

En Küçük Kareler Yöntemi ile Manyetometre Kalibrasyon Algoritması Geliştirilmesi ve Performans İncelemesi

Development of Magnetometer Calibration Algorithm with Least Squares Method and Performance Analysis

Murat GÜDER, C. Nurettin YILMAZ, İ. Ahmet ALTAŞ
Termoakışkan ve Elektronik Sistemler Mühendisliği Bölümü
Anova Arge Teknolojileri A.Ş., Ankara, Türkiye
{murat.guder, nurettin.yilmaz, ahmet.altas }@anova.com.tr

Özetçe— Günümüzde manyetometreler, manyetik alan şiddetini ölçmenin yanında manyetik kuzey yönünü tespit etmek amacıyla da kullanılan sensörlerdir. Manyetometre sensörleri, sensörün doğasından kaynaklanan hatalar, montaj hataları ve çevresel etkilerden dolayı doğrudan manyetik pusula olarak kullanılamamaktadır. Manyetometre sensörlerini, manyetik pusula olarak kullanabilmek için kalibrasyon algoritmasının geliştirilmesi ve ölçüm üzerindeki hataların elimine edilmesi gerekmektedir. Geliştirilen manyetometre kalibrasyon algoritmasının sınırlı hafıza, ram ve işlem kapasitesine sahip mikro işlemciler üzerinde çalışabilmesi için bir kalibrasyon algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca kalibrasyon katsayılarını oluşturmak için kullanılan veri toplama senaryolarının kalibrasyon sonucuna etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, farklı senaryolarda veri setleri oluşturulmuş, simülasyon ve deneysel olarak açı değerleri hesaplanmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda, farklı senaryolar arasındaki açı değerleri farklarının 1 derecenin altında olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler — *En Küçük Kareler Yöntemi; Manyetometre Kalibrasyon; Elipsoid Uydurma; Manyetik Pusula.*

Abstract— Today, magnetometers are sensors used to measure magnetic field strength and detect magnetic north direction. Magnetometer sensors cannot be used directly as magnetic compass due to errors caused by the nature of the sensor, assembly errors and environmental effects. In order to use magnetometer sensors as magnetic compass, the calibration algorithm of the magnetometer sensor has been developed and errors in the measurement must be eliminated. In order for the developed magnetometer calibration algorithm to work on microprocessors with limited memory, ram and processing capacity, the calibration algorithm has been developed. In addition to

that, the effect of the data collection scenarios used to create the calibration coefficients on the calibration result has been examined. In this context, data sets were created for different scenarios, angle values were calculated by simulation and experimentally. In simulation and experimental studies, it was seen that the differences in angle values between different scenarios were below 1 degree.

Keywords — *Least Square Method; Magnetometer Calibration; Ellipsoid Fitting; Magnetic Compass.*

I. GİRİŞ

Sayısal manyetik pusulalar (SMP), Dünya üzerinde bulunan manyetik alanın yönünü ve büyüklüğünü, bulunduğu noktada vektörel olarak ölçerek manyetik kuzey yönünü gösterebilen cihazlardır. SMP ölçüm sonucuna sensör öngerilimi (*ing. bias*), sensör hassasiyeti (*ing. sensitivity*), sensör eksen bozukluğu (*ing. non-orthogonality*) gibi sensör doğasından kaynaklanan hatalar, sensör montajı eksen kayması (*ing. misalignment*) gibi üretim hataları, sert demir ve yumuşak demir gibi çevresel etkiler etkimesinden dolayı manyetometreler doğrudan manyetik pusulalar olarak kullanılamamaktadır. SMP'lerin manyetik pusula olarak kullanılabilmesi için manyetometrenin kullanımdan önce kalibre edilmesi gerekir.

Manyetometre kalibrasyon algoritması ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ile manyetometrenin kalibrasyon parametreleri farklı yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. [1]'deki çalışmada manyetik pusula döner tabanın üzerine bağlanmış ve çeşitli yükseliş (*elevation*) ve yatış (*bank*) açılarında ayrı ayrı döndürülerek veri toplanmış ve elipsoid uydurma tabanlı bir yöntem ile hata parametreleri hesaplanmıştır. [2]'deki çalışmada 3 eksen manyetometrenin kalibrasyonu için elipsoid uydurma yöntemi

kullanılmış ve hata parametrelerinin hesaplanması için manyetometreden farklı durumlarda 600 noktadan veri toplanmıştır. [3]'teki çalışmada uygulamada kullanılan ideal manyetometrenin küre yarıçapını tespit edebilmek amacıyla açılacak yaklaşım uygulanmış ve hesaplamalar manyetometreden toplanan 46 veri ile gerçekleştirilmiştir. [4]'teki çalışmada en küçük kareler yöntemi ile hata parametreleri hesaplanmaya çalışılmış ve hata parametrelerinin hesaplanması için manyetometreden bütün açıl durumlara göre veri toplanmıştır. [5]'teki çalışmada manyetometre kalibrasyonu için en küçük kareler yöntemi ile belirli koşullar altında elipsoid uydurma yöntemi kullanılmış ve hata parametrelerinin hesaplanması için manyetometre verileri manyetometrenin bulunabileceği bütün olası durumlara göre toplanmıştır. Manyetometrenin gömülü sistem uygulamalarında, manyetometre kalibrasyonu için gerekli olan veri kümesi büyüklüğü mikroişlemcinin hafıza, ram ve işlem kapasitesi sınırlamalarından dolayı önemli bir etken olmaktadır. Bu çalışmada, geliştirilen en küçük kareler yöntemi ile elipsoid uydurma tekniğinin, manyetometre kalibrasyon algoritmasının gömülü sistemlere uygulanabilirliğini kontrol etmek amacıyla, veri toplama senaryosu ve veri büyüklüğüne göre performansı, bütün durumlar, 3 tam tur dönüş ve 12 nokta olmak üzere 3 farklı senaryodan elde edilen veri kümesine göre önce MATLAB ortamında daha sonra deneysel olarak incelenmiştir.

II. Bölümde manyetometrenin sensör hataları ile birlikte matematiksel modeli oluşturulmuştur. III. Bölümde manyetometre kalibrasyon algoritmasının hesaplanması çıkarılmıştır. IV. Bölümde manyetometreden bütün durumlar, 3 tam dönüş ve 12 nokta senaryolarında toplanan veri kümelerinin simülasyon sonuçları incelenmiştir. V. Bölümde manyetometre kalibrasyon performansının belirtilen 3 senaryoya göre performansı deneysel olarak incelenmiştir. VI. Bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışma yalnızca manyetometrenin çevresel etkilere karşı kalibrasyon algoritması geliştirme ve performansını inceleme üzerine hazırlanmıştır. Eğitim kompanzasyonu ve manyetometre üretiminde oluşan hataların kalibrasyonu bu çalışma kapsamında değildir.

II. MANYETOMETRE HATA MODELİ

Manyetometreler, manyetik kuzey yönünü tespit etmek amacıyla manyetik alan büyüklüğünü ve yönünü ölçebilen cihazlardır. Manyetometre ölçüm sonucu sensör hassasiyeti, sensör öngerilimi, eksen bozukluğu gibi sensörün üretiminden kaynaklanan sebeplerden; eksen kayması gibi montaj sırasında oluşan hatalardan; ferromanyetik malzemeler ve demir, nikel, kobalt gibi ölçüm ortamında bulunan çevresel etkenlerden etkilenecek bozulur. Ayrıca ölçüm sonucuna gauss, termal ve stokastik gürültüler de etki etmektedir.

A. Sensör Üretiminden Kaynaklanan Hatalar

Sensör Hassasiyeti: 3 eksen manyetometrelerde, orthogonal 3 eksen kullanılmaktadır. Manyetometre sensör üretimi esnasında her bir eksenin ölçüm hassasiyeti tam olarak aynı olmadığı için oluşan hatadır [6].

Sensör Öngerilimi: Sensör sürücü devrelerindeki voltajın, sensör çıkışına sabit voltaj olarak etkimesidir. Bu durumda ortamda manyetik alan bulunmasa dahi sensör çıkışında sabit voltaj bulunması durumudur.

Sensör Eksen Bozukluğu: Sensör üretiminde kartezyen koordinat sisteminde her bir eksene konulan sensörlerin tam olarak birbirine dik olmamasından kaynaklanan hatadır [3].

B. Sensör Montajından Kaynaklanan Hatalar

Eksen Kayması: Kurulum esnasında 3 eksen manyetometre eksenlerinin, kurulum yapılacak platform eksenlerine hizalama yapılamamasından kaynaklanan hatadır [3].

C. Çevresel Hatalar

Sert Demir: Manyetometrenin ölçüm yaptığı ortamda, ölçüm sonucu etkileyecek mesafede manyetik alan oluşturan malzemenin bulunması durumunda, sensör hem ortamda bulunan manyetik alanı hem de malzemenin ürettiği manyetik alanı ölçer. Bu etkiye sert demir etkisi denir [7]. Manyetik alan üreten malzemeler sensör çıkışına toplam olarak etkiyelecektir ve sensör çıkışında sabit voltaj olarak görünür.

Yumuşak Demir: Ferromanyetik malzemeler dünyanın manyetik alanı üzerinde bozucu etkiye sahiptir. Ferromanyetik malzemenin sensör etkin ölçüm mesafesinde olması durumunda manyetometre ölçüm sonucu bozulacaktır. Bu etkiye yumuşak demir etkisi denir [8].

Sensör hassasiyeti, sensör öngerilimi, sensör eksen bozukluğu, montaj eksen kayması hataları sensör çıkışında minör bozulmalara sebep olur iken ölçüm ortamında bulunan sert demir ve yumuşak demir etkenler sensör çıkışında majör bozulmalara sebep olmaktadır. Minör bozulmaya sebep olan hatalar sabit olduğu için ve zamanla değişmeyeceği için manyetometre sensör kalibrasyonu ile fabrikada üretim sürecinde ve montajda düzeltilebilir.

Diğer taraftan majör bozulmalara sebep olan hatalar çevresel etmenlerden kaynaklanan hatalar olduğu için kullanım esnasında, sensörün bulunduğu ortam değişikçe kalibre edilmesi gerekmektedir.

Sıcaklık değişimi sensör parametreleri üzerine etki etse dahi manyetometrenin manyetik pusula olarak kullanıldığı uygulamalarda, sıcaklık değişimi her bir eksen ölçüm hassasiyetine eş olarak etki edecektir. Manyetik pusula uygulamalarında açı hesabı x ve y eksenlerinin oranı üzerinden hesaplandığı için sıcaklık değişiminin sensör hassasiyeti üzerindeki etkisi ihmal edilebilir [9].

Manyetometre sensörü manyetik alan şiddeti ölçümü,

$$H_m = C_{si}C_mC_{sf}C_{nor}H_e + O_{hi} + O_{sb} \quad (1)$$

olarak ifade edilir.

$$H_m = CH_e + O_{hi} + O_{sb} \quad (2)$$

Denklemden, C_{si} , yumuşak demir etkilerini; C_m , eksen kayması; C_{sf} , sensör hassasiyeti; C_{nor} , eksen bozukluğu; O_{hi} , sert demir etkileri; O_{sb} , sensör öngerilimini ifade eder.

$C = C_{si}C_mC_{sf}C_{nor}$ ideal manyetometreye çarpan olarak etkiyen hataların kümülatif ifadesidir. $H_e = [h_x \ h_y \ h_z]^T$ ideal manyetometre ölçümünün vektörel olarak ifadesidir.

$H_m = [h_{mx} \ h_{my} \ h_{mz}]^T$ ise manyetometre sensöründen alınan manyetik alan şiddetinin vektörel olarak ifadesidir.

Denklem (2)' de O_{sb} hem çok küçük bir değer hem de sert demir kalibrasyon ile elimine edilebileceği için ihmal edilir. Bu durumda denklem,

$$H_m = CH_e + O_{hi} \quad (3)$$

olarak ifade edilebilir.

Denklem (3), ideal manyetometre ölçüm sonucunu ifade edecek şekilde tekrar düzeltilebilir,

$$H_e = C^{-1}x(H_m - O_{hi}) \quad (4)$$

$$H_e = M(H_m - O_{hi}) \quad (5)$$

$$M = C^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

ideal manyetometreye çarpan olarak etkiyen hataların kümülatif ifadesinin birimsel etkisidir.

İdeal şartlar altında manyetometrenin bulunduğu ortamdaki manyetik alan büyüklüğü, H_e sabittir. Bu sebeple;

$$\|H_e\|^2 = H_e^T x H_e = (H_m - O_{hi})^T M^T M (H_m - O_{hi}) \quad (6)$$

olur ve (6),

$$H_m^T \frac{M^T M}{\|H_e\|^2} H_m - 2 \frac{O_{hi} M^T M}{\|H_e\|^2} H_m + \frac{O_{hi}^T M^T M O_{hi}}{\|H_e\|^2} - 1 = 0 \quad (7)$$

şeklinde düzenlenebilir.

III. ELIPSOİD UYDURMA

İdeal şartlar altında manyetometrenin bulunduğu ortamdaki manyetik alan büyüklüğü sabit olduğu için manyetometrenin kendi eksenini etrafında dönüşleri sonucu elde edilen ölçümler bir kürenin yüzeyindeki noktaları oluşturur. Fakat manyetometre ölçümüne iç ve dış etmenler etkimesinden dolayı kürenin merkez noktası kayar ve bozucu etkilerin büyüklüğüne bağlı olarak küre formu elipsoid formuna dönüşür. Manyetometrenin kalibre edilebilmesi için elipsoid formunu tekrar küre formuna dönüştürecek parametrelerin hesaplanması gerekir.

Elipsoid genelleştirilmiş konik,

$$F(\theta, H_m) = ah_{mx}^2 + bh_{my}h_{mx} + ch_{my}^2 + dh_{mx}h_{mz} + eh_{my}h_{mz} + fh_{mz}^2 + ph_{mx} + rh_{my} + sh_{mz} \quad (8)$$

olarak ifade edilebilir.

$\theta = (a, b, c, d, e, f, p, r, s)^T$ elipsoidin parametreleri, x, y, z elipsoid üzerindeki noktaların vektörel ifadesidir.

Denklem(8) matris olarak şu şekilde ifade edilebilir,

$$(X - X_0)^T A (X - X_0) = 1 \quad (9)$$

ve genişletilebilir,

$$X^T A X - 2X_0^T A X + X_0^T A X_0 = 1 \quad (10)$$

$X = [x \ y \ z]^T$, elipsoid üzerindeki noktaların vektörel ifadesidir.

Elipsoidin standart forma dönüşü,

$$A = \begin{bmatrix} a & d/2 & e/2 \\ d/2 & b & f/2 \\ e/2 & f/2 & c \end{bmatrix} \text{ olarak ifade edilebilir ve merkezi ,}$$

$$X_0 = -A^{-1}[p/2 \ r/2 \ s/2]^T \text{ olarak ifade edilir.}$$

Denklem (7) ve (10) kıyaslandığında manyetik girişim modeli ile elipsoid modeli birbirine oldukça benzerdir.

Elipsoid uydurma ilkesi, denklem (11) veya (12) de ifade edildiği gibi, ölçülen veri noktasından elipsoide hesaplanan cebirsel uzaklıkların karelerinin toplamının minimize edildiği ideal bir elipsoid bulmaktır [10].

$$\min_{\theta \in R^{10}} \sum_{i=1}^N \|F(\theta, H_{mi})\|^2 \quad (11)$$

$$\min_{\theta \in R^{10}} \theta^T D^T D \theta \quad (12)$$

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 z_1 & y_1 z_1 & z_1^2 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 z_2 & y_2 z_2 & z_2^2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 & x_N z_N & y_N z_N & z_N^2 & x_N & y_N & z_N & 1 \end{bmatrix}$$

D matrisi, ölçülen noktaların matris formuna getirilmiş halidir ve tasarım (Design) matrisi olarak da ifade edilebilir. Uydurulan yüzeyin bir elipsoid olduğundan emin olmak için, $4ab - b^2 = 1$ eşitlik kısıtlaması (13) ile uygulanabilir.

$$\theta^T C \theta = 1 \quad (13)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0_{3 \times 7} \\ 0_{7 \times 3} & 0_{7 \times 7} \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

C, Kısıtlayıcı (Constraint) matrisi olarak ifade edilir.

Denklem (12) ve (13) ' e Lagrange çarpanı kullanılması ile birleştirilen denklem,

$$G(\theta) = \theta^T D^T D \theta + \lambda(1 - \theta^T C \theta) \quad (14)$$

şeklinde elde edilir.

Ekstremum noktalarının bulunabilmesi için, (14)'ün θ^T 'ye göre 1. seviye türevinin alınıp 0 'a eşitlenir.

$$D^T D \theta = \lambda C \theta \quad (15)$$

Böylece elipsoid kısıtlaması altındaki ekstremum noktaları elde edilebilir.

$$\begin{cases} D^T D \theta = \lambda C \theta \\ \theta^T C \theta = 1 \end{cases} \quad (16)$$

Denklem (15) ile ifade edilen problem, bir özdeğer problemidir ve θ çözümü, $D^T D$ matrisinin en küçük pozitif özdeğere karşılık gelen C matrisine göre genelleştirilmiş özvektördür ve bu da denklem(16) ile ifade edilir. Özdeğer probleminin çözümü, elipsoidin katsayı matrisi A ve elipsoidin merkez koordinatları X_0 sonuçlarını verir.

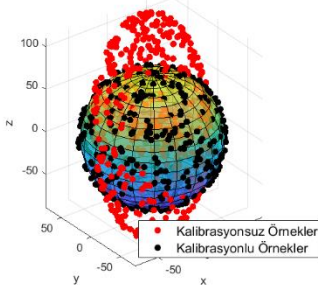
IV. SIMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Simülasyon çalışmalarında geliştirilen manyetometre kalibrasyon algoritmasının, farklı senaryolarda toplanan verilere göre performansı incelenmiştir. Öncelikle manyetometrenin MATLAB ortamında sensör modeli oluşturulmuştur.

A. Veri Toplama Senaryosu – 1

Bu senaryoda, manyetometrenin bulunabileceği bütün açısal durumlardan manyetometre verisi toplanmıştır. Oluşturulan veri kümesinin kalibrasyon parametreleri çıkarılmıştır. Elde edilen kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon parametreleri ile düzeltilen manyetometre verileri Şekil 1’de gösterilmiştir.

Manyetometre Bütün Durumlar Kalibrasyonu



Şekil. 1. Manyetometrenin Bütün Durumlarına Göre Kalibrasyonu

Senaryo - 1 verilerine göre elde edilen Yumuşak Demir parametreleri,

$$S_{i_{sen1}} = \begin{bmatrix} 0.9847 & -0.2311 & -0.0363 \\ -0.2311 & 1.3609 & -0.3391 \\ -0.0363 & -0.3391 & 0.8710 \end{bmatrix}$$

Sert Demir parametreleri,

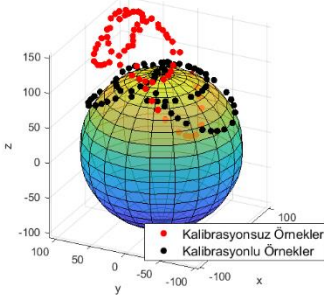
$$H_{i_{sen1}} = [2.1746 \quad 5.1520 \quad 10.2458]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

B. Veri Toplama Senaryosu - 2

1. durumda elevation açısı -30° , bank açısı 0° iken manyetometre tam tur döndürülerek,
2. durumda elevation açısı 0° , bank açısı 0° iken manyetometre tam tur döndürülerek,
3. durumda elevation açısı 30° , bank açısı 0° iken manyetometre tam tur döndürülerek,
toplanan 3 tam tur veri kümesine göre kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon sonrası elde edilen manyetometre verileri Şekil 2’de gösterilmiştir.

Manyetometre 3 Tam Tur Kalibrasyonu



Şekil. 2. Manyetometre 3 Tam Tur Kalibrasyonu

Senaryo – 2 verilerine göre elde edilen Yumuşak Demir parametreleri,

$$S_{i_{sen2}} = \begin{bmatrix} 0.9842 & -0.2312 & -0.0364 \\ -0.2312 & 1.3597 & -0.3391 \\ -0.0364 & -0.3391 & 0.8724 \end{bmatrix}$$

Sert Demir parametreleri,

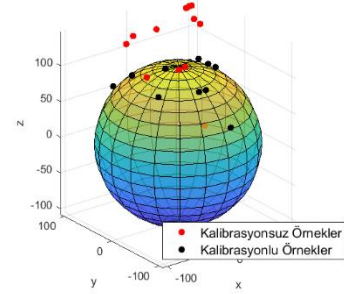
$$H_{i_{sen2}} = [2.3274 \quad 5.3477 \quad 10.5134]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

C. Veri Toplama Senaryosu – 3

1. durumda elevation 30° , bank 0° iken, yanca(azimuth) $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$,
2. durumda elevation 0° , bank 0° iken, azimuth $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$,
3. durumda elevation -30° , bank 0° iken, azimuth $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ pozisyonlarında,
12 adet noktadan elde edilen veri kümesine göre kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon sonrası elde edilen manyetometre verileri Şekil-3’de gösterilmiştir.

Manyetometre 12 Nokta Kalibrasyonu



Şekil. 3. Manyetometre 12 Nokta Kalibrasyonu

Senaryo – 3 verilerine göre elde edilen Yumuşak Demir parametreleri,

$$S_{i_{sen3}} = \begin{bmatrix} 0.9865 & -0.2321 & -0.0390 \\ -0.2321 & 1.3606 & -0.3391 \\ -0.0390 & -0.3364 & 0.8694 \end{bmatrix}$$

Sert Demir parametreleri,

$$H_{i_{sen3}} = [1.7671 \quad 5.0745 \quad 8.9792]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

Kalibrasyon algoritmasının farklı senaryolara uygulanması ile elde edilen yumuşak demir ve sert demir parametrelerinin değer olarak birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Diğer taraftan elde edilen kalibrasyon matrislerinin karşılaştırılması amacıyla, sensör hatası ve sert demir, yumuşak demir bozucu etkilere sahip farklı pozisyonadaki manyetometre verilerine kalibrasyon matrisleri uygulanmıştır ve Tablo -I ‘deki açılış değerleri hesaplanmıştır.

TABLO I. SİMÜLASYON AÇI SONUÇLARI

Manyetometre Pozisyonları	Senaryo		
	12 Nokta	3 Tam Tur Dönüş	Bütün Durumlar
Pozisyon 1	2.318°	2.502°	2.416°
Pozisyon 2	77.581°	77.501°	77.266°
Pozisyon 3	115.154°	115.643°	115.737°
Pozisyon 4	167.608°	167.422°	167.465°
Pozisyon 5	222.26°	222.931°	222.583°
Pozisyon 6	249.169°	249.542°	249.448°
Pozisyon 7	300.705°	300.182°	300.178°
Pozisyon 8	356.061°	356.02°	356.162°

Tablo I'deki değerler incelendiğinde bütün durumlar, 3 tam tur ve 12 nokta veri kümeleri kullanılarak elde edilen açı değerleri farkının 1° altında olduğu görülmüştür.

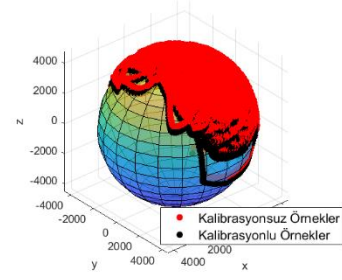
V. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geliştirilen algoritmanın çeşitli senaryolardaki veri kümelerine göre performansını deneysel olarak incelemek amacıyla Honeywell HMR2300 manyetometre sensör modülü ve pozisyon bilgisi almak için Sensor STIM300 modülü kullanılmıştır. Deneysel testler için sensör modülleri alüminyum tabla üzerine yerleştirilmiş ve tripota monte edilmiştir. Manyetometre dönüşlerinin kolay olabilmesi için sistem batarya ile enerjilendirilmiş ve manyetometre verileri RF modül ile transfer edilmiştir. Deneysel testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla Şekil - 4 'teki manyetometre veri toplama düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 4. Manyetometre Veri Toplama Düzeneği

Manyetometre Bütün Durumlar Deneysel Kalibrasyonu



Şekil 5. Manyetometre Bütün Durumlar Deneysel Kalibrasyonu

Senaryo - 1 verilerine göre elde edilen yumuşak demir parametreleri,

$$eSi_{sen1} = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.0045 & 0.0036 \\ 0.0045 & 1.0041 & -0.0040 \\ 0.0036 & -0.0040 & 0.9963 \end{bmatrix}$$

Sert demir parametreleri,

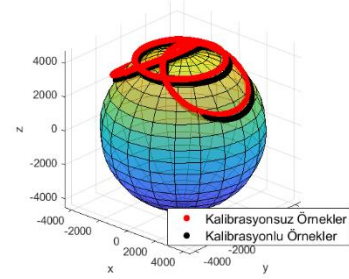
$$eHi_{sen1} = [-154.8994 \quad -73.2556 \quad 293.4482]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

B. Deneysel Veri Toplama Senaryosu - 2

Bölüm IV, Senaryo 2 'de belirtilen şekilde deneysel olarak toplanan veri kümesine göre kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon sonrası elde edilen manyetometre verileri Şekil - 6 'da gösterilmiştir.

Manyetometre Üç Tam Tur Deneysel Kalibrasyonu



Şekil 6. Manyetometre Üç Tam Tur Deneysel Kalibrasyonu

Senaryo - 2 verilerine göre elde edilen yumuşak demir parametreleri,

$$eSi_{sen2} = \begin{bmatrix} 1.0073 & 0.0024 & -0.0036 \\ 0.0024 & 1.0042 & -0.0098 \\ -0.0036 & -0.0098 & 0.9887 \end{bmatrix}$$

Sert demir parametreleri,

$$eHi_{sen2} = [-187.4221 \quad -110.7748 \quad 254.0068]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

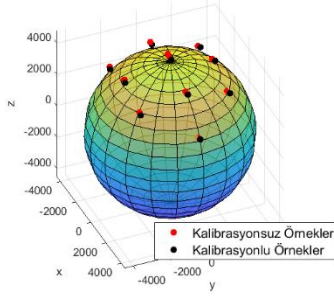
A. Deneysel Veri Toplama Senaryosu - 1

Bölüm IV, Senaryo 1 'de belirtilen şekilde deneysel olarak manyetometre verisi toplanmıştır. Oluşturulan veri kümesinin kalibrasyon parametreleri çıkarılmıştır. Bu senaryo ile elde edilen kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon parametreleri ile düzeltilen manyetometre verileri Şekil - 5 'te gösterilmiştir.

C. Deneysel Veri Toplama Senaryosu - 3

Bölüm IV, Senaryo 3 'te belirtilen şekilde deneysel olarak toplanan veri kümesine göre kalibrasyonsuz manyetometre verileri ve kalibrasyon sonrası elde edilen manyetometre verileri Şekil - 7'de gösterilmiştir.

Manyetometre 12 Nokta Deneysel Kalibrasyonu



Şekil 7. Manyetometre 12 Nokta Deneysel Kalibrasyonu

Senaryo – 3 verilerine göre elde edilen yumuşak demir parametreleri,

$$eSi_{sen3} = \begin{bmatrix} 1.0239 & 0.0014 & 0.0069 \\ 0.0014 & 1.0238 & 0.0080 \\ 0.0069 & 0.0080 & 0.9541 \end{bmatrix}$$

Sert demir parametreleri,

$$eHi_{sen3} = [-120.3191 \quad -14.7019 \quad -110.2921]^T$$

olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalarda her bir senaryoya göre veriler toplanmıştır. Toplanan veri kümeleri ile manyetometre üzerine etkileyen sert demir ve yumuşak demir bozucu etkilerin düzeltme parametreleri çıkarılmıştır. Senaryolara göre elde edilen manyetometre kalibrasyon parametreleri, manyetometre sensöründen 8 farklı pozisyonda alınan yanca (azimuth) açılarına uygulanmıştır. Böylece Tablo II 'deki deneysel açı sonuçları elde edilmiştir.

TABLO II. DENEYSEL AÇI SONUÇLARI

Manyetometre Pozisyonları	Senaryo		
	12 Nokta	3 Tam Tur Dönüş	Bütün Durumlar
Pozisyon 1	0.313°	0.508°	0.089°
Pozisyon 2	59.277°	58.915°	58.386°
Pozisyon 3	89.771°	89.989°	89.883°
Pozisyon 4	130.130°	130.643°	131.075°
Pozisyon 5	194.830°	194.320°	193.496°
Pozisyon 6	250.814°	250.668°	250.656°
Pozisyon 7	315.063°	315.275°	315.444°
Pozisyon 8	359.171°	359.883°	359.989°

Tablo II'deki deneysel açı sonuçlarına göre farklı senaryolarda toplanan manyetometre verilerinin, geliştirilen algoritma ile kalibrasyonu sonucunda elde edilen açı değerleri farkının 1° altında olduğu görülmüştür. Diğer taraftan her bir senaryoda elde edilen parametreler incelendiğinde, manyetometre ile ölçüm alınan ortamda yumuşak demir etkilerin zayıf olduğu dolayısı ile veri seti kümelerinden elde edilen formlarda küre formunun deformasyonunun az olduğu, sert demir etkilerin yoğun olduğu bu sebeple de orjinin merkezden kaydığı görülmüştür.

VI. SONUÇ

Manyetometreler yumuşak demir ve sert demir etkilerine bağışık olmadıkları için birçok farklı kalibrasyon yöntemi

bulunmaktadır. Manyetometrenin pusula uygulaması sınırlı kabiliyetlere sahip mikrokontrolcüler üzerinde gerçekleştirileceği için kalibrasyon algoritmasının farklı büyüklükteki veri kümelerine göre performans olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple geliştirilen algoritmanın farklı senaryolar ile elde edilen veri kümesi büyüklüklerine göre performans incelemesi yapılmıştır. Simülasyon ve deneysel test sonuçları, manyetometrenin kalibrasyonu için gereken veri kümesinin sadece manyetometrenin bütün durumlarda çevresinden ölçüm alınarak değil belirlenen 12 noktada ölçüm alınarak da 1° farkın altında hesaplanabileceğini göstermiştir. Bu sonuca göre manyetometre pusula uygulamalarında kısıtlı yeteneklere sahip mikroişlemciler kullanılabilir.

VII. TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya verdiği destekten dolayı Anova Ar -Ge Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve Elektronik Sistemler Müdürü Sn. İbrahim ALTUNSOY'a teşekkür ederiz.

VIII. REFERANSLAR

- [1] Fang J., Hongwer S., Juanjuan C., Xiao Z., Ye T. "A novel calibration method of magnetic compass based on ellipsoid fitting," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 6, Jun. 2011, pp. 2053-2060
- [2] Chi C., Lv Jun-Wei., Wang D., "Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Marc. 2015
- [3] Yan Xia L., Xi Sheng L., Xiao Juan Z., Yi Bo F., "Novel Calibration Algorithm for a Three-Axis Strapdown Magnetometer," *Sensors*, May 2014, pp. 8485-8504
- [4] Merayo J M G., Brauer P., Primdahl F., Petersen J R., Nielsen O V., "Scalar Calibration of Vector Magnetometers," *Meas. Sci. Technol.*, Nov. 2000, pp.120-132.
- [5] Ma M., Song Q., Gu Y., Zhou Z., "Use of Magnetic Field for Mitigating Gyroscope Errors for Indoor Pedestrian Positioning," *Sensors*, Aug. 2018.
- [6] Liu D., Pei L., Qian J., Wang L., Liu C., "Simplified Ellipsoid Fitting-Based Magnetometer Calibration for Pedestrian Dead Reckoning," *China Satellite Navigation Conference (CSNC)*, vol II ,Jan. 2016, pp. 473-486.
- [7] Livada B., Vujic S., Radic D., Unkasevic T., Banjac Z., "Digital Magnetic Compass Integration with Stationary, Land-Based Electro-Optical Multi-Sensor Surveillance System," *Sensors*, Oct. 2019.
- [8] Yang D., You Z., Li B., Duan W., Yuan B., "Complete Tri-Axis Magnetometer Calibration with a Gyro Auxiliary," *Sensors*, May 2017.
- [9] Caruso M J., "Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems," *IEEE 2000. Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.00CH37062)*, San Diego, CA, USA, 2000.
- [10] Feng, W.; Liu, S.B.; Liu, S.W.; Yang, S. "A calibration method of three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting," *J. Inf. Comput. Sci.*, Oct. 2013, pp. 1551-1558.