İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ UZUVLU DÜZLEMSEL ESNEK ROBOT KOL TASARIMI VE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Erdal GENÇ
(503011147)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Ocak 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 6 Şubat 2006

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet KUZUCU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Aydın HIZAL (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Sait YÜCENUR (İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Robot teknolojileri günümüz endüstriyel tesislerinde yoğun biçimde kullanılmaktadır.

Ancak bu robotların kararlı ve hassas çalışabilmeleri için,kolların rijit olması, bu nedenle de kesit atalet momentlerinin büyük olması gerekir. Bu durum kol kütlelerini arttırmakta ve robotlar neredeyse sadece kendi ağırlıklarına ve eylemsizliklerine karşı çalışmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldıracak daha hafif, dolayısıyla daha az enerjiye ihtiyaç duyan robotlar geliştirilmesi fikri ilk olarak 1970'li yılların ortasında gündeme gelmiştir. Bu tez kapsamında daha hafif ve daha az enerjiye ihtiyaç duyacak ve bunu yaparken de hassasiyetten ödün vermeyecek bir esnek robot kol mekanizmasının tasarım, matematik modellenmesi ve kontrolü çalışmaları yapılmıştır.

Yüksek lisans tezi olarak bu konuda çalışmamı bana tavsiye eden, çalışmalarım boyunca bana destek olan ve çözüm bulamadığım noktalarda ilham veren tavsiyelerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet KUZUCU' ya, veri toplama sisteminin kurulumunda desteğini esirgemeyen Y. Doç Dr. Şeniz ERTUĞRUL' a, hayatımın geride bıraktığım kısmında olduğu gibi bu aşamasında da desteklerini esirgemeyen aileme ve çalışmalarımda manevi destekte bulunan dönem arkadaşlarım Araş. Gör. İsmail İlker DELİCE, Özkan ÇELİK, Atilla KILIÇASLAN, Halit İlker ÇARDAKLI ve Kılıç Faruk ÖZEN' e teşekkür ederim

Şubat 2006 Erdal GENÇ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **iv**

TABLO LİSTESİ **v**

ŞEKİL LİSTESİ **vi**

ÖZET **viii**

SUMMARY **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Çalışmanın Amacı ve İçeriği 1

2. KAYNAK TARAMASI **4**

3. MATEMATİK MODEL **9**

3.1 Sürekli Ortam Mekaniği Yaklaşımı – Bernoulli-Euler Kirişi Analizi 9
3.1.1 Kiriş deplasmanları 9
3.1.2 Bernoulli-Euler eşitliği 11
3.1.3 Bernoulli-Euler denkleminin çözümü 12

3.2 Parametre Yoğun,Katı Cisim Modelleme - Sanal Uzuvlar Pasif Eklemler Yöntemi 15
3.2.1 Modelin tanıtılması 15
3.2.2 Serbest cisim diyagramını çizilmesi ve dinamik modelin elde edilmesi 18

4. DENEY DÜZENEĞİ **21**

4.1 Malzeme Seçim Kriterleri 21

4.2 Duyar Elemanları 23

4.3 Tahrik Mekanizması 25

4.4 Bilgisayar Donanımı 26

5. PARAMETRE TANIMLAMA **28**

6. KONTROL ALGORİTMASI **31**

6.1 Benzetim Modelinin Oluşturulması 31

6.2 Kontrol Algoritmasının Tanıtılması 35
6.2.1 Yapay sinir ağları (YSA) 35
6.2.2 YSA' da geriye yayılım algoritması 39
6.2.3 Nöromorfik kontrol yapısı 41

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **45**

KAYNAKLAR **60**

EKLER **62**

ÖZGEÇMİŞ **67**

KISALTMALAR

LQG	: Linear Quadratic Gausian
LED	: Light Emitting Diode
PWM	: Pulse Width Modulation
PRBS	: Pseudo Random Binary Sequence
YSA	: Yapay Sinir Ağı
ÇKYSA	: Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı
GYA	: Geriye Yayılım Algoritma

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Dikdörtgen Kesitlerde η_2 Değeri 23
Tablo 4.2: Motor Teknik Verileri 26
Tablo 6.1: NASTRAN da Oluşturulan Fiziksel Modelin Parametreleri 34

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 : Enine Yükleme İçin, Kirişte Oluşan Deplasman 9
Şekil 3.2 : y(x) Fonksiyonun x=x(0) Noktasındaki Eğriliği 10
Şekil 3.3 : Bernoulli-Euler Kirişi Kesit Serbest Cisim Diyagramı 11
Şekil 3.4 : Sanal Uzuvla Pasif Eklemler Yöntemi Yaklaşımı 16
Şekil 3.5 : Sanal Katı Uzuvlar ve Pasif Eklemlerdeki Yay-Damper Çifti 17
Şekil 3.6 : Uzuv 1.2 için Serbest Cisim Diyagramı 19
Şekil 4.1: Esnek Malzeme Boyutları 21
Şekil 4.2: Yanal Kararlılık Problemi 22
Şekil 4.3: İvme Ölçerlerin Doğrultusu 25
Şekil 4.4: Veri Toplama Giriş/Çıkış Kartı 27
Şekil 5.1: Ucunda Kütle Asılı Esnek Robot Kol 28
Şekil 6.1: NASTRAN Programında Oluşturulan Fiziksel Model 32
Şekil 6.2: Sanal Yay ve Sönüm Elemanları 32
Şekil 6.3: Aktif Eklemlerde Bulunan Motorlar 33
Şekil 6.4: Robot Kolun Ucundaki Kütle 33
Şekil 6.5: NASTRAN ve MATLAB Simulink Beraber Kullanılabilmekte 34
Şekil 6.6: Biyolojik Sinir Hücresi 36
Şekil 6.7: Yapay Sinir Hücresi 37
Şekil 6.8: Bazı Etkinlik Fonksiyonları 37
Şekil 6.9: YSA Tabaka Yapısı 39
Şekil 6.10: ÇKYSA Eğitilmesi 42
Şekil 6.11: ÇKYSA'nın Referans Girişler ile Kontrolör Olarak Kullanılması 43
Şekil 6.12: ÇKYSA**'**nın Referans Giriş ve Çıkış Geri Beslemesi Kullanılması 44
Şekil 7.1: Tek Uzuvlu Robot Kolu için Zengin İçerikli Giriş Sinyali 45
Şekil 7.2: İki Uzuvlu Robot Kolu için Zengin İçerikli Giriş Sinyali 46
Şekil 7.3: Beyaz Gürültü Girişe Karşılık Tek Uzuvlu Esnek Kolun Cevabı 46
Şekil 7.4: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun Sabit Açısal Hızda Yörünge Takibi 47
Şekil 7.5: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kol İçin Açısal Referans Yörünge 48
Şekil 7.6: Tek uzuvlu esnek robot kolun durum geri beslemesiz referans takibi 49
Şekil 7.7: Tek uzuvlu esnek robot kolun durum geri beslemeli referans takibi 49
Şekil 7.8: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=2s İçin Yörünge Takibi 50
Şekil 7.9: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=4s İçin Yörünge Takibi 50
Şekil 7.10: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=6s İçin Yörünge Takibi 51
Şekil 7.11: İki uzuvlu esnek robot kolun t=4s için yörünge takibi 52
Şekil 7.12: İki uzuvlu esnek robot kolun t=6s için yörünge takibi 53
Şekil 7.13: İki uzuvlu esnek robot kolun t=8s için yörünge takibi 54
Şekil 7.14: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=2s İçin Yörünge Takibi 55
Şekil 7.15: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=3s İçin Yörünge Takibi 56
Şekil 7.16: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=4s İçin Yörünge Takibi 57
Şekil 7.17: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=5s İçin Yörünge Takibi 58

Şekil B.1: Uzuv 1.1 Serbest Cisim Diyagramı 63
Şekil B.2: Uzuv 1.2 Serbest Cisim Diyagramı 64
Şekil B.3: Uzuv 1.3 Serbest Cisim Diyagramı 64
Şekil B.4: Uzuv 2.1 Serbest Cisim Diyagramı 65
Şekil B.5: Uzuv 2.2 Serbest Cisim Diyagramı 65
Şekil B.6: Uzuv 2.3 Serbest Cisim Diyagramı 66

İKİ UZUVLU DÜZLEMSEL ESNEK ROBOT KOL TASARIMI VE KONTROLÜ

ÖZET

Robotik sistemler, özellikle gelişmiş olan fabrika üretim hatlarında, insanların yapması gereken tekrarlı işlerde insan yerine, verilen görevi hatasız olarak yerine getirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Günümüzde robotların kullanılması seri üretim yapan işletmelerde neredeyse vazgeçilmez bir hal almıştır. Kimi fabrikalarda insanlar, sadece robotların çalışmasını denetlemektedir. Ancak büyük ve hantal yapılarından dolayı günümüz robotları fazlaca yere ve enerjiye ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca örneğin uzayda çalışması öngörülen uzun robotik kolların uç noktalarında meydana gelen deplasmanlar hassas çalışmalarında sorun yaratmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sorunlardan dolayı, hantal ve büyük robotlar yerine hafif ve hızlı çalışabilecek robotların imalatı fikri ortaya atılmıştır. Bununla birlikte eski nesil büyük robotlar, yapılarının getirdiği büyük kesit atalet momentleri değerlerinden dolayı rijit olarak çalışabilmekte ve sadece motor düzeyinde yapılacak ölçümler ve kontroller, robot kolun kumanda edilmesi için yeterli olmaktadır. Ancak bu durumda da bu büyüklükteki bir robot kolu hareket ettirebilmek için büyük tahrik mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Hafif olacak robot kollarda ortaya çıkan en büyük sorun esneklikten doğan ve kontrol edilemeyen kol ucu sapmaları ve titreşim sorunlarıdır. Eğer uç noktanın kontrolü yapılabilirse, elde ettiğimiz sistem daha ağır yükleri taşıyabilecek ve bunun için daha az enerjiye ihtiyaç duyacaktır.

Esneklik probleminin çözümü için, kol matematik modelinin hassas olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada daha önce kullanılan modelleme yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve temel olarak "Sanal uzuvla, pasif eklemler" yöntemi kullanılarak sistem modellenmesi ve kontrolü çalışması yapılmıştır.

TWO LINK PLANAR FLEXIBLE MANIPULATOR DESIGN AND CONTROL

SUMMARY

Robotic systems are used, especially on modern factories' production lines, for substituting humans that must complete repetitive tasks and for perfectly accomplishing a given task.

Today, use of robots in mass production plants is indispensable. In some factories, operators only check the proper operation of robots. However, robots of today need a considerable amount of working area and energy because of their huge and cumbersome constructions. Also, as it is the case for a long robotic arm that is supposed to operate in space, displacements of the end point of the arm cause problems for accurate operation.

As a result of the mentioned problems, idea of constructing light and fast robots instead of cumbersome and heavy ones is proposed. Nevertheless, old generation huge robots are able to work rigidly due to high sectional moment of inertia values caused by their construction and measurements and controls concerning only the motors are sufficient for controlling the robot arm. On the other hand, in order to actuate such a huge robot arm, powerful driving mechanisms are needed.

The most important problem arising for the light robot arms is the uncontrollable arm end point deviations and vibration problems originating from flexibility. If the end point is controlled, the system will be able to carry heavier loads and will need less energy for this.

Precise mathematical model of the arm is required to solve the flexibility problem. In this study, information on modeling approaches that have been used is given. Modeling and control of the system, mainly based on "virtual links, passive joints" method, is studied.

1. GİRİŞ

Günümüz robotlarının kararlı ve sorunsuz olarak üretim hatlarında çalışmalarının yanında büyük ve hantal yapılarının gerektirdiği geniş çalışma alanları ve yüksek enerji ihtiyaçları araştırmacıları başka yöntemler geliştirmeye zorlamıştır.

Ortaya atılan fikir daha hafif ve daha az enerji harcayan, bunun yanında faydalı yük/ağırlık oranları yüksek, kendi ağırlığına yakın ağırlıkta yükleri taşıyabilen robot kolların tasarımı olmuştur.

Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan robotlar, rijit olarak çalışabilmeleri için kesit atalet momenti değerler yüksek olacak şekilde tasarlanmakta bu da robotları ağır ve hantal kılmaktadır. Bu robotlarda motor seviyesinde yapılacak ölçümler ve kontrol robot kolun sorunsuz çalışması konusunda yeterli olmaktadır. Yapılması düşünülen hafif robotlar düşük kesit atalet momenti değerlerinden dolayı uç noktada yüksek deplasmanlara sebep olmakta ayrıca yapısal titreşimlerin kontrolü gerekmektedir.

İyi bir matematik model ve etkili bir kontrol algoritması ile bu sistem kontrol edilebilirse, faydalı yük/ağırlık oranı yüksek, kendi ağırlığına yakın ağırlıktaki yükleri taşıyabilecek ve/veya uzun kollu robotların tasarımı yapılabilecektir.

1.1 Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı yakın geçmişte bir ihtiyaç olarak ortaya atılmış olan esnek robot kolların modellenmesi, tasarımı ve kontrolü problemini, daha önce yapılmış olan çalışmaların ışığında çözüme kavuşturmaktır.

Bu tez kapsamında, düzlemsel hareket eden iki uzuvlu esnek bir robot kol mekanizmasının matematik modelinin oluşturulması, deneysel çalışmada kullanmak amacıyla bu mekanizmanın tasarımının yapılması ve son olarak ta uygulanacak bir kontrol algoritmasının geliştirilmesi ve bilgisayar ortamında elde edilmiş deney

düzeneğini temsil eden modele uygulanarak sonuçların irdelenmesi çalışmaları yapılmıştır. İlerideki bölümlerin içeriği şu şekildedir.

İkinci bölümde esnek robot kolların modellenmesi ve kontrolü ile ilgili olarak daha önce yapılmış olan çalışmaların bir taraması yapılmıştır. Bu bölümde de görülebileceği gibi çoğu mekanik titreşimler alanında araştırmacı olan yazarlar çok farklı mekanizmalardaki araştırmalarını genellikle deneysel olarak gerçekleştirmiş ve kabul edilebilir sonuçlar elde etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda kullanılan mekanizmaları şu şekilde sınıflandırmak mümkündür.

- Tek uzuvlu düzlemsel esnek robot kollar: En basit hal olarak ortaya çıkmaktadır. Genellikle Timoshenko çubuğu olarak adlandırılan sistemin modellenmesi ve kontrolü yapılmaktadır.
- İki uzuvlu birincisi rijit ikincisi esnek düzlemsel robot kollar: Bu hal için bir önceki durumdan farklı olarak esnek olan robot kolun modellenmesi aşamasında, sınır şartlarının dinamik olmasından kaynaklanan sorunlar ortaya çıkmakta ve bu sorunların çözümü irdelenmektedir. Ancak ilk kol katı olduğundan nispeten daha kolay bir modelleme ve kontrol süreci ortaya çıkmaktadır.
- İki esnek uzuvlu düzlemsel robot kollar: Bu durumda her iki uzuv da esnek olduğundan oldukça karışık bir modelleme süreci ortaya çıkmakta ayrıca dinamik sınır şartlarının gerçek zamanlı hesaplanması ve kontrolü problemi ortaya çıkmaktadır.

Üçüncü bölümde esnek robot kolların modellenmesi için önerilmiş matematik modelleme yöntemlerinden bahsedilmiş ve bu tez kapsamında kullanılacak matematik modelin elde edilişi ayrıntısı ile verilmiştir. Bu kapsamda önce Sürekli Ortam Mekaniği yaklaşımı ile, kısmi diferansiyel denklem yöntemi olarak adlandırılan ve sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjisini kullanarak "Lagrangian" yöntemi ile hareket denklemini elde eden yöntemden bahsedilmiştir. İkinci olarak Parametre Yoğun Katı Cisim Modelleme yaklaşımının bir örneği olan "Sanal uzuvlar, pasif eklemler" yöntemi ile ilgili tanımlamalar yapılmış, model tanıtılarak neden bu yöntemin seçildiği anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde deneysel düzeneğin tanıtılması yapılarak, tasarım sırasında esas alınan ölçütler ve malzeme seçimi anlatılmıştır. Ayrıca ölçüm ve kontrol amaçlı kullanılacak sensör ve motorların seçimi hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde Sistem parametrelerinin ve model parametrelerinin hesaplanmasına ilişkin yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Bu aşamadan sonra esnek robot kol mekanizması artık çok uzuvlu bir "Scara" tipi robot kol niteliğini kazanmış, dinamik davranış modeli oluşturulmuştur.

Altıncı bölümde en iyi sonucu verecek kontrol algoritması için önermelerle birlikte bilgisayar ortamında geliştirilmiş model kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları irdelenmiştir. Kullanılan kontrol algoritması bu bölümde ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Yedinci bölümde deney şartları hakkında bilgiler verilmiş, deney sonuçları yorumlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ve öneriler sekizinci bölümde sunulmuştur.

2. KAYNAK TARAMASI

Esnek robot kolların mekanik modellerinin çıkarılması ve çeşitli donanımlardaki robot kolları için kontrol yöntemlerinin uygulanması ile ilgili oldukça geniş kaynak bulmak mümkündür. Ayrıca deneysel amaçlı çalışmalar için yapılacak olan deney düzeneğinin hazırlanması ile ilgili çalışmalar bulmakta mümkündür.

J. M. Martins ve arkadaşları 2003 yılında yayınlanan makalelerinde, bu tarihe kadar yapılmış olan modelleme çalışmalarının genel yapılarını tek bir makale altında toplamış ve kıyaslama yapmıştır. Bu çalışmada daha önce yapılmış olan fazlaca sayıdaki matematik modelleme yöntemleri iki ana grup altında toplanmıştır. Bunlar "Öngörülmüş Modlar Yöntemi" ve "Sonlu Elemanlar Yöntemleridir". "Öngörülmüş Modlar Yöntemi", sistemin dinamik karakterini bulabilmek için yaklaşık titreşim modlarını hesaba katarak, elde edilmiş kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlerini bulmaya çalışır. Bunu yapabilmek için de robot kolun deplasmanı kullanılır. Bu yöntem, deneysel sonuçlarda genellikle tatmin edici cevaplar vermiştir. "Sonlu Elemanlar Yönteminde" ise sistemin yapısını karakterize edebilecek çok fazla sayıda küçük, şekli belirli rijit eleman kullanılarak sistemin çözümlemesi yapılmaktadır. Simülasyon ve kontrol amaçlı kullanılacak modelin güvenilir olduğunu söyleyebilmek için, modelin geçerliliğinin test edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan biri zaman domeninde gerçekleştirilen ve verilen bir giriş sinyalinin cevabının zamana göre değişimin incelenmesi ile yapılan geçerlilik testi işlemidir. Diğeri de frekans domeninde gerçekleştirilen ve sistemin doğal frekanslarını içeren cevaplardan elde edilen geçerlilik testidir **(Martins ve diğerleri, 2003).**

Öngörülmüş modlar yöntemi kullanılarak yapılacak olan modelleme işleminde en önemli parametreler, sistemde kullanılacak doğal frekanslardır. Yapılan araştırmalara göre çubuklarda meydana gelen titreşimler sonucu oluşan deplasmanların, ki bunlar her bir titreşim modunda meydana gelen deplasmanların toplamıdır, hesaplanmasında üç doğal titreşim modunun hesaba katılması yeterli olmaktadır. Daha fazla sayıda titreşim modu hesap yükünü arttıracaktır **(Hughes, 1987).**

Esnek robot deney düzeneğinin hazırlanması ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda, dikkat çekilen hususlardan biri, özellikle robotun izleyeceği yörünge de hesaba katılarak ihtiyaç duyulan motorun dönme momenti değerinin hesaplanmasıdır. Bir diğeri kullanılacak kontrol yasasının ihtiyaç duyduğu ölçüm elemanları ve bunların hassasiyetinin belirlenmesidir. Son olarak alınan ölçüm değerlerinin ve sisteme uygulanacak kontrol girişinin düzenlenebilmesi amacıyla kullanılacak güçlendiricilerin ve elektronik donanımın seçiminin yapılmasıdır **(Tokhi ve Azad, 1996)**.

Esnek robot kolların modellenmesi ile ilgili çalışmalarda öncelikle tek uzuvlu esnek robot kolların modellenmesi problemi üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmalardan birinde tek uzuvlu esnek robot kol için doğrusal durum uzay dinamik modeli elde edilmiştir. **(Hasting ve Book, 1986).** Başka bir çalışmada da Timoshenko çubuğunun titreşiminin matematik modellenmesi problemi, Timoshenko teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada farklı olarak iç ve dış sönüm etkileri de modellemede kullanılmıştır **(Sooraksa ve Chen, 1996).**

Tek uzuvlu esnek robot kolların modellenmesi problemine getirilen çözüm önerilerinden sonra yapılan başka bir çalışmada da en basit durum olan tek uzuvlu esnek robot kol için basit bir kontrol kanunu geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde sistemin gürbüz kontrolü için önce model oluşturulması ve ardından da **LQG** kontrol tekniği uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır **(Chaichanavong ve Banjerdpongchai, 1999).**

İki uzuvlu esnek robotların modellenmesi ve kontrolü söz konusu olduğunda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri eklem sayısı arttığı için sınır şartlarının dinamik olarak değişmesi ve gerçek zamanda kontrol yapılmak istendiğinde hesap yükünü arttırmasıdır. Bu konu ile ilgili yapılmış bir çalışmada doğrusal olmayan kesin matematik modelle birlikte, analiz ve kontrol amaçlı yaklaşık model de elde edilmiştir **(Nicosia ve diğerleri, 1996).** Başka bir çalışmada ise iki uzuvlu esnek robot kol için doğrusal matematik model elde edilmiş, deney düzeneğinde kullanılan ölçüm elemanları ile tahrik birimleri hakkında bilgi verilmiş ve de kontrolör tasarımı ile ilgili tasarım ölçütü tanımlanmıştır **(Jen ve diğerleri, 1996).**

İki uzuvlu esnek robot kollar ile ilgili yukarıda belirtilen çalışmalarda modelleme yöntemi olarak kısmi diferansiyel denklem takımları kurulmuş ve bu denklemlerin çözümleri yoluyla sonuçlar elde edilmiştir. Başka bir modelleme yöntemi ise sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntemde esnek robot kol çok sayıda ve küçük rijit uzuvların toplamı olarak modellenmektedir. Denklemin elde edilmesinde Newton-Euler yöntemi kullanılmıştır **(Gamarra-Rosado ve Yuhara, 1999).**

Buraya kadar anlatılan yöntemler matematik modelin oluşturulması anlamında çok başarılı sonuçlar vermişlerdir ancak her iki yöntemin de kendi içlerinde kullanışlı olmayan yönleri vardır. Sürekli Ortam Mekaniği yaklaşımı yönteminde dinamik davranış denklemleri kapalı yapıda olduğundan hangi kuvvetlerin tam olarak hangi etkileri doğurduğu irdelenememektedir.. Ayrıca sınır şartları dinamik olarak değiştiği için hesaplama zorlukları ve fazladan işlem yükü getirmektedir. Benzer şekilde sonlu elemanlar yönteminde de esas olarak Newton-Euler yöntemi kullanılmakla birlikte seçilecek olan eleman sayısının çok fazla olması aynı şekilde hesaplama yükü sorunu yaratmaktadır. Bahsedilen bu iki yöntem yerine ortaya başka bir fikir atılmıştır. Eğer esnek robot kol uzuvları üzerindeki esnekliği, sanal katı linkler ve bunları birbirine bağlayan pasif yay damper çiftleri kullanarak modelleyen bir yöntemle ifade edebilirsek sistemimiz hem modelleme hem de kontrol açısından alışılagelmiş katı robot kollarından farksız olacaktır. **Yoshikawa ve Hosada (1991)** ilk defa ortaya attıkları fikirlerini "Sanal rijit uzuvlar, pasif eklemler" olarak nitelendirmişlerdir. Temel olarak yöntem bir adet esnek uzvu, iki veya üç gibi az sayıda sanal rijit uzvun bileşkesi gibi kabul etmektedirler. Sanal rijit uzuvların birleşim noktalarında da pasif eklemler bulunmaktadır. Pasif eklemlerde iki sanal uzuv birbirine, sanal yay ve sanal damperlerle bağlıdır. Aynı şekilde aktif eklemlerdeki motor yataklarındaki sürtünmeyi de hesaba katmak için, aktif eklemlerde de sanal yay ve sönüm elemanlarının olduğu kabul edilmiştir. Böylece seçilecek olan uygun yay ve sönüm katsayıları ile sistemdeki esneklik modellenebilecektir. Esasında geliştirilen yöntem sonlu elemanlar yönteminden türetilmiştir diyebiliriz. Daha sonra matematik modelin oluşturulması aşamasında da, her bir sanal uzvun serbest cisim diyagramlarının çizilip, kuvvet ve moment eşitlik denklemlerinin yazılması ile hareket denklemi elde edilmiş olacaktır. Ancak yapılan bu çalışmanın deneysel sonuçlarının incelenmesi kısmında analitik olarak sönüm katsayısının hesabı kullanılmadığı için yaklaşık olarak dinamik karakteristiği nasıl etkilediği tespit edilememiştir. Ayrıca yapılan

çalışmada sadece matematik model oluşturulması işlemi yapılmış, kontrol algoritması hakkında bilgi verilmemiştir **(Yoshikawa ve Hosada, 1991).**

Ortaya atılmış olan Sanal uzuvlar, pasif eklemler yöntemi ile ilgili olarak daha sonraları yapılan çalışmalarda, deneysel çalışmalarla ilgili yöntem ve gözlemlere yer verilmiştir. Kısmi diferansiyel denklemler kullanarak sistem modellenmesi, dinamik davranışı basit şekilli çubuklar için oldukça hassas olarak vermektedir. Ancak çok uzuvlu sistemler söz konusu olduğunda, karmaşık sınır şartları sebebiyle çözüm elde etmek zorlaşmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise çok fazla sayıda eleman kullanarak dinamik karakteri hassas olarak ifade edebilmektedir. Bu da hesaplama yükünü arttırmaktadır. Sanal uzuvlar, pasif eklemler yöntemi ise çok fazla hassas olmayan bir dinamik hareket denklemi vermektedir. Ancak gerçek zamanda kontrol uygulamalarında ve kuvvetlerin yarattığı etkinin irdelenmesi bakımından kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Bu çalışmalarda yay ve sönüm katsayılarının hesaplanması için sistem tanımlama prosedürü hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca sistemin statik ve dinamik karakterlerinin, parametrik olarak nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır. Deneysel çalışma düzeneği ve sonuçları da irdelenmiştir. **(Yoshikawa ve Matsudera, 1994)**.

Ortaya atılmış bu yeni fikrin etkili olarak kullanılabilmesi için modelleme içerisinde kullanılmış parametrelerin ayrıntılı ve hassas olarak tanımlanabilmesi gerektiğnden bahsedilmişti. Modelleme yönteminde esnek robot kolu modellemek için sanal uzuvlardan ve sanal yay-damper çiftlerinden faydalanılmıştı. Dolayısı ile olmadığı halde modellemede kullandığımız bu bileşenlerin tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca matematik model sanal uzuvlar düzeyinde olduğu için, modelde kullanılan açı, açısal hız ve açısal ivme gibi değerlerinden ölçülmesi gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için ya yeni bir ölçüm yöntemi geliştirilmelidir ya da var olan ölçümler ile sanal uzuvlardaki değişimler arasında bir ilişki bulunmalıdır. Yapılmış olan çalışmalarda öncelikle model parametrelerinin tanımlanması görevi yapılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla esnek robot kolu üzerine belirli aralıklarla görsel sensörler yerleştirilmiştir ve sistem tahrik edilerek esnek kolun davranış verileri toplanmıştır. Daha sonra görüntü işleme yöntemleri kullanılarak bu görsel sensörlerin pozisyonları her bir örnek zaman aralığı için kaydedilmiştir. Parametre tanımlama yöntemi olarak en küçük kareler yönteminden faydalanılmıştır. Ayrıca sanal uzuvların boylarının ve diğer parametrelerin tayini için de bir optimizasyon algoritması önermesi yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda parametrik modelin sonuçları ile gerçek sistemden toplanan verilerin karşılaştırılması, birinci ve ikinci titreşim modları için yapılmış ve sonuçların modelleme çalışmalarında kullanılmasının kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştı. Yapılan bu çalışma da sadece matematik model oluşturulması ve bu modelin parametrelerinin tanımlanması amaçlıdır. Bu makalede kontrol yöntemleri hakkında bilgi verilmemiştir (**Yoshikawa ve diğerleri, 2001).**

3. MATEMATİK MODEL

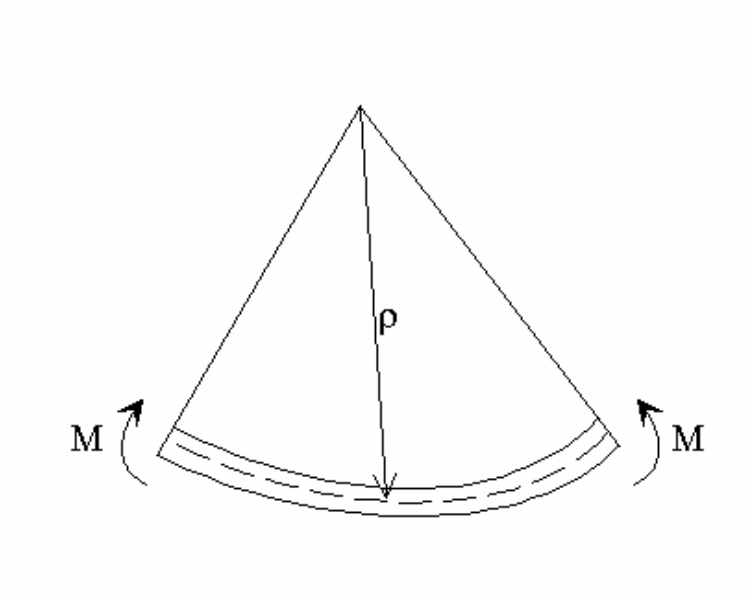
Esnek robot kolların dinamik davranış modellerinin çıkarılması, esnekliğin modellenmesi açısından oldukça zordur. Önerilmiş çeşitli modelleme yöntemlerinin kendi içlerinde avantajları ve dezavantajları da vardır. Çıkarılacak olan matematik model esnek robot kolun dinamiğini hassas olarak ifade edebiliyorsa, üzerine uygulanacak kontrol yöntemleri de aynı ölçüde başarılı olacaktır. Bu bölümde temel olarak iki yöntem üzerinde durulacaktır.

3.1 Sürekli Ortam Mekaniği Yaklaşımı – Bernoulli-Euler Kirişi Analizi

Bu yaklaşımda sürekli ortam mekaniği yaklaşımı yöntemi kullanılarak, basit "Bernoulli-Euler kirişi" için genel tanımlamalar yapılacaktır.

3.1.1 Kiriş deplasmanları

Şekil 3.1 deki enine yükleme durumu için, kirişte oluşan deplasman sonucu kirişin asal ekseni ile olan eğriliğin yarıçapı mukavemetten şu şekilde ifade edilebilir.



Şekil 3.1 : Enine Yükleme İçin, Kirişte Oluşan Deplasman

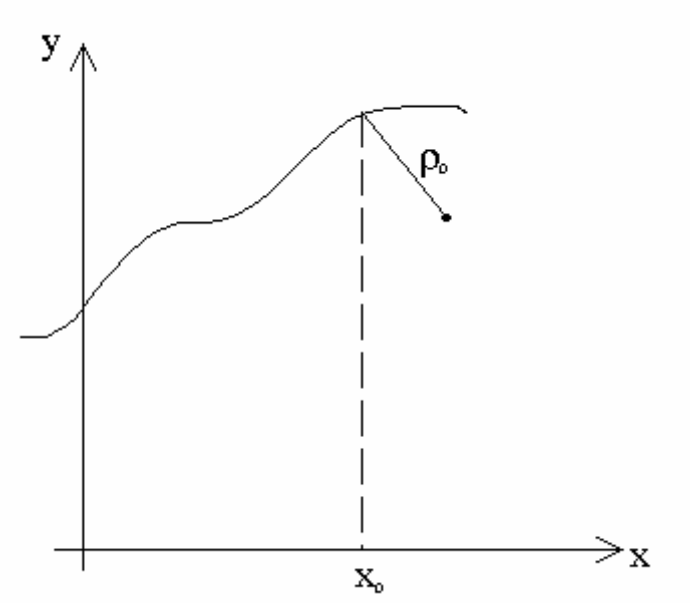
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada "M" dönme momenti, "E" Elastisite modülü, "I" kesit atelet momenti ve ρ eğrilik yarı çapıdır. Matematiksel olarak bir y(x) fonksiyonun $x=x_0$ noktasındaki eğriliği ρ_0 için aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{\left.\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right|_{x=x_0}}{\left[1+\left[\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{x=x_0}\right]^2\right]^{3/2}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

veya herhangi bir x noktası için

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1+\left[\frac{dy}{dx}\right]^2\right]^{3/2}} \qquad \textbf{(3.3)}$$



Şekil 3.2 : y(x) Fonksiyonun x=x(0) Noktasındaki Eğriliği

Kirişteki deplasmanlar ve eğrilikler küçük olacağından [$(dy/dx)<<1$] olacağından [$(dy/dx)^2$] terimi ihmal edilebilir. Dolayısıyla

$$\frac{1}{\rho(x)} \cong \frac{d^2 y}{dx^2} \qquad \textbf{(3.4)}$$

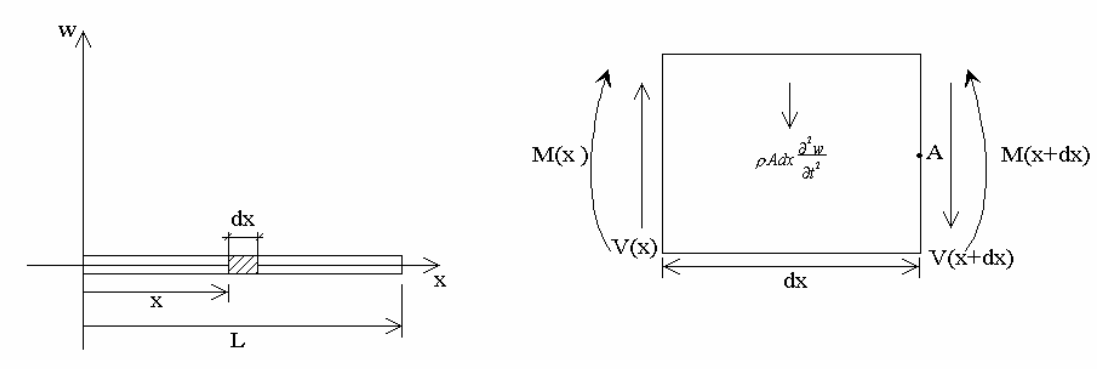
yazılabilir. Burada (3.1) denklemini kullanarak

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E \cdot I} \qquad \textbf{(3.5)}$$

elde edilir.

3.1.2 Bernoulli-Euler eşitliği

Şekil 3-3 teki kiriş için kuvvet ve moment denge denklemlerini yazarsak.



Şekil 3.3 : Bernoulli-Euler Kirişi Kesit Serbest Cisim Diyagramı

$$\Sigma F_w = 0 \Rightarrow V(x) - V(x+dx) - \rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

$$V(x) - \left(V(x) + \frac{\partial V(x)}{\partial x} dx \right) - \rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow -V(x)dx - M(x) + M(x+dx) + \rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \frac{dx}{2} = 0$$

$$-V(x)dx - M(x) + M(x) + \frac{\partial M}{\partial x} dx + \rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \frac{dx}{2} = 0$$

$$V(x) = \frac{\partial M}{\partial x} \qquad \textbf{(3.7)}$$

Denklem (3.7) yi, denklem (3.6) da yerine yazılacak olursa.

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \qquad \textbf{(3.8)}$$

Denklem (3.5) i son bulduğumuz denkleme (3.8) de yerleştirirsek Bernoulli-Euler denklemini elde etmiş oluruz.

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0 \qquad \textbf{(3.9)}$$

Sınır Şartları:

Söz konusu kiriş ile ilgili sınır şartları aşağıdaki gibidir.

1- $w(x,t)\big|_{x=0}=0$ x=0 Noktasında yer değiştirme sıfırdır.

2- $\left.\frac{\partial w(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0}=0$ x=0 Noktasında eğim sıfırdır.

3- $\left.\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\right|_{x=L}=0$ x=L Noktasındaki moment sıfırdır.

4- $\left.\frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3}\right|_{x=L}=0$ x=L Noktasındaki kesme kuvveti sıfırdır.

3.1.3 Bernoulli-Euler denkleminin çözümü

Denklem (3.9) ile elde edilen eşitlik bize "x" ekseni boyunca oluşacak yer değiştirmenin, herhangi bir "t" zamanındaki değerini vermektedir. Yer değiştirme fonksiyonu w(x,t) aynı zamanda biri zamana bağlı bir fonksiyon ile diğeri "x" eksenini fonksiyonu olmak üzere iki fonksiyonun çarpımı olarak ifade edilebilir.

$$w(x,t)=\Phi(x)\cdot q(t) \qquad \textbf{(3.10)}$$

Deplasman fonksiyonunu yeniden ifade ettiğimiz (3.10) numaralı denklemi, denklem (3.9) da yeniden yazarsak.

$$EI\frac{\partial^4(\Phi(\mathrm{x})\mathrm{q(t)})}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2(\Phi(\mathrm{x})\mathrm{q(t)})}{\partial t^2}=0$$

$$EI\mathrm{q(t)}\frac{d^4\Phi(\mathrm{x})}{dx^4}+\rho A\Phi(\mathrm{x})\frac{d^2\mathrm{q(t)}}{dt^2}=0$$

$$\frac{EI}{\rho A\Phi(\mathrm{x})}\frac{d^4\Phi(\mathrm{x})}{dx^4}+\frac{1}{\mathrm{q(t)}}\frac{d^2\mathrm{q(t)}}{dt^2}=0 \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$\mathrm{q(t)}=\mathrm{A}\cdot\cos(\omega\mathrm{t})+\mathrm{B}\cdot\sin(\omega\mathrm{t}) \qquad \textbf{(3.12)}$$

kabulünü yapacak olursak

$$\frac{EI}{\rho A\Phi(\mathrm{x})}\frac{d^4\Phi(\mathrm{x})}{dx^4}=-\frac{1}{\mathrm{q(t)}}\frac{d^2\mathrm{q(t)}}{dt^2}=\omega^2 \qquad \textbf{(3.13)}$$

elde edilecektir. Benzer şekilde

$$\Phi(x)=C_1\cdot\sin(kx)+C_2\cdot\cos(kx)+C_3\cdot\sinh(kx)+C_4\cdot\cosh(kx) \qquad \textbf{(3.14)}$$

olarak yazabiliriz. İlgili denklemi, denklem (3.13) de yerleştirip türev alacak olursak.

$$k=\sqrt{\frac{\rho A}{EI}}\omega^2 \qquad \textbf{(3.15)}$$

bulunacaktır. Daha önce yazmış olduğumuz sınır koşullarını Φ(x) fonksiyonu cinsinden tekrar yazacak olursak.

$$\Phi(x)\big|_{x=0}=0 \qquad \textbf{(3.16a)}$$

$$\left.\frac{d\Phi(x)}{dx}\right|_{x=0}=0 \qquad \textbf{(3.16b)}$$

$$\left.\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2}\right|_{x=L}=0 \qquad \textbf{(3.16c)}$$

$$\left.\frac{d^3\Phi(x)}{dx^3}\right|_{x=L}=0 \qquad \textbf{(3.16d)}$$

elde ettiğimiz sınır koşullarını matris formatında yazacak olursak aşağıdaki formu elde etmiş oluruz.

$$\begin{bmatrix}\Phi(0)\\ \Phi'(0)\\ \Phi''(L)\\ \Phi'''(L)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 1 & 0\\ -\sin(kL) & -\cos(kL) & \sinh(kL) & \cosh(kL)\\ -\cos(kL) & \sin(kL) & \cosh(kL) & \sinh(kL)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_1\\ C_2\\ C_3\\ C_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.17)}$$

Buradan katsayılar şu şekilde bulunur.

$$C_1=-C_3;\ \ C_2=-C_4;\ \ C_3=-\frac{\cos(kL)+\cosh(kL)}{\sin(kL)+\sinh(kL)}C_4=C \qquad \textbf{(3.18)}$$

(3.17) numaralı matris formunu, katsayılar arasında bulmuş olduğumuz ilişkiyi kullanarak tekrar yazacak olursak.

$$\begin{bmatrix}\Phi''(L)\\ \Phi'''(L)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sin(kL)+\sinh(kL) & \cos(kL)+\cosh(kL)\\ \cos(kL)+\cosh(kL) & \sinh(kL)-\sin(kL)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_3\\ C_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.19)}$$

C_3 ve C_4 katsayılarını bulabilmemiz için, (3.19) numaralı matriste bulunan 2x2 lik matrisin determinantının sıfır olması gerekir. Eşitliği yazacak olursak

$$\big(\sinh(kL)+\sin(kL)\big)\big(\sinh(kL)-\sin(kL)\big)=\big(\cosh(kL)+\cos(kL)\big)^2 \qquad \textbf{(3.20)}$$

eşitliğinin sağlanması gerekir.

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1 \qquad \textbf{(3.21a)}$$

ve

$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1 \qquad \textbf{(3.21b)}$$

eşitliklerinden de faydalanarak

$$\cosh(kL)\cos(kL) = -1 \qquad \textbf{(3.21c)}$$

eşitliğini elde ederiz. Bu eşitlik sınır koşullarından da anlaşılabileceği gibi bir ucu mesnetli diğer ucu serbest çubuk için geçerlidir.

Farklı yapılar için bu eşitlik şu şekilde yazılabilir.

$\cosh(kL)\cos(kL) = 1$ İki ucu da serbest kiriş

$\tan(kL) = \tanh(kL)$ Bir ucu sabit, diğer ucu yatayda kayar mesnetli çubuk

(3.21c) numaralı denklemin çözümüne bakıldığında n tane çözüm olduğu görülecektir. Denklemin çözümünü, her bir çözümün toplamı olarak gösterebiliriz. Ayrıca çözüm için aşağıdaki yaklaşık denkliği kullanabiliriz.

$$k_i L \cong \left(i - \frac{1}{2}\right)\pi \qquad \textbf{(3.22)}$$

Yukarıda bulduğumuz eşitlikleri ve aşağıdaki tanımları kullanarak (3.12) ve (3.14) numaralı denklemleri tekrar yazarsak

$$q_i(t) = A \cdot \cos(\omega_i t) + B \cdot \sin(\omega_i t) \qquad \textbf{(3.23)}$$

$$\Phi_i(x) = C\left(\sin(k_i x) - \sinh(k_i x)\right) + C\sigma\left(\cos(k_i x) - \cosh(k_i x)\right) \qquad \textbf{(3.24)}$$

$$C = -\frac{\cos(k_i L) + \cosh(k_i L)}{\sin(k_i L) + \sinh(k_i L)} C_4 = C_3 \qquad \textbf{(3.25)}$$

$$\sigma = -\frac{\sin(k_i L) + \sinh(k_i L)}{\cos(k_i L) + \cosh(k_i L)} \qquad \textbf{(3.26)}$$

$$k_i = \sqrt{\frac{\rho A}{EI}}\omega_i^2 \qquad \textbf{(3.27)}$$

Sonuç olarak Bernoulli-Euler kiriş denklemi denklem (3.23) ve denklem (3.24) ün doğrusal bir kombinasyonu olarak yazılabilir

$$w(x,t) = \sum_{i=2}^{\infty} \Phi_i(x) q_i(t) \qquad \textbf{(3.28)}$$

ω_i çubuğun zorlanmamış salınım frekansı olarak tanımlanır. Benzer şekilde herhangi bir moddaki titreşim frekansı şu şekilde yazılabilir.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \qquad \textbf{(3.29)}$$

$\Phi_i(x)$ fonksiyonu, Modal Şekil Fonksiyonu (Modal Shape Function) olarak adlandırılır ve çubuğun her bir doğal modunun şeklini tanımlar.

(3.28) numaralı denklemi n adet mod için tekrar yazarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz

$$w(x,t) = \sum_{i=2}^{n} \Phi_i(x) q_i(t) \qquad \textbf{(3.30)}$$

3.2 Parametre Yoğun,Katı Cisim Modelleme - Sanal Uzuvlar Pasif Eklemler Yöntemi

Aşağıda Parametre Yoğun Katı Cisim Modelleme Yaklaşımlarının özel bir hali olan Sanal Uzuvlar Pasif Eklemler yöntemi ile ilgili notasyon ve tanımlamalar verilecek sistem dinamiği incelenecektir.

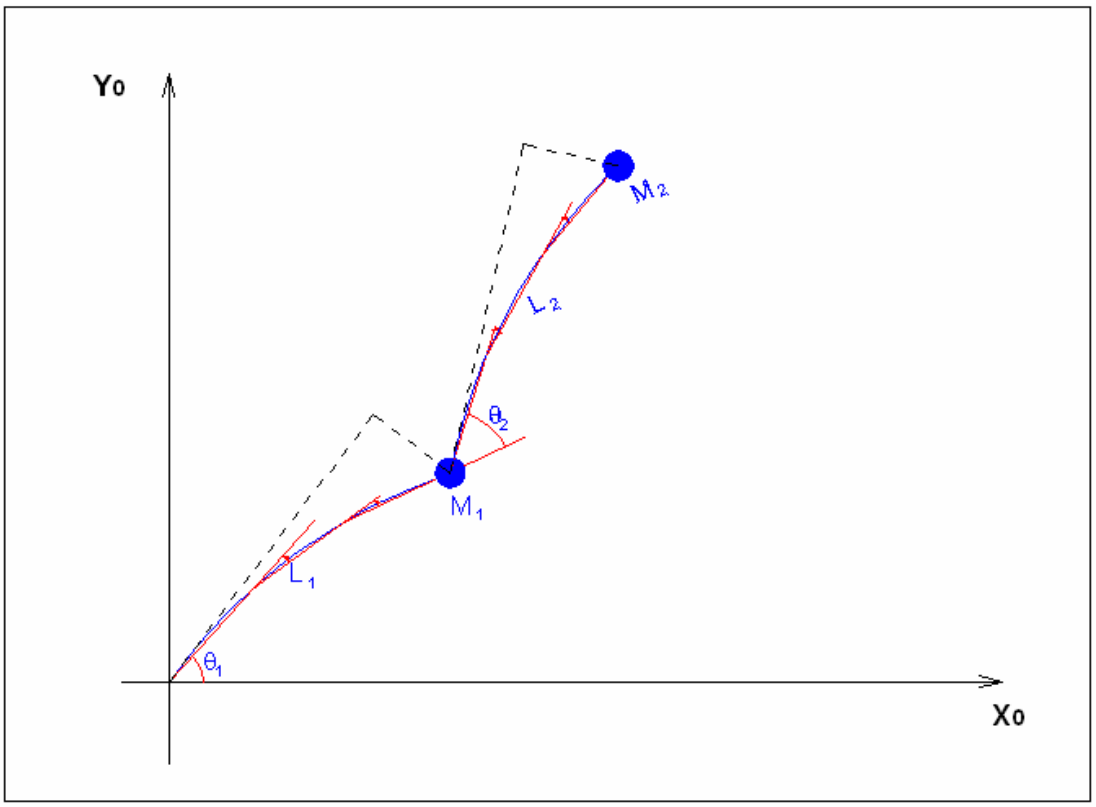
3.2.1 Modelin tanıtılması

Esnek robot kolların dinamiğinin modellenmesi söz konusu olduğunda literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunda iki yöntem öne çıkmaktadır. Birincisi sistemin enerji ifadelerinden yola çıkarak dinamik denklemini bulmaya yarayan "Euler-Lagrange" yöntemi, diğeri de her bir esnek uzvu çok küçük şekli bilinen elemanların toplamı olarak kabul eden ve de dolayısıyla sistem dinamiğini bu küçük uzuvların dinamiklerinin toplamı olarak kabul eden "Sonlu Elemanlar Yöntemi" dir. Ancak her iki yönteminde kendi içlerinde farklı zorlukları vardır. Birinci yöntemde sistemin modellenmesi ve kontrolü aşamalarında, özellikle dinamik değişen sınır şartları sebebiyle analitik zorluklar çıkmaktadır. İkinci yöntem ise fazla sayıda

elemanın dinamiklerinin eşzamanlı olarak hesaplanmasının getirdiği zorlukları içermektedir.

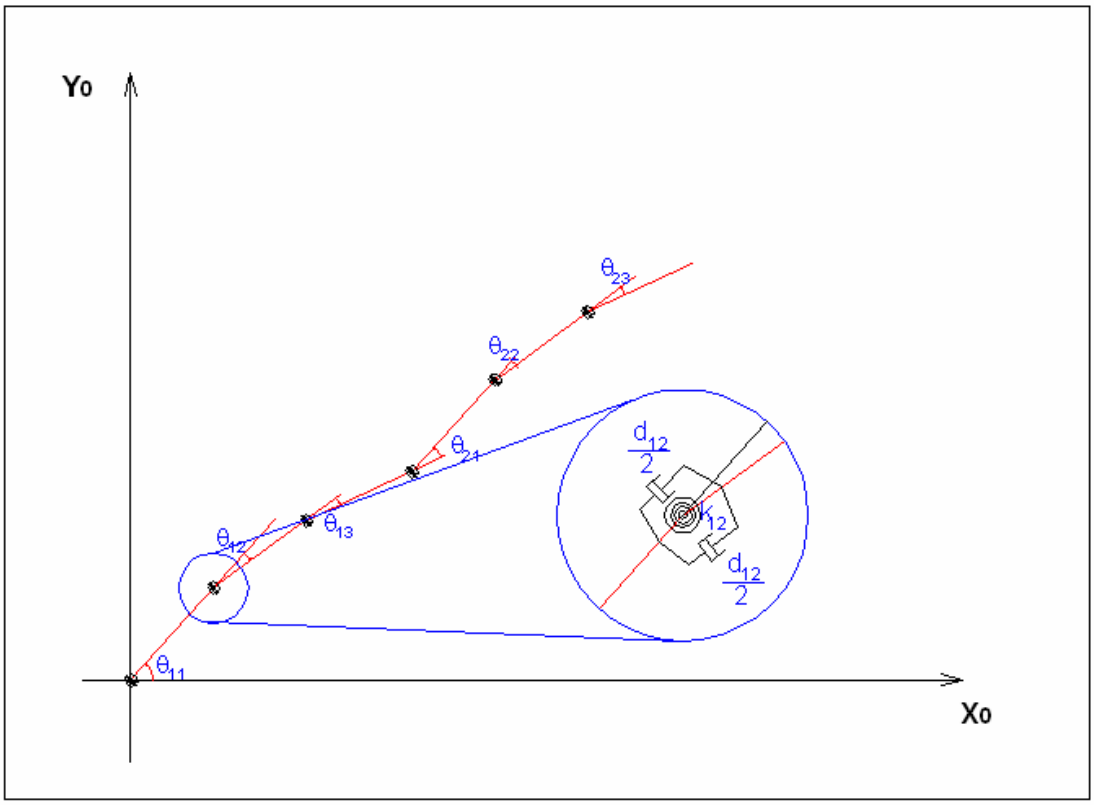
İlk kez **(Yoshikawa ve Hosada, 1991)** tarafından önerilen başka bir yöntem ise, esnek olarak kabul edilen robot kolunun, "sanal" katı uzuvların birbirleri ile "sanal" eklemler ile ve bu eklemlerde yer alan yay ve sönüm elemanları ile bağlanmasını öngören " Sanal Uzuvlar Sanal Eklemler" yöntemidir. Bu yöntemde motorların bağlı olduğu eklemler aktif eklemler olarak adlandırılır. Sanal uzuvları bağlayan sanal eklemlerde burkulma yayı ve dönel sönüm elemanları olduğu varsayımı yapılmıştır.

Her bir esnek uzvun üç adet sanal katı uzuvdan meydana geldiği kabul edilmiştir (Şekil 3.4) . Sistem X_0 Y_0 eksenin oluşturduğu düzlemde, Z_0 ekseni etrafında dönmektedir. Bir numaralı esnek kol, dönme eklemine bağlı ve kolun hareketi ile birlikte dönen X_1 Y_1 Z_1 eksen takımına bağlıdır. Uzunluğu L_1 dir ve ucunda M_1 kütlesi olduğu kabul edilmektedir. Benzer şekilde iki numaralı esnek kol da X_2 Y_2 Z_2 eksen takımına bağlıdır ve uzunluğu L_2, ucunda ki kütle M_2 dir. X_1 ve X_0 arasındaki açı θ_1 ve X_2 ve X_1 arasındaki açı θ_2 dir.



Şekil 3.4 : Sanal Uzuvla Pasif Eklemler Yöntemi Yaklaşımı

Sanal kollar ve eklemlerdeki notasyon da şu şekildedir (Şekil 3.5). Bağlı olduğu eksen takımı X_{ij} Y_{ij} Z_{ij} Kol uzunluğu "l_{ij}" bir önceki eksen takımının X ekseni ile yaptığı açı "θ_{ij}"ve sanal katı eksen ucundaki eklemde bulunan yayın yay katsayısı "k_{ij}" sönüm elemanının sönüm katsayısı "d_{ij}" dir. Burada i=1,2 ve j=1,2,3 tür.



Şekil 3.5 : Sanal Katı Uzuvlar ve Pasif Eklemlerdeki Yay-Damper Çifti

Bundan sonraki hesaplamalarımızda iki uzuvlu düzlemsel esnek robot kol mekanizmasını, altı uzuvlu düzlemsel robot kol mekanizmasıymış gibi kabul edeceğiz. Öncelikle sistemin önemli parametrelerinden biri olan "Jacobian" matrisinin elde edilmesini irdeleyeceğiz.

Altıncı uzvun uç noktasının konumunu, X_0 ve Y_0 eksenleri üzerindeki izdüşümleri ile aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$X_0 = l_{11}Cos\theta_{11} + l_{12}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}) + l_{13}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}) + l_{21}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) + l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) + l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(3.31)}$$

$$Y_0 = l_{11}Sin\theta_{11} + l_{12}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}) + l_{13}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}) + l_{21}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) + l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) + l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(3.32)}$$

Jacobian matrisinin genel yapısı aşağıdaki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{11}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{12}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{13}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{21}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{22}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{23}} \\ \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{11}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{12}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{13}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{21}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{22}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{23}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.33)}$$

Matris içindeki ifadeler EK A da verilmiştir.

Teğetsel hız vektörü ifadesini "Jacobian" kullanarak aşağıdaki şekillerde ifade etmek mümkündür.

$$\dot{p} = J \cdot \dot{\theta} \quad \textbf{(3.34a)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} & \dot{\theta}_{12} & \dot{\theta}_{13} & \dot{\theta}_{21} & \dot{\theta}_{22} & \dot{\theta}_{23} \end{bmatrix}^T \quad \textbf{(3.34b)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{12} \\ J_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{13} \\ J_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{14} \\ J_{24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{15} \\ J_{25} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{16} \\ J_{26} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{23} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.34c)}$$

Teğetsel ivme vektörü ifadesini de "Jacobian" kullanarak aşağıdaki şekillerde ifade etmek mümkündür.

$$\ddot{p} = \dot{J} \cdot \dot{\theta} + J \cdot \ddot{\theta} \quad \textbf{(3.35a)}$$

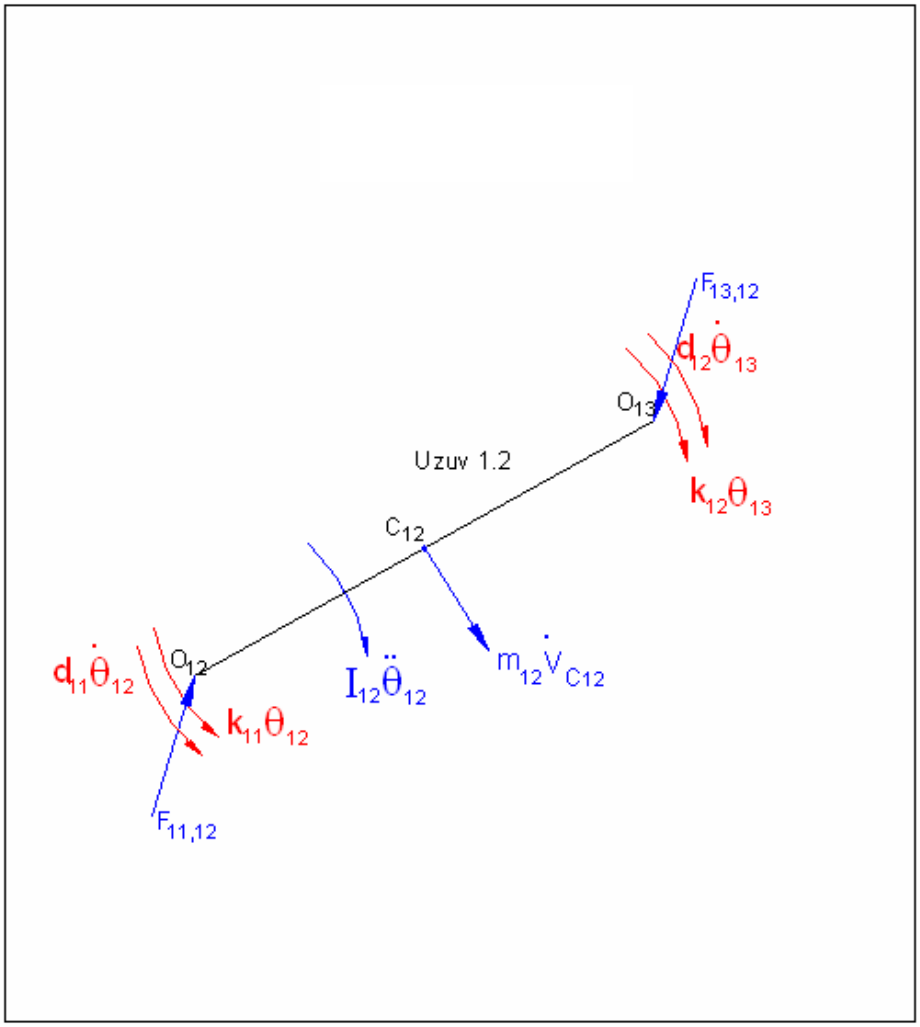
$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{J}_{11} & \dot{J}_{12} & \dot{J}_{13} & \dot{J}_{14} & \dot{J}_{15} & \dot{J}_{16} \\ \dot{J}_{21} & \dot{J}_{22} & \dot{J}_{23} & \dot{J}_{24} & \dot{J}_{25} & \dot{J}_{26} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} & \dot{\theta}_{12} & \dot{\theta}_{13} & \dot{\theta}_{21} & \dot{\theta}_{22} & \dot{\theta}_{23} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{11} & \ddot{\theta}_{12} & \ddot{\theta}_{13} & \ddot{\theta}_{21} & \ddot{\theta}_{22} & \ddot{\theta}_{23} \end{bmatrix}^T \quad \textbf{(3.35b)}$$

Aynı şekilde her bir uzvun uç ve orta noktalarının Jacobian Matrisleri, ilgili noktaların hız ve ivme vektörlerinin bulunması için kullanılabilir.

3.2.2 Serbest cisim diyagramını çizilmesi ve dinamik modelin elde edilmesi

Aşağıda örnek olması açısından bir sanal katı uzuv için serbest cisim diyagramı üzerinde(Şekil 3.6), etkiyen kuvvetler ve momentler gösterilecek ve Newton hareket kanunu kullanılarak sistemin kuvvet ve moment eşitlikleri yazılacaktır. Örnek olarak seçilen 1.2 numaralı uzuv, yani birinci esnek kolun sanal ikinci katı uzvudur. Bu uzuvda, pasif eklemlerde sanal yay ve damperlerin uyguladığı dönme momentleri yer almaktadır. Diğer sanal katı uzuvlarda, farklı olarak aktif eklemlerdeki motorların uyguladığı dönme momentleri ve ayrıca esnek kolların uç kısımlarında yer alan kütlelerin atalet etkileri yer almaktadır.

Uzuv 1.2



Şekil 3.6 : Uzuv 1.2 için Serbest Cisim Diyagramı

Kuvvet ve moment denge denklemleri

$$\sum F = 0 \Rightarrow$$
$$\vec{F}_{11,12} - \vec{F}_{13,12} - m_{12}\dot{\vec{V}}_{C_{12}} = 0 \qquad \textbf{(3.36a)}$$

$$\sum M_{C_{12}} = 0 \Rightarrow$$
$$k_{11}\theta_{12} + d_{11}\dot{\theta}_{12} - k_{12}\theta_{13} - d_{12}\dot{\theta}_{13} - \vec{F}_{11,12} \times \left(\overrightarrow{O_{12}C_{12}}\right) - \vec{F}_{13,12} \times \left(\overrightarrow{O_{13}C_{12}}\right) - \mathrm{I}_{12}\ddot{\theta}_{12} = 0 \qquad \textbf{(3.36b)}$$

Aynı denklemler diğer sanal uzuvlar için de EK B'de yazılmıştır.

Elde etmiş olduğumuz denklemleri matris formatında yazacak olursak

$$\begin{bmatrix} I_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \ddot{\theta}_{13} \\ \ddot{\theta}_{21} \\ \ddot{\theta}_{22} \\ \ddot{\theta}_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d_{11} & d_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{21} & d_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \\ \dot{\theta}_{21} \\ \dot{\theta}_{22} \\ \dot{\theta}_{23} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{21} & k_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \\ \theta_{21} \\ \theta_{22} \\ \theta_{23} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \vec{F}_{0,11} \times \left(\overrightarrow{O_{11}C_{11}}\right) + \vec{F}_{12,11} \times \left(\overrightarrow{O_{12}C_{11}}\right) \\ \vec{F}_{11,12} \times \left(\overrightarrow{O_{12}C_{12}}\right) + \vec{F}_{13,12} \times \left(\overrightarrow{O_{13}C_{12}}\right) \\ \vec{F}_{12,13} \times \left(\overrightarrow{O_{13}C_{13}}\right) + \vec{F}_{21,13} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{13}}\right) \\ \vec{F}_{13,21} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{21}}\right) + \vec{F}_{22,21} \times \left(\overrightarrow{O_{22}C_{21}}\right) \\ \vec{F}_{21,22} \times \left(\overrightarrow{O_{22}C_{22}}\right) + \vec{F}_{23,22} \times \left(\overrightarrow{O_{23}C_{22}}\right) \\ \vec{F}_{22,23} \times \left(\overrightarrow{O_{23}C_{23}}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_1 \dot{\vec{V}}_{O_{21}} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{13}}\right) \\ 0 \\ 0 \\ M_2 \dot{\vec{V}}_{O_3} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{23}}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ -\tau_2 \\ \tau_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.37)}$$

şeklinde yazabiliriz. Doğrusal olmayan dinamik denklemi aşağıdaki şekilde genel formunda da ifade edebiliriz.

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq + f(q, \dot{q}) = \tau \quad \textbf{(3.38)}$$

Burada "M" sistemin atalet matrisi, "D" sönüm katsayıları matrisi, "K" yay katsayılar matrisi, "f" doğrusal olmayan terimleri ve "τ" sisteme motorlar tarafından uygulanan dönme momentlerini göstermektedir.

4. DENEY DÜZENEĞİ

Deneysel çalışma, çıkarılmış olan dinamik davranış modelinin ve kullanılan kontrol algoritmasının doğruluğunun gözlemlenebilmesi için oldukça önemlidir. Bununla birlikte deneysel çalışmada kullanılacak duyar elemanları, malzeme ve tahrik elemanlarının seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca deney düzeneğinin bilgisayar ile kuracağı ara yüz ve elektronik donanım da oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir.

4.1 Malzeme Seçim Kriterleri

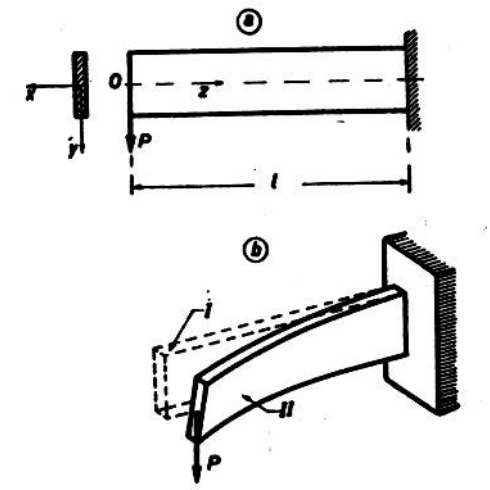
Esnek robot kollar ile ilgili olarak yapılmış olan çalışmalarda temel amaç daha öncede belirttiğimiz gibi hafif ve az enerji tüketen robotik sistemler gerçekleştirmektir. Biz bu çalışmada kullanacağımız malzemeyi seçerken asıl amacımız fark edilebilir esnekliğe sahip bir malzeme seçmenin gerektiğiydi. Kurduğumuz düzenek, dinamik davranış modelinin elde edilmesi ve kontrol algoritmasının uygulamasında basitlik sağlaması amacıyla düzlemsel olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece sadece iki boyutta oluşacak dinamik ve statik kuvvetler ile ilgilenilip, uç nokta sapmaları irdelenmiştir.

Aynı basitliğin titreşim analizinde de oluşması ve fiziksel olarak ta titreşimlerin iki boyutta oluşması ve dönme eksenlerine paralel üçüncü boyuttaki titreşimlerin ihmal edilebilir düzeylerde olması için, yükseklik/en oranı büyük olacak şekilde dikdörtgen kesit seçilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Esnek Malzeme Boyutları

Ancak ince kesitli çubuklarda da "Yanal Kararlılık" sorunu ortaya çıkmaktadır ve malzeme seçerken tasarım kıstası olarak göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 4.2). **(İnan , 1981)** Mustafa İNAN geniş kapsamlı "Cisimlerin Mukavemeti" kitabında "Yanal Kararlılık" tanımını şu şekilde yapmıştır. "Eğilmeye çalışılan kirişlerde kesitin asal atalet momentlerinden biri diğerine göre çok küçük olursa, kirişi eğen yük belirli bir kritik değere ulaşınca, çubuk kendi ekseni etrafında burularak devrilebilir. Bu tip kararlılık problemine yanal tip denir."



Şekil 4.2: Yanal Kararlılık Problemi

"Yanal burkulmada, çubuğun küçük olan eğilme rijitliği ile birlikte burulma rijitliğide rol oynar. Ankastre mesnetli kiriş için, kesitin ağırlık merkezinden etkiyen kritik yük değeri (4.1) numaralı formül ile bulunabilir.

$$P_k = 4,01 \cdot \frac{\sqrt{D_y \cdot D_z}}{L^2} \qquad \textbf{(4.1a)}$$

$$D_y = E \cdot J_y = E \cdot \frac{h \cdot b^3}{12} \qquad \textbf{(4.1b)}$$

$$D_y = E \cdot \eta_2 \cdot h \cdot b^3 \qquad \textbf{(4.1c)}$$

Burada D_y , "y" eksenine göre eğilme rijitliği; D_z , kesitin burulma rijitliğidir. D_z ifadesindeki η_2 nümerik çarpanı da değişik h/b oranları için aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1: Dikdörtgen Kesitlerde η_2 Değeri

h/b	1	1,5	1,75	2	2,5	3	4	5	6	8	10	∞
η_2	0,141	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263	0,281	0,291	0,299	0,307	0,312	1/3

Deney düzeneğinde kullanılacak esnek malzeme için "Pleksiglas" malzeme seçilmiştir. "Pleksiglas"ın diğer malzemelere göre çeşitli avantajları vardır. Öncelikle plastik karışımı bir polimer olduğu için diğer metal alaşımı malzemelere göre yoğunluğunun düşük olması sebebiyle daha hafif olacaktır. Ayrıca diğer malzemelerden farklı olarak ağırlığı arttırmadan ve esneklik özelliğini koruyacak şekilde daha geniş bir en seçilebilecektir. Böylece diğer donanımlar ve bunların elektrik bağlantılarının geçirilebileceği, kullanışlı bir alan elde edilebilecektir ve bunu yaparken malzeme özelliğini koruyacaktır. En büyük avantajı, gevrek bir malzeme olduğu için herhangi bir şekilde hata ile yapılabilecek aşırı yükleme sonucunda kalıcı şekil değimi yaratmayacak, kırılacaktır. Oysa diğer metal alaşımlarda benzer bir durumda kalıcı deformasyonlar oluşacaktır. Bu ise deneyler sırasında malzemenin özelliklerinin bozulmasına neden olacaktır. Yukarıdaki diğer tüm özelliklerinin yanında "Pleksiglas" ayrıca işlenmesi kolay ve maliyeti ucuz bir malzemedir.

4.2 Duyar Elemanları

Esnek robot kolların modellenmesi ve kontrolü ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda, genellikle sistem davranışını anlayabilmek ve yorumlamak için, uygulanması daha kolay olan ve gelişmiş bilgisayar altyapısının desteklediği benzetimler kullanılır. Ancak bu benzetimlerde genellikle ölçüm ve tahrik elemanlarının mükemmel olduğu kabul edilir. Oysa gerçekte hem ölçüm elemanları hem de tahrik elemanları kendi dinamiklerine sahiptirler ve kontrol katsayılarının yeniden hesaplanması ve veya farklı bir kontrol algoritması kullanılması gibi düzenlenmesi gerektirebilmektedir. Dolayısıyla kullanılacak ölçüm elemanlarının karakterleri ve hassasiyetlerinin tespiti ve dinamik davranış üzerindeki etkileri önem kazanmaktadır.

Elimizdeki deney düzeneğinin bilgisayar yardımı ile kontrolü için sistemden ölçmemiz gereken değerleri iki ana kısım da inceleyebiliriz. İlki sistemi rijit gibi kabul ettiğimiz zaman ölçmemiz gereken açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal

ivme değerleridir. Robot kollar gerçekte rijit olsaydı bu değerleri ve kinematik ifadeleri kullanarak, kol üzerindeki diğer çizgisel konum, hız ve ivme değerleri elde edilebilirdi. Oysa sistemimiz esnek yapıda ve bu esnekliğin dinamik davranışını modellemek için kullandığımız yöntemin kullanışlı olabilmesi için, çubuğun belirli noktalarındaki konumu ve hızı ölçmek gerekmektedir.

Beşinci bölümde anlatıldığı gibi, sistemi modellerken kullandığımız yay ve sönüm katsayıları gibi parametrelerin tayini için deney düzeneğinin üzerine yerleştirilmiş bir kamera ile görüntüler alınıp bu görüntü işlenecektir. Kol üzerine yerleştirilmiş LED' ler ile her bir örnekleme zamanı için bu noktaların konumları, görüntü işleme programlarından faydalanarak belirli bir referans noktasına göre "x" ve "y" koordinatları şeklinde bulunabilir. Trigonometrik ifadeler kullanılarak açısal konum şu şekilde bulunabilir.

$$\theta_i(k) = Arc\tan\left(\frac{y_{i+1}(k) - y_i(k)}{x_{i+1}(k) - x_i(k)}\right) - \sum_{j=1}^{i-1}\theta_j(k) \qquad \textbf{(4.2)}$$

Burada "i" değeri alınan nokta, "k" ise örnekleme zamanını göstermektedir.

Bulunan bu açısal konum bilgilerinden faydalanarak, iki ardışık örnekleme zamanı arasındaki açısal konum değişimini, açısal hız olarak aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

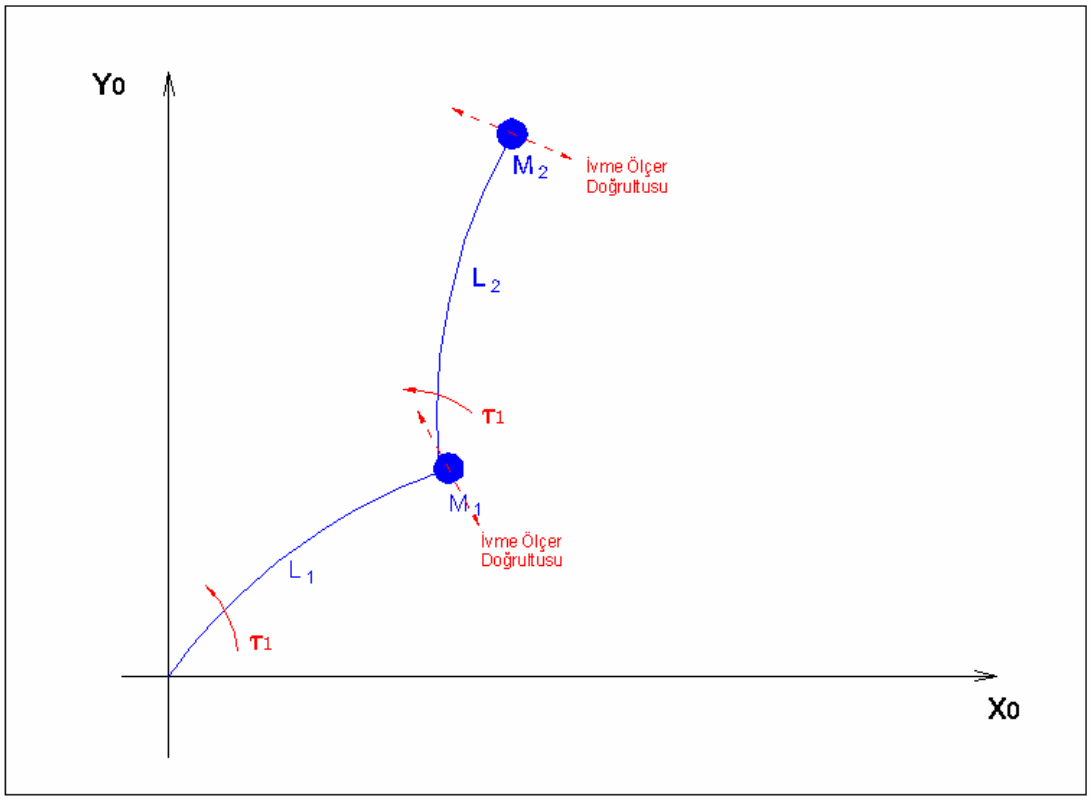
$$\dot{\theta}_i(k) = \frac{\theta_i(k) - \theta_i(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \qquad \textbf{(4.3)}$$

Bulunan bu değerler bir veri grubu oluşturacaktır. Elde edilen bu veri grubu "bölüm beş"te parametrelerin tayini için kullanılmıştır.

Eklemlerde oluşan açısal yer değiştirmenin ölçümü için tek turlu potansiyometreler kullanılmıştır. Potansiyometre eklemde bulunan milin dönmesi ile birlikte bir elektriksel potansiyel farkı oluşturacaktır. Bu fark, dönme açısı ile doğrusal olarak değişmektedir bilgisayarda yazılacak olan programda ikisi arasındaki ilişki girildikten sonra bu elektriksel potansiyel farkı radyan biriminde açı değeri olarak kabul edebiliriz. Açısal hız ifadesi için (4.3) numaralı formül kullanılabilir.

Elimizdeki düzeneğin gerçek zamanda kontrolü uygulamasının hızlı ve kabul edilebilir bir biçimde yapılabilmesi için iki yöntem düşünülebilir. Birincisi robot kol üzerine yerleştirilmiş LED' lerden kamera yardımı ile alınan görüntülerin kontrol ile eşzamanlı olarak işlenerek, her bir sanal uzvun anlık acısal konum ve hız bilgilerinin hesaplanmasıdır. Ancak bu işlem, yüksek hızlı bir bilgisayar sistemi ve gelişmiş,

hızlı ve yüksek çözünürlüklü kamera gerektirmektedir. Donanımların yetersiz olması durumunda görüntülerin alınması ve işlemi için gerekli çevrim zamanı kontrol algoritmasının uygulanması için fazla olacaktır dolayısıyla sistem düzgün çalışmayacaktır. İkinci seçenek ise her bir esnek uzvun uç noktalarına yerleştirilecek ivmeölçerlerle uç noktalardaki çizgisel ivmeler elde edilecektir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: İvme Ölçerlerin Doğrultusu

Bu sayede uç noktalarda oluşan yer değiştirmeler, ivme değerinin iki kere integre edilmesi elde edilebilecektir. "Bölüm beş"te anlatıldığı gibi çubuğun esnekliğinden kaynaklanan eğim bir polinom şeklinde ifade edilmiştir. Dolayısı ile uç noktalardaki yer değiştirmeleri kullanarak çubuğun herhangi bir noktasındaki yer değiştirme de bulunabilecektir.

4.3 Tahrik Mekanizması

Esnek robot kol modelleme çalışması yaparken yapmış olduğumuz kabulde eklemlerde dönme momentlerinin karşılandığını ve bu noktalarda açısal yer değiştirmenin sadece motor dönerken oluştuğunu varsaymıştık. Bir başka ifade ile motorların akımı kesildiğinde eklemlerde dönme olmayacak ve sadece malzemenin

esnek olmasından kaynaklanan uç nokta salınımları ortaya çıkacaktır. Uç noktaların salınımları motor merkezinde yüksek büyüklükte ve periyodik olarak yönü değişen dönme momentleri ortaya çıkaracaktır. Dolayısıyla motor seçerken göz önünde bulundurulması gereken noktalardan birisi motorların bu dönme momentlerini karşılayabilmesidir. Bunu sağlayabilen iki tip motor vardır. Birinci tipte motor enerjisizken mili boştadır ve dönebilmektedir, ancak enerjilendirildiği anda sadece yüksek döndürme momentleri üretmekle kalmayıp aynı zamanda bu momentleri karşılayabilmektedir. İkinci tipte ise motor mili dişli mekanizmaları ile başka bir mili tahrik etmektedir, çevrim oranının büyüklüğüne göre motor mili seviyesindeki döndürme momentinin değeri diğer milde artmaktadır. Aynı olay tersi içinde geçerlidir, yani ikinci mildeki yüksek döndürme momenti değeri motor mili seviyesinde azalmaktadır. Dolayısıyla yüksek çevrim oranlı ve yüksek döndürme momenti değerine sahip motorlar isteğimizi karşılayabilecektir. Dikkat edilmesi gereken İkinci bir nokta ise motorun nasıl bir elektriksel karakter ile çalıştığıdır. Farklı genişlikte darbeler üretip motorun çalışma gerilimini değiştiren darbe genişlik modülasyonlu PWM motorlar, darbeli çalıştıkları için zaten düzeltmeye çalıştığımız çubuklar üzerindeki titreşim problemine karmaşık bir dinamik ekleyecektir. Doğrusal akım motorları, akımın kontrol edilmesi ile uygun olarak kullanılabilir. Genellikle doğrusal akım motorlarında dönme momentinin, akım ile doğru orantılı olarak değiştiği kabul edilir ve bu değişim oranına "Dönme momenti katsayısı" denir. Aşağıdaki tabloda kullanılan "Bühler" marka motorların teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2: Motor Teknik Verileri

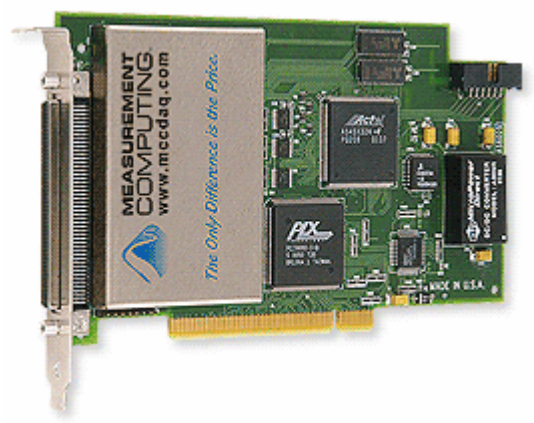
Motor	Model	Çalışma Gerilimi (VDA)	Maksimum Akım (mA)	Maksimum Dönme Momenti (Nsm)	Çevrim Oranı	Dönme Momenti Katsayısı (Nm/A)
1	1.61.013.306–8	6	320	20	241,6	0,625
2	1.61.013.313–0	6	500	20	116,9	0,4

4.4 Bilgisayar Donanımı

Tüm ölçme ve tahrik elemanlarının düzenli olarak çalışabilmesi ve hassasiyetle iş görebilmesi için yüksek işlem kapasiteli bir bilgisayara ve bilgisayarla dış çevre arasındaki bağlantıya ihtiyaç vardır.

Deney düzeneğinde Pentium© IV, 3 GHz işlemci kullanılmıştır. Bu bilgisayar donanımı gerekli yüksek performansı sağlamak konusunda yeterli olacaktır. Programlama için MATLAB© programı ve bu programın Simulink ©,"Image Processing" ve "Data Acquisition" gibi çeşitli eklentileri kullanılmıştır.

Bu bilgisayarın, tahrik ve ölçüm elemanları ile bağlantısı için ise "Measurement Computing" firmasının "PCI-DAS6025" modeli ara yüz kartı kullanılmıştır (Şekil 4.4). Sistemimizin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde giriş ve çıkış nokta sayıları aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.4: Veri Toplama Giriş/Çıkış Kartı

Veri giriş çıkış kartı özellikleri:

Analog Giriş: Sekiz adet diferansiyel veya on altı adet tek sonlu Analog giriş

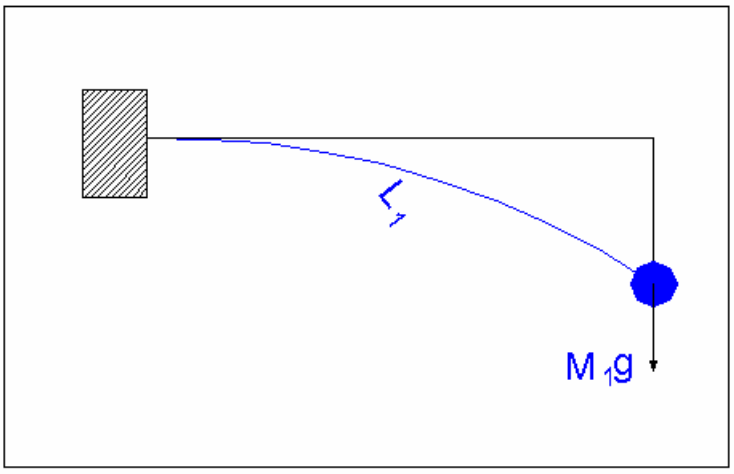
Analog Çıkış: İki adet 12-bit Analog çıkış

Dijital Giriş Çıkış: Otuz iki ader Giriş/Çıkış

5. PARAMETRE TANIMLAMA

Esnek robot kol mekanizmamızın dinamik davranışını tanımlamak için kullanmış olduğumuz modelleme yöntemi sanal rijit uzuvlar ve pasif eklemler olduğunu varsaymıştı. Temel olarak ta modelimizin hassasiyetinin yüksek olması için parametrelerin tespitinin oldukça iyi yapılması gerektiği üzerinde durmuştuk. Dolayısıyla bu bölümdeki temel amacımız sistemin yay ve sönüm katsayılarını tespit etmektir.

Yay katsayılarını tespit etmek için şöyle bir yol izleyeceğiz. Öncelikle burkulma yayının yer değiştirmesi açısaldır. Dolayısıyla burkulma yayında meydana gelen açısal yer değiştirme ile yay katsayısını çarpacak olursak bir dönme momenti oluşacaktır. Dolayısıyla aslında yaylardan kaynaklanan momentler sadece açısal yer değiştirmeye bağlıdır ve sistemin statik durumunda da ortaya çıkmaktadır. O halde çubuğun uç noktasına bir kuvvet uygulayacak olursak elde ettiğimiz eşitlik ile yay katsayılarını bulabiliriz. Sabit bir kuvvet uygulamanın en güzel yolu çubuğu düşey eksende ucuna bir ağırlık asarak yer çekimi etkisinde bırakmaktır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Ucunda Kütle Asılı Esnek Robot Kol

Üçüncü bölümdeki (3.38) numaralı denklemi tekrar hatırlayacak olursak

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq + f(q,\dot{q}) = \tau$$

Görüldüğü gibi statik durumda açısal ivme, açısal hız ve motorların uyguladığı dönme momenti sıfır olacaktır. Açısal konumu tespit etmek için ölçekli bir kâğıt önüne düzeneği koyup fotoğrafını çektikten sonra açıları aşağıdaki bağıntı ile bulmak mümkün olacaktır.

$$\theta_i = Arc\tan\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right) - \sum_{j=1}^{i-1}\theta_j \qquad \textbf{(5.1)}$$

Yay katsayılarını bulduktan sonra sönüm katsayılarını da dinamik denklemden elde etmemiz gerekmektedir. Ancak sönüm katsayılarının bulunabilmesi için aynı dinamik denklem içinde açısal hız ve açısal ivme değerlerini de bilmemiz gerekir. Bu değerleri sayısal fark alarak aşağıdaki şekilde bulabiliriz.

$$\dot{\theta}_i(k) = \frac{\theta_i(k) - \theta_i(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$\ddot{\theta}_i(k) = \frac{\dot{\theta}_i(k) - \dot{\theta}_i(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \qquad \textbf{(5.3)}$$

Sistemi sürekli sabit akım çekecek şekilde sınırlandırıp bu şekilde kumanda edecek olursak, sabit dönme momentleri elde etmiş oluruz. Dinamik davranış denkleminde yer alan diğer ifadeler ise parametrik olarak bilinmektedir. Dolayısıyla "D" sönüm katsayıları bulunabilir.

"Bölüm dört"te uç nokta sapmaları için ivme ölçer kullanacağımızdan bahsetmiştik. Ancak sadece iki adet ivme ölçer kullanabildiğimizden, çubuk üzerindeki sapmaları bir polinom olarak tespit edip uç noktanın sapmasını kullanarak diğer noktalardaki sapmalar ve bu sapmaların sayısal faklarını da alarak hız ve ivme değerleri bulunacaktır.

Çubuk boyunca oluşacak salınımların ikinci dereceden bir polinom karakterinde olduğunu varsayarsak, çubuk boyunca oluşacak sapma aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$y(x,t) = a_1(t)\cdot x^2 + a_2(t)\cdot x + a_3(t) \qquad \textbf{(5.4)}$$

Kamera kullanarak topladığımız görüntülerden oluşturduğumuz veri grubunu bu denklemin katsayılarını tayin etmek için kullanabiliriz. Katsayıların tayini için en küçük kareler yöntemi kullanılacaktır.

Kamera ile almış olduğumuz görüntülerde her bir LED'in konum vektörü "p" olsun.

$$ {}^{i}p_{j}(t) = \begin{bmatrix} {}^{i}p_{xj}(t) \\ {}^{i}p_{yj}(t) \end{bmatrix} \text{ i=1,2 ; j=1,2,3} \quad \textbf{(5.5)} $$

Ölçülmüş değerlerin oluşturduğu veri grubu matrisi "P" ise aşağıdaki gibidir.

$$ {}^{i}P(t) = \begin{bmatrix} {}^{i}p_{x1}{}^{2} & {}^{i}p_{x1} & 1 \\ {}^{i}p_{x2}{}^{2} & {}^{i}p_{x2} & 1 \\ {}^{i}p_{x3}{}^{2} & {}^{i}p_{x3} & 1 \end{bmatrix} \text{ i=1,2} \quad \textbf{(5.6)} $$

Çıkış matrisi "Y" ve katsıyı matrisi "a" ise aşağıdaki gibidir.

$$ {}^{i}Y(t) = \begin{bmatrix} {}^{i}p_{y1} & {}^{i}p_{y2} & {}^{i}p_{y3} \end{bmatrix}^{T} \text{ i=1,2} \quad \textbf{(5.7)} $$

$$ {}^{i}a(t) = \begin{bmatrix} {}^{i}a_{1} & {}^{i}a_{2} & {}^{i}a_{3} \end{bmatrix}^{T} \text{ i=1,2} \quad \textbf{(5.8)} $$

$$ {}^{i}Y(t) = {}^{i}P(t) \cdot {}^{i}a(t) \text{ i=1,2} \quad \textbf{(5.9)} $$

Katsayılar ise şu şekilde bulunabilir.

$$ {}^{i}a(t) = \left\{ \left({}^{i}P \right)^{T} \cdot \left({}^{i}P \right) \right\}^{-1} \left({}^{i}P \right)^{T} \left({}^{i}Y \right) \text{ i=1,2} \quad \textbf{(5.10)} $$

6. KONTROL ALGORİTMASI

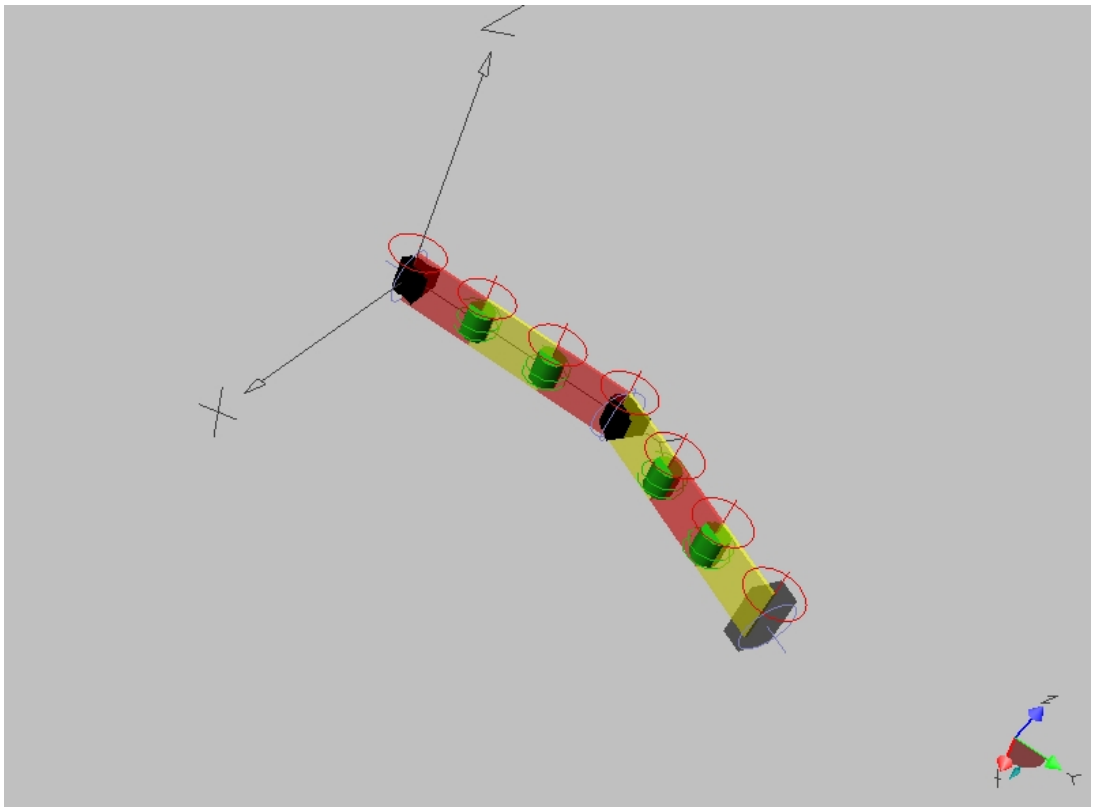
Esnek robot kola mekanizmaları ile alakalı olarak fikrin ilk ortaya atıldığı tarihten beri çözülmesi gereken en büyük problem uç salınımlarının kontrolü olmuştur. Yaklaşık yirmi beş yıllık bir süredir doğrusal olmayan karakteristiği ve yeni bir konu olması araştırmacıları konu üzerinde deneysel çalışma yapmaya itmiştir. Uzun yıllar boyunca devam eden çalışmalarda klasik kontrol yöntemlerinin yanı sıra, özellikle son zamanlarda popülaritesi artan "Akıllı" kontrol yöntemleri de uygulanmıştır.

Esnek robot kolların kontrol edilmesindeki yegâne amaç uç nokta salınımlarını yok edebilmektir. Robot kol mümkünse varması gereken noktaya aşım yapmadan tek seferde varmalıdır.

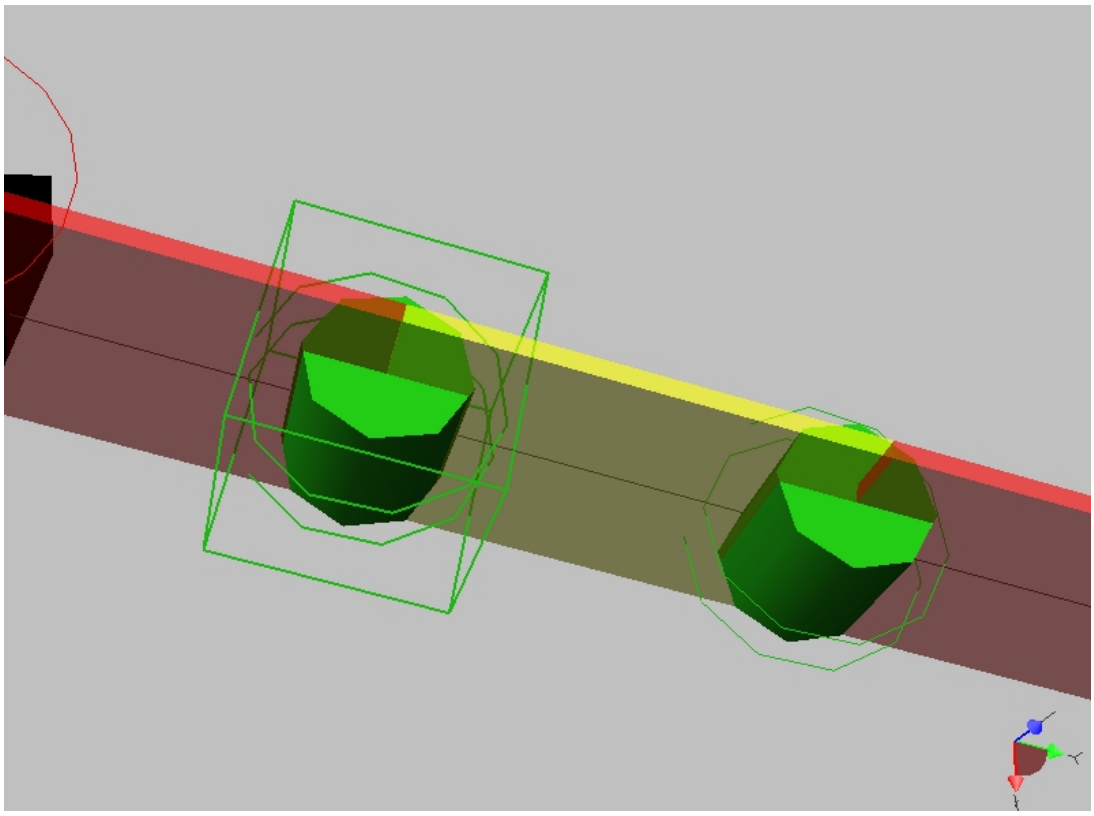
Bu çalışma kapsamı içerisinde Yapay Sinir Ağları Kontrolörü kullanılarak sistem eğitilmiş ve çıkışlar "Sonuçlar" bölümünde ele alınmıştır.

6.1 Benzetim Modelinin Oluşturulması

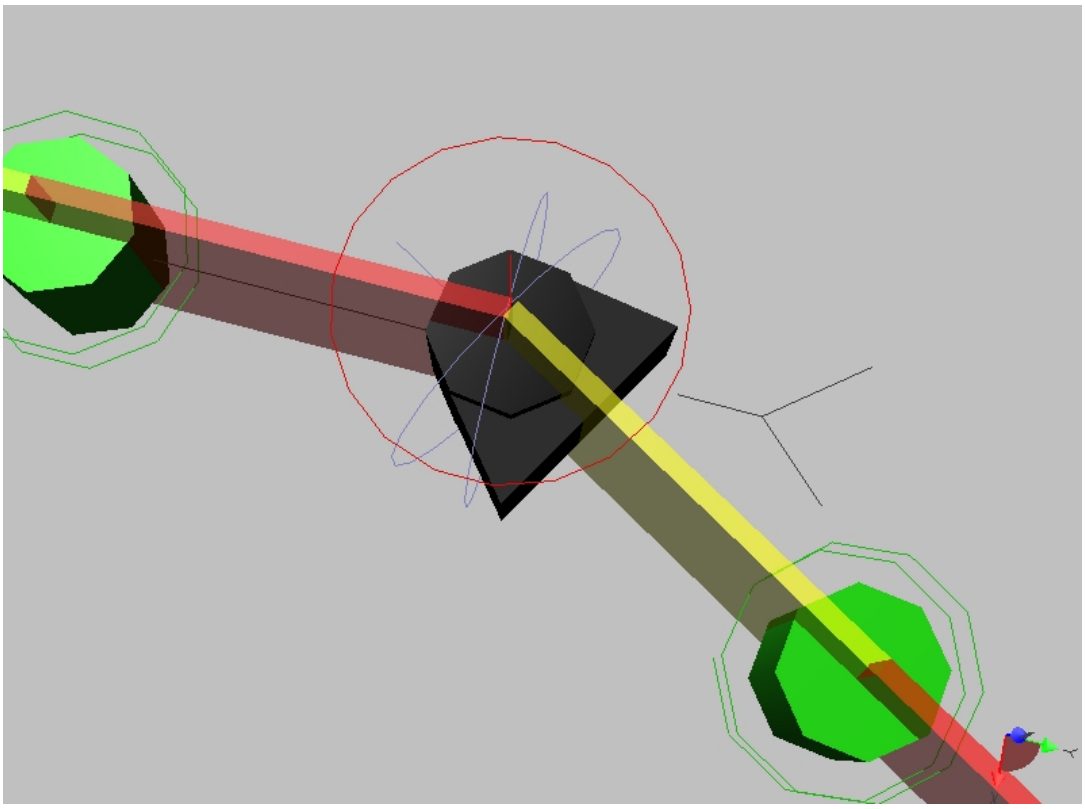
Benzetim çalışmalarının bilgisayar ortamında yapılabilmesi için MSC NASTRAN programı kullanılmıştır. NASTRAN tasarlanmış olan sistemlere giriş uygulanması, çıkışların grafik veya nümerik olarak irdelenmesine imkân tanıyan ve sistemlerin fiziksel girişlere cevaplarını irdeleyen bir tasarım programıdır. Üçüncü bölümde tanıtımı yapılan "Sanal uzuvlar, pasif eklemler" yöntemine uygun olacak şekilde benzer bir fiziksel model NASTRAN da oluşturulmuştur (Şekil 6.1). İlgili modelde esnek robot kollar daha önce bölüm üç de tanımlandığı gibi rijit kolların aralarında döner yay ve sönüm elemanları olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 6.2). Aktif eklemlerde ise kumanda işlemini gerçekleştirecek motorlar bulunmaktadır, motorları dönme momenti veya açısal hız uygulayarak kumanda etmek mümkündür (Şekil 6.3). Ayrıca esnek robot kolumuzun ucunda da taşıyacağı yükü temsil etmek amacıyla bir kütle konulmuştur ve esnek robot kol boyunca belirli noktalara konum, hız ve ivme gibi değişkenleri ölçmek amacıyla ölçüm noktaları eklenmiştir (Şekil 6.4).



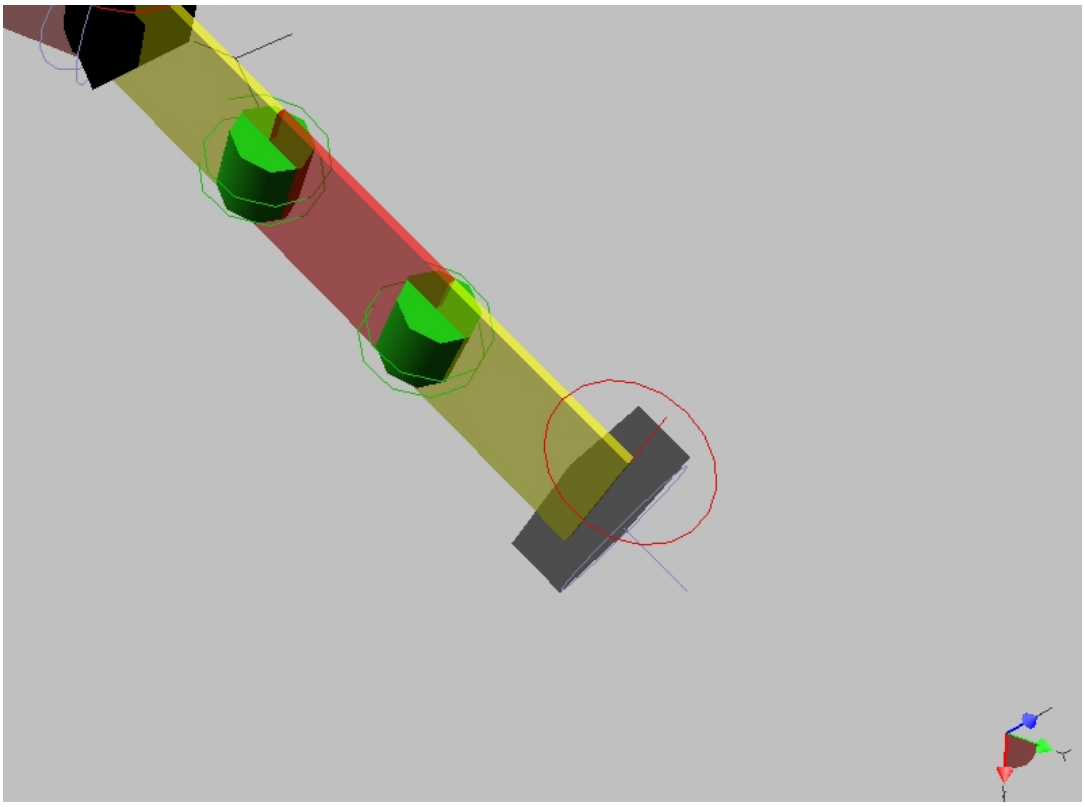
Şekil 6.1: NASTRAN Programında Oluşturulan Fiziksel Model



Şekil 6.2: Sanal Yay ve Sönüm Elemanları

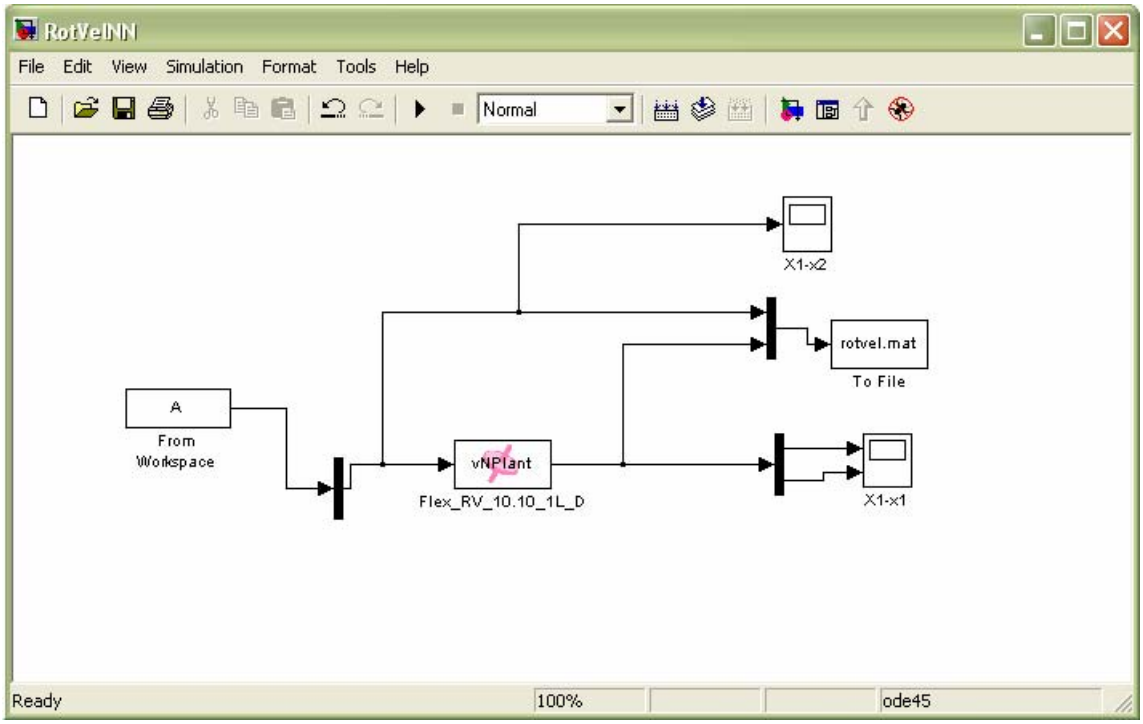


Şekil 6.3: Aktif Eklemlerde Bulunan Motorlar



Şekil 6.4: Robot Kolun Ucundaki Kütle

NASTRAN programı kullanılarak yaratılan fiziksel modelimiz, MATLAB programına, içinde barındırdığı bir eklenti ile bütünleştirilebilmekte ve bu sayede iki program eşzamanlı kullanılabilmektedir. Fiziksel model üzerinde bulunan motorlar MATLAB Simulink üzerinden aldığı giriş verilerini kullanarak motorları kumanda edebilmekte ve bu girişler sonucu oluşan uç noktalardaki konum bilgileri NASTRAN üzerinden Simulink'te bir dosyaya kayıt edilebilmektedir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: NASTRAN ve MATLAB Simulink Beraber Kullanılabilmekte

Tablo 6.1: NASTRAN da Oluşturulan Fiziksel Modelin Parametreleri

Parametre	Tanım	Ölçüler (m)	Yay Katsayısı (Nm/deg)	Sönüm Katsayısı (N.m.s/deg)
L11	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
L12	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
L13	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
L21	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
L22	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
L23	Uzuv	0,07x0,05x0,003	-	-
YD11	Döner Yay-Damper	-	0.08	0.000914
YD12	Döner Yay-Damper	-	0.08	0.000914
YD21	Döner Yay-Damper	-	0.08	0.000914
YD22	Döner Yay-Damper	-	0.08	0.000914

Bu benzetim çalışmasında kullanılan NASTRAN programında elde edilen fiziksel modele ilişkin parametreler Tablo 6.1 de verilmiştir. Bu parametreler dışınca ayrıca uç kütle 0,25 kg ağırlığında seçilmiştir**.**

6.2 Kontrol Algoritmasının Tanıtılması

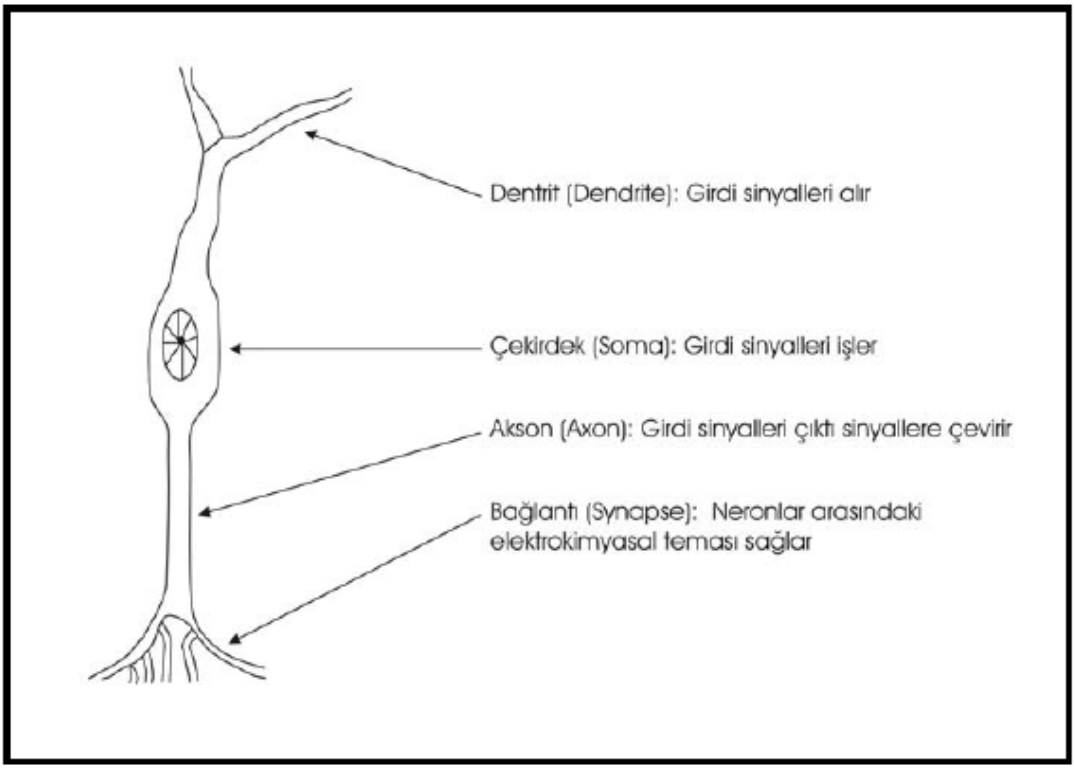
Kullandığımız Yapay Sinir Ağları Kontrol Algoritması, temel olarak fiziksel sistem üzerinden giriş ve çıkış verileri toplayıp bu verileri inceleyerek sistem dinamiğini öğrenen ve daha sonra istenen çıkışlara göre sisteme giriş uygulayan kontrol olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla Yapay Sinir Ağları kullanılarak kontrol yapılabilmesi için öncelikle sistem üzerinden veri toplanması gerekmektedir. Daha sonra elde edilen veriler ağ yapısını eğitmek için kullanılacak ve nihayetinde elde edilen kontrolörün istediğimiz yörüngeyi takip etmesi istenecektir. Kontrol algoritmasının çalışmasının yorumlanabilmesi için sistemin farklı donanımları üzerinden veri toplanıp kontrol uygulanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. İlk olarak basit olması bakımından tek uzuvlu esnek kol modeli üzerinden veri toplanıp kontrol gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı yöntem iki uzuvlu esnek robot kolda uygulanmış ve aradaki fark incelenip yorumlanmıştır.

6.2.1 Yapay sinir ağları (YSA)

İnsanlığın doğayı araştırma ve taklit etme çabalarının en son ürünlerinden bir tanesi Yapay Sinir Ağları teknolojisidir. Yapay Sinir Ağları, basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini simüle etmek için tasarlanan programlardır. Simüle edilen sinir hücreleri (nöronlar) içerirler ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir. Bir insanın, düşünme ve gözlemleme yeteneklerini gerektiren problemlere yönelik çözümler üretebilmesinin temel sebebi ise insan beyninin ve dolayısıyla insanın sahip olduğu yaşayarak veya deneyerek öğrenme yeteneğidir.

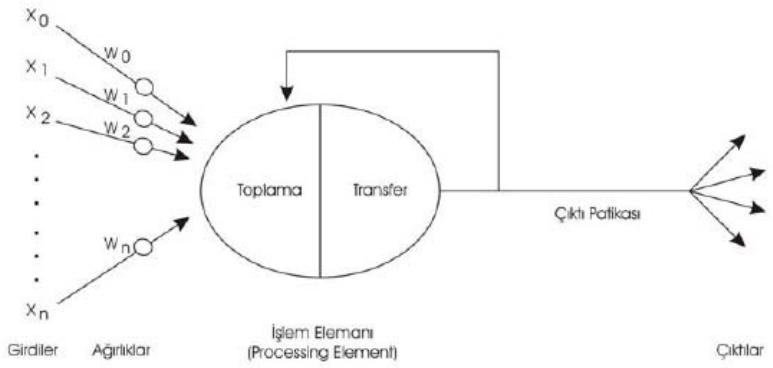
Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik (synaptic) bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren bir "yaşayarak öğrenme" süreci içerisine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe ettikçe sinaptik bağlantılar ayarlanır ve hatta yeni bağlantılar oluşur.

Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitme yoluyla örnekler kullanarak olur; başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitme algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını (weights of the synapses) bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla olur.



Şekil 6.6: Biyolojik Sinir Hücresi

YSA'lar, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem elemanlarından (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem elemanı, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem elemanı, diğer nöronlardan sinyalleri alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem elemanları kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır. **(Yurtoğlu , 2005).**

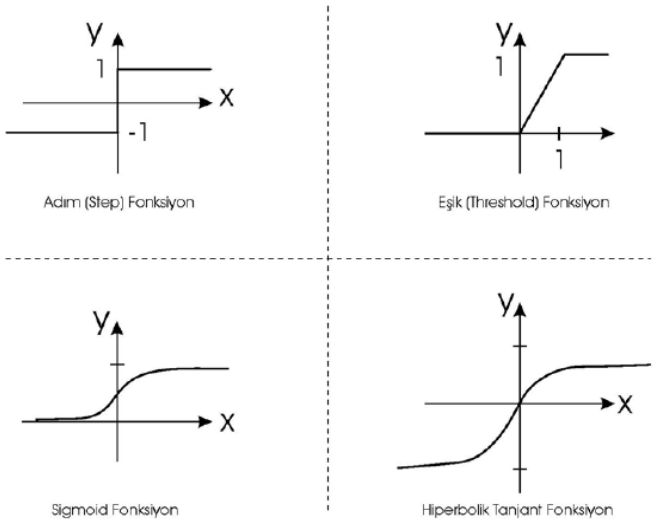


Şekil 6.7: Yapay Sinir Hücresi

Yapay sinir hücresinde girişler $\mathbf{x} = [\ x_0\ x_1\ x_2\ \ldots..\ x_n\ ]^T$ olacak şekilde bir yapıya sahiptir. Her bir giriş belirli bir ağırlık oranına göre nörona etki ederler, dolayısıyla her bir giriş kendisi ile alakalı ağırlık terimi ile çarpılır. $\mathbf{w} = [\ w_0\ w_1\ w_2\ \ldots..\ w_n\ ]^T$ olacak şekilde ağırlıklar vektörünü tanımlayacak ve $x_0 = 1$ olarak seçecek olursak.

$$y = f\left(\sum(x,w)\right) = f\left(w_0 + x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 + \ldots + x_nw_n\right) = f\left(w_0 + \sum_{i=1}^{n} x_iw_i\right) \qquad \textbf{(6.1)}$$

Olacaktır. w_0 , $x_0 = 1$ değerine denk gelen genel yanlılık (bias) terimidir. Nöron çıkışı ise ağırlıklar toplamının etkinlik (activation) fonksiyonu $f(.)$ üzerinden geçirilmesi ile elde edilir. Şekil 6.8' de bazı çok kullanılan etkinlik fonksiyonları görülmektedir



Şekil 6.8: Bazı Etkinlik Fonksiyonları

Sinirsel (neural) hesaplamanın merkezinde dağıtılmış, adaptif ve doğrusal olmayan işlem kavramları vardır. YSA'lar, geleneksel işlemcilerden farklı şekilde işlem

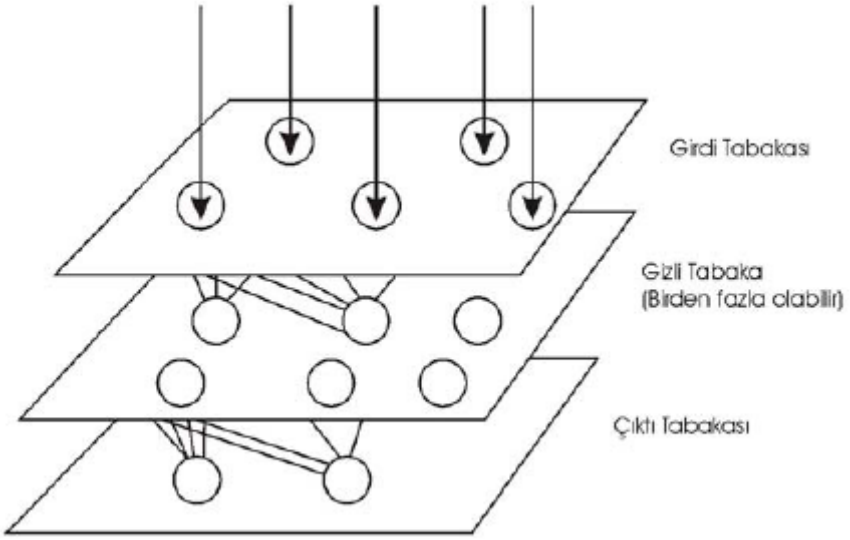
yapmaktadırlar. Geleneksel işlemcilerde, tek bir merkezi işlem elemanı her hareketi sırasıyla gerçekleştirir. YSA'lar ise her biri büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen, çok sayıda basit işlem elemanlarından oluşmaktadır. En basit şekilde, bir işlem elemanı, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile ağırlıklandırır, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlar ve bir çıktı değeri oluşturur. İlk bakışta, işlem elemanlarının çalışma şekli yanıltıcı şekilde basittir. Sinirsel hesaplamanın gücü, toplam işlem yükünü paylaşan işlem elemanlarının birbirleri arasındaki yoğun bağlantı yapısından gelmektedir.

Çoğu YSA'da, benzer karakteristiğe sahip nöronlar tabakalar halinde yapılandırılırlar ve etkinlik fonksiyonları eş zamanlı olarak çalıştırılırlar. Hemen hemen tüm ağlar, veri alan nöronlara ve çıktı üreten nöronlara sahiptirler.

YSA'nın ana öğesi olan matematiksel fonksiyon, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir.

YSA'larda, yapay nöronlar basit bir şekilde kümelendirilmektedirler. Bu kümelendirme tabakalar halinde yapılmaktadır ve daha sonra bu tabakalar bir diğerine ilişkilendirilmektedir. Temel olarak, tüm YSA'lar benzer bir yapıya sahiptirler. Böyle bir genel yapı Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Bu yapıda, bazı nöronlar girdileri almak için bazı nöronlar ise çıktıları iletmek için dış mekan ile bağlantılı haldedirler. Geri kalan tüm nöronlar ise gizli tabakalardadırlar, yani sadece ağ içinde bağlantıları vardır.

Önemli olan nokta, bir sinir ağının, bir nöronlar yumağından daha karışık olması gerektiğidir. YSA'ların ilk yıllarında, bazı araştırmacılar, nöronlar arasındaki bağlantıları rastsal olarak oluşturmuşlar ve olumsuz sonuçlarla karşılaşmışlardır. Bir yapıyı tasarlamanın en kolay yolu elemanları tabakalandırmaktır. Burada tabakalandırmanın üç bölümü vardır. Bunlar, nöronları tabakalar halinde gruplandırmak, tabakalar arasındaki bağlantıları gruplandırmak ve son olarak ise toplama ve transfer fonksiyonlarını gruplandırmaktır.



Şekil 6.9: YSA Tabaka Yapısı

Çoğu uygulamalar en az üç tabaka (girdi tabakası, gizli tabaka ve çıktı tabakası) içeren ağlara ihtiyaç duymaktadır. Girdi tabakası, dışarıdan girdileri alan nöronları içerir. Ayrıca, önemli olan bir nokta, girdi tabakasındaki nöronların girdi değerler üzerinde bir işlem uygulamamasıdır. Sadece girdi değerleri bir sonraki tabakaya iletirler ve bu yüzden de bazı araştırmacılar tarafından ağların tabaka sayısına dâhil edilmezler. Çıktı tabakası ise çıktıları dışarı ileten nöronları içeren tabakadır. Girdi ve çıktı tabakaları tek tabakadan oluşurken bu iki tabaka arasında birden fazla gizli tabaka bulunabilir. Bu gizli tabakalar çok sayıda nöron içerirler ve bu nöronlar tamamen ağ içindeki diğer nöronlarla bağlantılıdırlar. Çoğu ağ türünde, gizli tabakadaki bir nöron sadece bir önceki tabakanın tüm nöronlarından sinyal alır. Nöron işlemini yaptıktan sonra ise çıktısını bir sonraki tabakanın tüm nöronlarına gönderir. Bu yapı ağın çıktısı için bir ileri besleme patikası oluşturur. Bu bir nörondan diğerine olan iletişim hattı, sinir ağları için önemli bir parçadır. **(Yurtoğlu , 2005).**

6.2.2 YSA' da geriye yayılım algoritması

Karmaşık verilerin sınıflandırılmasında kullanılan etkin YSA modellerinden birisi, geri yayınım ağıdır (Back Propagation Network). İlk uygulamaları yazılı metinden söz sentezi, robot kollarının kontrolüdür. Sınırları ise denetimli eğitim giriş ve çıkış örneklerinin çok sayıda olmasıdır. Backpropagation günümüzde en yaygın kullanılan öğrenimi kolay sonuçları etkin bir YSA'dır.

Yayınma ve uyum gösterme (Propagate - Adapt) olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren GYA, katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı (Multilayer), İleri Beslemeli (Feed Forward) ve Denetimli (Supervised) olarak eğitilen bir YSA modelidir.

Geri yayınım algoritması (Backpropagation) birçok uygulamalarda kullanılmış en yaygın öğrenme algoritmasıdır. Anlaşılması kolay ve tercih edilen öğretme algoritmasıdır. Bu algoritma, hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayılmalı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır. Bir geri yayınımlı ağ modelinde giriş, saklı ve çıkış olmak üzere 3 katman bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre saklı katman sayısını artırabilmek mümkündür. Geri yayılım ağında, bir katmandan bir başka katmana, aradaki katmanı atlayarak geçebilmek mümkün değildir.

Bir giriş verisinin ağın ilk katmanında yer alan düğümlere uygulandığında en üst katman olan çıkış katmanına erişinceye kadar, bu veri üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen fiili çıktı, olması gereken çıktı ile karşılaştırılır. Fiili ve olması gereken değerler arasındaki fark, her çıktı düğümü için bir hata sinyali olarak hesaplanır. Hesaplanan hata sinyalleri, her çıktı düğümüne karşı gelen ara katmandaki düğümlere aktarılır. Böylece ara katmandaki düğümlerin her biri toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu süreç her katmandaki düğümler toplam hatanın belirli bir kısmını içerecek şekilde giriş katmanına kadar tekrarlanır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, bağlantı ağırlıkları her düğümde yeniden düzenlenir. Bu düzenleme tüm verilerin kodlanabileceği bir duruma ağın yakınsamasını sağlar.

Yukarıda anlatıldığı gibi, ileri besleme safhasında, giriş tabakasındaki nöronlar veri değerlerini doğrudan gizli katmana iletirler. Gizli katmandaki her bir nöron kendi giriş değerlerini ağırlandırarak toplam değer hesap ederler ve bunları bir taşıma fonksiyonu ile işleyerek bir ileriki tabakaya veya doğrudan çıkış katmanına iletirler. Katmanlar arasındaki ağırlıklar başlangıçta rasgele küçük rakamlardan seçilir.

Çıkış katmanındaki, her bir nöron ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer yine taşıma fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata minimize edilmeye çalışılır. Hata değeri belli bir mertebeye ininceye kadar iterasyon işlemine devam edilir ve böylece ağın eğitim aşaması tamamlanmış olur. Katmanlar arasındaki

bağlantılardaki ağırlık değerleri eğitimi tamamlamış ağdan alınarak deneme safhasında kullanılmak üzere saklanır.

6.2.3 Nöromorfik kontrol yapısı

Yukarıdaki temel bilgiler verildikten sonra, YSA'nın kontrolör olarak kullanılması aşamasında hangi kademelerin belirlenmesi gerektiği ve uygulandığı aşağıda açıklanmıştır.

Problemin Tanımlanması: Ayrık zamanlı çok giriş çok çıkışlı bir yapıyı ele alalım.

$$y(k+1) = f\left[y(k), y(k-1), ..., y(k-P+1), u(k), u(k-1), ..., u(k-Q)\right] \quad \textbf{(6.2)}$$

Burada, y çıkış vektörü, u giriş vektörü, k ayrık zaman indisi, P ve Q ise negatif olmayan tam sayılardır ve f(.) ise bilinmeyen bir fonksiyondur.

Amaç ise (6.1) numaralı denklemde verilmiş olan sistemin belirli bir r(k) referansının, zaman içerisinde e(k)=r(k)-y(k) hatasını minimize edecek şekilde takip edilebilmesi için ne şekilde kontrol uygulanması gerektiğinin öğrenilmesidir.

Kontrol amaçlı Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı: Daha önce literatürde uygulanmış olan pek çok kontrol yöntemi için Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları (ÇKYSA) kullanılmıştır. Uygulamayı uygun bulan mühendislerin en temel tercih sebepleri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ÇKYSA temel olarak ileri beslemeli bir yapı kullanır, bu yapıda bilgiler önce giriş tabakası, ardından saklı tabakalar ve en son olarak ta çıkış tabakasından geçecek şekilde ileri doğru bir hareket içerisindedirler. Giriş ve çıkışları açık bir şekilde belirlenmiş olan yapıların kontrolü için bu şekildeki bir yapı kullanım kolaylığı açısından oldukça elverişlidir.
- ÇKYSA, hassasiyet derecesi yüksek olan uygulamalarda bile saklı katman sayısı ve saklı katmanlarda bulunan nöron sayısı arttırılmak suretiyle ve aktivasyon fonksiyonunun doğru seçilmesi ile oldukça elverişlidir.
- ÇKYSA'daki en temel öğrenme algoritması olan Geriye Yayılım Algoritması (GYA), Optimal Kontrol uygulamalarında da kullanılan gredyen yöntemlerine dayanmaktadır ve kontrol mühendislerinin kolaylıkla yorumlayabileceği bir yapısı vardır.

İki genel kontrol yapısı, yukarıdaki faydalar ve eşleştirebilme yeteneği ile şu şekilde tanımlanabilir.

Nöral Sistem Taklitçisi: Formül (6.1) de verilen sistemin tersinin olduğu kabul edilecek olursa ve bu işlem sonucunda aşağıdaki gibi g(.) fonksiyonu tanımlanacak olursa.

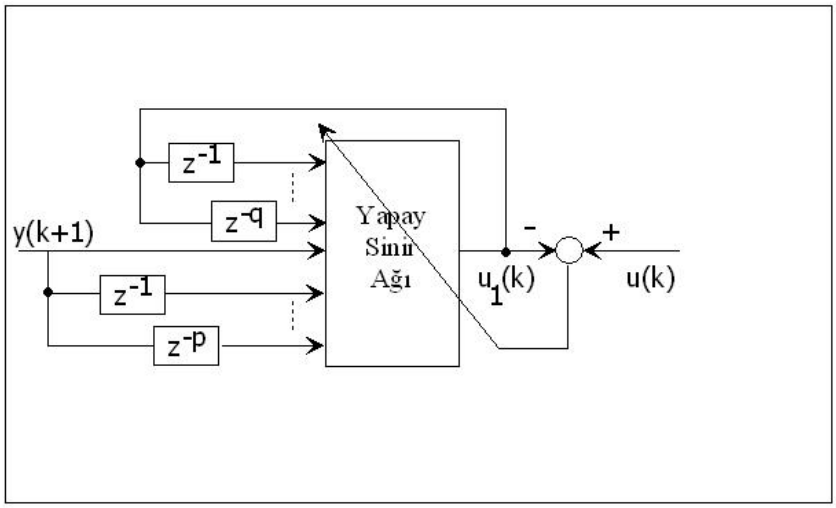
$$u_1(k) = g\left[y(k+1), y(k), ..., y(k-p+1), u(k-1), ..., u(k-q)\right] \quad \textbf{(6.3)}$$

p ve q'nun verildiğini ve ÇKYSA'nın m=p+q+1 adet giriş ve çıkış vektörü ile (6.3) numaralı denklemde verilmiş olan sistem taklit edilebilir. Sistem taklitçisi tarafından yapılan eşleştirme işleminin $\varphi_E(.)$ fonksiyonu tarafında sağlandığını ve çıkışın da u_1 olduğunu kabul ederek.

$$u_1 = \varphi_E(x_E) \quad \textbf{(6.4)}$$

$$x_E(k) = \varphi_E\left[y(k+1), y(k), ..., y(k-p+1), u(k-1), ..., u(k-q)\right]^T \quad \textbf{(6.5)}$$

Şeklinde elde edilecektir. Taklitçi, $u(k)-u_1(k)$ hatasını minimize edecek şekilde eğitilecektir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10: ÇKYSA Eğitilmesi

Nöral Kontrolör: Formül (6.2) de tanımlanan sistemin taklit edilmesi ve hatanın minimize edilmesi sonucu elde edilen ÇKYSA kontrolörü aşağıdaki formda tekrar yazılabilir.

$$u(k) = g\left[y(k+1), y(k), ..., y(k-P+1), u(k-1), ..., u(k-Q)\right] \quad \textbf{(6.6)}$$

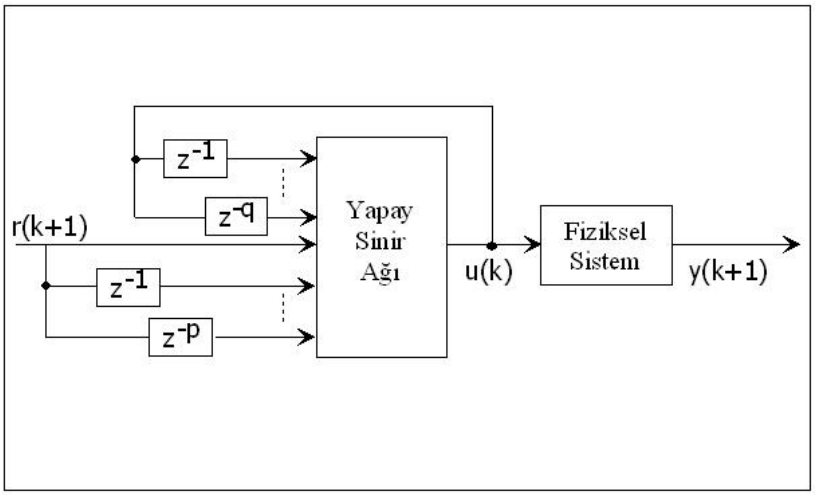
Bu u(k) kontrolör çıkışı ile x_c kontrolör girişleri arasında, $\varphi_C(.)$ şeklinde bir giriş çıkış eşleştirmesi fonksiyonu varsa, bu ilişki

$$u_1 = \varphi_C(x_C) \quad \textbf{(6.7)}$$

$$x_C(k) = \varphi_C\left[y(k+1), y(k), ..., y(k-p+1), u(k-1), ..., u(k-q)\right]^T \quad \textbf{(6.8)}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Eğer $\varphi_C(.)$ çıkışları benzer girişler için g(.) çıkışları ile yakınsıyorsa, ÇKYSA ileri beslemeli kontrol yapısı için Kontrolör olarak düşünülebilir. ÇKYSA yapısının girişlerini ifade eden x_C ifadesi için iki farklı yapı mümkündür. Şekil 6-11 de görülen yapı için k örnekleme zamanı için girişler aşağıdaki gibidir. Burada y(k+1),…,y(k-p+1) için referans değerleri kullanılmıştır.

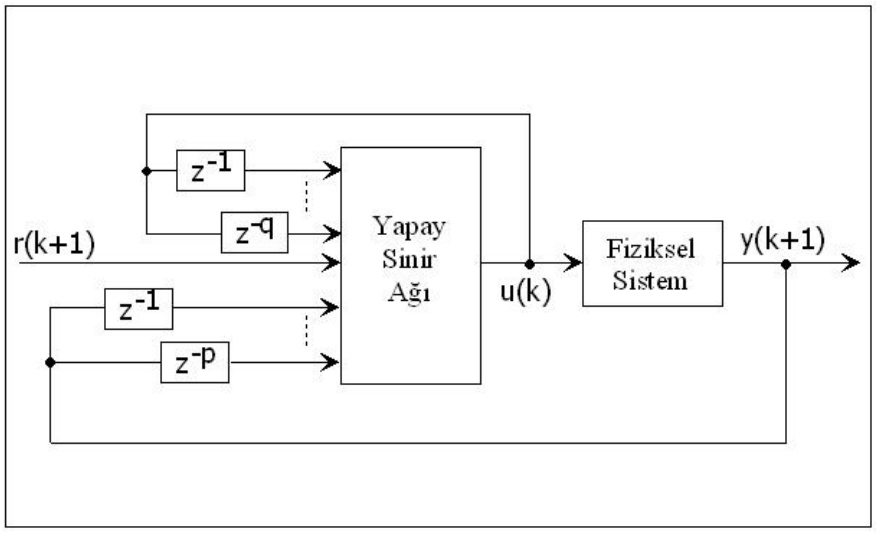
$$x_C(k) = \varphi_C\left[r(k+1), r(k), ..., r(k-p+1), u(k-1), ..., u(k-q)\right]^T \quad \textbf{(6.9)}$$



Şekil 6.11: ÇKYSA'nın Referans Girişler ile Kontrolör Olarak Kullanılması

Bir başka yapı ise Şekil 6-12 de görülen ve fiziksel sistem çıkışlarının geri beslendiği durumdur. Burada y(k+1) olmadığı için yerine referans olan r(k+1) kullanılmıştır. x_C girişi için ise şu şekilde bir ifade yazılabilir. **(Tanomaru ve Omatu, 1992)**

$$x_C(k) = \varphi_C\left[r(k+1), y(k), ..., y(k-p+1), u(k-1), ..., u(k-q)\right]^T \quad \textbf{(6.10)}$$

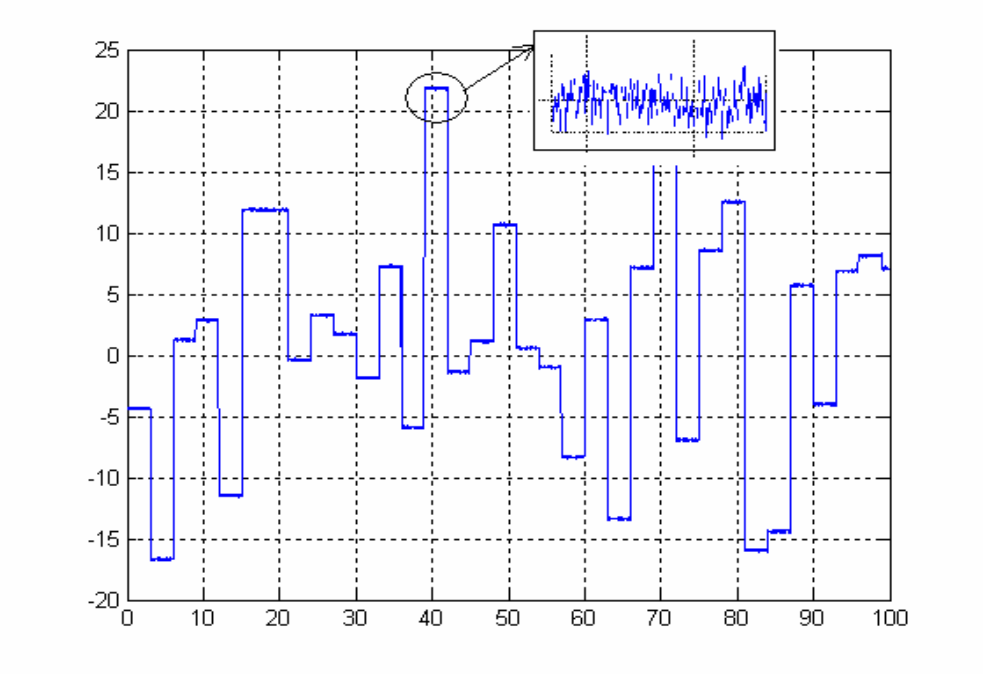


Şekil 6.12: ÇKYSA'nın Referans Giriş ve Çıkış Geri Beslemesi Kullanılması

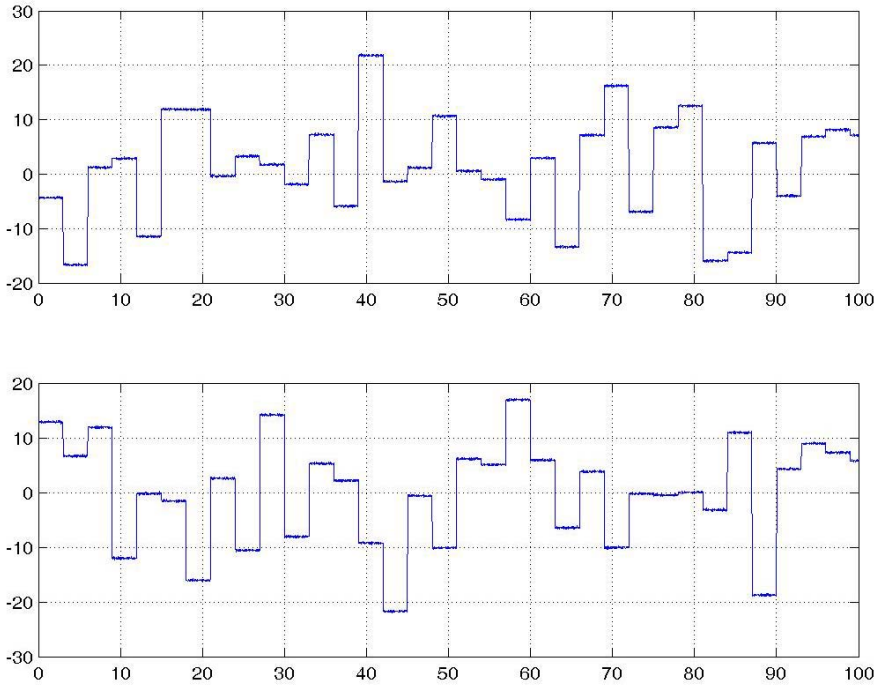
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları kullanılarak kontrolör eğitilmesi ve tasarlanan kontrolörün kullanılması için, öncelikle tek uzuvlu esnek robot kol üzerinde çalışma yapıldı. Yapılan çalışmada sistemden veri toplama, toplanan verinin kontrolörün katsayılarının bulunması için kullanılması ve kontrolörün Şekil 6-12 de gösterilen yapıda kullanılması sonucu çıkışların elde edilmesi ve yorumlanması verildi. Aynı işlemler daha sonra iki uzuvlu esnek robot kol için de uygulandı.

Yapay sinir ağları ile kontrol edilen sistem için öncelikle veri toplamak amacıyla modele Beyaz Gürültü (White Noise) adı verilen ve zengin içeriği nedeniyle sistemin tüm frekanslarını tetikleyebilen giriş sinyali uygulandı ve bu sinyale karşılık gelen cevap toplandı. Referans giriş sinyali daha da zengin olsun diye ayrıca üzerine bir miktar gürültü eklenmiştir (Şekil 7.1). Aynı "Beyaz Gürültü" sinyali iki uzuvlu robot kol için de uygulanmıştır(Şekil 7.2).

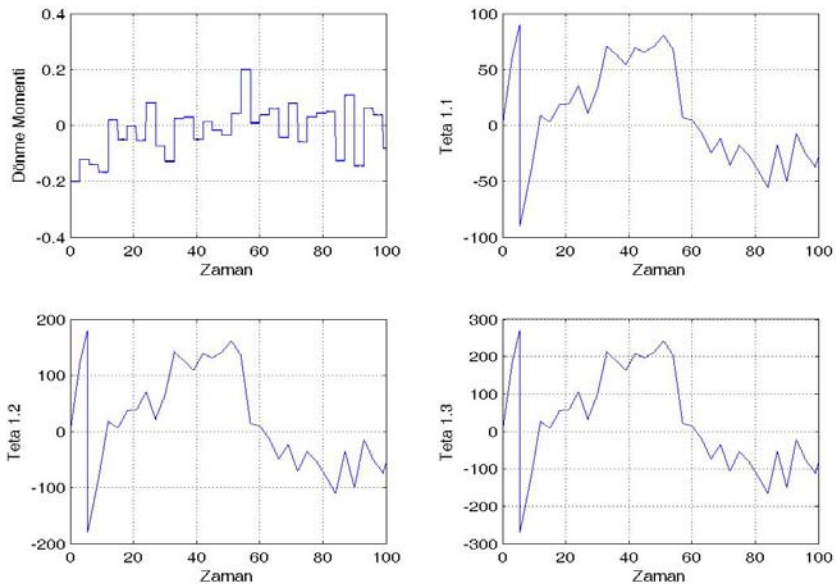


Şekil 7.1: Tek Uzuvlu Robot Kolu için Zengin İçerikli Giriş Sinyali



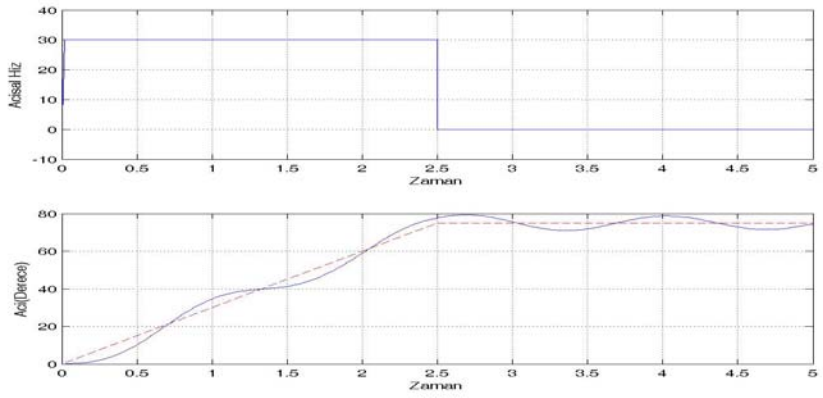
Şekil 7.2: İki Uzuvlu Robot Kolu için Zengin İçerikli Giriş Sinyali

Bu giriş sinyali ilk etapta tek uzuvlu bir esnek robot kola uygulanmıştır ve çıkış olarak da her bir sanal uzvun uç nokta koordinatları "x" ve "y" değerleri üzerinden açıları alınmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3: Beyaz Gürültü Girişe Karşılık Tek Uzuvlu Esnek Kolun Cevabı

Bu veriler kullanılarak sistem eğitilmiştir. Daha sonra elde edilen ağ yapısı kontrolör olarak kullanılmıştır. Kontrolör cevapları incelenmeden önce sitemin sabit hız durumunda nasıl hareket ettiği incelenmiştir. Oluşturulmuş olan bilgisayar benzetiminin esnekliği ne derece tanımlayabildiği Şekil 7.4 de görülmektedir.



Şekil 7.4: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun Sabit Açısal Hızda Yörünge Takibi

Kontrolör bizim vereceğimiz referans yörüngeyi takip edecek şekilde Yapay Sinir Ağları Kontrol algoritmasını koşturacaktır. Referans sinyal her bir sanal rijit uzuv için tanımlanmalıdır. Yumuşak bir yörünge için üçüncü dereceden bir polinom gibi tanımlayacak olursak yörünge denklemleri (7.1) ve (7.2) de gösterildiği gibi olacaktır.

$$\theta_1 = a_1 \cdot t^3 + b_1 \cdot t^2 + c_1 \cdot t + d_1 \quad \textbf{(7.1)}$$

$$\theta_2 = a_2 \cdot t^3 + b_2 \cdot t^2 + c_2 \cdot t + d_2 \quad \textbf{(7.2)}$$

Katsayıları bulabilmek için sınır şartlarını başlangıç ve bitiş noktasında açısal hız sıfır olacak şekilde tanımlarsak

$$\theta_1(0) = \theta_1^0 \quad \textbf{(7.3 a)}$$

$$\theta(0)' = 0 \quad \textbf{(7.3 b)}$$

$$\theta_1(T_f) = \theta_1^f \quad \textbf{(7.3 c)}$$

$$\theta_1(T_f)' = 0 \quad \textbf{(7.3 d)}$$

$$\theta_2(0) = \theta_2^0 \quad \textbf{(7.4 a)}$$

$$\theta_2(0)' = 0 \quad \textbf{(7.4 b)}$$

$$\theta_2(T_f) = \theta_2^f \quad \textbf{(7.4 c)}$$

$$\theta_2(T_f)' = 0 \quad \textbf{(7.4 d)}$$

Katsayılar aşağıdaki gibi bulunacaktır.

$$a_1 = \frac{2 \cdot (\theta_1^0 - \theta_1^f)}{T_f^{\,3}} \qquad \textbf{(7.5 a)}$$

$$b_1 = -\frac{3}{2} \cdot a_1 \cdot T_f \qquad \textbf{(7.5 b)}$$

$$c_1 = 0 \qquad \textbf{(7.5 c)}$$

$$d_1 = \theta_1^0 \qquad \textbf{(7.5 d)}$$

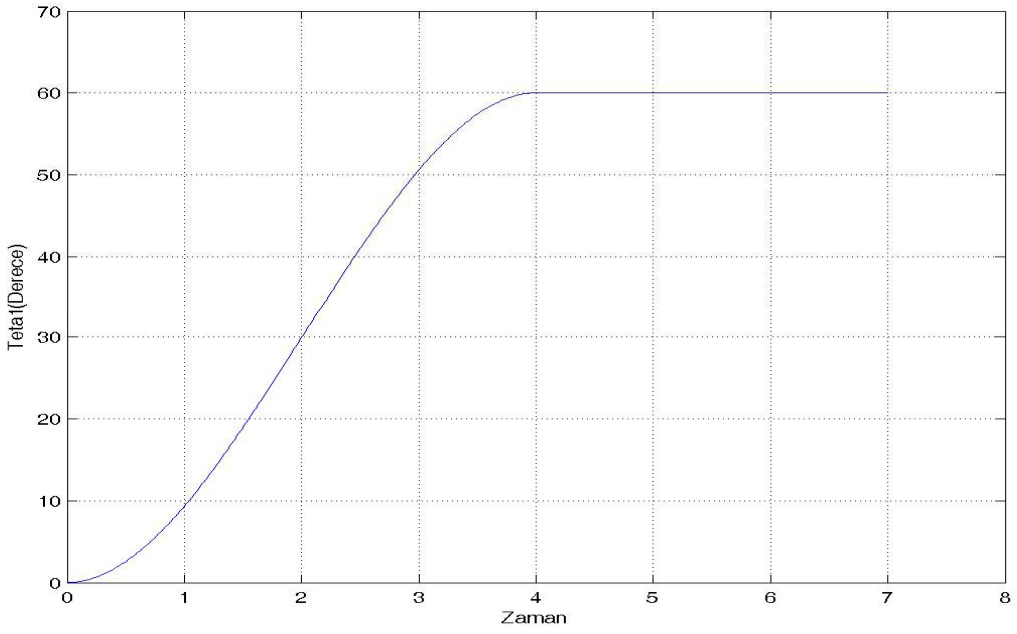
$$a_2 = \frac{2 \cdot (\theta_2^0 - \theta_2^f)}{T_f^{\,3}} \qquad \textbf{(7.6 a)}$$

$$b_2 = -\frac{3}{2} \cdot a_2 \cdot T_f \qquad \textbf{(7.6 b)}$$

$$c_2 = 0 \qquad \textbf{(7.6 c)}$$

$$d_2 = \theta_2^0 \qquad \textbf{(7.6 d)}$$

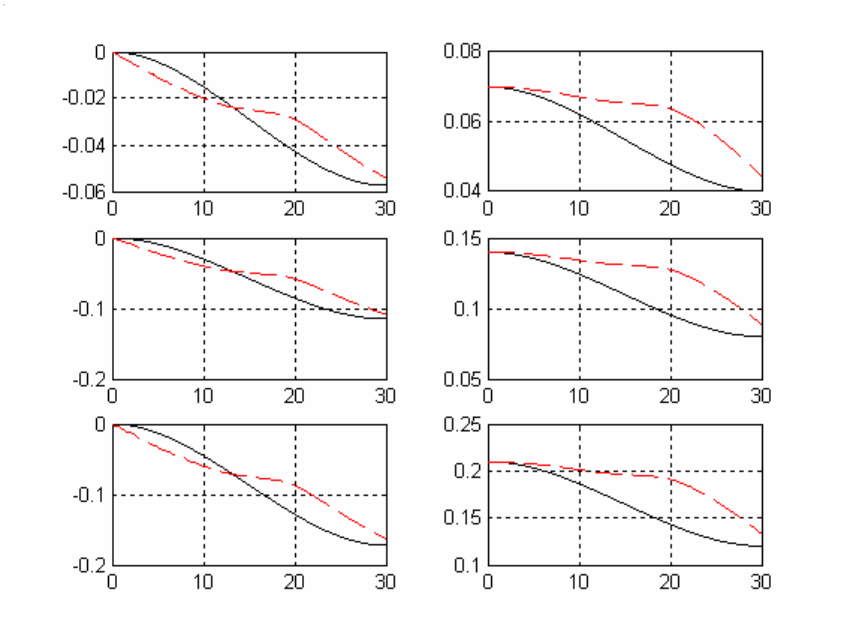
Örnek olarak tek uzuvlu esnek robot kolun $\theta_1^0 = 0^0$ açısından $\theta_1^f = 60^0$ açısına T_f=4s içerisinde gitmesi için, sanal rijit uzuvların takip etmesi gereken açısal yörünge Şekil 7.5 de gözükmektedir.



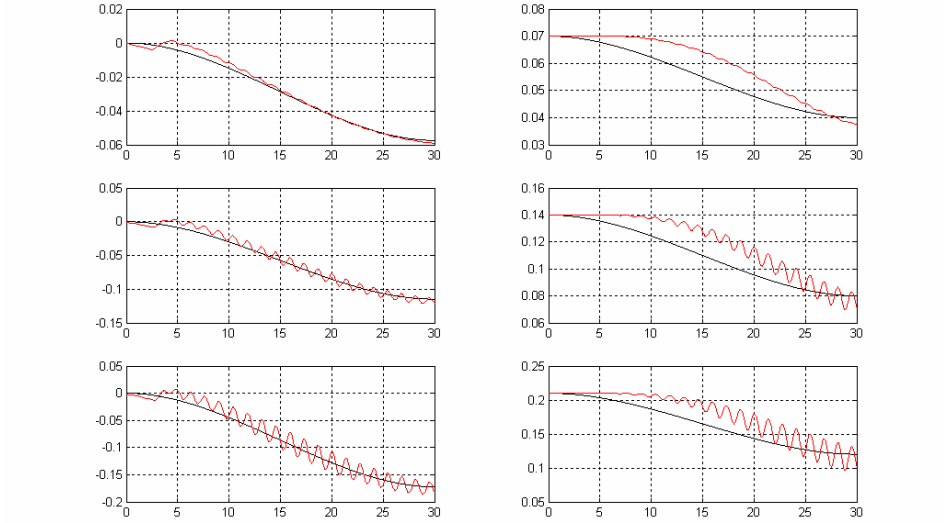
Şekil 7.5: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kol İçin Açısal Referans Yörünge

İki farklı kontrol uygulanmıştır. Öncelikle sistemin durum geri beslemeleri alınmadan sadece referans değerlerine göre yörünge takibi istenmiş ve sonuçların yeteri kadar uygun olmadığı görülmüştür. Daha sonra uç nokta salınımların sönümleyebilmek için uç nokta koordinatları geri beslenmiştir. Her iki durumun

kıyaslaması örnek olarak alınan tek uzuvlu robot kol sonuçları üzerinde Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 de görülebilir.

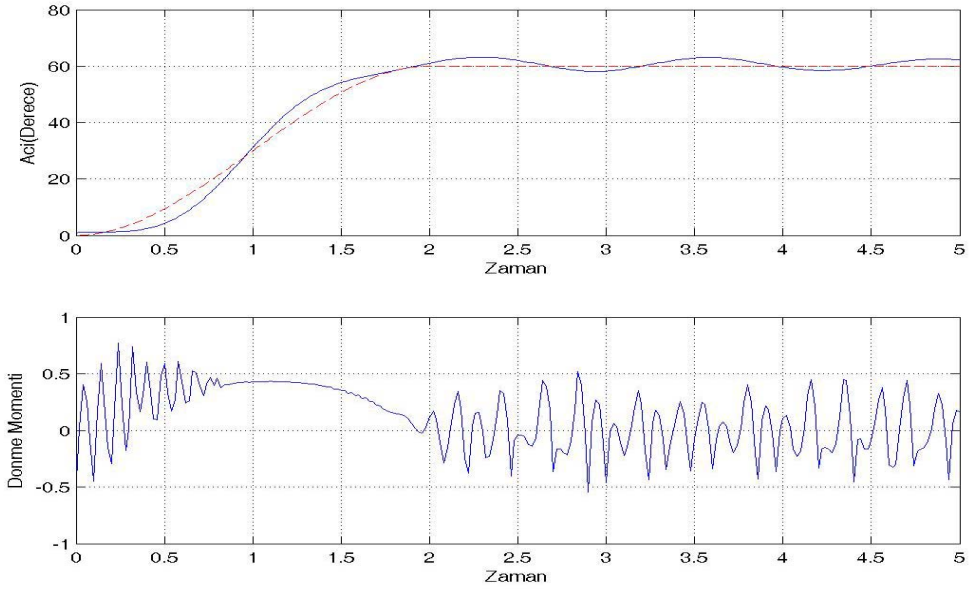


Şekil 7.6: Tek uzuvlu esnek robot kolun durum geri beslemesiz referans takibi

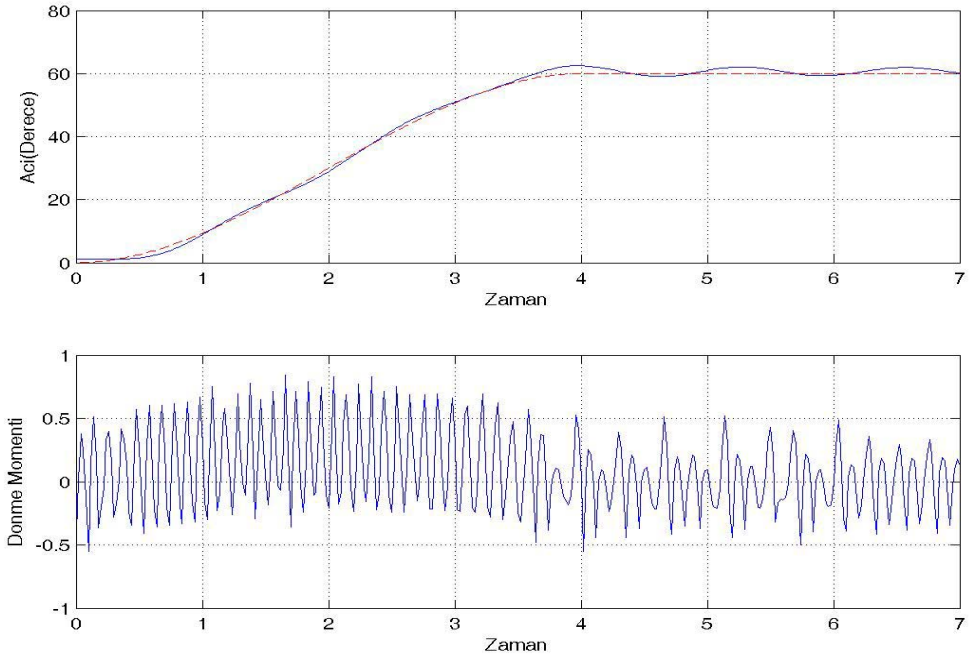


Şekil 7.7: Tek uzuvlu esnek robot kolun durum geri beslemeli referans takibi

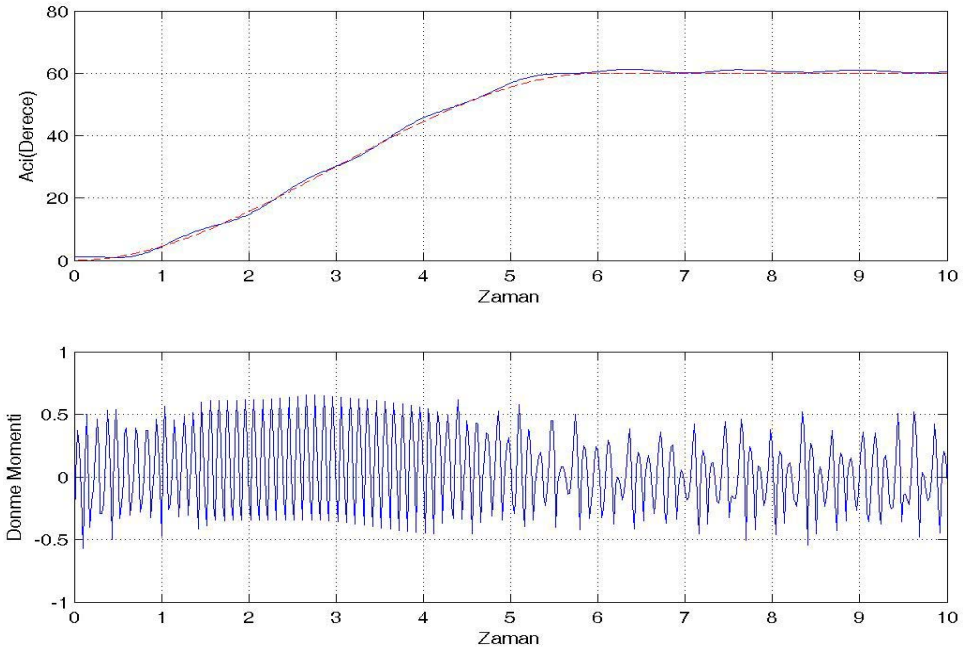
Durum geri beslemeli ÇKYSA kontrolör, daha önce tanımlanan referans yörüngeyi takip etmesi için tasarlanmıştır. Yapay Sinir Ağı Kontrolörünün cevabı ilk olarak t=2s ve sonrasında sırasıyla t=4s, t=6s süre ile takip etmesi istenmiştir.



Şekil 7.8: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=2s İçin Yörünge Takibi



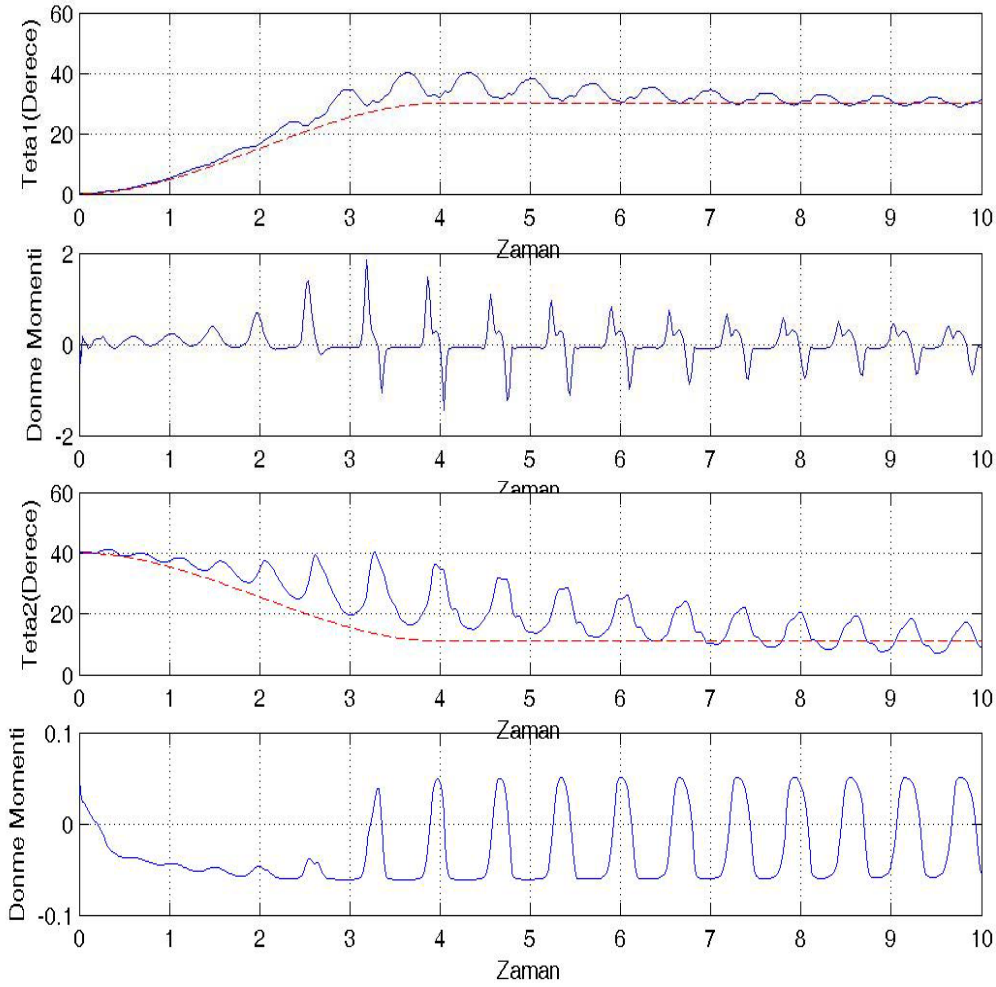
Şekil 7.9: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=4s İçin Yörünge Takibi



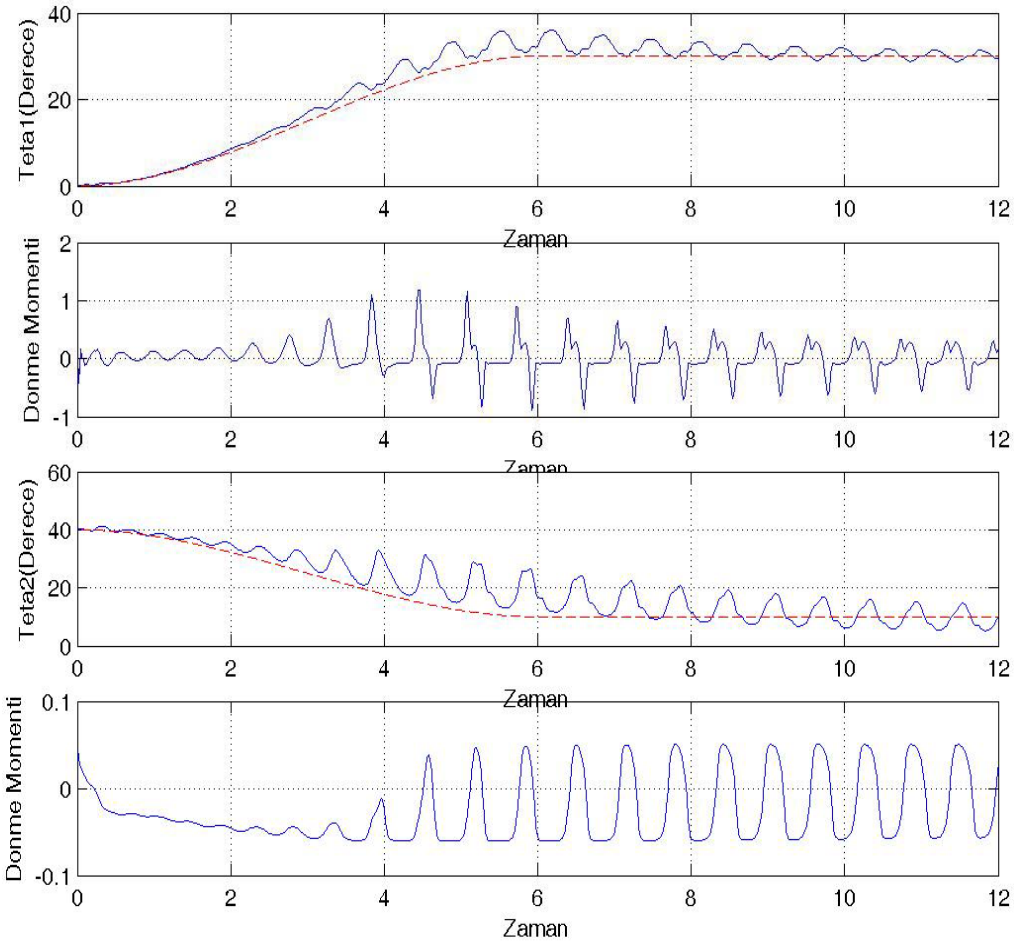
Şekil 7.10: Tek Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=6s İçin Yörünge Takibi

Aynı işlemler iki uzuvlu robot kol için de uygulanmış, elde edilen YSA kontrolörün sırasıyla t=4s, t=6s ve t=8s süreleri için yörünge takipleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

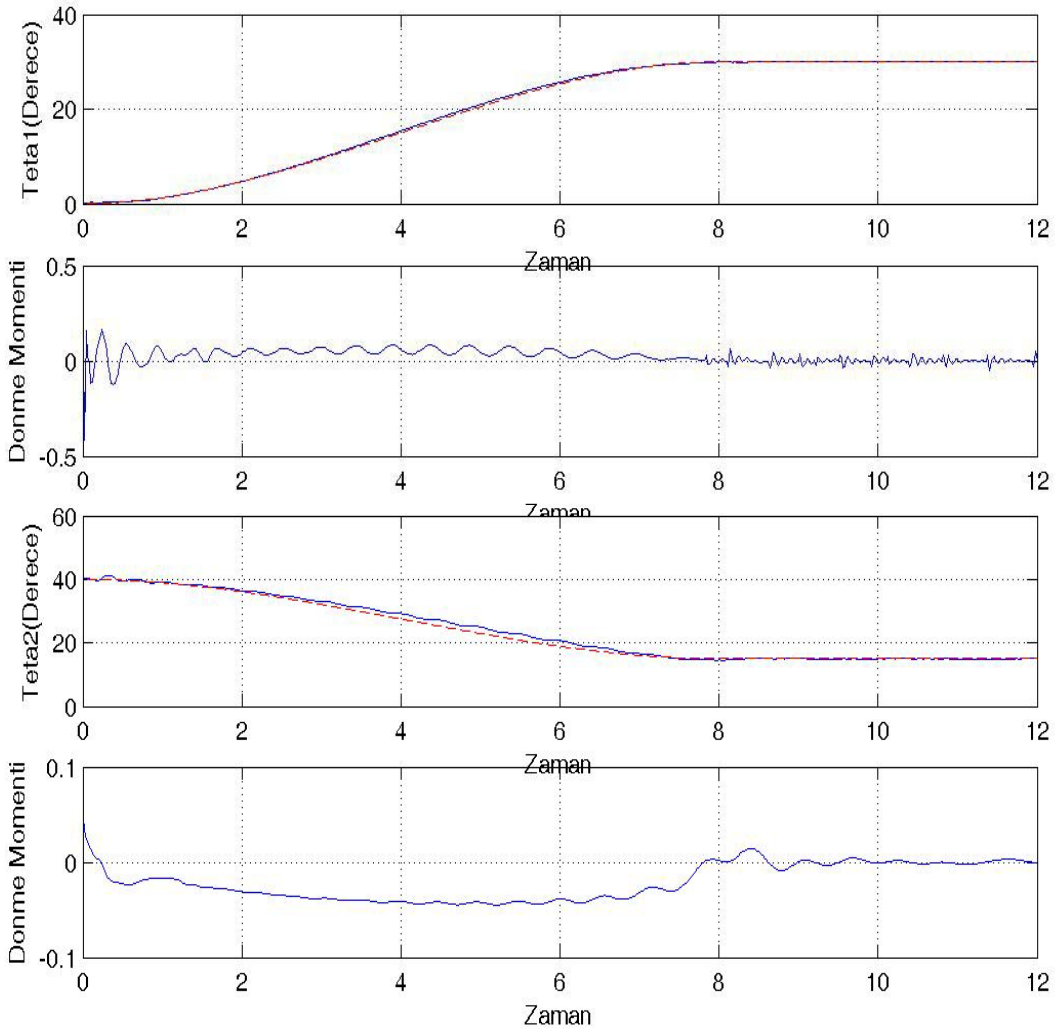
Ancak bu sonuçlar uç nokta salınımlarını gidememiştir. ÇKYSA nın tekrar eğitilmesi sonucu bulunan sonuçlar ise Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 de sırasıyla t=2s, t=3s, t=4s ve t=5s süreleri için bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar yeteri kadar tatmin edicidir.



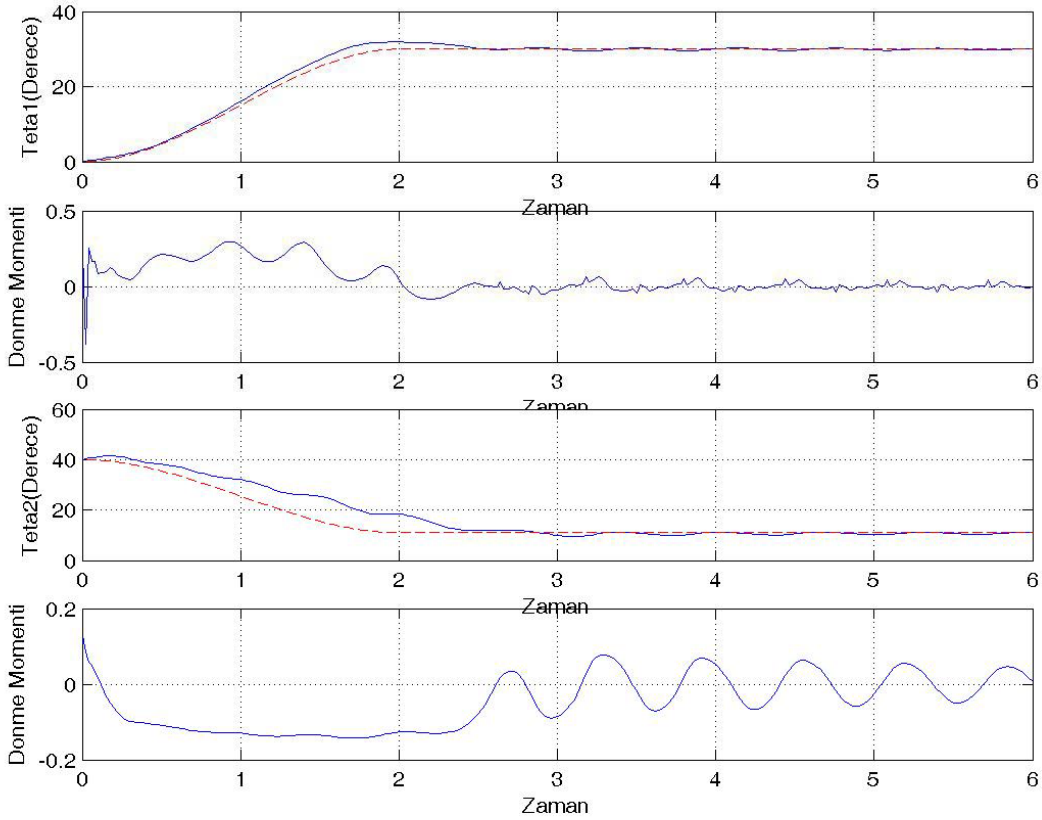
Şekil 7.11: İki uzuvlu esnek robot kolun t=4s için yörünge takibi



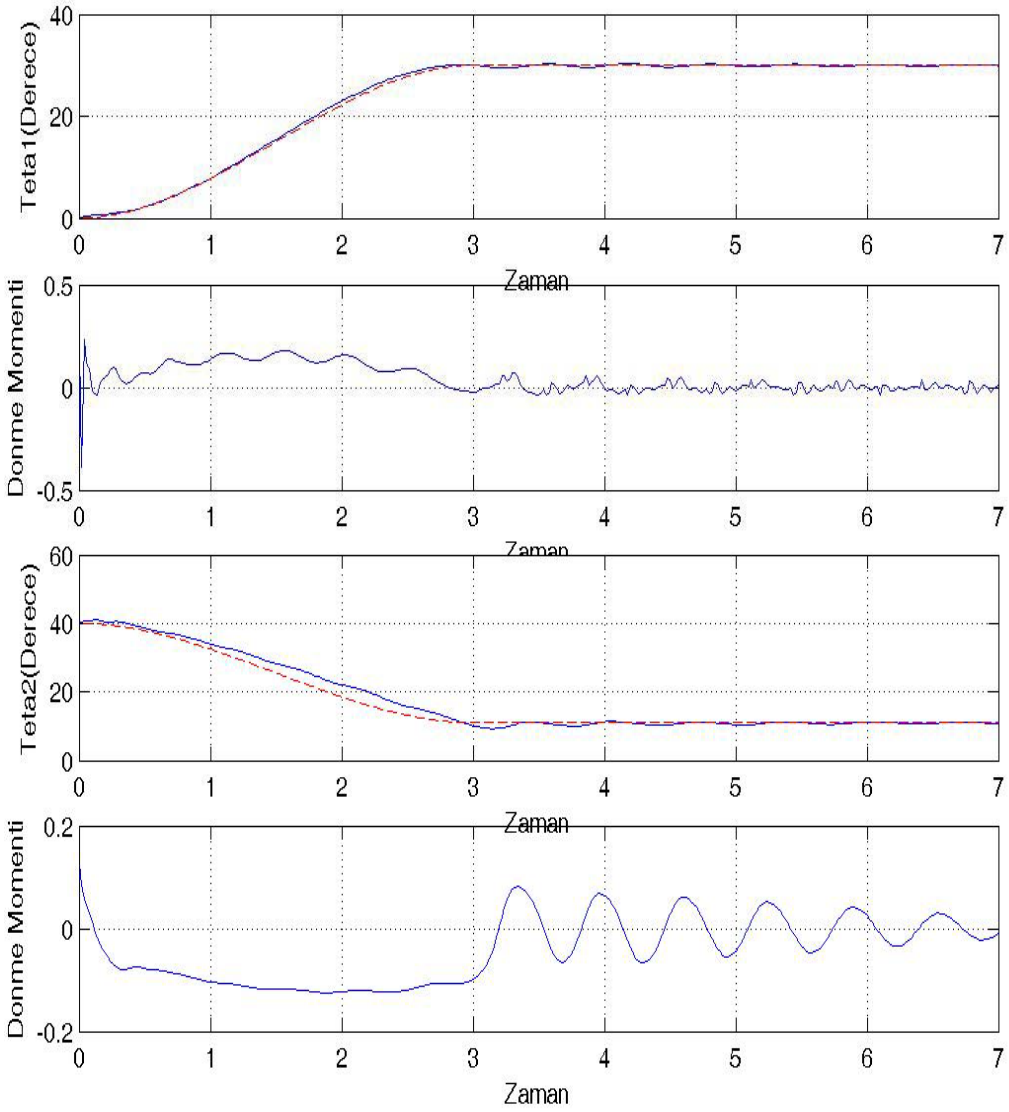
Şekil 7.12: İki uzuvlu esnek robot kolun t=6s için yörünge takibi



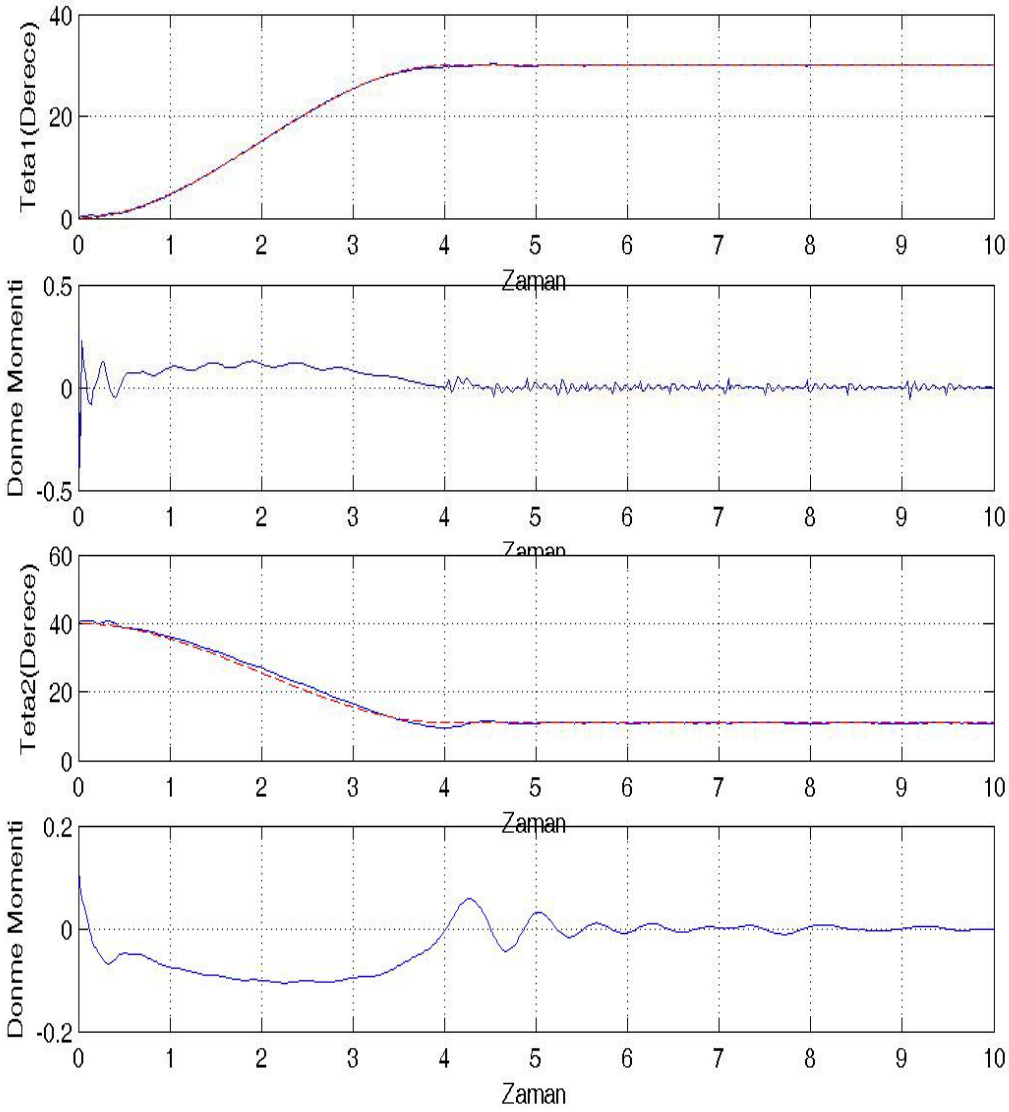
Şekil 7.13: İki uzuvlu esnek robot kolun t=8s için yörünge takibi



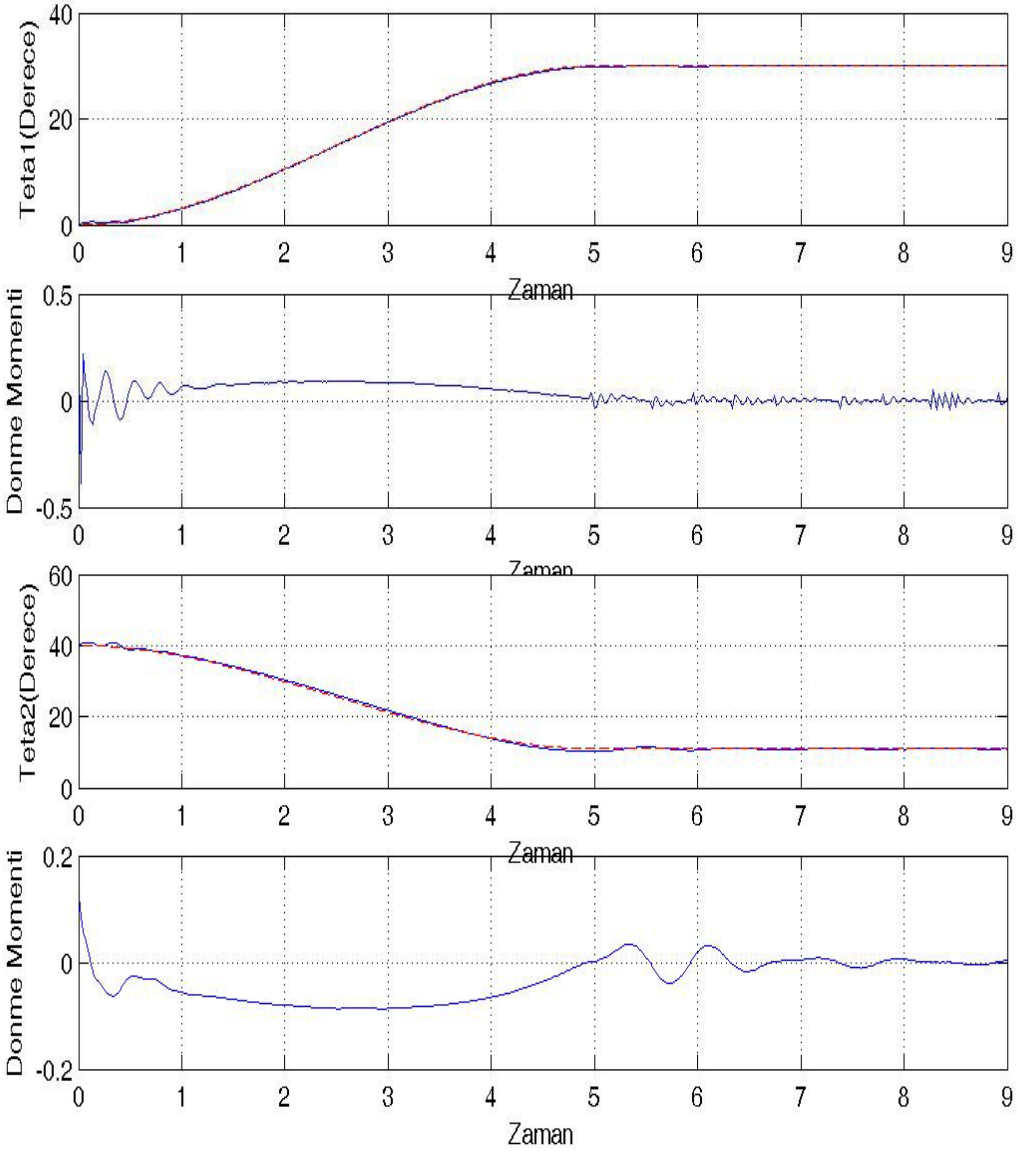
Şekil 7.14: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=2s İçin Yörünge Takibi



Şekil 7.15: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=3s İçin Yörünge Takibi



Şekil 7.16: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=4s İçin Yörünge Takibi



Şekil 7.17: İki Uzuvlu Esnek Robot Kolun t=5s İçin Yörünge Takibi

Hem tek uzuvlu hem de iki uzuvlu esnek robot kolların kontrolü amaçlı olarak sistemini eğitirken iki farklı yöntem izlenmiştir. İlk olarak her iki esnek kolun uç noktalarının koordinatları NASTRAN üzerinden alınmıştır, ancak bu durumda kontrolör olarak kullanılan YSA yapısı çok yüksek oranlarda sapmalar yapmaktaydı bunun sebebi de esnek robot kolun karmaşık dinamik yapısının sadece uç nokta koordinatları kullanılarak öğrenilmesinin zor olmasıdır. Dinamik yapıyı

anlayabilecek daha zengin içerikli veri elde etmek gerekmekte idi bunun için de daha önce modelleme yöntemi olarak kullanılan "Sanal Uzuvlar, Pasif Eklemler" yönteminin öngördüğü sanal uzuvların uç nokta koordinatları üzerinden veri toplanmış böylece ÇKYSA pasif yay ve sönüm elemanlarının dinamik davranışlarına da yakınsayabilmiştir.

Sonuç olarak düzlemsel olarak hareket eden esnek robot kolları için iki farklı modelleme yöntemi incelenmiş, genel yaklaşıma alternatif olarak geliştirilmiş "Sanal Uzuvlar, Pasif Eklemler" yöntemi anlaşılmasının kolay olması ve dinamik matematiksel modelin elde edilmesinde getirdiği kolaylıkları ile ortaya konmuştur **(Yoshikawa ve Hosada, 1991)**. Rijit robotların yörünge takibi kontrolü amacı ile kullanılan YSA kontrolörün tanıtılması da yapılmıştır **(Hitam ve Gill, 2000)**. Çeşitli sebeplerden dolayı Deney düzeneği tamamlanamamış olsada, bilgisayar ortamında yaratılmış olan benzetim modeli esneklik davranışınıda kapsayacak şekilde kurulmuş ve sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir.Görülmüştür ki "Sanal Uzuvlar, Pasif Eklemler" yöntemi esnek robot kolları modellemek için kullanılabilir bir yöntemdir ve esnek robot kolların kontrolü problemi çözülebilmektedir. Bu çalışmayı farklı kılan nokta ise daha önce literatürde yapılmamış olan "Sanal Uzuvlar, Pasif Eklemler" yöntemini öngördüğü bir bilgisayar benzetim modeli oluşturulup, ÇKYSA kullanılarak kontrol uygulanmıştır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda bu kontrol yönteminin, hazırlanacak olan düzgün çalışan bir deney düzeneği üzerinde denenmesi ve geçerliliğinin, deney düzeneğinde kullanılan diğer donanımların da getireceği dinamikler göz önüne alınarak çalışıp çalışmadığının irdelenmesi gerekmektedir. Hazılanacak olan veri deney düzeneğinde uç nokta koordinatlarının hesaplanabilmesi için işlem gücü yüksek bir bilgisayar ile birlikte yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılarak görüntü işleme yöntemleri uygulanabilir. Ayrıca tüm çalışma boyunca düzlemsel hareket yapıldığı öngörülmüştür, bir sonraki aşama olarak üç boyutta hareket eden esnek robot kolların modellenmesi, tasarlanması ve kontrolü problemlerinin çözülmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Arslan, H., 1999. Yapay Sinir Ağları ile Robotlarda Hareket Kontrolü, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Chaichanavong, P. and Banjerdpongchai, D., 1999. A Case Study of Robust Control Experiment on One-link Flexible Robot Arm , *IEEE International Conference on Decision & Control,* Phoenix, Arizona, USA, December, 4319-4324.

Delice, İ. İ., 2005. Taşıtın Yanal ve Doğrusal Kontrolü için Sürücünün Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gamarra-Rosado, V. O. and Yuhara, E. A. O., 1999. Dynamic Modeling and Simulation of a Flexible Robotic Manipulator, *Robotica,* **17,** 523-528.

Hastings, G. G. and Book, W. J., 1986. Verification of a linear dynamic model for flexible robotic manipulators, *IEEE International Conference on Robotic and Automation,* Atlanta, Georgia, USA, April 1024-1029.

Hitam, M. S. and Gill, K. F., 2000. *Identification* and Control Of a Robot Using a Neural Network , *TENCON 2000,* Kuala Lumpur, September 24-27, 308-314.

Hughes, P. C., 1987. Space Structure *vibration* modes: How many exist? Which are important?, *IEEE Control System Magazine,* **7,** 61-64.

İnan, Mustafa, 1981. Cisimlerin Mukavemeti, Birsen Yayınevi , İstanbul.

Jen, C. W., Nicosia, S. and Valigi, P., 1996. Theoretical and Experimental Study of Dynamics and Control of a Two-link Flexible Robot Manipulator of Revolute Joints , *IEEE Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory,* Baton Rouge, LA, USA, March 31-April 2, 237-241.

Martins, J. M., Mohammed, Z., Tokhi, M. O., Sa da Costa, J. and Botto, M. A., 2003. Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator system, *IEE Proc.-Control Theory Application,* **150 (4),** 401-411.

Meirovitch, L., 1967. Analiytical Methods in Vibrations , MacMillan Company, New York.

Moallem, M., Patel, R. V. and Khorasani, K., 2000. Flexible Link Robot Manipulators: Control Techniques and Structural Design, Springer-Verlag, London.

Nicosia, S., Valigi, P. and Zaccarian, L., 1996. Dynamic modelling of a two link flexible robot and experimental validation , *IEEE International Conference on Robotic and Automation,* Minneapolis, Minnesota, USA, April, 1953-1958.

Nguyen, H. T., Prasad N. R., Walker, C. L. and Walker, E. A., 2002. A First Course in Fuzzy and Neural Control, CRC Press, Florida.

Robinett, III R. D., Dohrmann, C. R., Eisler, G. R., Feddema, J. T., Parker, G. G., Wilson, D. G. and Stokes, D., 2002. Flexible Robot Dynamics and Control, Kluwer Academic Press, New York.

Sooraksa, P. and Chen, G., 1996. Mathematical Modeling of Flexible Robot Arm , *IEEE International Conference on Control Applications,* Dearborn, MI, USA, September 15-18, 960-964.

Tanomaru, J. and Omatu, S., 1992. Process Control by On-Line Trained Neural Controler, *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* **39 (6) ,** 511-521.

Timoshenko, S.P., Weaver, W. Jr. and Young, D. H., 1989. Vibration Problems in Engineering, John Wiley & Sons, New York.

Tokhi, M. O. and Azad, A. K. M., 1997. Design and development of an experimental flexible manipulator system, *Robotica,* **15,** 283-292.

Tsoukalas, L. H. and Uhrig, R. E., 1997. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering , John Wiley & Sons, New York.

Wang, F. Y. and Gao, Y., 2003. Advanced Studies of Flexible Robotic Manipulators, World Scientific, London.

Yoshikawa, T. and Hosada, K., 1991. Modeling of Flexible Manipulators Using Virtual Rigid Links and Passive Joints , *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91,* Osaka, Japan, Nov. 3-5, 967-972.

Yoshikawa, T. and Matsudera, K., 1994. Experimental Study on Modeling of Flexible Manipulators Using Virtual Joint Model , *Preprints of the Fourth IFAC Symposium on Robot Control,* Capri, Italy, September 19-21, 427-432.

Yoshikawa, T., Ohta, A. and Kanaoka, K., 2001. State Estimation and Parameter Identification of Flexible Manipulators Based on Visual Sensor and Virtual Joint Model , *IEEE International Conference on Robotic and Automation,* Seoul, Korea, May 21-26, 2840-2845.

Yurtoğlu, Hasan, 2005. Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellenmesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler için Türkiye Örneği, DPT, Ankara, Turkey.

EKLER

EK A

JACOBIAN MATRISI

Bölüm üçte kinematik olarak önemli bir ifade olan Jacobian matrisi ile alakalı olan 3.33 numaralı denklem verilmişti. Bu denklem uç noktaya ait değerler için örnek olarak yazılmıştır. Jacobian matrisinin her bir elemanının tam ifadesi aşağıdaki gibidir

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{11}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{12}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{13}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{21}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{22}} & \frac{\partial X_0}{\partial \theta_{23}} \\ \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{11}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{12}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{13}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{21}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{22}} & \frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{23}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.33)}$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{11}}=J_{11}=-l_{11}Sin\theta_{11}-l_{12}Sin(\theta_{11}+\theta_{12})-l_{13}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13})-l_{21}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) \quad \textbf{(A.1)}$$
$$-l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22})-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{12}}=J_{12}=-l_{12}Sin(\theta_{11}+\theta_{12})-l_{13}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13})-l_{21}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) \quad \textbf{(A.2)}$$
$$-l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22})-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{13}}=J_{13}=-l_{13}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13})-l_{21}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21})-l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) \quad \textbf{(A.3)}$$
$$-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{21}}=J_{14}=-l_{21}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21})-l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) \quad \textbf{(A.4)}$$
$$-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{22}}=J_{15}=-l_{22}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22})-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(A.5)}$$

$$\frac{\partial X_0}{\partial \theta_{23}}=J_{16}=-l_{23}Sin(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(A.6)}$$

$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{11}}=J_{21}=l_{11}Cos\theta_{11}+l_{12}Cos(\theta_{11}+\theta_{12})+l_{13}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13})+l_{21}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) \quad \textbf{(A.7)}$$
$$+l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22})+l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{12}}=J_{22}=l_{12}Cos(\theta_{11}+\theta_{12})+l_{13}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13})+l_{21}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) \quad \textbf{(A.8)}$$
$$+l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22})+l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{13}} = J_{23} = l_{13}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}) + l_{21}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) \quad \textbf{(A.9)}$$
$$+l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) + l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{21}} = J_{24} = l_{21}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}) + l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) \quad \textbf{(A.10)}$$
$$+l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23})$$

$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{22}} = J_{25} = l_{22}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}) + l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(A.11)}$$

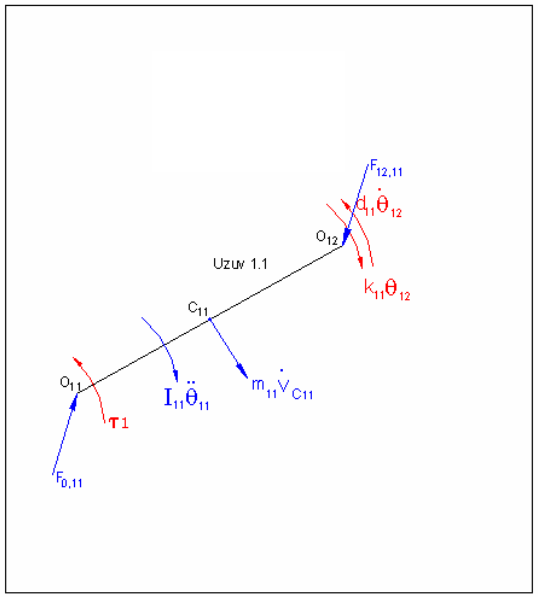
$$\frac{\partial Y_0}{\partial \theta_{23}} = J_{26} = l_{23}Cos(\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}+\theta_{21}+\theta_{22}+\theta_{23}) \quad \textbf{(A.12)}$$

EK-B

KUVVET VE MOMENT EŞİTLİKLERİ

Üçüncü bölümde dinamik davranış denklemini nasıl elde ettiğimizi gösterirken örnek olarak 1.2 numaralı uzvun serbest cisim diyagramını çizip, kuvvet ve moment eşitliklerini yazmıştık. Aşağıda tüm uzuvların kuvvet ve Moment denklemleri bulunmaktadır.

Uzuv 1.1



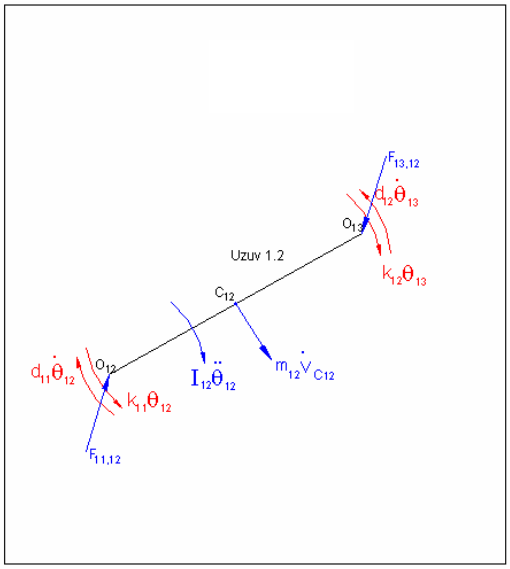
Şekil B.1: Uzuv 1.1 Serbest Cisim Diyagramı

$$\sum F = 0 \Rightarrow$$
$$\vec{F}_{0,11} - \vec{F}_{12,11} - m_{11}\dot{\vec{V}}_{C_{11}} = 0 \quad \textbf{(B.1a)}$$

$$\sum M_{C_{11}} = 0 \Rightarrow$$

$$\tau_1 - k_{11}\theta_{12} - d_{11}\dot{\theta}_{12} - \vec{F}_{0,11} \times \left(\overrightarrow{O_{11}C_{11}}\right) - \vec{F}_{12,11} \times \left(\overrightarrow{O_{12}C_{11}}\right) - \mathrm{I}_{11}\ddot{\theta}_{11} = 0 \qquad \textbf{(B.1b)}$$

Uzuv 1.2



Şekil B.2: Uzuv 1.2 Serbest Cisim Diyagramı

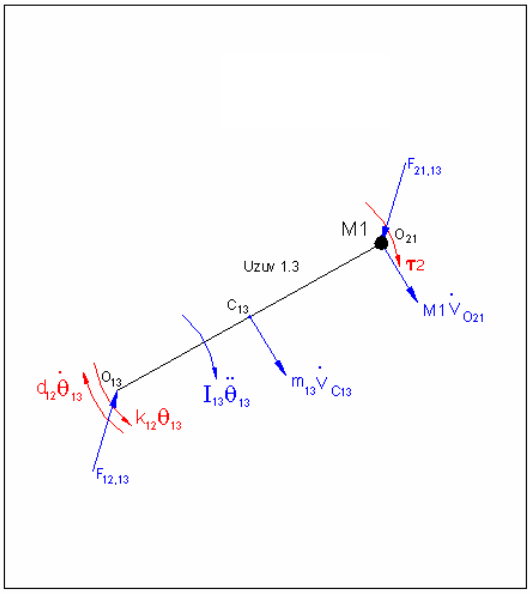
$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$\vec{F}_{11,12} - \vec{F}_{13,12} - m_{12}\dot{\vec{V}}_{C_{12}} = 0 \qquad \textbf{(B.2a)}$$

$$\sum M_{C_{12}} = 0 \Rightarrow$$

$$k_{11}\theta_{12} + d_{11}\dot{\theta}_{12} - k_{12}\theta_{13} - d_{12}\dot{\theta}_{13} - \vec{F}_{11,12} \times \left(\overrightarrow{O_{12}C_{12}}\right) - \vec{F}_{13,12} \times \left(\overrightarrow{O_{13}C_{12}}\right) - \mathrm{I}_{12}\ddot{\theta}_{12} = 0 \qquad \textbf{(B.2b)}$$

Uzuv 1.3



Şekil B.3: Uzuv 1.3 Serbest Cisim Diyagramı

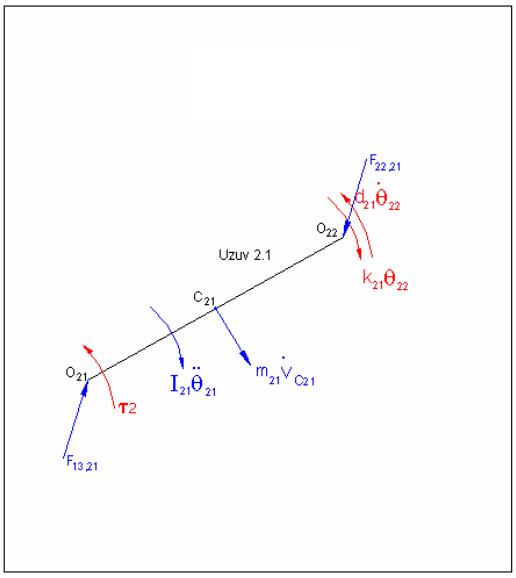
$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$\vec{F}_{12,13} - \vec{F}_{21,13} - m_{13}\dot{\vec{V}}_{C_{13}} - M_1\dot{\vec{V}}_{O_{21}} = 0 \qquad \textbf{(B.3a)}$$

$$\sum M_{C_{13}} = 0 \Rightarrow$$

$$-\tau_2 + k_{12}\theta_{13} + d_{12}\dot{\theta}_{13} - \vec{F}_{12,13} \times \left(\overrightarrow{O_{13}C_{13}}\right) - \vec{F}_{21,13} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{13}}\right) - M_1\dot{\vec{V}}_{O_{21}} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{13}}\right) - \mathrm{I}_{13}\ddot{\theta}_{13} = 0 \qquad \textbf{(B.3b)}$$

Uzuv 2.1



Şekil B.4: Uzuv 2.1 Serbest Cisim Diyagramı

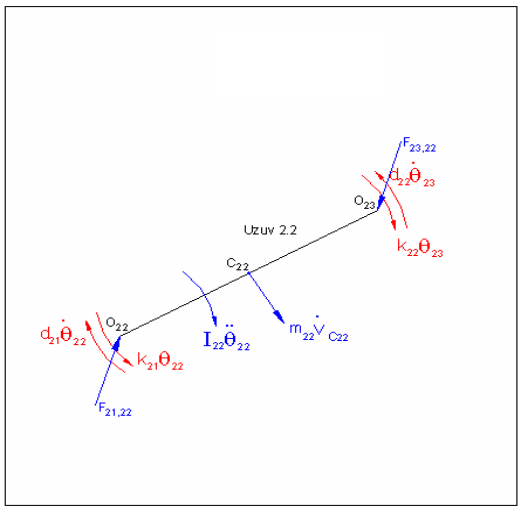
$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$\vec{F}_{13,21} - \vec{F}_{22,21} - m_{21}\dot{\vec{V}}_{C_{21}} = 0 \qquad \textbf{(B.4a)}$$

$$\sum M_{C_{21}} = 0 \Rightarrow$$

$$\tau_2 - k_{21}\theta_{22} - d_{21}\dot{\theta}_{22} - \vec{F}_{13,21} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{21}}\right) - \vec{F}_{22,21} \times \left(\overrightarrow{O_{22}C_{21}}\right) - \mathrm{I}_{21}\ddot{\theta}_{21} = 0 \qquad \textbf{(B.4b)}$$

Uzuv 2.2



Şekil B.5: Uzuv 2.2 Serbest Cisim Diyagramı

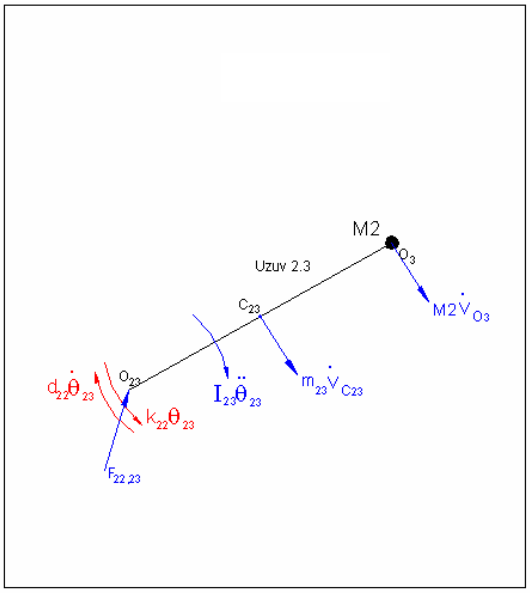
$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$\vec{F}_{21,22} - \vec{F}_{23,22} - m_{22}\dot{\vec{V}}_{C_{22}} = 0 \qquad \textbf{(B.5a)}$$

$$\sum M_{C_{21}} = 0 \Rightarrow$$

$$k_{21}\theta_{22} + d_{21}\dot{\theta}_{22} - k_{22}\theta_{23} - d_{22}\dot{\theta}_{23} - \vec{F}_{21,22} \times \left(\overrightarrow{O_{22}C_{22}}\right) - \vec{F}_{23,22} \times \left(\overrightarrow{O_{23}C_{22}}\right) - \mathrm{I}_{22}\ddot{\theta}_{22} = 0 \qquad \textbf{(B.5b)}$$

Uzuv 2.3



Şekil B.6: Uzuv 2.3 Serbest Cisim Diyagramı

$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$\vec{F}_{22,23} - m_{23}\dot{\vec{V}}_{C_{23}} - M_2\dot{\vec{V}}_{O_3} = 0 \qquad \textbf{(B.6a)}$$

$$\sum M_{C_{23}} = 0 \Rightarrow$$

$$k_{22}\theta_{23} + d_{22}\dot{\theta}_{23} - \vec{F}_{22,23} \times \left(\overrightarrow{O_{23}C_{23}}\right) - M_2\dot{\vec{V}}_{O_3} \times \left(\overrightarrow{O_{21}C_{23}}\right) - \mathrm{I}_{23}\ddot{\theta}_{23} = 0 \qquad \textbf{(B.6b)}$$

ÖZGEÇMİŞ

Erdal GENÇ, 1979 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğretimini Malatya'da tamamladı. Orta ve Lise eğitimini Turgutlu Manisa'da 1997 yılında tamamladıktan sonra 2001 yılında Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden Mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sistem Dinamiği ve Kontrol Programında yüksek lisans eğitimi almaya başladı. Yüksek Lisans Eğitimi süresince bina otomasyonu sektöründe üç yıl süreyle yurtiçi ve yurtdışı çeşitli projelerde çalıştı. Erdal GENÇ İngilizce bilmektedir.