

Sabit Kanat Hava Araçları İçin Döngüde Donanım Benzetim Yöntemi ile Otopilot Sistemi Geliştirilmesi

Onur Baki Ertin¹, Ünver Kaynak², Coşku Kasnakoğlu¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara
{bertin,kasnakoglu}@etu.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara
ukaynak@etu.edu.tr

Özetçe

İnsansız hava araçları için otopilot sistemi geliştirme sürecinin en önemli kısmı uçuş testleridir. Uçuş testleri; maliyetli, zor ve bazen tehlikeli olabilen testlerdir. Ayrıca sık tekrarlı testler olmadıkları için geliştirme sürecinin de yavaşlamasına neden olurlar. Bu noktada araştırmacılar benzetim yazılımlarından faydalanmaktadır.

Otopilot sisteminden donanımsal bileşenler katılarak oluşturulmuş bir benzetim döngüsü, tamamen benzetimsel bileşenlerden oluşan bir döngüye göre çok daha gerçekçi olacak ve gerçeği ile değiştirilen her benzetimsel bileşen için benzetimlerin doğruluğu daha da artacaktır. Bu çalışmada, sabit kanatlı bir insansız hava aracı için otopilot sistemi geliştirme sürecinde oluşturulmuş döngüde donanım benzetim sistemi ve bu sistemden faydalanılarak oluşturulmuş örnek bir otopilot sisteminin tasarımı, bileşenleri ve işleyişi üzerinde durulmaktadır.

1. Giriş

Otopilot sistemleri, hava araçlarında insan müdahalesi olmadan veya bu müdahaleyi minimum seviyede tutarak uçuşun sürdürülebilirliğini sağlayan sistemlerin genel adıdır. Tarihte bilinen ilk otopilot sistemi 1912 yılında Sperry Şirketi tarafından üretilmiştir. Bu sistem gemilerdeki jiroskopların küçültülmüş bir türevi sayesinde uçağı dengede tutabilmektedir.

Otopilot kapalı döngü bir kontrol sistemidir, durum gözleyicisi ve kontrolcü bu sistemi oluşturan başlıca iki bileşendirler [1]. Hızla ucuzlamaları, küçülmeleri ve hafif yapıları sayesinde mikro elektromekanik algılayıcı sistemleri günümüz otopilot sistemlerinin çoğunda durum gözleyici görevi için vazgeçilmez hale gelmişlerdir. Özellikle jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre gibi algılayıcıların bir araya gelmesiyle oluşan ataletsel ölçüm birimi ile bir küresel konumlama sistemi alıcı cihazının bir araya gelmesi, uçağın birçok durum değişkenini ölçülebilir hale gelmektedir.

Otopilot sisteminin diğer önemli bileşeni olan kontrolcü ise temel olarak durum gözleyiciden aldığı bilgiyi üzerinde programlı kontrol yazılımına göre işleyip eyleyicileri harekete geçirerek kontrol yüzeylerinde değişiklik yapabilen yapıdır.

En önemli görevi kontrol algoritmasını yürütmek olsa da çoğu zaman kontrolcünün tek görevi bu değildir. Algılayıcılarda olduğu gibi kontrolcü donanımları da hızla ucuzlamakta, hafiflemekte ve güçlenmektedirler. Hızlanan kontrolcüler sayesinde tek bir birim hem algılayıcı ünitesinin bir parçası gibi davranıp hem algılayıcı verilerinden gürültüleri ayırıştırıp gerekli hesaplamaları yaparak kullanışlı veriler elde edilmesini sağlayabilir hem de yer kontrol merkezi ile gerekli veri alışverişi işlemlerini yürütebilir.

Otopilot sistemi geliştirme sürecindeki uçuş testlerinde ortaya çıkabilecek hata ve zorlukların büyük bölümü uçuş testi öncesi yapılan benzetimlerle giderilebilir. Özellikle benzetim döngüsüne donanımların dahil edildiği döngüde donanım benzetimler ile benzetim güvenilirlikleri çok daha üst seviyelere çıkartılabilir.

Döngüde donanım benzetim tekniğinin ilk ortaya çıkışı da bir uçuş benzetimi için olmuştur. 1929 yılında üretilen bir pilot eğitim sistemi olan Linktrainer'da gerçek uçak denetim donanımları bulunduran bir uçak kokpiti, elektrikli ve hidrolik eyleyiciler üzerine yerleştirilmiş ve pilot tarafından verilen kontrollerin analog benzetimci yardımıyla gerçek uçak manevralarına benzer şekilde kokpiti hareket ettirmesi sağlanmıştır [2].

Gelişen teknolojiyle birlikte çok daha karmaşık sistemlerin modellenebildiği bilgisayarlar analog benzetimcilerin yerini almış ve döngü donanım benzetimlerinin kullanımı hızlı bir artış göstermiştir. Bugün füze güdüm sistemlerinden, yüksek manevra kabiliyetli uçaklara, araçların fren ve süspansiyon sistemlerinden robotik uygulamalarına kadar birçok farklı sistemin geliştirme çalışmaları döngüde donanım benzetim sistemleri ile yapılmaktadır [3-4].

Döngüde donanım benzetim tekniğini normal bilgisayar benzetimlerinden ayıran temel fark benzetimi yapılan sisteme ait bir veya birden fazla donanımsal bileşenin benzetim döngüsüne katılıyor olmasıdır [5]. Örneğin matematiksel modeli ortaya konmakta zorlanılan bir sistem donanımını doğrudan benzetim döngüsü içine katmak benzetimin güvenilirliğini oldukça arttıracaktır.

Hava araçları, füzeler, jet uçakları gibi testleri oldukça zor sistemler üzerinde laboratuvar ortamında çalışma şansı veren döngüde donanım benzetim tekniği, güvenlik, maliyet, zaman

gibi birçok konuda araştırmacılara büyük avantaj sağlamaktadır.

Benzetimi yapılacak sistemin kullanacağı matematiksel model döngü donanım benzetim sisteminin belki de en can alıcı noktasıdır. Sistem ile yapılan testlerin doğruluğu ve bu sistem kullanılarak programlanmış gömülü kontrolcülerin gerçek uçuş testlerinde gösterecekleri başarı kullanılan uçuş modelinin gerçekçiliği ile doğru orantılıdır.

Uçuş dinamiklerinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle gerçekçi bir uçuş modeli oluşturmak son derece zordur. Sistemdeki uçağın değiştirilmesi ise tekrar yeni bir model oluşturmayı gerektirecektir. Gerçekçi bir uçuş benzetimi için uçuş dinamiklerinin yanında hava olayları da yüksek doğrulukla modellenmelidir. Uçuşla ilgili modellere ait bu karmaşık yapı, benzetim kısmı için profesyonel bir uçuş benzetim yazılımını sisteme dâhil etme gerekliliği doğurmuştur. Profesyonel bir benzetim yazılımı ile uçuş modelleri için vakit harcamadan kontrolcü tasarımı kısmına geçilebilir. Ayrıca hazır bir yazılımın kullanılması çok daha esnek bir döngüde donanım benzetim sisteminin oluşturulmasını sağlar. Bu sebeplerle akademik çalışmalarda ve endüstride yaygın olarak kullanılan Xplane 10 adlı uçuş benzetim yazılımı döngüye dahil edilmiştir ve tüm sistem bu yazılım etrafında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan sistem sayesinde uçuş kontrol yazılımları doğrudan donanımsal gömülü sistem üzerinde geliştirilebilmekte, benzetim ortamında test edilebilmekte ve kolaylıkla tam donanımsal bir otopilot sistemine uygulanabilmektedirler.

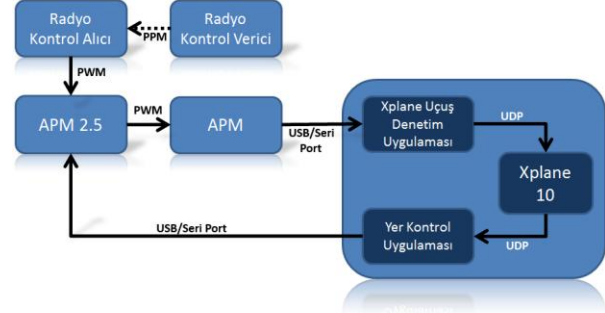
Çalışmanın ilk kısmında benzetimsel olmayan bir kontrolcü donanımı benzetim döngüsü içine alınmış ve bu kart üzerinde geliştirilen otomatik uçuş yapısının başarımı benzetim ortamında incelenerek yapı son haline getirilmiştir. Geliştirilen bu yapı çalışmanın ikinci kısmında tam donanımsal bir otopilot sistemine uygulanmış ve gerçekleştirilen uçuş testlerinde elde edilen sonuçlar ilk kısımda elde edilen döngüde donanım benzetim sistemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu bildiride destekli uçuş (Fly-by-wire) adı ile bilinen uçuş modu üzerinden sistemin gelişimi incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu mod altında uçuştaki uçak, kullanıcı tarafından bildirilen yalpa ve yunuslama açısı değerlerine otomatik olarak yerleşmektedir. Oluşturulan sistem ile çok farklı otonom uçuş modları geliştirilebilmek mümkündür. Bu bildiride, geliştirilen modlardan sadece birini kapsamakta ve oluşturulan diğer yapılar bildiride yer almamaktadırlar. Oluşan otopilot yapısı küçük boyutlu radyo kontrollü bir hava aracına uygulanacağından benzetimde de benzer özellikler gösteren bir model üzerinde çalışılmaktadır.

2. Döngüde Kontrolcü Donanımı İle Benzetim

Çalışmanın bu aşamasında sadece kontrolcü donanımının benzetim döngüsüne dâhil olduğu bir yapı kurulmuştur. Uçuş, benzetim yazılımında sürerken; uçuşa ait veriler geliştirilen bir arayüz yazılımı vasıtasıyla seri port üzerinden geri besleme olarak kontrolcü kartına iletilmektedirler. Kontrolcü üzerinde koşan yazılım tarafından; radyo kontrol alıcısından ve benzetim yazılımından gelen verilere göre oluşturulan çıkışlar ikinci bir kontrolcü kartına iletilir. İkinci kontrolcü, aldığı girişler ile benzetimdeki aracın kontrol yüzeylerini kontrol etmek ve gerçek bir aracın kontrol yüzeylerine bağlı servo

motorları sürmek üzere kodlanmıştır. İkinci kontrolcünden gelen uçuş denetim komutları seri port üzerinden bir arayüz uygulamasına aktarılır. Bu uygulama gelen verileri işleyip uçuş benzetim yazılımına uygun formata getirir ve ağ üzerinden uçuş benzetim yazılımına gönderir. Sistem bileşenlerini ve bağlantılarını gösteren blok şeması Şekil 1’de görülebilir.



Şekil 1: Döngüde kontrolcü donanımı ile benzetim sistemi blok şeması.

2.1. Sistem Donanımları

Sistem iki adet donanımsal kontrolcü kartı, benzetim yazılımı ve arayüz yazılımların koştugu bilgisayar, servo motorlar, radyo kontrol alıcısı ve vericisi bileşenlerinden meydana gelmektedir. Servo motorlar benzetim döngüsü içine katılmamaktadırlar. Servoların kullanım amacı, gömülü sistem kontrol yüzeyi çıkışlarının fiziksel olarak doğrulanabilmesi ve benzetimdeki araç ile karşılaştırılabilmesidir.

Sistemde kontrolcü kartları olarak Arduino tabanlı otopilot geliştirme kartları olan Ardupilot Mega (APM) ve Ardupilot Mega 2.5 (APM 2.5) kullanılmaktadır. 3D Robotics firmasının ürünü olan bu kartlar, radyo kontrollü hava araçları için uygun fiyatlı ve hepsi bir arada otopilot sistemleri olarak ortaya çıkmış ve büyük ilgi görmüşlerdir. Ürünleri tak çalıştır ticari otopilot sistemleri olmaktan çıkıp akademik çalışmalarda kullanılabilir hale getiren ise Arduino geliştirme çevresi destekli, açık kaynaklı ve yüksek seviyede özelleştirilebilir olmalarıdır. Bu sayede ürün üzerindeki yazılım tamamen silinip üreticiden bağımsız yeni bir otopilot sistemi oluşturulabilmektedir.

Ardupilot kartlarının; üzerinde bir adet Arduino işlemcisi, bir adet ataletsel ölçüm ünitesi; telemetri, GPS, radyo kontrol alıcısı ve servolar için konektörler bulunduran basit bir devre kartından ibaret olduğu söylenebilir. Yüksek miktarda üretimi yapılan bu kartlar sayesinde araştırmacı, hem bileşenleri kendi bir kart üzerinde birleştirmekle vakit harcamak durumunda kalmamaktadır hem de bileşenleri tek tek alacağı duruma göre çok daha uygun bir fiyatla karşılaşmaktadır. Ardupilot kartları çalışmanın bu kısmında sadece Arduino kartı olarak kullanılmakta ve kartların sensör bileşenleri döngüye katılmamaktadırlar.

Sistemde uçağın manuel kontrolü ve destekli uçuş modu için referans açı değerlerinin verilmesi işlemi radyo kontrol alıcısı ve verici donanımları ile yapılmaktadır.

2.2. Sistem Yazılımları

Sistem, benzetim yazılımı hariç dört farklı yazılımdan oluşmaktadır. Bunlar:

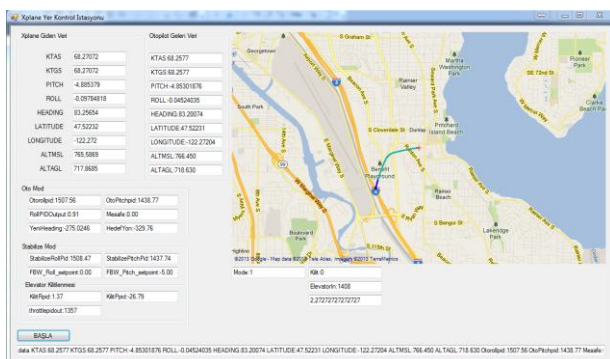
- Xplane 10 ortamındaki aracın kontrol yüzey denetimleri için çalışacak, APM kartıyla seri port üzerinden iletişim kuran, C# ile yazılmış konsol uygulaması
- Xplane 10 ortamındaki araca ait verileri APM 2.5 kartına gönderecek ve aynı zamanda bir yer kontrol istasyonu olarak kullanılacak olan C# ile yazılmış masaüstü uygulaması
- APM üzerinde çalışan ve APM 2.5'ten aldığı PWM sinyallerine göre uygulanacak kontrolleri seri port üzerinden bilgisayardaki konsol uygulamasına gönderen; gömülü, C++ tabanlı Wiring dili ile yazılmış uygulama
- APM 2.5 üzerinde çalışan ve yer kontrol uygulaması aracılığıyla seri port üzerinden Xplane 10'daki uçağa ait verileri alıp seçilen moda göre işleyerek PWM çıkışları üreten, Wiring dili ile yazılmış otopilot uygulaması.

Xplane 10 uçuş benzetim yazılımı; uçuş açılarından, uçak koordinatlarına, motor döñüş hızından, hava durumuna kadar uçuşla ilgili birçok veriyi uçuş ekranında paylaşabilen, bu verileri text uzantılı olarak kaydedebilen hepsinden önemlisi ise bu verileri ağ üzerinden paylaşabilen bir yazılımdır.

Xplane bu verileri kullanıcı veri bloğu protokolü kullanarak veri setleri halinde yollamaktadır. Her biri 41 bayt olan bu setlerin sayısı 100'ün üzerindedir. Her setin ilk 5 baytlık bölümü gelen verinin Xplane verisi olduğunu gösterir bir işaret taşır, sonraki 4 bayt ise hangi veri setine erişilmekte olduğunu gösterir. Kalan 36 bayt esas verinin taşındığı bölümdür ve bu 36 bayt ile en fazla 8 farklı veri taşınabilir. Her veri IEEE 754 tek duyarlıklı kayan nokta formatında 4 bayttan oluşmaktadır [6]. Bir veri setinin ağ üzerinde paylaşılması isteniyorsa Xplane'in veri setleri ekranından bu setlerin paylaşılma açılması gerekmektedir. Ayrıca yine aynı ekrandan verilerin gönderim frekansları ayarlanabilir.

Yer kontrol istasyonu, kontrolcü kartına iletmek ve arayüz üzerinde görüntülemek için bu veri setlerinden üçünü kullanır. Bu setler; 3 nolu uçuş hızları, 17 nolu uçuş açıları ve 20 nolu koordinat setleridir.

Birden fazla set paylaşıldığında sadece ilk set 5 baytlık imza bölümünü taşır, geri kalan setler ise 36 bayt olacaklardır. Çalışmada 3 set kullanıldığından tüm veriler toplamda 113 baytlık bir dizi oluşturacaklardır. Doğru verileri okuyabilmek için istenilen verinin bu dizinin neresinde olduğunu bilmek gerekir. İşlenmek istenilen veriye ait yeri bilinen 4 bayt, büyük diziden çekilip 4 baytlık yeni bir diziye yerleştirilir. Daha sonra bu dizi C#'ın BitConverter sınıfı sayesinde kolaylıkla ondalık bir sayı haline getirilebilir.



Sekil 2: Xplane yer kontrol istasyonu ekran görüntüsü.

Xplane'den alınan veriler format dönüşümü sonrası arayüzde gösterilirken bir yandan da usb/seri port üzerinden APM 2.5 kartına gönderilirler. Eş zamanlı olarak APM 2.5 kartının gönderdiği veriler de seri port üzerinden okunup arayüzde görüntülenmektedirler. Yer kontrol istasyonu yazılımı ekran görüntüsü Şekil 2'de görülebilir.

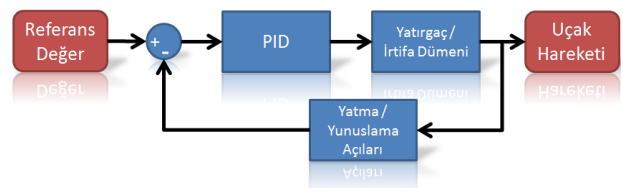
Karttan toplanan tüm veriler bir txt dosyasına kayıt edilmektedirler. Program çalıştırıldığı anda txt dosyasına tarih ve saat bilgisini kayıt eder ve sonraki her döngüsünde seri porttan okuduğu veriyi yeni bir satıra yazar.

APM kartının PWM girişleri, APM 2.5 kartının PWM çıkışlarına bağlıdır. APM kartı üzerinde koştan yazılım PWM girişlerinden okuduğu mikro saniye cinsinden PWM verisini seri port üzerinden bilgisayardaki uygulamaya gönderir. C# diliyle geliştirilmiş bir konsol uygulaması olan “Xplane Kontrol Yüzeyi Erişim Uygulaması” seri port üzerinden aldığı verileri, ağ üzerinden Xplane’e göndermekle yükümlüdür. Xplane kontrol yüzeyleri için açtığımız değerleri beklemektedir bu yüzden veriler ağ üzerinden gönderilmeden önce uygun açtığımız değerlerine dönüştürülmelidirler.

APM 2.5 kartı üzerinde çalışan otopilot uygulamasına bir sonraki kısımda değinilmektedir.

2.3. Kontrolcü Tasarımı ve Destekli Uçuş Modu

İHA’larda en çok kullanılan kontrol metodu PID kontroldür. Bu çalışmadaki bütün kontrol işlemleri için de PID kontrolcüler tercih edilmiştir. Destekli uçuş modu için kurulan kontrol yapısı Şekil 3’te görüldüğü gibidir.

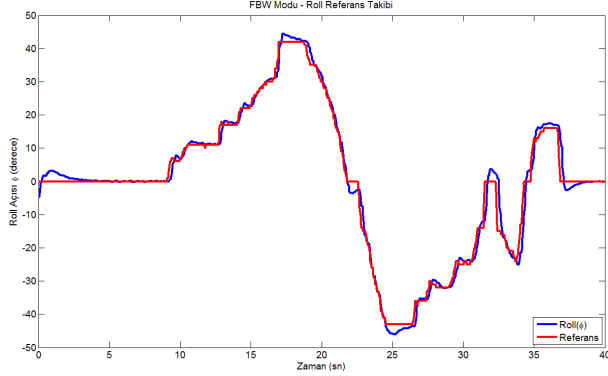


Şekil 3: Destekli uçuş modu kontrol yapısı.

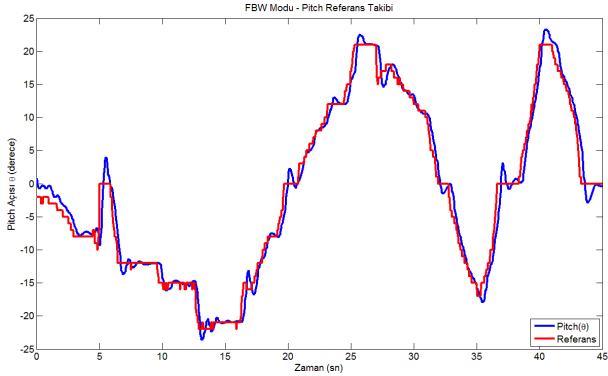
PID kontrolcü parametrelerini ayarlama da birçok yöntem bulunsun da, özellikle yüksek hassasiyet gerektirmeyen sistemlerde, manuel olarak ayarlama en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu çalışmadaki PID kontrolcü katsayılarının belirlenmesinde de manuel ayarlama yaklaşımı kullanılmış fakat ayarlama da kolaylık sağlayacak bir başlangıç noktası oluşturması açısından yalpalama ve yunuslama hareketlerinde kontrol için MATLAB benzetim yazılımı ile de benzetimler yapıp PID için katsayılar elde edilmiştir.

PID katsayılarının bulunmasında benzetim yazılımlarından faydalanabilmek için sistemin benzetim ortamında modeline ihtiyaç olacaktır. Bir uçağın gövde eksenlerinde hareketine ait bir model elde etmek için sadece kontrol yüzeyi açılarından faydalanmak yeterli olmayacaktır çünkü gövde eksenlerinde hareket kontrol yüzeylerinin etkisi yanında, itki kuvveti, atmosferik etkiler gibi birçok farklı etki sonucu oluşmaktadır. Fakat sabit bir itki altında ve atmosferik etkilerin minimum düzeyde olduğu bir ortamda gövde eksenlerinde harekette baskın etkinin kontrol yüzeyleri tarafından oluşturulacağını söylemek yanlış olmaz. Bu koşullar altında Xplane ortamında manuel uçuşlar yapılmış, kontrol yüzeylerine gönderilen PWM sinyalleri, palpa ve

yunuslama açıları model oluşturma sürecinde kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Model oluşturma sürecinde MATLAB'ın sistem tanılama aracında faydalanılmış, uçuşla ilgili toplanan giriş ve çıkış verileri kullanarak; yatırgeç kontrol yüzeyi açıları giriş ve yalpa açıları çıkış olarak kullanılmak üzere ve irtifa dümeni kontrol yüzeyi açıları giriş ve yunuslama açıları çıkış olmak üzere yalpa ve yunuslama hareketleri için ayrı modeller elde edilmiştir. Sonrasında MATLAB SISO tasarım aracı kullanılarak belirtilen yükselme ve yerleşme süresi kısıtları (1s ve 4s) altında PID katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 4: Destekli uçuş modu yalpa açısı referans takibi.



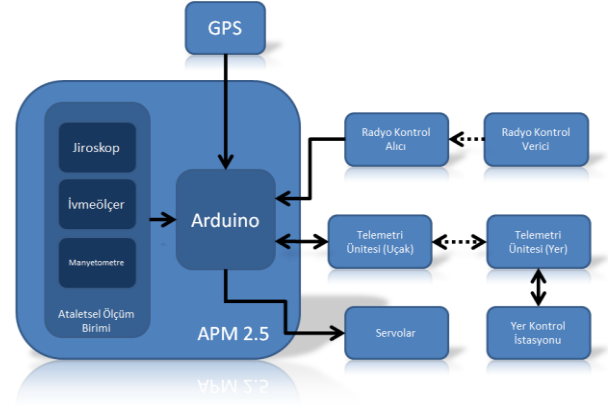
Şekil 5: Destekli uçuş modu yunuslama açısı referans takibi.

Destekli uçuş modunda radyo kontrol vericisinden gönderilen yatırgeç ve irtifa dümeni komutları bu yüzeylere iletilmek yerine açı değerlerine dönüştürülürler. Bu açıları otomatik dengeleme kontrol yapısına referans olarak girilirler, böylece uçağın bulunmasını istediğimiz yalpa ve yunuslama açıları kolaylıkla değiştirilebilir. Bu mod, uçuşu manuel uçuşa göre çok daha kolay bir hale getirmekte istemsiz yapılacak yatışların, tırmanma ve dalışların önüne geçmektedir ayrıca kurulacak tüm diğer otonom uçuş algoritmalarında bir iç döngü olarak yer alacak, temel oluşturacaktır. Kurulan yapıda yalpa açısı için sınırlar ± 45 derece, yunuslama açısı içinse ± 25 derecedir. FBW modunda sistemin referans takibi, yalpa hareketi için Şekil 4'te, yunuslama hareketi için Şekil 5'te verilmiştir.

3. Tam Donanımsal Otopilot Sistemi

Çalışmanın bu kısmında, döngüde donanım benzetim sisteminde kullanılan benzetimsel tüm bileşenler gerçek donanımlarla değiştirilerek tam donanımsal bir otopilot sistemi kurulmuştur. Sistem uçuş testleri için bir radyo kontrollü uçak platformuna yüklenmiş ve otonom bir insansız hava aracı sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, geliştirilen otopilot uygulamasının performansının gerçek uçuşlarla ölçümlenebilmesini sağlamaktadır.

Sistemde gömülü otopilot yazılımı APM 2.5 kartı üzerinde koşturmaktadır. Uçağın yalpa, yunuslama ve sapma açılarının tespiti APM 2.5 kartı üzerinde bulunan ataletsel ölçüm birimi algılayıcılarından gelen ölçümlerle yapılmakta, koordinatlar ise karta bağlı bir GPS alıcısı ile tespit edilmektedir. Uçağın manuel kontrolü ve destekli uçuş modu arası geçişler radyo kontrol sistemi ile gerçekleştirilmekte, yer kontrol istasyonu ile uçak arasındaki bağlantı ise telemetri donanımları ile sağlanmaktadır. Sistem bileşenleri ve bağlantılarını gösteren blok şeması Şekil 6'da görülebilir.

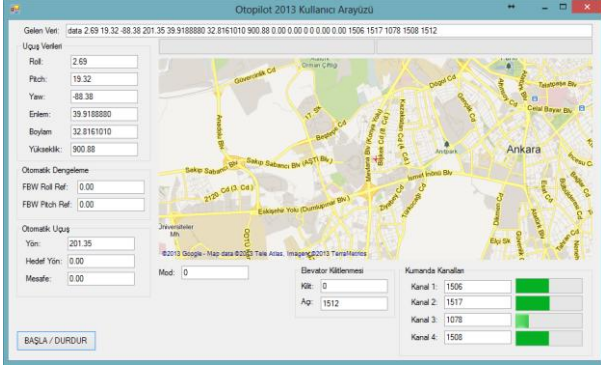


Şekil 6: Tam donanımsal otopilot sistemi blok şeması.

Sistem için iki adet yazılım oluşturulmuştur. Bunlar:

- Araçla telemetri sistemi üzerinden iletişim kurup kullanıcının uçuş bilgilerini görüntülemesini ve bilgilerin kayıt edilmesini sağlayan, C# dili ile geliştirilmiş yer kontrol istasyonu yazılımı.
- Uçuştaki araç üzerindeki kontrolcüde çalışan, gömülü otopilot uygulaması.

Uçuş sırasında kontrolcü kartın telemetri sistemi sayesinde yere gönderdiği tüm veriler, yer kontrol istasyonu ile düzenlenip kullanıcının uçağın durumunu kolayca gözlemleyebileceği bir hale getirilir. Yer kontrol istasyonu uygulaması ekran görüntüsü Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Tam donanımsal otopilot sistemi için yer kontrol istasyonu uygulaması ekran görüntüsü.

Benzetimsel sistemde olduğu gibi, karttan toplanan tüm veriler bir txt dosyasına kayıt edilmektedirler. Program çalıştırıldığı anda txt dosyasına tarih ve saat bilgisini kayıt eder, sonraki her döngüsünde seri porttan okuduğu veriyi yeni bir satıra yazar.

Tam donanımsal otopilot sisteminde kullanılan kontrolcü kartı ile, döngüde kontrolcü donanımı ile benzetim kısmında kullanılan kontrolcü kartı aynıdır. Bu sayede benzetim kullanılarak geliştirilen yazılım, üzerinde çok az değişiklik yapılarak tam donanımsal sisteme aktarılabilmiştir. Yazılımda, PID kontrolcü yapıları hiç değişikliğe uğramamış, uçuş benzetim yazılımı ile olan bağlantı yazılımdan çıkartılıp gerçek algılayıcılar yazılıma dahil edilmiştir.

Otopilot uygulaması çalışmaya algılayıcı kalibrasyonu ile başlamaktadır, bu kalibrasyon sayesinde kartın başlangıç anında durduğu pozisyon; yalpa, yunuslama ve sapma eksenleri için sıfır kabul edilebilmektedir. GPS verileri, GPS alıcısının bağlı olduğu seri port üzerinden gelirken, sensör verileri de açık kaynak Arduino kütüphaneleri yardımıyla kullanılabilir açı değerlerine dönüştürülmektedir.

Açı verileri, GPS verileri, PWM sinyal bilgileri ve PID kontrolcü çıkışlarıyla ilgili veriler tek bir cümle haline getirilir ve telemetri ünitesi ile yer kontrol istasyonuna gönderilirler. Karttan yere veri gönderim frekansı 10 Hz dir.

Benzetimsel öğeler kullanılarak geliştirilen kontrol yazılımı kolaylıkla ve başarıyla tam donanımsal bir sisteme çevrilebilmiştir. Tam donanımsal sistemin performansı sonuçlar bölümünde incelenecektir.

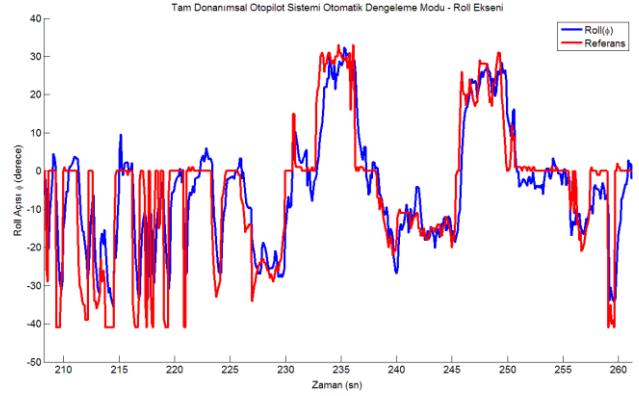
4. Sonuçlar

Tam donanımsal otopilot sisteminin uçuş testleri için Ankara Gölbaşı ilçesinde, 39.705471 derece enlem 32.7522315 derece boylam koordinatları civarındaki alana gidilmiştir. Bu alan daha önce farklı çalışmalar için yapılan uçuş testleri için de kullanılmış geniş bir düzlüktür. Ayrıca alanın yumuşak toprak yapısı, bu çalışmada kullanılan araç gibi gövde üzeri iniş yapan araçların inişte zarar görme ihtimalini büyük ölçüde azaltmaktadır.

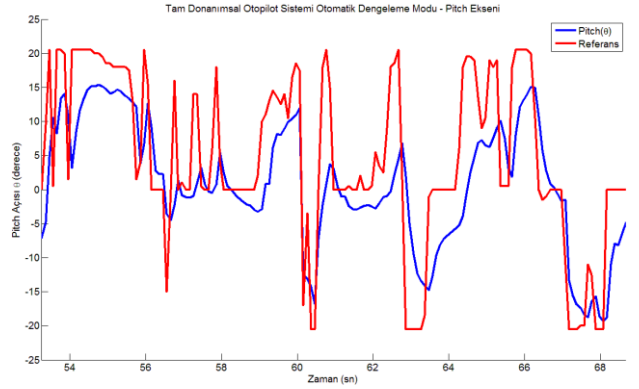
Destekli uçuş modunda yapılan test uçuşunda yalpa hareketi referans takibi Şekil 8'de, yunuslama hareketi referans takibi Şekil 9'da görülebilir.

Şekiller incelendiğinde, yalpa açısının radyo kontrol vericisiyle değiştirilen referans açısını oldukça hızlı ve doğru bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Elde edilen veriler

benzetim döngüsünde yapılan uçuşlarda elde edilen verilerle büyük benzerlik göstermektedirler.



Şekil 8: Tam donanımsal otopilot sistemi destekli uçuş modu yalpa hareketi kontrolü



Şekil 9: Tam donanımsal otopilot sistemi destekli uçuş modu yunuslama hareketi kontrolü

Yunuslama hareketi kontrolünde radyo kontrol vericisinden gelen referansların çok hızlı değiştirilmiş olması referans takibini bir miktar zorlaştırmış olsa da gözlenen sistem davranışı benzetim döngüsünde elde edilen sonuçlarla örtüşür niteliktedir.

Test sonuçları incelendiğinde, benzetim döngüsünde oluşturulup doğrudan tam donanımsal sisteme uygulanan kontrol yapısının amaçlandığı şekilde çalıştığı görülmektedir. Yer kontrol istasyonu da görevini başarıyla yerine getirmiş, hem harita üzerinde konum takibi, hem de veri kaydetme özellikleri başarıyla çalışmıştır. Sonuçlar kısmında verilen bütün grafikler yer kontrol istasyonunun uçuştaki uçaktan topladığı veriler kullanılarak oluşturulmuştur.

Kaynakça

- [1] Haiyang Chao, Yongcan Cao, YangQuan Chen, Autopilots for Small Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: A Survey, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 3144-3149, Ağustos 2007.

- [2] R. Isermann, J. Schaffnit, S. Sinsel, Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems, *Control Engineering Practice*, 7, 643-653, 1999.
- [3] J. S. Cole, A. C. Jolly, Hardware-in-the-loop simulation at the US Army Missile Command, *Technologies For Synthetic Environments: Hardware-In-The-Loop Testing*, 2741, 14-19, 1996.
- [4] R. Isermann, S. Sinsel, S. Schaffnit, Hardware-in-the-loop simulation of diesel engines for the development of engine control systems, *Algorithms And Architectures For Real-Time Control*, 91-93, 1997.
- [5] M. Bacic, On hardware-in-the-loop simulation, 44th IEEE Conference on Decision and Control, European Control Conference, 3194-3198, Aralık 2005.
- [6] Ertin, O.B., Korkmaz, H., Kaynak, U., Kasnakoğlu, C., Hardware-in-the-Loop Test Platform for a Small Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle Embedded Controller. The 32nd IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, Innsbruck, Austria, Şubat 2013.