



**Bozulmuş İnsansız Hava Araçları İçin Minimum Mesafe Ve
Minimum Zaman Optimal Yol Planlamalarının Çok Boyutlu
Makine Öğrenmesi Yaklaşımları Ile Başarımı**

Program Kodu:1002

Proje No:122E641

**Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. ÖNDER TUTSOY**

Araştırmacı(lar)

Doç. Dr. ADEM POLAT

Dr. Öğr. Üyesi DAVOOD ASADI HENDOUSTANI

OCAK 2024

ANKARA



ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında, bir İHA'nın bozulması sonucu ortaya çıkan parametrik belirsizlikleri (parametric uncertainties) ve çeşitli kısıtlamaları dikkate alan üç boyutlu yol planlama algoritmaları quadrotorlar için geliştirmiştir. Ayrıca, öteleme (translation), dönme (rotation), Euler açıları (Euler angle), ilgili minimum zaman ve minimum mesafe kontrol sinyalleri çok boyutlu parçacık sürü optimizasyonu (multi-dimensional particle swarm optimization) ve çok boyutlu genetik algoritması (multi-dimensional genetic algorithm) meta-sezgisel makine öğrenmesi yaklaşımları ile geliştirilmiştir. Algoritmalar hem simülasyon ortamında hem de deneysel ortamlarda değerlendirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Projenin sonuçlarında, çok boyutlu genetik algoritmanın kısıtlamalar altında daha kısa minimum mesafe ve minimum zaman yolları üretebildiği gösterilip doğrulanmıştır. Gerçek zamanlı deneyler, quadrotorun mevcut maksimum rotor hızlarını kullanarak üretilen hedef yolu tam olarak izleyebildiği ayrıca kanıtlanmıştır. Proje kapsamında lisans, yüksek lisans ve doktora öğrencilerine burs sağlanmış, projenin konusunda yapılan çalışmalara dahil edilmiş ve ayrıca bu alanda yeni projelerimizin alt yapısı oluşturularak yeni proje başvuruları yapılmıştır. Proje çalışmaları akademik bir yayına dönüştürülerek Q1 sınıflı IEEE Transactions on Intelligent Transportation dergisinden küçük düzeltmeler ile kabul almıştır (accept with minor corrections). Alanında seçkin bir uluslararası konferansa sunulmak üzere yaptığımız çalışmalarımız devam etmektedir.

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (Tübitak) tarafından desteklenmiştir ve proje ekibi bu destekten dolayı Tübitak'a teşekkür etmektedir.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|----|
| ÖNSÖZ..... | 3 |
| İÇİNDEKİLER..... | 3 |
| TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ..... | 5 |
| ÖZET..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 6 |
| GİRİŞ..... | 7 |
| QUADROTOR MODELİ VE MALİYET FONKSİYONLARI..... | 10 |
| <i>Quadrotor Modeli</i> | 10 |
| <i>Öteleme Modeli</i> | 10 |
| <i>Dönme Modeli</i> | 11 |
| <i>Euler Açıları</i> | 11 |
| <i>Maliyet Fonksiyonları</i> | 12 |
| <i>Minimum Mesafe Maliyet Fonksiyonu</i> | 12 |
| <i>Minimum Zaman Maliyet Fonksiyonu</i> | 12 |
| ÇOK BOYUTLU META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR..... | 13 |
| <i>Kısıtlanmış M-PSO ile Quadrotor Yol Planlaması</i> | 13 |
| <i>Kısıtlanmış M-GA ile Quadrotor Yol Planlaması</i> | 15 |
| SONUÇLAR..... | 17 |
| <i>Quadrotor ve Algoritma Parametreleri</i> | 17 |
| M-PSO algoritma parametreleri η^v, η^p, η^g sırasıyla 1.45, 2.99, 2.99'dur. M-GA algoritma parametreleri η^s, η^c, η^m sırasıyla 0.1, 0.02, 0.1 olarak belirlenmiştir..... | 18 |
| <i>Minimum Mesafe Yol Planlaması</i> | 18 |
| <i>Minimum Zaman Yörünge Planlaması</i> | 19 |
| <i>Euler Açıları ve Dönme Yörüngeleri</i> | 20 |
| <i>Karşılaştırma Sonuçları</i> | 21 |

| | |
|--|----|
| <i>Bozulmuş Quadrotor için Minimum Zaman Yörüngeleri</i> | 22 |
| <i>Gerçek Zamanlı Deneysel Sonuçlar</i> | 23 |
| SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR..... | 24 |
| REFERANSLAR..... | 25 |

ÖZET

İnsansız Hava Araçları (İHA) bilinmeyen ortamlarda, dinamik çevre koşullarında görev yapabilmekte ve beklenen ya da beklenmeyen birçok arızalarla karşılaşabilmektedirler. Bu sebeplerden dolayı otonom bir İHA, acil durumlarda minimum mesafe veya minimum sürede en uygun konuma inebilecek özellikler ile donatılmalıdır. Hasarlar ve bozulmalar, kararsız (unstable) ve belirsiz (uncertain) İHA dinamiklerini (dynamics) değiştirdiğinden, yol planlama (path planning) algoritmaları uyarlanabilir (adaptive) ve modelden bağımsız (model free) olmalıdır. Bunların yanında, İHA için tasarlanan yol planlama optimizasyon problemleri, gerçek zamanlı uygulamaların başarımı için hayati olan, aktüatör doygunluklarını (actuator saturations), kinematik ve dinamik kısıtlamaları (kinematic and dynamic constraints) dikkate alınmalıdır. Bu nedenle bu projede, bir İHA'nın bozulması sonucu ortaya çıkan parametrik belirsizlikleri (parametric uncertainties) ve çeşitli kısıtlamaları dikkate alan üç boyutlu yol planlama algoritmaları quadrotorlar için geliştirmiştir. Bu projede, öteleme (translation), dönme (rotation), Euler açıları (Euler angle), ilgili minimum zaman ve minimum mesafe kontrol sinyalleri çok boyutlu parçacık sürü optimizasyonu (multi-dimensional particle swarm optimization) ve çok boyutlu genetik algoritması (multi-dimensional genetic algorithm) meta-sezgisel makine öğrenmesi yaklaşımları ile elde edilmiştir. Algoritmalar hem simülasyon ortamında hem de deneysel ortamlarda değerlendirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Bu projenin bütçesi ile sadece lisans, yüksek lisans ve doktora öğrencilerine burs sağlanmış ve bu alanda yeni projelerimizin alt yapısı oluşturularak yeni projeler sunulmuştur. Projenin sonuçlarında, çok boyutlu genetik algoritmanın kısıtlamalar altında daha kısa minimum mesafe ve minimum zaman yolları üretebildiği gösterilip doğrulanmıştır. Gerçek zamanlı deneyler, quadrotorun mevcut maksimum rotor hızlarını kullanarak üretilen hedef yolu tam olarak izleyebildiği ayrıca kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bozulmuş quadrotorlar, meta-sezgisel algoritmalar, yol planlama, insansız hava araçları.

ABSTRACT

Unmanned air vehicles operate in highly dynamic and unknown environments where they can encounter unexpected and unseen failures. In the presence of emergencies, autonomous unmanned air vehicles should be able to land at a minimum distance or minimum time. Impaired unmanned air vehicles define actuator failures and this impairment changes their unstable and uncertain dynamics; henceforth, path planning algorithms must be adaptive and model-free. In addition, path planning optimization problems must consider the unavoidable actuator saturations, kinematic and dynamic constraints for successful real-time applications. Therefore, this project aims to develop 3D path planning algorithms for quadrotors with parametric uncertainties and various constraints. In this respect, this research constructs a multi-dimensional particle swarm optimization and a multi-dimensional genetic algorithm to plan paths for translational, rotational, and Euler angles and generates the corresponding control signals. The algorithms are assessed and compared both in the simulation and experimental environments. Results show that the multi-dimensional genetic algorithm produces shorter minimum distance and minimum time paths under the constraints. The real-time experiments prove that the quadrotor exactly follows the produced path utilizing the available maximum rotor speeds.

Keywords: Actuator failures, impaired quadrotors, meta-heuristic algorithms, path planning, unmanned air vehicles.

GİRİŞ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (İHA) öncelikle askeri talepler doğrultusunda geliştirilmiş, ancak uygulama alanları çevre, ticaret ve film endüstrisi gibi sektörlerle hızla yayılarak çeşitlenmiştir. İHA'ların popülaritesi temel olarak otonomilerinden, düşük maliyetlerinden, bilinmeyen belirsizliklere karşı dayanıklı olmalarından ve kendi aralarında ağ oluşturma yeteneklerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, çoğunlukla sensörlerde, aktüatörlerde ve mekanik parçalarda meydana gelen bir takım arızalara eğilimlidirler. Arızaların oluşması durumunda minimum mesafede veya minimum sürede en uygun alana inmek zorundadırlar. Görünmeyen ve karmaşık ortamlardaki değişik türlerdeki yapılandırılmış ve yapılandırılmamış belirsizlikler altında çalışmalarını gerekmesi nedenlerinden dolayı, yere otonom ve güvenli inişleri çok önemlidir. Bu nedenle İHA'lar için geliştirilen minimum mesafe ve minimum süre yol planlama algoritmaları şu özelliklere sahip olmalıdır:

- Değişen İHA dinamiklerini telafi etmek için modelden bağımsız (model free),
- Anında değişen gereksinimleri göz önünde bulundurmak için uyarlanabilir (adaptive),
- Aktüatör, kinematik ve dinamik sınırlamaları dahil etmek için sınırlı (constrained),
- Üç boyutlu uzayda hareket etmek için çok boyutlu (multi-dimensional),
- Belirsizlikleri azaltmak için gürbüz (robust).

Bu projede, iç ve dış belirsizlikler göz önünde bulundurularak, bozulmuş quadrotorlar için kısıtlı çok boyutlu minimum mesafe ve minimum zaman yolu planlama algoritmaları geliştirilmiştir. Yapay Zeka (AI) algoritmalarının alt sınıfı olan değiştirilmiş (differential) meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, minimum mesafe ve minimum zaman maliyeti fonksiyonlarını optimize ederek hedeflenen yollar (path) planlanmıştır. Quadrotorun hasar görmesi durumunda, yol planlama çözümleri mevcut tüm rotor hızlarını kullanarak, en uygun İHA yolunu planlayabilmektedir.

Yörünge oluşturma (trajectory generation) ve yol planlama yöntemleri arasındaki temel farklılık, yörünge oluşturma yöntemlerinin belirli (certain) sistem dinamiklerinin bilinmesini gerektirmesidir [1]. Yörünge üretme yöntemleri, kontrol eylemlerinin miktarını ve sistem durumlarını dikkate alarak hareketleri düzenleyen matematiksel model tabanlı yöntemler olarak adlandırılır [2]. Genel matematiksel model tabanlı yöntemler, Karma Tamsayı Doğrusal Program (MILP), Karma Tam Sayılı İkinci Dereceden Programlama (MIQP) ve optimal kontroldür. MILP'i kullanarak, Song vd. toplam seyahat mesafelerini en aza indirebilen yörünge oluşturma algoritmasını bir grup İHA için oluşturmuşlardır [3]. Bu optimizasyon algoritması, İHA'ların ilk konumlarını, diğer İHA'ların konumlarını ve pil seviyelerini dikkate almamaktadır. Yakın bir zamanda, Watanabe ve Mukai, görüntü işleme yöntemleri ile tanımlanan bir tekerlekli sandalyeyi yönlendirmek için MILP ile yörüngeler oluşturmuşlardır [4]. Bu çalışmada, İHA'nın konumu ve hızının anlık olarak bilindiği, engellerin ve çevre haritasının önceden mevcut olduğu varsayılmaktadır. MIQP, MILP'nin ikinci dereceden maliyet fonksiyonu versiyonudur. Letizia vd. dinamik ve kinematik kısıtlamaları karşılayan polinom tabanlı İHA yörüngeleri üretmişlerdir [5]. Bu çalışmada, yörünge optimizasyon problemindeki belirsizlikler ve karışıklıklar modellenmiş ve optimizasyon problemine eklenmiştir.

Optimal kontrol ile yol planlaması ile ilgili olarak, Adhikari ve Ruitter, sabit kanatlı İHA'lar için optimal bir kontrol tabanlı yörünge üretimi ve otonom çarpışmadan kaçınma algoritması tasarlamışlardır [6]. Optimum kontrolör, İHA'ların engeller arasında alçaktan uçuşmasını ve doğru verileri yakalamak için istenen hedefi yakından takip etmesini amaçlamaktadır. Matematiksel model tabanlı yaklaşımlar, durumların yinelemeli

çözümlerini gerektirdiğinden, yüksek hesaplama maliyetlerine neden olmaktadır. Ek olarak, daha önce hiç rastlanılmayan ve modellenmemiş belirsizliklerin varlığında sonuçların farklılaşması çok olasıdır. Ayırıştırma grafiği tabanlı yöntemler, engelleri ve boş alanları ayırt etmek için çevreyi hücrelere bölerek yolları planlayabilmektedirler [7]. Ischuk ve Lichachev, İHA'lar için en uygun yolu planlamada Dijkstra algoritmasını uyarlamışlardır [8]. Algoritma, hücreler oluşturularak ve esasında bu hücrelerin uzunluklarına kenar ağırlıkları atamak için kızılötesi navigasyon verilerini kullanmaktadır. Mac vd. üçgen ayırıştırma ile bölünmüş bir grafikten çarpışmasız İHA yollarını belirlemek için Dijkstra algoritmasını kullanmıştır [9]. Sonuçlar, ortam karmaşıksa algoritmanın işlem süresinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bir başka ayırıştırma grafiği tabanlı yöntem A* algoritması olup Dijkstra algoritmasının aksine, büyük ortamlardaki yol planlama problemlerini daha az hesaplama maliyeti ile halledilebilmektedir. Sun vd. A* algoritması ile ortak bir yol planlaması önermişlerdir [10]. Bu algoritma, ortamın bir haritasını oluşturmak için başlangıçta boşlukları rastgele araştırmaktadır. Ayırıştırma grafiğine dayalı başka bir yöntem de engelleri algılayan ve hücre kenarlarının ağırlıklarını güncelleyen D* algoritmasıdır. Peng vd. nesnelere ve diğer araçların konumlarını dikkate alarak uyarlanabilir bir D* yol planlama algoritması geliştirmişlerdir [11]. Algoritmanın temel amacı, minimum hesaplama süresini veren yolu seçmektir. Tüm bu yaklaşımlar arama tabanlı olduğundan ve İHA kısıtlamalarını göz ardı ettiğinden, gerçek zamanlı sonuçların simülasyon sonuçlarıyla örtüşmemesi yüksek olasılıklıdır. Ayrıca, karşılık gelen bir maliyet fonksiyonunun olmaması nedeniyle çözümler optimal özellikler taşımazlar.

Benzer bir yol planlama yöntemi, ortamı rastgele haritalayarak bir yol oluşturabilen örneklemeye dayalı yaklaşımdır. Temel olarak, başlangıç ve hedef durumlar arasında bir yol oluşturmak için serbest hücreleri yakındaki hücrelere bağlamayı temel almaktadır [12]. Lin vd. İHA'lar için hareketli nesnelere varlığında güvenli operasyonlar sağlamak için Hızlıca Keşfeden Rastgele Ağaç (RRT) algoritmasını uygulamışlardır [13]. Schmid vd. yerel minimumları ve alt-optimal yol yakınsama sorunlarını ortadan kaldıran RRT* algoritmasından ilham alan çevrimiçi bilgilendirici yol planlama algoritmasını önermişlerdir [14]. Madridano vd. acil durumlarda birden fazla yörünge planlayabilen üç boyutlu bir olasılıklı yol haritası yaklaşımı geliştirmişlerdir [15]. Örneklemeye tabanlı yöntemler, yetersiz arama yetenekleri nedeniyle başlangıç durumlarını hedef durumlara net bir şekilde ilişkilendiremezler.

Yapay Sinir Ağları (NN) ve evrimsel algoritmalar dahil olmak üzere biyo-ilhamlı yöntemler, matematiksel yöntemler gibi çevreyi modellemeden karmaşık nesnel problemleri çözmeyi amaçlar. Duan ve Huang, NN'yi küresel İHA yol planlaması için emperyalist rekabetçi algoritma ile eğitmişlerdir [16]. Yapay arı kolonisi ile karşılaştırmalı sonuçlar, NN'nin belirsizliği azaltabileceğini ve ayrıca yerel minimumlardan kaçınabileceğini göstermiştir. Sung vd. istenen yörüngelerden toplanan bir dizi çevrimdışı İHA verisi ile eğitilmiş bir NN inşa etmiştir [17]. NN yaklaşımları, herhangi bir bilinmeyen fonksiyona yaklaşabildiğinden, çevresel belirsizlikleri NN'e dahil etmeye çalışmışlardır. Nikkolos vd. iki boyutlu İHA yolları üreten bir diferansiyel evrim meta-sezgisel algoritmasını eğitmek için benzer bir çevrimdışı yaklaşım uygulamışlardır [18]. Veri toplamak için İHA'lar bir dizi konumdan fırlatılmış ve ilk durumları son konum bilgileri öğrenme amaçlı olarak kaydedilmiştir. Li vd. İHA küresel yol planlaması için bir genetik algoritma uygulamış ve planlanan yolu sürekli güncellemek için yerel bir yuvarlanma optimizasyon yaklaşımı kullanmışlardır [19]. Hava görüş sistemlerinden elde edilen yer görüntülerini yol planlaması için ayrıca işlemişlerdir. Biyo-ilhamlı yöntemler zorlu optimizasyon problemlerini çözebilse de, çözümleri birden fazladır ve dinamik, kinematik ve aktüatör kısıtlamaları optimizasyon problemlerine dahil edilmediğinden gerçek zamanlı uygulamalarda başarısız olabilmektedirler.

Tekerlekli otonom bir araç [20], bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) makineleri [21], endüstriyel bir robot [22], ve bir kuantum parçacığının taşınması [23] için minimum süre optimal yol planlama algoritmaları

geliştirilmiştir. Bununla birlikte, araştırdığımız kadarı ile, hedeflenen yolları otonom olarak planlayabilen yalnızca bir araştırma [24] İHA'lar için mevcuttur. İHA'lar için minimum mesafe veya en kısa yol planlama algoritmaları literatürde yaygın bir şekilde bulunmasına rağmen, bu çalışmalarda bozulmuş dronlar dikkate alınmamıştır. İfade edilen bu boşluklara dayanarak, projenin temel katkıları şu şekilde olmuştur:

1. Bozulmuş belirsizliklere maruz kalmış İHA'lar için minimum mesafe ve minimum süre yol planlama algoritmaları geliştirilmiştir.
2. İki tane modifiye edilmiş meta-sezgisel algoritması ile üç boyutlu yollar oluşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.
3. Kontrolcüye referans olarak verilen öteleme, dönme ve Euler açıları üretilmiştir.
4. Mevcut bozulmuş İHA rotor hızları açısından maksimum kontrol sinyalleri belirlenmiştir.
5. Optimizasyon problemlerine aktüatör, kinematik ve dinamik kısıtlamaları eklenmiştir.
6. Gerçek zamanlı deneyler yapılarak, sonuçları kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

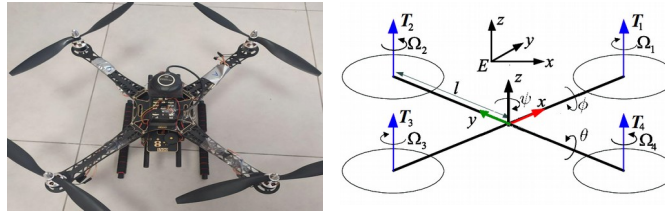
Projenin geri kalanında, Bölüm II quadrotor modelini sunmakta ve maliyet fonksiyonlarını tanıtmaktadır, Bölüm III çok boyutlu meta-sezgisel algoritmaları oluşturmakta, Bölüm IV sonuçları analiz etmekte ve son olarak Bölüm V projeyi özetleyip ve gelecekteki çalışmaları ifade etmektedir.

QUADROTOR MODELİ VE MALİYET FONKSİYONLARI

Bu projede önerilen yörünge planlama algoritmaları, quadrotor modelinin içgörülerini kullanmakta ve quadrotora gerçek zamanlı olarak uygulanan simülasyon ortamındaki yolları planlamaktadır. Bu nedenle, projenin bu bölümünde ilk olarak quadrotor modeli incelenmekte ve daha sonra kısıtlı minimum mesafe ve kısıtlı minimum zaman maliyeti fonksiyonları tanıtılmaktadır.

Quadrotor Modeli

Quadrotorlar Şekil 1'deki gibi iki çapraz çubuk, dört monteli pervane ve dört motordan oluşmaktadır.



Şekil 1: Pixhawk otopilotlu S500 quadrotor'un şematik görünümü.

Şekil 1'de, x, y, z öteleme konum durumlarıdır, ϕ, θ, ψ Euler açılarıdır, Ω_i $i=1, \dots, 4$ dönme hızlarıdır, T_i $i=1, \dots, 4$ üretilen motor torklarıdır. Quadrotor modeli, oluşturulan yörüngelerin tam olarak şu özellikleri yansıtmasını sağlamak için kullanılır:

- Quadrotorun dinamik kısıtlamaları,
- Quadrotorun kinematik kısıtlamaları,
- Quadrotorun motor hız kısıtlamaları,
- Alt modelleri arasındaki doğrusal olmayan bağlantı etkileri,
- Parametrik ve parametrik olmayan belirsizliklerdir.

Quadrotor modeli, simülasyon ortamlarında yörüngeler oluşturmak için de kullanılabilir. Bu, kararsız ve belirsizliklere maruz kalmış quadrotorlara zarar vermeden simülasyon ortamlarında, özünde

modelden bağımsız algoritmaları eğitmemizi sağlar. Ancak, gerçek zamanlı uygulamalarda, modelden bağımsız özellikleri nedeniyle, önerilen algoritmalar şu görevlere hizmet edebilmelidir:

- Simülasyonlarda planlanan yolları anlık olarak modifiye etmek,
- Modellenmemiş dinamikleri de yol dahil etmek,
- Görünmeyen belirsizlikleri göz önünde bulundurmaktır.

Bir sonraki alt bölüm, quadrotorun öteleme modelini sunulmaktadır.

Öteleme Modeli

Quadrotor, aşağıda verilen öteleme modeliyle kendisini ilk konumundan itibaren öteler.

$$\ddot{x} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_z}{m} + f_x^{drag} \quad 11\backslash$$

* MERGEFORMAT ()

$$\ddot{y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_z}{m} + f_y^{drag}$$

22* MERGEFORMAT ()

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{u_z}{m} + f_z^{drag} \quad 33\backslash$$

* MERGEFORMAT ()

u_z kontrol sinyali olup ve sürüklenme kuvvetleri şu şekilde ifade edilir:

$$f_x^{drag} = -\frac{k_x}{m} \dot{x}, \quad f_y^{drag} = -\frac{k_y}{m} \dot{y}, \quad f_z^{drag} = -\frac{k_z}{m} \dot{z} \quad 44\backslash$$

* MERGEFORMAT ()

burada k_x, k_y, k_z öteleme sürüklenme kuvvetleridir. Öteleme modelinin özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Sinüs ve kosinüs fonksiyonları nedeniyle doğrusal değildir,
- Aynı Euler açıları paylaşıldığı için dinamikleri iç içe geçmiştir (bağlantılıdır),
- Sinüs, kosinüs fonksiyonları ve u_z kontrol sinyalinin belirli limitleri olduğu için kısıtlıdır.

Bir sonraki alt bölüm, quadrotorun dönme modelini sunmaktadır.

Dönme Modeli

Ötelemek davranışı için quadrotorun dönme hareketini gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu projede aynı zamanda $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ dönme hızları da üretilmiş ve şu şekilde sunulmuştur:

$$\dot{p} = a_p q r + b_p u_\phi + \tau_p \quad 55\backslash$$

* MERGEFORMAT ()

$$\dot{q} = a_q p r + b_q u_\theta + \tau_q$$

66* MERGEFORMAT ()

$$\dot{r} = a_r p q + b_r u_\psi + \tau_r$$

77* MERGEFORMAT ()

burada $a_p, a_q,$ ve a_r aşağıda verilen dönme parametreleridir.

$$a_p = \frac{I_y - I_z}{I_x}, \quad a_q = \frac{I_z - I_x}{I_y}, \quad a_r = \frac{I_x - I_y}{I_z}$$

88* MERGEFORMAT ()

I_x, I_y, I_z sırasıyla x, y, z eksenleri etrafındaki eylemsizlik momentidir. Denklem 5 ila 7'deki $b_p, b_q,$ ve b_r parametreleri şunlardır:

$$b_p = \frac{1}{I_x}, \quad b_q = \frac{1}{I_y}, \quad b_r = \frac{1}{I_z}$$

99* MERGEFORMAT ()

Denklem 5 ile 7'deki τ_p , τ_q , and τ_r kuvvetleri şu şekilde temsil edilir:

$$\tau_p = \tau_p^{drag} + \tau_p^{gyro} + \tau_p^{wind}$$

1010* MERGEFORMAT ()

$$\tau_q = \tau_q^{drag} + \tau_q^{gyro} + \tau_q^{wind}$$

1111* MERGEFORMAT ()

$$\tau_r = \tau_r^{drag} + \tau_r^{wind}$$

1212* MERGEFORMAT ()

Parametrik sürüklenme kuvvetleri şu şekilde verilir:

$$\tau_p^{drag} = -\frac{k_\varphi}{I_x} p^2, \quad \tau_q^{drag} = -\frac{k_\theta}{I_y} q^2, \quad \tau_r^{drag} = -\frac{k_\psi}{I_z} r^2$$

1313* MERGEFORMAT ()

burada k_φ , k_θ , k_ψ dönme sürtünme sabitleridir. Denklem 10 ile 12'deki jiroskopik kuvvetler şu şekilde formüle edilir:

$$\tau_p^{gyro} = \frac{J_T}{I_x} q\Omega, \quad \tau_q^{gyro} = -\frac{J_T}{I_y} p\Omega$$

1414* MERGEFORMAT ()

burada J_T toplam dönme eylemsizlik momentidir ve Ω şu şekilde tanımlanan toplam dönme hızlarıdır:

$$\Omega = \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4$$

1515* MERGEFORMAT ()

Denklem 3,5,6 ve 7'deki u_z , u_φ , u_θ , u_ψ girdileri:

$$u_z = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

1616* MERGEFORMAT ()

$$u_\varphi = bl(\Omega_2^2 - \Omega_4^2)$$

1717* MERGEFORMAT ()

$$u_\theta = bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2)$$

1818* MERGEFORMAT ()

$$u_\psi = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2)$$

1919* MERGEFORMAT ()

b itme parametresi, l moment kolu ve d sürüklenme parametresidir. Aşağıda sunulan Euler açıları, Denklem 1 ile 3'teki öteleme yörüngelerinin ve Denklem 5 ile 7'deki dönme yörüngelerinin temel parçalarıdır.

Euler Açıları

Euler açıları, istenen öteleme ve dönme yörüngelerini oluştururlar. Euler açıları şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{\varphi} = p + q \sin \varphi \tan \theta + r \cos \varphi \tan \theta$$

2020* MERGEFORMAT ()

$$\dot{\theta} = q \cos \varphi - r \sin \varphi$$

2121* MERGEFORMAT ()

$$\dot{\psi} = \frac{1}{\cos\theta} [q \sin\varphi + r \cos\varphi]$$

2222* MERGEFORMAT ()

Quadrotor Euler açılarının özellikleri şu şekilde vurgulanabilir:

- $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ dönme hızları ile doğrudan bağlantılıdır,
- $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ öteleme ivmeleriyle dolaylı olarak bağlantılıdır,

Bu nedenle, bu çalışmada öncelikle maliyet fonksiyonlarını en aza indiren Euler açıları belirlenmektedir. Daha sonra Euler açıları kullanılarak ilgili öteleme ve dönme yörüngeleri oluşturulmuştur.

Maliyet Fonksiyonları

İHA'ların otonomisini artırmak için kendi kendini optimize edebilen çeşitli algoritmalar ile donatılmalıdır. Bu bölüm, quadrotor yollarını optimize eden minimum mesafe ve minimum zaman maliyeti fonksiyonlarını tanıtmaktadır.

Minimum Mesafe Maliyet Fonksiyonu

Bozulmuş quadrotorların havadaki mevcut konumlarından zemine minimum mesafede inmesi gerekebilmektedir. Minimum mesafeye karşılık gelen maliyet fonksiyonu şu şekilde formüle edilir:

$$\min e_d = \int_{t=0}^{t_f} \|\mathbf{p}_d - \mathbf{p}_t(t)\| dt$$

subject to

$$\mathbf{a}_e^{\min} \leq \mathbf{a}_e(t) \leq \mathbf{a}_e^{\max}$$

$$\mathbf{p}_t^{\min} \leq \mathbf{p}_t(t) \leq \mathbf{p}_t^{\max}$$

$$0 \leq \dot{\mathbf{p}}_t(t) \leq \dot{\mathbf{p}}_t^{\max}$$

$$\mathbf{r}_t^{\min} \leq \mathbf{r}_t(t) \leq \mathbf{r}_t^{\max}$$

$$\mathbf{u}^{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^{\max}$$

2323* MERGEFORMAT ()

burada e_d minimum mesafe maliyeti, t_f sonlu zaman, \mathbf{p}_d son öteleme konumu, $\mathbf{p}_t(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$

Denklem 1 ile 3'teki anlık öteleme konumu, $\dot{\mathbf{p}}_t(t)$ anlık öteleme hızı, $\mathbf{a}_e(t) = [\varphi(t) \ \theta(t) \ \psi(t)]^T$ Denklem 20

ila 22'deki Euler açıları, $\mathbf{p}_r(t) = [p(t) \ q(t) \ r(t)]^T$ anlık dönüş konumları, $\mathbf{u} = [u_z \ u_\varphi \ u_\theta \ u_\psi]^T$ Denklem 16

ila 19'daki giriş sinyalleri, $(.)^{\min}$ ve $(.)^{\max}$ karşılık gelen minimum ve maksimum değerlerdir. Denklem 23'teki maliyet fonksiyonunun temel özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- 1-norm $\|\cdot\|_1$, vektörüne sahiptir, dolayısıyla bir skaler değer, 3-boyutlu öteleme yörünge uzayının genel performansını temsil eder.
- t_f başlangıçta bilinmediğinden, mevcut tüm maliyetlerin minimumu olan anlık maliyet değeri kullanılır.

Bir sonraki alt bölüm, minimum zaman maliyeti fonksiyonunu tanıtmaktadır.

Minimum Zaman Maliyet Fonksiyonu

Acil durumlarda, quadrotorların minimum sürede zemine inmesi gerekebilmektedir. Minimum zaman maliyeti fonksiyonu şu şekilde formüle edilebilir:

$$\min T = \int_{t=0}^{t_f} 1 dt$$

subject to

$$\mathbf{a}_e^{\min} \leq \mathbf{a}_e(t) \leq \mathbf{a}_e^{\max}$$

$$\mathbf{p}_t^{\min} \leq \mathbf{p}_t(t) \leq \mathbf{p}_t^{\max}$$

$$0 \leq \dot{\mathbf{p}}_t(t) \leq \dot{\mathbf{p}}_t^{\max}$$

$$\mathbf{r}_t^{\min} \leq \mathbf{r}_t(t) \leq \mathbf{r}_t^{\max}$$

$$\mathbf{u}^{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^{\max}$$

2424* MERGEFORMAT ()

Denklem 24'deki maliyet fonksiyonu, doğrusal olmayan kısıtlamaları olan üçüncü dereceden doğrusal olmayan bir sistem için zaman optimal bir problemdir. Bu nedenle, doğrudan çözümü zordur. Çözümü kolaylaştırmak için minimum zaman maliyeti fonksiyonu şu şekilde yeniden formüle edilebilir:

- Minimum Zaman = Minimum Mesafe/Maksimum Hız

Minimum zaman problemi şu hali alır:

$$\min T = \int_{t=0}^{t_f} \frac{\|\mathbf{p}_d - \mathbf{p}_t(t)\|_1}{\|\dot{\mathbf{p}}_t^{\max}(t)\|_1} dt$$

subject to

$$\mathbf{a}_e^{\min} \leq \mathbf{a}_e(t) \leq \mathbf{a}_e^{\max}$$

$$\mathbf{p}_t^{\min} \leq \mathbf{p}_t(t) \leq \mathbf{p}_t^{\max}$$

$$0 \leq \dot{\mathbf{p}}_t(t) \leq \dot{\mathbf{p}}_t^{\max}$$

$$\mathbf{r}_t^{\min} \leq \mathbf{r}_t(t) \leq \mathbf{r}_t^{\max}$$

$$\mathbf{u}^{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^{\max}$$

2525* MERGEFORMAT ()

Denklem 25'te $\dot{\mathbf{p}}_t^{\max}(t)$ tüm motorların maksimum hızlarında dönmesi gerektiği anlamına gelmemektedir. Belirli öteleme hareketini sağlamak için ilgili motorlar gerekli dönüş hızlarını üretmelidir. Bir sonraki bölüm, minimum mesafe ve minimum zaman yollarını planlayan çok boyutlu meta-sezgisel algoritmaları tanıtmaktadır.

ÇOK BOYUTLU META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Bu bölüm, minimum mesafe ve minimum zaman yolu planlama maliyet fonksiyonlarını optimize eden, değiştirilmiş Çok Boyutlu Parçacık Sürü Optimizasyonu (M-PSO) ve Çok Boyutlu Genetik Algoritmayı (M-GA) kısaca tanıtmaktadır.

Kısıtlanmış M-PSO ile Quadrotor Yol Planlaması

PSO algoritması, bir popülasyondan birkaç üye seçerek bir maliyet fonksiyonunu optimize etmeye odaklanır. Bu çalışmada, M-PSO, Denklem 23'teki minimum mesafe maliyet fonksiyonunu ve Denklem 25'teki minimum zaman maliyeti fonksiyonunu azaltabilen optimum Euler açılarını yinelemeli olarak seçmektedir. Yol planlama süreci ileri beslemelidir; dolayısıyla quadrotorun geri hareketi engellenir.

PSO algoritması, Euler açılarını şu şekilde ifade edilen bir oran ile günceller:

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \eta^v \mathbf{v}(t) + r_1 \eta^p (\mathbf{p}(t) - \mathbf{a}_e(t)) + r_2 \eta^g (\mathbf{g}(t) - \mathbf{a}_e(t))$$

2626* MERGEFORMAT ()

burada $\mathbf{p}^{(t)}$ ve $\mathbf{g}^{(t)}$ kısıtlanmış $\mathbf{a}_e^{\min} < \mathbf{a}_e^t < \mathbf{a}_e^{\max}$ aralığında sırasıyla yerel ve global en iyi Euler açısı çözümleri, η^v , η^p ve η^g karşılık gelen öğrenme parametreleri, r_1 ve r_2 tekdüze dağılmış rastgele keşif gürültüleridir. Euler açıları için güncelleme kuralı şu şekilde verilir:

$$\mathbf{a}_e(t + \Delta t) = \mathbf{a}_e(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t)$$

2727* MERGEFORMAT ()

Denklemler 23 ve 25'teki maliyet fonksiyonlarının minimum değerlerine bağlı olarak en iyi yerel $\mathbf{p}^{(t)}$ ve global $\mathbf{g}^{(t)}$ çözümleri elde edilir. Her devirin sonunda, en iyi yerel Euler açısı çözümleri, global en iyi Euler açıları çözümü olarak atanır. Global en iyi Euler açısı çözümleri Denklem 1 ile 3'teki öteleme yörüngelerini ve Denklem 20 ile 22'deki dönme yörüngelerini hesaplamak için kullanılır. Algoritma 1, M-PSO ile yol planlamasını özetlemektedir.

Algoritma 1: M-PSO algoritması ile yol planlama.

Girdi:

Denklem 26'daki η^v , η^p , η^g parametreleri ve η^d iskontosu,

$v^{\max} = 0.2(a_e^{\max} - a_e^{\min})$ ve $v^{\min} = -v^{\max}$ limitleri,

İlk ve hedef öteleme yörüngeleri $\mathbf{p}^{(1)}$ ve \mathbf{p}_d ,

Denklem 24'teki kısıtlamaların üst ve alt limitleri,

Çıktı:

Optimize Euler açısı $\mathbf{a}_e(t)$,

Optimize edilmiş öteleme yörüngesi $\mathbf{p}^{(t)}$,

Optimize edilmiş dönüş yörüngesi $\mathbf{r}_i(t)$,

for $t = 1$ to *trajectory length*

for $j = 1$ to *repeat length*

for $k = 2$ to *search length*

1. $\mathbf{a}_e(k)$, ya eşit rastgele bir Euler açısı popülasyonu oluşturulur.

$$\mathbf{a}_e(k) = \text{unifrnd}(\mathbf{a}_e^{\max}, \mathbf{a}_e^{\min}, 3)$$

2828* MERGEFORMAT ()

2. $\mathbf{v}(k)$ güncelleme oranını Denklem 26 ile belirlenir.

3. $\mathbf{a}_e(k)$ Euler açılarını Denklem 27 ile güncellenir.

4. Denklem 16'da kontrol sinyali $u_z(k)$, y1 belirlenir.

$$u_z(k) = \text{sign}(\mathbf{K} * \mathbf{p}(k - 1))$$

2929* MERGEFORMAT ()

5. Kontrol sinyali kısıtlamaları $u_z(k)$ üzerine uygulanır.

$$u_z(k) = \max(u_z(k), u_z^{\min})$$

3030* MERGEFORMAT ()

$$u_z(k) = \min(u_z(k), u_z^{\max})$$

3131* MERGEFORMAT ()

6. Denklem 1 ila 3'te $\mathbf{p}^{(k)}$ öteleme durumları elde edilir.
7. $\mathbf{p}^{(k)}$ üzerine öteleme konum kısıtlamaları uygulanır.

$$\mathbf{p}^{(k)} = \max(\mathbf{p}^{(k)}, \mathbf{p}^{\min})$$

3232* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{p}^{(k)} = \min(\mathbf{p}^{(k)}, \mathbf{p}^{\max})$$

3333* MERGEFORMAT ()

8. Denklem 23 veya 25'teki maliyetler hesaplanır.
9. Yerel en iyi çözümler şu şekilde güncellenir:

eğer anlık maliyet $e^{(k)}$ kişisel en iyi çözüm e_p 'den daha az ise

Quadrotor yol bilgilerini kayıt et:

$$\mathbf{a}_e^p = \mathbf{a}_e(k), \mathbf{p}^p = \mathbf{p}^{(k)}, \mathbf{u}^p = \mathbf{u}_z(k)$$

Kişisel en iyi çözüm $e_p = e^{(k)}$.

Eğer sonu

10. Küresel en iyi çözümü şu şekilde güncellenir:

eğer kişisel en iyi çözüm e_p global en iyi çözüm e_g 'den daha az ise

Quadrotor yol bilgilerini kayıt et:

$$\mathbf{a}_e^g = \mathbf{a}_e^p, \mathbf{p}^g = \mathbf{p}^p, \mathbf{u}_z^g = \mathbf{u}_z^p$$

Global en iyi çözüm $e_g = e_p$.

Eğer sonu.

for döngüsü sonu

11. Denklem 26'daki öğrenme parametresi η^v 'yi güncellenir.

$$\eta^v = \eta^v \cdot \eta^d$$

3434* MERGEFORMAT ()

12. Global en iyi çözümlerle optimizasyonu başlatılır.

for döngüsü sonu

13. Global en iyi yörünge çözümleri kaydedilir.

$$\mathbf{a}_e(t) = \mathbf{a}_e^g, \mathbf{p}(t) = \mathbf{p}^g, \mathbf{u}_z(t) = \mathbf{u}_z^g$$

14. Denklem 20 ila 22 ile $\mathbf{r}_i(t)$ dönme yörüngesini elde edilir.

for döngüsü sonu

Bir sonraki alt bölümde, kısıtlı M-GA ile quadrotor yol planlaması sunulmaktadır.

Kısıtlanmış M-GA ile Quadrotor Yol Planlaması

GA bir popülasyondaki kaynakların doğal seçim sürecinden esinlenmiş bir algoritmadır. Popülasyonun tamamı, maliyet fonksiyonu için olası aday çözümleri temsil eder.

Algoritma 2: M-GA algoritması ile yol planlaması.

Girdi:

η^s seçim, η^c çaprazlama, η^m mutasyon parametreleri,

$v^{\max} = 0.2(a_e^{\max} - a_e^{\min})$ ve $v^{\min} = -v^{\max}$ limitleri.

İlk ve hedef öteleme yörüngeleri $\mathbf{p}^{(1)}$ ve \mathbf{p}_d ,
Denklem 24'teki kısıtlamaların üst ve alt limitleri,

Çıktı:

Optimize Euler açısı $\mathbf{a}_e(t)$,

Optimize edilmiş öteleme yörüngesi $\mathbf{p}^{(t)}$,

Optimize edilmiş dönüş yörüngesi $\mathbf{r}_t(t)$,

Başlatma:

e maliyet fonksiyonunu başlat,

Kümülatif toplam $c(1) = 0$,₁ başlat,

\mathbf{a}_e^p üst ögesini başlat,

for $t = 1$ to *trajectory length*

for $k = 2$ to *search length* k^l

1. $\mathbf{a}_e(k)$, ya eşit rastgele bir Euler açısı popülasyonu oluşturulur.

$$\mathbf{a}_e(k) = \text{unifrnd}(\mathbf{a}_e^{\max}, \mathbf{a}_e^{\min}, 3)$$

3535* MERGEFORMAT ()

2. η^p seçim olasılıklarını belirlenir.

$$\eta^p = e^{-(\eta^* e^m)}$$

3636* MERGEFORMAT ()

burada ortalama maliyet $e^m = \frac{1}{k^l} \sum_{i=1}^{k^l} e(i)$ 'dir.

3. Yarı popülasyonla çaprazlama işlemi gerçekleştirilir.

for $j = 2$ to $k^l / 2$

4. Rulet Çarkı ile $\mathbf{a}_e^{p,1}$ üst ögelerini seçilir.

$$r = \text{rand} * \sum_{i=1}^{k^l} \eta^p(i)$$

3737* MERGEFORMAT ()

$$c(j) = c(j-1) + \eta^p(j)$$

3838* MERGEFORMAT ()

If $r \leq c(j)$ then $\mathbf{a}_e^{p,1} = \mathbf{a}_e^{p,1} + 1$ end

3939* MERGEFORMAT ()

5. $\mathbf{a}_e^{p,2}$ için Denklem 37, 38, ve 39'u tekrarlanır.

6. Çaprazlamayı işlenir.

$$\eta^c = \text{unifrnd}(-\eta^c, 1 + \eta^c, k^l)$$

4040* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{a}_e^{c,1} = \eta^c \cdot \mathbf{a}_e^{p,1} + (1 - \eta^c) \cdot \mathbf{a}_e^{p,2}$$

4141* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{a}_e^{c,2} = \eta^c \cdot \mathbf{a}_e^{p,2} + (1 - \eta^c) \cdot \mathbf{a}_e^{p,1}$$

4242* MERGEFORMAT ()

for döngüsü sonu

7. $\mathbf{a}_e^c = [\mathbf{a}_e^{c,1}; \mathbf{a}_e^{c,2}]$ ile mutasyonu gerçekleştirilir.

for l=2 to k^l

8. \mathbf{a}_e^m mutasyonunu uygulanır.

$$f = rand(3) \leq \eta^f$$

4343* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{a}_e^m(l) = \mathbf{a}_e^c(f) + \eta^f \cdot randn(3)$$

4444* MERGEFORMAT ()

9. Euler açısı sınırları kontrol edilir.

$$\mathbf{a}_e(l) = \max(\mathbf{a}_e^m(l), \mathbf{a}_e^{\min})$$

4545* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{a}_e(l) = \min(\mathbf{a}_e(l), \mathbf{a}_e^{\max})$$

4646* MERGEFORMAT ()

10. Denklem 16'da kontrol sinyali $u_z(l)$ 'yi belirlenir.

$$u_z(l) = \text{sign}(\mathbf{K} \cdot \mathbf{p}(l-1))$$

4747* MERGEFORMAT ()

11. Kontrol sinyali kısıtlamaları $u_z(l)$ üzerine uygulanır.

$$u_z(l) = \max(u_z(l), u_z^{\min})$$

4848* MERGEFORMAT ()

$$u_z(l) = \min(u_z(l), u_z^{\max})$$

4949* MERGEFORMAT ()

12. Denklem 1 ila 3'teki $\mathbf{p}(l)$ öteleme durumlarını elde edilir.

13. $\mathbf{p}(l)$ 'ye öteleme konumu kısıtlamaları uygulanır.

$$\mathbf{p}(l) = \max(\mathbf{p}(l), \mathbf{p}^{\min})$$

5050* MERGEFORMAT ()

$$\mathbf{p}(l) = \min(\mathbf{p}(l), \mathbf{p}^{\max})$$

5151* MERGEFORMAT ()

14. Denklem 23 veya 25'teki maliyetleri hesaplanır.

15. Yerel en iyi çözümler şu şekilde güncellenir:

eğer anlık maliyet $e^{(l)}$ kişisel en iyi çözüm e_p 'den daha az ise

Quadrotor yol bilgilerini kaydet.

$$\mathbf{a}_e^p = \mathbf{a}_e(l), \mathbf{p}^p = \mathbf{p}(l), u^p = u_z(l)$$

Kişisel en iyi çözüm $e_p = e(l)$

eğer döngüsü sonu
for döngüsü sonu

16. Kişisel en iyi e^p 'yi global en iyi e^g olarak kaydedilir.
17. Global en iyi çözümlerle optimizasyonu başlatılır.

for döngüsü sonu

18. Global en iyi yörünge çözümlerini kaydedilir.

$$\mathbf{a}_e(t) = \mathbf{a}_e^g, \mathbf{p}(t) = \mathbf{p}^q, u_z(t) = u_z^p$$

19. Denklem 20 ve 22 ile dönme yörüngesi $\mathbf{r}_r(t)$ elde edilir.

for döngüsü sonu

Bir sonraki bölümde simülasyon ve gerçek zamanlı sonuçlar sunulmakta ve kapsamlı bir şekilde analiz edilmektedir.

SONUÇLAR

Bu bölümde ilk önce quadrotor parametreleri tanıtılmakta, meta-sezgisel algoritmaların uygulama sonuçları verilmekte ve ardından sonuçları analiz edilmektedir.

Quadrotor ve Algoritma Parametreleri

Tablo 1 İHA'nın parametrelerini sunmaktadır.

Tablo 1: S500 quadrotor İHA parametreleri.

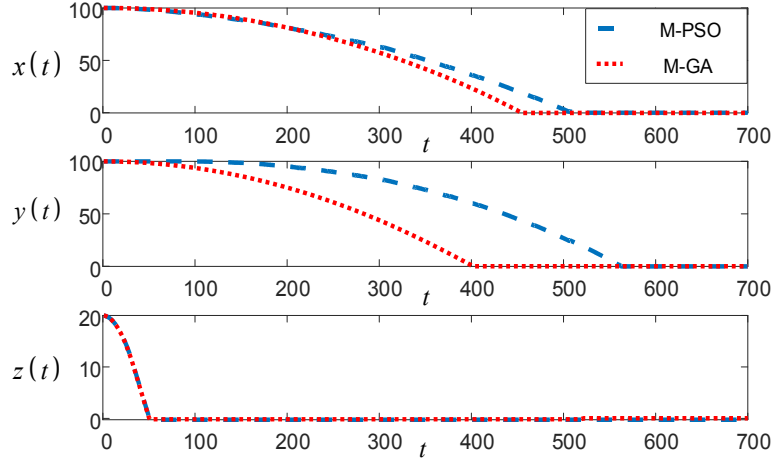
| Parametre | Açıklama | Değer |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| m | Kütle | 1.7 kg |
| b | İtme parametresi | 4.1×10^{-7} N/rpm ² |
| d | Sürüklenme parametresi | 8×10^{-9} Nm/ rpm ² |
| l | Moment kolu | 0.243m |
| I_x | x eksenine göre moment eylemsizliği | 0.0213kg.m ² |
| I_y | y eksenine göre moment eylemsizliği | 0.0221kg.m ² |
| I_z | z eksenine göre moment eylemsizliği | 0.028kg.m ² |
| k_x, k_y | Öteleme sürüklenme katsayıları | 5.5×10^{-4} N/m/ s |
| k_z | Öteleme sürüklenme katsayıları | 6.3×10^{-4} N/m/ s |
| k_φ, k_θ | Dönme sürüklenme katsayıları | 5.5×10^{-4} N/m/ s |
| k_ψ | Dönme sürüklenme katsayısı | 6.3×10^{-4} N/ rad/s |
| J_t | Toplam moment eylemsizliği | 6.8×10^{-4} kg.m ² |
| a_p | P -alt-modelinin parametresi | -0.2770 |
| a_q | q -alt-modelinin parametresi | 0.3032 |

| | | |
|-------|--------------------------------|---------|
| a_r | r -alt-modelinin parametresi | -0.0286 |
|-------|--------------------------------|---------|

M-PSO algoritma parametreleri η^v, η^p, η^g sırasıyla 1.45, 2.99, 2.99'dur. M-GA algoritma parametreleri η^s, η^c, η^m sırasıyla 0.1, 0.02, 0.1 olarak belirlenmiştir.

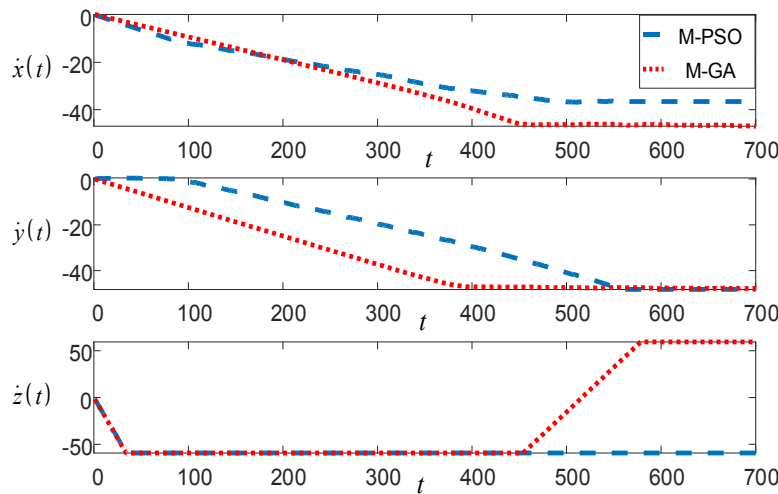
Minimum Mesafe Yol Planlaması

Şekil 2, M-PSO ve M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile minimum mesafeli quadrotor öteleme yol pozisyon planlamasını sunmaktadır.



Şekil 2: Minimum mesafe öteleme pozisyonları.

Quadrotorun başlangıç öteleme konumları $x(t), y(t)$ ve $z(t)$ için sırasıyla 100, 100, 20'dir ve optimizasyon algoritmasının amacı, iniş için minimum mesafe hedef yörüngeleri üretmektir. Şekil 2'den görülebileceği gibi, M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritması dinamik, kinematik ve aktüatör kısıtlamaları altında quadrotor için daha küçük $x(t)$ ve $y(t)$ öteleme konumları üretmeyi başarabilmektedir. Bununla birlikte, her iki optimizasyon algoritması, hedefi diğer öteleme konumlarından daha hızlı yakınsayan ve tam olarak aynı $z(t)$ öteleme konumunu planlayabilmektedirler. Bu çalışmada önerilen minimum mesafe algoritmaları, aynı zamanda, Şekil 3'teki gibi quadrotor için öteleme hızları üretebilmektedir.

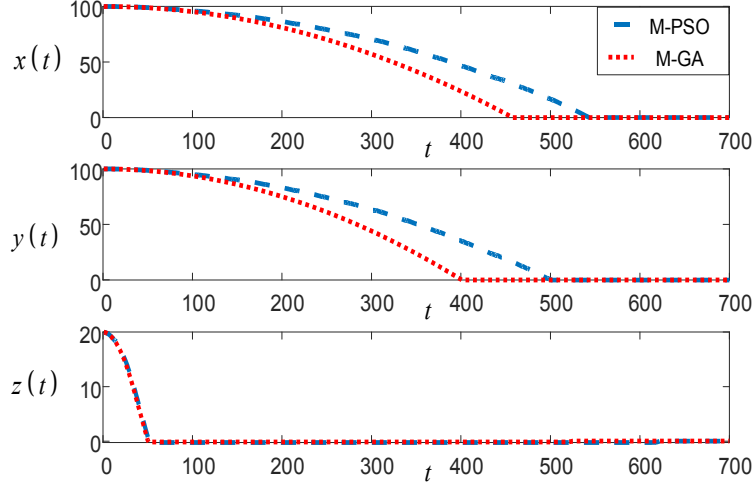


Şekil 3: Minimum mesafe öteleme hızları.

M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritması, Şekil 2'de gösterildiği gibi daha küçük öteleme konumları ve daha büyük öteleme hızları üretebilmektedir. Şekil 3'te oluşturulan tüm hedef yörüngeler benzer karakterlere sahip olsa da, M-GA algoritması tarafından üretilen $\dot{z}(t)$ öteleme hızı 50 m/s, M-PSO algoritması tarafından üretilen ise -50 m/s'ye olmaktadır. Bu durumun temel nedeni referans noktasının değişmesidir. Bu projede ayrıca bir sonraki alt bölümde ele alınan minimum zaman yörüngeleri planlaması yapılmaktadır.

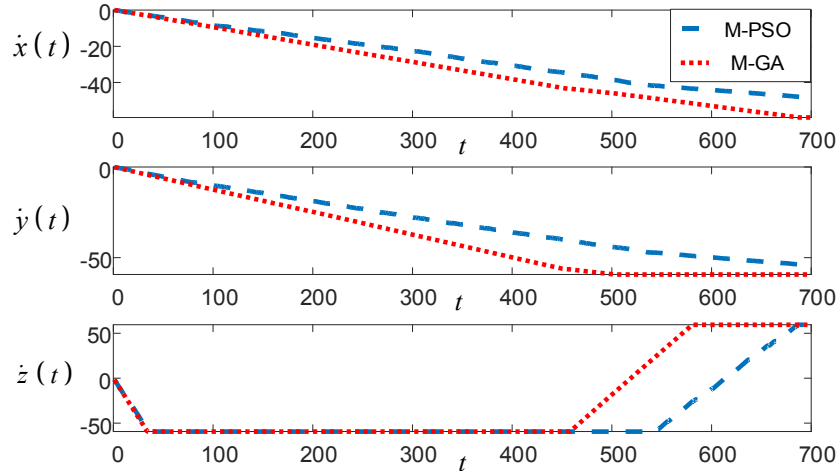
Minimum Zaman Yörünge Planlaması

Şekil 4, M-PSO ve M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile planlanan minimum zamanlı quadrotor öteleme pozisyonlarını göstermektedir.



Şekil 4: Minimum zaman öteleme pozisyonları.

Minimum mesafe öteleme konumları ve hızları, M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritması ile optimum olarak üretilir. Ek olarak, yörüngelerin genel karakterleri, Bölüm V.Hata: Başvuru kaynağı bulunamadı'de belirtilen süre dışında aynıdır. Minimum zaman yörünge planlama algoritması, Şekil 5'te verilen öteleme hızlarını üretir.

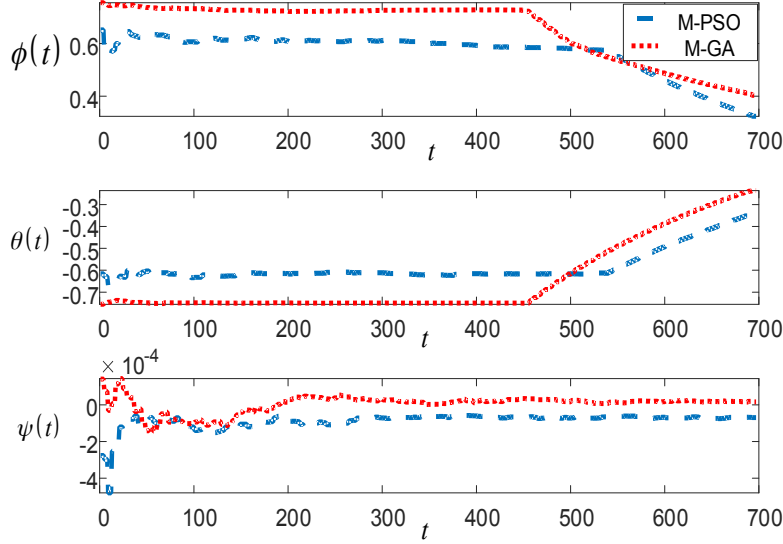


Şekil 5: Minimum zaman öteleme hızları.

Şekil 3'teki minimum mesafe öteleme hızlarının aksine, minimum zaman öteleme $\dot{z}(t)$ hızları tutarlı karakterlere sahiptirler. Bu çalışmada önerilen yörünge planlama algoritmaları, Euler açılarını ve dönme konumlarını da üretebildiği bir alt bölümde gösterilmiştir.

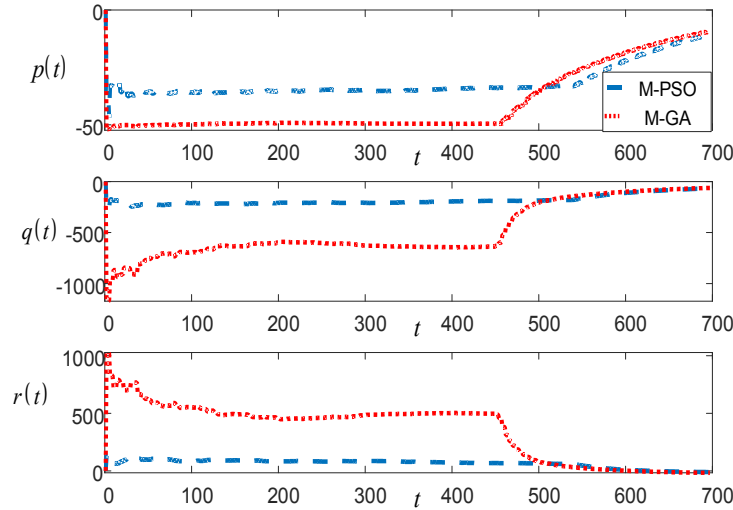
Euler Açıları ve Dönme Yörüngeleri

Şekil 6 minimum zaman quadrotor Euler açılarını göstermektedir.



Şekil 6: Minimum zaman Euler açısı yörüngeleri.

Verilen hedef öteleme konumlarına karşılık gelen Euler açıları, M-PSO ve M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları tarafından ayrıca üretilir. Şekil 6'dan görülebileceği gibi, M-PSO algoritması başlangıçta biraz daha büyük dalgalanmalara sahiptir, ancak daha sonra her iki algoritma da quadrotorlar için benzer Euler açıları üretmektedirler. Bununla birlikte, M-GA algoritması, oldukça büyük Euler açıları üreterek hedef yörüngeleri planlamak için daha kısa sürelere ihtiyaç duymaktadır. Euler açılarına benzer şekilde, Şekil 7'de gösterildiği gibi dönme konumu yörüngelerini planlamak için minimum zamana ihtiyaç duymaktadır.

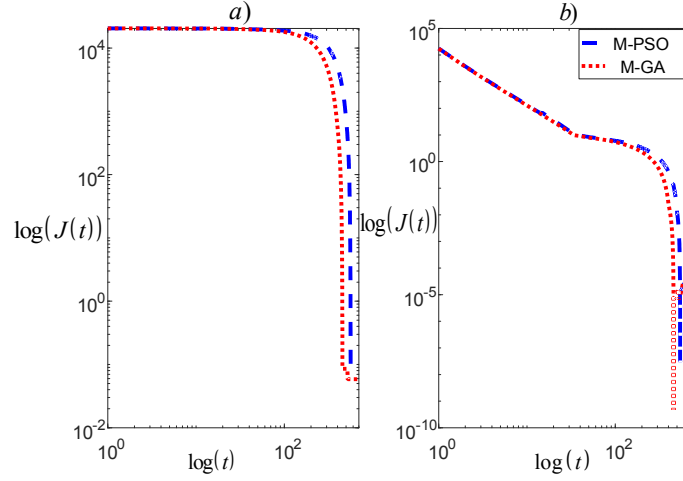


Şekil 7: Minimum zaman dönme pozisyonu yörüngeleri.

Quadrotorların pozisyonun değişmesi için dönmesi gerektiğinden, bu projede aynı zamanda istenen öteleme yörüngelerini karşılık gelen dönme yörüngeleri de üretilmiştir. Şekil 7'den, M-GA algoritmasının daha hızlı iniş üretmek için daha büyük dönüşler üretebildiği görülmektedir. Ayrıca, büyük rotasyonların daha büyük başlangıç aşmaları (overshoot) sağladığı da dikkat çekicidir. Asgari zaman yörüngesi agresif rotasyonel eylemler gerektirdiğinden bu durum beklenebilir bir özelliktir. Bir sonraki bölümde, minimum mesafe ve minimum zaman yörünge planlama sonuçlarını M-PSO ve M-GA meta-sezgisel algoritmaları ile karşılaştırılmaktadır.

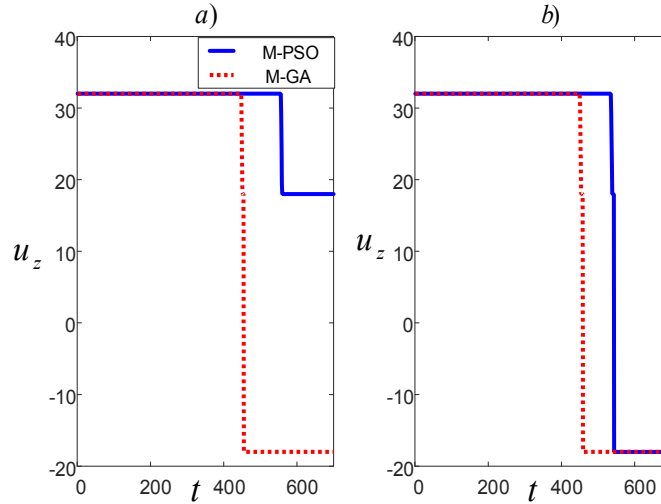
Karşılaştırma Sonuçları

Şekil 8, optimize edilmiş minimum mesafe ve minimum zaman yörünge maliyetlerini M-PSO ve M-GA meta-sezgisel algoritmalarıyla karşılaştırmaktadır.



Şekil 8: a) minimum mesafe, b) minimum zaman algoritmaları ile optimize edilmiş maliyetler.

Şekil 8'den görülebileceği gibi, M-PSO algoritması, hem minimum mesafe hem de minimum zaman algoritmaları için optimum yörüngeleri öğrenmede daha fazla zamana ihtiyaç duymaktadır. Denklem 25'de verilen maksimum hızın tersi de dikkate alınması nedeni ile minimum zaman maliyetlerinin hızla azaldığı dikkat çekicidir. Optimize edilmiş maliyetler ve süreleri Şekil 9'da karşılaştırılmaktadır.

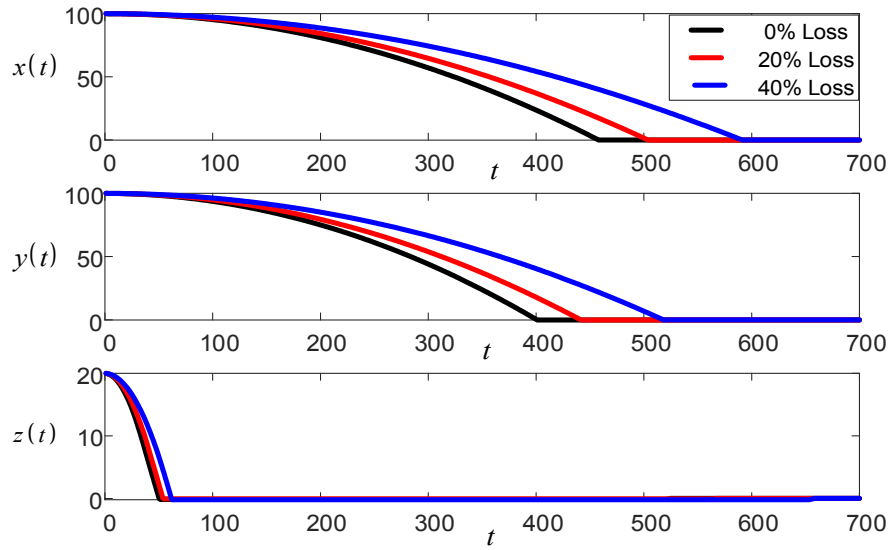


Şekil 9: Kısıtlanmış kontrol sinyalleri a) minimum mesafe, b) minimum zaman algoritmaları.

Şekil 9'dan her iki algoritmanın da quadrotoru hedeflediği gibi sürmek için maksimum kontrol sinyalleri ürettiği açıktır. Hedef yörüngelere yaklaşıldığında, kontrol sinyalleri negatif veya pozitif minimumlara birleşmektedir. Bu özellik ile her iki algoritmanın da bang-bang kontrol karakterine sahip olduğu ifade edilebilir.

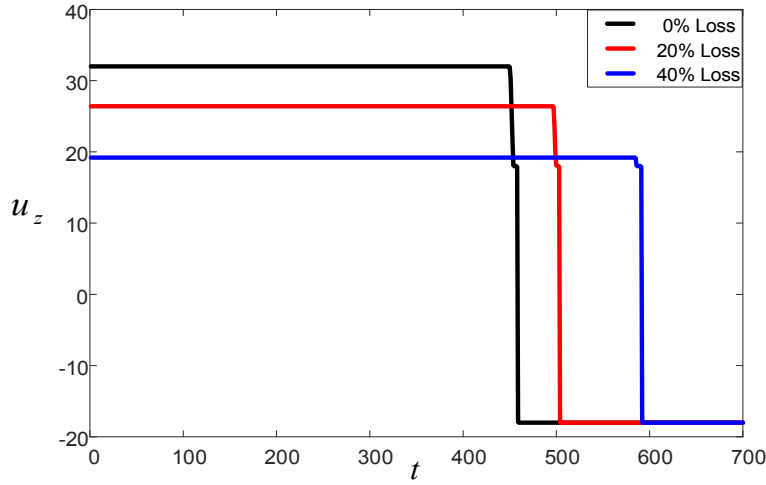
Bozulmuş Quadrotor için Minimum Zaman Yörüngeleri

Şekil 10 bozulmuş quadrotor için M-GA algoritması ile planlanan minimum zaman öteleme yörüngelerini göstermektedir.



Şekil 10: Bozulmuş quadrotor için planlana minimum zaman öteleme yörüngesi.

Aktüatör arızası meydana geldiğinde, arızanın konumuna ve büyüklüğüne göre aktüatörlerin dönüş hızları düşmektedir. Bu nedenle, minimum zaman yörünge oluşturma algoritması, Şekil 10'da görüldüğü gibi, yere inmek için daha uzun süreler gerektiren yeni yörüngeler planlaması gerekmektedir. Yörüngelerle birlikte, minimum zaman yörünge oluşturma algoritması, kontrol sinyalini Şekil 11'deki gibi yeniden yapılandırmaktadır.

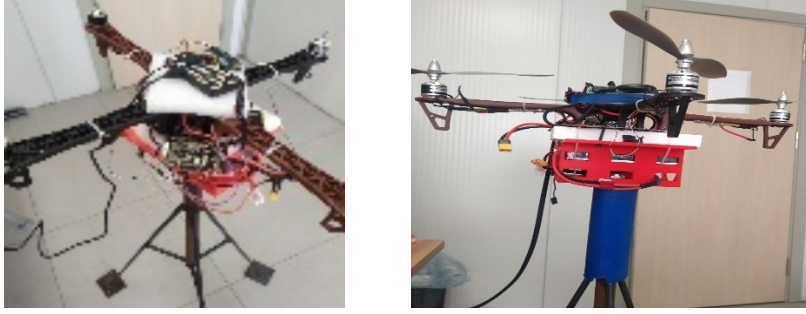


Şekil 11: Arızalı quadrotor için M-GA algoritması tarafından üretilen minimum zaman kontrol sinyalleri.

Kontrol sinyali u_z 'in maksimum değerleri, aktüatörler dönüş hızlarının 0%, 20%, 40%'ını kaybettiğinde sırası ile 32, 26.2, 19.2'dir. Şekil 11'de gösterildiği gibi artan aktüatör arızaları daha uzun sürelerde maksimum kontrol sinyalleri gerektirmektedir. Bir sonraki bölüm, gerçek zamanlı deneysel sonuçları sunmaktadır.

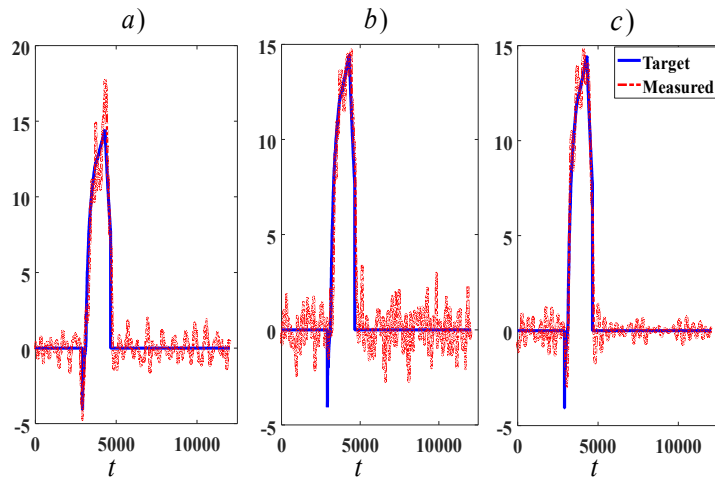
Gerçek Zamanlı Deneysel Sonuçlar

Makalenin bu bölümünde, gerçek zamanlı test ortamı deneylerinden elde edilen deneysel sonuçları sunmaktadır. Bu amaçla, Şekil 12'de gösterildiği gibi, Pixhawk otopilot ve S500 dört rotorlu çerçeve ile donatılmış bir test ortamı geliştirilmiştir. Test ortamı, motor girişleri ve kuadrotor durumları gibi gerçek zamanlı verileri elde etmek için kullanılabilir. Darbe Genişlik Modülasyonuna (PWM) dayalı motor girişleri ve kuadrotorun durumlarını içeren gerçek zamanlı veriler, test ortamı aracılığıyla elde edilebilir. Test ortamı, çerçevenin üç boyutlu dönüşüne izin verecek şekilde tasarlanmıştır.



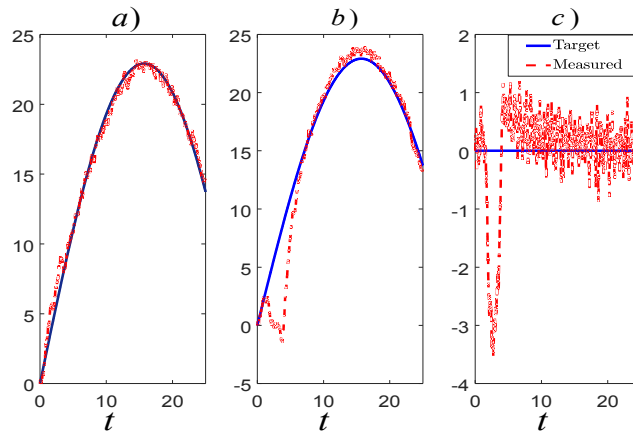
Şekil 12: S500 quadrotor ve Pixhawk otopilot ile test ortamı.

Şekil 13: Aktüatör 1 ve aktüatör 2 arızalarının varlığında gerçek zamanlı dönme durumlarını göstermektedir.



Şekil 13: Gerçek zamanlı olarak aktüatör arızaları ve dönme durumları.

Başlangıçta, aktüatör 2, $t=25$ saniyede arızalanmakta ve bu arıza, P dönme hızında büyük bir tepe noktasının oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde, aktüatör 1, $t=32$ saniyede arızalanmakta ve q dönme hızında birden fazla büyük tepe noktalarının oluşmasına neden olmaktadır. Referans izleme kontrolcüsü quadrotoru istenen r dönme hızında stabilize etmeyi amaçladığından, r dönme durumları $t=25$ saniye süresine kadar dalgalanır. Quadrotor istenilen konumlarda stabilize edildikten sonra, önce aktüatör 2, ardından aktüatör 1 arızaları başlatılmış ve Şekil 14'te gösterilen yörüngeler elde edilmiştir.



Şekil 14: Gerçek zamanlı arıza ve quadrotor yörüngeleri.

Şekil 14'ten de görüleceği gibi, geliştirilen yol planlama algoritmaları aktüatör arızalarının oluşması durumunda gerçek zamanlı optimal yol planlaması yapabilmektedir. Gerçek zamanlı ve simülasyon çalışma sonuçlarının tutarlılık göstermesi, geliştirilen algoritmaların etkinliğini göstermektedir.

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu projede, bozulmuş quadrotorlar için çok boyutlu minimum mesafe ve minimum zaman yolu planlama algoritmaları geliştirmiştir. Kısıtlı ve çok boyutlu M-PSO ve M-GA meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, en iyi quadrotor Euler açılarını seçerek maliyet fonksiyonlarını optimize edebilmiştir. Belirlenen Euler açılarına karşılık gelen öteleme ve dönme konumları ve hızlarının planlanması ayrıca başarılmıştır. Sonuçlar, her iki meta-sezgisel algoritmanın da hedeflenen quadrotor yollarını planlayabildiğini göstermektedir. Ancak M-GA algoritmasının hem en kısa quadrotor mesafelerini hem de sürelerini planlamayı başarabildiği proje kapsamında yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır. Ayrıca tasarlanan algoritmaların quadrotor bozulmaları durumunda yol planlamasını etkili bir şekilde ele alabildiği ve hata miktarına göre planlanan yolları modifiye edebildiği gösterilmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneyler eşit koşullar altında gerçekleştirilmiş ve quadrotorun simülasyon ile türetilen hedef yolları takip edebildiği gösterilmiştir.

Gelecekte, bu algoritmalar diğer İHA'ların konumları, pil seviyeleri ve belirtilen İHA görevleri dahil edilerek birden fazla quadrotorun yol planlamasında kullanılacaktır.

REFERANSLAR

1. Madridano, Á., Al-Kaff, A., Martín, D. and de la Escalera, A., 2021. Trajectory planning for multi-robot systems: Methods and applications. *Expert Systems with Applications*, 173, p.114660.
2. Zuo, Y., Tharmarasa, R., Jassemi-Zargani, R., Kashyap, N., Thiyaalingam, J. and Kirubarajan, T., 2020. MILP Formulation for Aircraft Path Planning in Persistent Surveillance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(5), pp.3796-3811.
3. Song, J., Song, T., Seo, D., Jin, D. and Kim, J., 2017. Social Big Data Analysis of Information Spread and Perceived Infection Risk During the 2015 Middle East Respiratory Syndrome Outbreak in South Korea. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 20(1), pp.22-29.
4. Watanabe, S. and Mukai, M., 2021. Optimal trajectory generation of a drone for wheelchair tracking using mixed-integer programming. *Artificial Life and Robotics*, 27(1), pp.159-164.
5. Letizia, N., Salamat, B. and Tonello, A., 2021. A Novel Recursive Smooth Trajectory Generation Method for Unmanned Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(5), pp.1792-1805.
6. Adhikari, M. and de Ruiter, A., 2020. Online Feasible Trajectory Generation for Collision Avoidance in Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43(6), pp.1201-1209.
7. Guo, X., Ji, M., Zhao, Z., Wen, D. and Zhang, W., 2020. Global path planning and multi-objective path control for unmanned surface vehicle based on modified particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Ocean Engineering*, 216, p.107693.

-
8. Ischuk, I., 2021. Modeling of the Optimal Flight Route of Unmanned Aerial Vehicles Based on Infrared Video Navigation Data Based on the Upgraded Dijkstra Algorithm. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 14(7), pp.788-802.
 9. Mac, T., Copot, C., Tran, D. and Keyser, R., 2017. A hierarchical global path planning approach for mobile robots based on multi-objective particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 59, pp.68-76.
 10. Sun, G., Zhou, R., Di, B., Dong, Z. and Wang, Y., 2019. A Novel Cooperative Path Planning for Multi-robot Persistent Coverage with Obstacles and Coverage Period Constraints. *Sensors*, 19(9), p.1994.
 11. Peng, J., 2015. Mobile Robot Path Planning Based on Improved Q Learning Algorithm. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 10(7), pp.285-294
 12. Cryan, M., 2006. Michael Mitzenmacher and Eli Upfal. Probability and computing: Randomized algorithms and probabilistic analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 2005, 386 pp. *Bulletin of Symbolic Logic*, 12(2), pp.304-308.
 13. Lin, Y. and Saripalli, S., 2017. Sampling-Based Path Planning for UAV Collision Avoidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(11), pp.3179-3192.
 14. Schmid, L., Pantic, M., Khanna, R., Ott, L., Siegwart, R. and Nieto, J., 2020. An Efficient Sampling-Based Method for Online Informative Path Planning in Unknown Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), pp.1500-1507.
 15. Madridano, Á., Al-Kaff, A., Martín, D. and de la Escalera, a., 2020. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies. *Sensors*, 20(3), p.642.
 16. Duan, H. and Huang, L., 2014. Imperialist competitive algorithm optimized artificial neural networks forUCAV global path planning. *Neurocomputing*, 125, pp.166-171.
 17. Sung, I., Choi, B. and Nielsen, P., 2021. On the training of a neural network for online path planning with offline path planning algorithms. *International Journal of Information Management*, 57, p.102142.
 18. Nikolos, I.K., E.S. Zografos, and A.N. Brintaki, *UAV path planning using evolutionary algorithms*, in *Innovations in intelligent machines-1*. 2007, Springer. p. 77-111.
 19. Li, J., Deng, G., Luo, C., Lin, Q., Yan, Q. and Ming, Z., 2016. A Hybrid Path Planning Method in Unmanned Air/Ground Vehicle (UAV/UGV) Cooperative Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12), pp.9585-9596.
 20. Consolini, L., Locatelli, M., Minari, A. and Piazzzi, A., 2017. An optimal complexity algorithm for minimum-time velocity planning. *Systems & Control Letters*, 103, pp.50-57.
 21. Zhang, Q., Li, S. and Guo, J., 2012. Smooth time-optimal tool trajectory generation for CNC manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3), pp.280-287.
 22. Kim, J., Kim, S., Kim, S. and Kim, D., 2010. A practical approach for minimum-time trajectory planning for industrial robots. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(1), pp.51-61.

-
23. Stefanatos, D. and Li, J., 2014. Minimum-Time Quantum Transport With Bounded Trap Velocity. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(3), pp.733-738.
 24. Tychy, L. and Woolsey, C., 2009. Minimum-Time Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Steady Uniform Winds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(6), pp.1736-1746.

