DÖRT ROTORLU İHA İÇİN ÜÇ FARKLI ROTA TAKİBİ VE ENGELLERDEN KAÇMA HAREKETİ İZLENMESİNİN ANALİZİ

Doğan NALÇACI 180 106 106 006 Uğurcan DOĞAN 180 106 106 061 Erkan DOĞAN 180 106 106 062

dogan1232@gmail.com

ugurcan2000dogan@gmail.com

erkan001100@hotmail.com

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

Özet

İnsansız hava araçları (İHA), ön tanımlı uçuş planı olanlar ve otomatik uçuş gerçekleştirenler olarak ikiye ayrılmaktadır. Uzaktan kumanda ile yönlendirilen İHA'lar ön tanımlı bir uçuş planına sahip olurken bazı İHA çeşitleri ise otomatik uçuş gerçekleştirirler. Otomatik uçuş gerçekleştiren İHA, takip edeceği rotayı tek başına belirlemeli ya da önceden oluşturulan yolu takip etmelidir. Zor koşullar altında ve engel çıkması durumunda da rotayı en az hata payıyla takip etmesi gerekmektedir.

Projemizde dört rotorlu İHA'nın dinamik denklemleri elde edilip, sistemin dikdörtgeni daire ve sonsuz rota takip denetimi, MATLAB Simulink ortamında test edilip incelenmiştir. İHA, simülasyon ortamında modellenmiştir ve matematiksel denklemleri oluşturulmuştur. İHA'nın oluşturulan tasarım, konum, açı ve denklemlerine göre hareketleri incelenmiştir. Aracın güzergahı, dikdörtgen, daire ve sonsuz olmak üzere üç geometri üzerinde belirlenmiştir. PD kontrolcüsü yardımıyla şekilleri takip etme oranları ve sapmaları hesaplanıp değerleri elde edilmiştir. Kontrolcü yazılımı ile İHA'nın rota üzerindeki engellerden kaçıp rotasına tekrardan geri dönmesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Dört rotorlu İHA, PD kontrolcü, Referans sapma payı, Engel algılama, Simülasyon.

1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA), fiziksel olarak içinde insan bulunmayan bir tür uçan araçtır. İHA'ların en önemli özelliği, yer tabanlı bir kontrolcü ile araç arasında bir iletişim sistemi kurmasıdır. İHA'lar hedeflerine göre değişik boyut ve aerodinamik yapılarda üretilmektedir. İHA'lar; büyük ölçekli harita yapımı, askeri amaçlar, arkeolojik alanların belgelenmesi, tarımsal uygulamalar ve afet yönetimi gibi alanlarda kullanılabilir. İHA'lar son yıllarda tüm sektörlerde büyük ilgi gördüğü ve etkin bir şekilde kullanıldığı için hareketleri ve denetimleri ile ilgili çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [1].

Çeşitli yapıda ve boyutta pek çok İHA türü bulunmaktadır. Bunlar sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Çalışmamızda dört rotorlu İHA kullanılmaktadır.

Dört rotorlu İHA'lar dört farklı motordan oluşmaktadır. Dört pervaneli İHA, ağırlığı azaltmak ve manevrayı artırmak için hafif kompozit malzemelerden imal edilmiştir. İHA'nın pervaneleri uzaktan kontrol vericisiyle manuel olarak kontrol edilir.

Kontrol ünitesi elemanları farklı yönlerde hareketlere izin verir ve İHA'nın dengelenmesini sağlar. Kontrol sistemindeki ekranlar, sabit kameradan canlı video görüntüleri almak için dekullanılabilir [2].

Pervanelerdeki dönüş kuvveti araç gövdesinde sapmaya yol açan momentler oluşturur ve araç dengesi bozulabilir. Aracı dengeli hale getirmek için motor hızlarını kontrol eden denetleme sistemleri kullanılır. Çok rotorlu İHA'larda dengeli uçuş sağlamak tekrotorlu araçlara göre daha kolaydır. Çünkü dönüş kuvvetleri birbirlerini dengelemektedir. Araç kalkış için dört pervaneden de güç aldığı için daha küçük motorlar ve pervaneler kullanılabilir. Dört rotorlu araçların diğer tip araçlardan üstünlükleri, kaldırma kuvvetini dönen kirişlerden elde etmeleri ve daha yüksek manevra takiplerine sahip olmalarıdır. Bu yüzden rotor craft sınıfındadırlar. Cihazın kontrolü, motorların dönüş hızı, tork, itme ve kaldırma karakteristiklerinde farklılık yaratarak sağlanır. Bu araçlar dikey kalkış ve iniş için uygun tasarlanmıştır. Pervanelerin açısını değiştirmek için mekanik bağlantıya gerek duyulmamasından dolayı ve bakımı oldukça kolaylaşır. Yapımı ve kontrol kolaylığı sayesinde model uçuş projelerinde dört rotorlu İHA şaseleri sıklıkla kullanılmaktadır [3].

Dört rotorlu İHA'lar için piyasada çok sayıda kontrolcü geliştirilmiştir. Sistemimizde PD (oransal ve türevsel) kontrolcü kullanılarak, durum kontrolü ve konum takibi yapılmıştır. Bu çalışmada doğrusal olmayan uyarlanabilir kontrol sistemi geliştirilmiştir ve araca entegre edilmiştir.

Uyarlanabilir PD kontrolcüleri ile farklı rotalar üzerindeki uygulamalar ve yapılan testler sonrası varılan sonuçlar paylaşılmıştır. İHA'nın farklı geometrilere sahip yörüngeleri takip etmesi PD, PID ve uyarlamalı PD denetleyiciler ile lineer kontrol yöntemleri uygulanmış ve ani manevralarda PD kontrolcüleri ile sapmalar tespit edilip hatalar önlenmiştir. PD kontrolcülerle kontrol edilen insansız hava aracının takip ettiği rotada karşısına çıkacak olan engellerden kurtulması ve tekrar eski rotasını takip etmesi planlanmaktadır. İHA'nın irtifa değişiminden yararlanarak engellerden kaçınılması sağlanmıştır.

2. YÖNTEM

Dört Rotorlu İHA'nın Matematiksel Modellemesi

Dört rotorlu İHA, rotor hızlarının bağımsız olarak değisimi ile kontrol edilir. Aşağıda itki (u₁), yalpalama (u₂), yunuslama (u_3) ve dönme (u_4) eşitlikleri verilmiştir. Rotor torkları (τ) ve rotorların merkeze olan mesafeleri (d) arasındaki esitlikler belirtilmiştir.

$$u_{1} = \tau_{1} + \tau_{2} + \tau_{3} + \tau_{4}$$

$$u_{2} = d. (\tau_{2} - \tau_{4})$$

$$u_{3} = d. (\tau_{1} - \tau_{3})$$

$$u_{4} = \tau_{1} + \tau_{3} - \tau_{2} - \tau_{4}$$

Rotasyon matrisi, üç boyutlu uzayda dönüşü tanımlayan bir matristir. $R_z(\psi)$, $R_v(\theta)$ ve $R_x(\phi)$ sırasıyla dönme, yunuslama ve yalpalama hareketleridir.

$$R_{z}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{y}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_{x}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$R_{x}(\phi) = \begin{bmatrix} 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$R_{zyx} = R_z(\psi).R_y(\theta).R_x(\phi)$$

Newton-Euler prensiplerine göre toplam kuvvet ve toplam tork ifadesi asağıda matris seklinde verilmistir. Burada F toplam kuvveti, τ toplam torku, I atalet momentini (3x3 matris), m kütleyi, a lineer hızlanmayı, α açısal hızlanmayı, v lineer hızı, ω açısal hızı göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w \times mv \\ w \times Iw \end{bmatrix}$$

Aşağıdaki eşitlikte döner kanadın üç eksendeki eylemsizliği (I_{xx}, I_{yy} ve I_{zz}) ve gövde eylemsizliği verilmiştir.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Pervanelerin uyguladığı toplam kaldırma kuvveti (F_T) eşitliği aşağıda verilmiştir. Eşitlikte (c_T) pervane boyutlarına bağlı itkidir.

$$F_T = c_T \cdot \sum_{i=1}^4 w_i^2$$

Toplam atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanır (g yerçekimi ivmesidir).

$$F_e = R_{zvx} \cdot F_T - mg$$

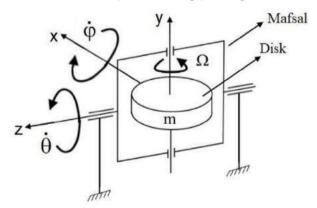
Yunuslama, yalpalama ve dönme hareketlerine ait tork değerleri $(\tau_{\phi}, \tau_{\theta}, \tau_{\psi})$ aşağıdaki matriste verilmiştir. c₀ dönme faktörünü temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} F_T \\ \tau_{\phi} \\ \tau_{\theta} \\ \tau_{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_T & c_T & c_T & c_T \\ 0 & dc_T & 0 & -dc_T \\ -dc_T & 0 & dc_T & 0 \\ -c_Q & c_Q & -c_Q & c_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_2^2 \end{bmatrix}$$

Her bir rotorun kaldırma kuvvetleri, torkları oluşturur. x, y, z eksenlerinin herhangi birinde oluşan tork değeri, diğer eksende yer alan pervanelerin torklarının farkına eşittir. Rotorun gövdesinin ve pervanelerinin dönmesiyle ortaya çıkan jiroskopik torklar ve döner kanat gövdesinin moment değerleri aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{split} \tau_{\phi_G} &= J_m Q\left(\frac{\pi}{30}\right) (w_1 - w_2 + w_3 - w_4) \\ \tau_{\theta_G} &= J_m P\left(\frac{\pi}{30}\right) (-w_1 + w_2 - w_3 + w_4) \\ M_a &= \begin{bmatrix} dc_T w_2^2 - dc_T w_4^2 + \tau_{\phi gyro} \\ -dc_T w_1^2 + dc_T w_3^2 + \tau_{\theta gyro} \\ -c_Q w_1^2 + c_Q w_2^2 - c_Q w_3^2 + c_Q w_4^2 \end{bmatrix} \end{split}$$

Yukarıda J_m rotorun ataletidir. P, Q ve R değerleri rotorun x, y ve z eksenlerindeki dönme açılarındaki değişimleri göstermektedir.



Şekil 1. Jiroskop modeli

Gerçekleştirilecek projede Şekil 1'de belirtilen jiroskop modeli esas alınmaktadır. Jiroskop, yön ölçülmesi, eksen hareketlerinin ayarlanması ve dengenin korunması ilkesiyle çalışan bir alettir. Açısal momentumun korunma ilkesini benimser.[4]

İHA Kontrolcü Tasarım denklemleri

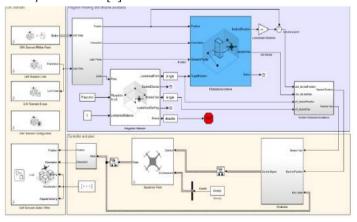
Bu bölümde dört rotorlu İHA'ya ait PD, uyarlamalı PD ve PID kontrolcü kullanım yöntemlerinden bahsedilmiştir. Genelde piyasada en çok PID kontrolcüsü (orantılı-integraltürev) kullanılmaktadır. PID'nin alt türü olan PD kontrolcüsü (orantılı-türev) kapalı döngü geri besleme (feedback) sistemidir. Üzerinde çalıştığımız sistemde mümkün olan en iyi sonuçlara PD kontrolcüsü ile ulaşılmıştır. Bu yüzden PD tercih edilmiştir. Dört rotorlu İHA üzerine yerleştirilen sensörler yoluyla yapılan ölçümler ile planlanan ölçümler arasındaki fark, hata ve sapma değerlerinin minimum olması istenilmektedir. Planlanan değer (referans) ile gerçek değerin farkı alınıp hata sinyali elde edilir. Uyarlamalı PD kontrolcüsü, PD kontrolcüsüne ek olarak yeni durumlara göre uyum sağlar ve sistemin davranışını değiştirir. Bu kontrolcüler kullanılarak İHA'nın havadaki hareketi sağlanmış olur.

PID kontrolcü, tasarımı ve sistem gücü açısından avantajlıdır fakat doğrusal olmayan ve kesin durumlarda, dört rotorlu modeller İHA'nın hareket etmesini ve performansını sınırlar. PD kontrolcüsünün çıktısını hesaplamak için orantısal ve türev terimleri toplanır. u(t) kontrolör çıkışı olarak tanımlanır ve PD algoritmasının son formu şu şekildeki gibidir.

$$\begin{split} u(t) &= K_P e(t) + K_D \frac{d}{dt} e(t), \\ \theta &= -[e_X + \varphi_X^T Y_X + K_{\Phi_Z} + K_{X_2} (\dot{e}_X + K_{X_3} e_X)] \\ u &= -[e_{\Phi} + \varphi_{\Phi}^T Y_{\Phi} + K_{\Phi_S} (\dot{e}_{\Phi} + K_{\Phi_S} e_X)] \end{split}$$

Denklemde verilen K_P değeri oransal kazanç K_D ise türevsel kazancı belirtmektedir. Burada bulunan t ise zaman bölgesine ait bir değiskendir. Uvarlanabilir PD kontrolcüsü, K_P ve K_D parametrelerinde değisiklikler yapmak için tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan kazanclar PD kontrolörünün performansını etkiler. Kontrolcülerin kazanç parametreleri Ziegler-Nichols tarafından belirlenir. Bu yöntem ile PD ve PID parametrelerini belirleyebilmek için sistemin integral ve türev kontrollerini kapatmak gerekmektedir. Sadece oransal kontrol ile sistem osilasyona gidene kadar Kp değeri arttırılıp, sistemi periyodik osilasyonda kontrol eden en düşük oransal kazanç değeri ile sistemin periyodu elde edilir [5].

İHA'nın kontrolcü blok şeması Şekil 2'de gösterilmektedir. Sistem modeline göre kontrolör katsayılarını düzenleyerek, İHA'nın yön ve sapma performansının ve hızının belirlenmesi amaçlanmaktadır [6].



Şekil 2. İHA Simulink engel kontrol şeması.

İHA tasarımı yapılıp itki ve kontrol verileri alınarak rotor hız kontrolü yapılır. Yer çekimi ve sürtünme kuvveti gibi çevresel etmenler ihmal edilerek İHA'nın dinamik modeli aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{split} \ddot{\mathcal{X}} &= \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -\frac{1}{m} \begin{bmatrix} c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi) \\ c(\phi)s(\theta)s(\psi) - s(\phi)c(\psi) \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\ \dot{\phi} &= \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \end{split}$$

Denklem Newton-Euler prensiplerine göre düzenlenirse istenilen referans model elde edilir ve asağıdaki gibidir.

$$\ddot{\mathcal{X}}_{m} = \ddot{\mathcal{X}}_{d} + K_{\mathcal{X}_{2}}(\mathcal{X}_{d} - \dot{\mathcal{X}}_{m}) + K_{\mathcal{X}_{1}}(\mathcal{X}_{d} - \mathcal{X}_{m})$$

$$e_{\mathcal{X}} = \mathcal{X} - \mathcal{X}_{m}$$

$$\ddot{e}_{m} - \ddot{e}_{d} + K_{d_{m}}(\phi_{d} - \dot{\phi}_{m}) + K_{d_{m}}(\phi_{d} - \phi_{m})$$

$$e_{\phi} = \phi - \phi_{\pi}$$

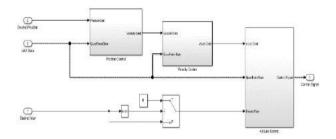
Yukarıdaki denklemde K_{X1} , K_{X2} , $K_{\Phi 1}$ ve $K_{\Phi 2}$ kazanç katsayılarıdır. Konum hatası vektörlerini ve kontrol sinyallerini elde etmek için uyarlama kuralları ve denklemdeki kazanç katsayıları aşağıdaki denklemde belirtilmiştir. Denklem adaptasyon oranını, kontrol sinyalini belirleyen matrisleri ve uyarlanabilir PD kontrolcüsü katsayılarını içerir [7].

$$\begin{split} \dot{Y}_{\mathcal{X}} &= K_{\mathcal{X}} \big(\dot{e}_{\mathcal{X}} + K_{\mathcal{X}_1} e_{\mathcal{X}} \big) \\ \dot{Y}_{\Phi} &= K_{\Phi} \big(\dot{e}_{\Phi} + K_{\Phi_1} e_{\mathcal{X}} \big) \\ K_{\Phi} &= \alpha_{\Phi} \phi_{\Phi} \end{split} \qquad \begin{aligned} \dot{\vartheta} &= - [e_{\mathcal{X}} + \varphi_{\mathcal{X}}^T Y_{\mathcal{X}} + K_{\Phi_2} + K_{\mathcal{X}_2} (\dot{e}_{\mathcal{X}} + K_{\mathcal{X}_1} e_{\mathcal{X}})] \\ u &= - [e_{\Phi} + \varphi_{\Phi}^T Y_{\Phi} + K_{\Phi_2} (\dot{e}_{\Phi} + K_{\Phi_1} e_{\mathcal{X}})] \\ K_{\Phi} &= \alpha_{\Phi} \phi_{\Phi} \end{aligned}$$

Rota Takibi

Dört rotorlu İHA'nın Simulink simülasyon programı yardımıyla kontrol sistemleri ve rota takip modellemesi yapılmıştır. İHA'nın yalpalama, yunuslama ve dönme (x, y, z ekseni) hareketleri incelenmiştir. PD ve PD uyarlamalı kontrol uygulamaları ile dikdörtgen, daire ve sonsuz (lemniscate) geometrileri ile aracın hareketi yörüngede gözlenmiştir.

Xd(t), Yd(t) ve Zd(t) takip sırasında referans yolu belirlemek üzere, İHA konumunun toplam hatası hesaplanmıştır.

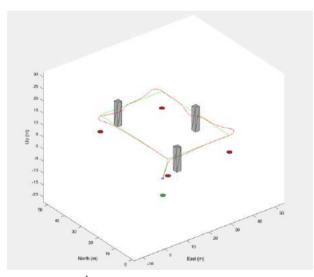


Şekil 3. İHA Simulink PD kontrolcü şeması.

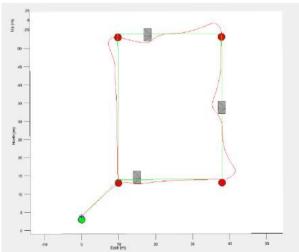
Engel tespiti ve engelden kaçma

İHA'nın rotasının mümkün olan en az hatayla rota takibi yapması, karşısına çıkan engellerden mümkün olan en az sapmayla kurtulması ve yeniden rotasını takip etmesi önemlidir. İHA'ların engellerden kaçması donanımsal ve yazılımsal olarak ikiye yönteme ayrılmaktadır. Bu çalışmada yazılımsal ve algoritmik yöntemler kullanılarak insansız hava engelden kaçınması incelenmiştir. İHA'nın dikdörtgen, daire ve sonsuz olmak üzere 3 rotada engelden kaçması vize projesinde incelenmiştir. Final projesinde İHA'nın rotasına rastgele konumlandırılmış engeller tanımlanmıştır. İnsansız hava aracı bu engeller karsısında engelden lidar sensörü yardımıyla kurtulması ve rotasına devam edebilmesi için uygun bir algoritma geliştirilmiştir. İnsansız hava aracının karsısına çıkan engellerden x, v ve z eksenleri üzerinde hareketler yaparak engellerden kaçınılması sağlanmıştır. Engele göre yön değişimi yapıldıktan sonra eski rotasına döndürülmesi sağlanmıştır. Engelden kaçan insansız hava aracı rotasına geri dönerken gözle görülür birtakım sapmalar olmuştur.

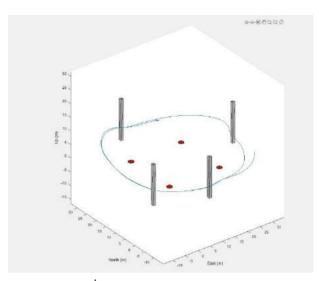
3. DENEYSEL SONUÇLAR



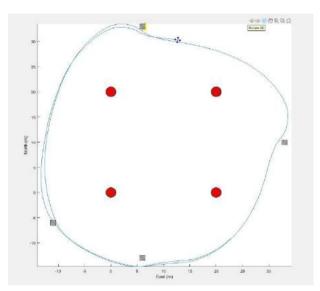
Şekil 4. İHA dikdörtgen engel referans şeması.



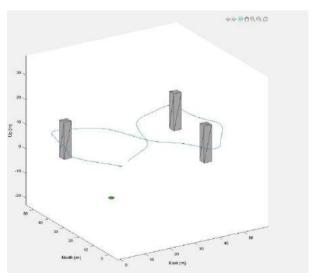
Şekil 5. İHA dikdörtgen engel referans şeması kuş bakışı.



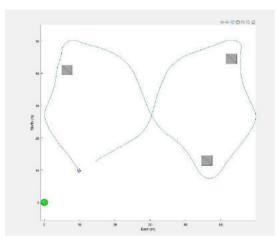
Şekil 4. İHA daire engel referans şeması.



Şekil 5. İHA daire engel referans şeması kuş bakışı.



Şekil 4. İHA sonsuz engel referans şeması.



Şekil 5. İHA sonsuz engel referans şeması kuş bakışı.

4. GENEL RAPOR SONUÇLARI

Tasarlanan sistemde dört rotorlu İHA'nın belirlenen yörünge için PD, PID ve uyarlamalı PD kontrolcüsü performansları incelenmiş ve uygun olan kontrolcü belirlenip tasarıma uygun hale getirilmiştir. Kontrolcü için gereken parametrelerle dinamik denklemler belirlenmiş ve uygun PD kazanç değerleri elde edilmiştir. Elde edilen dinamik denklemlere uygun algoritmalar yazılarak kodlar simülasyona hazır hale getirilmiştir. Belirlenen kontrolcünün ani manevra anında daha az sapmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede hata ve sapma oranlarının, grafik ve simülasyon sonuçlarında hedeflenen referans değerine göre çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada İHA'nın rota takibi için uyarlamalı PD kontrolör performansı ve İHA'nın engelden kurtulup rotasına devam etmesi incelenmiştir. Belirli yörüngede rastgele çıkan engellerden insansız hava aracının kurtulma performansı incelenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Vikipedi, Özgür Ansiklopedi, "İnsansız hava aracı", Int: https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0nsans%C4%B1z_hava_ara c%C4%B1.
- [2] Kabadayı A., Uysal M., "Extraction Of Buildings From Data Obtained By Unmanned Aerial Vehicle". "Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering", (8-13), (02.12.2019).
- [3] Kılıç B., "Quadcopter'in Dinamik Analizi ve Tasarımı", (Haziran 2014).
- [4] Vikipedi, Özgür Ansiklopedi, "Jiroskop", Int: https://tr.wikipedia.org/wiki/Jiroskop.
- [5] Üstüner M. A., Taşkın S. "Decoupling Of Multi-Input Multi- Output Systems: A Process Control System Application". "CBU J. of Sci.", (vol.11, 18sue.2), (225-230).
- [6] Fatih M., "Pid Kontrolör ile Tasarım", (21.03.2014).
- [7] J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", (3.ed., vol.2) Oxford: Clarendon, (65–70).