

NON-LINEAR CONTROL SYSTEMS

Muhammed Taha KAYA

213303016

Tarihsel ve Güncel Gelişmeler

- Özet

- Son 5-10 yıl içinde lineer kontrol sistemlerinde ki gelişmeler çok daha hızlandı. Lineer kontrol sistemleri: Doğrusal zaman içinde değişen sistemlerin yanıtı. Denetlenebilirlik ve gözlenebilirliğe giriş. Doğrusal zaman içinde değişmeyen sistemlerin denetlenebilirlik ve gözlenebilirliği. Denetlenebilen/denetlenemeyen ve gözlenebilen/gözlenemeyen modlar, şeklinde açıklanabilir.
- Ancak burada konumuz linner çözümlerin ötesinde bir konu. Modern teknoloji, sıkı tasarım özelliklerini karşılamak için karmaşık kontrol yasalarını gerektirir, bu da bu slaytın konusu olan nonlinear kontrol sistemlerinin giderek daha belirgin bir konumda olduğunu vurgular.

<https://www.anadolu.edu.tr> › fakulteler › ders › ders-içerik

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017NLE.....6..301I/abstract>

Giriş

- Gerçek dünya sistemleri, geniş bir işletme aralığı üzerinde düşünüldüğünde en azından doğaları gereği nonlineerdir, birçok sistem düşük hızlarda belirli bir işletme noktasının yakınında lineer davranacak şekilde varsayılsa da. Birçok fiziksel süreç, nonlinear modellerle temsil edilir. Örnekler arasında; Coulomb sürtünmesi, yerçekimi ve elektrostatik çekim, çoğu elektronik sistemlerin voltaj-akım karakteristikleri ve hareket halindeki bir aracın üzerindeki direnç bulunmaktadır. Son zamanlarda, proses kontrolü, biyomedikal mühendislik, robotik, uçak ve uzay aracı kontrolü gibi geniş alanlardan birçok araştırmacı, nonlinear kontrol stratejilerinin tasarımı ve analizi konusunda aktif bir ilgi göstermiştir. Bu nedenle, çoğu gerçek problem kaçınılmaz olarak nonlinearliklere takılır.
- Lineer olmayan kontrol sistemlerine son zamanlarda artan ilginin tabii ki nedenleri var. Bunların arasından bazıları; model belirsizliklerini ortadan kaldırır çünkü çok daha basit bir tasarıma sahipler, dinamik kuvvetleri hesaba katarak basit yaklaşımları iyileştirir.
- Bu nedenle, lineer kontrol yasaları belirli bir doğrulukta hareket hızına ciddi bir kısıtlama getirir. Bununla birlikte, basit bir nonlinear denetleyici, nonlinear kuvvetleri makul bir şekilde telafi edebilir ve böylece geniş bir çalışma alanında yüksek hıza ulaşabilir. Ayrıca, dead-zone'lar, histerezis, Coulomb sürtünmesi, statik sürtünme, geri oyun ve doygunluk gibi sert nonlinearity'ler, gerçek dünya sistemlerinin lineer yaklaşımını izin vermez.
- Bu lineer davranışları öngördükten sonra, lineer olmayan yaklaşımlarla telafi ederek ortaya eşsiz bir performans çıkar. Ayrıca lineer olmayan sistemler, lineer sistemlerde ortaya çıkan bazı parametrik hataları da telafi edebilir ve çok daha iyi sonuçların ortaya çıkmasını sağlar. Lineer olarak kontrol edilemeyen veya gözlemlenemeyen sistemler, nonlinear bir anlamda kontrol edilebilir/gözlemlenebilir olabilir.

<http://eng.harran.edu.tr> › [131_modelleme22](#)

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017NLE....6..301I/abstract>

iki kaynaktan aldığım bilgilerde kendi cümlelerimi kullandım

Tarihsel Perspektif

- Nonlinear kontrolün tarihsel perspektifi, 18. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Bu dönemde, buhar makinesini düzenlemek için buhar girişini kontrol eden "uçuş topu" adlı santrifüj bir valf icat edildi, ancak valfın somut analitik kavramlar olmaksızın çalıştırılması gerekiyordu.
- 1892'de Rus matematikçi A.M. Lyapunov, Ordiner Diferansiyel Denklemlerle (ODE) tanımlanan dinamik sistemlerin kararlılığını belirlemek için iki yöntem sundu. İkinci yöntem, Lyapunov'un doğrudan yöntemi olarak adlandırılan, ODE'yi çözmeden kararlılığı belirleyebilen ve bu nedenle doğrusal olmayan kontrol sistemlerinin kararlılık analizinde potansiyel bulan bir yöntemdir. Lyapunov, bir sistemin denge noktasına yakın lineer bir yaklaşımın kararlı olduğunu gösterdiğinde, gerçekten doğrusal olmayan sistem, o noktanın bir mahallesinde kararlı olacaktır. Lyapunov'un çalışması 1907'de Fransızcaya çevrildi ve daha sonra Kalman ve Bertram tarafından kontrol bağlamında ele alındı.
- <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nleng-2016-0077/html>

- Kontrol mühendisliği konusu, 1930'lara kadar bilimsel topluluk, servomekanizmalar kontrol problemini ele almaya başladığında bebeklik dönemini yaşadı. İkinci dünya savaşı, yangın kontrol sistemleri ve güdümlü araç kontrolü tarafından dayatılan işlevsel gereksinimler nedeniyle servomekanizmaların doğrusal olmayan kontrolü üzerine yapılan araştırmayı hızlandırdı. 1940-1960 yılları arasında, doğrusal olmayan sistemleri analiz etmek için kullanılan üç ana analitik yaklaşım; tanımlayıcı fonksiyon, faz düzlemi yöntemi ve röle sistemlerini içeren çeşitli yöntemlerdir. Klasik dönemde, çoğu sorun tek girişli, tek çıkışlı, doğrusal, sınırlı boyutlu ve zamanla değişmeyen sistemleri içeriyordu.
- 1960 yılı, doğrusal olmayan kontrol için modern çağın başlangıcı olarak kabul edilir. Bu, mekanik teorisi ve Nyquist-Bode geri besleme teorisini birleştiren Moskova'da düzenlenen ilk Uluslararası Otomatik Kontrol Federasyonu (IFAC) kongresinin yapıldığı zamandır. Bu dönemdeki iki ana uygulama sürücüsü savunma ve uzay yarıştı. Doğrusal olmayan kontrolün uygulandığı diğer endüstriyel alanlar arasında otomobiller, gemiler, çelik, kağıt, mineraller vb. bulunmaktadır. Karşılaşılan gerçek sistemlerin doğrusal olmayan, zamanla değişen, yüksek boyutlu, kötü modellenmiş ve çok değişkenli doğası, klasik kontrol teorisinin sınırlarının dışındaydı. Sayısal bilgisayar, bir tasarım aracı olarak ilk kez tanıtıldı ve daha sonra bir kontrol sisteminin bir bifeşeni olarak kullanıldı.
- Erken doğrusal olmayan kontrol tarihini eleştirel bir gözden geçirme, optimallik, kararlılık ve belirsizlikle ilgili kavramların tanımlayıcı olduğunu, yapıcı olmadığını göstermektedir. 1990'lar, tanımlayıcı araştırmanın yapıcı prosedürler aracılığıyla formel tasarım yöntemlerine dönüştüğü 'aktivasyon süreci' olarak kabul edilir.

1880s-90s	Poincare	Astrodinamikte, gök mekaniğinde n-cisim probleminin doğrusal olmayan dinamiklerinin incelenmesi.
		Limit döngüleri ve bifürkasyon teorisi kavramı.
1892	Lyapunov	Dinamik sistemlerin kararlılık analizi.
1910s	Duffing	2. dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklem kullanarak bir dinamik kaotik sistemi modelleme.
1920s	Van der Pol	Osilatör dinamiği ile ilişkili limit çevrimlerin incelenmesi.
1930s	Bode	Frekans tepkisinin asimptotik temsili.
1930s	Krylov and Bogoliubov	Sabit ölçüler teoreminin varlığı.
		Tanımlama Fonksiyonu Yöntemi
1932	Nyquist	Yeniden üretim (veya Geri Bildirim) teorisi
1944	Lur'e	Mutlak kararlılık sorunu
1950s	Emelyanov	Kayar kipli kontrolle değişken yapı sistem teorisi
1960	Doğrusal olmayan kontrol için modern dönemin başlangıcı	
1960s	Edward Norton Lorenz	Kaotik teori
		Kelebek etkisi
1960	Kalman and Bertram	Lyapunov'un çalışmasının kontrol bağlamında yeniden ele alınması

1961	Popov	Asimptotik kararlılık için çevre kriteri
		Hiperstabilite kavramı
1962	Yakubovich	Lur'e ve Popov'un sonuçları arasındaki bağlantılar
1970	Various scientists	Dinamik sistemleri enerji dönüşüm mekanizmaları olarak görme
1971	Luenberger	Durum gözlemcisinin kavramı ve yapımı
1972	Willems Jan	Dissipatif sistemler teorisi
1978	Richalet <i>et al.</i>	Model Prediktif Heuristik Kontrol
1980s	Zames	H^∞ kontrolün formülasyonu
1989	Ortega and Spong	Pasiflik Temelli Kontrol (PBC) kavramı
1990	'Aktivasyon süreci' başlangıcı	
1990s	Sontag and Wang	Doğrusal olmayan sistemler için Giriş-Durum Kararlılığı teorisi
1995	Isidori	Geometrik Kontrol Teorisi

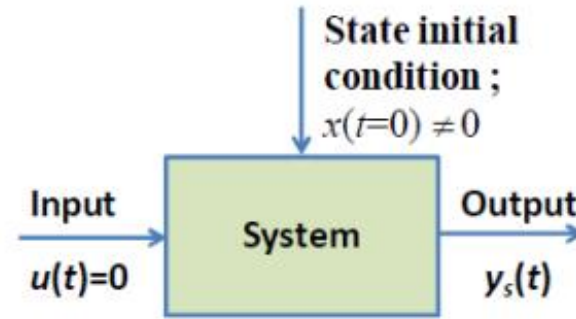
Matematiksel Bakış Açısı

- Saf ve uygulamalı matematikteki gelişmeler ve belirli ölçüde fizikteki gelişmeler, doğrusal olmayan kontrol stratejilerinin evriminde büyük bir rol oynamaktadır. Otomatik kontrol problemlerine matematiksel çözümler bulma, anlama ve formülleme amacıyla Diferansiyel Cebir ve çok değişkenli hesap kullanımı, çeşitli doğrusal olmayan kontrol stratejilerine yol açmıştır.
- Eğitim amaçlı olarak, değişken yapı kontrol tekniği olan SMC (Sliding Mode Control), matematiksel bakış açısından incelenmesi için burada seçilmiştir; çünkü sağlamlık özelliğine ve teorik ve pratik gelişmelerin uzun tarihine sahiptir. Bu kontrol tekniği, şimdi doğrusal olmayan bir sistemin modelleme ve parametrik belirsizliklerini ele alma konusunda bir de facto çözüm haline gelmiştir. Diğer ayırt edici özellikleri ise düşük mertebeden telafi edilmiş dinamikler ve sonlu zamanda yakınsamadır.
- SMC'nin temel fikri, bitiş aşamasına ulaşılan kayma yüzeyine (sliding surface) bitişik doğrusal olmayan dinamikleri sürmektir. Bu dinamikler, sonraki tüm zamanlarda doğrusallıklara bakılmaksızın bu yüzeyde tutulur.
- <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nleng-2016-0077/html>



Kontrol Sistemlerinin Matematik Modeli

Linear Sistem vs Linear Olmayan Sistem: Serbest tepki, giriş işareti $u(t)=0$:



Linear Sistem

$$\dot{x} = Ax$$

1) Tek bir denge noktası:

$$Ax = 0 \Leftrightarrow x = 0$$

2) Kararlılık başlangıç noktasından bağımsız

$$x(t=0) \neq 0.$$

Linear Olmayan Sistem

$$\dot{x} = f(x)$$

1) Çoklu denge noktası:

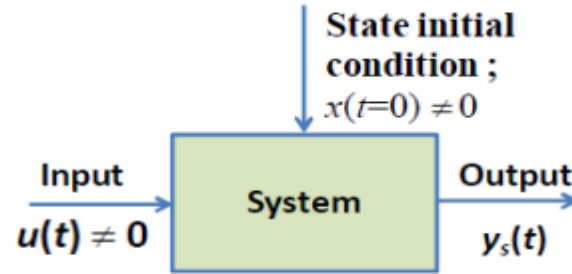
$$f(x) = 0$$

2) Denge noktası kararlılığı başlangıç değerine göre değişir



Kontrol Sistemlerinin Matematik Modeli

Linear Sistem vs Linear Olmayan Sistem: Zorlanmış tepki, giriş işareti $u(t) \neq 0$:



Linear Sistem

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

1) Sonlu giriş sonlu çıkış

$$\|u\| \text{ finite} \Rightarrow \|x\| \text{ finite} \\ \text{if open loop stable}$$

2) Frekans tepkesi

$$u = U \sin \omega t \Rightarrow x = X \sin(\omega t + \varphi)$$

3) Toplamsallık

$$u = u_1 + u_2 \Rightarrow x = x_1 + x_2$$

Linear Olmayan Sistem

$$\dot{x} = f(x, u)$$

1) Sonlu giriş sonlu çıkış anlamına gelmez

$$\|u\| \text{ finite} \not\Rightarrow \|x\| \text{ finite}$$

2) Frekans tepkesi yok

$$u = U \sin \omega t \not\Rightarrow x \text{ sinusoidal}$$

3) Toplamsallık geçerli değil

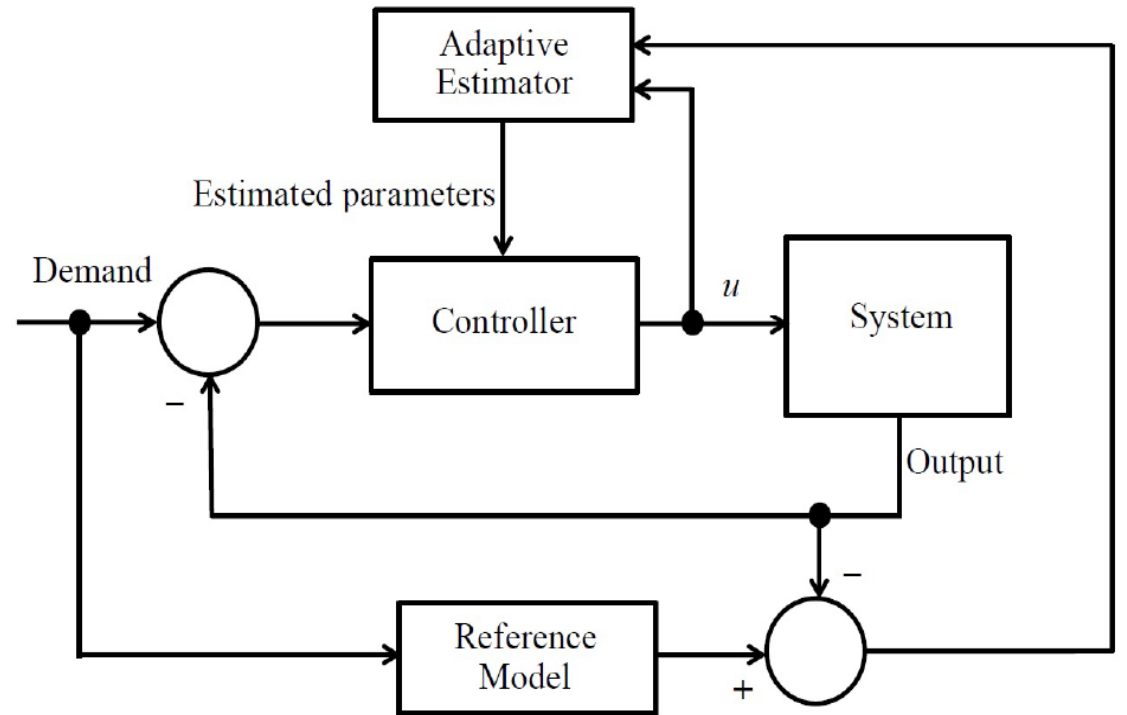
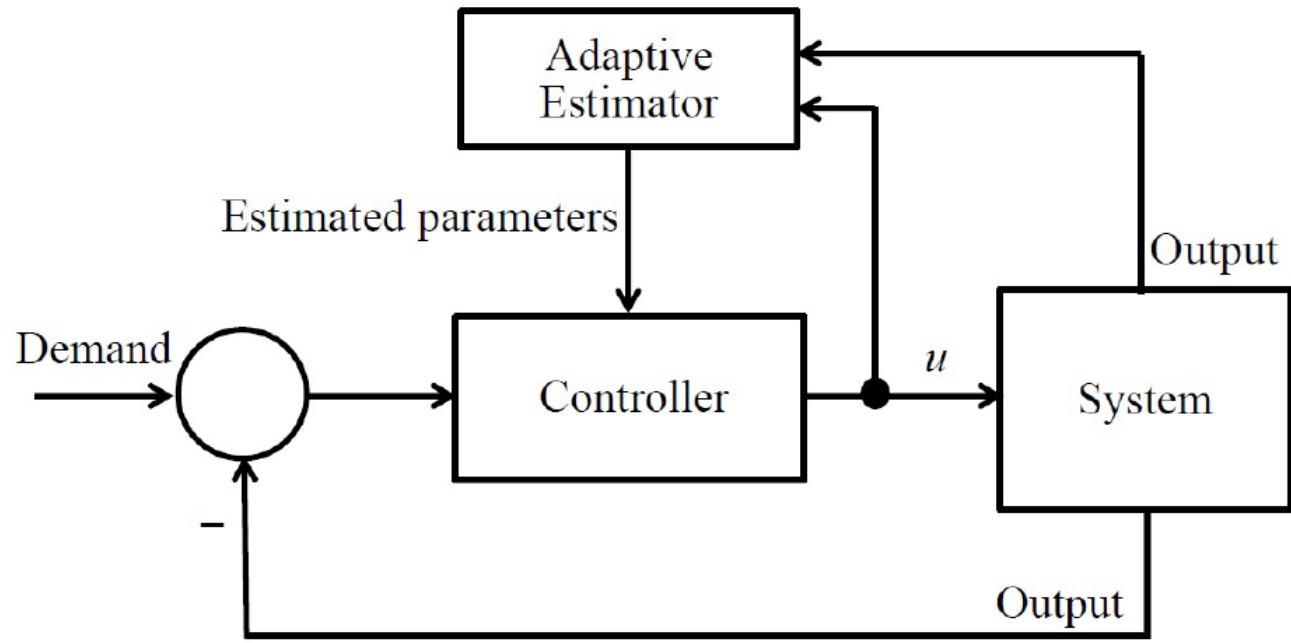
$$u = u_1 + u_2 \not\Rightarrow x = x_1 + x_2$$

Son Gelişmeler

- Son iki on yılda, doğrusal olmayan kontrol sistemlerindeki ilerlemeler iki katmanlıdır: teorik yaklaşımlarda yaşanan ilerlemeler ve daha da önemlisi uygulama odaklı gelişmeler. Teoride, kayma kontrolü, geri besleme doğrusallaştırma ve doğrusal olmayan adaptif stratejiler alanlarında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Son zamanlarda, doğrusal olmayan kontrol sistemleri, teorik kavramların geniş ölçüde çeşitli alanlardaki (elektrik, mekanik, tıp, havacılık, uzay vb.) gerçek dünya problemlerini çözmek için yaygın olarak uygulanmasından dolayı büyük popülerlik kazanmıştır. Ayrıca, bilgisayar donanımındaki ve bilgi teknolojisindeki ilerlemeler, doğrusal olmayan kontrol sistemlerinin analizi ve tasarımındaki hesaplama kısıtlamalarını büyük ölçüde çözmüştür. Şu anda, 'drive by wire' araçlardan 'fly by wire' uçuş kontrol sistemlerine, robotik, tıbbi, endüstriyel ve uzay sistemlerine kadar birçok doğrusal olmayan kontrol sistemi uygulaması görmekteyiz.
- "Drive by Wire" ifadesinin Türkçe karşılığı "Tel ile Sürüş" veya "Elektronik Kontrollü Sürüş" olabilir. Bu terim, araç kontrol sistemlerinde mekanik bağlantıların yerine elektronik sinyallerin kullanılmasını ifade eder. Bu yaklaşım, aracın çeşitli sistemlerini, örneğin gaz pedalı, fren ve direksiyonu, elektronik sinyallerle kontrol etmek anlamına gelir.
- "Fly by Wire" ifadesinin Türkçe karşılığı "Tel ile Uçuş" veya "Elektronik Kontrollü Uçuş" olabilir. Bu terim, uçak kontrol sistemlerinde mekanik bağlantıların yerine elektronik sinyallerin kullanılmasını ifade eder. Fly by Wire sistemleri, pilotun kontrol girişlerini elektronik sinyallere dönüştürerek uçağın çeşitli sistemlerini kontrol etmesine olanak tanır. Bu, uçağın daha hassas ve esnek bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.
- <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nleng-2016-0077/html>

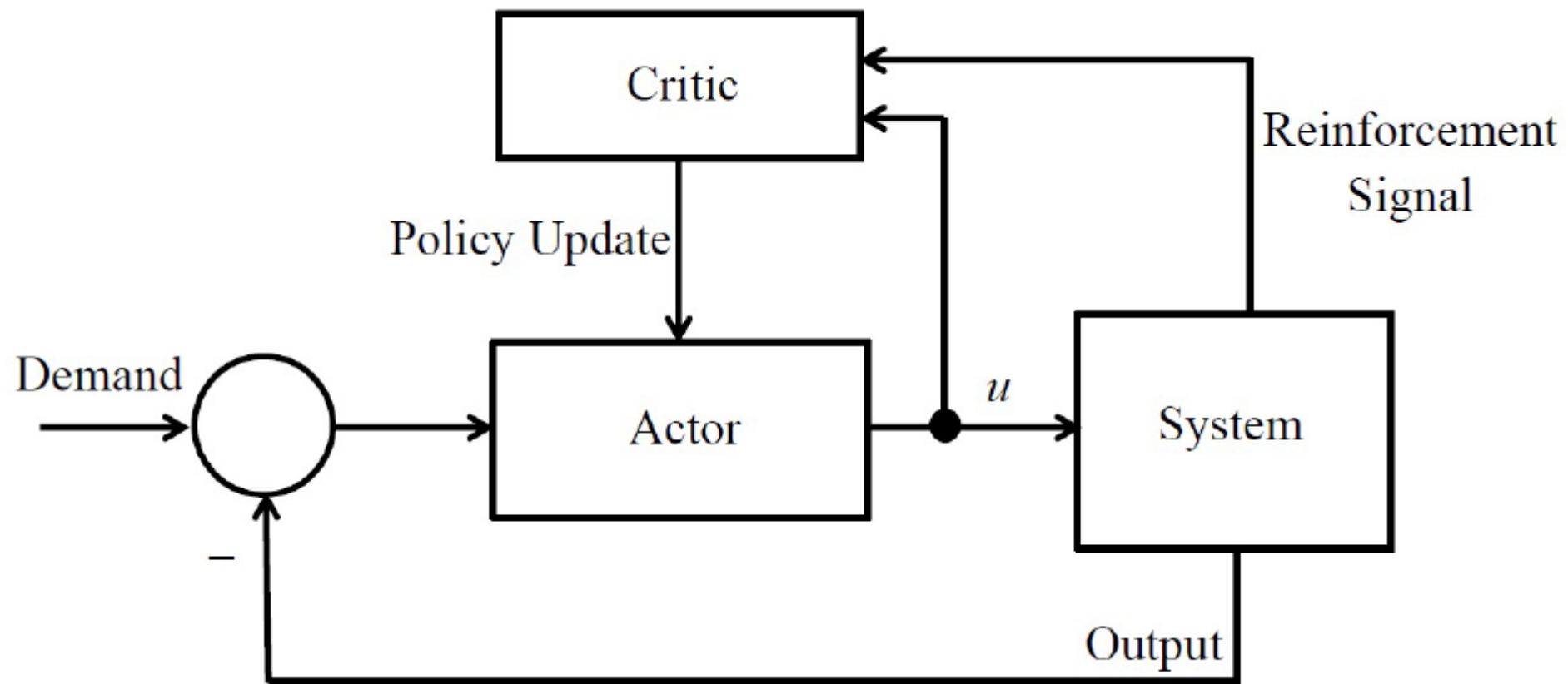
Doğrusal Olmayan Uyumlu Kontrol

- En etkili ve gelişmiş doğrusal olmayan kontrol stratejileri adaptif denetleyicilerdir. Bir adaptif denetleyicinin temel fikri, belirsiz parametreleri tahmin etmek ve kontrolcüyü çevrimiçi ayarlamak, sistem parametrelerinde veya çevresindeki değişikliklerin önemli olduğu dinamik bir duruma uyum sağlamaktır. Adaptif kontrol, özellikle 1950'lerde havacılık kontrol topluluğunda popülerlik kazandı. Ancak iyi anlaşılmiş kararlılık araçlarının ve uygun donanımın eksikliği nedeniyle cazibesini kaybetti. Bu ilgi kaybının özel bir nedeni, bir adaptif yasa tarafından kontrol edilen bir uçak kazasının yaşanmasıydı . Bununla birlikte, adaptif kontrolle ilgili ilgi özellikle sosyal robotikte, kontrollü ve düzenli endüstriyel çalışma hücrelerine kıyasla son derece doğrusal olmayan, yapısal olmayan ve dinamik bir insan çevresi için uygunluğundan dolayı canlandı.
- Genel olarak, iki ana adaptif kontrol şeması bulunmaktadır: Model Referanslı Adaptif Kontrol (MRAC) ve Kendi Ayarlı Adaptif Kontrol (STAC) . MRAC'de adaptasyon mekanizması uygun parametreleri tahmin eder, böylece sistem referans modeliyle aynı şekilde davranır. STAC'te ise yavaşça değişen parametreler veya bilinmeyen sabitler, genellikle hata minimizasyonu veya verimliliğin maksimizasyonu gibi bir amaç fonksiyonunu en aza indirmek/maksimize etmek üzere optimize edilir.



Doğrusal Olmayan Optimal Kontrol

- En etkili ve gelişmiş doğrusal olmayan kontrol adaptif denetleyicileri, izleme hassasiyeti ve hızlı tepki açısından oldukça güçlüdür. Ancak, adaptif kontrol eylemi genellikle yüksek enerji ve agresiflik içerir. Bu, kaynakların optimal kullanımının kritik olduğu uygulamalarda (örneğin, İHA'lar ve otonom robotlar gibi) büyük bir dezavantaj olabilir. Öte yandan, geleneksel doğrusal optimal kontrol teknikleri (örneğin, LQG ve H^∞) çevrimdışı tekniklerdir ve sistemin çok hassas bir modelini ve tam durum geribildirimini gerektirir.
- Reinforcement learning, adaptif kontrol şemalarına optimaliteyi tanıtmak için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Sutton ve ark., reinforcement learning tabanlı adaptif optimal şemaların doğrudan adaptif denetleyiciler olduğunu savunmuştur. Doğrudan adaptif denetleyicilerde, tahmin edilen parametreler doğrudan kontrol sinyalini hesaplamak için kullanılır, oysa dolaylı yöntemlerde tahmin edilen değerler kontrolcünün parametrelerini bulmada kullanılır.
- Reinforcement learning tabanlı optimal adaptif denetleyiciler, çevrimiçi olarak doğrusal olmayan cebirsel Riccati denklemini çözer. Eleştirmen, aktör tarafından alınan eylemi değerlendirir, yani onu ödüllendirir (veya cezalandırır). Ardından, kontrol politikası güncellenir ve sonunda zaman içinde optimal bir kontrol politikası geliştirilir.



- Doğa doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve en iyi yaklaşım, onunla doğrusal olmayan yöntemlerle başa çıkmaktır. Bununla birlikte, on yıllardır doğrusal kontrol başarıyla kullanılmıştır. Doğrusal sistemle ilgili sorun, çoklu serbestlik dereceli robotlar (az eylemli veya kısıtlamalı), İHA'lar, denizaltılar ve daha karmaşık sistem işlemlerinin ve daha büyük uygulama aralıklarının gerektiği modern ve gelişmiş teknolojiyi karşılayamayabileceğidir.
- Belirli bir uygulama için doğrusal veya doğrusal olmayan kontrolü seçme kararı zor olabilir. Doğrusal kontrol iyi test edilmiş ve endüstrideki insanlar ona güven duymaktadır. Doğrusal sistemler için Bode çizimi, kök yerleştirme, Nyquist kararlılık kriterleri, Laplace dönüşümü, Z-dönüşümü ve Fourier dönüşümü gibi mükemmel analiz araçları mevcuttur. Diğer taraftan doğrusal olmayan sistem karmaşık matematiksel analizlere ihtiyaç duyar, örneğin Lypunov kararlılık kriteri, Popov kriteri ve tekil bozulma yöntemleri. Matematiksel modelleme doğrusal olmayan sistemler için karmaşık olabilir. Doğrusal olmayan sistem limit döngüsü, kaos ve bifürkasyon gibi sorunlarla karşılaşabilir. Çoğu düzen sadece yerel kararlılığı sağlayabilir, global kararlılıklar garantilenemez

- Aktüatör doygunlukları genellikle doğrusal kontrolde de meydana gelebilir, ancak doğrusal olmayan kontrol durumunda daha sorunlu ve felaket getirebilir çünkü burada kontrol sinyali çok yüksek ve agresiftir. Bu nedenle, sistemin aşırıya gitmesine neden olabilir. Khan ve ark. çalışmasında, humanoid bir robot kolu için model referanslı adaptif uyumluluk kontrolünde aktüatör doygunluk sorunlarıyla başa çıkmak için anti-windup kompanzasyonu kullanılmıştır. Ancak, anti-windup kompanzasyonları genellikle nominal kontrol şemasının performansını düşürür.
- Doğrusal olmayan kontrol şemalarının daha uzun süre dayanabilmesi için daha pahalı aktüatörlere ihtiyaç duyulabilir. Doğrusal olmayan kontrolörler, dikkatli bir şekilde uygulanmazsa pahalı sistemlere zarar verme riski taşır. Ayrıca, karmaşık ve tükenmiş bir ayarlama süreci gerekebilir.

- Bahsedilen nedenlerden dolayı, endüstrideki insanlar hala doğrusal olmayan kontrol konusunda oldukça temkinlidir ve doğrusal olmayan kontrol araştırmacıları ile endüstriyel kontrol mühendisleri arasında büyük bir boşluk bulunmaktadır. Endüstriler hala genellikle basit geleneksel doğrusal düzenlere güvenir. Bu gelişmiş doğrusal olmayan stratejilerin karmaşıklığını azaltmak için daha fazla çalışma gerekmektedir. Modern doğrusal olmayan tekniklere uyum sağlamak için kontrol uygulayıcılarını ikna etmek için önemli çabalar sarf edilmelidir.

Sonuç

- Son yıllarda, modern teknolojinin gereksinimleri ve çeşitli yeni alanların olgunlaşması, teorik ve uygulamalı açıdan doğrusal olmayan kontrol sistemlerinde ilerlemeleri tetiklemiştir. Bu nedenle, doğrusal olmayan kontrol konusu artık kontrol mühendislerinin anlayışının temel bir parçası haline gelmiş ve onlara pratik kontrol problemleriyle sistemli bir şekilde başa çıkma yeteneği kazandırmıştır. Bu tür problemleri çözmek için yaygın bir tasarım stratejisi, sistemi temsil edilen çalışma noktasında doğrusallaştırmaktır. Bu yaklaşım bazen basit ve işe yarar, ancak bazen doğrusal olmayan sistemlerin özgün özelliklerini bozarak doğruluk kaybına veya yanlış sonuçlara yol açabilir.
- Doğrusal olmayan kontrol sistemleri alanı, birçok ilginç ve önemli zorluklarla dolu parlak bir geleceğe sahiptir. Robotlar, enerji, biyoloji, sağlık hizmetleri ve büyük veri araştırmaları gibi doğrusal olmayan kontrol sistemlerinin giderek artan uygulamalarının, gelişmiş teoriler üzerine yapılan araştırmaları ve ilişkili fiziksel teknolojilerin geliştirilmesini daha da hızlandırması beklenmektedir.

Kaynakça

- <https://www.anadolu.edu.tr/fakulteler/ders/ders-icerik>
- <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017NLE.....6..301I/abstract>
- http://eng.harran.edu.tr/131_modelleme22
- <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nleng-2016-0077/html>
- https://www.gibtu.edu.tr/Medya/Personel/Dosya/20221113224445_c2a14aff.pdf