İstikamet Açısı Salınım Problemleri İçin Kısıtlanmamış Optimizasyon ile Adaptif Filtre Tasarımı
Adaptive Filter Design with Unconstrained Optimization For Heading Angle Oscillation Problems

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

***Özetçe*— Seyrüsefer sistemlerinde istikamet açı bilgisi elde etmek için ağırlıklı olarak ivme ve manyetik alan ölçen sensörler kullanılmaktadır. Sensörler bulundukları sistemin veya ortamın bozucu (titreşim, şok, manyetik alan değişimi) etkenlerinden dolayı zamanla değişen gürültülü çıkış verileri üretmektedirler. Bu yüzden yüksek doğruluklu sensör verisi elde etmek için iyi bir sensör kalibrasyonunun yanı sıra iyi bir sayısal filtre geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bozucu etkileri giderecek bir adaptif filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Filtre içerisinde ceza/ödül katsayıları, kısıtlanmamış optimizasyon (Unconstrained Optimization) yöntemlerinden olan en dik iniş optimizasyon (Steepest Descent Optimization) yöntemi kullanılarak bulunmaktadır.**

Anahtar Kelimeler — En Dik İniş Optimizasyonu; Adaptif Filtre; Sayısal Filtre Tasarımı; Kısıtlanmamış Optimizasyon.

***Abstract*— In navigation systems, sensors that measure acceleration and magnetic field are mainly used to obtain direction angle information. Sensors produce noisy output data that changes over time due to disruptive factors (vibration, shock, magnetic field change) of the system or environment in which they are located. In order to obtain high-accuracy sensor data, it is necessary to develop a good digital filter as well as a good sensor calibration. In this study, an adaptive filter design was carried out to eliminate corruptive effects. Punishment/reward coefficients in the filter are found using the Steepest Descent Optimization method, which is one of the Unconstrained Optimization methods.**

Keywords — ***Steepest Descent Optimization; Adaptive Filter; Digital Filter Design; Unconstrained Optimization.***

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

I. GİRİŞ

Gürültülü ortamlar, sensörlerin iddia ettikleri doğruluk değerlerine ulaşmasına engel olmaktadır. Bu ortamlara örnek olarak; ivmeölçerler için yüksek titreşimli ortamlar, manyetometreler için manyetik alan değişiminin olduğu ortamlar verilebilir. Bu ortamlarda gürültü karakteristiğini zaman ile değişen veya değişmeyen gürültüler olarak ikiye ayırabiliriz. Bu çalışmada, düşük frekanslarda zaman ile değişen gürültülerin filtrelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada, içerisinde hareketli aksamlar bulunan bir elektrooptik sistemin soğutucu motorunun manyetik değişimlerinin sayısal manyetik pusula (SMP) [1] üzerinde oluşturduğu istikamet açısı salınım probleminin çözümü ele alınmıştır. Elektrooptik sistem zamanla değişen manyetik alan bozunumu ve titreşim oluşturmaktadır. Bu bozucu etkiler ivmeölçer ve manyetik alan ölçer üzerinde etkili olup istikamet açısı üzerinde 15° 'ye varan ölçüm hatalarına neden olmaktadır.

Probleme yönelik literatür taraması yapıldığında çoğunlukla sensör füzyonu içeren yöntemler kullanıldığı görülmektedir. Sensör füzyonu yaklaşımını uygulayabilmek için manyetik alan ölçer ve ivmeölçer sensörlerine ek olarak jiroskop sensörü kullanıldığı görüşmüştür. [2] 'de sunulan yöntemde kalman filtresi kullanılmıştır. Bu etkili bir yöntem olmasının yanı sıra sensör füzyonuna ihtiyaç duymaktadır. Eğer sistemde 3 eksen bir jiroskop yok ise kullanılamamaktadır. [3] 'de sunulan yöntem de ise yine bir jiroskopa ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca genişletilmiş kalman filtresi kullanımından kaynaklı olarak karmaşık işlemlerin yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Tasarımında bütçe ve fiziksel boyut kısıtından dolayı SMP 'de sensör füzyonu yapılabilecek herhangi bir harici sensör eklenememektedir. Sadece manyetik alan ölçer ve ivmeölçer

sensör verileri ile kendi kendini iyileştiren bir filtre tasarımı yapılmıştır. Filtrelenmeden önce 15 ° 'ye varan ölçüm hataları adaptif filtre [4] tasarımı ile 0.2 ° 'ye kadar indirilmiştir.

II. EN DİK İNİŞ OPTİMİZASYONU

Gradyan iniş algoritması olarak da bilinen en dik iniş algoritması, bir fonksiyonun minimumunu bulmak için kullanılan bir optimizasyon algoritmasıdır [5]. Yaygın olarak makine öğrenimi, matematiksel optimizasyon ve sayısal analizde kullanılır. Algoritmanın amacı, parametreleri fonksiyondaki en dik azalma yönünde ayarlayarak fonksiyonun minimumuna doğru yinelemeli olarak hareket etmektir.

A. Algoritma

Adım 1: Parametreleri Başlat

x_0 parametreleri için ilk tahminle başlanır.

Adım 2: Gradyanı Hesapla

Amaç fonksiyonunun $f(x)$ gradyanını mevcut parametre değerlerinde $\nabla f(x_k)$ hesaplanır. Gradyan, fonksiyondaki en dik artışın yönünü gösteren bir vektördür.

$$\nabla f(x_k) = \left[\frac{\partial \mathrm{f}}{\partial x_1}, \frac{\partial \mathrm{f}}{\partial x_2}, \frac{\partial \mathrm{f}}{\partial x_3}, \cdots, \frac{\partial \mathrm{f}}{\partial x_n}\right] \quad (1)$$

Adım 3: Parametreleri Güncelle

Parametreleri inişin tersi yönde ayarlanır. Adım boyutunu kontrol etmek için bir α öğrenme oranı eklenir.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha * \nabla f(x_k) \quad (2)$$

Burada α öğrenme hızıdır ve $\nabla f(x_k)$ gradyan vektörüdür.

Adım 4: Tekrar

Maksimum yineleme sayısı, amaç fonksiyonunun belirli bir değerine ulaşma veya parametrelerde yeterince küçük bir değişiklik elde etme gibi bir durdurma kriteri karşılanana kadar 2. ve 3. adımlar tekrarlanır.

α öğrenme oranının seçimi çok önemlidir. Çok büyük bir değer, aşmaya neden olabilir ve çok küçük bir değer, yavaş yakınsamaya neden olabilir. Optimizasyon işlemi sırasında uygun bir öğrenme oranının seçilmesi için satır arama veya uyarlanabilir yöntemler gibi çeşitli stratejiler kullanılabilmektedir.

III. ADAPTİF FİLTRE ALGORİTMASI

Elektrooptik sistem ile elde edilen istikamet açılarının karakteristikleri incelendiğinde motorun düzensiz hız değişimlerinden kaynaklı olarak salınımın belirli bir frekansı olmadığı ancak tam bir salınım hareketi gözlenen yerlerde ise bu hareketin tamamlanmasının 30 saniye sürdüğü yani 0.03 Hz olduğu gözlemlenmiştir. Ancak tasarlanan sistemin dışarıya 50 Hz 'de istikamet açısı vermesi gerekmektedir. Bu durum adaptif filtre ihtiyacını ortaya koymaktadır.

A. Algoritma

Bu algoritma tasarlanırken kullanılabilecek tek veri yüksek salınıma sahip istikamet açı değeridir. Sistemden elde edilen istikamet açı değerleri sırayla işlenerek belirlenen ödül yada ceza parametre değerleri [6] ile çarpılmakta, ardından gelecek yeni istikamet açılarıyla düzeltmeler yapılmaktadır. Son olarak belirlenen periyotlarda adaptif olarak güncellenmesi sağlanmaktadır.

Ek olarak, sistemin istikamet açısı salınımları uzun süreli olarak kaydedildiğinde bu verilerin ortalamasının olması gereken değere çok yakın sonuç verdiği teyit edilmiş ve bu veri filtre tasarımında kullanılmıştır.

Adım 1:
Sistem çalıştıktan sonra elde edilen ilk istikamet açı değeri A_1 elimizde başka herhangi bir veri olmadığından dolayı ilk veri olarak kullanılır ve $A_{TN} = [A_1]$ olarak bir matrise kaydedilir. A_{TN} matrisi diğer adımlarda da güncelleneceğinden hafıza olarak kullanılacaktır.

Adım 2:
Elde edilen ikinci istikamet açı değeri A_2 ve ilk adımda elde edilen A_1 değerlerinin ortalaması A_{2N} olarak isimlendirilir ve hafıza matrisine $A_{TN} = [A_1, A_{2N}]$ olarak kaydedilir.

Adım 3:
Elde edilen üçüncü istikamet açı değeri A_3 ve ikici adımda elde edilen A_{2N} değeri ile beraber;

$$A_{3N} = A_{2N} * 0.75 + A_3 * 0.25 \quad (3)$$

olarak değerlendirilir. $A_{TN} = [A_1, A_{2N}, A_{3N}]$ olarak kaydedilir. Bu kısımda kullanılan 0.75 ve 0.25 değerleri tasarımcı tarafından belirlenmiş sabit katsayılardır.

Adım 4:
Bu adımda yeni gelen istikamet açı değeri A_4 olarak isimlendirilir.
Elimizde yeniden değerlendirilmiş halde dört adet veri $(A_1, A_{2N}, A_{3N}, A_4)$ bulunmaktadır. Bu aşamada bu dört adet verinin standart sapma değerini minimum hale getirecek objektif fonksiyon için optimizasyon yardımı ile düzeltme parametresi hesaplanır. Hesaplanan bu parametre filtrenin daha stabil çalışması için ceza yada ödül değeri olarak tanımlanır. Bu parametre A_{TN} matrisindeki verilerin ortalaması ile çarpılarak A_{4TN} olarak isimlendirilir ve $A_{TN} = [A_1, A_{2N}, A_{3N}, A_{4TN}]$ olarak kaydedilir. A_{4TN} değeri optimizasyon yardımı ile bulunan sanal bir istikamet açısıdır

ve 8. değere kadar 4. ve 8. değer arasındaki değerlerin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır.

Bu amaç fonksiyonu Denklem 4 'te gösterilmektedir.

$$\min\left(\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_i-\bar{A})^2}\right) \quad (4)$$

- A_i anlık istikamet açısı,
- n toplam veri sayısı,
- $\bar{A}$ olması gereken değer,

olarak tanımlanabilir.

Adım 5:
Bu adımda yeni gelen istikamet açı değeri A_5 olarak isimlendirilir. Yeni değeri hesaplamak için,

$$A_{5N} = A_5 * 0.5 + A_{4TN} * 0.5 \quad (5)$$

olarak hesaplanır.

Yeni gelen istikamet açı değeri A_6 olarak isimlendirilir. Yeni değeri hesaplamak için,

$$A_{6N} = A_{5N} * 0.5 + A_6 * 0.5 \quad (6)$$

olarak hesaplanır. 8. istikamet açısı değerine kadar bu şekilde hesaplamalar sürdürülür. Bu kısımda kullanılan 0.5 değerleri tasarımcı tarafından belirlenmiş sabit katsayılardır.

Adım 6:
8. istikamet açısı geldiğinde $A_{TN} = [A_1, A_{2N}, A_{3N}, A_{4TN}, \dots, A_8]$ matrisinin standart sapma değerini minimum hale getirecek objektif fonksiyon için optimizasyon yardımı ile düzeltme parametresi hesaplanır ve bu verilerin ortalaması üzerinde uygulanır.

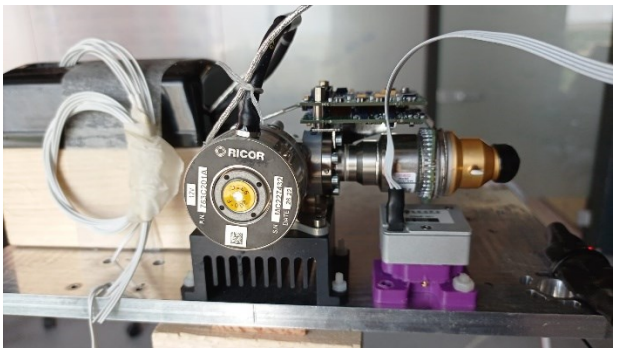
Bu düzeltme parametreleri yardımı ile sanal veri üretme işlemi A_{TN} matrisinin bir önceki sanal veri üretilen adımındaki matris boyutunu ikiye katlayarak yani A_{8TN} , A_{16TN} , A_{32TN} , A_{64TN} olarak her seferinde daha fazla verinin değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde A_{TN} hafıza matrisi büyütülerek ilerletilir. Ancak A_{TN} matrisi işlemcinin kısıtlı kaynakları göz önüne alınarak en yüksek 64 elemanlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kısıt ile hem yeterli doğrulukta çıktı elde edilebilecek bir veri setine sahip olurken hem de sistemin performansının düşmesinin önüne geçilmektedir.

Adım 7:
Yukarıda belirtilen $A_{(1,\dots,n)TN}$ değerleri dışındaki değerlerin hesaplanması için Adım 5' de anlatılan yöntem kullanılır.
Adım 5 ve Adım 6 işlemleri bir döngü içerisinde devam eder.

IV. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tasarlanan yöntemi test etmek için bir elektrooptik sistemin soğutucu motorunun altına yerleştirilmiş bir SMP bulunmaktadır. Elektrooptik soğutucunun kendi kontrol algoritması olup sıcaklığı istenilen bir değer aralığında sabit hale getirmeye çalışmaktadır. Bu kontrol döngüsünden dolayı motor hareketlerini düzensiz olarak yapmaktadır ve belli bir karakteristiği bulunmamaktadır. Hem bu düzensiz hareketlerden dolayı hem de motor içerisinde manyetik ve haraketli parçaların bulunmasından dolayı manyetik alan çok fazla değişkenlik göstermektedir.

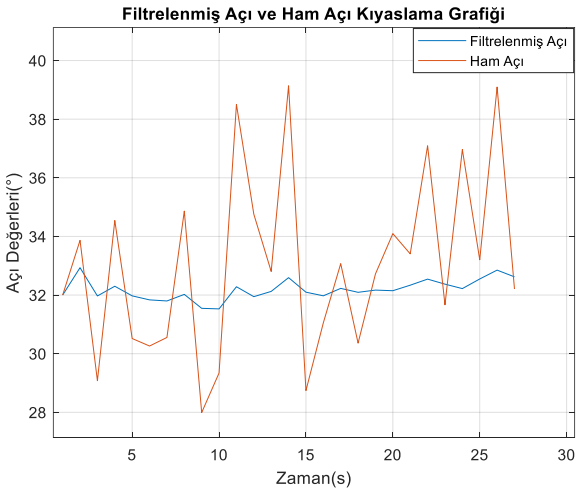
Bu motor ile manyetometre sensörü arasındaki mesafe 10 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 1: Termal Soğutucu ve Manyetometre Sensörü Yerleşimi

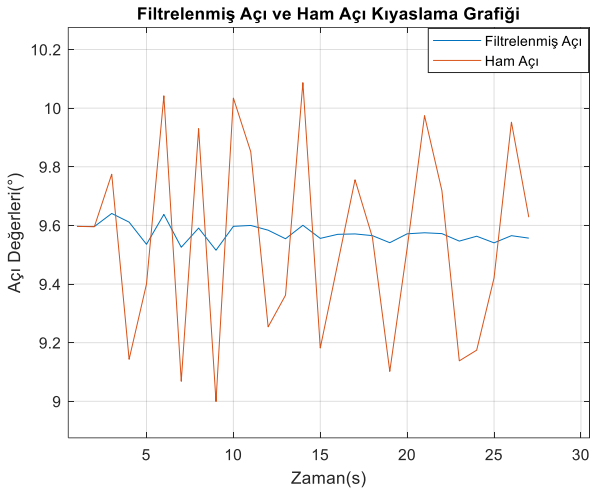
Aşağıda farklı zaman dilimlerimde yapılmış olan üç farklı çalışma incelenmektedir.

Şekil 2 de yapılan çalışma da görüldüğü üzere ham istikamet açı değerlerinin yaklaşık 12° salındığı gözlemlenmektedir. Adaptif filtreleme yönteminden sonra ise ilk 3 saniye içerisinde verilerin salınımının hızla düştüğü gözlemlenmektedir. Filtrelenmiş verilerde ise salınımın 1° altında olduğu gözlemlenmektedir.



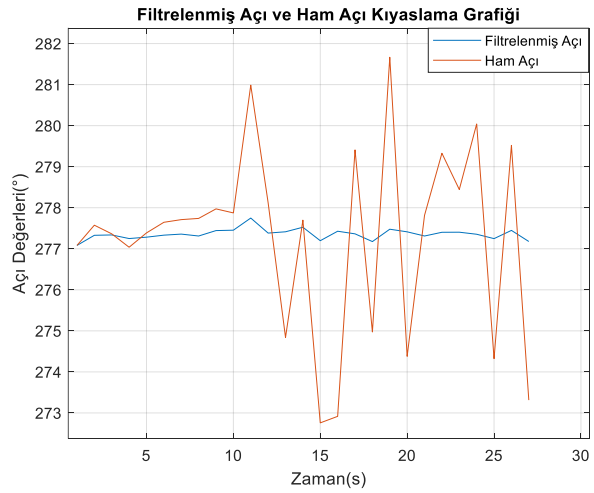
Şekil 2:Test 1- Filtrelenmiş ve Ham Açı Grafiği

Şekil 3 de yapılan çalışma da görüldüğü üzere ham istikamet açı değerlerinin yaklaşık 1.5° salındığı gözlemlenmektedir. Filtrelenmiş verilerde ise salınımın 0.2° altında olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3: Test 2- Filtrelenmiş ve Ham Açı Grafiği

Şekil 4 de yapılan çalışma da görüldüğü üzere ham istikamet açı değerlerinin yaklaşık 10° salındığı gözlemlenmektedir. Filtrelenmiş verilerde ise salınımın 0.5° altında olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4: Test 3- Filtrelenmiş ve Ham Açı Grafiği

Bu kısımda toplanan 3 ayrı veri setinde birbirinde farklı salınım karakteristiği görülmektedir. Bunun sebebi veri setlerinin farklı zamanlarda toplanmasından kaynaklı olarak farklı manyetik etkilere maruz kalmasından kaynaklanmaktadır.

V. SONUÇ

Değişken yüksek manyetik alan ve titreşim, ivmeölçer ve manyetometre sensöründen elde edilen istikamet açısının salınımına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada bu salınımın giderilmesindeki en büyük zorluk herhangi bir harici sensör olmadan sadece bozunum içeren sensör verilerinin kullanılması zorunluluğudur.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda çok yüksek salınıma sahip verilerin adaptif filtre çıkısında kabul edilebilir düzeyde salınıma sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca filtre zaman geçtikçe düzeltme parametrelerini sürekli güncelleyerek salınım miktarını 0.2° altına kadar indirebildiği gözlemlenmiştir. SMP cihazının içerisinde yer alan mikroişlemci maliyet ve boyut kısıtlarından dolayı yüksek hafıza ve hıza sahip değildir. Buna rağmen sunulan yöntemde yer alan optimizasyon işlemi çevrimiçi olarak sadece belirlenen koşullar oluştuğunda çalıştığından ötürü gömülü sisteme entegrasyonunda herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Bu verilere ek olarak, jiroskop kullanarak sensor füzyonu yöntemi ile filtreleme yapan yöntemlere göre daha düşük maliyet ve fiziksel boyut ile iyi bir çözüm sunmaktadır.

BİLGİLENDİRME

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

KAYNAKLAR

[1] *V. X. Hau and V. E. Ivanov, "Research, Design, Manufacture and Quality Improvement of a Digital Magnetic Compass System for Marine Vessels," 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 0313-0317, doi: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117772.*

[2] *Li W, Wang J. Effective Adaptive Kalman Filter for MEMS-IMU/Magnetometers Integrated Attitude and Heading Reference Systems. Journal of Navigation. 2013;66(1):99-113. doi:10.1017/S0373463312000331*

[3] *Zhankui Zeng, Shijie Zhang, Yanjun Xing, Xibin Cao, "Robust Adaptive Filter for Small Satellite Attitude Estimation Based on Magnetometer and Gyro", Abstract and Applied Analysis, vol. 2014, Article ID 159149, 7 pages, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/159149*

[4] *Douglas, S.C. "Introduction to Adaptive Filters" Digital Signal Processing Handbook Ed. Vijay K. Madisetti and Douglas B. Williams Boca Raton: CRC Press LLC, 1999*

[5] *MIT Open Course Ware Document.[Online], Available:https://ocw.mit.edu/courses/15-084j-nonlinear-programming-spring2004/9c07ac34609f36bb15967a35a4e77a7b_lec5_steep_desce.pdf*

[6] *Xiaofei Chen, Liguo Weng, Haiyan Zhu, Deqiang Lian, A Novel Pricing Algorithm Based on Reward-Punishment Mechanism for Supply and Demand Balancing.*