Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile Sensör Hata Kaynaklarının Giderilmesi

Elimination of Sensor Error Sources with Particle Swarm Optimization Algorithm

İ. Ahmet ALTAŞ, C. Nurettin YILMAZ
Seyrüsefer Sistemleri Birimi
Anova Arge Teknolojileri A.Ş., Ankara,Türkiye
{ ahmet.altas, nurettin.yilmaz}@anova.com.tr

***Özetçe*— Sensörler günlük yaşamda birçok alanda kullanılan önemli teknolojik buluşların başında gelmektedir. İvmeölçerler, manyetometreler, basınç sensörleri, sıcaklık sensörleri vb. gibi birçok sensör endüstride birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu sensörler üretimlerinden kaynaklı olarak birçok hatayı da içerisinde bulundururlar. Bu hataları gidermek için sensör kalibrasyonu yapılması gerekmektedir. Bu bildiride PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemi ile sensör kalibrasyonu gerçekleştirilerek yüksek doğruluklu sensör verileri elde edilmiştir. Bu kalibrasyon işlemi ile sensör hata kaynaklarının oluşturduğu bozulmalar tespit edilerek, ölçüm sonuçlarını düzeltmede kullanılmaktadır. Ayrıca, PSO algoritması belirli parametreler tanımlayarak sensörlerden toplanan verilerin referans bir üründen alınan veriler vasıtasıyla iyileştirilmesini sağlamaktadır.**

Anahtar Kelimeler — Parçacık Sürü Optimizasyonu; Ataletsel Sensörler; Manyetik Sensörler; Çok Konumlu Kalibrasyon; Sensör Kalibrasyonu.

***Abstract*— Sensors are one of the most important technological inventions used in many areas of daily life. Accelerometers, magnetometers, pressure sensors, temperature sensors, etc. Many sensors such as are frequently used in many areas of industry. However, these sensors contain many errors due to their production. Sensor calibration is required to eliminate these errors. In this paper, high accuracy sensor data was obtained by performing sensor calibration with the PSO (Particle Swarm Optimization) method. With this calibration process, distortions caused by sensor error sources are detected and used to correct the measurement results. In addition, the PSO algorithm defines certain parameters and enables us to improve the data collected from sensors by using data from a reference product.**

Keywords — ***Particle Swarm Optimization; Inertial Sensors; Magnetic Sensors; Multi-Location Calibration; Sensor Calibration***

I. GİRİŞ

Endüstriyel ve savunma sanayii uygulamalarında kullanılan sensörlerden uygulama alanına göre değişmekle birlikte yüksek doğruluğa sahip çıktılar beklenmektedir.

979-8-3503-8896-1/24/$31.00 ©2024 IEEE

Ancak bu sensörler tasarım ve üretim kaynaklı birçok hata kaynağını bünyelerinde barındırmaktadır.
Sensörlerden yüksek doğrulukta ölçüm yapabilmek için sensör hata parametrelerinin bulunması gerekmektedir. Bu parametreleri bulmak için farklı kalibrasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Yeni teknolojik gelişmelerle birlikte sensörün ölçüm doğruluk değerindeki beklentiler de artmaktadır. Literatürde sensör kalibrasyon yöntemleri incelenip Analog Device ADXL317 3 eksen ivmeölçer sensörü kullanılarak yöntemlerin karşılaştırmaları yapılmıştır.

[1]' de sunulan yöntemde 6 farklı pozisyonda sensör her seferinde bir kenarı üzerinde yere paralel olarak konumlandırılmıştır. Bu işlem sonucunda okunan ve olması gereken yer çekimi ivmeleri üzerinden ortalama alarak kalibrasyon yapılmaktadır. Bu yöntem deneysel olarak uygulandığında 1º rms gibi yüksek hata değeri gözlemlenmiştir. [2]' de kullanılan yöntemde istenilen (< 0.1º) rms hata değerine ulaşılmakla beraber yapay sinir ağları gibi karmaşık bir yöntem kullanılmaktadır. Sensör uygulamalarında genellikle düşük fiziksel boyutlar ve ağırlık tercih edildiği için düşük kapasiteli mikrodenetleyiciler tercih edilir. Böyle bir mikrodenetleyici seçildiğinde bu yöntemin uygulanabilirliği zorlaşmaktadır.
[3]' da kullanılan yöntemde hem ivmeölçer hem de manyetometre sensör kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Sensör 12 farklı pozisyonda konumlandırılıp ortalama alarak kalibrasyon yapmaktadır. Bu yöntem uygulandığında 1º rms gibi yüksek hata değeri gözlemlenmektedir.

Bu bildiride, ivmeölçer ve manyetometre sensör hata parametreleri özelinde simülasyon ortamında (MATLAB) ve deneysel çalışmalarda elde edilen çıktılar analiz edilmektedir. Yöntemin uygulanması için yüksek doğrulukta referans sensörler kullanılmaktadır. Referans sensörün verileri ile kalibre edilecek sensörün verileri toplanmaktadır. Optimizasyon yönteminde kullanılmak üzere bu iki veri seti üzerinden, eş konumlarda birbirleri arasındaki fark en az olacak şekilde objektif hata fonksiyonu tanımlanmaktadır. Yöntemde PSO tercih edilmesinin sebebi, sürü yaklaşımı ile birden fazla

vektörün birbirleri ile iletişim halinde en iyiye ulaşmaya çalışmasından dolayı hata karakteristiğinin son derece lineer olmayan sensörlerde bile yüksek doğrulukta değerler elde etmeye imkân sağlamasıdır [4].

II. SENSÖR HATA MODELİ

İvmeölçer için hatalar sistematik ve rastgele hatalar olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Sistematik hatalar çeşitli statik ve dinamik metotlar kullanılarak düzeltilir. Bu çalışmada bu iki grup hatadan sistematik hatalar incelenmektedir. Bunlar sensör sapması hataları, ölçek faktörü hatası ve yanlış hizalama hataları olarak sıralanabilir.
Manyetometre için hatalar sistematik hatalar ve çevresel hatalar olarak sınıflandırılır. Bu çalışmada sadece sistematik hatalar üzerine çalışılacak olup çevresel hatalar olan sert ve yumuşak demir etki kalibrasyonundan bahsedilmeyecektir.

İvmeölçerlerde ve manyetometrelerde hata parametreleri sensörün üretiminden ve yerleşiminden kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

A. Sensör Üretiminden Kaynaklı Hatalar

1) Sensör Sapması Hatası (Bias Error)

Sapma hatası, çıkış sinyalindeki bir değişikliğin ölçülecek giriş değerindeki bir değişikliğe göre fark hatasıdır. Bu hata tüm eksenler üzerinde etkili olduğundan dolayı düzeltilmesi için 1x3 matris ile toplanması gerekmektedir.

2) Ölçek Faktörü Hatası (Scale Factor Error)

Ölçek faktörü hatası, çıkış sinyalindeki bir değişikliğin ölçülecek giriş değerindeki bir değişikliğe oranındaki hatalardır. Bu hata sabit terimleri, sıcaklıktan kaynaklanan varyasyonları, asimetri ve doğrusal olmayan hata kısımlarını da içerir. Bu hata tüm eksenler üzerinde etkili olduğundan dolayı düzeltilmesi için 3x3 matris ile çarpımı yapılması gerekmektedir.

B. Sensör Yerleşiminden Kaynaklı Hatalar

1) Yanlış Hizalama Hatası (Misalignment Error)

Bu hata aynı zamanda ortogonal olmama hatası olarak da tanımlanmaktadır. İdeal koşullarda sensör eksenleri dikey olarak monte edilmelidir. Ancak mekanik aksamlar kusursuz üretilemez ve bu aksamlar kusursuz bir şekilde montajı yapılamaz. Bu, sensör eksenleri arasında bir ortogonal olmamaya neden olur ve ölçümler üzerinde bir ölçek faktörü etkisi yaratır. Bu hata tüm eksenler üzerinde etkili olduğundan dolayı düzeltilmesi için 3x3 matris ile çarpımı yapılması gerekmektedir.

C. İvmeölçer Matematiksel Hata Modeli

MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) temelli ivmeölçer sensörlerinin üzerine etki eden ve sensörün sağladığı doğruluğu önemli ölçüde etkileyen hata kaynakları bulunmaktadır [5]. Bu hata kaynaklarının tek bir eksen için matematiksel hata modeli Denklem 1 de ifade edilmiştir.

$$\overline{a}_x = (1 + S_x + \beta S_x)a_x + B_x + \beta B_x \tag{1}$$

Denklem 1'de a_x ile ifade edilen değişken ideal bir ivmeölçer sensöründen elde edilen x eksen değeridir. $\overline{a}_x$ ile ifade edilen değişken anlatılan hataların etkilediği ivmeölçer sensöründen elde edilen x eksen değeridir. S_x ile ifade edilen değişken ölçek faktörü hatasıdır. B_x ile ifade edilen değişken ölçüm sapma hatasıdır. βS_x ile ifade edilen değişken ölçek faktör hatası stabilitesidir. βB_x ile ifade edilen değişken sapma hatası stabilitesidir.

Denklem 2'de üç eksen için matematiksel hata modeli ifade edilmiştir. Denklemde M_{xy} , M_{xz} , M_{yx} , M_{yz} , M_{zx} , M_{zy} değerleri yanlış hizalama hataları olarak verilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\overline{a}_x\\ \overline{a}_y\\ \overline{a}_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1+S_x+\beta S_x & M_{xy} & M_{xz}\\ M_{yx} & 1+S_y+\beta S_y & M_{yz}\\ M_{zx} & M_{zy} & 1+S_z+\beta S_z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_x\\ a_y\\ a_z\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B_x+\beta B_x\\ B_y+\beta B_y\\ B_z+\beta B_z\end{bmatrix} \tag{2}$$

D. Manyetometre Matematiksel Hata Modeli

Üretim, montaj ve dış ortamın etkisi nedeniyle üç eksenli manyetometrede ölçüm hataları bulunur.
Üretim hatası sıfır sapma H_0 ve hassasiyet hatası K_s'yi içerir. Montaj hatası, dik olmayan hata düğümünü K_{nor} ve yanlış hizalama hatasını T_m^b içerir. Çevresel hata, yumuşak demir hatasını C_s ve sert demir hatasını H_p içerir. H_n gaussian beyaz gürültüsü olarak isimlendirilir. H_e ise ölçülmesi gereken ideal manyetik alan değeridir [6].

Denklem 3'te manyetometre matematiksel modeli ifade edilmektedir.

$$H_m = K_s K_{nor} T_m^b C_s\left(H_e + H_p\right) + H_0 + H_n \tag{3}$$

III. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU

PSO, doğadan ilham alan bir optimizasyon algoritmasıdır. 1995 yılında James Kennedy ve Russell Eberhart tarafından geliştirilmiştir [7]. Bu algoritma, kuş sürülerinin hareketlerinden esinlenilerek tasarlanmıştır. PSO, birçok optimizasyon problemi için kullanılabilir ve özellikle çok boyutlu ve karmaşık problemlerde etkilidir.

PSO algoritmasında, her biri bir potansiyel çözüm olan bir dizi "parçacık" vardır. Bu parçacıklar, belirli bir hedef fonksiyonunun değerini minimize etmek için hareket ederler. Her bir parçacık, pozisyon ve hızını güncellemek için kendi yerel en iyi konumuna ve en iyi performans göstermiş evrensel parçacığın geçmiş hareketlerine bakar. Bu şekilde, parçacıklar

problem alanında hareket ederek çözümü en iyi şekilde yaklaşık olarak hesaplarlar.

A. Algoritma

1) Parçaçıkların konumları ve hızları başlangıçta rastgele belirlenir:

$$X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}] \quad (4)$$
$$V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}] \quad (5)$$
$$P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}] \quad (6)$$

Denklem 4, 5 ve 6'da i bir parçacık numarasını, d problem boyutunu gösterir. X_i pozisyon vektörü, V_i hız vektörü, P_i sürünün yerel en iyi pozisyonu olarak tanımlanmaktadır [8].

2) Parçacıkların hızı, kendi geçmiş hareketleri ve en iyi performans gösteren komşusu parçacığın geçmiş hareketlerine bağlı olarak güncellenir:

$$v_{i,t+1}^d = v_{i,t}^d + c_1 * rand(p_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + c_2 * rand(p_{g,t}^d - x_{i,t}^d) \quad (7)$$

Denklem 7'de, c_1 ve c_2 çarpanlardır. 'rand' değerler ise 0-1 arasında rastgele sayılardır.

3) Parçacıkların konumu, yeni hızlarına bağlı olarak güncellenir*:*

$$x_{i,t+1}^d = x_{i,t}^d + v_{i,t+1}^d \quad (8)$$

4) Hedef fonksiyonu değerlendirmesi yapılır ve en iyi konumlar (pbest) ve en iyi komşuların konumları (gbest) güncellenir:

$$p_{i,t+1}^d = \{x_{i,t+1}^d, f(x_{i,t+1}^d) < f(p_{i,t}^d)\} \quad (9)$$

$$P_{g,t+1}^d = \{X_{i,t+1}^d, f(X_{i,t+1}^d) < f(P_{i,t}^d)\} \quad (10)$$

Burada $f(X_{i,t+1}^d)$ parçacığın yeni konumunun hedef fonksiyon değeridir.

5) Adımlar 2-4 bir döngü içinde devam eder. PSO algoritması son iki hedef fonksiyon değeri arasındaki fark 10^{-4} ' den küçük oluncaya kadar çalıştırılır.

IV. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Simülasyon çalışmalarında, modellenen sensörler belirlenen farklı pozisyonlara getirilerek sensörlerden veriler toplanmaktadır. Ardından bu veriler PSO algoritması yardımı ile sensör kalibrasyon matrisleri elde edilmektedir. Denklem 11 'de PSO algoritması yardımı ile çözülecek amaç fonksiyonu gösterilmektedir. Burada M parametresi, ölçek faktörü ve yanlış hizalama hatalarını giderecek matris iken B parametresi, sensör sapma hatasını giderecek matris olarak kullanılmaktadır. Ayrıca A_i sensörden alınan kalibrasyonsuz veriler iken $\bar{A}$ referans cihazdan alınan verileri ifade etmektedir.

$$\min\left(\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(M(A_i - B) - \bar{A})^2}\right) \quad (11)$$

Elde edilen M ve B düzeltme matrisleri kalibrasyonsuz verilere uygulandığında sensör çıktılarının referans cihaz ile benzer doğrulukta çıktılar vermesi beklenmektedir. Bu işlemlerden sonra kalibrasyonlu hale gelen sensörden alınan veriler ile referans üründen alınan veriler arasındaki farklardan yola çıkarak rms hata hesaplaması gerçekleştirilir.

A. İvmeölçer Modeli Simülasyon Çalışması

MATLAB ortamında ivme ölçer sensör parametreleri fonksiyonu ile model oluşturulmuştur [9]. Simülasyon üzerinde -45º yükseliş açısından +45º yükseliş açısına kadar 15'er derecelik aralıklar ile "imuSensor" fonksiyonu kullanılarak sanal ivmeölçer verisi üretilmiştir [10]. Optimize edilecek veri, MATLAB üzerinde sensör hatası eklenerek modellenmiş sensör verisi iken ideal veri için ise sensör hatası eklenmeyen sensör verisi kullanılmıştır. Bu iki veri seti PSO yönteminde işlenmektedir.

TABLO 1 'deki sonuçlar incelendiğinde yükseliş açısı için 0.015º rms hata değeri yatış açısı için 0.014º rms hata değeri elde edilmiştir.

TABLO 1. İVMEÖLÇER MODELİ SİMÜLASYON AÇI SONUÇLARI

Oluşturulan Açı Değerleri		**Kalibrasyonsuz Sonuçlar**		**Kalibrasyonlu Sonuçları**	
Yükseliş Açısı	***Yatış Açısı***	***Yükseliş Açısı***	***Yatış Açısı***	***Yükseliş Açısı***	***Yatış Açısı***
-45 º	0 º	-42.96 º	1.43 º	-44.98 º	0.02 º
-30 º	0 º	-28.06 º	1.41 º	-30.00 º	0.001 º
-15 º	0 º	-13.27 º	1.39 º	-15.03 º	-0.01 º
0 º	0 º	1.39 º	1.38 º	-0.001 º	-0.02 º
15 º	0 º	15.98 º	1.39 º	15.01 º	-0.02 º
30 º	0 º	30.51 º	1.38 º	30.01 º	-0.01 º
45 º	0 º	43.99 º	1.38 º	44.99 º	-0.01 º

B. Manyetometre Modeli Simülasyon Çalışması

Simülasyon ortamında 0º yönelim açısından 300º yönelim açısına kadar 60' ar derecelik aralıklar ile sanal manyetometre verisi üretilmiştir. Optimize edilecek veri, MATLAB üzerinde sensör hatası eklenerek modellenmiş sensör verisi iken ideal veri için ise sensör hatası eklenmeyen sensör verisi kullanılmıştır. Bu iki veri seti PSO yönteminde işlenmektedir. Sert ve yumuşak demir etkisi çalışmada kapsam dışı tutulduğu için bu etki modellenmemiştir.

TABLO 2 ‘deki sonuçlar incelendiğinde kuzey açısında 0.019 º rms hata değeri elde edilmiştir.

TABLO 2. MANYETOMETRE MODELİ SİMÜLASYON AÇI SONUÇLARI

Oluşturulan Kuzey Açısı	Kalibrasyonsuz Kuzey Açısı	Kalibrasyonlu Kuzey Açısı
0º	1.56 º	0.02 º
60º	58.14 º	60.02 º
120º	123.21 º	119.98 º
180º	178.56 º	180.01 º
240º	242.18 º	239.99 º
300º	297.67 º	300.03 º

V. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geliştirilen algoritmanın pratikte uygulanabilmesi amacıyla BWSENSING BWS4700 üç eksen eğim ölçer [11] ve pozisyon bilgisi almak için Analog Devices ADXL317 sensör modülü [12] kullanılmıştır. Deneysel testler için sensör modülleri alüminyum tabla üzerine yerleştirilmiş ve tripota monte edilmiştir. Deneysel testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla Şekil 1 ‘deki ivmeölçer veri toplama düzeneği hazırlanmıştır.

Şekil 1: Test Platformu

TABLO 3. DENEYSEL AÇI SONUÇLARI

Referans Açı Değerleri		Kalibrasyonsuz Açı Değerleri		Hata Değerleri	
Yükseliş Açısı	***Yatış Açısı***	***Yükseliş Açısı***	***Yatış Açısı***	***Yükseliş Açısı***	***Yatış Açısı***
0.16º	0.15º	0.17º	0.16º	0.01 º	0.01 º
15.12º	0.21º	15.09º	0.23º	0.03 º	0.02 º
42.11º	0.09º	42.15º	0.10º	0.04 º	0.01 º
-14.96º	0.15º	-14.98º	0.18º	0.02 º	0.03 º
-45.04º	0.02º	-45.07º	0.04º	0.03 º	0.02 º
0.23º	15.21º	0.20º	15.22º	0.03 º	0.01 º
0.08º	44.45º	0.03º	44.40º	0.05 º	0.05 º
0.05º	-14.99º	0.02º	-14.97º	0.03 º	0.02 º
0.08º	-43.83º	0.06º	-43.79º	0.02 º	0.04 º

TABLO 3 ‘deki sonuçlar incelendiğinde yükseliş açısı için 0.03º rms hata değeri yatış açısı için 0.0268 º rms hata değeri elde edilmiştir.

VI. SONUÇ

Bildiride, hem simülasyon ortamında hem de deneysel bir çalışma ile PSO ile kalibrasyon yöntemi uygulanarak yüksek doğrulukta sensör çıktı değerleri elde edilmiştir.

Belirtilen yöntem ile sensör kalibrasyonu yapıldığında geleneksel yöntemlere göre 50 kata kadar daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu aynı zamanda maliyet etkin projeler için düşük maliyetli sensörler kullanılarak yüksek doğruluk değeri elde edilebileceğini göstermektedir.

Yapay sinir ağları gibi gelişmiş yöntemlerle kıyaslandığında ise daha basit yapısı ile iyi bir alternatif sunmakla beraber düşük bütçeli mikrodenetleyici içeren sistemler için de uygulanabilir olmaktadır.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışmaya verdiği destekten dolayı Anova Ar -Ge Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.‘ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] *NXP ApplicationNotes.[Online]. Available:*https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3916.pdf

[2] *Claesson, Marklund. Calibration of IMUs using Neural Networks and Adaptive Techniques, M.S. Thesis, Chalmers University of Technology, 2019.*

[3] *Z. Li, X. Li and Y. Wang, "A calibration method for magnetic sensors and accelerometer in tilt-compensated digital compass," 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Beijing, China, 2009, pp. 2-868-2-871.*

[4] *J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.*

[5] *Unsal, D., Estimation of Deterministic and Stochastic IMU Error Parameters, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2012.*

[6] *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*

[7] *Poli, Riccardo & Kennedy, James & Blackwell, Tim. (2007). Particle Swarm Optimization: An Overview. Swarm Intelligence.*

[8] *Wang, Dongshu et al. “Particle swarm optimization algorithm: an overview.” Soft Computing 22 (2018): 387-408.*

[9] *MATLAB, Accelerometer sensor parameters, (2018). [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/nav/ref/accelparams.html*

[10] *MATLAB, IMU Simulation Model, (2019). [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/nav/ref/imusensor-system-object.html*

[11] *BWSENSING,Datasheet. [Online]. Available: https://www.bwsensing.com/details_BWM427-175.html*

[12] *ANALOG DEVİCES, Datasheet. [Online]. Available: https://www.analog.com/en/products/adxl317.html*