

## KONTROL KARTI – GÖREV 3: IMU VE ENCODER SENSÖR FÜZYONU İLE ROBOT ODOMETRİSİ

Tarih: 17.12.2025

Hazırlayan: Beyza Nur Yağcı

### 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Otonom mobil robotların navigasyon yeteneği, robotun kendi konumunu (x, y) ve yönelimini (heading/yaw) ne kadar doğru tahmin ettiğine bağlıdır. Geleneksel yöntemlerde kullanılan tekerlek enkoderleri, sürtünme ve patinaj (slip) kaynaklı hataları zamanla biriktirerek (drift) konum bilgisinin sapmasına neden olur.

Bu çalışmanın amacı, **STM32F4** mikrodenetleyicisi üzerinde **BNO055 IMU** (Atalet Ölçüm Ünitesi) sensörü ve **Çift Enkoder** verilerini birleştirerek (Sensor Fusion), her iki sensörün güçlü yönlerini kullanan hibrit ve kararlı bir **Odometri Sistemi** geliştirmek ve bu verileri **micro-ROS** protokolü ile ROS 2 ortamına gerçek zamanlı olarak aktarmaktır.

### 2. DONANIM VE SİNYAL KONFİGÜRASYONU

Sistemde kullanılan donanım mimarisi ve haberleşme protokolleri aşağıdadır:

- **Mikrodenetleyici:** STM32F407 Discovery (168 MHz).
- **IMU Sensörü:** Bosch BNO055.
  - **Haberleşme:** I2C (400 kHz).
  - **Konfigürasyon:** Sensör, manyetik alan ve ivme gürültülerini donanım seviyesinde bastırmak için **NDOF (Nine Degrees of Freedom)** moduna alınmıştır.
- **Enkoderler:**
  - **Sol Motor:** KY-040 (Mekanik, 20 PPR).
  - **Sağ Motor:** E38S6G5 (Optik, 400 PPR).
  - **Okuma Yöntemi:** STM32 Timer donanımları (TIM2 ve TIM3) "Encoder Mode" ile kullanılarak işlemci yükü minimize edilmiştir.

### 3. METODOLOJİ VE FİLTRELEME YAPISI

#### 3.1. Kullanılan Filtre: Donanımsal Kalman Filtresi (NDOF)

Projede ham ivme ve jiroskop verilerini mikrodenetleyici üzerinde işlemek (yazılımsal Complementary veya Kalman filtresi) yerine, endüstriyel kararlılık sağlamak amacıyla BNO055 sensörünün dahili **Sensor Fusion** motoru kullanılmıştır.

- **Yapı:** NDOF modunda sensör; İvmeölçer (Yerçekimi referansı), Jiroskop (Açısal hız) ve Manyetometre (Kuzey yönü) verilerini dahili bir Kalman Filtresi türevi ile birleştirir.
- **Avantajı:** Bu yöntem, titreşimlerden kaynaklanan gürültüleri donanım içinde çözer ve STM32 işlemcisini navigasyon hesaplamaları için özgür bırakır.
- **Veri Formatı:** Matematiksel kilitlenme (Gimbal Lock) sorununu önlemek için Euler açıları yerine **Quaternion (w, x, y, z)** verisi okunmuştur.

#### 3.2. Kinematik Füzyon Modeli

Odometri hesabı için "Hız Enkoderden, Açı IMU'dan" prensibi benimsenmiştir. Bu hibrit yapının gerekçesi şöyledir:

##### 1. Enkoder:

- **Avantaj:** Kısa mesafede hassas hız ve alınan yol ölçümü sağlar.
- **Dezavantaj:** Dönüşlerde tekerlek kayması (patinaj) nedeniyle açısal hatası yüksektir ve bu hata zamanla birikir.
- **Çözüm:** Sistemin **Hız (v)** verisi Enkoderden alınmıştır.

##### 2. IMU (Atalet Ölçüm Ünitesi):

- **Avantaj:** Tekerlek sürtünmesinden ve zeminden bağımsız olarak mutlak yönelim bilgisi sağlar.
- **Dezavantaj:** İvme verisinden konum türetmek (çift integral işlemi) zamanla büyük kümülatif hatalara yol açar.
- **Çözüm:** Sistemin **Açı (Yaw)** verisi IMU'dan alınmıştır.

#### 4. MICRO-ROS ENTEGRASYONU

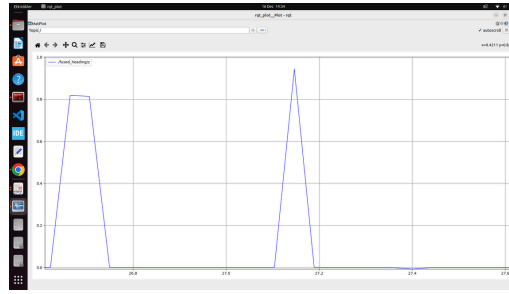
STM32, USB üzerinden seri haberleşme ile micro-ROS istemcisi olarak çalışmaktadır. 10 Hz (100 ms) periyotla aşağıdaki topic'ler yayınlanmaktadır:

1. **/robot\_state (nav\_msgs/Odometry):** Füzyon sonrası elde edilen konum (x,y), hız ve yönelim verisi. Otonom sürüş paketleri (Nav2) tarafından doğrudan kullanılabilir.
2. **/fused\_heading (geometry\_msgs/Quaternion):** Sadece yönelim verisini içeren filtrelenmiş başlık bilgisi.
3. **/raw\_imu (sensor\_msgs/Imu):** ROS standartlarına uygun oryantasyon verisi.

#### 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ

##### 5.1. Yönelim Verisinin Kararlılık Testi

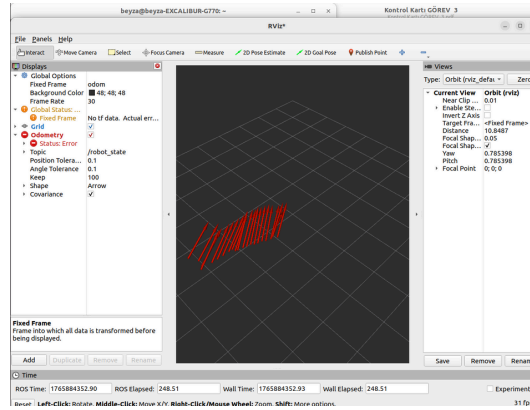
rqt\_plot aracı ile yapılan testte, sensör ardışık olarak  $\pm 90^\circ$  döndürülüp serbest bırakılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere sistem harekete **gecikmesiz tepki vermiş** ve hareket bitiminde **sürüklenme (drift) olmadan** tekrar 0.0 noktasına oturmuştur.



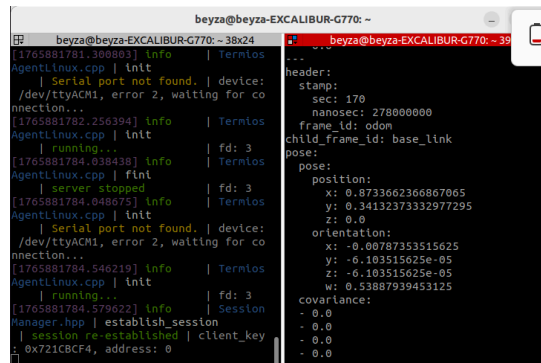
Şekil 1: /fused\_heading verisinin zamanla değişimi ve tekrarlanabilirlik testi.

##### 5.2. Yörünge Takibi ve Görselleştirme

RViz ortamında yapılan testte, enkoderler ileri yönde hareket ettirilirken IMU sensörü döndürülmüştür. Oluşan yörünge (kırmızı oklar), robotun hem öteleme hem de dönme hareketini başarıyla birleştirdiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 2: Enkoder ve IMU füzyonu sonucu RViz'de oluşturulan robot yörüngesi.



Şekil 3: /robot\_state topic'inden alınan canlı odometri verileri.

## 6. GELECEK ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER

Mevcut sistemde füzyon, STM32 üzerinde kinematik denklemlerle yapılmaktadır. Daha karmaşık arazi koşulları için şu geliştirmeler önerilmektedir:

- **Geniştirilmiş Kalman Filtresi (EKF):** ROS 2 tarafında robot\_localization paketi kullanılarak; sensörlerin hata kovaryans matrislerini (güvenilirliklerini) hesaba katan istatistiksel bir füzyon yapısı kurulabilir. Bu sayede tekerleklerden biri patinaj yapsa bile EKF, IMU verisine veya varsa GPS verisine ağırlık vererek konumu düzeltebilir.

## 7. SONUÇ

Bu proje kapsamında STM32 tabanlı kontrol kartında IMU ve Enkoder sensörleri başarıyla entegre edilmiş, BNO055'in NDOF modu sayesinde gürültüsüz yönelim verisi elde edilmiş ve micro-ROS üzerinden ROS 2 ekosistemine tam uyumlu bir odometri veri akışı sağlanmıştır. Sistem, otonom navigasyon görevleri için hazırdır.