

Sabit Kanatlı İnsansız Hava Araçlarında Kooperatif Yol Planlama ve Görev Dağılımı

Cooperative Path Planning and Task Execution of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles

Mehmet Kınacı, Harun Resul Can, Tufan Kumbasar,

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
{kinaci19, canh19, kumbasart}@itu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, sabit kanatlı İnsansız Hava Araçlarının (İHA) gözetleme görevlerindeki kullanımı ve çoklu İHA sistemlerinin bu tip görevlerde sağladıkları avantajlar incelenmiştir. Sabit kanatlı İHA'lar, uzun uçuş süreleri, geniş operasyonel menzil ve yüksek yük taşıma kapasitesi gibi özellikleriyle etkili bir şekilde gözetleme görevlerini yerine getirebilmektedir. Çoklu İHA sistemlerinin kullanımı, gözetleme görevlerinde verimliliği artırarak daha geniş bir kapsama alanı sunmaktadır. Bu çalışmada, MATLAB ve Simulink kullanılarak birden fazla İHA ile gözetleme görevlerinin icrası sağlanmıştır. Bir görev dağılımı algoritması kullanılarak gözetleme noktalarının İHA'lar arasında paylaşımı optimize edilmiştir. Global ve lokal yol planlama algoritmaları birlikte kullanılarak İHA'ların, uçuşa yasak bölgelerin olduğu ve statik ya da dinamik engeller ile karşılaşılabilen bir arazi ortamında güvenli ve etkin bir biçimde hedeflerine varabilmeleri sağlanmıştır. Kontrol ve güdüm algoritmaları kullanılarak İHA'ların kendilerine atanan gözetleme noktalarına vardikten sonra nokta etrafında çember uçuşu yapmaları sağlanmıştır.

Abstract

In this study, the usage of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) in surveillance missions and the advantages provided by multi-UAV systems in such tasks are examined. Fixed-wing UAVs are capable of effectively performing surveillance missions due to their long flight durations, extensive operational range, and high payload capacity. The utilization of multi-UAV systems enhances efficiency and enables wider coverage in surveillance missions. In this study, MATLAB and Simulink were utilized to accomplish surveillance missions with multiple UAVs. A task allocation algorithm was employed to optimize the sharing of surveillance points among UAVs. Global and local path planning algorithms were combined to ensure the safe and efficient navigation of UAVs in terrain environments that may include no-flight zones and encounter static or dynamic obstacles. Control and guidance algorithms were utilized to enable UAVs to perform circular flights around the assigned surveillance points after reaching them.

1. Giriş

Sabit kanatlı İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), çevre gözetleme görevleri başta olmak üzere çeşitli sektörlerde önemli araçlar olarak kullanılmaktadır [1]. Sabit kanatlı İHA'lar, aerodinamik karakteristikleri sayesinde uzun uçuş sürelerine, geniş

operasyonel menzile ve yüksek faydalı yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, İHA'nın belirtilen bir hedef konum etrafında istenilen süre boyunca uçarak bilgi toplama işlemini ifade eden gözetleme görevlerinde sabit kanatlı İHA'ların kullanımı tercih edilmektedir [2]. Birbirleriyle uyumlu şekilde hareket eden çoklu İHA sistemlerinin kullanımı, sabit kanatlı İHA'lar gözetleme görevlerinde sağladığı faydaları arttırmaktadır.

Bu çalışmada, birden fazla sabit kanatlı İHA'dan oluşan sistemlerin gözetleme görevlerinde kullanımı durumunda ortaya çıkan görev dağılımı ve yol planlama problemleri üzerine çalışılmıştır. Munkres algoritması kullanılarak İHA'ların başlangıç konumları ve görev noktaları arasında minimum maliyetli eşleşme yapılmıştır. Rapidly-exploring Random Tree (RRT) algoritması kullanılarak arazi yapıları ve uçuşa yasaklı bölgeler olan ortamda yol planlaması yapılmıştır. Artificial Potential Field (APF) algoritması ile uçuş sırasında karşılaşılan dinamik ve statik engellerden kaçınılmıştır. Nihai yollar, Carrot Chase güdüm algoritması kullanılarak uygun benzetim ortamında takip edilmiştir.

Çoklu İHA sistemlerinin kullanımı gözetleme görevlerinde verimliliği arttırmakta ve daha geniş bir kapsama alanı sunmaktadır. Gözetleme yapılacak konumların İHA'lar arasında paylaşılabilmesi sayesinde birden fazla İHA'nın eşzamanlı olarak görev icra etmesi sağlanmaktadır. Bu sayede, görev noktalarına daha hızlı ulaşılmakta ve aynı anda daha geniş bir bölge gözetlenebilmektedir.

Görev noktalarının İHA'lar arasında paylaşımı için görev dağılımı algoritması olarak Munkres algoritması kullanılmış ve yapılan paylaşımın en verimli şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Munkres algoritması, görev noktaları ve görev gerçekleştirecek İHA'ların buldukları konumların arasındaki Öklid uzaklığı maliyet olarak kabul etmekte ve maliyeti en düşük paylaşım işlemi yapmaktadır. Bu sayede her bir İHA'ya kendisine en yakın mesafedeki görev noktası atanmıştır.

Yapılan görev dağılımının ardından İHA'ların görev noktalarına ulaşabilmesi için güvenli ve uçuşa uygun yolların planlanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda yol planlama algoritmaları kullanılmıştır. Yol planlama işlemi global ve lokal olarak ikiye ayrılmaktadır. Global planlama işlemi için RRT algoritması, lokal planlama işlemi için ise Artificial Potential Field (APF) algoritması kullanılmıştır. Global yol planlama algoritması, uçuşun gerçekleşeceği ortam hakkında uçuş öncesinde sahip olunun ortamın arazi yapısı, uçuşa yasaklı bölgeler gibi bilgileri kullanarak her bir İHA için referans yolları hesaplar. İHA'lar uçuşa başlar ve uçuş sırasında

uçuşa engel olabilecek bir engelle karşılaşılmadığı sürece referans yolu takip eder. Uçuş sırasında İHA ile çarpışma riski taşıyan statik ya da dinamik engeller ile karşılaşılabilmektedir. Bu durumda takip edilen referans yol güvenli olmaktan çıkmakta ve yeni bir yola ihtiyaç duyulmaktadır. Uçuş sırasında bir engel ile karşılaşılmaması durumunda lokal planlama algoritması olan APF devreye girer. APF, referans yolun engelden uzak bir noktasını hedef konum olarak alır ve İHA'nın takip ettiği yolu manipüle ederek engelle çarpışmadan bu konuma ulaşmasını sağlar. Ardından İHA referans yolu takip etmeye devam eder. İHA'nın görev noktasına ulaşmasının ardından güdüm algoritmaları devreye girerek İHA'nın görev noktası etrafında çember uçuşu yaparak gözetleme görevini tamamlaması sağlanır.

2. Çevre

İHA'lar görevlerini yerine getirirken çeşitli engellerle karşılaşabilmekte ve bu engeller, çevreye bağlı olarak değişebilmektedir. Yol planlama algoritmaları, bu engelleri harita tipi veri yapılarında tutarak en uygun yolun hesaplanmasını sağlar ve İHA'nın istenen konuma yönlendirilmesini sağlar. Bu tür haritalardan biri occupancy 3B haritalarıdır. Occupancy 3B haritaları, İHA sensörleri tarafından ölçülen verileri üç boyutlu bir dünyada saklar ve engel olasılığını dikkate alarak yol planlamasına olanak tanır [3]. Bu haritalar, senaryoya dayalı olarak statik ve dinamik engellerin konumlarını ve şekillerini temsil ederek oluşturulur. Oluşturulan haritalar sayesinde yol planlama aşamasında engellerle çarpışma ihtimali göz önünde bulundurularak güvenli yollar elde edilir. Bir İHA'nın uçuş yaptığı çevrede engellerin yanı sıra rüzgâr ya da türbülans gibi uçuşun gidişatını engelleyebilecek ve rastlantısal etkenler de vardır. Ancak bu çalışmada tasarlanan ortam, rüzgâr ya da türbülans gibi etkenler yok kabul edildiği ve sadece engellerin dahil edildiği 3 boyutlu bir yapı şeklindedir. İHA'nın uçuş yolunda bulunmaması gereken yapılar Uçuşa Yasaklı Bölgeler, Arazi Yapıları, Statik Engeller ve Dinamik Engeller olarak ilgili başlıklar altında incelenmektedir.

2.1. Uçuşa yasak bölgeler

Uçuşa yasak bölgeler, İHA'ların görev yürütmesi sırasında kaçınılması gereken hava sahalarıdır. Bu bölgeler, çeşitli nesne ve alanları temsil edebilir. Örneğin işbirlikçi bir görev sırasında İHA'ların bir şehir merkezine girmeden bölgeyi çevrelemesi gerekiyorsa, bu alan occupancy 3B haritasında uçuşa yasak bölge olarak belirlenebilir. Bu sayede yol planlama algoritmalarının uçuş yolunu hesaplaması sırasında bu bölgelerden kaçınılması sağlanmaktadır. Ayrıca radarlar veya topçu birlikleri gibi tehlikeli alanlardan veya düşman askeri bölgelerinden kaçınmanın gerektiği durumlarda da bu bölgeler uçuşa yasak bölge olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, uçuşa yasaklı bölgeler kaçınılması gereken radar kapsama alanları şeklinde tanımlanmıştır. Haritaya eklenecek her bir radar için bir kapsama alanı bilgisi bir de konum bilgisi gerekmektedir. Bunlar, haritanın oluşturulması sırasında kullanılan parametrelerdir. Belirtilen kapsama alanlarına ve konumlara sahip radar alanları birer yarım küre şeklinde modellenerek haritaya eklenir.

2.2. Arazi Yapıları

Uçuş ortamı, yükseltilere ve girintilere sahip bir arazi tasarımını temel almaktadır. Arazide yer alan yükselti ve girinti yapıları,

uçuş yolunda yer alabilecek bir dağı ya da vadiyi tanımlamak için eklenmiştir. Yol planlama algoritmalarının, ortamda yer alan dağlar ile çarpışma riskini gözeterek sonuç üretmesi gerekmektedir. Benzetim ortamında araziye occupancy 3B haritasında modellemek için matematiksel bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda 3B occupancy haritasının oluşturulması adına (1) denklemi kullanılarak arazinin modellenmesi sağlanmıştır. Haritanın genişliği, uzunluğu ve yüksekliği 3000 metre olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Occupancy 3B haritasında East-North-Up (ENU) koordinat çerçevesi kullanılmıştır. Bu koordinat çerçevesindeki eksenler, denklemde x eksenini doğuyu, y eksenini kuzeyi ve z eksenini doğu-kuzey düzlemine dikey olarak yukarıya doğru işaret edecek şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan x ve y değerleri kullanılarak z değerleri hesaplanmaktadır. Bu işlemler sonucu matematiksel fonksiyon aracılığıyla 3B arazi yüzeyi hesaplanmaktadır [4]. Bu yüzey, occupancy 3B haritasına aktararak arazinin girintili ve yükselti yapıları benzetilmektedir.

$$z = 3(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2} \quad (1)$$

2.3. Statik Engeller

Statik engeller, İHA'ların kaçınması gereken çevredeki sabit engel türleridir. Bu engel türleri, uçuş öncesinde varlığı bilinmeyen engel türleridir ve bu nedenle global yol planlamasında gözetilemezler. Ancak uçuş sırasında İHA'nın görüş mesafesine girdikten sonra varlıkları ve konumları bilinir hale gelmektedir. Ardından lokal yol planlama algoritması olan APF devreye girerek takip edilen yolu manipüle eder ve statik engeller ile çarpışmanın önlenmesini sağlar. İHA'ların sahip olduğu sensörlerin menzilleri, ileri görüş mesafesini belirlemektedir. Bu çalışmada ileri görüş mesafesi 200 metre olarak kabul edilmiştir.

2.4. Dinamik Engeller

Dinamik engeller, İHA'ların kaçınması gereken çevredeki hareketli engel türleridir. Tıpkı statik engellerde olduğu gibi bu engel türlerinin varlığı uçuş öncesinde bilinmemektedir. Fakat çarpışmasız seyri sağlamak için bu engellerden kaçınılması gerekmektedir. Bu görev APF sayesinde yapılmaktadır. Hareketli engel türlerine örnek olarak diğer hava araçları ve füzeler verilebilir.

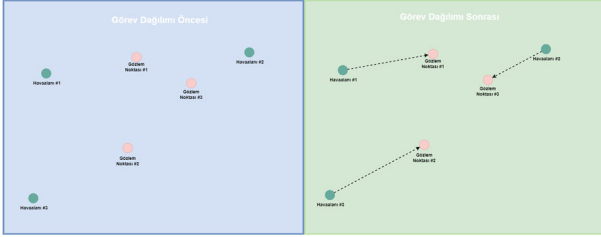
3. Görev Dağılımı

Çoklu İHA sistemlerinde görev planlaması safhasında görev dağılımı ve iş birliği odaklı yaklaşımlar, görevin başarılı ve maliyet etkin olacak şekilde yerine getirilmesi için öneme sahiptir. Görev dağılımı, çoklu İHA sistemlerinde merkezi ya da merkezi olmayan otorite tarafından birden fazla görevin İHA'lara dağıtılarak görevin başarı oranını arttırmaya ve maliyetini düşürmeye çalışan bir yaklaşımdır. Görev ataması, merkezi algoritmalar ve dağıtık algoritmalar olmak üzere iki farklı başlık altında tanımlanabilir. Merkezi algoritmalar, uygun görevlerin merkezi bir otorite tarafından ajanlara atanmasıdır. Buna karşılık dağıtık algoritmalar birbirleriyle etkileşime geçerek global bir hedefi başarmak için birlikte çalışan birden fazla bağımsız ajan içerirken, her ajan kendi

kısıtlamaları içinde lokal hedeflerini optimize etmeye odaklanır.

$$Cost(p, o) = \sqrt{(o_x - p_x)^2 + (o_y - p_y)^2} \quad (2)$$

Bu çalışmada, merkezi görev atama algoritması olarak Munkres algoritması kullanılmıştır. Munkres algoritması, İHA'ların görev noktalarına olan uzaklıklarını maliyet kabul ederek optimizasyon problemini çözer ve atamaları yapar [5]. Denklem (2) kullanılarak İHA'ların başlangıç konumları ve gözlem noktalarının konumları arasında maliyet hesabı yapılmaktadır. Bu algoritma ile yapılan atamalar daha ayrıntılı olarak Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1: Görev dağılımı sonrası eşleşen gözlem noktaları ve İHA başlangıç pozisyonları.

Elde edilen maliyet değerleri kullanarak $m \times n$ bir matris elde edilir. Elde edilen matris, m sayıdaki İHA için n görev noktasının maliyetlerini içerir. Matris, Munkres algoritmasıyla optimize edilmekte ve optimal atamalar yapılmaktadır.

$$\min \sum_{i,j} c_{ij}x_{ij} \quad (3)$$

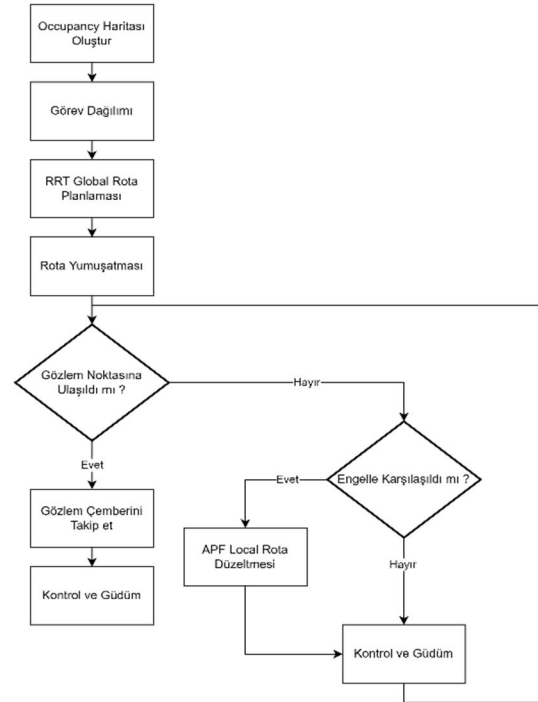
Atama problemi, (3) denkleminde açıklanmaktadır. Burada c_{ij} , ajan i 'nin görev j 'yi yerine getirmek için gereken maliyeti ifade eder. Aynı zamanda c_{ij} , algoritma tarafından optimize edilmesi gereken ikili bir maske değeridir. Her bir sütun ve satırda bir c_{ij} değeri 1 olabilir. Bu değer, atanan görevi ve ajanı maskelemek suretiyle optimizasyon fonksiyonunu oluşturur [6]. Bu çalışmada, Munkres algoritması kullanılarak yapılan atama sırasında, lokal yol planlaması sonucu uçuş yolunda yapılabilecek değişikliklerin maliyet üzerindeki etkisi öngörülemez. Bunun nedeni, lokal planlamada karşılaşılan dinamik nesnelere tahmin edilememesi ve ana maliyet hesaplamasında dikkate alınamamasıdır. Ancak bu algoritma ile yapılan atama, İHA'ların verimli ve işbirlikçi bir şekilde gözlem görevlerini gerçekleştirmesi için oldukça yararlıdır.

4. Yol Planlama ve Güdüm

Sabit kanatlı İHA'lar için yol planlama, başlangıç ve hedef durumlar arasında uygulanabilir en iyi yolu belirlemeyi ve çevredeki engellerden kaçınmayı içerir. Yol planlama algoritmaları, İHA'ların konfigürasyonunu, engel düzenini ve operasyonel gereksinimleri dikkate alarak güvenli ve verimli yollar oluşturmayı hedefler. Dinamik kısıtlamalar ve İHA'nın hızı, yatış açısı vb. gibi fiziksel sınırları da göz önünde bulundurulur.

Bu çalışmada, Çevre başlığı altında belirtilen görev ortamı için yol planlama, global ve lokal olarak iki alt başlıkta incelenmektedir. Şekil 2'de bu çalışmada oluşturulan yapının

akış diyagramı verilmiştir. Bu yapıda, çoklu İHA senaryosunda uygulanabilir ve maliyet etkin yol planlama stratejisi iki farklı yol planlayıcısıyla sağlanılmaktadır.



Şekil 2: Yol planlama ve güdüm akış diyagramı.

Yol planlamadan önce sensörler ve çeşitli haritalar yardımıyla çevrenin occupancy 3B haritası oluşturulmaktadır. Bu harita kullanılarak verilen başlangıç ve görev noktaları için uygun görev dağılımı yapılmaktadır. Görev dağılımı sonrası RRT algoritması aracılığıyla global yol planlaması yapılmaktadır. RRT, bünyesinde bulundurduğu Dubins bağlantı koşulu ile çarpışmasız ve uçulabilir bir yol planlamayı vadetmektedir [7]. Elde edilen yol yumuşatılarak uçuşa uygunluğu artırılır. Bu sayede her İHA için referans yol edilmektedir. Global yol, başlangıç noktasından hedef noktasına engellerden kaçınılması için takip edilmesi gereken uygulanabilir yoldur. Bu yol uygun güdüm algoritması ile takip edilecektir. Yol takibi sırasında karşılaşılan dinamik engeller için APF algoritması ile lokal yol planlaması gerçekleştirilmektedir. APF, statik ve dinamik engellerden kaçınılması için gerekli yol düzeltmesini yaparak global yolun takibini sağlamaktadır. Yol takibi sonucu hedefe varan İHA'lar, hedef üzerinde çembersel yörüngeyi takip ederek gözlem görevlerini icra etmektedirler.

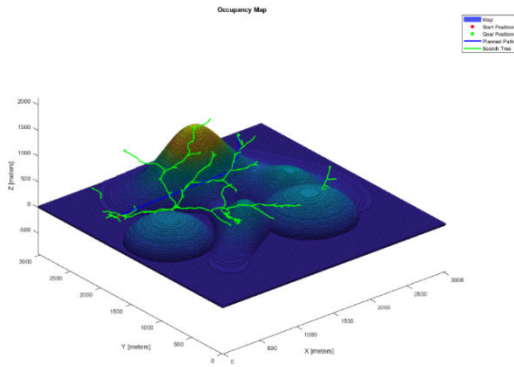
4.1. RRT ile Global Yol Planlama

RRT başlangıç konumundan hedef konumuna yol bulan bir yol bulma algoritmasıdır. Algoritma, durum uzayında rastgele örnekleme düğümleri oluşturur ve belirli kriterler sağlandığında bunları birleştirerek ağaç benzeri yapılar oluşturur. Bu yapılar, arama alanını keşfetmek ve istenen hedefe uygun bir yol bulmak için kullanılır. Bu süreçte iki nokta arasındaki bağlantıyı kontrol eden çeşitli eşik değerleri bulunmaktadır. RRT algoritması, uygulanamaz düğümleri ağaç yapısına eklemeyerek daha verimli bir çalışma sağlar.

RRT algoritması, başlangıç konumunu temsil eden bir başlangıç örnekleme düğümü ile başlar. Ardından durum uzayında rastgele örnekleme düğümleri oluşturulur. Bu düğümler genellikle mevcut düğümleri değiştirerek veya belirli sınırlar içinde rastgele düğüm üretmekle oluşturulur. Algoritma, her yeni düğümün çarpışma önleme veya uygulanabilirlik gibi belirli koşulları sağlayıp sağlamadığını kontrol eder. Koşulları sağlayan düğümler mevcut ağaç yapısına bağlanır. Bu çalışmada RRT algoritması ile Dubins kullanılarak global yol planlaması yapılmaktadır. RRT tarafından oluşturulan rastgele düğümler, İHA'nın aerodinamik sınırları açısından değerlendirilir ve uygulanabilir bir bağlantının sağlanıp sağlanmayacağına karar verilir. Uygulanabilir bir bağlantı sağlanabiliyorsa, Dubins bağlantı koşullarına uyarak iki düğüm birbirine bağlanır. Bu sayede iki düğüm arasında oluşturulan yolun uçuşa uygun olması sağlanır. Böylece arama uzayındaki düğümler üzerinden uçuşa uygun bir arama ağacı oluşturulur.

Bağlantı süreci, mevcut ağaç içinde yeni düğüme en yakın komşuyu bulmayı içerir. Bu komşu, Öklid uzaklığı gibi bir mesafe ölçütüne dayanarak belirlenir. En yakın komşu belirlendikten sonra komşu ile yeni düğüm arasında düzgünlük veya açıklık gibi ek kısıtları sağladığından emin olacak şekilde bir yol oluşturulur. Yol, ağaç yapısına eklenir ve arama alanını genişletir. RRT algoritması, yeni düğümler oluşturma, bunları mevcut ağaca bağlama ve arama alanını genişletme sürecini tekrarlayarak devam eder. Başlangıç konumundan hedef konumuna belirli bir yakınlıkta bir düğüm oluşturulana kadar devam eder ve bu, uygulanabilir bir yolun bulunduğunu gösterir. Başlangıç konumundan hedef konumuna olan yol, hedef düğümden başlangıç düğümüne doğru ağaç yapısını takip ederek elde edilmektedir.

Sahip olduğu rastlantısallık unsuru ve sadece uygulanabilir düğümleri ağaç yapısına ekleme özelliği sayesinde RRT algoritması karmaşık ortamlarda arama alanını etkili bir şekilde keşfeder ve yol planlar. Dubins bağlanma koşulu kullanılarak oluşturulan RRT ağaç yapısı ve hesaplanan yol Şekil 3'te verilmiştir. Bu yol daha sonra yumuşatılarak global yol olarak kullanılacak ve takip edilecektir [8].



Şekil 3: RRT ile oluşturulan ağaç yapısı ve planlanan yol.

4.2. APF ile Lokal Yol Planlama

Bu çalışmada, lokal yol planlaması algoritması olarak APF kullanılmıştır. APF'nin temel prensibi, İHA'yı hedef konuma çeken ve engellerden uzaklaştıran potansiyel kuvvetlerin oluşturulmasıdır. Hedef ve engel bilgilerine dayalı çekici ve itici kuvvetler atanarak İHA'nın çarpışmalardan kaçınması sağlanır. Sonuçta elde edilen yol, çekici ve itici kuvvetler

arasında bir denge oluşturur ve İHA'nın hedefe doğru hareket etmesini sağlar.

APF algoritması, çekici ve itici olmak üzere iki potansiyel kuvveti çevre ortamında modellemektedir. Çekici kuvvet, çekici fonksiyonun gradyanı alınarak hesaplanmaktadır. Çekici kuvvet fonksiyonu ile hedef konumun 3 boyutlu uzayda yer alan noktalara uyguladığı potansiyel çekim kuvveti hesaplanmaktadır. Çekim kuvvetlerinin büyüklükleri 3B koordinat düzleminde z değeri olarak kullanılarak x ve y koordinatlarına bağlı potansiyel çekim kuvveti yüzeyi oluşturulmaktadır. Yüzeyde ortaya çıkan minimum noktası, hedefin bulunduğu konumu gösterir. Çekici kuvvet fonksiyonu (4) denkleminde verilmiştir. Burada ζ , çekme kuvvetinin oranını temsil etmektedir. q_{hedef} , hedef noktasını; d^*_{hedef} , hedefe olan uzaklığın eşik değerini temsil etmektedir.

$$F_{çekme}(q) = \begin{cases} \zeta(q - q_{hedef}), & d(q, q_{hedef}) \leq d^*_{hedef}, \\ \frac{d^*_{hedef} \zeta(q - q_{hedef})}{d(q, q_{hedef})}, & d(q, q_{hedef}) > d^*_{hedef}. \end{cases} \quad (4)$$

İtici kuvvet, itici fonksiyonun gradyanı alınarak hesaplanmaktadır. İtici kuvvet fonksiyonu ile engellerin 3 boyutlu uzayda yer alan noktalara uyguladığı potansiyel itme kuvveti hesaplanmaktadır. Hesaplanan itme kuvvetleri kullanılarak 3 boyutlu potansiyel itme kuvveti yüzeyi oluşturulmaktadır. Yüzeyde engellerden uzak noktalar daha düşük değerlere sahipken, engellerin bulunduğu noktalar yerel maksimum noktalarıdır. İtme kuvveti fonksiyonu (5) denkleminde verilmiştir. Burada η , itme kuvvetinin oranını temsil etmektedir. Q^* , İHA ile engeller arasındaki uzaklığın eşik değerini temsil etmektedir [9].

$$F_{itme}(q) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{Q^*} - \frac{1}{D(q)} \right) \frac{1}{D^2(q)} \nabla D(q), & D(q) \leq Q^*, \\ 0, & D(q) > Q^*. \end{cases} \quad (5)$$

Hesaplanan çekici ve itici kuvvetler birleştirilerek toplam kuvvet yüzeyi elde edilmektedir. Bu kuvvet yüzeyinin mutlak minimum noktası, hedef noktasını vermektedir. İtici kuvvetlerin etkisi sayesinde çarpışmasız ve uygulanabilir bir yol planlaması mümkün olmaktadır. Elde edilen potansiyel enerji yüzeyi ve Steepest Descent metodunu kullanılarak optimize edilen yol, engellerden kaçınmak için gerekli lokal yol düzeltmelerini vermektedir [10].

4.3. İHA Dinamik Modeli

Yol planlama algoritmaları tarafından İHA'ları hedeflerine götürecek yollar üretilir. Üretilen yolların İHA tarafından takip edilmesi için kontrol ve güdüm algoritmalarının kullanılması gerekir. Kontrol ve güdüm algoritmaları, İHA'nın yolu takip edebilmesi için üretilen konum komutlarının uygulanarak İHA'nın yolu takip edecek şekilde uçuşmasını sağlar. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için İHA'nın dinamik modelinin çıkarılması ve bu modeli kullanan bir benzetim ortamı oluşturulması gerekmektedir. Bir İHA'nın dinamiğini benzetim ortamına yansıtma amacıyla farklı doğruluk derecelerine sahip modeller kullanılabilir. Yüksek doğruluk seviyesine sahip modeller İHA'nın aerodinamik karakteristiğini daha iyi ortaya koyarken daha düşük doğruluk derecesine sahip modeller modelin üretilmesi ve kullanımı açısından bazı kolaylıklar sağlamaktadır. Benzer bir farklılık güdüm modellerinde de

görülmektedir. Bu çalışmada, benzetim ortamı olarak kullanılan Simulink yazılımı bünyesinde farklı İHA dinamik modelleri ile kontrol ve güdüm modelleri yer almaktadır. Bazı modellerin, çevreye bağlı olarak aerodinamik katsayıların değişimi ve kaldırma, sürüklenme ve yunuslama momenti gibi hava aracına ait parametrelerin modellendiği yüksek doğruluk seviyesine sahip modeller olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak daha düşük doğruluk seviyesine sahip modeller de yer almaktadır. Bunlardan bazıları Newton'un yasalarıyla çalışan ve kütle noktası modelleri olarak tanımlanan modellerdir. Bu çalışmada, yol takibi ve çember uçuşu gibi gereklilikleri yerine getirmek için İHA'nın noktasal kütle modelinin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Noktasal kütle modelleri arasında da farklı kabiliyetler olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, sabit rüzgâr etkilerini içeren, İHA'nın 6 eksenli hareketini modelleyen ve basit hareket denklemlerinin kullanıldığı bir model kullanılmıştır. Kullanılan modele ait detaylar Noktasal Kütle Modeli başlığı altında verilmiştir. Benzetim ortamında modellenen İHA, hesaplanan yolların takibi için uygun bir güdüm modeli ile takip edilmelidir. Güdüm modelinin görevi, çembersel veya hesaplanan yolun takibini en verimli şekilde ve çapraz takip hatalarını en aza indirecek şekilde gerçekleştirmektir. Bu çalışmada, İHA'ların görevlerini gerçekleştirebilmesi için hesaplanan yolun ve çemberin benzetim ortamında takibi için Carrot Chase güdüm algoritması kullanılmıştır.

4.4. Noktasal Kütle Modeli

Noktasal kütle kinematik modeli, İHA'yı tek bir nokta külesi olarak ele alarak modelleyen hareket modelidir. Bu model, aerodinamik kuvvetleri ve uçak üzerindeki farklı kuvvetleri ve momentleri göz ardı ederek uçağın kütleli hareketine odaklanır. Böylece uçak hareketlerinin analizini kolaylaştırır ve bu uçaklar için kontrolör ve güdüm algoritmalarının geliştirilmesini sağlar.

Kütle noktası kinematik modeli Newton'un hareket yasalarını kullanır. Model, İHA'nın herhangi bir t zamanındaki ivme, hız ve konum gibi değerlerini kullanarak $t+1$ zamanındaki değerlerinin çıkarımlarını yapar. İHA'nın kinematik modeli, (6) denklemde verilmiştir [7]. Bu denklemde, İHA'nın North-East-Down (NED) koordinat çerçevesinde sahip olduğu uzlamsal konumu p_n , boylamsal konumu p_e ve irtifası h olarak tanımlanmıştır. İHA'nın NED koordinat çerçevesinde tanımlanan konum bilgileri, ENU koordinat çerçevesine dönüştürülerek benzetim ortamında kullanılmaktadır. Noktasal kütle modeli, konum ve irtifa'nın hava hızı V_a ve rüzgâr hızı w 'ye göre değişimini vermektedir. Bunun yanı sıra baş açısı ψ 'nin yatış açısı ϕ 'ye göre değişimi ve kontrolcü girdileri b 'ye bağlı olarak ise İHA'nın hava hızı, uçuş yolu açısı γ ve yatış açısı gibi parametrelerinin değişimleri belirlenir.

$$\begin{cases} \dot{p}_n = V_a \cos \psi \cos \gamma_a + w_n \\ \dot{p}_e = V_a \sin \psi \cos \gamma_a + w_e \\ \dot{h} = V_a \sin \gamma_a - w_d \\ \dot{\psi} = \frac{g}{V_a} \tan \phi \\ \dot{\gamma} = b_\gamma (\gamma^c - \gamma) \\ \dot{V}_a = b_{V_a} (V_a^c - V_a) \\ \dot{\phi} = b_\phi (\phi^c - \phi) \end{cases} \quad (6)$$

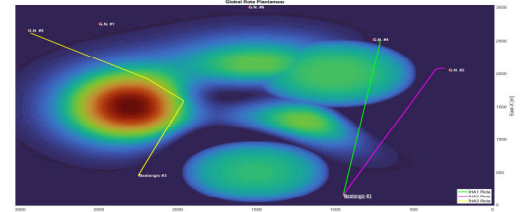
4.5. Carrot Chase Güdüm Algoritması

Carrot Chase, Sanal Takip Noktası (VTP) prensibi ile çalışan bir güdüm algoritmasıdır. Bu algoritma, bir uçağın belirli bir yolun ara noktalarını takip etmesi için gerekli yatış referansını oluşturarak uçağın istenilen yolu izlemesini sağlar. Etkinliği, uçağın yol veya çembere göre konumuna bağlı olarak güdüm referansını dinamik olarak ayarlayabilme yeteneğine dayanmaktadır. Algoritma, mevcut konuma dayalı sürekli VTP'yi güncelleyerek doğru ve güvenilir takip performansını sağlar. VTP, uçağı istenilen yol veya daire boyunca yönlendiren sanal bir hedef noktası olarak rol almaktadır. Algoritma, VTP'yi yol veya çember üzerinde kaydırarak uçağın yolu takip etmesi için referans noktalarını etkin bir şekilde oluşturur [11].

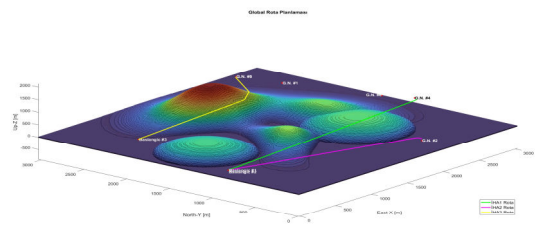
5. Benzetim Sonuçları

Çalışma kapsamında kullanılan algoritmaların doğruluğunun araştırılabilmesi adına MATLAB/Simulink ile farklı senaryolarda testler yapılmıştır. Testler, 3 adet faal İHA ve 5 adet gözetleme noktası ile yapılmıştır. Görev dağılımı algoritması kullanılarak gözetleme noktalarından 3 tanesi, maliyeti minimumda tutacak şekilde İHA'lara atanmıştır. Bulunulan ortamın arazi yapısı ve uçuşa yasaklı bölgeler gözetilerek her İHA için global yol planlama işlemi yapılmıştır. Ardından uçuş başlatılmış ve İHA'ların engellerle karşılaşması durumlarında referans yolu manipüle edilerek engelden kaçınmayı sağlayan lokal planlama algoritması çalıştırılmıştır. Referans yollar ve manipüle edilmiş yollar, benzetim çıktılarında birlikte gösterilmiştir. İHA'ların kendilerine atanan gözetleme noktalarına varmalarının ardından kontrol ve güdüm algoritmaları ile gözlem noktası etrafında çember uçuşu yapılmıştır.

Şekil 4, uçuş sırasında herhangi bir engel ile karşılaşılmayan test senaryosunun çıktılarını içermektedir. Şekil 5, uçuş sırasında statik bir engel ile karşılaşılacak test senaryosunun çıktılarını içermektedir. Şekil 6, uçuş sırasında dinamik bir engel ile karşılaşılacak test senaryosunun çıktılarını içermektedir.

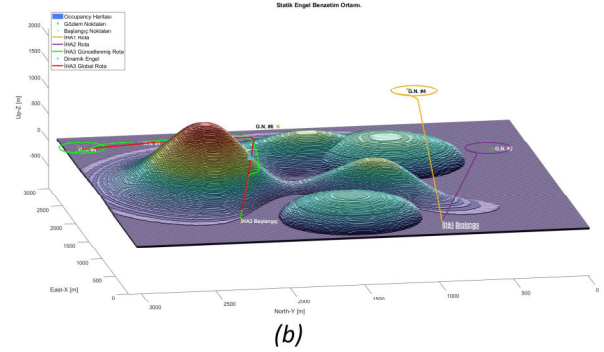
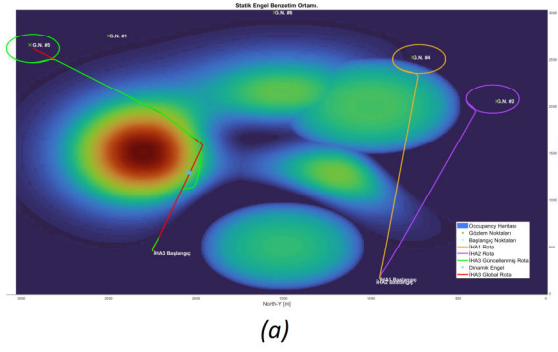


(a)



(b)

Şekil 4: İHA'ların, uçuşa yasaklı bölge ve arazi içeren çevrede görev dağılımı ve yol planlaması. (a) RRT ile planlanan global yolun ve çevrenin kuş bakışı görünümü. (b) RRT ile planlanan global yolun ve çevrenin 3B görünümü.



Şekil 5: İHA'ların uçuşa yasaklı bölge, arazi ve statik engel içeren çevrede görev dağılımı ve yol planlaması. (a) RRT ile planlanan global yolun, APF ile hesaplanan lokal yolun ve çevrenin kuş bakışı görünümü. (b) RRT ile hesaplanan global yolun, APF ile planlanan lokal yolun ve çevrenin 3B görünümü.

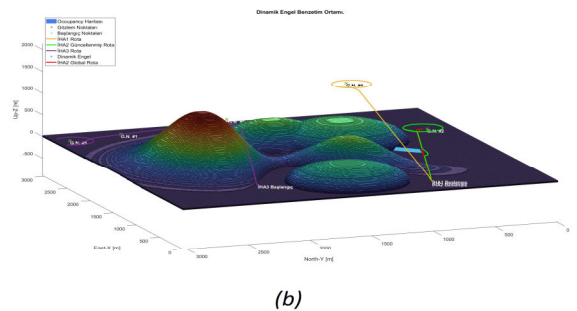
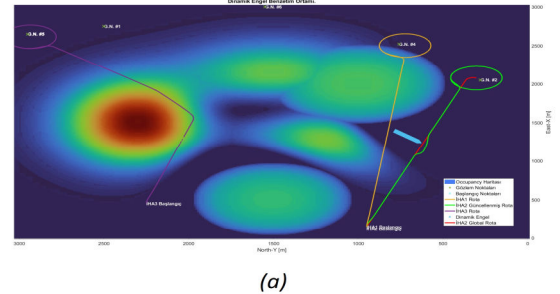
6. Sonuçlar

Bu çalışma, İHA'ların gözetleme görevlerindeki kullanımının önemini vurgulamaktadır. Sabit kanatlı İHA'lar, aerodinamik karakteristikleri sayesinde uzun uçuş süreleri, geniş operasyonel menzil ve yüksek faydalı yük taşıma kapasitesi gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikler, gözetleme görevlerinde etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çoklu İHA sistemlerinin kullanımı gözetleme görevlerinde verimliliği artırmakta ve daha geniş bir kapsama alanı sunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan görev dağılımı algoritması, İHA'lar arasında görev noktalarının paylaşımını optimize etmektedir. Global ve lokal yol planlama algoritmaları ise İHA'ların güvenli ve etkili bir şekilde görev noktalarına ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çalışılan ortamın arazi yapısı, uçuşa yasaklı bölgeler ve potansiyel engeller gibi faktörler de yol planlama algoritmaları tarafından göz önünde bulundurulmaktadır.

Kaynakça

- [1] N. Elmeseiry, N. Alshaer, and T. Ismail, "A detailed survey and future directions of Unmanned Aerial Vehicles (uavs) with potential applications," *Aerospace*, Cilt. 8, No: 12, s: 363, 2021.
- [2] N. Nigam and I. Kroo, "Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles," *2008 IEEE Aerospace Conference*, 2008.
- [3] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard, "OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping Framework based on octrees," *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp. 189–206, 2013.
- [4] Peaks function – MATLAB, <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/peaks.html> (accessed Jul. 9, 2023).
- [5] "Assignment problem, 1955; Kuhn 1957; Munkres," *SpringerReference*.
- [6] S. Giordani, M. Lujak, and F. Martinelli, "A distributed algorithm for the multi-robot task allocation problem," *Trends in Applied Intelligent Systems*, s: 721–730, 2010.
- [7] R. W. Beard and T. W. McLain, *Small Unmanned Aircraft Theory and Practice*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012.

- [8] Peng Cheng and S. M. LaValle, "Resolution complete rapidly-exploring random trees," *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [9] H. Choset and H. M. Choset, *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation*. MIT Press, 2005.
- [10] J. C. Meza, "Steepest descent," *WIRES Computational Statistics*, Cilt. 2, No: 6, s: 719–722, 2010.
- [11] P. B. Sujit, S. Saripalli and J. B. Sousa, "Unmanned Aerial Vehicle Path Following: A Survey and Analysis of Algorithms for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles," in *IEEE Control Systems Magazine*, Cilt. 34, No. 1, s: 42–59, 2014.



Şekil 6: İHA'ların; uçuşa yasaklı bölge, arazi ve dinamik engel içeren çevrede görev dağılımı ve yol planlaması. (a) RRT ile hesaplanan global yolun, APF ile planlanan lokal yolun ve çevrenin kuş bakışı görünümü. (b) RRT ile hesaplanan global yolun, APF ile planlanan lokal yolun ve çevrenin 3B görünümü.