

## Bir Sarkaç Sisteminde Video Geri Beslemesi ile Gerçek Zamanlı Denetim

Aydın Eresen<sup>1</sup>, Nevrez İmamoğlu<sup>1</sup>, Mehmet Önder Efe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara  
{aeresen,nimamoglu,onderefe}@etu.edu.tr

### Özetçe

Otomatik kontrol sistemlerinin önemli uygulama alanlarından biri görsel bilginin değerlendirilmesi ve bu bilginin kontrol hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmasıdır. Bu bildiri de bir sarkaç sistemi kullanılarak sistemin tek ekseninde fırçasız motor ve pervane itkisi ile hareketi sağlanmış, sarkaç çubuğu üzerine sabitlenen bir mini kamera vasıtasıyla dönme eksenine dik düzlemde bulunan bir cismin video üzerinde önceden tanımlanmış bir bölgeye yerleşmesi problemi ele alınmıştır. Sistemin alt düzey kontrolü bir kontrol kolu<sup>1</sup> üzerinden elle yapılmış, ardından integral kontrolör ve bulanık mantık kontrolörü denenmiştir. Elde edilen bulgulara göre bulanık mantık kontrolörünün başarılı müspet bulunmuştur.

### 1. Giriş

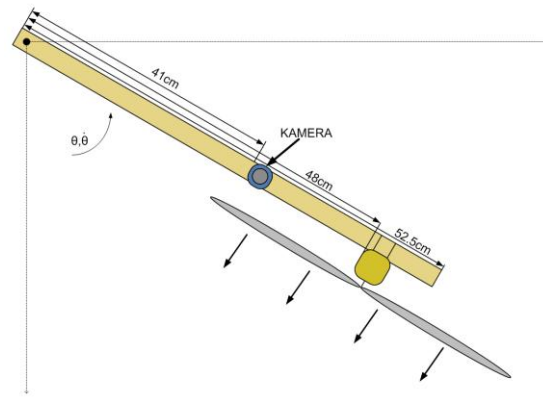
Sarkaç sistemleri birçok bilimsel esere konu olmuş, literatürde özellikle ters sarkaç üzerine çokça bulgular sunulmuştur [1-3]. Bunlar arasında Kremayer dişlisi üzerinde hareket eden, dönel biçimde olan veya kayışlı olan sarkaç sistemleri çokça karşılaşılan deneysel tiplerdir. Bu çalışma, özünde video geri beslemesinin kullanımını amaçladığı için alt düzey kontrol problemi olarak standart sarkaç sistemi üzerinde durulmuştur. Şekil 1'de bahsi geçen bir sarkaç sisteminin temsili resmi, Şekil 2'de de gerçekleştirilen sistemin fotoğrafları verilmiştir. Sistemin dinamik modelinin (1) denklemindeki gibi olduğu Euler türetimi ile bulunabilir.

$$\ddot{\theta} = a \sin(\theta) + bu - f(\dot{\theta}) \quad (1)$$

Her ne kadar sistemin dinamik modeli üzerinden kontrol işlevini gerçekleştirmek mümkünse de bu çalışmanın neticeleri dinamik model üzerinden kurgulanmamış, hareketi niteleyen dilsel değişkenler üzerinde durularak sistem olabildiğince görsel algıya dayalı hale getirilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşımın benimsenmesinin temel nedeni burada çalışma koşulları belirlenen sistem bileşenlerinin fevkalade karmaşık diferansiyel gösterilime sahip bir insansız hava aracında kullanılmasının amaçlanmasıdır. Burada kullanılan düzende kontrol, düzeneğin ucunda bulunan fırçasız motor ve pervane ile sağlanmaktadır. Pervaneden alınan itki ile sistem istenen konuma getirilebilir ve bu noktada tutulabilir.

Gerçek zamanda videonun edinimi için sarkacın üstüne bir mikro kamera monte edilmiştir. Alınan görüntü bilgisayar ortamında işlenerek cismin bulunduğu nokta belirlenmekte ve cismi video görüntüsünde merkeze alabilmek için gerekli kontrol sinyali üretilmektedir. Makalenin sunumu şu şekildedir: 2. bölümde sistemin bileşenleri, 3. bölümde sarkaç

sisteminin elle kontrolü, 4. bölümde görüntü tabanlı kontrolde kullanılan görüntü işleme metodları, 5. bölümde kullanılan kontrol teknikleri, 6. bölümde ise gerçek zamanlı deneysel sonuçlar sunulmuştur.



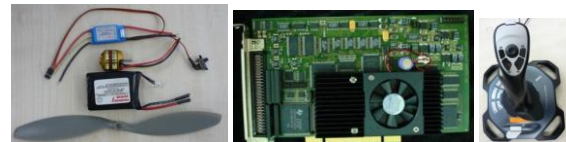
Şekil 1. Sarkaç sisteminin temsili çizimi



Şekil 2 – Deneysel Düzeneği

### 2. Sistemin Bileşenleri

Düzenekte, AXI 2212/34 fırçasız motoru kullanılmıştır. Bu tür motorlar hafif model uçaklarda yüksek tork özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Motorun rotoruna 10x4.7 ölçülerinde bir pervane monte edilerek itki mekanizması tamamlanmıştır. Kullanılan motor JETI elektronik hız kontrolörü (EHK) ile sürülmektedir. Şekil 3'de sistemin bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3 - Sistemin bileşenleri

Kullanılan motorun kontrolü kabul edilebilir aralığı Şekil 4'te gösterilen DGM<sup>2</sup> sinyali vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu

<sup>1</sup> İng. Joystick

<sup>2</sup> İng. Pulse Width Modulation (PWM)

sinyali üretmek ve sisteme ilişkin bilgilerin kontrol bilgisayarında görüntülenebilmesi için DSpace® kontrol kartı ve *Control Desk* yazılımı kullanılmaktadır. Kart kendi üzerinde işlemci bulundurmaktadır ve bilgisayar ortamında kurgulanan kontrolörlerin uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada DSpace birimi motoru süren DGM sinyalinin üretilmesi ve veri okumak için kullanılmıştır.



Şekil 4 - DGM Sinyali

Şekil 4'te gösterilen periyodun, 1ms ve 2ms aralığına tekabül eden %5'i ile %10'u DGM sinyalinin kabul edilebilir aralığıdır. Motora giden DGM değeri de bu oranlarla ifade edilmektedir. 0.05 değeri %0 güç anlamına gelmektedir, 0.1 değeri ise %100 gücü sağlamaktadır. Uygulamamızda 0.05-0.1 aralığı, sınırları 0 ve 255 olan 256 eşit parçaya bölünerek kullanılmıştır.

DGM sinyalinin (Bkz. Şekil 4) kabul edilebilir aralığı 0.05 ile 0.1 olarak belirtilmiştir. Şekil 8'de ve Şekil 11'deki grafiklerde gösterilen DGM sinyali şekillerinde de belirtildiği gibi 0-255 aralığında tam sayılardır. Bu değerler motoru sürmek için 0.05-0.1 aralığına çevirilmektedir.

Motor sisteminin enerjisi lityum-polimer tipte pillerle sağlanmıştır. Test düzeneğinde lityum-polimer bataryanın tercih edilme nedeni ise kullanılan motorun yüksek akım ihtiyacını çok fazla gerilim düşümüne uğramadan sağlayabilmesidir.

### 3. Sarkaç Sisteminin Elle Kontrolü

Sarkacın el ile kontrolünü sağlamak için Şekil 3'te gösterilen *Logitech Force 3D Pro* isimli kontrol kolu kullanılmıştır. Bu donanım 3 yön eksenli, hızlanmayı sağlayan bir eksen ve 12 tuşa sahiptir. Kontrol kolundaki 2 tuş yardımıyla el ile kontrol ve görüntü tabanlı otonom kontrol arasında geçiş sağlanmıştır. El ile kontrolde motora verilecek gücü belirlemek için kontrol kolu üzerindeki hızlanma eksenli kullanılmıştır. El ile kontrolü sağlamak için kontrol kolu önce bilgisayara bağlanmıştır, kontrol kolundan bilgisayara alınan veriler ise seri haberleşme kullanılarak Dspace® kartına gönderilmiştir.

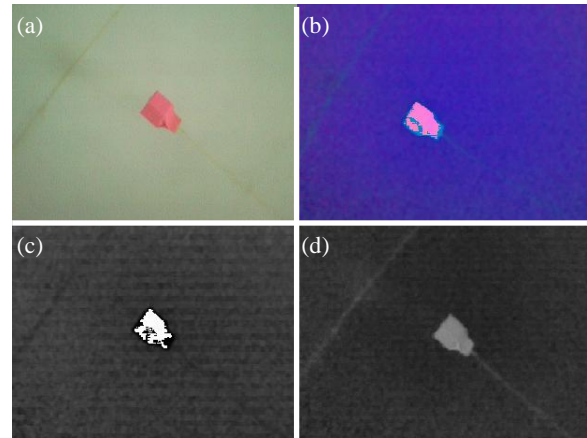
Kontrol kolu verilerinin bilgisayara okunması ve DSpace kartına seri bağlantı kurulması için gerekli yazılım *Microsoft® Visual Studio.Net® 2008*'de C# dili kullanılarak oluşturulmuştur. Hız ekseninden alınan değer DSpace kartında işlenerek ilgili DGM sinyaline dönüştürülmüş, böylelikle motorun istenen açıda tutulması sağlanmıştır. Bu işlemler *Matlab/Simulink®* kullanılarak modellenmiş ve sonrasında DSpace kartına gömülerek çalıştırılmıştır.

### 4. Görüntü İşleme Yöntemleri

Görüntü işleme birçok farklı renk uzayında gerçekleştirilebilmektedir. Görüntü işlemede en yaygın olan renk

uzayı RGB'dir<sup>1</sup>. RGB renk uzayında ortamda bulunan renkler kırmızı, yeşil ve maviden oluşan üç temel rengin farklı oranlarda karıştırılmasıyla oluşmaktadır [4]. RGB renk uzayı kullanıldığında, ortamdaki ışık yoğunluğu ve ışıktaki değişim görüntüdeki bilginin çıkarsanmasında güçlüklerle sebep olmaktadır. RGB renk uzayından farklı olarak kullanılan diğer renk uzaylarından birisi de HSV<sup>2</sup>'dir [4]. HSV renk uzayında ortamda bulunan renkler, RGB renk uzayından farklı olarak renk özü, doygunluk ve parlaklık olarak tanımlanmaktadır. Bu sebepten dolayı HSV renk uzayında ışık değişimleri kolaylıkla tanınabilmekte ve görüntü işleme sırasındaki zorluklar ortadan kaldırılabilmektedir.

Kullanılan test düzeneğinde arka plan beyaz olarak kabul edilmiş ve farklı ışık yoğunluklarında denemeler yapılmıştır; sonuç olarak HSV renk uzayı kullanımı uygun görülmüştür. Mikro kameradan alınan görüntü HSV renk uzayına çevirilmiş ve çevirilen görüntü HSV'nin üçüncü renk boyutu olan parlaklık kullanılmadan elde edilen görüntü grilik ölçeğine çevirilmiştir. Şekil 5'te RGB görüntüsü, RGB'den HSV formatına dönüştürülen görüntünün RGB uzayındaki görünümü ve yapılan uygulamada kullanılan renk uzayı gösteriminin iki bileşeni verilmiştir.



Şekil 5 – (a) RGB uzayında temsil, (b) HSV değerlerinin RGB uzayında dönüşüm yapılmadan yorumlanması, (c) HSV'nin renk özü (H) parçası, ve (d) HSV'nin doygunluk (S) parçası

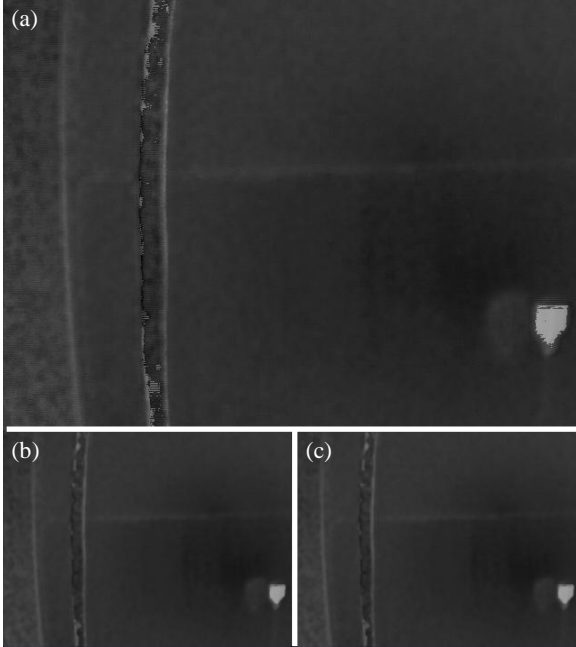
Grilik ölçeğine çevrilen görüntünün en-boy değerleri, Gauss piramidi yönteminin alt örnekleme özelliği kullanılarak azaltılmıştır [4-5]. Piramidin alçak geçiren süzgeç özelliği sayesinde de görüntü iyileştirilmiştir. Sistemden elde edilen örnek bir görüntünün işlem öncesindeki ve sonrasındaki sonuçları Şekil 6'da gösterilmektedir. Gauss piramidi işleminin sonucunda elde edilen görüntüdeki nesnenin daha iyi tanımlanabilmesi için görüntü ard arda 2 medyan süzgeçten geçirilmiştir [4]. Bu işlemin sonunda elde edilmiş olan görüntü, gürültülerden arındırılmış ve boyutu küçültülmüştür. Uygulanan Gauss Piramidi ile görüntüdeki nesnenin daha iyi tanımlanması sağlanmıştır.

Medyan filtrelerden geçirilen görüntü ışık ve gürültü etkilerinden dolayı iyi bir analiz görüntüsü değildir. Bu görüntüdeki nesnenin özelliklerini net olarak elde etmek için görüntü siyah görüntüye çevrilirken Yerel Eşik Değer (YED) yöntemi kullanılmıştır[4,6-8]. YED yöntemi sayesinde

<sup>1</sup> İng. Red-Green-Blue

<sup>2</sup> İng. Hue, Saturation, Value

ışık etkileri sonucu oluşan nesne gibi algılanabilecek bölgeler (Bkz. Şekil 7(b)) arka plan olarak tanımlanır. Yerel eşik değeri yönteminin temelinde, görüntünün farklı ışık yoğunluklarına sahip bölgelerinde farklı eşik değerleri kullanılarak iki değerli görüntüye dönüştürülmesi vardır. Işıktaki düzensizliğin bertarafına bir örnek Şekil 7’de gösterilmiştir. Elde edilen nesnenin ağırlık merkezi belirlenmiş ve görüntü üzerinde bu nokta işaretlenmiştir (Bkz. Şekil 7(a)).



Şekil 6 - Gauss Piramit (a)HSV’den gri tona çevrilmiş resim (b)Gauss Piramidi sonucu oluşan görüntü (c)Medyan süzgeç sonucu oluşan görüntü

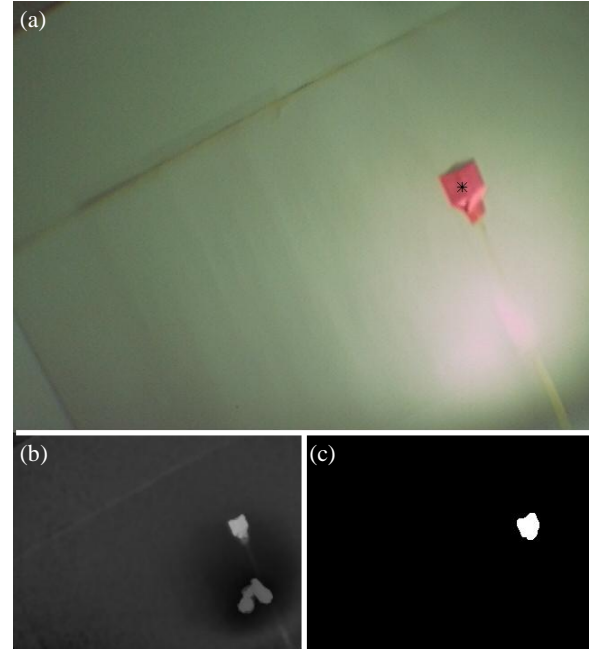
## 5. Kontrol Teknikleri

Görüntü analizi sonucunda elde edilen çıkış değeri bölüm 4’te belirtildiği gibi cismin ağırlık merkezini vermektedir. Uygulaması yapılan görüntü tabanlı kontrol çalışmasında kamera görüntüsü üzerinde belirlenen ağırlık merkezi koordinatları cismin görüntü üzerinde istenen bir noktaya getirilmesi için bilinmesi gereken geri besleme bilgisidir. Kapalı çevrimde integral kontrolör ve bulanık mantık kontrolörü test edilmiştir ve bu yöntemlerin gerçek zamanda uygulanmasında sistemin dinamik modelinden istifade edilmemiştir.

Gerçeklenen her iki yaklaşımda da kapalı çevrim kontrol sisteminin amacı, cismin görüntüde x ekseninde orta noktaya gelmesini sağlamaktır. Bunun nedeni ise sarkaç sisteminin 1 hareket serbestisine sahip olmasından dolayı sabit duran cismin görüntü üzerinde bir yay üzerinde hareket etmek zorunda olmasıdır. Bir hareket serbestisi ile iki eksende yerleşim sağlanamayacağından dolayı tek eksende yerleştirme problemi ele alınmış ve eksen çözünürlüğünün daha yüksek olmasından dolayı -yatay eksen olan- x ekseninde merkeze alma işlemi amaçlanmıştır. Görüntü tabanlı kontrol işlemleri uygulanan iki kontrol türü için de saniyede yaklaşık olarak 7 görüntü ile örneklenmiştir.

## 5.1. İntegral Kontrolör

Sarkaç sistemi ikinci dereceden bir sistemdir ve literatürde bu tip sarkaç sistemlerinin geri beslemeli kontrolünde Oransal İntegral Türevsel (PID) tipte kontrolörlerden faydalandığı bilinmektedir [9]. Çeşitli deneyler sonucunda en uygun PID tipinin salt integral etkisi içeren kontrolör olduğu sonucuna varılmış ve integral katsayısının seçiminde de sistemin cevabının kabul edilebilirliği göz önüne alınarak deneme yanılma yoluna gidilmiştir.



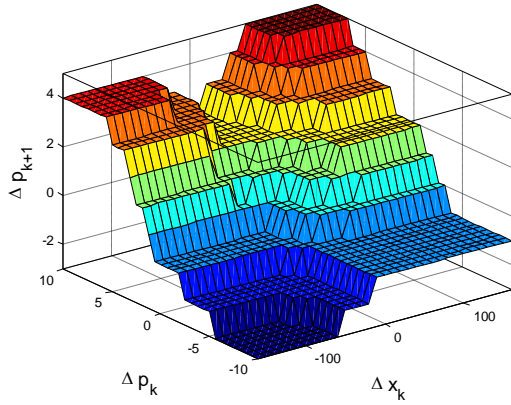
Şekil 7 – Yerel Eşik Değer Yöntemi (a)RGB formatındaki görüntü (b)Medyan süzgeç çıkışı (c)YED yöntemi ile elde edilen görüntü

Sistemde hata hesaplanırken cismin merkezden uzaklığı esas alınmış, sistemin cevabı ise ataletsel ölçme birimi ile gözlemlenerek sarkacın açısı gerçek zamanda kontrol bilgisayarına alınmıştır. Sabit cisim görüntüde merkeze gelirken sarkaç sisteminin açısının da sabit bir değere yakınsadığı görülmüştür. Sistemdeki hatanın değişimi ve ataletsel ölçme biriminden alınan açı bilgisi Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekle göre üst çizgede değeri 0 ile 255 arasında değişen DGM sinyali ( $p$ ) gösterilmekte,  $T_s$  ise örnekleme periyodunu temsil etmektedir. Cisim sabit olduğu için sistem belirli bir açıda cismi ortalamakta ve yerçekimi etkisini yenerek bu açıda kalabilmek için motor itkisini sıfırdan farklı sabit bir değerde tutması gerekmektedir. Ortadaki çizgede ise resim merkezi ile tespit edilen cisim merkezi arasındaki fark -sadece x eksenini için- gösterilmektedir. Sistem çalışmaya başladığında cisim görüntü dışındadır ve cisim görüntü içine girene dek geri besleme bilgisi 0, istenen nokta ise 160. piksel olduğundan başlangıç hatası büyük olur, bu nedenle şekilde de görüldüğü üzere nesnenin algılanması/tanınması esnasında hızlı bir geçiş gözlemlenmektedir. En altta ise istenen görüntünün sarkacın  $\theta \approx 45^\circ$  açısında iken elde edildiği görülmektedir. Her ne kadar elde edilen kontrolör basit ve bulgular müspet de olsa

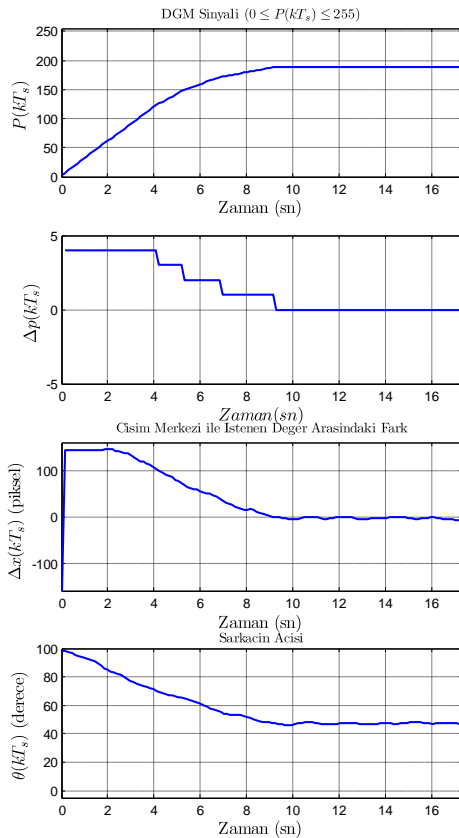




Şekil 11’de sunulan neticeler integral kontrolör ile elde edilen neticelerle kıyaslandığında bulanık kontrolörün yerel kararların tümleştirilmesi esasına dayanmasından dolayı olay uzayında karar çözünürlüğünün artmasına, dolayısıyla başarımın ve karmaşıklığın da artmasına yol açmıştır. En üst çizgede DGM değeri, ikinci çizgede bulanık kontrolör çıkış sinyali, üçüncü sırada piksel olarak hata değeri ve en altta da nesneyi x yönünde ortalayan sarkaç açısı gösterilmiş, salınımların azaldığı, geçici rejimin hızlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 10 - Bulanık Kontrolör Çıkışı



Şekil 11 - Bulanık Kontrolör İle Elde Edilen Sonuçlar

## 6. Sonuçlar

Görüntü tabanlı gerçek zamanlı kontrol, otomatik kontrol bilimi açısından fevkalade önem arz eden, ve mikroişlemci ve video edinme teknolojisinin hızla gelişmesiyle gün geçtikçe uygulanabilirliği çeşitlenerek artan bir alandır. Bu çalışmada ileriye dönük bir görüntü tabanlı kontrol projesinin ön bulguları rapor edilmekte ve geri beslemeli sistemin tüm bileşenlerinin uygun çalıştığını göstermek için bir sarkaç sistemi üzerine monte edilen kamera görüntüsü üzerinde bazı performans ölçütlerinin karşılanabildiği gösterilmektedir.

Sarkaç sisteminin tek hareket serbestisine sahip olması ve kameranın bu sarkaç sistemi üzerine sabitlenmiş olması, görüş alanı içerisinde sabit duran bir cismin kamera hareket ettikçe videoda yay biçimli bir eğri üzerinde hareket edebileceğine işaret eder. Bu durumda cisim kamera görüntüsü üzerinde bir yörüngeye kısıtlanır ve başarım ölçütleri bu yörünge üzerinden tanımlanır. Bu çalışmada çözünürlüğün daha yüksek olması dolayısıyla aranan cismin x eksenı yönünde ortaya alınması problemi çalışılmıştır.

Bildiriye çeşitli deneyler sonucunda integral kontrolör ve bulanık kontrolör ile elde edilen neticeler konmuş, buna sebep olarak da dinamik modelin geliştirilmesine gerek kalmadan görsel algılarla kapalı çevrim kontrolün gerçekleşmesi üzerinde durulmuştur.

Sunulan sonuçlara göre her ne kadar işlemsel karmaşıklığı daha fazla da olsa bulanık mantık kontrolörünün daha iyi başarım gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çalışmada verilmemesine karşın cismin hareketli olduğu durumlar için de deneyler yapılmış ancak sistemin hızlı hareketi algılamakta ve x-ekseninde ortalayarak takip etmekte güçlüklerinin olduğu teşhis edilmiştir. Bu durumun en temel sebebinin ise negatif kontrol sinyalinin uygulanamaması olduğu yargısına varılmıştır.

Yazarların ileriye dönük amacı bu neticeleri geliştirerek dönerkanat tipinde bir insansız hava aracıyla otonom yörünge takibi ve görüntüleme yapabilmektir.

## 7. Teşekkür

Bu çalışma 107E137 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar TOBB ETÜ İnsansız Hava Araçları Laboratuvarına ve TOBB ETÜ Kütüphanesine teşekkür eder.

## 8. Kaynakça

- [1] K.M. Passino, S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison-Wesley Longman Inc., Menlo Park, California, pp. 23-99, 1998.
- [2] S.W. Nawawi, M.N. Ahmad, and J.H.S. Osman, “Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot”, *International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering*, Vol.2, No.1, pp. 70-76, 2008.
- [3] A. Shimada, N. Hatakeyama, “High-Speed Motion Control of Inverted Pendulum Robots”, *9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 307-310, May, 2006.
- [4] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, *Digital image Processing*, pp. 322-335, 394-451, 461-474 & 738-763, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2008.

- [5] P.J. Burt, E.H. Adelson, "The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. Com-31, No. 4, pp. 532-540, April, 1983.
- [6] A.E. Savakis, "Adaptive Document Image Thresholding Using Foreground and Background Clustering", *Proceedings of International Conference on Image Processing ICIP*, Vol. 3, pp. 785-789, 1998.
- [7] Q. Huang, W. Gao, W. Cai, "Thresholding Technique with Adaptive Window Selection for Uneven Lighting Image", *Pattern Recognition Letters*, 26, 801-808, 2005.
- [8] P.L. Rosin, T. Ellis, "Image Difference Threshold Strategies and Shadow Detection", *Proceedings of the 6th British Machine Vision Conference*, Vol.1, pp. 347-356, 1995.
- [9] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, pp. 62-67 & 281-288, Prentice Hall, 4th Edition, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.