

MEKATRONİK SİSTEMLERDE UYGULANAN BELLİ BAŞLI KONTROL YÖNTEMLERİ

Bülent Özkan*

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme
Enstitüsü (TÜBİTAK-SAGE), P.K. 16, 06261, Mamak, Ankara

Özet

Mekanik, elektronik, kontrol ve yazılım esaslı alt sistem ve bileşenlerin uyumlu bir şekilde birlikte kullanılmasıyla oluşturulan ve en genel anlamda kontrol edilen sistemi (plantı) mekanik özellikte olan kontrol sistemleri olarak adlandırılabilir. Mekanik sistemler, günümüzde pek çok uygulamada önemli roller üstlenmektedir. Mekanik bir sistemin işlevlerini kendinden beklenen doğruluk ve hassasiyette yerine getirebilmesinin önkoşullarından biri de yüksek başarımlı karakteristiklerini haiz bir kontrol yöntemine sahip olmasıdır. Bu anlamda, mekatronik sistemlerin kontrolünde çeşitli tekniklerin uygulandığı görülmektedir. Diğer taraftan bu yöntemler, ilgili kontrol sistemi oluşturulurken plantın dinamik davranışının göz önüne alınıp alınmamasına bağlı olarak model tabanlı ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri olarak iki ana grupta ele alınabilir. Her iki grupta yer alan yöntemlerin birbirlerine göre çeşitli üstünlük ve zayıflıkları bulunmakta olup, kontrol edilecek sistemin modellenebilirliği ve planlanan işletim koşullarına göre uygun olan yaklaşım kontrol sistemi tasarımında tercih edilmelidir. Bu çalışmada, mekatronik sistemlerin genel özellikleri ile ilgili kısa bir bilgi verildikten sonra, mekatronik sistem kontrolünde kullanılan model tabanlı ve model tabanlı olmayan yöntemler, uygulama şekillerinin yanı sıra üstünlük ve zayıflıkları açısından ele alınmaktadır. Çalışmanın sonunda, ele alınan hususlarla ilgili kısa bir değerlendirme sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mekatronik sistem, kontrol sistemi, kontrol yöntemi, model tabanlı kontrol, model tabanlı olmayan kontrol, klasik kontrol, modern kontrol, gürbüz kontrol, Lyapunov fonksiyonu, geri adımlamalı kontrol, kayan kipli kontrol, H-2 kontrol, H-inf kontrol, yapay sinir ağları, bulanık mantık

NOTABLE CONTROL METHODS UTILIZED IN MECHATRONICS SYSTEMS

Abstract

Mechatronic systems constructed using mechanical-, electronics-, control-, and software-based subsystems and components in a compatible manner and which can, generally, be identified as mechanical control systems with mechanical plants are enrolled in many applications today. One of the prerequisites for a mechatronic system to fulfill its functions accurately and precisely is that it possesses a control method having high performance characteristics. In this sense, it can be observed that several techniques are utilized in the control of mechatronic systems. On the other hand, these methods can be classified into two groups called model-based and nonmodel-based control methods depending on whether the dynamical behavior of the plant is considered or not. As each method in both groups has advantages and disadvantages with respect to others, the approach convenient in terms of whether the plant can be modeled and planned operating conditions should be chosen in control system design. In this study, after giving brief information about the general properties of the mechatronic systems, the model- and nonmodel-based methods used in their control are handled with regard of their advantages and disadvantages as well as implementation issues. At the end of the work, a short evaluation is presented about the matters considered.

Keywords: Mechatronic system, control system, control method, model-based control, nonmodel-based control, classical control, modern control, robust control, Lyapunov's function, backstepping control, sliding-mode control, H-2 control, H-inf control, neural networks, fuzzy logic

* E-posta: bozkan@sage.tubitak.gov.tr

1. Giriş

Semboller

\hat{A}	: Sistem matrisi
\hat{B}	: Girdi matrisi
\hat{C}	: Çıktı matrisi
$C(s)$: Kontrol sistemi çıkışı
D	: Türevsel (<i>İng. derivative</i>)
\hat{D}	: Durum geçiş matrisi
E, e	: Hata (<i>İng. error</i>)
$G(s)$: Plant transfer fonksiyonu
$G_c(s)$: Kontrolcü transfer fonksiyonu
$H(s)$: Ölçer transfer fonksiyonu
I	: İntegral (<i>İng. integral</i>)
\bar{k}	: Kontrolcü kazançları sütun matrisi
K_d	: Türevsel kazanç katsayısı
K_i	: İntegral kazanç katsayısı
K_p	: Oransal kazanç katsayısı
m	: Plant çıktısı sayısı
$M(s)$: Ölçülen kontrol sistemi çıkışı
N	: Sistem mertebesi
P	: Oransal (<i>İng. proportional</i>)
p	: Plant girdisi sayısı
$R(s)$: Kontrol sistemi referans girişi
s	: Laplace değişkeni
T	: Devrik (<i>İng. transpose</i>) işlemi
T_d	: Türev zaman sabiti
T_i	: İntegral zaman sabiti
U	: Kontrol sinyali
\bar{u}	: Plant girdileri sütun matrisi
\bar{x}	: Plant durum değişkenleri sütun matrisi
x_i	: i . durum değişkeni ($i=1, 2, \dots, n$)
$\ \bar{x}\ _2$: H_2 normu
$\ \bar{x}\ _\infty$: H_∞ normu
\bar{y}	: Plant çıktıları sütun matrisi

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (<i>İng. Computer-aided Design</i>)
CAM	: Bilgisayar Destekli Üretim (<i>İng. Computer-aided Manufacturing</i>)
I-PD	: İntegral-oransal ve türevsel kontrolcü
İng	: İngilizce
PD	: Oransal ve türevsel kontrolcü
PI	: Oransal ve integral kontrolcü
PID	: Oransal, integral ve türevsel kontrolcü
PIV	: Oransal, integral ve hız kontrolcüsü
PLC	: Programlanabilir Mantık Kontrolcüsü (<i>İng. Programmable Logic Controller</i>)
YSA	: Yapay Sinir Ağları

Özellikle son yıllardaki teknolojik gelişmelerin doğurduğu en önemli sonuçlardan biri de “mekatronik sistemler” olarak adlandırılan sistemlerin hayatımıza girmesi ve birbirinden farklı pekçok alanda üstlendikleri görevler sayesinde işlerimizi büyük oranda kolaylaştırması olmuştur. Gündelik yaşantıda kullanılmakta olan birçok sistem,

esas itibarıyla birer mekatronik sistemdir. Mekatronik sistemler, klasik mekanik sistemlerden farklı olarak birden fazla mühendislik dalına ait tasarım unsurlarının uyumlu olarak birarada kullanıldığı uygulamalardır.

En genel anlamda mekanik, elektronik, kontrol ve yazılım bileşenlerinden oluşan; denetim değişkeni olarak seçilen fiziksel büyüklüğe ilişkin verileri uygun şekilde seçilmiş algılayıcıları aracılığıyla toplayan, bu verileri kontrolcülerini ve hafızasındaki yazılımlar marifetiyle yorumlayan ve gerekli kararları alabilen, ayrıca tahrik elemanları (eyleticileri) ile de gerekli tepkileri veren tüm makine, cihaz ve sistemler “mekatronik sistemler” olarak adlandırılmaktadır. Algılayabilen, ölçebilen, karar verebilen ve bu karar yönünde hareket edebilen otomatik makineler; yani mekatronik sistemler, savunma sanayii, güvenlik sistemleri, makine sanayii, endüstriyel otomasyon sistemleri, tıp, tarım, bankacılık ve madencilik gibi çeşitli alanlarda uygulanmakta olup, kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir [1], [2]. Mekatroniğin bir bilim dalı olarak gelişimi temelde robot sistemleriyle birlikte başlamışsa da, günümüzde pekçok alanda mekatronik uygulamalarına rastlanmaktadır [3]. Endüstriyel robotlar, gece görüş sistemleri, mayın tarama robotları, otomatik stoklama sistemleri, fotoğraf makineleri, videolar, çamaşır-bulaşık makineleri ve bankamatikler gibi sistem ve ürünler, esas itibarıyla birer mekatronik sistemdir [1]. Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen sırasıyla tek kollu sabit ve iki kollu hareketli robot kolu sistemleri, otomotiv sanayii başta olmak üzere endüstrinin birçok alanında halen kullanılmakta olan mekatronik sistemlerdendir.



Şekil 1. Kuka KR16 tipi endüstriyel robot kolu [4]



Şekil 2. Çok kollu hareketli robot sistemi [5]

Yukarıda bahsedilen genel maksatlı klasik robot sistemlerinin yanısıra, şimdilik yalnızca gösteri amaçlı olarak geliştirilmesine rağmen yakın gelecekte özellikle mayın tarama, üretim, bütünleme ve nakliye gibi tehlikeli ve zaman alıcı işlerde insan gücünün yerine kullanılması planlanan insansı robotlar da tasarlanmıştır. Belirtilen sistemlere örnek olarak, HONDA firması tarafından geliştirilen ve ASIMO olarak adlandırılan robot Şekil 3’te gösterilmiştir.

Geliştiren firma tarafından “yüzyılın buluşu” olarak tanıtılan, prensip olarak birbirine paralel iki tekerlek arasına yerleştirilen bir tabla üzerine binen sürücüsünü devrilme sorunu yaşatmaksızın taşıyan ve SEGWAY (ya da GINGER) olarak bilinen taşıma cihazı da mekatronik bir tasarımdır. SEGWAY’in özel amaçlı bir uygulaması Şekil 4’te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5’te görülen TOMAHAWK füzesi benzeri güdümlü füze ve bombalar da, savunma sanayiinin başlıca mekatronik uygulamalarındandır.



Şekil 3. İnsansı robot ASIMO [6]

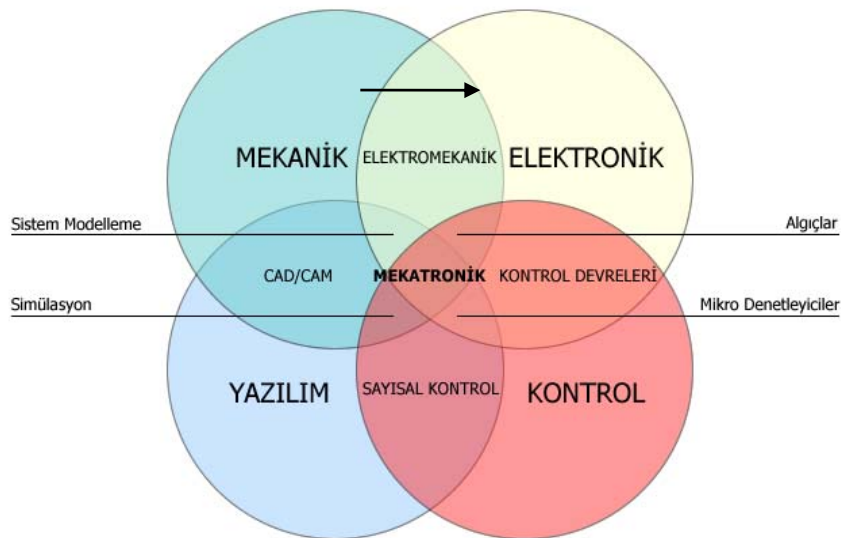


Şekil 4. Paralel iki tekerlekli taşıma cihazı SEGWAY [7]



Şekil 5. TOMAHAWK füzesi [8]

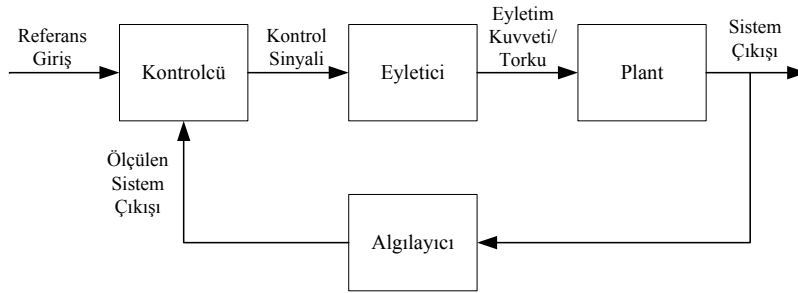
Mekatronik disiplinini oluşturan bilim dallarının birbiriyle etkileşimi Şekil 6'daki şemada verildiği gibi özetlenebilir. Buna göre, yukarıda bahsedilen alanlardan mekaniğin elektronik ve yazılımla arakesitleri sırasıyla elektromekanik ve CAD/CAM (bilgisayar destekli tasarım/bilgisayar destekli üretim) iken kontrol bileşeninin elektronik ve yazılımla ortak kümesi sırasıyla kontrol devreleri ve sayısal kontrol alanlarıdır. Ayrıca, şekilde işaret edilen sistem modelleme; mekanik, yazılım ve elektroniğin, simülasyon (benzetim); mekanik, yazılım ve kontrolün, mikro denetleyiciler; elektronik, kontrol ve yazılımın ve nihayet algıçlar (algılayıcılar) da mekanik, elektronik ve kontrol alanlarının ortak ürünleridir. İfade edilen dört ana disiplinin kesişimi de mekatroniği oluşturmaktadır [1].



Şekil 6. Mekatroniği oluşturan bilim dallarının birbiriyle etkileşimi [1]

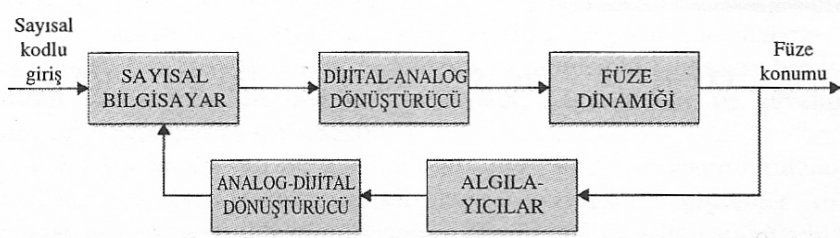
Kontrol mühendisliği açısından bakıldığında, mekatronik sistemler; kontrol edilen sistemi (plantı) mekanik yapıda olan ve genel yapısı Şekil 7’deki gibi tanımlanabilen kapalı çevrim kontrol sistemleridir. En basit yapıdaki tek giriş ve tek çıkışlı uygulamaları göz önüne alınarak bir betimleme yapılırsa, kapalı çevrim kontrol sistemlerinde amaç; kullanıcı tarafından dışarıdan sağlanan ve belirlenen kontrol değişkeni için olması gereken değeri gösteren referans girişle kontrol değişkeninin (sistem çıkışının) bir algılayıcı tarafından ölçülen değerini kullanarak kontrolcü birimi tarafından üretilen kontrol sinyalini mekanik harekete (eyletim kuvveti veya torkuna) çeviren bir eyletici aracılığıyla kontrol değişkeni olarak seçilen plant parametresinin istenen değer veya değerlere getirilmesidir. Bahsedilen değer bir su tankının su seviyesi veya ele alınan bir kara aracının seyir hızı gibi sabit bir büyüklük ise kontrol sistemi bir “düzenleme sistemi (*İng. regulator system*)”, zaman içerisinde genliği ve/veya yönü değişen bir değişkense de “takip sistemi (*İng. tracking system*)” olarak adlandırılmaktadır [9], [10].

Tasarlanan bir kontrol sisteminin fiziksel ortamda uygulanabilmesi için, sisteme ilişkin oluşturulan modelin ayrıık zamana çevrilmesi (sayısallaştırılması) ve elde edilen ayrıık zamanlı kontrol modelinin gerçekçi bilgisayar benzetimleri ile doğrulanması gerekmektedir. Böylelikle, ele alınan fiziksel sisteme uygulanmadan önce, gerçek işletimde kontrolcü olarak görev yapacak kişisel bilgisayar veya mikroişlemci biriminden çıkacak ayrıık zamanlı kontrol sinyallerinin sistem çıkışını öngörülen değerlere getirip getiremediği gözlenmiş olur. Ayrıca, benzetimde kontrol sistemi üzerine etkililen bozucu girişlerin fiziksel sistem üzerindeki etkileri de gerçeğine yakın bir şekilde anlaşılabilir.



Şekil 7. Kapalı çevrim kontrol sistemi genel yapısı

Yukarıda bahsedilen ayrıık zamana dönüştürülmüş kontrol sistemlerine örnek olarak, güdümlü bir füze için tasarlanan kontrol sistemi (otopilot) blok diyagramı Şekil 8’de verilmiştir. Buna göre, dışarıdan sayısal kodlu olarak kontrolcüye (sayısal bilgisayara) sağlanan referans giriş, algılayıcılar tarafından ölçülen ve analog-dijital dönüştürücü yardımıyla ayrıık zamana çevrilen gerçek füze konumu değeriyle karşılaştırılarak sayısal bilgisayar tarafından kontrol sinyali oluşturulmakta ve elde edilen ayrıık zamanlı kontrol sinyali bu kez bir dijital-analog dönüştürücü sayesinde analog sinyale dönüştürülerek füze dinamiğine girdi olarak verilmektedir. Buradaki modelde füze dinamiği, esasında eyletici ve plant bileşenlerini kapsamaktadır [10].



Şekil 8. Güdümlü bir füzeyle ilişkin otopilot sistemi [10]

Mekatronik esaslı kontrol sistemlerinin geliştirilmesi sırasında ele alınması gereken en önemli hususlardan birisi de ilgili sisteme dış kaynaklı komutlar ve üzerinde bulunan algılayıcılar aracılığıyla sağlanan girdiler doğrultusunda sistemin gerekli kararları alabilmesini; bir başka deyişle kararları mekanik hareketlere dönüştüren eyleticilere gerekli emirlerin gönderilmesini sağlayacak kontrol yönteminin belirlenmesidir. Uygulanacak yöntem, öncelikle ilgili kontrol sisteminin kararlılığını (*İng. stability*) sağlamalı, ayrıca sistemin, seçilen denetim değişkeni için dışarıdan verilen referans değerlerini belirlenen doğruluk seviyesinde takip etmesini olanaklı kılmalıdır. Bunların yanısıra, kontrol sisteminin dışarıdan etkiyen kontrolsüz kuvvet ve/veya moment girişleri (bozucu girişler) ile algılayıcılar üzerindeki gürültüden de mümkün olduğunca az etkilenmesini sağlamalıdır. Yaygın bir tanımlama olarak, sistemin

komut emirlerini takip edilebilmesi yeteneği “servo karakteristiği (*İng. servo characteristics*)”, bozucu girişlerden etkilenmemesi yeteneği de “regülatör karakteristiği (*İng. regulator characteristics*)” olarak adlandırılmaktadır [9], [10]. Buraya kadar sıralanan özelliklerinin yanısıra, iyi bir kontrol sisteminin; sistemi tanımlayan parametrelerin bir veya birkaçındaki değişim ve modellenemeyen belirsizliklerinden kaynaklanacak bozucu etkileri de ortadan kaldıracak olması gerekmektedir. Regülatör özelliğinin yanısıra belirtilen yeteneğe de sahip bir kontrol sistemi, “gürbüz kontrol sistemi” olarak belirtilir [11]. Endüstriyel uygulamalar için geliştirilen mekatronik sistemlerin çoğunlukla yük ve parametre belirsizlikleri altında çalışacağı dikkate alındığında, gürbüzlük (*İng. robustness*) kistasının kontrol sistemlerinin tasarımında ne denli önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Kontrol sistemi tasarımı konusunda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, öncelikli olarak belirlenen gereksinim ve eldeki olanaklar dahilinde çeşitli kontrol yöntemlerinin ele alındığı görülmektedir. Çoğunluğu kapalı çevrim yapısında olan sistemlerde kontrol sinyali, genellikle referans giriş ve ölçülen sistem çıkışı arasındaki farka karşılık gelen işletim hatası (*İng. actuating error*) değeri kullanılarak göz önüne kontrol yöntemi tarafından oluşturulmaktadır. Bunun yanısıra, kontrol sinyalini oluştururken referans giriş ve ölçülen sistem çıkışı büyüklüklerini ayrı ayrı ele alan kontrol yaklaşımları da bulunmaktadır.

Mekatronik sistemlere uygulanan kontrol yöntemleri, ilgili kontrol kuralı türetilirken plant dinamiğinin kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak öncelikle model tabanlı ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacağı gibi, her iki yaklaşımın da birbirine göre belirli üstünlük ve zayıflıkları bulunmaktadır.

2. Model Tabanlı Kontrol Yöntemleri

Üzerine kontrol sistemi tasarlanacak plantın dinamik davranışının ilgili sistem parametreleri kullanılarak modellenmesi halinde, belirlenen kontrol değişkenini istenilen değer veya değerlere getirecek kontrol sinyalini üretecek kontrol kuralının gereksinimleri azami ölçüde karşılayacak şekilde türetilmesi mümkündür. Göz önüne alınan sistem parametrelerindeki olası belirsizlik ve işletim sırasındaki değişimler dolayısıyla modellenmenin tam olarak yapılamaması ve elde edilen modelin sistem davranışını belirli sınırlar içerisinde tanımlayacak düzeyde olması durumunda bile, model tabanlı olarak elde edilecek kontrol kuralı değişkenleri üzerinde yapılacak küçük ayarlamalarla (*İng. tuning*), plantın belirlenen çalışma koşulları içerisinde kararlı ve istenilen başarımlı gereksinimlerini sağlayacak düzeyde çalıştırılması sağlanabilir.

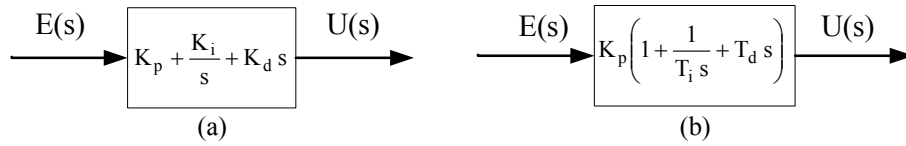
Mekatronik sistemlerde uygulanan model tabanlı kontrol (*İng. model-based control*) yöntemleri, temelde üç alt başlık altında ele alınabilir:

- i. Klasik kontrol yöntemleri
- ii. Modern kontrol yöntemleri
- iii. Gürbüz kontrol yöntemleri

2.1. Klasik kontrol yöntemleri

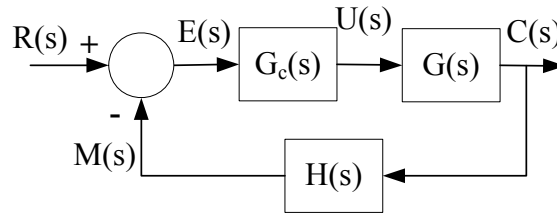
Kontrol edilecek sistemin (plantın) tek giriş ve tek çıkışlı olması durumunda en fazla tercih edilen yaklaşım “klasik” olarak adlandırılan kontrol yöntemlerinin kullanılmasıdır. Klasik kontrol yöntemlerinde kontrol kuralı; kontrol sisteminin referans girişi ve ölçülen sistem çıkışı arasındaki işletim hatası (hata) baz alınarak hata, hata integrali ve hata türevi büyüklüklerinden uygun şekilde seçilenlerin, genliği plant dinamiği ve başarımlı isterleri doğrultusunda belirlenen kazanç katsayılarıyla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Belirtilen yaklaşımda, kazançların belirlenmesi amacıyla gerekli cebirsel işlemlerin kolaylıkla yapılabilmesi ve ayrıca elde edilen nihai denklemlerin oluşturulan kontrol sisteminin frekans kümesindeki davranışını belirlemek üzere kullanılabilmesi amacıyla zaman kümesinde ifade edilen dinamik denklemlere Laplace dönüşümü uygulanmakta ve tasarımda hesaba katılacak eşitliklerin tamamı Laplace değişkeni (“s”) cinsinden ifade edilmektedir. Elde edilen kontrol kuralı yalnızca hatanın hesaplanan bir kazançla çarpılması ile oluşturuluyorsa mevcut kontrol yöntemi “P (oransal) kontrol”, hata ve hatanın integrali göz önüne alınıyorsa “PI (oransal ve integral) kontrol” ve hata ve hatanın türevi ele alınıyorsa “PD (oransal ve türevsel) kontrol” olarak adlandırılmakta olup, hata, hata türevi ve hata integralinin dikkate alındığı en genel klasik kontrol kuralı “PID (oransal, integral ve türevsel) kontrol” olarak tanımlanmaktadır. Bu anlamda P, PI ve PD kuralları PID kontrol kuralının türevleri olup, hata (*İng. error*) ve kontrol sinyali büyüklükleri sırasıyla E ve U harfleri ile ifade edilmek üzere, “s” değişkeni kullanılarak PID tipi bir kontrolcünün transfer fonksiyonu Şekil 9-(a)’daki gibi oluşturulabilir. Şekilde görülen K_p , K_i ve K_d sembolleri kontrolcünün sırasıyla oransal, integral ve türevsel

kazançlarına karşılık gelmekte olup, PID kontrolcü kuralı; T_i ve T_d sırasıyla integral ve türev işlemlerine ilişkin zaman sabitleri olmak üzere Şekil 9-(b)'deki'deki gibi de ifade edilebilir [9], [10].



Şekil 9. PID kuralına göre çalışan kontrolcü yapısı

PID tipi kontrolcünün kullanıldığı klasik bir kontrol sisteminin en genel haldeki blok diyagramı ise, kontrolcü, plant ve ölçer transfer fonksiyonları sırasıyla $G_c(s)$, $G(s)$ ve $H(s)$ ile gösterilmek üzere Şekil 10'daki gibi çizilebilir. Diyagramda, $R(s)$, $C(s)$ ve $M(s)$ de kontrol sistemi referans girişi, sistem çıkışı ve ölçülen sistem çıkışını temsil etmektedir. Burada PID kuralı kullanıldığında $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ olurken, $G_c(s)$; P, PI ve PD kuralları için sırasıyla K_p , $K_p + K_i/s$ ve $K_p + K_d s$ şeklini alır.



Şekil 10. Klasik kontrol sistemi blok diyagramı

PID esaslı kontrolçüler, nispeten basit tasarımları, kontrolcü kazançlarının kolaylıkla ayarlanabilmesi ve pekçok sistem için yeterli düzeydeki gürbzlükleri dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yapılarıdır. Özellikle kontrolcü olarak PLC (programlanabilir mantık kontrolcüsü) sistemlerinin kullanıldığı durumlar için, PID tipi kontrol vazgeçilmez hale gelmiştir. Diğer taraftan, başta sistem parametrelerindeki belirsizlik ve değişimler olmak üzere yüksek genlikli bozucu girişler altında başarımlarının düşmesi, bu türdeki kontrolçüler üzerinde çeşitli iyileştirme çalışmalarının yapılmasına neden olmuştur. Bu amaçla, özellikle integral ve türev işlemlerinin hata yerine ölçülen sistem çıkışı üzerine etkilendiği değiştirilmiş klasik kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Ölçümden kaynaklanan büyük gürültü sinyallerinin hatayı gerçekçi olmayan bir şekilde artırması ve dolayısıyla kontrol sisteminin kararlılık ve başarımlı karakteristیکlerinin kötüleşmesini önlemek amacıyla hata yerine ölçülen sistem çıkışının integral ve/veya türevinin alındığı bu uygulamalarda, belirlenen bant genişliği (köşe frekansı) değerlerine kadar düz bir sistem cevabı elde edilebilmiştir. Bir başka deyişle, kapalı çevrim kontrol sistemi için öngörülen bant genişliğinin altında olan çalışma frekanslarında sistem çıkışı referans girişe eşit olmaktadır. Ancak, bu tip değiştirilmiş sistemlerin en büyük zayıflığı; neden oldukları yüksek faz kaymasıdır. Sırasıyla integral ve türev işlemlerinin ölçülen sistem çıkışı üzerine uygulandığı I-PD (integral-oransal ve türevsel) ve PIV (oransal, integral ve hız) tipi kontrolçülerin kullanıldığı kontrol sistemlerinin Bode genlik ve faz diyagramlarından da gözleneceği gibi, bant genişliği değerine kadar yatay olarak devam eden genliğe karşılık sistemin faz kayması, çalışma frekansının sıfır olduğu durumda bile sıfırdan farklıdır. Bu değer frekans artışıyla orantılı olarak artmakta ve bant genişliğinden çok önce 90° değerinin üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle, anılan özellikteki değiştirilmiş kontrolçüler bilhassa yüksek hızlı mekatronik uygulamalarında fazla tercih edilmemektedir [9], [10].

Klasik kontrolçülü sistemlerde kontrolcü kazançlarının belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Belirtilen yöntemler içerisinde en sık uygulananı, kapalı çevrim kontrol sistemi kutuplarının sistem için öngörülen bant genişliği ve sönümlenme oranına göre konumlandırıldığı ve kazançların da elde edilen kutuplar göz önüne alınarak belirlendiği kutup yerleştirme tekniğidir (*İng. pole placement technique*). Füzehedef eşleşme senaryolarındaki güdümlü füzeler gibi çalışma koşullarının işletim süresince değişim gösterdiği uygulamalarda, kontrol sistemi kutuplarının belirlenen konumlarını muhafaza etmelerini sağlamak amacıyla, kontrolcü kazançlarının sistem davranışıyla uyumlu olarak değiştirildiği (güncellendiği) uyarlamalı (*İng. adaptive*) kontrol algoritmaları oluşturulmuştur. Bahsedilen güncelleme, çoğu kez katsayı ayarlama (*İng. gain scheduling*) tekniği, yapay sinir ağları (*İng. neural network*), bulanık mantık (*İng. fuzzy logic*) ve bu yöntemlerin iki veya üçünün birarada kullanıldığı karma yapılar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir [12], [13].

Laplace kümesinde tasarlanan yapıların yanında, zaman kümesinde tasarlanan klasik kontrolçüler de bulunmaktadır. Özellikle robot kolların kontrolünde ele alınan ve esas sistemi oluşturan kolları birbirine bağlayan eklemelerin birbirinden bağımsız olarak eyletilmesine dayanan bağımsız eklem kontrolçüleri (*İng. independent joint controllers*) bu tip yapılardandır [14].

2.2. Modern kontrol yöntemleri

Birden fazla girdi ve çıktılı kontrol sistemlerinin tasarımı söz konusu olduğunda ilk akla gelen yaklaşım modern kontrol yöntemleridir. Modern kontrol yaklaşımında amaç, durum uzayı formunda ifade edilmiş plant dinamik denklemlerini kullanarak ele alınan kontrol değişkenini istenilen değere getirecek kontrolcü kazançlarının belirlenmesidir. Buna göre, dinamik davranışı n . ($n \geq 1$) mertebeden bir diferansiyel denklem veya denklemlerle ifade edilen bir plantın üç boyutlu uzaydaki hareketini tanımlayacak şekilde belirlenmiş n adet durum değişkeninden oluşan durum değişkenleri sütun matrisi (vektörü) \bar{x} ($\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$), plant girdileri sütun matrisi \bar{u} ($\bar{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]^T$, $p \leq n$) ve plant çıktıları sütun matrisi \bar{y} ($\bar{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$, $m \leq n$) ile gösterilirse, sırasıyla $n \times n$, $n \times p$, $m \times n$ ve $m \times p$ boyutlarındaki sistem, girdi, çıktı ve durum geçiş matrisleri \hat{A} , \hat{B} , \hat{C} ve \hat{D} sembolleri ile temsil edilmek üzere plantın durum uzayındaki gösterimi (Eş. 1) ve (Eş. 2) kullanılarak gerçekleştirilebilir [9].

$$\dot{\bar{x}} = \hat{A} \bar{x} + \hat{B} \bar{u} \quad (1)$$

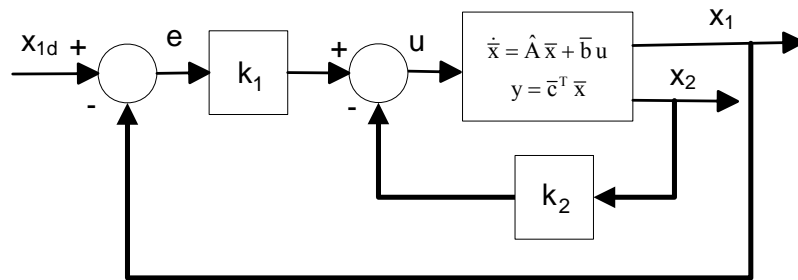
$$\bar{y} = \hat{C} \bar{x} + \hat{D} \bar{u} \quad (2)$$

Burada $\dot{\bar{x}}$, \bar{x} vektörünün zamana göre değişimini ve T harfi de devrik (*İng. transpose*) işlemini sembolize etmektedir.

Modern kontrol yaklaşımında kontrol sinyali, büyüklükleri klasik kontrol bölümünde anlatıldığı şekilde kapalı çevrim kontrol sisteminden beklenen bant genişliği ve sönüm değerleri doğrultusunda kutup yerleştirme tekniği gibi bilinen yöntemlerle hesaplanan kontrolcü kazançlarının durum değişkenleri veya çıktı değişkenleri ile çarpılması ve elde edilen niceliklerin toplanması ile oluşturulur. Algoritmada durum değişkenlerinin göz önüne alınması durumunda kontrol yöntemi “durum geribeslemeli (*İng. state feedback*) kontrol”, çıktı değişkenlerinin alınması durumunda da “çıkta geribeslemeli (*İng. output feedback*) kontrol” olarak adlandırılır [15]. Kontrol sisteminin takip sistemi türünde olması durumunda kontrol değişkeni olarak seçilen durum değişkeni ile çarpılan kontrolcü kazancı bu değişken için belirtilen referans değerle de çarpılarak, bu çarpımların farkı kontrol sinyalinin elde edilmesi sırasında dikkate alınır. Buna göre, düzenleme ve takip sistemi olarak tasarlanan durum geribeslemeli kontrol sistemlerinin kontrol girdileri, takip sisteminde kontrol değişkeni olarak seçilen x_1 değişkeninin referans değeri x_{1d} ile gösterilmek üzere sırasıyla (Eş. 3) ve (Eş. 4)’teki gibi ifade edilir. Eşitliklerde, kontrolcü kazançları sütun matrisi \bar{k} ($\bar{k} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]^T$) sembolü ile belirtilmiştir [9], [10].

$$\bar{u} = -\bar{k}^T \bar{x} \quad (3)$$

$$\bar{u} = k_1 x_{1d} - \bar{k}^T \bar{x} \quad (4)$$



Şekil 11. Durum geribeslemeli kontrol sistemi blok diyagramı

Örnek olarak seçilen iki değişkenli durum geribeslemeli bir takip sisteminin blok diyagramı Şekil 11’de verilmiştir. Burada “e” harfi kontrol değişkeninin referans ve ölçülen değerleri arasındaki farkı (hatayı) göstermektedir.

Şekil 11'deki şematik gösterimde de belirtildiği üzere, modern kontrol esaslı kapalı çevrim sistemlerde belirlenen sisteme özgü durum değişkenlerinin tamamı kontrol sinyali oluşturulurken kullanılmaktadır. Öte yandan, birçok pratik uygulamada bütün durum değişkenlerini ölçmek mümkün olmaz. Bu tip durumlarda, ölçülemeyen değişkenlerin kestirimi için Kalman filtresi gibi gözleyiciler (*İng. observers*) kullanılmaktadır [16].

Modern kontrol sistemlerinin en yaygın kullanıldığı alanlardan biri de robotiktir. Özellikle robot kollarından oluşan sistemlerin uç işlemcisinin (*İng. end effector*) hassas bir şekilde konumlanmasının gerektiği durumlarda, bağımsız eklem kontrolcülere yerine hesaplanmış tork yöntemi (*İng. computed torque method*) tercih edilmektedir. Bu yöntemde eklemelere uygulanacak kontrol torkları, eklem konumlarını tanımlayan durum değişkenleri ile bu değişkenlerin zamana göre birinci ve ikinci türevlerinden elde edilen eklem hız ve ivmeleri kullanılarak elde edilir [17], [18].

Durum ve çıktı geribeslemeli sistemler, klasik kontrol sistemlerine benzer şekilde kontrolcü kazançlarının gerçek işletim koşullarına uygun olarak ayarlanmasına olanak sağlamaları dolayısıyla avantajlı gözükmesine karşın, sistem cevabındaki durağan durum hatasını tamamen ortadan kaldıramamaları nedeniyle özellikle konumlama hassasiyeti gereksiniminin yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilmezler. Plant değişkenlerinin tamamının doğrudan ölçülememesi hususu da bu tip sistemlerin kullanımına sınırlama getirmektedir [9], [10], [16]. Bunun yanısıra, mekatronik sistemler üzerindeki bozucu girişlerin olumsuz etkilerini enaza indirmek amacıyla durum geribeslemeli düzenleme sistemleri de önerilmiştir [19].

2.3. Gürbüz kontrol yöntemleri

Göz önüne alınan mekatronik sistemde parametre belirsizlikleri ile sistem davranışını olumsuz yönde etkileyen bozucu girişler söz konusu olduğunda, gürbüz kontrol sistemleri uygun bir çözüm gibi gözükmektedir. Mekatronik sistemlere uygulanan gürbüz kontrol yöntemleri, temelde iki alt başlık altında incelenebilir [20]:

- i. Lyapunov teoremi esaslı gürbüz kontrol yöntemleri
- ii. H_2 ve H_∞ normu esaslı gürbüz kontrol yöntemleri

2.3.1. Lyapunov teoremi esaslı gürbüz kontrol yöntemleri

Kontrol sinyalinin ele alınan sistem için uygun olarak seçilen bir Lyapunov fonksiyonu uyarınca belirlendiği yöntemler, genel olarak "Lyapunov teoremi esaslı kontrol yöntemleri" olarak adlandırılabilir. Liretaturde bu başlık altında değerlendirilebilecek pekçok farklı yaklaşım bulunmakla birlikte, temelde iki tip Lyapunov teoremi esaslı kontrol yönteminden bahsetmek mümkündür:

- Geri adımlamalı kontrol
- Kayan kipli kontrol

2.3.1.1. Geri adımlamalı kontrol

Yinelemeli (*İng. recursive*) bir kontrol yöntemi olan geri adımlamalı kontrol (*İng. backstepping control*) yaklaşımına göre kontrolcü tasarlanırken, ilk olarak plant dinamiğini tanımlayan denklemler alt üçgensel (*İng. lower triangular form*) ifade edilir. Örneğin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerini ve u da plant girdisini temsil etmek üzere, ele alınan sistemin dinamik denklemleri (Eş. 5)'ten (Eş. 7)'ye kadar olan ifadelerde görüldüğü gibi tamamen geribeslemeli forma dönüştürülebilir [21], [22], [23]:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (6)$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3, u) \quad (7)$$

Yukarıdaki ifadelerden de görüldüğü gibi, yöntemin uygulanabilmesi için diferansiyel denklemlerin doğrusallaştırılmış olmasına gerek yoktur. Yeter şart; denklem setinin tamamen geribeslemeli forma dönüştürülebilmesidir.

Geri adımlamalı kontrol tekniğinde, sırasıyla x_1 , x_2 ve x_3 değişkenlerinin dinamiğini temsil eden diferansiyel denklemlerin herbiri, ilk denklemden başlamak üzere bir sonraki denklemde dinamiği tanımlanan durum değişkeni kullanılarak kararlaştırılır. Bir başka deyişle, ilk aşamada (Eş. 1) ile belirtilen x_1 dinamiğini kararlaştırmak için x_2 parametresi sanal kontrol değişkeni olarak seçilir. Benzer şekilde, (Eş. 2)'deki x_2 dinamiği için de x_3 değişkeni kullanılır. Nihayet, x_1 ve x_2 dinamiklerinin kararlaştırılmasının ardından, (Eş. 3) ifadesini kararlı hale getirecek u girdisi x_1 , x_2 ve x_3 'ün fonksiyonu olarak elde edilir. Belirtilen aşamaların herbirinde sanal ve gerçek kontrol girdileri, bahsedilen girdiler için tanımlanan hata parametreleri kullanılarak oluşturulan Lyapunov fonksiyonlarını enaza indirgeyecek şekilde hesaplanır. Yöntem, kararlaştırıcı sanal kontrol girdileri her bir aşama için ayrıca bulunduğu ve bu işlemler dizisi gerçek kontrol girdisi elde edilinceye kadar yinelenen için, "geri adımlamalı kontrol" olarak isimlendirilmiştir [24], [25], [27].

Geri adımlamalı kontrol, sistem parametrelerindeki belirsizlikler ve bozucu girdilere karşı oldukça duyarsız bir kontrol sistemi elde edilmesini olanaklı kılar. Bir başka deyişle, sistem parametreleri için modellemede göz önüne değerlerle gerçek büyüklükleri arasında meydana gelebilecek büyük farklılıklar ve ayrıca sisteme dışarıdan etkiyen kontrolsüz girdiler, kontrol sistemi başarımında belirgin bir düşmeye sebep olmaz. Nihai kontrol girdisini elde edebilmek için sistem dinamik denklemlerinin doğrusallaştırılmasını gerektirmemesi de yöntemin bir diğer üstünlüğüdür. Ancak sistem dinamiğinin karmaşıklığıyla orantılı olarak kontrol girdisini elde etmek için daha çok ara işlem yapılması ve sonuçta ortaya çıkan ifadenin uygulama açısından karmaşık olması sebebiyle, yöntem fiziksel sistem uygulamalarında fazla tercih edilmez. Bu anlamda, kontrol sinyali ifadesinin uygulamasını zorlaştıran etkenlerden biri de göz önüne alınan durum değişkenlerinin tamamının ölçülmesi veya kestirilmesi zorunluluğudur. Kontrol sinyalini oluştururken gerçekleşmesi gereken integral ve türev işlemlerinin fiziksel sistemlere uygulanabilmesi için ayrı zamanlara çevrilmesi sırasında ortaya çıkabilecek gürültü büyümesi etkileri de geri adımlamalı kontrol yaklaşımının sıklıkla kullanılmasının önünde engel teşkil etmektedir [22], [26], [28]

2.3.1.2. Kayan kipli kontrol

Genellikle tek girdi ve tek çıktılı sistemlerin kontrolünde kullanılan yöntemlerden biri olan kayan kipli kontrol (*İng. sliding mode control*) yaklaşımında amaç, durum uzayında uygun şekilde tanımlanan bir kayma manifoldu aracılığıyla, seçilen kontrol değişkeninin referans ve ölçülen değerleri arasındaki fark (hata) ile bu hatanın zamana bağlı türevlerini sıfır yapmak veya durum değişkenlerini tanımlanan bir denge konumuna taşımaktır. Bahsedilen ilk durum takip sistemine karşılık gelirken, ikinci yaklaşım düzenleme sistemleri için uygulanmaktadır. Kayan kipli kontrolde sistemin durum değişkenleri buldukları ilk konumdan önce kayma manifoldunun üzerine, buradan da belirlenen denge noktasına taşınırlar. Bahsedilen ilk aşama "ulaşma aşaması (*İng. reaching phase*)" olarak adlandırılırken, ikinci safha "anahtarlama aşaması (*İng. switching phase*)" olarak bilinmektedir. Burada kayma manifoldu üç durum değişkenli sistemlerde kayma yüzeyi ve iki değişkenli sistemlerde de kayma doğrusu halini almakta olup, eğimi; ulaşma aşaması için öngörülen süreye göre hesaplanmaktadır. Kayan kipli kontrol yaklaşımında kontrol sinyali, durum uzayında kayma manifoldunu ifade eden denklemin karesinden oluşturulan Lyapunov fonksiyonunu enaza indirgeyecek şekilde belirlenir. Kontrol sinyalini oluştururken kullanılan bir diğer parametre olan kararlılık parametresi de, kontrol sisteminden beklenen yerleşme zamanı; dolayısıyla da bant genişliği değeri esas alınarak bulunur [29], [30].

Kayan kipli kontrol yöntemi, olası parametre değişiklikleri ve bozucu girişlere karşı kontrol sisteminin kararlılığını belirlenen hassasiyet sınırları içerisinde sağlayabilmektedir. Ayrıca sistem dinamiğini ifade eden denklemlerin doğrusallaştırılmış olmasını da zorunlu kılmamaktadır. Öte yandan, işletim süresince sistemin kararlılığını koruyabilmek amacıyla hata veya durum değişkenlerini kayma manifoldu üzerinde tutmak için kontrol kuralının sürekli genlik ve yön değiştiren bir kontrol sinyali üretmesi nedeniyle, uygulamada çatırtı (*İng. chattering*) denilen istenmeyen bir durum ortaya çıkmaktadır. Çatırtı, kontrol edilen sistemde yorulmalara sebep olmakta ve sistemin ömrü ciddi oranda kısalmaktadır. Ayrıca, plantı istenildiği şekilde kontrol edebilmek için belirtilen değişken genlik ve yöndeki akım her zaman eyleticilere sağlanamamaktadır. Çatırtının azaltılması için çeşitli önerilerde bulunulmuş olup, belirtilen öneriler; aslında çatırtı ile kontrol kararlılığı arasında bir uzlaşma sağlanması esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle sistemin kararlılık marjından bir miktar fedakârlık edilerek çatırtının şiddeti azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu durum, çatırtıyı hissedilir oranda sönmemesine karşı, kontrol sisteminin gürbüzlüğünü oldukça azaltmaktadır. Çatırtıyı enaza indirirken sistem kararlılığından fedakârlık etmemek amacıyla uygulanan bir diğer yöntem de kayma manifoldu eğiminin işletim süresince kontrol sisteminin bulunduğu konuma göre değiştirilmesidir. Ancak, belirtilen yaklaşım yüksek işlem hızları gerektirmesi dolayısıyla özellikle düşük çalışma frekanslı uygulamalarda gerçekleştirilememektedir [31], [32]. Bununla birlikte, geri adımlamalı kontrolde olduğu gibi göz önüne alınan durum değişkenlerinin tamamının ölçülmesi veya gerçek değerine en yakın şekilde kestirilmesi gerektiğinden ve

kontrolcünün ayrık zamana çevrilmesi sırasında karşılaşılabilecek sorunlardan dolayı, kayan kipli kontrol yöntemi klasik kontrol yaklaşımları kadar tercih edilmemektedir. Diğer taraftan, başta güdümlü mühimmatlar için geliştirilen güdüm ve kontrol algoritmaları olmak üzere kayan kipli kontrolün uygulandığı önemli mekatronik çalışmaları da mevcuttur [32], [33].

2.3.2. H_2 ve H_∞ normu esaslı gürbüz kontrol yöntemleri

Klasik yaklaşımlar kullanılarak tasarlanan kontrol sistemleri, tasarımda göz önüne alınan çalışma koşulları altında kendilerinden beklenen kararlılık ve başarımlarını yerine getirebilirler. İşletim koşullarının değiştiği durumlarda, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi uyarlamalı yapılar sayesinde kontrolcü kazançları anlık olarak güncellenerek sistemin kararlılığı korunmaya çalışılmaktadır. Ancak, sistemdeki parametre belirsizlikleri ve özellikle bozucu girişlerin büyüklüğü arttığında, geleneksel yaklaşımların başarılı olmadığı gözlenmektedir. Bu tip durumlarda sıklıkla başvurulmuş yöntemlerden biri de H_2 veya H_∞ normuna göre gürbüz kontrolcü tasarlamaktır. Burada yapılan iş, özünde farklı çalışma koşullarında kararlılığını yitirmeden çalışabilecek birçok kontrol sisteminin görevini tek başına yapan bir kontrol sistemi elde etmektir [11], [34].

Çok girdi ve çıktılı uyarlamaları da bulunmakla birlikte genellikle tek girdi ve tek çıktılı sistemler için sentezlenen H_2/H_∞ kontrolcüler, doğrusallaştırılmış sistem dinamiği esas alınarak tasarlanmaktadır. Ortaya çıkacak kontrol sistemi için belirlenen kontrol girişleri ile bozucu girişlere uygulanacak ağırlık fonksiyonları kararlaştırıldıktan sonra, enaza indirgenecek (cezalandırılacak) sistem parametreleri kararlaştırılır. Bahsedilen parametreler genellikle referans giriş ve ölçülen sistem çıkışı arasındaki fark (hata), kontrolcü sinyalinin genliği ve tasarlanan kontrol sistemi ile ulaşılmak istenen ideal sistem çıktıları arasındaki fark olup, bu niceliklerin de istenilen değer aralıklarında tutulması için uygun ağırlık fonksiyonları belirlenir. Daha sonra, x_k ve \bar{x} sırasıyla k. durum değişkeni ve durum değişkeni sütun matrisini ($\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$) göstermek üzere, H_2 normu göz önüne alınacaksa (Eş. 8)'de verilen $\|\bar{x}\|_2$ parametresini, tasarım H_∞ normuna göre yapılacaksa da (Eş. 9)'daki $\|\bar{x}\|_\infty$ büyüklüğünü enaza indirgeyecek kontrolcü matrisleri hesaplanır [11], [20].

$$\|\bar{x}\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_k|^2} \quad (8)$$

$$\|\bar{x}\|_\infty = \max\{|x_k|, 1 \leq k \leq n\} \quad (9)$$

H_2 ve H_∞ tipi kontrolcüler klasik kontrolcülere göre plantı daha geniş bir parametre değeri aralığında ve daha büyük genlikli bozucu girişler altında kararlı durumda tutabilmeleri dolayısıyla son yıllarda oldukça popüler olmuştur. Ayrıca gelişen tasarım araçları sayesinde tasarımcının işi yalnızca ağırlık fonksiyonlarını belirlemeye kadar indirgenmiş ve hazır kodlar kullanılarak kontrolcü matrislerini bulmak olanaklı hale gelmiştir. Genel yaklaşım kontrolcü tasarımının belirtilen normlardan birisi ele alınarak yapılması şeklinde olmakla birlikte, her iki normu da dikkate alarak senetçilenmiş gürbüz kontrolcülere de rastlanmaktadır. Öte yandan, ağırlık fonksiyonlarının mertebesi ve çalışma frekansı değerlerindeki artışa paralel olarak kontrolcü matrislerinin boyutlarının da artması ve dolayısıyla daha yüksek işlem hızlarına gereksinim duyulması, kullanılan matris indirgeme yöntemlerine rağmen H_2 ve H_∞ normu esaslı kontrolcülerin uygulama alanını fazla genişletmemiştir. Bunun yanısıra gereksinimleri en yüksek düzeyde karşılayacak kontrolcünün elde edilmesinin yinelenmeli ve zaman alıcı bir işlem olması, klasik yöntemlerin aksine kontrolcü matrisleri elemanlarının işletim sırasında gerçek zamanlı olarak güncellenememesi ve kontrol algoritmasında integral işlemi bulunmaması dolayısıyla durağan durum hatasının hiçbir zaman mutlak anlamda sıfırlanamaması, bu tip kontrolcülerin başlıca zayıflıkları olarak belirtilebilir [11], [34], [35].

3. Model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri

Üzerine kontrol sistemi tasarlanacak plantın matematiksel modelinin çıkarılabilmesi, kontrol sistemi tasarımında arzu edilen bir özelliktir. Plant dinamik davranışı çalışma koşullarının tamamında geçerli olacak şekilde tam olarak modellenemese ve parametreler için elde edilen veya kestirilen değerler bir miktar belirsizlik içerirse dahi, sistemin dinamik davranışını tanımlayan bir matematiksel model kullanılarak analitik yöntemlerle daha hassas kontrol sistemleri tasarlamak mümkündür. Diğer taraftan, bazı uygulamalarda ele alınan plantın matematiksel modelini elde etmek oldukça zor, hatta kimi durumlarda olanaksızdır. Özellikle akışkan kontrollü sistemlerde ve toplumsal davranış yapılarını modelleme çalışmalarında, bahsedilen zorlukla sıkça yüzyüze gelinir. Temeli göz önüne alınan plant modeline dayanan model tabanlı kontrol yaklaşımlarının çözüm üretmediği bu tip durumlarda, kontrol

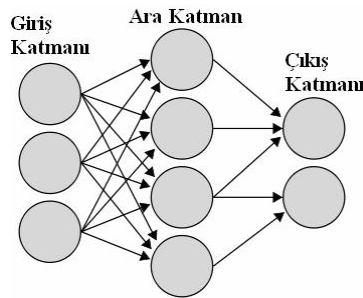
mühendisliği terminolojisinde “model tabanlı olmayan kontrol (*İng. model-based control*)” başlığı altında sınıflandırılan teknikler kullanılmaktadır. Mekatronik sistemler için gerçekleştirilen model tabanlı olmayan kontrol uygulamaları incelendiğinde, çalışmaların en fazla iki yaklaşım kullanılarak yapıldığı görülmüştür [36]:

- i. Yapay sinir ağları esaslı kontrol yöntemleri
- ii. Bulanık mantık esaslı kontrol yöntemleri

Literatürde, yapay sinir ağları ve bulanık mantık yapılarının ayrı ayrı kullanıldığı çalışmalar ağırlıkta bulunmakla birlikte, her iki yöntemin birlikte uygulandığı durumlar da bulunmaktadır [36], [37].

3.1. Yapay sinir ağları esaslı kontrol yöntemleri

Plant matematiksel modelinin çıkarılmadığı ancak uygulanan girdilere karşılık çıktıların ölçülebildiği durumlarda, toplanan girdi ve çıktı verileri kullanılarak eğitilen yapay sinir ağları (YSAlar), ters plant dinamiği mantığıyla sistemi kontrol etmek amacıyla oluşturulmaktadır. YSAlar, insan hücrelerinin birbirleriyle etkileşimlerinden esinlenilerek, bir girdi hücresinden sağlanan sinyalin aradaki belirli sayıda hücreden geçtikten sonra belirlenen bir çıktı hücresinde neden olduğu etkiyi, girdi ve çıktıları arasındaki ilişki doğrusal olmayan sistem, süreç veya işlemlerin modellenmesinde kullanmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Bu anlamda YSAlar, “doğrusal olmayan fonksiyon tanımlama (*İng. nonlinear function mapping*)” yapıları olarak da bilinmektedir [38]. Burada girdi ve çıktı hücrelerinden oluşan katmanlar sırasıyla giriş ve çıkış katmanları olarak tanımlanırken, ara hücreleri içeren katman ara katman veya gizli katman olarak adlandırılmaktadır. En genel halde YSA yapısı, şematik olarak Şekil 12’de verildiği gibidir.



Şekil 12. Yapay sinir ağı yapısı [39]

YSA kullanılarak yapılan doğrusal olmayan modellemede, öncelikle giriş ve çıkış katmanlarıyla ara katmandaki sinir hücrelerinin sayısı belirlenir. Bu aşamada, ara katmanın kaç paralel sıradan oluşacağı da kararlaştırılır. Daha sonra, yukarıda da bahsedildiği gibi plant üzerinden bilgisayar benzetimleri yoluyla veya deneysel olarak toplanan girdi-çıkış verilerinden oluşturulan veri seti kullanılarak YSA eğitilir. Burada “eğitim”den kasıt, plant girdi ve çıktıları sırasıyla kontrolcü olarak kullanılacak YSA’nın çıktı ve girdisi olarak tanımlanarak belirlenen bir hata marjı dahilinde geriye yayılım (*İng. back propagation*) veya Hebb Öğrenme Kuralı gibi bir eğitim yöntemi yardımıyla sinir hücrelerinin birbiriyle etkileşimini sağlayan bağlar üzerindeki ağırlık fonksiyonlarının belirlenmesidir [38].

YSA tabanlı kontrolcüler, uygulandıkları sistemin çalışma koşulları ağ eğitiminde kullanılan verilerin toplandığı işletim aralığında bulunduğu sürece tatminkâr sonuçlar vermektedir. Ayrıca girdi sayısının çıktı sayısından daha fazla olabilmesine de olanak sağlayan ve çok girdi-çıkışlı sistemler için uygulanabilir özellikteki yapıları YSAların popüleritesini artırmıştır. Öte yandan, kontrol sisteminden beklenen hassasiyet düzeyi arttıkça eğitimde kullanılan veri setinin eleman sayısını da artırmak gerekmektedir. Standart bir veri setinin eleman sayısı, genellikle 1000 ilâ 100,000 arasında değişmekte olup, eleman sayısı arttıkça YSA’nın eğitim süresi de ciddi oranda uzamaktadır. Ayrıca, elde edilen kontrol sisteminin kararlılığını kontrol edilecek belirli bir yöntem yoktur. Özellikle sistem parametrelerinin eğitim sırasında belirlenen aralıkların dışına çıkması durumunda, YSA kontrolcülü kontrol sistemi kararsız olmaktadır [40]. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla model tabanlı kontrolcü takviyeli karma (*İng. hybrid*) kontrol sistemlerinin kullanımı yoluna gidilse de, YSA’lı kontrol sisteminin kararlılığını tam manasıyla garanti etmek mümkün olmamaktadır. Eğitim süresinin uzunluğu ve özellikle kararlılıkla ilgili bahsedilen zayıflıkları dolayısıyla, hassasiyet beklentisinin yüksek olduğu kritik uygulamalarda genellikle YSA esaslı kontrolcü kullanımı yoluna gidilmemektedir [38], [41], [42], [43].

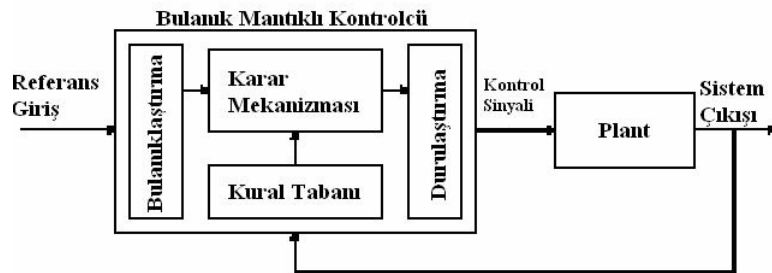
3.2. Bulanık mantık esaslı kontrol yöntemleri

Girdi ve çıktılar aralarındaki matematiksel ilişkinin istenilen kesinlikte kurulamadığı sistem, süreç veya işlemlerde dışarıdan uygulanan bir girdiye karşılık çıktının ne olması gerektiğini insan karar mekanizması benzeri bir kurguyla belirlemeye çalışan bulanık mantıklı yapılarda, girdi değeri “hızlı-yavaş”, “uzun-kısa” veya “0-1” gibi keskin bir sınıflandırmaya tâbi tutulmamaktadır. Bunun yerine girdi verileri, karşılaştırılan üyelik fonksiyonları (*İng. membership functions*) aracılığıyla, örneğin “%20 hızlı, %80 yavaş” veya “%10 uzun, %35 orta, %55 kısa” gibi “bulanık” bir şekilde betimlenmektedir. Böylelikle, belirlenen sınır değerlerin arasındaki girdilerin, doğruluk değeri yüksek ve daha hassas çıktılara neden olması sağlanmış olur [36].

Çok girdi ve çıktılı kontrol sistemi uygulamaları da bulunmakla birlikte çoğunlukla tek girdili kontrol sistemlerinde kullanılan bulanık mantıklı kontrolcülerde, girdi değişkenleri genellikle hata ve hatanın türevi, çıktı ise kontrol sinyali olmaktadır. Bulanık mantık, esas itibarıyla işletim koşulları ile tasarımcının deneyim ve bilgisi çerçevesinde oluşturulan kural tabanına göre kararların verildiği ve sonucunda kontrol sinyalinin oluşturulduğu bir metodolojidir. Bulanık mantık esaslı kontrol, temelde üç ardışık aşamadan oluşur [36]:

- Bulanıklaştırma (*İng. fuzzification*)
- Karar mekanizması (*İng. inference mechanism*)
- Durulaştırma (*İng. defuzzification*)

Kontrolcü girdilerinin sayısal değerleri, bulanıklaştırma aşamasında tanımlanan sınıflandırma seviyelerine göre üyelik fonksiyonları aracılığıyla karar mekanizmasında değerlendirilmeye uygun büyüklüklere dönüştürülür. Dönüştürülmüş girdi verilerini kullanan karar mekanizması, mevcut durumda hangi kuralların uygulanması ve kontrolcü çıktısının (kontrol sinyalinin) ne olması gerektiğine karar verir. Nihayet, karar mekanizması tarafından verilen kararlar durulaştırma aşamasında nicel büyüklüklere dönüştürülerek kontrol sinyali oluşturulur [36], [38]. Bahsedilen aşamaları da içeren bulanık mantıklı kontrol sisteminin şematik gösterimi Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Bulanık mantıklı kontrol sistemi yapısı [44]

Bulanık mantıklı kontrolcüler, dinamik davranışı güçlükle modellenebilen sistemler için tasarlanan birçok kontrol sisteminde kontrolcü olarak görev yapmaktadır. Kontrol hassasiyetinin çok yüksek olmadığı uygulamalardaki başarımlarına karşın, YSA esaslı yapılarda da olduğu gibi nihai kontrol sistemlerinin kararlılığını garanti edecek tutarlı bir yöntem bulunmamasından dolayı, bulanık mantıklı kontrolcüler kritik uygulamalarda genellikle tercih edilmemektedir. Ayrıca, sınıflandırma seviyelerinin karşılaştırıldığı ve üyelik fonksiyonlarının belirlendiği çalışma aralıkları dışındaki işletim durumlarında yetersiz kalmaları da, bulanık mantıklı kontrolcülerin çoğunlukla benzetim ortamlarında kalması ve fiziksel uygulamalara taşınamaması sonucunu doğurmuştur. Öte yandan, bulanık mantıklı kontrol sistemlerinin değişen çalışma koşullarına uyum sağlayabilmesi ve kararlılığının garanti edilebilmesi amacıyla, parametre değişikliklerine uyumlu üyelik fonksiyonlarının uygulanması gibi farklı tasarım yöntemleri denenmiştir [38], [45], [46], [47].

4. Sonuçlar

Mekatronik sistemlerin tasarlanması sırasında dikkate alınması gereken hususlardan birisi de oluşturulacak kontrol sistemlerinde uygulanacak kontrol yönteminin belirlenmesidir. Sistem başarımını doğrudan etkileyen bu seçim yapılırken, kontrol edilecek sistemin (plantın) modellenebilirlik durumu ve öngörülen işletim koşullarına bakılarak bir karar verilmelidir. Bu noktada mekatronik sistemlere uygulanabilecek mevcut kontrol yöntemleri, kontrol kuralının türetiminde plant dinamiğinin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak model tabanlı ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Geliştirilecek kontrol sisteminin başarımının

yüksek olması ve sistem kararlılığının belirlenen işletim süresinin tamamında sağlanabilmesi için, öncelikle model tabanlı kontrol yöntemleri tercih edilmelidir. Plant modelinin çıkarılmasının güç olduğu durumlarla parametre değişiklikleri ve öngörülemeyen dinamik davranışların ortaya çıktığı hallerde ise, model tabanlı olmayan yöntemler uygun tasarım alternatifleri sunabilmektedir. Ayrıca, yukarıda da bahsedildiği gibi, değişken koşullar altındaki üstün başarımlı özelliklerine karşın bahsedilen yöntemlerin hiçbirisi klasik kontrol yaklaşımları kadar rağbet görmemiştir. Bu durum, aslında klasik yöntemlerin basitlik ve uygulama kolaylığından kaynaklanmakta olup, bozucu girişlere karşı sistem gürbüzlüğünün önem kazandığı durumlarda gürbüz kontrol yöntemleri de özellikle son yıllarda daha fazla önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak, ele alınan kontrol yöntemleri arasında mutlak anlamda öne çıkan bir yaklaşım bulunmamaktadır. İlgili kısımlarda açıklandığı gibi, her bir yöntemin diğerlerine göre üstün ve zayıf olduğu durumlar vardır. Bu nedenle, mekatronik bir sisteme uygulanacak kontrol yöntemi seçilirken, sistem karakteristikleri ve belirlenen işletim koşulları göz önüne alınmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Wikipedia-“Mekatronik” maddesi, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Mekatronik> (2009).
- [2] Eilers, S., Oodes, T., **Modelling and Simulation of Heterogeneous Mechatronic Systems**, Çalışma Raporu, Sistem ve Tasarım için Sistem Mühendisliği Enstitüsü, Hannover Üniversitesi, Almanya (2007).
- [3] Bansevicius, H. R. P., **Smart Piezoelectric Mechanisms or the Golden Age of Mechatronics**, Litvanya Mekatronik Araştırmalar, Çalışmalar ve Bilgi Merkezi, Litvanya (2008).
- [4] Ağ sayfası: <http://robotics.unibg.it/lab/resources.html>.
- [5] Ağ sayfası: <http://www.engineering.lancs.ac.uk/REGROUPS/ci/Files/projects/bakari.html>.
- [6] Ağ sayfası: <http://acg.cs.tau.ac.il/courses/workshop/spring-2009/high-quality-motion-paths>.
- [7] Ağ sayfası: <http://www.segwayjunkyard.com/customs.htm>.
- [8] Ağ sayfası: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Tomahawk_Block_IV_cruise_missile.jpg/800px-Tomahawk_Block_IV_cruise_missile.jpg.
- [9] Ogata, K., **Modern Control Engineering**, Üçüncü Baskı, Prentice-Hall Inc., ABD (1997).
- [10] Kuo, B. C., **Otomatik Kontrol Sistemleri**, Çeviren ve Uyarlayan: Prof. Dr. Atilla Bir, Literatür Yayıncılık, Yedinci Basım, İstanbul, Türkiye (1999).
- [11] Zhou, K., Doyle, J. C., **Essentials of Robust Control**, Prentice-Hall Inc., ABD (1998).
- [12] Blakelock, J. H., **Automatic Control of Aircraft and Missiles**, John Wiley & Sons Inc., ABD (1965).
- [13] Lee, H. C., Choi, Y. S., Choi, J. W., “Autopilot Design for Agile Missile Using Time-Varying Control Technique”, **16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace Bildirileri**, Saint-Petersburg, Rusya, Cilt: 2, Sayfa: 103-108 (2004).
- [14] Berghuis, H., Löhnberg, P., Nijmeijer, H., “Tracking Control of Robots Using Only Position Measurements”, **30th Conference on Decision and Control Bildirileri**, Sayfa: 1039-1040, Brighton, İngiltere (1991).
- [15] Janardhanan, S., Bandyopadhyay, B., “Tracking of LTI Systems with Unstable Zero Dynamics Using Multirate Output Feedback Based Sliding Mode Control”, **Interdisciplinary Programme in Systems and Control Engineering Bildirisi**, Indian Institute of Technology, Bombay, Hindistan (2004).
- [16] Goodwin, G. C., “A Brief Overview of Nonlinear Control”, **Centre for Integrated Dynamics and Control Bildirisi**, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, Avustralya (2002).
- [17] Groeneweg, E. J., **Investigation of a Robust Controller, Based on the Adaptive Computed Torque Method**, Çalışma Raporu, Eindhoven University of Technology, Makina Mühendisliği Bölümü, Hollanda (1991).
- [18] Kwan, E., Liu, M., **Robot Manipulators Tracking Using Hybrid Fuzzy Logic Controller**, Konferans Bildirisi, Monash University, Elektrik ve Bilgisayar Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Avustralya (2008).
- [19] Muñoz, J. A. T., Malabre, M., “Simultaneous Model Matching and Disturbance Rejection by State Feedback”, **37th IEEE Conference on Decision and Control Bildirileri**, Sayfa: 4374-4379, Tampa, Florida, ABD (1998).
- [20] Helton, J. W., James, M. R., “Extending H_∞ Control to Nonlinear Systems”, **Bulletin of the American Mathematical Society**, Cilt: 38, Sayı: 1, Sayfa: 93-96 (2000).
- [21] Liu, R., **Nonlinear Control of Electro-Hydraulic Servosystems: Theory and Experiment**, Yüksek Lisans Tezi, University of Illinois at Urbana Champaign, ABD (1998).
- [22] Härkegård, O., **Backstepping and Control Allocation with Applications to Flight Control**, Doktora Tezi, Linköping University, İsveç (2003).

- [23] Aguiar, A. P., Hespanha, J. P., Kokotović, P. V., “Path-Following for Non-Minimum Phase System Removes Performance Limitations”, **Center for Control Engineering and Computation Bildirisi**, University of California, Santa Barbara, ABD (2004).
- [24] Chang, J., Tan, Y., Yu, J. T., “Backstepping Approach of Adaptive Control, Gain Selection and DSP Implementation for AC Servo System”, **IEEE yayını**, Sayfa: 535-541 (2007).
- [25] Härkegård, O., **Backstepping Designs for Aircraft Control-Where is there to gain?**, Çalışma Raporu, Linköping University, İsveç (2001).
- [26] Joseph, A., “Application of Backstepping for the Control of Launch Vehicle”, **IE(I) Journal-AS**, Cilt: 88, Sayfa: 13-19 (2007).
- [27] Menon, P. K., Ohlmeyer, E. J., “Computer-aided Synthesis of Nonlinear Autopilots for Missiles”, **Nonlinear Studies**, Cilt: 11, Sayı: 2, Sayfa: 173-198 (2004).
- [28] Vuilmet, C., “A MIMO Backstepping Control with Acceleration Feedback for Torpedo”, **38th Southeastern Symposium on System Theory Bildirisi**, Tennessee Technological University, Cookeville, TN, ABD, 157-162 (2006).
- [29] Kjaer, M. A., **Sliding Mode Control**, Ders Notu, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, İsveç (2004).
- [30] Young, K. D., Utkin, V. I., Özgüner, Ü., “A Control Engineer’s Guide to Sliding Mode Control”, **IEEE Workshop on Variable Structure Systems**, Tokyo, Japonya (1996).
- [31] Tokat, S., **Koordinat Dönüşümüne Dayalı Zamanla Değişen Kayma Yüzeyi Tasarım Yöntemleri**, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2003).
- [32] Damiano, A., Gatto, G. L., Marongiu, I., Pisano, A., “Second-Order Sliding-Mode Control of DC Drives”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Cilt: 51, Sayı: 2, Sayfa: 364-373 (2004).
- [33] Thukral, A., Innocenti, M., “A Sliding Mode Missile Pitch Autopilot Synthesis for High Angle of Attack Maneuvering”, **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Cilt: 6, Sayı: 3, Sayfa: 359-371 (1998).
- [34] Xing, G. Q., Bainum, P. M., “H-infinity Robust Controller Design and Comparison with LQG, PID Controllers for an Expandable Launch Vehicle”, **AIAA/AAS Astrodynamics Conference Bildirileri**, Sayfa: 183-191, San Diego, CA, ABD (1996).
- [35] Elisante, E., Rangaiah, G. P., Palanki, S., “Robust Controller Synthesis for Multivariable Nonlinear Systems with Unmeasured Disturbances”, **Chemical Engineering Science**, Elsevier, Cilt: 59, Sayfa: 977-986 (2004).
- [36] Passino, K. M., “Intelligent Control: an Overview of Techniques”, **Department of Electrical Engineering Bildirisi**, The Ohio State University, ABD (2001).
- [37] Özkan, B., **Dynamic Modeling, Guidance, and Control of Homing Missiles**, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye (2005).
- [38] Lin, C. L., Su, H. W., “Intelligent Control Theory in Guidance and Control System Design: An Overview”, **National Science Council ROC(A) Bildirileri**, Cilt: 24, Sayı: 1, Sayfa: 15-30 (2000).
- [39] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/User:Paskari/page2> (2009).
- [40] Kuljaca, O., Swamy, N., Lewis, F. L., Kwan, C. M., “Design and implementation of Industrial Neural Network Controller Using Backstepping”, **40th IEEE Conference on Decision and Control Bildirileri**, Sayfa: 2709-2714, Orlando, Florida, ABD (2001).
- [41] Kim, K., **The Control of Nonlinear Nonminimum Phase Systems**, Coordinate Systems Laboratory Teknik Raporu, Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, ABD (2000).
- [42] Shtessel, Y. B., Shkolnikov, I. A., “Non-minimum Phase Tracking on Sliding Modes”, **Department of Alabama in Huntsville Bildirisi**, ABD (1998).
- [43] Calise, A. J., Sharma, M., Corban, J. E., “An Adaptive Autopilot Design for Guided Munitions”, **AIAA Bildirisi** (2000).
- [44] Vural, A. Ö., **Fuzzy Logic Guidance System Design for Guided Missiles**, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye (2003).
- [45] Chen, G., Ying, H., “On the Stability of Fuzzy PI Control Systems”, **Institute of Space Systems Operations Bildirisi**, University of Houston, ABD (1993).
- [46] White, B. A., Blumel, A. L., Hughes, E. J., “A Robust Fuzzy Autopilot Design Using Multi-Criteria Optimization”, **International Journal of Fuzzy Systems**, Cilt: 2, Sayı: 2, Sayfa: 129-138 (2000).
- [47] Sutton, R., Craven, P. J., “A Fuzzy Autopilot Design Approach That Utilizes Non-Linear Consequent Terms”, **Journal of Marine Science and Technology**, Cilt: 9, Sayı: 2, Sayfa: 65-74 (2001).