

MODEL TAHMİNLİ KONTROL YAKLAŞIMI İLE HELİKOPTERLER İÇİN YÖRÜNGE EN-İYİLEMESİ VE TAKİBİ

Arda Yücekayalı¹
Türk Havacılık ve Uzay Sanayi, Ankara

Ali Türker Kutay²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Helikopterler için yörünge en iyilemesi optimal kontrol yöntemi olan model tahminli kontrol, MTK, ("Model Predictive Control") yaklaşımı ile çalışılmıştır. Karmaşık, etkileşimli ve lineer olmayan bir helikopter matematik modeli üzerine, lineer ve lineer olmayan tahmin modellerini içeren MTK yaklaşımı uygulanmış, görev pas noktalarının takibi gibi multi-disipliner en iyileme fonksiyonunu minimize eden yörünge üretilmesi ve takibi simülasyonları yapılmıştır. Çeşitli disiplinlerden beslenen ve karmaşık optimizasyon fonksiyonu için, MTK yaklaşımının başarımı değerlendirilmiş, tahmin ve kontrol ufku sürelerinin sonuçlara etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda tipik bir 5 ton sınıfı helikopter modeli ile çeşitli parkurlarda (slalom, dönüşlü tırmanış, tırmanış ve hızlanma vb) simülasyonlar yapılmış, MTK yaklaşımının helikopterler için yörünge en iyilemesi ve takibi için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Rotorlu hava araçları karmaşık aeromekanik, uçuş dinamiği ve etkileşim problemleri sergilemekte, bu da lineer olmayan, kapsamlı ve bütünlük matematik modelleme ihtiyacı oluşturmaktadır. Bu matematik modeller kullanılarak yapılacak yörünge optimizasyonu ve takibi sistemin anlık dinamik tepkisini geribildirim olarak almalı, ileri davranışını tahmin etmeli ve akupile çözüm üretmelidir. Burada yörünge ile belirtilen uçuş izi/koordinatlarının yanı sıra hava aracının, istenilen uçuş izini nasıl takip ettiği, hız, Euler açıları, güç gibi uçuş dinamiği parametre bilgilerini kapsamaktadır. Yörünge en iyilemesi için performans, güvenlik, konfor ve görev başarımı gibi farklı disiplinlerden hedefler de dahil edildiğinde ve lineer olmayan bir matematik modelin hesaplanan yörüngeyi takip etmesi amaçlandığında, Model Tahminli Kontrol (MTK, "Model Predictive Control") uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir.

Tipik bir MTK yaklaşımı, çeşitli hedeflerden beslenen bir en iyileme fonksiyonunu minimize etmeye çalışan ve belirli sınırlandırmalara dayanan en iyileme basamağını, sistemin ileri dinamik tepkisini tahmin eden bir tahmin modeli ile birleştirmekte, yörünge hesabı yapmakta ve sistemin hesaplanan yörüngeyi takip etmesi için uygun optimal girdi setini oluşturmaktadır [Wang, 2002]. Klasik yaklaşımda, MTK optimal kontrol ve sistem dinamik tepkisinin geri bildirimini sağlayan, önceden belirlenmiş bir uçuş izi takip algoritması olarak çalışmaktadır [Neunert 2016, Castillo 2007]. Fakat literatürde MTK yaklaşımını yörünge en iyileme ve takibi için kullanan birçok çalışma da mevcuttur [Lapp 2004].

¹ Helikopter Yük Grubu Başmühendisi., E-posta: ayucekayali@tai.com.tr

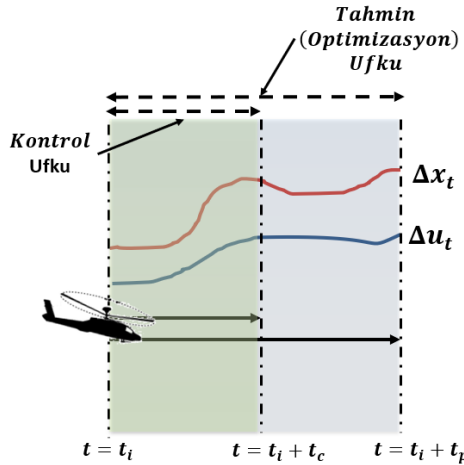
² Asst. Prof Dr. Ali Türker Kutay, E-posta: kutay@metu.edu.tr

Bu çalışmanın güncel aşamasında MTK yaklaşımı ile konvansiyonel bir helikopter konfigürasyonu için, belirlenmiş görev pas noktalarından geçiş sağlayan, yörünge en iyilemesi ve takibi çalışılmıştır. Çalışmanın devamında, aeroakustik, performans, güvenlik ve konfor konuları en iyileme algoritmasının içine dahil edilerek, MTK yaklaşımı ile yörünge en iyilemesi çalışılacaktır. Geliştirilen en iyileme ve yörünge takip yapısının çözünürlüğü ve çalışma hızı, tahmin modelinin çözünürlüğünde bir dengeye ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda lineer ve lineer olmayan tahmin modelleri ile MTK yaklaşımı uygulanmış, yörünge en iyilemesi ve takibi yapılmış, hedef fonksiyon, uçuş izi takip başarımı, hesaplama süresi vb gibi konularda kıyas yapılmıştır.

YÖNTEM

Çalışmanın temel amacı, en iyilenmiş yörünge hesabı problemini, görev pas noktalarından geçilmesi kaidesi ile MTK ve optimal kontrol yaklaşımı ile çözmektir. Amaç multi-disipliner ve lineer olmayan yörünge en iyileme olduğundan, model tabanlı, sistemin ileri dinamik tepkisinin tahmini avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, kullanılan tahmin modelin çözünürlüğüne bağlı olarak üretilen yörünge takip edilemeyeceği MTK yaklaşımında önceden kestirilmekte, uçuş izinden sapmalar ise bir sonraki en iyileme aşamasında dikkate alınarak karşı önleme veya düzeltme verilmektedir. Çalışmada, tahmin modeli olarak hem lineer hem de lineer olmayan modeller uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan lineer olmayan helikopter matematik modeli ve MTK alt yapısı ile organizasyonu ile ilgili detaylar, ilgili doktora tezinde [Yücekayalı, 2020] bulunulabilir.

Model tahminli kontrol metodunda, Şekil 1’ de gösterildiği gibi tahmin ufku, kontrol ufkundan uzun tutmak, en iyileme algoritmasına doğal bir ileri besleme (“feedforward”) özelliği kazandırmakta, bu da engellerin aşımında/sakınımını ve görev pas noktalarına yaklaşma anında önceden kestirim yapılmasını sağlayarak hem yörünge en iyilemesinde hem de takibinde başarımlı arttırmaktadır. Buna ek olarak, rotorlu hava araçlarında, konfor ve güvenliği etkileyen düzlemsel ve açısal ivmelenmeler hızlı dinamiğe sahip olmakta, bu da ileri besleme özelliğinin avantajını arttırmaktadır.



Şekil 1 Tipik bir MTK metodu için tahmin ve kontrol ufuklarının temsili [Yücekayalı 2019]

Bu çalışmada, gradyan tabanlı, lineer olmayan, sınırlandırılmış en iyileme metodu kullanılmıştır. Bu yaklaşım global optimum çözümü sağlayamayacağı öngörülmektedir. Fakat, literatürde de bahsedildiği gibi [Hartjes 2019], gradyan tabanlı yaklaşım yörünge en iyileme hesaplamalarında hızlı, her zaman bir önceki aşamadan daha iyiye (konveks) ve stabil çözüm sağladığından uygun değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan global hedef fonksiyonu denklem (1) ile verilmiştir. Çalışmanın temel amacı lineer ve lineer olmayan MTK yaklaşımlarının kıyası olduğundan ve performans, güvenlik ve konfor konuları çalışmanın ileri versiyonlarında dahil edileceğinden, bu bildiride sadece görev pas noktalarından geçişi sağlayan, görev planlaması ve görev başarımını sağlayan denklem (2) ile verilen indirgenmiş hedef fonksiyonu kullanılmıştır.

$$J_{Overall} = [J_{Fuel} J_{Safety} J_{Trim} J_{Comfort} J_{Position} J_{Direction}] \quad (1)$$

$$J_{Overall} = [J_{Trim} J_{Position} J_{Direction}] \quad (2)$$

Denklem (3) ile verilen helikopter kontrol girdileri en iyileme fonksiyonunun içine dahil edilmiştir. Bu sayede, ani ve yüksek kontrol girdilerinin üretilmesi, en iyileme fonksiyonu için fazladan penaltı getireceğinden, sert manevralardan kaçınım sağlanabilmektedir.

$$u = [\theta_0 \ \theta_{1c} \ \theta_{1s} \ \theta_p] \quad (3)$$

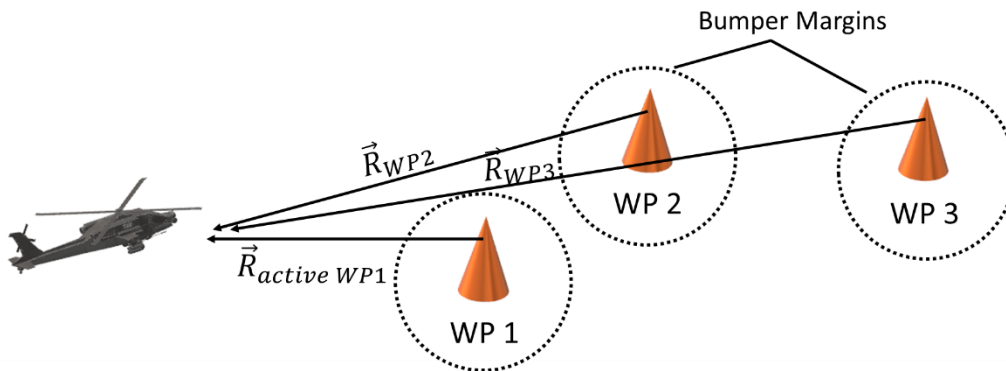
kontrol girdi dizisinde θ_0 pilot kolektif, θ_{1c} θ_{1s} pilot saykik ve θ_p pilot pedal girdilerini temsil etmektedir. Hedef fonksiyonu ve platform pilot girdi dizileri göz önünde bulundurulduğunda, en iyileme fonksiyonu denklem (4) şeklinde oluşturulmuştur.

$$F = J_{Overall} Q Q J_{Overall}^T + u R R u^T \quad (4)$$

burada F minimize edilecek en iyileme fonksiyonunu, $Q Q$ ve $R R$ kare ağırlık matrislerini temsil etmektedir. Ağırlık matrisleri denklem (5) ile temsil edilmekte, hedef ve pilot girdi değişkenlerine öncelik sıralaması sağlanabilmektedir.

$$Q Q = \begin{bmatrix} Q_1 & & \\ & \ddots & \\ & & Q_n \end{bmatrix} \quad R R = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & \ddots & \\ & & R_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu çalışmanın temel amacı olan çok sayıda görev pas noktalarından geçişin sağlanması için, görev planlama algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma aynı anda tüm görev pas noktalarını ("waypoint") göz önünde bulundurmakta, yörünge en iyilemesi hesaplamalarında rol almakta ve görev pas noktaları için geçiş sıralamasını belirlemektedir. Görev planlama algoritması, en iyileme fonksiyonuna $J_{Position}$ ve $J_{Direction}$ hedef fonksiyonları ile katkıda bulunmaktadır. $J_{Position}$ hedef fonksiyonu, tüm görev pas noktalarına olan anlık uzaklıktan beslenmektedir. Sıralamada ilk olan görev pas noktası aktif pas noktası olarak temsil edilmekte ve en yüksek öneme sahip olmaktadır. Simulasyon boyunca ve en iyileme hesaplamaları esnasında tüm pas noktalarına olan uzaklık ve aktif pas noktasının indeksi bilgisi sağlanmakta ve hesaplamalara ileri besleme özelliği sağlanmaktadır.



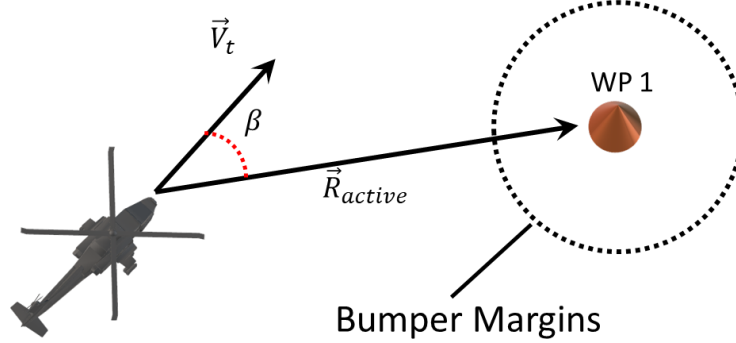
Şekil 2 Pozisyon hedef fonksiyonu için görselleştirme

Her görev pas noktasından bir penaltı katkısı gelmekte ve denklem (6) ile verilen toplama fonksiyonu ile pozisyon hedef fonksiyonunun toplam değeri anlık olarak hesaplanmaktadır.

$$J_{position} = \sum_{m=Active\ WP}^{WPn} a^m \frac{1}{|\vec{r}^m|} \quad (6)$$

burada WPn toplam pas noktası sayısını, $Active\ WP$ aktif pas noktası indeksini, $\vec{r}^m$ pas noktalarına anlık uzaklığı, a^m ile pas noktaları arasında önem sıralaması yapmayı sağlayan ağırlık parametresini temsil etmektedir. Ağırlık parametresi görev planlama algoritması tarafından anlık

olarak modifiye edilebilmektedir. $J_{Direction}$ hedef fonksiyonu ise helikopterin uçuş vektörü ile aktif görev pas noktası pozisyon vektörü arasındaki açı ile değişen, ek bir penaltı fonksiyonu olarak toplam en iyileme fonksiyonuna katkı yapmaktadır. En iyileme fonksiyonu, Şekil 3 ile görselleştirilen uçuş vektörü ile aktif pas noktası pozisyon vektörünü üst üste getirmeye çalışmaktadır. Her iki pozisyon ve yönelim hedef fonksiyonları için, görev pas noktaları etrafında belli bir yarıçapta tampon (“bumper”) bölge oluşturulmuştur ve helikopter bu bölgeye giriş yaptığı anda görev pas noktasından geçmiş kabul edilmektedir.



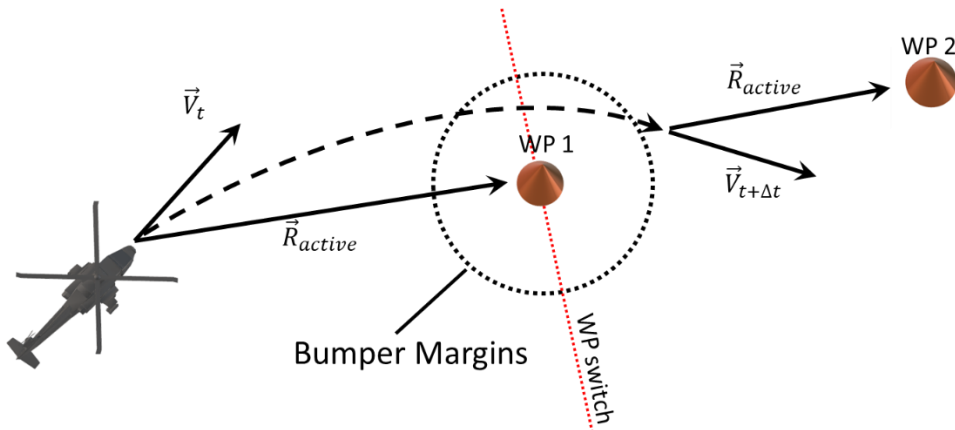
Şekil 3 Yönelim hedef fonksiyonu için görselleştirme

Yönelim hedef fonksiyonu, $J_{direction}$, denklem (7) ile hesaba dahil edilmektedir.

$$J_{direction} = |1 - \cos(\beta)| = \left| 1 - \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \cdot \frac{\vec{R}_{active WP}}{|\vec{R}_{active WP}|} \right| \quad (7)$$

burada, $\vec{R}_{active WP}$ helikopterin anlık pozisyonu ile aktif pas noktası arasındaki vektörü, $\vec{V}$ helikopterin anlık uçuş vektörünü ve β bu iki vektör arası açığı temsil etmektedir.

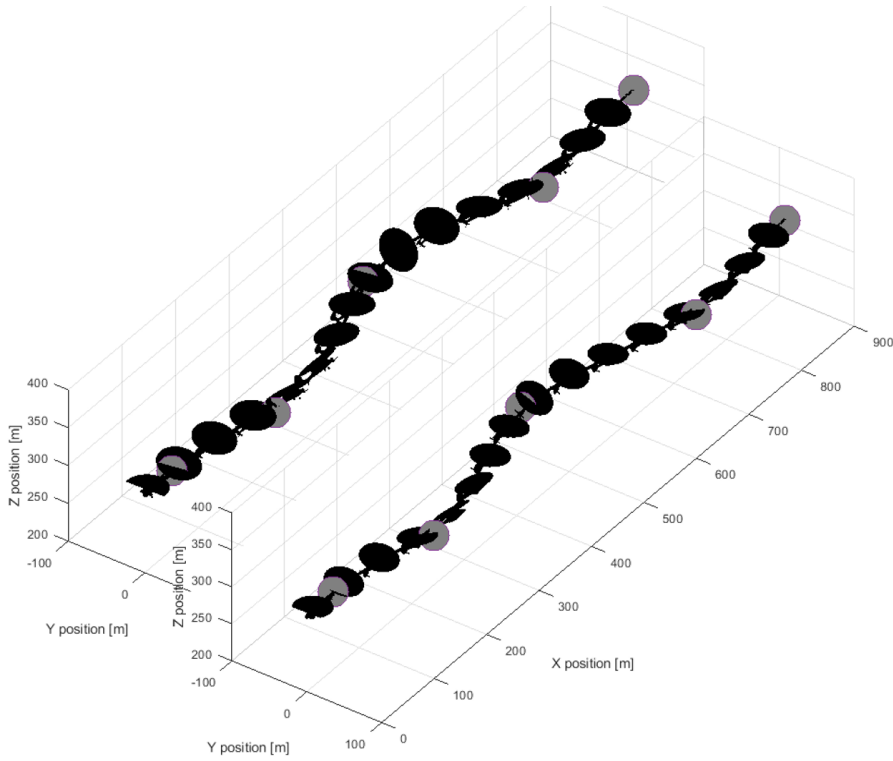
Her iki hedef fonksiyonu, görev planlama algoritması tarafından anlık olarak hesaplanmaktadır. Görev planlama algoritması helikopterin anlık pozisyonunu, hız vektörünü, pas noktaları pozisyonlarını, tampon bölgeleri göz önünde bulundurarak, görev pas noktaları arasında sıralama yapmakta, aktif pas noktasını belirlemekte ve geçmiş olan pas noktalarını hesaptan çıkarmaktadır. Aktif pas noktası belirlenmesinde iki değişim (“switching”) kriteri belirlenmiştir. Birincisi, simülasyon esnasında veya MTK aşamasında tahmin ufku boyunca helikopterin anlık pozisyonunu monitor etmekte ve aktif pas noktası tampon bölgesine geçiş sağlanası durumunda, aktif pas noktası değişimini sağlamaktadır. İkinci değişim kriteri ise, Şekil 4’de görselleştirildiği üzere, simülasyon veya MTK aşamasında tahmin ufku boyunca, aktif pas noktası merkezinde helikopter anlık hız vektörüne dik bir yüzey oluşturulması ve bu yüzeyden geçiş sağlandığı taktirde aktif pas noktası değişimi yapılması kaidesine dayanmaktadır. Bu sayede, yörünge en iyilemesi ile aktif pas noktasından veya tampon bölgesinden geçiş sağlanamaması durumunda, bir sonraki pas noktasının hedeflenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4 Görev pas noktası değişim kriteri için görselleştirme

UYGULAMALAR

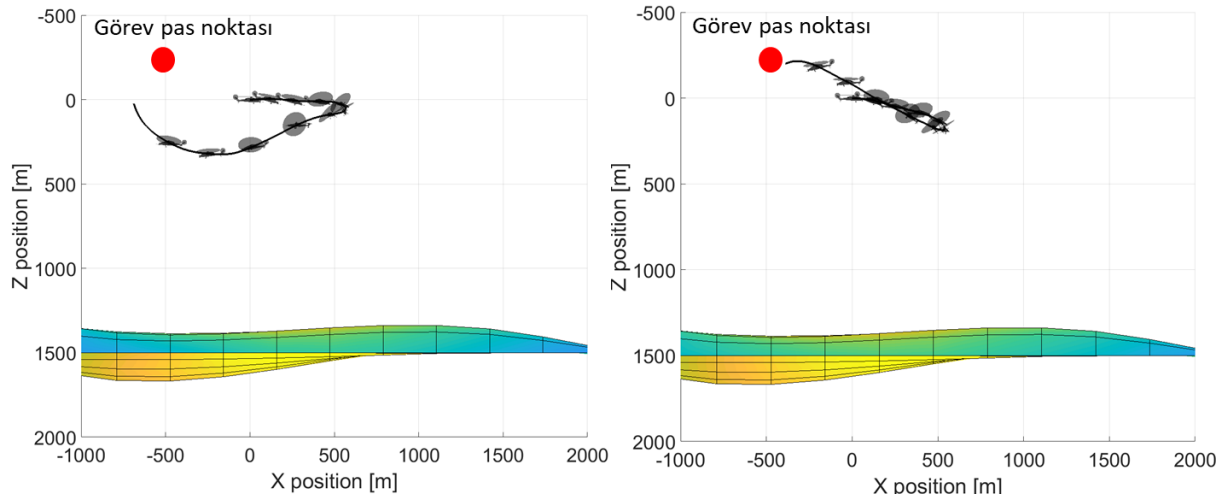
Tipik bir 5 ton sınıfı konvansiyonel helikopter, lineer olmayan matematik modeli üzerinde [Senipek 2017], model tahminli kontrol yaklaşımı ile yörünge en iyileme ve takibi için optimal kontrol çalışmaları yapılmıştır. Lineer ve lineer olmayan MTK yöntemleri ile yörünge en iyilemesi ve takibi yapılmış ve kıyaslanmıştır. Bu kapsamda öncelikle, basit bir slalom manevrası incelenmiştir. Helikopter başlangıç olarak tipik bir ileri hız olan 80 knot düz uçuşta dengelenmiş, 900 metre uzunluğunda 50'er metre yanal yönlerde yerleştirilmiş 5 pas noktasından geçiş parkuru lineer ve lineer olmayan MTK yaklaşımları ile simülasyonlar yapılmıştır. Slalom manevrası için üretilen en iyilenmiş yörünge ve takip simülasyon sonucu Şekil 5'de verilmiştir. Gri küreler görev pas noktalarını temsil etmektedir.



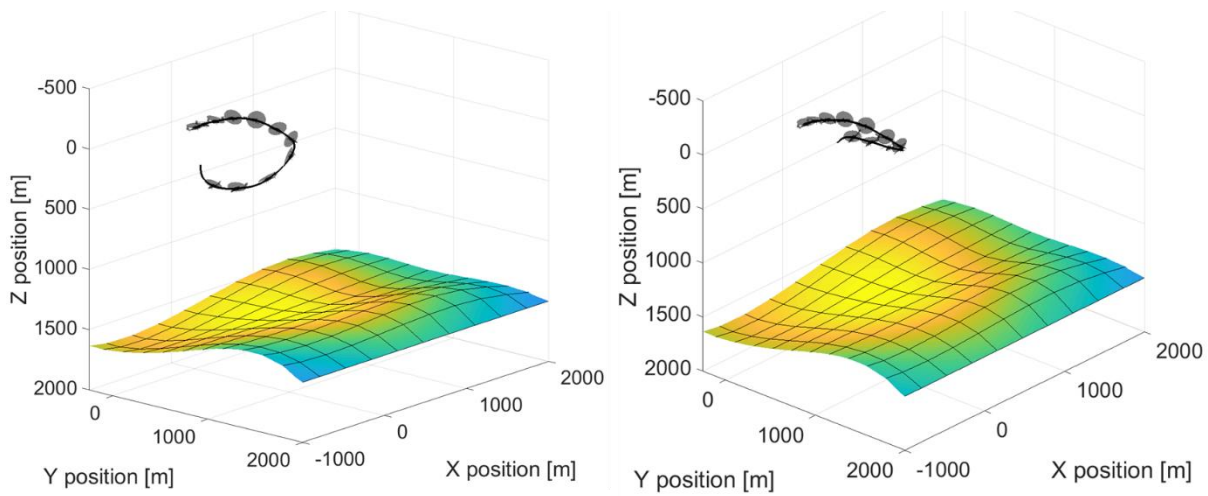
Şekil 5 Lineer (Solda) ve lineer olmayan (sağda) tahmin modelleri ile slalom manevrası yörünge optimizasyonu

İki MTK yaklaşımı için de görev başarımı sağlanmış, lineer MTK için en iyileme dahil toplam simülasyon gerçek zamanlı olduğu, lineer olmayan MTK için ise en iyileme süresinin kullanılan tahmin ufkuna göre değiştiği gözlemlenmiştir. Slalom manevrası için kontrol/tahmin ufkı oranı 2/10 saniye kullanılmış, bu oran ile toplam simülasyon süresi lineer olmayan MTK ile yaklaşık 250 kat daha yavaş olduğu belirlenmiştir.

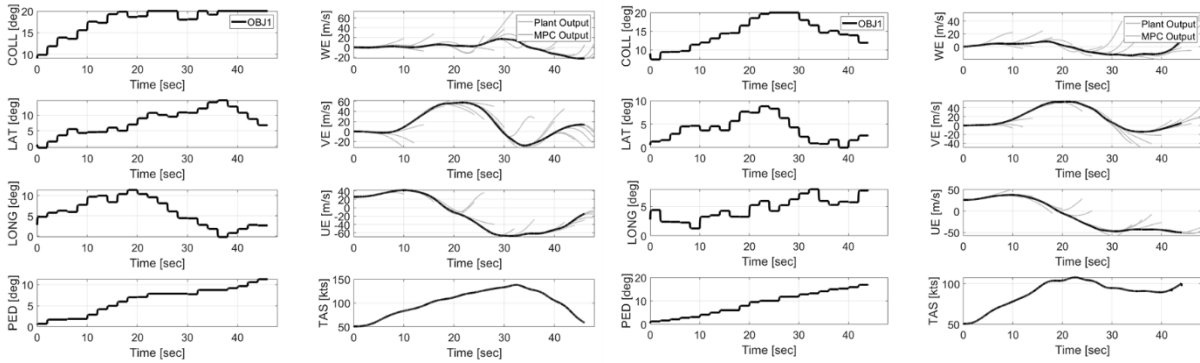
Slalom manevrası gibi görece kolay bir parkurda, lineer MTK yaklaşımının simülasyon süresi yönünden çok daha verimli olduğu, görev başarımı açısından da bir dezavantajının olmadığı gözlemlenmiştir. Lineer ve lineer olmayan MTK'ların daha kapsamında değerlendirilebilmesi için, 180 derece dönüş ve tırmanış görev adımlarını içeren görece daha kompleks bir parkurda kıyas çalışması yapılmıştır. Başlangıç olarak 50 knot düz uçuşta dengelenmiş helikopterin, 180 derece dönüş yapıp, 250m irtifa kazanmasını gerektirecek bir görev pas noktası oluşturulmuş, her iki MTK yaklaşımı ile de yörünge en iyilemesi ve takibi simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen yörünge ve takip performansları, yörünge görselleştirmesi, pilot kontrol girdi ve helikopterin dinamik tepkileri kapsamında Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur. Yapılan çalışmadan, lineer olmayan helikopter modeli üzerinde, slalom parkuruna görece daha kompleks görev profilleri için lineer MTK yaklaşımı ile görev başarımının sağlanamadığı değerlendirilmiştir.



Şekil 6 Dönüştürme parkuru, sol: lineer MTK, sağ: lineer olmayan MTK

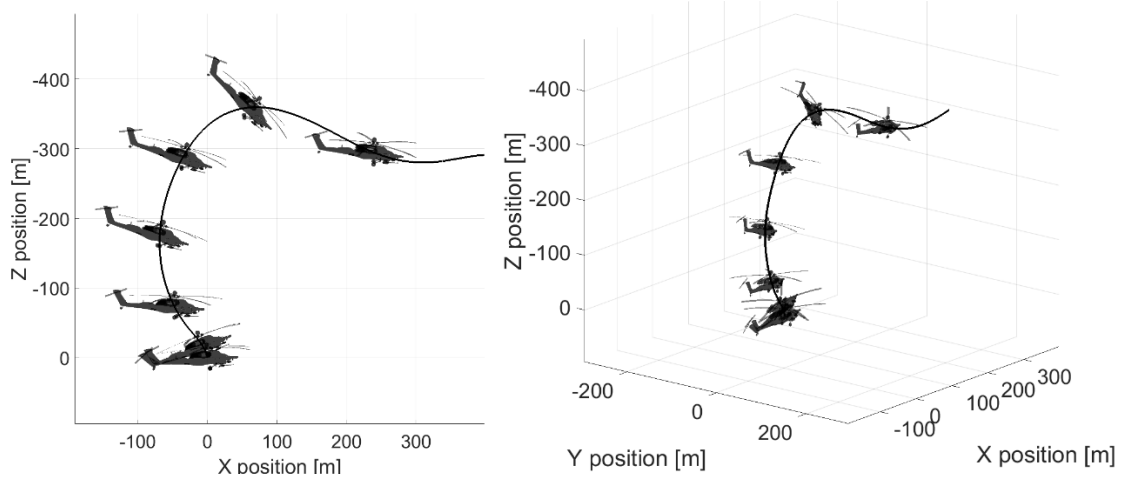


Şekil 7 Dönüştürme parkuru, sol: lineer MTK, sağ: lineer olmayan MTK

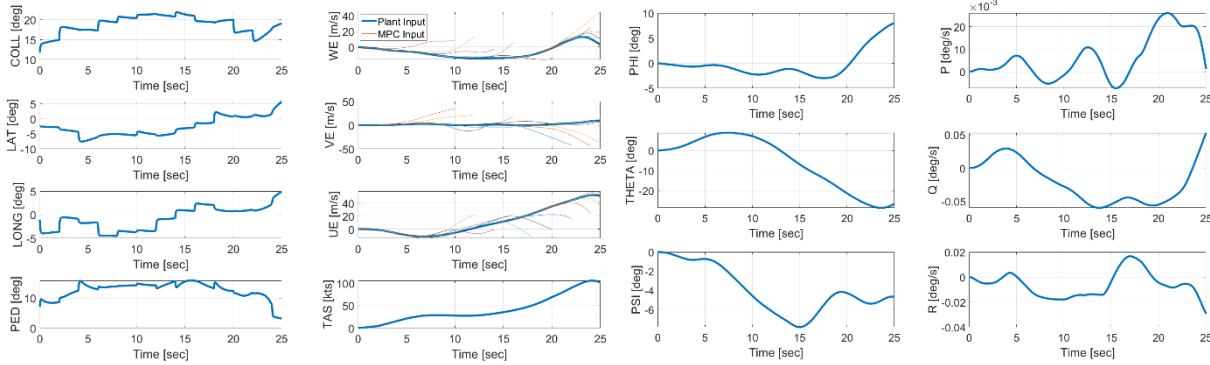


Şekil 8 Dönüştürme parkuru, sol: lineer MTK, sağ: lineer olmayan MTK

Lineer olmayan helikopter matematik modeli için, hesaplama süresi dezavantajına rağmen, performans, güvenlik, konfor gibi disiplinlerin de en iyileme fonksiyonuna dahil olacağı ve en iyileme fonksiyonunu daha da karmaşık hale getireceği öngörüsü ile, lineer olmayan MTK yaklaşımının kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Lineer olmayan MTK yaklaşımının kabiliyetinin değerlendirilebilmesi için iki görev profili için daha simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. İlk olarak yerden kalkış, dikey 300m azami tork seviyesinde sabit baş açısı ile tırmanış ve 100 knot ileri hıza azami ivme ile hızlanma görev profili için simülasyon yapılmıştır. Lineer olmayan MTK yaklaşımı ile yörünge en iyileme ve takip performansı, yörünge görselleştirmesi, pilot kontrol girdileri ve helikopter dinamik tepkisi kapsamında Şekil 9 ve Şekil 10 ile sunulmuştur.

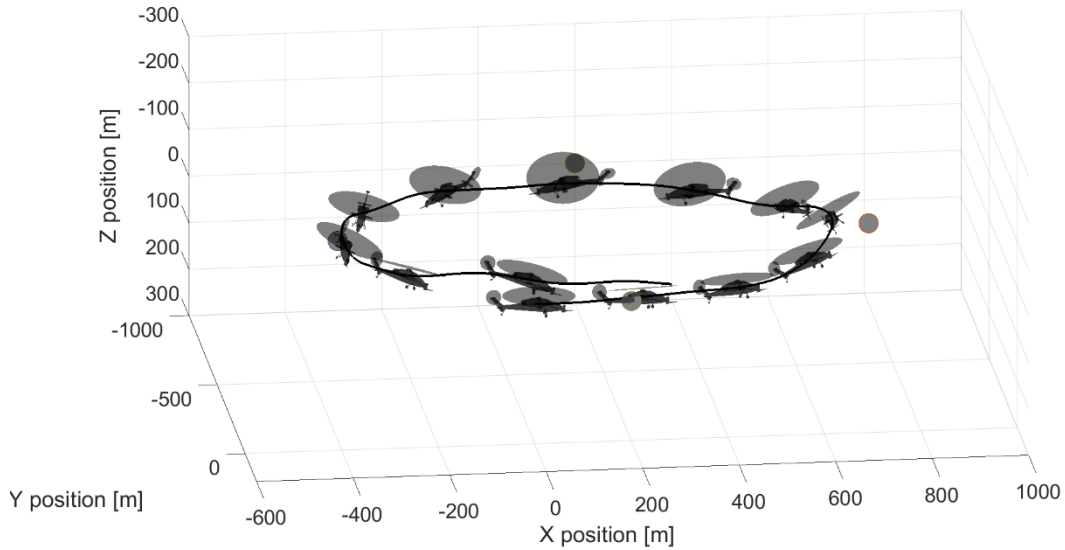


Şekil 9 Tırmanış ve hızlanma görev profili lineer olmayan MTK sonuçları

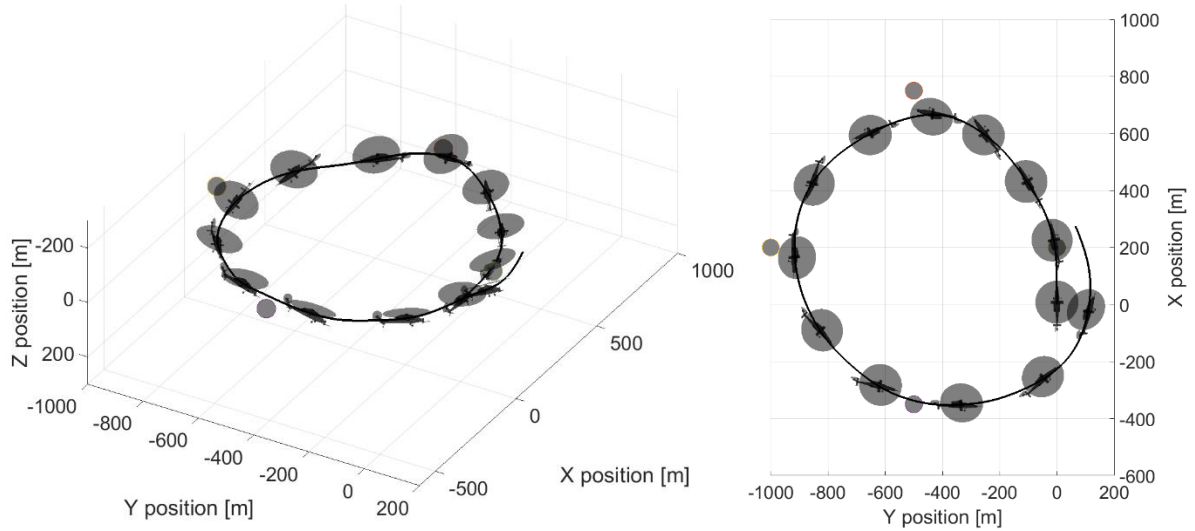


Şekil 10 Tırmanış ve hızlanma görev profili lineer olmayan MTK sonuçları

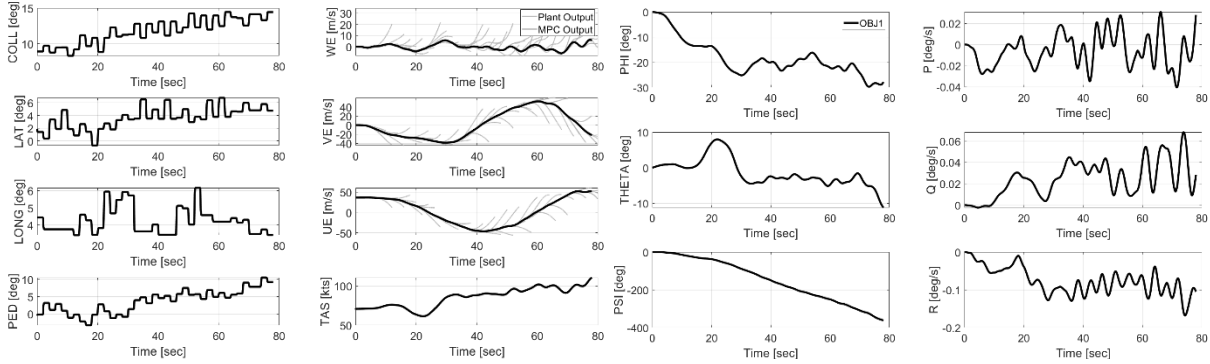
Lineer olmayan MTK kabiliyetinin değerlendirmesi için ikinci çalışma, sabit yükseklikte, hızlanarak sabit yarıçapta 360 derecelik dönüş görev profili ile yapılmıştır. Bu kapsamda, başlangıç olarak 60 knot düz ileri uçuş koşunda dengelenmiş helikopterin, 500 metre yarıçapta dairesel bir parkurda sabit yükseklikte fakat hızlanarak 360 derece dönüş görevi profili 4 adet görev pas noktası ile oluşturulmuştur. Lineer olmayan MTK yaklaşımının bu görev için yörünge en iyileme ve takip performansı, yörünge görselleştirmesi, pilot kontrol girdileri ve helikopter dinamik tepkisi kapsamında Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13 ile sunulmuştur.



Şekil 11 360 derece dönüş görev profili, lineer olmayan MTK sonuçları



Şekil 12 360 derece dönüş görev profili, lineer olmayan MTK sonuçları



Şekil 13 360 derece dönüş görev profili, lineer olmayan MTK sonuçları

SONUÇ

Bu çalışma ile, model tahminli kontrol yaklaşımının, helikopterler için multi-disipliner yörünge en iyilemesi ve takibi için başarımı değerlendirilmiştir. Lineer ve/veya lineer olmayan MTK yaklaşımları ile, çeşitli parkurlarda ve görev profillerinde, görev pas noktası takibi ile helikopter durum hedeflerinin tutturulması simülasyonları yapılmış, sonuçlar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen çıkarımlar şu şekilde özetlenmiştir:

- Slalom gibi görece basit görev profillerinde, lineer ve lineer olmayan MTK yaklaşımları benzer yörünge en iyileme ve takip performansı sergilemiştir. Lineer MTK yaklaşımı ile hesaplama sürece yaklaşık 250 kat hızlanmakta, bu tarz sapması az olan parkurlarda lineer MTK kullanımı faydalı değerlendirilmiştir.
- Dönüşlü tırmanış görev profilinden gözlemlendiği gibi, manevra karmaşıklaştığında ve görev adımları çeşitlendiğinde, lineer MTK yaklaşımı ile görev başarımı sağlanamamıştır. Bunun sebebi olarak, lineer MTK yaklaşımında kullanılan lineer modelin, belirli bir uçuş koşulunda dengelenmiş helikopter durumu etrafında oluşturulduğu ve dönüşlü tırmanış parkurunda denk gelinen farklı helikopter uçuş durumlarında, helikopterin uçuş dinamiği tepkisinin tahmininde başarılı olamadığı değerlendirilmiştir. Çok çeşitli uçuş durumlarından oluşturulmuş lineer modeller ile çizelgelenmiş bir model ile, bu problemin aşılabacağı değerlendirilmiş, bu çalışmanın ileri faz faaliyeti olarak planlanmıştır.
- Dönüşlü tırmanış görev profilinde, lineer olmayan MTK yaklaşımı ile görev başarımı sağlanmış, çoklu adımlı görev profillerinde ve karmaşık parkurlarda, çalışmanın bu aşamasında lineer olmayan MTK yaklaşımının kullanılması uygun değerlendirilmiştir.
- Tırmanış ve hızlanma ile 360 derece dönüş görev profillerinden gözlemlendiği gibi, lineer olmayan MTK ile görev başarımı her şekilde sağlanabilmekte olduğu değerlendirilmiştir.

- Lineer olmayan helikopter matematik modelleri için, karmaşık parkurlarda ve çeşitli görev adımları içeren görev profillerinde, lineer olmayan MTK yaklaşımı ile her daim görev başarımının elde edilebildiği değerlendirilmiştir. Buna karşılık, hesaplama süresinin uzunluğu bir dezavantaj oluşturmakta olduğu, iyi kurgulanmış ve kısıtlandırılmış en iyileme fonksiyonları ve yöntemleri ile bu süresinin azaltılmasının elzem olduğu değerlendirilmiştir.

MTK yaklaşımının doğası gereği, simülasyon başarımı kullanılan model çözünürlüğüne ve en iyileme fonksiyonunun kapsamına doğrudan bağlıdır. Genellikle, yörünge en iyilemesinde birbirine ters maliyet oluşturan disiplinlerin kombinasyonu hedeflenmektedir. Bu durumda, kullanılan toplam en iyileme fonksiyonuna bağlı olarak, en iyilenmiş yörünge izinden küçük sapmalar, toplam maliyet üzerinde büyük etkiler oluşturabilmektedir. Bu çalışma ile gelinen noktada, belirlenen bir parkurda veya görev profilinde, lineer ve lineer olmayan MTK yaklaşımları ile yörünge en iyilemesi ve takibi sağlanabilmektedir. Bu çalışma çizelgelenmiş lineer model ile lineer olmayan MTK yaklaşımlarının kıyası ile devam ettirilecektir. Ayrıca, farklı en iyileme fonksiyonları ile çalışmanın çeşitlendirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen MTK yaklaşımı ile aeroakustik, performans, güvenlik, konfor gibi disiplinler ile genişletilerek, kapsamlı yörünge en iyilemesi ve takibi çalışılacaktır.

Kaynaklar

- Castillo, C. L., Moreno, W., and Valavanis, K. P. “Unmanned Helicopter Waypoint Trajectory Tracking Using Model Predictive Control.” 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, MED, Athens, Greece, 2007. doi:10.1109/MED.2007.4433726.
- Hartjes, S., and Visser, H. G. (2019) “Optimal Control Approach to Helicopter Noise Abatement Trajectories in Nonstandard Atmospheric Conditions.” *Journal of Aircraft*, Vol. 56, No. 1, 2019, pp. 43–52. doi:10.2514/1.C034751.
- Lapp, T., and Leena, S. Model Predictive Control Based Trajectory Optimization for Nap-of-Earth Flight Including Obstacle Avoidance, American Control Conference, Boston, Massachusetts, USA 2004.
- Neunert, M., De Crousaz, C., Furrer, F., Kamel, M., Farshidian, F., Siegwart, R., and Buchli, J. “Fast Nonlinear Model Predictive Control for Unified Trajectory Optimization and Tracking.” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2016–June, No. ICRA, 2016, pp. 1398–1404. doi:10.1109/ICRA.2016.7487274.
- Şenipek, M. (2017) Development of an Object-Oriented Design, Analysis and Simulation Software for a Generic Air Vehicle, Middle East Technical University, 2017.
- Wang, Y., and Boyd, S. (2002) “Fast Model Predictive Control Using Online Optimization.” *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, Vol. 18, No. 2, 2010, pp. 267–278. doi:10.1109/TCST.2009.2017934.
- Yücekayalı, A., Şenipek, M., and Ortakaya, Y (2019) AGILITY ASSESSMENT OF HELICOPTER MAIN ROTOR DESIGN, 75th Vertical Flight Society Annual Forum, Philadelphia, USA, 13-16 May 2019
- Yücekayalı, A. (2020), “Noise Minimal & Green Trajectory and Flight Profile Optimization for Helicopters, PhD Dissertation, METU, Ankara, Turkey.