



## Quadrotorün Dikey Hareketi için Tasarlanan Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolörünün Katsayılarının Genetik Algoritma ile Optimizasyonu

### Optimization of the Coefficients of the Proportional-Integral-Derivative Controller Designed for Vertical Motion of the Quadrotor with Genetic Algorithm

Zafer Civelek

<sup>1</sup>Karatekin Üniv. Uluyazı Kampüsü Müh. Fak., 18200 ve Çankırı, TÜRKİYE

*Başvuru/Received:* 19/11/2020

*Kabul / Accepted:* 15/12/2020

*Çevrimiçi Basım / Published Online:* 31/12/2020

*Son Versiyon/Final Version:* 31/12/2020

#### Öz

İnsansız hava araçları (İHA) sivil ve askeri alanlarda oldukça geniş uygulama alanları bulmuşlardır. Düşük maliyetli fiziksel yapıları ve emsallerine göre daha az karmaşık kontrol yapıları, bu cihazları birçok araştırmacının hedefi yapmıştır. Bu çalışmada dört motorlu İHA'nın dikey yönde hareketini kontrol eden oransal-integral-türevsel (PID) kontrolörün katsayıları Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. GA, Matlab/Script dilinde kodlanmıştır. Quadrotörün matematiksel modeli Matlab ortamında geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları GA'nın PID kontrolörün katsayılarını başarıyla optimize ettiğini göstermektedir.

#### Anahtar Kelimeler

*quadrotör, pid, genetik algoritma, kontrol*

#### Abstract

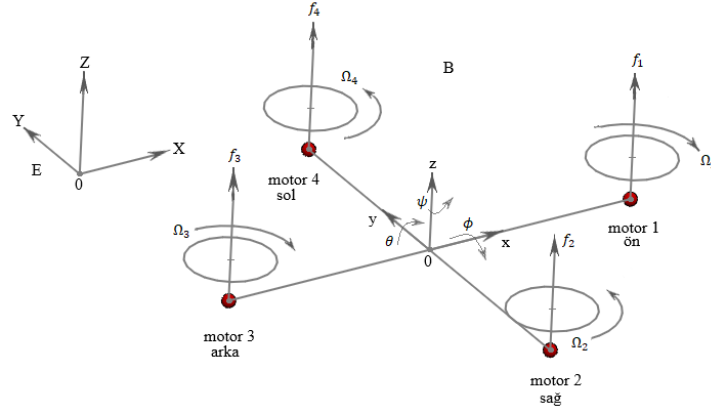
Unmanned aerial vehicles (UAVs) have found wide application areas in civil and military. Their low-cost physical structure and less complex control structures compared to their counterparts have made these devices the target of many researchers. In this study, the coefficients of the proportional-integral-derivative (PID) controller that controls the vertical movement of four-motor UAVs have been optimized with the genetic algorithm (GA). GA is coded in Matlab / Script language. Mathematical model of Quadrotor was developed in Matlab environment. The simulation results show that the GA has successfully optimized the coefficients of the PID controller.

#### Key Words

*quadrotor, pid, genetic algorithm, control*

## 1. Giriş

Quadratör dik yönde iniş-kalkış yapabilen bir hava aracıdır. X veya + yapısında olup, quadratörün kollarının ucunda motor ve pervane çiftleri bulunur. Şekil 1’de görüldüğü gibi iskelet yapının tam ortası kütle ağırlık merkezidir. Motorların ikisi saat yönüne dönerken ikisi de saat yönünün tersine döner. Bu helikopterlerde arka kuyruktaki pervanenin yaptığı görevi yapar ve dengelemeyi sağlar. Quadratörün modellenmesinde iki koordinat sistemi kullanılır. Bunlardan birisi yer koordinatı (earth axis) diğeri cihaz koordinatı (body axis) dir. Yer koordinatı sabittir ve X, Y ve Z harfleri ile gösterilir. Cihaz koordinatı ise hareketlidir ve x, y, z harfleri ile gösterilir.



Şekil 1. Dört Motorlu İnsansız Hava Aracının Modeli

Yalpa (roll) açısını ( $\phi$ ) değiştirmek için sol ve sağdaki motorların hızları artırılıp azaltılır. Yunuslama (pitch) açısı ( $\theta$ ) değişimi ön ve arka motorların hızları ayarlanarak yapılır. Sapma (yaw) açısını ( $\psi$ ) değiştirmek için arka, ön, sağ ve sol motorların hızları değiştirilir. Bu açılar değiştirilirken toplam itme kuvveti sabit tutularak, quadratörün dikey ekseninde sabit kalması sağlanır. Quadratörün dikey eksenindeki (z) hareketi ise dört motorun itme kuvvetlerinin aynı oranda değişmesiyle belirlenir.  $\Omega_i$ , i’inci motorun hızıdır, (i=1, 2, 3, 4). b, itme katsayısı, d ise sürükleme katsayısıdır. Üç Euler açısındaki ( $\phi, \theta, \psi$ ) değişimlerin küçük olduğu kabul edilerek; bu açıların zaman türevleri, quadratör eksenlerinin açısal hızlarına eşitlenmiştir.

Quadratörün hareketi iki kısma ayrılabilir; açısal dönüş hareketi ve doğrusal yer değiştirme hareketi. Sistem denklemleri Denklem 1 ve Denklem 2’den de görülebileceği gibi yer değiştirme hareketi açısal harekete bağlı olduğu halde açısal hareket yer değiştirme hareketinden bağımsızdır.

Son yıllarda quadratörün modellenmesi ve kontrolü ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar klasik PID kontrol (Li & Li, 2011), (Goodarzi et al., 2013),  $H_\infty$  kontrol (Raffo et al., n.d.), predictive kontrol (Abdolhosseini et al., n.d.), (Bouffard et al., n.d.), backstepping kontrol (Madani et al., n.d.), sliding mode kontrol (Xu et al., n.d.), LQR kontrol (Reyes-Valeria et al., n.d.), dynamic surface kontrol (Shao et al., 2018), adaptive kontrol (Dydek et al., n.d.), neural network kontrol (Nicol et al., n.d.), fuzzy kontrol (Santos Peñas et al., 2010) ve bu metodların hibrit karışımları gibi çalışmalardır.

Bunlarla birlikte hala klasik PID kontrol basitliğinden dolayı en çok kullanılan ve tercih edilen kontrol çeşitidir. PID kontrolörün kazanç katsayılarının ayarlanmasının kolay olması, tasarımının basit olması ve doğrusal sistemler için iyi bir kararlı kontrol mekanizması sağlaması gibi avantajları vardır. Bu makalede dikey ekseninde hareketi kontrol eden klasik PID kontrolörün katsayıları ilk önce Ziegler-Nichols (ZN) yöntemi ile sonra genetik algoritma ile belirlenmiştir.

## 2. Quadratörün Dinamiği

Quadrotorun dinamik yapısı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Birçok çalışmada kabul edilen matematiksel denklemler Denklem 1 ve Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$\left. \begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{1}{m} (\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi) U_1 \\
\ddot{y} &= \frac{1}{m} (-\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi) U_1 \\
\ddot{z} &= \frac{1}{m} \cos\theta \cos\phi U_1 - g \\
\ddot{\phi} &= \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta} \Omega_r + \frac{l}{I_x} U_2 \\
\ddot{\theta} &= \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_y} \dot{\phi} \Omega_r + \frac{l}{I_y} U_3 \\
\ddot{\psi} &= \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{1}{I_z} U_4
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Burada  $x, y, z$  hareketsiz ekseninde cisim merkezinin bulunduğu konumdur.  $\phi, \theta, \psi$  ise quadrotor ekseninin hareketsiz eksene göre durumunu belirleyen Euler açılarıdır.  $m$ , quadrotorun kütlesi,  $l$  ise quadrotörün kütle merkezi ile pervanelerin dönüş eksenini arasındaki mesafedir.  $J_r$ , motorun eylemsizlik momenti,  $I_x, I_y, I_z$  ise quadrotorun kütle merkezinin etrafındaki eylemsizlik momentleridir ve  $x, y, z$  eksenleri için simetrik olduğu farz edilmektedir.  $U_1$ , dört motorun quadrotora uyguladığı toplam itme kuvvetidir.  $U_2, U_3, U_4$  ise motorlar tarafından üretilen ve quadrotor ekseninde açılmalara sebep olan torklardır.  $\Omega_r$  ise motorların bağlı hızlarıdır.  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  ise sırasıyla 1, 2, 3 ve 4. motorların hızlarıdır.

$$\left. \begin{aligned}
U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\
U_2 &= b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\
U_3 &= b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\
U_4 &= d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\
\Omega_r &= \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4
\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Bu çalışmada kullanılan quadrotörün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Quadrotörün Parametreleri

Parametre Sembolleri	Değer	Birim	Parametre Tanımı
$I_x$	0.0086	$kg\ m^2$	x eksenini eylemsizlik momenti
$I_y$	0.0086	$kg\ m^2$	y eksenini eylemsizlik momenti
$I_z$	0.0172	$kg\ m^2$	z eksenini eylemsizlik momenti
$J_r$	$3,7404 \cdot 10^{-5}$	$kg\ m^2$	motor eylemsizlik momenti
$b$	$3,13 \cdot 10^{-5}$	$N\ s^2$	itme katsayısı
$d$	$9 \cdot 10^{-7}$	$N\ m\ s^2$	sürüklenme katsayısı
$m$	0.4794	$kg$	quadrotörün kütlesi
$l$	0.225	$m$	quadrotör kol uzunluğu

Kontrolörün ürettiği kontrol sinyallerinin quadrotörün ürettiği toplam torku koruması istenirse Denklem (3)'deki hesaplamaların dikkate alınması gereklidir. Bu durum özellikle quadrotörün bulunduğu yükseklikte açılmalara sebep olan torkların istendiğinde önemli olmaktadır.

$$\left. \begin{aligned}
\Omega_1 &= \frac{1}{2} \left( \frac{U_4}{d} + \frac{U_1}{b} + 2 \frac{U_3}{b} \right)^{1/2} \\
\Omega_2 &= \frac{1}{2} \left( -\frac{U_4}{d} + \frac{U_1}{b} - 2 \frac{U_2}{b} \right)^{1/2} \\
\Omega_3 &= \frac{1}{2} \left( \frac{U_4}{d} + \frac{U_1}{b} - 2 \frac{U_3}{b} \right)^{1/2} \\
\Omega_4 &= \frac{1}{2} \left( -\frac{U_4}{d} + \frac{U_1}{b} + 2 \frac{U_2}{b} \right)^{1/2}
\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 3. Genetik Algoritma (GA)

#### Genetik Algoritma Yapısı

Genetik algoritmada onlu sistemi kullanan bazı genetik algoritma yapıları bulunsa da çoğunlukla ikili kodlama sistemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, optimize edilmek istenen kontrol sisteminde onlu sayılar kullanılmasına rağmen, genetik algoritma kodlamasında ikili sistem sayıları tercih edilmiştir. GA'nın içine bir takip ve kontrol algoritması yerleştirilmiştir. Bu algoritma popülasyondaki en iyi bireyleri takip ederek, en iyi bireylerin tekrarlanma sayılarını hesaplamakta ve GA'nın herhangi bir lokal minimum veya maksimuma takılıp takılmadığını kontrol etmektedir. Eğer GA'nın lokal bir minimum veya maksimuma takıldığına karar verirse çaprazlama ve mutasyon oranlarını değiştirmektedir. Böylece GA'yı lokal minimum veya maksimum kurtarmaya çalışmaktadır.

#### Seçim

GA popülasyon tabanlı bir algoritma yapısına sahiptir. Popülasyondaki her bir bireyin hedef fonksiyona yada değere yakınlığını gösteren bir uygunluk değeri vardır. Bir bireyin uygunluk değeri ne kadar yüksek ise gelecek neslin ebeveyni olma ihtimali o kadar fazladır. Oluşturulan yeni popülasyon içindeki uygun bireyler çeşitli yöntemlerle seçilir. Bu yöntemlerin bazıları; rulet tekerleği, turnuva, sıralama gibi isimlere sahiptir. Bu çalışmadaki GA'da rulet tekerleği seçim yöntemi tercih edilmiştir.

#### Çaprazlama

Çaprazlama genetik algoritmanın kalbidir ve temel amacı yüksek uygunluk değerine sahip iki bireyden bir yada daha fazla yeni birey üretmektir. Kullanılan çaprazlama yöntemi GA'nın hedefe ulaşımını çok etkilemektedir. İyi bir çaprazlama yöntemi seçimi ile GA hedefe kısa bir sürede ulaşmaktadır. Çaprazlama işlemi içerisinde çaprazlama oranı denilen bir kavram bulunmaktadır. Çaprazlama oranı çaprazlamaya tabi tutulacak bireylerin miktarını belirler. Bu oran GA'yı tasarlayan uzmana bağlı olmakla birlikte, genelde %70 - %90 arasında seçilen yüksek bir değerdir. Bu çalışmadaki GA'da çaprazlama oranı %90 olarak ayrıca çaprazlamada kullanılan nokta sayısı da değişken olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan GA çaprazlamaya tek noktadan başlamaktadır. GA'nın içinde başka bir algoritma popülasyonunun en iyi bireylerini takip etmektedir. Eğer belirli bir sayıda bu bireyler aynen tekrar edilirse, algoritma çaprazlama sayısını da arttırmaktadır. Bu yöntemle çaprazlama işlemine bir zenginlik katılmıştır. Çaprazlama noktasının üst sınırı ise kromozom uzunluğunun bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

#### Uygunluk Fonksiyonu

Genetik algoritmada, popülasyondaki her bir bireyin çözüme yakınlığını göstermek için uygunluk fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu çalışmada, z eksenindeki hatanın mutlak değerinin ortalaması uygunluk fonksiyonunda kullanılmıştır. Sıfıra bölme hatasından kaçınmak için mutlak değer ortalama hata  $1 \cdot 10^{-3}$  ile toplanmıştır. Uygunluk fonksiyonu Denklem 4'de verilmiştir.

$$F(t) = 1/(ort(|hata_z|) + 1 \cdot 10^{-3}) \quad (4)$$

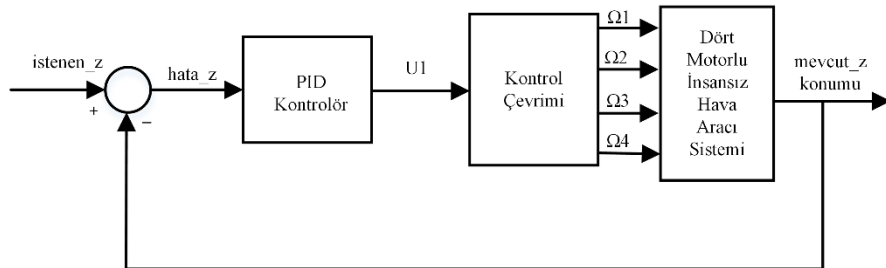
### 4. Kontrolör Yapısı

#### PID kontrolör

Denklem 5'de gösterildiği gibi, PID-oransal-integral-türevsel kontrol yönteminde, hata\_z sinyali,  $k_p$  oransal katsayısı ile, hata\_z sinyalinin türevi,  $k_d$  türevsel katsayısı ile hata\_z sinyalinin integrali de,  $k_i$  integral katsayısı ile çarpılarak, toplanır ve  $U_1$  kontrol sinyalinin değeri elde edilir. Şekil 2'de Quadrotor ve PID Kontrol Sistemi Blok Şeması görülmektedir.

PID-oransal-integral-türevsel

$$U_1 = k_p \cdot hata\_z + k_i \int hata\_z dt + k_d \cdot \frac{d(hata\_z)}{dt} \quad (5)$$



Şekil 2. Quadrotor ve PID Kontrol Sistemi Blok Şeması

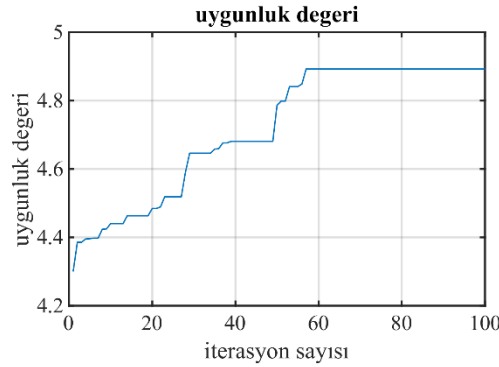
## 5. Simülasyon Sonuçları

Quadratör modeli Matlab/Script ortamında modellenmiştir. Simülasyon süresi 20 sn dir ve İterasyon adımı 0.01 sn olarak seçilmiştir. Yalpa (roll) açısı ( $\phi$ ) için sınır değerleri  $\pi/2$  ile  $-\pi/2$ , yunuslama (pitch) açısı ( $\theta$ ) için sınır değerleri  $\pi/2$  ile  $-\pi/2$ , sapma (yaw) açısı ( $\psi$ ) için sınır değerleri  $\pi$  ile  $-\pi$  arasında alınmıştır. Simülasyon süresince quadratör 20 sn içinde z ekseninde (istenen\_z) 0 m den 20 m ye çıkarılmak istenmektedir. PID kontrolör katsayıları ilk önce ZN yöntemi ile belirlenip, sistem buna göre çalıştırılmıştır. Daha sonra Matlab/Script dilinde kodlanan genetik algoritma ile PID kontrolörün katsayıları optimize edilmiştir. Her iki yöntem ile bulunan katsayılar Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** PID Kontrolörün Katsayıları

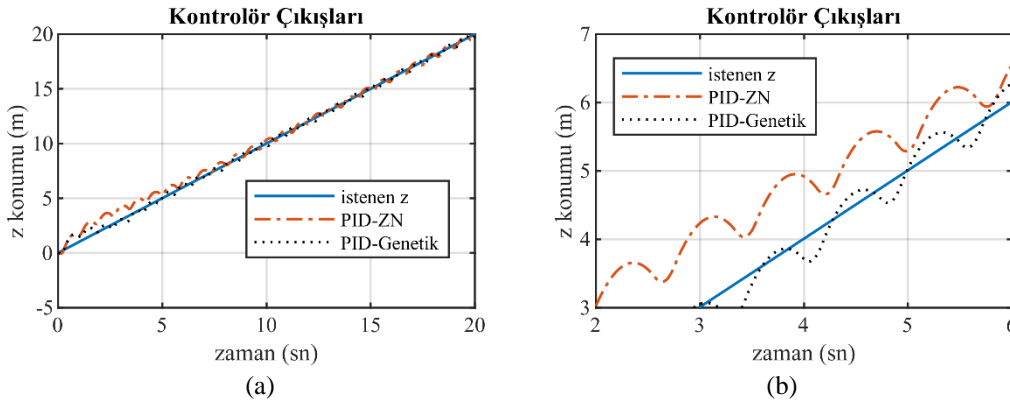
Yöntem/Katsayılar	kp	ki	kd
Ziegler-Nichols	30	30	7
Genetik Algoritma	67	56	99

GA, 100 iterasyon yaparak 10 kere çalıştırılmıştır. 10 çalışmanın her ne kadar sonuçları birbirine yakın ise de en iyi olan seçilmiştir. GA’nın uygunluk fonksiyon grafiği Şekil 3’de verilmiştir.



**Şekil 3.** GA uygunluk fonksiyon grafiği

GA ve ZN yöntemleri ile bulunan PID katsayıları ile çalıştırılan PID kontrolörün kontrol ettiği z-ekseni kontrolünün çıkışları Şekil 4 (a) ve (b) de gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Kontrolör Çıkışları

Şekil 4 (a)'da genel hatları ile görülen quadratörün z eksenindeki hareketi Şekil 4 (b)'de daha detaylı olarak görülmektedir. GA ile optimize edilen PID kontrolörün çıkışları, ZN ile belirlenen katsayılardan daha iyi sonuç verdiği Şekil 4 (b)'den görülmektedir. Bu çalışmada hareketlendiricideki gecikme de dikkate alınarak simülasyona 0.1 sn gecikme uygulanmıştır. Yani kontrolörden gelen sinyaller 0.1 sn sonra çıkış üretmektedirler. Bunun sebebi motor pervanelerindeki dönme hareketinin kuvvete aktarılmasında oluşan gecikme süresidir.

## Referanslar

- Abdolhosseini, M., Zhang, Y., robotic, C. R.-J. of intelligent &, & 2013, undefined. (n.d.). An efficient model predictive control scheme for an unmanned quadrotor helicopter. *Springer*. Retrieved October 28, 2020, from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10846-012-9724-3.pdf>
- Bouffard, P., Aswani, A., International, C. T.-2012 I., & 2012, undefined. (n.d.). Learning-based model predictive control on a quadrotor: Onboard implementation and experimental results. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 28, 2020, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6225035/>
- Dydek, Z., ... A. A.-... T. on control, & 2012, undefined. (n.d.). Adaptive control of quadrotor UAVs: A design trade study with flight evaluations. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 28, 2020, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6220873/>
- Goodarzi, F., Lee, D., & Lee, T. (2013). Geometric nonlinear PID control of a quadrotor UAV on SE(3). *2013 European Control Conference, ECC 2013*, 3845–3850. <https://doi.org/10.23919/ecc.2013.6669644>
- Li, J., & Li, Y. (2011). Dynamic analysis and PID control for a quadrotor. *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2011*, 573–578. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2011.5985724>
- Madani, T., International, A. B.-2006 I., & 2006, undefined. (n.d.). Backstepping control for a quadrotor helicopter. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 27, 2020, from [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4058900/?casa\\_token=dQH8u6f5YWUAAAAA:ii12Y0DQF\\_ekTjLsuLSzFZp8ZP1dzLME5tSNDbEMxYjQ6I\\_WnOcyAHtkQmyfMw2EZBznKHOF8g](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4058900/?casa_token=dQH8u6f5YWUAAAAA:ii12Y0DQF_ekTjLsuLSzFZp8ZP1dzLME5tSNDbEMxYjQ6I_WnOcyAHtkQmyfMw2EZBznKHOF8g)
- Nicol, C., ... C. M.-... C. on E., & 2008, undefined. (n.d.). Robust neural network control of a quadrotor helicopter. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 28, 2020, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4564736/>
- Raffo, G., Ortega, M., Automatica, F. R.-, & 2010, undefined. (n.d.). An integral predictive/nonlinear  $H_\infty$  control structure for a quadrotor helicopter. *Elsevier*. Retrieved October 28, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109809004798>
- Reyes-Valeria, E., ... R. E.-C.-C., & 2013, undefined. (n.d.). LQR control for a quadrotor using unit quaternions: Modeling and simulation. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 28, 2020, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6525781/>
- Santos Peñas, M., López, V., Santos, M., & Madrid, T. (2010). Intelligent fuzzy controller of a quadrotor Early prediction of depressive disorders based on complexity analysis and machine learning View project PriceProfor View project Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor Francisco Morata. *Ieeexplore.Ieee.Org*. <https://doi.org/10.1109/ISKE.2010.5680812>
- Shao, X., Liu, J., Cao, H., Shen, C., & Wang, H. (2018). Robust dynamic surface trajectory tracking control for a quadrotor UAV via extended state observer. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(7), 2700–2719. <https://doi.org/10.1002/rnc.4044>
- Xu, R., Control, U. O.-I. C. on D. and, & 2006, undefined. (n.d.). Sliding mode control of a quadrotor helicopter. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved October 27, 2020, from [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4177181/?casa\\_token=1V4tu\\_LTXrQAAAAA:IoPm4aZbbWy4QbC\\_5Y4uyMGIQl\\_LnMks1jDd65FezifDHMCYwaBliwZo-\\_PNIAyBmWicYH7X\\_A](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4177181/?casa_token=1V4tu_LTXrQAAAAA:IoPm4aZbbWy4QbC_5Y4uyMGIQl_LnMks1jDd65FezifDHMCYwaBliwZo-_PNIAyBmWicYH7X_A)