

Açısal Hareket Sistemlerinin Hızını Ölçmek İçin BNO055 Sensör ve ESP32-WROOM-32 Mikrodenetleyici Kullanılarak Açısal Hareket Sistemlerinin Donanım Geliştirilmesi ve Ölçeklendirilmesi

Serhat Çindemir^{1*}, Süleyman Erdoğan²

¹Rollmech Automotive, Araştırma Geliştirme, Bursa, Türkiye

²Rollmech Automotive, Araştırma Geliştirme, Bursa, Türkiye

*serhat.cindemir@rollmech.com

Özet – Hareket sırasında dairesel alanları tarayan sistemlerde, hareket hızını ölçmek için yaygın olarak jiroskoplar, takometreler ve kodlayıcılar kullanılır. Bu çalışmada, manyetometre, jiroskop ve ivmeölçer içeren BNO055 sensörü açısal hareketi ölçmek için kullanılmıştır. Sensörden gelen jiroskop ve ivmeölçer verileri açısal hızı ölçmek için kullanılmış ve veri işleme için bir ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyici seçilmiştir. Bileşenler özel olarak tasarlanmış bir PCB'ye monte edilmiştir. Elektronik ölçüm cihazı vantuzlarla dönen bir sisteme sabitlenmiş ve sistemin belirli noktadaki anlık doğrusal hızı hesaplanmıştır. Dairesel hareketin olduğu çeşitli sistemlerde kullanılabilmesi için sensör ile dönme merkezi arasındaki mesafe manuel olarak ölçülmüş ve Bluetooth aracılığıyla sisteme iletilmiştir. Sensörün vantuzlu montajı kullanım kolaylığını artırmıştır. Ayrıca PCB, anakarta veri aktarımını sağlayan RS485 haberleşmesi ile donatılmıştır. Anakart üzerindeki ESP32-WROOM-32E, WiFi bağlantısı sayesinde sensör verilerinin internet üzerinden bir sunucuya yüklenmesine olanak tanır. Böylece çeşitli uygulamalara uygun bir açısal hız ve açı ölçüm sistemi geliştirildi.

Anahtar Sözcükler – BNO055, ESP32WROOM32, açı ölçümü, açısal hız hesaplama

Hardware Development and Scale-up of Angular Motion Systems Using BNO055 Sensor and ESP32-WROOM-32 Microcontroller to Measure the Speed of Angular Motion Systems

Abstract – In systems that scan circular areas during movement, gyroscopes, tachometers, and encoders are commonly used to measure movement speed. In this study, the BNO055 sensor, which includes a magnetometer, gyroscope, and accelerometer, was used to measure angular motion. Gyroscope and accelerometer data from the sensor were utilized to measure angular velocity, and an ESP32-WROOM-32 microcontroller was selected for data processing. The components were mounted on a custom-designed PCB. The electronic measurement device was fixed to a rotating system using suction cups, and the system's instantaneous linear velocity at specific points was calculated. To allow use in various systems with circular motion, the distance between the sensor and the center of rotation was manually measured and transmitted to the system via Bluetooth. The suction cup mounting of the sensor facilitated ease of use. Additionally, the PCB was equipped with RS485 communication, enabling data transfer to the mainboard. The ESP32-WROOM-32E on the mainboard, with its WiFi connectivity, allows sensor data to be uploaded to a server via the internet. Thus, an angular velocity and angle measurement system suitable for various applications was developed.

Keywords – BNO055, ESP32WROOM32, angle measurement, angular velocity calculation

I. GİRİŞ

Jiroskoplar ve ivmeölçerler gibi atalet sensörleri, navigasyon, otomotiv endüstrisi, robotik ve askeri alanlar gibi çeşitli alanlarda yoğun bir şekilde talep görmektedir [1] – [4]. Son on yılda, BNO055 (Bosch Sensortec tarafından geliştirilen), BNO080/85/86 (Hillcrest Labs ve Bosch Sensortec'in ortak çalışması) ve MPU9250 (InvenSense tarafından üretilen) gibi çeşitli IMU'lar, araştırmacılar arasında büyük bir popülerlik kazandı. Bu IMU'ların popülerliğinin

arkasındaki en önemli nedenlerden biri, yüksek hızda gerçek zamanlı yönelim verilerini (kuaterniyonlar ve/veya Euler açıları şeklinde) çıkarabilmeleridir. Bu işlem, sensörün içerisine entegre edilmiş bir mikrodenetleyici tarafından, genellikle 100 Hz gibi yüksek örnekleme hızlarında, bir sensör füzyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilir. Örneğin, BNO055 IMU'su, 100 Hz'de yönelim verilerini kuaterniyonlar veya Euler açıları şeklinde işleyebilmek için 32 bitlik bir mikrodenetleyiciye sahiptir. Bu mikrodenetleyici, Kalman

filtresi tabanlı bir sensör füzyon algoritması uygular. Bu sayede, ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre gibi farklı sensörlerden gelen verileri birleştirerek, doğruluk ve kararlılığı yüksek yönelim verilerini sağlar. Sensör füzyon algoritmaları, özellikle gerçek zamanlı izleme, robotik ve otonom sistemlerde büyük avantajlar sunar.[9] – [10]

Birden fazla sensörün kombinasyonundan oluşan atalet ölçüm birimleri IMU'lar, dönme hızı ve yerçekimi kuvveti gibi dönme ve doğrusal atalet verilerini ölçmek için bir gerekliliktir. IMU'lar, açısal dönüşleri ölçmek için jiroskopları ve atalet ivmelerini ölçmek için ivmeölçerleri kullanır [5]. Her iki sensör de üç eksende ölçüm yapabilen üç serbestlik derecesine sahiptir. IMU teknolojisi, bu iki ölçüm türünü tek bir cihazda entegre ederek önemli bir ilerleme kaydetmiştir [6]. Dokuz serbestlik derecesine sahip (9-DOF) bir IMU, ivmeölçer ve jiroskopik sensörler içerir ve 3 eksende ivme ile jiroskopik değerlerle 6 serbestlik derecesi sunar. İvmeölçerler bir nesnenin doğrusal ivmesini ölçerken, bu veriler nesnenin duruşunu belirlemek için yerçekimi kuvvetini de içerir. IMU sensör verileri, konum ve hızı belirlemek için kullanılabilir. [7]-[8]

Açısal hareket eden sistemlerin hızını doğru ve hassas bir şekilde ölçmek, mühendislik uygulamalarında ve bilimsel araştırmalarda öneme sahiptir. Bu tür ölçümler, robotik sistemlerin stabilizasyonu, otomotiv endüstrisi, havacılık mühendisliği, uzay araştırmaları ve spor performans analizi gibi çeşitli alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Açısal hız, bir cismin belirli bir eksen etrafındaki dönme hızını ifade eder ve genellikle derece/saniye ($^{\circ}/s$) biriminde ölçülür.

Bu çalışmada, BNO055 sensörü ve ESP32 mikrodenetleyicisi kullanılarak açısal hız ölçümü için bir sistem geliştirilmiştir. BNO055 sensörü, Bosch Sensortec tarafından üretilen ve jiroskop, ivmeölçer ve manyetometre özelliklerini bir arada sunan bir hareket takip sensörüdür. 100 Hz'de örnekleme hassasiyeti sağladığı için açısal hız ölçümlerinde tercih edilen bir çözüm olmuştur. ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyicisi ise Espressif Systems tarafından geliştirilmiş olup geniş bellek kapasitesi ve güçlü veri işleme yetenekleri sunar. Özellikle entegre WiFi ve Bluetooth özelliği sayesinde, sensör verilerinin gerçek zamanlı olarak iletilmesi ve uzaktan erişim imkânı sağlanabilmektedir. Bu özellikler, sistemin saha içi ve saha dışı uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmaktadır.

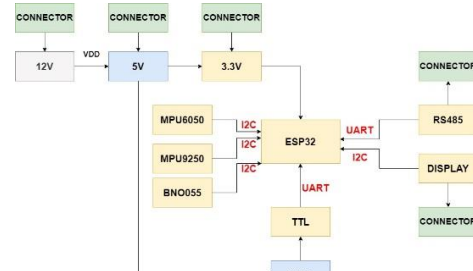
Bu çalışmanın amacı, BNO055 sensörü ve ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyicisi tabanlı yeni bir donanım ve yazılım sistemi geliştirerek açısal hareket eden sistemlerde hız ve açı ölçümü için doğru, hassas ve güvenilir ölçümler yapabilen bir teknoloji sunmaktır. Donanım tasarımı, sensör verilerinin güvenilir bir şekilde toplanmasını ve işlenmesini sağlamak için özel olarak yapılandırılmıştır. Yazılım bileşenleri ise veri analizi ve farklı platformlarda kullanılabilirlik konularında esneklik sunmaktadır.

Bu makalenin ilerleyen bölümlerinde, geliştirilen sistem detaylı bir şekilde açıklanacak, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları tartışılacak ve sistemin performansı değerlendirilecektir. Gerçekleştirilen bu çalışma, endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

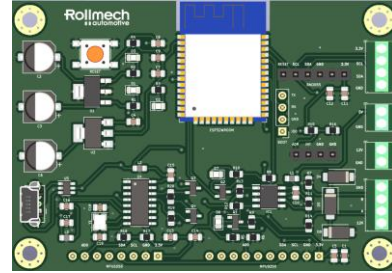
II. YÖNTEM

A. Devre Kartı

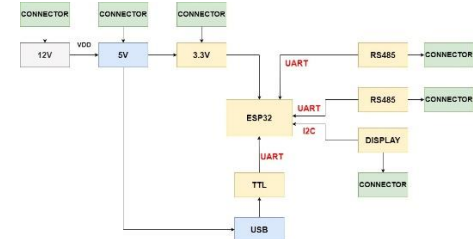
Şekil 1 ve Şekil 3'te blok diyagramda görüldüğü üzere, sarı renkli kutular 3.3V çalışma voltajını, mavi renkli kutular 5V çalışma voltajını temsil etmektedir. Şekil 2'de sensörün bulunduğu ve ölçümü gerçekleştiren devre kartı ve Şekil 4'te sensörlerden anlık ölçüm sonuçlarını RS485 ile alan ve sunucu ile Wifi kullanarak bağlantı kuran haberleşme devre kartı tasarımının 3D görüntüsü görülmektedir.



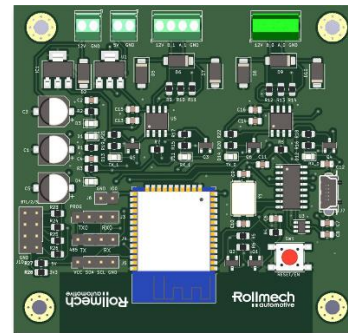
Şekil 1: Sensör devre kartının blok diyagramı.



Şekil 2: Sensör devre kartının tasarımı üç boyutlu görüntüsü.



Şekil 3: Haberleşme devre kartının blok diyagramı.



Şekil 4: Haberleşme devre kartının tasarımı üç boyutlu görüntüsü.

B. Mikrodenetleyici

Gelen sinyalleri alıp işlemek için, Şekil 1'deki blok diyagramda görüldüğü üzere, ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici, çift çekirdekli 240 MHz çalışma frekansına sahip olup, WiFi ve Bluetooth özellikleri içermektedir. Toplamda 34 adet giriş-çıkış pini, 3 tane UART, 2 tane I2C, SPI, ADC ve Timer

modüllerine sahiptir. Pinlerin sayısı bu işlem için fazlasıyla yeterlidir. Programlama pinleri, devre kartı üzerinde CH340G USB seri çevirici ile bağlantı kurulacak şekilde tasarlanmıştır. Devre kartı üzerinde bir harici reset butonu bulunmakta ve giriş sinyalleri için bir alçak geçiren filtre yapısı kullanılmıştır. Güç beslemesi, adaptör veya USB bağlantısı üzerinden sağlanmaktadır. Güç besleme kısmında, voltaj kararlılığını artırmak için bypass kondansatörleri ve devreye gelen gürültüleri bastırmak için ferrit boncuk kullanılmıştır.

C. Jiroskop Sensör

Şekil 1'deki blok diyagramda görüldüğü üzere, BNO055 9 serbestlik dereceli (9-DOF) mutlak konum sensörü tercih edilmiştir. Bu sensör, 3 eksenli ivmeölçer, jiroskop ve manyometre bileşenlerini içeren entegre bir yapıya sahiptir ve bu sayede doğrudan açısal hız, eğim ve konum hesaplamalarını gerçekleştirebilmektedir.

Açısal hız (ω), birim zamandaki açı değişimini ifade eder ve Denklem 1'deki şekilde formüle edilir.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1)$$

Bu denklemde:

$$\omega = \text{Açısal hız}(\text{rad/s})$$

$$\Delta\theta = \text{Açı değişimi}(\text{rad})$$

$$\Delta t = \text{Zaman değişimi}(\text{s})$$

Denklem 1'de görüldüğü üzere birim zamandaki açı değişiminin, açısal hızın temel belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu ifade, jiroskop gibi sensörler aracılığıyla ölçülen veri üzerinden açısal hızın hesaplanmasında kullanılır. Doğrusal hız (ϑ) ise, açısal hızın yarıçap ile çarpılmasıyla elde edilir ve Denklem 2'deki şekilde formüle edilir.

$$\vartheta = \omega * r \quad (2)$$

Bu denklemde:

$$\vartheta = \text{Doğrusal hız}(\text{m/s})$$

$$\omega = \text{Açısal hız}(\text{rad/s})$$

$$r = \text{Yarıçap}(\text{m})$$

Denklem 2'de açısal hızın yarıçapla orantılı olarak doğrusal hıza dönüştürebileceğini ifade eder. Bu, bir nesnenin dögüsel hareketinin doğrusal hıza nasıl yansıdığını matematiksel olarak ifade etmektedir.

Açı ölçümü, manyometre verileri kullanılarak hesaplanabilen başka bir önemli parametredir. Heading açısı (θ_h), özellikle yön belirleme uygulamalarında kullanılır ve manyometrenin x ve y eksenlerindeki bileşenlerden türetilir. Heading açısının hesaplanması Denklem 3'te formüle edilmektedir.

$$\theta_h = \arctan2(M_y, M_x) \quad (3)$$

$$\theta_h = \text{Heading açısı}(\text{rad})$$

$$M_x, M_y = \text{Manyometre x ve y eksen bileşenleri}$$

Denklem 3, heading açısının, manyetik alan vektörlerinin x ve y bileşenlerinin ters tanjant fonksiyonuna uygulanmasıyla

hesaplandığını gösterir. Bu yöntem, z eksenli etrafındaki dönüş açısını tespit etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, açısal hız ve açı ölçümü gibi temel parametreler, sensör verilerinin matematiksel modeller ile işlenmesi yoluyla elde edilir. BNO055 gibi entegre sensör sistemleri, bu tür hesaplamaları doğrudan ve yüksek doğrulukla gerçekleştirme kapasitesine sahip olup, yönelim ve konum tespiti uygulamalarında önemli bir yere sahiptir.

D. Programlama ve Seri Port Bağlantı Devresi

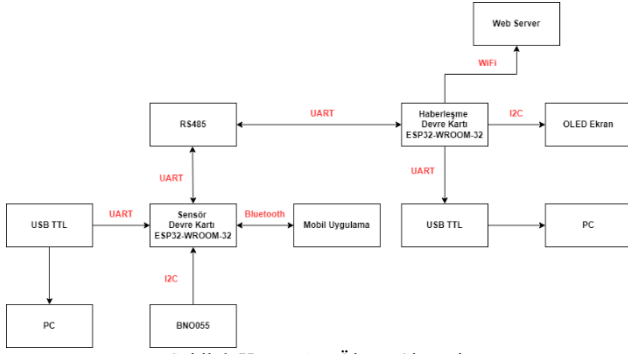
Bilgisayar üzerinde hazırlanan seri port ekranı uygulamaları ile BNO055 sensöründen alınan verilerin okunması için devre kartı üzerinde, Şekil 1'deki blok diyagramda görülen TTL (Transistor to Transistor Logic) ile USB seri port üzerinden verilerin aktarılması için devre tasarımı yapılmıştır. Bu devre tasarımında, ESP32-WROOM-32 ile bilgisayar arasındaki veri iletişimi ve mikrodenetleyicinin programlama işlemleri USB üzerinden sağlanmıştır. Yapılan tasarımda devre kartı ve bilgisayar arasında USB kablo bağlantısı sağlanarak, seri port üzerinden gönderilen veriler bilgisayar ortamında hazırlanan yazılım uygulamasında, grafik ile anlaşılmış ve sayısal değerleri görüntülenmiştir. Ölçümü görüntülenen veriler, .xlsx, .txt ve .png formatında gün, saat, dakika olarak sayısal ölçüm sonucu ve grafik değeri kaydedilip raporlanabilmektedir.

E. RS485 Haberleşme Sistemi

Sensör verilerinin aktarılması için RS485 haberleşme protokolü kullanılmıştır. RS485, uzun mesafelerde elektromanyetik parazitlere dayanıklı, dengeli (balanced) bir haberleşme standardıdır. Yarı çift yönlü (half-duplex) modda çalışan sistemde, sensörden gelen açısal hız ve açı verileri tek bir hat üzerinden ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyicisine iletilmiştir. RS485 sürücüsü, düşük enerji tüketimi ve yüksek elektromanyetik uyumluluk sağlayan bir transceiver modülü ile tasarlanmıştır. Bu sayede, veriler toplanarak mikrodenetleyici üzerinden WiFi aracılığıyla sunucuya aktarılmıştır.

F. Hız ve Açı Ölçüm Sistemi

Aşağıda Şekil 6'da gösterilen hız ve açı ölçüm sisteminin bileşenleri, blok diyagramda belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Sistem, mobil uygulama ile sensör devre kartı arasında Bluetooth bağlantısı kurar. Sensör devre kartının dönme merkezine olan uzaklığı manuel olarak bluetooth ile sensör devre kartına tanıtılır, Sensör devre kartında, BNO055 sensöründen alınan sinyaller ESP32-WROOM-32 mikrodenetleyicisinde işlenir. Mikrodenetleyici, gelen sinyali gerekli parametrelerle filtreler ve kalibrasyon işlemini tamamlar. Ardından, hız ve açı bilgisi RS485 haberleşme protokolü üzerinden haberleşme devre kartına aktarılır. Haberleşme devre kartı, bu veriyi hem OLED ekrana hem de bilgisayara seri port üzerinden iletir. Ayrıca, haberleşme devre kartının WiFi özelliği sayesinde hız ve açı bilgileri bir servera anlık olarak aktarılır.



Şekil 6: Hız ve Açılı Ölçme Sistemi.

G. Ölçüm Sonuçları

Mekanik açı ölçüm cihazı kullanılarak ayarlanan referans açı değerleri tasarlanan sistem kullanılarak Tablo 1'de belirtilen açı değerleri için ölçümlenmiştir ve sonuçları Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1: Referans açı değerleri ve sensör açı ölçüm sonuçları.

Açı Değeri	Mekanik Açı Ölçer	Açı Ölçüm Sonucu1	Açı Ölçüm Sonucu2	Açı Ölçüm Sonucu3
0	0	0	0	0
10	10	10.06	10.00	10.06
20	20	20.06	20.00	20.06
30	30	30.00	30.06	30.00
40	40	39.94	39.94	39.06
50	50	50.06	50.06	50.06
60	60	59.94	59.94	60.00
70	70	69.94	70.06	70.00
80	80	80.00	79.94	80.06
90	90	90.00	90.06	90.19

H. Yazılım

Sistem iki ana kod parçasından oluşmaktadır.

H.A.1 Sensör Birimi Kodu

Bu kısımda, BNO055 sensöründen gelen verileri toplayarak RS485 üzerinden haberleşme cihazına ileten bir ESP32 WROOM-32 mikrodeneleyicisinde çalışmaktadır.

H.A.2 Kütüphaneler ve Tanımlamalar

Gerekli kütüphaneler dahil edilmiştir: Wire.h, Adafruit_Sensor.h, Adafruit_BNO055.h, Bluetooth_Serial.h, vb. SensorData yapısı tanımlanmıştır; sensörden elde edilecek verileri tutar.

H.A.3 Kurulum Fonksiyonu

- Seri haberleşme ve Bluetooth başlatılır.
- BNO055 sensörü başlatılır ve doğru şekilde çalıştığı kontrol edilir.
- RS485 için gerekli pinler ve seri portlar ayarlanır.

H.A.4 Ana Döngü

- Bluetooth üzerinden yarıçap bilgisi alınır.
- BNO055 sensöründen Euler açıları okunur ve başlık (heading) değeri hesaplanır.
- Açısal hız ve doğrusal hız hesaplamaları yapılır
- Hesaplanan veriler SensorData yapısına kaydedilir.
- Veriler RS485 üzerinden ana cihaza gönderilir.

H.B.1 Haberleşme Birimi Kodu

Bu kod, sensör biriminden gelen verileri alır, ekranda gösterir ve sunucuya gönderir.

H.B.2 Kütüphaneler ve Tanımlamalar

- OLED ekran için Adafruit_GFX.h ve Adafruit_SSD1306.h kütüphaneleri kullanılır.
- Wi-Fi ve HTTP işlemleri için gerekli kütüphaneler dahil edilir.
- SensorData yapıları tanımlanır, sensörden gelen verileri tutar.
- Wi-Fi bağlantı bilgileri ve sunucu adresi tanımlanır.

H.B.3 Kurulum Fonksiyonu

- Seri haberleşme başlatılır ve Wi-Fi ağına bağlanılır.
- RS485 portları ve ilgili pinler ayarlanır.
- OLED ekran başlatılır ve başlangıç görseli gösterilir.

H.B.4 Ana Döngü

- RS485 üzerinden her iki sensörden gelen veriler okunur ve ilgili yapılara kaydedilir.
- Veri alma işlemi sırasında iletişim hatları etkinleştirilir ve sonrasında devre dışı bırakılır.
- OLED ekranda sensörlerden gelen başlık, yarıçap ve doğrusal hız değerleri görüntülenir.
- Her 10 saniyede bir, Wi-Fi üzerinden sunucuya HTTP POST isteği gönderilir.
- Gönderilen JSON verisi, cihaz kimliği ve sensör verilerini içerir.
- HTTP isteğinin yanıtı ve durumu seri monitöre yazdırılır.
- Eğer Wi-Fi bağlantısı koparsa, yeniden bağlanma işlemi gerçekleştirilir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında BNO055 kullanılarak açısal ölçümler yapılmış olup, ölçüm sonuçlarının doğruluğu mekanik açı ölçer kullanılarak 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° ve 90° açılarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları mekanik açı ölçer referansında yüzde doğruluk ve Kare kök ortalama hatası (RMSE) olarak hesaplanmış ve bildirinin tartışmalar kısmında detaylı olarak belirtilmiştir. Elde edilen hız ölçümleri çalışma kapsamında paylaşılmamıştır ve teorik olarak bu ölçümün yapılabileceğinden bahsedilmiştir.

IV. TARTIŞMA

Kurulan sistem için herhangi kalibrasyonu yapılmış manuel açı ölçer kullanılarak ölçüm sonuçlarının doğruluğu kontrol edilmiştir.

Denklem 4'te görüldüğü gibi, her bir açı için yapılan üç ölçüm sonucunun ortalaması hesaplanmıştır. Denklem 5'te ise, ortalama ölçüm değeri ile gerçek açı arasındaki fark kullanılarak yüzde doğruluk hesaplanmıştır.

$$\text{Ortalama Ölçüm} = \frac{Açı\ Ölçümü1 + Açı\ Ölçümü2 + Açı\ Ölçümü3}{3} \quad (4)$$

$$\text{Yüzde Doğruluk} = \left(1 - \frac{\text{Gerçek Açı} - \text{Ortalama Ölçüm}}{\text{Gerçek Açı}}\right) \times 100 \quad (5)$$

Ölçümlerin ortalama doğruluğu = %99.82

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

Kare kök ortalama hatası (RMSE) $\cong 0.119$

V. SONUÇ

Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre yüzde doğruluk oranı Denklem 5'te belirtildiği gibi hesaplanarak %99.82 olarak bulunmuştur.

RMSE değeri ise Denklem 6 kullanılarak hesaplanmış olup $\cong 0.119$ olarak bulunmuştur.

Tüm bu doğruluk ve hata oranları kululan sistemin güvenilir ölçüm sonuçları için kullanılabileceğini kanıtlar niteliktedir.

TEŞEKKÜR

Tüm Rollmech çalışanlarına ve Rollmech Ar-Ge Ekibi'ne destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] V. Saahar and R. Durai, "Designing MEMS Based Tuning Fork Gyroscope For Navigation Purpose", International conference on Communication and Signal Processing, pp. 1102-1107, April 2013.
- [2] B. Mashadi and M. Gowdini, "Vehicle Dynamics Control by Using an Active Gyroscopic Device", Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 137, pp. 1-12, 2015.
- [3] C. Acar, A. Schofield, A.R. Trusov, L.E Costlow and A.M. Shkel, "Environmentally robust MEMS vibratory gyroscopes for automotive applications", IEEE Sensors Journal, vol. 9, pp. 1895-1906, 2009.
- [4] D. Dobriborsci, A. Kapitonov and N. Nikolaev, "The basics of the identification localization and navigation for mobile robots", International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), pp. 100-105, 2017.
- [5] A.S. Kundu, O. Mazumder, P.K. Lenka and S. Bhaumik, "Hand Gesture Recognition Based Omnidirectional Wheelchair Control Using IMU and EMG Sensors", Journal of Intelligent and Robotic Systems., vol. 91, pp. 529-541, 2018.
- [6] K. Okada, T. Kakutani, H. Itano, Y. Matsu and S. Sugiyama, "Development of 6-axis Motion Sensors Using Piezoelectric Elements", Proceedings of the 21st Sensor Symposium, 2004.
- [7] Bakhshi, S., Mahoor, M. H., & Davidson, B. S. (2011). Development of a body joint angle measurement system using IMU sensors. Paper presented at the 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society
- [8] Yuan, Q., & Chen, I.-M. (2014). Localization and velocity tracking of human via 3 IMU sensors. Sensors and Actuators A: Physical, 212, 25-33.
- [9] H. Liu, X. Xie, M. Millar, M. Edmonds, F. Gao, Y. Zhu ve diğerleri, "Eklem pozisyonu ve kuvvet algılama yoluyla el-nesne manipülasyonunu incelemek için eldiven tabanlı bir sistem", IEEE/RSJ Uluslararası Intell. Robot Sistemleri Konferansı (IROS) Bildirileri, s. 6617-6624, Eylül 2017.
- [10] F. Fei, S. Xian, X. Xie, C. Wu, D. Yang, K. Yin ve diğerleri, "El kinematiki değerlendirme için çoklu sensörlere sahip giyilebilir bir eldiven sisteminin geliştirilmesi", Micromachines, cilt 12, sayı 4, s. 362, Mart 2021.