



Vektör Alan Kılavuzu Yöntemi ile Görsel Çizgi Takibi İçin İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Yalpanın Model Öngörülü Denetimi

Model Predictive Control Gimbal on Unmanned Aerial Vehicle for Visual Line Tracking With Vector Field Guidance

Aytaç Altan¹, Kerem Köksal², Rıfat Hacıoğlu^{1*}

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, görsel çizgi (rota) takibi için İnsansız Hava Aracı (İHA) üzerinde bulunan 3 eksenli yalpanın dış bozucu etki altında model öngörülü denetimi gerçekleştirilmektedir. İHA ile görsel çizgi takibi için Tanjant Vektör Alan Kılavuz (TVAK) yöntemi kullanılmaktadır. Dış ortam ve kapalı ortamda yapılan testlerde, ön tanımlaması yapılan çizginin görüntü işleme algoritmalarıyla tespiti ve sonrasında TVAK yöntemi kullanılarak rota takip işlemi gerçekleştirilmektedir. İHA'nın alçak ve yüksek irtifa uçuşlarında rota takibi başarımları deneysel olarak gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar PID denetime sahip yalpadan elde edilen veriler ile karşılaştırılmaktadır. Dış bozucu etki altında TVAK yöntemi ile rota takibi için İHA üzerindeki 3 eksenli yalpanın MPC denetiminde PID ile denetime göre başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Görsel çizgi takibi, İnsansız Hava Aracı (İHA), Model öngörülü denetim, Tanjant Vektör Alan Kılavuzu (TVAK), Yalpa denetimi

Abstract

In this study, Model Predictive Control (MPC) is performed under the external disturbance effect of the 3-axis gimbal on the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for visual line tracking. The Tangent Vector Fields Guide (TVFG) method is used for visual line tracking with UAV. In the tests performed in the outdoor and indoor environments, the pre-defined line is detected with the image processing algorithms and then the line tracking process is performed using the TVFG method. The visual line tracking success rates in the low and high altitude of UAV flight are observed experimentally. The obtained results are compared with data obtained by the gimbal having PID control. The successful results are obtained with MPC control according to PID control of 3 axis gimbal on UAV under external disturbance for visual line tracking using TVFG method.

Keywords: Visual line tracking, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Model Predictive Control (MPC), Tangent Vector Field Guidance (TVFG), Gimbal control

1. Giriş

İçinde insan olmayan, uzaktan kumanda veya otonom olarak yönlendirilen, faydalı yükleri ana gövdesine yüklenip görev sonu geri dönerek iniş yapabilen İHA'lar (USA Government 2005), son yıllarda hem sivil hem askeri alanda kullanılarak insanlı sistemlere göre birçok yönden üstünlük sağlamaktadır. İlk başlarda sadece operatörler tarafından kontrol edilebilen İHA'lar, zamanla insan bağımlılığını azaltacak şekilde

gelişme göstermiştir. Kullanım amacına göre İHA'nın ya gideceği güzergâhı kendi başına hesaplayabilmesi ya da daha önceden belirlenen güzergâha sadık kalabilmesi gerekmektedir (Rasmussen vd. 2005, Chung vd. 2006, Geiger vd. 2006). İHA'nın gideceği güzergâhı planlama işini optimum kontrol problemi olarak ele alıp, sınır koşullarını, kontrol sabitlerini ve maliyet kriterlerini inceleyen çalışmalar (Stone ve Clarke 2001, Winstrand 2004) ile MPC ile çizgi takibine ilişkin (Böck ve Kugi 2014, Backman, Oksanen ve Visala 2012) çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, MPC tabanlı İHA çizgi takibi için kullanılan yalpanın denetimi amaçlanmaktadır.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hacirif@beun.edu.tr

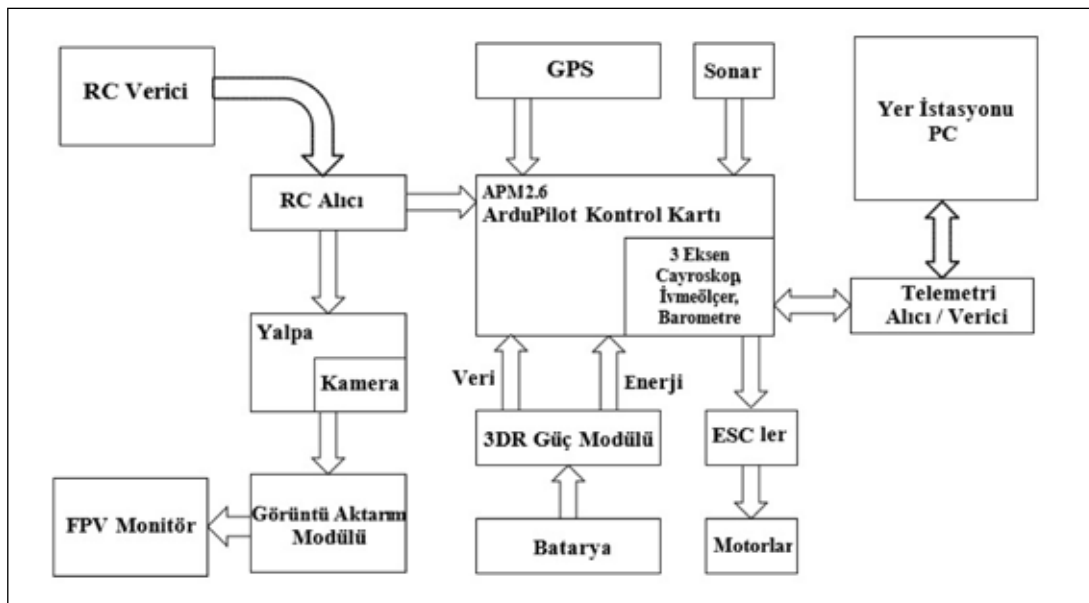
İHA'ların belirlenen görevleri kısa zamanda etkili bir biçimde yerine getirmeleri için üzerlerinde bulunan sistemlerin denetimlerinin etkili olmaları gerekmektedir. Bu durumda İHA üzerinde bulunan yalpanın denetimi oldukça önem taşımaktadır. Bu çalışmada, önceden bazı parametreleri tanımlanmış bir yolu görsel olarak algılayarak bulan ve TVAK (Nelson vd. 2007) yöntemi ile yol üzerinde seyrine devam eden İHA'nın üzerinde bulunan 3 eksenli yalpanın dış bozucu etki altında MPC denetimi yapılmaktadır.

Çeşitli yapıda ve boyutta pek çok İHA türü bulunmaktadır. Bu çalışmada dört pervaneli İHA helikopter kullanılmaktadır. Dört pervaneli İHA helikopterler, dört farklı motordan oluşmakta ve quadrotor, quadro-motor, quad-helikopter gibi farklı isimlerle de anılmaktadır. Normal helikopterlerde olduğu gibi, her bir pervane için dönüş kuvveti helikopter gövdesinde sapmaya (yaw) yol açan momentler oluşturmakta ve helikopteri dengesiz hale getirmektedir. Bu nedenle, helikopteri dengeli hale getirmek, ileri-geri veya sağa-sola süzülmesini engellemek için motor hızlarını kontrol eden denetim sistemleri kullanılmaktadır. Buna rağmen çok pervaneli helikopterlerde süzölmeleri engelleyip dengeli bir uçuş sağlamak tek pervaneli helikopterlere göre daha kolaydır. Çünkü motor konumlarının dengeli seçilmesi sayesinde pervane dönüş kuvvetleri birbirini yok edebilmektedir. Uygun denetim sistemleri ile dört pervaneli helikopterler diğer uçan kanatlı araçlara göre daha fazla manevra kabiliyetine sahip oldukları için avantajlı duruma gelmektedirler. Kalkış ve havalanmak için dört motor birden kullanılacağından daha küçük motor ve pervaneler ile imal edilebilirler. Şekil 1'de dört pervaneli İHA'nın blok

şeması yer almaktadır. İHA üzerinde bulunan güç modülü, motor sürücü devreleri, telemetri, sonar, GPS ve RC alıcı modülleri Şekil 1'de gösterilen ArduPilot kontrol kartı üzerinden kontrol edilmektedir. Telemetri modülü alıcı/verici ünitesi ile yer istasyonu ve ArduPilot kontrol kartı arasında veri aktarım işlemini gerçekleştirmektedir. İHA üzerinde bulunan batarya seviye bilgisi ArduPilot kontrol kartı üzerinden telemetri modülü ile yer istasyonuna aktarılmaktadır.

Birçok mühendislik probleminin çözümü için sistem modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem modeli fiziksel sistemin dinamik davranışını karakterize eden matematiksel ifadelerin bütünü olarak tanımlanabilir. Sistem ise çeşitli girişler karşısında çıkışlar üreten nesne olarak tanımlanır. Bir sistem ile ilgili denetim problemi söz konusu olduğunda, sistem için giriş-çıkış ilişkisini gösteren transfer fonksiyonları kullanılır. Sistem tanımlama, bilinen giriş-çıkış verileri kullanılarak sonraki herhangi bir giriş sinyali için çıkış sinyalini tanımlayan sistem modelinin oluşturulması şeklinde tanımlanmaktadır (Clarke vd. 1987, Ljung 1999).

MPC, sistemle ilgili verileri, önceden tahmin eden denetim yöntemidir (Camacho ve Bordons 2007). MPC'ler, endüstride 1980'li yıllardan beri kullanılan ileri seviye bir denetim yaklaşımıdır. Sistem modellerini kullanarak, sistemin ileriki zamandaki girişlere olan yanıtlarını inceleyen optimizasyon algoritmalarıdır (Qin ve Badgwell 2002) ve denetlenen sistemin dinamik denklemlerini kullanırlar. Bu denklemler genellikle sistem tanımlama yaklaşımları ile oluşturulmuş olan doğrusal bir modeldir. Bu nedenle



Şekil 1. Dört pervaneli İHA blok şeması.

modeller, modellenen dinamik sistemin girişlerine göre çıkış işaretlerinin elde edilmesini mümkün kılarlar.

İHA'daki yalpa üzerinde bulunan kameradan elde edilen anlık görüntüler işlenerek, otonom bir uçuş sağlanmaktadır. Elde edilen görüntüye, gürültü yok etme, nesne kesimleme ve renk temelli filtreleme ön işlemleri uygulanarak takip edilecek rota tespit edilmektedir. Renk temelli filtreleme işlemlerinde RGB yerine, renk ayrımının daha rahat yapılabildiği YCbCr renk uzayı kullanılmaktadır (Singh vd. 2003). Ek olarak, çalışmada görüntü işleme filtreleri için AForge.NET Kütüphanesi (Kirillov 2014) kullanılmaktadır. Rota tespitinin ardından dinamik yol planlama algoritması olarak TVAK yöntemi kullanılarak İHA'nın rotaya uygun hareketinin sağlanması (Nelson vd. 2007) için kameranın bulunduğu dönel-dönel-dönel (RRR) eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında MPC ile denetimi sağlanmaktadır.

2. Model Öngörülü Denetleyici (MPC)

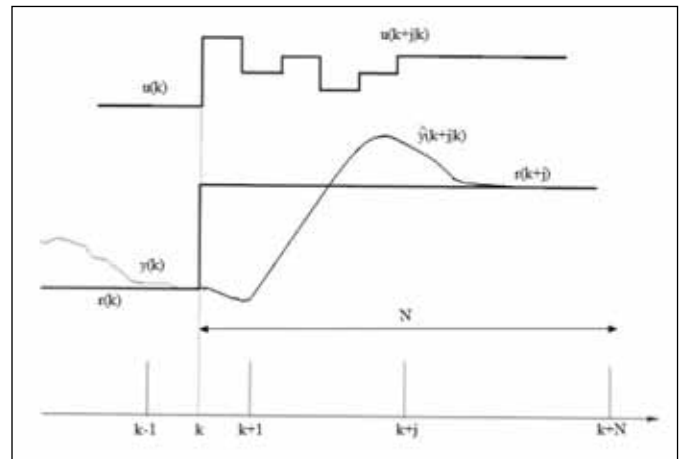
MPC terimi tek bir denetleyici tasarım yöntemini değil, çok geniş denetim tasarım yöntemleri bütünü tanımlar. Bu yöntemlerin ortak özelliği sistem modelinin doğrudan kullanılması ve kontrol işaretinin belirli bir ölçütü optimize ederek elde edilmesidir. Bu tasarım yöntemleri ile elde edilen denetleyiciler çoğunlukla doğrusal yapıdadır (Camacho ve Bordons 2007). MPC denetim, sistemin giriş ve çıkış kısıtlarını dikkate alarak, sonlu bir kontrol ufkü için her adımda sistemin matematiksel modeline ilave olarak geçmiş ve o anki mevcut durum bilgilerini de kullanarak istenen optimizasyon problemini çözmektedir (Rawlings 2000, Mayne vd. 2000, Bemporad vd. 2002, Kwon ve Han 2005). MPC, sistemin gelecekteki davranışını optimize etmek için uygulanması gereken kontrol dizisini hesaplayan bir denetleyici sınıfını nitelemektedir. Bu yöntemin temel düşüncesi Şekil 2'de görülmektedir (Camacho ve Bordons 2007). Gelecek bir zaman dilimindeki sistem yanıtını öngörebilmek için sistem modeli kullanılır. Belirlenen bir ölçütü en aza indirgeyerek denetlenen sisteme uygulanan kontrol değişkeni dizisi hesaplanır. Kaydırma işlemi, yani her örnekleme anında ufkün geleceğe doğru bir adım ilerlemesi; elde edilen kontrol işaretleri dizisinin ilk elemanının uygulanması olarak ifade edilebilir. Sistem modelinden yararlanarak, öngörü ufkü denilen, belirlenmiş bir ufuk boyunca gelecekteki sistem yanıtları hesaplanır. Bu yanıtlar o ana kadar bilinen değerler (geçmişteki girişler ve sistem yanıtları), o andaki sistem yanıtı ve gelecekteki kontrol değişkenleri kullanılarak hesaplanır. Şekil 2'de

sisteme uygulanan kontrol işareti $u(k)$, sistem çıkışı $y(k)$ ve referans giriş $r(k)$ olarak görülmektedir. Şekil 2'de öngörü ufkü N ile verilirken gelecekteki kontrol değişkeni $u(k+j|k)$ ile ve öngörülen sistem çıkışı $\hat{y}(k+j|k)$ ile gösterilmektedir. Geleceğe ilişkin kontrol işareti dizisi; bir başarımlı ölçütünü minimize ederek, genellikle öngörülen sistem çıkışı ile referans yörüngesi arasındaki hatayı en aza indirgeyerek hesaplanmaktadır. Sadece o andaki kontrol değişkeni sisteme uygulanarak bir sonraki örnekleme zamanında ölçülmektedir. En aza indirgenen performans ölçütü genellikle öngörülen çıkış ile referans yörüngesi arasındaki hatanın karesel fonksiyonudur. Eğer model doğrusal, ölçüt karesel ve sınırlandırmalar yok ise analitik bir çözüm bulunabilmekte, aksi durumda iteratif optimizasyon yöntemlerini kullanmak gerekmektedir (Camacho ve Bordons 2007).

MPC'nin temel yapısı Şekil 3'de verilmektedir. Model, önceki sistem giriş-çıkışları ve öngörülen kontrol girişlerine bağlı olarak sistemin gelecekteki yanıtlarını öngörmekte kullanılmaktadır. Kontrol girişleri ise belirlenen bir ölçüt için optimizasyon işlemi ile elde edilmektedir. MPC algoritması her kontrol aralığında, sistemin gelecek zamandaki davranışlarını optimize etmektedir. MPC, sistem modelini ve sistemden alınan anlık ölçümleri kullanarak süreçle ilgili gelecek zamandaki giriş-çıkışları hesaplamaktadır. Bu hesaplama, istenilen kriterlere göre oluşturulmuş bir optimizasyon probleminin çözülmesi şeklinde yapılmaktadır.

MPC tasarımında minimize edilerek kontrol değişkeninin hesaplanmasında kullanılan amaç ölçütü

$$J(N_m, N_y, N_u) = \sum_{j=N_m}^{N_y} R_j [r(k+j) - \hat{y}(k+j|k)]^2 + \sum_{j=N_m}^{N_u} Q_j [\Delta u(k+j|k)]^2 \quad (1)$$



Şekil 2. MPC stratejisi.

ile ifade edilmektedir. Denklem (1) de yer alan $r(k+j)$ referans değişkeni, $\hat{y}(k+j|k)$ öngörülen çıkış ve $\Delta u(k+j|k)$ kontrol değişkeni değişimidir. R_y ve Q_y ağırlık katsayıları olarak tanımlanmakta olup N_m , N_y , N_u , sırasıyla minimum öngörü ufkü, öngörü ufkü ve kontrol ufkü değişkenleridir. Bu durumda,

$$u(k) = \arg \min_{\Delta u} J(N_m, N_y, N_u) \quad (2)$$

optimizasyonu sonucunda kontrol değişkeninin elde edilmesi ile MPC tasarım gerçekleştirilmektedir.

MPC algoritması iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi sistem modeli, ikincisi optimizasyon yöntemidir. Optimizasyon yöntemi, sistem modelini kullanarak denklem (1)'i minimize eden değerleri hesaplamakta ve denetlenecek olan sürecin kontrol sinyali olan MPC'nin çıkış işaretini üretmektedir.

MPC ile denetimi yapılan sistemin blok şeması Şekil 4'te gösterilmektedir. İstenilen referans değeri ve sistem çıkışı MPC bloğuna girmektedir. Burada denklem (1) kullanılarak sistemin gelecekteki giriş-çıkışları uygun şekilde hesaplanmakta ve kontrol işareti sisteme gönderilmektedir. Çalışmada kullanılan dört pervaneli İHA'nın yalpası RRR eklem yapısına sahip olup, Şekil 5'te mekanik yapısı gösterilmektedir. Yalpanın genel dinamik denklemi matrisel formda

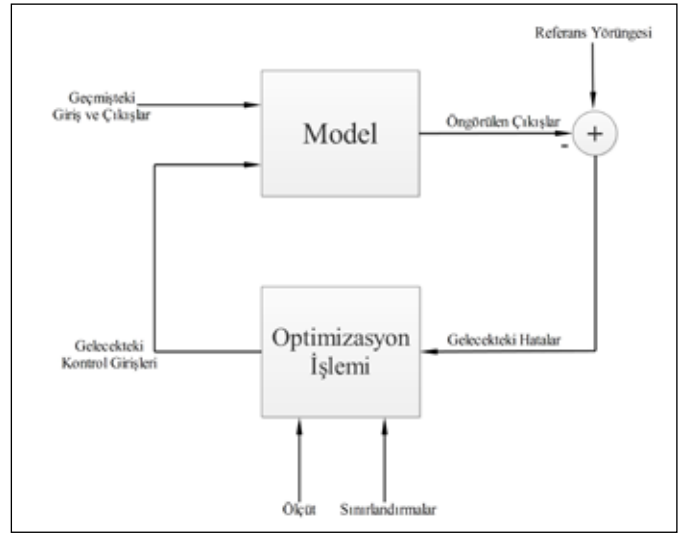
$$\tau_r = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + f_r \quad (3)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

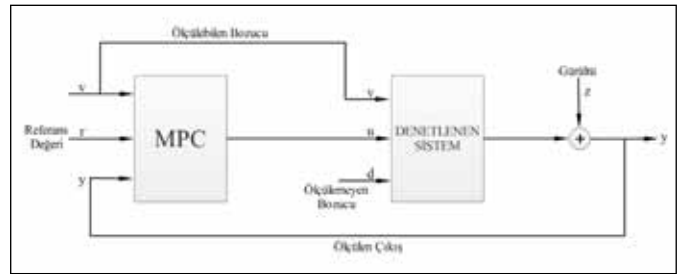
verilmektedir. Burada, yalpanın dinamik denklemi içerisinde yer alan $M(q)$ kütle matrisini, $V(q, \dot{q})$ coriolis ve merkezkaç matrisini ve $G(q)$ yer çekimi matrisini ifade etmektedir (Altan ve Hacıoğlu 2014). Ayrıca, f eklemlere etkiyen sürtünme torkunu, τ_r eklemlere etkiyen torku, q dönel eklemler için eklem açısını, $\dot{q}$ eklem hızını ve $\ddot{q}$ ivmeyi ifade etmektedir.

3. Tanjant Vektör Alan Kılavuz (TVAK) Yöntemi ile Rota Takibi

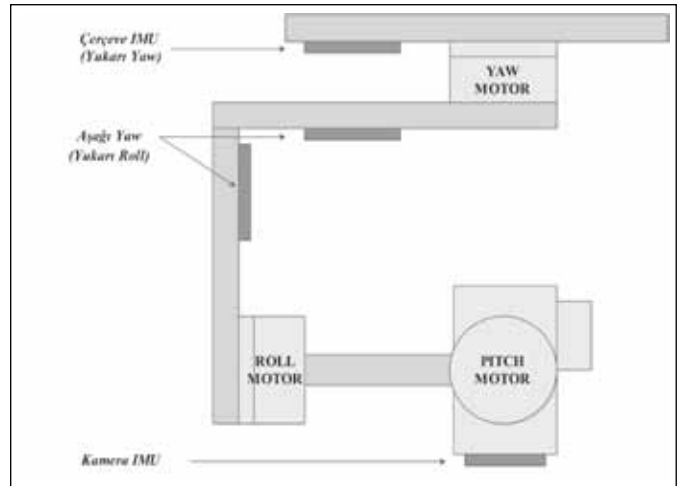
Görüntü işleme uygulamalarında, işlenecek görüntünün analizini kolaylaştırmak için ana uygulamadan önce ön işlem kullanımı gerekebilmektedir. Bu ön işlemler, görüntüdeki gürültüyü yok etme, nesne kesimleme, renk temelli filtreleme gibi işlemleri içermektedir (Loy ve Barnes



Şekil 3. MPC temel yapısı.

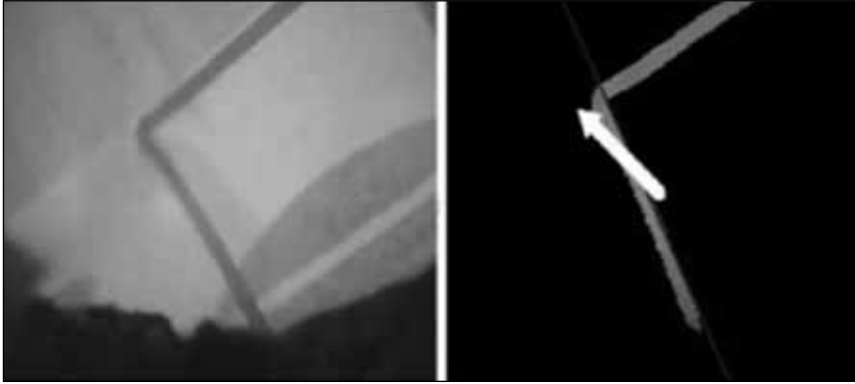


Şekil 4. MPC blok şeması.

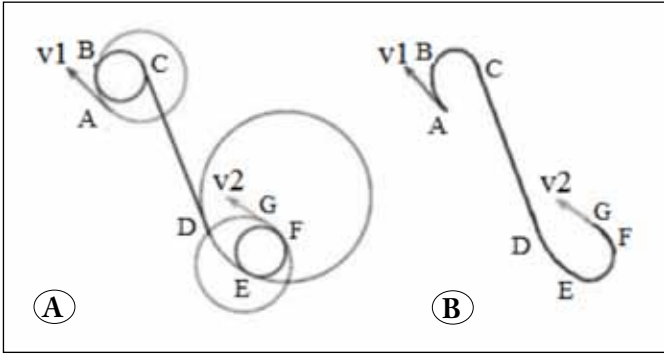


Şekil 5. Dört pervaneli İHA'da bulunan RRR eklem yapısı yalpanın mekanik yapısı.

2004, Kim vd. 2005, Zuo ve With 2005, Yu vd. 2008). Bu çalışmada görüntü işleme esaslı yol belirlemesi yapıldığı için, deneysel olarak izlenecek yola ait ön tanımlamalar getirilmekte ve takip edilecek çizginin renk aralığı



Şekil 6. Görüntü işleme yöntemleri ile rotanın tespiti.



Şekil 7. İHA rota planlaması istenen ve seçilen yol. A) Planlanan yol, B) Seçilen yol.

belirlenmektedir. Şekil 6'da da görüldüğü üzere, yapılan uygulamalarda şerit, dört pervaneli İHA tarafından takip edilecek çizgi olarak belirlenmektedir. Şeridin, görüntünün kalanından ayrılması için YCbCr renk uzayında renk aralığı filtresi kullanılmaktadır. RGB renk uzayı ışık parlaklığı bilgisini ayrı bir kanal olarak içermediği için robotik görüntülemelerde tercih edilmemektedir (Singh vd. 2003). Işık değişiminin etkisini en aza indirmek için RGB uzayı yerine, ışık parlaklığı bilgisini de ayrı bir kanal olarak içeren renk uzaylarından biri olan YCbCr renk uzayı seçilmektedir. İzlenecek yol verisi görüntüden ayrıştırıldıktan sonra yolun takip edilecek kısmı belirlenmektedir. Bu amaçla renk filtresi işlemi sonrası oluşan görüntüye sırasıyla griye dönüştürme, kenar belirleme, eşik değer uygulama, inceltme, genişleme ve Hough çizgi tespiti filtreleri uygulanmıştır. Hough çizgi tespiti yöntemi, Paul Hough'un 1962'de bulduğu, Duda ve Hart'ın genelleştirdiği, görüntü işlemede özellik çıkarım tekniklerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Duda ve Hart 1972).

Hough dönüşümü ile tespit edilen çizgiler, çizgileri oluşturan üye sayısına göre sıralanmış ve en uzun kesintisiz çizgiyi kapsayan üyelikler seçilmiştir. Benzer açı ve konuma sahip üyelikler birleştirilmiş ve sonuçta izlenecek yola ait

baskın çizgiler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu çizgilerden izlenecek çizginin kullanımında ise dört pervaneli İHA'nın mevcut pozisyonunu en fazla düzeyde koruyarak ilerlemesini sağlayan en baskın çizgi tercih edilmiştir. Bu çalışmada görüntü işleme filtreleri için AForge.NET kütüphanesi (Kirillov 2014) kullanılmıştır.

İHA'lar için güzergâh planlama, klasik en uygun yörünge planlamadan, karmaşık sürü davranışına kadar çeşitli yaklaşımlar ile ele alınabilecek önemli bir araştırma konusudur. Belirli bir başlangıç hız ve konumundan, istenen hız ve konuma yönelim için izlenecek yolun bulunması İHA'larda rota planlamanın ana sorusudur. Şekil 7A'da dört pervaneli İHA, A noktasından v_1 hızı ile harekete geçip istenilen G noktasında v_2 hızıyla güzergâhı sonlandırmaktadır. En uygun güzergâh (en küçük seyahat mesafesi) $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ noktalarını takip etmektedir. Burada EF ve BC'ye teğet çemberler en küçük dönüş açısını, DE'ye teğet çember en yüksek hızı, AB'ye teğet çember geçerli hızı ve GF'ye teğet çember son hızı temsil etmektedir. A'dan G'ye en uygun güzergâh Şekil 7B'deki gibi belirtilmektedir. Bu nedenle, en uygun kontrol problemi; maliyet fonksiyonu minimum iken A ve G pozisyon ve hızları verilmişken B/C/D/E/F noktalarının tespit edilmesidir (Chen vd. 2013).

Bu çalışmada rüzgârın hızı, dört pervaneli İHA'nın uçuş mesafesinin performans etkisi, dönüş ve seyir hızı limitleri dikkate alınarak, söz konusu kısıtlamalar ve bozucular ile ilgili düzeltmelerde geri besleme olarak kameradan gelen görüntünün kullanıldığı dinamik bir yaklaşım kullanılmıştır. Buna rağmen bozucuların etkisinin en aza indirgenmesi ve daha az maliyetle rotanın takibi için yine dinamik bir yöntem olan vektör alan metotlarından TVAK yöntemi kullanılmıştır (Köksal vd. 2014, Nelson vd. 2007).

Vektör alanı kavramı, robotik uygulamalarda güzergâh planlama için karşımıza çıkmakta, dört pervaneli İHA'larda

ise sürekli esen rüzgârın etkisi gibi dış bozucu durumlarla baş edebilmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem ile düz yol, kavisli yol ve yörünge takibi yapılabilmektedir. İzlenecek yolun şekline ve İHA'nın pozisyonuna göre aracın yönelmesi gereken açının tanımlandığı vektörlerden oluşan alandır. Şekil 8'de de görüldüğü gibi vektörler, izlenmesi istenen yola aracın yönelim açısını tanımlamaktadır. Vektör alanların oluşturulması için, istenen yola sağdan ve soldan yaklaşımlara göre değer üretecek tekil bir fonksiyon seçilmelidir. Ayrıca seçilen fonksiyon, araç yörüngeye oturduğunda minimum hata ile rotayı takip etmelidir.

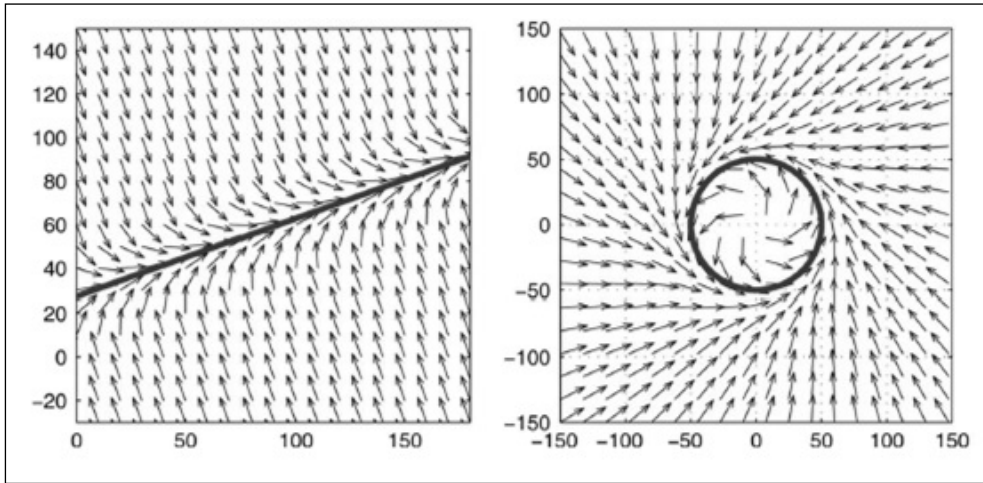
Bu amaçla arctan fonksiyonu literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Fonksiyona girilen değere göre doğrudan bir yö-

nelim açısı sunulmaktadır. Ancak bu yönelim açısı, (örneğin $\pi/2$) çoğu uygulama için oldukça büyük bir değerdir. Bu sebeple maksimum yönelim açısı ve maksimum yönelim açısından hatadaki yönelim açısına olan değişim keskinliği de hesaba katılarak yönelim açısı;

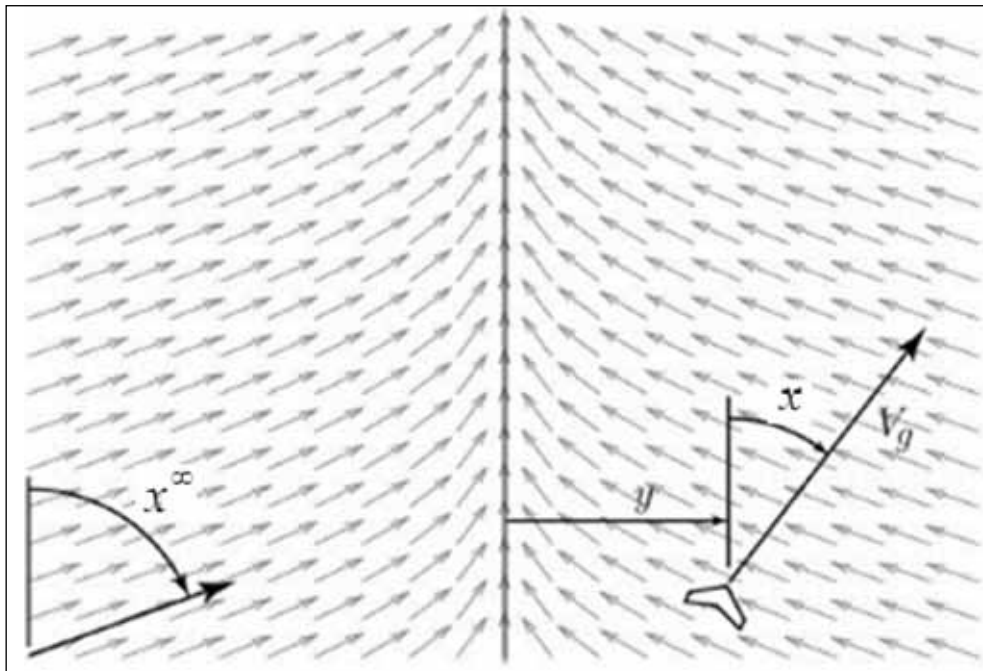
$$x^d(y) = -x^\infty \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(ky) \quad (5)$$

olarak elde edilir. Burada x^∞ maksimum yönelim açısını, k ise değişim keskinlik katsayısını ifade etmektedir.

Şekil 9'da belirli bir k ve x^∞ değeri için y uzaklığında aracın yönelmesi istenen açıya ait vektör alanı, Şekil 10'da ise farklı k değerleri için bu alanın değişimi görülmektedir (Nelson vd. 2007).



Şekil 8. Vektör alanının düz yol ve yörünge için gösterimi.



Şekil 9. İHA düz yol hareketi için vektör alanı değişimi.

Sonuç olarak arzu edilen yönelim açısı TVAK ile kolayca tespit edilebilmektedir. Sonrasında ise, aracın izlenecek yola göre açısı görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilebilmekte ve İHA gerekli komutlarla hedef açığa yönlendirilmektedir.

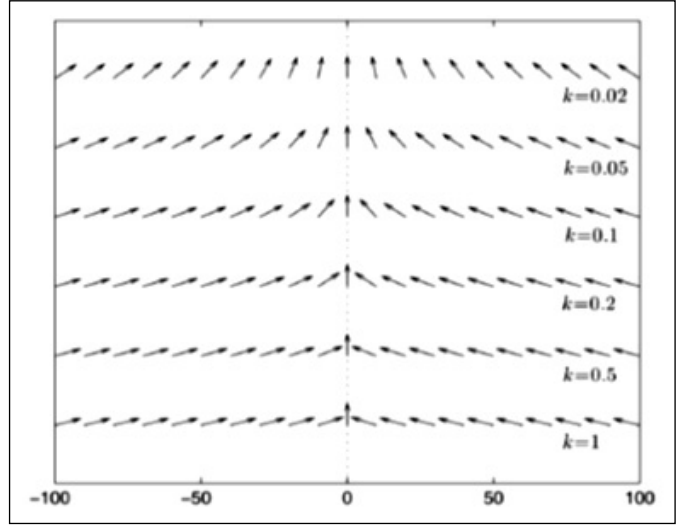
4. Deneysel Sonuçlar

Yapılan çalışmanın testlerinde 30 m'lik bir parkur oluşturulmuş ve dört pervaneli İHA'nın bu parkuru Şekil 11'de gösterildiği gibi tamamlaması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan dört pervaneli İHA'nın uçuşa hazır hale getirilmesinin ardından yapılan test uçuşlarında uçuş süresi yaklaşık 11dk olarak kaydedilmiştir. Dört pervaneli İHA'nın askıda kalma (yüksekliği sabit tutma) modunda yalpanın MPC denetiminin yapılarak görüntü işleme ile rota takibinin yapılabileceği anlaşılmıştır. Dört pervaneli İHA üzerindeki kameradan bilgisayara aktarılan görüntüden izlenecek yol verisi ayrıştırılarak yolun takip edilecek kısmı belirlenmiştir. Bu amaçla renk filtresi işlemi sonrası oluşan görüntüye sırasıyla griye dönüştürme, kenar belirleme, eşik değeri uygulama, inceltme, genişleme ve Hough çizgi tespiti filtreleri uygulanarak dört pervaneli İHA'nın tespit edilen yöne hareketi denklem (5) kullanılarak elde edilen TVAK yöntemi ile sağlanmıştır. GPS modülü ile İHA'nın konum belirleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler neticesinde, dört pervaneli İHA üzerinde kullanılan kameranın geniş açılı ve yüksek kalitede görüntü alabilmesinden dolayı dört pervaneli İHA'nın alçak uçuşlarda dahi rota takibinde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat irtifa yükseldikçe rüzgâr hassasiyetinin arttığı, dört pervaneli İHA'nın rota takip süresinin uzadığı ve batarya ömrünün kısaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kamera kalitesi iyi olduğundan ışık seviyesinin daha az olduğu bulutlu havalarda da görüntü işleme adımının başarılı olarak gerçekleştirildiği görülmüştür.

Kullanılan dört pervaneli İHA üzerinde kameranın dünya düzlemde sabit kalmasını sağlamak için Şekil 12'deki yalpa kullanılmış ve yalpa MPC ile denetlenmiştir. MPC denetimli yalpa ile dört pervaneli İHA'nın çizgiyi ortalama için yaptığı sağa ve sola süzülme hareketlerinde daha az salınım gözlenmiş ve incelenen görüntülerde çizginin ortalama oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Dört pervaneli İHA ile 60 cm irtifayla ve 3 m irtifayla 5 uçuş gerçekleştirilmiştir. Rotanın tamamlanması için gerçekleşen ortalama uçuş süreleri ile toplam batarya tüketimine ilişkin bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur. Parkur tamamlama süresinin yaklaşık %10 arttığı göz önünde bulundurulduğunda,



Şekil 10. Farklı k (0.02 – 1 aralığında) değerleri için vektör alanı değişimi.



Şekil 11. Test için oluşturulan parkur ve uçuş testi.



Şekil 12. Dört pervaneli İHA üzerinde bulunan RRR eklem yapısına sahip yalpa.

dört pervaneli İHA'nın yükseklik ile doğru orantılı olarak batarya tüketiminin de arttığı görülmüş ve bunun dış bozucu etki olarak rüzgârdan kaynaklandığı da belirlenmiştir. Testlerde aynı anda tedarik edilip kullanılan bataryalar birebir aynı özelliklere sahiptir. Bataryalar, hücre kontrollü geri beslemeli şarj aleti ile paralel olarak aynı anda şarj edildiğinden aralarında olabilecek gerilim farkları göz ardı edilmiştir.

MPC denetimli yalpanın etkisini gözlemlemek için alçak uçuşlar gerçekleştirilmiştir. PID denetimli yalpa kullanılarak yapılan uçuşlarda salınımın yüksek olduğu belirlenmiş ve rota çizgisinin, alınan görüntülerin ancak %43'ünde ortalanaabildiği gözlemlenmiştir. MPC denetimli yalpa kullanıldığında ise rota çizgisinin görüntülerde ortalama oranının %84'e yükseldiği görülmüştür. Bu oranlar, görüntü işleme için 2 fps ile kaydedilen kareler incelenip, orta noktası %5 tolerans ile belirlenerek hesaplanmıştır.

Dört pervaneli İHA üzerinde bulunan RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında MPC denetimi yapılmış olup kameranın takılı olduğu uç işlevcisine ait denklem (3) ile ifade edilen hıza ilişkin uç işlevcisinin motoruna uygulanması gereken tork grafiği Şekil 13'de verilmiştir. Dört pervaneli İHA üzerinde bulunan yalpanın uç işlevcisinin belirlenen rotayı tasarım kriterleri içerisinde takip ettiği gözlemlenmiştir.

İç ortamda yapılan (sabit ışık, rüzgârsız ortam) testler daha başarılı olsa da dış ortamda yapılan testlerde de rota takibi sağlanmıştır. Rüzgâr hızı ve değişimi, sistemin en zayıf olduğu parametredir. Ortamdaki rüzgâr durumuna göre gözlem yapılmıştır. Uçuş testi Şekil 14'de görüldüğü gibi PID denetimli yalpaya bağlı kamera ve MPC denetimli yalpaya bağlı kamera ile ayrı ayrı yapılmıştır. Çizelge

Çizelge 1. İHA ile 30 cm ve 3m uçuş bilgileri.

Yükseklik	Uçuş Süresi (s)	Batarya Tüketimi (%)
60 cm	47	43
3 m	52	51

Çizelge 2. Işık rüzgâr etkisine göre İHA'nın rotayı takip etme oranları.

Işık	Rüzgâr	PID denetimli Yalpa ile (%)	MPC denetimli Yalpa ile (%)
Çok Yüksek	Yok	84	90
Az	Var	80	84
Yüksek	Var	82	87
Çok Yüksek	Var	82	87

2'de kamera görüntüsünün %5 tolerans ile yol çizgisinin ortalama oranları yüzde olarak sunulmuştur.

PID denetimli yalpa kullanılan kamera görüntülerinde yol çizgisi ortalama oranları düşük iken MPC denetimli yalpa kullanılan kamera görüntülerinde başarımın gözle görülür oranda arttığı gözlemlenmektedir. Hem PID hem de MPC denetimli yalpa kullanımında tüm testlerde izlenecek yol çizgisi görüntü içerisinde kalmıştır.

MPC denetimli yalpa kullanımının incelendiği birinci senaryoda; kapalı ortamda, rüzgâr yokken ve ışık aydınlatması yoğunken yolu takip etme oranı %90 olarak gözlemlenmiştir. İkinci senaryoda; rüzgârlı dış ortamda, ışık miktarı az iken yol %84 başarımla takip edilmiştir. Üçüncü senaryoda; rüzgârlı dış ortamda, ışık miktarı sınırlı iken %87'lik bir oran ile çizgi takip edilmiştir. Son senaryoda ise; rüzgârlı ve güneşli dış ortamda yapılan uçuşun yine %87 oranına yakın başarımla takip edildiği gözlemlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında dış bozucu etki var iken farklı ışık miktarları altında da MPC denetimli yalpa ile görsel çizgi takibinin PID denetimli yalpaya göre başarılı sonuç verdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 13. MPC denetimli yalpanın uç işlevcisinin hıza göre tork-zaman değişimi.



Şekil 14. Dört pervaneli İHA ile uçuş testi.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, dış bozucu etki altında dört pervaneli İHA ile hem görsel çizgi takibi hem de üzerindeki 3 eksenli yalpanın kıyaslamalı PID ve MPC denetimi gerçekleştirilmiştir. Yalpasız veya PID denetimli 2 eksenli yalpa ile yapılan daha önceki çalışmalara göre görsel çizgi takibi başarımlarında belirgin bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Çizgi takibi ve engelden kaçma amacı ile önerilen TVAK yöntemi, bu çalışmada İHA'nın görsel çizgi takibi için kullanılmış, kapalı ortam ve dış ortam testleri gerçekleştirilerek MPC ve PID denetim kıyaslanmıştır. İHA'nın alçak ve yüksek irtifa uçuşlarında rota takibi başarımları deneysel olarak gözlemlenmiş, elde edilen sonuçlardan 3 eksenli yalpaya sahip MPC denetimli İHA'nın 2 eksenli yalpaya sahip PID denetimli İHA'ya göre çizgi takibinde yaklaşık %10 daha başarılı olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, uç işlevcisinde kamera bulunan dört pervaneli İHA üzerindeki 3 eksenli yalpanın dış bozucu etki altında yapılan testlerinde TVAK yöntemi ile görsel çizgi takibi için PID denetime göre MPC denetim ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

6. Teşekkür

Bu çalışma, Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) (Proje Numarası: 2014-75737790-01 ve 2014-75737790-02) tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, değerli desteklerinden dolayı Bülent Ecevit Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

7. Kaynaklar

- Altan, A., Hacıoğlu, R. 2014. The controller of the camera used in target tracking for unmanned vehicle with model predictive controller. *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, pp. 1686-1689, Trabzon.
- Backman, J., Oksanen, T., Visala, A. 2012. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear Model Predictive path tracking. *Comp. Elect. Agric.*, 82: 32-43.
- Bemporad, A., Borrelli F., Morari, M. 2002. Model predictive control based on linear programming the explicit solution. *IEEE Trans. Auto. Cont.*, 47(12): 1974-1985.
- Böck, M., Kugi, A. 2014. Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane. *IEEE Trans. Cont. Sys. Tech.*, 22(4): 1461-1473.
- Camacho, EF., Bordons, C. 2007. Model Predictive Control, Second Edition, Springer Verlag London Limited, 405 pp.
- Chen, H., Chang, K., Agate, CS. 2013. UAV Path Planning with Tangent-plus- Lyapunov Vector Field Guidance and Obstacle Avoidance. *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.*, 49: 840-856.
- Chung, CF., Göktoğan, AH., Cheang K., Furukawa, T. 2006. Distributed Simulation of Forward Reachable Set-Based Control for Multiple Pursuer UAVs. *SimTecT 2006 Conference*, pp. 171-177, Melbourne, Australia.
- Clarke, DW., Mohtadi, C., Tuffs, PS. 1987. Generalized Predictive Control Part II Extensions and Interpretations. *Automatica*, 23(2): 149-160.
- Duda, RO., Hart, PE. 1972. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM*, 15(1): 11-15.

- Geiger, BR., Horn, JF., DeLullo, AM., Long, LN. 2006.** Optimal Path Planning of UAVs Using Direct Collocation with Nonlinear Programming. *ALAA GNC Conference*, pp. 1-13, Colorado, USA.
- Kim, KK., Cho, SH., Kim, HJ., Lee, JY. 2005.** Detecting and Tracking Moving Object Using An Active Camera. *7th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT2005*, pp. 817-820, Ireland.
- Kirillov, A. 2014.** <http://www.aforgenet.com>. AForge.NET Framework (2.2.5).
- Köksal, K., Sürücü, D., Sürücü, M., Hacıoğlu, R. 2014.** Visual Line Tracking with Vector Field Guidance for UAV. *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, pp. 646-649, Trabzon.
- Kwon, WH., Han, S. 2005.** Receding horizon control: model predictive control for state models, Springer, 380 pp.
- Ljung, L. 1999.** System Identification Theory for User, Prentice Hall, 511 pp.
- Loy, G., Barnes, N. 2004.** Fast Shape-Based Road Sign Detection For A Driver Assistance System. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 70-75, Sendai, Japan.
- Mayne, DQ., Rawlings, JB., Rao, CV., Scokaert, PO. 2000.** Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6): 789-814.
- Nelson, DR., Barber, DB., McLain TW., Beard, RW. 2007.** Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles. *IEEE Trans. Robot.*, 23: 519-529.
- Qin, SL., Badgwell, TA. 2002.** A Survey of Industrial Model Predictive Control. *Cont. Eng. Prac.*, 11: 733-764.
- Rasmussen, SJ., Mitchell, JW., Chandler, PR., Schumacher, CJ., Smith, AL. 2005.** Introduction to the MultiUAV2 Simulation and Its Application to Cooperative Control Research. *American Control Conference*, pp. 4490-4501, Portland, USA.
- Rawlings, JB. 2000.** Tutorial overview of model predictive control. *IEEE Cont. Sys.*, 20(3): 38-52.
- Singh, SK., Chauhan, DS., Vatsa, M., Singh, R. 2003.** A Robust Skin Color Based Face Detection Algorithm. *Tamkang J. Sc. Eng.*, 6: 227-234.
- Stone, RH., Clarke, G. 2001.** Optimization of Transition Maneuvers for a Tail-Sitter Unmanned Air Vehicle (UAV). *5th Australian International Aerospace Congress*, pp. 105-119, Canberra, Australia.
- USA Government, 2005.** 2005-2030 UAV Road Map. US Government, Washington DC, United States.
- Winstrand, M. 2004.** Mission Planning and Control of Multiple UAVs. *Swedish Defence Research Agency*, pp. 1650-1942, Stockholm, Sweden.
- Yu, H., Ren, C., Qiao, X. 2008.** A New Corner Matching Algorithm Based On Gradient. *International Conference on Signal Processing (ICSP)*, pp. 1346-1349, Beijing, China.
- Zuo, F., With, de PHN. 2005.** Real-Time Embedded Face Recognition for Smart Home. *IEEE Trans. Cons. Elect.*, 51: 183-190.