

3. Quadrotorların Hareketleri

Quadrotorların 4 temel hareketi vardır bunlar; yükselme ve alçalma (throttle), ekseninde dönme (yaw), yaslanma-yatış (roll), yunuslamadır(pitch). Dört rotorun aynı anda hareket edişi yükselme ve alçalma hareketlerini oluşturur motorların hızlarının artmasıyla oluşan hava akımı ihayı kaldırırken motorların yavaşlamasıyla iha inişe geçer. Havada bulunan ihadaki 2 çapraz rotorun diğer rotora göre hızlanmasıyla dönüş hareketi elde edilir. İHA'nın soldaki 2 pervanesinin, diğer pervanelere göre daha çok hızlanmasıyla aracın sol kısmı yükselir ve bu sayede sağa yatış, sağdaki 2 pervanesinin hızlanmasıyla ise aracında sağ kısmı yükselerek sola yatış hareketleri elde edilir. İHA'nın arka 2 pervanesinin öndeki 2 pervaneye göre hızlarını artırmasıyla aracın arka tarafı havalanır ve ileriye gitme hareketi elde edilir tersi harekette de geri gitme hareketi elde edilir.

Dört temel hareket birbirleriyle kombin hale getirerek de hareket elde edilebilir. Örneğin; ihamız havalanırken (throttle), kendi eksenini etrafında dönüş(yaw) yaparak bir dizi sahnesini çekebilir yada tehlike arz etmeyecek yüksekliğe ulaştığında ileri yönde hareket(pitch) ederek yükselir(throttle) yada belirli bir yükseklikteyken cihazımız bir nesneye odaklanarak etrafında dönüş yapabilir; bu hareketle ile hem yaslanma(roll) hem de dönüş (yaw) gerçekleşmiş olur buna yükselme hareketi de(throttle) dahil olabilir. Bu hareketlerin kombinasyonu quadrotorun kabiliyetine göre değişmektedir. Biz bu projemizde DJI'nın Mavic Pro modelini kullandık.

3.1. Yükselme ve Alçalma Hareketleri(Throttle)

Quadrotorun ilk kalkış anında pervanelerin yaptığı hareket kaldırma hareketidir ve dronenun en çok harcağı güç kalkış anıdır. Motorlar cihazın kalkışı için diğer hareketlere göre daha çok dönüş yaparlar. 4 rotor aynı hızda hızla çalışır.



Şekil 2: Drone Kalkış ve İnişi

ifadesiyle tanımlanır, buradaki b itme faktörü sabit bir değerdir. Quadkoptere pervanelerden uygulanan toplam kaldırma kuvveti,

$$F_T = b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (4.5)$$

ve bu kuvvetten dolayı oluşan ivme,

$$a_F = \frac{b}{m} \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (4.6)$$

şeklindedir. a_F ivmesinin A çerçevesine göre ifadesi $R a_F$ olarak toplam ivme ifadesi, kuvvet dengesinden,

$$\dot{v} = -g e_z + R e_z a_F \quad (4.7)$$

şeklinde gösterilebilir. Buradaki $e_z = [0 \ 0 \ 1]^T$ şeklinde bir vektör olup z eksenindeki büyüklüğü ifade etmek için kullanılır. R, rotasyon matrisi; C, Kosinüs'ü ve S de Sinüs'ü ifade etmek üzere aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır,

$$R = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & C\psi S\theta S\phi - S\psi C\phi & C\psi S\theta S\phi + S\psi C\phi \\ S\psi C\phi & S\psi S\theta S\phi + C\psi C\phi & S\psi S\theta C\phi - C\psi S\phi \\ -S\theta & C\theta S\phi & C\theta C\phi \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Katı cismin açısal hızıyla ilgili olarak, rotasyon matrisi ve gövde çerçevesinin açısal hızları arası ilişki şu şekilde tanımlanmıştır,

$$\dot{R} = R S(\omega) \quad (4.9)$$

buradaki ω , gövde çerçevesinin açısal hız vektörü olup,

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

şeklindedir. $S(\omega)$ ise, ω ifadesinin 3x3 eksi bakışlı (skew symmetric) matrisidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Kendi eksenini etrafında hızlı bir şekilde dönen katı cisimlerin dönme eksenini, yerçekimi doğrultusundaki düşey eksen etrafında döner ve bir dönme konisi oluşturur. Döner cisme etki eden dönme momentinin cismin dönme ekseninin doğrultusunu değiştirmesinden bir yalpalama hareketi (presesyon hareketi) ortaya çıkar. Quadkopterin bütün dönme hareketlerinde oluşan bu etkiye cayroskopik etki denir. Quadkopter, eksenleri etrafında ω açısal hızlarıyla döndüğü için $L_{x,y,z}$ açısal momentumları oluşur ve şu şekilde ifade edilir.

$$L_{x,y,z} = I\omega \quad (4.12)$$

Burada 3x3 bir matris olan I, quadrotor gövdesinin x, y ve z eksenlerindeki ataletidir,

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Tork, açısal momentumun zamana göre değişimi olduğundan, quadkopterin açısal hızlarından dolayı oluşan tork,

$$\tau_B = \dot{L} \quad (4.14)$$

(4.12) ve (4.14) denklemlerinden,

$$\tau_B = \omega \times I\omega + I\dot{\omega} \quad (4.15)$$

Burada “x” vektörsel çarpım işlemi olarak kullanılmıştır. Quadkopterin gövdesinin ve pervanelerin kendi eksenleri etrafında dönmesinden dolayı ortaya çıkan cayroskopik tork şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\tau_G = \sum_{i=1}^4 J(\omega \times e_z)\Omega_i(-1)^i \quad (4.16)$$

Burada J, bir adet rotorun ataletini simgelemektedir. Şekil 8’de görülen ve her bir pervanenin yaptığı dönme hareketinden dolayı oluşan kaldırma kuvvetleri, quadrotora etkileyen torklar oluşturur. Bir eksen boyunca uzanan tork, diğer eksenlerde bulunan pervanelerin oluşturduğu torkların farkına eşittir. x, y ve z eksenleri boyunca, pervanelerin sebep olduğu torklar şöyledir,

$$\tau_a = \begin{bmatrix} lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\ddot{y} = (\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (4.36)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos\theta \cos\phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (4.37)$$

5. Quadrotorun Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde 4. bölümde çıkartılan Quadrotor modeline eklenecek olan kontrolcülerle Quadrotor kontrolü yapılması amaçlanmıştır. Bu kontrolcülerini tasarlamak için sistemin girdileri olan (4.28-4.31) denklemleri kullanılmıştır. Quadrotoru hareket ettirecek olan U_1 , U_2 , U_3 ve U_4 girdileri sırasıyla, z eksenindeki hareketi, y eksenindeki hareketi yani yalpalama açısını, x eksenindeki hareketi yani yunuslama açısını ve z eksenini etrafındaki yönelme açısını kontrol eder. Bu girdilere verilmesi gereken sayısal değerler yine bu girdiler üzerinden tasarlanan kontrolcü algoritmalarıyla hesaplanmıştır. U_i girdileri (4.28-4.31) denklemlerinden görüleceği üzere, pervanelerin açısal hızlarıyla elde edilir. Bu açısal hızlar ise motorun dönmesiyle, motorun dönmesi de motora verilen elektrikle sağlanır. Daha sonraki bölümlerde anlatılacak olan gerçek sistem yapısından dolayı kontrolcü tasarımında direkt motorların dönme açıları yerine U_i girdileri üzerinden kontrol sağlanmaktadır. Bu bölümde modeli kontrol etmek için PID kontrolcüler tasarlanmıştır, PID kontrolcü kullanılmasının amacı modelden elde edilebilecek bir kontrol algoritması olması ve sistemi üst sel olarak kararlı hale getirmesidir. Tasarlanan PID kontrolcülerin algoritmaları bulanıklaştırılarak bulanık PID kontrolcü tasarlanmıştır. Bulanık PID kontrolcü tasarlanmasının amacı başta, bu tür kontrolcülerin modelden bağımsız olarak yapılabilmesidir. Ayrıca bulanık PID kontrolcü dilsel kurallara dayandığından kontrol sürecinin anlaşılması daha kolaydır.

5.1 PID Kontrol

Önce Quadrotorun konumunu kontrol edecek PID kontrolcü, daha sonra bundan bağımsız olarak Quadrotorun öteleme hareketlerini kontrol eden bir PID kontrolcü üzerinde çalışılmıştır.

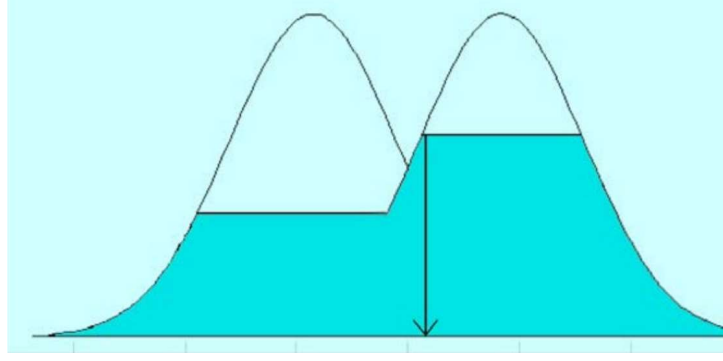
5.1.1 Konum Kontrolü

İrtifa Kontrolü: İrtifa kontrolü, denklem (4.37)'den şu şekilde karşımıza çıkar,

$$U_1 = \frac{mg}{\cos\theta \cos\phi} + \frac{m(Kp_z z + Kd_z \dot{z})}{\cos\theta \cos\phi} \quad (5.1)$$

burada, Kp_z , oransal kontrol katsayısı ve Kd_z türevsel kontrol katsayısıdır.

ψ , θ ve Φ Kontrolü: ψ , θ ve Φ kontrolünde, quadrotorun mevcut konumunu koruması ve farklı açısal konumlara ulaşabilmesi için, PID kontrolcüler şu şekilde tasarlanır.



Şekil 13: Eşit alan berraklaştırma yöntemi

Berraklaştırma sonucunda ortaya çıkacak olan sayı, bulanık çıktıyı en iyi ifade edecek şekilde berraklaştırma yapmak gereklidir. Buna göre kontrolcü sürekli olmalı; girişlerdeki küçük değişimler çıkışta büyük bir değişim oluşturmamalıdır. Berraklaştırma algoritması belirli olmalıdır; berraklaştırma sonucu çıkacak olan sayıyı ifade eden işlem süreci açıkça ifade edilmiş olmalıdır. Ayrıca berraklaştırma, akla yatkın olmalıdır; yüksek üyelik derecesi olmalı ve çıkan şeklin yaklaşık olarak ortalarına denk gelmelidir. Basit olmalıdır; algoritma gerçek zamanlı hesaplamalar için yeterince hızlı hesaplanabilir olmalıdır. Tasarlanan kontrolcü için bu kurallara en iyi şekilde uyacak olan “eşit alan” berraklaştırma yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemde bulanık kontrolcü çıktısı sonucu üyelik fonksiyonlarından oluşan şekli, ortasından iki eşit alana bölen bir doğrunun gösterdiği sayısal değer kontrolcü çıktısı olarak kullanılır. Şekil 13’te iki eşit alana bölünmüş şekilden sayısal değer elde edilmesi görülmektedir.

5.2.2 Bulanık PID Kontrol No: 2

İkinci aşama olarak θ ve Φ açılarının istenen değerleri de bulanık kontrolcüyle elde edilmiştir. Aşağıdaki şekilde kontrolçüler ve kontrolçülerin girdileri ve çıktıları görülmektedir. Bulanık PID Kontrol No: 1’de, θ ve Φ açılarının değerleri klasik kontrolle bulunuyorken yeni kontrolcüde bu değerler de bulanık kontrolcüyle elde edilmiştir. Şekil 14’te görünen koyu renkli bulanık kontrolçüler sisteme ikinci aşamada eklenen, daha önce klasik kontrolçülerin yaptığı görevi yerine getiren kontrolçülerdir. Ancak (5.11) ve (5.13) denklemlerinin karmaşık yapısından dolayı $\dot{\varphi}$ ve $\dot{\theta}$ açısal hızlarını elde eden kontrolçüler, bulanık kontrolcüye çevrilmemiştir.