

Ataletsel Algılayıcı Sistemlerinde Eğim Düzeltmesi İçin Yeni Bir Yöntem

A Novel Method for Tilt Compensation in Inertial Sensor Systems

Erol DUYNAMAZ¹

Optoel Mühendislik - Ostim Teknopark
İHA Teknolojisi - Ostim Teknik Üniversitesi
Ankara, TÜRKİYE
erol.duymaz@ostimteknik.edu.tr

Berker IŞIK²

Optoel Mühendislik
Ostim Teknopark
Ankara, TÜRKİYE
berkerali41@gmail.com

Özetçe— Ataletsel Ölçü Birim (AÖB) sistemleri, özellikle yerdeki sabit durumundan ayrılarak düşey eksen bileşeni içeren hareketlerde bulunduklarında verdikleri yönelim açılarındaki önemli bozulmalar yaşamaktadırlar. Bu çalışmada, düşük maliyetli bir Açısal Referans Sistemi (ARS) için ilgili soruna çözüm olması amacıyla yeni bir eğim düzeltme/telafi algoritması önerilmektedir. İvme, dönü ve manyetik ölçer verilerinin kullanılacağı söz konusu yaklaşım, yönelim doğruluğunda belirleyici bir etken olan manyetik ölçer kalibrasyon rutini ve olasılıksal filtreleme de içermektedir. Benzetim sonuçları, önerilen algoritmanın ham algılayıcı verileri içeren ilgili test dataları için 90 dereceden küçük düşey/dikey hareketlerde önemli ölçüde yönelim iyileştirmeleri yaptığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler — ataletsel algılayıcı; ivme-dönü-ölçer; manyetik-ölçer kalibrasyonu; kalman filtreleme; eğim düzeltme.

Abstract— Inertial Measurement Units experience significant deterioration in the orientation angles when they are in movements containing vertical axis components by removing from their stationary state on the ground. In this study, a new tilt compensation/correction algorithm is proposed for an AHRS-Attitude and Heading Reference System to solve the related problem. The approach, in which acceleration, rotation, and magnetic meter data are used, includes the probabilistic filter and also a magnetometer calibration routine, which is a determining factor in orientation accuracy. The simulation results showed that the algorithm made a significant orientation accuracy improvement in vertical movements less than 90 degrees for test-raw sensor data.

Keywords — inertial sensor; accelerometer-gyroscope; magnetometer calibration; kalman filter; tilt-compensation.

I. GİRİŞ

Ataletsel Ölçü Birimleri (Inertial Measurement Units), hareket halindeki bir cismin üstünde oluşan ivme (birim kütleye düşen kuvvet) ve dönme kuvvetini (dönüş hızı değişimi) 3 eksenle ölçen algılayıcıların genel ismidir. Bu algılayıcılar/sensörler, ayrıca manyetik alan yoğunluğunu da ölçüyor ise MARG (Magnetic, Angular Rate, Gravity) sensör olarak adlandırılır. Bu verileri kullanarak, cismin konum ve

hareketi hakkında bilgi sağlayan elektro-mekanik sistemler ise; Açısal Referans Sistemi (AhRS -Attitude and Heading Reference System) olarak bilinir.

AÖB sistemleri, özellikle gövdeye bağlı (strapdown) pozisyonda oldukları uygulamalarda, yerdeki kararlı durumundan ayrıldıklarında çıkış yönelim açılarındaki önemli bozulmalar yaşamaktadırlar. Düşey eksen bileşeni içeren bu hareketleri nedeniyle bozulan yönelim (euler) açıları sadece yüksek doğruluk gerektiren askeri uygulamalarda değil, tam bir hareket tanımlamaya engel olduğundan sağlık ya da spor gibi alanlardaki uygulamalar için de sorun oluşturmaktadır. Bu çalışmada, ilgili soruna çözüm olması amacıyla O-Motion marka yerli bir Açısal Referans Sistemi (ARS) kullanarak test edilen yeni bir eğim düzeltme/telafi algoritması önerilmektedir. Bunlarla birlikte, düşük maliyetli Mikro Elektronik Mekanik Sistemli (MEMS), ivme-ölçer (accelerometer), dönü-ölçer (gyroscope) ve manyetik-ölçer (magnetometer) algılayıcılarının sağladığı işlenmemiş veriler genel itibarıyla gürültü, önyargı (bias), orantı (scale), kayma (drift) ya da eksenel kaçıklık (misalignment) gibi deterministik ve olasılıksal bazı bozulmalara maruz kalmaktadır. [1-3] Bunların kalibrasyonsuz ya da kompanzasyonsuz (düzeltmeden) kullanılması yönelim gibi çıktılardaki hassasiyeti etkilemektedir. ARS ham verilerinin yönelim doğruluğu için bir eğim düzeltme algoritması yanısıra, ivme ve dönü ölçer filtrelemeleri ile manyetik ölçer kalibrasyon rutinine ve olasılıksal filtrelemeye de yer verilmiştir.

II. ÖN SİNYAL İŞLEME (SIGNAL CONDITIONING)

A. İvme-ölçer ve Dönü-ölçer Filtrelemeleri

İvme-ölçer ve dönü-ölçer sensörleri, (manyetik ölçer algılayıcılar gibi) yukarıda sözü edilen bozulmalara sahiptir. Özellikle gürültü, bu veriler üzerinde baskın olduğundan filtreleme/süzme işlemlerinden geçirilmeleri oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, ivme ve dönü-ölçer algılayıcıları için (manyetik ölçerden farklı olarak) yalnızca gürültü süzme uygulanmıştır.

B. Manyetik-ölçer Filtrelemesi ve Kalibrasyonu

Manyetik-ölçer algılayıcı, Dünya'nın manyetik alanını bulunduğu noktada/yerde ölçer. Manyetik-ölçer sensörün tüm yönlerde döndürülmesi ile yarıçapı manyetik alan kuvveti olan küre şeklinde bir veri kümesi oluşur. [1]

Bununla birlikte, özellikle düşük maliyetli sensörlerle yapılan ölçümler, çeşitli faktörler tarafından deforme edilmekte olup bu küre yapısı bozulur. Üretim/imalat hatası sorunları gibi enstrümantasyon hatalarına ek olarak, manyetik alan sensörler aynı zamanda manyetik düzensizlikler ve (sensörün içinde bulunduğu) ana platformdaki ferro-manyetik malzemelerin neden olduğu manyetik sapmalar gibi çevresel hatalara da maruzdurlar. [2]

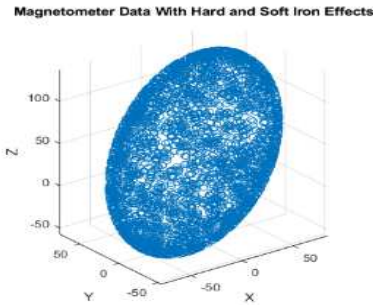
Bu bozulmalar, sensör ölçümlerinde yapay önyargı (bias), ölçek faktörü (scale factor) ve hizalama hatalarına (misalignment) neden olur. Bu hatalar, sert ve yumuşak demir hataları olarak kategorize edilir ve yüksek doğrulukta ölçümler elde etmek için manyetik-ölçerin süzme işleminden sonra uygun şekilde kalibre edilmesi gerekir. [3]

C. Hard-Soft Iron Bozulmaları ve Düzeltmeler

Hard-Iron (Sert-demir) etkisi, sabit alana sahip malzemeler tarafından üretilen bir bozulmadır. Gerçek sensör değerinin ilave bir sabit alanla eklenerek ölçmesine ve böylece, manyetik alan verilerinin orjinden sapmasına neden olur. [4]

Bu sapmayı (OFFSET) belirlemekte ilk adım, her eksenindeki sapmayı belirlemektir ve ardından bunu gerçek ölçümlerden çıkarmaktır. α veya (Bx) x eksenindeki sapmayı, β veya (By) y eksenindeki sapmayı ve ζ veya (Bz) z eksenindeki sapmayı ifade ediyor ise, OFFSET vektörünün oluşur üç parametrelili model şöyle olur; [5]

$$\begin{aligned} Bx &= x_{\max} - x_{\min}/2; \\ By &= y_{\max} - y_{\min}/2; \\ Bz &= z_{\max} - z_{\min}/2; \end{aligned} \quad (1)$$



Şekil 1. Manyetik ölçer verisi ve hard-soft iron etkisi

Soft-Iron (yumuşak demir) ise, ideal manyetometre verilerinin küresel yapısının, demir veya nikel gibi malzemeler tarafından üretilen bozulmalarla elipsoid bir manyetik alana dönüşmesidir.

$$\begin{aligned} Axy &= Ayx \\ Ayz &= Azy \\ Axx &= Azz \end{aligned} \quad \text{hizalama hata sabitleri ve} \quad Sx, Sy, Sz \text{ ölçek faktörleri olmak üzere; [2]}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{Matrix}} &= \begin{bmatrix} 1 & Axy & Axx \\ Ayx & 1 & Ayz \\ Axx & Azy & 1 \end{bmatrix} \text{ ve} \\ \mathbf{S}_{\text{Matrix}} &= \begin{bmatrix} Sx & 0 & 0 \\ 0 & Sy & 0 \\ 0 & 0 & Sz \end{bmatrix} \text{ olarak tanımlanır.} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{Soft-Iron}_{\text{Matrix}} = \begin{bmatrix} 1 & Axy & Axx \\ Ayx & 1 & Ayz \\ Axx & Azy & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Sx & 0 & 0 \\ 0 & Sy & 0 \\ 0 & 0 & Sz \end{bmatrix} = \text{FITTING}$$

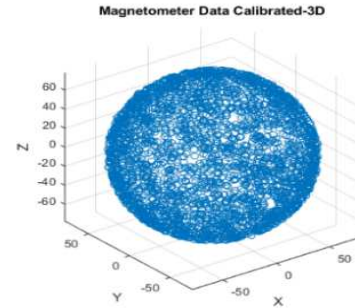
$$\mathbf{Hard-Iron}_{\text{Matrix}} = \begin{bmatrix} Bx \\ By \\ Bz \end{bmatrix} = \text{OFFSET} \quad (3)$$

Benzetim ortamında oluşturulmuş sanal manyetik ölçer verisi için Şekil 1'de bias (sapma), yanlış hizalama ve ölçeklemenin etkisi görüntülenmiştir. Yumuşak demir etkilerini düzeltmek için ana adım, elipsi FITTING modeline göre üç boyutlu rotasyon ($\mathbf{A}_{\text{Matrix}}$, $\mathbf{S}_{\text{Matrix}}$) matrisleri kullanarak x eksenini ile aynı hizada olacak şekilde döndürmektir: [2]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} Mx \\ My \\ Mz \end{bmatrix} = \text{FITTING} * \begin{bmatrix} mx \\ my \\ mz \end{bmatrix} - \text{OFFSET} \quad (4)$$

Burada; Mx, My, Mz-kalibreli manyetik ölçer verisi iken, mx, my, mz ise kalibresiz (ham) manyetik ölçer verileridir.

Sözü edilen bozulmaya uğramış sanal manyetik ölçer verisinin ilgili modele göre düzeltme/kalibrasyon işlemi gördükten sonraki gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kalibre edilmiş manyetik ölçer verisi

III. EĞİM DÜZELTME (TILT COMPENSATION)

ARS uygulamalarında, Z eksenini etrafındaki dönüşü (sapma yönelimini) hesaplamak için dönü ölçer kullanılırsa, kayma problemi dışında ilk değer belirleme de önem arz eder. Bu nedenle yazında, manyetik ölçer kullanarak Z yönelim/sapma açısı (yaw, heading, azimuth ...) hesaplayan yaklaşımlar görülmektedir. [6] Manyetik verileri kullanırken ise şu hususlara dikkat etmek gerekir; Dünyanın manyetik alanı, yeryüzeyine paraleldir. [7] Bu nedenle, üç eksenli manyetik ölçer (magnetometre) yeryüzüne paralel iken doğru bir şekilde ölçüm yapar. Ancak çoğu uygulamada magnetometre, içinde bulunduğu nesneye bağlanır (strapdown) ve nesne ile birlikte hareket ederek yatay düzlemin dışına çıkar. Sonuç olarak, sapma istikametini (yaw) ölçmek zor olur ve sensörün ne kadar eğildiğine bağlı olarak, hesaplamalarda farklı

miktarlarda hata görünür. [8] Eğim düzeltme/telafi işlemi, magnetometre verilerini yatay düzleme eşler ve magnetometrenin konumundan bağımsız olarak doğru bir açı hesaplaması sağlar. Bu yaklaşımda genellikle dönme (roll) ve yunuslama (pitch) açıları ivme ölçer verilerinden yararlanılarak hesaplanırken, magnetometrenin konumundan bağımsız olarak eğim hatasını düzeltmek için bu açılar manyetometre verileriyle birlikte kullanılır.

A. Model / Denklemler

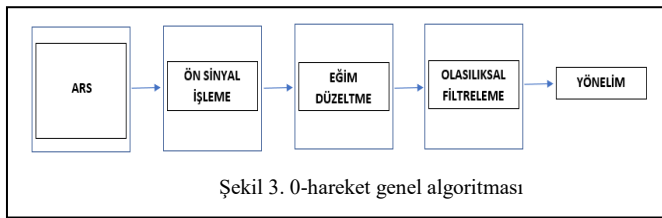
Eğim düzeltme ile ilgili model aşağıda verilmiştir; [3]

$$\Phi = \tan^{-1}(G_y/G_z)$$

$$\Theta = \tan^{-1}(-G_x/G_y \sin \Phi + G_z \cos \Phi) \quad (5)$$

$$\Psi = \tan^{-1}(M_z \sin \Phi - M_y \cos \Phi) / (M_x \cos \Theta + M_y \sin \Theta \sin \Phi + M_z \sin \Theta \cos \Phi)$$

Burada Φ dönme (roll) açısını, Θ yunuslama (pitch) açısını, Ψ ise sapma/yönelim (yaw) açısını ifade ederken, $G_{x,y,z}$ ivme ölçer ve $M_{x,y,z}$ manyetik ölçer verilerini ifade eder.



Şekil 3. 0-hareket genel algoritması

B. Algoritma

Bu araştırma kapsamında önerilen ARS eğim düzeltme algoritması Şekil 3'te verildiği gibidir. Önceki bölümlerde ilk (pre-) basamakları tanımlanan algoritmadaki düzeltici işlemlere rağmen ataletsel ölçü birimi ile tam bir yönelim almak ancak olasılıksal bir filtreleme (kalman, parçacık vs. filtreleme) ile mümkün olabilir. İyi tanımlanmış ve tüm hata parametrelerini içeren bir filtreleme, ARS çıkışında doğru/gerçek yönelim bilgileri alınmasını sağlar. Bu çalışmada, gürültü tahmini için kalman tabanlı filtreleme kullanılmış olup, parametreleri bildiri kısıtı nedeniyle özet olarak verilmiştir. Genel olarak 0-hareket adını verdiğimiz bu algoritmanın performansı sonraki bölümde tartışılacaktır. Kovaryans değerlerinin deneysel olarak belirlendiği kalman filtresi bölümünde yönelim açısı durum değişkenlerini oluşturacak şekilde; durum geçiş matrisi $A_k = [1 \ -dt \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$, gözlem matrisi $c_k = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 1]$, durum (geçiş) gürültüsü w_k , ölçüm gürültüsü ise v_k olarak alınmıştır. Proses ve ölçüm modeli eşitlikleri aşağıdaki gibi olup standart kalman tahmin/düzeltilme adımları kullanılmıştır;

$$\mathbf{x}_{\varepsilon,k} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_{\varepsilon,k-1} + \mathbf{w}_k$$

$$\mathbf{z}_{\varepsilon,k} = \mathbf{c}_k \mathbf{x}_{\varepsilon,k} + \mathbf{v}_k \quad (6)$$

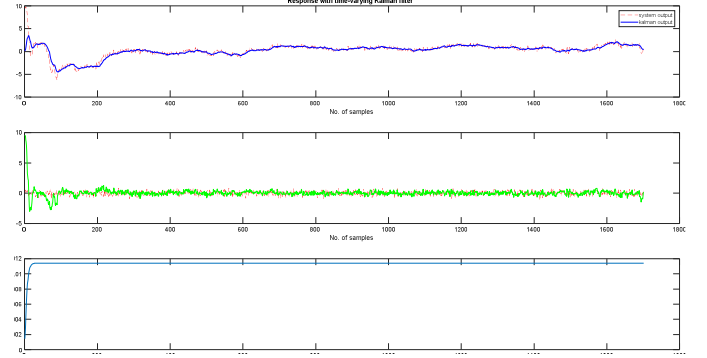
IV. BULGULAR

Bu çalışmada, ataletsel ölçüm verileri, 9 DOF (serbestlik dereceli) O-Motion marka yerli bir Açısız Referans Sisteminden (ARS) alınmıştır. Alınan ham datalar; ivme, dönü ve manyetik ölçer verilerini içermektedir. Gürültülü ve çeşitli hatalar barındıran bu verilere, filtreleme ve kalibrasyon gibi ön (pre-) sinyal işleme algoritmaları uygulanmıştır. Algılayıcı

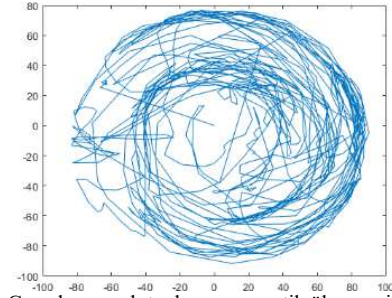
yöneliminin, eğim (tilt) hareketlerinde bozulmasını engelleyen eğim düzeltme işlemi sonrasında olasılıksal hatalar için son (post-) filtreleme gerçekleştirilmiştir. Algoritma adımları ile ilgili sonuçlar şöyledir;

A. Ön Sinyal İşleme Sonuçları

Ataletsel sensör verilerinin sapma, gürültü gibi etkilerden arındırıldığı işlemler olup sensör filtreleme ve kalibrasyonlarına ait sonuçlardan bazıları Şekil 4 ve 5'deki gibidir;



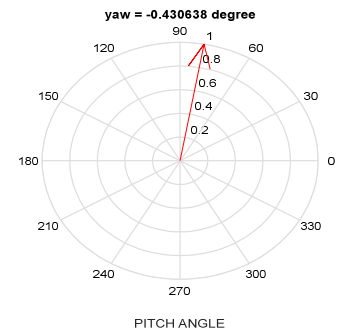
Şekil 4. Algoritma ile düzeltilmiş (x eksen) ivme-ölçer verisi (üstte), tahmin hatası (ortada) ve hata kovaryansı (altta)



Şekil 5. Gerçek zamanlı toplanan manyetik ölçer verilerinin X (yatay) ve Y (düşey) düzlemleri için kalibrasyon sonrası değerleri.

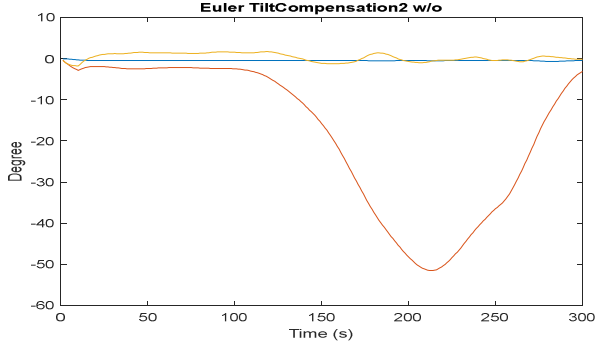
Kalibrasyonlu manyetik ölçer verisi, üç boyutlu (XYZ) düzlemde küresel bir formda oluşurken herhangi iki bileşeni içeren durumda dairesel formda ortaya çıkar. Gerçek zamanlı olarak toplanan manyetik ölçer verisinin *Hard-Soft Iron* etkilerinden arındırılmış kalibrasyonlu 2B gösterimi Şekil 5'de verilmiştir. Burada kalibrasyonun performansı (sabit) manyetik alan normu ve (birden küçük) residual hata parametresi gibi metriklerle de ölçülerek teyid edilmiştir.

B. Eğim Düzeltme ve Yönelim Sonuçları



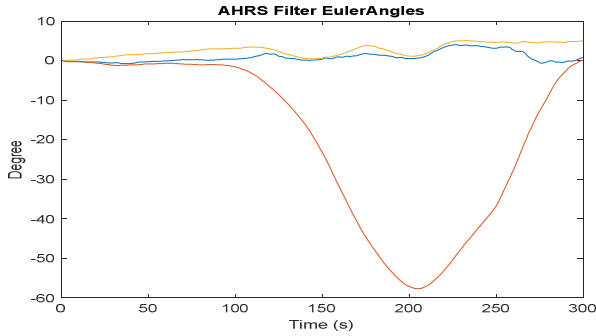
Şekil 6. Eğim düzeltme uygulanmış gerçek zamanlı sapma açısı

Eğim düzeltme algoritması uygulanarak alınan gerçek zamanlı sapma açısı sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Burada, yunuslama (pitch) açısının 90 dereceye yakın olduğu durumda, değişmeyen başlangıç (0 derece civarındaki) sapma açısının korunduğu görülmektedir.



Şekil 7. Algoritmamız ile düzeltilmiş yönelimler: yunuslama (kırmızı), dönme (mavi) ve sapma açısı (sarı)

Ayrıca, genel algoritmamız ile alınan yönelimler Şekil 7'de, referans bir veri birleştirme algoritması yoluyla alınan yönelim sonuçları ise Şekil 8'de verilmiştir. Burada dönme ve sapma açılarındaki bozulmalar (150-250sn. arası yaklaşık 10°) açıkça görülmekte olup algoritmamızda bu açılar bozulmamıştır.



Şekil 8. Referans algoritma ile düzeltilmiş yönelimler: yunuslama (kırmızı), dönme (mavi) ve sapma açısı (sarı)

TABLO I. HATA ÖLÇÜM TABLOSU

Algoritma Tahmin Hata Ort.	Yunuslama Açısı Değeri	Sapma Açısı (Gerçek Açısı=10°)	
		Tahmin-1(o)	Tahmin-2(o)
0.25	30 derece	10.25	11.12
1.57	60 derece	11.57	12.38
2.64	70 derece	12.64	13.09

0-hareket algoritması ve farklı kalman modellenen referans algoritma için değişen yunuslamalarda (10° sapma) elde edilen hatalara ait sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Algoritmamızın kullandığı sapma açısı tahmininde (Tahmin-1) alınan hata değerleri $\pm 2\sigma$ (%95.49) güvenilirlik sınırları içerisinde olup referans algoritmaya göre gerçek değerlere daha yakındır.

V. SONUÇ

AÖB sistemleri, günümüzde çok yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Askeri alanda füze güdüm sistemlerinden pozisyon kontrolü ve seyrüsefer problemlerine kadar

kullanılmakta olan bu yapılara sağlığta daha çok hareket bozuklukları, performans değerlendirme, erken teşhis ve tanı gibi alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Spordaki performans analizlerine ek olarak, eğlence sektöründe sanal ve artırılmış gerçeklik içeren tüm uygulamalarda AÖB'leri görmek mümkündür. Özellikle uygulamanın doğası gereği gövdeye bağlı (strapdown) pozisyonda oldukları uygulamalarda ise, yerdeki kararlı durumundan ayrıldığı düşey eksen bileşenli hareketleri nedeniyle bozulan yönelim (orientation) açıları sadece yüksek doğruluk gerektiren askeri uygulamalarda değil, sağlık ya da spor gibi uygulamalar için de sorun oluşturmaktadır. Bu çalışmada, ilgili soruna çözüm olması amacıyla yeni bir eğim düzeltme/telafi algoritması önerilmiştir. O-Motion marka yerli bir ARS, ham algılayıcı verileri sağlamakta kullanmıştır.

Önerilen yaklaşımda, ARS ham verilerinden doğru yönelim açıları elde etmek için öncelikle algılayıcı ön filtrelemeleri ile manyetik ölçer kalibrasyon rutini kullanılmıştır. Algoritmada bunun yanısıra sapma açısı doğruluğu sağlayan eğim düzeltme ve olasılıksal filtrelemeye (kestirime) de yer verilmiştir. Benzetim sonuçları, test hareketleri için algoritmanın 90 dereceden küçük düşey/dikey hareketlerde önemli ölçüde iyileştirme yaptığını göstermiştir.

Daha sonraki çalışmalar kapsamında kayma (drift) eliminasyonları, doğrusal ivmelenme ve manyetik bozucu etkileri gibi durumların yönelim çıkışlarına etkisinin incelenerek düzeltilmesi ile Madgwick, bütüncü filtreler gibi sensör birleştirme yaklaşımlarının benzetimleri ya da sağlık, savunma, ulaşım vb. alanlardaki deneysel ARS uygulamalarının gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] <https://www.mathworks.com/help/nav/ug/magnetometer-calibration.xml>
- [2] Ozyagcilar T., "Calibrating an e-Compass in the Presence of Hard and Soft-Iron Interference", *Freescale Semiconductor Application Note*, Document Number: AN4246, Rev. 3, 04/2013
- [3] Ozyagcilar T., "Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors", *Freescale Semiconductor Application Note*, Document Number: AN4248, Rev. 4, 11/2015
- [4] Renaudin V., Afzal M.H., Lachapelle G., "Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain", *Journal of Sensors*, Vol. 2010, Article ID 967245, 2010, p10. <https://doi.org/10.1155/2010/967245>
- [5] Revuelta A.L., "Orientation estimation and movement recognition using low-cost sensors", (Dissertation), Department of Applied Signal Processing in Electrical Engineering, Blekinge Institute of Technology, 2017, SE-371 79 Karlskrona, Sweden
- [6] Yun S., Park C.G., "A Calibration Technique for a Two-Axis Magnetic Compass in Telematics Devices", *ETRI Journal*, Volume 27, Number 3, June 2005
- [7] <https://www.autoquad.org/magnetic-inclination-and-declination>
- [8] Yang J., Wang J., Wang Y., Hu X., "Algorithm design and experimental verification of a heading measurement system based on polarized light/inertial combination", *Optics Communications*, 2021, Vol 478, 126402, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126402>