

GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİNİN YÖNLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN KARDANLI YAPILARIN DENETİMİNDE UYGULANABİLECEK BAŞLICA YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bülent ÖZKAN¹
Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

ÖZET

Uçak, helikopter ve güdümlü mühimmat gibi hava platformlarında hedef takibi ve görüntüleme amacıyla kullanılan farklı özellikteki görüntü algılama sistemlerinin görüş alanlarını genişletmek amacıyla kullanılan kardanlı yapılar, çeşitli yaklaşımlar dahilinde denetlenmektedir (kontrol edilmektedir). Üzerinde bulunduğu platformdan kaynaklanan mekanik titreşimler ve dış kaynaklı sinyal gürültüleri gibi istenmeyen etkenlerin başarımına olumsuz etkisini asgari düzeyde tutabilmek amacıyla, bahsedilen kardanlı yönlendirme mekanizmalarının, açısız konum denetiminin yanında kararlılaştırılmalarının (stabilizasyonlarının) da sağlanması gerekmektedir. Belirtilen isterleri sağlayacak şekilde, farklı denetim yöntemlerinin ele alındığı teorik ve uygulamalı çalışmalara konu ile ilgili literatürde rastlanmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel yaklaşımların yanı sıra, düzenlemiş geleneksel yöntemler ve gürbüz denetim şemalarının kardanlı sistemlerin denetim ve kararlılaştırılmasındaki başarım özellikleri incelenmekte ve gerçekleştirilen gerçekçi bilgisayar benzetimlerinin sonuçları ışığında karşılaştırmalı bir genel değerlendirme yapılmaktadır.

GİRİŞ

Uçak, helikopter ve güdümlü mühimmat gibi hava platformlarında, hedef takibi ve görüntüleme işlemlerinde, daha geniş görüş alanı elde etmek ve takip doğruluğunu artırmak amacıyla kardanlı görüntüleme sistemleri kullanılmaktadır [Zarchan, 1994]. Bahsedilen hedef takibi ve görüntülemenin hızlı ve doğru şekilde yapılabilmesi için gerek şartlardan biri de kardanlı yapıyı oluşturan bileziklerin hassas bir şekilde denetlenmesidir (kontrol edilmesidir). Bu amaçla seçilen denetim yöntemi, özellikle bozucu girişlerden kaynaklanan hataların etkisinin en aza indirilmesi noktasında önem kazanmaktadır [Smith vd., 1999].

Kardanlı mekanizmalar, taşıdıkları görüntüleme birimini belirlenen hedefe yönlendirmenin yanı sıra, üzerinde bulunduğu platformun hareketlerinden ve dış kaynaklı sinyallerden kaynaklanan bozucu girdilere karşı da sistemi kararlı tutmaya çalışmaktadır [Murphy vd., 1999; Baek, Kim ve Choo, 2005]. Geleneksel kardan denetim sistemleri temeli açısız konum ve bazı uygulamalarda açısız hız denetimine dayanan tek döngülü kapalı çevrimli yapılardan oluşmakta iken, kararlılaştırma (stabilizasyon) gereksinimini karşılamak ve konumlama hassasiyetini artırmak amacıyla içiçe iki döngüden oluşan denetim sistemleri de tasarlanmıştır [Murphy vd., 1999]. Kardanlı yapıların hassas konumlandırılması ile ilgili olarak literatürdeki mevcut çalışmalarda, özellikle bağlantı kablolarının değişken direngenliği (Ing. stiffness), ölçerler üzerindeki gürültü ve yapının üzerine bütünlendiği zeminden aktarılan titreşimler dolayısıyla, açısız konum denetiminin istenilen hassasiyette gerçekleştirilemediği görülmüştür [Yuejin, 1996]. Bunun üzerine, sıklıkla kullanılan tek döngülü

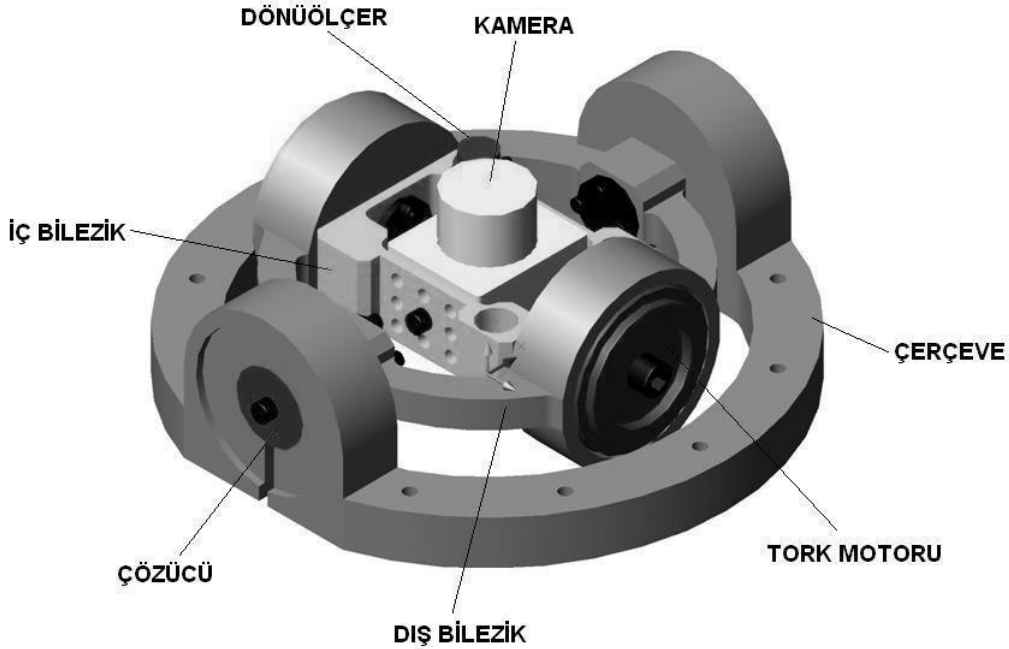
¹ Doç. Dr., Mak. Müh. Böl., E-posta: bozkan@gazi.edu.tr

denetim sistemlerinin yerine içiçe (kaskat yapıdaki) iki döngüden oluşan bir denetim sistemi algoritması oluşturulmuştur. Bahsedilen algoritmada, içteki döngü ele alınan kardanın açılma hızını öngörülen yerleşme zamanı içerisinde sıfırlamaya çalışırken, dıştaki döngü; durağan durumdaki açılma konum hatâsını da sıfırlayacak şekilde açılma konum denetimi yapmaktadır [Smith vd., 1999].

Bu çalışmada, kardanlı yönlendirme mekanizmaları için oluşturulan başlıca tek ve iki döngülü denetim sistemi modelleri anlatılmaktadır [Özkan, 2019]. Ele alınan denetim sistemlerinin tasarlanmasının ardından, oluşturulan modeller MATLAB® Simulink ortamına aktarılarak ilgili sistem parametreleri için belirlenen sayısal değerlerle gerçek zamanlı bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar kullanılarak modellerin başarımları karşılaştırılmıştır. Daha sonra, seçilen tek döngülü denetim sistemleri ile iç döngüsü gürbüz denetleyici kullanılarak tasarlanan iki döngülü denetim sistemi, gereksinimlere uygun olarak tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen prototip kardan bütünü kullanılarak laboratuvar ortamında oluşturulmuş ve belirlenen test girişleri için sistemlerin cevapları incelenmiştir (Bahsedilen çalışmalar, kardan bütünü oluşturulan hareketli yapılardan yalnızca iç bilezik üzerinde uygulanmıştır.).

KARDANLI YÖNLENDİRME SİSTEMİ

Çalışma kapsamında, şematik görünümü Şekil 1’de verilen kardan bütünü modeli esas alınmıştır.



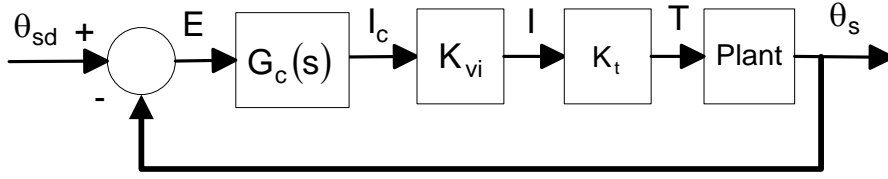
Şekil 1: Kardan Bütünü

Kardan bütünü, Şekil 1’den de görüldüğü üzere, dış ve iç bilezik olmak üzere iki hareketli alt bütünden oluşmaktadır. Dış bilezik hareketsiz çerçeveye, iç bilezik de dış bileziğe göre bağıl açılma hareketine sahiptir. Eylemsizlik özellikleri ve sürtünme katsayıları birbirinden farklı olmakla birlikte, her iki bileziğin dinamiği benzer denklemlerle tanımlanabilir. Bu çalışmada, kardan bütünü’nün belirtilen özelliğinden yararlanılarak, aday denetim sistemleri yalnızca iç bilezik için tasarlanmış ve benzetimler iç bilezik denetim sistemi için gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modeller, iç bilezik dinamik parametrelerinin yerine dış bilezik parametreleri yazılarak kolaylıkla dış bileziğe de uyarlanabilir.

TEK DÖNGÜLÜ KARDAN BÜTÜNÜ DENETİM SİSTEMLERİ

Ele alınan tek döngülü denetim sistemleri, denetim değişkeni olarak iç bilezik açılma konumu (θ_s) seçilerek, oluşturulan kardan dinamiğine göre doğrudan açılma konum denetimi yapacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan tek döngülü denetim sistemlerinin genel yapısı Şekil 2’de verildiği gibidir. Şekil 2’de kullanılan θ_{sd} , E , I_c , I ve T , sırasıyla iç bilezik açılma konumunun istenen değeri, istenen ve gerçekleşen bilezik açılma konumu arasındaki fark (hatâ), denetleyici (kontrolcü) çıkış sinyali, sürücü kartı çıkış akımı ve plant (denetlenen sistem) denetim torkunu göstermektedir. Ayrıca, $G_c(s)$, K_{vi} ve

K_t sembolleri ile de sırasıyla denetleyici transfer fonksiyonu, sürücü kartı kazancı ve motor tork katsayısı ifade edilmektedir.

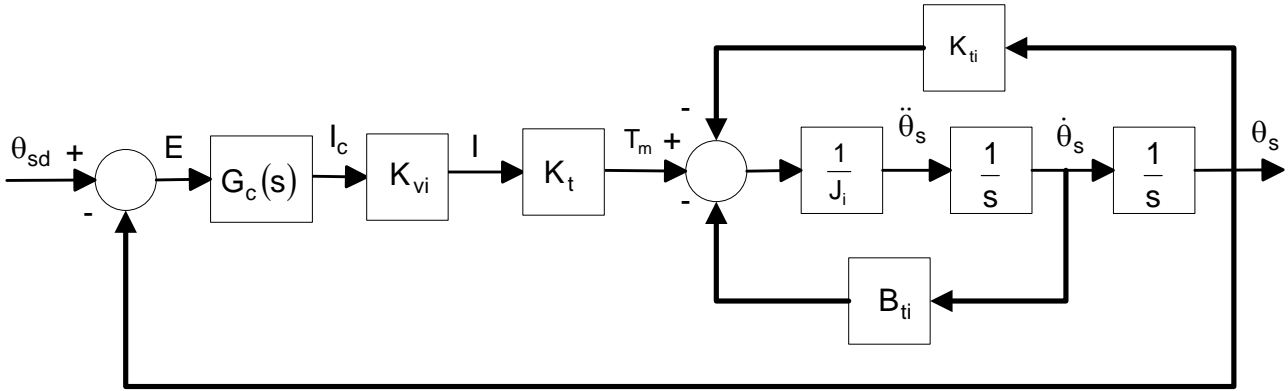


Şekil 2: Tek Döngülü Denetim Sistemi Yapısı

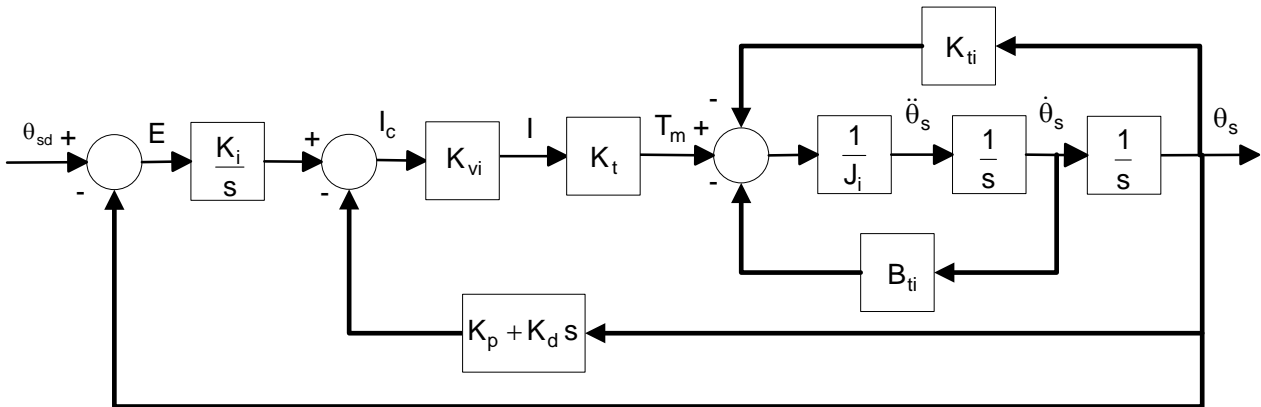
Bu kapsamda, klasik PID (oransal, tümlensel ve türevsel), I-PD (tümlensel, oransal ve türevsel) ve PIV (oransal, tümlensel ve hız) denetleyicilerinin kullanıldığı denetim sistemleri ile durum geribeslemeli (İng. state feedback) denetim sistemi, ilgili blok diyagramları sırasıyla Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verildiği gibi olacak şekilde göz önüne alınmıştır. Bahsedilen şekillerde gözükten J_i , B_{ti} ve K_{ti} sembolleri sırasıyla iç bileziğin toplam eylemsizlik momentini, dış ve iç bilezik arasındaki viskoz sürtünme katsayısı ve iç bilezik kablolarının direngenliğini göstermekte olup K_p , K_i , K_d ve K_v de denetleyicinin sırasıyla oransal, tümlensel, türevsel ve hız kazançlarını temsil etmektedir.

Ayrıca, Şekil 3'teki denetleyici transfer fonksiyonu $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ olarak tanımlanmaktadır.

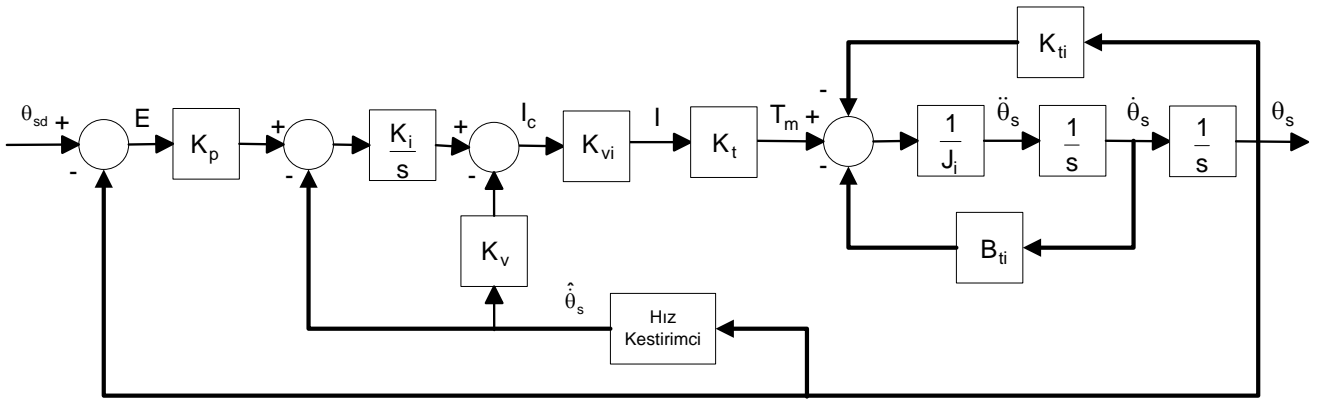
Durum geribeslemeli denetleyiciye ait olan Şekil 6'deki blok diyagramında, k_1 ve k_2 sembolleri ile denetleyici kazançları belirtilmektedir.



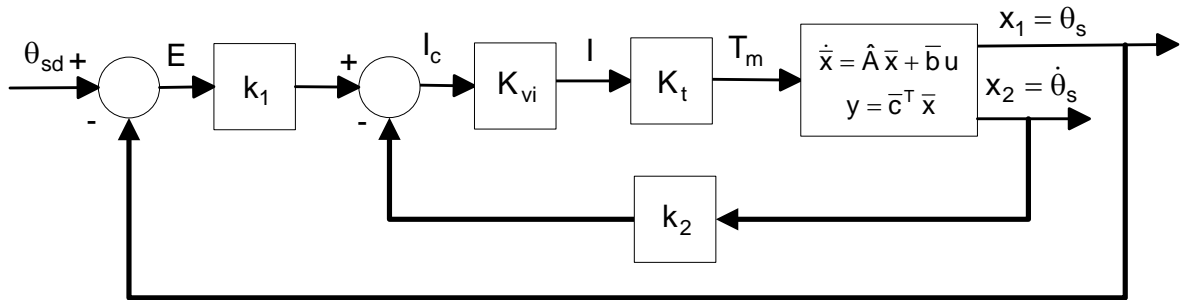
Şekil 3: PID Denetleyicili Tek Döngülü Kardan Denetim Sistemi



Şekil 4: I-PD Denetleyicili Tek Döngülü Kardan Denetim Sistemi



Şekil 5: PIV Denetleyicili Tek Döngülü Kardan Denetim Sistemi



Şekil 6: Durum Geribeslemeli Tek Döngülü Kardan Denetim Sistemi

Oluşturulan blok diyagramları esas alınarak, çalışma kapsamında ele alınan PID, I-PD ve PIV denetleyicili denetim sistemleri ile durum geribeslemeli yapının kapalı çevrim transfer fonksiyonları, n_i ($i=0, 1$ ve 2) ve d_j ($j=0, 1, 2$ ve 3) katsayıları kullanılarak, sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

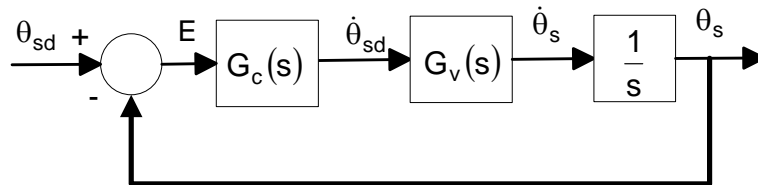
$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_{sd}(s)} = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + 1}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (1)$$

$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_{sd}(s)} = \frac{1}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (2)$$

$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_{sd}(s)} = \frac{1}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (3)$$

$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_{sd}(s)} = \frac{n_0}{d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (4)$$

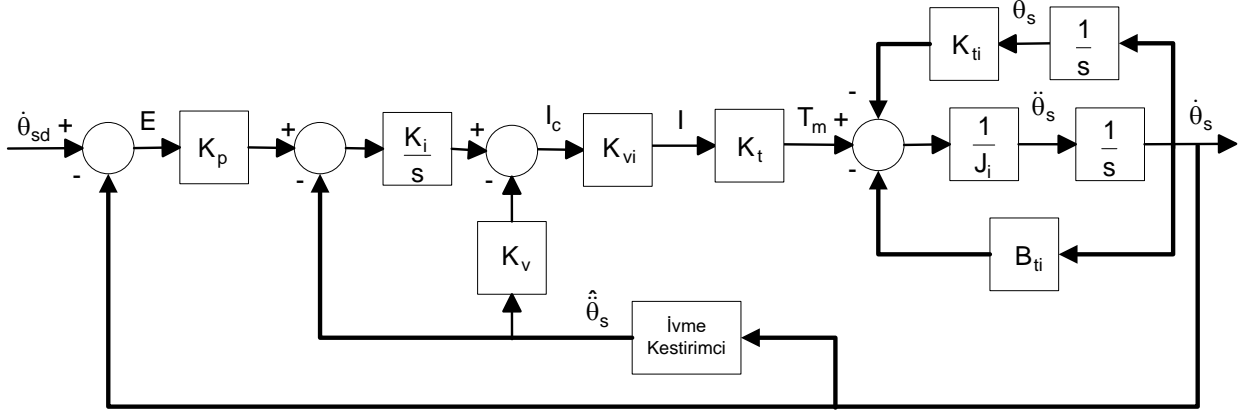
İKİ DÖNGÜLÜ KARDAN BÜTÜNÜ DENETİM SİSTEMLERİ



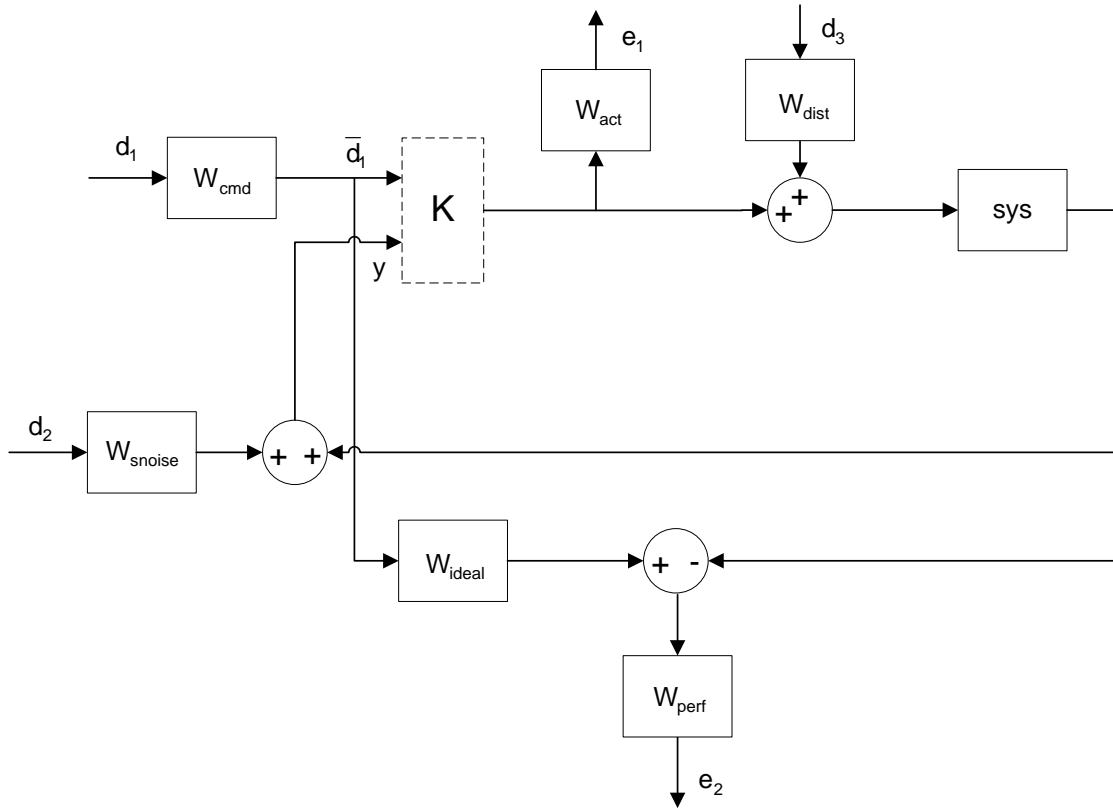
Şekil 7: İki Döngülü Denetim Sistemi Yapısı

Şekil 1'de verildiği gibi iç bileziğe bütünleşmiş olan görüntüleme sisteminin (kameranın) daha hassas olarak konumlanabilmesi amacıyla göz önüne alınan ve genel yapısı Şekil 7'deki blok diyagramında gösterilen iki döngülü denetim sistemi yapısında, içteki denetleyici bileziğin açılma hızını belirlenen bant genişliğine (dolayısıyla yerleşme zamanına) göre sınırlamaya çalışırken, dıştaki denetleyici iç bileziği istenen açısal konuma getirmeye çalışmaktadır. Bu çalışmada, "s" harfi Laplace değişkenini

temsil etmek üzere, $G_c(s)$ ile gösterilen dış döngü denetleyicisi klasik PI (oransal ve tümlsel) denetim kuralına göre $G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ şeklinde oluşturulurken, $G_v(s)$ ile sembolize edilen ve hız denetim sistemi olarak adlandırılan iç döngüde, blok diyagramları sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da verilen klasik PIV denetleyicisi ile iç bilezik üzerine gelen bozucu girişlerin etkisini en aza indirecek şekilde tasarlanan gürbüz denetleyici (H_2 veya H_∞ normuna göre) ele alınmıştır.



Şekil 8: PIV Denetim Kuralına Göre Oluşturulan Açısal Hız Denetim Sistemi



Şekil 9: Gürbüz Denetleyicili Açısal Hız Denetim Sistemi Blok Diyagramı

Şekil 9'da yer alan d_i ($i=1, 2$ ve 3), e_j ($j=1$ ve 2), W_k ($k=\text{cmd, act, dist, perf, ideal}$ ve noise) ve "sys" ibareleri sırasıyla girdi, hata, ağırlık fonksiyonu ve plant transfer fonksiyonunu göstermekte olup Şekil 8 ile tanımlanan PIV kurallı açısal hız denetim sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\dot{\theta}_s}{\dot{\theta}_{sd}} = \frac{n_1 s + n_0}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (5)$$

BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ

Tablo 1. Benzetimlerde Kullanılan Sayısal Değerler

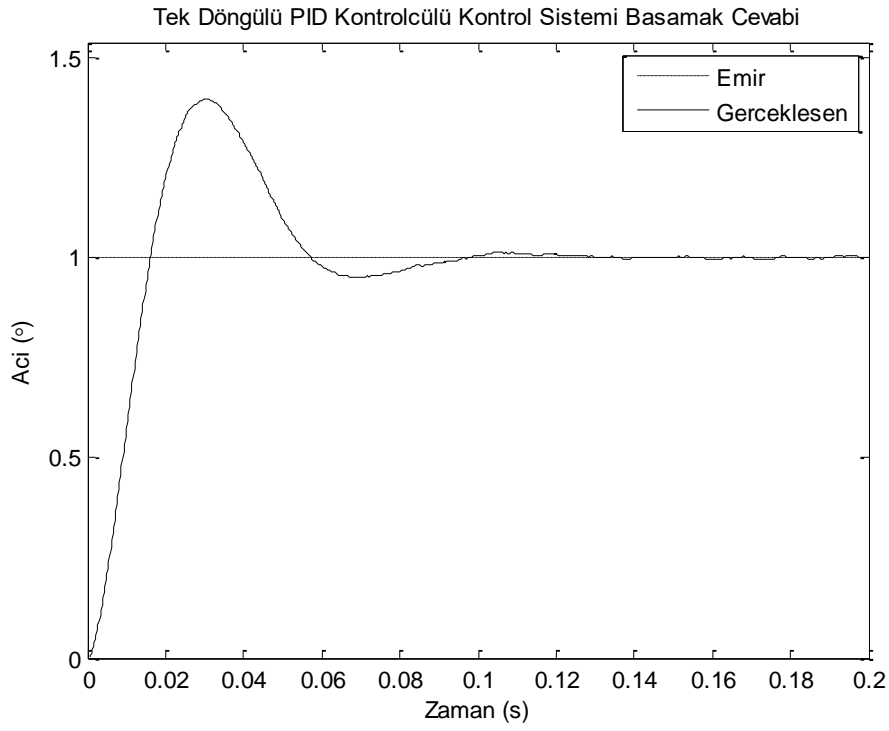
Parametre	Sayısal Değer
$B_{ti}(N \cdot m \cdot s/rad)$	$4,27 \times 10^{-2}$
$f_c(Hz)$	15
$f_s(Hz)$	60
$J_i(kg \cdot m^2)$	$3,493 \times 10^{-3}$
$K_{vi}(A/V)$	1
$K_t(N \cdot m/A)$	0,159
$K_{ti}(N \cdot m/rad)$	1,189
$T_a(s)$	1/4000
$T_s(s)$	1/400
$T_v(s)$	1/4000
Benzetim örnekleme frekansı (Hz)	4000
Çözücü çözünürlüğü (bit)	16

Tasarlanan denetim sistemlerinin başarımlarının incelenmesi amacıyla MATLAB® Simulink ortamında bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Modellerde kullanılan parametrelerin sayısal değerleri ilgili bileşenlerin teknik dokümanlarından alınan verilerin yanı sıra gerçekleştirilen sistem tanımlama çalışmalarından da elde edilmiş ve toplu halde Tablo 1’de verilmiştir. Benzetim modelleri, iç bilezik kablolarının direngenliğindeki değişim miktarı ve ölçerler üzerindeki gürültü seviyesini de içermektedir. Benzetimlerde, iç bilezik için izin verilebilir durağan durum hatasının 1 mrad olması gerektiği göz önüne alınmıştır. Ayrıca, yukarıda anlatıldığı üzere sürekli durum için tasarlanan denetim sistemi modellerini gerçek zamanlı benzetimlerde kullanabilmek için modeller, Tustin yöntemi kullanılarak ayrık zamana çevrilmiştir [Behnam, 2005].

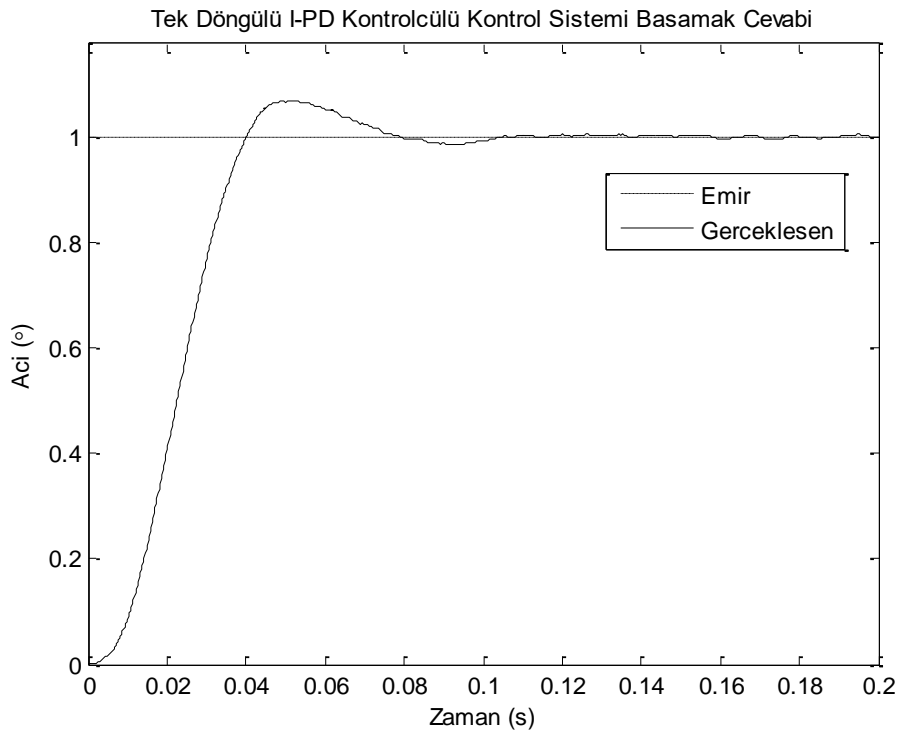
Çalışma dahiline göz önüne alınan tek ve iki döngülü denetim sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sayısal veriler Tablo 2’de sunulmaktadır. Bilgisayar benzetimleri sonucunda ele alınan kardan bütününün denetiminde kullanılan yöntemlerden örnek olarak seçilenlerin birim basamak cevapları de Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmektedir.

Tablo 2. Ele Alınan Denetim Sistemlerinin Ölçer Gürültüsü Altındaki Benzetim Sonuçları

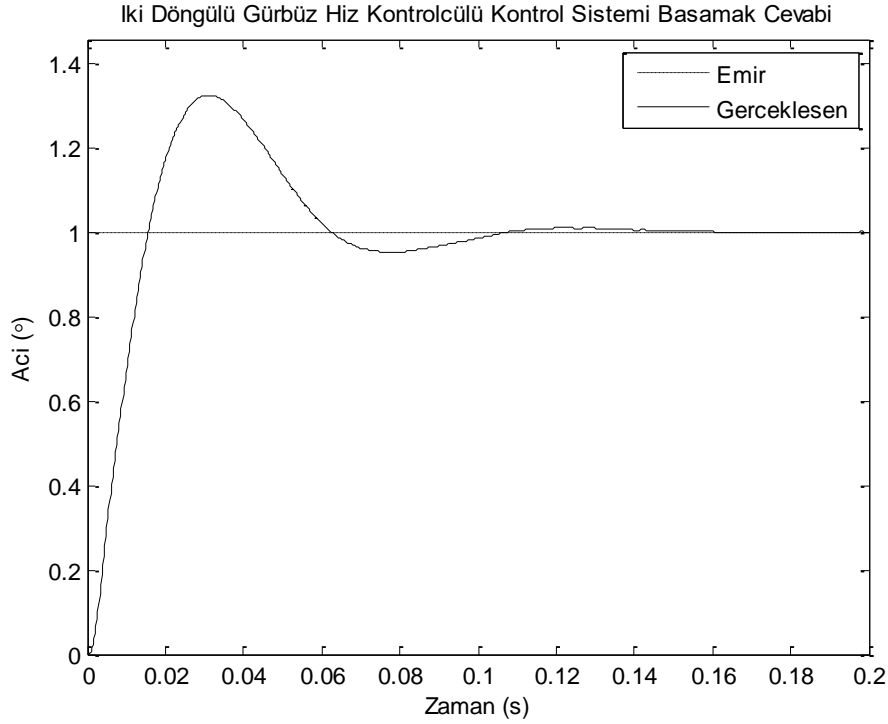
Denetleyici Tipi	En Büyük Akım Tüketimi (A)	En Büyük Aşma (%)	Yerleşme Zamanı (ms)	Durağan Durum Hatâsı (mrad)	En Büyük Açısal Yerdeğiştirme (μ rad)
Tek Döngülü Denetim Sistemi					
PID	9,862	39,8	68,75	0	104,720
I-PD	9,874	7,0	92,00	0	104,720
PIV	10,030	7,0	94,50	0	104,720
Durum Geribeslemeli	3,329	0,4	80,25	0,669	33,161
İki Döngülü Denetim Sistemi					
PIV	12,850	53,1	57,50	0	80,285
Gürbüz	2,786	32,1	77,00	0	50,615



Şekil 10: Tek Döngülü PID Denetleyicili Sistemin Ölçer Gürültüsü Altındaki Birim Basamak Cevabı



Şekil 11: Tek Döngülü I-PD Denetleyicili Sistemin Ölçer Gürültüsü Altındaki Birim Basamak Cevabı



Şekil 12: İki Döngülü Gürbüz Hız Denetleyicili Sistemin Ölçer Gürültüsü Altındaki Birim Basamak Cevabı

DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Tablo 2'deki sayısal sonuçlara göre en büyük aşma parametresi bakımından tek döngülü denetim sistemlerinden daha kötü durumda gözüken iki döngülü yapılar, ele alınan diğer kıstaslar bakımından avantajlı olarak gözükmemektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen modelleme ve benzetim çalışmaları sonucunda, içte açısal hız dışta ise açısal konum denetimi yapan iki döngülü bir denetim sisteminin kullanılmasının uygun olduğu gözlenmiştir. Yapılan kaynak taramaları da göz önüne alındığında, açısal hız denetimi için en uygun seçeneğin, yine Tablo 2'de yer alan veriler doğrultusunda, PIV'li şemaya göre karşılaştırma kıstasları bakımından çoğunlukla daha düşük sonuçlar ortaya çıkaran gürbüz denetleyicili denetim sistemi olduğu görülmektedir. Açısal konum denetimi içinse, PI denetleyicili basit bir yapı kullanılabilir. Diğer taraftan, ölçerler üzerindeki gürültü seviyesinin mutlaka azaltılması gerektiği ve bu çalışmada "düşük" olarak tanımlanan değerlerin altına düşürebilmek için uygun yalıtımın yapılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- Baek, J. H., Kim, J. C. ve Choo, S., 2005. *Modeling on a gimbal with an antenna*, Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Machines, ABD, s. 1035-1040.
- Behnam, M. H., 2005. *Flexible scheduling for real time control systems based on jitter margin*, Yüksek Lisans Tezi, Mälardalen Üniversitesi, İsveç.
- Murphy, K., Goldblatt, S., Warren, J., Chapman, R., Hemler, J., Mitchell, C. ve Moe, G., 1999. *Pointing and stabilization system for use in a high altitude hovering helicopter*, SPIE, Proceedings of the Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing XIII, ABD, Cilt. 3692, s. 23-32.
- Özkan, B., 2019. *Tek ve iki döngülü denetim sistemlerinin dönel bir tabla bütünü üzerindeki başarımlarının karşılaştırılması*, 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, Hatay, Türkiye.
- Smith, B. J., Schrenk, W. J., Gass, W. B. ve Shtessel, Y. B., 1999. *Sliding mode control in a two axis gimbal system*, Proceedings of IEEE Aerospace Conference, s. 457-470.
- Yuejin, Z., 1996. *New image-stabilizing system*, SPIE Proceedings, Cilt: 2739, s. 319-323.
- Zarchan, P., 1994. *Tactical and Strategic Missile Guidance*, Cilt. 157, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Washington DC, ABD.