

# Sabit Kanatlı Bir Hava Aracı için Model İzleme Tabanlı İntegral Etkili Model Öngörülü Kontrolör Tasarımı

## Explicit Model Following Based Integral Action Model Predictive Control Design for Fixed Wing Aircraft

Talha Ulukır<sup>1</sup>, İlker Üstoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uçuş Kontrol ve Algoritma Tasarım Mühendisi  
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ, Ankara  
talha.ulukir@tai.com.tr

<sup>2</sup>Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
ustoglui@itu.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada sabit kanatlı bir hava aracının açık model takibi tabanlı boylamsal kontrolü için integral etkili model öngörülü kontrol (MPC) kullanılmıştır. Integral etkili MPC ile birlikte sürekli-hal hatası olmadan referans takibi yapabilmek mümkündür ve ayrıca açık model takibi ile model öngörülü kontrolü destekleyici ileri-yönlü kontrol yüzeyi komutları üretilmiştir, bu sayede geçiş anında takip performansı iyileştirilmiştir. Sistemin ileri yol kazançlarının belirlenmesinde durum uzay matrislerinden faydalanılmış ve sistem açık çevrim dinamiği gözetilmiştir, MPC tasarımında ise Bryson normalizasyonu kullanılmıştır.

### Abstract

In this study, integral effect model predictive control (MPC) is used for open pattern tracking based longitudinal control of a fixed-wing aircraft. With the integral-effect MPC, it is possible to follow the reference without steady-state error, and also forward-direction control surface commands are produced to support the model predictive control with open model tracking, thus improving the tracking performance at the time of transition. State space matrices were used to determine the forward path gains of the system and the system open loop dynamics was observed, while Bryson normalization was used in the MPC design.

### 1. Giriş

Bir sabit kanatlı hava aracının boylamasına kontrolü tüm uçuş zarfı boyunca büyük önem arz etmektedir. Pilot veya üst döngüdeki başka bir kontrolör tarafından verilen referans değerinin iç döngüde hızlı bir şekilde takip

edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle komut verildikten sonraki referansa ulaşılırken geçiş bölgesinin olabildiğince hızlı geçilmesi gerekmektedir. Model izleme tabanlı kontrol sistemi tasarımı güçlü model takip eden bir tasarım tekniğidir ve havacılık uygulamalarında sıklıkla önerilmektedir. [1,2]

Integral etkili MPC, sürekli hal hatası olmadan referans takibi yapabilmesi, sistem kısıtlarını optimizasyona dahil etmesi ve çok değişkenli tasarım yapabilmek kabiliyeti ile büyük avantajlara sahiptir. Çalışma içerisinde hem MPC'nin yukarıda bahsedilen kabiliyetlerinden faydalanılmış hem de kontrolöre verilen referans'tan türetilen ileri-yol kazançları ile geçiş anının kısaltılması hedeflenmiştir. Model öngörülü kontrol yöntemi, kontrol literatüründe çok uzun süredir var olan bir yöntemdir. [3,4] Model öngörülü kontrol yönteminin en büyük avantajları, kontrol probleminin optimum altı çözümlerinin kolayca elde edilebilmesi ve kontrol parametrelerinin kolayca ayarlanabilmesidir. [5,6]

### 2. Hava Aracı Modeli

Tezde kullanılacak uçak modeli, NASA Teknoloji Transfer Programı'nda da bulunan GTM'dir (Generic Transport Model). NASA Havacılık Emniyet Programı, uçaklarda kontrol kaybından kaynaklanan durumları incelemek amacıyla Genel Ulaşım Modeli kapsamında geliştirilen T-2 kuyruk numaralı uçak ile çalışmalar gerçekleştirildi. Bu hava aracında hasar ve arıza nedeniyle kontrolün kaybedilmesi durumunda kontrolü sağlayabilecek uçuş kontrol teknolojilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Doğrusal olmayan uçak modeline ek olarak, hata senaryolarında değişen davranışlar da modele dahil edilmiştir. Klasik uçak

modelleme çalışmalarının ardından uçuşlar gerçekleştirilmiş ve modelin son hali elde edilmiştir.

## 2.1. Sistem Karakteristiği

Uçak doğrusal modeli elde edildiğinde, sabit kanatlı uçaklar için boylamasına ve yanal dinamikler kolayca ayrılabilir. Ses altı hızlarda seyahat eden konvansiyonel uçaklarda uzunlamasına ve yanal olarak ayrılmış olan uçağın doğrusal modelinin kutuplarının konumuna göre uçağın özelliklerini yorumlayabiliriz.

Hava aracının boylamsal hareketini ifade eden durum uzay modeli denklem 1'deki gibi elde edilir. Burada sistem durumlarından  $V$  hava hızını,  $\alpha$  hücum açısını,  $q$  yunuslama hızını ve  $\theta$  yunuslama açısını ifade ederken; sistem girişlerinden birinci giriş ( $\delta_e$ ) irtifa dümeni komutunu ve ikinci giriş ( $\delta_t$ ) gaz kolu komutunu ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -0.727 & 11.2101 & 0.2012 & -19.0598 \\ -0.0076 & -2.0847 & 0.9372 & 0.0047 \\ -0.0145 & -24.7317 & -3.0278 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} -0.0181 & 0.04 \\ -0.0038 & 0 \\ -0.6374 & 0.0091 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_e \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

Buna göre, boyuna dinamiklerin modları Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1: Sistem Boylamsal Dinamiği

Mod	Kutup Yeri	Sönüm Oranı	Zaman Sabiti (s)	Doğal Frekans (rad/s)
Uzun Periyot	-0.0229	0.0796	43.6	0.288
Uzun Periyot	+ 0.287i			
Uzun Periyot	-0.0229	0.0796	43.6	0.288
Uzun Periyot	- 0.287i			
Kısa Periyot	-3.03	0.422	0.330	7.17
Kısa Periyot	+ 6.5i			
Kısa Periyot	-3.03	0.422	0.330	7.17
Kısa Periyot	+ 6.5i			

## 3. Kontrol Yöntemi

### 3.1. İntegral Etkili Model Öngörülü Kontrol Yapısı

Ayrık zaman uzayında doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemin ifadesi denklem 2'deki gibi ifade edilebilir:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot u_k, y_k = C \cdot x_k \quad (2)$$

Burada  $x_k$  sistemin durumunu ve  $u_k$  sistemin girdilerini ifade eder. Model öngörülü kontrol yönteminde, belirli bir ufukta sistemin optimal kontrol işaretinin elde edilmesi denklem 3'deki karesel bir fonksiyon ile ifade edilebilir.

$$J_0(x_0, U) = \sum_{k=0}^{Np-1} x_k^T Q x_k + \sum_{k=0}^{Nc-1} u_k^T R u_k \quad (3)$$

İkinci dereceden fonksiyonda;  $N_p$  sistemin tahmin ufkunu,  $N_c$  sistemin kontrol ufkunu,  $x_0$  ise durum vektörünü belirtir. Model öngörülü kontrolde temel amaç, bu ikinci dereceden fonksiyonu en aza indirecek  $U$  vektörünü hesaplamaktır.  $Q$  ve  $R$  ağırlıklandırma matrisleri de bu vektörün hesaplanmasında önemlidir.  $Q$  matrisi sistemin durumları arasındaki ağırlıklandırmayı ifade ederken,  $R$  matrisi sistemin girdileri arasındaki ağırlıklandırmayı ifade eder.

Klasik durum uzaylı MPC çözümü bir regülatör şeklindedir ve referans izleme için tam olarak uygun değildir. Bu nedenle, bu çalışmada integral eylem MPC yaklaşımı kullanılmıştır. Bu alt çözüm ile MPC yapısı, herhangi bir sürekli hal hatası olmadan verilen referansları takip etmeye uygun olacaktır. Bunun için sistemin matrislerini manipüle etmemiz ve artırılmış hale getirmemiz gerekiyor [7]. Sistemin artırılmış hale getirilmesi için öncelikle denklem 4'teki düzenleme yapılmalıdır.

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & o^T \\ CA & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (4)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} o & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$$

Durum uzayı formuna dayalı olarak, sistemin gelecekteki durum değişkenleri ve çıktıları denklem 5'teki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B(\Delta u(k) + u(k-1)) \\ y(k+1) &= CAx(k) + CB(\Delta u(k) + u(k-1)) \end{aligned} \quad (5)$$

Artırılmış durum uzayı matrisleri için ikinci dereceden fonksiyon denklem 6'daki gibidir.

$$J_0(x_0, U) = \sum_{k=0}^{Np-1} (\text{ref} - y_k^T) * Q * (\text{ref} - y_k) + \sum_{k=0}^{Nc-1} u_k^T * R * u_k \quad (6)$$

Tüm değişkenlerin sistemin önceki çıktıları ve gelecekteki kontrol sinyalleri cinsinden ifade edilebileceğini unutmayın. Çıkış değişkenleri bir vektör olarak ifade edilirse denklem 7 elde edilir.

$$\begin{aligned} Y &= [y(k_i + 1 | k_i) \dots y(k_i + N_p | k_i)]^T \\ \Delta U &= [\Delta u(k_i) \dots \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Bu vektörler ile sistemin öngörü ufkunu daha basit bir şekilde denklem 8'deki şekilde ifade edebiliriz.

$$Y = Fx(k_i) + H\Delta U \quad (8)$$

Burada  $H$  ve  $F$  denklem 9'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

Sisteme verilen referans değeri  $ref_s$  tahmin ufku boyunca genişletilsin. Buna göre, ikinci dereceden fonksiyon denklemini de revize edebiliriz.

$$J = (ref_s - Fx(k_i) + H\Delta U)^T (ref_s - Fx(k_i) + H\Delta U) + \Delta U^T R \Delta U \quad (10)$$

Kısıtlanmamış çözüm için ikinci dereceden bir fonksiyonun minimum olduğu yer, buna göre birinci türevinin 0 olduğu yerdir. Bu durumda Jacobian matrisini  $\Delta U$ 'ya göre türevini alırsak denklem 11'i elde ederiz.

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2\Phi^T (ref_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R})\Delta U = 0 \quad (11)$$

Kısıtlamasız çözüm için kontrol işareti, tahmin matrisleri F ve H ile denklem 12'deki şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta U = (H^T H + \bar{R})^{-1} \Phi^T (ref_s - Fx(k_i)) \quad (12)$$

İkinci dereceden fonksiyonun kısıtlı çözümü için amaç fonksiyonunun birinci türevi yeterli olmayacaktır, burada amaç fonksiyonunu en aza indiren kontrol komutu farklı optimizasyon çözüm yöntemleri ile hesaplanabilir.

### 3.1.1. Ağırlıklandırma Matrisi

İkinci dereceden problemin çözümünde kullanılan ağırlıklandırma matrislerinde Bryson kuralı kullanılmıştır. [8] Bu yöntemde göre Q ve R matrisleri için basit ve makul bir seçim denklem 13'te ifade edilen bir sistem için, denklem 14'teki gibidir.

$$J_{LQR} = \int_0^\infty \left( \sum_{i=1}^p \bar{Q}_{ii} z_i(t)^2 + \rho \sum_{j=1}^m \bar{R}_{jj} u(t)^2 \right) dt \quad (13)$$

$$Q = \text{diag} \left\{ \frac{\alpha_1^2}{x_{1_{max}}^2}, \frac{\alpha_2^2}{x_{2_{max}}^2}, \dots, \frac{\alpha_n^2}{x_{n_{max}}^2} \right\} \quad (14)$$

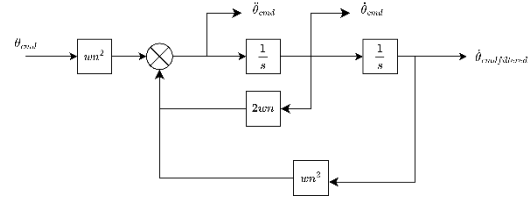
$$R = \rho \text{diag} \left\{ \frac{\beta_1^2}{u_{1_{max}}^2}, \frac{\beta_2^2}{u_{2_{max}}^2}, \dots, \frac{\beta_m^2}{u_{m_{max}}^2} \right\}$$

Temelde, Bryson'ın kuralı  $J_{LQR}$ 'da görünen değişkenleri, her terim için kabul edilebilir maksimum değer 1 olacak şekilde ölçeklendirir. Bu, u ve z'nin farklı bileşenleri için kullanılan birimler sayısal olarak bu değişkenlerin

değerlerini birbirinden çok farklı yaptığında özellikle önemlidir.

### 3.2. Model İzleme Tabanlı Kontrol Yapısı

Tasarımda kullanılan model izleme kontrol yapısı genel şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Komut Filtresi Yapısı.

Model izleme yapısında referans model olarak bir komut filtresi kullanılmakta ve sistemin bu filtre çıktısını takip etmesi beklenmektedir. Bu filtre, sinyallerin hızını, büyüklüğünü ve bant genişliğini sınırlayabilir, komut sinyallerini yumuşatabilir.

Kullanılacak komut filtresi sönüm oranı ( $\zeta$ ) aşırıdır bir cevap elde etmek için 1 olarak seçilmiştir. Sistemin boyutsal dinamiğinin kısa periyot doğal frekansı ( $\omega_n$ )  $7.17 \frac{rad}{s}$  olması nedeniyle komut filtresinde de aynı doğal frekans tercih edilmiştir.

Euler denklemlerine göre  $\dot{\theta}$  ile yunuslama hızı arasındaki ilişki denklem 15'teki gibidir.

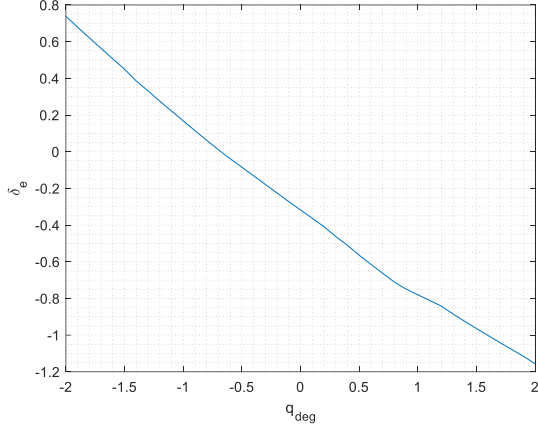
$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (15)$$

Çalışma kapsamında yanal dinamiklerin ihmal edilmesi sebebiyle  $\phi = 0$  (yatış açısı) ve  $r = 0$  (sapma hızı) olarak alınmıştır, bu durumda ise  $\dot{\theta} = q$  olarak ifade edilebilmektedir.

Komut filtresinin ilk çıktısı  $\ddot{\theta}_{cmd}$ , sistemin  $\ddot{\theta}$  ve  $\delta_e$  ilişkisini ifade eden katsayı ile çarpılarak ileri yönlü bir terim olarak kontrol yüzeyine gönderilmektedir.  $\ddot{\theta}$  ve  $\delta_e$  ilişkisi, sistemin kontrol matrisinde  $B_{(3,1)} = -0.6374$  olarak görülmektedir.

İkinci çıktı olan  $\dot{\theta}_{cmd}$ , sistemin  $\dot{\theta}$  ve  $\delta_e$  ilişkisini ifade eden katsayı ile çarpılarak ileri yönlü bir terim olarak kontrol yüzeyine gönderilmektedir. Bu terimi elde etmek için sistem farklı  $\dot{\theta}$  koşullarında doğrusallaştırılmıştır ve  $\delta_e$ 'ün bu doğrusallaştırmalar ile değişimi incelenmiştir. Farklı  $\dot{\theta}$ 'lar ile yapılan doğrusallaştırmalar sonucu elde edilen  $\delta_e$  değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre iki

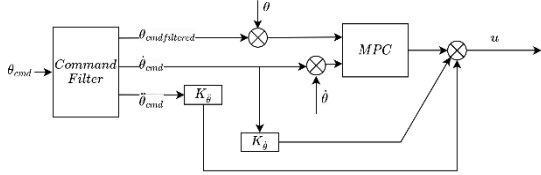
değişken arası lineer ilişki kullanılarak  $\dot{\theta}_{cmd}$  -0.4721 ile çarpılarak ileri yönlü olarak beslenmektedir.



Şekil 2: Farklı Yunuslama Hızlarında İrtifa Dümeni Değişimi.

### 3.3. Bütünleşik Kontrol Yapısı

Model izleme tabanlı kontrol ile integral etkili model öngörülü kontrol yapısının bir arada kullanımı Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3: Bütünleşik Kontrol Yapısı.

Model izleme tabanlı kontrol kuralı ile referans ve geri beslemeler arası ilişki denklem 16'teki gibi kurulmuştur.

$$u = \ddot{\theta}_{cmd}K_{\ddot{\theta}} + \dot{\theta}_{cmd}K_{\dot{\theta}} + u_{MPC} \quad (16)$$

Kontrol işaretinin elde edilmesini detaylı ifade edecek olursak, öncelikle referans modelin aynı kontrol işareti karşısında cevabı denklem 17'deki şekildedir.

$$x_m = u_{rm}\dot{x}_m \quad (17)$$

$$\dot{x}_m = u_{rm}\ddot{x}_m$$

Gerçek sistemin çıkışları için ise kontrol işareti sonucunda oluşan çıktısı denklem 18'deki gibidir.

$$x_p = u_p\dot{x}_p \quad (18)$$

$$\dot{x}_p = u_p\ddot{x}_p$$

Denklem 17 ve 18'in farkı referans model ile gerçek sistemin farkını ifade etmektedir, bu durumda denklem 19 elde edilir.

$$x_e = x_m - x_p = u_{rm}\dot{x}_m - u_p\dot{x}_p \quad (19)$$

$$x_e = \dot{x}_m - \dot{x}_p = u_{rm}\ddot{x}_m - u_p\ddot{x}_p$$

$x_e$  ve  $\dot{x}_e$  kompanse etmek için bir kontrolör yapısı gerekmektedir, bu yapı MPC seçilmiş ve çıktısı olan kontrol işareti komutu  $u_{MPC}$  ile ifade edilmiştir.

İleri beslemeli denetleyici  $\ddot{\theta}_{cmd}K_{\ddot{\theta}}$  ve  $\dot{\theta}_{cmd}K_{\dot{\theta}}$ , ideal modelin girişindeki değişikliklere hızlı tepkiler vererek izleme performansını iyileştirir.

Tablo 2: Kontrol Parametreleri

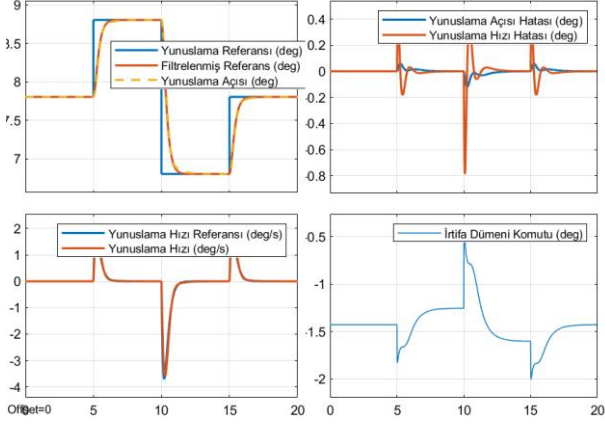
Parametre	Değer	Kullanımı
$\alpha_1$	0.33	Hız tutuş ağırlıklandırması
$\alpha_2$	0.33	Yunuslama hızı tutuş ağırlıklandırması
$\alpha_3$	0.33	Yunuslama açış tutuş ağırlıklandırması
$\rho$	1	Ağırlıklandırma matrisi oranı
$\beta_1$	0.5	İrtifa dümeni ağırlıklandırması
$\beta_2$	0.5	Gaz kolu ağırlıklandırması
$x_{1-max}$	3	Hız tutuş hata aralığı
$x_{2-max}$	5	Yunuslama hızı tutuş hata aralığı
$x_{3-max}$	0.1	Yunuslama açış tutuş hata aralığı
$u_{1-max}$	30	İrtifa dümeni en yüksek değeri
$u_{2-max}$	0.1	Gaz kolu en yüksek değeri
$K_{\ddot{\theta}}$	-0.6374	İkinci türev ileri yol kazancı
$K_{\dot{\theta}}$	-0.4721	Birinci türev ileri yol kazancı
$\zeta$	1	Komut filtresi sönüm oranı
$w_n$	7.17	Komut filtresi doğal frekansı

Elde edilen MPC ağırlıklandırma matrisleri denklem 17'deki gibidir.

$$Q = \begin{bmatrix} 0.00443 & 0 \\ 0 & 684.7243 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 68.889 & 0 \\ 0 & 0.04 \end{bmatrix} \quad (17)$$

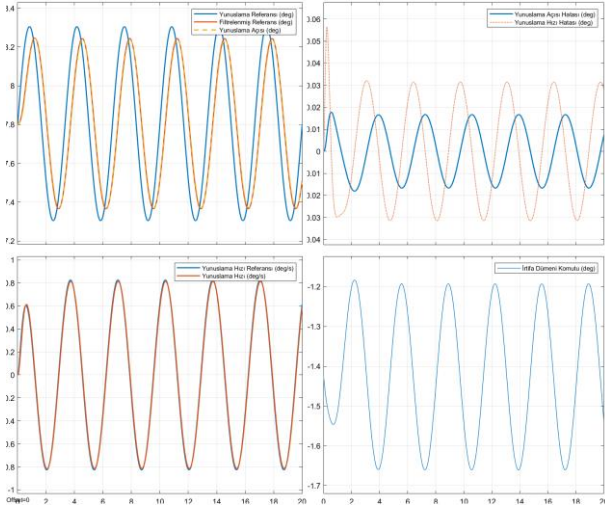
#### 4. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan kontrolörün referans takip performansını değerlendirmek için farklı tipte komutlar verilmiştir. Her iki yöne de aynı genlikte komut verildiği durumdaki sistem cevabı Şekil 4'te görülebilir.



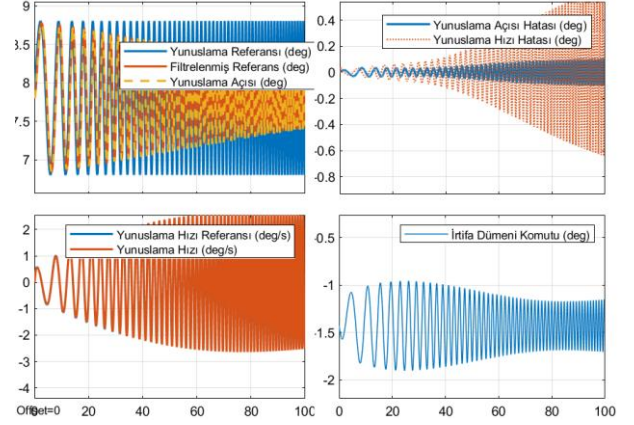
Şekil 4: Eşit Genlikli Komutlara Cevabı

0.3 Hz frekanslı ve 1 derece genlikli sinüse karşılık sistem cevabı Şekil 5'te görülebilir.



Şekil 5: Sinüs Cevabı

0.1 Hz ile 1 Hz arası chirp komutlara karşılık sistem cevabı Şekil 6'da görülebilir.



Şekil 6: Chirp Cevabı Komutlar

#### 5. Değerlendirme

Model öngörülü kontrolör sistem kısıtlarını dikkate alarak optimal kontrol işaretini hesaplamaktadır, bu yapısı sebebiyle ağırlıklandırma matrislerinin doğru seçilmesi durumunda her döngüde belirlenen ufukta optimal kontrol işaretini hesaplamaktadır. Integral etkili MPC ise klasik MPC'den farklı olarak sistem durumlarındaki bozulmaları regüle eden bir yapıdan sistemde tanımlanan hatayı sürekli hal hatası olmadan sıfırlayacak bir yapıdadır.

Model izleme kontrol yapısı ise ideal sistem tanımlaması ile kontrol edilecek sistemi belirlenen bir davranışa benzetmeye çalışmaktadır. Bu mimaride kullanılacak ideal modelin karakteristiğinde yer alan hızlanma ve ivmelenme eğrilerinin ileri yönlü olarak beslenmesi gerçek sistemin verilen komutları hızlı takip etmesini sağlamaktadır.

Model izleme kontrol yapısının güçlü referans takip yapısı ile model öngörülü kontrol yapısının çevrimiçi optimizasyon çözümü kısıtlar içerisinde düşük hata ile referans takibi yapmayı sağlamıştır. Tasarlanan boylamsal kontrolörün farklı referans tiplerine ve değerlerine verdiği cevaplar incelendiğinde hem basamak komutları hem de çeşitli frekanstaki komutları başarıyla takip edebildiği görülmektedir.

Mevcut yapıda MPC'nin bir 100 Hz'lik bir döngüde bir çözümü yaklaşık olarak 110 Hz'de bulunduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda, daha hızlı sonuç veren MPC çözümleri ile aynı yapı uygunacaktır. Model izleme tabanlı kontrol yaklaşımında referans modelden türetilen ileri yönlü kontrol komutlarının, gerçek sistemden davranışından durumunda ters/olumsuz etkiler yapabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

### Kaynakça

- [1] Berger, Tom & Tischler, Mark & Hagerott, Steven & Gangsaas, Dagfinn & Saeed, Nomaan. (2012). Longitudinal Control Law Design and Handling Qualities Optimization for a Business Jet Flight Control System.
- [2] Gangsaas, D., Bruce, K., Blight, J. ve Ly, U.L. (1986). Application of modern synthesis to aircraft control: Three case studies, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(11), 995–1014.
- [3] Kothare, S. L. D. O., & Morari, M. (2000). Contractive model predictive control for constrained nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(6). <https://doi.org/10.1109/9.863592>
- [4] Muske, K. R., & Rawlings, J. B. (1993). Model predictive control with linear models. *AIChE Journal*, 39(2). <https://doi.org/10.1002/aic.690390208>
- [5] Garcia, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: Theory and practice-A survey. *Automatica*, 25(3). [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2)
- [6] Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., & Sokaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6). [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9)
- [7] Rossiter, J Anthony (2017) Model-based predictive control: A practical approach. In *Model-Based Predictive Control: A Practical Approach*, Book, 2017
- [8] A.E. Bryson, Y.-C. Ho, G.M. Siouris, Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 9 (2008). <https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310229>.