

Çoklu İHA Uçuş Simülasyon Yer Kontrol İstasyonu



Ercan Caner, BİTES Savunma, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Firması'nda Proje Yöneticisi olarak çalışmaktadır. Türkiye Hava Sahası Yönetimi alanında doktora tez çalışmalarını sürdürmektedir. **İnsansız Hava Araçları** (2014) ve **Taarruz Helikopterleri** (2015) konulu makaleleri yayımlanmıştır. Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK), Birleşmiş Milletler (BM), Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) ve savunma sanayinde toplam 30 yıllık çalışma deneyimine sahiptir. Yazılarını ve çevirilerini <https://independent.academia.edu/ECaner> sitesinde paylaşmaktadır.

Özet

Bu çalışma, çok sayıda İnsansız Hava Aracı (İHA)'nın uçuş ve seyrüseferini kontrol edebilen, kol uçuşu uygulama karakteristiklerini uygulayabilen, engellerden sakınmayı sağlayabilen bir yer istasyonu için geliştirilen hesaplama yöntemlerini ortaya koymaktadır. Sistem, görev planlama ve çoklu uçuş kontrol modülleri olmak üzere iki modül olarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Görev planlama modülünde ilave olarak, kol uçuşu ve rota planlama modülleri olmak üzere iki modül daha bulunmaktadır. Bu modüller, Coğrafik Bilgi Sistemi (Geographic Information System - GIS) olarak kullanılabilmelerini sağlayan, doğrudan 3 boyutlu haritalar üzerinde kol uçuşu ve rota planlamaya imkân veren, NASA tarafından hazırlanan, dünya üzerindeki herhangi bir noktanın görüntüsünün alınmasını sağlayan NASA World Wind API programına dayanmaktadır. Çoklu uçuş kontrol modülü için potansiyel alan tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu modülde kol uçuş koordinatları, hava aracı için sanal ilgi çekici koordinatlar olarak rota planlaması maksadıyla seçilen noktalara yansıtılmaktadır. İHA'lar belirlenen noktalara yönlendirildiğinde planlanan uçuş rotası üzerindeki çoklu İHA'ların birbirlerine çarpmaları, oluşturulan 'itme alanı' sayesinde önlenir. Önerilen metodolojinin test edilmesi ve doğrulanması maksadıyla bir simülatör geliştirilmiştir. Bu simülatör ile, görev öncesi simüle edilmiş uçuşun görselleştirilmesi yolu ile görev planlaması yapmak ve potansiyel alan parametrelerini değerlendirmek mümkündür. Simülasyon ortamının diğer bir özelliği de Yer Kontrol İstasyonunun, X-Pi (X-Plane Interface) açık kaynak ara yüzü vasıtasıyla çoklu uçuş görevlerini gerçeğe çok yakın bir şekilde simüle edebilen X-Plane uçuş simülatörü ile entegre edilebilmesidir.

Anahtar Kelimeler: İHA, Yer Kontrol İstasyonu, Çoklu Uçuş

I. GİRİŞ

Son zamanlarda İHA'lar askeri ve sivil maksatlı olarak ve genelde insanlar için tehlikeli bir şekilde sıkça kullanılmaktadır. İHA kullanım senaryolarının birçoğunda, birbirleri ile işbirliği içerisinde hareket eden çoklu hava araçlarının kullanılması, görevin daha iyi bir şekilde icrası için gereklidir. Bunu bir örnekle açıklamak gerekirse, 2010 yılında Rio de Janeiro'nun dağlık kesimlerinde meydana gelen toprak kaymasını

izleme operasyonunu kullanabiliriz. Görev, UAV-IME¹ Projesi ile yürütülmüştür. Bu doğal felakette binlerce insan toprak kayması nedeniyle toprak altında kalmıştır. Felaketin hemen sonrasında İHA'lar tarafından çekilen hava fotoğraflarının Şekil 1'de görülen Google Haritaları ile karşılaştırılması, toprak altında kalan kurbanların yerlerinin belirlenmesini ve kurtarma ekiplerinin süratle bu bölgelere yönlendirilerek arama kurtarma faaliyetlerinin hızlandırılmasını sağlamıştır. Bu senaryoda zaman, kurbanların kurtarılması açısından çok kritik bir faktördür. Birbirleri ile işbirliği içerisinde hareket eden çoklu hava araçlarının kullanılması zamanı kısaltacak ve hayatta kalanların kurtarılma ve yaşama şanslarını artıracaktır.

UAV-IME Projesi kapsamında yürütülen araştırmalar esnasında otonom insansız hava araçlarının MaSE (Multi-Agent Systems Engineering – Çok Ajanlı Sistem Mühendisliği) teknikleri kullanılarak yönetildiği bir modellemenin² yapılması ve filo unsurlarının/ajanlarının modeller olarak haritalanması önerilmiştir. Bu çalışmada, uçuş planlama ve akıllı algoritmaların test edilmesi amacıyla, yazarlar tarafından bir otonom insansız hava araçları simülatörü³ geliştirilmiş ve otonom hava araçları için görüntü tabanlı seyrüsefer sistemi kullanılması önerilmiştir⁴.



Şekil 1: Dağlık Arazi Operasyonu – UAV-IME; toprak kayması öncesinde Google Haritası Aynı bölgenin felaket sonrası görüntüleri

¹ J. M. M. Neto, L. R. L. Rodrigues, E. M. Moreira, J. C. J. dos Santos, and P. F. F. Rosa, "Uma missão de monitoramento para o projeto vantime: Operac, ~ao regi~ao serrana-rj," *AutoSoft*, 2011, .

² C. A. P. Pinheiro, "Ve'iculos a'ereos aut'onomos n~ao-tripulados para monitoramento de ambientes desestruturados e comunicac, ~ao de dados," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, julho 2006.

³ R. B. Maroquio, "Simublimp - uma contribuic, ~ao ao desenvolvimento de algoritmos inteligentes para uma equipe de dirig'iveis rob'oticos aut'onomos," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, julho 2007.

⁴ F. S. Vidal, "Sistema de navegacao para dirig'iveis a'ereos n~ao-tripulados baseado em imagens," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, 2007.

Yapılan çalışmalarda^{5,6,7}, çoklu uçuş problemine potansiyel alan yöntemi ile yaklaşmış ve önerilen sistemin test edilmesi ve doğrulanması için simülasyon ortamı kullanılmıştır. Vidal tarafından, 7 adet makineden oluşan ve çoklu hava araçları için yüksek performanslı bir simülasyon ortamı sağlayan X-Plane uçuş simülatörünü⁸ ve Matlab/Simulink ortamını birbirine bağlayan, küme şeklinde bir yapılanma kullanılması önerilmiştir. Garcia ve Barnes tarafından kaleme alınan '**Multi-UAV Simulator Utilizing X-Plane**' isimli çalışmada, uçuş ve kol uçuş kontrolünde, '**Unmanned Ground Vehicle Swarm Formation Control Using Potential Fields**' konulu çalışmada ele alınan sürü araçlarının kontrolü ve potansiyel fonksiyonları esas alınmıştır. Paul, Krogstad ve Gradvahl tarafından kaleme alınan '**Modelling of UAV Formation Flight Using 3D Potential Field**' konulu çalışmada 'Lider' olarak adlandırılan sanal bir lidere bağlı, 'Takipçiler' olarak adlandırılan birçok İHA'nın tanımlanan bir bölgeye götürülmesi ve rota boyunca uçuşlarının takip edilmesi incelenmiştir.

Bu yazıda, kol uçuşunda çoklu insansız hava araçlarını kontrol edebilen ve bir Yer Kontrol İstasyonu için geliştirilen yazılım çözümü sunulmaktadır. Meyer tarafından kaleme alınan **X-Plane Operation Manual**'den uyarlanan potansiyel alan esaslı yöntem, çoklu uçuş yaklaşımı için geliştirilmiştir⁹. Çoklu uçuş fonksiyonellikleri için önerilen metotların test edilmesi ve doğrulanması maksadıyla; görev planlama ve çoklu uçuş kontrol modülü olmak üzere iki modülden oluşan bir simülasyon ortamı geliştirilmiştir. Görev planlama modülü, 3B coğrafik bilgilerin manipülasyonunu ve görüntülenmesini sağlayan NASA World Wind API¹⁰ programına dayanmaktadır. Görev planlaması sonrasında simülatör, simüle edilmiş uçuş yollarını görüntüleyerek uçuş şartlarının analiz edilmesini sağlar. Simülatörün bu özelliği, potansiyel alan parametrelerinin gözden geçirilmesini ve görev öncesi uçuş planlamasının tekrar

⁵ R. Garcia and L. Barnes, "Multi-UAV simulator utilizing x-plane," J.Intell. Robotics Syst., vol. 57, no. 1-4, pp. 393–406, Jan. 2010.

⁶ L. Barnes, M. Fields, and K. Valavanis, "Unmanned ground vehicle swarm formation control using potential fields," in 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, July 27 - 29 2007.

⁷ T. Paul, T. R. Krogstad, and J. T. Gradvahl, "Modelling of UAV formation flight using 3d potential field," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, no. 9, pp. 1453 – 1462, 2008.

⁸ A. Meyer, X-Plane Operation Manual : [www.xplane.com/files/manuals/X-Plane Desktop manual.pdf](http://www.xplane.com/files/manuals/X-Plane%20Desktop%20manual.pdf), Laminar Research, 5001 Radcliffe - Rd Columbia SC 29206, 2011, last updated on June 19, 2011.

⁹ M. A. Goodrich, "Potential fields tutorial," Class Notes, 2002.

¹⁰ P. Hogan, "Nasa world wind: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>," National Aeronautics and Space Administration, 2011.

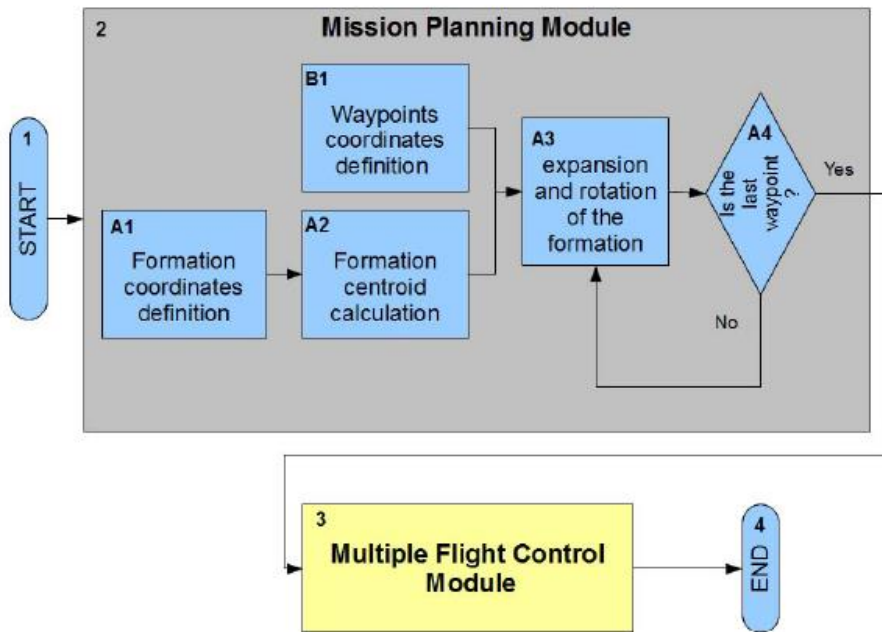
değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Yer Kontrol İstasyonunun diğer bir özelliği de X-Plane uçuş simülatörü ile entegre olabilmesidir. X-Pi olarak adlandırılan açık kaynak ara yüz vasıtasıyla sağlanan iletişim, gerçeğe çok benzeyen bir ortamda çoklu uçuş uygulamasına imkân sağlamaktadır.

Bu çalışma giriş bölümüne ilave olarak 3 kısımdan oluşmaktadır. İkinci kısımda Yer Kontrol İstasyonu modülleri detaylı olarak incelenmekte, üçüncü kısımda ise yapılan testler ve sonuçları sunulmaktadır. Son olarak dördüncü kısımda, çalışma ve bulgulara bağlı olarak gelecek için öneriler sunulmaktadır.

II. YER KONTROL İSTASYON MODÜLLERİ

Yer Kontrol İstasyonu iki modülden oluşmaktadır: görev planlama ve çoklu uçuş kontrol modülleri. Görev planlama modülü NASA World Wind programına dayanmakta olup, kol uçuşu planlaması ve rota planlaması olarak iki alt modüle bölünmüştür.

World Wind, Java uygulamaları için bir komponentler dizisi sağlayarak coğrafi bilgilerin ele alınmasını ve işlenmesini sağlayan bir API (Application Programming Interface) ara yüzüdür. Bu arayüz ile 3B haritalar kullanılarak rota planlaması ve kol uçuş planlaması için grafiksel bir aracın geliştirilmesi mümkün olmuştur. Şekil 2’de sunulan akış diyagramı, görev planlama modülünün genel bir görünümüdür.



Şekil 2: Görev Planlama Modülü Akış Diyagramı

Şekil 2’de gösterilen 1. aşamada, kol uçuşu planlama modülü kullanılarak kol uçuşu koordinatları grafiksel olarak elde edilmektedir. Şekil 3, çalışmamızda delta kolu olarak adlandırılan üçgen şeklinde tertiplenmiş bir kolu göstermekte olup, haritada gösterilen sembollerin her biri simülasyon ortamında bir hava aracına karşılık gelmektedir. Görüntünün solunda yer alan panelde kol uçuşu ve rota planlama modülleri arasında, Şekil 2’de gösterilen 2’nci ve 3’ncü aşamalara karşılık gelen geçiş yapılabilmektedir. B1 aşamasında seyrüsefer (S/S) maksadıyla kullanılacak noktaların koordinatları, rota planlama aracında belirlenir. A1 aşamasında olduğu gibi uçuş planı S/S noktalarının koordinatları da, Şekil 8’de gösterildiği gibi, işaretleyicilerin harita üzerinde noktalanması suretiyle grafiksel olarak elde edilmektedir. Kolun merkez noktası, Şekil 2’de gösterildiği gibi A2 aşamasında tanımlanmaktadır. Kol merkezi, her bir hava aracının A1 aşamasında belirlenen enlem ve boylam koordinatları kullanılarak belirlenmektedir. Kolun merkezi aşağıdaki formül ile belirlenir:

$$(x_c, y_c) = \sum_{i=1}^{n_v} (lat_i, lon_i) / n_v$$

Formülde x_c ve y_c , kol merkezinin koordinatlarıdır. n_v , toplam İHA sayısı; lat_i ve lon_i , her bir İHA’nın, görev planlama akış diyagramında gösterilen ve A1 aşamasında elde edilen enlem ve boylam koordinatlarıdır. A1 aşamasında kol oluşturulduğunda, kolun merkez noktası hesaplanır (Aşama 2), S/S noktaları B1 aşamasında tanımlanır, görev planlama modülü rota üzerindeki her bir S/S noktasının koordinatlarını büyütür ve döndürür (Akış Diyagramı A3 ve A4 aşamaları). Bu işlem aşağıdaki formül ile yapılır:

$$W_{ix} = W_{actual_x} + (dx_c \cos(\theta) + dy_c \sin(\theta))$$

$$W_{iy} = W_{actual_y} + (-dx_c \sin(\theta) + dy_c \cos(\theta))$$

Formülde, Akış Diyagramı A1 aşamasında elde edilen dx_c kolun merkez noktasından olan enlemsel mesafeyi, dy_c ise yine kolun merkez noktasından olan boylamsal mesafeyi göstermektedir. θ , kullanılmakta olan/geçerli S/S noktası (**Wactual**) ile bir sonraki S/S noktası (**Wprox**) arasındaki açıdır. (**W_{ix}**, **W_{iy}**), koldaki her bir İHA için tanımlanan ve bir sonraki S/S noktasına bağlı olarak büyütülen ve döndürülen S/S noktalarının koordinatlarına karşılık gelmektedir.



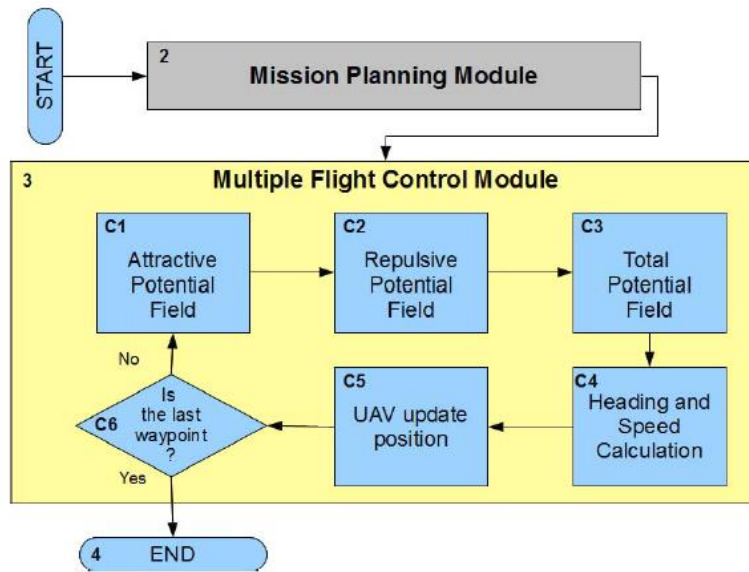
Şekil 3: Kol Uçuşu Planlama Modülü (Akış Diyagramı 1 ve 2'nci Adımlar)

Potansiyel Çekim Alanı Hesabı

Akış diyagramında gösterilen potansiyel ilgi alanını hesaplamak maksadıyla (Aşama C1), $[x_G, y_G]$ 'nin hedefin koordinatlarını gösterdiğini varsayalım, r de hedefin yarıçapıdır. $[x_V, y_V]$ koordinatları İHA'nın konumunu göstermektedir; s etki alanı, α ise çekim kuvvetidir. Bu parametrelerle İHA ile S/S noktası arasındaki d mesafesi ve θ baş istikameti hesaplanır:

$$d = \sqrt{(x_G - x_V)^2 + (y_G - y_V)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_G - y_V}{x_G - x_V} \right)$$



Şekil 4: Çoklu Uçuş Kontrol Modülü Akış Diyagramı

Sonrasında, ∇x_G ve ∇y_G hesaplamalarında aşağıdaki kurallar uygulanır:

- 1) If $d < r$ then $\nabla x_G = \nabla y_G = 0$
- 2) If $d > r + s$ then $\nabla x_G = \alpha s \cos(\theta)$ and $\nabla y_G = \alpha s \sin(\theta)$
- 3) If $r \leq d \leq r + s$ then $\nabla x_G = \beta r \cos(\theta)$ and $\nabla y_G = \beta r \sin(\theta)$

Potansiyel İtme Alanı Hesabı

C2 aşamasında, $[x_o, y_o]$ 'nun engeli koordinatlarını, $[x_v, y_v]$ 'nin ise İHA konumunu gösterdiği, itme alanı hesaplaması yapılmaktadır. R engel yarıçapı, S itme etki alanı, β ise itme kuvvetidir. C1 aşamasında olduğu gibi d ve θ , engel koordinatları kullanılarak hesaplanır. ∇x_o ve ∇y_o 'nun hesaplanmasında aşağıdaki kurallar uygulanır:

- 1) If $d < r$ then $\nabla x_o = -\beta s \cos(\theta)$ ve $\nabla y_o = -\beta s \sin(\theta)$
- 2) If $r \leq d \leq r + s$ then $\nabla x_o = -\beta(R + S - d) \cos(\theta)$ and $\nabla y_o = -\beta(R + S - d) \sin(\theta)$
- 3) If $d > r + s$ then $\nabla x_o = \nabla y_o = 0$

∇x_G ve ∇y_G C1 aşamasında potansiyel çekim alanı, ∇x_o ve ∇y_o ise C2 aşamasındaki itme alanından oluşturulur. Toplam potansiyel alanı hesaplamak üzere C3 aşamasında birleştirilirler:

$$\nabla x_{total} = \nabla x_o + \nabla x_G$$

$$\nabla y_{total} = \nabla y_o + \nabla y_G$$

Akış Diyagramı C4 aşamasında v hızı ve θ baş istikameti aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$v^2 = \nabla x^2 + \nabla y^2$$

$$\theta = \tan^{-1}(\nabla y / \nabla x)$$

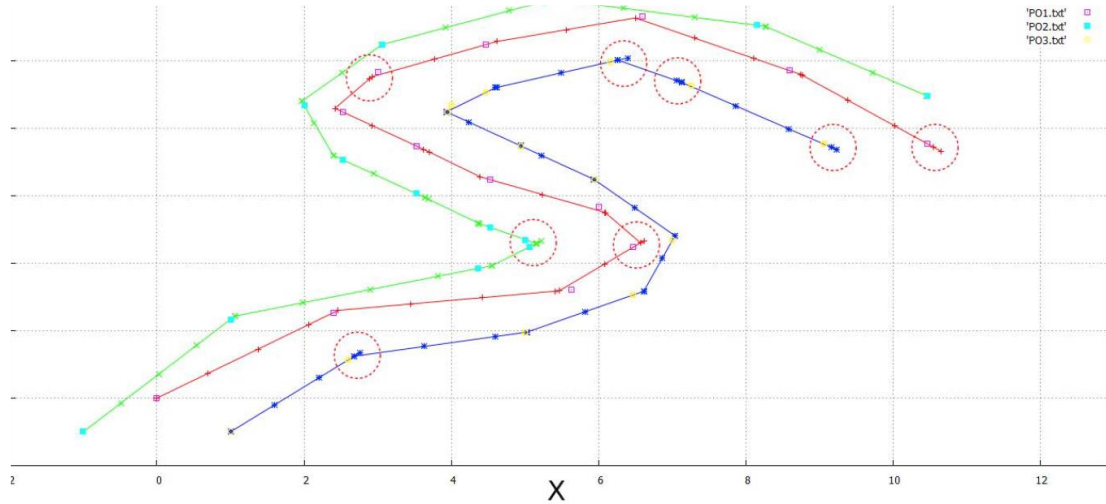
C5 aşamasında her bir hava aracının eylem ve boyla bilgisi güncellenir ve sonrasında her hava aracının bulunduğu konumdan bir sonraki gitmesi gereken, kendisine ait S/S noktasına olan mesafe ve baş istikameti hesaplanır. C6 aşamasında, geçerli olan S/S **Wactual** noktasının son S/S noktası olup olmadığına bakılır. Son S/S noktası değil ise C1-C5 aşamaları son S/S noktasına kadar yeniden hesaplanarak görev tamamlanır.

III. TESTLER VE SONUÇLARI

Bu kısımda Yer Kontrol İstasyonunun kullanılması, çoklu hava aracı kol uçuşu simüle edilerek anlatılacak ve çoklu uçuş kontrol modülünde uygulanan potansiyel alan algoritmalarının doğrulanması gösterilecektir. S/S noktasının koordinatları ve hava aracının konumu başlangıç olarak, Kartezyen koordinat düzleminde merkez noktası $(x, y) = (0,0)$ olarak gösterilecektir.

A. Test I

Şekil 5’de, delta kol uçuşundaki hava araçlarının simüle edilen rotaları gösterilmiştir. Hava araçlarının başlangıç koordinatları, delta (üçgen) konumunu oluşturmak için, 1. İHA için $(0,0)$, 2. İHA için $(-1,-1)$ ve 3. İHA için $(1,-1)$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 5: Delta Kol Uçuşu Simülasyonu: kırmızı, yeşil ve mavi renkli rotalar ile gösterilen 1-2-3 numaralı İHA'lar; pembe, yeşil ve sarı renkteki karelerle gösterilen PO1, PO2 ve PO3 numaralı S/S noktalarına yönlendirilmişlerdir. Rota üzerindeki daireler, İHA'ların istenmeyen davranışlarını göstermektedir.

Sabit kanatlı bir hava aracının uçuş karakteristik ve dinamikleri göz önüne alındığında, Test I bazı imkânsız hava aracı manevralarının olduğunu göstermiştir. Tespit edilen ilk problem, İHA düz uçuşta bir sonraki S/S noktasına ileri doğru giderken noktayı geçmesi ve sonrasında o noktayı tanımlamak için geri uçuşunda yaşanmıştır. Diğer problem İHA'lardan birinin S/S noktasına ulaştığında diğer İHA'ların kendileri için planlanmış olan noktalara gelmesini beklemek için durması ve sadece diğerleri geldiğinde ileri hareketine devam etmesinde yaşanmıştır. İHA'ların bu davranışları,

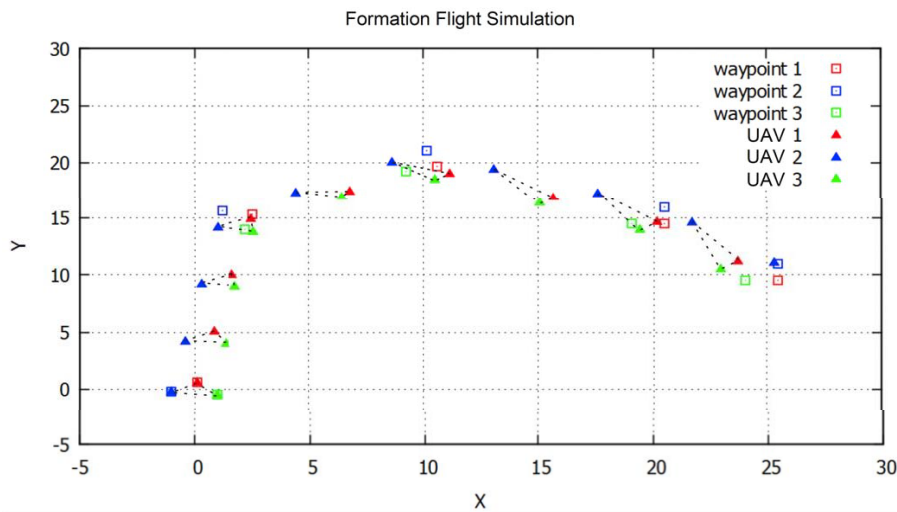
Şekil 5'te rotalar üzerindeki daireler ile gösterilmiştir. Bu problemlerin çözümü her İHA'nın kendi S/S noktasına ulaşabilmesi için gerekli orantısal hız metodunu kullanması ile sağlanmıştır. Bu yöntemde her İHA kendi S/S noktasını tespit ettiğinde diğer İHA'ları beklemeden diğer S/S noktasına doğru hareketine devam etmektedir. Her bir çekim alanının s parametresi simülasyon esnasında, her bir İHA'yı kontrol eden maksimum, medium ve minimum s_{max} , s_{med} ve s_{min} değerleri alınarak dinamik olarak değiştirilmek zorundadır. Hız kontrol metodu hava araçlarının birbirlerine olan göreceli mesafeleri ve her bir hava aracının son S/S noktasına olan mesafesine bağlıdır ve aşağıda belirtilen aşamaları kapsar:

1. Her bir hava aracının S/S noktasına olan mesafesinin hesaplanması,
2. Kol içinde hava araçlarının birbirlerine olan mesafelerinin doğrulanması.

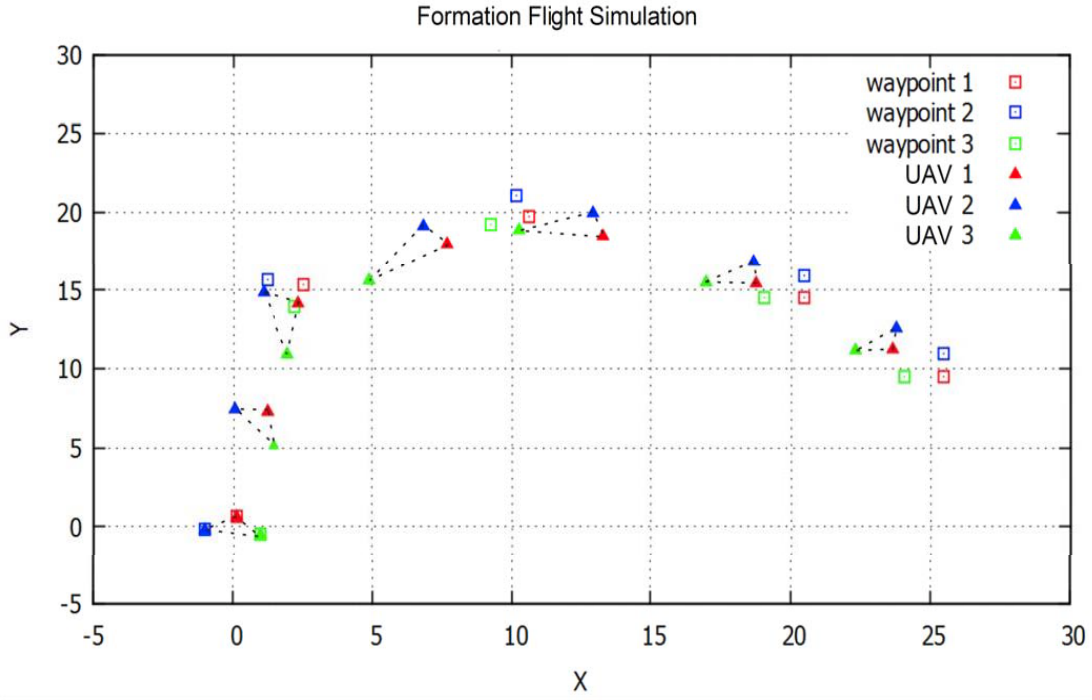
Mesafe limitten düşük ise s , s_{max} olarak S/S noktasından en uzakta olan İHA'ya hızını artırmak üzere bağlanması, S/S noktasına yakın olan İHA'ya hızını düşürmek maksadıyla s_{min} olarak bağlanması işlemidir. İHA'lar başlangıçta oluşturulan mesafe limitleri içerisinde ise hepsine s_{med} hızları bağlanarak seyahat süratlerini muhafaza etmeleri sağlanır.

B. Test II

Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulan simülasyonlarda orantılı hız metodu kullanımının delta kol uçuşunun rota boyunca muhafaza edilmesindeki başarımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 6: Orantılı Hız Olmaksızın Delta Kol Uçuşu



Şekil 7: Orantılı Hız ile Delta Kol Uçuşu

Şekil 6'da sunulan grafikte uçuş simülasyonu orantılı hız metodu olmadan gösterilmektedir ve uçuş rotası boyunca özellikle ileri aşamalarda kol uçuşunun bozulduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 7'de gösterilen orantılı hız metodunda ise kol uçuşunun keskin dönüşlerde bozulduğu, fakat dönüşün hemen sonrasında tekrar uygun hale geldiği görülebilir.

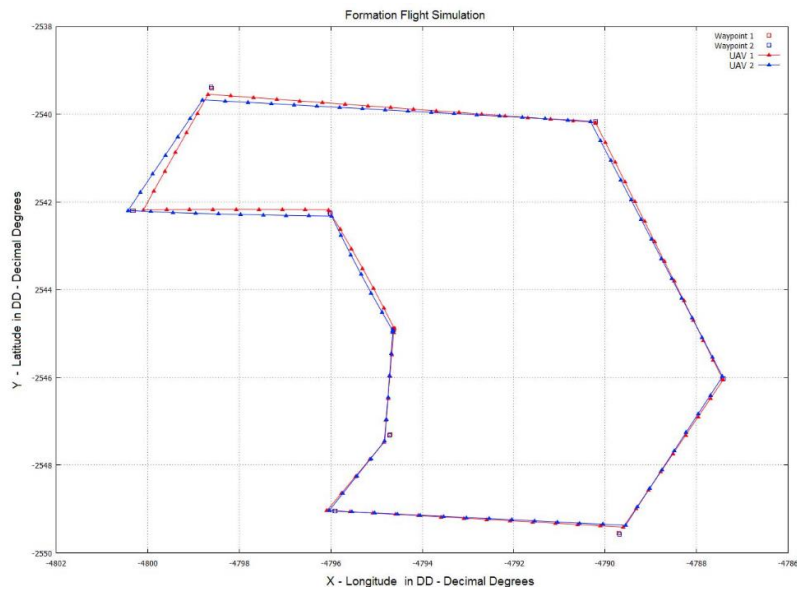
C. Test III

Şekil 8, 9 ve 10'da Yer Kontrol İstasyonunda 2 adet hava aracı için belirlenen bir rota için yapılan görev planlamasından seyrüsefer kontrolüne kadarki uygulamalar gösterilmektedir. Bu simülasyon uçuşunda kullanılan hava aracı modeli Cessna Skyhawk'tır ve X-Plane simülatöründe modellenmiştir.

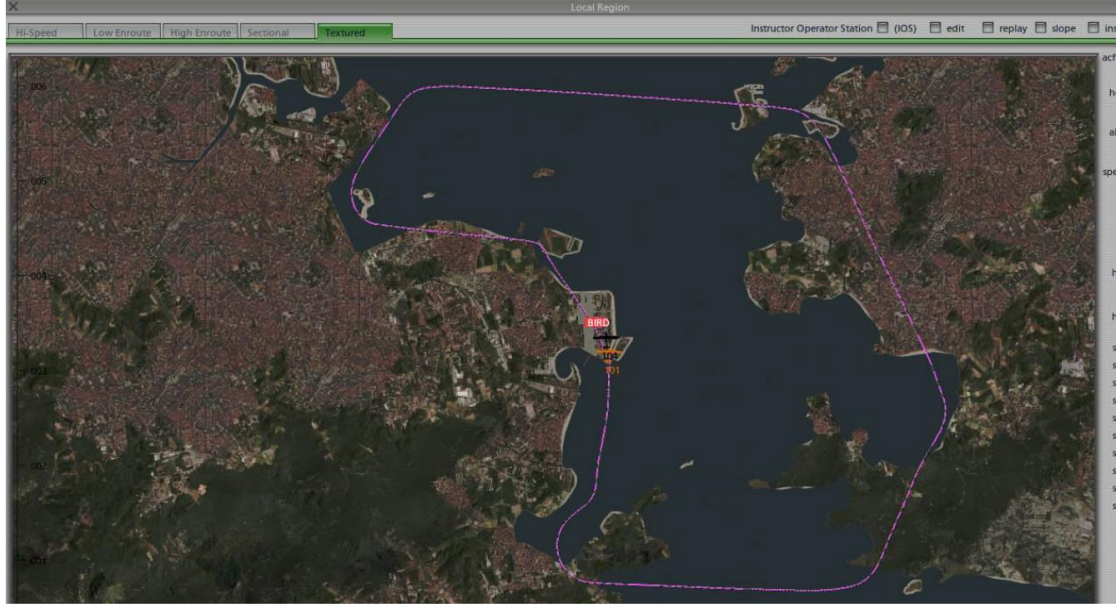


Şekil 8: Görev Planlama Modülü: uçuş rotasının tanımlanması

Bütün çalışmalarda, 2D yaklaşma metotlarını kolaylaştırmak amacıyla sabit 2000 feet irtifa kullanılmıştır. Şekil 8’de rota planlama aracı gösterilmekte, Şekil 9’da ise X-Plane simülatörde planlanan uçuş yörüngesi gösterilmektedir. Şekil 10’da X-Plane simülasyon ortamında harita üzerinde simüle edilen uçuş rotası gösterilmektedir. Şekil 8 ve 9’da gösterilen ve Şekil 10’de harita üzerine aktarılan uçuş rotalarının aynı olduğu görülebilir.



Şekil 9: Simülasyon öncesinde üretilen grafik: İHA 1 Kırmızı, İHA 2 Mavi



Şekil 10: X-Plane uçuş simülatöründe uçuşun harita üzerinde gösterilmesi: İHA 1 Turuncu, İHA 2 Siyah. İHA'lar sırasıyla 102 ve 104 numaraları ile gösterilmektedir

IV. SONUÇ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, çoklu insansız hava araçlarını kontrol edebilme kabiliyeti olan bir yer kontrol istasyonu için geliştirilen yazılım sunulmuştur. X-Plane simülatöründe, çoklu uçuş kontrolü için önerilen çözümlerin testlerinin yapıldığı ve doğrulandığı bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. X-Plane simülatörünün entegrasyonu yoluyla yer kontrol istasyonunun çoklu insansız hava araçlarının kontrolündeki tam etkinliği gerçeğe benzer ortamlarda gösterilmiştir.

Bu çalışmada sunulan yer kontrol istasyonu yazılım çözümünün uygulanabilir ve tam fonksiyonel olduğu ispatlanmıştır. Ancak, bu çalışmanın bir başlangıç aşaması olduğu ve daha birçok geliştirmelerin yapılabileceği de açıktır. Örnek olarak, hava araçlarının farklı görevleri yerine getirebileceği akıllı bir seyrüsefer kontrol fonksiyonu ilave edilebilir. Diğer bir gelişme ise, yer kontrol istasyonunun merkezi bir kontrol ünitesi olmaktan ve yerde tek bir kontrol istasyonu olarak kullanılması yerine, hava araçları üzerine yerleştirilerek kullanılmasıdır. Buna paralel olarak bu çalışmanın devamı olabilecek mantıklı bir yaklaşım da gerçek hava araçlarının bir otopilotla yer kontrol istasyonu üzerinden kontrolü olabilir. Yer kontrol istasyonunun bu maksatla geliştirilmesi oldukça maliyet-etkin bir çözüm olabilir.

YAZARLAR:

Alberto Torres Angonese
Defense Engineering Graduate Program
Instituto Militar de Engenharia
Rio de Janeiro
Email: angonesealberto@gmail.com

Paula Fernando Ferreira
Defense Engineering Graduate Program
Instituto Militar de Engenharia
Rio de Janeiro
Email: rpaulo@ime.eb.br

Referanslar

- [1] J. M. M. Neto, L. R. L. Rodrigues, E. M. Moreira, J. C. J. dos Santos, and P. F. F. Rosa, "Uma missão de monitoramento para o projeto vantime: Operação, região serrana-rj," AutoSoft, 2011, .
- [2] C. A. P. Pinheiro, "Veículos aéreos autônomos não-tripulados para monitoramento de ambientes desestruturados e comunicação de dados," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, julho 2006.
- [3] R. B. Maroquio, "Simublimp - uma contribuição ao desenvolvimento de algoritmos inteligentes para uma equipe de dirigíveis robóticos autônomos," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, julho 2007.
- [4] F. S. Vidal, "Sistema de navegação para dirigíveis aéreos não-tripulados baseado em imagens," Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, 2007.
- [5] R. Garcia and L. Barnes, "Multi-UAV simulator utilizing x-plane," J. Intell. Robotics Syst., vol. 57, no. 1-4, pp. 393–406, Jan. 2010.
- [6] L. Barnes, M. Fields, and K. Valavanis, "Unmanned ground vehicle swarm formation control using potential fields," in 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, July 27 - 29 2007.
- [7] T. Paul, T. R. Krogstad, and J. T. Gravdahl, "Modelling of UAV formation flight using 3d potential field," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, no. 9, pp. 1453 – 1462, 2008.
- [8] A. Meyer, X-Plane Operation Manual : [www.xplane.com/files/manuals/X-Plane Desktop manual.pdf](http://www.xplane.com/files/manuals/X-Plane%20Desktop%20manual.pdf), Laminar Research, 5001 Radcliffe - Rd Columbia SC 29206, 2011, last updated on June 19, 2011.
- [9] M. A. Goodrich, "Potential fields tutorial," Class Notes, 2002.
- [10] P. Hogan, "Nasa world wind: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>," National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [11] L. F. A. Cantoni, "Avaliação do uso da linguagem pddl no planejamento de missões para robôs aéreos," Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

SUNUM

SWARM Nedir



Ortak bir amaç doğrultusunda;

- Eş zamanlı ve birbirleri ile koordineli olarak çalışan,
- Bilgiler edinip paylaşan,
- Tek bir sistem gibi hareket eden otonom ya da yarı otonom sistemlerdir.

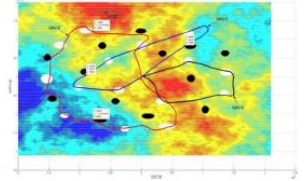


SWARM Sivil Alanda Kullanım

- Acil yardım ulaştırma,
- Emniyet ve güvenlik,
- Fotoğraf çekimi,
- Yön ve mevki belirleme,
- Orman yangınlarının tespiti,
- Şehir yangınlarında durum tespiti,
- Riskli durumlarda yangınlara müdahale,
- 3 Boyutlu arazi ve bölge taraması,
- Harita yapımı,
- Bitki örtüsünün izlenmesi,
- Doğal vahşi hayatın izlenmesi,
- Doğal afet sonrası durum ve hasar tespiti.



Fotoğraf Çekimi



Harita Yapımı



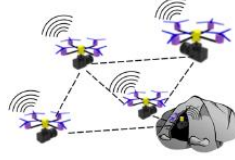
Emniyet



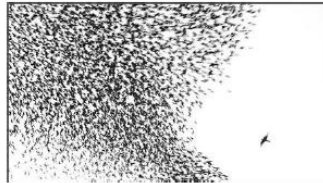
Bitki Örtüsünün İzlenmesi

SWARM Askeri Alanda Kullanım

- Açık ve gizli keşif ve gözetleme,
- Atış kontrol ve yönlendirme,
- İletişim köprüsü oluşturma,
- Arazi değişikliklerini belirleme,
- Sahte karıştırma ve elektronik taarruzlar,
- Düşman hava savunma sisteminin baskı altına alınması ve imhası,
- Taktik aldatma, sahte hedef ve savunma,
- Karşı mayın hareketi,
- Düşman gemilerini önleme,
- Muharebe hasar değerlendirmesi,
- Sabotaj,
- Kirletilmiş bölgelerde hareket.



Potansiyel avantajlar



- Muharebe gücü dağıtılabılır, düşmanın hedef sayısı artar ve düşmanı daha fazla cephane harcamaya zorlar.
- Sürü sistemlerinin esnekliği, platformun hayatta kalabilirlik özelliğinin yerini alır. Eğer bir taarruza karşı esneklik sağlayabilecek kadar çok sayıda ise, platformun kendisinin hayatta kalabilir özelliklerinin olmasına gerek yoktur.



22 June 2016

Potansiyel avantajlar

- Kitle halinde kullanıldığından, sistemler ayrı ayrı feda edilebilirler ve bütün yeteneklerin bir araç üzerinde toplandığı gelişmiş bir sisteme nazaran tek başlarına muharebe dışı kalmalarının önemi yoktur.
- Salvo halinde taarruzlar düşman savunma sistemini çökertebilir. Birçok savunma sisteminin aynı anda karşı koyabileceği saldırı miktarı belli ve sınırlıdır.



22 June 2016

Otonominin avantajları

Otonomluk, bir makinenin bir görevi insan girdisi olmadan yerine getirebilmesi özelliğidir. Otonom kabiliyeti aşağıda belirtilen avantajları sağlamaktadır:

- Artırılmış emniyet ve güvenilirlik,
- Gelişmiş reaksiyon süresi ve performans,
- Operasyonel avantajlar sağlayan, daha az maliyetli ve azalan insan iş yükü,
- İletişim imkânlarının zayıf olduğu ve kirlenmiş alanlar gibi girilemeyen bölgelerde harekâta devam edebilme imkân ve kabiliyeti.



EA-6B Prowler Modeli İHA

İHA - Çoklu kullanım

Kullanım alanlarının çokluk ve çeşitliliği nedeniyle İHA'lar askeri ve sivil maksatlı olarak ve genelde insanlar için tehlikeli bir şekilde sık olarak kullanılmaktadırlar. İHA kullanım senaryolarının birçoğunda, birbirleri ile işbirliği içerisinde hareket eden çoklu hava araçlarının kullanılması görevin daha iyi bir şekilde icrası için gereklidir.

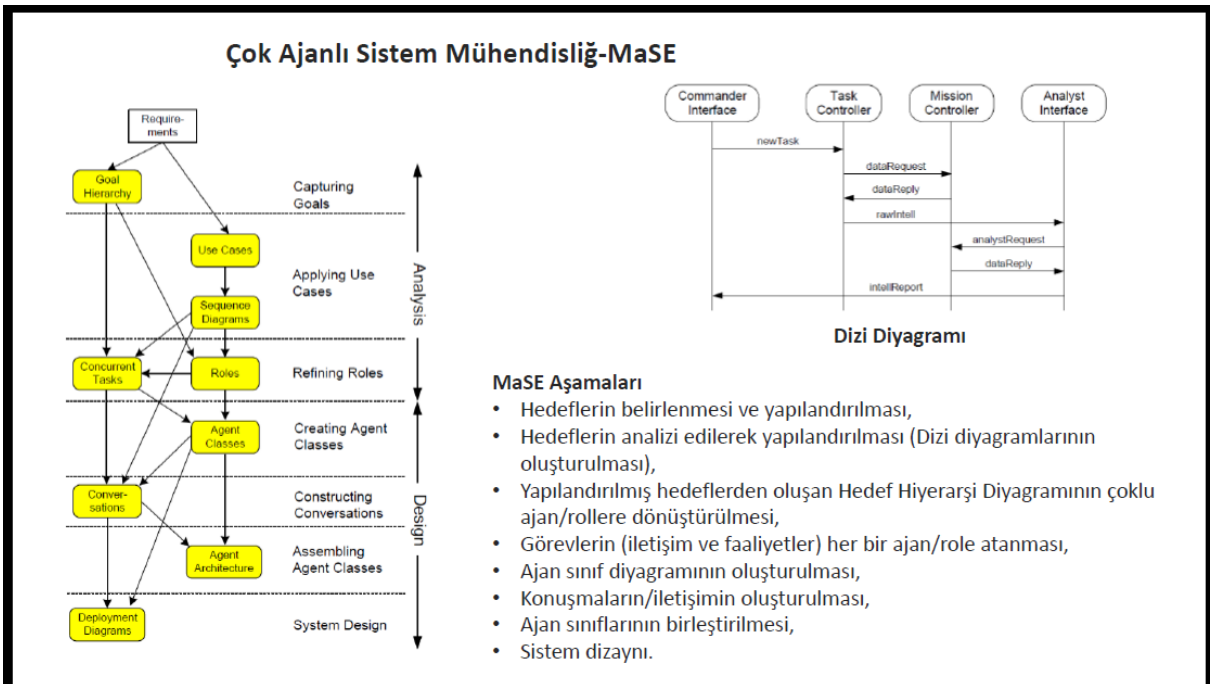
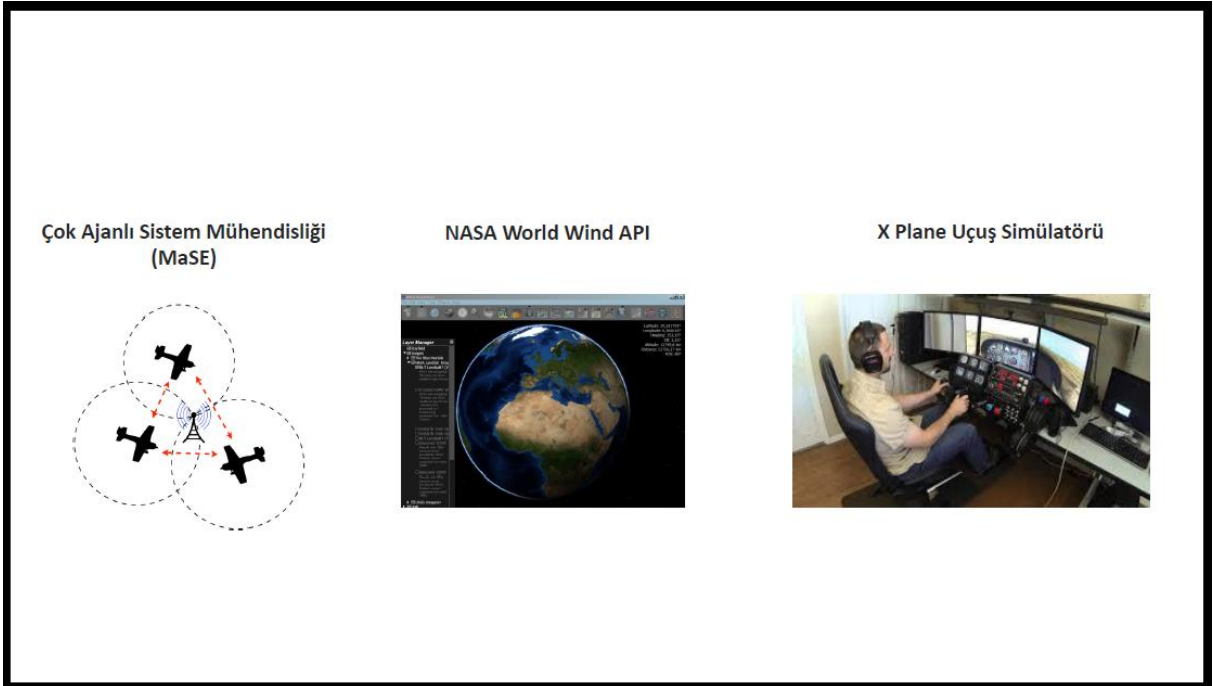


ABD Savunma Bakanlığı Hedefleri



ABD Savunma Bakanlığı'nın güncel yaklaşımı, insansız araçların uzak bir merkezden bir pilot vasıtasıyla kontrolüdür. Gelecekteki vizyonları ise '**Daha az ile daha çoğu yapabilmektir**', bunun anlamı otonominin yaygınlaştırılmasıdır, öncelikler:

- Güvenilir ve yüksek oranda otonom olarak karar verebilen sistemlerin geliştirilmesi ve insanların tamamen veya kısmen kontrol ve karar verme mekanizmalarından uzaklaştırılarak sahip olunan üstün ve ezici muharebe gücünün muhafaza edilmesi,
- Yüksek oranda otonomluk içeren teknolojilerin takip edilmesi ve insan iş yükünün azaltılması maksadıyla yüksek süratli iletişim linklerinin kullanılması ve buna bağlı olarak karar verme süresinin kısaltılması,
- İnsansız sistemlerden oluşan timlerin birbirleri ile faaliyetlerini koordine edebilmesini ve insan müdahalesi olmadan ortak hedefleri başarmasını sağlayan ve işbirliği içerisinde hareket eden otonom sistemlerin geliştirilmesi,
- Değişken yeni görev atamalarını da içeren ve otonom görev optimizasyonunu sağlayan algoritmaların geliştirilmesi,
- Heterojen insansız sistemlerin, network esaslı merkezi olmayan kontrolüne imkan sağlayan, merkezi olmayan bir kontrol sisteminin geliştirilmesi.

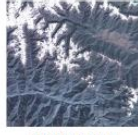


NASA World Wind API

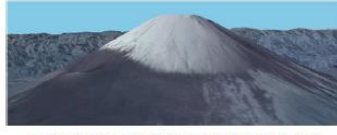
- 3D Engine - Herhangi bir kullanıcıya, uydu irtifasından, dünya üzerinde herhangi bir yeri yüksek çözünürlüklü Landsat görüntüleri ve SRTM – Shuttle Radar Topography Mission yükseklik verilerini birleştirerek sunan ve dünyanın 3D görüntülenmesini sağlayan bir programdır.
- **Blue Marble, Land Sat 7, SRTM, NASA SVS (Scientific Visualization Studio), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), GLOBE, Country & State Borders, Place Names, Visual Tools ve Land Mark** özellikleri sayesinde dünyanın herhangi bir yeri ayrıntılı olarak görüntülenebilir.



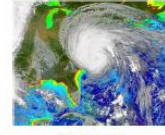
BLUE MARBLE



LAND SAT 7



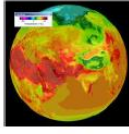
SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION



NASA SVS



MODIS



GLOBE



COUNTRY & STATE BORDERS



PLACE NAMES



VISUAL TOOLS

World Wind is developed at NASA Ames Research Center by Chris Maxwell, Randy Kim, Tom Gaskins, Bruce Lam and project manager Patrick Hogan.

X - Plane Uçuş Simülatorü

- X - Plane uçuş simülatorünün en büyük avantajı bir hava aracı oluşturma programını içermesi ve kullanıcıların kendi hava araçlarını dizayn ederek çeşitli dizayn parametrelerinin etkisini göstermesidir.
- Bu nedenle birkaç hava aracı üreticisi tasarım çalışmalarında X-Plane simülatorünü kullanmaktadırlar.
- Microsoft Flight Simulator'a ilave olarak X-Plane, kullanıcıya kendi hava aracını tasarlama imkanı sağlamaktadır.



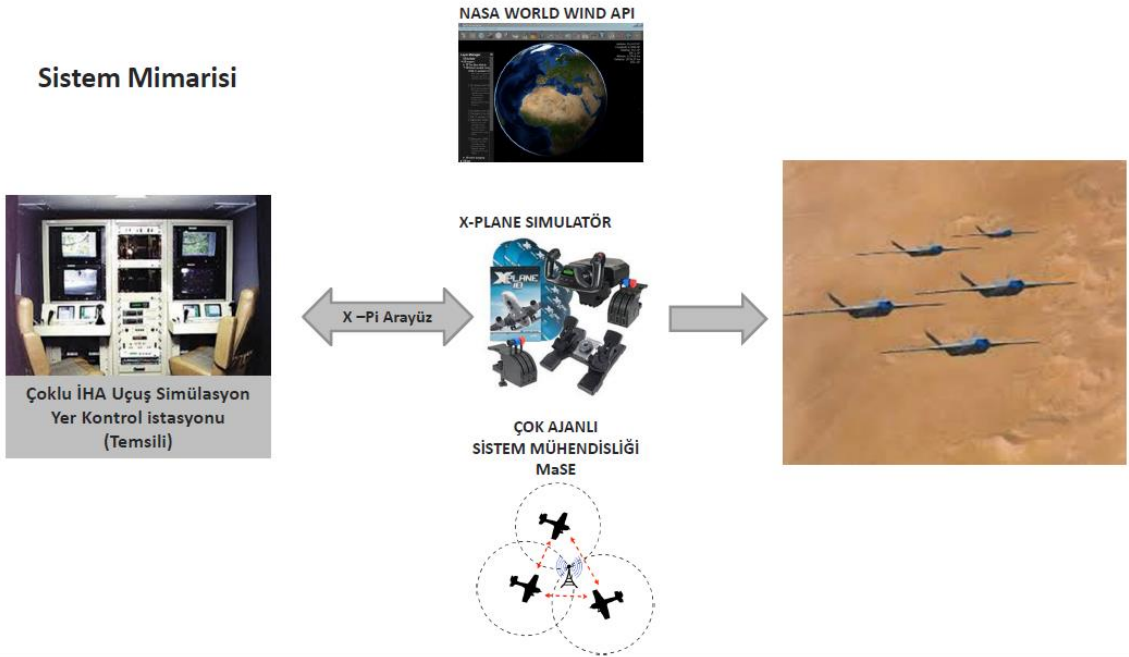
Bu çalışmada çok sayıda İHA'nın;

- Uçuş ve seyrüseferini kontrol edebilen,
- Kol uçuşu uygulama karakteristiklerini uygulayabilen ve
- Engellerden sakınmayı sağlayabilen

bir yer istasyonu için geliştirilen hesaplama yöntemleri ortaya koyulacaktır. Sistem, **görev planlama ve çoklu uçuş kontrol modülleri** olmak üzere iki modül olarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Görev planlama modülünde ilave olarak, **kol uçuşu ve rota planlama modülleri** olmak üzere iki modül daha bulunmaktadır. Bu modüller, Coğrafik Bilgi Sistemi (Geographic Information System-GIS) olarak kullanılabilmelerini sağlayan ve direkt olarak 3D haritalar üzerinde kol uçuşu ve rota planlamaya imkân veren, NASA tarafından hazırlanan, dünya üzerindeki herhangi bir noktanın görüntüsünün alınmasını sağlayan NASA World Wind API programına dayanmaktadır.



Sistem Mimarisi



UAV-IME Projesi

Brezilya'da sel ve toprak kayması: 95 ölü

Brezilya'nın Rio de Janeiro eyaletinde sağanak yağışlar en az 95 kişinin ölümüne yol açtı. Brezilya'da sel ve toprak kayması Toprak kaymalarında ölenler arasında beş aylık bir bebek de var. Yağışlar toprak kaymalarına neden oldu, birçok cadde sular altında kaldı, okullar tatil edildi. Rio de Janeiro Valisi Sergio Cabral, eyalette olağanüstü hal ilan etti ve halka sokağa çıkmamaları uyarısı yaptı. Vali Cabral, sel riski taşıyan bölgelerde ise evlerin boşaltılması talimatı verdi. Rio kenti de felaket bölgesi ilan edildi. Brezilyalı yetkililer, ölü sayısının artmasından endişe ediyor.



UAV-IME Projesi kapsamında yürütülen araştırmalar esnasında otonom insansız hava araçlarının MaSE (Multi Agents Systems Engineering- Çok Ajanlı Sistem Mühendisliği) teknikleri kullanılarak yönetildiği bir modellemenin yapılması ve filo unsurlarının/ajanlarının modeller olarak haritalanması önerilmiştir.



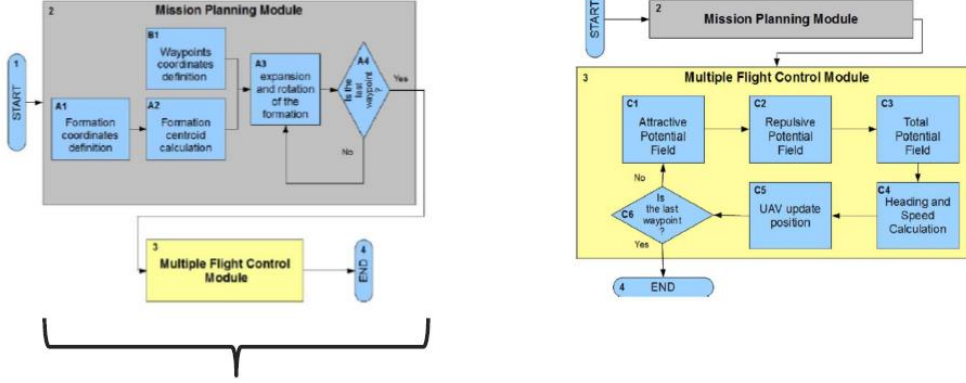
Toprak kayması öncesinde Google Haritası



Aynı bölgenin felaket sonrası görüntüleri

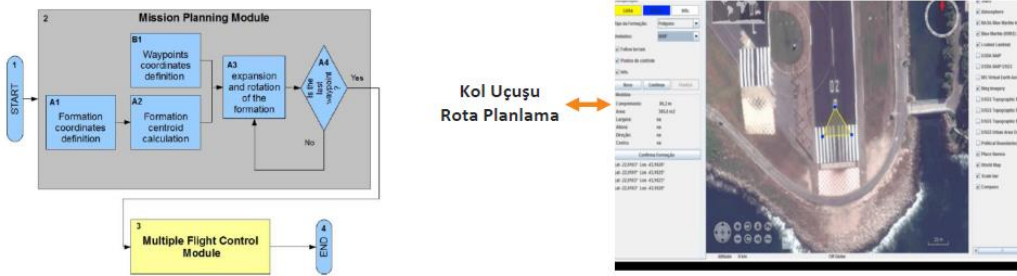
YER KONTROL İSTASYON MODÜLLERİ

- Görev planlama modülü
- Çoklu uçuş kontrol modülü



- KOL UÇUŞU PLANLAMA MODÜLÜ
- ROTA PLANLAMA MODÜLÜ

Görev planlama



- A-1 aşamasında, kol uçuşu planlama modülü kullanarak kol uçuşu koordinatları grafiksel olarak elde edilmektedir.
- B-1 aşamasında S/S maksadıyla kullanılacak noktaların koordinatları rota planlama tool vasıtasıyla belirlenir.
- A-2 aşamasında kol merkezi, her bir hava aracının A1 aşamasında belirlenen enlem ve boylam koordinatları kullanılarak belirlenmektedir.
- A-3 aşamasında kol uçuşunun genişleme ve döndürülmesi sağlanmaktadır.

Kol uçuşu planlama modülü



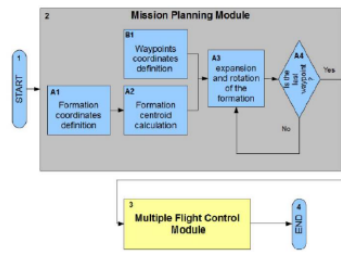
Görev planlama modülü



- Seyrüsefer S/S noktaları harita üzerinde işaretlenerek belirlenir.
- Kolun merkezi her bir hava aracı için ayrı ayrı belirlenir.

$$(x_c, y_c) = \sum_{i=1}^{n_v} (lat_i, lon_i) / n_v$$

Formüle x_c ve y_c kol merkezinin koordinatlarıdır. n_v İHA toplam sayısını lat_i ve lon_i ise her bir İHA'nın enlemsel ve boylamsal koordinatlarıdır. i A1 aşamasında elde edilir.



$$W_{ix} = W_{actualx} + (dxc \cos(\theta) + dyc \sin(\theta))$$

$$W_{iy} = W_{actualy} + (-dxc \sin(\theta) + dyc \cos(\theta))$$

dxc Kol merkezinden olan enlemsel mesafe

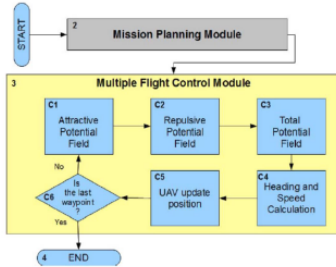
dyc Kol merkezinden olan boylamsal mesafe

θ W_{actual} ile W_{prox} arasındaki açı

W_{ix} ve W_{iy} her bir İHA için tanımlanan ve bir sonraki S/S noktasına bağlı olarak büyütülen ve döndürülen koordinatlarıdır.

A 3 aşamasında görev planlama modülü her bir S/S noktasının koordinatlarını genişletir ve döndürür.

Potansiyel ilgi alanı hesabı - C1 Aşaması



$$d = \sqrt{(x_G - x_V)^2 + (y_G - y_V)^2}$$

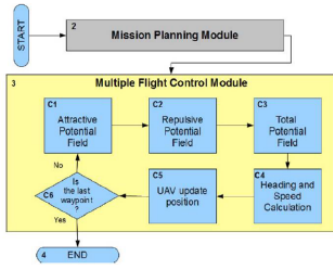
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_G - y_V}{x_G - x_V} \right)$$

∇x_G e ∇y_G can be calculated as the follow rules:

- 1) If $d < r$ then $\nabla x_G = \nabla y_G = 0$
- 2) If $d > r + s$ then $\nabla x_G = \alpha s \cos(\theta)$ and $\nabla y_G = \alpha s \sin(\theta)$
- 3) If $r \leq d \leq r + s$ then $\nabla x_G = \beta r \cos(\theta)$ and $\nabla y_G = \beta r \sin(\theta)$

Akış diyagramında gösterilen potansiyel ilgi alanını hesaplamak maksadıyla (Aşama C1), $[x_G, y_G]$ 'nin hedefin koordinatlarını gösterdiğini varsayalım, r de hedefin yarıçapıdır. $[x_V, y_V]$ koordinatları İHA'nın konumunu göstermektedir, s etki alanı ve α de ilgi dayanıklılığıdır. Bu parametreler kullanılarak İHA ile S/S noktası arasındaki ' d ' mesafesi ve θ baş istikameti hesaplanır.

İtici alan hesabı – C2 Aşaması



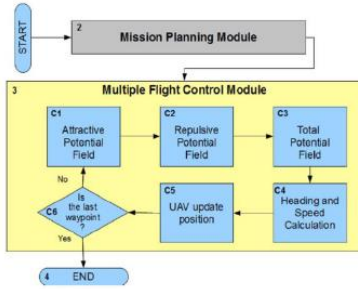
$[x_O, y_O]$ 'nun engel koordinatlarını, $[x_V, y_V]$ 'nin ise İHA konumunu gösterdiği itici alan hesaplaması yapılmaktadır. R engel yarıçapı, S itici etki alanıdır ve β de itici alan dayanıklılığıdır. C1 aşamasında olduğu gibi, d ve θ engel koordinatları kullanılarak hesaplanır. ∇x_O ve ∇y_O 'nun hesaplanmasında aşağıdaki kurallar geçerlidir:

Bu çalışmanın yaklaşımında İHA koordinatları birbirleri için engel olarak kabul edilmektedirler.

- 1) If $d < r$ then $\nabla x_O = -\beta s \cos(\theta)$ e $\nabla y_O = -\beta s \sin(\theta)$
- 2) If $r \leq d \leq r + s$ then $\nabla x_O = -\beta(R + S - d) \cos(\theta)$ e $\nabla y_O = -\beta(R + S - d) \sin(\theta)$
- 3) If $d > r + s$ then $\nabla x_O = \nabla y_O = 0$

Toplam potansiyel alan - C 3 Aşaması

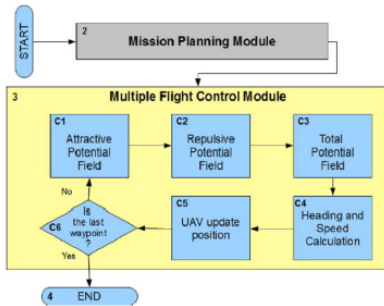
∇xG ve ∇yG , C1 aşamasında potansiyel ilgi alanı, ∇xO ve ∇yO ise C2 aşamasındaki repulsive alanından oluşturulurlar ve toplam potansiyel alanı hesaplamak üzere C3 aşamasında birleştirilirler. Denklemlere göre:



$$\nabla x_{total} = \nabla xO + \nabla xG$$

$$\nabla y_{total} = \nabla yO + \nabla yG$$

Baş ve sürat hesaplanması - C 4 Aşaması

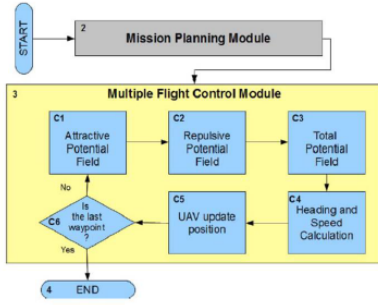


$$v = \sqrt{\nabla x^2 + \nabla y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\nabla y / \nabla x)$$

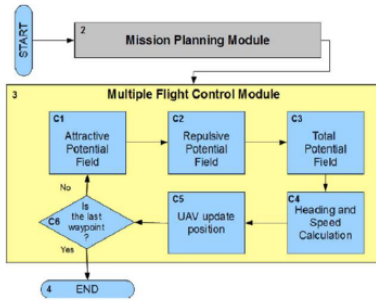
v sürat θ ise başı göstermektedir.

İHA konum güncellemesi – C 5 Aşaması



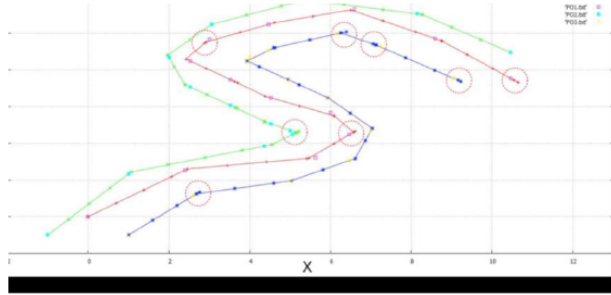
C5 aşamasında her bir hava aracının eylem ve boylamları güncellenir ve sonrasında hava aracının bulunduğu konumdan bir sonraki gitmeleri gereken kendilerine ait S/S noktasına olan mesafe ve baş istikametleri hesaplanır. C6 aşamasında geçerli olan S/S noktasının (*Wactual*) son S/S nokta olup olmadığı kontrol edilir. Son S/S noktası değil ise C1 - C5 aşamaları son S/S noktasına kadar yeniden hesaplanır ve görev tamamlanır.

Son S/S noktası sorgulama – C 6 Aşaması



C 6 aşamasında geçerli olan S/S noktasının (*Wactual*) son S/S nokta olup olmadığı kontrol edilir. Son S/S noktası değil ise C1 - C5 aşamaları son S/S noktasına kadar yeniden hesaplanır ve görev tamamlanır.

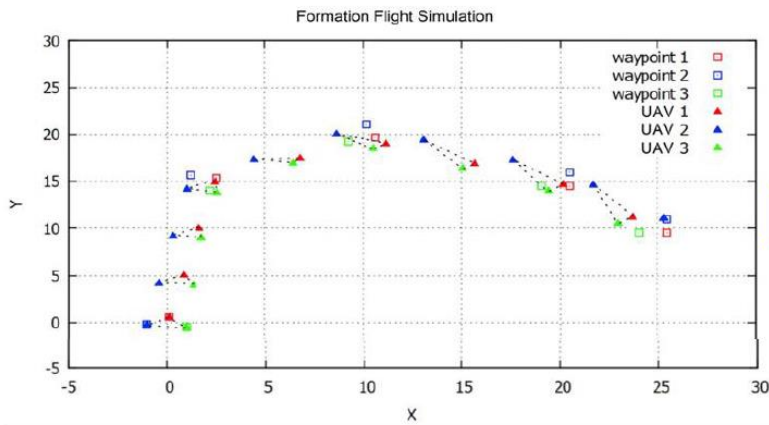
Test I



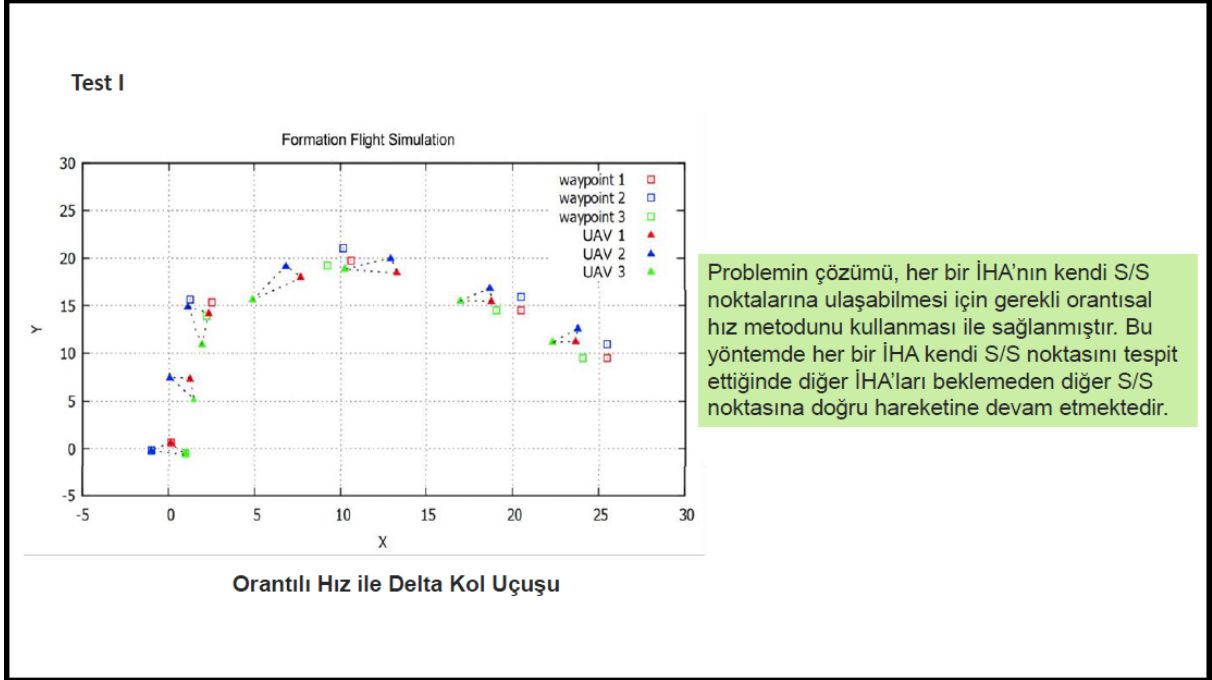
Sabit kanatlı bir hava aracının uçuş karakteristik ve dinamikleri göz önüne alındığında Test I bazı imkânsız hava aracı manevralarının olduğunu göstermiştir. Tespit edilen ilk problem, İHA düz uçuşta bir sonraki S/S noktasına doğru ileri doğru giderken noktayı geçmesi ve sonrasında o noktayı tanımlamak için geri uçuşunda yaşanmıştır. Bir diğer problem İHA'lerden birinin S/S noktasına ulaştığında diğer İHA'ların aynı noktaya gelmesini beklemek için durması ve sadece diğerleri geldiğinde ileri hareketine devam etmesinde yaşanmıştır.

Delta Kol Uçuşu Simülasyonu: 1-2-3 numaralı İHA'lar kırmızı, yeşil ve mavi renkli yörüngeler ile gösterilmiştir ve pembe, yeşil ve sarı renkte kareler ile gösterilen PO1, PO2 ve PO3 numaralı S/S noktalarına yönlendirilmiştir. Yörünge üzerindeki daireler hava araçlarının istenmeyen davranışlarını göstermektedir.

Test I



Orantılı Hız Olmaksızın Delta Kol Uçuşu

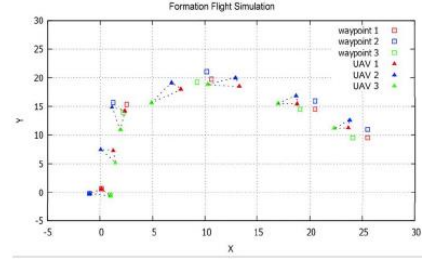
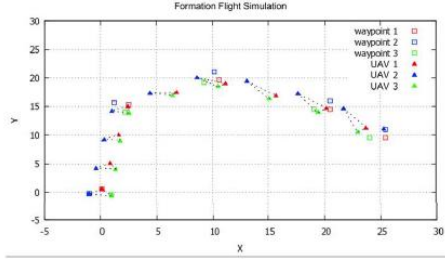


Test I

Bu yöntemde her bir İHA kendi S/S noktasını tespit ettiğinde diğer İHA'ları beklemeden diğer S/S noktasına doğru hareketine devam etmektedir. Her bir ilgi alanının 's' parametresi simülasyon esnasında, her bir İHA'yı kontrol eden maksimum, medium ve minimum S_{max} , S_{med} ve S_{min} değerleri alınarak dinamik olarak değiştirilmek zorundadır. Hız kontrol metodu hava araçlarının birbirlerine olan göreceli mesafeleri ve her bir hava aracının son S/S noktasına olan mesafesine bağlıdır ve aşağıda belirtilen aşamaları kapsar:

1. Her bir hava aracının S/S noktasına olan mesafesinin hesaplanması,
2. Kol içinde hava araçlarının birbirlerine olan mesafelerinin doğrulanması. Mesafe limitten düşük ise $s = S_{max}$ olarak S/S noktasından en uzakta olan İHA'ya hızını artırmak üzere bağlanması, S/S noktasına yakın olan İHA'ya hızını düşürmek amacıyla S_{min} olarak bağlanması işlemidir. İHA'lar başlangıçta oluşturulan mesafe limitleri içerisinde ise hepsine S_{med} hızları bağlanarak seyahat süratlerini muhafaza etmeleri sağlanır.

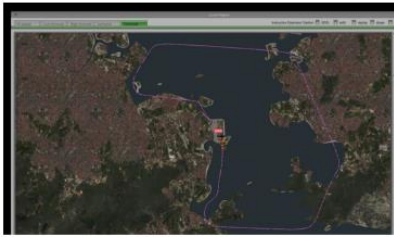
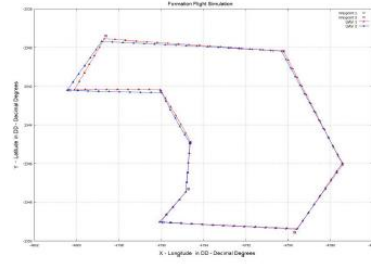
Test II



Solda gösterilen grafikte uçuş simülasyonu orantılı hız metodu olmadan gösterilmektedir ve uçuş rotası boyunca özellikle ileri aşamalarda kol uçuşunun bozulduğu açıkça görülmektedir.

Sağda gösterilen orantılı hız metodunda ise kol uçuşunun keskin dönüşlerde bozulduğu fakat dönüşün hemen sonrasında tekrar uygun hale geldiği görülebilir.

Test III – 2 Uçak Görev Planlaması + S/S kontrolü



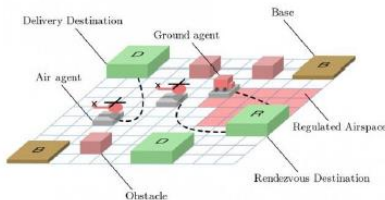
Sonuç ve Gelecekteki Çalışmalar

Bu çalışmada, çoklu insansız hava araçlarını kontrol edebilme kabiliyeti olan bir yer kontrol istasyonu için geliştirilen yazılım sunulmuştur. X-Plane uçuş simülatöründe, çoklu uçuş kontrolü için önerilen çözümlerin testlerinin yapıldığı ve doğrulandığı bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. X-Plane simülatörünün entegrasyonu yoluyla yer kontrol istasyonunun çoklu insansız hava araçlarının kontrolündeki tam etkinliği gerçeğe benzer ortamlarda gösterilmiştir.

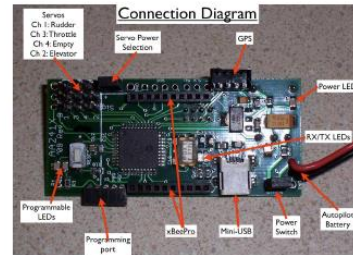


Bu çalışmada sunulan yer kontrol istasyonu yazılım çözümünün uygulanabilir olduğu ve tam fonksiyonelliği ispatlanmıştır, fakat bu çalışmanın bir başlangıç aşaması olduğu ve daha birçok geliştirmelerin yapılabileceği de açıktır. Örnek olarak;

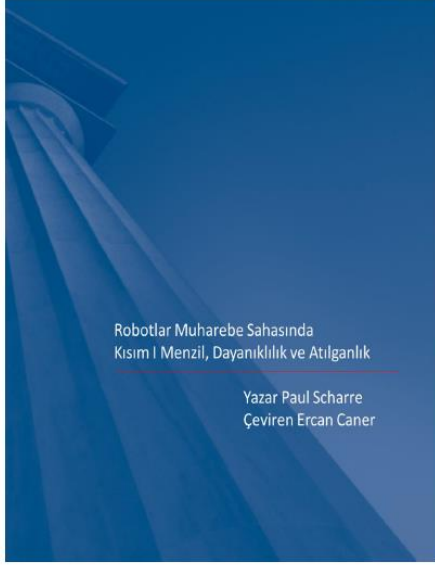
- Hava araçlarının farklı görevleri yerine getirebileceği akıllı bir seyrüsefer kontrol fonksiyonu ilave edilebilir.
- Diğer bir gelişme ise yer kontrol istasyonunun merkezi bir kontrol ünitesi olmaktan ve yerde tek bir kontrol istasyonu olarak kullanılması yerine hava araçları üzerine yerleştirilerek kullanılmasıdır.
- Bu önerilere paralel olarak bu çalışmanın devamı olabilecek mantıklı bir yaklaşım da gerçek hava araçlarının bir oto pilot eklenerek yer kontrol istasyonu vasıtası ile kontrol edilebilmesi olabilir.



GPS, INS, TCAS, ADS-B,
SATELLITE, NAVIGATION AIDS,
COMMUNICATION LINKS, SENSORS



İlave Kaynaklar



KISIM I Menzil, Dayanıklılık ve Atilganlık

I. ÖZET

II. GİRİŞ: Savaşma Yöntemlerinde Devrim

III. İnsansız ve Otonom Sistemlerin Faydaları

IV. Robotik Sistemlerin Muharebe Sahasında Sağladığı Avantajlar: Menzil ve Dayanıklılık

V. Robotların Muharebe Sahasında Sağladığı Operasyonel Avantajlar: Cesaret

VI. Kolaylaştıran Etkenler ve Engeller

VII. Tavsiyeler

KISIM II Sürü Teknolojisi

VIII. Bul ve Yoket Savaşı

IX. Kitle

X. Koordinasyon ve İstihbarat

XI. Sürat

XII. Sürüyü Yönetmek

XIII. Düşman Sürü Sistemleri ve Karşı Tedbirler

XIV. Sonuç: Sürüyü Oluşturmak

XV. Tavsiyeler

ⁱ Bu çalışmanın yaklaşımında İHA koordinatları birbirleri için engel olarak kabul edilmektedirler.