

30. HAZERFAN İHA'nın UZUNLAMASINA HAREKET DİNAMIĞI ve KONTROLÜ

Özet

Gelişen havacılık teknolojisiyle birlikte gelişimini sürdüren İHAları son zamanlarda üzerinde araştırmalar ve yatırımlar yapılan öncelikli konulardan biri olmuştur. Hava araçlarında insan faktörünü azaltmak ve kontrolü bilgisayar sistemlerinden sağlamak insansız havacılığın öncelikli amacıdır. Bu çalışmada, Hazerfan İHA'nın uzunlamasına hareket denklemleri çıkartılmış ve kararlılığı incelenmiştir. Kararlılık incelenmesiyle, kontrolör olarak neye ihtiyaç duyduğu tesbit edilmiş, PID ve diğer kontrolörler, köklerin yer eğrisi yöntemi ile tasarlanmış, ve sistemin zaman cevapları Matlab kullanılarak analiz edilmiştir.

GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, Hazerfan İHA'nın bir otopilot ile yerden kumanda edilmeden çeşitli görevleri yerine getirmesini sağlayabilmektir. Bu çalışma kapsamında, Hazerfan insansız uçağının uzunlamasına hareket denklemleri çıkartılmış, öncesinde lineer olmayan sistem yüksekliğin 50 m ve ilerlemesine hızın 11m/s olduğu uçuş şartı için lineerleştirilmiş, daha sonra uzunlamasına harekete elevatörün etkisi incelenmiştir. Kararlılık analizi yapılmış ve PID ve diğer kontrolörler tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında, sistem kontrol edilmesi zor, kararsız bir yapıya sahip olduğu için kararlılığın sağlanması öncelikli kriteri oluşturmaktadır. Kontrolör tasarımında, sol yarı düzlemde sıfır- kutup silme, filtre tasarım yöntemleri uygulanmış ve çoğunlukla pratikte kullanılan gerçek PID denilen transfer fonksiyonunda pay ve paydanın derecesi eşit olan kontrolör yapısı kullanılmıştır. Sistem zaman cevapları analiz edilmiştir.

UZUNLAMASINA HAREKET DENKLEMLERİ

Bilindiği üzere, uçak üzerindeki oluşan tüm kuvvet ve moment denklemleri dünya eksen takımında aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [2].

$$m(\dot{U} + QW - RV) = F_{Gx} + F_{Ax} + F_{Tx}$$

$$m(\dot{V} + RU - PW) = F_{Gy} + F_{Ay} + F_{Ty}$$

$$m(\dot{W} + PV - QU) = mg \cos \phi \cos \theta + F_{Gz} + F_{Az} + F_{Tz}$$

(1)

F_G : Yerçekimi kuvveti

F_A : Aerodinamik kuvvet

F_T : İtme Kuvveti

Gövde Eksen takımında matris formda yazacak olursak eğer,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = mg \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & 0 \\ -\cos \beta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_T & 0 & \cos \phi_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Moment denklemleri ise ,

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{Q} \\ \dot{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R & Q \\ R & 0 & -P \\ -Q & P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\dot{P} + I_{xz}\dot{R} + QR(I_{zz} - I_{yy}) + PQI_{xz} \\ I_{yy}\dot{Q} + PR(I_{xx} - I_{zz}) + (R^2 - P^2)I_{xz} \\ I_{zz}\dot{R} + I_{xz}\dot{P} + PQ(I_{yy} - I_{xx}) - QRI_{xz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

olmaktadır.

Doğrusallaştırma için, denge durumu civarında küçük bozuntular varsayımı uygulandığında, ilerlemesine lineerleştirilmiş hareket denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır [2].

$$m(\dot{u} - V_1 r - R_1 v + W_1 q + Q_1 w) = -mg\theta \cos \theta_1 + f_{A_x} \quad (5)$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})(P_1 r + R_1 p) + I_{xz}(2P_1 p - 2R_1 r) = m_{A_y} \quad (6)$$

$$m(\dot{w} - U_1 q - Q_1 u + V_1 p + P_1 v) = -mg\theta \cos \phi_1 \sin \theta_1 - mg\phi \sin \phi_1 \cos \theta_1 + f_{A_z} \quad (7)$$

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial u} \square u + \frac{\partial X}{\partial w} \square w + \frac{\partial X}{\partial \delta_e} \square \delta_e \quad (8)$$

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial u} \square u + \frac{\partial Z}{\partial w} \square w + \frac{\partial Z}{\partial \dot{w}} \square \dot{w} + \frac{\partial Z}{\partial q} \square q + \frac{\partial Z}{\partial \delta_e} \square \delta_e \quad (9)$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial u} \square u + \frac{\partial M}{\partial w} \square w + \frac{\partial M}{\partial \dot{w}} \square \dot{w} + \frac{\partial M}{\partial q} \square q + \frac{\partial Z}{\partial \delta_e} \square \delta_e \quad (10)$$

Bu denklemleri durun değişkenleri uzayında yazarsak , $\dot{x} = Ax + Bu$:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{X_u}{m} & \frac{X_w}{m} & \frac{X_q}{m} - w_0 & -g \cos \theta_0 \\ \frac{Z_u}{m} & \frac{Z_w}{m} & \frac{Z_q}{m} + u_0 & -g \cos \phi_0 \sin \theta_0 \\ \frac{M_u}{I_{yy}} & \frac{M_w}{I_{yy}} & \frac{M_q}{I_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{X_{\delta_e}}{m} & \frac{Z_{\delta_e}}{m} & \frac{M_{\delta_e}}{I_y} & 0 \end{bmatrix}^T, X = [u \ w \ Q \ \theta]^T, u = [\delta_e] \text{ olmaktadır.}$$

UZUNLAMASINA UÇUŞ DİNAMİĞİNİN ANALİZİ

Hazerfan İHANın verileri [1] hesaplanmıştır. Bu veriler, modelimizde yerine konulup, trim şartında incelendiğinde, sisteme ait A ve B matrisleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} -0.0234 & 1.0161 & 0 & -8.7352 \\ -1.7654 & -7.2092 & 11 & -4.4647 \\ -4.4268 & -7.9806 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0.607 \\ -8.68 \\ -136.3172 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Transfer fonksiyonlar elde edilirse,

$$\frac{U(s)}{\delta_e(s)} = \frac{-0.6 (s-13.05) (s^2+35.05s+1101)}{(s+1.336) (s-1.431) (s^2+7.325s+92.36)} \text{ ve} \quad (13)$$

$$\frac{q(s)}{\delta_e(s)} = -\frac{s(s+6.46) (s+0.2453)}{(s+1.336) (s-1.431) (s^2 + 7.327s + 92.36)} \quad (14) \text{ olmaktadır.}$$

Sistem tamamiyle kontrol edilebilir ve gözlenebilir olduğu için, sisteme ait transfer fonksiyonlarında mod kaybı söz konusu olmamaktadır. Böylelikle, gerçek sistemin özellikleri bu transfer fonksiyonları ile tam olarak ortaya konulmaktadır [3].

Eğer açık çevrim karakteristik denklemini analiz edecek olursak, bir çift kompleks eşlenik kökü, bir adet negatif gerçek kök ve sistemi kararsız kılan bir adet pozitif gerçek kök bulunduğu görülecektir[1].

$$\Delta_0(s)=(s+1.336) (s-1.431) (s^2+7.327s+92.36) = 0 \quad (15)$$

$$s_1 = -1.336 \rightarrow \text{kararlı mod}$$

$$s_2 = 1.431 \rightarrow \text{kararsız mode}$$

$$s_{3,4} = -3.6635 \pm 8.8847i \rightarrow \text{kısa period mod}$$

$s_{3,4}$ için

$$\left. \begin{array}{l} \omega_n = 9.61 \text{ rad / s} \\ \xi = 0.3812 \\ T = 0.2738 \text{ s} \end{array} \right\} \rightarrow \text{kısa period osilasyonu}$$

Sistem aşırı derecede kararsız olduğu için, kararlı ve iyi performans gösteren bir sistem cevabı elde etmek en önemli problemdir. Uzunlamasına hareket kontrolünde ilerlemesine hız ve yunuslama açısı oranı kontrolünü gerçekleştirmek yeterli olacaktır. Bu yüzden ilerlemesine hız kontrolü ve yunuslama açısı oranı için kontrolörler tasarlanmıştır.

KONTROLÖR TASARIMI

• İlerlemesine hız kontrolü

Eğer ilerlemesine hız kontrolü için transfer fonksiyonunu

inceleyecek olursak; $\frac{U(s)}{\delta_e(s)}$ (13) için negatif geri besleme yapabilmek için sistemin

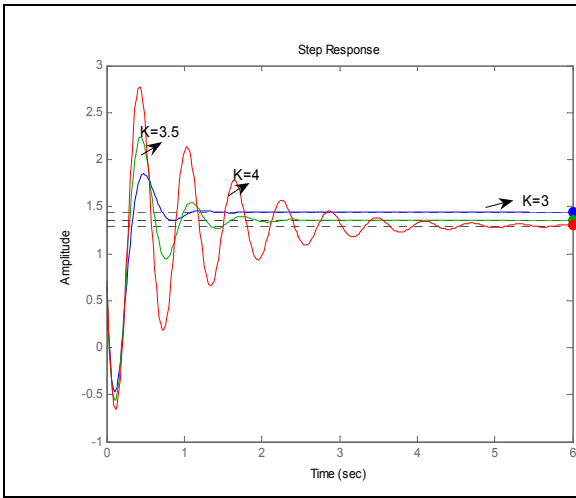
fazının çevrilmesi gerekecektir. Sistemin fazı 180° çevrildikten sonra kontrolör tasarımı yapılacaktır. Kontrolör, kompleks kutup ve sıfırlar notch filtresi ile yüksek frekanslar için kararsız bölgeye geçmesi engellenmiş, kararlı kutup olan $s=-1.336$ silinmiş, $s=15'e$

kararsız olan bir sıfır atayarak,kontrolör $C(s)= \frac{(s^2+7.325s+92.36)(s+1.336)(s-15)}{(s^2+35.05s+1101)(s+75)}$ (16)

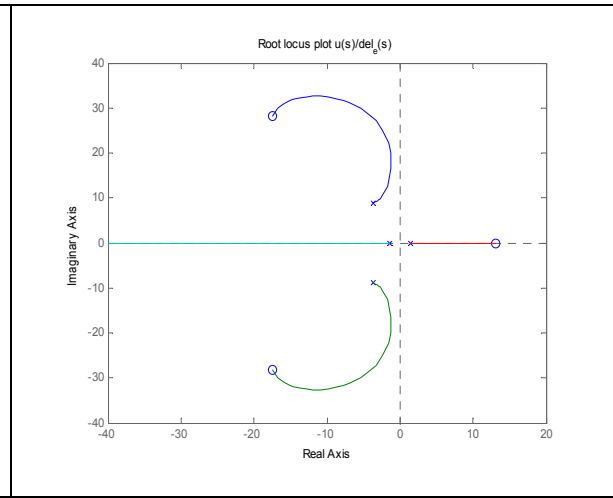
olarak tasarlanmış, kök eğrisinin kollarının sol yarı s düzlemine geçmesi sağlanmıştır. Kontrol edilen sistemin birim basamak girişi için kapalı çevrim cevabı ve çeşitli kazanç değerleri için sürekli hal, yerleşme zamanı ve aşım değerleri Tablo- 1 verilmiştir.

Tablo-1 İlerlemesine hız kontrolü ile sistemin birim basamak girişi için çeşitli kazanç değerleri ile kapalı cevrim cevapları

Kp	Sürekli hal	Yerleşme zamanı	% Aşım
3	1.44	0.998s	28.4
3.5	1.35	1.78s	65.2
4	1.3	4.16s	114

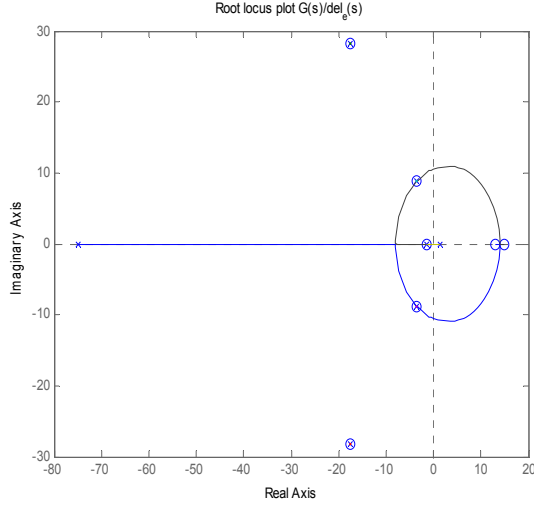


Şekil 1: Birim basamak giriş için çeşitli kazanç değerlerinde sistem cevapları



Şekil2:Sistemin kök eğrisi

Kök eğrisi grafiklerinden de görüldüğü üzere, sistemin kök eğrisinin sağ yarı düzlemde bulunan kolları, kontrolör sayesinde sol yarı düzleme geçirilmiş ve belirli kazanç aralığı için sistem cevabı istenen sınırlar arasında kalabilmektedir.

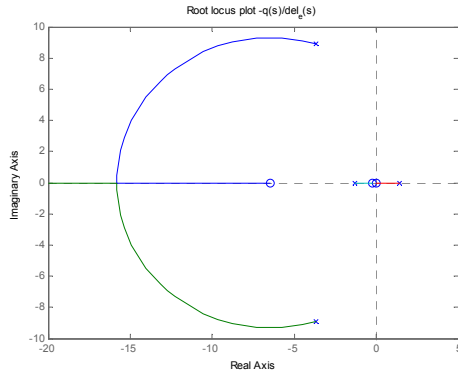


Şekil3: Kontrollörlü sistemin kök eğrisi

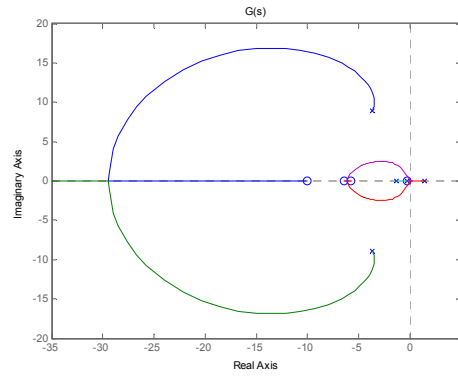
• **Yunuslama açısı oranı kontrolü**

İlerlemesine hız kontrolünde olduğu gibi, $\frac{q(s)}{\delta_e(s)}$ (14) transfer fonksiyonunda, negatif geri

besleme yapabilmek için sistemin fazının 180° çevrilmesi gerekecektir. Bu sistem için klasik PID kabul edilebilir cevaplar için yeterli olmamaktadır, bu yüzden daha gerçekçi bir PID yapısı kullanılmıştır. Bu PID ile, referans girişlerindeki süreksizlik, kontrolöre giden hata fonksiyonunda sıçramaları, süreksizliği ve büyük işaret sinyalleri engellenmiş olacaktır. Gerçekçi PID bu sinyalleri bastıracaktır [3].



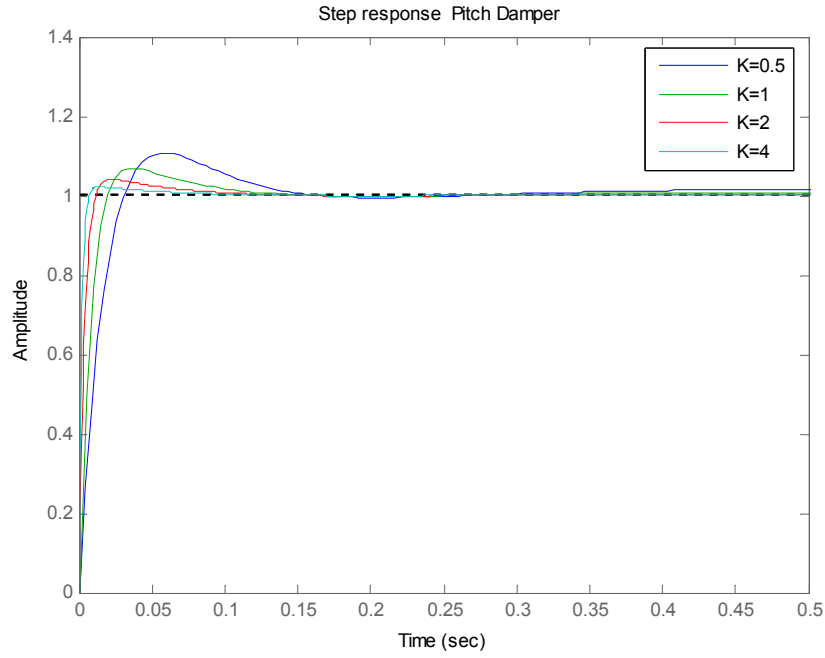
Şekil2: Sistemin kök eğrisi



Şekil5: Kontrollörlü sistemin kök eğrisi

Kullanılan kontrolörde $C(s) = \frac{(s+5.8)(s+10)}{s(s+0.22)}$ (17) ayrıca, diğer kutup ve sıfırların yerleri,

sistemin baskın kutuplarını istenen bölgeye çekecek şekilde seçilmiştir. Bu kontrolör ile sistemin birim basamak girişi için kapalı çevrim cevabı ve çeşitli kazanç değerleri için yerleşme zamanı ve aşım değerleri Tablo-2' de verilmiştir. Kök eğrisi grafiklerinden görüldüğü üzere kararsız bölgedeki kolların kararlı bölgeye geçmesi sağlanmıştır.



Şekil6: Birim basamak giriş için çeşitli kazanç değerlerinde sistem cevapları

Tablo-2 Yunuslama açısı için kontrolü ile sistemin birim basamak girişi için çeşitli kazanç değerleri için yerleşme zamanı ve aşım değerleri

Kp	Yerleşme Zamanı	% Aşım
0.5	0.23	10
1	0.0899	6.55
2	0.557	3.94
4	0.0206	2.22

Bu çalışma İTÜ UUBF BAP projesi (Proje yürütücüsü Prof. Dr. Elbrus Caferov) kapsamında yapılmıştır.

Bu proje sayesinde Hazerfan İhanın uzunlamasına hareketi incelenmiş ve zor olan uçuş şartı için kontrolü sağlanmıştır. BU çalışmadan yola çıkarak, elde ettiğimiz modeli ve kontrolü mikro işlemciye yazılım yapılarak, uçak üzerinde monte edilip daha sonra da elle ya da radyo ile kumandaya gerek kalmadan istediğimiz şekilde uçurabilmek mümkün olacaktır. Uçağın zarar görmemesi için öncelikle simülasyon sonuçlarına ihtiyacımız olacaktır, bu çalışma sayesinde ön çalışmayı tamamlamış olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Tekin, R. Equations of Motion of Hazerfan UAV and Autopilot Design, İTÜ Kontrol Müh. Lisans Tezi, EEF, say. 41, 2006
- [2] Yechout, T. Introduction to Aircraft Flight Mechanics, American Institute of Aeronautics and Astronautics Publishing 2003
- [3] Ogata, K. Modern Control Engineering New Jersey Prentice Hall Publishing 2002
- [4] Chen, C. Analog and Digital Control System Control Design. China Saunders College Publishing 1993