

van Straten, Gerrit, and L.G. van Willigenburg. 2006. Section 3.2 Control and Optimization, pp. 124-138 of Chapter 3 Methods, Algorithms, and Software, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Çevirmen: Hakkı SOY

Çeviri Editörleri: Sefa TARHAN ve Mehmet Metin ÖZGÜVEN

3.2 Kontrol ve Optimizasyon

Yazarlar: G. van Straten ve L. G. van Willigenburg

Çevirmen: Hakkı SOY

Özet: Çeşitli klasik ve modern kontrol yöntemlerinin büyük bölümü gerek duyulan bilgiye göre sınıflandırılmış ve optimizasyonun açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomasyon, Kontrol, Optimizasyon, Kontrol sınıflandırma

3.2.1 Giriş

Kontrol geniş anlamda otomasyonun bir alt kümesidir. Otomasyon devamlı insan çabası olmaksızın işlemleri gerçekleştirmeyi amaçlar. Bu bölüm sürekli prosesler üzerinde odaklanarak tarımsal uygulamalarda dinamik optimizasyon içeren kontrol yöntem ve algoritmalarına genel bakış sağlamaktadır. Otomasyonda başka bir ana görüş hasat, paketleme ve dâhili taşıma benzeri kesikli işlemler ile ilgilenir. Bu alan ON/OFF sensörler ve basit eyleyicilerle birleştirilmiş programlanabilir diziler ve PLC'lerin kullanımına göre nitelendirilmektedir. Önemli ve yaygın olmasına karşın bu özel alan bölüm kapsamına alınmamıştır.

Tarımsal alanda kontrol uygulamalarının iki ana sahası mevcuttur: *mekanik ve mekatronik* (güç, donanımlar, saha işlemleri, robotik) ve *işleme* (kurutma, depolama, sera tarımı).

Zaman ölçeğindeki ve hedeflerdeki farklılıklara rağmen yaklaşımda pek çok benzerlikler mevcuttur. Bundan dolayı bu kısımda genel kavramlar üzerinde yoğunlaşacağız. Amacımız pratik durumlarda uygun seçim yapılmasında okuyucuya yardım sağlamak üzere çeşitli kontrolör örneklerine genel bakış ortaya koymaktır. Bu kitabın 4.1 Otomasyon ve Kontrol bölümü pratik kontrol sistemlerinin bileşenlerinin ve tekniklerinin gözden geçirilmesini sağlamaktadır.

3.2.2 Kontrolün Amacı

Herhangi bir kontrol sistemi tasarlamadan veya satın almadan önce kontrol edilen sistemin temel hedefinin veya amacının ne olacağı sorulması önemlidir. Hedef en önde gelen konudur. Kontrol “*sistemi istediğimiz gibi hareket edecek hale*

getirmek” olarak tanımlanabilir. İstek amacı ifade eder. Mümkün olabilir kontrol amaçları şunlardır:

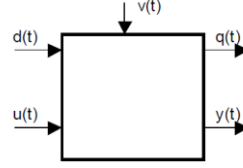
- Hassasiyet, doğruluk ve kalite sağlamak. Tüm hedeflerin esas çıkarılan amacı algılanan değerleri sabit ve tekrarlanabilir tutmaktır;
- Monoton işlerde çalışan personele konfor ve rahatlık sağlamak. Buna kontrol olmaksızın yapılabilecek zor olan görevlerde dâhildir;
- Riskleri ortadan kaldırmak ve güvenliği sağlama almak. Kontrol sistemi uyarılar vermek ve güvenlik sınırları içinde sistemi dengede tutmak üzere kullanılır;
- İsrafi ve değerli kaynakların kötüye kullanımını önlemek. Kontrol sistemi toleranslara yakın olarak gerçekleştirilen, böylece enerji tasarrufu sağlayan, kalite kaybını önleyen ve kısıtlı kaynakların en iyi kullanımına neden olan işlemlere izin verir. Böyle hedefler çoğu kez sadece ayar noktası kontrolünden daha fazlasını ister: kısıtlama tatmini ve optimizasyon yöntemleri burada önemlidir;
- Geniş algıda prosesin ekonomik sonuçlarını arttırmak. Çoğu kez bu amaç tamamen ekonomik faktörler ile çevreye bağlı kısıtlamalar ve ürün kalitesiyle arasında ödünleşime yol açar. Bu amaç iş gücü üzerinde tasarrufları içine alabilir. Açıkça burada optimizasyon yöntemleri ana rolü oynar;
- Hassas tarım vb. sistemleri kontrol olmaksızın tasarlamak mümkün olmayabilir. Bu uygulamalarda kontrol sadece ekstra bir araç değil sistemin bir bütün olarak başlıca elemanıdır.

3.2.3 Sistemler, Sinyaller ve Modeller

Sistem için kontrolör tasarımında veya seçiminde ilk adım sistem sınırlarının tanımlanmasıdır. Sistem sınırları tanımlandığında sistemin çevresi ile etkileşiminin nasıl olduğunun belirtilmesi gereklidir. Bu işlem *modelleme* olarak görülebilir. Sistemin uyguladığımız etkilere nasıl cevap vereceğini bilmek amacı ile modele ihtiyaç duyarız, böylece istediğimiz gibi davranacak sistem yapabiliriz. Pratikte bazen başarılı kontrol, deneme ve hata ile kesin modeller olmaksızın gerçekleştirilebilir, Şimdiye kadar modelleme bilimsel tabanlı tasarımda ve kontrolörlerin gelişiminde en önde gelen konu olmuştur.

Kontrol amaçları için modelleme bakış açısından enerji ve kütle değişimi gibi fiziksel akışlar bilgi akışı veya *sinyaller* olarak görülebilir, örneğin zamanla değişen büyüklükler. Kontrol teorisinde baskın yaklaşım *giriş* sinyalleri ve *çıkış* sinyalleri arasındaki farkı ayırt etmektir. Girişler veya zorlayıcı değişkenler sistem üzerine dışarıdan uygulanır. Çıkışlar sistemin cevabını gösterir. Girişler ayrıca gözlenemeyen bozucu girişler (v), gözlenen bozucu girişler (d) ve kontrol girişleri (u) (Şekil 1'e bakılabilir) olmak üzere alt bölümlere ayrılabilir. Çıkışlar gözlemlenen çıkışlar (y) ve ilgilenilen çıkışlar (q) olmak üzere alt bölümlere ayrılabilir. Bunlar gözlenemez fakat

bilinen sistem değişkenlerinden hesaplanabilir. Sistem dinamikleri açısından bakıldığında alt bölümlere ayırma önemli değildir, fakat kontrolör tasarımı açısından bakıldığında önemlidir, çünkü her kontrol girişi bir *eyleyici* ile ilişkilendirilir ve her gözlemlenen değişken bir *sensör* gerektirir. Pratikte sensörler ve eyleyiciler kontrol sisteminin maliyetini belirler ve bundan dolayı maliyet ile gerçekleştirilebilir performans arasında ödünleşime tabi tutulur.



Şekil 1. Giriş ve çıkış sinyalleri ile sistem.

Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sistemler

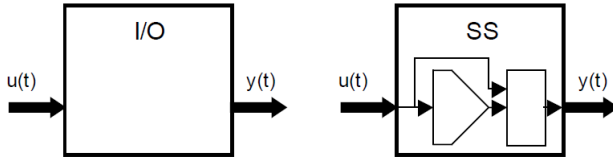
Giriş ile orantılı olarak çıkış verme özelliğine sahip sistemler *doğrusal* sistemler olarak isimlendirilir. Çıkış, giriş sıfırken sistem çıkışına göre ölçülmelidir. Gerçek hayattaki sistemlerin çoğu doğrusal olmayan sistemlerdir, fakat çoğu özel çalışma aralığı üzerinde doğrusal sistem modellerine yakınlaşır. Kontrol teorisi doğrusal olmayan sistemlerden daha çok doğrusal sistemler için geliştirilmiştir.

Modeller

Sistem için dinamik modeli elde etmek üzere iki temel yaklaşım mevcuttur: *veri yönelimli modelleme* ve *mekanik modelleme*. Veri yönelimli yaklaşımı mevcut sistem verileri ile başlar ve veriden giriş ile çıkış arasındaki dinamik davranışı tespit etmeye çalışır. Bazı sinyal sürücü modeller, mevcut veri kümelerinden türetilbilme avantajına sahiptir ve bundan dolayı sistemin nasıl çalışacağı hakkında herhangi bir önceden belirlenmiş karara bağlı değildir. Veriden modelleri çıkaracak yaygın olarak kullanılan yazılımlar mevcuttur. Bu işlem *sistem tanımlama* olarak bilinir. Sonuç *giriş/çıkış modelidir* (I/O modeli, Şekil 2, sol), ki bu model yüksek dereceli diferansiyel denklem veya doğrusal durumda transfer fonksiyonu şeklini alabilir. Sinyal sürücü modeller klasik kontrolör tasarımında çok kullanışlıdır, fakat diğer benzer durumlara geçiş yapmak zordur ve sistem henüz mevcut olmadığında kullanılamazlar.

Buna karşın, mekanik modeller kütle ve enerji korunum kanunlarından veya sistem içinde erişilebilir değişkenler arasındaki bilinen ilişkilerden çıkarılır. Modellemenin bu şeklinde sistem hafızasını gösteren *durum değişkenleri* adı verilen yardımcı değişkenler (Şekil 2, sağ) bulunur. Güncel durum biliniyorsa geçmiş davranış önemsiz olur. Durum değişkenleri fiziksel anlama sahip olabilirler, fakat aynı zamanda sanal matematiksel yapılarda da olabilirler. Durumun tek olmadığını gösteren aynı giriş çıkış davranışını sağlayan çeşitli durum uzayı gösterimleri mevcut

olabildiğine dikkat edilmelidir. Uzay durum yaklaşımı özellikle tasarım ve optimizasyon çerçevesinde çok güçlüdür.



Şekil 2. Giriş-çıkış modelleri (sol) ve durum uzay modelleri (sağ).
Tüm sinyaller ve fonksiyonlar vektör değerlidir.

Tablo 1 hem doğrusal olmayan genel durum için hem de doğrusal durum için sürekli modellerin ortak şeklini I/O biçiminde ve uzay zaman biçiminde gösterir. Bu tabloda $u(t)$ giriş ve $y(t)$ çıkıştır. I/O denklemleri sadece tek giriş tek çıkış için verilir, fakat denklemler kolaylıkla çok giriş çok çıkışa genişletilebilir. Uzay zaman gösteriminde $x(t)$ n boyutlu durum vektörü iken, $u(t)$ m boyutlu giriş ve $y(t)$ p boyutlu çıkıştır. Doğrusal modeller için transfer fonksiyonu (TF) biçimi de sıklıkla kullanılır. Transfer fonksiyonu Laplace dönüştürülmüş \bar{u} girişine bağlı olarak Laplace dönüştürülmüş \bar{y} çıkışını gösterir. Giriş çıkış birleşimleri olduğu gibi çok fazla sayıda transfer fonksiyonları vardır. Durum uzayı durumu için parantezler arasındaki ifade m.p matristir. Doğrusal I/O diferansiyel denklem biçimi, transfer fonksiyonu biçimi ve doğrusal durum uzay biçimi birbirlerine dönüştürülebilir. Bu verilen biçimlerden birine bağlı olan kontrolör tasarımlarının diğer biçimlerden herhangi birine uygulanabileceği anlamına gelir.

Tablo 1. Sürekli giriş çıkış (I/O) modelleri ve durum uzay modelleri (SS) için standart şekil. Doğrusal durumda transfer fonksiyonu şeklinde olduğu gibi doğrusal olmayan ve doğrusal diferansiyel denklem şekilleri verilmiştir.

	I/O	SS
Doğrusal Olmayan	$f\left\{y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots\right\} = g\left\{u, \frac{du}{dt}, \frac{d^2u}{dt^2}, \dots\right\}$	$\dot{x} = f\{x, u, t\}$ $y = g\{x, u, t\}$
Doğrusal	$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y =$ $b_q \frac{d^q u}{dt^q} + b_{q-1} \frac{d^{q-1} u}{dt^{q-1}} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u$	$\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx + Du$
Doğrusal Transfer Fonksiyonu	$G_{u \rightarrow y} = \frac{b_q s^q + b_{q-1} s^{q-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$	$\bar{y} = (C(sI - A)^{-1} B + D)\bar{u}$

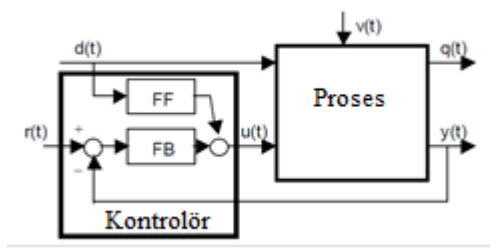
3.2.4 PID Kontrol

Kontrol problemlerine genel çerçeve ortaya koymadan önce iyi bilinen klasik Oransal Integral Türev (PID, Proportional Integral Derivative) kontrolörü kısaca

tanıtmak uygundur. Bu kontrolör tek giriş ve tek çıkış (SISO, single input single output) kullanır. Hedef, bozucuları çıkarmak ve pek çok uygulamada sadece r sabit ayar noktası olmak üzere $r(t)$ referans yörüngesini izlemektir. Kontrolör şöyle verilir:

$$u(t) = c + K \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int \varepsilon(t) dt + \tau_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Ana fikir, çıkışın referans değerden ayrılıp ayrılmadığını kontrol etmek ve kontrolör kazancı K 'yı kullanarak u girişini hata $\varepsilon(t)=r(t)-y(t)$ ile orantılı düzeltmektir. Geri besleme (FB, Feedback) fikri kontrolün temelidir. Eğer hata sıfırsa, giriş c nominal değerindedir. Çünkü pratikte yük değişimlerinden dolayı kararlı giriş, çıkışı korumayı ayarlamaya ihtiyaç duyar, bunu otomatik olarak gerçekleştirmek için integral işlemi eklenir. Türev işlemi hızlı bozulmalara karşı kontrolör cevabını hızlandırmayı ortaya koyar.



Şekil 3. İleri beslemeli ve geri beslemeli kontrolör ile sistem için sinyal akışları.

Şekil 3, bu tip kontrolör için sinyal akışını gösterir. Bu plan aynı zamanda ölçülen bozunumların ileri beslemeli düzeltme seçeneğini gösterir.

3.2.5 Genel Yapı

Genel Sistem Modeli Tanımı

Uzay zaman biçiminde genel model tanımlaması:

$$\dot{x}(t) = f\{x(t), u(t), d(t)\}, \quad x(t_0) = x_0 \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_y\{x(t), u(t), d(t)\} \\ g_q\{x(t), u(t), d(t)\} \end{bmatrix} \quad (2b)$$

Burada x , başlangıç değeri x_0 ve başlangıç zamanı t_0 olan durum vektörüdür. Durumun zaman açılımı diferansiyel denklemler ile verilir (Denklem 2). Vektör değerli fonksiyonu f durumun kendisinin ve harici zorlayıcı değişkenlerin fonksiyonu olarak değişimin hızını göstermektedir. Bu giriş sinyalleri ayarlanmış değişkenlere $u(t)$ ve bozucu değişkenlere $d(t)$ ayrılır. Durum çıkış sinyallerinden hesaplanabilirler. Çıkışlar gözlenen çıkışlar $y(t)$ ve çevrim içi ölçülemeyen, sadece hesaplanabilen ilgi değişkenlerine (kalite değişkenleri) $q(t)$ 'ye ayrılır.

g_y ve g_g fonksiyonları vektör değerli cebirsel dışarı okuma fonksiyonlardır. Pratikte bazen ilgi değişkenlerinin bazıları durumların veya çıkışların integrasyonu ile hesaplanır, örneğin sera modelinde toplam enerji tüketimi. Bu çerçevede integrali alınmış değerler, durumlar olarak ele alınır. Uygun uzaysal ayrıklaştırma ile durum uzay tanımlaması aynı zamanda uzaysal olarak dağıtılmış sistemlerle bağdaşır.

Bu plan ayarlanmadan önce tasarımcı uygun kontrol sinyallerinin ve çıkış sinyallerinin seçimi hakkında kararlar almalıdır. Bu seçim eyleyici ve sensörlerin beklenen etkinlikleri ile bağlantılı olarak mevcudiyeti ve maliyetine bağlıdır. Bu seçimi yapmak kontrol sistemi tasarımında çok önemli bir adımdır ve çoğunlukla tekrarlanan işlemler gerektirir.

Sistem Üzerinde İdeal Kontrol

Gelecek bozucuların tam bilgisini içeren hatasız bir modele ve optimize edilecek uygun bir hedef fonksiyonuna $J(u,d)$ sahip olursak, o zaman (teorik olarak) J minimum olacak şekilde kontrol yörüngesini $u^*(t)$ hesaplamak mümkündür. Aynı zamanda $x^*(t)$ durumlarının optimal yolları ve $y^*(t)$ ile $q^*(t)$ sinyalleri elde edilebilir olacaktır. Dikkat edilirse cevap gelecek bozuculara bağlıdır, d için tahmine ihtiyaç duyulur. Hedef fonksiyonu, minimum değerinin bulunması durumunda *maliyet fonksiyonu* olarak veya maksimum yapılmasına ihtiyaç duyuluyorsa *fayda fonksiyonu* olarak formüle edilebilir. İşareti değiştirilerek biri diğerine kolayca dönüştürülebileceğinden biz *maliyetin minimum yapılması ve hedef optimizasyonu* terimlerini eşdeğer olarak kullanacağız.

Karakteristik Hedef Fonksiyonu

Hedef fonksiyonunun genel biçimi:

$$J = \Phi\{x(t_f)\} + \int_{t_0}^{t_f} L\{x(\tau), u(\tau), d(\tau), q(\tau), \tau\} d\tau \quad (3)$$

Burada Φ , son durum $x(t_f)$ ile ilişkilendirilmiş maliyetleri göstermektedir. Genellikle bunlar hasat zamanında ürün, yığın reaktörlerde bitki yetiştirmenin tamamlanmasında biyokütle değeri gibi kazançlardır. L işletme maliyetini temsil eder. Sera ısıtma örneğinde maliyetler ısıtma gücü $u(t)$ ve sıcaklık $x(t)$ ile ilgilidir. Final zamanı (t_f) sabit, bağımsız ve sınırsız olabilir.

Dinamik Optimizasyon

Bu görev model denklemler sağlanırken maliyet J minimuma indirilecek şekilde optimal kontrol yörüngesini $u(t)$ bulmaktır. Matematiksel terimlerle:

$$u^*(t) = \arg \min J \quad (4)$$

denklem (1) ve (2)' ye bağı olarak. Buna ek olarak x , u ve y üzerinde kısıtlamalar olabilir.

Hem burada gösterildiği gibi sürekli sistemler için hem de ayrık zaman ve örneklenmiş veri sistemleri için bu tip problemleri çözecek yazılım mevcuttur. Çözümler final zamanının doğasına ve durum uzay veya kontrol kısıtlamalarının bulunmasına bağı olarak farklı olabilir [1].

Açık Çevrim Kontrol

Yukarıda yapılan varsayımlar altında hesaplanan optimal kontrolü*(t) sisteme uygulanabilir. Eğer model doğruysa sistem optimal yönde davranacaktır, öyle ki $x(t)=x^*(t)$, $y(t)=y^*(t)$, $q(t)=q^*(t)$ ve hedef fonksiyonu $J=J^*$. Bu *açık çevrim optimal kontrol* olarak isimlendirilir. Buna örnek robotun sabit yük koşulları altında optimal zamanlı hareket sağlamak üzere yönlendirilmesidir. Diğer örnek biyokütle kazancını optimize etmek için yığın beslemeli biyoreaktörün optimal besleme değeri kontrolüdür.

Geri Besleme İhtiyacı

Gerçek hayatta yukarıda özetlenen resim çeşitli sebeplerden bozulmuştur:

- Modelleme hataları,
- Başlangıç durumu sapmaları,
- Tahmin edilen bozuculardan sapmalar,
- Tahmin edilemeyen ve bilinmeyen bozucular.

Tahmin edilen bozuculardan sapmalara modelleme hatalarıymış gibi muamele edilebilir, çünkü bozucu tahmini modellemenin özel bir durumu gibi görülebilir. Modelleme hataları örneğin, ihmal edilen alt süreçlerin ihmalinden, değişkenlerin birleştirilmesinden ve hatalı parametrelerden ortaya çıkar.

Belirsizliklerden dolayı sistem davranışı ideal davranışından $x^*(t)$ sapacaktır. Belirsizliğe cevap geri beslemedir. Gözlenebilir çıkışlar $y(t)$ yoluyla sistem izlenir ve eğer beklenen yörüngeden sapmalar ortaya çıkarsa düzeltme yapılır. Bu şekilde plan kontrolör ile geliştirilir. Bu kontrolör (muhtemelen bilgisayar üzerinde çalışan bir algoritma biçiminde) hedef fonksiyonu J optimize edilecek şekilde, gözlenen çıkışları $y(t)$ ve/veya ondan elde edilmiş sistemin durumunu $x(t)$ kontrol girişine planlayan cihaz olarak görülebilir. Kontrolör aynı zamanda gözlenen bozucu girişleri $d(t)$ kullanabilir. Böyle planlar bulmak *geri beslemeli kontrolör tasarımı* olarak isimlendirilir. Etkin olması için geri besleme çevrim içi olarak hesaplanması gerekir.

3.2.6 Geri Besleme Kontrol Aileleri

Doğrusal Geri Beslemeli Denkleştirici ile Optimal Kontrol

Optimizasyona ek olarak doğrusal denkleştiricinin eklenmesi Şekil 4a'daki planı doğurmaktadır [2]. Dinamik optimizasyon çevrim dışı gerçekleştirilir. Denkleştirici tahmin edilen çıkış ve gözlenen çıkış arasındaki sapma temeli üzerinde

düzeltilme sinyali ile önceden hesaplanmış optimal kontrolleri düzeltir. Eğer bozunum sapmaları küçükse denkleştirici doğrusal ikinci dereceden kontrolör (LQ, Linear Quadratic) olarak tasarlanabilir. Temel model bölgesel olarak doğrusal hale getirilmiş transfer fonksiyonu veya sistemin durum uzay modelidir. Hedef fonksiyon aşağıdaki ikinci dereceden ifadedir:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left(\delta u(\tau)^T Q(\tau) \delta u(\tau) + \delta x(\tau)^T R(\tau) \delta x(\tau) \right) d\tau \quad (5)$$

Burada δu ve δx nominal optimal yörüngeden sapmalar, Q ve R izlenen özellikler ve kontrol çabası arasında tasarımcının denge kurmasına izin veren ağırlık matrisleridir. Normal olarak dağılmış bağımsız stokastik modelleme ve ölçüm hataları için kapalı çevrim optimal kanununun durum geri besleme kanunu formu aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\delta u(t) = -F(t) \delta x(t) \quad (6)$$

Burada F , Q ve R matrislerini izler [2] [3].

Kontrol kuralının uygulaması (Denklem 6) durumun gözlenebilmesine ihtiyaç duyar. Sistem durumu çoğu kez doğrudan erişilebilir değildir. Bu durumda *durum yeniden yapılandırmaya* ihtiyaç duyulur. Bu Kalman filtresi ile doğrusal ikinci dereceden Gaussian durum yeniden yapılandırma (LQG, Linear Quadratic Gaussian State Reconstruction) veya gözlemci tarafından yapılabilir [4]. Ana fikir Denklem 6 da bulunan δx 'i aşağıdaki gibi bir hesaplama ile değiştirmektir:

$$\frac{d\delta \hat{x}(t)}{dt} = A(t) \delta \hat{x}(t) + B(t) \delta u(t) + L(t) \delta y(t) \quad (7)$$

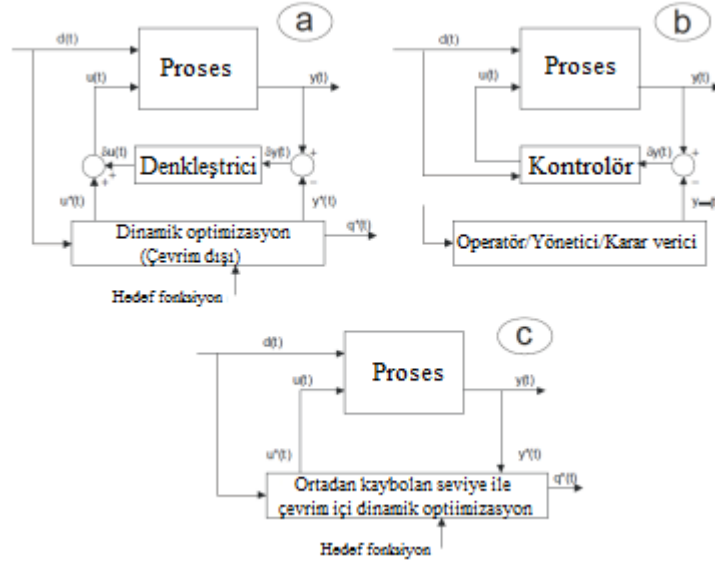
Burada δy optimal çıkış $y^*(t)$ ve gözlenen çıkış $y(t)$ arasındaki farktır. Kalman filtre durumunda kazanç L varsayılan sistem ve gürültü değişimlerinin ölçümünden hesaplanır. Eğer böyle bir bilgi mevcut değilse, durum hatasının yok edilmesi gibi belirtilmiş bir yöntem ile gözlemci kazancı tasarlanabilir.

Dikkat edilirse denkleştirici planı, optimal yörünge kontrol sınırlarını yakaladığında başarısız olur.

Yönetici (Karar Verici) ile Geri Beslemeli Kontrol

Eğer çevrim dışı dinamik optimizasyon, yönetimsel karar alıcı ile değiştirilirse çok yaygın bir plan ortaya çıkar. Bu Şekil 4b'de gösterilmiştir. Gözlenen çıkış yönetici olarak karar verici tarafından belirlenen birkaç ayar noktası veya ayar noktası yörüngesi ile karşılaştırılır. Bu; bir insan operatörü, planlayıcı (genel sera iklimlendirme kontrol bilgisayarlarındaki program dizisi vb.) veya statik veya dinamik optimizasyonun sonucu olabilir.

Dikkat edilirse bu planın tüm özellikleri ve maliyetleri tamamen yöneticiye bağlıdır. Bu kontrolör ne kadar iyi tasarlanırsa tasarlanırsa alt optimal olabilir. Çoğu pratik uygulamalarda alt optimal kontrol oldukça tatmin edicidir. Kontrol uygulamalarının ana bölümünün bu plana ait olmasının sebebi, sorumluluklarının bölünmüş olmasıdır. Bu sebepten kontrolör sadece ayar noktalarının izlenildiğinden ve bozucuların geri çevrildiğinden emin olmasına ihtiyaç duyarken (ekonomik) optimallik yöneticinin ellerine kalır. Ölçülen herhangi bir bozucu kontrolörde ileri beslemeli denkleştirici ile bağdaştırılabilir.



Şekil 4. (a) Doğrusal geri beslemeli denkleştirici ile optimal kontrol, (b) standart geri beslemeli/ileri beslemeli kontrol, (c) Ortadan kaybolan seviye optimal kontrol.

Kontrolör tasarımlarının geniş bir bölümü, aşağıda belirtildiği gibi, kontrol ve gözlem sayısına ve sistem dinamikleri hakkında mevcut bilgiye bağlı olarak mevcuttur. Genel klasik tek giriş tek çıkış tasarımlar bu aileye ait doğrusal transfer fonksiyonu tanımlamasına dayanır. Fakat aynı zamanda Denklem 6'nın çok giriş çok çıkış LQ kontrolörü bu çerçevede kullanılabilir. Denklem 5'in çevrim dışı optimizasyonuna dayanır. Bu durumda δx önceden tanımlanmış ayar noktasından sapmayı gösterir ve δu ön ayar nominal kontrol değerine göre alınır.

Çevrim İçi Optimizasyon ile Model Kestirimci Ortadan Kaybolan Seviye Kontrol

Bu plan Şekil 4c'de gösterilmiştir. Denkleştirici ile bağlantılı çevrim dışı optimizasyon yerine daha önce belirli bir ufukta ana hatları belirtildiği gibi yaklaşan kontrol aralığında doğrudan kontrol ihtiyaçlarını hesaplayan çevrim içi optimizasyon gerçekleştirilir. Seviye uzunluğu sistemin en yavaş zaman sabiti ile karşılaştırıldığında yeterince uzun olmalıdır. Bir sonraki aralıkta optimizasyon tekrarlanır, final zamanında ortadan kaybolur [5, 6]. Ortadan kaybolan seviye planları özellikle bozucular tahmin edilemediğinde fakat ölçülebildiğinde, kontrol ve

durum kısıtlamaları mevcutsa uygulanabilir. Karakteristik örnek sera iklimlendirme kontrolüdür. Çevrim içi optimizasyonların başarılı olmasından dolayı bu yöntem sadece gerekli hesaplama süresi ile karşılaştırıldığında yeterince yavaş sistemlere uygulanabilir. Bilgisayarların hızının giderek yükselmesi ile potansiyel uygulamaların sayısı artmaktadır.

Çevrim içi optimizasyondan ikinci dereceden hedef fonksiyonu ile bağlantılı doğrusallık varsayımı altında kaçınılabilir. Böyle durumlarda *genelleştirilmiş kestirimci kontrol* (GPC, generalized predictive control) gibi kapalı döngü çözümler bulunabilir [7]. Bu yol ile orijinal optimalliğin kaybolabileceği açıktır. Bununla birlikte böyle tasarımlar Şekil 4'deki yönetici planında klasik tasarıma veya LQ tasarımına alternatif olarak hala kontrolör olarak kullanılabilir. Model kestirimci geri beslemeli kontrolörlerin klasik geri beslemeli tasarımlara göre avantajı sınırlamaların kolayca üstesinden gelmeleridir.

3.2.7 Kontrolör Paradigmaları ve Tasarım Yöntemleri

Literatürde yer alabilecek çeşitli kontrol yöntemleri mevcuttur. Yöntem seçimi temelde problem hakkında mevcut bilgi tarafından belirlenir. Önemli konular şunlardır:

1. Sistem önceden mevcut mu yoksa hala tasarlanıyor mu? İlk durumda veri tabanlı modelleme yöntemleri kullanılabilir. Verilerden doğrusal dinamik modelleri tahmin edebilecek sistem tanımlama araçları mevcuttur [8, 9]. Eğer sistemin doğrusal olmayan olduğu varsayılırsa sinirsel ağ modelleme iyi sonuçlar verir [10];
2. Model yapısı biliniyor mu, kısmen biliniyor mu, niteliksel biliniyor mu veya bütünüyle bilinmiyor mu? Eğer model yapısı biliniyorsa uzay durum yöntemleri üstündür. Çoğu kontrolör uzay durum modelinden (muhtemelen doğrusallaştırmada sonra) veya verilerden türetilebilecek transfer fonksiyonu bilgisinin temelinde tasarlanabilir. Eğer sadece niteliksel bilgi mevcutsa bulanık modeller kullanılabilir. Eğer kesinlikle hiçbir şey bilinmiyorsa, deneme ve yanılmadan başka hiçbir şey kalmaz, muhtemelen en iyisi halihazırda mevcut olan PID kontrol ile başlamaktır;
3. Güvenilir model parametreleri mevcut mu? Değilse parametre tahmini için deneylere ihtiyaç duyulur veya parametreleri belirlemek için anlık uyarlamalı yöntemler seçilebilir. Burada deneysel tasarım ve tanımlanabilme önemli konulardır. Parametre tahmini alanı regresyon ile ilgilidir, burada tahminlerdeki güvenin değerlendirilmesini yapacak yöntemler mevcuttur [13];
4. Eğer bozucular ölçülebilirse bunlar ileri beslemeli kontrol ile birleştirilebilir. Modele ihtiyaç duyulur. İleri beslemeli kontrol üst seviyede gerekli ön düzenlemeleri hesaplamak üzere özellikle ölçülebilir yük değişimleri için kullanışlıdır [12];

5. Sistem durumlarının tamamına erişilmeyebilir. Bu durumda onların durum tahmin yöntemleri (gözlemciler, Kalman filtresi vb.) ile yeniden kurulmasına ihtiyaç duyulur. Doğrusal sistemler için gözlenebilirlik koşulları kontrol edilir. Belki ilave sensörlere ihtiyaç duyulabilir;
6. Doğrusal sistemler için önerilen plan denetlenebilirlik için kontrol edilebilmelidir. Eyleyici ve sensörlerin yeniden düzenlenmesi gerekebilir.

Tablo 2, en önemli durumlar ve onlara ilişkilendirilmiş en uygun kontrol yöntemlerini özetlemektedir. Kontrol edilen sistemin performansını artırmak için en önemli adım sistemi daha iyi anlamaktır (modeli iyileştirme).

Tablolar 3-6 iyi bilinen birkaç kontrol yönteminin detaylı olmayan özetini verir. Bunlar okuyucuya uygun modeli bulmasına yardımcı olmak niyeti ile verilmiştir. Bazı özellikler aşağıda açıklanmıştır.

Tablo 2. Mevcut bilginin fonksiyonu olarak tercih edilen kontrol ailesi.

Sistem Bilgisi		
Model Bilgisi	Ek Özellikler	Tercih Edilen Yöntem
Kesin		Optimal kontrol + LQ(G)
Düzeltililebilir	Çalışırken	Uyarlamalı kontrol
Düzeltililebilir	Tekrarlama ile	Yinelemeli öğrenme kontrolü
Şüpheli	Kesin durum gözlemleri ile	Ortadan kaybolan seviye optimal kontrol (ρ o)
Şüpheli	Bazı deneyimler ile	PID/Bulanık kontrol/Kural tabanlı kontrol
Şüpheli	Kararsızlık sınırları üzerinde bazı fikirler ile	Gürbüz kontrol
Şüpheli		Çevrim dışı model geliştirme!

Tablo 3. Frekans alanında tasarım yöntemleri.

Tip	Frekans Alanı Yöntemleri				Robust
	PID	Kademeli Kontrol	Smith Öngörücü	FF Denkleştirme	
Model		TF biçimi veya cevap eğrisi			Kararsızlık sınırları ile TF/Bode
Karakteristik problem alanı	SISO ikinci derece benzeri	Yavaş/Hızlı	Ölü zaman	Ölçülebilir bozucular	Bilinmeyen değişken dinamikleri
Sentez		Ayarlama/kutup yerleştirme			Döngü şekillendirme
Analiz		Faz/kazanç kenarı/kök yeri			μ -sentezi
Sonuç		Ayarlanmış PID	Ayarlanmış PID + FF		TF formatında ayarlanmış FB kanunu
Avantaj		Rafa kalkmış, pratikte oldukça robust			Parametre belirsizliği altında çalışma
Sorun		Performans sınırlayan sabit yapı	Sabit ölü zaman	İyi FF modelleme ihtiyacı	Korunumlu olmaya eğilimi (en kötü durumda)
Açıklamalar	MIMO: dekaplaj yoluyla	2 sensor/aktuator			PID'den daha esnek kontrolörler
Referanslar			[11, 12]		[14]

Tablo 4. Durum uzayı tasarım yöntemleri.

Tip	Doğrusal Durum Uzay Yöntemleri		
	LQ	LQG	Robust H_{inf}
Model			Doğrusal Durum Uzayı
Karakteristik problem alanı	Kesin model + durum gözlemleri	Kesin model + çıkış gözlemleri	Belirsiz model
Sentez	Riccati denklemini çöz	Kalman filtre tasarımı + Riccati denklemi	Min-max hedefi minimum yap
Analiz	Q, R matrislerini ayarla	Q, R matrislerini + belirsiz parametreleri ayarla	
Sonuç	$u=-Fx$		$u=-Fy$
Avantaj	MIMO / 2. dereceden hedefler için optimal		MIMO
Sorun		Robust değil	Korunumlu
Açıklamalar	Hedef 2. dereceden değilse optimal değil		Belirsizlik bilgisi gerektiriyor
Referanslar		[1-3]	[14]

Model

Çoğu yöntemlerde nihai kontrolör modelin kendisini açıkça içerse de içermese de model anahtar rol oynar. PID kontrolde olduğu gibi bazen model sadece kontrolör parametrelerini bulmak için kullanılır. LQ ve gürbüz (robust) kontrolde olduğu gibi bazen model kontrolör parametreleri ile ilişkili kontrolör biçimini çıkarmak için kullanılır, fakat bu durumların tümünde modelin kendisi kontrolörün bir parçası değildir. Buna karşın kontrol optimize edilmesinde, ortadan kaybolan seviye model kestirimci kontrol ve bazı uyarlamalı kontrol planları dahil, modelin kendisi kontrolör algoritmasının içinde gömülüdür.

Tablo 5. Model kestirimci yöntemler ve uyarlamalı kontrol.

Tip	GPC	IMC,DMC	RHOC	Uyarlamalı Kontrol	
				Kendinden Ayarlama	MRAC
Model	CARIMA(X)	Basamak cevabı	Durum uzayı	(C)AR(D)MA(X)	Durum uzayı
Karakteristik problem alanı	Veri yönelimli problemler ile uzay ve giriş kısıtlamaları		Belirsiz model + Kesin durum gözlemleri	Bilinmeyen veya zamanla değişen parametreler	Servo problemler
Sentez	İkinci dereceden hedeflerin optimize edilmesi: Diophantine denklemleri		Hedefin optimizasyonu	GPC + tekrarlanan parametre kestirimi benzeri	Lyapunov teorisi + referans model
Analiz	Simülasyon; kararlılık analizi			Simülasyon; kararlılık analizi	
Sonuç	Açık FB kanunu: Diophantine denklemlerine çözüm; seviye ayarlama		Kapalı biçim yok; çevrim içi optimizasyon	Otomatik tepki veren kontrolör	FB + ayarlama mekanizması
Avantaj	Sezgilere başvurma		Herhangi bir hedef için optimal	Kendi kendine ayarlamalı ve değişen dinamiklere adapte edilme	
Sorun			Aşırı sayısallaştırma	Kararlılığın gösterilmesi kolay değil	
Açıklamalar	Hedef ikinci dereceden olmadığına optimal değil		Ölçülebilir bozucular kullanılabilir	Tekrarlamalı öğrenmeye uygun	
Referanslar	[6, 7]		[2, 5, 22]	[15-17]	

Frekans Alanı Yöntemleri: Klasik Kontrol

Bu kontrolörler doğrusal transfer fonksiyonları temeli üzerinde tasarlanırlar. Frekans alanı ismi, bir Bode çiziminde sistem artı kontrolörün kapalı döngü davranışının çalışılabilirliği gerçeğinden türemiştir. Bode çizimi bozucu frekansının veya ayar noktasının fonksiyonu olarak kapalı devre sistemin genlik kuvvetlendirmesinin çizimidir. Burada görev, kararlılığı garanti ederken iyi izleme performansı ve iyi bozucu engellemeyi elde etmek için kontrolör parametrelerini seçmektir. Sadece doğrusal sistemler için geçerli olsa da uygun çalışma noktası etrafında doğrusallaştırma ile doğrusal olmayan sistemler için yaklaşık transfer fonksiyonu belirlenebilir.

Gürbüz (Robust) Kontrol

Geri besleme döngüsünün dengelenmesi klasik kontrol de dikkat edilmesi gereken ana husustur. Tasarım prosedürünün sonuçları modelin kalitesine bağlıdır. Klasik tasarım fazında genellikle belirsizlikler bulunduğundan model uyuşmazlığını düzenlemek için kazanç sınırı kullanılır. Diğer bir yaklaşım gürbüz kontroldür, burada model ve parametreler hakkındaki belirsizlikler açıkça ifade edilir. Frekans alanında kapalı döngü cevabı, kapalı döngü sistem daima belirsizlik sınırları içinde olacak şekilde şekillendirilir. Gürbüz tasarlanmış kontrolörler en kötü durum için izin vermeye ihtiyaç duyacağından ölçülü ve aşırıya kaçmayan yapıda olmaya yatkındır [14]. Gürbüz tasarım durum uzayında H_∞ tasarımı ile ilişkilidir.

Tablo 6. Doğrusal olmayan durum uzayı tasarım yöntemleri ve yapay zekâ tasarım yöntemleri.

Tip	Doğrusal Olmayan Durum Uzay Yöntemleri		AI Yöntemleri	
	Optimal kontrol	Doğrusal olmayan kontrol	Sinirsel kontrol	Bulanık kontrol
Model	Doğrusal olmayan durum uzayı		Sinir ağı (NARMAX)	Yok
Karakteristik problem alanı	Kesin genel model, herhengi bir hedef fonksiyonu	Geniş çalışma aralığı ile doğrusal olmayan sistemler	Çok fazla veri, mekanik model yok	Önceki nitelikli bilgi
Tasarım yöntemi	Hamiltonian & yan uzaylar veya NL programlama	Geri adımlama: geri besleme doğrusallaştırma	MPC fakat sinirsel model ile veya doğrudan istenen hareketi taklit etmek	Mevcut hareket üzerinde üyelik fonksiyonu ayarlama
Analiz	Simülasyon		Simülasyon	
Sonuç	Durum ve kontrol yörüngeleri	Doğrusal Olmayan FB	Doğrusal Olmayan FB	Bulanık FB kuralları
Avantaj	Gerçekten optimal		Mekanik model için ihtiyaç yok	İnsan bilgisini kullanır
Sorun	Sayılaştırma talep eder		Çok fazla veriye ihtiyaç duyar	Önyargıya bağlı
Açıklamalar	Genellikle düzenleyici ile birleştirilir	Teori gelişim altındadır	Çok fazla değişken; tekrarlamalı öğrenme için uygundur	Çok fazla değişken
Referanslar	[1, 22, 23]	[17]	[10]	[18]

Uyarlamalı Kontrol

Uyarlamalı kontrol düşüncesi ya kontrolör ya da temel teşkil eden model parametrelerinin çevrim içi güncellenmesi ile kontrolör performansının geliştirilebilmesidir. Aslında gürbüz kontrole bir alternatiftir. Sistem en kötü durumun ele alınmasından daha ziyade kararlı olarak yeni durumlara ayarlanabilir olduğu için, gürbüz kontrolden daha az korunumludur. Ancak, sistem hakkında bilgi edinmek için ihtiyaç duyulan tanımlama adımı, sistemin karıştırılmasına (bazen sondalama olarak isimlendirilir) gereksinim duyar. Ki bu gereksinim sistemin kontrol edilmesinin arzu edildiği çoğu durumda kaçınılmazdır. Bundan dolayı uyarlamalı planların kararlılığı temel sorundur. Uyarlamalı kontrol aynı zamanda kendi kendine ayarlayan ve kendi kendine öğrenen kontrolörlerin tasarımında kullanılabilir [15].

Bundan başka yığın prosesler veya tekrarlı mekanik operasyon örnekleri gibi sistem tekrarlı olduğunda, her bir tekrar sistemi geliştirmek için kullanılabilir. Burada tekrarlayan öğrenme teknikleri çok kullanışlıdır.

Model Kestirimci ve Uyarlamalı Kontrol

Düşünce çok basittir: model gelecek davranış tahmini için kullanılır. Bu davranış kontrol hareketinin fonksiyonu olacağından, performansı maksimum yapacak hareket aranabilir. Bu önceden tartışılmıştı. Parametreler çevrim içi elde edilirse uyarlamalı kontrol gerçekleştirilebilir [16]. Parametreleri ayarlayabilmek için yeterli uyarmaya ihtiyaç duyulur. Tüm uyarlamalı planlar doğrusal olmayan kontrolörler ile sonuçlanır ve bu sebepten genelde doğrusal olmayan kontrolör tasarımının alt kümesi olarak görülür [17].

Yapay Zeka Yöntemleri

Yapay zeka terimi veya AI, sinirsel ağ modelleme ve bulanık modelleme gibi modelleme yöntemlerini belirtmek için kullanılır. Sinirsel ağlar ve bulanık modeller [18] doğrusal olmayan haritalama olarak görülebilir. Dikkat edilirse sinirsel ağlarda ağı eğitmek için çok fazla ölçüm verisine ihtiyaç vardır, oysaki bulanık kuralların formüle edilmesi sistem hakkında iyi niteliksel bilgiye gerek duyar. Kontrol bağlamında iki yolla da gerçekleştirilebilecek dinamik modellere ihtiyaç vardır. Bir yaklaşımda durum denklemleri olağandır, fakat eşitliğin sağ tarafı statik sinirsel ağ ve bulanık model ile yaklaşık olarak tanımlanır. Diğer yaklaşımda ise dinamik zamanda ayırıklaştırmayla yaklaşık olarak tanımlanır. Giriş/çıkışın geçmiş değerleri ve çıkışın arasında eşleştirme oluşturulur. Bu model tabanlı yaklaşımlardan ayrı olarak aynı zamanda sinirsel ve bulanık kontrolörlere sahip olunması mümkündür. Bu durumlarda kontrolörler istenen davranışların elde edilmesi ile veya vasıflı operatörün kontrol stratejilerinin taklit edilmesi ile ayarlanabilir.

3.2.8 Dinamik Optimizasyon için Yöntemler

Önceki paragraflarda optimallik temel düşünce olarak seçilmişti. Optimal düzenin nasıl hesaplanabileceği sorusu cevaplandırılması gerekmektedir.

Doğrudan yöntemler denildiğinde (ayırıklaştırılmış) kontrol dizisi genel optimizasyon teknikleri ile elde edilir. Bu sınıf içinde yöntemlerin bir grubu Newton yöntemi ve değişkenleri kullanarak gradyan algoritmaları ile oluşturulur. Bunlar nispeten hızlı fakat gradyanlara gerek duyar ve yerel minimumda takılabilir. Bunun üstesinden gelmek için *kontrollü rastgele arama* [19] veya *evrimsel algoritmalar* vb. ve özellikle göreceli olarak etkili *diferansiyel gelişim yöntemi* gibi farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Bunlar genel olarak yavaş olmakla birlikte geniş çaplı optimumu belirlemede daha iyidirler. Doğrudan yöntemlerin ikinci grubu, temel olarak bir planlama yöntemi olan dinamik programlamanın değişkenleri ile optimal yolu

bulmak için çabalar. Oldukça etkili bir yöntem ise *tekrarlanan dinamik programlamadır* [21].

Dolaylı yöntemler problemin dinamik doğasını kullanır. Bunlar eklenmiş değişkenler ve Hamiltonian fonksiyonu ile çalışır. Minimum için şartlar *Euler-Lagrange* adı verilen denklemlerden türetilmiştir [22]. Bu yöntemlerin çözümlerin hassaslığında anlama yeteneği sağlaması ek bir avantajdır. Çeşitli kontrol, durum ve uç kısıtlamalara bağlı olarak bu algoritmanın çok sayıda değişkeni mevcuttur (örneğe bakılabilir [23]).

Kaynaklar

1. Bryson, A. E., Jr. 1999. Dynamic Optimization. Menlo Park, CA: Addison-Wesley.
2. Athans, M. 1971. The role and use of the stochastic linear-quadratic-gaussian problem in control system design. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-16(6): 529-552.
3. Kwakernaak H., and R. Sivan. 1972. Linear Optimal Control Systems. New York, NY: Wiley.
4. Lewis, F. L. 1986. Optimal Estimation. New York, NY: Wiley Interscience.
5. Mayne, D. Q., and H. Michalska. 1990. Receding horizon control of nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control 35(7): 814-824.
6. García, C. E., D. M. Prett, and M. Morari. 1989. Model predictive control: Theory and practice—A survey. Automatica 25(3): 335-348.
7. Clarke, D. W., C. Mohtadi, and P. S. Tuffs. 1987. Generalized predictive control—Parts I and II. Automatica 23(2): 137-160.
8. Norton, J. P. 1986. An Introduction to Identification. London, UK: Academic Press.
9. Ljung, L. 1987. System Identification—Theory for the User. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
10. Sjöberg, J., Q. Zhang, L. Ljung, A. Benveniste, B. Delyon, P.-Y. Glorennec, H.Hjalmarsson, and A. Juditsky. 1995. Nonlinear black-box modeling in system identification: A unified overview. Automatica 31(12): 1691-1724.
11. Nise, N. S. 1995. Control Systems Engineering. Redwood City, CA: Benjamin/Cummings.
12. Stephanopoulos, G. 1984. Chemical Process Control. London, UK: Prentice-Hall International.
13. Montgomery, D. C, E. A. Peck, and G. G. Vining. 2001. Introduction to Linear Regression Analysis. New York, NY: Wiley Interscience.
14. Morari, M., and E. Zafiriou. 1989. Robust Process Control. London, UK: Prentice Hall.
15. Åström, K. J., and B. Wittenmark. 1995. Adaptive Control. Reading, MA: Addison-Wesley.
16. Martín Sánchez, J. M., and J. Rodellar. 1996. Adaptive Predictive Control. London, UK: Prentice Hall.
17. Krstić, M, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotović. 1995. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York, NY: Wiley-Interscience.
18. Tagaki, T., and M. Sugeno. 1985. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. IEEE Trans. Fuzzy Systems 1(1): 7-31.
19. Price, W. L. 1983. Global optimization by controlled random search. J. Optimization Theory and Applications 40(3): 333-348.
20. Storn, R., and K. Price. 1997. Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. J. Global Optimization 11: 341-359.

21. Luus, R. 2000. Iterative Dynamic Programming. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC.
22. Stengel, R. F. 1994. Optimal Control and Estimation. New York, NY: Dover Publications.
23. Bryson, A. E., Jr., and Y. C. Ho. 1975. Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control. New York, NY: Hemisphere.