

KÜÇÜK UYDULARDA YÖNELİM BELİRLEME FİLTRESİNİN KAMERA TABANLI ÖLÇÜMLER İLE DESTEKLENMESİ

Halil Ersin Söken¹
Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü,
Ankara

Mehmet Burak Güzel² ve Ozan Tekinalp³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

ÖZET

Kendini birçok görevde kanıtlayan küçük uydular artık bilimsel çalışmalar dâhil daha kapsamlı görevler için de kullanılmaya başlandı. Fakat uydulardaki yer kısıtı sebebiyle, hem görev için faydalı yükleri, hem de görevi yüksek başarımla gerçekleştirmeyi sağlayacak alt sistemleri birden fazla amaç için kullanmak gerekebiliyor. Bu bağlamda ilgi çekici konulardan biri Dünya gözlemi için gerekli olan ve çoğu küçük uydu görevinde de kendine yer bulan kameranın, yönelim belirleme amacıyla da kullanılıp kullanılamayacağı. Bu çalışmada, ilk olarak, uydu üzerinde yer alan kameranın çektiği Dünya görüntüleri kullanılarak 3-eksenli yönelim kestirimi için bir yöntem sunulmaktadır. Yöntem için gerekli kenar tespiti gibi öncül algoritmalar sunulmuş ve detayları ile açıklanmıştır. Sonrasında farklı senaryolar dâhilinde, görüntüden yönelime dair çıkarılabilecek en fazla bilgi saptanmakta ve bu bilgi bir genişletilmiş Kalman filtresi temelli yönelim filtresinde ölçüm olarak değerlendirilerek, uydunun yönelim kestirimi iyileştirilmektedir. Önerilen yöntem bir küçük uydu için benzetimler yoluyla test edilmiş ve kamera destekli yönelim belirleme sonuçları, sadece geleneksel yönelim algılayıcıların kullanıldığı bir algoritmanın sonuçları ile karşılaştırılarak önerilen yöntemin yönelimi ne denli iyileştirebileceği gösterilmiştir.

GİRİŞ

Düşük bütçeli olması ve tek seferde birden fazla sayıda fırlatılabilmesi gibi birçok avantajı bulunan küçük uyduların kullanımı hızla artmaktadır [Sweeting, 2018]. Uyduların uzaya gönderilme amaçları göreve göre değişiklik gösterse de, hassas yönelim tespiti görevin başarı ile sonuçlandırılmasında hayati önem arz etmektedir [Steyn, 2020]. Öte yandan, boyut, kütle ve güç sınırlamaları, küçük uydularda kullanılmak istenilen algılayıcı veya eyleyici sayısını ve niteliklerini kısıtlar. Bu kısıtlama, ek boyut, kütle ve güç gerektirmeksizin birden fazla amaç için kullanılabilecek yönelim algılayıcı ve eyleyicileri güncel bir araştırma konusu haline getirmiştir [Iwasaki, vd, 2019]. Bu anlamda, görevde hâlihazırda kullanılmakta olan bir faydalı yükü algılayıcı veya eyleyici olarak kullanmak da bir başka ilgi çekici konudur.

Son zamanlarda teknolojide yaşanan ilerleme kameraların boyutunun azalmasını beraberinde getirmiş ve cep telefonunda yer alabilecek küçüklükteki kameralarla bile yüksek çözünürlüklü görüntüler çekilebilmesine olanak sağlamıştır. Dahası bu görüntüler kısa sürelerde işlenebilmekte, çehre ve özellik tanıma gibi süreçler gerçek zamanlı yapılabilmektedir. Boyut olarak cebimize sığabilecek denli küçük olan bu kameraların uydu üzerinde yönelim belirleme amacıyla kullanılabilirliği oldukça ilgi gören araştırma konularından biridir [Amartuvshin and Asami, 2017; Iwasaki, vd, 2019; Baumann, vd, 2017; Modenini and Zannoni, 2019; Lump, Rawashdeh, 2014]. Bu ilginin temel nedeni, gün geçtikçe daha da popüler hale gelen küçük uydu görevleri için bu tip kameraların oldukça uygun olmasıdır. Yer gözlemi için hâlihazırda uydu üzerinde bulunan kameranın, yönelim tespiti için de kullanılması, yıldız izleyici gibi daha büyük algılayıcılara gerek

¹ Dr., Başuzman Araştırmacı, E-posta: ersin.soken@tubitak.gov.tr

² Ar.Gör., Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: mbguzel@metu.edu.tr

³ Prof.Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: tekinalp@metu.edu.tr

kalmamasına ve uydu üzerinde yerden tasarruf yapılmasına imkân verir. Ayrıca, geleneksel yönelim algılayıcıların aksine, yönelim kestirimi için kamera kullanıldığında, görevin farklı evrelerinde Güneş, yıldızlar gibi farklı referanslar kullanılabilir. Kamera ile elde edilen, yer görüntüleri kullanılarak [Koizumi, vd, 2019; Modenini and Zannoni, 2019] yıldız görüntüleri kullanılarak [Baumann, vd, 2017] veya Dünya, Ay ve Güneş doğrultusundaki vektörler kullanılarak [Dagvasumberel, 2019] yönelim kestirimi yapan çalışmalar vardır. Bu görüntüler açısız hız kestirimi için de kullanılabilir. [Atunaga and Ikuya, 2019; Lump, Rawashdeh, 2014].

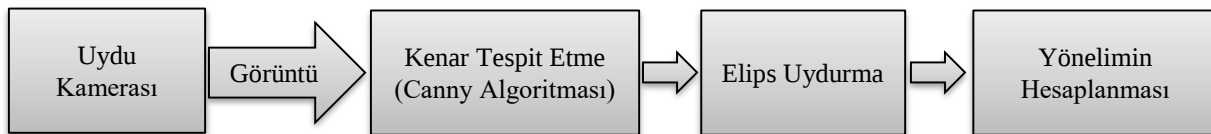
Kamera tabanlı yönelim tespiti yapılırken ortaya çıkan genel sorun, seçilen referans gök cisminin bağımsız olarak, çözümün sürekli olmamasıdır. Kamera her yörünge turunda ancak birkaç sefer yönelim kestirimi amacıyla kullanılabilecek görüntü sağlayabilir. Bu görüntüden elde edilebilecek yönelim bilgisi de çoğu zaman iki eksen ile limitlidir. Sonuçta sürekli yönelim bilgisine ihtiyaç duyulan günümüz görevlerinde - literatürde birçok çalışmada önerildiği gibi [Koizumi, vd, 2019; Modenini, 2018] sadece görüntünün çekildiği ana ait bir kerelik yönelim kestirimi uygulamada çok kullanışlı değildir. Bu bilginin bir filtre içinde değerlendirilmesi ve geleneksel yönelim algılayıcılarından gelen bilgi ile tümleştirilmesi gerekir. Manyetometre ve Güneş algılayıcı gibi hemen hemen her küçük uyduda yer alan algılayıcıların ölçümlerini kameradan gelecek ölçümler ile beraber kullanmak bir yandan yönelim kestiriminde sürekliliği sağlarken bir yandan da oldukça hassas kestirim sonuçları elde edilmesine mümkün kılacaktır.

Bu çalışmada, kameranın çektiği Dünya görüntülerinden elde edilen yönelim bilgisi ile uydu üzerinde yer alan manyetometre ve Güneş algılayıcısının ölçümlerini bir filtre içinde birleştirerek sürekli yönelim kestirimi hedeflenmektedir. 3-eksenli yönelimin, bir yörünge turu süresince, yer görüntüleri kullanılarak kısıtlı sayıda kestirilebileceği varsayılmaktadır. Yer görüntülerinin işlenmesi ve görüntüden 3-eksenli yönelim bilgisinin çıkarılmasında daha önce [Modenini, 2018] ile önerilmiş bir algoritma kullanılmıştır. Algoritmayı kullanabilmek için gerekli görüntü kenar tespiti ve elips uydurma gibi öncül adımlar uygulanmış ve görüntü ile yönelim kestirimi farklı senaryolarda test edilmiştir. Kamera tabanlı ölçümler, manyetometre, Güneş algılayıcısı ve düşük maliyetli bir jiroskop üçlüsü ile bütünleşik çalışmaktadır. Tüm ölçümler temelini bir çarpımsal genişletilmiş Kalman filtresinin (Multiplicative Extended Kalman Filter - MEKF) oluşturduğu ve bu çalışma ile önerilen bir algoritma içinde kullanılmaktadır. Burada temel amaç uydunun geleneksel algılayıcılar kullanılarak kestirilen yönelimini, görüntü temelli ölçümler ile iyileştirmektir. Önerilen bütünleşik yönelim kestirim algoritması, diğer yönelim algılayıcılarının kullanılabildiği farklı senaryolarda test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

YÖNTEM

Kamera Görüntüleri Kullanılarak Uydunun Yöneliminin Hesaplanması

Uydu üzerinden kamera ile yönelim tespiti yapılırken, öncelikle Dünya'nın bir fotoğrafı çekilir. Üç boyutlu uzayda Dünya elipsoit şeklinde iken, iki boyutlu olan kamera düzleminde Dünya elips şeklinde olacaktır. Kamera düzleminde oluşan elips, doğru şekilde tespit edilebilir ise, perspektif izdüşümü (ing: perspective projection) kuralları kullanılarak kameranın, dolayısıyla da uydunun yönelimi tespit edilebilir. Yönelim tespiti için izlenilen adımlar Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılabilir ki üzere elde edilen Dünya görüntüsünün önce Canny algoritması kullanılarak kenarları tespit edilmiştir. Elde edilen kenar noktaları kullanılarak ilgili şekle en yakın doğrulukta olan bir elips uydurulmuştur. Uydurulan elipsin denklemindeki katsayılar kullanılarak perspektif geometri yardımıyla yönelim tespit edilmiştir. Bu adımlar sonraki kısımda detaylandırılacaktır.



Şekil 1: Uydu Yönelim Hesabı.

Görüntü kenar tespiti: Literatürde kenar tespiti için kullanılmakta olan en yaygın algoritmalar Prewitt, Sobel, Robert ve Canny algoritmalarıdır. [Christian, 2017] Diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar elde edilmesinden ötürü Canny algoritması kenar tespiti için kullanılmıştır. Canny yöntemi temelde, kenar tespiti sürecinde algoritma için belirlenen üç hedefi dikkate alarak oluşturulmuştur. Bunlar; düşük hata oranına sahip olmak (hiçbir kenarı kaçırmamak veya kenar olmayan bir yeri kenar olarak göstermemek), tespit edilen kenarın görüntüdeki gerçek kenarla aynı yerde olması ve bir kenar için sadece bir cevabın olmasıdır. Canny algoritması 4 basamakta özetlenebilir.

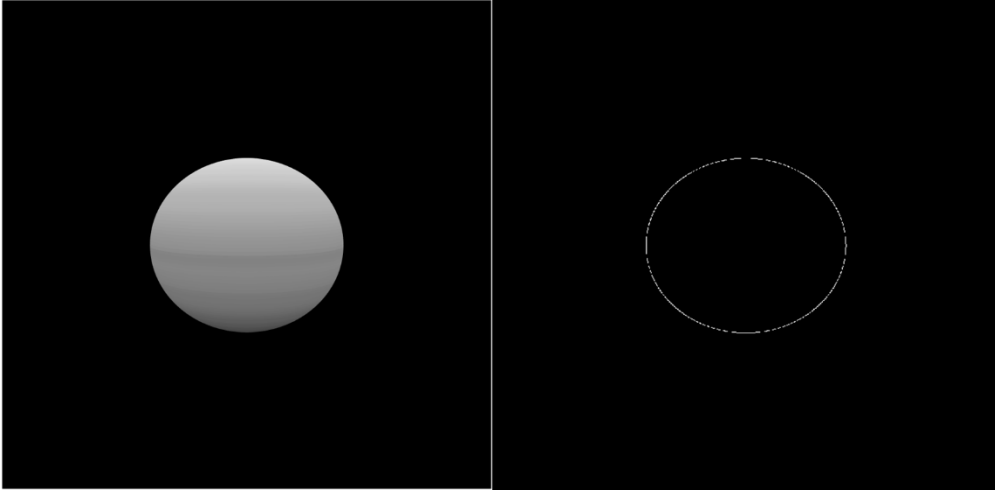
- I. İlk olarak görüntü üzerindeki gürültüyü azaltmak için Gaussian filtresi kullanılır.
- II. İkinci olarak görüntü pikselleri arasındaki yoğunluk değişimleri hesaplanır. Bu yöntemde iki piksel arasındaki yoğunluk değişiminin en yüksek olduğu bölgeler kenar olarak algılanır. Diğer yöntemlerin aksine, Canny yönteminde yoğunluk farkları iki yönde birden hesaplanır.
- III. Canny algoritmasının amaçlarından birinin gerçek kenar ile tespit edilen kenarın aynı bölgede olması olduğundan bahsetmiştik. Üçüncü adım bu amaçla kullanılır. Bu adımda tespit edilen kenarın bir piksel genişliğinde olması hedeflenir. Yoğunluk değişiminin en yüksek olduğu pikseller kenar olarak tespit edilirken, bunların haricindeki pikseller kenar adaylığından elenir. Şekil 2’de en yüksek yoğunluk farkının seçili olduğu örnek bir görüntü matrisi verilmiştir. Her pikseldeki gri renk yoğunluğu matrisin ilgili elemanında belirtilmektedir. Algoritmanın tespit ettiği pikseller kırmızı daire içinde olanlardır.

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	26	154
0	0	26	128	205	205
0	77	179	205	204	204
154	205	204	202	202	202
204	202	202	202	202	202
202	202	202	202	202	202

Şekil 2: En Yüksek Yoğunluk Farkına Sahip Pikselin Seçilmesi.

- IV. Son olarak iki seviyeli eşik kullanılarak elenen düşük yoğunluk farkına sahip pikseller gözden geçirilerek kenar tespitinin son hali oluşturulur. Canny algoritması biri küçük (T_1) diğeri büyük (T_2) olmak üzere iki eşik değeri ile çalışır. T_2 ’den büyük yoğunluk farkına sahip pikseller kenar olarak kabul edilir, T_1 ’den küçük olan pikseller ise kenar olarak kabul edilmez. Yoğunluk farkı T_1 ile T_2 arasında kalan pikseller için ise komşu piksellere bakılır. Eğer komşu pikseller içerisinde T_2 ’den büyük yoğunluk farkına sahip piksel mevcut ise bu piksel kenar kabul edilir, aksi takdirde kenar değildir. [Canny, 1986]

Şekil 3’de Canny algoritması kullanılarak bir Dünya görüntüsünün kenarlarını tespit edilmesine örnek verilmiştir. Anlaşılacağı üzere soldaki şekil çekilen Dünya görüntüsü iken, sağdaki şekil görüntü için tespit edilen kenarları göstermektedir.



Şekil 3: Canny Yöntemi İle Yapılan Kenar Tespiti.

Elips uydurma: Dünya'nın şekli elipsoit olarak kabul görmektedir. Elipsoit şeklindeki bir cismin fotoğrafı çekildiğinde, iki boyutlu kamera koordinat çerçevesine aktarılan şekil elips şeklindedir. Çekilen fotoğrafta kenar tespit işlemi yapıldıktan sonra elde edilen kenar noktalarına uygun bir elips şekli uydurulmalıdır.

Konik, $x = [x, y]^T$ noktalarının sağladığı ikinci dereceden bir denklemin iki boyutlu düzlemdeki geometrik şeklidir. Bu ikinci dereceden denklem şu şekilde olmalıdır

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

a, b, c, d, e ve f konik denkleminin katsayıları olan gerçekte sayılardır. $\theta = [a, b, c, d, e, f]^T$ ve $u(x) = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T$ olarak tanımlanırsa ise Denklem (1) şu şekilde yazılabilir.

$$\theta^T u(x) = 0 \quad (2)$$

Koniğin determinanı ise şu şekildedir:

$$D = \begin{vmatrix} a & b/2 & d/2 \\ b/2 & c & e/2 \\ d/2 & e/2 & f \end{vmatrix} \quad (3)$$

Koniğin determinanı (D) sıfıra eşitse bu konik çakışık bir konik olarak adlandırılır. Yani Denklem (2)'yi sağlayan birden çok $u(x)$ değeri vardır. Determinant sıfır değil ise bu konik çakışık olmayan bir koniktir. Çakışık olmayan konikler için ise ayrıştırıcı (ing: discriminant) $\Delta = b^2 - 4ac$ negatif ise elips, sıfıra parabol, pozitif ise hiperboldür. $\Delta < 0$ şartını sağlayan denklemler elipsi ifade eder ve şu şekilde yeniden ifade edilebilir.

$$\theta^T F \theta > 0 \rightarrow F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

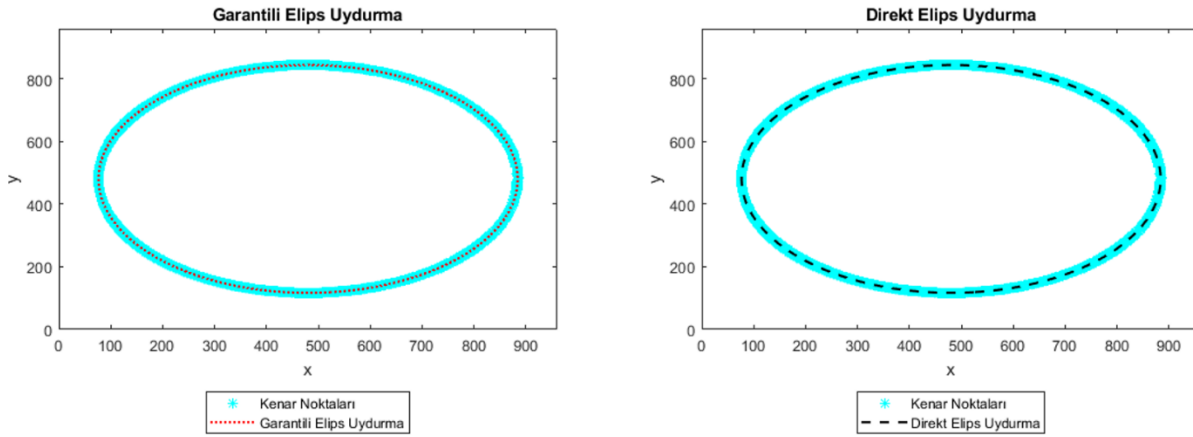
$\otimes$ Sembolü Kronecker çarpımını ifade eder. Elips uydurma yöntemi uygulaması için bir maliyet fonksiyonu seçilirken, Denklem 4'teki kısıt göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde bulunan en

doğru elips uydurma yöntemlerinden birisi Doğrudan Elips Uydurma (ing: direct elips fitting) yöntemidir. Bu yöntemle ait seçilen maliyet fonksiyonu; [Fisher, Fitzgibbon, Pülu,2016]

$$J_D(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta^T A \theta}{\theta^T F \theta} \rightarrow \theta^T F \theta > 0, \\ \infty \rightarrow \theta^T F \theta \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$A = \sum_{n=1}^N u(x_n) u(x_n)^T$ olması durumunda sağlanır. J_D fonksiyonunu en küçük değere götüren θ_D değeri elips uydurma probleminin ($\theta^T A \theta$ ifadesini en küçük yapan ve $\theta^T F \theta = 1$ ifadesini sağlayan) de çözümünü oluşturur.

Direkt Elips Uydurma yönteminin sonuçlarını başlangıç değeri olarak alan ve yaklaşık en çok olabilirlik (ing: approximate maximum likelihood) yöntemini kullanarak yinelemeli (ing: iterative) bir elips uydurma yöntemi olan Garantili Elips Uydurma (GEU) yönteminin gezegen kenar tespitinde daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. [Chojnacki, Hengel, Szpak, v.d.,2012]. Direkt elips uydurma ve garantili elips uydurma yöntemleri kullanılarak elde edilen elips şekilleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere iki yöntem de tutarlı sonuçlar sağlamaktadır.

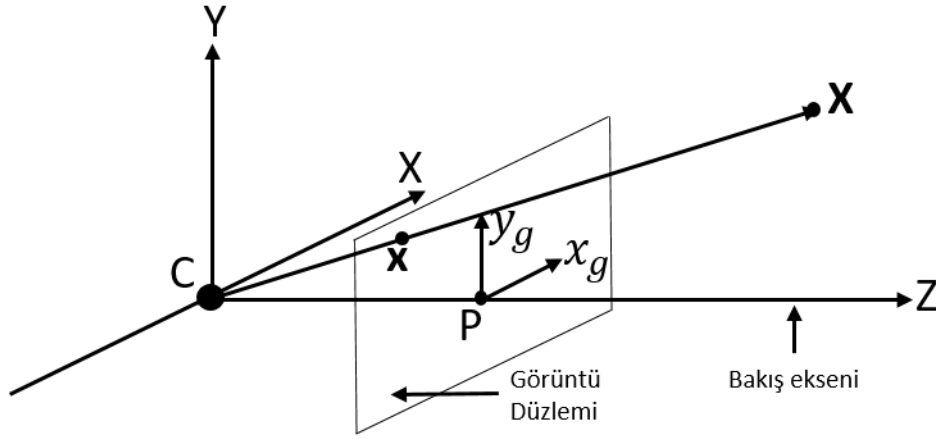


Şekil 4: Direkt Elips Uydurma ve Garantili Elips Uydurma Yöntemleri.

Yönelim Tespiti: Elips uydurulduktan sonra yönelim tespiti yapabilmek için perspektif geometrisi kuralları kullanılmıştır. Perspektif geometrisine göre üç boyutlu düzlemdeki bir cismin iki boyutta nasıl görünmesi gerektiği bilinmektedir. [Hartley, Zisserman, 2004] Şekil 5'te gösterilen X noktasının üç boyutlu uzayda bir nokta olduğunu varsayalım. C noktası kamera merkezi olmak üzere X noktasının, iki boyutlu görüntü düzleminde oluşacak karşılığı şu şekilde hesaplanır.

$$(X, Y, Z)^T \rightarrow (fX/Z, fY/Z) \quad (6)$$

Bu işlem 3-eksenli $\mathbb{R}^3$ Öklid uzayının 2-eksenli $\mathbb{R}^2$ görüntü çerçevesine çevrilmesidir. İzdüşümün merkezi kameranın da merkezi olan C noktası olarak kabul edilir. Kamera merkezinden çıkıp görüntü düzlemini dikey kesen çizgiye bakış eksen (ing: principle axis) denir. Bakış eksen ile görüntü düzleminin kesiştiği nokta bakış noktasıdır (ing: principle point P). Kamera merkezinin (C) görüntü düzlemine olan uzaklığına odak uzaklığı (f) denilir.



Şekil 5: Kamera Geometrisi.

3-eksenli uzayda bulunan nokta ve 2-eksenli görüntü düzleminde bulunan noktalar homojen koordinatlar ile ifade edilmişse merkezi iz düşüm doğrusal dönüşüm (ing: linear mapping) şeklinde ifade edilebilir:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ fZ \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Yani 2-eksenli uzayda bulunan noktanın koordinatları $(x_g, y_g)^T = P(X, Y, Z)^T$ denklemiyle hesaplanabilir. Buradaki P matrisi Denklem 7’de verilen köşegenel odak uzaklıklarının olduğu matristir. Eğer görüntü çerçevesinin orijini bakış noktasında değilse, hesaba bakış noktasının 2 eksenli görüntü çerçevesindeki koordinatlarını da katmak gerekir. Bu durumda doğrusal dönüşüm şu şekilde olacaktır:

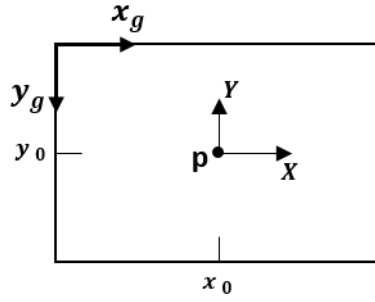
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_z \\ fZ \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

p_x ve p_y Şekil 6’da görüldüğü gibi bakış noktasının x ve y düzlemindeki koordinatlarıdır. Doğrusal dönüşümü yapan matrisin sol tarafına kamera ölçümleme matrisi denilir ve şu şekilde gösterilir:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Denklem 6 şu şekilde daha basit ifade edilebilir:

$$x_g = K[I | 0] X \quad (10)$$



Şekil 6: Görüntü (x_g, y_g) ve Kamera (X, Y) Koordinat Sistemleri

Kameranın gövde referans çerçevesi ile 3-eksenli uzayın tanımlandığı referans çerçevesinin çakışık olmadığı durumlarda ise çerçeveleri aynı yönelime sahip hale getirmek için bir dönüşüm matrisine(R) (ing: rotation matrix) ihtiyaç duyulur. Bu durumda 3-eksenli uzaydaki noktanın, 2 boyutlu görüntü eksenindeki koordinatlarını bulmak için şu denklem kullanılır:

$$x_g = KR[I \quad t]X \quad (11)$$

Bu denklemde R dönüşüm matrisi, t ise kameranın 3-eksenli uzaydaki pozisyon vektörünü ifade eder. Bir noktanın 3-eksenli uzaydan 2-eksenli görüntü çerçevesine geçişini bu şekilde yapılırken, nokta yerine bir elipsoit şekil varsa bunun dönüşümü de benzer bir yolla yapılır. [Modenini,2018] Elipsoidin merkezinin 3-eksenli uzayın orijininde olduğu kabul edilirse, üzerindeki noktalar şu homojen ikinci dereceden denklem ile ifade edilebilir:

$$X^T Q X = 0 \quad (12)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1/a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/b^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Q Matrisinde yer alan a , b ve c elipsoidin yarı-eksenleridir (ing: semi-axis), bu nedenle sabittirler.

Perspektif geometrisi kuralları altında, $T = R[I \quad t]$ olacak şekilde kabul edilirse elipsoit şeklindeki Q , görüntü düzlemine şu denkleme göre bir elips olarak aktarılır:

$$C^* \propto K T Q^* T^T K^T \quad (14)$$

Yıldız (*) üstsimgesi bir eklenti (ing: adjoint) temsil eder ve elipsoit için bu matrisin tersine eşittir

$C^* = C^{-1}$ ve $Q^* = Q^{-1}$. C elips denkleminin katsayılarından oluşan bir matristir öyle ki

$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$ elips denklemi için C şu şekilde tanımlanır:

$$C = \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & D \end{bmatrix} \quad (15)$$

$C_{im}^* = K^{-1} C^* K^{-T}$ olacak şekilde tanımlanırsa Denklem 14 aşağıdaki hali alır:

$$\alpha C_{im}^{-1} = T Q^{-1} T^T \quad (16)$$

$T = R \begin{bmatrix} I & t \end{bmatrix}$ ifadesi Denklem 16'nın içerisine yazılırsa:

$$\alpha C_{im}^{-1} = R(Q_{(1:3,1:3)}^{-1} - t t^T) R^T \quad (17)$$

İfadesi elde edilir. Burada $B = (Q_{(1:3,1:3)}^{-1} - t t^T)$ ifadesi tanımlanarak Denklem 17'de yerine yazılırsa:

$$R B R^T = \alpha C_{im}^{-1} \quad (18)$$

α 'yı bulmak için eşitliğin iki tarafının da izi (ing: trace) alınır:

$$\alpha = \frac{tr(B)}{tr(C_{im}^{-1})} \quad (19)$$

Bu aşamadan sonra simetrik matrisler için spektral teorem (ing: spectral theorem for symmetric matrices) kullanılarak iki matrisin de özvektörlerinden oluşan matrisleri bulunur. Yönelim matrisi bu özvektör matrisleri yardımıyla elde edilir:

$$\begin{aligned} \alpha C_{im}^{-1} &= V D_C V^T; B = W D_B W^T \\ R &= V P W^T \end{aligned} \quad (20)$$

$P = diag \{ \pm 1 \quad \pm 1 \quad \pm 1 \}$ matrislerinin hepsi Denklem 18'in sonucu olacaktır. Fakat doğru yönelim tespiti için $P = diag \{ +1 \quad +1 \quad +1 \}$ veya $P = diag \{ -1 \quad -1 \quad +1 \}$ matrislerinden biri kullanılmalıdır. Hangisinin kullanılacağı önceki yönelim bilgileri kontrol edilerek tayin edilebilir.

MEKF ile Yönelim Kestirilmesi

Oluşturulan algoritma içinde kameradan gelen yönelim ölçümleri uydu üzerinde hâlihazırda bulunan manyetometre, Güneş algılayıcı ve jiroskobun (dönüölçer) ölçümleri ile tümleştirilerek uydunun yönelimi kestirilmektedir. Algoritmanın genel akışı Şekil 7'de verilmiştir. Kameranın çektiği Dünya görüntüsü öncelikle yönelim bilgisine uygunluk açısından değerlendirilir. Eğer görüntüden 3-eksen yönelim bilgisi çıkarılabilecek durumdaysa önceki bölümde detaylandırılan yöntem yardımıyla 3-eksen yönelim hesaplanır. Sonuçta hesaplanan yönelim bilgisi, şu ana kadar yapılan çalışmaların aksine nihai sonuç olarak kabul edilmeyip, MEKF içerisinde ölçüm olarak kullanılmaktadır. Şayet Dünya görüntüsünden 3-eksen yönelim bilgisi elde edilemiyorsa, nadir vektörü tespit edilip bu 2-eksen yönelim bilgisi geleneksel yönelim algılayıcılar bloğu içinde manyetometre ve Güneş algılayıcı ölçümleri ile birlikte değerlendirilir.

Kameranın çektiği Dünya görüntülerinden elde edilebilecek 3-eksen yönelim bilgisi kuaterniyon türündedir. Bu bilgiyi filtre içerisinde kullanmak için filtrenin o an için öngördüğü kuaterniyon ile arasındaki fark çarpımsal olarak hesaplanır:

$$\delta \mathbf{q}_{o,c} = \begin{bmatrix} (q_{cam})_4 I_3 - [(q_{cam})_{1:3} \times] & (q_{cam})_{1:3} \\ - (q_{cam})_{1:3}^T & (q_{cam})_4 \end{bmatrix} [\hat{\mathbf{q}}_{k+1|k}]^{-1} \quad (21)$$

Burada $\hat{\mathbf{q}}_{k+1|k}$ filtrenin $k+1$ ayrık zamanı için öngördüğü kuaterniyon vektörü, $\mathbf{q}_{cam}$ Dünya görüntüsünden elde edilmiş 3-eksen yönelim ölçümü, $\delta \mathbf{q}_{o,c}$ ise $\delta \mathbf{q}_{o,c} = [\delta \mathbf{g}_{o,c}^T \quad \delta \mathbf{q}_{4,o,c}]^T$ şeklinde hesaplanan kuaterniyon hata vektörüdür. $[\mathbf{v} \times]$ Herhangi bir $\mathbf{v}$ vektörü için çapraz çarpım matrisidir. Filtre içerisinde kullanılacak yönelim hata ölçümü ise $\delta \mathbf{q}_{o,c}$ vektörü kullanılarak

$$\delta \mathbf{p}_{o,c} = 2\delta \mathbf{g}_{o,c} / \delta \mathbf{q}_{4,o,c} , \quad (22)$$

şeklinde hesaplanır.

Öte yandan, geleneksel yönelim algılayıcıların (ve saptanabildiği zamanlarda nadir vektörünün) ölçümleri de öncelikle bir QUEST algoritması içinde işlenerek, kaba yönelim bilgisi elde edilir. Gene kuaterniyon türünden saptanan kaba yönelim vektörü ($\mathbf{q}_{quest}$) benzer bir süreçten geçirilerek $\delta \mathbf{p}_{o,q}$ hesaplanır ve MEKF içerisinde kullanılır.

MEKF her bir adımda kuaterniyonları jiroskop ölçümlerini kullanarak öteler ve elde olan ölçümler ile tümleştirerek, adımın sonunda uydu için yönelim bilgisini kestirir. Yönelim bilgisinin yanı sıra, filtre, jiroskop ölçümleri için kayma hatalarını da kestirmekte ve ölçümler bu kestirim değerlerini dikkate alarak düzeltilmektedir:

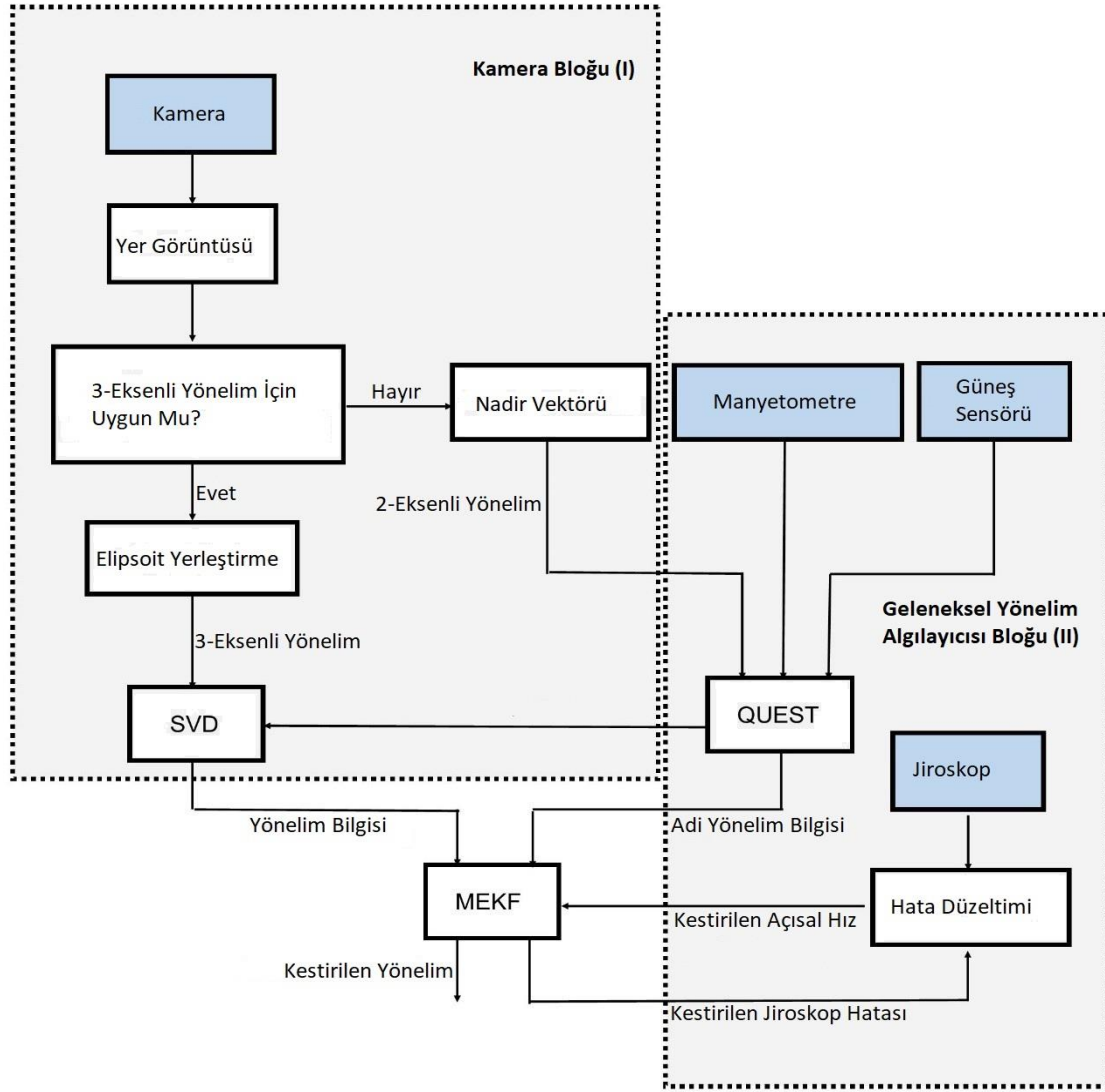
$$\bar{\omega}_{bi,k+1} = \tilde{\omega}_{bi,k+1} - \hat{\mathbf{b}}_{g,k} . \quad (23)$$

Burada, $\tilde{\omega}_{bi,k+1}$ jiroskop ölçümleri (uydu eksen takımında ifade edilmiş, uydu eksen takımının, ataletsel eksen takımına göre açısal hızları), $\hat{\mathbf{b}}_{g,k}$ filtre tarafından kestirilen kayma vektörü, $\bar{\omega}_{bi,k+1}$ ise filtre içerisinde kuaterniyon ötelemede kullanılan düzeltilmiş açısal hız değerleridir. Nihayetinde, MEKF için durum vektörü, $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \quad \mathbf{b}_g^T]^T$ şeklindedir.

UYGULAMALAR

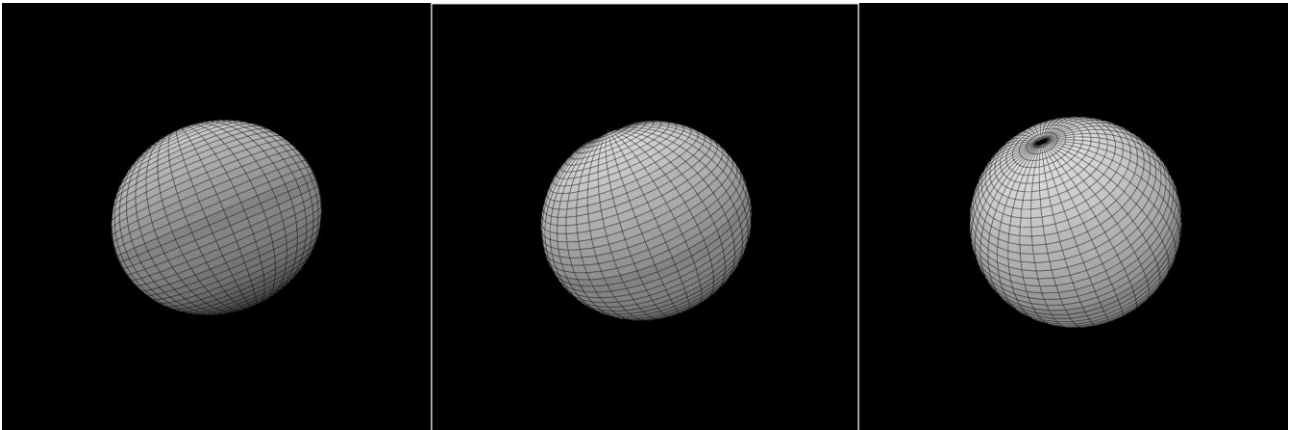
Kamera Görüntüleri ile Uydu Yönelim Hesabı Sonuçları

Önceki bölümde detayları verilen kamera görüntülerini kullanarak yönelimi hesabı yapan yöntemi test etmek adına ilk olarak Dünya ile aynı ölçülere sahip bir elipsoit oluşturulmuştur. Sonrasında kameranın tüm Dünya çehresini görebilecek bir uzaklıkta olduğu varsayılarak fotoğrafı çekilmiştir. Matlab sahne kontrol aracı ile kameranın Dünya merkezli ataletsel eksen takımına göre pozisyonu, yönelimi ve görüş alanı ayarlanabilmektedir. Farklı yönelimler için benzetimi yapılan 960x960 piksele sahip yapay Dünya fotoğraflarına örnekler Şekil 8'de verilmiştir. Bu fotoğrafların soldan sağa sırayla 0°, 20° ve 40° boylamlardan çekildiği varsayılmıştır.



Şekil 7: Önerilen Kamera Bütünleşik Yönelim Kestirim Algoritması.

MEKF yönelim kestirimi yaparken, her adımda “Geleneksel Yönelim Algılayıcısı Bloğu”ndan ölçüm geldiği varsayılmaktadır (Güneş algılayıcıların ölçüm vermeyeceği tutulma anları haricinde). “Kamera Bloğu”ndan ise ölçümler sadece çekilen Dünya görüntüsü 3-eksen yönelim bilgisi vermeye uygunsa, bir yörünge turu boyunca bir veya birkaç defaya mahsus alınabilmektedir.



Şekil 8: Yapay Dünya Fotoğrafları.

Benzer şekilde istenilen referans yönelimler için fotoğraflar oluşturulduktan sonra önceki bölümde anlatılan görüntü kenar tespiti, elips uydurma ve Dünya görüntüsünden yönelim tespiti algoritmaları sırasıyla uygulanmış ve her üç eksen de yönelimi gösteren Euler açıları elde edilmiştir. Farklı boylamlardan çekilen Dünya görüntüleri kullanılarak kestirilen Euler açıları için kestirim hataları Tablo 1’de verilmiştir. Dünya’nın şeklinden kaynaklı olarak kutuplara doğru gidildikçe (boylam arttıkça) yalpa açısındaki hata artmaktadır. Temel sebep, çekilen fotoğrafın düzlem üzerinde elipsten ziyade daireye yakınsaması ve sonucunda yalpa açısının fotoğraftan tespit edilememesidir. Yöntemin ekvator geçişleri sırasında en hassas sonucu vereceği şeklinde bir genel yorumda bulunulabilir.

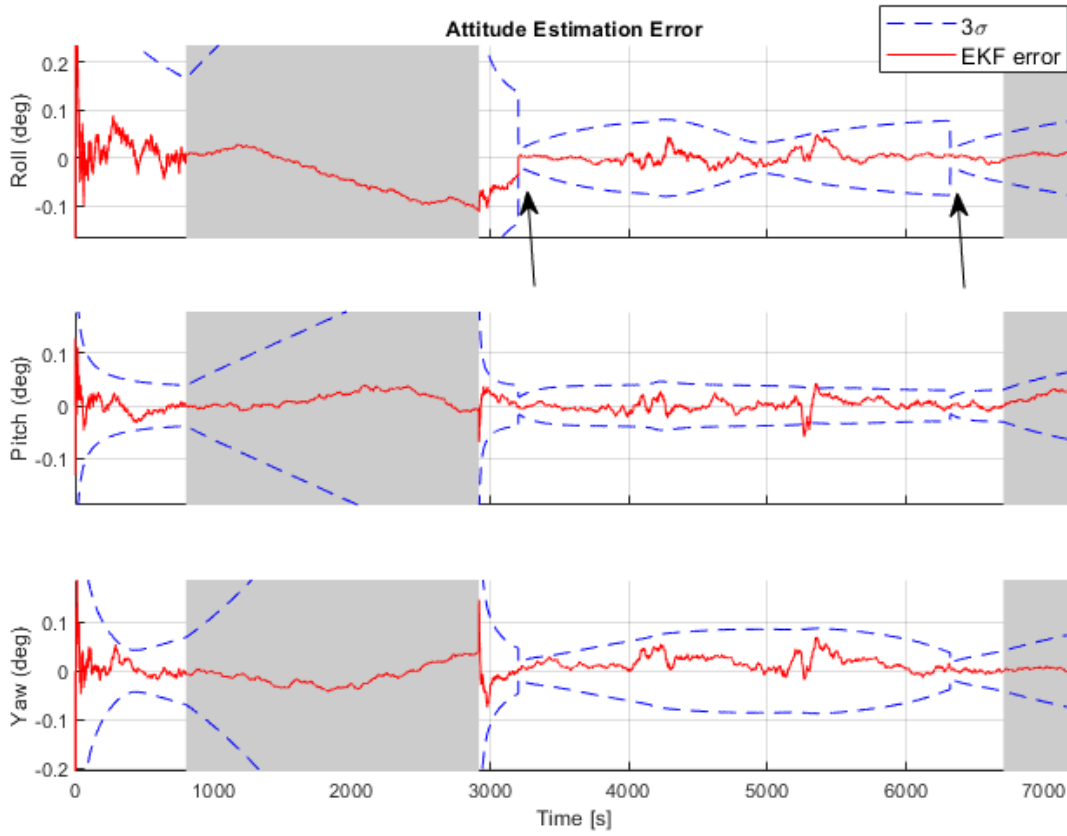
Tablo 1: Dünya Görüntüsü Kullanılarak Gerçekleştirilen Yönelim Kestirimi İçin Hatalar.

	Yunuslama [°]	Yuvarlanma [°]	Yalpa [°]
Boylam 0°	0.0047	0.0001	0.002
Boylam 20°	0.041	0.101	0.1225
Boylam 40°	0.0626	2.56	3.37
Boylam 60°	0.0403	1.0673	2.1685
Boylam 80°	0.0739	0.9941	5.7828

MEKF ile Yönelim Kestirim Sonuçları

Dünya görüntüsünden yönelim kestirimi için elde edilen sonuçlar dikkate alınarak Şekil 7’de detayları verilen bütünlük kestirim algoritması, test edilmiş ve yönelim kestirim hata sonuçları Şekil 9’da sunulmuştur. Benzetimler alçak Dünya yörüngesindeki bir küçük uydu için gerçekleştirilmiştir. Uydu eğikliği $i = 74^\circ$ ve periyodu yaklaşık 6000 saniye olan dairesel bir yörüngededir. 3202 ve 6320. saniyelerde kameradan 3-eksen yönelim bilgisi alındığı varsayılmaktadır. Benzetimlerde uydunun görüntü çekerken bulunduğu enleme göre görüntü işleyerek elde edilen 3-eksen yönelim bilgisi Tablo 1’de verilen değerler doğrultusunda hatalıdır. 3202 ve 6320. saniyeler uydunun yaklaşık ekvator geçişlerine denk gelmektedir. Tabloda verilen hatalara ek olarak yönelim bilgisine her üç eksen de $\sigma_c = 0.001^\circ$ rastgele Gauss beyaz gürültü katılmıştır. Görüntüden gelen anlık ölçümler haricinde algoritma manyetometre ve Güneş algılayıcı ölçümleri ile çalışmaktadır. Manyetometre ve Güneş algılayıcı için kabul edilen Gauss beyaz gürültü hata miktarları sırasıyla $\sigma_m = 300\text{nT}$ ve $\sigma_s = 0.1^\circ$ şeklindedir. Bu senaryoda gene kameranın çektiği görüntülerden, görüntü 3-eksenli yönelim bilgisi için uygun değilse elde edilebilecek 2-eksenli nadir vektörü kullanılmamıştır.

Şekil 9’daki sonuçlar göstermektedir ki kameradan ölçüm gelmediği anlarda uydu yönelimi her bir eksen de ortalama $0.1^\circ (1\sigma)$ ’lik bir hata ile kestirilebilmektedir. Kameradan 3-eksen ölçüm geldiği anlarda ise bu hata azalmakta ve filtre, 1 saniye için gelen tek ölçüme rağmen 1-2 dakika boyunca daha doğru bir yönelim kestirimi ile devam edebilmektedir. Filtrenin kayma hataları düzeltilmiş jiroskop ölçümleri ile öteleme yapabilmesi tek anlık ölçümün düzeltici etkisinin daha uzun olmasındaki temel sebeptir. Şüphesiz MEKF içinde ayarlanmış olan süreç gürültüsü kovaryans matrisi ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrisinin değerlerine göre filtrenin kestirim cevabı farklılık gösterebilir. Şekil üzerinde ok işaretleri ile gösterildiği üzere düzeltici etki her iki ölçüm anında da yuvarlanma açısı üzerinde daha fazladır. Mavi kesikli çizgi ile gösterilen kestirim kovaryans değerlerindeki azalma da bunu açıkça göstermektedir. Farklı anlarda farklı miktarlardaki düzeltici etki, uydunun Dünya merkezli ataletsel referans eksen takımına göre o anki yönelimi ile alakalıdır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında düzeltici etkinin yörünge referans takımına göre olan yönelimde ne şekilde olduğu da sonuçlara dahil edilecektir. Bu sonuçların daha genel geçer olması beklenmektedir.



Şekil 9: Küçük Uydu İçin Yönelim Kestirim Hataları. Yaklaşık 3202 ve 6320. Saniyelerde Görüntü Tabanlı 3-eksen Yönelim Bilgisi Gelmekte. Gri Alanlar Uydunun Tutulma Bölgesinde Olduğunu Göstermekte.

SONUÇ

Bu çalışmada, kameranın çektiği Dünya görüntülerinden elde edilen yönelim bilgisi ile uydu üzerinde yer alan manyetometre ve Güneş algılayıcısının ölçümlerini bir filtre içinde birleştirerek sürekli yönelim kestirimi hedeflenmiştir. Özel olarak, anlık, bir yörünge periyodu boyunca sadece birkaç kez gelebileceği varsayılan görüntü temelli yönelim ölçümlerinin uydunun yönelim kestirimini ne denli iyileştirebileceği incelenmiştir. Kamera görüntülerinden en fazla yönelim bilgisini çıkarabilmek için bir yöntem önerilmiş ve tasarlanan algoritma içinde bu bilgi, uydu üzerinde halihazırda bulunan geleneksel yönelim algılayıcılarının ölçümleri ile tümleştirilmiştir. Yapılan benzetimler hem çekilen görüntüden 3-eksen yönelim tespiti, hem de önerilen bütünleşik algoritmanın doğruluğu üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında, görüntü işleme temelli yönelim kestirimi için çoklu koşum ile hata analizi gerçekleştirilecek ve algoritmaların bütünleştirilmesi aşamasında bu hatalar dikkate alınacaktır. Ayrıca, bütünleşik algoritma çekilen görüntünün içeriğine ve çıkarılabilecek yönelim bilgisine göre uygulamaya konulacaktır.

Kaynaklar

- Amartuvshin, D. and Asami, K., 2017. "Vision-based attitude determination system for small satellites using unscented Kalman filter," in *68th International Astronautical Congress*, Adelaide, Australia.
- Atunaga, S. M. and Ikuya, B. Y. K., 2019. "On-board Relative Attitude Determination and Propagation Using Earth Sensor," in *32nd International Symposium on Space Technology and Science*, Fukui, Japan.

- Baumann, F., Brieß, K., Korn, N. and Wolf, N., 2017. “Multifunctional Optical Attitude Determination Sensor for Picosatellites,” in *68th International Astronautical Congress*, Adelaide, Australia.
- Canny, J.F., 1986. “A Computational Approach to Edge Detection.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intel ligence*, 8(6):679-698.
- Chojnacki, W., Hengel, A., Szpak, Z. L., v.d., 2012. Guaranteed ellipse fitting with the Sampson distance, 12th European Conference Computer Vision.
- Christian, J.A., 2017. “Accurate Plenetary Limb Localization for Image-Based Spacecraft Navigation,” *J. Spacecrafts and Rockets*, vol. 54, no. 3, pp. 708-730.
- Dagvasumberel, A., 2019. “A Visual-Inertial Attitude Propagation for Resource-Constrained Small Satellites,” *J. Aeronaut. Sp. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 65–74.
- Fisher, R.B., Fitzgibbon, A., Pilu, M., 1999. “Direct least square fitting of ellipses”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 21(5), 476–480.
- Hartley, R., Zisserman, A., 2004. *Action of a Projective Camera on Quadrics*, 2nd ed.; Cambridge University Press: New York, NY, USA.
- Iwasaki, Y., v.d., 2019. “Development and Initial On-orbit Performance of Multi-Functional Attitude Sensor using Image Recognition,” in *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Utah, USA.
- Koizumi, S., v.d., 2018. “Development of Attitude Sensor using Deep Learning,” in *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Utah, USA.
- Lumpp, J. E. and Rawashdeh, S. A., 2014. “Image-based attitude propagation for small satellites using RANSAC,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 3, pp. 1864–1875.
- Modenini, D., 2018. “Attitude determination from ellipsoid observations: A modified orthogonal procrustes problem,” *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 41, no. 10, pp. 2320–2325.
- Modenini, D. and Zannoni, M., 2019. “A high accuracy horizon sensor for small satellites,” *2019 IEEE Int. Work. Metrol. AeroSpace, Metroaerosp. Proc.*, pp. 451–456, Torino, Italy.
- Steyn, W.H., 2020. “Stability, Pointing and Orintation,” in *Handbook of Small Satellites* (ed. J.N. Pelton), Springer Nature, Switzerland.
- Sweeting, M. N., 2018. “Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space,” *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 3, pp. 343–361.