

Bozucu Gözleyici Yaklaşımların İncelenmesi: Bir Gimbal Örneği

Investigation of Disturbance Observer Approaches: A Gimbal Example

Mücahid Rıdvan Kaplan^{1,3}, Burak Kürkcü², Zeki Yağız Bayraktaroğlu³

¹Kontrol Sistemleri Tasarım Müdürlüğü
Aselsan, MGEO
kaplanmuc@itu.edu.tr

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
bkurkcucu@cs.hacettepe.edu.tr

³Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
bayraktar6@itu.edu.tr

Özetçe

Bozucu-etki gözleyici tabanlı kontrol (BGTK), kapalı çevrim sistem dinamiklerin, tasarım aşamasında belirlenen nominal sistem cevabına yakınsamasını amaçlar. Literatürde ise benzer amaçlarla türetilen birçok farklı yaklaşım mevcuttur. Bu çalışmada, tekrar edilebilirlik açısından oluşturulan bir simülasyon ortamında, kayda değer çeşitli BGTK yapılarının karşılaştırılması hedeflenmektedir. Bu amaç için ise, yöntemlerin matematiksel formları uygulanabilirlik açısından yeniden ele alınmıştır. Literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında, çalışmanın katkısı, önerilen kayda değer yöntemleri, tek-giriş tek-çıkışlı (TGTC) bir sistem üzerinde, uygulanabilirlik ve performans değerlendirme açısından, ölçülebilir ve iyi tanımlı özellikler ile karşılaştırmaktır. Çalışmada değerlendirilen metodlar için tasarlanan kontrol sistemleri, her bir yöntemin önerdiği yaklaşımlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, zaman uzayı ve frekans uzayı analizleri kullanılarak yorumlanmıştır.

Abstract

Disturbance-observer-based control (DOBC) aims to approximate closed loop system dynamics to the nominal system response determined during the design phase. In the literature, there are many different approaches derived for similar purposes. In this study, it is aimed to compare various DOBC structures in a simulation environment created in terms of repeatability. For this purpose, the mathematical forms of the methods have been reconsidered in terms of applicability. Compared with existing studies in the literature, the contribution of the study is to compare the proposed notable methods on a

single-input single-output (SISO) system with measurable and well-defined characteristics in terms of applicability and performance evaluation. The control systems designed for the methods evaluated in the study were carried out in line with the approaches suggested by each method. The results are interpreted using time-domain and frequency-domain analyses.

1. Giriş

Son yıllarla üssel bir şekilde artan bilim ve teknoloji alanındaki ilerlemeler, sonuç olarak elde edilen mühendislik sistemlerinden beklenen performans ve kararlılık açısından ihtiyacı da arttırmaktadır [1]. Bu durum ise, diğer mühendislik alanlarına benzer şekilde, kontrol teorisi üzerine çalışan araştırmacıları kararlı ve daha fazla performans sunan yöntemleri araştırmaya yöneltmektedir. Ayrıca sistemlerin artan karmaşıklık seviyesi ise, kesin matematiksel modeller ile dinamik davranışın teminini güçleştirmektedir. Diğer bir deyişle karmaşık sistemlerin modellerinde mevcut olan belirsizlikler artmaktadır. Sorunun kontrol teorisi açısından çözülebilmesi adına, geri-beslemeli sistemler için bozucu-etkiler ve dinamik belirsizlikler altında nominal performansın geri kazanılması araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Öncü bazı çalışmalar, sistemin tüm dinamik özelliklerinin ve sisteme etkileyen bozucu-etkilerin hangi kanaldan ve hangi biçimde etkidiğinin bilindiği varsayımı altında, ileri-besleme stratejisinin kayda değer sonuçlar ürettiğini göstermiştir [2]. Belirtmek gerekir ki, yukarıda bahsedilen dinamik belirsizlikler ve bozucu-etkiler birçok pratik sistemde mevcuttur [3].

Günümüzde giderek uygulama sayısı artan yaygın diğer bir strateji ise bozucu-etki gözleyici tabanlı kontrol sistemleridir. Problemi bir bütün olarak ele alan Ohnishi ve arkadaşlarının [4] ve bağımsız olarak Johnson'ın [5] önerdikleri çalışmalar BGTK

sistemi tasarımı için ilk örnekler olarak değerlendirilmektedir. Bu öncü fikirlerden sonra ise geçen 40 yılda BGTK sistemleri için çok gelişmiş örnekler önerilmiştir. Özellikle optimal kontrol, gürbüz kontrol, doğrusal olmayan kontrol gibi alanlarda elde edilen kazanımlar hızlı bir şekilde BGTK'e uyarlanmıştır. Bu ve benzer kontrol teorisi alanlarına ek olarak, geliştirilen BGTK yöntemleri doğrusal, doğrusal olmayan, minimum olmayan fazlı sistemler, zaman gecikmeli sistemler, çok-giriş-çok-çıkışlı (ÇGÇÇ) sistemler gibi birçok farklı sistem özellikleri için de başarılı bir şekilde teorik ve pratik olarak uyarlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında karşılaştırılacak olan farklı BGTK yöntemleri için temel bazı yaklaşımlar seçilmiştir. Her ne kadar fiziksel sistemlerin dinamik davranışı genellikle doğrusal olmayan bir tutum sergilese de, denge noktası etrafında yapılacak olan doğrusallaştırmanın uygulanabilirliği birçok farklı pratik uygulama ile doğrulanmıştır. Ayrıca, doğrusal olmayan dinamik temsil ile gürbüz kararlılık ve gürbüz performans garantilemesi teorik olarak oldukça karmaşık ve bu nedenle genel uygulayıcılar açısından anlaşılması/uygulanması problematik bir durumdur [6]. Belirtilen sebeplerden ötürü, karşılaştırmada kullanılacak yöntemlerin seçimi için ölçü kriteri olarak alanın kurucuları tarafından yapılan güncel derleme makaleleri referans alınmıştır ve bunlar arasından doğrusal teknikleri kullanan çalışmalara yoğunlaşılmıştır. Bu çalışmalar ise EGB (EID) [7], BBT (UDE) [8], DBBT (MUDE) [9], ABBK (ADRC) [10], BUKBGG (UIO in DAC) [11] ve BTTGK (DUETRC) [12] şeklindedir. Ayrıca ilgilenenler için, BGTK'deki dikkate değer yaklaşımların ayrıntılı tartışmalarını Chen ve arkadaşları [13] özetlemiştir.

Literatürdeki derleme makalelerinden farklı olarak, bu makalede temel yöntemlerin teorik analizlerine ek olarak yöntemlerin önerilme amaçlarına uygun endüstriyel bir uygulama örneği detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Özellikle sisteme etkileyen bozucu-etkilerin performans koşulları üzerindeki etkilerinin net olarak gözlemlendiği ve yüksek performans isterlerine sahip elektro-optik bir gimbal sistemi uygulama örneği olarak seçilmiştir. Gimbal sisteminin kontrol teorisi bakışı açısından sahip olduğu zorluklar ise; eyleyici limitleri, sensör donanımsal limitleri/özellikleri, mekanik rezonanslar ve esnek modlar, bağlantı noktalarında tutma-bırakma etkileri, ilk koşullara karşı hassaslık, modellemesi güç sürtünme etkileri ve gimbalin takıldığı platform hareketlerinden kaynaklanan ve gimbalin durumunu bozmaya çalışan titreşimler şeklinde özetlenebilir.

Karşılaştırılan tüm BGTK yöntemlerinin temel amacı ise yukarıda bahsedilen zorluklar (diğer bir deyişle bozucu-etkiler) altında sistemin iç kararlılığının, gürbüz kararlılığının korunması ve kapalı çevrim sistemin nominal performans özelliklerinin iyileştirilmesi olarak düşünülebilir. Sonuç olarak bozucuları ve belirsizlikleri (veya etkileri) tahmin etme yöntemlerini araştırılıp, yöntemleri simülasyon ortamında (tekrar edilebilirliği sağlamak amacı ile) karşılaştırılmış ve konu üzerinde çalışan araştırmacılara yol gösterilmiş olacaktır. Bunun için öncelikle problem formülasyonu kısmında problemin tanımı, varsayımlar ve açıklamalar yapılmıştır. Daha sonra matematiksel denklemlerle desteklenen dört farklı tahmin yöntemi açıklanmıştır. Sistem olarak TGTÇ yapıya sahip bir gimbal modeli kullanılmıştır. Sistem modeli ataletsel moment, vizkoz sürtünme ve rezonansları içermektedir. Yöntemleri birbirleri ile adil bir şekilde kıyasla-

mak için benzer geçici hal cevaplarına sahip kontrol sistemleri, ortaya atıldıkları ana çalışmalara uygun bir biçimde tasarlanmıştır. Son olarak, sistem üzerinde uygulanan bu bozucu-etki gözleyici tabanlı yöntemlerin referans takip ve bozucu bastırma performanslarını analiz etmek için, basamak giriş ve basamak bozucuların çıkış zaman cevapları ile bozucu bastırma frekans yanıtları verilmiştir.

2. Problem Formülasyonu

Bu bölümde, ilerleyen bölümlerde verilecek olan yöntemlerin anlaşılabilmesi adına üç farklı doğrusal zamanla-değişmez durum-uzayı gösterimi ele alınmaktadır.

İlk olarak eşleşmeyen bozucu-etkilerin (bozucu-etkilerin sistemin giriş kanalından farklı kanallardan girmesi durumu) [14] değerlendirildiği durum-uzayı temsili

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Bad(t), \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ile verilsin. Burada $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $x(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $u(t) \in \mathbb{R}$, $B_d \in \mathbb{R}^{n \times n_d}$, $y(t) \in \mathbb{R}$, $d(t) \in \mathbb{R}^{n_d \times 1}$ ve $B \neq B_d$ şeklindedir.

Bozucu-etkilerin doğrudan sistemin giriş kanalı üzerinden etki ettiği durum eşleşen sistemler ise ($B = B_d$)

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + B(u(t) + d_{ed}(t)), \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ile verilmiş olsun. Burada $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}$ ve $d_{ed}(t) \in \mathbb{R}^{n_d \times 1}$ şeklindedir.

Denklem (1) ve (2) sistemleri arasındaki farkı anlayabilmek ve geçişi ve eşdeğerliği anlayabilmek adına aşağıdaki tanım faydalı olacaktır.

Tanım 1. *Bozucu-etki $d(t)$ altında, (1) sisteminin çıkışı $y(t)$ ve bozucu-etki $d_{ed}(t)$ altında (2) sistemin çıkışı $\hat{y}(t)$ şeklindedir. Eğer $y(t) = \hat{y}(t)$, $\forall t \leq 0$ ise $d_{ed}(t)$ bozucusuna Eşdeğer-Giriş-Bozucu-etki (EGB) denir [7].*

Tanım 1 ile verilen eşdeğerlik neredeyse her fiziksel sistem için geçerlidir ve genel durum için ispatı [15]'de verilmiştir. Bu ispat ile (1) sistemi yerine her yerde (2) sistemi kullanılabilir.

Sistemlerin dinamik temsili için kullanılan diğer bir kavram ise belirsizliktir. Belirsizlik ve bozucu-etkilerin birlikte düşünüldüğü diğer bir doğrusal zamanla değişmeyen sistem temsili ise

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= A\tilde{x}(t) + Bu(t) + \Delta A\tilde{x}(t) + \Delta Bu(t) + d(t) \\ \tilde{y}(t) &= C\tilde{x}(t) + Du(t), \quad \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

ile verilmiştir. Burada $\tilde{x}(t) = [\tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_n(t)]^T$ durum, A bilinen durum matrisi, ΔA bilinmeyen durum matrisi, $u(t) = [u_1(t), \dots, u_r(t)]^T$ kontrol girişidir, B tam sütun sıralaması bilinen kontrol matrisidir, ΔB bilinmeyen kontrol matrisi, $\tilde{y}(t)$ çıkış ve $d(t)$, öngörülemez harici bozucudur.

Tanım 2. *Bozucu-etki $d_{ed}(t)$ altında, (2) sisteminin çıkışı $\hat{y}(t)$ ve (3) sisteminin çıkışı $\tilde{y}(t)$, bozucu-etki ve belirsizlik altındaki ifadesi $\Delta A\tilde{x}(t) + \Delta Bu(t) + d(t)$ şeklindedir. Eğer $\tilde{y}(t) = \hat{y}(t)$, $\forall t \leq 0$ ise $d_{ed}(t)$ bozucusuna "EGB" adı verilir.*

Karesel sistemler (aynı sayıda giriş-çıkış sayısına sahip olan sistemler) ve sınırlı belirsizlik altında sistemlerin sahip olduğu belirsizliklerin EGB olarak düşünülebileceği [16] ile ispatlanmıştır. Bu sebeple, makalede incelenen durum TGTC olduğu için Tanım 2 çalışmanın kalanında geçerlidir.

Açıklama 1. Her ne kadar çalışmada esas alınan yöntemler (1), (2) veya (3) ile temsil ediliyor olsa da, Tanım 1'in neredeyse her durum için ve Tanım 2'nin ise bu çalışma özelinde geçerli olmasından dolayı, bütün yaklaşımların (2) ile incelenmesi hem teorik olarak hemde tüm sistemlerin eşit koşullar altında test edilebilmesi için faydalı olacaktır.

Varsayım 1. (A, B, C) matrisleri ile tanımlanan sistem kontrol edilebilir, gözlemlenebilir ve sanal ekseninde kutupları ve sıfırları yoktur.

Varsayım 2. (2) ile verilen sistem minimum fazlıdır ve iç kararlılığa sahiptir.

Varsayım 3. d_{ed} büyüklük bakımından sınırlı, bilinmeyen ve sürekli bir sinyaldir.

Açıklama 2. Varsayım 1'in amacı incelenen problemin amacına uygun olarak ve kontrol sistemi tasarımının gerçekleştirilebilmesi adına kararlaştırılabilir bir sistem açısından gereklidir. Varsayım 2 ise incelenen her yöntemin çalışabilir olması adına gereklidir çünkü UDE ve DOBC yöntemleri minimum fazlı olmayan sistemlerde çalışmamaktadır. Benzer şekilde Varsayım 3 ise her yöntemin içinde tanımladığı bozucu-etki sinyalini kapsayan ve olası bir uyumsuzluğu gidermek adına verilmiştir. Bütün varsayımlar literatürde çeşitli makalelerde standart olarak görülebilmektedir.

Kontrol Tasarım Amacı: Bozucu-etki gözleyici yöntemlerinin belirli bir bant genişliği altında etkin olması ve bu sayede adil bir karşılaştırma yapılmasını amaçlanmaktadır.

3. Doğrusal Bozucu-etki Gözleyici Tabanlı Kontrol ve İlişkili Yöntemler

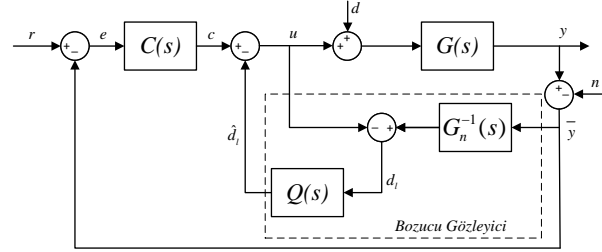
Bu bölümde, dört adet tahmin yöntemi açıklanmıştır. Bunlar sırasıyla; Frekans Uzayı Bozucu-etki Gözleyici Tabanlı Kontrol (FUBGTK), Belirsizlik ve Bozucu Tahmincisi (BBT), Eşdeğer Giriş Bozucu Tahmincisi (EGBT), Bozucu/Belirsizlik Tahmincisi Tabanlı Gürbüz Kontrol (BTTGK)'dür.

Bu çalışma, her ilgili yöntemin makalesinde önerilen kontrol sistemi tasarım yöntemi ile tahmin edici yöntemlerin seçilen bir minimum fazlı, kararlı ve TGTC sistemine uygulanmasını ve sonuçları karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu karşılaştırmayı yaparken adil olmak için, kontrol sistemi parametreleri aynı kriterler (bant-genişliği) üzerine seçilmelidir. Bu kriter, zaman uzayı sistem yanıtı yoluyla yerleşme zamanı parametresine bağlı olarak seçilmiştir. Yerleşme zamanını indirmek, sistem bant genişliğini artıracaktır.

3.1. Frekans Uzayı Bozucu-etki Gözleyici Tabanlı Kontrol

Bu yöntem [4], sisteme kontrol sinyali kanalından giren bozucuyu gözlemleyebilmek için, minimum fazlı sistem varsayımı altında, dış geri besleme döngüsünü yok sayarak "lump (yumru) bozucusu" olarak tanımlanan bir sinyali hesaplanmaktadır. Bu yapı için önerilen blok diyagram yapısı Şekil 1 ile verilmiştir. Burada $C(s)$ kontrol sistemini, $G(s)$ sistemi, $G_n(s)$ nominal

sistemi ve $Q(s)$ alçak geçiren filtreyi temsil etmektedir. Nominal sistemin tersi alınarak ve kontrol sinyalinden (u) çıkarılarak (d_i) elde edilmektedir. Daha sonra, bir alçak geçiren filtre aracılığıyla lump (yumru) bozucusu (\hat{d}_i) tahmin edilmekte ve ana kontrol sisteminin çıkışına negatif olarak beslenmektedir.



Şekil 1: Bozucu-etki Gözleyici Tabanlı Kontrol Yapısı [13]

Lump (yumru) bozucusu

$$\begin{aligned} d_i(s) &= d(s) - G_n(s)^{-1}n(s) + [G_n(s)^{-1} - G(s)^{-1}]y(s) \\ \hat{d}_i(s) &= d_i(s)Q(s) \end{aligned} \quad (4)$$

ile tanımlanır ve harici bozucu ($d(s)$), ölçüm gürültüsü ve fiziksel sistem ile nominal model arasındaki modelleme hatasından oluşur. Temel olarak yumru bozucusu (d_{ed}) ile aynı yapıya sahiptir ve bu şekilde ele alınabilir. ($Q(s)$) filtresinin tasarımı, bozucu-etki gözleyici tabanlı yapıda önemlidir. Mükemmel bir bozucu-etki tahmini için, ($Q(j\omega) \approx 1$) seçilmesi gerekmektedir ancak bu durum aşağıdaki sebeplerden ötürü mümkün değildir.

1. Çıkış ölçüm gürültüsü baskın hale gelip sistemin performansını ve hatta kararlılığını bozabilir,
2. Bu yapıda nominal sistemin tersi gereklidir. Ancak kesinlikle uygun (payın derecesinin paydanın derecesinden küçük olduğu) bir sistem için ters almadan sonra tümgeçiren yapıda ($Q(j\omega) \approx 1$) bir filtre kullanımı "uygun olmayan" bir sonuç doğuracaktır ve bu tarz sistemler gerçekleştirilebilir değildir.

2 ile belirtilen nedenden ötürü, ($Q(s)$) filtresinin derecesi, nominal sistemin göreceli derecesine (yani, transfer fonksiyonunun paydası ve payı arasındaki derece farkı) göre bir alçak geçiren filtre olarak tasarlanmalıdır.

$$Q(s) = \frac{1}{(T_q s + 1)^r}, \quad \omega_c = \frac{1}{T_q} \quad (5)$$

burada ω_c alçak geçiren filtrenin kesme frekansıdır. BGTK için bant genişliğini ifade etmektedir. Ayrıca bu filtrenin göreceli derecesi r 'dir.

Bu filtrenin amaçlarından biri sistemin tersini uygun hale getirmektir. Bunu yaparken veri kaybı olmamasına özen gösterilmelidir (alçak geçiren filtrenin gecikme katmasından dolayı).

$C(s)$ tasarımı için önerilen yöntem durum geri beslemeli kontrolüdür. Kontrol girişi ise

$$u(t) = -K_c x(t) - \hat{d}_i(t) \quad (6)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada $x(t)$ durumlar, K_c ise durum geri besleme kazancıdır.

3.2. Belirsizlik ve Bozucu Tahmincisi

Bu kısımda anlatılan [17], Belirsizlik ve Bozucu Tahmincisi (BBT) tabanlı kontrol yöntemi üç serbestlikten oluşmaktadır. Bunlar referans model, filtre, hata geri besleme kazancıdır. BBT, hem belirsizlik hem de bozucu-etkilerini birleştirerek tahminler yapar. Bu yöntemin temel tasarım felsefesi sezgiseldir. Doğrusal belirsiz bir sistemi şu şekilde düşünün:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Delta Ax(t) + \Delta Bu(t) + d(t) \quad (7)$$

burada $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ durum, A bilinen durum matrisi, ΔA bilinmeyen durum matrisi, $u(t) = [u_1(t), \dots, u_r(t)]^T$ kontrol girişidir, B tam sütun sıralaması bilinen kontrol matrisidir, ΔB bilinmeyen kontrol matrisi ve $d(t)$, öngörülemeyen harici bozucudur.

Referans sistem dinamiği olarak

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (8)$$

eşitliğini ele alalım. Burada $r(t) = [r_1(t), \dots, r_n(t)]^T$ istenen veya referans durum, A_m referans modelin durum matrisi ve B_m tam sütun sıralaması bilinen kontrol matrisidir.

BBT yönteminde eşdeğer bozucu olarak adlandırılan *lump* (yumru) bozucusu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} d_l(t) &= \Delta Ax(t) + \Delta Bu(t) + d(t) \\ d_l(t) &= \dot{x}(t) - Ax(t) - Bu(t) \end{aligned} \quad (9)$$

Ancak, doğrudan kontrol yasasında kullanılamaz [17]. Bu nedenle bir filtreden geçirilmelidir. Referans modelin durumları ile fiziksel model arasındaki fark hata olarak tanımlanır. Bu hata, sifıra yakınsamak için kontrol hedefidir.

$$e(t) = x_m(t) - x(t) \quad (10)$$

İstenen hata dinamiği, (11) ile verilmiştir.

$$\dot{e}(t) = (A_m + K) e(t) \quad (11)$$

burada K , hata geri besleme kazancıdır. (12), (11) denkleminin yerine (7), (8) ve (9) konularak elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} A_m x_m(t) + B_m r(t) - Ax(t) - Bu(t) - d_l(t) &= Ke(t) \\ u(t) &= B^\dagger (A_m x_m(t) + B_m r(t) - Ax(t) - d_l(t) - Ke(t)) \end{aligned} \quad (12)$$

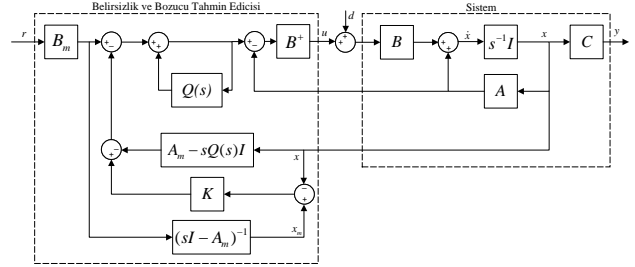
burada $B^\dagger = (B^T B)^{-1} B^T$, B 'in sözde tersi'dir.

Açıklama 3. Her ne kadar yöntem sözde tersi kullanmakta ise de yöntem için sözde-tersin varlığı tek başına yeterli olmamaktadır. (12)'dan anlaşılacağı üzere amaç $B^\dagger B = I$ eşitliğinin sağlanmasıdır. Bu makale özelinde TGTÇ sistemler incelendiği için B 'nin sözde tersi mevcut olsa da bu her durum için mümkün değildir. Yöntemi kullanan tasarımcının sözde tersin bu açıklamadaki eşitliğin sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmesi gerekir.

BBT yapısı için önerilen blok diyagram yapısı Şekil 2 ile verilmiştir. Denklem (5) ile verilen yapıya benzer şekilde, $Q(s)$ 'in uygun formda bir alçak geçiren filtre olduğunu varsayalım. Bu

durumda denklemler düzenlenirse, BBT tabanlı kontrol kuralı (13) gibi türetilir [8].

$$u(t) = -B^\dagger \left(Ax(t) + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{sQ(s)}{1-Q(s)} \right\} * x(t) - \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{1-Q(s)} \right\} * (A_m x(t) + B_m r(t) - Ke(t)) \right) \quad (13)$$



Şekil 2: Belirsizlik ve Bozucu Tahmincisi Yapısı

BBT yönteminde çıkıştan herhangi bir geri besleme alınmaz. Bunun yerine, sistem modelinin durumları referans modelin durumlarından çıkarıldıktan sonra hata geri besleme kazancı (K) çarpılır. Bu nedenle referans model ve sistem modeli, sistemin kapalı döngü yanıtında kararlı durum hatası olmaması için gözlemlenebilir kanonik formda [18] yazılmalıdır. Ayrıca yüksek mertebeden sistem modeli kullanılması durumunda denklemlerdeki matris işlemlerinin doğru yapılabilmesi için referans modelin derecesi ile sistem modelinin derecesinin aynı olması gerekmektedir.

3.3. Eşdeğer Giriş Bozucu Tahmincisi

Bu bölümde [7], literatürde çok yaygın olarak kullanılan ve temel olarak eşleşmemiş sistemler için yeni bir yaklaşım olarak önerilen EGB tahmincisi anlatılacaktır. Şekil 3'ün durum gözleyicisi

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu_f(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (14)$$

ile ifade edilmektedir. Burada L gözleyici kazancıdır ve tasarımı optimal bir kontrol yöntemi olan LQR ile yapılmaktadır.

$$\Delta x(t) = \hat{x}(t) - x(t) \quad (15)$$

Denklem (15), (2)'deki durumların yerine konulursa, (16) elde edilmektedir.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + \{Bd_{ed}(t) + [\Delta\dot{x}(t) - A\Delta x(t)]\} \quad (16)$$

karşılayan bir $\Delta d(t)$ kontrol girişi olduğunu varsayalım.

$$\Delta\dot{x}(t) - A\Delta x(t) = B\Delta d(t) \quad (17)$$

Denklem (17), (16)'de yerine konulup B ortak parantezine alındığında (18) elde edilmektedir.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B(u(t) + [d_{ed}(t) + \Delta d(t)]) \quad (18)$$

EGB'nin tahmin ettiği bozucu-etki (19) ile ifade edilmektedir.

$$\hat{d}(t) = d_{ed}(t) + \Delta d(t) \quad (19)$$

sistemi şu şekilde ifade etmemizi sağlar.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B[u(t) + \hat{d}(t)] \quad (20)$$

Denklemler (14) ile (20)'in sağ tarafları birbirine eşitlenirse, (21) elde edilmektedir.

$$B[\hat{d}(t) + u(t) - u_f(t)] = LC[x(t) - \hat{x}(t)] \quad (21)$$

Eşdeğer Giriş Bozucu-etki Tahmincisi (EGB) yönteminde, eğer $\hat{d}(t)$ için (21) en küçük kareler yöntemi ile çözümlerse, tahmin edilen bozucu

$$\hat{d}(t) = B^\dagger LC[x(t) - \hat{x}(t)] + u_f(t) - u(t) \quad (22)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $B^\dagger = (B^T B)^{-1} B^T$, B 'in sözde tersi'dir ve Açıklama 3, (12) için de geçerlidir.

$$\begin{aligned} \tilde{d}(t) &= \hat{d}(t) * \mathcal{L}^{-1}\{Q(s)\} \\ \tilde{D}(s) &= \hat{D}(s)Q(s) \end{aligned} \quad (23)$$

Burada "*" operatörü konvolüsyon işlemidir. $\tilde{D}(s)$ ve $\hat{D}(s)$, sırasıyla $\tilde{d}(t)$ ve $\hat{d}(t)$ 'in Laplace dönüşümleridir. $\tilde{d}(t)$ elde edilen bozucu-etki tahminidir. Ayrıca $Q(s)$ bozucu-etki tahmincisinin bant genişliğini belirleyen (5) formunda alçak geçiren filtreyi temsil etmektedir. EGB yapısı için önerilen blok diyagram yapısı Şekil 3 ile verilmiştir.

İlk olarak, bozucu-etki ihmal edilmiş ve basamak sinyali ve sistemin dahili bir modelini içeren tek bir artırılmış durum temsili (24) ile oluşturulmuştur [7]. A_R ve B_R kontrol sisteminde iç model parametrelerini (basamak girişe karşılık takip performansını iyileştirmek için kullanılan modeldir) temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}(t) \\ \delta \dot{x}_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -B_R C & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta x_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \delta u(t) \quad (24)$$

burada $\delta x(t) = x(t) - x(\infty)$, $\delta x_R(t) = x_R(t) - x_R(\infty)$, ve $\delta u(t) = u(t) - u(\infty)$

Şekil 3'teki K_P ve K_R durum geri besleme kazançlarıdır ve (25) karesel maliyet fonksiyonu (LQR) ile hesaplanmaktadır.

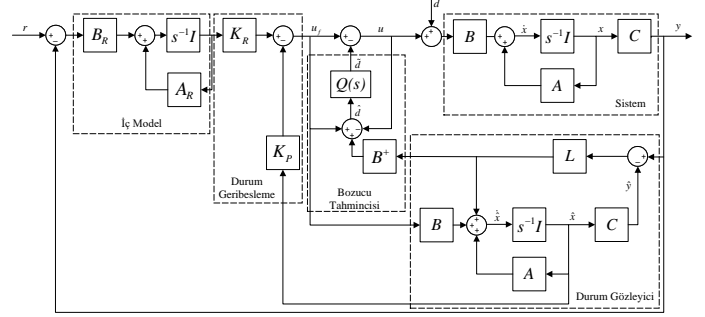
$$J_K = \int_0^\infty \left\{ [\delta x^T(t) \delta x_R^T(t)] Q_K \begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta x_R(t) \end{bmatrix} + R_K \delta u^2(t) \right\} dt \quad (25)$$

L gözleyici kazancını ifade etmektedir ve benzer şekilde (26) karesel maliyet fonksiyonu (LQR) ile hesaplanmaktadır.

$$J_L = \int_0^\infty \{ \rho x_L^T(t) Q_L x_L(t) + R_L u_L^2(t) \} dt \quad (26)$$

3.4. Bozucu/Belirsizlik Tahmincisi Tabanlı Gürbüz Kontrol (BTTGK)

Bu yöntemde [12], sistem kontrol edilebilir, gözlemlenebilir olarak tanımlanır. Bu şart, nominal sistemin iç kararlılığını garanti etmek için gereklidir. Ayrıca EGB'deki gibi sanal eksende kutup ve sıfır yoktur ancak Kürçkü vd. [15] ile bu şartın kaldırılabilir olduğu ispatlanmış ve bunun için \mathcal{H}_∞ sentezleme yöntemi genişletilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak bu yöntemde, bozucu-etki gözleyicisi ve ana kontrol sistemi ayrı ayrı



Şekil 3: Eşdeğer Giriş Bozucu Yapısı

olarak ele alınmamakta, bunun yerine gürbüz kararlılık ve performansı sağlayabilmek için iki adet \mathcal{H}_∞ sentezlemesi bir bütün olarak ele alınmaktadır. BTTGK yapısı için önerilen blok diyagram yapısı Şekil 4 ile verilmiştir. Burada $C(s)$ \mathcal{H}_∞ ile tasarlanan ana kontrol sistemini, $G(s)$ kontrol edilmesi amaçlanan gerçek sistemi, $G_n(s)$ kontrol sentezlemeleri ve yöntemde kullanılan nominal sistem modelini, $C_{obs}(s)$ \mathcal{H}_∞ ile tasarlanan bozucu-etki gözleyici döngüsünün kontrol sistemini ve \hat{u} ise yöntemin sonucunda elde edilen bozucu-etki tahminini temsil etmektedir. Tümlaşik kontrol sistemi tasarımı ise adım adım aşağıda verilmektedir.

- Bastırılması istenen d_{ed} bozucu-etkisinin frekans aralığı belirle

$$\hat{u}(j\omega) = d_{ed}(j\omega) \mid \forall \omega \in (0, \omega_r]. \quad (27)$$

Burada ω_r bozucu-etkinin bastırılması istenilen frekans bileşenlerinin üst sınırını belirtmektedir.

- Denklem (27)'ün sağlanabilmesi ve Şekil 4'ün yardımı ile

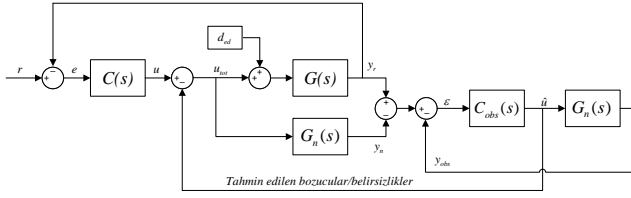
$$\begin{aligned} \varepsilon(j\omega) &= (1 + G_n(j\omega)C_{obs}(j\omega))^{-1}(y_r - y_n) \\ &= S_{obs}(j\omega)(y_r - y_n) \\ &= (1 - T_{obs}(j\omega))(y_r - y_n) \\ &\approx 0 \mid \forall \omega \in (0, \omega_r] \end{aligned} \quad (28)$$

eşitliğini sağlayacak C_{obs} 'un tasarımı gerekmektedir. Dikkat edilmesi gerekir ki bu tasarım nominal sistem üzerine yapılmalıdır ve herhangi bir belirsizlik tasarıma katılmamalıdır.

- Bozucu-etki döngüsünün kontrol sistemi tasarlandıktan sonra S_{obs} ve T_{obs} dikkate alınarak [12]'in Sonuç 1'ine göre ana kontrol sistemi tasarımında kullanılacak olan gürbüzlük ağırlık matrisi W_T güncellenecek ve bu ağırlık matrisine göre $C(s)$ tasarımı gerçekleştirilecektir.

Tasarım detayları için okuyucular [12]'ye bakabilir.

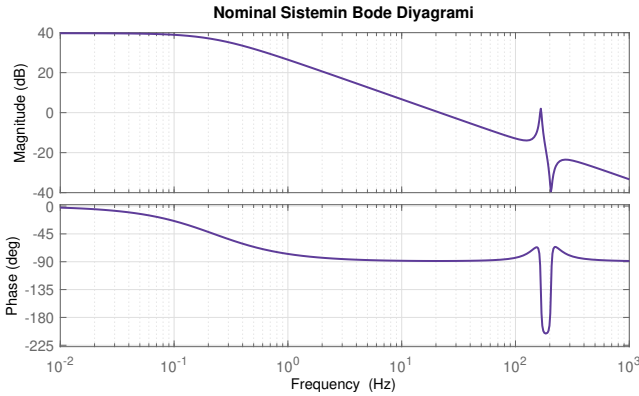
Amaç, bozucu/belirsizlik tahmin edicisine dayalı kontrolde gürbüz kararlılık, performans ve bant genişliği gereksinimi için net matematiksel ifadeler elde etmektir. Tasarım sonucu elde edilen yapı gürbüz kararlılık ve performansı analitik olarak garanti eder.



Şekil 4: Bozucu/Belirsizlik Tahmincisi Tabanlı Gürbüz Kontrol Blok Diyagramı

4. Tasarım ve Analiz

Yukarıda belirtilen ve detayı açıklanan yöntemlerin anlamlı bir kıyası için karmaşıklık seviyesi ve performans gereksinimi yüksek olan bir gimbal sistemi seçilmiştir. Her ne kadar belirli bir efor ile ÇGÇÇ genişletmesi mümkün olsa da, anlaşılabilirliği ve tekrar edilebilirliği arttırmak adına gimbal sisteminin tek bir eksenli TGTC sistem olarak ele alınmıştır. Temsili yapısı Şekil 6 ile verilen sistemin girişi yükseliş (elevation) eksenindeki motordan uygulanan tork, çıkışı ise dönüölçerden okunan açısal hız şeklindedir. Bu sistem, (2) ile durum-uzay olarak temsil edilmektedir.



Şekil 5: Nominal sistemin bode diyagramı

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -2.558 \cdot 10^{12} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1.828 \cdot 10^{12} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -7.513 \cdot 10^8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -2.782 \cdot 10^6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -663.2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 2.477 \cdot 10^{14} \\ 1.194 \cdot 10^{11} \\ 3.772 \cdot 10^8 \\ 7.385 \cdot 10^4 \\ 135.6 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad D = 0$$

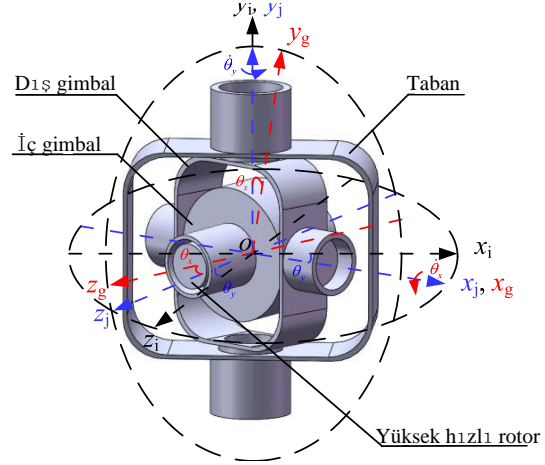
Transfer fonksiyonu gösterimi

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (29)$$

şeklinde olan sistem Şekil 5'de görüldüğü üzere kararlı ve minimum fazlıdır. Sisteme giren bozucu-etki:

$$d_{ed}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0.4 \\ 1, & t \geq 0.4 \end{cases} \quad (30)$$

Karşılaştırmada öncelikle tüm yöntemlerin benzer bir oturma zamanına sahip olması amaçlanmıştır. Oturma zamanı üst sınırı olarak ise referans takip için $\tau_s = 0.13$ sn ve bozucu-etki tahmini için $\tau_s = 0.04$ sn olarak belirlenmiştir.



Şekil 6: Gimbal Yapısı [19]

4.1. Frekans Uzayı Bozucu-etki Gözleyici Tabanlı Kontrol

Bu yapıda tasarım, durum geri beslemeli kontrol sistemi yöntemi ile yapılmaktadır. Tasarım için yukarıda belirtilen $G(s)$ nominal modeli kullanılmıştır. Durum geri besleme kazançları bulunurken deneme yanılma yöntemi ile oturma süresini en aza indiren kazanç katsayıları bulunmuştur. Sistem modelinin kutup sayısı sıfır sayısından bir fazla olduğundan ($r = 1$), sistemin tersini "uygun" hale getirmek için (5) formunda ve $\omega_c = 314.2$ rad/s olan ve (31)'de verilen alçak geçiren filtreden geçirilir. Kontrol giriş sinyali de aynı alçak geçiren filtreden geçirilir ve aralarındaki fark, tahmin edilen bir bozucu olarak sistemin ana kontrol sistemine negatif bir sinyal olarak girer. Aynı zamanda bu tahmin edilen bozucu sinyali, nominal sistemin girişinden önce kontrol sinyali ile toplanır.

$$Q(s) = \frac{1}{0.00318s + 1} \quad (31)$$

Tasarım sonucunda elde edilen durum geri besleme kazanç katsayıları aşağıdaki gibidir:

$$K_c = [5.012 \quad 19.982 \quad 10.168 \quad 10.138 \quad 41.901 \quad -31.313]$$

4.2. Belirsizlik ve Bozucu Tahmincisi

Bu yapıda sistem çıkışından herhangi bir geri besleme alınmaz. Hata geri besleme kazancı, referans modelin durumlarından sistem durumlarının farkı ile çarpılır. Bu nedenle hem referans model hem de sistem modeli gözlemlenebilir kanonik forma dönüştürülmüştür. Bu şekilde yapılmazsa, sürekli hal hatası oluşmaktadır. Bu sistem yapısında, BBT için referans model, ve kontrol sistemi parametreleri hesaplanan diğer yöntemlerin sistem cevaplarına yakın olacak şekilde deneme yanılma yöntemi ile seçilmiştir. Hata geri besleme kazancı, hem sistem yanıtını referans modele yakınlaştırmakta hem de dolaylı olarak bozucuyu tahmin etmektedir. Tahmin edilen bozucuda, hata geri besleme kazancının diğer tahmin edici yöntemlere göre %10'a kadar daha iyi olduğu kontrol sistemi parametreleri belirlenmiştir. Alçak geçiren filtre de tüm yöntemlerde olduğu gibi (31) ile aynı seçilmiştir. Referans model matrisleri (A_m, B_m), hata geri

besleme kazancı (K), ve B^\dagger aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -7.03 \cdot 10^{13} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1.89 \cdot 10^{12} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -2.99 \cdot 10^{10} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -2.83 \cdot 10^7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -9191 \end{bmatrix} \quad B_m = \begin{bmatrix} 7.03 \cdot 10^{13} \\ 6.93 \cdot 10^{10} \\ 2.28 \cdot 10^7 \\ 2500 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K = -250$$

$$B^\dagger = \begin{bmatrix} 4.03 \cdot 10^{-15} & 1.94 \cdot 10^{-18} & 6.14 \cdot 10^{-21} \\ 1.20 \cdot 10^{-24} & 2.20 \cdot 10^{27} \end{bmatrix}$$

4.3. Eşdeğer Giriş Bozucu Tahmincisi

Burada ana kontrol sistemi tasarımında, A_R ve B_R katsayıları sırasıyla 0 ve 1 olarak seçilmiştir. Bu seçimden dolayı (LQR) yapısı sürekli hal hatası oluşturmayan (LQI) formuna dönüşmüştür. Önceki bölüme benzer, ancak ağırlıklandırma matrisi Q ve R 'nin başlangıç değerleri, durum geri besleme kazanç sistemini kararlı hale getiren değerler seçilmiştir. Alçak geçiren filtre için (31) kullanılmıştır.

Ana kontrol sistemi tasarımında, (25)'deki karesel maliyet fonksiyonu ile sistemi minimum yerleşme zamanına ulaştıran Q_K ve R_K değerleri aşağıdaki gibidir:

$$Q_K = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 7.51 \quad 38.51\}, R_K = 0.0455$$

olarak seçildiğinde

$$K_P = [16.02209 \quad 8.82660 \quad 14.4689 \quad 2.3830 \quad 40.7110].$$

$$K_R = -29.07437$$

elde edilmektedir. Daha sonra gözleyici tasarımı için 26'deki maliyet fonksiyonu minimize edilmektedir.

$$Q_L = \text{diag}\{2 \quad 2 \quad 2 \quad 2\}, \quad R_L = 0.5$$

olarak seçildiğinde

$$L = [629.729 \quad 411.372 \quad 268.75 \quad 87.59 \quad 28.536]^T$$

elde edilmektedir.

4.4. Bozucu/Belirsizlik Tahmincisi Tabanlı Gürbüz Kontrol

Ağırlıklı karma duyarlılık \mathcal{H}_∞ ile hem ana hem de gözleyici kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu tasarımda, herhangi bir kontrol girişi sınırlaması olmaksızın duyarlılık ağırlık matrisinin W_P bant genişliğini artırmak teorik olarak mümkündür.

Denklem (32)'de verilen duyarlılık ağırlık matrisi W_P 'nin parametreleri: $M_P = 1.05$, $\xi_P = 1e-4$, $k = 2$, ve $\omega_P = 2 \cdot \pi \cdot 5$. $W_{P_{obs}}$ 'nin ise: $M_P = 1$, $\xi_P = 1e-4$, $k = 1$, ve $\omega_P = 2 \cdot \pi \cdot 20$.

$$W_P(s) = \left(\frac{s / \sqrt[k]{M_P} + \omega_P}{s + \omega_P \sqrt[k]{\xi_P}} \right)^k \quad (32)$$

Kontrol ağırlık matrisi $W_U = 0.01$, ve $W_{U_{obs}} = 0.0001$ olarak seçilmiştir.

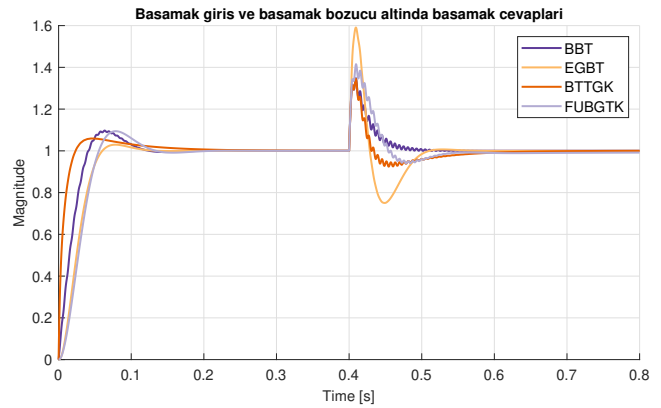
Denklem (33)'de verilen belirsizlik ağırlık matrisi W_T 'nin parametreleri: $M_T = 1.25$, $\xi_T = 0.667$, $k = 1$, ve $\omega_b = 2 \cdot \pi \cdot 20$.

$$W_T(s) = \left(\frac{s + \omega_b / \sqrt[k]{M_T}}{s \sqrt[k]{\xi_T} + \omega_T} \right)^k \quad (33)$$

Duyarlılık, kontrol ve belirsizlik ağırlık matrisleri gözleyici ve ana kontrol sistemi için ayrı ayrı seçilmiştir. İterasyon sonucunda ana kontrol sistemi için $\gamma = 0.9618$, gözleyici ise $\gamma_{obs} = 1$ değerine ulaşmıştır. Deneme yanılma yöntemi ile diğer yöntemlerin performansına benzer sonuç elde edilmiştir.

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

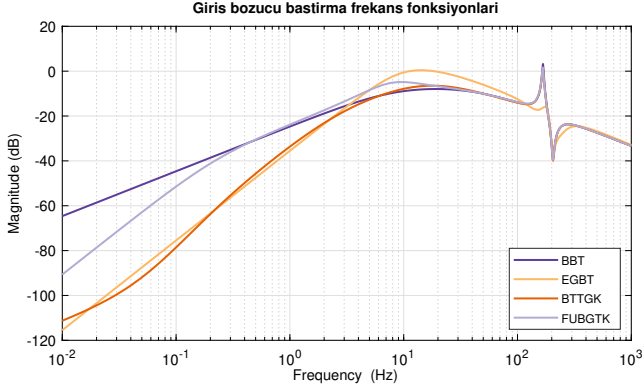
Sistemlere $t = 0$ sn. anında birim basamak referansı, $t = 0.4$ sn. anında ise birim basamak giriş bozucusu uygulanmıştır ve performansları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Basamak giriş ve basamak bozucu altında basamak cevapları

Frekans cevapları için tüm yöntemlerin matematiksel ifadeleri analitik olarak yazılmış ve giriş bozucusundan çıkışı olan transfer fonksiyonları parametrik olarak elde edilmiştir. Sistem modeli kontrol sistemi parametreleri transfer fonksiyonlarda yerlerine konulmuştur. Şekil 8'de elde edilen giriş bozucu bastırma fonksiyonları üzerinden performansları verilmiştir. Bu yöntemler incelendiğinde BTGK ve EGBT kontrol yöntemleri 5 Hz altındaki bozucu-etkileri diğer yöntemlere göre daha çok bastırdığı görülmektedir. Ancak 5 Hz üzerindeki performanslar için BBT ön plana çıkmaktadır. Ayrıca giriş bozucusundan çıkışa olan transfer fonksiyonda ileri yolda yalnızca sistem olduğu için, sisteme ait rezonans frekansları da giriş bozucu bastırma frekans fonksiyonunda gözükmemektedir. Şekil 7'de giriş bozucusu uygulandıktan sonra çıkış sinyali üzerinde ufak salınımlar görülmesinin sebebi basamak bozucu uygulandığında sistemin mod frekansının uyarılmasıdır. Yöntemlerin tümü pratik olarak uygulanabilmektedir.

Gelecek çalışmalarda benzer bir karşılaştırmayı, minimum fazlı olmayan sistemler, ÇGÇÇ sistemler ve kararsız sistemler için yapmak hedeflenmektedir. Bazı yöntemler için minimum fazlı olmayan sistemler için değiştirilmiş yapılar kullanılmaktadır. Tasarım sonucu başarısız yöntemler için onların değiştirilmiş versiyonları uygulanacaktır. Ayrıca simülasyon ortamında yapılan bu çalışma, pratik uygulamalar ile zenginleştirilecektir.



Şekil 8: Giriş Bozucu Bastırma Frekans Fonksiyonu

6. Kaynakça

- [1] T. Fortier and E. Baumann, “20 years of developments in optical frequency comb technology and applications,” *Communications Physics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, 2019.
- [2] P. I. Corke and M. C. Good, “Dynamic effects in visual closed-loop systems,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 671–683, 1996.
- [3] L.-L. Xie and L. Guo, “How much uncertainty can be dealt with by feedback?” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 12, pp. 2203–2217, 2000.
- [4] K. Ohishi, M. Nakao, K. Ohnishi, and K. Miyachi, “Microprocessor-controlled dc motor for load-insensitive position servo system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE-34, no. 1, pp. 44–49, 1987.
- [5] C. Johnson, “Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems,” *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 16, no. 6, pp. 635–644, 1971.
- [6] S. Dashkovskiy, D. V. Efimov, and E. D. Sontag, “Input to state stability and allied system properties,” *Automation and Remote Control*, vol. 72, no. 8, pp. 1579–1614, 2011.
- [7] J.-H. She, M. Fang, Y. Ohyama, H. Hashimoto, and M. Wu, “Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 380–389, 2008.
- [8] Q.-C. Zhong, A. Kuperman, and R. Stobart, “Design of ude-based controllers from their two-degree-of-freedom nature,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 21, no. 17, pp. 1994–2008, 2011.
- [9] L. Sun, D. Li, Q.-C. Zhong, and K. Y. Lee, “Control of a class of industrial processes with time delay based on a modified uncertainty and disturbance estimator,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 11, pp. 7018–7028, 2016.
- [10] J. Han, “From pid to active disturbance rejection control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009.
- [11] C. Johnson, “Further study of the linear regulator with disturbances—the case of vector disturbances satisfying a linear differential equation,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 15, no. 2, pp. 222–228, 1970.
- [12] B. Kürkçü, C. Kasnakoğlu, and M. O. Efe, “Disturbance/uncertainty estimator based robust control of non-minimum phase systems,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1941–1951, 2018.
- [13] W.-H. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, “Disturbance-observer-based control and related methods—an overview,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1083–1095, 2016.
- [14] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, ser. Pearson Education. Prentice Hall, 2002.
- [15] B. Kürkçü, C. Kasnakoğlu, M. Ö. Efe, and R. Su, “On the existence of equivalent-input-disturbance and multiple integral augmentation via h-infinity synthesis for unmatched systems,” *ISA transactions*, 2022.
- [16] B. Kürkçü and C. Kasnakoğlu, “Robust autopilot design based on a disturbance/uncertainty/coupling estimator,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 2622–2629, 2019.
- [17] Q.-C. Zhong and D. Rees, “Control of uncertain lti systems based on an uncertainty and disturbance estimator,” *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 126, no. 4, pp. 905–910, 2004.
- [18] P. Mellodge, “Chapter 2 - system modeling,” in *A Practical Approach to Dynamical Systems for Engineers*, P. Mellodge, Ed. Woodhead Publishing, 2016, pp. 17–145.
- [19] H. Li and J. Yu, “Anti-disturbance control based on cascade eso and sliding mode control for gimbal system of double gimbal cmg,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5644–5654, 2020.