasıyla omuz eklemi ile dirsek eklemi arasında kalan ana kol ve dirsek eklemi ile bilek eklemi arasında kalan ön kolun uzunluklarını, m(metre) cinsinden ifade etmektedir. m_1 , m_2 sırasıyla ana ve ön kolların kütlelerini kilogram cinsinden ifade etmektedir. J_1 , J_2 sırasıyla ana ve ön kolların kütleli atalet momentlerini kilogram metre kare cinsinden ifade etmektedir. θ_1 , θ_2 sırasıyla ana ve ön kolların açısal konumları ° (derece) cinsinden ifade etmektedir. $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$ sırasıyla ana ve ön kolların açısal hızları °/s (derece/saniye) cinsinden ifade etmektedir. $\ddot{\theta}_1$, $\ddot{\theta}_2$ sırasıyla ana ve ön kolların açısal ivmeleri °/s² (derece/saniye kare) cinsinden ifade etmektedir.



Şekil 3.1 Serpent 1. Scara robotunun kartezyen kordinat sistemdeki gösterimi

3.2. İleri Kinematik

Büyüklikleri bilinen eklem değişkenlerini (θ_i 'leri) kullanarak robotun, bilek konumunu ortogonal kordinatlar cinsinden hesaplanmasına düz kinematik denir. Şekil 3.1'deki robotun bilek konumunu belirleyen B noktasının X_B ve Y_B kordinatları düz kinematik ile aşağıdaki şekilde bulunur.

$$X_B = r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.1)$$

$$Y_B = r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2)$$

3.3. Ters Kinematik

Bir robotun bilek konumu X_B ve Y_B ortogonal kordinatlar cinsinden verilerek eklem değişkenlerinin (θ_i 'lerin) hesaplanmasına ters kinematik denir.

Düzlemsel bir robot kolunun ters kinematiği birçok kaynakta detaylı olarak ifade edilmiştir. Bu nedenle formüller arasındaki işlemler detaylı olarak verilmeyecektir. Aynı düzlemde döner eklemlere sahip iki serbestlik dereceli tüm robot kollarının ters kinematiği aynı yöntemle hesaplanır. Denklem (3.1) ve (3.2) bilinen X_B ve Y_B kordinatları için çözümlenirse θ_1 ve θ_2 aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\cos \theta_2 = \frac{(X_B^2 + Y_B^2) - (r_1^2 + r_2^2)}{2r_1 r_2} \quad (3.3)$$

ve

$$\tan \theta_1 = \frac{-(r_2 \sin \theta_2) X_B + (r_1 + r_2 \cos \theta_2) Y_B}{(r_2 \sin \theta_2) Y_B + (r_1 + r_2 \cos \theta_2) X_B} \quad (3.4)$$

Serpent 1 robotunun dinamik denklemleri M. Taylan DAŞ'ın Yüksek lisans tezinde aşağıdaki formüllerle verilmiş olup, bu çıkarımda eklem ve dişlilerde meydana gelen sürtünme ve yer çekim ivmesinin ihmal edildiği belirtilmiştir.[7].

$$L = T - V \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q_i \quad (3.6)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \dots n \quad (3.7)$$

Serpent 1 Scara Robotunun kinetik enerji formülü

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} J_{m1} \dot{\theta}_{m1}^2 + \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{r_1^2}{4} \right) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_{m2} \dot{\theta}_{m2}^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ & + \frac{1}{2} m_2 \left(r_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{r_2^2}{4} \right) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \right. \\ & \left. + r_1 r_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1 \theta_2) [\cos(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin \theta_1] \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Ana kol hareketi için:

Bu denklemde Q_i genelleştirilmiş tork'u ifade etmekte olup, aşağıda verilen $T_1(t, \theta_{m1}, \dot{\theta}_{m1})$ ve $T_2(t, \theta_{m2}, \dot{\theta}_{m2})$ ifadeleri her iki uzvu hareketlendiren motorların ayrı ayrı genelleştirilmiş torklarını ifade etmektedir.

$$L_{a1} \frac{dI_{a1}}{dt} + R_{a1} I_{a1} + K_{a1} \dot{\theta}_{m1} = V_{a1} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} T_1(t, \theta_{m1}, \dot{\theta}_{m1}) = & \left(\frac{m_1 r_1 r_2}{N_1^2} \left(\cos \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2} \right) \cos \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} \right) + \sin \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2} \right) \sin \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} \right) \right) \right) \dot{\theta}_{m1} \\ & + \left(\frac{J_2}{N_1 N_2} + \frac{m_2 r_2^2}{4 N_1 N_2} + \frac{m_1 r_1 r_2}{2 N_1 N_2} \left(\cos \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2} \right) \cos \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} \right) + \sin \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2} \right) \sin \left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} \right) \right) \right) \dot{\theta}_{m2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{\dot{\theta}_{m1}\dot{\theta}_{m2}}{N_1} + \frac{\dot{\theta}_{m2}^2}{2N_2} \right) \left(\frac{m_1r_1r_2}{N_1N_2} \right) \left(\cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) - \sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) \right) \\
& + \left(J_{m1} + \frac{(J_1 + J_2)}{N_1^2} + \frac{(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + 4m_2r_1^2)}{4N_1^2} \right) \ddot{\theta}_{m1}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Dirsek hareketi için:

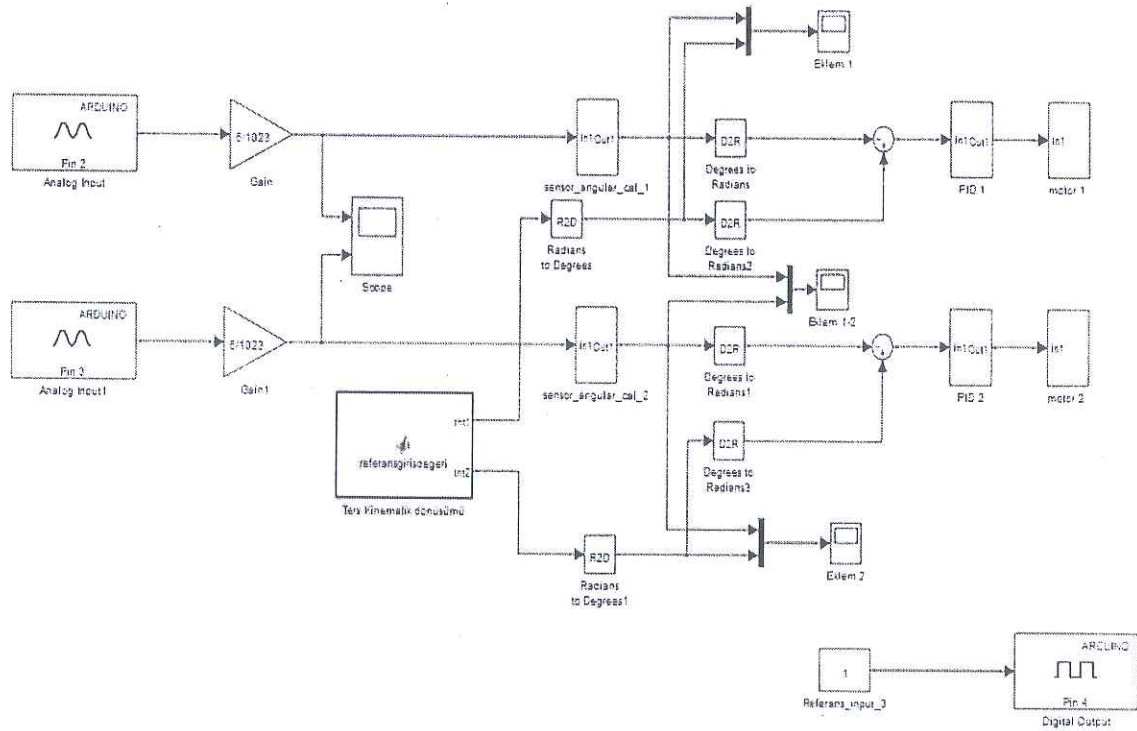
$$L_{a2} \frac{dI_{a2}}{dt} + R_{a2}I_{a2} + K_{a2}\dot{\theta}_{m2} = V_{a2} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
T_2(t, \theta_{m2}, \dot{\theta}_{m2}) = & \frac{m_2r_1r_2}{2N_1N_2} \left(\frac{\dot{\theta}_{m1}^2}{N_1} \right) \left(\sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) - \cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) \right) \\
& + \left(\frac{J_2}{N_1N_2} + \frac{m_2r_2^2}{N_1N_2} + \frac{m_1r_1r_2}{2N_1N_2} \left(\cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \cos\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) + \sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1} + \frac{\theta_{m2}}{N_2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{m1}}{N_1}\right) \right) \right) \ddot{\theta}_{m1} \\
& + \left(J_{m2} + \frac{J_2}{N_1^2} + \frac{(m_2r_2^2)}{4N_1N_2} \right) \ddot{\theta}_{m2}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Yukarıda her bir motor için bulunan genelleştirilmiş tork denklem çiftleri birbirlerine bağımlılıkları nedeniyle birlikte çözümlenmeleri gerekmektedir.

4. SAYISAL DENETİM KARTININ TANITIMI

Bu çalışmadaki blok şema tasarımının tamamı Simulink ortamında yapılmış ve Arduino Mega 2560 Sayısal Denetim kartı ile bütünleştirilmiştir. Bu kart MATLAB programı tarafından desteklenen bir kart olup, tasarım ortamında bu kartın fonksiyonlarına ait terminal blokları program kütüphanesi tarafından sunulmaktadır. Sistemimiz sürekli bir sistem olup, sistem içerisinde sabit adımlı 4. Mertebe Runge Kutta sayısal çözüm yöntemi ve örnekleme zamanı olarak 1/1000 s kullanılmıştır. Simulink programı MATLAB'a tam bütünleşik görsel bir program olup, MATLAB bünyesindeki her türlü algoritma rahatlıkla kullanılabilir. Simulinkle sistem seviyesinde tasarım, simülasyon, otomatik kod üretimi, gömülü sistemlerle sürekli olarak gerçek zamanlı veri alışverişi, çalışmaların grafiksel analiz yapılabilir. Simulink ortamında oluşturduğumuz denetim blok şeması aşağıdaki Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



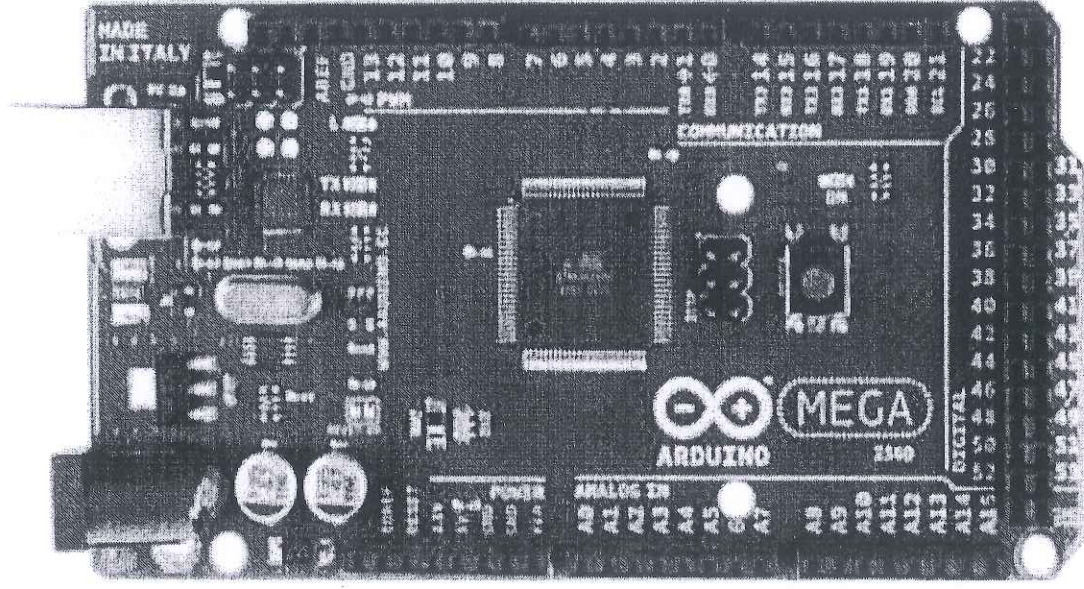
Şekil 4.1. Serpent 1 Scara robotunun kontrol blok şeması

4.1. Arduinio Sayısal Denetim Kartı

Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak tasarım mühendisleri neredeyse tüm uygulamalarda, üzerinde mikro işlemci barındıran denetim kartlarıyla çalışmayı istemektedir. Bu kartlar, belirli bir amacı gerçekleştirmek üzere tasarlanan, temini kolay, ucuz ve kullanımı kolay devre elemanlarıdır. Mikro denetleyici kartların en önemli parçası taşıdıkları mikro işlemcilerdir. Mikro işlemcinin hızı, kapasitesi ve hafızası gibi özellikleri aynı zamanda denetim kartının özelliğini belirlemektedir.

Günümüzde, elektrikle çalışan neredeyse tüm endüstriyel ürünlerde mikro denetleyiciler kullanılmaktadır. Özellikle evlerimizde kullandığımız birçok alette bu denetleyici kartlar, gömülü olarak bulunmaktadır. Mikro denetleyici kartlara aynı zamanda gömülü bilgisayarlarda denilmektedir. Sofistike bir ürün olan modern otomobillerde elektronik işlemleri gerçekleştirmek için yaklaşık 80 tane değişik boyut ve özelliklerde mikro denetleyiciler bulunmaktadır.[TI DSP2833x Documents] Otomobillerde bulunan Ani Fren Kilit (ABS), Elektronik Denge Programı (ESP), Adaptif Hız Sabitleyici (ACC), Merkezi Klit, Elektronik Koltuk Ayarları, Mesafe Sensörü, Otomatik Park Sistemi Yokuş Kalkış Sistemi, Yokuş İniş Sistemi ..vb gibi bir çok sistemin donanımında mikro denetleyici kartlar bulunmakta ve bu işlemler kart üzerinde yüklü programlarla gerçekleştirilmektedir.

Arduino açık kaynak kodlu yazılım ve donanım olarak bilinen, kullanımı kolay elektronik bir platformdur. Bu platformda, belirli amaçları gerçekleştirmek için imalatçı tarafından tasarlanmış birçok farklı denetim kart modeli mevcuttur. Arduino Mega 2560 sayısal kontrol kartında, ATmega 2560 micro işlemci kullanılmıştır. Bu micro işlemci 54 adet sayısal giriş/çıkış (I/O) terminaline (pinine) sahiptir. Bu terminallerden 14 tanesi PWM (dalga genlik modülasyonu) işlemi için kullanılabilir. Denetim kartı üzerinde 16 adet analog giriş terminali, 4 UART (seril port), 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, kart besleme adaptör girişi, ICSP çıkışı ve bir reset butonu bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Arduino Mega 2560 fotoğrafı.[36]

4.1.1. Ardunio Mega 2560 Özellikler

Mikrodenetleyici	ATmega2560
Çalışma Gerilimi	5V
Besleme Voltajı (Önerilen)	7-12V
Besleme Voltajı (Limit)	6-20V
Dijital I/O Pinleri	54 (14ü PWM çıkışı)
Analog Giriş Pinleri	16
I/O Pinlerinin Akımı	40 mA
3.3V Pini Akımı	50 mA
Flash Bellek	256 KB (8kB'ını bootloader kullanıyor)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Frekansı	16 MHz

Bu özelliklerin tamamı imalçı tarafından yayınlanmıştır.[36]

4.1.2. Arduino Mega 2560 Güç Özellikleri

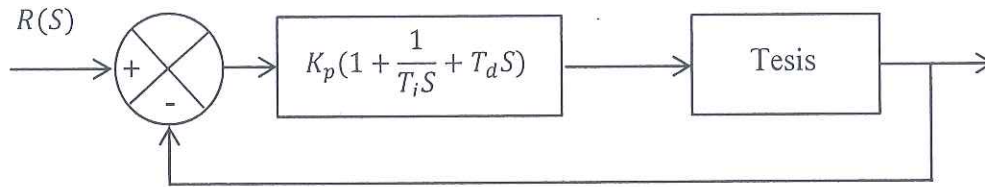
Arduino Mega 2560 USB 'den ve harici bir adaptör veya batarya ile beslenebilen bir yapıya sahip olup, kart kendi içinde güç kaynağını otomatik olarak seçer. Kart 6-20V arasında harici bir kaynaktan beslenebilmesine rağmen bu çalışmada USB ile bilgisayardan beslenmiştir.[36]

54 dijital giriş çıkış pinlerinin hepsi pinMode() digitalWrite() ve digitalWrite() fonksiyonları kullanılarak giriş veya çıkış olarak kullanılabilir. Bu giriş çıkış sinyallerinin maksimum genlik seviyesi en fazla 5 voltur. Her bir terminal, maksimum 40mA giriş/çıkış akım destekleyebilir. Pinlerde 20-50 kOhm pull-up dirençleri mevcuttur. Mega2560'ın 0-5V gerilim aralığında çalışan 16 adet analog girişin bit çözünürlüğü 10 bit olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kartın programlanmasında üretici firma tarafından geliştirilmiş bir ortam mevcut olup bu ortamda kodlar C diliyle yazılmaktadır.[36]

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

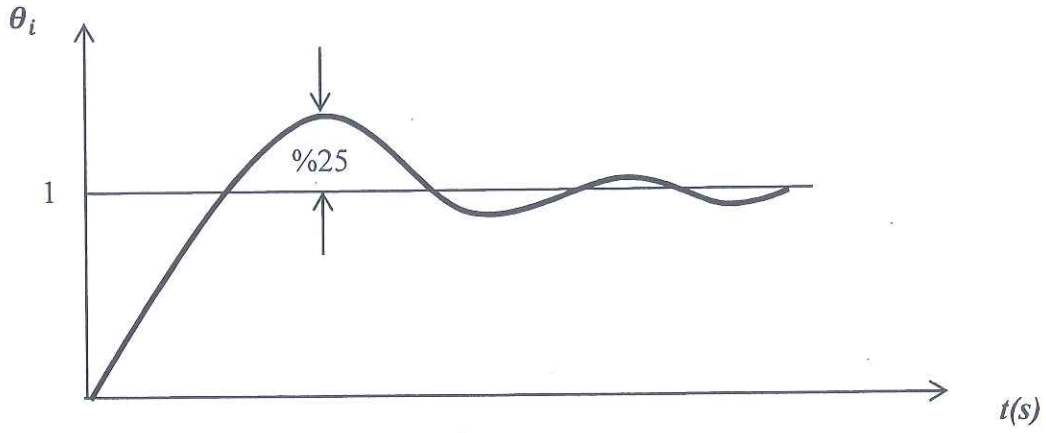
5.1. Ziegler ve Nichols Yöntemi ile PID Katsayılarının Ayarlanması

Günümüz endüstrisinde kullanılan kontrolörlerin birçoğu PID veya modifiye PID dir. Analog PID kontrolörlerin büyük çoğunluğu hidrolik, pnömatik, elektrik tipinde ya da bunların kombinasyonları biçimindedir. Güncel olarak kullanılan bu kontrolörlerin çoğu sayısal işlemciler kullanılarak sayısal kontrolörlere dönüştürülmektedir. Aşağıda Şekil 5.6'da PID kontrolü kullanılarak kontrol edilen bir tesis gösterilmektedir.



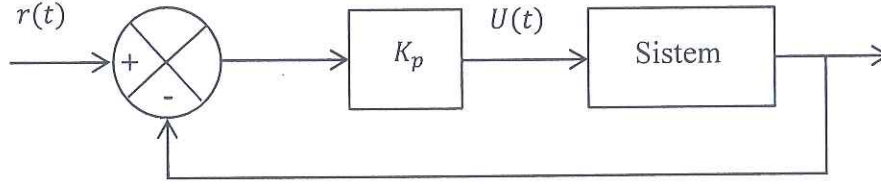
Şekil 5.1. PID kontrol blok şeması

PID kontrolör parametrelerinin (katsayılarının) deneysel yöntemlerle ayarlanmasına yönelik olarak literatürde bir çok farklı yöntem mevcuttur. Endüstride PID katsayılarının hangi yöntemle ayarlanılacağına imalatçısı karar verir. Ziegler ve Nichols, tarafından önerilen deneysel yöntem bu yöntemlerden biridir. Bu yöntemde amaç, sadece orantısal (P) kontrolör kullanarak sistem tepkisinde, Şekil 5.4'de gösterilen sönümsüz, sabit genlikli salınımlar elde etmektir. Sönümsüz sabit genlikli salınımların oluştuğu orantısal kazanç değerine Kritik Kazanç K_{cr} ve bu salınımların periyoduna ise Kritik Periyod P_{cr} denir. Yöntem, PID katsayılarının kritik değerlere göre hesaplanmasını öngören, matbu formülleri önermekte olup, bu formüller Tablo 5.1'de verilmiştir. Ziegler ve Nichols kuralları matematiksel modeli bilinmeyen sistemlerde kullanışlı bir yöntem olmakla birlikte matematiksel modeli bilinen sistemlerde rahatlıkla kullanılabilir. Önerilen formüllerin amacı Şekil 5.2'de gösterildiği gibi sistemin birim basamak tepkisinde %25 oranında maksimum aşmanın elde edilmesidir.

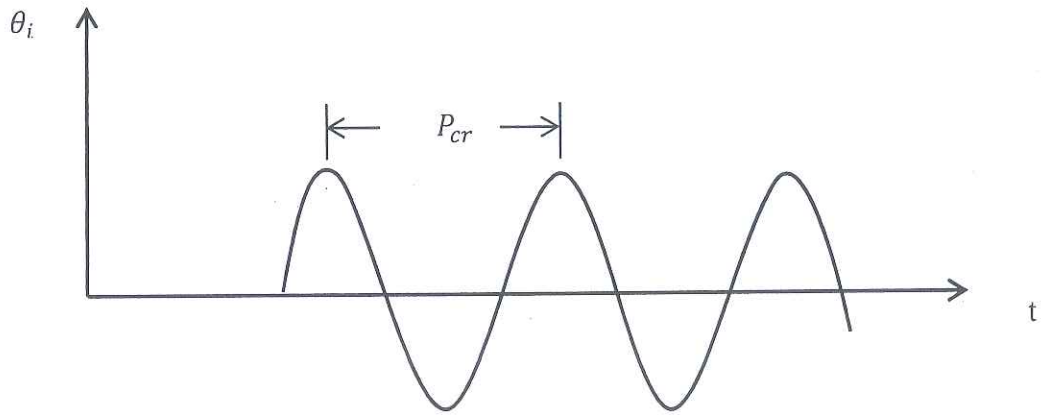


Şekil 5.2. Ziegler ve Nichols %25 maksimum aşma grafiği

Bir sistemde, K_p 'nin tüm değerlerine karşılık olarak çıkışta sönümsüz salınımlar oluşmuyorsa bu yöntem bu sistem için kullanılamaz.



Şekil 5.3. Orantısal kontrol blok şeması



Şekil 5.4. Ziegler ve Nichols sabit genlikli sönümsüz salınımlar grafiği

$$G_c(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (5.1)$$

$$G_c(S) = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,50P_{cr}S} + 0,125P_{cr}S \right) \quad (5.2)$$

$$G_c(S) = 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{(S + \frac{4}{P_{cr}})^2}{S} \quad (5.3)$$

Tablo 5.1. Ziegler ve Nichols PID katsayıları

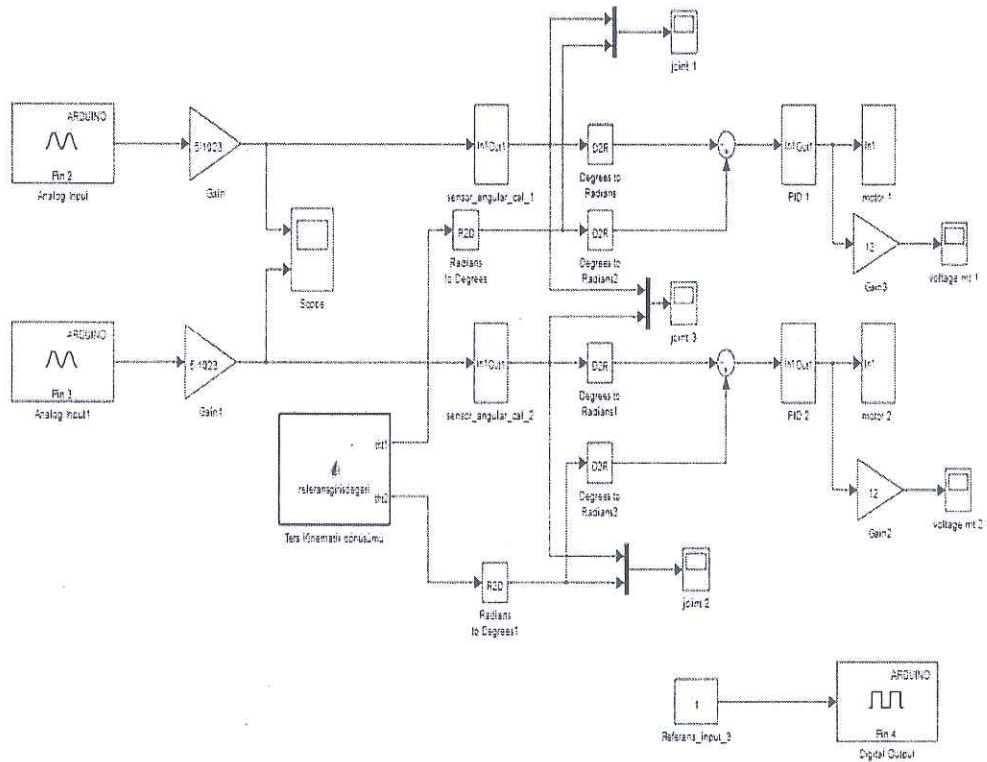
Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Bu yöntem hesaplanan sabit katsayıların değerleri sistem denetimi için nihai değildir. Bu yöntem, bize, kontrolör katsayılarının, aranmaya başlanacağı, başlangıç değerlerini vermektedir. Bir başka deyişle, bu yöntemin kullanılması sonucunda elde edilen PID katsayılarıyla yapılacak denetim sonucunda elde edilecek performanstan daha iyi performansı verebilecek farklı PID katsayıları her zaman mevcuttur.

PID kontrolörünün kendisi aslında bir kompanzatör olup, bu kontrolör kapalı döngü transfer fonksiyonuna $S = -4/P_{cr}$ konumunda iki adet sıfır (negatif reel eksen üzerinde) ve $S = 0$ konumunda bir adet kutup (orjinde) eklemektedir. Kapalı döngü sisteme eklenen sıfırlar sistemin kutuplarını sanal eksene doğru yaklaştırmakta yani sistem tepkisini hızlandırmakta olup, eklenen kutup ise sistemin kutuplarını sanal eksenden uzaklaştırmakta ve sistem tepkisini yavaşlatmaktadır. Bu her iki özelliği birlikte kullanarak sistem tepkisinde istediğimiz performansı elde etmek için PID'nin sıfır konumlarını değiştiriyoruz. Negatif reel eksen üzerinde konumlandırılan iki adet sıfırın konumunu değiştirilirken orantısal kazaç değeri K_p sabit tutulmakta ve sonucta istenen sistem performansı elde edilebilmektedir. Burada amaç istenen performans özelliklerini elde

etmek için kapalı döngü sistemin baskın kutupları üzerinde etkin sıfırları reel eksen üzerinde konumlandırmaktır. [34, 37]

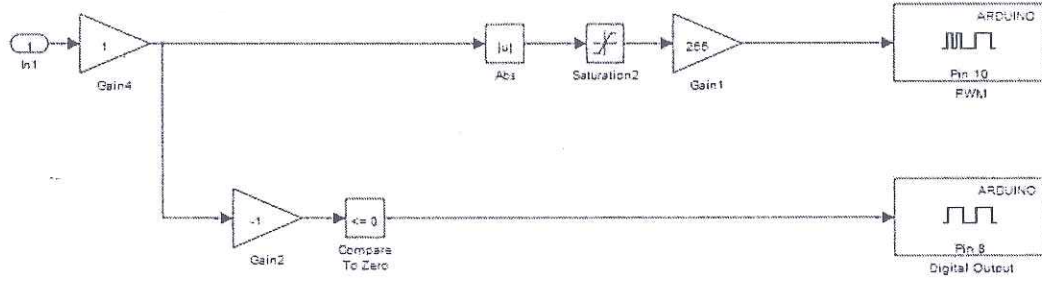
Çalışmamız, Şekil 5.5'de gösterilen kontrol blok şeması olarak Simulink ortamında hazırlanmış ve Arduino Mega 2560 micro denetim kartına kod olarak yüklenmiş ve kart üzerinde çalıştırılmıştır. Program denetim kartı üzerinde çalışırken eş zamanlı olarak tüm veriler MATLAB Workspace ortamında kaydedilmiş ve Kullanıcı Grafik Arayüzü (GUI) tarafından grafiğe dönüştürülmüş ve çalışma bu grafikler üzerinde gerçek zamanlı olarak takip edilmiştir.



Şekil 5.5. Geribeslemeli kontrol blok şeması

Bu çalışmanın referans giriş ve geribesleme değişkenleri her bir uzvun derece cinsinden açısal konumudur. Ortogonal kordinatlarda verilen bilek konumu, içinde

yukarıda anlatılan ters kinematik dönüşüm formüllerini içeren ters kinematik bloğu tarafından $uzuv_1$ ve $uzuv_2$ 'nin eklem değişkenlerine dönüştürülmekte ve referans giriş olarak kapalı döngü denetim sistemine uygulanmaktadır. Geribesleme sinyalleri, Şekil 5.5'deki kontrol blok şemasında Arduino Analog Input bloğu tarafından, potansiyometreden uzvun konumuna ilişkin olarak alınan 0-5 V analog gerilimin kart tarafından sayısallaştırılması sonucunda, programda kullanılmıştır. Kontrol blok şemasının çıkışı Şekil 5.5'de gösterilen Motor 1 ve Motor 2 bloklarının içinde yer alan Şekil 5.6'da gösterilen blok şemadaki Arduino PWM ve Arduino Digital Output bloklarıdır. Sırasıyla birinci blok denetim için gerekli olan PWM sinyalini üretirken diğer blok motorun yön sinyalini üretmektedir.



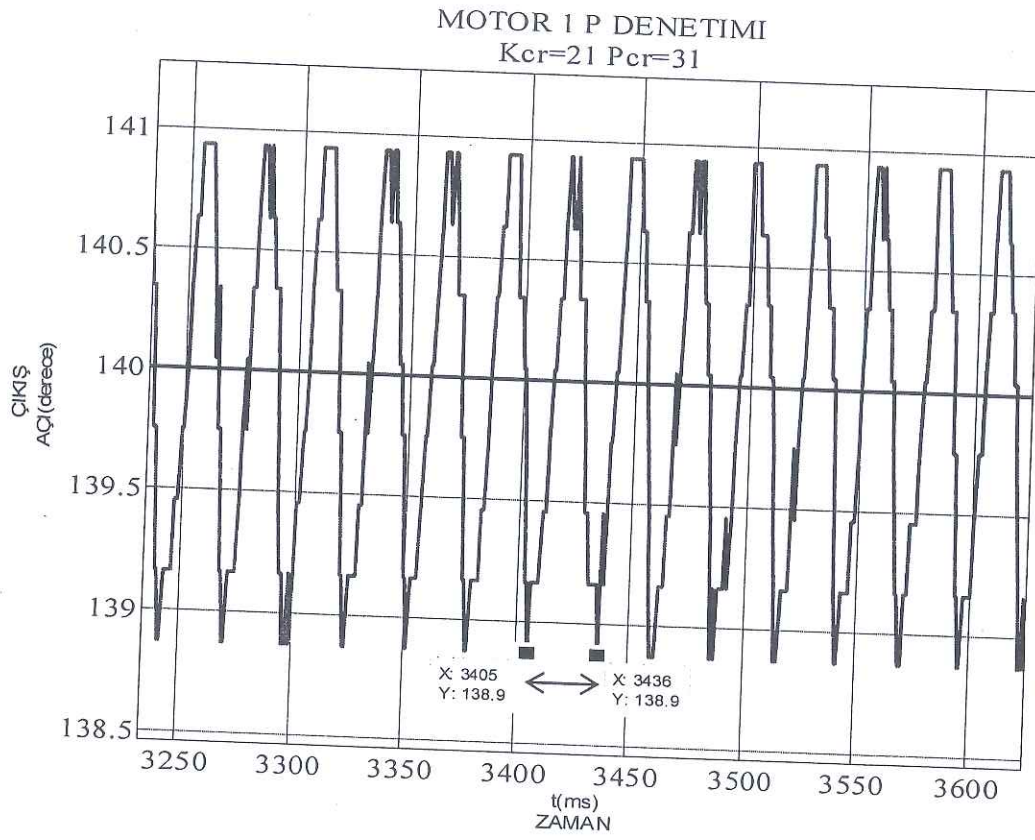
Şekil 5.6. PWM üretimi blok şeması

Bu çalışmada örnekleme zamanı $1/1000$ s ve PWM anahtarlama periyodunun iletim süresi olarak PID'nin çıkış değeri alınmıştır. Ana kontrol blok şeması içerisinde yer alan motor 1 ve 2 bloğunun içerisinde bulunan alt kontrol bloğunda, PID kontrol bloğundan gelen sinyalin PWM için mutlak pozitif olması için öncelikle mutlak değeri alınmış ve daha sonra iletim süresini belirlemek için saturation ve kazanç bloğu kullanılmıştır.

Serpent 1 SCARA Robotunun ilk iki uzvunun sönümlenmeyen salınımlar yaptığı kritik kazanç K_{cr} ve kritik periyod P_{cr} değerleri deneysel olarak iki farklı uygulamada tespit edilmiş ve formüllerle hesaplanan PID katsayılarına göre denetim yapılmıştır. Birinci uygulamada, yukarıda anlatılan yöntem, iki uzuvdan biri sabitken (hareketsizken) diğerine

uygulanmıştır. İkinci uygulamada ise yukarıda anlatılan yöntem her iki uzuv aynı anda hareketli iken uygulanmıştır.

İki numaralı uzuv hareketsizken bir numaralı uzvun orantısız denetimi sonucunda sönümsüz sabit salınımların oluştuğu Kritik Kazanç ve Kritik Periyod değerleri sırasıyla $K_{cr1} = 21$ ve $P_{cr1} = 31$ s olarak bulunmuş ve bu salınımlar aşağıda Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Uzuv 1'in (Motor 1'in) P denetimi $K_{cr} = 21$ ve $P_{cr} = 31$ s $S = -0.129$

$$G_{c1}(S) = K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S} + K_{d1}S = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}S} + T_{d1}S \right) \quad (5.4)$$

$$K_{cr1} = 21 \quad (5.5)$$

$$P_{cr1} = 31 \quad (5.6)$$

Denklem 5.5 ve 5.6 ile verilen kritik kazanç değerlerine göre PID katsayılarının hesabı denklem 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 ve 5.11'de yapılmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 21 = 12.6 \quad (5.7)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d1} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 31 = 3.8 \quad (5.8)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 12.6 * 3.8 = 48.825 \quad (5.9)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

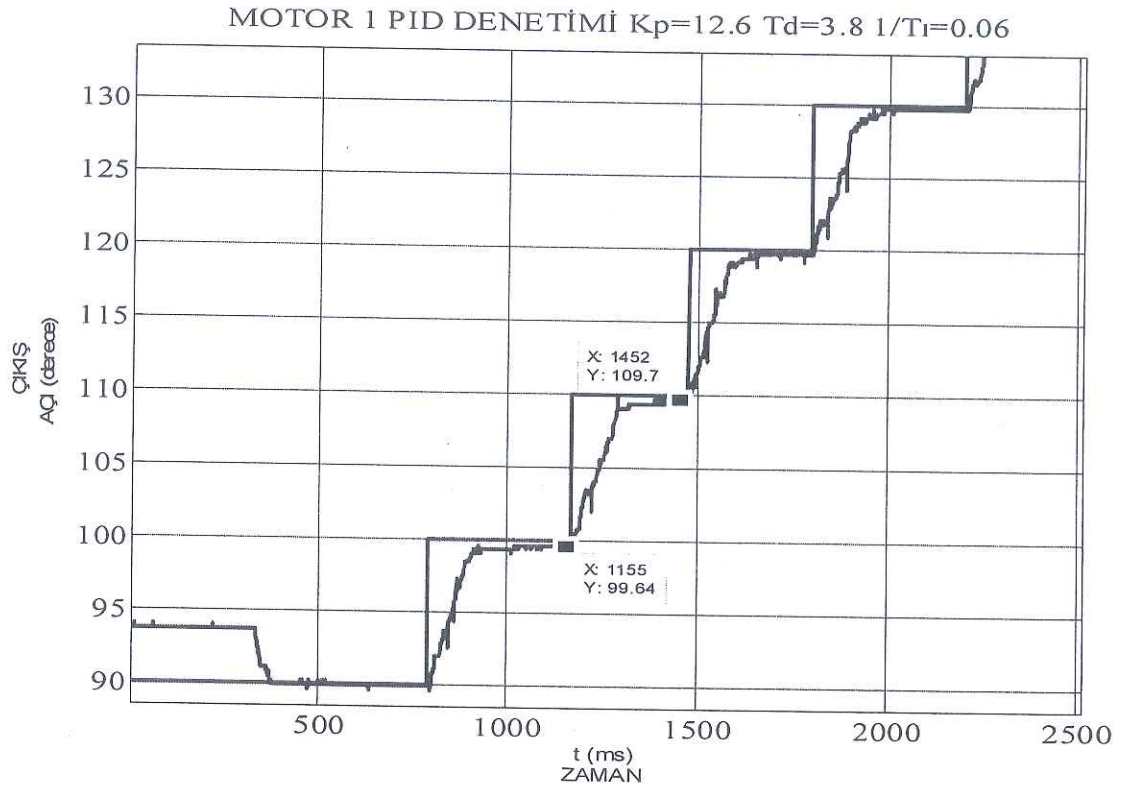
$$1/T_{i1} = 1/(0.5P_{cr1}) = 1/(0.5 * 31) = 0.06 \quad (5.10)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 12.6 * 0.06 = 0.756 \quad (5.11)$$

Bulunan PID katsayılarını denklem 5.4'te yerine yazdığımızda denklem 5.12 ve 5.13'te verilen PID kontrolörü elde edilmiş olur.

$$G_{c1}(S) = 12.6 + \frac{0.756}{S} + 48.825S = 12.6 \left(1 + \frac{0.06}{S} + 3.8S \right) \quad (5.12)$$

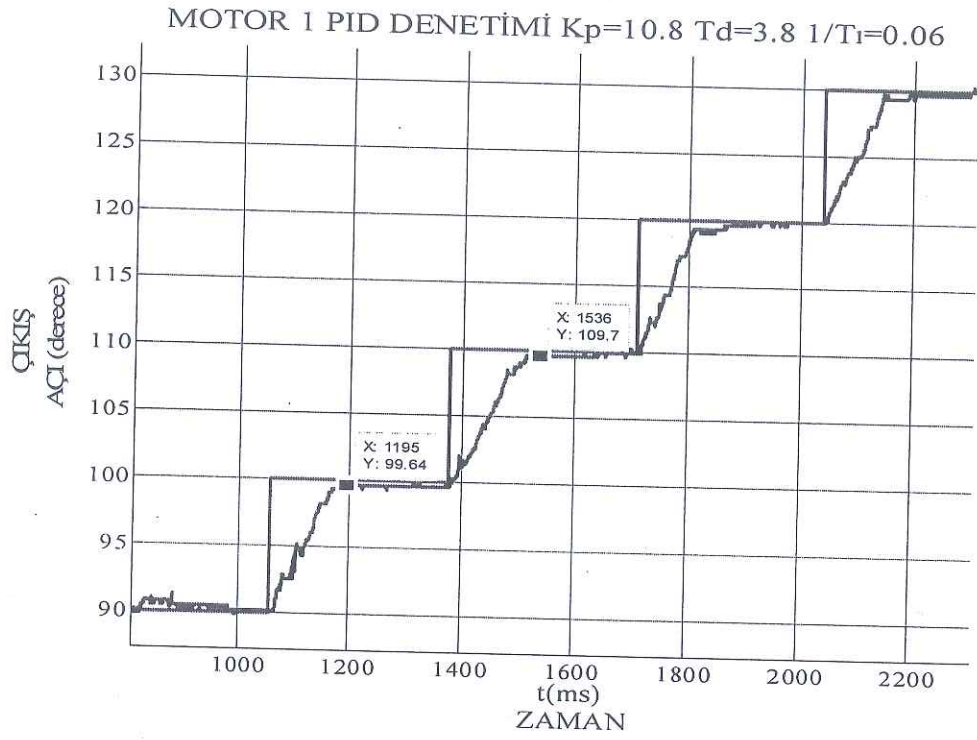
$$G_{c1}(S) = 0.075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 48.825 \frac{(S + 0.129)^2}{S} \quad (5.13)$$



Şekil 5.8 Uzun 1'in (Motor 1'in) PID denetimi

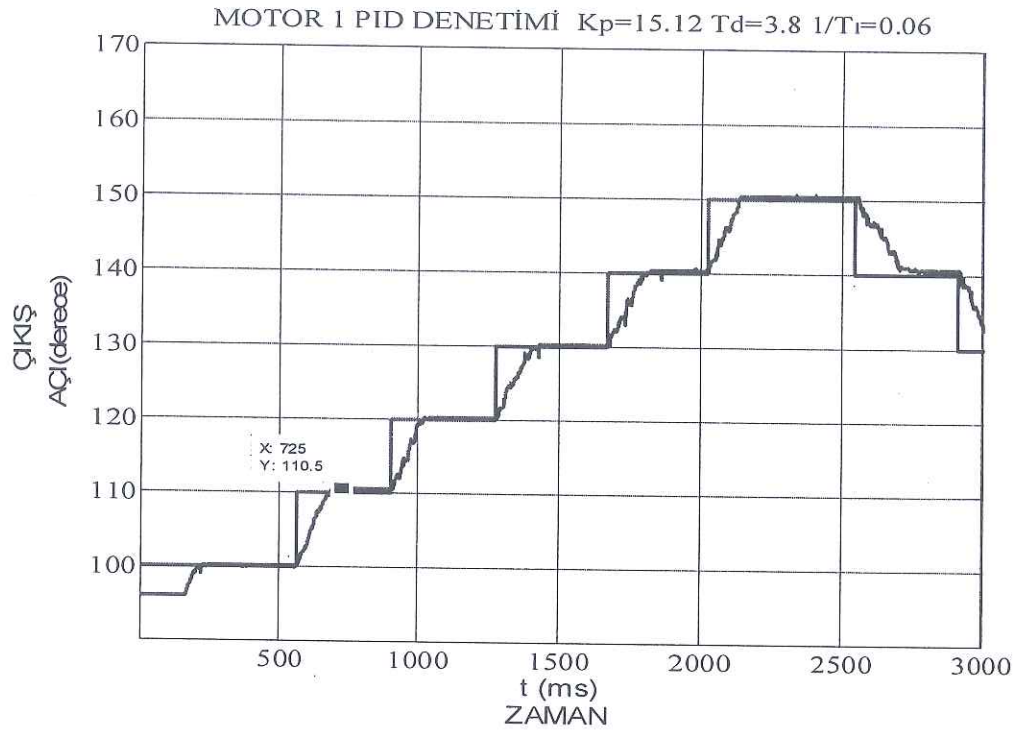
Serpent 1 Scara Robotunun 1 numaralı uzvunu, yukarıda hesaplanmış PID denetimi sonucunda Şekil 5.8'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir. Bu denetimde referans girişler sırasıyla 90° , 100° , 110° , 120° , 130° olarak girilmiş ve kalıcı durumda 1° ile 2° arasında değişen kalıcı durum hataları elde edilmiştir.

Yapılan ikinci ve üçüncü uygulamada, 1 numaralı uzvunun $1/T_{i1} = 0.06$ $T_{d1} = 3.8$ değerleri sabit tutulmuş sadece orantısal kazanç değeri sırasıyla 20% azaltılarak $K_{p1} = 10.8$ değerinde ve 20% arttırılarak $K_{p1} = 15.12$ değerinde PID denetimleri yapılmıştır. Bu denetimler sonucunda elde edilen tepkiler Şekil 5.9'da ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



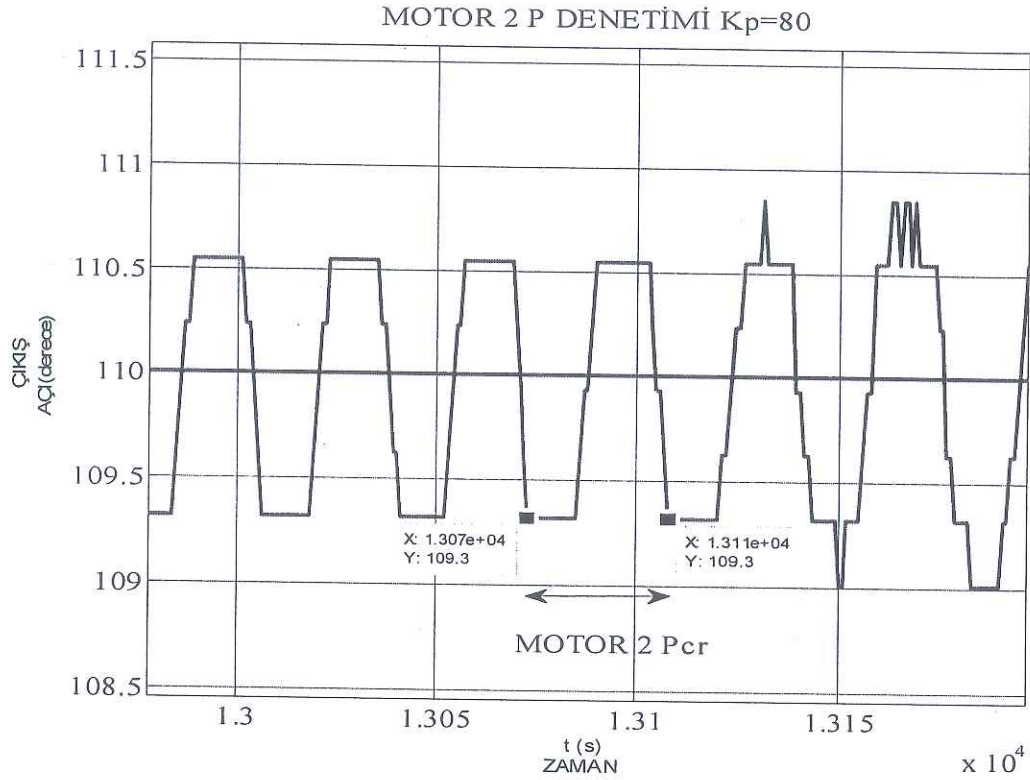
Şekil 5.9 Uzuv 1'in (Motor 1'in) PID denetimi

Bu denetimde referans girişler sırasıyla 90° , 100° , 110° , 120° , 130° olarak girilmiş ve kalıcı durumda 0.5° ile 1° arasında değişen kalıcı durum hataları elde edilmiştir.



Şekil 5.10 Uzun 1'in (Motor 1'in) PID denetimi

Bu denetimde referans girişler sırasıyla 100° , 110° , 120° , 130° , 140° , 130° , olarak girilmiş ve kalıcı durumda 0.5° kalıcı durum hataları elde edilmiştir.



Şekil 5.11 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) P denetimi $K_{cr2} = 80$, $P_{cr2} = 40$ s, $S = -0.1$

Bir numaralı uzvu sabit tutup iki numaralı uzvun orantısal denetimi sonucunda sönümsüz sabit salınımların olduğu Kritik Kazanç ve Kritik Periyod değerleri sırasıyla $K_{cr2} = 80$ ve $P_{cr2} = 40$ s olup, bu salınımlar yukarıda Şekil 5.11.'de gösterilmiştir.

$$G_{c2}(S) = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S} + K_{d2}S = K_{p2} \left(1 + \frac{1}{T_{i2}S} + T_{d2}S \right) \quad (5.14)$$

$$K_{cr2} = 80 \quad (5.15)$$

$$P_{cr2} = 40 \quad (5.16)$$

Denklem 5.15 ve 5.16 ile verilen kritik kazanç değerlerine göre PID katsayılarının hesabı denklem 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 ve 5.21'de yapılmıştır.

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 80 = 48 \quad (5.17)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d2} = 0.125P_{cr2} = 0.125 * 40 = 5 \quad (5.18)$$

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 48 * 5 = 240 \quad (5.19)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$1/T_{i2} = 1/(0.5P_{cr2}) = 1/(0.5 * 40) = 0.05 \quad (5.20)$$

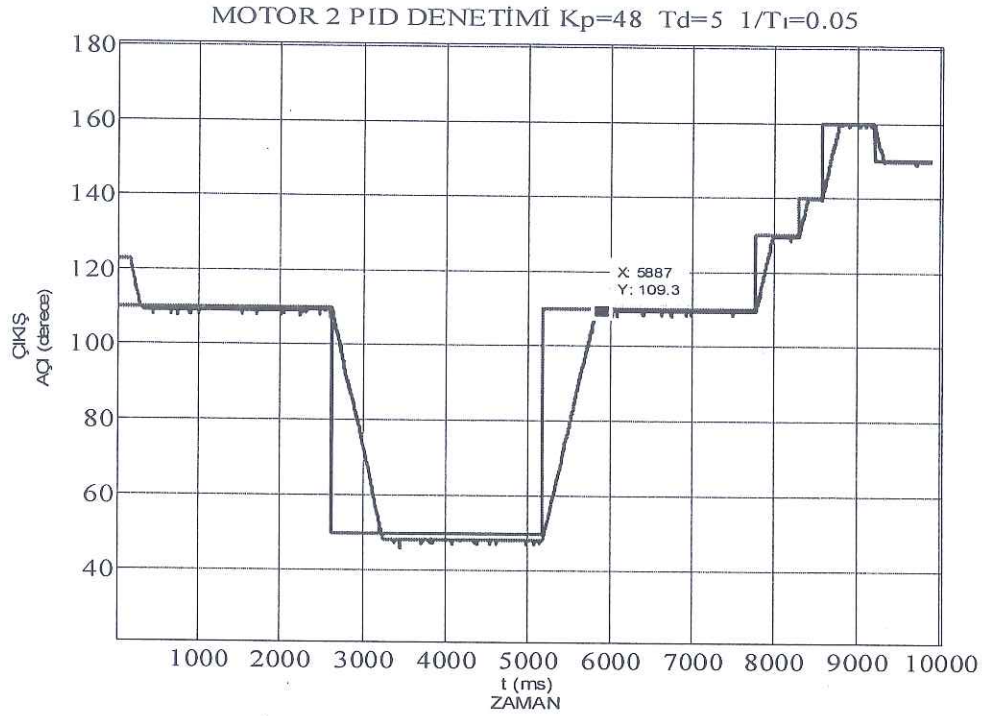
$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 48 * 0.05 = 2.4 \quad (5.21)$$

Bulunan PID katsayılarını denklem 5.14'te yerine yazdığımızda denklem 5.22 ve 5.23'te verilen PID kontrolörü elde edilmiş olur.

$$G_{c2}(S) = 48 + \frac{2.4}{S} + 240S = 48 \left(1 + \frac{0.05}{S} + 5S \right) \quad (5.22)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}} \right)^2}{S} = 240 \frac{(S + 0.1)^2}{S} \quad (5.24)$$

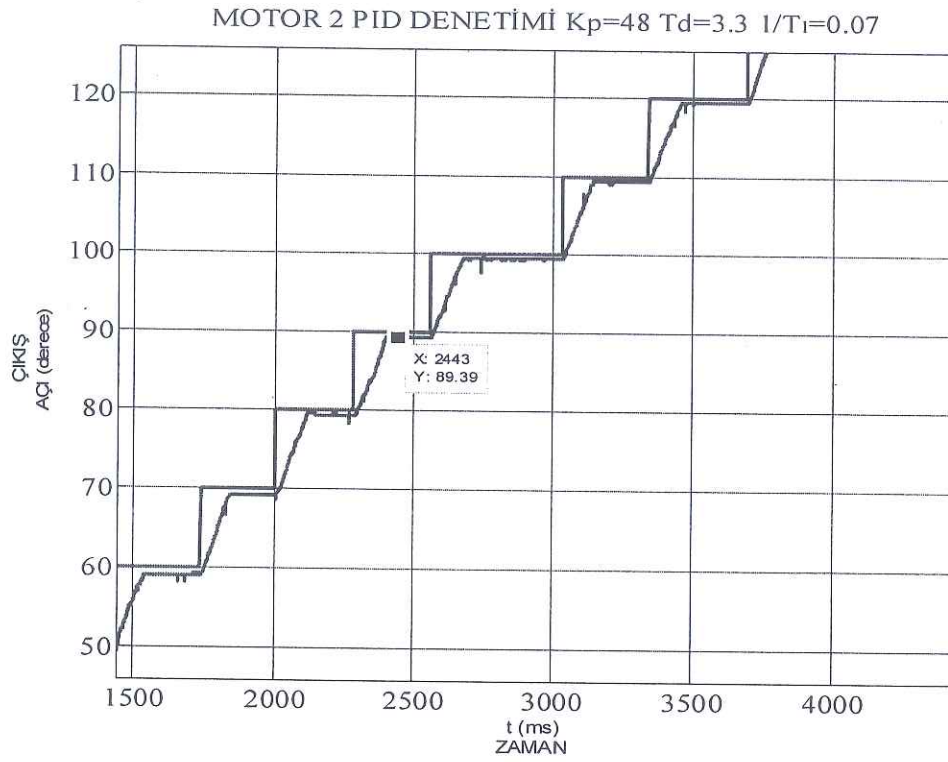
Serpent 1 Scara robotunun 2 numaralı uzvunu, yukarıda hesaplanmış PID ile denetimi sonucunda Şekil 5.12'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.12 UzuV 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi

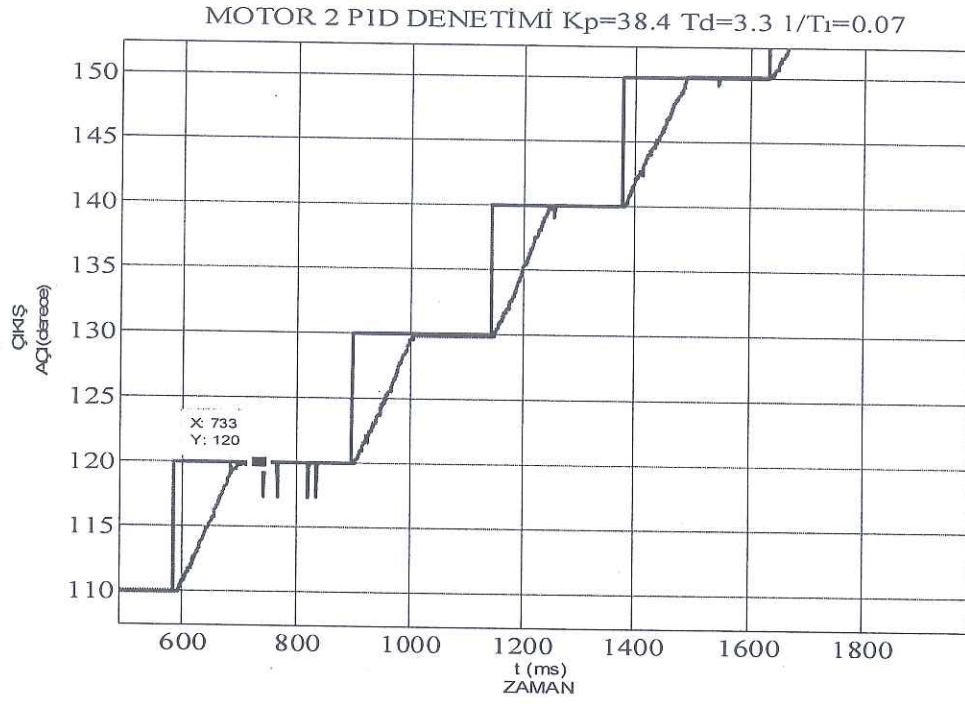
Bu denetimde referans girişler sırasıyla 100° , 50° , 110° , 130° , 140° , 160° , olarak girilmiş ve kalıcı durumda 0.7° ile 0° arasında değişen kalıcı durum hataları elde edilmiştir.

Yapılan ikinci ve üçüncü uygulamada, 2 numaralı uzvunun $K_{p2} = 48$ olarak sabit tutulması ve sadece negatif reel eksen üzerinde $S=-0.1$ konumunda bulunan sıfırın konumu kalıcı durum hatasını azaltmak ve sıfırları kapalı döngü kutupları üzerinde daha etkin hale getirmek için $S=-0.15$ 'e taşınması sonucunda PID katsayıları bu yeni sıfır konumuna göre tekrar $1/T_{i2} = 0.075$ $T_{d1} = 3.325$ değerlerinde hesaplanmış ve bu değerlere göre PID denetimi yapılmış olup, denetim sonucundaki tepki Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Bulunan bu PID değerlerinden $1/T_{i2} = 0.075$ $T_{d1} = 3.325$ değerleri sabit tutulmuş sadece orantısal kazanç değeri sırasıyla 20% azaltılarak $K_{p2} = 38.4$ değerinde ve 20% artırılarak $K_{p2} = 57.6$ değerinde tekrar PID denetimleri yapılmıştır. Bu denetimler sonucunda elde edilen tepkiler Şekil 5.14'da ve Şekil 5.15'de gösterilmiştir.

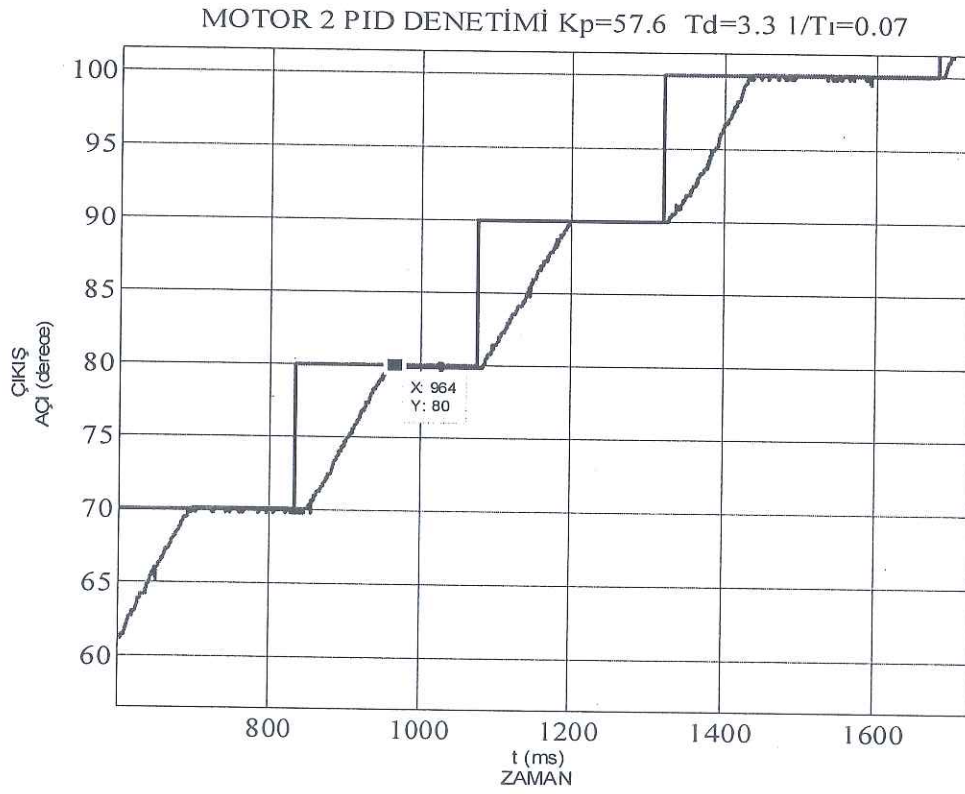


Şekil 5.13 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi

Bu denetimde referans girişler sırasıyla 60° , 70° , 80° , 90° , 100° , 110° , 120° , olarak girilmiş ve kalıcı durumda 0.61° ile 1° arasında kalıcı durum hataları elde edilmiştir. Bu noktada orantısız kazanç değerinin artırılması ve azaltılması sonucunda aşağıda Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilen tepkiler elde edilmiştir.



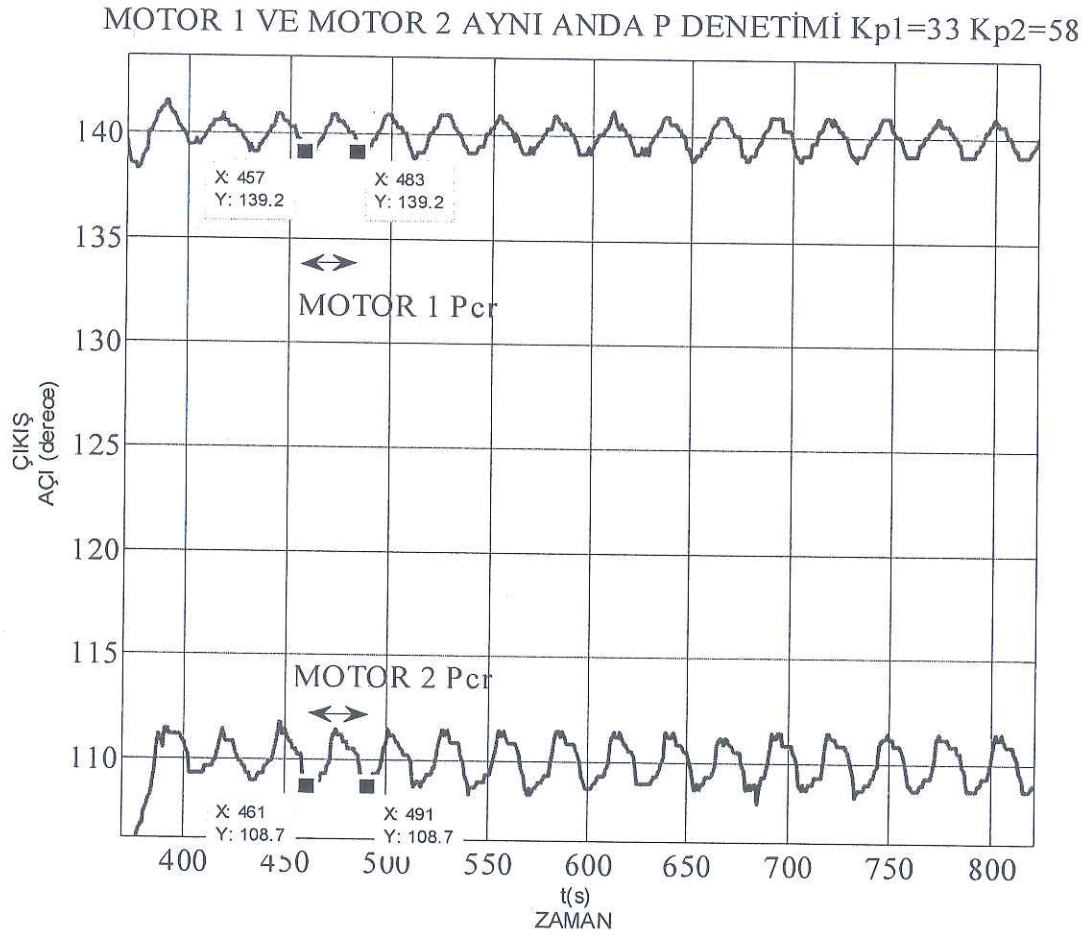
Şekil 5.14 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi



Şekil 5.15 Uzuv 2'in (Motor 2'nin) PID denetimi

Bu denetimler sonucunda Şekil 5.14 ve 5.15'te kırmızı renkle gösterilen referans girişler için kalıcı durum konum hataları her iki tepkidede 0° civarında elde edilmiştir.

Bir ve iki numaralı uzuvların aynı anda orantısız (P) denetimi sonucunda sönümsüz sabit salınımların oluştuğu Kritik Kazanç ve Kritik Periyod değerleri sırasıyla $K_{cr1} = 33$ ve $P_{cr1} = 26$ s ve $K_{cr2} = 58$ ve $P_{cr2} = 30$ s olup, bu salınımlar aşağıda Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Uzuv 1 ve 2'nin P denetimi

$$G_{c1}(S) = K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S} + K_{d1}S = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}S} + T_{d1}S \right) \quad (5.25)$$

$$K_{cr1} = 33 \quad (5.26)$$

$$P_{cr1} = 26 \quad (5.27)$$

Denklem 5.26 ve 5.27'de verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 numaralı uzvu denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32'de hesaplanmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 33 = 19.8 \quad (5.28)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d1} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 26 = 3.25 \quad (5.29)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 19.8 * 3.25 = 64.35 \quad (5.30)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$\frac{1}{T_{i1}} = \frac{1}{0.5P_{cr1}} = \frac{1}{0.5 * 26} = 0.0769 \quad (5.31)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 19.8 * 0.0769 = 1.522 \quad (5.32)$$

Birinci uzuvun denetimi için bulunan PID katsayılarını denklem 5.25'te yerine yazdığımızda denklem 5.33 ve 5.34'te verilen PID kontrolörü elde edilmiş olur.

$$G_{c1}(S) = 19.8 + \frac{1.522}{S} + 64.35S = 19.8 \left(1 + \frac{0.0769}{S} + 3.25S \right) \quad (5.33)$$

$$G_{c1}(S) = 0.075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 64.35 \frac{(S + 0.153)^2}{S} \quad (5.34)$$

İkinci uzvun denetimini gerçekleştirecek olan PID'nin hesabı aşağıdaki denklemlerde yapılmıştır.

$$G_{c2}(S) = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S} + K_{d2}S = K_{p2} \left(1 + \frac{1}{T_{i2}S} + T_{d2}S \right) \quad (5.35)$$

$$K_{cr2} = 58 \quad (5.36)$$

$$P_{cr2} = 30 \quad (5.37)$$

Denklem 5.36 ve 5.37'de verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 numaralı uzvu denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32'de hesaplanmıştır.

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 58 = 34.8 \quad (5.38)$$

Türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d2} = 0.125P_{cr2} = 0.125 * 30 = 3.75 \quad (5.39)$$

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 34.8 * 3.75 = 130.5 \quad (5.40)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$\frac{1}{T_{i2}} = \frac{1}{(0.5P_{cr2})} = \frac{1}{(0.5 * 30)} = 0.066 \quad (5.41)$$

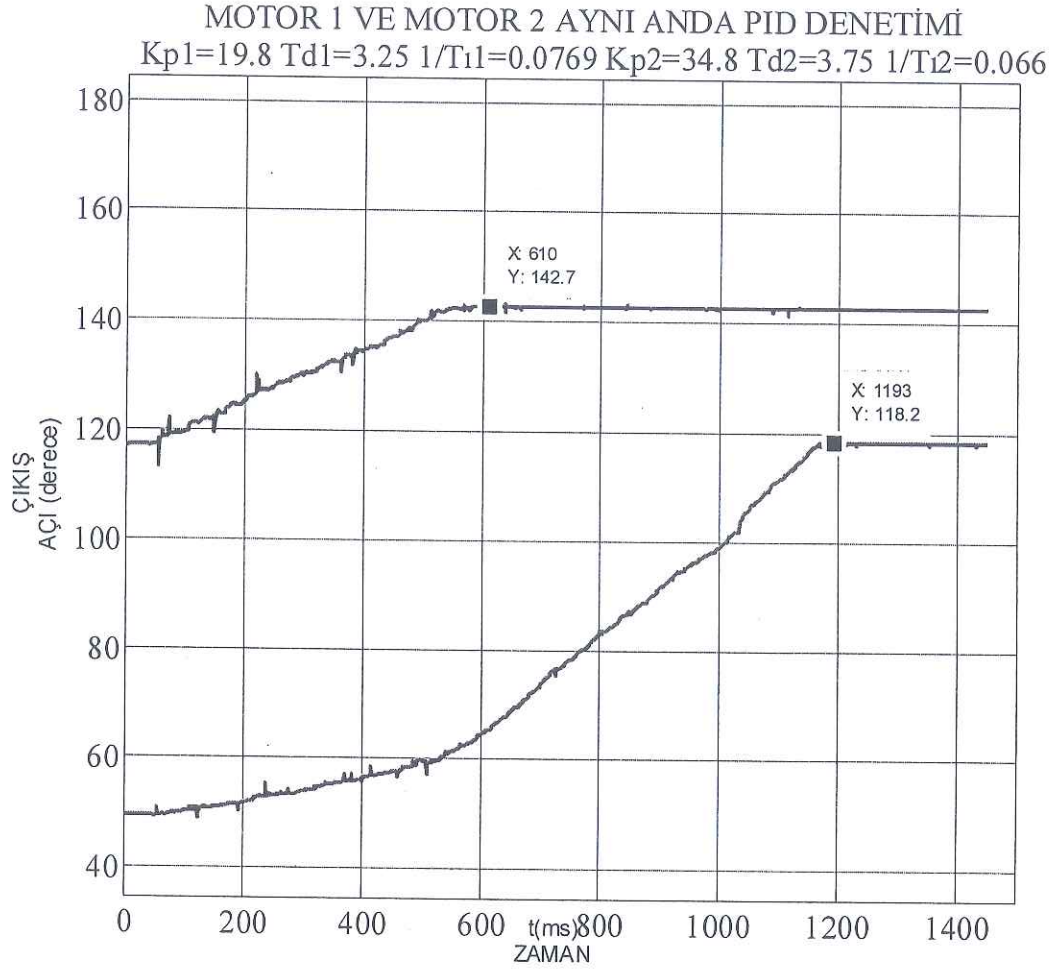
$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 34.8 * 0.066 = 2.2968 \quad (5.42)$$

ikinci uzuvun denetimi için bulunan PID katsayılarını denklem 5.35'te yerine yazdığımızda denklem 5.43 ve 5.44'te verilen PID kontrolörü elde edilmiş olur.

$$G_{c2}(S) = 34.8 + \frac{2.29}{S} + 130.5S = 34.8 \left(1 + \frac{0.066}{S} + 3.75S \right) \quad (5.43)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}} \right)^2}{S} = 130.5 \frac{(S + 0.133)^2}{S} \quad (5.44)$$

Serpent 1 Scara robotunun 1 ve 2 numaralı uzuvlarını, yukarıda hesaplanmış PID'ler ile denetimi sonucunda Şekil 5.17'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.17 UzuV 1 ve 2'in PID denetimi

Bu denetimde referans girişler birinci uzuv için 140° ve ikinci uzuv için 110° olarak girilmiş ve kalıcı durumda birinci uzuv için 2.7° ve ikinci uzuv için 8.2° kalıcı durum hatası meydana gelmiştir.

Yukarıda elde edilen tepkideki kalıcı durum konum hatasını azaltmak ve kapalı döngü sistemin kutupları üzerinde PID tarafından eklenen sıfırların baskınlığını arttırmak için orantısal kazanç katsayısını sabit tutup sadece sıfır konumlarını negatif reel eksen üzerinde orjine doğru $S=-0.002$ 'de konumlandırırdık ve buna bağlı olarak PID'nin integral türev zaman sabitlerini tekrar aşağıda hesapladık ve bulunan katsayı değerlerine göre sistemi denetlediğimizde aşağıda Şekil 5.18'de gösterilen tepkiyi elde ettik.

$$G_{ci}(S) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{S} + K_{di}S = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_{ii}S} + T_{di}S \right) \quad (5.45)$$

$$G_{ci}(S) = 0,075K_{cri}P_{cri} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cri}} \right)^2}{S} \quad \text{ve } S = -0.002 \quad (5.46)$$

$S = -0.002$ sıfır konumunda

$$K_{cr1} = 33 \quad (5.47)$$

$$K_{cr2} = 58 \quad (5.48)$$

$$P_{cr1} = P_{cr2} = \frac{4}{0.002} = 2000 \quad (5.49)$$

Denklem 5.47 ve 5.48'de verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 ve 2 numaralı uzuvları denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.54, 5.55, 5.56, 5.57'de hesaplanmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 33 = 19.8 \quad (5.50)$$

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 58 = 34.8 \quad (5.51)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d1} = T_{d2} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 2000 = 250 \quad (5.52)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 19.8 * 250 = 4950 \quad (5.53)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 34.8 * 250 = 8700 \quad (5.54)$$

$$\frac{1}{T_{i1}} = \frac{1}{T_{i2}} = \frac{1}{0.5P_{cr1}} = \frac{1}{0.5 * 2000} = 0.001 \quad (5.55)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 19.8 * 0.001 = 0.0198 \quad (5.56)$$

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 34.8 * 0.001 = 0.0348 \quad (5.57)$$

1. ve 2. uzuvun denetimi için yukarıda hesaplanan PID katsayılarını denklem 5.45 ve 5.46'da yerine yazdığımızda denklem 5.58, 5.59, 5.60 ve 5.61'de verilen PID kontrolörleri elde edilmiş olur.

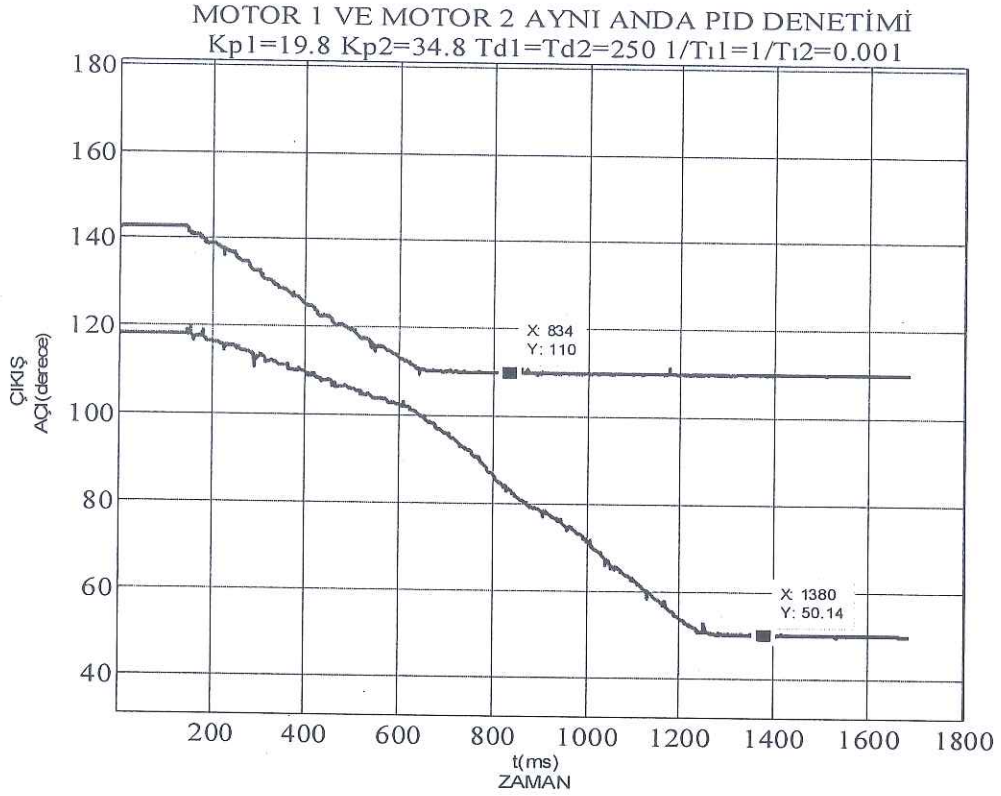
$$G_{c1}(S) = 19.8 + \frac{0.0198}{S} + 4950S = 19.8 \left(1 + \frac{0.001}{S} + 250S \right) \quad (5.58)$$

$$G_{c2}(S) = 34.8 + \frac{0.0348}{S} + 8700S = 34.8 \left(1 + \frac{0.001}{S} + 250S \right) \quad (5.59)$$

$$G_{c1}(S) = 0,075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 4950 \frac{(S + 0.002)^2}{S} \quad (5.60)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}} \right)^2}{S} = 8700 \frac{(S + 0.002)^2}{S} \quad (5.61)$$

Serpent 1 Scara robotunun 1 ve 2 numaralı uzuvlarını, yukarıda hesaplanmış PID'ler ile denetimi sonucunda Şekil 5.18'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.18 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi

Bu denetimde referans girişler birinci uzuv için 110° ve ikinci uzuv için 50° olarak girilmiş ve kalıcı durumda birinci uzuv için 0° ve ikinci uzuv için 0.14° kalıcı durum hatası meydana gelmiştir.

PID'nin sıfırlarının konumlarının orjine doğru yaklaştırmaya devam ettik. Sıfırların konumu birinci uygulamada $S=-0.001$ 'e ve ikinci uygulamada $S=-0.0005$ 'e konumlandırıp bu sıfır konumlarında PID katsayılarını hesaplayıp denetim yaptık. Denetim sonucunda sırasıyla Şekil 5.19'da ve Şekil 5.20'de gösterilen tepkileri elde ettik.

$$G_{ci}(S) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{S} + K_{di}S = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_{ii}S} + T_{di}S \right) \quad (5.62)$$

$$G_{ci}(S) = 0,075K_{cri}P_{cri} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cri}}\right)^2}{S} \quad \text{ve } S = -0.001 \quad (5.63)$$

$$K_{cr1} = 33 \quad (5.64)$$

$$K_{cr2} = 58 \quad (5.65)$$

$$P_{cr1} = P_{cr2} = \frac{4}{0.001} = 4000 \quad (5.66)$$

Denklem 5.64 ve 5.65'de verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 ve 2 numaralı uzuvları denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.67, 5.68, 5.69, 5.70, 5.71, 5.72, 5.73, 5.74'de hesaplanmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 33 = 19.8 \quad (5.67)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 58 = 34.8 \quad (5.68)$$

$$T_{d1} = T_{d2} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 4000 = 500 \quad (5.69)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 19.8 * 500 = 9900 \quad (5.70)$$

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 34.8 * 500 = 17400 \quad (5.71)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$\frac{1}{T_{i1}} = \frac{1}{T_{i2}} = \frac{1}{0.5P_{cr1}} = \frac{1}{0.5 * 4000} = 0.0005 \quad (5.72)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 19.8 * 0.0005 = 0.0099 \quad (5.73)$$

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 34.8 * 0.0005 = 0.0174 \quad (5.74)$$

1. ve 2. uzuvun denetimi için yukarıda hesaplanan PID katsayılarını denklem 5.62 ve 5.63'de yerine yazdığımızda denklem 5.75, 5.76, 5.77 ve 5.78'de verilen PID kontrolörleri elde edilmiştir.

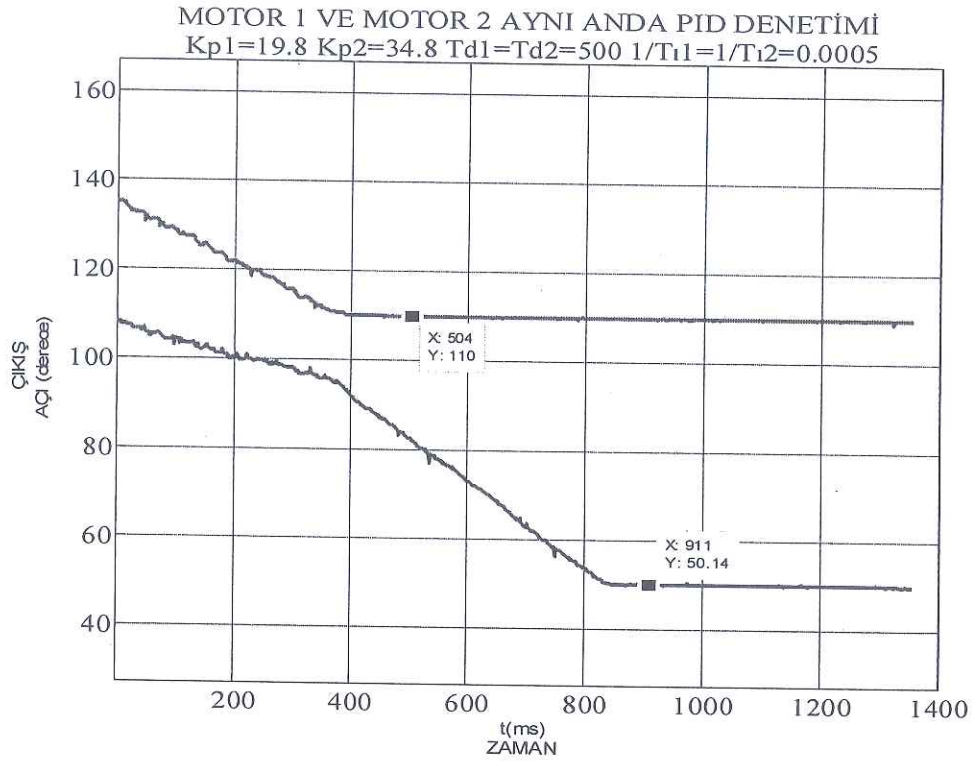
$$G_{c1}(S) = 19.8 + \frac{0.0099}{S} + 9900S = 19.8 \left(1 + \frac{0.0005}{S} + 500S \right) \quad (5.75)$$

$$G_{c2}(S) = 34.8 + \frac{0.0348}{S} + 8700S = 34.8 \left(1 + \frac{0.0005}{S} + 500S \right) \quad (5.76)$$

$$G_{c1}(S) = 0,075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 9900 \frac{(S + 0.001)^2}{S} \quad (5.77)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}} \right)^2}{S} = 17400 \frac{(S + 0.001)^2}{S} \quad (5.78)$$

Serpent 1 Scara robotunun 1 ve 2 numaralı uzuvlarını, yukarıda hesaplanmış PID'ler ile denetimi sonucunda Şekil 5.19'da gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.19 Uzun 1 ve 2'in PID denetimi

Bu denetimde referans girişler birinci uzun için 110° ve ikinci uzun için 50° olarak girilmiş ve kalıcı durumda birinci uzun için 0° ve ikinci uzun için 0.14° kalıcı durum hatası meydana gelmiştir.

$$G_{ci}(S) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{S} + K_{di}S = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_{ii}S} + T_{di}S \right) \quad (5.79)$$

$$G_{ci}(S) = 0,075K_{cri}P_{cri} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cri}} \right)^2}{S} \text{ ve } S = -0.0005 \quad (5.80)$$

$$K_{cr1} = 33 \quad (5.81)$$

$$K_{cr2} = 58 \quad (5.82)$$

$$P_{cr1} = P_{cr2} = \frac{4}{0.0005} = 8000 \quad (5.83)$$

Denklem 5.81, 5.82 ve 5.83'te verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 ve 2 numaralı uzuvları denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.84, 5.85, 5.86, 5.87, 5.88, 5.89, 5.90 ve 5.91'de hesaplanmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 33 = 19.8 \quad (5.84)$$

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 58 = 34.8 \quad (5.85)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d1} = T_{d2} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 8000 = 1000 \quad (5.86)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 19.8 * 1000 = 19800 \quad (5.87)$$

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 34.8 * 1000 = 34800 \quad (5.88)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$\frac{1}{T_{i1}} = \frac{1}{T_{i2}} = \frac{1}{0.5P_{cr1}} = \frac{1}{0.5 * 8000} = 0.00025 \quad (5.89)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 19.8 * 0.00025 = 0.00495 \quad (5.90)$$

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 34.8 * 0.00025 = 0.00878 \quad (5.91)$$

1. ve 2. uzuvun denetimi için yukarıda hesaplanan PID katsayılarını denklem 5.79 ve 5.80'de yerine yazdığımızda denklem 5.92, 5.93, 5.94 ve 5.95'de verilen PID kontrolörleri elde edilmiştir.

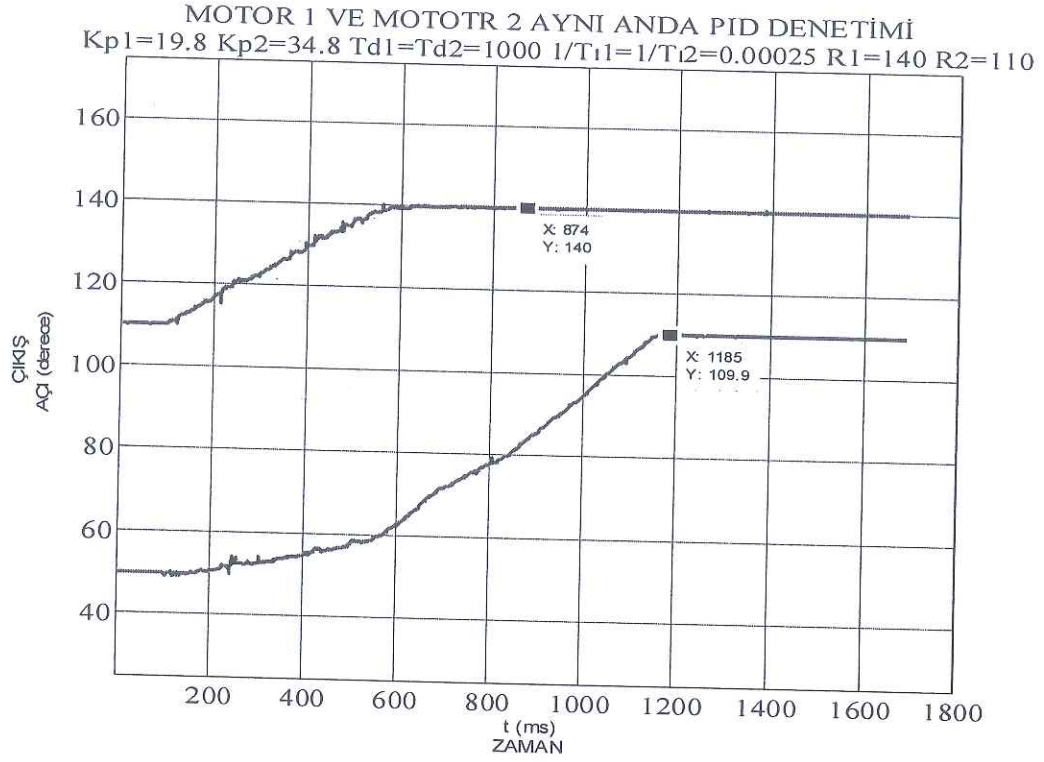
$$G_{c1}(S) = 19.8 + \frac{0.00495}{S} + 19800S = 19.8 \left(1 + \frac{0.00025}{S} + 1000S \right) \quad (5.92)$$

$$G_{c2}(S) = 34.8 + \frac{0.00878}{S} + 34800S = 34.8 \left(1 + \frac{0.00025}{S} + 1000S \right) \quad (5.93)$$

$$G_{c1}(S) = 0,075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 19800 \frac{(S + 0.0005)^2}{S} \quad (5.94)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}} \right)^2}{S} = 34800 \frac{(S + 0.0005)^2}{S} \quad (5.95)$$

Serpent 1 Scara robotunun 1 ve 2 numaralı uzuvlarını, yukarıda hesaplanmış PID'ler ile denetimi sonucunda Şekil 5.20'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.20 UzuV 1 ve 2'in PID denetimi

Bu denetimde referans girişler birinci uzuv için 140° ve ikinci uzuv için 110° olarak girilmiş ve kalıcı durumda birinci uzuv için 0° ve ikinci uzuv için 0.1° kalıcı durum hatası meydana gelmiştir.

Birinci uzvun kalıcı durum hatasının sıfır olması nedeniyle $S=-0.0005$ konumunda PID sıfırları sabitlenmiş ve ikinci uzvun kalıcı durum hatasını sıfırlamak amacıyla ikinci uzvun PID sıfırları $S=-0.000125$ konumuna taşınmış ve her iki uzvun bahse konu sıfır konumlarındaki PID katsayıları hesaplanmış ve denetim sonucunda elde edilen tepkileri Şekil 5.21'de gösterilmiştir.

$$G_{ci}(S) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{S} + K_{di}S = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{T_{ii}S} + T_{di}S \right) \quad (5.96)$$

$$G_{c1}(S) = 0,075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} \text{ ve } S = -0.0005 \quad (5.97)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}}\right)^2}{S} \quad \text{ve } S = -0.00025 \quad (5.98)$$

$$K_{cr1} = 33 \quad (5.100)$$

$$K_{cr2} = 58 \quad (5.101)$$

$$P_{cr1} = \frac{4}{0.0005} = 8000 \quad (5.102)$$

$$P_{cr2} = \frac{4}{0.00025} = 16000 \quad (5.103)$$

Denklem 5.100, 5.101, 5.102 ve 5.103'te verilen kritik kazanç değerlerine göre 1 ve 2 numaralı uzuvları denetleyecek PID katsayılarının değeri denklem 5.104, 5.105, 5.106, 5.107, 5.108, 5.109, 5.110, 5.111, 5.112 ve 5.113'te hesaplanmıştır.

$$K_{p1} = 0.6K_{cr1} = 0.6 * 33 = 19.8 \quad (5.104)$$

$$K_{p2} = 0.6K_{cr2} = 0.6 * 58 = 34.8 \quad (5.105)$$

PID türev katsayısı ve türev zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$T_{d1} = 0.125P_{cr1} = 0.125 * 8000 = 1000 \quad (5.106)$$

$$T_{d2} = 0.125P_{cr2} = 0.125 * 16000 = 2000 \quad (5.107)$$

$$K_{d1} = K_{p1}T_{d1} = 19.8 * 1000 = 19800 \quad (5.108)$$

$$K_{d2} = K_{p2}T_{d2} = 34.8 * 2000 = 69600 \quad (5.109)$$

PID integral katsayısı ve integral zaman sabitini hesaplayacak olursak,

$$\frac{1}{T_{i1}} = \frac{1}{0.5P_{cr1}} = \frac{1}{0.5 * 8000} = 0.00025 \quad (5.110)$$

$$\frac{1}{T_{i2}} = \frac{1}{0.5P_{cr2}} = \frac{1}{0.5 * 8000} = 0.000125 \quad (5.111)$$

$$K_{i1} = \frac{K_{p1}}{T_{i1}} = 19.8 * 0.00025 = 0.00495 \quad (5.112)$$

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_{i2}} = 34.8 * 0.000125 = 0.00435 \quad (5.113)$$

1. ve 2. uzuvun denetimi için yukarıda hesaplanan PID katsayılarını denklem 5.96 ve 5.97'de yerine yazdığımızda denklem 5.114, 5.115, 5.116 ve 5.117'de verilen PID kontrolörleri elde edilmiştir.

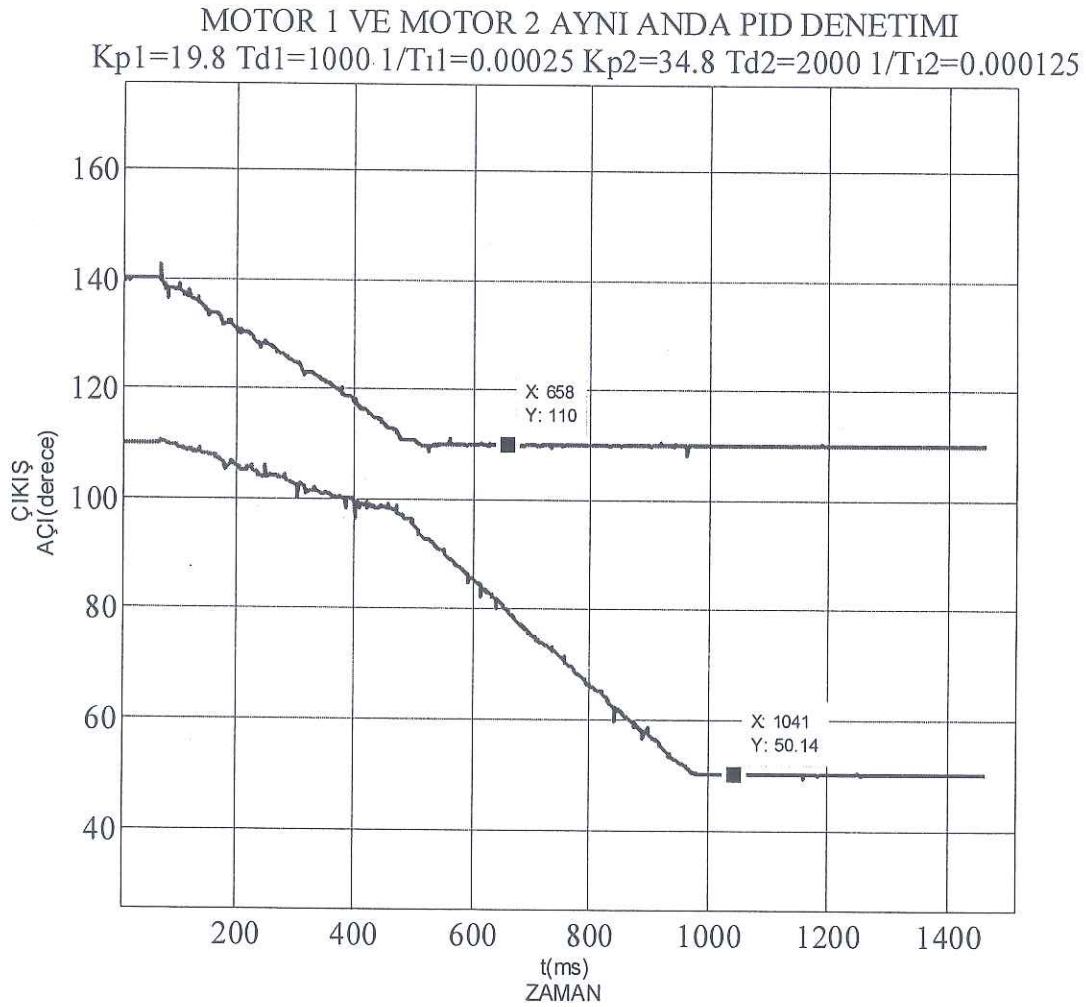
$$G_{c1}(S) = 19.8 + \frac{0.00495}{S} + 19800S = 19.8 \left(1 + \frac{0.00025}{S} + 1000S \right) \quad (5.114)$$

$$G_{c2}(S) = 34.8 + \frac{0.00435}{S} + 69600S = 34.8 \left(1 + \frac{0.000125}{S} + 2000S \right) \quad (5.115)$$

$$G_{c1}(S) = 0,075K_{cr1}P_{cr1} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr1}} \right)^2}{S} = 19800 \frac{(S + 0.0005)^2}{S} \quad (5.116)$$

$$G_{c2}(S) = 0,075K_{cr2}P_{cr2} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr2}}\right)^2}{S} = 34800 \frac{(S + 0.00025)^2}{S} \quad (5.117)$$

Serpent 1 Scara robotunun 1 ve 2 numaralı uzuvlarını, yukarıda hesaplanmış PID'ler ile denetimi sonucunda Şekil 5.21'de gösterilen tepki grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.21 Uzuv 1 ve 2'in PID denetimi

Bu denetimde referans girişler birinci uzuv için 110° ve ikinci uzuv için 50° olarak girilmiş ve kalıcı durumda birinci uzuv için 0° ve ikinci uzuv için 0.14° kalıcı durum hatası meydana gelmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Toplamda 6 bölümden oluşan bu çalışmanın amacı, Feedback firması tarafından 1985 yılında imal edilmiş olan Serpent 1 modelindeki SCARA robotunu açık mimari ile kontrol etmek ve daha sonra geliştirilecek kontrol algoritmaları için hazır bir düzenek oluşturmaktır. Gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiş olan bu kontrol çalışmasında laboratuvarımızda mevcut olan Serpent 1 Scara robot iskeleti ve motorları, Matlab&Simulink yazılım ve tasarım ortamı, Arduino Mega 2560 sayısal denetim kartı ve DC Motor Sürücü devresi kullanılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümün giriş mahiyetinde olup, Scara robot çalışmaları hakkında literatür araştırma sonuçları paylaşılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, Serpent 1 Scara robotunun detaylı tanıtımı yapılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, Serpent 1 Scara robotunun düz kinematiği, ters kinematiği ve Lagrange yöntemine göre çıkarılmış matematiksel dinamik modeli verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, Matlab&Simulink tasarım ve yazılım ortamı hakkında, Arduino Mega 2560 sayısal denetim kartı hakkında ve kapalı döngü denetim blok şeması hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, Ziegler-Nichols yöntemi anlatılmış ve Serpent 1 robotu üzerinde uygulaması gösterilmiş ve gerçek zamanlı olarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir.

Çalışmada sonunda, Ziegler-Nichols yönteminin PID katsayılarının deneysel olarak ayarlanmasında ne kadar başarılı olduğu görülmüştür. Yukarıda da bahsedildiği üzere bu yöntem sadece PID katsayılarının aranmaya başlanacağı noktayı belirtmiştir. Daha iyi performans değerlerini veren PID katsayıları bu noktadan başlanarak aranmıştır. PID kendi doğası gereği kapalı döngü transfer fonksiyonuna negatif reel eksen üzerinde iki sıfır ve orjinde de bir kutup eklemektedir. Katsayılar aranırken kullandığımız yöntem eklenen sıfırların baskın kapalı döngü kutuplar üzerindeki etkinliğini arttırmak ve sistem davranışını istediğimiz performans değerlerine getirmektir. Bir diğer deyişle amaç baskın kapalı döngü kutupların bitiş noktasını sistemin sonuzdaki sıfırlarında değil eklediğimiz sıfırlarda gerçekleştirmektir. Bu nedenle Ziegler-Nichols ile bulduğumuz sıfır konumları orjine doğru yaklaştırılması durumunda anlamlı gelişmeler yaşanmıştır.

Her iki uzvun aynı anda hareketinin denetlendiği çalışmalar neticesinde bir numaralı motor için $S=-0.002$ sıfır konumuna sahip PID ile yapılan denetimde kalıcı durum hatası sıfırlanırken iki numaralı motor için $S=-0,0005$ sıfır konumlarına sahip PID ile yapılan denetimde kalıcı durum hatası 0.1° bulunmuş ve bu motor için kalıcı durum hatasını dahada azaltmak için sıfırımızı orjine biraz daha yaklaştırarak $S=-0.00025$ sıfır konumuna

sahip PID ile yapılan denetimde kalıcı durum hatası 0.14° olarak bulunmuştur. Dolayısıyla iki numaralı motor için sıfır kalıcı durum hatası mümkün olmamış ancak bu motor için en düşük kalıcı durum hatası $S=-0.0005$ sıfır konumlarına sahip PID ile sağlanmıştır.

Robotumuzun eski olması ve birçok mekanik ve elektriksel hataları barındırması nedeniyle daha ileri düzeyde çalışmalarımıza imkan vermemiştir. Ancak, bundan sonraki geliştirilecek kontrol algoritmaları için bir ön düzenek olarak kullanılabileceğini bu çalışma göstermiştir.

8. KAYNAKLAR

1. **SCHILLING, R.J.**, 1990. Fundamentals Of Robotics Analysis And Control, Prentice Hall, New Jersey
2. **Demirci A.E.**, 2013. Scara robot tasarım ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir.
3. **Özkarakoç, M.**, 2009. SCARA robot manipulator ile seçme ve yerleştirme uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir.
4. **Öztürk, S.**, 2007, SCARA tipi robotun yapay sinir ağı ile eğitilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Adapazarı.
5. **Şahin, Y.**, 2006, SCARA Tip Bir Robotun Yörünge Kontrolünde PID Kontrol Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konya.
6. **Soygüder, S.**, 2004, Programlanabilir lojik kontrolör kullanarak PID yöntemi ile bir scara robotun kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
7. **Daş, M.T.**, 2003, SCARA tipi robotun programlanabilir mantık denetleyicisiyle (PLC) hareket denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
8. **Tuncay, Ö.**, 2005, İki eklemlili doğrudan sürülebilir bir robot kolunun denetim algoritmalarının kıyaslamalı değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. **Ertürk, M.**, 1997, Scara tipi robot kolunun hareketlerinin bilgisayar destekli programlarla kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
10. **Yamaçlı, S. ve Canbolat, H.**, 2008, Simulation of a SCARA robot with PD and learning controllers, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **16** 1477-1487.
11. **Er, M.J., ve Lim, M.T., ve Lim, H.S.**, 2001, Real-time hybrid adaptive fuzzy control of a SCARA robot, *Microprocessors and Microsystems*, **25**, 369-378.
12. **Beiner, L.**, 1992, Singularity avoidance for SCARA robots, *Robotics and Autonomous Systems*, **10**, 63-69
13. **Sisir K. Padhy** 1992, On the dynamics of SCARA robot, *Robotics and Autonomous Systems*, **10**, 71-78

14. Ananthraman, S. ve Garg, D.P., 1993, Training backpropagation and CMAC neural networks for control of a SCARA robot, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **6**, 105-115
15. Kang, Z.B., ve Chai, T.Y., ve Oshima, K., ve Yang, J.M., ve Fujii, S., 1997, ROBUST Vibration Control For Scara-Type Robot Manipulators, *Control Engineering Practice*, **5** 907-917
16. Puente, E.A., ve Balaguer, C., Barrientos, A., 1991, Force-torque sensor-based strategy for precise assembly using a SCARA robot *Robotics and Autonomous Systems*, **8**, 203-212
17. Ge, S.S., ve Lee, T.H., ve Gong, J.Q., 1999, TA robust distributed controller of a single-link SCARA \ Cartesian smart materials robot *Mechatronics*, **9**, 65-93
18. Milutinovic, D., ve Milacic, R. 1996, Micro Scara Robot as Universal Adaptive Compliant Wrist, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **45**, 31-34
19. Safaric, R., ve Uran, S., ve Jezernik, K., 1992, Off-Line Identification Estimation Of Parameters For Two D.O.F. Scara Robot, Robot Control 1991 Selected Papers from the 3rd IFAC/IFIP/IMACS Symposium, Vienna, Austria, 16-18 September 1991-1992, Pages 45-50.
20. Jain, R.K., ve Majumder, S., ve Dutta, A., 2013, SCARA based peg-in-hole assembly using compliant IPMC micro gripper, *Robotics and Autonomous Systems*, **61**, 297-311.
21. Bhatia, P., ve Thirunarayanan, J., ve Dave, N., 1998, An expert system-based design of SCARA robot, *Expert Systems with Applications*, **15**, 99-109.
22. Toyama, K.S., ve Hatae, S., ve Haga, S., ve Kinoshita, N., 1991, Kinematic Calibration of SCARA Robot with Condition Number and Error Map Method, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **40**, 9-12
23. Shing, L.W., ve Loon, N.K., 1992, Experimental and statistical determination of the static position repeatability and a recommended specification for a SCARA robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **9**, 247-253
24. Dragan Milutinović, D. ve Potkonjak, V., 1990, A new concept of the SCARA robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **7**, 337-343
25. Sulzer, J., ve Kovač, I., 2010, Enhancement of positioning accuracy of industrial robots with a reconfigurable fine-positioning module, *Precision Engineering*, **34**, 201-217

26. Er, M.J., ve Low, C.B., ve Nah, K.H., Moo Heng Lim, M.H., ve Ng, S Y., 2002, Real-time implementation of a dynamic fuzzy neural networks controller for a SCARA, *Microprocessors and Microsystems*, 26, 449-461.
27. Milutinovic, D., 1997, Universal compliant device based on SCARA concept *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 13, 319-321.
28. Burton, T.D., 1994, *Introduction to Dynamic Sysytem Analysis*, McGraw-Hill
29. Vu, H.V., Esfandiari, R.S., 1998, *Dynamic Sysytem Modelling and Analysis*, McGraw-Hill
30. D'Souza, A.F., 1984, *Advanced Dynamics Modelling and Analysis*, Prentice Hall
31. Arpçay, C., 2007, Advantech PCL-818HG ile Serpent Robotunun Kontrol Sistemi Tasarımı, İmalatı ve Programlanması, Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği İzmir.
32. Dorf, R.C., 1983, *Robotics and Automated Manufacturing*, Reston, Va
33. Mohan, N., Undeland, T., Robins, W.P., 1995, *Power Electronics*, John Wily & Sons.
34. Ogata, Katsuhiko., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall., 2010
35. WALLİ., *Serpent Manual*, 1993
36. <https://www.arduino.cc>
37. Ogata, Katsuhiko., *System Dynamics*, Prentice Hall., 2003

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı.....: Yener ÇELİKBAĞ
Adres.....: Ataşehir Mah. Gakgoşlar Sok. No:17 Balakgazi Sitesi B Blok Kat:2 Daire:3
Elazığ
Tel.....: 00 90 505 478 20 20
E-Posta.....: yenercelikbag@gmail.com
Üniversite.....: Gazi Üniversitesi
Fakülte : Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Bölüm.....: Elektrik Elektronik Mühendisliği Ankara 2002
İş tecrübesi.....: 2002 K.K. Eğitim Doktrin Komutanlığı Hava Savunma Okul ve Eğitim
Merkez Komutanlığında Alçak İrtifa Hava Savunma Eğitimi 4 ay
2002-2003 Hava Kuvvetleri Komutanlığı 1. Ana Jet Üs Komutanlığı Uçaksavar
Taburu Oerlikon Bölüğünde 35 mm Oerlikon Uçak Savar Topu
Takım Komutanlığı
2003-2006 TEDAŞ Genel Müdürlüğü Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. Etüd ve
Proje Müdürlüğünde Elektrik Elektronik Mühendisi olarak İstanbul
Avrupa yakası Alçak ve Orta Gerilim yatırımları etüd ve proje
çalışmalarını yaptım
2006-2011 Fırat Elektrik Dağıtım A.Ş. Proje Baş Mühendisliği yaptım
2011-2013 AKSA Fırat Elektrik Dağıtım A.Ş. Yatırım Grup Proje Baş
Mühendisliği yaptım
2013 Elazığ İl Tarım, Gıda ve Hayvancılık Müdürlüğü Elektrik Müh.