



## Akıllı Telefon IMU ve GNSS Entegrasyonu ile Harmonik Hareketlerin İzlenmesi *Harmonic Motion Tracking with Smartphone IMU and GNSS Integration*

Caneren Gül<sup>1,✉</sup>, Taylan Öcalan<sup>1</sup>

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, Esenler, İstanbul, Türkiye

✉cgul@yildiz.edu.tr

### Özet

GNSS ve ivmeölçer yapı sağlığı, yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, deformasyonların belirlenmesi vb. çalışmalarda farklı nitelikteki donanımların dışında yaygın olarak kullanılan sensörlerdir. Yüksek frekanslı jeodezik GNSS alıcıları, sismometrelerin ölçebileceğinden daha büyük yer değiştirmeleri ölçebilmektedir. Buna karşın ivmeölçerler ise GNSS alıcılarına kıyasla daha yüksek örnekleme frekansına sahiptirler. Bu özellikler GNSS alıcısı ve ivmeölçerin birbirlerini tamamlayan sensörler olmasını sağlarken, GNSS/IMU entegrasyonunun yer değiştirme hareketlerinin belirlenmesinde etkin kullanımını sağlamaktadır. Bu çalışmada yüksek maliyetli ve yüksek frekanslı jeodezik nitelikteki sabit referans istasyonu kalitesinde GNSS alıcısı (Trimble NETR9) gözlemleri ile görece düşük maliyetli ve düşük frekanslı çift frekans GNSS çipine sahip akıllı bir telefonun (Xiaomi Mi8) GNSS gözlemleri, akıllı telefonda bulunan Ataletsel Ölçüm Birimleri (Inertial Measurement Unit, IMU) ile entegre edilerek, harmonik hareketleri izleyebilme yetenekleri araştırılmıştır. Yüksek frekanslı hassas GNSS gözlemleri için Trimble NETR9 (20 Hz), düşük frekanslı akıllı telefon GNSS gözlemleri için ise Xiaomi Mi8 (1 Hz) eş zamanlı olarak kullanılmıştır. GNSS verilerinin değerlendirilmesinde bağıl yöntem ve Hassas Mutlak Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) teknikleri kullanılmış, veri değerlendirme ve analizler RTK-LIB yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Entegre edilecek IMU ölçüleri için Xiaomi Mi8 telefonda bulunan ICM20690 ivmeölçer ve ak0991x manyetometre sensörleri ile 100 Hz örnekleme frekansında kayıt yapılmıştır. Harmonik hareketler tek eksenli bir sarsma tablasında üç kez tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Harmonik hareketler için frekans ve genlikler 0.5 Hz için 2 cm ve 5 cm; 1 Hz için 2 cm ve 5 cm; 2 Hz için yalnızca 2 cm olarak belirlenmiştir. İlk olarak GNSS alıcılarının harmonik hareketleri algılayabilme yeteneğini gözlemlemek amacıyla Trimble NETR9 GNSS gözlem çözümlerine Allan varyansı analizi yapılarak gürültü süreçleri belirlenmiş, ardından bu gürültü süreçleri Kalman Süzgeci ile giderilerek elde edilen sonuçlar Butterworth bant geçiren süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için genlik ve frekans değerleri Hızlı Fourier Dönüşümü ile elde edilmiştir. Karşılaştırmada Trimble NETR9 gözlemlerindeki gürültülerin giderilmesinde Kalman Süzgeci'nin bant geçiren süzgece alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır. Xiaomi Mi8 GNSS gözlemleri için ise Butterworth yüksek geçiren süzgeç kullanılmış ve sonuçlar Kalman Süzgeci ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada Kalman süzgecinin ve yüksek geçiren süzgecin Xiaomi Mi8 gözlemlerindeki gürültüleri gidermede yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. GNSS ve IMU entegrasyonu öncesinde ivmeölçer ve manyetometre sensör çerçevesinden referans vektörler yardımıyla Tekil Değer Ayrıştırması (Singular Value Decomposition, SVD) yöntemi kullanılarak lokal çerçeveye dönüşüm yapılmıştır. Entegrasyonda kullanılan Kalman Süzgeci'nin dinamik gürültü sürecini belirlemek amacıyla ivmeölçer verilerine Allan Varyansı analizi yapılmıştır. Hızlı Fourier Dönüşümü ile elde edilen genlik ve frekans değerleri referans değerler ile karşılaştırılmış, bağıl çözüm ve PPP gözlemleriyle yapılan entegrasyonun performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda Trimble NETR9 bağıl çözüm GNSS ve IMU entegrasyonunda genlik değerlerindeki hataların mm düzeyinde, PPP GNSS ve IMU entegrasyonunda ise genlik değerlerindeki hataların mm – cm düzeyinde olduğu görülmüştür. Xiaomi Mi8 bağıl çözüm ve PPP GNSS entegrasyonunda ise genlik değerlerindeki hataların dm – m düzeyinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** GNSS, IMU, İvmeölçer, Harmonik Hareket, Kalman Süzgeci, Allan Varyansı

### Abstract

GNSS and accelerometer are sensors that are widely used in studies of structural health monitoring, crustal monitoring, and detection of deformation, apart from different other sensors. High-frequency



geodetic grade GNSS receivers can capture larger displacements than seismometers can measure. On the other hand, compared to GNSS receivers, accelerometers have a higher sampling frequency. While these features make GNSS receivers and accelerometers complementary sensors, they enable the effective use of GNSS/IMU integration in detection of displacements. In this study, high cost and high frequency geodetic grade permanent reference station quality GNSS receiver (Trimble NETR9) observations and relatively low cost, low frequency and dual frequency GNSS chipset (Xiaomi Mi8) observations were integrated with Inertial Measurement Units (IMU) found in smartphone to investigate the ability of harmonic motion tracking. Trimble NETR9 (20 Hz) was used for high-frequency precise GNSS measurements and Xiaomi Mi8 was used for low-frequency smartphone GNSS measurements simultaneously. Relative positioning and Precise Point Positioning (PPP) methods were used to process GNSS data and processing and analysis were performed using RTK-LIB. The IMU data for integration was recorded with a 100 Hz sampling rate using the ICM20690 accelerometer and the ak0991x magnetometer sensors at Xiaomi Mi8. The harmonic motions were simulated three times in a single axis shake table. Frequencies and amplitudes for harmonic motion simulations were selected as 2 cm and 5 cm for 0.5 Hz, as 2 cm and 5 cm for 1 Hz, as 2 cm for 2 Hz. Firstly, in order to observe the ability of tracking the harmonic motions with GNSS receivers, the noise processes in GNSS solutions were identified using the Allan variance and then these processes were denoised with Kalman Filter and results were compared with a Butterworth bandpass filter. Frequencies and amplitudes were obtained from Fast Fourier Transform for comparison. It was concluded that Kalman Filter can be an alternative to the bandpass filter for denoising Trimble NETR9 solutions. A Butterworth highpass filter were used for denoising Xiaomi Mi8 GNSS solutions and compared with Kalman Filter. Results showed that both Kalman Filter and highpass filter are not sufficient for denoising Xiaomi Mi8 solutions. Before GNSS/IMU integration, accelerometer and magnetometer sensor frame was transformed local frame using Singular Value Decomposition (SVD) method. Dynamic noise processes in Kalman Filter used in the integration were analysed with Allan variance method. Frequencies and amplitudes obtained from Fast Fourier Transform were compared with reference data, performance of integration with relative and PPP solutions were evaluated. Results showed that amplitude errors in Trimble NETR9 relative solution and IMU integration were at mm level, PPP GNSS and IMU integration errors were in the range of mm – cm. Amplitude errors in Xiaomi Mi8 relative solution and PPP IMU integration were reached to dm – m level.

**Keywords:** GNSS, IMU, Accelerometer, Harmonic Motion, Kalman Filter, Allan Variance