

MEMS Sensör Jiroskoplarının İnsansız Hava Araçlarında Kullanımı

Berat Buğra Kodal¹, Emin Konukoğlu², Görkem Aktaş³, Yücel Aydın⁴

^{1,2,3,4} Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

kodal21@itu.edu.tr, konukoğlu17@itu.edu.tr, aktasg17@itu.edu.tr, aydinyu@itu.edu.tr

Özetçe

İnsansız hava araçları ulaşım alanından askeri sektöre kadar geniş bir alan kapsayan ve çok rağbet gören bir konudur. Otomasyon ve verim olarak çığır açabilecek bir icat olması sebebiyle bu yönelim anlaşılabilir. Bu konuda dikkat çekmek istediğimiz konu ise drone (İHA-İnsansız Hava Araçları'nın) gerçekten otonom çalışabilmesi için en gerekli parça olan sensörlerdir. Sensörler aracın kendi çevresini ve yaptığı hareketlerin kendi altyapısı ya da eğer mevcutsa operatörü tarafından algılanmasını sağlar. Bu sensörlerden hareket için en önemli olan jiroskopun anlaşılmasını sağlamak ve bu konuda fikir yaratımına yardımcı olmak bu metnin temel amacıdır.

Abstract

Unmanned aerial vehicles are a very popular subject covering a wide area from the field of transportation to the military sector. This trend is understandable as it is a breakthrough invention in terms of automation and efficiency. The issue we want to draw attention to in this regard is the sensors, which are the most necessary parts for unmanned aerial vehicles to work truly autonomously. The sensors ensure that the vehicle's environment and movements are detected by its own infrastructure or, if available, by the operator. The main purpose of this text is to provide an understanding of the gyroscope, which is the most important for movement from these sensors, and to help create ideas on this subject

1.Giriş

1.1 MEMS Sensörleri ve Jiroskoplar

Mikro elektro-mekanik (MEMS) sensörleri ucuz ve yüksek performanslı parçalardır.

Elektronik sistemlerde ulaşım ve telekomünikasyon gibi birçok alanda kullanılır ve kullanılan sensörlerde kristal sensörlerden jiroskoplara kadar çeşitlilik gösterir [1].

MEMS jiroskopları ise, açısal hızı ölçmek için kullanılan bir tür atalet sensörüdür.

Geleneksel jiroskoplarla karşılaştırıldığında, MEMS jiroskoplarının birçok avantajları vardır. Küçük boyut, hafiflik, düşük maliyet ve yüksek hassasiyet gibi özelliklere sahip olup denge ve kontrol gibi çeşitli alanlarda kullanılır [2].

Bir jiroskopun temel çalışması, izole bir dönen kütleli tutma eğiliminde olmasıdır. Atalet referans çerçevesine göre açısal konumu ve sabit bir harici tork olduğunda kütleyle uygulanır, dönme eksenine bir harekete uğrar ve torkun yönünde sabit bir açısal hızda hareket gerçekleştirir.

$$C_y = -I\Omega\omega_z \quad (1)$$

$$C_z = I\Omega\omega_y \quad (2)$$

Yukarıdaki formül jiroskobun çalışmasını gözlemlemek için kullanılabilir. Burada C üretilen torku, I momentumu, Ω açısal dönüş hızını, ω ise devrim hızını ifade etmektedir [3].

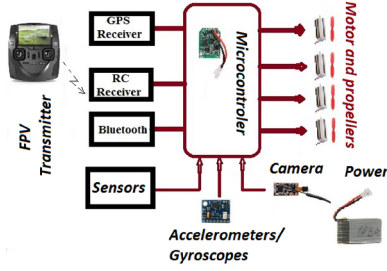
2.İHA (Drone)' lar Hakkında

İnsansız hava araçları operatörlü veya otonom olarak uçan, ölümcül olan veya olmayan malzemeleri taşıyan, drone olarak da adlandırılan araçlardır. Balistik veya yarı balistik araç, seyir füzeleri, topçu mermileri, torpidolar, mayınlar ve uydular drone olarak kabul edilemez. İnsansız hava araçları insanların bulunmasının zor ya da imkânsız olduğu yerlerde kullanılması amaçlanmasına rağmen günümüzde kullanım alanları birçok alana yayılmıştır [4].

Drone üretimindeki gelişmeler, navigasyon, uzaktan kontrol yetenekleri ve güç depolama sistemleri gibi çok çeşitli amaçlar için insansız hava araçlarının geliştirilmesini mümkün kılmıştır [5].

Drone genel olarak iki sistem sayesinde çalışır. Bunlardan ilki hareket sistemidir ve drone dış yapısının çoğunu kapsar. Pervane, kol sayısı, şasi gibi parçalardan oluşan hareket sistemi drone kullanım amacına göre tasarlanır [6].

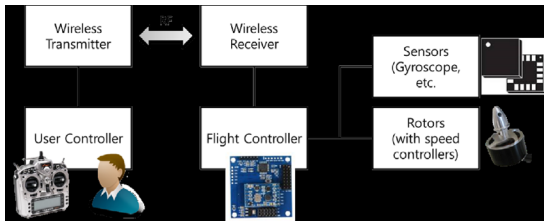
Drone yapısının iç kısmını oluşturan parçalar ise kontrol sistemidir. Bu kısımda drone içerisinde enerji, kontrol ve iletişim alt sistemleri bulunur. Bu parçalarda hareket sistemi aksine fazla değişim görülmeyebilir [6].



Şekil 1: Bir drone kontrol sistemi [7]

2.1 Drone Kontrolünde Jiroskopların Kullanımı

Drone uçuş kontrol sistemlerini güçlendirmek için hafif ve ucuz MEMS jiroskopları kullanılmaktadır. MEMS jiroskopları bütünleşmiş devrelere dahil olarak tasarlanmıştır. Jiroskop açığa bağlı olarak eğim, yönlendirme ve dönüş şeklini ölçer. Bu nedenle, uçuş kontrolü için temel bir sensördür [8].



Şekil 2: Jiroskobun drone sistemine dahil olduğu nokta [8]

Jiroskoplar drone sistemlerinde birçok görevi gerçekleştirmek için kullanılabilir. Bu görevler arasında konum bulma, yön bulma, hareket açısı bulma gibi görevler bulunur [9].

2.2 İnsansız Hava Araçlarında PID Kontrolörlerin Kullanımı

Orantılı integral-türev kontrolörler ölçülen bir süreç değişkeni ile istenen bir ayar noktası arasındaki fark olarak bir hata değeri hesaplayan, bir kontrol döngüsü geri besleme mekanizmasıdır. Kontrolör, bağımsız değişken kullanılarak süreci ayarlar ve böylece hatayı en aza indirir [10].

PID kontrolörler drone sistemlerinde ölçümleri kolaylaştırır ve değişkenlerin kolay değiştirilebilmesini sağlar. Yükseklik ölçümlerinin yapılmasına ve bu ölçümlerin dönüm hareketleri ve açılı hareketlerle karşılaştırılmasında kullanılır [11].

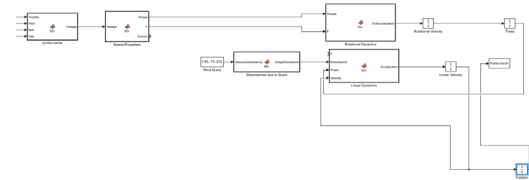
$$U_{1,d} = \begin{cases} mg(1 + K_{tf})z > 0.5m \\ 0.8(r_z - z) - 0.3v_z z \leq 0.5m \end{cases} \quad (3)$$

Bu denklemde, U yükseklik ölçümlerinin, r_z referans yüksekliği, v_z tahmini dikey hız ve z ise tahmini drone yüksekliği olarak alınır. Yüksekliğin ölçümlerinin hata payının bulunmasında kullanılır [11].

3.Simulink Gerçeklenmesi

Bu modelin amacı bir jiroskop kullanılarak bir drone konum kontrolü için gerekli sinyalin üretilmesini sağlamaktır. Bu amaçla Simulink üzerinde bir model oluşturularak jiroskop verisi bir geribesleme yardımı ile sinyali düzenlenmiş ve ardından oluşturulan kontrolörler ile istenilen çıkış elde edilmeye çalışılmıştır.

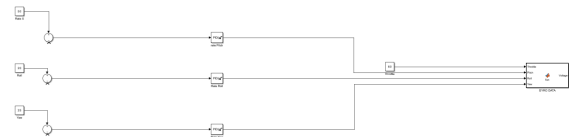
3.1 Drone Modeli



Şekil 3: Simulink ortamında oluşturulmuş drone modeli

Yukarıdaki görselde Simulink ortamında oluşturulmuş ana drone modeli görülmektedir. Bu modelin amacı bir insansız hava aracının sahip olduğu lineer ve dönme dinamiklerini ele alarak drone hareketini tanımlamaktır.

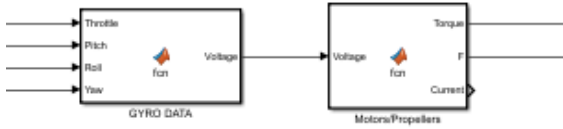
Amacımız drone hareketi için gerekli olan pitch, roll, yaw (konumsal hareketler) ve throttle (açalma/yükselme durumu) değerleri üzerinden motor kontrolü sağlamaktır.



Şekil 4: Pitch, yaw, roll ve throttle girişlerinin simulink üzerinden gösterimi

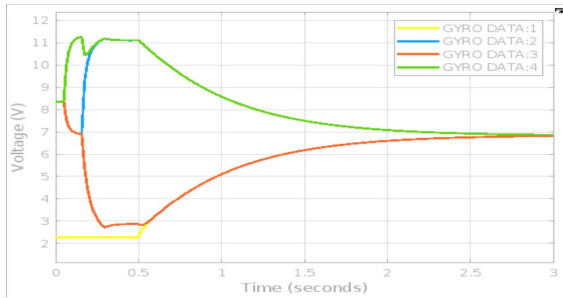
Bahsedilen pitch, yaw, roll ve throttle girişleri yukarıdaki gibi verilmektedir. Örneğin bu görsele göre konum hareketi pitch 50, roll 20 ve yaw 25 kodlu olacak şekilde bir ayarlama istenmektedir. Buradan gelen veriler PID kontrolör aracılığı ile işlenerek GYRO DATA bloğuna eklenmektedir.

Buradaki PID kontrolörlerin amacı hatayı minimize etmek üzerine kurgulanmıştır. İlgili yapılar bloğa dahil olduktan sonra hareketin tamamlanması için ihtiyaç duyulan gerilim verilerini ortaya çıkarmaktadır.



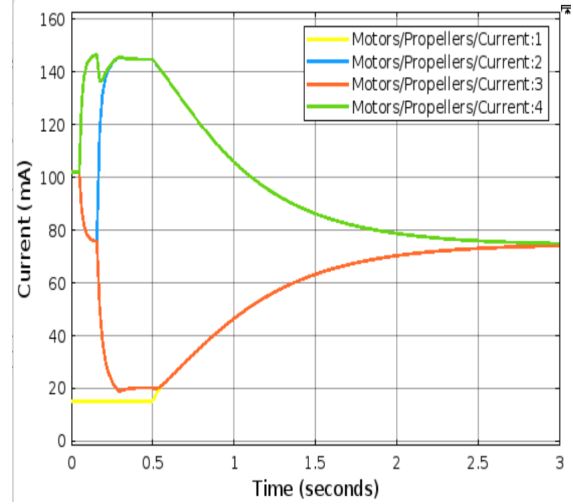
Şekil 5: Genel GYRO Data blok diyagram modeli

Veriler giriş olarak GYRO DATA bloğuna verildikten sonra motorlara doğru olan akışı sistem üzerinden 10 saniyelik bir simülasyon ile izledik.



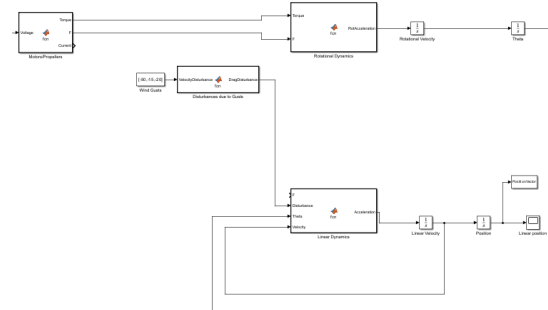
Şekil 6: Gerilim zaman grafiği

Bu grafik GYRO DATA bloğu sonrasında motorların akımını üretecek ve pervanelerin hızını ona göre ayarlayacak olan "Motors/Propellers" bloğuna iletilmektedir. Burada quadcopter örneği olduğu için 4 adet motor bulunmaktadır. 4 adet motor için başlangıçta belirtilen konumları oluşturabilmek adına sisteme dahil edilmesi gereken gerilim değerleri yukarıdaki gibidir. Görülecek olursa sistem yaklaşık 3 saniye sonra istenilen yönü elde ettiği için tüm gerilim çıkışları kendini sabitlemektedir.



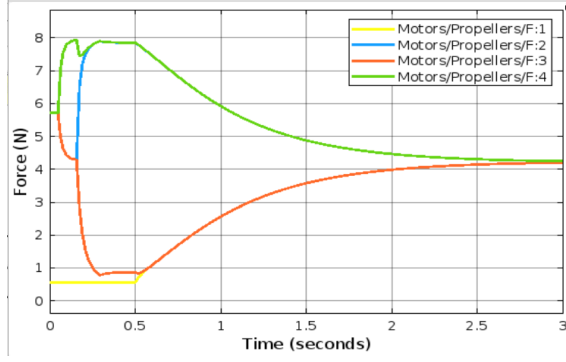
Şekil 7: Motors/Propellers bloğu sonrası çıkan akım değerleri

Bu grafikte de "Motors/Propellers" bloğu sonrası çıkan akım değerleri görülmektedir. Her bir motor için iletilen akım değerleri zamana bağlı şekilde burada temsil edilmiştir.

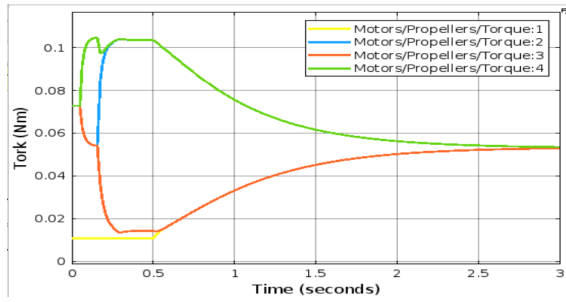


Şekil 8: Bu grafikte de "Motors/Propellers" bloğu sonrası blok diyagramları

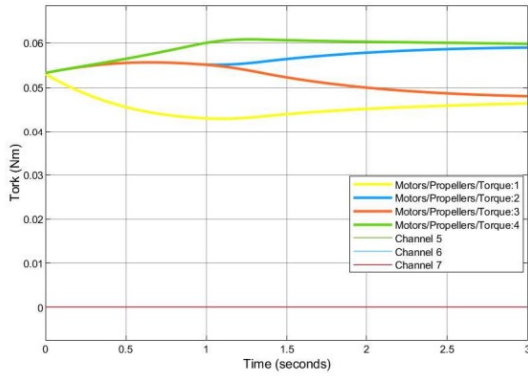
Motorlara ilgili akım değerleri verildikten sonra üretilen tork ve kuvvet değerleri lineer ve dönme hareketlerini tanımlamak için modellenen sisteme verilmektedir. Bu sırada bozucu etki de "Disturbances due to Gusts" bloğu içerisinde verilmiştir.



Şekil 9: Motorların ürettiği kuvvet miktarı zamana bağlı olarak verilmektedir.



Şekil 10: Üretilen tork



Şekil 11: PI-PD Kontrolör altındaki sistemin üretilen tork grafiği

3.2 Jiroskop ve Motor Sonuçları

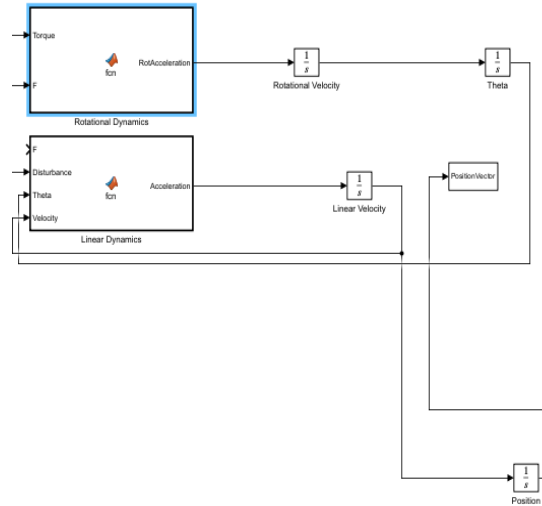
Bu kısma kadar yapılan simülasyonlar ve deneylerin amacı tasarlanan motor ve jiroskop yapılarının doğru çalışıp çalışmadığını tespit etmeye yöneliktir. Burada görülmektedir ki motorlara iletilen akım ve üretilen tork ile kuvvet değerleri beklenen davranışları göstermiştir.

3.3 Bozucu Etkisi

Sisteme rüzgâr gibi dış bir bozucu etkisi verilmiştir. Buradaki amaç drone modelindeki hareketin gerçekliğini artırmaya yöneliktir.



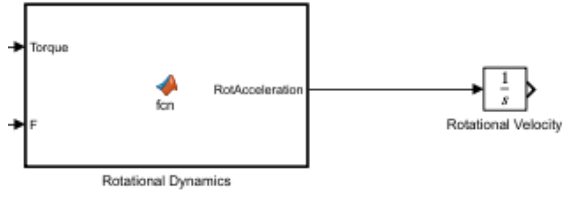
Şekil 12: Bozucu etkisi blok diyagramı



Şekil 13: Lineer ve dönme davranışı blok diyagramı

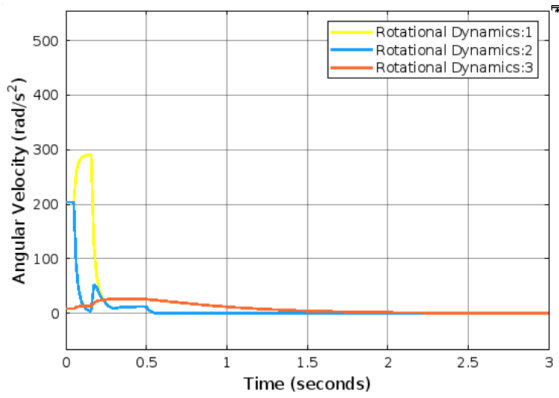
Dış etkiler ve motorun ürettiği kuvvet ile tork işaretleri sisteme dahil edilerek hem lineer davranış hem de dönme davranışı incelenmiştir.

3.4 Dönüş Dinamiği

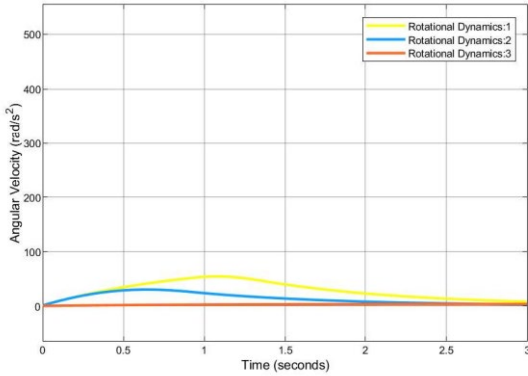


Şekil 14: Dönüş dinamiği blok diyagramı

Buradaki yapıda dönme davranışı modellenmiş ve ardından açısız hız ve konum çıktıları üretilmiştir. “Rotational Dynamics” bloğu aracılığı ile öncelikle açısız ivme elde edilmiştir. Ardından bu işaretin integrali alınarak açısız hız ve sonrasında üretilen işaretin de integrali alınarak açısız konum hesaplanmıştır.



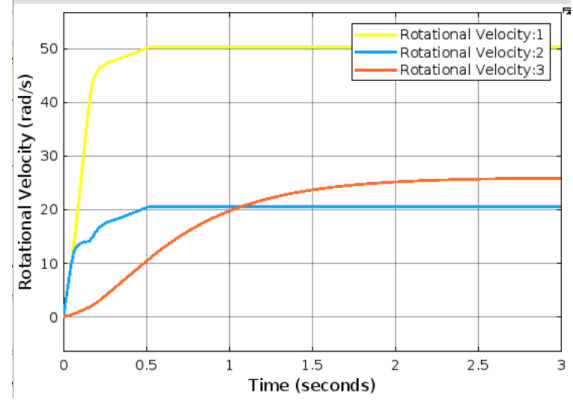
Şekil 15: Açısız ivme izdüşüm grafiği



Şekil 16: PI-PD Kontrolör altındaki sistemin açısız ivme grafiği

Buradaki grafikte koordinat düzlemi içerisindeki drone modelinin her bir eksen üzerindeki açısız ivme izdüşümü bulunmaktadır.

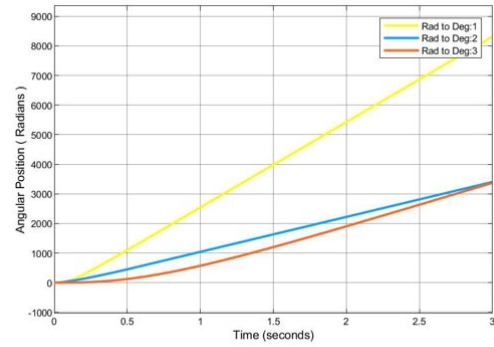
Burada dikkat çekilecek nokta ise konumun oturtulması için zaman bağılı ivme değişiminin yapıyor olmasıdır. Mevcut dengeyi sağlamak için ilgili ivmeler değişmektedir.



Şekil 17: Açısız hız grafiği

Bu grafik ise açısız hızları göstermektedir. Değerlere dikkat edilecek olursa sisteme ilk başta verilen pitch 50, roll 20 ve yaw 25 değerleri görülmektedir. Sistem ilk anında bu değerlerden uzak olmasına karşılık sonrasında bu yönlere gelecek şekilde bir değişim yaşamış ve istenen değerlere sistem çıkışı oturtulmuştur.

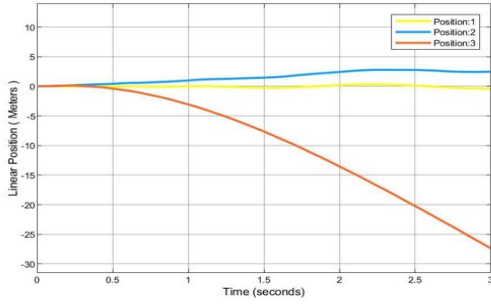
Buradaki yapıda ise yukarıda bahsedilen açısız hız durumunun açısız pozisyon karşılıkları hesaplanmıştır. Buradaki açısız konum çıkışı lineer harekete geri bildirim olacak şekilde düzenlenmiştir.



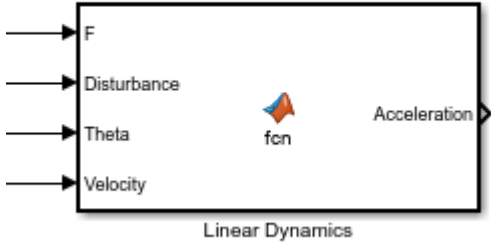
Şekil 18: Açısız durum grafiği

Buradaki grafik yukarıda bahsedilen açısai konum yapısının ihtiyaç duyduğu açısai durumu ifade etmek için oluşturulmuştur. İlgili hareketin sağlanabilmesi için üç eksen üzerindeki konumların ilgili açısai değeri burada ifade edilmektedir.

3.5 Doğrusal Davranış



Şekil 19: Doğrusal davranış grafiği

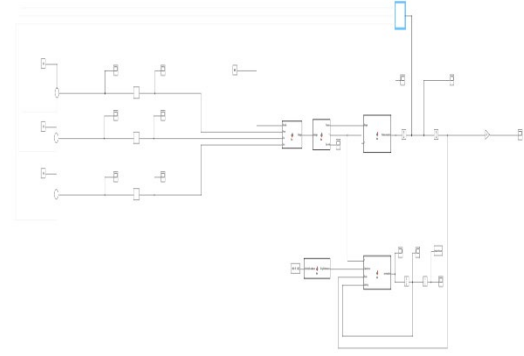


Şekil 20: Lineer dinamik simulink grafiği

Buradaki yapı ise lineer hareketi tanımlamak için oluşturulmuştur. Ardından sol taraftaki grafik doğrusal hareketin zamana bağlı değişimini eksen bazında göstermektedir. Bu şekilde bir hareket sonrasında drone değişimi simüle edilmiştir.

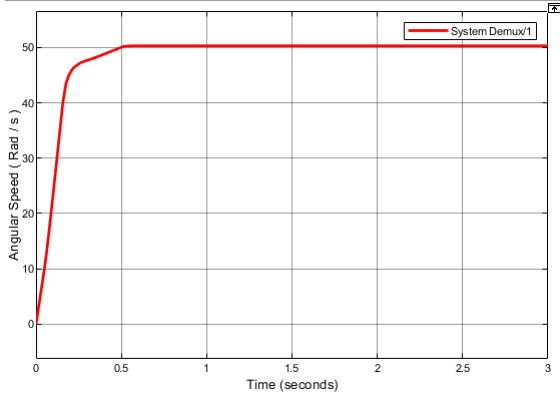
3.6 Geri besleme yapısı

Yukarıda anlatılan yapılar ileri yönlü anlatımı içermekteydi, fakat sistem geri besleme olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bölümde yukarıdaki simülasyon sonuçlarına da etki eden geri besleme yapısı bahsedilecektir.

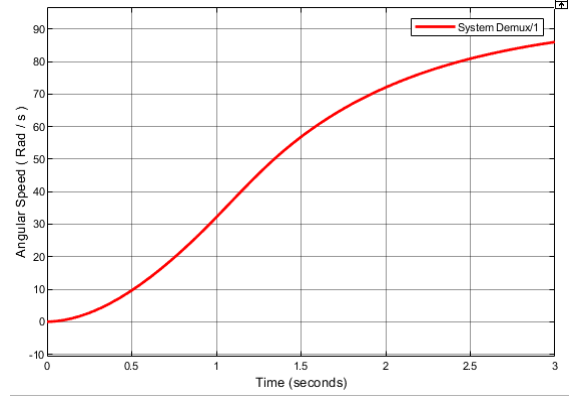


Şekil 21: Geri besleme simulink grafiği

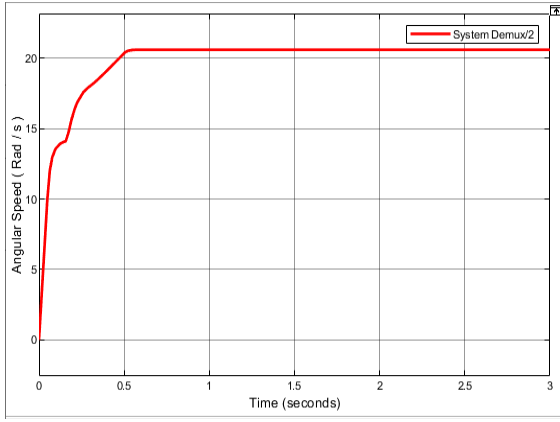
Yukarıdaki yapıdan görüleceği üzere açısai hız çıkıtısı bir demux yardımı ile ilgili girişlere geri besleme olacak şekilde aktarılmaktadır.



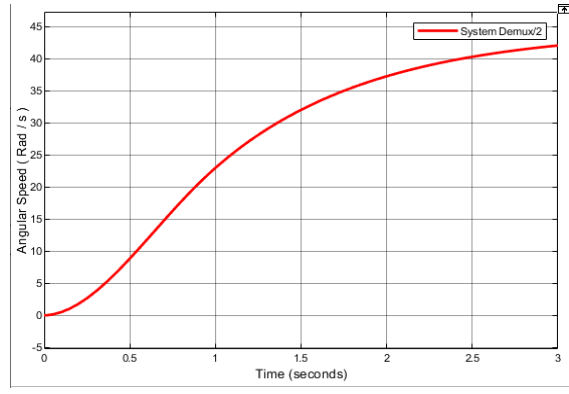
Şekil 22: Demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar



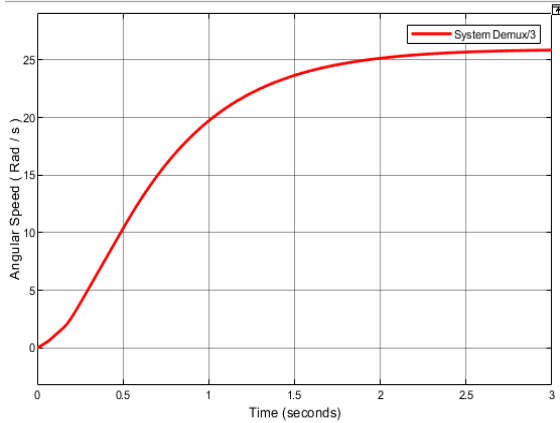
Şekil 25: PI-PD Kontrolör altındaki sistemde demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar



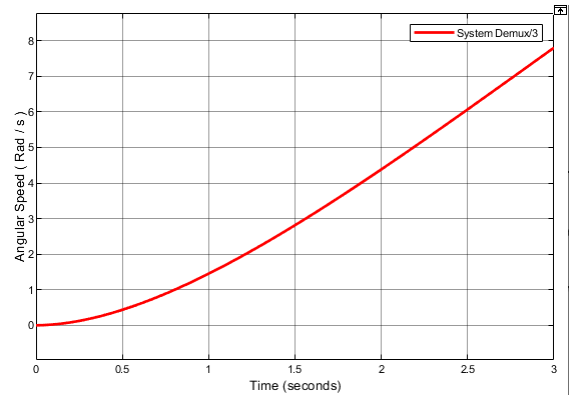
Şekil 23: Demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar



Şekil 26: PI-PD Kontrolör altındaki sistemde demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar

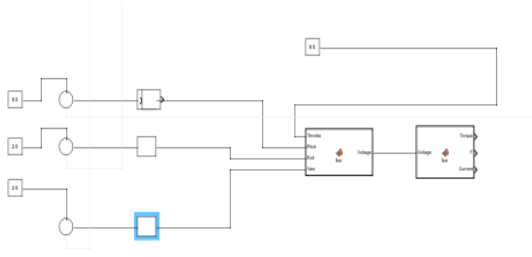


Şekil 24: Demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar



Şekil 27: PI-PD Kontrolör altındaki sistemde demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızlar

Yukarıdaki grafikler demux sonucu ayrıştırılmış açısız hızları göstermektedir. Dikkat edilecek olursa hedeflenen pitch 50, roll 20 ve yaw 25 değerlerine oturacak şekilde ilerlediği görülmektedir. Sistem çıkışı sürekli kontrol edip jiroskopa iletilen referans değerini hatayı minimize edecek şekilde ilettiği için ilgili konum çıktısı sağlanabilmektedir.



Şekil 28: Geri besleme simulink grafiği

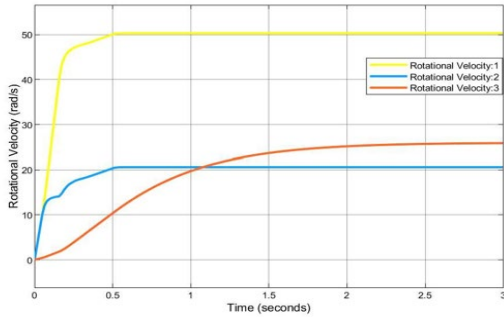
Bu görselde görüleceği üzere istenen referans işaretleri geri beslemeden gelen işaretler ile fark alınarak jiroskopa tekrardan dahil olmaktadır. Her bir yapı için mevcut PID kontrolörler de işareti düzenlemekte ve istenilen değerleri çıkarmaktadır.

4. Deneyler

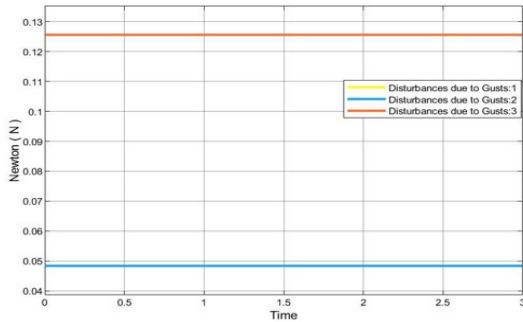
4.1 Bozucu Etki Değişimi

Bu deneyler esnasında pitch 50, roll 20 ve yaw 25 olacak şekilde bir referans uygulanmıştır ve simülasyonlar 5 saniye olarak yapılmıştır.

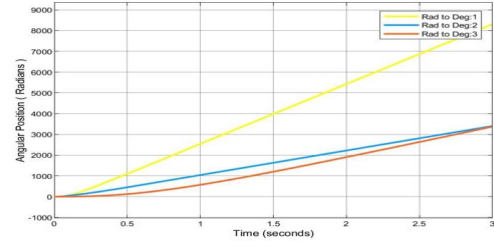
Bozucu Etki [2,2,2] için



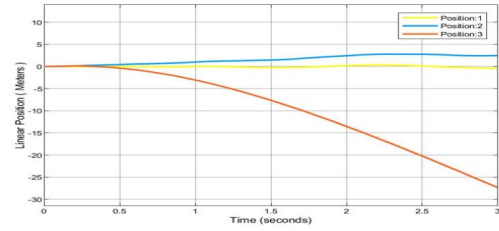
Şekil 29: Açısal Hız



Şekil 30: Bozucu çıkışı

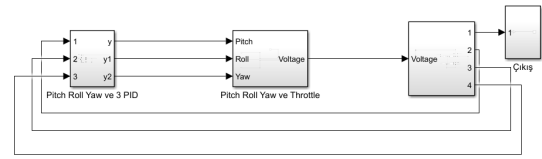


Şekil 31: Açısal Konum Grafiği



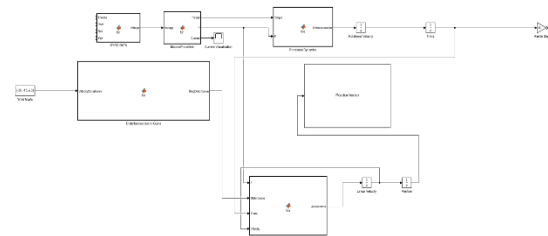
Şekil 32: Lineer Pozisyon

5. Sonuçlar



Şekil 33: Sistemin simulink gerçekleştirilmesi

Sistemimizin tam halinin simulink üzerinden gösterimi şekildedeki gibidir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere öncelikle sistemimizin referans olarak bir pitch roll yaw ve throttle girişi vardır ardından bu girişin kontrolünü sağlayan 3 adet PID kontrolör ve daha sonrasında yukarıdaki örneklerde verilmiş olan kontrolör etkisindeki Subsystemlardan oluştuğunu söyleyebiliriz.

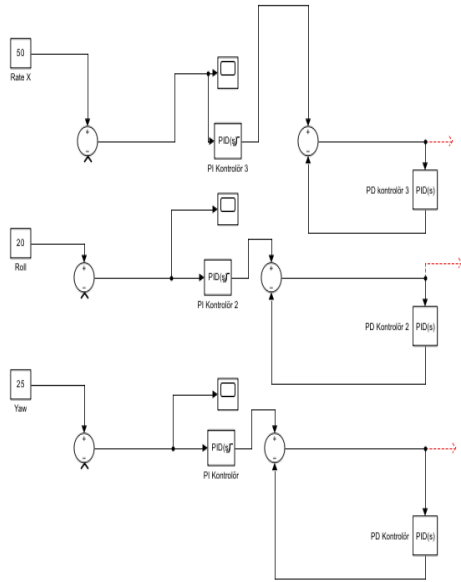


Şekil 34: Simulink Blok Diyagramının İçeriği

Aynı zamanda sistemde pitch, roll ve yaw kısmında 3 adet birbirinden farklı katsayılarla sahip PID kullanılmıştır. Ayrıca modelde PID yerine katsayılar ile oynanarak PI kontrolörü denenmiş ve sistemin başarılı bir şekilde kontrolü sağlanmıştır. Aynı zamanda makalenin belli kısımlarında PID Kontrolörün PI-PD Kontrolör ile karşılaştırılması yapılmıştır

Makalemizde genel amacımız insansız hava araçlarında kullanılan kontrol sistemlerini ve etkilerini incelemek ve tanıtmaktır. Jiroskop bu araçların hareket kontrolü için en önemli sensörlerden biri olduğu için bir drone tasarlanmas aşamasında jiroskobun ne amaçla kullanıldığının bilinmesi gereklidir.

Bu drone sistemi hakkında verilen bilgiler ile ileride daha verimli drone kullanımının yapılabilmesi bu metinden beklenen ana kazançtır.



Şekil 35: Genel PI-PD görüntüsü

6.Kaynakça

- [1] Dunzhu Xia, C. Y. (2014). The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology. *Sensors*, 1354-1469.
- [2] George IPATE, G. V. (2015). RESEARCH ON THE USE OF DRONES IN PRECISION AGRICULTURE. *U.P.B. Sci. Bull.*, 263-274.
- [3] Hakan UCGUN, I. O. (2022). Test Platform and Graphical User Interface Design for Vertical Take-Off and Landing Drones. *ROMANIAN JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 350-368.

- [4] Huikai Xie, G. K. (2003). Integrated Microelectromechanical Gyroscope. *JOURNAL OF AEROSPACE ENGINEERING*, 65-75.
- [5] M. Hassanalian, A. A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 99-131.
- [6] Mohamed Okasha, J. K. (2022). Design and Experimental Comparison of PID, LQR and MPC Stabilizing Controllers for Parrot Mambo Mini-Drone. *Aerospace*, 298-318.
- [7] Piotr Kardasz, J. D. (2016). Drones and Possibilities of Their Using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 784-791.
- [8] Vittorio M. N. Passaro, A. C. (2017). Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective. *Sensors*, 1-22.
- [9] Vitul Varshney, M. W. (2014). PID based Stabilization of Gesture Controlled Drones using HIL Simulation. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 222-225.
- [10] Yunmok Son, H. S. (2015). Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors. *USENIX Security Symposium* (s. 881-896). Washington, D.C.: USENIX Association.
- [11] YUNMOK SON, J. N. (2018). GyrosFinger: Fingerprinting Drones for Location Tracking Based on the Outputs of MEMS Gyroscopes. *ACM Transactions on Privacy and Security*, 10-25.