

FIRDÖNDÜ UYDULAR İÇİN SÖZDE-ÖLÇÜMLER KULLANARAK YÖNELİM BAĞIMSIZ GERÇEK ZAMANLI MANYETOMETRE KALİBRASYONU

Mustafa Efe ÇETİN*
ROKETSAN A.Ş., Ankara

Halil Ersin SÖKEN†
Tübitak Uzay Teknolojileri
Araştırma Enstitüsü, Ankara

Ozan TEKİNALP‡
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Manyetometreler ucuz, hafif ve dayanıklı yapılarından dolayı küçük uzay araçlarındaki yönelim belirleme uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Fakat doğrudan kullanımları sensör hataları sebebiyle mümkün değildir. Söz konusu hatalar ulaşılabilecek yönelim belirleme hassasiyetini kısıtlamaktadır. Ne var ki ardışık çözüm üreten özyinelemeli algoritmalar kullanılarak manyetometre hataları (sabit kayma hatası, ölçeklendirme hatası ve eksenel kaçıklık hataları) kestirilip, ölçümler düzeltilebilir. Bu çalışmada Türkçe firdöndü uydusu olarak tabir edebileceğimiz dönü (ing. spin) kararlı uydular için tüm hata uzayını kapsayacak şekilde, gerçek zamanlı ve yönelimden bağımsız manyetometre kalibrasyon algoritması önerilmektedir. Algoritma oluşturulurken genel olarak kullanılan yönelim bağımsız, ölçüm büyüklüğünü temel alan gözlem, firdöndü uydusu dinamiği bilgisi kullanılarak türetilmiş iki yeni ölçüm ile desteklenmiştir. Önerilen yöntemin başarımı sentetik olarak üretilmiş ölçümlerle doğrulanmış ve performansı yaygın kullanıma sahip bir yığın manyetometre kalibrasyon algoritması ile karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Üç eksenli manyetometreler yönelim belirleme uygulamalarında sıklıkla tercih edilmekte ve kendilerine, güdümlü mühimmatlardan insansız hava araçlarına kadar geniş yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Sensörün pratik kullanılabilir oluşu, dayanıklı ve hafif yapısı ve düşük güç tüketimiyle birleştiğinde bu sensörleri yönelim açısından alçak Dünya yörüngesi (ADY) uydularının vazgeçilmez bir elemanı yapmaktadır. Sensör çıktı olarak uydusu eksen takımındaki manyetik alan vektörünü üretmekte, bu bilgi ataletsel ölçüm birimleri[Crassidis, 2003] veya kestirim algoritmaları destekli dinamik modeller[Psiaki, 1990] ile birleştirildiğinde yönelim bulunabilmektedir. Yönelim hassasiyeti sensör hatalarıyla kısıtlı olup, hata kestiriminin yapılması için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Özellikle küçük uydulardaki manyetometre hataları ve bu hatalara karşı kullanılabilecek kalibrasyon algoritmaları ilgi gören bir çalışma alanıdır [Soken, 2018].

*Mühendis, Füze ve Topçu Sistemler Direktörlüğü Sistem Tasarım Müd., E-posta: efe.cetin@roketan.com.tr

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

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

Manyetometrenin kullanıldığı yönelim belirleme uygulamalarında doğruluk yerleşik kalibrasyon algoritması ile doğrudan ilişkilidir. Manyetometre hataları pek çok değişkene bağlı olmakla birlikte üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar: sabit kayma hataları, ölçeklendirme hataları ve eksenel kaçıklık hatalarıdır. Hatalar yaygın olarak sensörlerin üretim ve montaj süreçlerinde meydana gelmekte veya termal ve mekanik yük kaynaklı olarak sonradan oluşabilmektedir. İçinde bulunan koşullara bağlı olarak hatalar zamanla değişebilen veya sabit davranış sergileyebilmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda önerilen algoritmanın zamanla değişen hata parametrelerini kestirebilir nitelikte olması önemlidir.

Manyetometre kalibrasyonu özellikle hataların kısa vadede değişmediği büyük uydular için yığın algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem uzun süre toplanan verilerin sonradan işlenmesi ile hata değerlerinin elde edilmesine dayanmaktadır. Bu prosedür uydunun görev süresinde defalarca tekrarlanmakta ve elde edilebilecek en iyi değerlerin bulunması hedeflenmektedir. Yığın kalibrasyon için kullanılan yönelimden bağımsız gözlem, manyetometrenin ölçtüğü gövde eksen takımıdaki manyetik alan vektörü ve modellenen geomanyetik referans vektörü kullanılarak oluşturulabilmektedir. Bu iki vektör sensör hatalarının ve gürültüsünün olmadığı mükemmel ölçüm durumunda eşit büyüklüğe sahiptir. Bu yöntem literatürde skalar değerlendirme olarak bilinmektedir [Wertz , 1978]. Yığın kalibrasyon algoritmaları temelinde eniyileme yöntemleri olup belirli bir maliyet fonksiyonunun en küçük değerini bulmayı hedeflemektedir. Alonso ve Shuster'ın geliştirdiği İki-Adımlı (*ing. TWO-STEP*) [Alonso , 2002] algoritma bu alandaki diğer yöntemler nazarında en kararlı performansı sergilemektedir ve en sık başvuru çözüm yoludur. Alonso ve Shuster ilk etapta sadece kayma hataları için önerdikleri mevcut algoritmayı genişletmiş ve manyetometrenin tüm hata uzayında uygulanabilir hale getirmiştir [Alonso , 2002]. Söz konusu yöntem, bu çalışmada önerilecek olan algoritmanın performansının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılacaktır.

Günümüz uzay araçlarında, otonom şekilde kalibrasyon algoritmalarının gerçekleştirilmesi yaygın istekler arasındadır. Hacimsel kısıtlar nedeniyle manyetometrelerin çevre şartlarından çokça etkilendiği ve hatalarının anlık değişebildiği küçük uydular için gerçek zamanlı kalibrasyon özellikle önemlidir. İki-Adımlı algoritma yinelenmesi gereken yöntemler arasında olup, görevin belirli bir bölümünde toplanan verilerin sonradan işlenmesine dayalıdır ve gerçek zamanlı çalışmaya uygun değildir. Ölçüm modelleri üzerinde yapılan iyileştirmelerle zamanla değişen hatalara karşı duyarlı hale getirilebilse de [Soken , 2018] gerçek zamanlı çalışmıyor olması anlık olarak değişen çevresel şartlara karşı tepkisiz kalmasına neden olmakta, bu da yönelim hassiyetini olumsuz etkilemektedir. Bu durumlar göz önüne alındığında gerçek zamanlı çalışabilen ardışık çözüm üreten özyinelemeli algoritmaların kullanılması güncel gereksinimlerin karşılanmasını adına önemlidir. [Crassidis, 2003]'de yönelim bilgisinden bağımsız gerçek zamanlı manyetometre kalibrasyon algoritması önerilmiştir. Algoritma ölçüm modelindeki yüksek doğrusal olmayan karakter sebebiyle sezgisiz Kalman filtresi (*ing. unscented Kalman filter / UKF*) ile başarımlı gösterebilmiş fakat genişletilmiş Kalman filtresi (*ing. extended Kalman filter / EKF*) gibi yapılarda yakınsama sorunları yaşamıştır.

Yakın zamanlarda yönelimden bağımsız manyetometre kalibrasyon çalışmaları jiroskop destekli veya bağıl açılma hız ölçümlerini kullanarak gerçekleştirilmiştir. [Wu , 2019] çalışmasında doğrusal-olmayan programlama temelli kalibrasyon algoritması önerilmiştir. [Troni , 2014] ve [Sakai , 2011]'da benzer yaklaşım Kalman filtresinin tasarlanmasında kullanılmıştır. Yukarıdaki tüm çalışmalar sadece sabit kayma hatasını bulmayı hedeflemiş diğer hata kaynaklarını göz ardı etmiştir.

Bu çalışmada fırdöndü uydular için ardışık kestirim algoritması olan UKF tabanlı, gerçek zamanlı, yönelimden bağımsız ve tüm manyetometre hata uzayını kapsayan bir kalibrasyon algoritması önerilmektedir. [Soken , 2017]'de bu çalışmanın öncül formu sadece sabit kayma hataları için uygulanmıştır. Kalibrasyon bir sözde-lineer Kalman filtresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bildiride önerilen algoritma ise dönen uydu dinamiği bilgisini tüm manyetometre hatalarını kestirmekte kullanmayı hedeflemektedir. Uydunun dinamik karakteri kullanılarak iki yeni ölçüm türetilmiş, bunlar da gerçek zamanlı çalışan algoritmaya sözde-ölçüm olarak beslenmiştir.

Çalışmanın yöntem kısmında; yönelimden bağımsız ve sözde-ölçümlerin nasıl elde edildiklerine, kestirim algoritmasının nasıl kurgulandığına değinilecektir. Uygulamalar bölümünde; önerilmiş algoritma sentetik olarak üretilmiş manyetik alan verileri ile denenecek, başarımı yaygın kullanıma sahip İki-Adımlı algoritmanınki ile karşılaştırılacaktır. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve başarımlar değerlendirilecek, sonraki çalışmalardan bahsedilecektir.

YÖNTEM

Ölçüm Modeli

Tüm hata uzayı göz önüne alındığında, manyetometre ölçümleri aşağıdaki gibi modellenenabilir,

$$\mathbf{B}_k = (I_{3 \times 3} + D_k)^{-1} (A_k \mathbf{H}_k + \mathbf{b}_k + \epsilon_k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$\mathbf{B}_k$ burada k ayrı zaman adımıdaki manyetometre ölçüm vektörü, $\mathbf{H}_k$ Dünya merkezli ataletsel koordinat sistemindeki (ing. Earth Centred Inetial / ECI) referans manyetik alan vektörü, A_k dünya merkezli ataletsel koordinat sisteminden gövde eksen takımına dönüşümü sağlayan yönelim matrisi, D_k matrisi ölçeklendirme ve eksenel kaçıklık hatalarını gösteren matris, $\mathbf{b}_k$ ise sabit kayma hata vektörüdür. Stokastik parametre olan ϵ_k ölçüm gürültü vektörüdür; sıfır ortalamalı, Gaussian dağılımına sahip olup kovaryans değeri Σ_k olarak gösterilir [$\epsilon \sim N(0, \Sigma)$].

Yönelimden Bağımsız Ölçüm:

Referans ve gövde eksen takımları arasında dönüşümler sırasında vektör büyüklükleri eşit kalmaktadır. Dolayısıyla ölçümlerin hatasız olduğu ideal durumda referans ($\mathbf{H}_k$) ve gövde eksen takımındaki ($\mathbf{B}_k$) manyetik alan ölçümleri büyüklükçe eşit olmak zorundadır. Ölçümün oluşturulabilmesi için öncelikle iki vektörü ilişkilendiren yönelim bilgisi ortadan kaldırılmalıdır. Bu da vektörleri karelerin alınmasıyla basit bir şekilde sağlanabilir.

$$z_k = \|\mathbf{B}_k\|^2 - \|\mathbf{H}_k\|^2 \quad (2)$$

Doğrusal olmayan ölçüm modeli $h_k(x_k)$ ve kalibrasyon için kullanılacak ölçüm (2) arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$z_k = h_k(x_k) + v_k \quad (3)$$

$$h_k(x_k) = -\mathbf{B}_k^T (2D_k + D_k^2) \mathbf{B}_k + 2\mathbf{B}_k^T (I_{3 \times 3} + D_k) \mathbf{b}_k - \|\mathbf{b}_k\|^2 \quad (4)$$

Ölçüm modeli $h_k(x_k)$ 'nin oluşturulması [Alonso, 2002]'da detaylı şekilde anlatılmıştır. Bu ölçüm ardışık kestirim algoritmamızda kullanılacak ilk ölçüm olup [Crassidis, 2003]'de önerilen algoritmalar içinde tek kullanılan ölçümdür.

Sözde-Ölçümler:

Belirli bir eksen etrafında gerçekleştirilen dönü hareketi en basit ve etkili yönelim dengeleme yöntemleri arasındadır. Uzay araçlarından topçu mühimmatlarına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada Z-ekseninde ω açısal hızında dönü dinamiğine sahip bir fırdöndü uydu incelenecek olup, sahip olduğu dinamik özellikler kullanılarak türetilmiş sözde ölçümler manyetometre kalibrasyon filtresinin bir parçası olarak kullanılacaktır.

İdeal durumda ölçülen manyetik alan vektörünün gövde X ve Y eksenlerine izdüşümü periyodik sinyaller oluşturmaktadır. Bahsedilmiş sensör hataları manyetometre ölçümleri üzerinde bozucu etkiye sahiptir. Sabit kayma hataları ölçümleri ötelemekte, ölçeklendirme hataları sinyallerin genliklerini değiştirmekte ve eksenel kaçıklık hataları sensör ölçümleri arasında istenmeyen ilişkilere neden olmaktadır.

Bu bölümde, yönelimden bağımsız ölçümün üzerine iki tane sözde-ölçüm önerilecektir. "Sözde" denilmesinin sebebi bu değerlerin doğrudan ölçülemiyor ve dönen uydu dinamiği varsayımı kullanılarak türetiliyor olmasıdır. Dolayısıyla bu ölçümler dönü dinamiğine sahip araçlarda fayda sağlayacaktır. Ölçümlerin oluşturulmasına (1)'de verilen ölçüm modelinin açılmasıyla başlanacaktır ($\bar{\mathbf{B}}_k = A_k \mathbf{H}_k$).

$$\begin{bmatrix} 1 + D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & 1 + D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & 1 + D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{B}_x \\ \bar{B}_y \\ \bar{B}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sensör hatalarının olmadığı durumda, dönü düzlemindeki ölçümlerin (X ve Y) sıfır ortalamalı, 90° faz farkına sahip periyodik salınım hareketi gerçekleştirmesi beklenmektedir. Dolayısıyla ölçümlerin belirli bir pencere boyutunda ortalaması alındığında alçak geçirgen filtre karakteri gösterip dönüden kaynaklanan frekansları süzecektir. Bu da hatanın olmadığı mükemmel ölçüm kabul edeceğimiz $[\bar{B}_x \ \bar{B}_y]^T$ terimlerini temizleyecek geriye kalan terimler ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum B_x &= (b_x - \frac{D_{12}}{N} \sum B_y - \frac{D_{13}}{N} \sum B_z) / (1 + D_{11}) \\ \frac{1}{N} \sum B_y &= (b_y - \frac{D_{21}}{N} \sum B_x - \frac{D_{23}}{N} \sum B_z) / (1 + D_{22}) \end{aligned} \quad (6)$$

Burada N ortalamanın alındığı pencere boyutunu belirtmektedir. Pencere boyutunun seçimi kritik bir parametre olup, büyük pencere seçiminde filtrenin kesme frekansının düşürülmesiyle beraber sistemdeki gürültü kaynaklı bozulmaların önüne geçilebilmektedir. Fakat yüksek dinamiklerin süzülmesi de olası ani hareketin veya değişimin kaçırılmasına sebep verecektir. Dolayısıyla uygulama bazlı ayarların yapılması veya uyarlamalı pencere boyutunun seçilebildiği bir çalışma gerçekleştirilmesi başarımın artırılması adına önemli olacaktır. (6) ile uydunun dönü dinamiği varsayımı kullanılarak sabit kayma hatası kestirimini iyileştirmek adına iki tane sözde-ölçüm ortaya konulmuştur. Z-ekseninde dönü dinamiğine bağlı ölçüm bulunmadığı için aynı yaklaşım uygulanamamaktadır. Bu eksenindeki iki ardışık ölçüm arasındaki değişimin az olduğu varsayımı kullanılarak ($\dot{\bar{B}}_z = 0$) yeni bir ölçüm önerilmiştir. (5)'deki ifadenin üçüncü satırı Z-eksenindeki ölçümü ifade etmektedir.

$$D_{13} B_x + D_{23} B_y + (1 + D_{33}) B_z = \bar{B}_z + b_z \quad (7)$$

İki tarafın zamana bağlı türevi alındığında yeni bir sözde-ölçüm elde edilebilmektedir.

$$\dot{\bar{B}}_z = (-D_{13} \dot{B}_x - D_{23} \dot{B}_y) / (1 + D_{33}) \quad (8)$$

Önerilen bu son ölçüm (8) simülasyon çalışmalarında kayda değer bir başarımla sergilememiş olup türev işlemini temel aldığı için gürültülü sinyallerde filtrenin kararlılığını bozucu etkiler göstermiştir. Dolayısıyla algoritmanın kurgulanmasında kullanılmamıştır.

Sonuç olarak dokuz tane manyetometre hata durumunun özyinelemeli UKF algoritmasında kestirimi için üç tane ölçüm önerilmiştir, bunlardan ilki yönelimden bağımsız ölçüm olup son ikisi dönü dinamiği varsayımı kullanılarak türetilmiştir. Bu yapı kullanılarak hataların gerçek zamanlı kestirimi sağlanacaktır.

UYGULAMALAR

Önerilmiş algoritma sentetik olarak üretilmiş veriler üzerinde doğrulanacaktır. Veriler ADY'nde, düşük eksantriklik $e = 6.4 \times 10^{-5}$ ve $i = 74^\circ$ lik meyil açısına sahip, ortalama irtifası 612 km olan yörüngede ve Z-ekseni etrafında 7.5 rpm dönüye sahip nano-uydu düşünülerek üretilmiştir.

Tablo 1: Manyetometre Hataları

Manyetometre Hataları için Gerçek Değerler					
Sabit Kayma Hatası (nT)		Ölçeklendirme Hatası		Eksenel Kaçıklık Hatası	
b_x	5000	D_{11}	0.05	D_{12}	0.05
b_y	3000	D_{22}	0.1	D_{13}	0.05
b_z	4000	D_{33}	0.05	D_{23}	0.05

Manyetometre verileri üretilirken sensör gürültüleri sıfır ortalamalı, Gaussian dağılımına sahip beyaz gürültü olarak karakterize edilmiştir ve standart sapma değeri $\sqrt{\Sigma} = 300 \text{ nT}$ olarak belirlenmiştir. Çalışmada manyetometre verileri ardışık ve yığın algoritmanın aynı ölçüm modeli ile karşılaştırılması adına sabit seçilmiş ve değerleri Tablo 1'de belirtilmiştir. Algoritmalar 18000s'lik veri paketi üzerinde uygulanmış, bu da yaklaşık olarak üç yörüngeye denk düşmektedir. Filtrenin öteleme ve güncelleme işlemleri her örnekleme adımında tekrarlanmıştır ($\Delta t = 1s$). Ortalamanın alındığı pencere boyutu $N = 8$ zaman adımı olarak seçilmiştir. Bu da Z-ekseni etrafında gerçekleştirilen bir tam dönü periyoduna eşittir. Yapılan denemeler sonucu en ideal değer bu olduğu görülmüştür çünkü pencere genişliği dönü periyodunu yakalayacak kadar uzun aynı zamanda yüksek dinamikleri yakalayacak kadar kısadır.

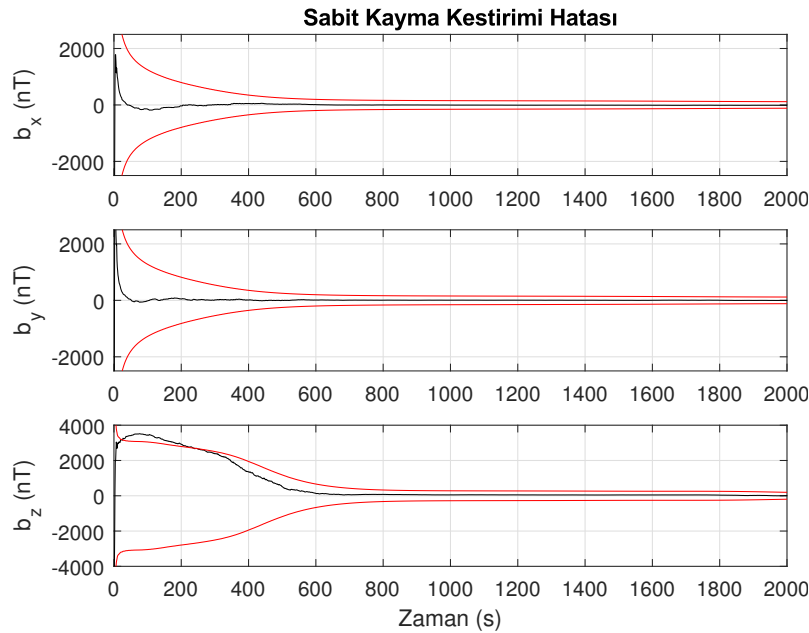


Fig. 1: Sabit Kayma Kestirimi Hatası ve 3σ limitleri

Fig. 1-3'te manyetometre kestirim hataları algoritmanın doğruluğunun daha kolay anlaşılabilmesi adına kestirim kovaryanslarından elde edilen $\pm 3\sigma$ limitleri ile birlikte verilmiştir. Sonuçların gösterdiği üzere manyetometre sensör hataları kısa bir zaman içerisinde yüksek doğrulukla kestirilmektedir. Sabit kayma hatası Z eksenindeki (b_z) gözlenebilirlik probleminden dolayı X ve Y eksenine göre daha geç yakınsamış ve doğruluk değeri de daha düşük kalmıştır. Gözlenebilirliğin artırılması adına Z eksen için türetilmiş son sözde-ölçüm de kullanılmış, düşük gürültü seviyelerinde yarar sağlasa da yüksek değerlere çıktığı noktada filtrenin kararlılığını olumsuz etkilemiştir. Gürbüzlük sorunlarından dolayı bu ölçüm verilen sonuçları elde ederken kullanılmamıştır.

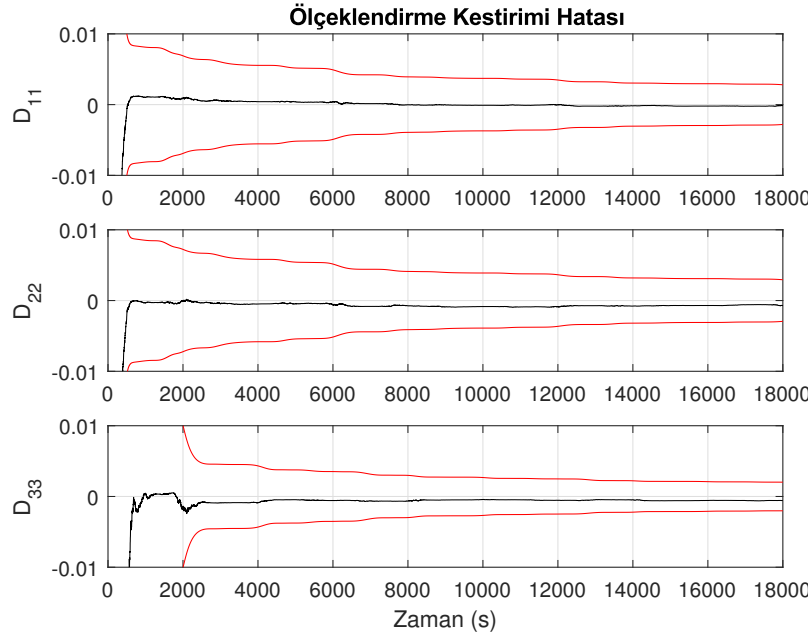


Fig. 2: Ölçeklendirme Kestirimi Hatası ve 3σ limitleri

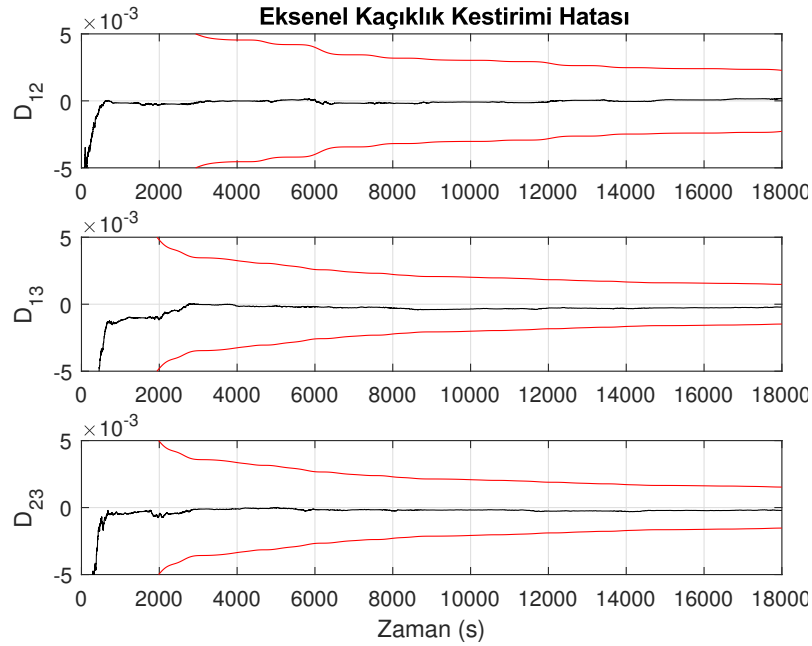


Fig. 3: Eksenel Kaçıklık Kestirimi Hatası ve 3σ limitleri

Algoritmanın başarımının karşılaştırılması yaygın kullanıma sahip yığın algoritma (İki-Adımlı) ile 1000 adet *Monte-Carlo* tipi simulasyon kullanılarak gerçekleştirilmiş, son hata kestirimlerinin ortalama ve $\pm 3\sigma$ değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Sonuçlarda açıkça görülebildiği gibi önerilen yeni yöntem hem sonuç doğruluğu hem de dağılımı açısından yığın algoritmaya denk hatta yer yer daha iyi performans göstermiştir. Öngörülebileceği gibi algoritmanın ortaya koyduğu doğrudan iyileştirme b_x ve b_y sabit kayma hatası kestirimlerinde gözlenmiş olup, önerilmekte olan sözde ölçümlerle beraber kestirimler daha dar bir dağılıma sahiptir. Bununla beraber dolaylı iyileştirme ise eksenel kaçıklık hatalarında gözlemlenmiştir. Dönü düzlemine ait olmayan D_{13} ve D_{23} parametrelerinin kestiriminde daha dar bir belirsizlik dağılımı elde edilmiş, fakat X ve Y eksenleri arasındaki D_{12} eksenel kaçıklık ilişkisinde iyileşme elde edilememiştir.

Tablo 2: Monte-Carlo Analizi Sonuçları

Parametre	Gerçek Değer	İki-Adımlı	UKF
b_x	5000 nT	$4998.5067 \pm 15.5661 nT$	$4998.8961 \pm 9.6920 nT$
b_y	3000 nT	$2999.1426 \pm 15.8386 nT$	$2998.9754 \pm 10.1059 nT$
b_z	4000 nT	$4009.5559 \pm 11.8367 nT$	$4012.1788 \pm 11.7200 nT$
D_{11}	0.05	0.0496 ± 0.0007	0.0498 ± 0.0007
D_{22}	0.1	0.0996 ± 0.0008	0.0997 ± 0.0008
D_{33}	0.05	0.0495 ± 0.0005	0.0494 ± 0.0005
D_{12}	0.05	0.0499 ± 0.0006	0.0499 ± 0.0006
D_{13}	0.05	0.0499 ± 0.0005	0.0499 ± 0.0004
D_{23}	0.05	0.0499 ± 0.0005	0.0499 ± 0.0004

SONUÇ

Bu çalışmada fırdöndü uydular için yönelimden bağımsız, sözde-ölçüm destekli, gerçek zamanlı manyetometre kalibrasyon algoritması önerilmiştir. Başarım sentetik olarak üretilmiş veriler üzerinde denenmiş, çalışmalarda ardışık algoritma ile sensör hataları başarılı bir şekilde kestirilmiştir. Değişken koşullara karşı hassasiyet ve doğruluğun belirlenmesi adına iki algoritma *Monte-Carlo* simulasyonları kullanılarak karşılaştırılmış, önerilen yöntem kullanılan sözde-ölçümlerle yığın algoritmaya denk hatta yer yer daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çıktılar göz önüne alındığında yığın algoritmanın zamanla değişen çevresel koşullara karşı yeterince duyarlı olamaması ve günümüzün artan bilgisayar performanslarıyla beraber yüksek işlem gereksinimleri olan algoritmaların artık tasarımlarda dar boğaz yaratmamasıyla gerçek uygulamalarda ardışık algoritmalar kendilerine daha yaygın kullanım alanı bulabilecektir.

Kaynaklar

- Alonso, Roberto and Shuster, Malcolm D., 2002. *TWOSTEP A fast robust algorithm for attitude-independent magnetometer-bias determination*, *Journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 50, s: 433-451
- Alonso, Roberto and Shuster, Malcolm D., 2002. *Complete linear attitude-independent magnetometer calibration*, *Journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 50, s: 477-490
- Crassidis, John L. and Markley, F. Landis., 2003. *Unscented Filtering for Spacecraft Attitude Estimation*, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 26, No. 1, s: 536-542
- Psiaki, Mark L. and Martel, Francois and Pal, Parimal K., 1990. *Three-axis attitude determination via Kalman filtering of magnetometer data*, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 3, s: 506-514
- Sakai, Shin-ichiro and Bando, Nobutaka and Shimizu, Shigehito and Maru, Yusuke and Fuke, Hideyuki, 2011. *Real-time estimation of the bias error of the magnetometer only with the gyro sensors*, *28th International Symposium on Space Technology and Science*, s: 1-6
- Söken, Halil Ersin and Sakai, Shin-ichiro, 2017. *Real-Time Attitude-Independent Magnetometer Bias Estimation for Spinning Spacecraft*, *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, Vol. 41, s: 276-279
- Söken, Halil Ersin, 2018. *A survey of calibration algorithms for small satellite magnetometers*, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 122, s: 417-442
- Troni, Giancarlo and Eustice, Ryan M., 2014. *Magnetometer bias calibration based on relative angular position: Theory and experimental comparative evaluation*, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s: 444-450
- Wertz, J.R., 1978. *"Scalar checking"*, *Spacecraft Attitude Determination and Control*, *Astrophysics and Space Science Library*
- Wu, Jin, 2019. *Real-Time Magnetometer Disturbance Estimation via Online Nonlinear Programming*, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, s: 4405-4411