İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSAN OPERATÖRLERİN AKILLI SİSTEMLERLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Özkan ÇELİK

Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı : SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

HAZİRAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSAN OPERATÖRLERİN AKILLI SİSTEMLERLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Özkan ÇELİK
(503041612)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet KUZUCU

Doç. Dr. Ata MUĞAN

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yaparken sağladıkları eşsiz destek ile kendimi tamamen bu çalışmaya verebilmemi sağlayan TÜBİTAK'a ve BAYG'a (Bilim Adamı Yetiştirme Grubu) teşekkürlerimi sunarım. BAYG'ın Yurt İçi Yüksek Lisans Bursu olmadan bu çalışmayı yapmam çok daha zor olurdu.

Tez çalışmam boyunca hiç eksilmeyen desteği ve yol göstericiliğinden ötürü, kendisiyle çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum danışmanım Sayın Doç. Dr. Şeniz ERTUĞRUL'a;

İki yıl boyunca laboratuvarda aynı odayı paylaşmaktan mutluluk ve onur duyduğum, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen değerli dostum Atilla KILIÇARSLAN'a;

Sistem Tanıma derslerini takip ederek bu konuda bilgi edinmemde pay sahibi olan Sayın Prof. Dr. Leyla GÖREN'e;

Deney düzeneğini kurarken ihtiyaç duyduğum önemli birçok parçayı büyük bir özenle imal eden, laboratuvarımız teknisyeni Sayın Ahmet SAVAŞ'a;

Çeşitli konularda yardımlarını esirgemeyen, başta İlker DELİCE olmak üzere tüm arkadaşlarıma;

Zamanlarını ayırarak operatörlük yapmayı kabul eden ve deney düzeneğini kullanıp görüşlerini bildirerek hem veri toplamamda hem de arayüzü geliştirmemde bana yardımcı olan Atilla KILIÇARSLAN, İlker DELİCE, Yavuz ŞAHİN, Mesut ACAR, İlker ÖZELGİN, Sinem ÖZTÜRK, Büşra YILMAZ, Burak AŞURECİLER ve Cevdet OKUTAN'a;

Son olarak, bana sağladıkları büyük manevi destek ve gösterdikleri sabır sebebiyle ablam Özlem F. ÇELİK'e ve nişanlım Şule AYTAŞKIN'a sonsuz ve içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Haziran 2006 Özkan ÇELİK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **ix**
ÖZET **x**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**
1.1 İnsan Operatör Modeli İhtiyacı ve Uygulama Alanları 2
1.2 Literatürdeki Çalışmalar 3
1.3 Amaç ve Kapsam 4

2. DENEY DÜZENEĞİ **6**
2.1 Donanım 6
2.1.1 Mekanik Konstrüksiyon 6
2.1.2 Motor ve Sürücü Devre 8
2.1.3 Diğer Donanımlar 9
2.2 Yazılım 11
2.2.1 Kamera Programı 12
2.2.2 Ana Program 15
2.2.3 Operatör Arayüzü ve Veri Toplama Oturumları 19
2.2.4 Operatörler 24

3. MODELLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE TEORİ **25**
3.1 Kontrol Çevrimi ve Giriş-Çıkış İşaretleri 27
3.2 Sistem Tanıma 29
3.2.1 Referans İşaret ve Giriş İşareti 29
3.2.2 Koherans Analizi 32
3.2.3 Parametrik Yöntemler İçin Sürekli Uyaranlık Mertebesi Analizi 33
3.2.4 Kullanılan ARX Model Yapısı 34
3.2.5 Yerel Doğrusal Modellerin Bir Bulanık Mantık Sistemi Kullanılarak Birleştirilmesi 36
3.3 Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkartım Sistemi (ANFIS) 37
3.4 Modellerin Öngörü Başarısı 38

4. MODELLEME SONUÇLARI **41**

4.1 Koherans Analizi 41
4.2 Yerel ARX Modeller 42
4.3 Bulanık Mantık Sistemi ile Birleştirilerek Elde Edilen Genel Model 49
4.4 ANFIS Kullanılarak Oluşturulan Model 53
4.5 Modellerin Karşılaştırılması 55

5. MODELLERİN KONTROLÖR OLARAK KULLANILMASI – SONUÇLAR VE ÖNERİLER 58
5.1 Modellerin Kontrolör Olarak Kullanılması ile Elde Edilen Sonuçlar 58
5.2 Öneriler 61

KAYNAKLAR 62

ÖZGEÇMİŞ 64

KISALTMALAR

ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkartım Sistemi – USBÇS)
ARX : Auto Regressive with eXogeneous inputs
PRBS : Pseudo-Random Binary Signal (Sanki Rastgele İkili İşaret – SRİİ)
OP1 : Operatör 1
PWM : Pulse Width Modulation (Darbe Genişliği Modülasyonu – DGM)
AIC : Akaike's Information Criterion (Akaike'nin Bilgi Ölçütü – ABÖ)
MDL : Minimum Description Length (Minimum Tanım Uzunluğu – MTU)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Farklı parametre değerleri için 15º senaryosunda öngörü başarıları 49
Tablo 4.2: Op2 için elde edilen bulanık geçişli ARX model kullanılarak farklı operatörlerin "Rastgele" senaryoları verileri üzerinden hesaplanan öngörü başarıları 51
Tablo 4.3: Op1 için elde edilen ANFIS model kullanılarak farklı operatörlerin "Rastgele" senaryoları verileri üzerinden hesaplanan öngörü başarıları 54
Tablo 4.4: Farklı modelleme yöntemlerinin öngörü başarıları 57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Mekanik konstrüksiyon 7
Şekil 2.2: Motor sürücü devresi 9
Şekil 2.3: Kamera ve sabitleme konstrüksiyonu 10
Şekil 2.4: Operatör ekranı ve kontrol çubuğu 11
Şekil 2.5: Kamera programı 13
Şekil 2.6: Kalibrasyon alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi 14
Şekil 2.7: Uç konumu çıkartımı alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi 14
Şekil 2.8: Veri toplama alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi 15
Şekil 2.9: Operatör arayüzünde yürüyen işlemleri gösteren blok diyagram 20
Şekil 2.10: Operatör arayüzü – operatör bölümü 21
Şekil 2.11: Operatör arayüzü – kullanıcı bölümü 21
Şekil 2.12: Bir veri toplama oturumunda kaydedilen referans işareti 22
Şekil 3.1: Hemen hemen doğrusal insan operatör modeli 25
Şekil 3.2: (a) Hata yok edici sistem, (b) İzleyici sistem 28
Şekil 3.3: Modelleme için kabul edilen yapı 29
Şekil 3.4: 20 Hz'te en az 40 örnekleme zamanı boyunca (2 saniye) sabit kalan PRBS'in güç spektrumu 30
Şekil 3.5: Kaydedilen veri dosyalarından giriş-çıkış verilerinin elde edilmesi 31
Şekil 3.6: 15º senaryosunda kaydedilmiş örnek operatör davranışı 32
Şekil 3.7: ARX model yapısı 35
Şekil 3.8: Yerel ARX modellerin bir bulanık sistemle birleştirilmesi 38
Şekil 3.9: ANFIS ile oluşturulan model 39
Şekil 4.1: (e, u) için elde edilen koherans 42
Şekil 4.2: Model mertebesinin belirlenmesi 43
Şekil 4.3: Operatör 1 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler ve ortalamaları) 46
Şekil 4.4: Operatör 2 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler ve ortalamaları) 47
Şekil 4.5: Operatör 3 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler ve ortalamaları) 47
Şekil 4.6: Operatör 4 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler ve ortalamaları) 48
Şekil 4.7: Operatör 5 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler ve ortalamaları) 48
Şekil 4.8: Oluşturulan bulanık sistemin giriş üyelik fonksiyonları 50
Şekil 4.9: Bulanık çıkartım sisteminin yapısal diyagramı 51
Şekil 4.10: Sonsuz adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve bulanık geçişli modelden hesaplanan kontrol işareti 52

Şekil 4.11: 5 adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve bulanık geçişli modelden hesaplanan kontrol işareti 53
Şekil 4.12: Sonsuz adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve ANFIS modelden hesaplanan kontrol işareti 56
Şekil 5.1: Ortalama ARX model ile kontrol edilen sistem davranışı 59
Şekil 5.2: Bulanık geçişli ARX model ile kontrol edilen sistem davranışı 59
Şekil 5.3: ANFIS model ile kontrol edilen sistem davranışı 60

SEMBOL LİSTESİ

$\gamma_{xy}^2(f)$	: $x(t)$ giriş işareti ile $y(t)$ çıkış işareti için koherans fonksiyonu
$G_{xx}(f)$	: $x(t)$ işaretinin oto spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{xy}(f)$	: $x(t)$ ve $y(t)$ işaretlerinin çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{xx}(f)$	: $x(t)$ işaretinin tek taraflı oto spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{xy}(f)$	: $x(t)$ ve $y(t)$ işaretlerinin tek taraflı çapraz spektral yoğunluk fonksiyonu
$r_e(\tau)$	: $e(t)$ işaretinin otokorelasyonu
$R_e(n)$	: $e(t)$ işareti için kovaryans matrisi
$A(q)$	: ARX model yapısı için çıkış polinomu
$B(q)$	: ARX model yapısı için giriş polinomu
na	: ARX model yapısı için çıkış mertebesi
nb	: ARX model yapısı için giriş mertebesi
nk	: ARX model yapısı için giriş-çıkış arasındaki gecikme mertebesi

İNSAN OPERATÖRLERİN AKILLI SİSTEMLERLE MODELLENMESİ

ÖZET

İnsan günlük yaşamında birçok kontrol görevini çok farkında olmasa ve çok büyük çaba harcamasa da başarıyla yerine getirmektedir. Bir cismi bir konumdan alınıp istenen başka bir konuma istenen yönelim ve duruş biçiminde yerleştirmek gibi görece basit görevlerin yanı sıra, bir vinç ile yük taşımak, bir aracı sürmek veya bir uçağı kontrol etmek gibi zor görevler de bunlara örnek oluşturmaktadır. Bir makineyi kontrol etmekte uzmanlaşmış olan kişilere operatör denmektedir. Operatör davranışlarının modellenmesi ise beceri kazandırmaya yönelik eğitim veya çeşitli uyarı sistemlerinin geliştirilmesi gibi çeşitli alanlarda uygulama imkânı bulmaktadır.

Bir kontrolcü olarak insanın davranışı çoğu zaman doğrusallıktan oldukça uzaktır. İnsan operatör görevleri tekrarlayarak tecrübe edinip öğrenebilmekte ve davranışını geliştirebilmekte, hatta kontrol ettiği sistemin dinamiğinde oluşabilecek değişimlere göre kendisini uyarlayabilmektedir. Bu özellikleri onun çok farklı kontrol görevlerini başarıyla yerine getirebilmesini sağladığı gibi, modellenmesini de diğer dinamik sistemlere oranla daha zor kılmaktadır.

Bu tez çalışması iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde insan operatörün kontrol edebileceği ve bu kontrol davranışının modellemede kullanılabilmesi için veri kaydının yapılabileceği bir deney düzeneği oluşturulmuştur. İkinci bölümde ise bu düzenek kullanılarak çeşitli operatörlerden veri toplanmış ve bu verilerden yola çıkılarak farklı modelleme yöntemleriyle modeller elde edilmiştir.

Deney düzeneğinin mekanik kısmı, bir doğru akım motoru tarafından tahrik edilen esnek bir çubuktan oluşmaktadır. Operatörlere verilen görev, çubuğun uç konumunu 180º'lik çalışma alanı içerisinde beliren referans konumları takip edecek şekilde kontrol etmeleri ve bunu yaparken mümkün olduğunca hızlı ve çubukta minimum salınıma yol açacak şekilde davranmalarıdır. Operatörler bu görevi, düzeneği üstten görüntüleyen bir kamera ile bilgisayar ekranında oluşturulan bir arayüzü ve bir kontrol çubuğunu (joystick) kullanarak yerine getirmektedirler. Çubuğun uç konumu görüntü işleme teknikleri ile, dip konumu bir potansiyometreden alınan ölçümlerle tespit edilmekte, bu konumlarla birlikte referans işareti ve operatörün oluşturduğu kontrol işareti veri toplama oturumlarında bir dosyaya kaydedilebilmektedir.

İnsan operatörün modellenmesi için farklı birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar arasında doğrusal sistem tanıma, çok iyi geliştirilmiş teorik altyapısı ile önemli olanaklar sunmaktadır. İnsan operatörün davranışları belirli kısıtlamalar ve kabuller altında doğrusal kabul edilebilmektedir. Fakat bu kısıtlamalar sağlandığı takdirde ancak yerel modeller elde edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında söz konusu yol izlenerek yerel modeller elde edilmiş, yerel modellerin birleştirilerek genel modellerin oluşturulması için bulanık mantığa dayalı yeni bir yöntem denenmiştir.

Denenen yöntem ile, hem genelleme yeteneği hem de öngörü özellikleri açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Modellemede kullanılabilecek diğer bir yöntem ise doğrudan genel modelleri oluşturmakta akıllı sistemlerden faydalanmaktır. Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde başarılı bir yöntem olan uyarlamalı sinirsel bulanık çıkartım sistemi (adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS), modelleme için kullanılan ikinci yöntemdir.

Farklı modelleme yöntemleri ile elde edilen modeller, hem öngörü başarılarının incelenmesi hem de gerçek sistem üzerine yazılımla eklenerek insan operatörün yerini alacak bir kontrolör olarak davranışlarının doğrudan gözlemlenmesi ile birbirleriyle karşılaştırılmışlardır.

INTELLIGENT MODELING OF HUMAN OPERATORS

SUMMARY

A human carries out many control tasks in his daily life without consuming considerable effort or even without paying attention. Examples for these tasks vary from similar ones like taking an object from its original position and placing it in a desired position with a desired orientation to harder ones like operating a crane for carrying loads, driving a vehicle or piloting a plane. People who are experts on operating machinery are called operators. Modeling operator behavior finds applications in areas like training for gaining skill or developing various warning systems.

Human behavior as a controller is generally quite nonlinear. Human operator is able to gain experience and learn by repeating control tasks and improve his behavior. He can even adjust himself according to the changes in the dynamics of the system that he controls. These aspects allow him to be able to accomplish very different kinds of control tasks while making the modeling more difficult compared to other dynamic systems.

This study is composed of two main parts. In the first part, an experimental setup that can be controlled by a human operator and used to acquire data for modeling the operator has been constructed. In the second part, the setup has been used to collect data from various operators and models have been obtained using different modeling methods.

The experimental setup consists of a flexible arm driven by a DC motor. The task assigned to the operators is controlling the tip position of the arm so that the tip point follows the appearing references within its working space of 180º, and they should do this as fast as possible and with minimum oscillations. Operators carry out this task by using an interface on the computer screen that utilizes a camera displaying the setup from the top and a joystick. The tip position of the link is determined by image processing techniques and the bottom position by a potentiometer. These data together with reference signal and the operator's control signal can be recorded to a file in data acquisition sessions.

There are many different methods for modeling the human operator. Among them, system identification serves important tools with its well established theoretical basis. Human operator's control behavior can be assumed to be linear under certain constraints and assumptions. However, under these constraints, only local models can be obtained. In this study, local models have been obtained and a new method for combining the local models to form a global model based on fuzzy logic is used. Models that are successful in context of both generalizing ability and prediction properties have been obtained with this method.

Another method that can be used for directly forming global models is using intelligent systems. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), a successful method for modeling nonlinear systems, has been used as a second method for modeling.

Models obtained by using different approaches have been compared by examining their prediction success and their behavior as a controller after implementing them on the experimental setup replacing the human operator.

1. GİRİŞ

İnsanları diğer hayvanlardan ayıran birçok özelliği bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de onun primatlar sınıfında farklı bir yer almasını sağlayan el aletleri kullanabilme becerisidir. Özellikle 19. ve 20. yüzyıllarda meydana gelen önemli teknolojik gelişmeler sonucunda insan, kendi kullanımı için oldukça karmaşık araçlar ve makineler yapmıştır. Bu makinelerden istenen yüksek performans düzeyleri ile birlikte bu makineleri kullanan insan operatörlerin beceri ve kapasitelerinin sınırlı oluşu, makinelerin tasarımında insan operatörün özelliklerinin ve sınırlarının dikkate alınması zorunluluğunu doğurmuştur. İnsan operatörlerin modellenmesinin gerekliliği ilk kez bu şekilde ortaya çıkmıştır **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**.

İnsan operatörlerin modellenmesi konusunun daha geniş kapsamlı olan "insan-makine etkileşimi" başlığının bir alt kolu olduğunu belirtmek yerinde olacaktır. İnsan-makine etkileşimi konusundaki ilk çalışmalar bahsedilen operatör modelleri şeklinde olmasına rağmen, günümüzde bu başlık altında farklı birçok çalışma yer almaktadır. Daha çok tasarımsal ve yazılımsal özellikler taşıyan kullanım kolaylığı sağlayan insan-makine arayüzlerinin geliştirilmesi; felçli veya bir uzvunu yitirmiş kişiler için protezler geliştirilmesi ve bu protezlerin vücuttaki sinirlerden gelen işaretlerle tahrik edilmesi; sanal ortamlardaki hareketlerde dokunma hissini insana verebilen haptik cihazlar; uzaktan ameliyata olanak veren veya çok hassas ameliyatlarda cerraha önemli ölçüde yardımcı olan ameliyat robotlarının geliştirilmesi gibi çok çeşitli konulardaki çalışmalar bu başlık altında toplanabilir. Güncel çalışmaların bu uygulama alanlarına yoğunlaşmış olmasına rağmen insan operatörün modellenmesi konusu da hâlâ üzerinde aktif olarak çalışmalar yürütülen ve kendisine uygulama alanları bulan bir konudur.

İnsan operatörün modellenmesi söz konusu olduğunda, insanın gerçekleştirdiği çeşitli etkinlikler göz önüne alınarak bir sınıflandırmaya gidilmesi gerekmektedir. **Sheridan ve Ferrell (1974)** tarafından insan operatör modellerinin üç ana grupta incelenmesi önerilmiştir: bilgi işleme modelleri, kontrol modelleri ve karar verme

modelleri. Bu tez çalışmasının da konu edindiği kontrol modellerinde, insanın genellikle görsel geri besleme ile ölçümler yaparak ve eli ile kontrol işaretini uygulayarak gösterdiği kontrolör davranışı ele alınmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada "insan operatörün modellenmesi" terimi "insan operatörün bir kontrolör olarak modellenmesi" anlamını taşımaktadır.

1.1 İnsan Operatör Modeli İhtiyacı ve Uygulama Alanları

Bir kontrolör olarak insan operatör çok farklı yapılardaki sistemleri oldukça iyi bir performansla kontrol edebilmekte ve bu performansını öğrenme ile artırabilmekte ve kendini kontrol ettiği sistemde veya takip etmesi gereken referans değerlerinin yapısında oluşan değişimlere uyarlayabilmektedir. Bu özellikleri onu çok başarılı bir kontrolör kılmakta fakat yine aynı özellikler sonucunda onun geniş oranda geçerli bir modelinin çıkarılması oldukça zor bir problem oluşturmaktadır.

İnsan operatör modeli konusunda yapılan ilk çalışmalarda, bir uçağı kontrol eden bir pilotun modellenmesi amaçlanmıştır. Elde edilecek modellerin uçağın manevra kabiliyeti gibi özelliklerinde performans artışı sağlamak için kullanılması öngörülmüştür **(McRuer, 1980)**.

İnsan operatörün modellenmesi konusunda ilerleyen zamanlarda yapılan çalışmalarda, modellerin operatörün yerini alabilmesi veya en azından insan operatöre yardımcı olabilmesi hedeflenmiştir. Güncel araştırma konuları arasında sürücünün modellenmesi ve bu modelden faydalanılarak sürücüye çeşitli tehlikelerin ortaya çıktığında (yorgunluk gibi) uyarıda bulunacak ve yardım edecek sistemlerin tasarlanması bulunmaktadır **(Pilutti ve Ulsoy, 1999), (Chen ve Ulsoy, 2000), (Prokop, 2001), (Mulder ve diğ., 2005) (Delice, 2005)**. Birçok durumda çıkarılan insan operatör modelinin tüm yetkileri üstlenecek şekilde insan operatörün yerini alması sakıncalı bulunmaktadır. Örneğin, doğrudan bir sürücü modelinin kontrolü altında olan bir aracın beklenmedik davranışlar göstermesi sebebiyle doğabilecek kötü sonuçlar, bu girişimler için önemli bir kısıtlama getirmektedir.

Güncel bazı diğer uygulamalara örnek olarak, acemi operatörün hızlı ve etkin bir şekilde eğitilmesini sağlayacak tecrübeli operatörün modelinden faydalanılması verilebilir **(Nechyba ve Xu, 1995).** Yine, bir sistemin insan operatörün kontrolünden

çıkıp otomatik bir kontrol sisteminin kontrolü altına verileceği durumlarda (örneğin uçakta kontrolün otopilota geçmesi) tehlikesiz ve pürüzsüz bir geçişin sağlanması için operatörün hareketlerinin öngörülebileceği bir modelden faydalanılması da örnekler arasında yer almaktadır **(Repperger, 1992)**.

1.2 Literatürdeki Çalışmalar

İnsan operatörün kontrol davranışı doğrusal değildir. Kontrol edilen sistemin dinamiği ve çalışma şartları genel olarak aynı kalsa bile, farklı operatörler sistemi kontrol ederken oldukça farklı davranış sergileyebilmektedirler. Bu farkların sebepleri arasında operatörün verilen kontrol görevi veya benzer görevlerde önceden tecrübesi bulunması veya bulunmaması, operatörün yaşı, ortalama dikkat seviyesi gibi birçok etken sayılabilir. Aynı sistemi kontrol eden aynı operatör bile farklı dış ortam koşullarına (sıcaklık, gürültü gibi) bağlı olarak farklı zamanlarda farklı davranışlar gösterebilir. Hatta tüm dış koşullar sabit tutulsa bile operatörün kendisi yorgunluk, uykusuzluk, dalgınlık, stres gibi bazı etkenler sebebiyle davranış farklılığı gösterebilir. Sayılan tüm bu belirsizlikleri bertaraf etmek için, bir operatör grubundan belirli bir sistemi kontrol etmeleri istendiğinde, çok iyi tanımlanmış ve bu faktörlerin tümünü mümkün olduğunca göz önüne alan bir deney tasarlanmalıdır.

Kontrol edilen sistemin dinamiği ve operatörün sisteme takip ettirmesi gereken referans işaretin özelliklerinin sabit tutulduğu durumlarda operatör davranışının yaklaşık olarak doğrusal olduğu belirlenmiştir. Bu şartlar altındaki operatör modellerine ise bir tanım olarak hemen hemen doğrusal (quasi-linear) insan operatör modeli ismi verilmiştir **(Sheridan ve Ferrell, 1974), (McRuer, 1980)**. Bu tanım dâhilinde kalan modelleme çalışmalarında, hem frekans tanım bölgesi yöntemleri hem de parametrik sistem tanıma yöntemleri kullanılmıştır.

Bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi akıllı sistemler, doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde önemli bir kullanım alanı bulmuşlardır. İnsanın öğrenme yeteneğini taklit eden yapay sinir ağları ile insanın karar verme mekanizmasına benzer işlev gösteren bulanık sistemler, doğal olarak insan operatörün modellenmesinde kullanılmışlardır.

1.3 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmadaki temel amaç, doğrusal olmayan bir sistemi kontrol eden bir insan operatörün modellenmesi için, basit ama tüm çalışma bölgesinde geçerli bir modelleme yöntemi geliştirmektir.

İnsan operatörün modellenmesinde kullanılacak verilerin toplanması için daha önce de değinildiği gibi iyi tasarlanmış bir deney düzeneği ve iyi tanımlanmış bir kontrol görevi bulunmalıdır. Bu konuda yapılan birçok çalışmada kontrol edilen sistem, bilgisayar yazılımı ile benzetimi (simülasyon) yapılan bir sistemden oluşmaktadır **(Murray-Smith, 1998), (Nechyba ve Xu, 1995), (Bos ve diğ., 1995), (Ertuğrul ve Hızal, 2005)**. Bu tipte benzetime dayalı çalışmalara iki önemli eleştiri yöneltilebilir. Bunlardan ilki, bilgisayar ekranında bir grafiği takip ederken veya basit çizimlerden oluşan bir sistemi kontrol ederken insan operatörün gerçek kontrol hissine ulaşamaması, bundan dolayı da elde edilecek modellerin operatörün gerçek davranışını yansıtmayacağı şeklindedir. Önemli bir diğer konu ise, benzetimle oluşturulan bu sistemlerde alınan ölçümlerin hatasız ve mükemmel olması, dolayısı ile çıkarılacak modelin gerçek bir sistem üzerinde kullanılabilirliğinin şüpheli olmasıdır.

Belirtilen sebeplerden ötürü, bu tez çalışmasında insan operatörlerden kontrol etmeleri talep edilen gerçek bir sistem tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. İnsan operatörlerin doğrusal olmayan bir sistemi kontrol ederkenki özelliklerini yakalayabilmek için sistem kasıtlı olarak doğrusal olmayan ve kontrol etmesi görece zor bir sistem olarak tasarlanmıştır. Sistem; basitçe açıklanırsa, tek serbestlik dereceli esnek bir koldan ve bu kolun açısal konumunu değiştirmek için kullanılan bir doğru akım motorundan oluşmaktadır. Operatörden, sistemi esnek kolun uç konumu referans açı değerlerini takip edecek şekilde, bir kontrol çubuğu (joystick) yardımıyla kontrol etmesi istenmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, hem hemen hemen doğrusal model yapısına uygun biçimde parametrik sistem tanıma yöntemlerinden hem de akıllı sistemlerden faydalanılarak insan operatör modelleri elde edilmiştir. Parametrik modeller arasında bulanık bir sistem ile geçiş yapılmasına dayanan yeni bir model yapısı önerilmiştir. Ayrıca hem bulanık mantığın hem de yapay sinir ağlarının özelliklerini taşıyan bir

yöntem olan uyarlamalı sinirsel bulanık çıkartım sistemi (adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS) de modellemede denenmiş, elde edilen sonuçlar ve modellerin başarıları karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Elde edilen modeller gerçek sistemi kontrol edecek şekilde yazılıma eklenmiş ve böylece bu modellerin gerçek sistemi kontrol etme becerilerini ve yetersiz kaldıkları noktaları çok net biçimde gözlemlemek mümkün olmuştur.

2. DENEY DÜZENEĞİ

İnsan operatörün modellenmesinde kullanılacak verileri elde etmek için, insan operatörden belirli kısıtlamalar, amaçlar ve görevler doğrultusunda kontrol etmesi istenecek bir düzenek gerekmektedir. İnsanın özellikle zor bir kontrol görevini yerine getirirken ortaya koyduğu davranışın modellenmesi amaçlandığı için kontrol edilecek sistemin bu zorluğu sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu noktadan hareketle tek eklemli bir esnek kolun açısal konum kontrolü görev olarak belirlenmiştir.

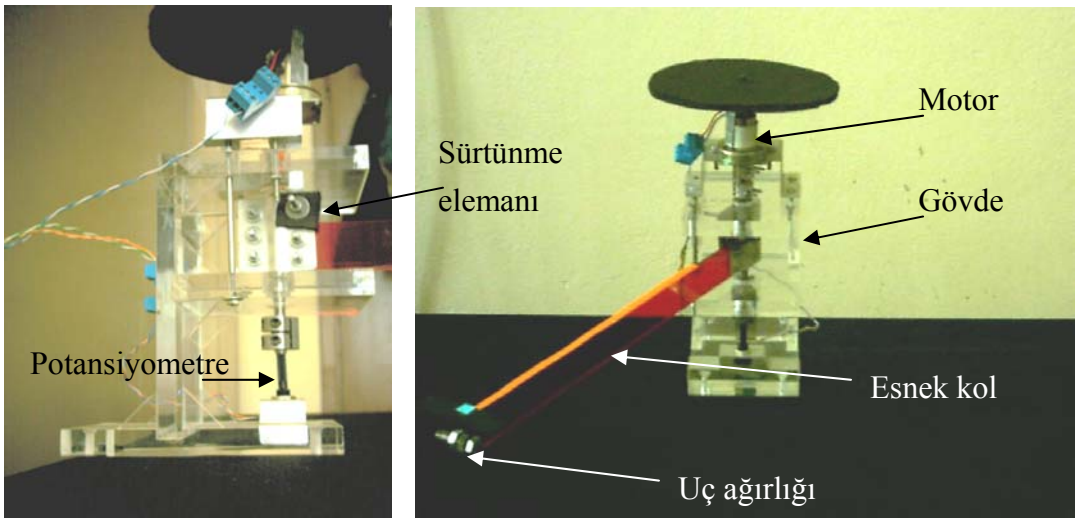
Benzer bir sistem daha önce benzer amaçlarla gerçekleştirilmiştir **(Sasaki ve diğ., 1990)**. Fakat adı geçen çalışmada sistemin tahrik elemanı olan motor bir otomatik kontrol sistemi tarafından kapalı çevrimde sürülmekte, insan operatör ise sadece referans değerlerini bir potansiyometre yardımıyla sağlamaktadır. Dolayısı ile her ne kadar görsel geri besleme ile insan operatör ikinci bir kapalı çevrim oluştursa da, içteki ilk kapalı çevrim sebebiyle insan pasif bir kontrolör olmaktadır. Bu tez çalışmasındaki sistemde ise operatör bir kontrol çubuğu (joystick) kullanarak doğrudan tahrik motorunun hızını değiştirmektedir. Bu durumda operatörün kontrolör olarak oluşturduğu kapalı çevrim dışında sistemde başka bir kapalı çevrim bulunmamakta, operatör sistem içinde aktif bir kontrolör olarak yer almaktadır.

2.1 Donanım

2.1.1 Mekanik Konstrüksiyon

Deney düzeneğinin mekanik kısmı esnek kol, gövde, dip konumu ölçümü için kullanılan bir potansiyometre, 12 V'luk redüktörlü doğru akım motoru, uç ağırlığı, rijit kavramalar, bilyeli yataklar ve sürtünme elemanından oluşmaktadır (Şekil 2.1). Esnek kol için çeşitli malzemeler ve uzunluklar ile yapılan denemeler sonucunda 3x50 cm boyutlarında kesilen 2 mm kalınlığındaki pleksiglas malzemenin bir miktar uç ağırlığı eklendiğinde en uygun genlik ve sönümde titreşimler yarattığı belirlenmiş ve düzenekte bu malzemenin kullanılmasına karar verilmiştir. Burada uygunluk

koşulu olarak, çok hızlı bir şekilde dip konumu değiştirildiğinde (dolayısı ile dikkatsiz bir kontrol uygulandığında) kolun uç konumunun belirgin bir şekilde yüksek genlikli titreşimlere yol açması ve bu titreşimlerin çok kısa sürede sönümlenmemesi dikkate alınmıştır.



Şekil 2.1: Mekanik konstrüksiyon

Sürtünme elemanına olan ihtiyaç ise motor redüktöründeki boşluktan kaynaklanmaktadır. Redüktör çok yüksek bir çevrim oranına sahip olduğu için çıkış miline uygulanacak momentler kilitlenme etkisiyle konum değişikliğine yol açamamaktadır. Bu da esnek kolun aldığı son konumun korunmasında işe yaramaktadır. Fakat çıkış milinin aldığı herhangi bir son konumda dişliler arasındaki boşluktan ötürü açısal olarak çok küçük oynamalar olmaktadır. Bu küçük açısal değişimler ise esnek kolun ucunda yaklaşık 2-3 cm'lik bir oynamaya yol açmaktadır. İşte bu oynamalar sonucunda uç konumu kontrolü ve ölçümü tamamen hassasiyetten uzak bir hal almaktadır. Bu sorunun giderilmesi için çubuğun dip kısmına gövdeye sürtünecek elastik bir malzeme yerleştirilmiştir. Bu şekilde redüktörün çıkış milinin aldığı son konum sabitlenmiş ve esnek çubukta boşluktan kaynaklanan hareketler ve salınımlar önlenmiş olmaktadır.

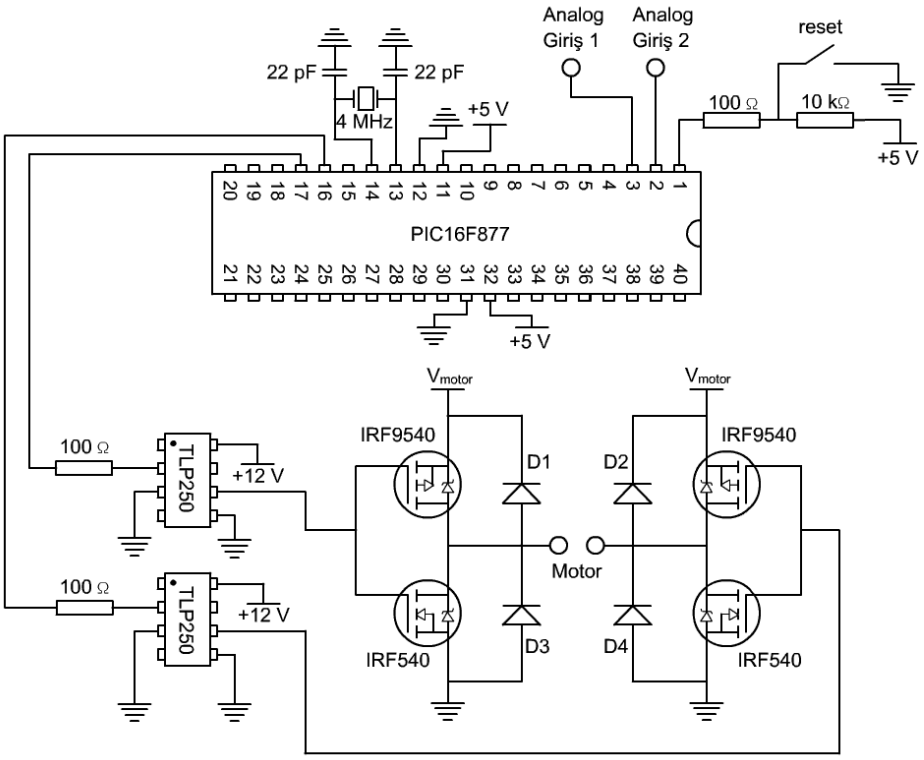
Sistemin yerleştirildiği düzlemin ve mekanik konstrüksiyonun gövde kısmının siyah bir örtü ile kaplanmasının ve esnek çubuğun üzerinin turuncu bir şeritle işaretlenip uç kısmına mavi bir kare yerleştirilmesinin sebebi ileride açıklanacağı üzere görüntü işleme algoritmasında kolaylık ve operatör arayüzünde kolay izlenebilirlik sağlama amacını taşımaktadır.

2.1.2 Motor ve Sürücü Devre

Sistemde kullanılan motor 12 V'luk fırçalı bir doğru akım motorudur. Üzerinde monte edilmiş durumda yüksek çevrim oranlı bir redüktör bulunmaktadır. Çıkış milinin dönme hızı 12 V'ta yaklaşık 10 d/dak (61 derece/sn) olarak ölçülmüştür.

Doğru akım motorlarında dönme hızının uygulanan gerilimle yaklaşık olarak doğru orantılı olduğu bilinmektedir (bu yaklaşıklık aslında kötü bir yaklaşıklıktır ve daha ileride açıklandığı üzere motorda bulunan bir ölü bölge, oluşturulan modellerin sistem üzerinde denenmesi ile elde edilen sonuçları kötü etkileyen önemli bir faktör olarak yer almıştır). Deney düzeneğinde insan operatörün motorun hızını kontrol ederek az salınımlı ve hızlı bir şekilde referans konumlara ulaşması istendiğinden tahrik elemanı olarak bir doğru akım motorunun kullanılması uygulama açısından kolaylık sağlamaktadır.

Motoru sürmek için, veri toplama kartından gelen analog çıkış işaretlerini motoru sürecek şekilde güçlendirecek bir sürücü devreye ihtiyaç vardır. Bir veri toplama kartından alınan analog çıkış işaretleri sadece bir kontrol işaretidir ve asla güç (dolayısıyla akım) gerektiren çeşitli donanımları sürmekte doğrudan kullanılmamalıdır. Bu amaçla gelen kontrol işaretlerini analog giriş olarak kabul eden, çıkışında ise gelen kontrol işaretiyle orantısal olarak değişen ve yüksek akımlarda besleme yapabilen bir çıkış gerilimi üreten bir sürücü devre üretilmiştir (Şekil 2.2). Bu devrede çıkış geriliminin ayarlanmasında darbe genişliği modülasyonu (DGM - İngilizce kısaltması PWM) kullanılmıştır. Devreye giren analog işaretin aldığı değer bir PIC16F877 mikrokontrolör tarafından belirlenip 500 Hz'lik DGM darbelerinin görev çevrimleri (duty cycle) oranlarını belirlemektedir **(Palacherla, 1997)**. Motorun saat yönünde ve saat yönünün tersi yönünde dönme durumlarına bağlı olmak üzere veri toplama kartından iki analog çıkış işareti gönderilmektedir. Bu durumda iki işaretten birisi pozitif bir değer aldığında diğer işaret sıfır olmak zorundadır, aksi takdirde motor aynı anda iki zıt yönde dönmeye zorlanmış olacaktır. Üretilen DGM darbeleri optokuplörler (TLP250) üzerinden bir H-köprüsü oluşturacak şekilde yerleştirilmiş mosfetleri tetiklemektedir. Bu şekilde devre çıkışında gerilimi motor geriliminin maksimum ve minimum değerleri arasında ayarlanmış ve dönüş yönünü belirleyecek şekilde pozitif veya negatif değerler alan sürme işareti üretilmektedir.



Şekil 2.2: Motor sürücü devresi

2.1.3 Diğer Donanımlar

Sistemde kullanılan diğer donanımlar; kamera, bilgisayar, veri toplama kartı ve kontrol çubuğu (joystick) olarak özetlenebilir.

Esnek kolun uç konumunun ölçülmesi için ilk olarak bir ivmeölçer denenmiştir. İvmeölçerden gelen ivme işaretinin iki kez integre edilmesi ile elde edilen konum verisinin kısa sürede büyük ölçüm hatalarına yol açması sonucunda bu yöntemden vazgeçilmiştir. İvmeölçerler ile konum verisi elde edilmesi ve bu verilerin hassasiyetlerinin artırılması hakkında yapılan çalışmaların sonuçları da bu yöntemin çok başarılı olmadığını ortaya koymuştur **(Aldridge ve Juang, 1997)**.

Uç konumu tespiti için denenen ve başarılı olan ikinci yöntem görüntü işlemeye dayanmaktadır. Esnek kolun çalışma düzlemindeki hareketlerini üstten görüntüleyebilmek için Sony SSC-DC18P renkli kamera kullanılmıştır. Kamera maksimum 720x576 piksel büyüklüğünde ve saniyede 29 kare hızında görüntüler alabilmektedir. Kamera; yerden yüksekliği, duvardan yatay yöndeki uzaklığı ve üç eksen etrafındaki açıları ayarlanabilecek bir konstrüksiyon ile duvara sabitlenmiştir (Şekil 2.3). Kameranın bilgisayarla iletişimini sağlamak için kameranın bilgisayara

bir USB portundan bağlanmasına olanak veren AverMedia EZMaker USB 2.0 kamera-USB arayüzü birimi kullanılmıştır.

Kullanılan bilgisayar gerek veri toplama, gönderme ve kaydetme gerekse görüntü işleme algoritmalarını gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebilecek şekilde yüksek bir donanıma sahiptir. P4 3.0 GHz işlemcili ve 1 GB RAM'a sahip olan bilgisayarın kullanıcı arayüzü ile insan operatörün rahat kullanımına izin vermesi açısından 17" bir ekranı bulunmaktadır.

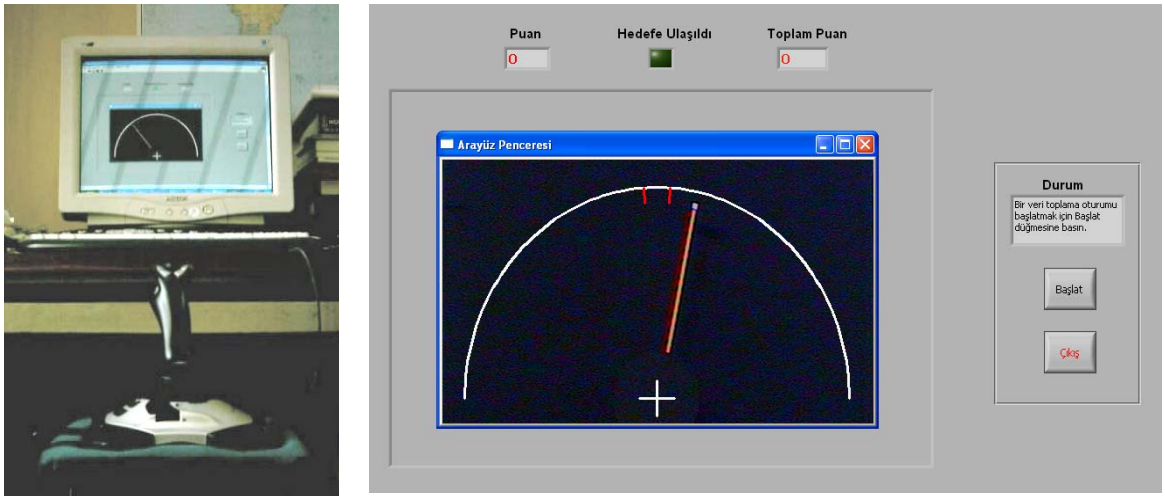


Şekil 2.3: Kamera ve sabitleme konstrüksiyonu

Daha ileride anlatılacağı üzere; veri toplama, kaydetme ve operatör ile arayüz oluşturma amacıyla LabVIEW yazılımı kullanılmıştır. Bilgisayarda, bu yazılımın desteklediği veri toplama kartlarından olan Measurement Computing PCI-DAS6025 kartı kurulmuş durumdadır. Bu kart üzerinde 12 bit çözünürlükte 16 adet analog giriş, 2 adet analog çıkış, 32 adet dijital giriş/çıkış ve 2 adet sayıcı/zamanlayıcı kanalları bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan sistemde motorun sürülmesi için 2 analog çıkış kanalı, potansiyometre ile dip konumu ölçümü için 1 analog giriş kanalı ve görüntü işleme algoritmasının oluşturduğu gecikmenin tespiti amacıyla bir defalığına 1 dijital giriş kanalı kullanılmıştır.

İnsan operatörün oluşturulan esnek kol sistemini kontrol edebilmesi amacıyla bir Logitech kontrol çubuğu kullanılmıştır (Şekil 2.4). Kullanılan kontrol çubuğunun merkezleme yayları (çubuk serbest bırakıldığında çubuğu merkeze geri getiren yaylar) sert bir karakteristiğe sahiptir. Böyle bir kontrol çubuğunun tercih edilmesinin sebebi, insan operatörün doğru akım motoruna uyguladığı gerilim

işaretinin büyüklüğünü eliyle az çok hissedebilmesini sağlamak ve böylece sistemi öğrendikçe daha hassas kontrol davranışlarını yerine getirebilmesini kolaylaştırmaktır. Kontrol çubuğu belirli bir yükseklikteki bir yapı üzerine sabitlenerek operatör önüne yerleştirilmiş, böylece, operatörün, çubuğun gövde kısmını kendisinin eliyle sabitlemeye çalışmasına gerek kalmamıştır.



Şekil 2.4: Operatör ekranı ve kontrol çubuğu

2.2 Yazılım

İnsan operatörün bir kontrol çubuğu aracılığı ile kontrol edebileceği gerçek bir sistem tasarlanması probleminde çok önemli bir konu, sistem ile bilgisayar arasındaki veri alış-verişinin gerçek zamanlı olarak yapılabilmesini sağlayabilmektir. Nihai amaç sistemden toplanacak veriler ile operatör modelleri elde etmek olduğu için, tüm algoritmalar gerçek zamanlı olarak çalışırken, verilerin de bir yandan kaydedilmesi ek bir yük getirmektedir. Kontrol çubuğuna uygulanan işaretin tespiti ve veri toplama kartı üzerinden sürücü devreye iletilmesi, potansiyometreden ölçümlerin alınması, verilerin kaydedilmesi gibi işlemlerin gerçek zamanlı olarak sorunsuz bir şekilde yürütülebilmesi için veri alış-verişinde yeterince hızlı olan bir yazılım kullanılması gerekmektedir. Tüm bu özelliklere sahip olması sebebiyle LabVIEW (7 Express sürümü) yazılımı tercih edilmiştir.

Görüntü işleme algoritmasının ilk kullanım amacı, esnek kolun uç konumunu tespit etmek olmasına karşın, kameranın sağladığı görüntünün, operatörün sistemi doğrudan asla izleyemeyeceği kadar iyi bir açıdan olması, operatörün sistemi bu görüntüyü içeren bir arayüz aracılığı ile kontrol etmesinin daha yararlı olacağını

ortaya koymuştur. Ayrıca, operatörden takip etmesi istenen rastgele referans konum değerlerinin görüntü işleme algoritması ile arayüz üzerinden operatöre doğrudan iletilebilmesi de önemli bir getiri olmuştur. Yani operatör, kontrolü grafikleri izleyerek değil, doğrudan sistemin kameradan alınan görüntüsünü ve bu görüntü üzerinde belirtilen referans değerlerini izleyerek gerçekleştirebilmektedir.

Görüntü işleme algoritmaları için kullanılan yazılım, LabVIEW yazılımı için hazırlanmış bir araç kutusu olan IVision LabVIEW Toolkit 1.8'dir. Bu başlı başına bir yazılım olmayıp, LabVIEW yazılımı altında çalışan ve çeşitli görüntü işleme işlemlerini gerçekleştirebilen bloklar ve alt programlardan oluşmaktadır.

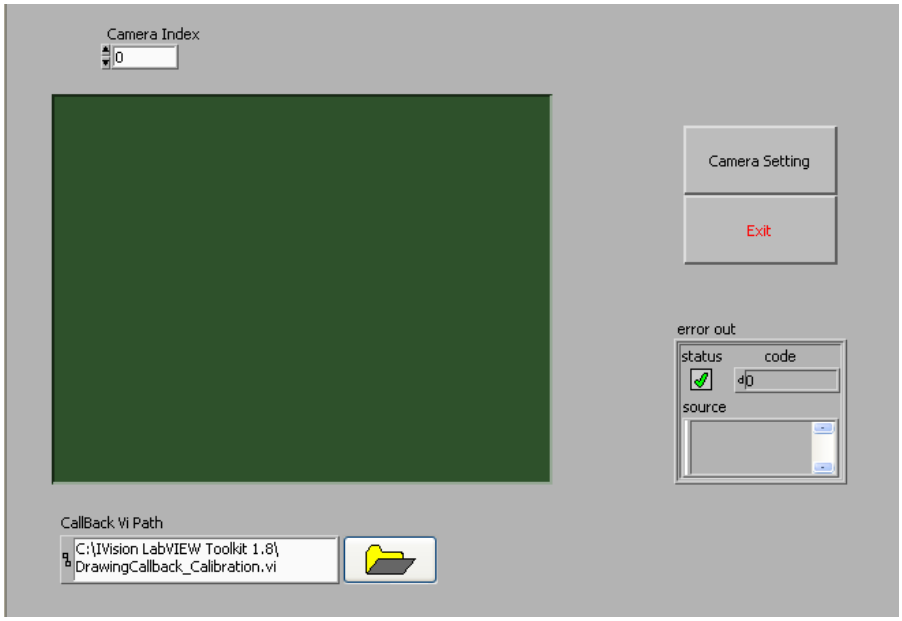
Operatörler ile gerçekleştirilen veri toplama oturumlarından elde edilen verilerle modeller oluşturulması amacıyla ise MATLAB (6.5 sürümü) yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen modellerden; doğrusal olanlar doğrudan LabVIEW içinde oluşturularak, bulanık mantık temelli olanlar ise MATLAB Bulanık Mantık Araç Kutusu (Fuzzy Logic Toolbox) dosyası olarak kaydedilip LabVIEW içinden MATLAB kodu olarak çağrılarak gerçek sistem üzerine eklenmiş ve davranışları izlenmiştir.

Operatör arayüzü, LabVIEW ve IVision LabVIEW Toolkit kullanılarak oluşturulmuştur. Arayüz, temel olarak iki sanal enstrüman (virtual instrument - VI) dosyasından oluşmaktadır. Bunlardan ilki (Camera.vi) kameranın çalıştırılmasını sağlamakta ve başka bir sanal enstrüman dosyasını çağırarak kameradan alınan görüntü üzerinde kesme ve çeşitli çizgilerin çizilmesi gibi işlemleri gerçekleştirmektedir (Şekil 2.5). Diğer temel dosya ise ana program (Mainprog.vi) olarak adlandırılmıştır ve görüntü işlemeyle ilgili olarak uç konumu tespiti dâhil olmak üzere diğer tüm işlemleri (veri alış-verişi, dosya kaydı, referans işaret üretimi) yerine getirmektedir.

2.2.1 Kamera Programı

Kameranın programı çalıştırılırken, öncelikle farklı görüntü işleme amaçları için hazırlanmış çağrılabilecek dosyalardan uygun olanı (örneğin veri toplama oturumlarında kullanılmak üzere hazırlanan DrawingCallback_DataAcquisition.vi dosyası gibi) seçilir. Program çalıştırıldığında çıkan menüden kameradan gelen görüntünün büyüklüğü 720x576 piksel olarak seçilir. Sonrasında hem kameranın

aldığı ham (işlenmemiş) görüntü hem de çağrılan görüntü işleme dosyasının işlemi sonucunda ortaya çıkan görüntü iki ayrı pencerede ekrana gelir. Kamera programı içinden kamera ayarlarına girilebilmekte ve parlaklık, kontrast gibi ayarlar yapılabilmektedir.



Şekil 2.5: Kamera programı

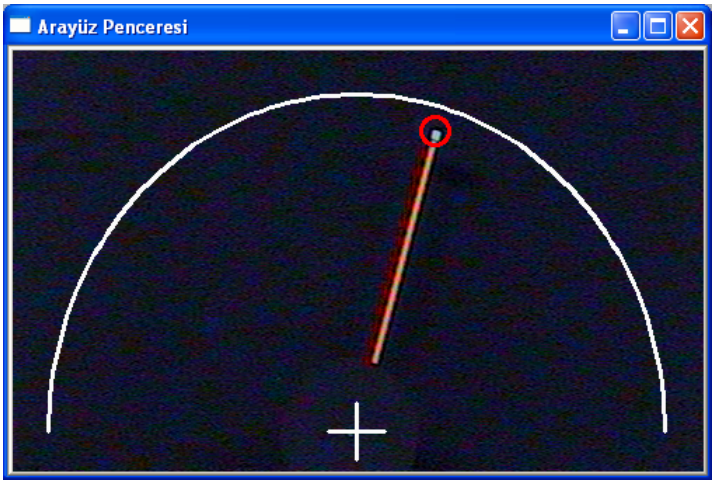
Kamera programında çağrılabilecek görüntü işleme dosyaları arasında Drawing Callback_Calibration.vi bulunmaktadır. Bu dosya seçilerek program çalıştırıldığında, öncelikle gelen ham görüntüden ilgilenilen kısmın kesilerek çıkarılması ve arayüz penceresinde görüntülenmesi sağlanır. Ayrıca arayüz penceresinde esnek kolun 180º'lik çalışma alanında 0º, 45º, 90º, 135º ve 180º değerlerine karşılık düşen konumlardan geçen çizgiler ekrana çizdirilir (Şekil 2.6). Esnek kol kameradan izlenip bu çizgilerle sırasıyla çakıştırılarak ve o konumlarda potansiyometreden okunan değerler ana programdan bakılıp not edilerek, potansiyometre ölçümlerinin bir eğri uydurma işlemi ile iyileştirilmesi mümkün olmaktadır.

Çağrılabilecek bir diğer dosya DrawingCallback_tipextract.vi dosyasıdır. Bu dosya da benzer kesme işlemini yapmakta, ayrıca kolun dönme ekseni ile çakıştırılması gereken beyaz bir "+" işaretini ve kolun uç konumunun yaklaşık olarak takip edeceği bir yarım çemberi beyaz renkli olarak görüntü üzerine çizmektedir. Bahsedilen yarım çember aslında düşeyde daha büyük bir çapa sahiptir, dolayısı ile aslında yarım bir elipstir. Bunun sebebi ise kameranın aldığı görüntü üzerinde yarattığı kaçınılmaz bazı optik çarpıtmalardır. Hem kamera hem de esnek kol tam yatay konum alacak

şekilde konumlandırılmasına rağmen bu bozulmalar önlenememektedir. Bu dosyanın asıl kullanım amacı ise, ana program içinde bulunan görüntü işleme algoritması tarafından tespit edilen uç konumunu küçük bir çember içine alarak ekranda göstermesidir (Şekil 2.7). Bu şekilde uç konumu tespitinde ortaya çıkabilecek sorunlar veya uç konumu ölçümlerinin hatalı olarak geldiği anlaşıldığında bu hatanın sebebi (örneğin arayüz penceresinde kullanıcının fark edemediği fakat algoritmayı yanıltabilecek açık renkli bir bölge veya cismin bulunması) tespit edilebilmektedir.



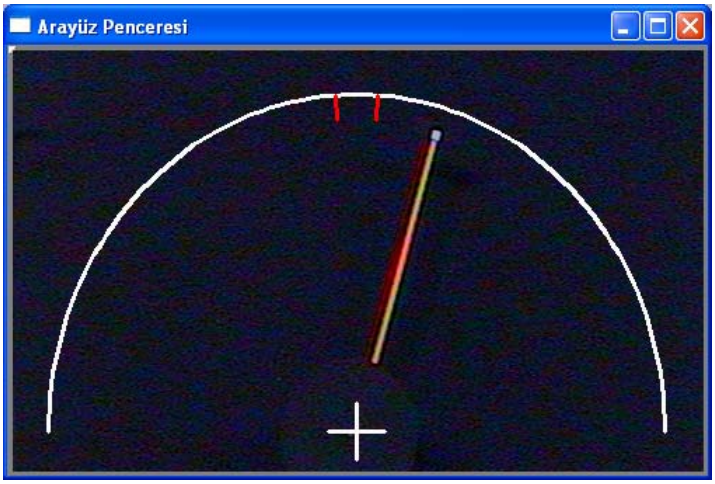
Şekil 2.6: Kalibrasyon alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi



Şekil 2.7: Uç konumu çıkartımı alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi

Çağrılması mümkün olan bir diğer dosya ise DrawingCallback_DataAcquisition.vi dosyasıdır. Normal işletim koşullarında, yani bir operatörden veri alınacak bir oturum yapılacağında kullanılması gereken dosya budur. Bu dosya standart kesme işlemini yapmakta, "+" işareti ile yarım çemberin çizilmesini ve ana programda üretilen rastgele referans işaretinin bu yarım çember üzerinde aralarında 5º'lik bir

açıklık bulunan iki kısa kırmızı çizgiden oluşan bir aralık olarak gösterilmesini sağlamaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Veri toplama alt programı çağrıldığında oluşturulan arayüz penceresi

Operatör kullanırken kamera görüntüsü ile operatöre geri besleme sağlayan arayüz penceresi, mümkün oldukça sade ve operatörün dikkatini dağıtmayıp sadece kontrol görevine odaklanmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Operatörün esnek kolun ucuna takip ettirmesi gereken referans açı değerlerinin tek bir çizgi ile gösterilmesi yerine 5º'lik bir aralık olarak gösterilmesinin sebebi; tek çizginin operatörde aşırı hassasiyet duygusu uyandırması ve bundan dolayı operatörün davranışında gecikmeler, yavaşlamalar, aşırı düzeltme çabaları gibi bozucuları ortaya çıkarma olasılığı bulunmasıdır.

2.2.2 Ana Program

Ana program dosyası içerisinde her biri farklı bir görevi yerine getiren beş adet alt çevrim bulunmaktadır: veri alış-verişi çevrimi, referans işareti üretimi çevrimi, uç konumu tespiti için görüntü işleme çevrimi, kullanıcı arayüzü ve dosya kaydetme çevrimi ve operatörün başarılı kontrol davranışlarına göre çalışan puanlandırma çevrimi.

Veri alış-verişi çevriminde, birisi kontrol çubuğunun x ekseni (sağ-sol) verisini toplayan (Joy_x_axis.vi), diğeri ise iki analog çıkış kanalı ile bir analog giriş kanalındaki veri alış-verişini sağlayan (daqsub.vi) iki alt program bulunmaktadır. Bu çevrimde, kontrol çubuğundan gelen kontrol işaretlerinin veri toplama kartının iki analog çıkış kanalı üzerinden sürücü devreye gönderilmesi ve esnek kolun dip

konumunu ölçen potansiyometreden gelen verinin bir analog giriş kanalı ile okunup dereceye çevrilmesi işlemleri yapılmaktadır. Potansiyometreden gelen gerilim değerinden, derece cinsinden açı değeri elde edilirken, potansiyometrenin doğrusal davranmaması sebebiyle oluşan ölçüm hatalarını azaltmak için yukarıda söz edilen kalibrasyon çizgileri ile kol çakıştırılıp okunan gerilim değerleri kaydedilmiş, bu değerler ile açı değerleri kullanılarak 4. dereceden bir polinom şeklinde bir eğri uydurulmuştur. Bu eğri uydurma işlemine rağmen ölçümlerin yaklaşık ±3º saptığı, daha hassas ölçüm değerleri veren uç konumu verileriyle yapılan karşılaştırmadan anlaşılmıştır. Bu sebeple dip konumu verileri herhangi bir modelleme işleminde kullanılmamış, sadece bir güvenlik önlemi olarak kullanılmıştır. Bu güvenlik algoritması çubuk 0º'ye ulaştığında (çubuk en sağda) çubuğun daha fazla sağa döndürülmesine ve çubuk 180º'ye ulaştığında (çubuk en solda) çubuğun daha fazla sola döndürülmesine engel olmaktadır. Bu çevrimdeki kontrol çubuğunun sağ ve sol konumları ile dip açısal konumu genel (global) değişkenler olarak tanımlanarak farklı programlar tarafından alınıp kullanılmasına olanak sağlanmıştır. Bu çevrime belirli herhangi bir çevrim süresi verilmemiş olup mümkün olan en yüksek hızda çalışması amaçlanmıştır.

Referans işaret üretimi çevriminde, üretilecek referans işaretin genliği ve türü seçilebilmektedir. Söz konusu genlik, orta konumun kaç derece sağında veya solunda referans konumların ortaya çıkacağını belirlemektedir. Örneğin bu değer 45 olarak belirlenir ve işaret türü de "PRBS" (pseudo-random binary signal) seçilirse, referans konumları orta konumun 45º sağında veya solunda sadece iki farklı değer alabilecek şekilde ortaya çıkmaktadır. Yine aynı genlik seçilip bu kez işaret türü "rastgele genlikli işaret" olarak belirlenirse, bu kez genliği maksimum sağda veya solda 45º olabilen fakat rastgele olarak bu iki konum arasındaki herhangi bir açı değerini alabilen bir referans işaret üretilmiş olacaktır. Bu çevrimin çevrim süresi de rastgele olarak belirlenmektedir. Yani mevcut herhangi bir referans açı değerindeki bekleme süresi, dolayısı ile bir sonraki değerin ortaya çıkacağı an rastgeledir. Bunun gerekliliği insan operatörün bazı özelliklerinden kaynaklanmakta olup sonraki bölümlerde açıklanacaktır. Bu bekleme süreleri, rastgele olarak belirlense de bu süreler için bir minimum ve maksimum sınırı konmuştur. Bir referans açı değerinde en az 2 sn, en fazla 5 sn beklenmektedir. PRBS türündeki sadece iki farklı değer alabilen işaretlerde maksimum bekleme süresi, referans konumun, bulunulan ile aynı

konum olarak belirlenebilmesinden dolayı 5 sn'yi aşabilmektedir. Bu değerler insan operatörün hem fazla bekleyerek sıkılmayacağı hem de çok hızlı değişen işaretlerle takip etme isteğini kaybetmeyeceği şekilde ayarlanmıştır. Bu çevrimde üretilen referans açı değeri ile bekleme süresi değeri de genel değişkenlere dönüştürülmüştür.

Uç konumu tespitini sağlayan çevrim, işlem yükü olarak bilgisayarı en çok zorlayan çevrimdir. Görüntü, sadece deney düzeneğinin bulunduğu kısım alınacak şekilde kesildikten sonra 493x300 piksel büyüklüğe sahip olmaktadır. Her bir piksel için 0 ile 255 arasında kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) renk değerleri bulunmaktadır. Dolayısı ile aslında gelen her kare görüntü, üç adet 493x300 boyutunda matrise karşılık gelmektedir. Görüntü verisi, kamera programı içinden çağrılan alt programdan, genel bir değişken (global variable) olarak tanımlanmak suretiyle ana programa iletilmektedir.

Görüntü işleme ile bir noktanın veya cismin konumunun belirlenmesi için iki seçenek bulunmaktadır. Bunlardan birincisi görüntü içerisinde yer alan bir şekle göre (örneğin belirli büyüklükteki bir kare, çember veya herhangi başka belirgin bir şekil) tüm görüntüyü tarayıp, bu şeklin bulunduğu konumu ve gerekiyorsa cismin yönelimini tespit etmektir. Diğer ve çok daha hızlı çalışabilen algoritma ise görüntü içerisinde belirli bir renge sahip pikselleri tespit etmek yolu ile o renge sahip cismin konumunu tespit etmeye dayanmaktadır. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılmıştır. Esnek çubuk turuncu bir şerit ile kaplanmış, uç noktasındaki ağırlık ise siyah bir örtme parçası ile kapatılıp üzerine de 1x1 cm boyutlarında mavi bir kare yerleştirilmiştir. Uç konumu tespiti için görüntünün sadece mavi tabakası alınıp (3 matristen sadece biri) bu tabakadaki değeri maksimum olan ilk 10 piksel belirlenmektedir. Bunlar arasından, konumu, görüntü içerisinde en yukarıda olanı seçilmektedir. Seçilen nokta uç konumunu belirtmektedir fakat 1 cm^2'lik mavi alan üzerinde sürekli olarak gezinen bu nokta ölçümün bir miktar gürültülü olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, belirlenen konumda açısal konuma geçildikten sonra elde edilen değer bir pürüzsüzleştirme filtresinden (smoothing filter) geçirilmektedir. Bu filtrenin yaptığı işlem aslında çok basit bir işlemdir ve sadece çıkış olarak son dört değerin ortalamasını vermekten ibarettir. Bulunan uç konumu değeri yine bir genel değişken olarak tanımlanmıştır.

Düzeneğin üzerinde bulunan masanın ve gövde kısmının siyah bir örtü ile kaplanmasının amacı görüntü işleme algoritmasına yardımcı olmaktır. Beyaz bir yüzeyin görüntüde oluşturduğu piksellerin tüm renk bileşenleri 255'e yakın olmaktadır, dolayısı ile mavi bir pikselin tespiti yapılırken beyaz bir yüzey de mavi olarak nitelendirilecektir. Bunu önlemenin yolu görüntüyü tek tabaka değil iki tabaka halinde işlemek olabilir. Mavi rengin bulunduğu pikselde sadece mavi bileşen büyük iken beyaz pikselde kırmızı bileşen de büyüktür. Fakat iki tabakanın işleme tâbi tutulması, hatta tabakalardaki tüm elemanların tek tek taramadan geçirilmesi çok ağır bir işlem yükü getirip tüm programın çalışmasını çok yavaşlatmıştır. Bu sebeple sistemin ilgisiz kısımlarının siyah yüzeylerle kaplanması çok daha hızlı çalışabilecek bir görüntü işleme algoritması kullanılmasına izin vermiştir. Anlatılan uç konumu tespiti algoritmasının bir çevrimi için geçecek süre 50 ms olarak belirlenmiş ve gerçekten anlatılan algoritma ile görüntü içerisindeki uç konumunu 20 Hz'te örneklemek mümkün olmuştur.

Puanlandırma çevrimi, programın ilk halinde yer almayıp sonradan eklenen bir çevrimdir. Programın ilk hali farklı birkaç operatör tarafından kullanıldığında, operatörlerin en hızlı ve en az salınıma yol açacak şekilde referans konumları takip etmeleri görevinde yeterli motivasyonu sağlayamadıkları görülmüştür. Bazı operatörler salınımlara yol açmamaya fazla yoğunlaşıp çok yavaş davranırken, bazıları da hızlı davranmaya yoğunlaşıp salınımları göz ardı etmişlerdir. Bu sebeple operatörlerin her iki kısıtı da göz önüne almaları doğrultusunda onlara motivasyon sağlayacak, hatta öğrendikçe daha iyi yapabildikleri hakkında onlara bir geri besleme verebilecek bir puanlandırma sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde, her yeni referans konumu için bir ilk puan ortaya çıkmakta, zaman geçtikçe bu puan hızla geriye doğru saymakta, operatör kolun ucunu verilen referansa oldukça az bir salınımla oturtabildiği anda mevcut puan toplam puanına eklenmektedir. Puanlamada her yeni referans için bir önceki referanstan olan uzaklığa bağlı olarak geriye saymaya başlanan ilk puan değeri ayarlanmaktadır. Daha uzakta beliren referanslar için daha büyük puanlar söz konusu olmaktadır. Ayrıca operatör referansa uygun şekilde ulaştığında, ekranda gösterilen yeşil bir ışık ile hedefe ulaştığı ona bildirilmektedir. Bu puanlandırma sistemi ile operatörlerin motivasyonu önemli ölçüde artmış, operatörler de bu sistemin çok faydalı olduğunu dile getirmişlerdir.

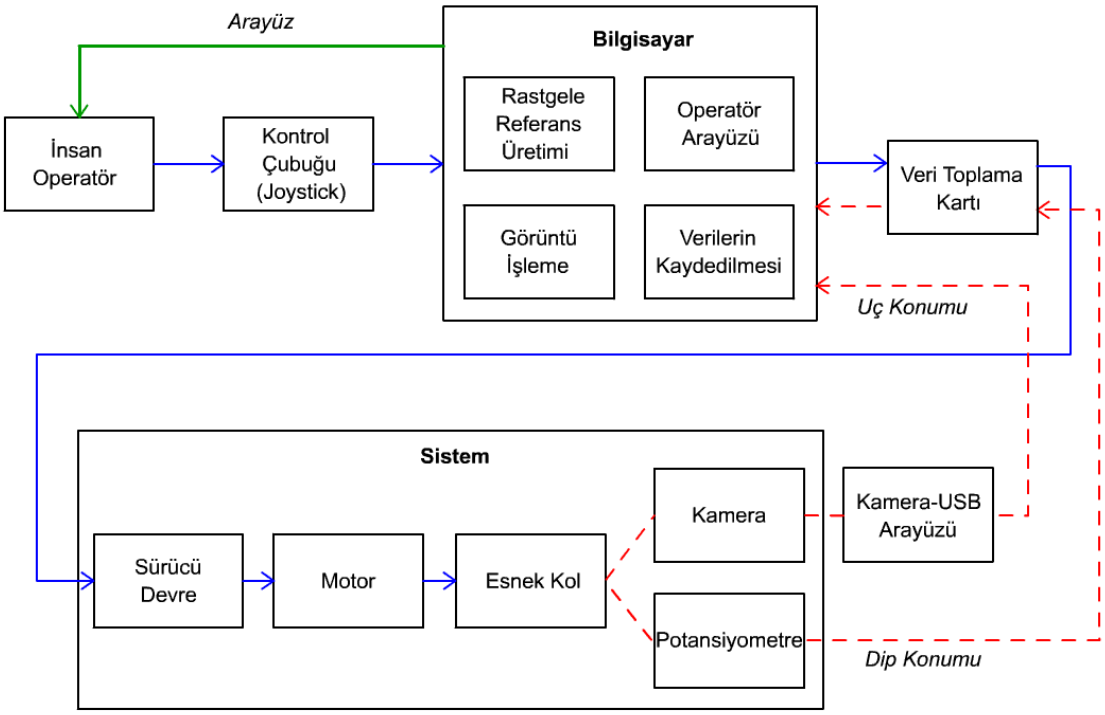
Ana programda yer alan bir diğer çevrim, kullanıcı arayüzü ve dosya kaydetme çevrimidir. Aslında ana program çalışırken kullanıcının (veri toplama oturumunu yöneten kişi) ve operatörün (sistemi kontrol eden kişi) kullandığı arayüzün oluşturulmasında yukarıda anlatılan çevrimlerin bazılarının doğrudan katkısı bulunmaktadır. Örneğin, uç konumu tespiti çevriminde, referans işaretini, dip konumunu ve uç konumunu aynı grafik üzerinde çizdiren bir bölüm bulunmaktadır. Bu grafikler kullanım sırasında incelenerek ölçümlerin doğru olarak yürütüldüğünden emin olunabilir. Referans işaret üretimi çevriminde referans işaretin tipi ve genliğinin seçilmesini sağlayan arayüz üzerinde kontrol değişkenleri ve anlık olarak üretilmiş olan referans işaretiyle ilgili genlik ve bekleme süresi bilgilerini aktaran göstergeler bulunmaktadır. Veri alış-verişi çevriminde ise o andaki kontrol işaretinin ve potansiyometreden okunan açı değerinin okunabildiği göstergeler bulunmaktadır. Ayrıca puanlandırma çevriminde de operatöre anlık alınabilecek puanı, toplam puanı ve referans konuma yeterince küçük salınımlar ile yerleşildiği bilgisi sağlanmaktadır. Bunların dışında kalan, kullanıcının bir dosya kaydını başlatmasını, programdan çıkmasını sağlayan düğmeler ile, veri toplama işleminin o anki durumu hakkında bilgi veren bir gösterge, kullanıcı arayüzü ve dosya kaydetme çevriminde yer almaktadır. Bu çevrimin bir kez dönme süresi de 50 ms olarak ayarlanmıştır, dolayısı ile kaydedilen veri dosyalarında veriler 20 Hz örnekleme frekansı ile kaydedilmektedir.

2.2.3 Operatör Arayüzü ve Veri Toplama Oturumları

Veri toplama oturumları için hem kamera programı hem de ana program çalıştırılmalıdır. Her iki program da çalışır durumdayken işlemlerin akışını gösteren bir blok diyagramı Şekil 2.9'da görülmektedir.

Diyagramda, kamera vasıtasıyla alınan veriden uç konumunun, potansiyometreden alınan veriden ise dip konumunun elde edildiği belirtilmiştir. Fakat, doğal olarak, kameradan alınan görüntünün tek kullanım amacı konum tespiti değildir; doğrudan operatöre yansıtılan geri besleme olan arayüz penceresi de bu görüntülerin işlenmesi ile ortaya çıkmaktadır.

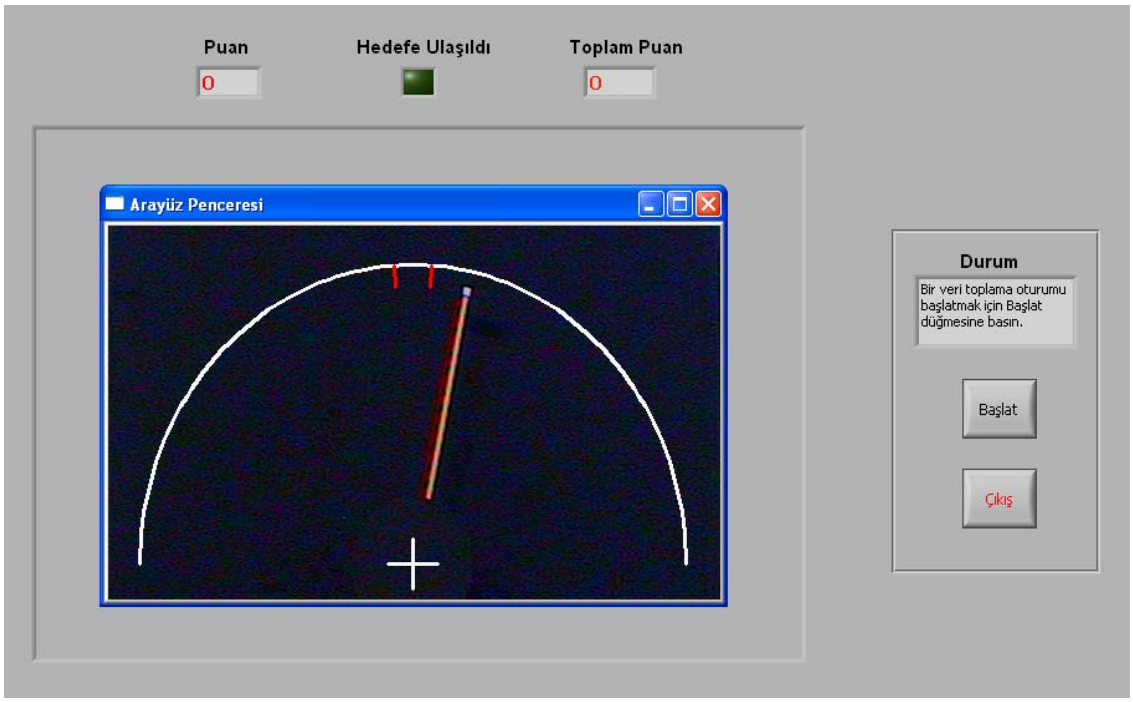
Operatör arayüzü iki bölümden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi operatöre, ikincisi ise veri toplama oturumunu yöneten kullanıcıya yönelik hazırlanmıştır.



Şekil 2.9: Operatör arayüzünde yürüyen işlemleri gösteren blok diyagram

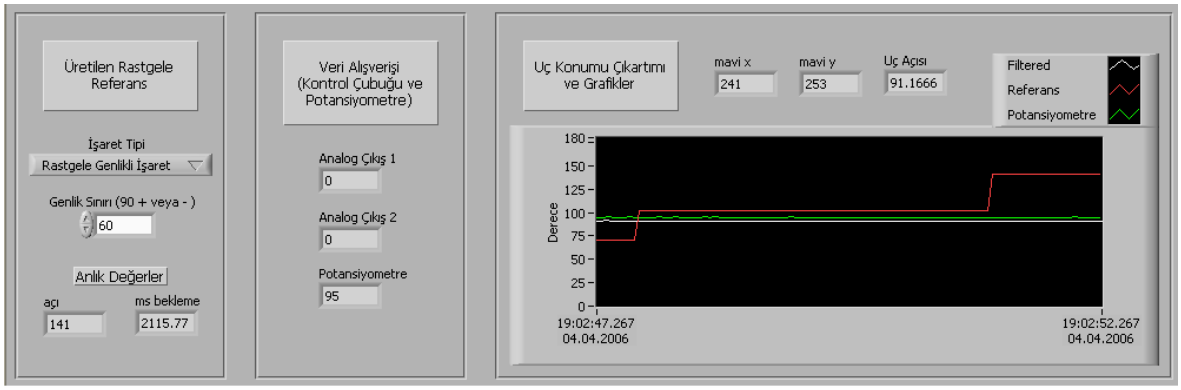
Operatörün, esnek kol sistemini kullanırken ekranda gördüğü arayüz Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Operatör; arayüz penceresi içerisinde esnek kolu ve takip etmesi gereken referansı, hemen üst kısımda anlık puanı, biriktirdiği toplam puanı ve esnek çubuğu referansa yeterince düzgün bir şekilde konumlandırabildiğini gösteren ışığı görebilmektedir. Hemen sağda yer alan "Başlat" ve "Çıkış" düğmeleri kullanıcı içindir ve veri kaydının başlatılmasını veya programdan çıkılmasını sağlamaktadır. Durum göstergesi ise kullanıcıya veri toplama işleminin o anki durumunu bildirmektedir.

Verilerin kaydedileceği dosyanın ismi ve konumu ana program çalıştırılmadan önce ana programın blok diyagramındaki "Write LVM file" bloğundan ayarlanmalıdır. "Başlat" düğmesine basılmadığı sürece toplam puan göstergesi aktif değildir, fakat "Puan" ve "Hedefe Ulaşıldı" göstergeleri aktiftir. "Başlat" düğmesine basıldıktan sonra 3 dakika boyunca veriler dosyaya kaydedilmektedir. 3 dakikanın sonunda kayıt otomatik olarak bitmekte ve her iki süreç de "Durum" penceresinden takip edilebilmektedir. Bir kez veri kaydı yapıldıktan sonra, operatör arayüzünün ikinci kısmı kullanılarak, gerekiyorsa, kullanıcı tarafından referans işaret üzerinde çeşitli düzenlemeler yapılır. Yeni referans işaret ile yine 3 dakikalık bir kayıt yapılması için "Başlat" düğmesine basılması yeterli olacaktır. Bu durumda veriler aynı dosyaya en son kalınan satırdan itibaren yazılmaya devam edecektir.



Şekil 2.10: Operatör arayüzü – operatör bölümü

Operatör arayüzünün ikinci bölümü Şekil 2.11'de görülmektedir. Bu bölüm üç alt bölümden oluşmaktadır. İlk kısımda referans işaretin tipi ve genliği ile ilgili ayarlamalar yapılabilmektedir. Ayrıca anlık olarak üretilmiş referans işaretin açısal konumu ve o konumdaki bekleme süresi de buradan izlenebilmektedir. İkinci kısımda kontrol çubuğu ile üretilen kontrol işaretleri ve ölçülen dip konumu, üçüncü kısımda ise görüntü işleme algoritmasının tespit ettiği uç konumunun sahip olduğu piksel koordinatları ile uç konumu, dip konumu ve referans değerlerinin belirli bir zaman aralığındaki davranışlarının gözlemlenmesini sağlayan grafikler bulunmaktadır.

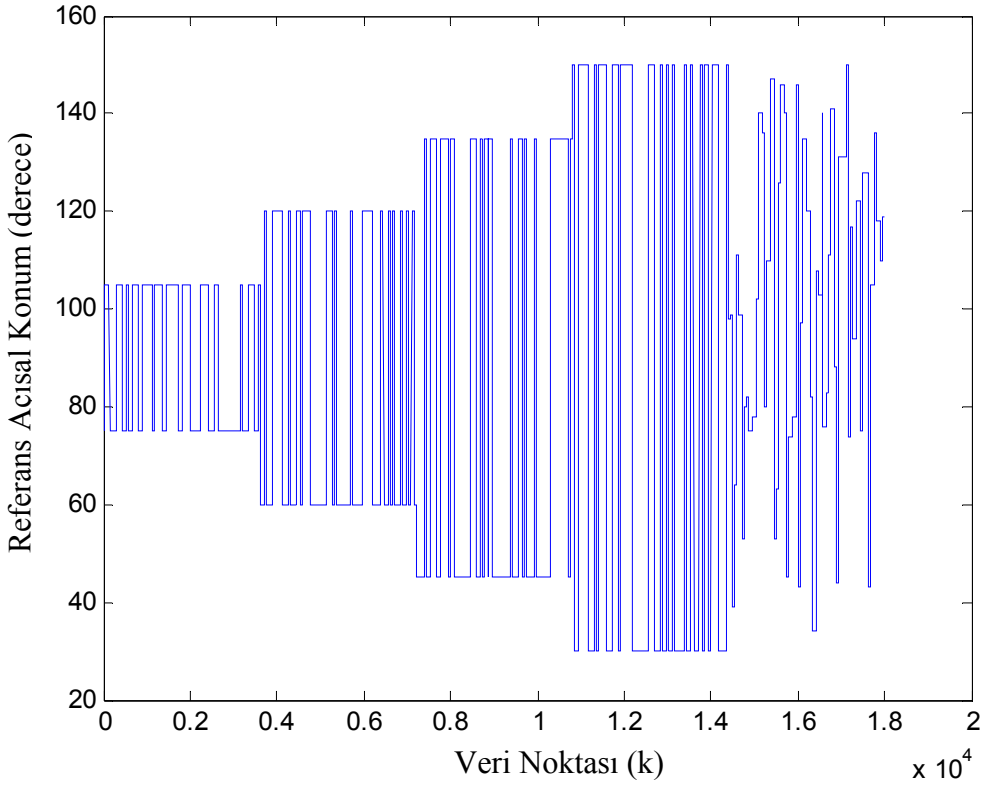


Şekil 2.11: Operatör arayüzü – kullanıcı bölümü

Bu çalışma kapsamındaki modelleme işlemleri için toplam 15'er dakika süren veri toplama oturumları düzenlenmiştir. Bu oturumlar 3'er dakikalık 5 bölümden

oluşmaktadır (Şekil 2.12). Bu bölümlerden ilk dördü merkez konumun belirli bir açı değeri kadar sağında veya solunda beliren, dolayısı ile sadece iki farklı değer alan bir referans işaretin (PRBS) takip edilmesini içeren senaryolardır. Bu senaryolar, merkezin sağında veya solunda beliren referans konumların merkezden uzaklıklarına işaret edecek biçimde; 15º, 30º, 45º ve 60º senaryoları olarak isimlendirilmiştir. Örneğin 15º senaryosunda, referans açılar merkezin 15º sağında veya solunda belirmektedir. Son bölüm ise referansın, merkeze göre ±60º aralığında kalacak biçimde rastgele değerler aldığı senaryodur. Bu senaryo ise rastgele senaryosu olarak isimlendirilmiştir.

Anlatılan biçimde bir veri toplama oturumunun gerçekleştirilmiş olmasının amacı, kurulacak modellere uygun veri dizilerini elde edebilmektir. Bu uygunluk, daha ileriki bölümlerde kurulan modeller açıklanırken daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



Şekil 2.12: Bir veri toplama oturumunda kaydedilen referans işareti

İnsan operatörün modellenmesinde, öğrenmenin ve motivasyonun etkilerinin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**. Bir kontrol görevini yerine getiren bir operatör, görevi tekrarladıkça öğrenmekte ve davranışı, başlangıçta rastgele değişimler göstermekte iken daha sonra belirli bir karakteristiğe oturmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada sistemi kontrol eden operatörlerin her

birinden, 10 kez veri toplama oturumunu tamamlamaları istenmiştir. Bir oturumun 15 dakika sürdüğü göz önüne alındığında, bir kerede tüm verilerin alınması imkânsız olmaktadır. Bu nedenle, hiçbir operatörden bir kerede 3 oturumdan fazla veri alınmamış, operatör sıkıldığını veya isteksizlik duyduğunu söylediğinde veri toplamaya devam edilmemiştir. Daha önce de belirtildiği üzere motivasyonun sağlanması için oluşturulan puanlama sistemi ile operatörlerin veri toplama esnasında yeterince motive oldukları gözlemlenmiştir.

Farklı operatörlerin farklı kontrol davranışları sergilemeleri olağandır. Çıkarılacak modellerde amaç, dış etkenlerin değişmesinden mümkün olduğunca az etkilenen, yani genelleme yeteneği iyi olan modeller çıkarmak olduğu için, tek bir operatörden alınan verilerle değil, birkaç farklı operatörden alınan verilerle çalışılmıştır.

Veri toplama oturumlarında, sistemi ilk kez kullanacak olan operatörlere gerçekleştirmeleri gereken görev aşağıdaki şekilde anlatılmıştır:

"Kontrol etmeniz istenen sistem, bir doğru akım motoru tarafından tahrik edilen bir mile bağlanmış esnek bir çubuktur. Sizden istenen, bir kare ile işaretlenmiş olan çubuğun ucunu, ekranda beliren referans değerlere *en kısa sürede ve en az salınımla* oturtacak şekilde takip ettirmenizdir. Bunu yapmak için bir kontrol çubuğu kullanacaksınız. Kontrol çubuğunun sadece sağ-sol hareketi sistem tarafından dikkate alınmaktadır. Sizin kontrol çubuğuna bu sağ-sol hareketlerini yaptırmanız ile çubuğu tahrik eden motor da sağa veya sola dönecektir. Sizin *kontrol çubuğunu belirli bir yönde itme miktarınız ile motorun o yönde dönme hızı orantılıdır*. Yani kontrol çubuğunu ne kadar fazla iterseniz motor o kadar hızlı dönecektir. Herhangi bir referans konuma yeterince yakın olarak ve yeterince az bir salınımla çubuğu oturtabildiğinizi, ekranın üst kısmındaki yeşil ışığın yanmasından anlayabilirsiniz."

Bu görev tanımında en önemli noktalar eğik yazı ile vurgulanmıştır. Bu görev tanımı dışında, operatöre, oturumun bölümleri ve bu bölümde karşılaşacakları referans işaret tipleri ile puanlama sisteminin çalışma mantığı da ilgili bölümlerde yer aldığı gibi açıklanmıştır.

Dikkat edilirse, operatöre, onu bilerek zorlayacak bir görev verilmektedir. Sadece hızlı bir takip görevi yerine, salınımlara yol açmayacak şekilde bir takip görevi verilmesindeki amaç, insan operatörün zor ve doğrusal olmayan kontrol görevlerini

yerine getirirken ortaya koyduğu davranışın ortaya çıkarılmasıdır. Çıkarılacak modeller de bu davranışı taklit etme yeteneği açısından başarılı veya başarısız olarak nitelendirilmişlerdir.

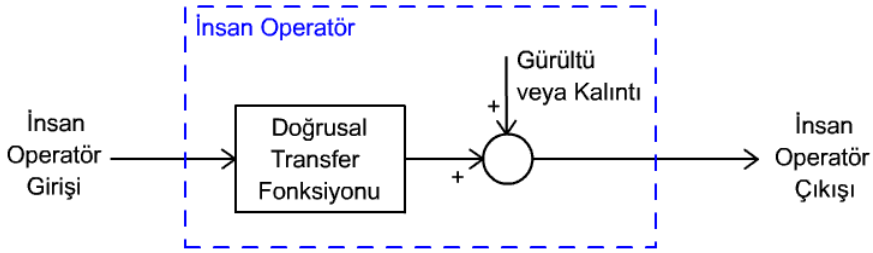
2.2.4 Operatörler

Bu çalışmada, veri toplama oturumları, 5 farklı operatör ile gerçekleştirilmiştir. Operatörlerin 3 tanesi yüksek lisans, 2 tanesi ise doktora öğrencisidir. 1 operatör 28 yaşında, 1 operatör 26 yaşında, diğer operatörler ise 25 yaşındadır. Tüm operatörler iyi düzeyde bilgisayar kullanıcısıdır ve daha önce kontrol çubuğu kullanmışlardır.

Operatörler kasıtlı olarak bahsedilen özellikleri taşıyacak ve dar bir yaş diliminde bulunacak şekilde seçilmişlerdir. Bunun amacı, çıkarılacak modellerin birbirine mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamaktır. Çok farklı yaş dilimlerinden veya bilgisayar/kontrol çubuğu kullanma becerisine sahip kişilerin tercih edilmesi, çıkarılacak modellerin çok farklı ve birbiriyle kıyaslama yapmaya izin vermeyecek derecede genelleme yeteneğinden yoksun olmasıyla sonuçlanacaktır. Herhangi bir operatörün verileri kullanılarak çıkarılan modelin başarısı, benzetimde diğer operatörlere ait verilerle göstereceği uyum ile belirlenmektedir. Çok farklı altyapı ve fiziksel duruma sahip operatörlerin kullanılması durumunda bu karşılaştırma anlamsız olacak ve modelin gerçekte sahip olduğu başarının ölçülememesine yol açacaktır.

3. MODELLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE TEORİ

İnsan operatörün kontrol davranışı doğrusal değildir. Fakat, referans işaretin yapısı ile kontrol edilen sistemin dinamiği sabit kaldığı durumlarda, insan operatörün davranışı, doğrusal bir dinamik kısım ile operatörün engel olamayacağı bir içsel gürültü teriminin toplamı şeklinde tanımlanabilmektedir **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**. Bu gürültü terimine kalıntı (remnant) da denmektedir. Bu şekildeki bir operatör modeline, hemen hemen doğrusal (quasi-linear) insan operatör modeli de denmektedir ve bu modelin blok diyagramı Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Hemen hemen doğrusal insan operatör modeli

Belirtilen model yapısı üzerinde **McRuer ve Krendel (1957),** frekans tanım bölgesi kullanarak yapılan farklı çalışmalar ile birlikte kendi ulaştıkları bazı sonuçları da ele almışlardır. Bu çalışmaların sonucu, insan operatör için elde edilmiş hemen hemen doğrusal bir transfer fonksiyonu ile özetlenebilir **(Sheridan ve Ferrell, 1974).** $e(t)$, insan operatörün giriş işareti olan hata işaretini; $u(t)$, çıkış işareti olan kontrol işaretini ve $E(s)$ ile $U(s)$ bu işaretlerin Laplace dönüşümlerini göstermek üzere, $Y_H(s)$ ile gösterilen bu transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U(s) = Y_H(s)E(s) + kalıntı \tag{3.1}$$

$$Y_H(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}(T_L s + 1)}{(T_N s + 1)(T_I s + 1)} \tag{3.2}$$

Bu denklemde K operatör tarafından 1 ile 100 arasında değerler alacak şekilde ayarlanabilen kazanç değerini; τ_d 0,12 ile 0,2 saniye arasında değerler alan tepki

zamanı gecikmesini; T_N sinirsel-kas sisteminde yer alan birinci dereceden bir gecikmenin (lag) zaman sabitini (kasın harekete başlaması için yaklaşık 0,2 saniye mertebesinde) simgelemektedir. T_L ile T_I ise sırasıyla insan operatör tarafından belirli bir performans koşulunu sağlayacak biçimde K ile birlikte ayarlanabilen avans (lead) ve gecikme (lag) katsayılarını göstermektedir. İnsan operatörün bu şekilde iyi tasarlanmış bir servomekanizma gibi davrandığı gösterilmiştir.

Hemen hemen doğrusal model tanımına uyacak senaryo ve sistemler ile veri toplandığında, doğrusal sistem tanıma yöntemleri uygulanabilirlik kazanmaktadır. Doğrusal sistem tanıma yöntemleri çok iyi geliştirilmiş bir teorik altyapıya ve geniş uygulama alanına sahiptir **(Söderström ve Stoica, 1989), (Ljung, 1999)**. Fakat bu yöntemlerin kullanılabilmesi için yapılan kabuller, çıkarılan modellerin sadece yerel olmaları sakıncasını getirmektedir. Sistemin dinamiği zaten değişmediği için bu sorunu yaratan etken referans işaret üzerindeki kısıtlamadır.

Doğrusal sistemlerde süperpozisyon ilkesi geçerlidir. Bu sebeple herhangi doğrusal bir sistemin birim basamak cevabı biliniyorsa, birim basamağın belirli bir katsayı ile çarpılması ile elde edilmiş olan bir basamak giriş, sisteme uygulandığında, sistemin vereceği cevap, sistemin birim basamak cevabının aynı katsayıyla çarpılması ile bulunabilmektedir. Fakat doğrusal olmayan sistemler bu özelliği taşımazlar. Dolayısı ile, insan operatörü ve deney düzeneğini göz önüne alırsak, operatörün 30º senaryosunda ürettiği kontrol işaretleri, 15º senaryosunda ürettiklerinden çok daha farklı olabilir.

Deney düzeneği kullanılarak, farklı senaryolardan elde edilen verilerle modeller elde edildiğinde, farklı senaryolara ait modellerin katsayıları arasında çok küçük farklar bulunduğu, fakat bu modellerin benzetimi sonucunda elde edilen öngörü başarıları arasında önemli farklar bulunduğu görülmüştür. Bu durum Tablo 4.1'de açıkça görülmektedir. İnsan operatörün sistem tanıma teknikleri kullanılarak modellenmesinde genel olarak geçerli tek bir modelin bulunmasının zorluğuna **Pilutti ve Ulsoy**'un **(1999)** çalışmasında da değinilmiştir.

Bu sorunla başa çıkmanın bir yolu, her bir senaryo için farklı bir modelin oluşturulması, daha sonra bu yerel olarak doğrusal modellerin uygun bir yöntemle birleştirilmesidir. Bu şekilde genel model elde edilebilir. Bu çalışmada, doğrusal

sistem tanıma yöntemleri kullanılarak elde edilen yerel doğrusal modellerin birleştirilmesinde, bulanık çıkartım sistemleri kullanılmıştır.

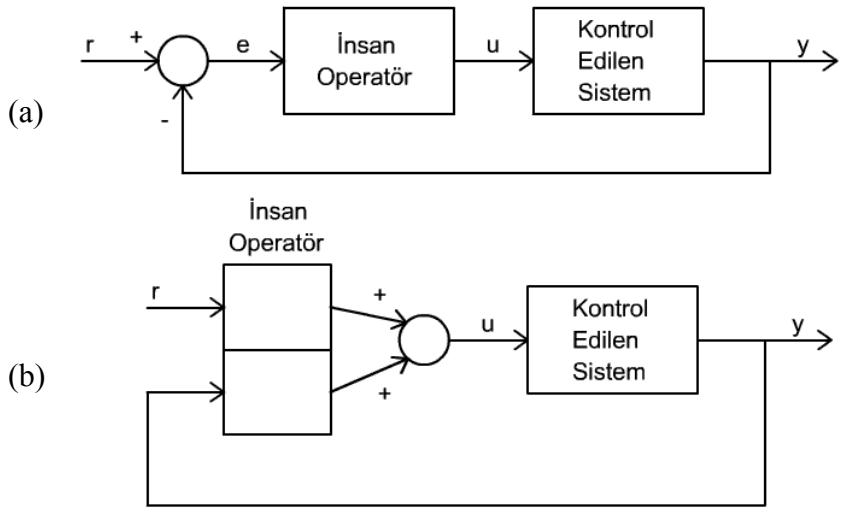
Yerel doğrusal modeller elde edip birleştirmek yerine, doğrudan genel modelin doğrusal olmayan sistem tanıma yöntemleri ile elde edilmesi yöntemi de denenmiştir. Doğrusal olmayan sistem tanıma yöntemleri arasında yapay sinir ağları ve bulanık mantık sistemleri önemli bir yer tutmaktadır **(Nelles, 2001)**. Yapay sinir ağları ile başarılı modeller elde edilebilmesine karşın, modelin tamamen kara kutu bir model olması, yani sonradan üzerinde düzeltmeler veya değişiklikler yapılmasına izin vermemesi, önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bulanık mantık sistemleri kullanılarak oluşturulan modellerin ise hem yorumlanması kolaydır hem de üzerlerinde çeşitli düzenlemeler yapılmasına izin verirler **(Abonyi, 2003)**. Bu tip modellerin sakıncası ise kurulmaları esnasında çok fazla serbest değişken bulunması ve başarılı bir model elde edilene kadar deneme yanılma ile bir miktar zaman kaybedilmesidir.

Sadece sistem üzerinden toplanmış veriler kullanılarak, bir bulanık modelin oluşturulmasına izin veren uyarlamalı sinirsel bulanık çıkartım sistemi (USBÇS; adaptive neuro-fuzzy inference system - ANFIS) hem yapay sinir ağlarının hem de bulanık modellerin üstünlüğünden faydalanılmasına izin vermektedir **(Jang ve diğ., 1997)**. Bu tez çalışmasında, toplanan verilerden, ANFIS yöntemi kullanılarak, doğrudan genel doğrusal olmayan modeller de elde edilmiştir.

3.1 Kontrol Çevrimi ve Giriş-Çıkış İşaretleri

Hem sistem tanıma ile elde edilecek doğrusal modeller için hem de ANFIS kullanılarak elde edilecek doğrusal olmayan modeller için öncelikle karar verilmesi gereken konu, giriş ve çıkış verilerinin hangi veriler olacağıdır.

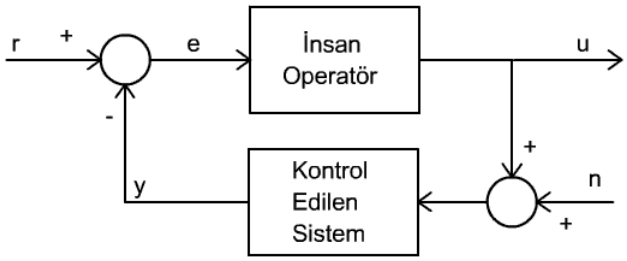
Sheridan ve Ferrell (1974) tarafından operatör ve kontrol edilen sistemden oluşan kontrol çevrimi, operatöre gelen giriş işaretinin tipine göre dört farklı gruba ayrılmıştır: hata yok edici (compensatory) sistem, izleyici (pursuit) sistem, öngörülü (preview) sistem ve ön bilgili (precognitive) sistem. Mevcut deney düzeneği ve operatör arayüzü göz önüne alındığında bunlar arasında ilk ikisi en uygun yapıyı ortaya koymaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: (a) Hata yok edici sistem, (b) İzleyici sistem

Hata yok edici sistemde operatörün girişi doğrudan hata işaretidir (e). Bu ancak referans işaretinden (r) çıkış işaretinin (y) çıkarılması ile elde edilen işlenmiş bir verinin uygun bir gösterge ile operatöre gösterilmesi durumunda mümkündür. İzleyici sistemde ise operatör referans işareti ile çıkış işaretini ayrı ayrı görebilmektedir. Her iki işaret farklı işlemlerden geçmekte, kontrol işareti (u) ise bu işlemlerden elde edilen sonuçların bir birleşimi olmaktadır. Tasarlanan operatör arayüzünde gerçekleşen durum, izleyici sistem tanımına tam olarak uymaktadır. Fakat bu şekilde bir model yapısı kabul edildiğinde, operatör için ya iki ayrı model çıkarılmalı ya da, en azından, iki giriş-tek çıkışlı bir model elde edilmelidir. Farklı modelleme yöntemlerinin uygulanması ve karşılaştırılması açısından, bu durum sorun doğurabilir.

Operatöre ulaşan işaret, her ne kadar ayrı iki işaret olsa da, operatörün kontrol davranışını yine de hata işaretine göre belirlediği varsayımı, makul bir varsayımdır. Nitekim, bir araç simülatöründen elde edilen veriler kullanarak, sürücünün sistem tanıma yöntemleriyle modellenmesi üzerinde çalışan **Pilutti ve Ulsoy (1999)** da, sürücünün giriş verisini, aracın yatay sapması olarak almışlardır. Gerçekte, sürücü, şerit çizgilerini (dolayısı ile referansı) ve aracın yatay konumunu (dolayısı ile çıkış) ayrı ayrı görmesine karşın, girişin, modelleme amacıyla hata işareti alınması uygun bulunmuştur. Bu tez çalışmasındaki modelleme işlemleri için de benzer model yapısı kabul edilmiştir. Bu yapı Şekil 3.3'te görülmektedir. Burada n ile gösterilen işaret gürültüyü simgelemektedir. Dolayısıyla insan operatörün giriş işareti hata, yani e, çıkış işareti ise kontrol işareti, yani u, olmaktadır.



Şekil 3.3: Modelleme için kabul edilen yapı

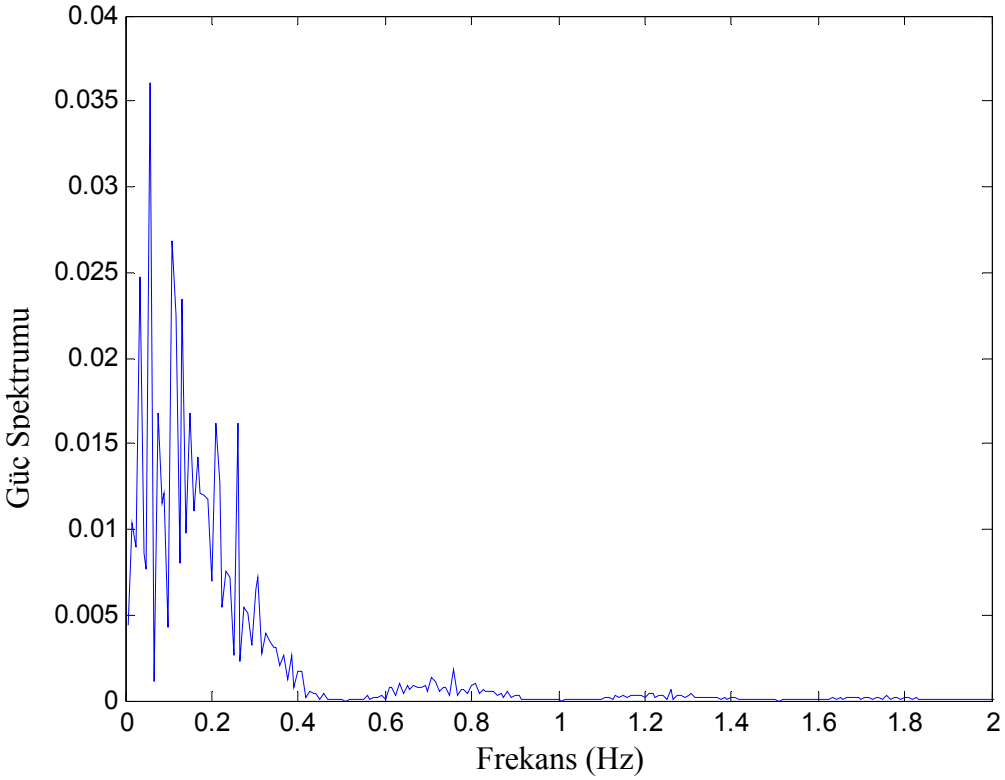
3.2 Sistem Tanıma

Doğrusal sistem tanıma yöntemleri hakkında geniş bilgi **Söderström ve Stoica (1989)** ile **Ljung (1999)**'da bulunabilir. Bu bölümde ayrıntılı olarak bu yöntemlere girilmeyecek, sadece çalışmada kullanılan özgül model yapısı ile referans işaretler üzerinde durulacaktır.

3.2.1 Referans İşaret ve Giriş İşareti

Sistem tanımada en yaygın kullanılan giriş işareti, sanki rastgele ikili işarettir (SRİİ; pseudo-random binary signal - PRBS). Bu işaret her örnekleme anında ya 1 ya da -1 değerini rastgele olarak almaktadır. Sahte olarak isimlendirilmesinin sebebi ise bilgisayar algoritması tarafından üretilirken, belirli bir periyoda sahip olarak üretilmesidir. Örneğin, periyodu 4095 olan bir PRBS işaretinin en fazla 4095 elemanı sistem tanıma deneyinde giriş olarak uygulanmalıdır, işaret kendini tekrarlamaya başlamadan önce deney sonlandırılmalıdır.

Bölüm 2'de açıklandığı üzere, veri toplama oturumlarında, örnekleme zamanı 50 ms'dir. Sıradan PRBS işaretinin kullanılması durumunda referans konumlar çok hızlı değişeceği için, insan operatörün, esnek çubuğa bu referans konumları takip ettirmesi imkânsız olacaktır. Bu sebeple, PRBS işareti, operatörün takip edebileceği şekilde değiştirilmiştir. Bu değiştirme için saat periyodunun uzatılması yöntemi tercih edilmiştir **Söderström ve Stoica (1989)**. Referans işaret, herhangi bir konuma geldiğinde, işaretin bu konumda en az 2 saniye beklemesi sağlanmıştır. Bu değişiklik doğal olarak referans işaretin ve dolayısıyla insan operatörün girişi olan hata işaretinin frekans içeriğinde önemli değişikliklere yol açmıştır. Bu değişim 0,5 Hz'den daha yüksek frekanslarda bileşen bulunmaması şeklindedir. Bu durum Şekil 3.4'teki güç spektrumunda da açıkça görülmektedir.



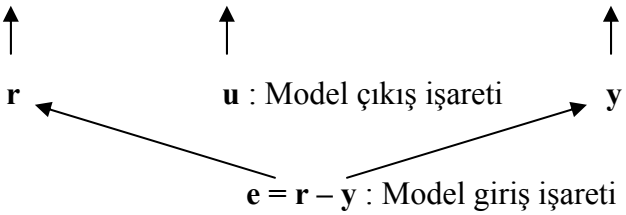
Şekil 3.4: 20 Hz'te en az 40 örnekleme zamanı boyunca (2 saniye) sabit kalan PRBS'in güç spektrumu

İnsan operatörün 2 Hz'e kadar olan işaretleri izleyebildiği gösterilmiştir **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**. Fakat bu tespit, operatörün elindeki kontrol çubuğunun konumu çıkış olarak alındığında yapılmıştır. Deney düzeneğinde araya motorun ve esnek çubuğun hareketleri de girmiş olduğundan, yani çıkış esnek çubuğun uç konumu olduğundan, referans işaret değişimlerinde en az 2 saniyelik bir bekleme yaratmak makul bulunmuştur.

İnsan operatörlerin, ancak ve ancak rastgele olarak değişen giriş işaretlerine doğrusala yakın cevap verdikleri tespit edilmiştir **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**. Öngörüde bulunabilecekleri herhangi bir işareti izlemeleri istendiğinde, doğrusallık bozulmakta, hatta insan operatör gerçek dinamiklerini ortaya koymamaya başlamaktadır. Bu sebeple, insan operatörden takip etmesi istenen işaretin rastgele anlarda değişen bir PRBS olması, bu şartın sağlanması yönünden de uygundur.

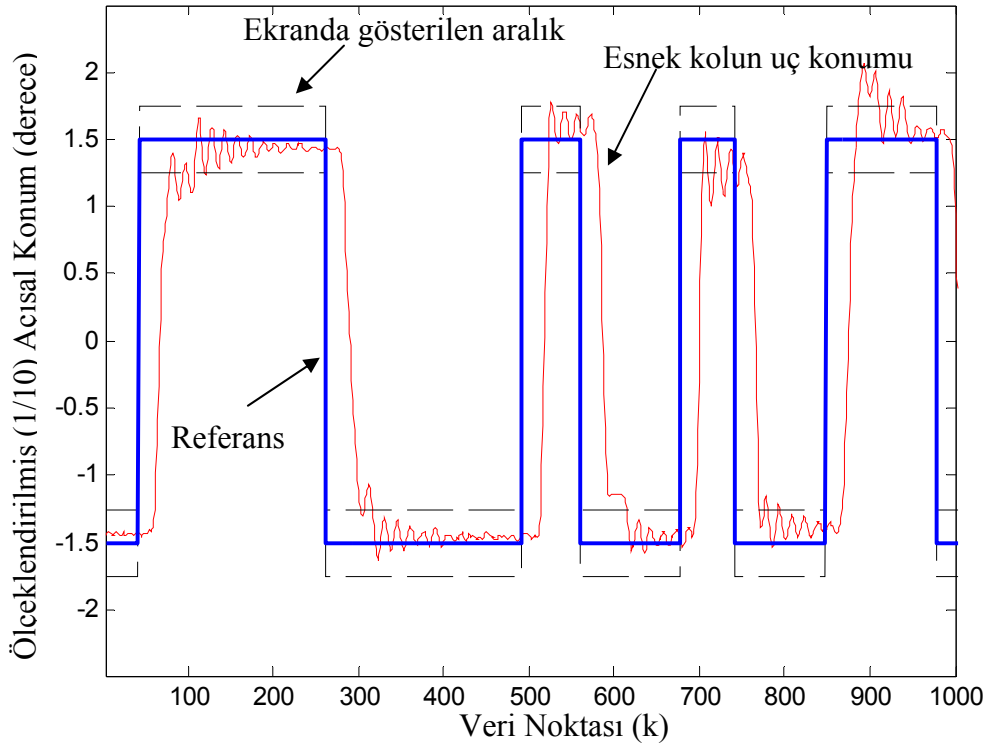
İnsan operatörün giriş işareti modelleme için kabul edilen yapı gereğince referans değil hata işaretidir. Kaydedilen veri dosyalarının yapısı ve giriş-çıkış verilerinin elde ediliş şekli Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

Zaman [sn]	Referans Açı Değeri [º]	Kontrol İşareti [V]	Esnek Kol Dip Konumu [º]	Esnek Kol Uç Konumu [º]	Toplam Puan [-]
0	75	0,039062	77	75,26396	0
0,046	75	0,039062	76	75,26396	0
0,093	75	0,039062	76	75,26396	0
0,14	75	0,039062	76	75,222	0
0,187	75	0,039062	76	75,20914	0
0,25	75	0,039062	76	75,20914	0
…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…



Şekil 3.5: Kaydedilen veri dosyalarından giriş-çıkış verilerinin elde edilmesi

Anlatıldığı şekilde elde edilen giriş-çıkış verileri, bir ölçeklendirmeye tâbi tutulmuşlardır. İnsan operatörün çıkış işareti olan kontrol işareti (u), normalde sürücü devreye giden gerilimleri göstermekte ve ±5 V aralığında değerler almaktadır. Bu işaret, ±1 aralığına ölçeklendirilmiştir. İnsan operatörün giriş işareti olan hata işareti (e) ise farklı senaryolarda farklı aralıklarda değişim göstermektedir; 15º senaryosunda ±30º aralığında değerler alırken, 60º senaryosunda ±120º aralığında değerler almaktadır. Farklı senaryolar kullanılarak elde edilecek yerel modellerin birleştirilmesi düşünüldüğünden, farklı senaryolardaki verilerin hepsi için aynı ölçeklendirmenin yapılması gerekmektedir. Uygun bir ölçeklendirme olarak, açı değerlerinin 10'a bölünmesi seçilmiştir. Ölçeklendirilmiş verilerle çizdirilen, örnek bir veri toplama oturumuna ait operatör davranışının grafiği, Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6: 15º senaryosunda kaydedilmiş örnek operatör davranışı

3.2.2 Koherans Analizi

Koherans analizi, tek giriş - tek çıkışlı bir sistemin, giriş-çıkış ilişkisinin ne kadar doğrusal olduğunu tespit etmekte kullanılır. Analiz, koherans fonksiyonunun farklı frekanslardaki değerlerinin elde edilmesi ile gerçekleştirilir. Koherans fonksiyonu

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \qquad \textbf{(3.3a)}$$

olarak tanımlanır ve tüm frekans değerleri (*f*) için

$$0 \le \gamma_{xy}^2(f) \le 1 \qquad \textbf{(3.3b)}$$

eşitsizliğini sağlar. Tanımda yer alan $S_{xx}(f)$ ve $S_{yy}(f)$ değerleri $(-\infty,+\infty)$ aralığı için tanımlanmış olan oto spektral yoğunluk fonksiyonlarını, $S_{xy}(f)$ ise aynı aralık için tanımlanmış çapraz spektral yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir. $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ ve $G_{xy}(f)$ ise bu fonksiyonların $[0,+\infty)$ aralığında tanımlı olan, diğer yerlerde sıfır değerini alan tek taraflı karşılıklarını göstermektedir. Burada kullanılan

tanımlar ve eşitlikler hakkında ayrıntılı bilgi **Bendat ve Piersol (1986)**'da bulunabilir.

Belirtildiği gibi, $x(t)$ ile $y(t)$ arasında, herhangi bir frekans değerinde tam olarak doğrusal bir ilişki bulunduğunda, koherans fonksiyonu o frekansta 1 değerini almaktadır. Eğer koherans fonksiyonunun değeri 1'den farklı ise bunun üç farklı sebebi bulunabilir; ölçümlerde yabancı bir gürültü kaynağı mevcuttur, $x(t)$ ile $y(t)$ arasındaki ilişki doğrusal değildir veya $y(t)$, $x(t)$ dışındaki bazı girişlere de bağlı olan bir çıkış işaretidir (**Bendat ve Piersol, 1986)**.

Bu çalışmada, insan operatörlerden toplanan giriş ve çıkış verileri ile yapılan koherans analizi ile 0 – 0,5 Hz frekans bandında giriş ile çıkış arasında doğrusala yakın bir ilişkinin bulunduğu gösterilmiştir. Sonuçlar daha ayrıntılı olarak Bölüm 4.1'de yer almaktadır.

3.2.3 Parametrik Yöntemler İçin Sürekli Uyaranlık Mertebesi Analizi

Bir parametrik modelde kestirimi yapılacak parametre sayısına o modelin mertebesi denmektedir (bkz. Model Yapısı Bölümü). Parametre kestirimi için toplanan verilerdeki giriş işaretinin sürekli uyaranlık (persistent excitation) mertebesi, söz konusu veri takımı ile maksimum kaç parametrenin kestirilebileceğini belirler. Yani bir giriş işaretinin sürekli uyaranlık mertebesi, elde edilebilecek modellerin mertebelerine bir üst sınır getirmektedir **(Söderström ve Stoica, 1989)**.

PRBS, doğrudan giriş olarak bir sisteme uygulandığı durumlarda sistem tanıma için uygunluğu kanıtlanmış ve neredeyse her mertebeden sürekli uyaran (persistently exciting) olduğu gösterilmiş bir işarettir. Fakat, sistemdeki geri besleme sebebiyle, referans konumdan çıkış konumunun (çubuğun uç konumunun) çıkarılması ile elde edilen hata işareti modelin girişi olarak belirlendiği için, bu işaretin sürekli uyaranlık mertebesinin yeterli olup olmayacağının tespit edilmesi gerekmektedir.

Bunun için öncelikle giriş işaretinin otokorelasyonu ve bu otokorelasyondan faydalanarak kovaryans matrisinin oluşturulması gerekmektedir. $e(t)$ işaretinin otokorelasyonu

$$r_e(\tau) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} e(t+\tau)e(t) \qquad \textbf{(3.4)}$$

şeklinde tanımlanır. Fiziksel olarak anlamı, *e*(*t*) işaretinin belirli bir gecikme sayısı τ kadar kaydırılmış hali ile kendisinin eleman elemana çarpılıp toplanması ile elde edilen değerin beklenen değeridir. Otokorelasyon fonksiyonundan faydalanarak n. mertebenden kovaryans matrisi aşağıdaki şekilde oluşturulabilir.

$$R_e(n) = \begin{bmatrix} r_e(0) & r_e(1) & \text{L} & r_e(n-1) \\ r_e(-1) & r_e(0) & & \text{M} \\ \text{M} & & \text{O} & \text{M} \\ r_e(1-n) & \text{L} & \text{L} & r_e(0) \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Oluşturulan kovaryans matrisinin pozitif kesin (positive definite) olması halinde, *e*(*t*) işareti n. mertebeden sürekli uyaran olmaktadır. Başka bir ifadeyle

$R_e(n) > 0 \Rightarrow e(t)$ n. mertebeden sürekli uyaran **(3.6)**

Bu çalışmada kullanılan *e*(*t*) işaretinin, bu yöntemle, en az 10. dereceden sürekli uyaranlık özelliğini taşıdığı, dolayısı ile model mertebesi 10'a kadar olan modellerin kestiriminin eldeki verilerle yapılabileceği tespit edilmiştir.

3.2.4 Kullanılan ARX Model Yapısı

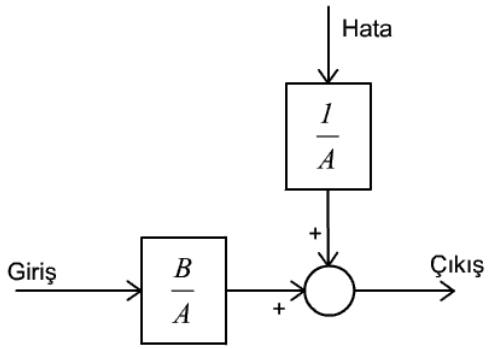
Sistem tanımada sık kullanılan parametrik model yapıları arasında ARX (Auto Regressive with eXogeneous inputs), ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXogeneous inputs), ARMA (Auto Regressive Moving Average), Box-Jenkins (BJ) ve Çıkış Hatası (Output Error-OE) gibi birçok yapı bulunmaktadır **(Ljung, 1999)**.

Bu tez çalışmasında, veri grupları ile ARX ve ARMAX yapısında modeller çıkarılmıştır. **Pilutti ve Ulsoy'**da **(1999)** ve **Chen ve Ulsoy**'da **(2000)** da aynı model yapıları kullanılmıştır. ARX modellerin ARMAX modellerden, sonsuz adım öngörü başarısı oranlarında %20-25 daha iyi sonuç vermesi üzerine, sadece ARX modeller üzerine yoğunlaşılmıştır. ARX model yapısı, hemen hemen doğrusal insan operatör yapısına da en uygun yapıdır.

Şematik olarak Şekil 3.7'da gösterilen ARX model yapısı, ayrık modeller söz konusu olduğunda aşağıdaki fark denklemine karşılık gelmektedir.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-nk) + e(t) \qquad \textbf{(3.7a)}$$

Burada q, ayrık kontrolde z olarak bilinen zamansal kaydırma operatörünü, $y(t)$ çıkış işaretini, $u(t\text{-}nk)$ giriş işaretini, $e(t)$ ise model hatalarını simgelemektedir. t, tam sayı olarak örnekleme anını (örneğin t=5 için 5. örnekleme zamanını), nk ise giriş-çıkış arasındaki gecikmeyi, örnekleme zamanının tamsayı katı olarak göstermektedir. $A(q)$ve $B(q)$, q cinsinden polinomlardır.



Şekil 3.7: ARX model yapısı

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \mathrm{L} \; + a_{na} q^{-na} \qquad \textbf{(3.7b)}$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \mathrm{L} \; + b_{nb} q^{-nb+1} \qquad \textbf{(3.7c)}$$

Dolayısı ile **(3.4a)** denklemi daha açık olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} & y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \mathrm{L} \; + a_{na} y(t-na) \\ & \quad = b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \mathrm{L} \; + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \end{aligned} \qquad \textbf{(3.7d)}$$

na, modele, çıkış işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını, benzer şekilde nb de modele, giriş işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını göstermektedir. na+nb değeri model mertebesi olarak isimlendirilmektedir.

Bir ARX modelin yapısının tam belirli olması için na çıkış mertebesinin, nb giriş mertebesinin ve nk giriş-çıkış arasındaki gecikme mertebesinin belirlenmesi gerekmektedir. En uygun mertebelerin bulunması deneme-yanılmaya dayanmaktadır. Farklı mertebe kabulleri ile parametre kestirimleri yapıldıktan sonra, modelin

benzetimiyle elde edilen çıkış değerlerinin, gerçek çıkış değerleri ile karşılaştırılması yapılarak modelin başarısı belirlenmektedir. Genelde model mertebesi artırıldıkça bu başarı da artmaktadır. Fakat model de giderek karmaşıklaşmakta ve kullanım pratikliğini kaybetmektedir. Bu sebeple artan model mertebeleri ile yapılan kestirimler sonucunda, kendisinden öncekilere kıyasla önemli bir başarı artışı sağlamış, kendisinden sonrakilerin ise başarıyı ancak küçük oranda artırabilmiş olduğu model mertebesi, uygun model mertebesini (dolayısı ile *na* ve *nb*'yi) verecektir. Gecikmenin mertebesi de benzer bir süreç içerisinde belirlenir.

Model mertebesinin belirlenebilmesi için bazı matematiksel ölçütler de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak Akaike'nin Bilgi Ölçütü (Akaike's Information Critreion – AIC) ve Rissanen'in Minimum Tanım Uzunluğu (Rissanen's Minimum Description Length - MDL) ilkesi verilebilir. Bu ölçütler farklı parametre sayılarına sahip modeller arasında, farklı noktaları göz önüne alarak bir karşılaştırma ve seçim yapılmasına olanak vermektedir. Akaike'nin ölçütünde amaç, gerçek sisteme göre entropiyi maksimum yapan, veya eşdeğer bir anlatımla, gerçek sisteme olan bilgi uzaklığını minimum yapan bir model elde etmektir. Rissanen'in ölçütü ise gözlemlenen veriler için en kısa bir tanımlama veya kod gerektiren modellerin seçilmesi gerektiğini belirtmektedir **(Ljung, 1999)**.

Bu çalışmada model mertebesi 3 olarak belirlenmiştir. Bu belirlemede matematiksel ölçütler yerine, açıklanmış olan ilk yaklaşım tercih edilmiş ve modelin basit olması önemli bir kıstas olarak görülmüştür. Bunun sebeplerinden bir tanesi, basit model yapıları için yerel modellerden genel modele geçmenin kolay olmasıdır. Bir diğer sebep ise, daha ileri çalışma aşamalarında söz konusu olabilecek, gerçek zamanlı sistem tanıma (online identification) yöntemlerinin ancak basit model yapıları için uygulanabilir olmasıdır. Model mertebesinin seçimi ile ilgili ayrıntılar Bölüm 4.2'de bulunmaktadır.

3.2.5 Yerel Doğrusal Modellerin Bir Bulanık Mantık Sistemi Kullanılarak Birleştirilmesi

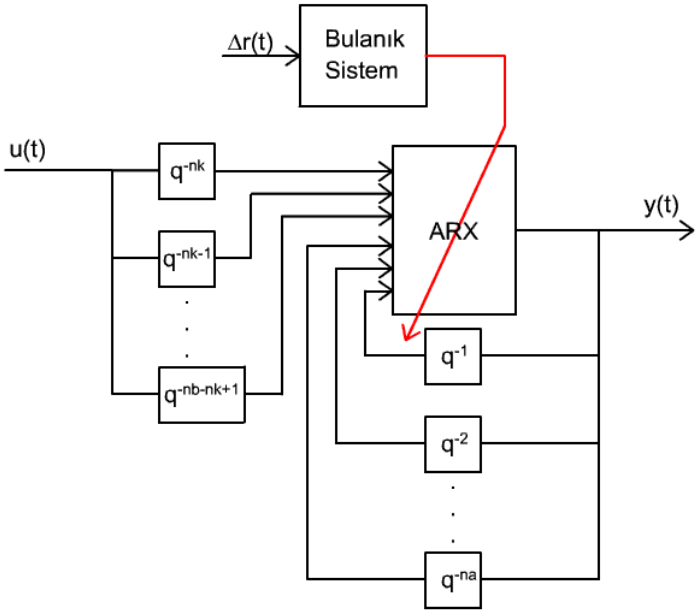
Daha önce belirtildiği ve Bölüm 4.2'de özetlendiği gibi, tek bir yerel modelin tüm çalışma bölgelerinde başarılı olamadığı görülmüştür. Bu sebeple, bu çalışmada, farklı çalışma bölgeleri için elde edilen yerel doğrusal modellerin, tüm çalışma bölgelerini

kapsayacak bir genel model oluşturmak üzere birleştirilmeleri için bulanık bir sistemden faydalanılmıştır. Bu yeni yaklaşımda, modeller arasındaki geçiş, elde edilen doğrusal model parametreleri arasındaki bir geçiş olarak düşünülmüştür. Dolayısıyla bulanık sistemin çıkışı, model parametreleri olacaktır. Sistemin girişi için, modelin giriş işareti (ki bu çalışmada bu işaret insan operatörün giriş işareti olan açısal konum hatasıdır) veya referans işareti gibi farklı alternatifler bulunmaktadır. Bu çalışmada, herhangi bir referans işaretinin takip edilmesi işlemi boyunca modelin sürekli değişmesine engel olmak amacıyla, bulanık sistemin girişinin referans işareti olmasına karar verilmiştir. Referans işareti, hemen hemen tüm uygulamalarda zaten değeri sürekli bilinen bir işaret olduğu için bu amaçla kullanılması uygulamada bir zorluk çıkarmamaktadır. Fakat referans işaretinin, doğrudan kendisinin kullanılması yerine, basamaklar şekilde ortaya çıkan referans, her yeni değer aldığında, bir önceki değeri ile farkının mutlak değerinin kullanılması daha anlamlı olacaktır. Örneğin esnek kol ve operatör sistemi ele alınırsa, referansın 50º olduğu bir anda operatörün göstereceği dinamik, bir önceki referansın kaç olduğuna bağlıdır. Bir önceki referans 20º ise operatörün davranışı 15º senaryosundaki gibi; 140º ise operatörün davranışı 45º senaryosundaki gibi olacaktır. Bu sebeple son iki referansın farkının mutlak değeri bulanık sistem için giriş kabul edilmiştir. Önerilen yaklaşımın algoritmasını şematik olarak yansıtan blok diyagramı Şekil 3.8'de görülebilir.

Bulanık sistemin tek girişi, referansın değişim genliğidir ve yukarıda açıklanmıştır. Sistemin çıkışı a_i ve b_i model parametreleri olacağı için çıkış sayısı doğrudan model mertebesine eşit olacaktır.

3.3 Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkartım Sistemi (ANFIS)

Doğrusal olmayan bir sistemin modellenmesinde izlenebilecek bir yöntem, yerel doğrusal modeller elde edip birleştirmek yerine doğrudan doğrusal olmayan bir model yapısı kullanmaktır. ANFIS, hem bulanık mantık sistemlerinin, hem de yapay sinir ağlarının üstünlüklerini birlikte bulunduran bir yöntemdir. ANFIS hakkında detaylı bilgi **Jang ve diğ., 1997** ve **Jang, 1993**'te bulunabilir.



Şekil 3.8: Yerel ARX modellerin bir bulanık sistemle birleştirilmesi

Normal bulanık mantık sistemi ile model oluşturulurken ortaya çıkan bir problem, çok fazla serbest parametre bulunması ve iyi bir model elde edilene kadar, çok farklı parametre değerlerinin ve sayısının denenmesinin gerekmesidir. ANFIS, bulanık mantık sistemindeki üyelik fonksiyonlarının konumlarının ve şekillerinin modellenmek istenen sistem üzerinden alınan veriler yardımıyla belirlenmesine olanak tanır. Bunu da kurulan temel bulanık sistem yapısını bir yapay sinir ağı algoritması ile eğiterek yapar.

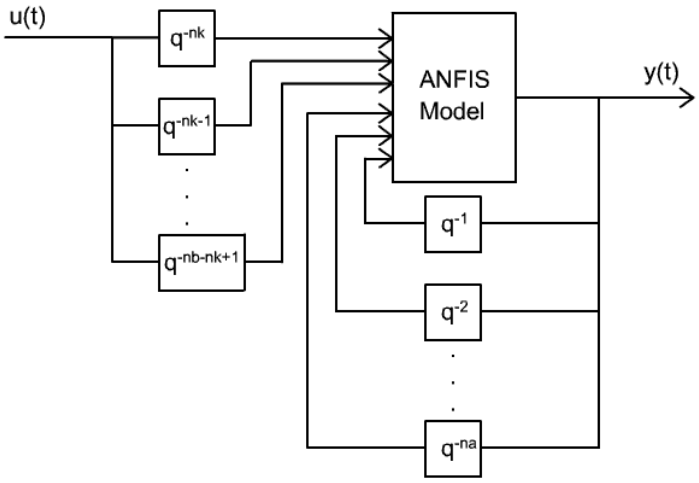
Bu çalışmada kurulan ANFIS modellerde giriş ve çıkış verileri ARX model yapısındakilerle aynıdır (Şekil 3.9). Girişler için 2'şer ve 3'er üyelik fonksiyonu kullanılan yapılar denenmiştir. Eğitim süreçleri 10 adım ile sınırlandırılmıştır.

3.4 Modellerin Öngörü Başarısı

Farklı yöntemlerle elde edilen modellerin birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için bir başarım ölçütü gerekmektedir. Bu çalışmada, modellerin başarımları, doğru öngörülerde bulunabilme yetenekleri ile ölçülmüştür.

Bir model ile öngörü yapılırken, öngörü ufkunun belirlenmesi gerekmektedir. Öngörü ufku örnekleme adımı cinsinden verilmektedir. Bir modelin benzetimi (simülasyon) ile 5 adım öngörü yapılması, bulunulan an t ile ifade edilirse, t+5 anındaki çıkış değerinin model üzerinden hesaplanması anlamına gelmektedir.

İteratif olarak yapılan hesaplamalarda, çıkış değeri için kullanılacak son değer $y(t)$ değeridir, t+1, t+2, …, t+5 anlarındaki değerlerin hepsi model ile hesaplanmış değerler olacaktır. Fakat aynı durum giriş işareti için geçerli değildir, çünkü gerçek çalışma koşullarında da, her an için giriş işaretinin ölçülmüş değeri kullanılabilir olacaktır.



Şekil 3.9: ANFIS ile oluşturulan model

Başka bir deyişle, $Y^t = \{y(t), y(t-1), ...\}$, t anındayken erişilebilir olan bilgiyi göstermek üzere;

$$\begin{aligned} &\hat{y}(t+k|t) + a_1\hat{y}(t+k-1|t) + ... + a_{na}\hat{y}(t+k-na|t) \\ &\quad = b_1u(t+k-nk) + b_2u(t+k-nk-1) + ... + b_{nb}u(t+k-nk-nb+1) \end{aligned} \tag{3.8}$$

denklemi kullanılarak istenen öngörü ufkundaki (k) çıkış değeri modelin benzetimi ile elde edilebilir. Burada $\hat{y}(t+k|t)$, çıkışın k adım ilerideki değerinin, t anında elde bulunan veriler kullanılarak model üzerinden hesaplanmış hâlini belirtmektedir. Bu eşitlikteki $\hat{y}$ değerleri için aşağıdaki şart da gözden kaçırılmamalıdır **(Stoica, 1989)**.

$$\hat{y}(t+i|t) = \begin{cases} \hat{y}(t+i|t), & i > 0 \quad \text{için} \\ y(t+i), & i \le 0 \quad \text{için} \end{cases} \tag{3.9}$$

Sonsuz adım öngörü yapılırken, çıkış işaretine gereken sayıda başlangıç koşulu vermek gerekmektedir. Bu çalışmada sonsuz adım öngörü benzetimleri yapılırken başlangıç koşulları sıfır alınmıştır.

Yapılan öngörü benzetimlerinden elde edilen çıkış verisinin, kaydedilmiş gerçek çıkış verisi ile karşılaştırılması ile model öngörü başarı oranları hesaplanmıştır. Sonuçların birbiriyle ne kadar uyumlu olduğunun bir ölçütü olan bu oran, y_m model çıkışı değerlerini, y_g ise gerçek çıkış değerlerini göstermek üzere

$$\text{Yüzde uyum } = 100\left[1 - \frac{\|y_m - y_g\|}{\|y_g - \bar{y}_g\|}\right] \qquad \textbf{(3.10)}$$

ifadesiyle hesaplanmıştır **(Ljung, 2002)**. Burada $\bar{y}_g$ gerçek çıkış değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Kullanılan normlar ise Öklid normudur.

Farklı modeller öngörü başarıları açısından karşılaştırılırken farklı öngörü ufku değerleri kullanılmıştır. 1 adımlık öngörü ufku için bulunan öngörü başarısı değerleri, en küçük kareler yöntemiyle parametre kestirimi yapılırken kullanılan maliyet fonksiyonunun ne oranda en küçültülebildiğinin (minimize edilebildiğinin) doğrudan bir göstergesi olduğu için hesaplanmış ve bu sebeple ilgili tablolarda bu değer belirtilmiştir. Modellerin karşılaştırmasında bu değerden doğrudan faydalanılmamıştır. Modellerin karşılaştırılması amacıyla sonsuz adım öngörü başarısı değerleri kullanılmıştır. Bir modelin sonsuz adım öngörü ufku için yapılan benzetimi, bu modelin gerçek çalışma koşullarında göstereceği başarının doğrudan bir göstergesidir.

Hem 1 adım hem de sonsuz adım öngörü ufku için yapılan model benzetimlerinin başarı oranları, sistem tanıma literatüründe sürekli ve yaygın olarak kullanılan model başarı ölçütleridir.

4. MODELLEME SONUÇLARI

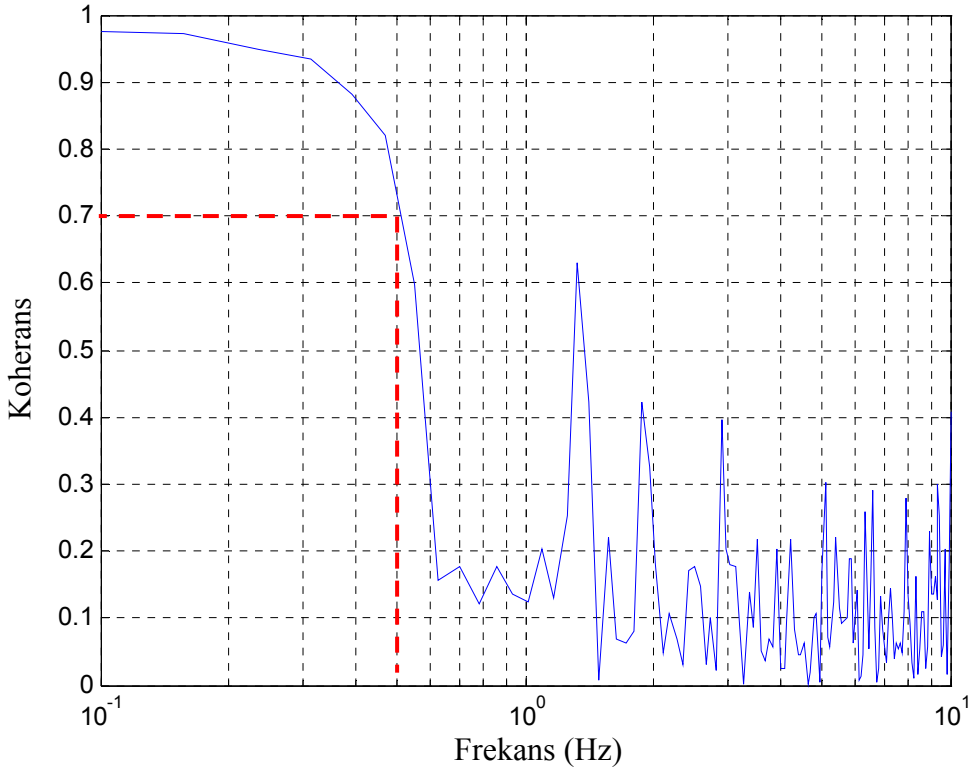
Bir önceki bölümde açıklanan modelleme yöntemleri, 5 farklı operatörün her birinden alınan verilere uygulanarak modeller elde edilmiştir. Farklı operatörlerden bahsederken kolaylık sağlamak amacıyla 1. operatör "op1", 2. operatör "op2", vb. şeklinde isimlendirilmiştir.

Öncelikle yerel doğrusal olma kabulünün geçerliliğini sorgulayan koherans analizi sonuçlarına yer verilmiştir. Daha sonra ARX model yapısı için belirlenen mertebeler ve elde edilen modellerin öngörü başarıları verilmiştir. Yerel doğrusal modeller arasında geçiş yapılarak oluşturulacak genel modelin getireceği kazanç incelenmiştir. Son olarak ANFIS ile elde edilen modellerin öngörü başarıları verilmiş ve elde edilen genel modeller birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

4.1 Koherans Analizi

Operatörün giriş verisi olan açısal konumdaki hata (e) ile çıkış verisi olan kontrol işareti (u) arasındaki koherans hesaplanıp, frekansa göre değişimi incelenerek koherans analizi yapılmıştır. Elde bulunan verilerin tümü için bunu yapmak hem gereksiz hem de anlamsızdır. Çünkü her bir operatörün her bir oturumu için ve her bir oturumdaki her bir senaryo için bunun ayrı ayrı yapılması 250 adet koherans grafiği ile sonuçlanacaktır. Farklı operatörlerin rastgele seçilen oturumlarındaki farklı senaryolara göre yapılan hesaplamalarda, koheransın, tek bir genel karakteristik taşıdığı belirlenmiş ve bu sebeple tek bir sonucun burada yansıtılması yeterli görülmüştür. Op1'in 5. oturumundaki 30º senaryosu için yapılan analizin sonucu Şekil 4.1'de görülebilir. Görüldüğü üzere bu çalışmada insan operatörün sisteme takip ettirdiği referans işaretin frekans aralığı olan 0 – 0,5 Hz aralığında koherans değerleri 1'e yakındır. Bu da bu frekans aralığı için yapılan doğrusallık kabulünün büyük oranda geçerli olduğunu göstermektedir. Farklı operatörlerin farklı senaryolarında bulunan koherans değerleri de benzer özellik taşımakta, hepsinde

değerler 0,5 Hz'e yaklaşıldığında 1'den ayrılmaya başlamaktadır. 0,5 Hz'teki değerlerin farklı senaryolar/operatörler için 0,6 ile 0,8 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



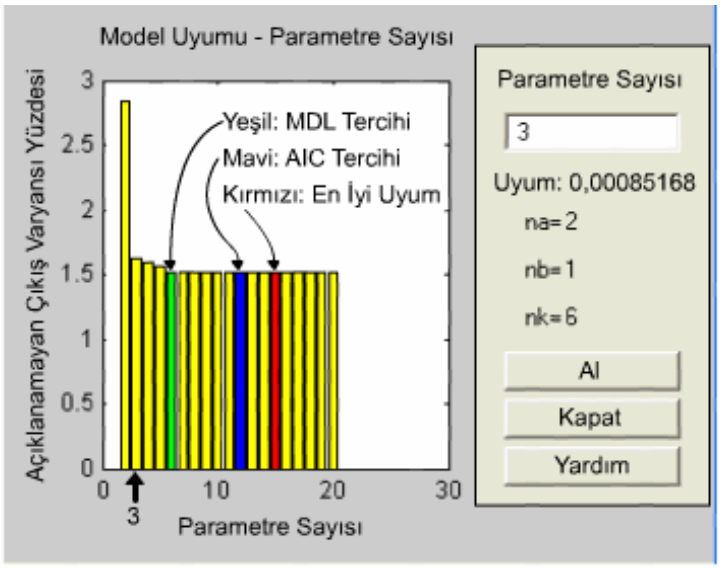
Şekil 4.1: (e, u) için elde edilen koherans

4.2 Yerel ARX Modeller

MATLAB'in Sistem Tanıma Araç Kutusu (System Identification Toolbox) kullanılarak farklı mertebelerden ARX modeller operatör verilerine uygulanmıştır. Parametre kestirim yöntemi olarak en küçük kareler (least squares) yöntemi kullanılmıştır.

na ve *nb* mertebelerinin belirlenmesi için daha önce 3. bölümde açıklanan yol izlenmiştir. Artan model mertebeleri (dolayısı ile model parametreleri sayısı) için elde edilen öngörü uyumları incelenmiş, model parametre sayısının en uygun değeri, dikkate değer bir uyum artışı sağlayan en yüksek değer olarak alınmıştır. Şekil 4.2'de artan model parametresi sayıları ile modelin açıklayamadığı çıkış varyansının değişimi görülmektedir. Burada daha önce bahsedilen matematiksel ölçütler (AIC ve MDL) tarafından tercih edilen model mertebeleri şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilde *na*=2 ve *nb*=1 olmak üzere üç parametre sayısı için açıklanamayan çıkış

varyansının bir önceki parametre sayısı olan ikiye göre önemli miktarda azaldığı, fakat bundan sonraki parametre sayısı artışlarının uyum başarısına önemli bir katkı getiremediği net olarak görülmektedir. Seçilen bu model yapısında gecikme mertebesi olan *nk*=6 değerini almaktadır.



Şekil 4.2: Model mertebesinin belirlenmesi

Gecikme mertebesinin en uygun değerleri 6, 7, nadiren 8 olarak ortaya çıkmıştır. Bu değerler örnekleme periyodu olan 50 ms göz önüne alındığında, sırasıyla 300, 350 ve 400 ms'ye karşılık düşmektedir. Literatürde, insan operatörün herhangi bir uyaranı algılayıp karşılığında el-ayak gibi motor sistemlerle uyguladığı kontrol davranışı arasında yaklaşık 200-300 ms gecikme bulunduğu deneylerle gösterilmiştir **(Sheridan ve Ferrell, 1974)**. Dolayısı ile gerçekleştirilen modelleme çalışmaları gecikme mertebesi olarak oldukça doğru sonuçlar ortaya koymuştur. En sık olarak ortaya çıkan gecikme mertebeleri olan 6-7 değerlerinden, literatürdeki değere daha uygun düşen 6 değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Burada gözden kaçırılmaması gereken önemli bir nokta, görüntü işleme algoritmasının yarattığı gecikmenin toplanan verilerdeki giriş-çıkış arasındaki gecikmeyi etkileyip etkilemediğinin araştırılmasıdır.

Tüm algoritmalar çalışırken, görüntü işleme algoritması ile belirlenen uç konumu verisinin ölçümünde, tüm algoritmaların yarattığı işlem yükü sebebiyle bir gecikme oluşmaktadır. Bu gecikmenin ölçülebilmesi için, bir anahtar ve mavi renkli bir lambadan oluşan basit bir devre kullanılmıştır. Anahtar kapatıldığında mavi ışık

yanmakta ve uç konumu algoritması ile saptanmış bulunan konum verisi, esnek kolun ucu yerine, yanan ışığın konumunu göstermeye başlamaktadır. Işığı yakan işaretin bir paraleli veri toplama kartının bir dijital girişine bağlanmış, böylece ışığı yakmak için düğmeye basılma anının bilgisayara hızlı bir şekilde aktarılması sağlanmıştır. Anahtarın kapatıldığı an ile görüntü işleme algoritmasındaki konum değerinin ışık konumuna sıçradığı an arasındaki süre, görüntü işleme algoritmasındaki toplam gecikme olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde bu değer 3-4 örnekleme zamanına yani 150-200 ms'ye karşılık gelmektedir.

Önemli bir diğer nokta, uç konumu verisinin bir pürüzsüzleştirme (smoothing) filtresinden geçirilmiş olmasıdır. Hem işlem süresinin yarattığı gecikme, hem de filtreden kaynaklanan gecikme hesaba katıldığında uç konumu ölçümleri için toplam gecikmenin yaklaşık 7-8 örnekleme zamanı, yani 350-400 ms olduğu tespit edilmiştir.

Fakat bu gecikme değeri, insan operatörün modellenmesi sonucunda elde edilen, giriş işaretindeki bir değişiklik ile bu değişikliğin çıkış işaretinde ilk değişimi yarattığı an olarak belirlenen insan operatörün gecikme zamanında hesaba katılmamalıdır. İnsan operatörün giriş işareti hata (verilen referans konum ile bulunulan konum arasındaki fark), çıkış işareti ise kontrol çubuğundan elde edilen ölçümlerdir. Dolayısı ile giriş işaretindeki anlık değişim, yeni referans değer arayüz penceresine yansıtıldığı anda; insan operatörün bu değişikliğe cevabının başlangıcı ise kontrol çubuğunu hareket ettirmeye başladığı anda gerçekleşmektedir. Dolayısı ile bu gecikme değerine esnek kolun uç konumu verisinin bir etkisi olmamaktadır. Böyle bir etkinin bulunmayışını modellerden elde edilen gecikme mertebesi de onaylamaktadır.

Sonuç olarak, tüm yerel doğrusal modellerde tek bir ARX model yapısı kabul edilmiştir ve bu yapı *na*=2, *nb*=1, *nk*=6 mertebelerine sahip, kısaca ARX216 olarak isimlendirilen yapıdır. Bu yapının ifade ettiği fark denklemi şu şekildedir:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) = b_1 u(t-6) + e(t) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Buradaki a_1, a_2 ve b_1 katsayıları yerel doğrusal modelleri tam olarak ifade etmektedir ve yerel modeller arasında tasarlanacak geçişler aslında bu katsayılar arasında yapılacak geçişlerle ifade edilecektir.

Burada elde edilen ARX modellerin kararlılığına değinmek de yerinde olacaktır. Mevcut model yapısı için aşağıdaki şekilde kutup analizi yapılarak kararlılık incelemesi yapılmıştır.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) = b_1 u(t-6) \quad \textbf{(4.2)}$$

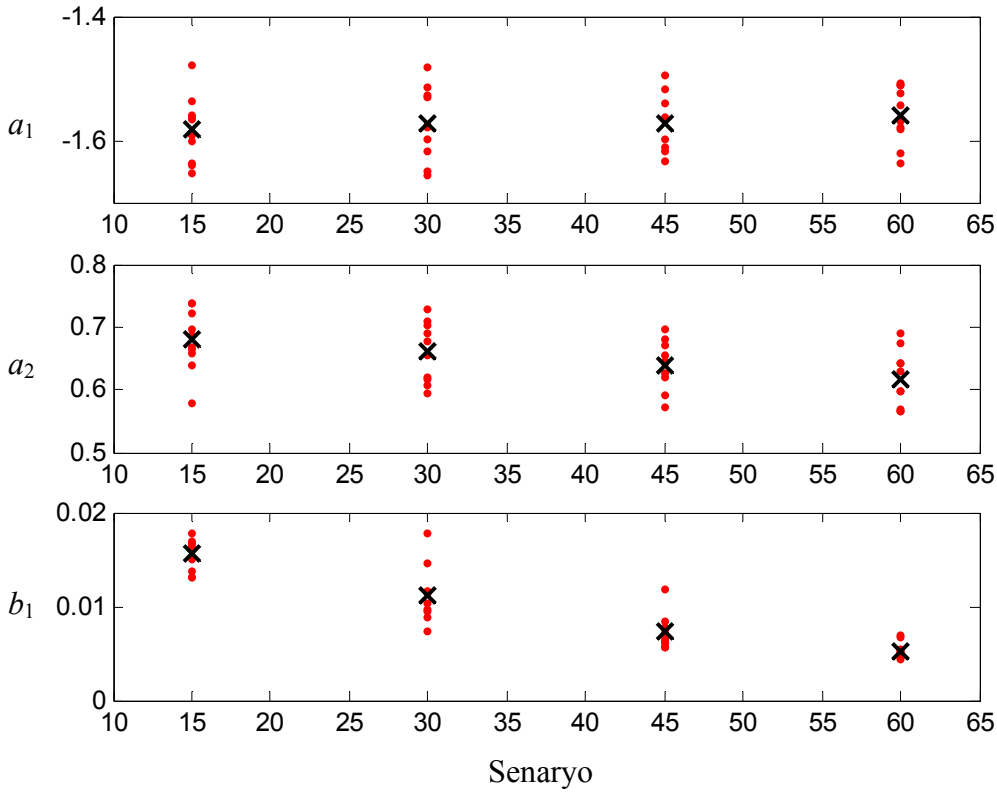
$$Y(z)(1 + a_1\ z^{-1} + a_2\ z^{-2}) = b_1 z^{-6} U(z) \quad \textbf{(4.3)}$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-6}}{1 + a_1\ z^{-1} + a_2\ z^{-2}} = \frac{b_1}{z^6 + a_1\ z^5 + a_2\ z^4} = \frac{b_1}{z^4(z^2 + a_1\ z + a_2)} \quad \textbf{(4.4)}$$

Görüldüğü üzere, elde edilen modeller için, z-düzlemi orijininde 4 katlı kutup, ayrıca a_1 ve a_2 değerlerine bağlık olmak üzere iki kutup daha bulunmaktadır. Yapılan parametre kestirimleri sonucunda elde edilen tüm parametre değerleri için tüm kutuplar birim çember içinde kalmaktadır. Bunun anlamı, yerel ARX modellerinin hepsinin kararlı olduğudur. Buradan çıkarılacak sonuç, yerel modellerin birleştirilmesi ile oluşturulacak genel modelin kararlı olması için gerekli bir şartın sağlandığı, fakat yeterlilik şartı için bir şey söylenemeyeceğidir.

Söz konusu model parametreleri, farklı senaryolarda, yani farklı yerel modellerde doğal olarak farklı değerler alacaktır. Herhangi bir parametrenin herhangi bir senaryoya ait yerel doğrusal modelde alması gereken değer belirlenirken, bir operatörün tamamladığı tüm oturumlar için ayrı ayrı elde edilen değerlerin ortalamasının alınması yöntemi tercih edilmiştir. Op1'in tamamladığı 10 oturum için PRBS senaryolarındaki (15º, 30º, 45º ve 60º senaryoları) parametrelerin aldıkları değerler ve ortalamaları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Parametrelerin değişimi incelendiğinde göze iki önemli sonuç çarpmaktadır. Bunlardan birincisi; modeller, dolayısı ile model parametreleri arasında doğrusal olmayan bir geçiş ilişkisi çıkması beklenirken, tüm parametreler (özellikle a_2 ve b_1 için) bu ilişki doğrusala çok yakın görünmektedir. İkinci nokta ise katsayıların değişim aralıklarının çok küçük olması, dolayısı ile tasarlanacak modeller arası geçiş yönteminin model başarısına getireceği katkının da küçük olması ihtimali bulunmaktadır.

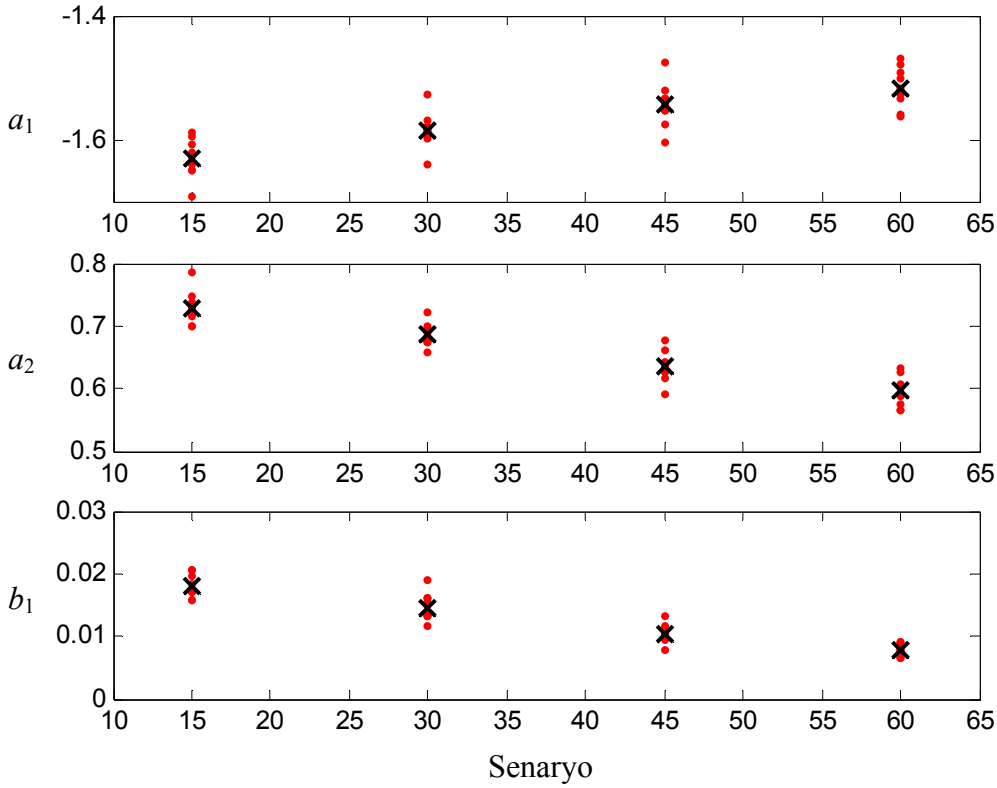


Şekil 4.3: Operatör 1 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler (·) ve ortalamaları (x))

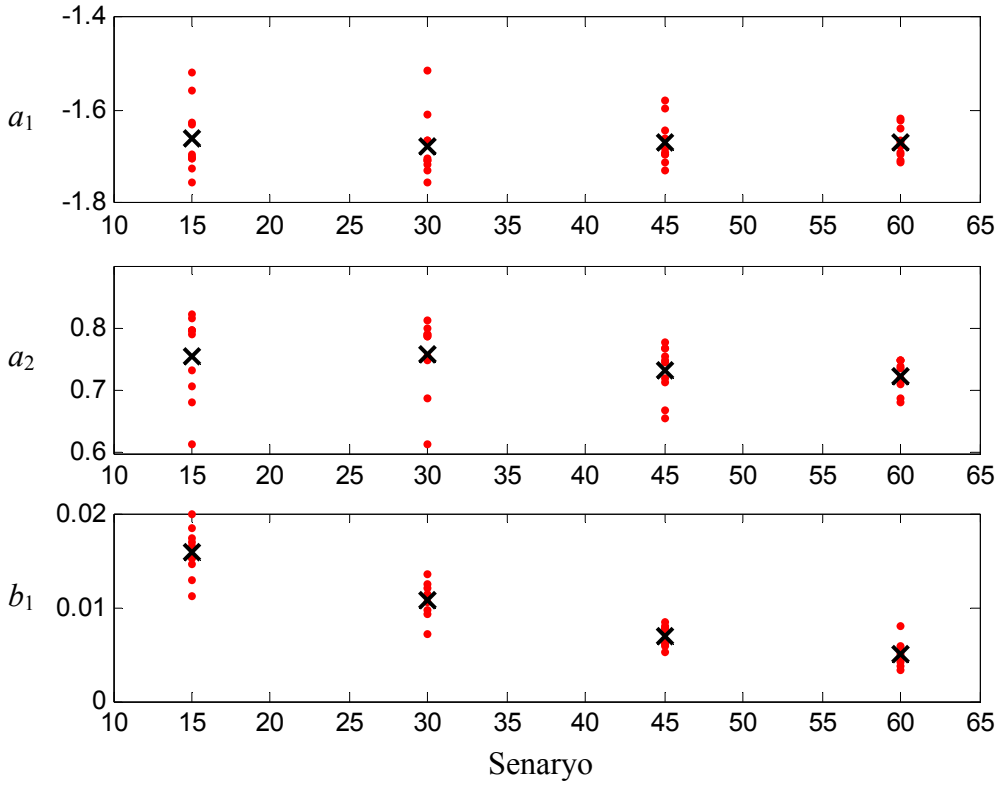
İlk konuda genel bir sonuca varılabilmesi için diğer operatörlerin parametre değişimleri de incelenmelidir. Op2, Op3, Op4 ve Op5 için elde edilen sonuçlar Sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'da verilmiştir.

Söz konusu şekiller incelendiğinde, op2 ve op3 için bulunan katsayılarda da benzer doğrusal bir davranış göze çarpmaktadır. b_1 katsayısı için doğrusal değişim tüm operatörlerde söz konusudur fakat a katsayılarının değişimi op4 ve op5 için doğrusallıktan uzaktır.

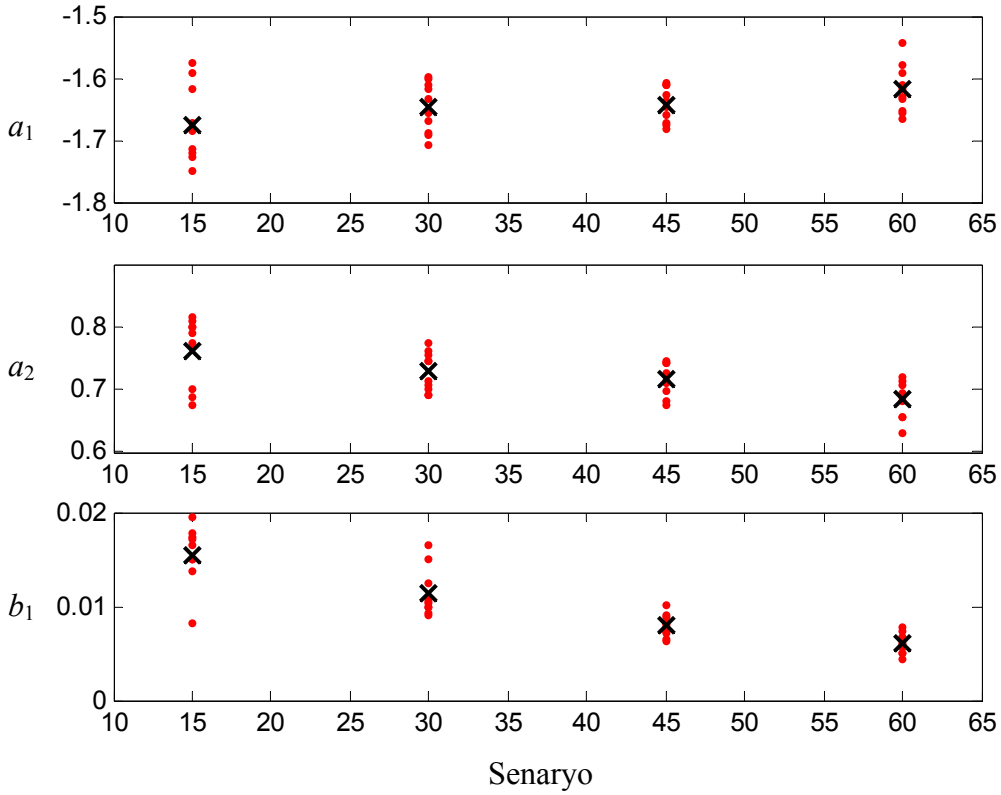
Parametrelerin doğrusal değişim göstermesinin tüm operatörler için geçerli olmadığı gösterilerek ilk soru cevaplanmış olmaktadır. İkinci sorunun, yani küçük parametre değişimlerinin model öngörü başarısına hangi ölçüde etki ettiği sorusunu cevaplamak için ise, tek bir senaryodan elde edilen bir modelin, farklı senaryolarla benzetimi yapıldığında elde edilen öngörü başarılarının değişimi incelenmiştir.



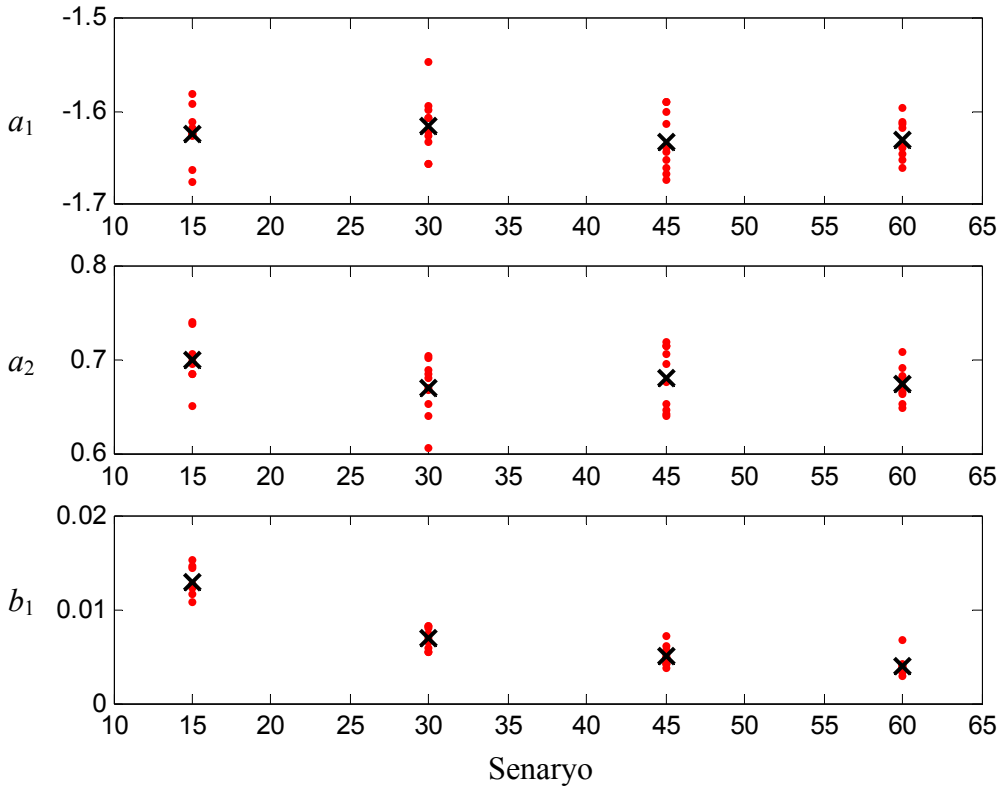
Şekil 4.4: Operatör 2 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler (·) ve ortalamaları (x))



Şekil 4.5: Operatör 3 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler (·) ve ortalamaları (x))



Şekil 4.6: Operatör 4 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler (·) ve ortalamaları (x))



Şekil 4.7: Operatör 5 için ARX216 model parametrelerinin senaryolara göre değişimi (10 oturum için bulunan değerler (·) ve ortalamaları (x))

Örnek olarak op2'nin 15º senaryosu alınmıştır. Op2'nin 6. oturumuna ait (herhangi bir oturum seçilebilir, rastgele olarak 6. oturum seçilmiştir) 15º senaryosundaki giriş-çıkış verileri, 1 adım, 5 adım ve sonsuz adım için model öngörülerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Daha sonra aynı veri kümesiyle op2'nin diğer senaryolar için bulunan ortalama katsayıları kullanılarak öngörü başarıları tekrar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Farklı parametre değerleri için 15º senaryosunda öngörü başarıları

Katsayıların ait olduğu senaryo	a_1	a_2	b_1	**1 adım öngörü başarısı (%)**	**5 adım öngörü başarısı (%)**	**Sonsuz adım öngörü başarısı (%)**
15º	-1,6292	0,72941	0,017919	89,4	60,8	55,5
30º	-1,5839	0,68629	0,014572	89,1	57,0	49,7
45º	-1,5444	0,63658	0,010464	88,8	52,5	40,5
60º	-1,5165	0,59654	0,0076904	88,5	49,9	33,0

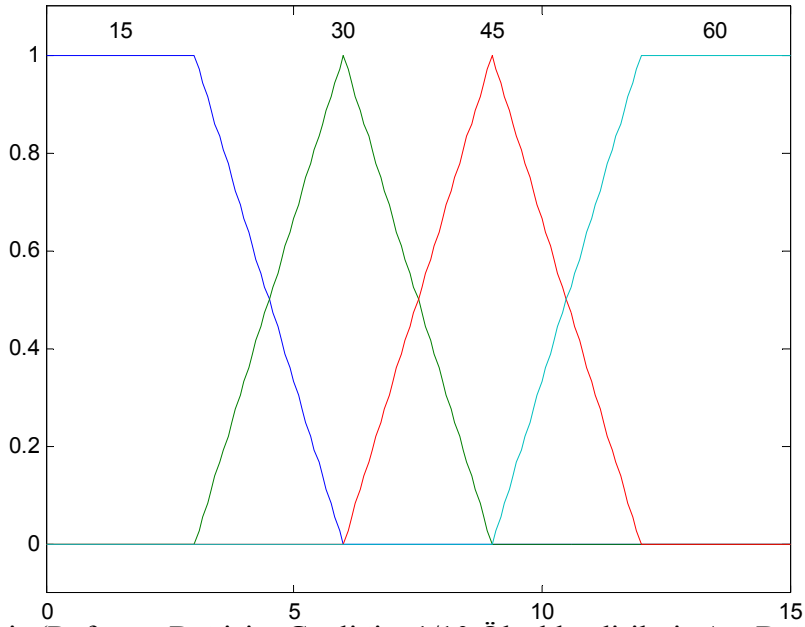
Tablodaki değerlerin ortaya koyduğu sonuç, parametre değerlerinin yerel doğrusal modeller arasında çok küçük miktarlarda değişmesine rağmen, bu değişim özellikle 5 adım ve sonsuz adım öngörü başarılarını önemli derecede etkilediği şeklindedir. 1 adım öngörü başarıları, söz konusu değişimlerden neredeyse hiç etkilenmese de, 15º senaryosuna ait verilerle benzetim yapılırken 15º modelinin kullanılması ile 60º modelinin kullanılması, yaklaşık %22'lik bir öngörü başarısı farkıyla sonuçlanmaktadır. Dolayısı ile yerel modellerin bulanık bir sistemle birleştirilmesi genel model başarısını önemli bir miktarda artıracaktır.

4.3 Bulanık Mantık Sistemi ile Birleştirilerek Elde Edilen Genel Model

Modelleme yöntemleri bölümünde kısaca anlatılan bulanık mantık sisteminin yapısını, model mertebesinin belirlenmiş olması sebebi ile artık daha ayrıntılı ele almak yerinde olacaktır.

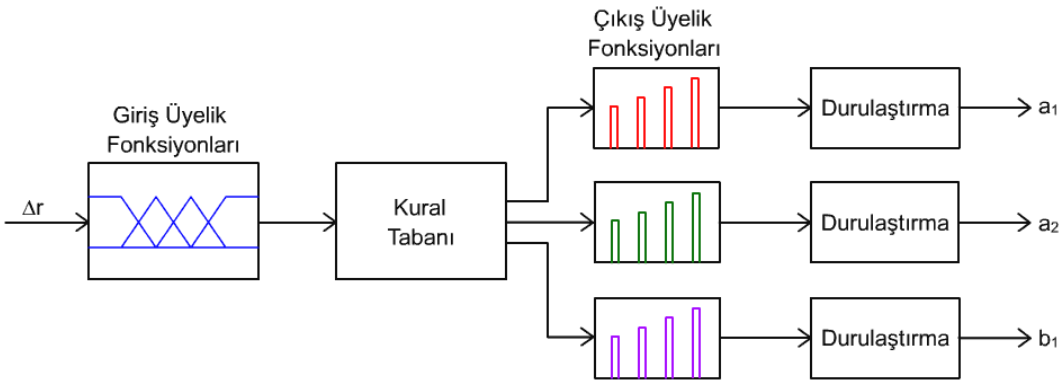
Bulanık mantık sisteminin oluşturulmasında MATLAB Bulanık Mantık Araç Kutusu (Fuzzy Logic Toolbox) kullanılmıştır. Sıfırıncı mertebeden Sugeno tipinde olan

bulanık mantık sisteminin çıkış üyelik fonksiyonları birer sabit değerdir **(Jang ve diğ., 1997)**. Giriş için her bir senaryoya karşılık düşecek şekilde 4 adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlardan 15º ve 60º senaryolarına karşılık gelen üyelik fonksiyonları yamuk (trapezoidal), diğer iki üyelik fonksiyonu ise üçgen şeklinde seçilmiştir (Şekil 4.8). Her bir model parametresi için 4 adet sabit değerlerden oluşan üyelik fonksiyonu bulunmaktadır ve bu sabit değerler elde edilen ortalama model parametreleri değerlerine eşittir. Kural tablosu ise ilgili senaryolara ait üyelik fonksiyonlarını birbirleriyle ilişkilendirecek şekilde hazırlanmış 4 kuraldan oluşmaktadır. Örneğin ilk kural "**Eğer** referans 15º **ise,** a_1 = -1,6292 **ve** a_2 = 0,72941 **ve** b_1 = 0,017919'dir." şeklindedir. Diğer 3 kural da benzer şekildedir. Burada referansın 15º olması, ±15º'ye, dolayısı ile referans değişiminin mutlak değerinin 30º olmasına karşılık geldiği gözden kaçırılmamalıdır. Bulanık çıkartım sisteminde "ve" operatörü için çarpım yöntemi, durulaştırma işleminde ise ağırlıklandırılmış ortalama yöntemi kullanılmıştır. Bulanık sistemin yapısı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Oluşturulan bulanık sistemin giriş üyelik fonksiyonları

Her çalışma bölgesinde (farklı referans genliğinde), bulanık geçiş sistemi ile, uygun a_1, a_2 ve b_1 katsayıları hesaplanarak söz konusu çalışma bölgesi için uygun bir doğrusal model elde edilmektedir. Bu şekilde adeta tüm çalışma bölgeleri boyunca sonsuz tane doğrusal model elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 4.9: Bulanık çıkartım sisteminin yapısal diyagramı

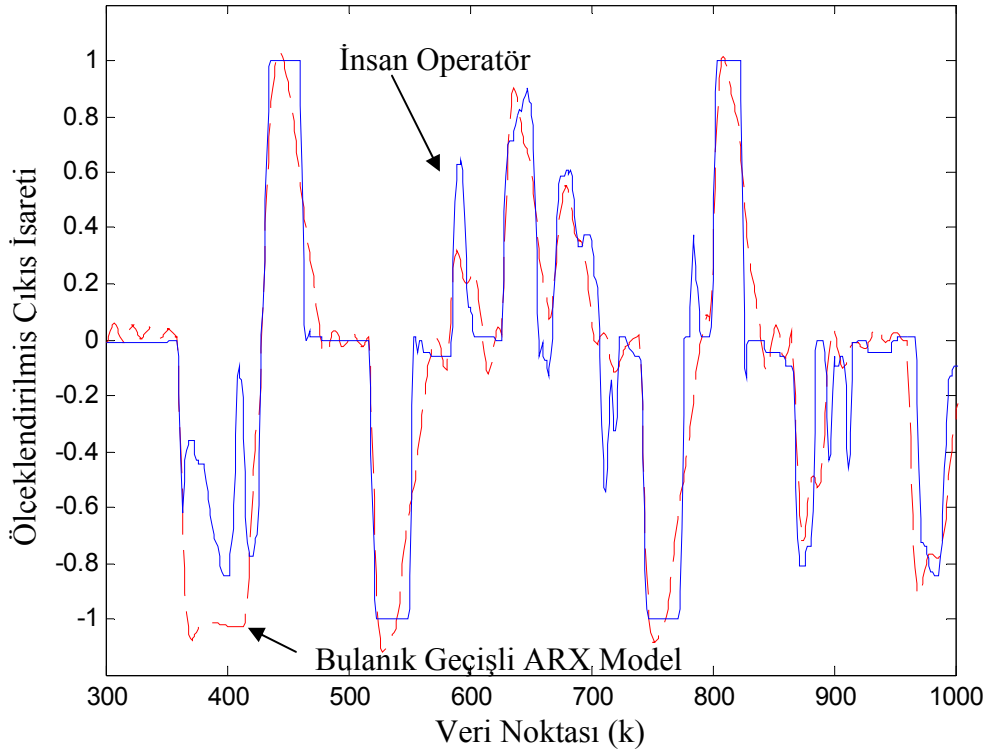
Önerilen yeni model yapısı genelleyebilme yeteneği ve öngörü başarı yüzdeleri açısından denenmiştir. Tüm operatörler arasında en yüksek puanı elde eden ve model katsayıları farklı oturumlarda ortalama değerlerden en az sapma gösteren (bkz. Şekil 4.4) op2'nin, en uzmanlaşmış operatör olduğu kabul edilmiştir. Op2'nin bulanık geçişli ARX modeli çıkarılmış, tüm operatörlerin son oturumlarındaki rastgele genlikli işaret senaryoları üzerinden toplanan veriler kullanılarak, bu modelin öngörü başarısı hesaplanmıştır. Son senaryoların kullanılmasındaki amaç, tüm operatörlerin en çok tecrübe kazandıkları durumun incelemeye katılmasının istenmesidir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Burada 1 adım öngörü başarısı hepsi için yaklaşık %88 değerini aldığı için tabloda belirtilmemiştir.

Tablo 4.2: Op2 için elde edilen bulanık geçişli ARX model kullanılarak farklı operatörlerin "Rastgele" senaryoları verileri üzerinden hesaplanan öngörü başarıları

Verinin Ait Olduğu Operatör	5 adım öngörü başarısı (%)	Sonsuz adım öngörü başarısı (%)
Op1	64,4	60,7
Op2	65,9	63,6
Op3	69,2	61,4
Op4	65,8	59,9
Op5	60,5	51,6

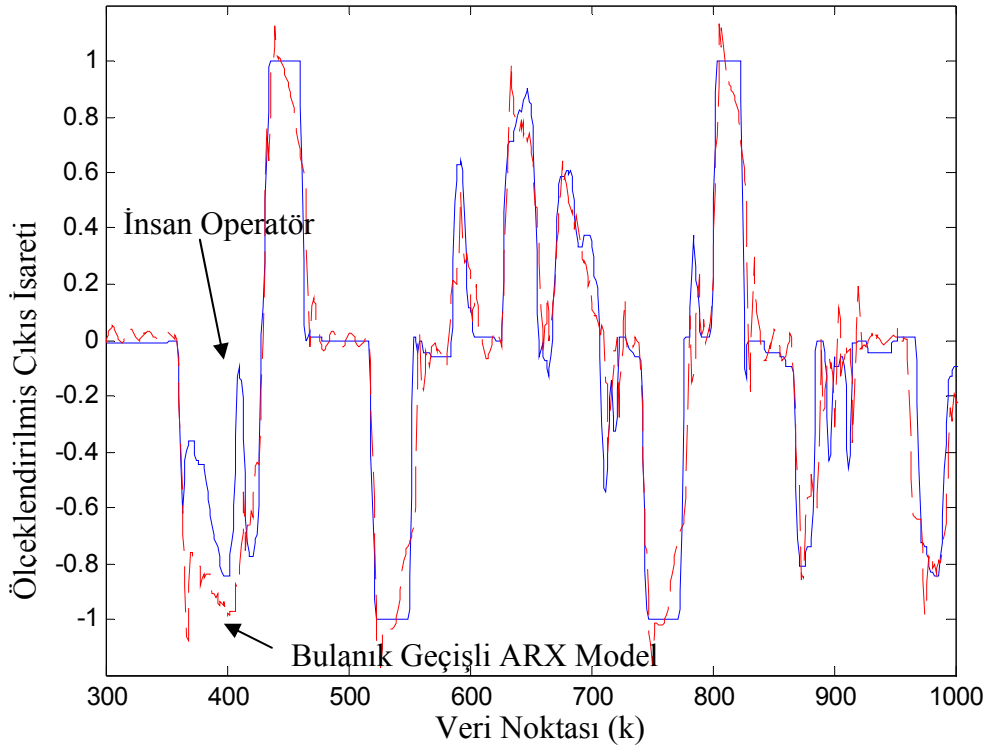
Sonuçlar oldukça başarılıdır. Özellikle dikkat çeken bir nokta, Op2 için elde edilen modelin Op3 için 5 adım öngörüde Op2 için olandan daha büyük bir başarı göstermesidir. Modelin farklı operatörler için elde edilen sonuçlarından genelleme yeteneğinin yüksek olduğu söylenebilir.

Op2 için elde edilen bulanık geçişli ARX modelin 5 adım öngörü ve sonsuz adım öngörü için yapılan benzetimlerinden birer kesit Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de görülebilir.



Şekil 4.10: Sonsuz adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve bulanık geçişli modelden hesaplanan kontrol işareti

Burada önerilen yönteme, giriş-çıkış ilişkisi doğrusala çok yakın olan veri kümeleri için bir eşleme yapılırken bir doğru uydurulması yerine neden bir bulanık sistem tasarlandığı şeklinde bir eleştiri yöneltilebilir. Önerilen yöntemin motivasyonu, farklı çalışma bölgeleri için elde edilen doğrusal modeller arasında doğrusal olmayan bir geçiş sağlanması olduğu için bulanık sistem tercih edilmiştir. Bir doğru uydurma algoritması ile de yakın sonuçların elde edilebileceği gösterilebilir, fakat, önerilen yöntem söz konusu ilişkinin doğrusal olmaması durumlarında da geçerliliğini korurken doğru uydurma yöntemi geçerliliğini yitirecektir. Duruma göre doğru yerine doğrusal olmayan ilişkiyi temsil edecek bir eğri uydurma yöntemi izlenebilir. Fakat bulanık mantık sistemi kullanıldığında, modelin başarısız olduğu belirli bir bölge için düzeltme veya değişiklik yapmak çok daha kolay olacaktır.



Şekil 4.11: 5 adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve bulanık geçişli modelden hesaplanan kontrol işareti

4.4 ANFIS Kullanılarak Oluşturulan Model

Önerilen bulanık geçişli doğrusal modelle bir karşılaştırma yapılabilmesi için, ANFIS ile model oluşturulurken, ARX modeller için kullanılan ile aynı giriş-çıkış verileri kullanılmıştır. Yani ARX216 modeli gibi, ANFIS ile oluşturulan model de çıkış verisinin 1 ve 2 örnekleme zamanı önceki iki değeri ile giriş verisinin 6 örnekleme zamanı önceki değerini kullanarak o anki çıkışı üretmektedir. Her bir giriş için 3 üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. 2'şer üyelik fonksiyonu içeren yapı da denenmiş fakat az da olsa daha başarısız sonuçlara yol açtığı için burada sonuçlarına değinilmemiştir.

ANFIS modelinin, benzetimde bazen ortaya çıkan sorunlu bir davranış bölgesi vardır. Modelin kararsız davranması olarak adlandırılacak olan bu davranış biçimi daha sonra açıklanacaktır. Fakat bu davranış biçimi, op2'nin verilerinden faydalanılarak model kurulduğunda daha sık olarak ortaya çıkmakta, ikinci en başarılı operatör olan op1'in verilerinden kurulan modelde ise daha seyrek olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun için ANFIS modeli için op1'in verileri kullanılmıştır.

Modellemede farklı olan bir başka nokta, sadece son oturumdaki rastgele senaryosu verisinin ANFIS ile modeli elde etmekte yeterli kabul edilmesidir.

Tablo 4.3: Op1 için elde edilen ANFIS model kullanılarak farklı operatörlerin "Rastgele" senaryoları verileri üzerinden hesaplanan öngörü başarıları

Verinin Ait Olduğu Operatör	5 adım öngörü başarısı (%)	Sonsuz adım öngörü başarısı (%)
Op1	66,1	55,7
Op2	60,3	52,3
Op3	65,4	53,7
Op4	58,1	51,4
Op5	60,1	49,3

Elde edilen modelin farklı operatörlerin son oturumdaki rastgele senaryoları verileri ile benzetimi yapılarak öngörü başarısı incelenmiştir. Sonsuz adım ve 5 adım öngörü için elde edilen başarı oranları Tablo 4.3'te verilmiştir. 1 adım öngörü başarı oranları yine fazla değişmediği için tabloya dâhil edilmemiştir.

Sonsuz adım öngörü için yapılan benzetimlerde sistem bazen kararsız davranış bölgelerine girmektedir. Kararsız davranış bölgesinde ANFIS modelin çıkışı çok büyük mertebelerde değerler almaktadır. Bir kez bu bölgeye girildiğinde çıkış değeri bir daha gerçek değerleri yakalayamamaktadır. Bunu önlemek için ANFIS model ile benzetim yapılırken, her adımda bulunan çıkış değeri, gerçek çıkış değerleri için üst ve alt sınır değerleri olan ±1 aralığında kalacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlama sonrasında model çıkışının kararsız bölgeye girdikten bir süre sonra tekrar gerçek çıkışı yakalayabildiği ve normal davranışa dönebildiği gözlemlenmiştir. Kararsız bölge boyunca model çıkışı çok yüksek bir frekansla maksimum ve minimum olan +1 ve -1 değerlerine yakın değerler almaktadır.

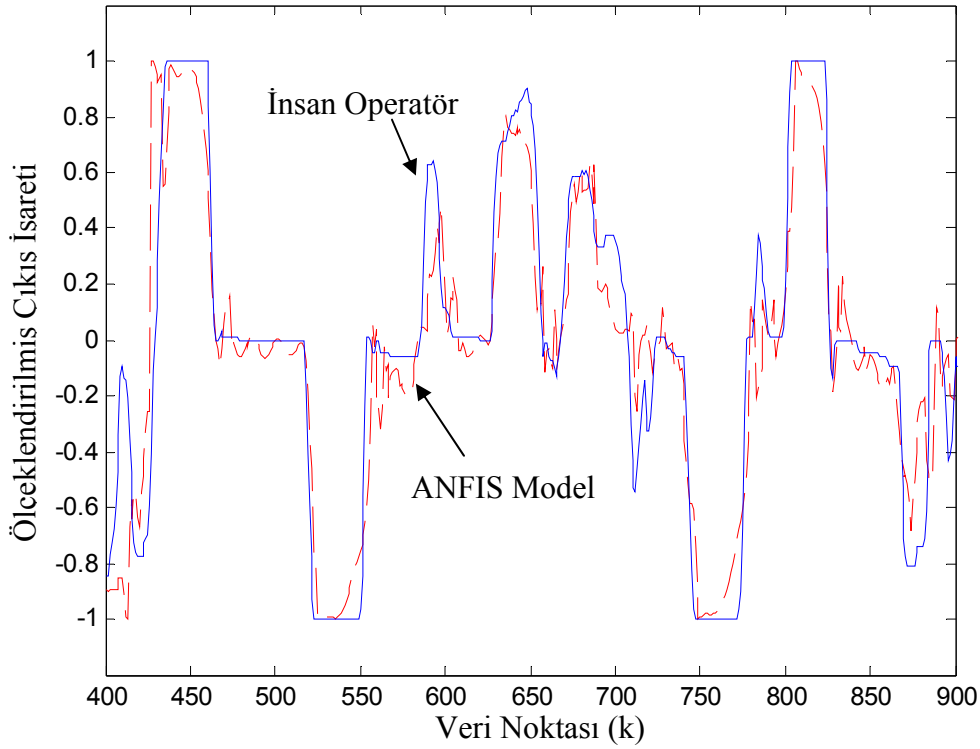
ANFIS modelinin başarımını artırabilmek ve kararsız bölgelere girmesini önleyebilmek için, model giriş sayısının artırılması denenmiştir. Giriş işaretinin sadece 6 örnekleme zamanı gecikmeli değeri yerine 4 ve 5 örnekleme zamanı gecikmeli değerleri de model girişine eklenmiştir. Toplam 5 girişli ve her bir giriş için 2 üyelik fonksiyonu içeren yeni modelle yapılan benzetimlerde de kararsız

bölgelerin önlenemediği görülmüştür. Her bir giriş için 3 üyelik fonksiyonunun olduğu yapı ise çok uzun bir hesaplama zamanı gerektirerek (program yaklaşık yarım saat beklenmesine rağmen işleyişini tamamlayarak bir sonuç üretememiştir) bilgisayarın işlem gücünü aşmıştır. Benzer durum giriş sayısı daha da artırıldığında 2'şer üyelik fonksiyonlu yapılarda da meydana gelmiştir.

Kararsız davranışın önlenmesi için denenen başka bir yöntem, ANFIS model oluşturulurken sadece son oturum verisinin kullanılmasının yetersiz olabileceği fikrinden yola çıkmaktadır. Bu yöntemde söz konusu veri artırılmıştır. Öncelikle, sadece son oturumun rastgele senaryosuna ait veriler yerine son iki oturumunki, daha sonra ise son üç oturumunki kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Her giriş için 3'er üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Son iki oturum verisi kullanıldığında elde edilen model, sadece op4'ün sonsuz adım öngörüsü esnasında kararsız davranışa girmiş, bu davranışa girmediği durumlarda başarı oranının az miktarda arttığı gözlemlenmiştir. Fakat son üç oturum verisi ile oluşturulan modelin tüm operatörlerin sonsuz adım öngörüsü benzetimlerinde kararsız davranış bölgesine girmesi, sorunun veri yetersizliğinde olmadığını göstermiş ve düzeltme için denenen bu yöntemin de başarısızlıkla sonuçlanmasına yol açmıştır. Sonuç olarak ANFIS ile elde edilen genel modelin başarımı Tablo 4.3'te özetlendiği durumdan öteye taşınamamıştır ve bu modelleme yöntemi, üzerinde daha ileri çalışma yapılabilecek bir konu oluşturmaktadır. ANFIS modelin op4 verisi ile sonsuz adım öngörü amacıyla yapılan benzetiminin sonuçlarından bir kesit Şekil 4.12'da görülmektedir.

4.5 Modellerin Karşılaştırılması

Bulanık geçişli doğrusal model, hem 5 adım hem de sonsuz adım öngörü benzetimlerinde oldukça başarılıdır. Davranışı hiçbir zaman kararsızlığa girmemektedir. Fakat oluşturulması için kullanılan veri miktarı oldukça fazladır; 10 oturumdaki 4'er senaryo verisi 120 dakikalık bir veri toplama süresine karşılık gelmektedir. Tüm operatörler için yakın öngörü başarısı göstermesi genelleme yeteneğinin yüksekliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.12: Sonsuz adım öngörü için insan operatörün uyguladığı kontrol işareti ve ANFIS modelden hesaplanan kontrol işareti

ANFIS modelin üstünlüğü, bulanık geçişli ARX modele oranla çok az miktarda veriden faydalanılarak oluşturulabilmesidir. Tek bir operatörün en çok uzmanlaşmış olduğu halinde, yani son oturumundaki rastgele senaryosu verisi, modelleme için kullanılan tek veri kümesidir ve 3 dakikaya karşılık gelmektedir. ANFIS kullanılarak elde edilen model öngörü başarımlarında bulanık geçişli ARX modelin gerisinde kalmıştır ve kararsız davranış bölgesine girebildiği gözlemlenmiştir. ANFIS kullanılarak bu sorunların ortadan kaldırıldığı bir model elde edilmesi üzerinde daha fazla çalışılması gereken bir konudur.

Kullanılan farklı modelleme yöntemlerinin, farklı operatör verileri kullanılarak, 5 ile sonsuz öngörü adımı için sağladıkları başarı oranları Tablo 4.4'te özetlenmiştir. Burada ARX olarak belirtilen model, ARX216 yapısındaki standart doğrusal modeldir. Bu modelin katsayıları, op2'nin farklı senaryolar için elde edilen katsayılarının ortalamasına eşit alınmıştır.

Tablo incelendiğinde, elde edilen ARX modellerin ortalaması olan sabit bir ARX model ile bulanık geçişli ARX modelin öngörü başarılarının çok farklı olmadıkları, fakat bulanık geçişli modelin sürekli %1-5 daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu

durum göz önüne alınarak, önerilen yeni modelleme yönteminin kullanılmaya değer olup olmadığı sorgulanabilir.

Tablo 4.4: Farklı modelleme yöntemlerinin öngörü başarıları

	5 adım öngörü başarısı (%)			**Sonsuz adım öngörü başarısı (%)**		
Verinin Ait Olduğu Operatör	ARX	Bulanık Geçişli ARX	ANFIS	ARX	Bulanık Geçişli ARX	ANFIS
Op1	63,4	64,4	66,1	57,2	60,7	55,7
Op2	63,8	65,9	60,3	59,9	63,6	52,3
Op3	66,4	69,2	65,4	56,3	61,4	53,7
Op4	64,7	65,8	58,1	56,7	59,9	51,4
Op5	60,0	60,5	60,1	48,9	51,6	49,3

Bu soruya verilecek cevap, her iki modelin de elde edilirken farklı çalışma noktalarında zengin verinin kullanılmış olması ve aslında aralarındaki tek farkın bulanık bir geçiş tasarlanıp tasarlanmamasından ibaret olmasıdır. Bu da büyük bir ek yük getirmemektedir. Ayrıca burada başarı oranları verilen ARX modelin standart modelleme yöntemlerinde kullanılan ARX modellerden farklı olduğu da gözden kaçırılmamalıdır. Normalde ARX modeller çıkarılırken, sabit genlikli tek bir PRBS referans işareti kullanılır. Bu şekilde çıkarılabilecek model ise ancak tek bir senaryonun ortalama modeli olabilir. Böyle bir durumda başarı oranlarının nasıl değişeceği hakkında Tablo 4.1 bir fikir vermektedir. Sadece 15º senaryosuna kullanılarak elde edilen bir modelin farklı senaryolardaki öngörü başarıları arasında %22'ye varan farklar bulunmaktadır.

Önerilen bulanık geçişli ARX modelleme yönteminin, farklı doğrusal olmayan sistemlerin tanınmasında, örneğin insan operatörün, kontrolü çok daha zorlayıcı olan başka bir sistemi kontrol ederkenki davranışı modellendiğinde, standart ARX modelleme yönteminden çok daha başarılı sonuçlar vereceği tahmin edilmektedir.

5. MODELLERİN KONTROLÖR OLARAK KULLANILMASI – SONUÇLAR VE ÖNERİLER

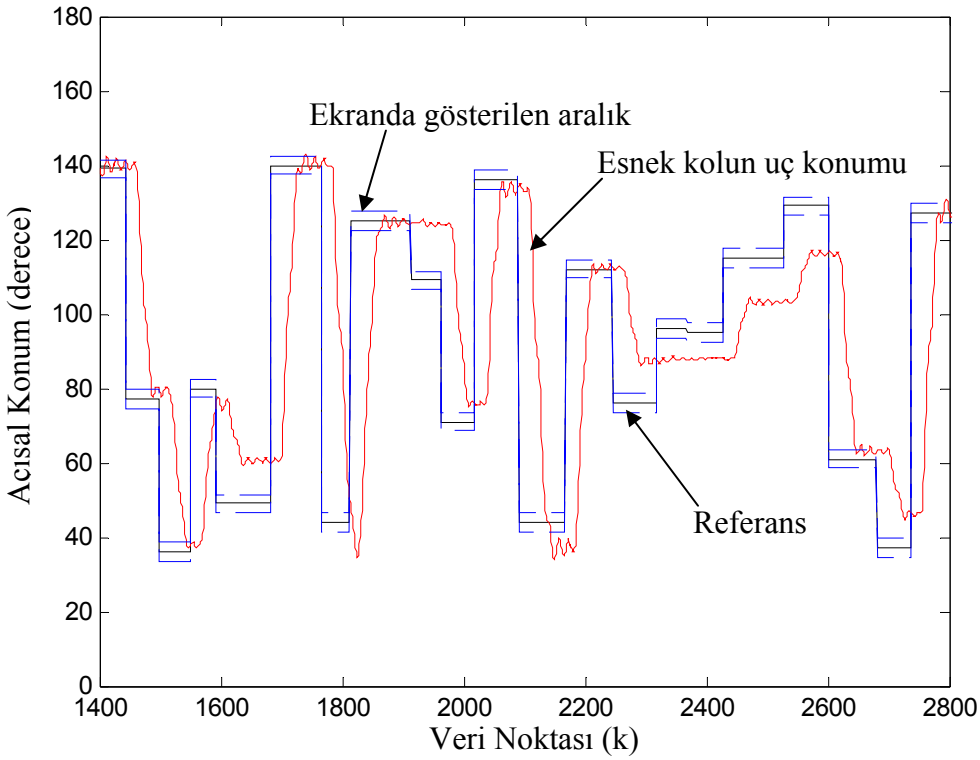
Farklı yöntemlerle elde edilen modeller, deney düzeneğinin yazılımına, insan operatörün yerini alan bir kontrolör olarak eklenmiştir. Bunun gerçekleştirilmiş olması, elde edilen modellerin kontrolör olarak kullanılabilirliklerinin gösterilmesinden öte, daha ileri bazı uygulamalar için gerekli altyapının sağlanabildiğini ortaya koymaktadır. Bu uygulamalar için çeşitli örneklerden, öneriler bölümünde bahsedilmiştir.

5.1 Modellerin Kontrolör Olarak Kullanılması ile Elde Edilen Sonuçlar

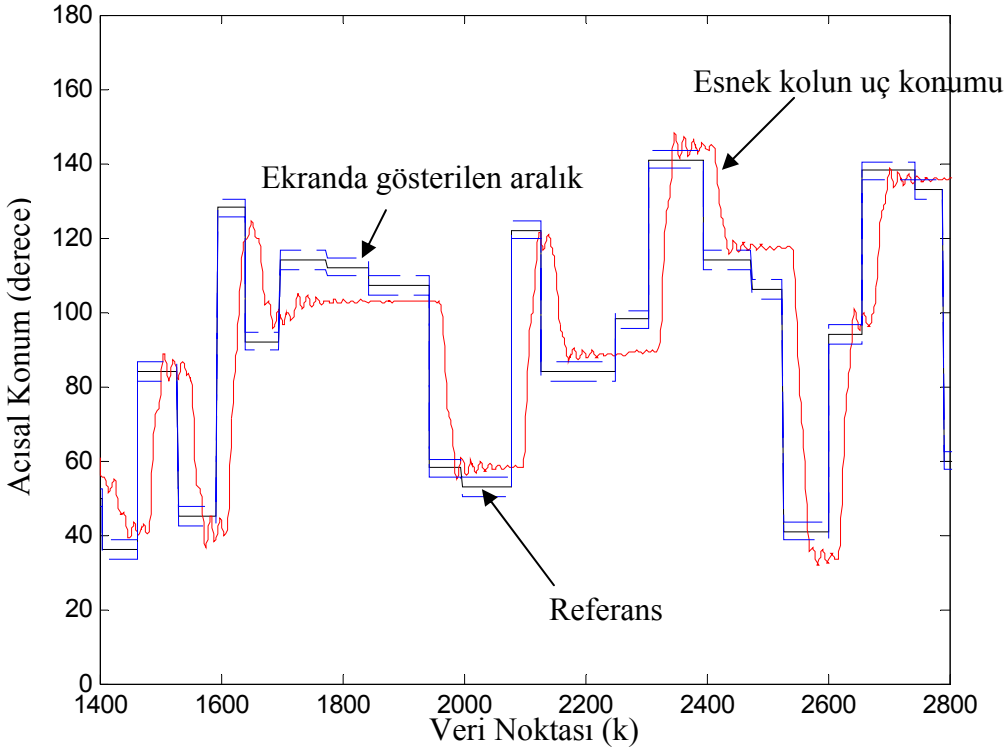
İnsan operatörler deney düzeneğini kullanıp tecrübe edindikçe geliştirdikleri genel bir davranış biçimi bulunmaktadır. Bu davranış biçiminde, operatörlerin referans konumlara çubuğun uç konumunu oturturken, önce çubuğu hızlı bir şekilde hareket ettirdikleri, referansa yaklaştıklarında ise çubuğu yavaşlatarak son konuma konumlandırdıkları gözlemlenmiştir. Bu strateji ile, tanımlanmış görev olan, hızlı bir şekilde ve az salınımla referans konumlara çubuğu konumlandırma görevini başarmaktadırlar.

Elde edilen tüm modellerin insan operatörlerin geliştirdikleri bu davranışı az çok taklit edebildikleri gözlemlenmiştir. Modellerin insan operatörün davranışının genel karakterini yakalayabildiği söylenebilir. Çıkarılan modeller sistemi kontrol ederken ortaya çıkan sistem davranışları; ortalama ARX model için Şekil 5.1'de, bulanık geçişli ARX model için Şekil 5.2'de ve ANFIS model için Şekil 5.3'te görülmektedir.

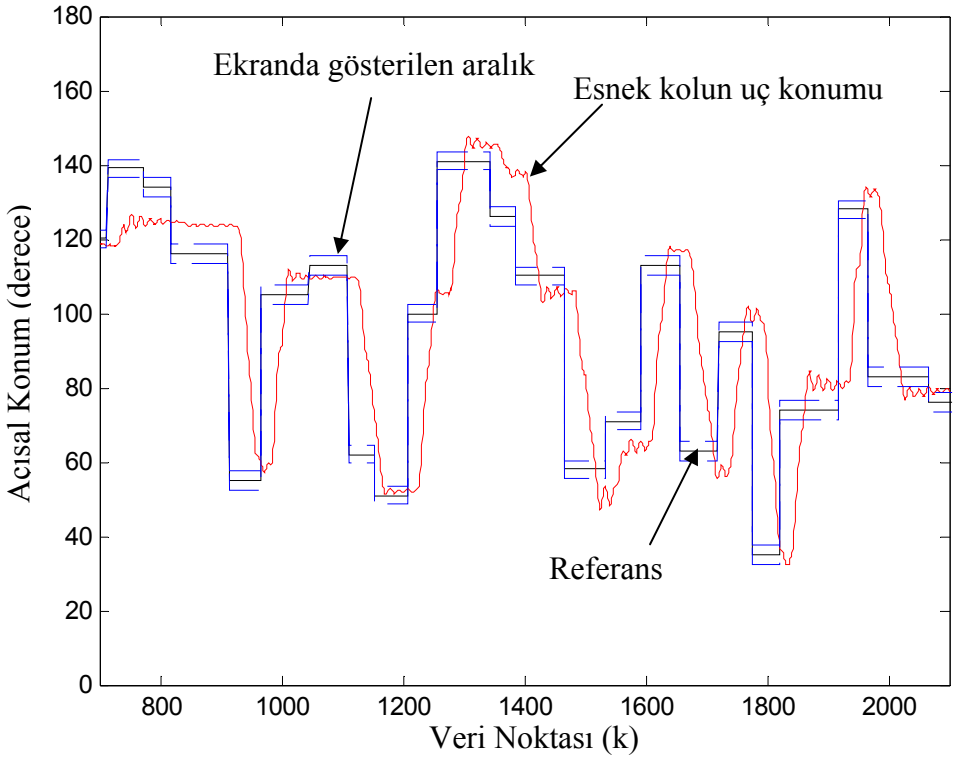
ARX ve bulanık geçişli ARX modellerin davranışları her zaman kararlı olmakla birlikte, ANFIS modelin benzetimlerde gözlemlenene benzer kararsız davranışlar ortaya çıkarabildiği görülmüştür.



Şekil 5.1: Ortalama ARX model ile kontrol edilen sistem davranışı



Şekil 5.2: Bulanık geçişli ARX model ile kontrol edilen sistem davranışı



Şekil 5.3: ANFIS model ile kontrol edilen sistem davranışı

Gözlemlerde tüm modellerin yetersiz kaldıkları bir nokta göze çarpmıştır. Yakında (mevcut konumun 0º-30º uzağında) beliren referans konumları takip ederken, modellerin çubuğun ucunu referansa yaklaştırıp referans aralığın içine bile girmeden kontrole son verdiği görülmüştür. Bunun nedeni doğru akım motorunun sahip olduğu ölü bölgedir. Yaklaşık 1,5 V değerinde bir kontrol işaretine ulaşılmadığı takdirde motor hareket etmemektedir. Modellerin söz konusu durumlarda motoru aslında doğru yönde çevirmek için belirli bir kontrol işareti yarattığı, fakat bu işaretin büyüklüğü bahsedilen ölü bölgeyi aşmaya yetmediği için motorun hareketsiz kaldığı tespit edilmiştir. İnsan operatörün benzer durumlarda çok küçük hareketler elde edebilmek için genliği küçük ama ölü bölgeyi aşmaya yeten, darbeye yakın işaretler uyguladıkları bilinmektedir. Motorun doğrusallıktan çok uzak olan bu davranışına karşılık olarak insan operatörün geliştirdiği davranış da doğrusallıktan çok uzaktır ve kullanılan modelleme yöntemleri bu davranışı yakalayamamıştır. Bununla birlikte, daha uzakta beliren referans işaretlerin takibinde söz konusu sorun yaşanmamakta, çubuğun uç konumu ise genellikle referans aralığa başarıyla konumlandırılabilmektedir.

5.2 Öneriler

Kurulan deney düzeneği, hem insan operatör için farklı modelleme yöntemlerinin denenmesi hem de elde edilen modellerin düzenek üzerine eklenerek çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesi için çok uygundur.

Deney düzeneğinden veri toplama için farklı senaryolar oluşturulabilir, modelleme yöntemi farklı olduğunda gerekebilecek farklı özelliklerdeki veriler toplanabilir. Bu şekilde farklı modelleme yöntemleri denenebilir.

ANFIS ile elde edilen modellerin iyileştirilmesine ve kararsız davranışların yok edilmesine çalışılabilir.

Elde edilen modeller, tecrübeli operatör modelinden faydalanarak acemi operatörün eğitimini hızlandırma amacıyla kullanılabilir. Bu işlem gerçekleştirilirken, altta sürekli çalışmakta olan uzman operatör modelinin o an için hangi kontrol işaretini üreteceği hesaplanabilir ve arayüz üzerinden o an sistemi kullanan acemi operatöre bu işaret hakkında geri besleme verilebilir. Bu geri besleme doğrudan modelin çıkışı olabileceği gibi, acemi operatörün uyguladığı çıkış ile modelin çıkışı arasındaki fark da olabilir.

Modeli, acemi operatörün eğitimi amacıyla kullanılmak yerine, modelin acemi operatöre destek olması şekilde kullanmak da mümkündür. Operatörün belirli bir miktardan daha kötü davranışlarında model devreye girecek ve düzeltme yapacak şekilde düzenlemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

Abonyi, J., 2003. Fuzzy Model Identification for Control, Birkhäuser, Boston.

Aldridge, H.A. and Juang, J.N., 1997. Experimental Robot Position Sensor Fault Tolerance Using Accelerometers and Joint Torque Sensors, NASA Technical Memorandum, 110335, Hampton, Virginia.

Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 1986. Random Data – Analysis and Measurement Procedures (Second Edition), John Wiley and Sons, New York.

Bos, J.F.T., Stassen, H.G., van Luntern, A., 1995. Aiding The Operator In The Manual Control of a Space Manipulator, *Control Engineering Practice,* **Vol. 3, No. 2,** 223-230.

Chen L-K and Ulsoy, G., 2000. Identification of a Nonlinear Driver Model via NARMAX Modeling, *Proceedings of the American Control Conference,* Chicago, Illinois, June 2000, 2533-2537.

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

Ertuğrul Ş., and Hızal, N.A., 2005. Neuro-Fuzzy Controller Design via Modeling Human Operator Actions, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,* **16**, 133-140.

Jang, J.-S., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics,* **Vol. 23, No. 03**, 665-685.

Jang, J.-S., Sun, C.-T., Mizutani, E., 1997. Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Ljung, L., 1999. System Identification – Theory for the User, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Ljung, L., 2002. System Identification Toolbox User's Guide, The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts.

McRuer, D., 1980. Human Dynamics in Man-Machine Systems, *Automatica,* **Vol. 16**, 237-253.

Mulder, M., van Paassen, M.M.R., Abbink, D.A., 2005. Identification of Driver Car-Following Behaviour, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,* **Vol. 3,** 2095-2910.

Murray-Smith, R., 1998. Modelling Human Control Behaviour with Context-Dependant Markov-Switching Multiple Models, *IFAC Man-Machine Systems Conf.,* Kyoto, Japan.

Nechyba, M.C., and Xu, Y., 1995. Human Skill Transfer: Neural Networks as Learners and Teachers*, International Conference on Intelligent Robots and Systems,* **Vol. 3**, 314-319.

Nelles, O., 2001. Nonlinear System Identification, Springer-Verlag, Germany.

Palacherla, A., 1997. Using PWM to Generate Analog Output, Microchip Technology Inc.

Pilutti T. and Ulsoy, G., 1999. Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans,* **Vol. 29, No. 5,** 486-502.

Prokop, G., 2001. Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization, *Vehicle System Dynamics,* **Vol. 35,** 19-53.

Repperger, D.W., 1992. The Application of A Formal Model of The Human Operator Into A System Which Is Dynamically Changing, *First IEEE Conference on Control Applications*, **Vol. 2,** Dayton, Ohio, September 1992, 1032-1037.

Sasaki M., Inooka, H., Ishikura, T., 1990. Manual Control of a Flexible Arm and its Application to an Automatic Control System, IEEE *Transactions on Systems, Man and Cybernetics,* **Vol. 20, No. 3,** 718-722.

Sheridan, T.B. and Ferrell, W.R., 1974. Man-Machine Systems, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Söderström, T., and Stoica, P., 1989. System Identification, Prentice Hall, University Press, Cambridge, Great Britain.

ÖZGEÇMİŞ

Özkan Çelik 1981 yılında Sivas'ta doğdu. 7 yıl devam ettiği Sivas Selçuk Anadolu Lisesi'nden 1999'da mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği programında eğitim görmeye hak kazandı. Bir yıl İngilizce Hazırlık sınıfına devam ettikten sonra, 2000 yılında başladığı Makine Mühendisliği eğitimini 2004 yılında tamamlayarak mezun oldu. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sistem Dinamiği ve Kontrol Yüksek Lisans Programı'nda başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.