

Software Library Design for GNSS/INS Integrated Navigation Based on Multi-Sensor Information of Android Smartphone

Youngki Kim, Tae Hyun Fang, Kiyeol Seo[†]

Maritime Safety and Environmental Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

In this paper, we designed a software library that produces integrated Global Navigation Satellite System (GNSS) / Inertial Navigation System (INS) navigation information using the raw measurements provided by the GNSS chipset, gyroscope, accelerometer and magnetometer embedded in android smartphone. Loosely coupled integration method was used to derive information of GNSS /INS integrated navigation. An application built in the designed library was developed and installed on the android smartphone. And we conducted field experiments. GNSS navigation messages were collected in the Radio Technical Commission for Maritime Service (RTCM 3.0) format by the Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). As a result of experiments, it was confirmed that design requirements were satisfied by deriving navigation such as three-dimensional position and speed, course over ground (COG), speed over ground (SOG), heading and protection level (PL) using the designed library. In addition, the results of this experiment are expected to be applicable to maritime navigation applications using smart device.

Keywords: GNSS, INS, integrated navigation, android smartphone, maritime

1. INTRODUCTION

최근 5년간 발생한 해양 사고를 선종 기준으로 분류하면 어선이 10,388척으로 66.1%를 차지한다. 이 중 연근해 어선이 8,874척으로 86.4%를 차지하고, 비어선 중에는 수상레저기구가 2,771척으로 52.0%를 차지한다. 해양수산부 해양안전심판원에서 분석한 어선 사고의 원인 현황을 살펴보면 어선의 사고원인은 크게 운항과실, 취급불량 및 결함 그리고 기타로 분류되며, 운항과실은 다시 13가지 세부 원인으로 분류되는데, 최근 5년간 어선의 운항과실에 의한 사고로 분류된 467건 중 선위확인 소홀은 35건, 경계 소홀은 224건이다 (KMST 2021). 이는 장비 결함을 제외한 어선의 사고 원인의 과반 수 이상이 자선의 위치 확인이나 주변 경계를 소홀이 한 것에 있다는 것을 나타낸다.

Received Aug 19, 2022 Revised Aug 28, 2022 Accepted Aug 29, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: kyseo@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3684 Fax: +82-42-866-3600

Youngki Kim <https://orcid.org/0000-0003-1365-1147>

Tae Hyun Fang <https://orcid.org/0000-0001-7680-9875>

Kiyeol Seo <https://orcid.org/0000-0002-1462-6720>

한 장소에서 다른 장소로 최단 거리로 이동하는 것을 주 목적으로 하는 타 선종과는 달리 어선에서는 항해와 어로 작업이 동시에 수행될 수 있으며 전문적인 항해 장비가 설치된 선박의 조종실을 비울 수밖에 없는 상황이 발생할 가능성이 있다. 따라서 어선의 선원들이 휴대하는 스마트기기에 경보시스템이 포함된 항법 어플리케이션이 있다면 안전한 조업에 도움이 될 수 있다.

안드로이드 운영체제를 기반으로 하는 스마트폰은 Global Navigation Satellite System (GNSS) 원시측정치를 자체적으로 제공하고 있고 자이로스코프 등 관성항법센서 정보도 함께 제공하고 있다. 그리고 데이터 통신이 용이한 장점이 있기 때문에 충돌 방지를 지원하는 항법 장치로의 활용이 가능하다. 이와 관련하여 지난 10년간 어선에 대한 GNSS 항법장치의 판매는 Fig. 1 과 같이 150,000대 이상으로 2배 증가했다. European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA)는 증가의 첫 번째 원인으로 어선에서 안전성을 향상시키기 위해 선박자동식별 시스템 (Automatic Identification System; AIS)을 사용하여 충돌 방지를 지원하는 전용 항법 장치를 탑재하기 때문인 것으로 분석했다 (GSA 2022). 또한, GSA는 이미 스마트기기 기반 GNSS를 이용하여 개발된 어플리케이션이 항공 및 해양 분야의 전용 전문 항법 기술과 경쟁하기 시작했다는 점을 설명한 바 있다 (GSA 2020).

한편 스마트기기 기반 GNSS 항법 기술과 관련해서는 많은 연구가 진행되고 있다. Zangenehjad & Gao (2021)는 2016년부터 발표된 여러 관련 연구를 분석하여 스마트폰 GNSS 원시 측정치에는 잡음이 많음에도 불구하고 비용-효율성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다고 평가했다.

구글과 항법 학회는 진보된 기계 학습과 GNSS 정밀 알고리즘 등 첨단 기술을 이용하여 스마트기기 기반 GNSS 측위 정확도를 향상시키는 연구를 장려하기 위해 2021년과 2022년 스마트폰 데시미터 챌린지 대회를 개최하였다 (Institute of Navigation 2022). 대회에서 Campos-Vega et al. (2021)는 4차 확장 칼만 필터를 이용한 스마트기기 기반 통합 측위를 수행하여 100 Hz로 약 5 m 정확도를 달성했다.

안드로이드 스마트기기의 멀티 GNSS 원시 측정치의 오차 특성을 분석한 연구 (Li & Geng 2019), 스마트폰 간의 정지 측위 정확도 비교 연구 (Szot et al. 2019), 안드로이드 스마트폰의 이주파 코드 의사거리 관측치 품질을 평가하고 GNSS 단독 측위 성능을 보인 연구 (Robustelli et al. 2021)와 같이 스마트기기 자체적으로도 높은 정확도의 위치정보를 제공할 수 있음을 설명한 연구결과가 많았으나 해양 항법에 응용하거나 항해사 지원 시스템의 구축과 관련된 연구는 찾아보기 어려웠다.

선박의 위치나 동적 상태를 포함하는 항법 정보와 선박자동식별시스템의 정보, 전자해도 (Electronic Navigational Chart) 및 기타 정보와의 융합을 통해 소형 선박의 항해사를 지원하는 스마트기기 기반 항법 지원 어플리케이션을 개발하기 위해서는 우선 스마트기기의 센서 정보를 이용해서 신뢰성 있는 항법 정보를 생산하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 먼저 안드로이드 스마트기기에 내장된 GNSS 칩셋과 자이로스코프, 가속도계 (Accelerometer)와 자력계 (Magnetometer) 센서를 이용하여 GNSS/Inertial Navigation System (INS) 통합 항법 정보를 생산하는 소프트웨어 라이브러리를 설계한다. 다음으로 설계에 따라 제작된 라이브러리와 이를 이용한 어플리케이션을 이용하여 육해상 필드 실험을 수행하고 그 결과를 제시한다.

2. DESIGN OF SOFTWARE LIBRARY

2.1 Sensor Information Provided by Android Smartphones

현존 안드로이드 스마트폰의 84%가 원시 GNSS 측정 데이터를 제공한다. 안드로이드 버전 10.0 이상을 실행하는 기기나 버전 9.0 이하의 기기 중 2016년 이후 출시된 스마트폰은 모두 원시 GNSS 측정 데이터를 제공한다. 그러나 모든 기기가 안드로이드 Application Programming Interface (API)가 지원하는 모든 GNSS데이터를 제공하는 것은 아니다. 구글 개발자 웹페이지에는 안드로이드 스마트기기에 내장된 칩셋에 따라 의사거리와 의사거리 변화율, 항법 메시지, 자동 이득제어기 (Automatic Gain Controller) 값, 누적 도플러거리 (Accumulated delta range; ADR)이나 반송파 위상 (Carrier phase) 등의 정보가 선택적으로

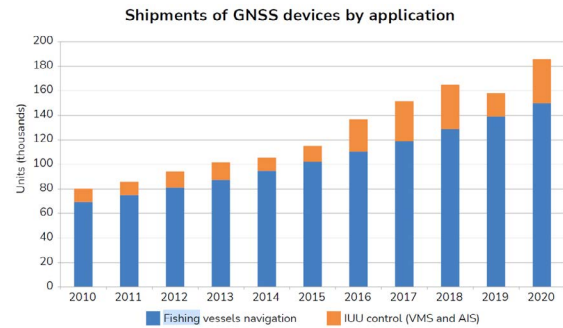


Fig. 1. Shipments of GNSS devices by application (GSA 2022).

제공되며 제조사나 모델에 따라서는 수신 가능한 GNSS의 종류나 L5 등 이중 주파수 수신 여부가 다르다는 점이 명시되어 있다 (Android developer guide 2022a).

또한 대부분의 안드로이드 기기는 GNSS 칩셋 외에도 해당 기기의 동작, 방향 및 다양한 환경 조건을 측정할 수 있도록 자이로스코프, 가속도계, 자력계, 온도계, 습도계, 기압계와 조도계가 포함되기도 한다 (Android developer guide 2022b).

2.2 Design of Library

본 소프트웨어 라이브러리 설계의 목적은 전자해도를 다루거나 AIS 등 외부 정보를 다루는 복잡한 어플리케이션 제작 시 해당 기능을 항법 정보 도출 기능과 명확히 분리하고 한번 검증이 완료된 라이브러리를 추후 다수의 안드로이드 기반 항법 응용 어플리케이션을 제작하는데 쉽게 활용할 수 있도록, 항법 정보를 도출하는데 사용되는 소프트웨어 코드를 정리함에 있다. 라이브러리 개발 환경으로는 안드로이드, 윈도우 및 리눅스 운영체제 기반 기기에서 활용할 수 있도록 .Net 5 프레임워크를 선정하였고 개발 언어는 C#를 사용하였다.

Fig. 2는 설계 소프트웨어 라이브러리를 사용하는 어플리케이션의 역할을 보인다. 어플리케이션이 안드로이드 API를 통해 발생하는 GNSS 칩셋의 출력인 GNSS 원시 측정 정보와 항법 데이터 그리고 자이로스코프, 가속도계와 자력계로부터 측정 데이터를 수집하고 네트워크를 통해 외부로부터 데이터를 수집하여 라이브러리에 전달하면 라이브러리가 항법 정보를 계산하여 어플리케이션에 회신한다.

안드로이드 API는 고유 형식의 항법 메시지를 지원하지만 본 연구에 사용된 스마트기기는 항법 메시지 출력 이벤트를 발생시키지 않았기 때문에 International GNSS Service (IGS)의 Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) 서버로부터 RTCM 3.0 형식의 궤도력 메시지를 수신하여 활용할 수 있도록 설계하였다.

어플리케이션은 자이로스코프, 가속도계, 자력계의 측정치 출력 이벤트가 발생하면 그 시각을 100분의 1초 단위로 기록하고 동시에 라이브러리에 전달한다. 어플리케이션은 라이브러리 사용을 선언하는 과정에서 측위 방법, 위성시스템의 마스크 값, 초기화 시간, 오경보 및 미검출 확률 등을 결정할 수 있다.

Fig. 3은 라이브러리 함수 간의 데이터 흐름을 나타낸다. 라이

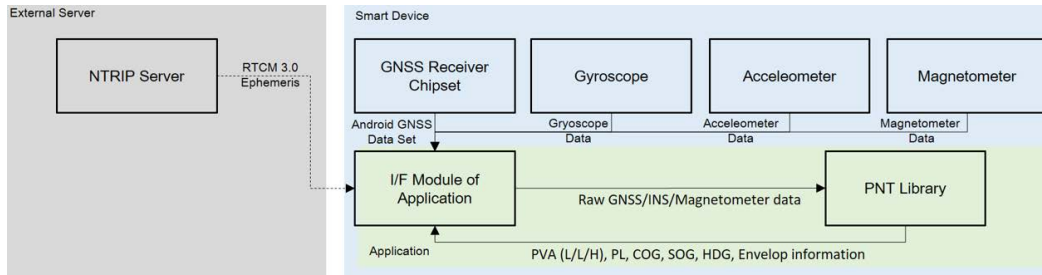


Fig. 2. The role of the application using the designed library.

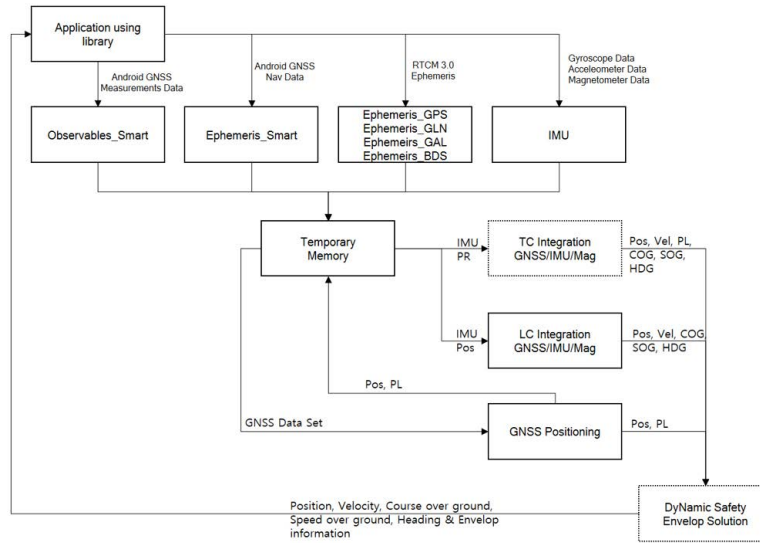


Fig. 3. Library functions accessed by the application and internal data flow diagram of the library.

브러리를 사용하는 어플리케이션이 스마트기거나 인터넷을 통해 얻은 정보를 라이브러리에 입력하는데 사용하는 함수는 총 8개이다. Observables Smart 함수는 안드로이드 기반 GNSS 원시 측정 데이터를 입력하는데 사용한다. Ephemeris Smart 함수는 안드로이드 기반 항법 메시지를 입력하는데 사용한다. Ephemeris GPS 등 5개 함수는 각기 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS의 항법 메시지를 RTCM 3.0 형식으로 라이브러리에 입력하는데 사용한다. Inertial Measurement Unit (IMU) 함수는 안드로이드 기반 자이로스코프, 가속도계, 자력계 정보를 입력하는데 사용한다. 3개의 내부 함수는 스냅샷 방식의 GNSS 단독 측위 결과와 약결합 방식의 GNSS/INS 통합 및 강결합 방식의 GNSS/INS 통합 항법 결과를 도출한다. 라이브러리가 최종적으로 생산하는 항법 정보는 3차원 위치와 속도, 대지 침로, 대지 속도, 선수 방향 및 보호 수준이다. 점선으로 표현된 함수는 본 논문 작성 시 완성되지 않았다.

3. ALGORITHM

3.1 Pseudorange Calculation

안드로이드 API는 의사거리 측정치를 직접 제공하지 않고 의

사거리 측정치 계산에 필요한 원시 데이터를 제공한다 (GSA 2017). 제작된 라이브러리는 식 (1-6)의 과정을 통해 GPS 위성에 대한 의사거리를 도출한다. FullBiasNanos는 수신장치 내부 시계의 시각과 기준시로부터 계산된 실제 GPS 시스템 간의 시각 차이이다. 식 (1)을 통해 weeknumber를 추출한다. 식 (2)를 통해 신호 수신 시점의 수신기 시각을 구한다. TimeNanos는 수신장치의 내부 하드웨어 클럭 값이다. 식 (3)을 통해 신호 수신 시점의 GPS 시각을 구한다. BiasNanos는 FullBiasNanos의 서브 나노 초 부분이다. 식 (4)를 통해 신호 송신 시점의 GPS 시각을 구한다. ReceivedSVTimeNanos는 측정 시점의 GNSS 위성 시각이다. 식 (5, 6)을 통해 의사거리를 계산한다. 이 과정에서 Week rollover가 발생할 수 있고, 처리가 필요하다.

$$weekNumberNanos = \text{floor}(-10^{-9} \times FullBiasNanos \div WN_{max}) \times WN_{max} \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$tRxNanos = TimeNanos - FullBiasNanos - weekNumberNanos \quad (2)$$

$$tRxSeconds = (tRxNanos - TimeOffsetNanos - BiasNanos) \times 10^{-9} \quad (3)$$

$$tTxSeconds = ReceivedSVTimeNanos \times 10^{-9} \quad (4)$$

$$prSeconds = tRxSeconds - tTxSeconds \quad (5)$$

$$pseudorange = prSeconds \times 299,792,458 \quad (6)$$

GLONASS 위성에 대한 의사거리를 구하기 위해 식 (2) 대신 식 (7)을 사용하고, 식 (3) 대신 식 (8)을 사용하여 신호 수신 시점의 시스템 시를 GLONASS 시로 변환한다.

$$tRxNanos = TimeNanos - FullBiasNanos \tag{7}$$

$$tRxSeconds = (RxNanos - TimeOffsetNanos - BiasNanos) \times 10^{-9} + 108000 - LS \tag{8}$$

BeiDou 위성에 대한 의사거리를 구하기 위해서는 식 (4) 대신 식 (9)를 사용하였다. 위성 시계 오차가 보상되지 않은 신호 송신 시점을 BeiDou Navigation Satellite System Time으로 변환하였다.

$$tTxSeconds = \text{modulo}(\text{ReceivedSvTimeNanos} \times 10^{-9} + 14,604800) \tag{9}$$

3.2 Configuration of GNSS/INS Fusion Filter

Kalman 필터에 의한 GNSS와 INS 융합은 상호간의 약점을 보완하는 것으로 알려진 기법이다. INS는 높은 갱신율을 가지고 상대적으로 외부 간섭에 강인하다. 따라서 GNSS는 INS에 의한 항법데이터를 갱신하기 위해서 주로 사용된다. INS는 가속도계와 자이로스코프의 측정치를 적분하여 위치와 자세의 항법데이터를 추정한다. 스마트폰의 GNSS 원시 측정치와 센서 정보를 이용하는 GNSS/INS 통합 측위 알고리즘을 도시하면 Fig. 4와 같다.

IMU 전처리 과정을 통해 초기 자세각을 추정한다. 이것은 자력계 교정 (Calibration) 계수 결정 및 초기 방위각 결정을 포함한다. 다음으로 INS Mechanization은 자이로스코프 적분을 통한 자세각 갱신, 가속도계 적분을 통한 속도 갱신, 그리고 속도 적분을 통한 위치를 갱신한다. 자력계의 방위각 결정을 위해 교정 계수 갱신과 교정 및 자북 추정, 그리고 편각 (Magnetic declination) 적용 및 진북을 추정한다. 또한 GNSS 측위 결과와 함께 잔차 (Residuals)를 계산하고 Kalman 필터를 거쳐 INS 오차를 추정한다. 이렇게 추정된 INS 오차를 보정하여 항법 솔루션에 적용한다 (Groves 2013).

식 (10-12)를 통해 잔차 δZ^{e-} 를 계산한다. 잔차 행렬은 INS 측정 위치 $r_{eb,INS}^e$ 와 GNSS 측정 위치 $r_{eb,GNSS}^e$ 의 차와 INS 방위각 $\psi_{eb,INS}^e$ 과 자력계 방위각 $\psi_{eb,Magnetometer}^e$ 의 차로 구성한다. 여기서 윗첨자 e 는 지구 고정좌표계에서 결정되는 값을 나타내며, 아래첨자 eb 는 지구 고정좌표계에서 동체좌표계로의 값을 나타낸다.

$$\delta Z^{e-} = \begin{bmatrix} \delta r_{eb}^e \\ \delta \psi^e \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\delta r_{eb}^e = r_{eb,INS}^e - r_{eb,GNSS}^e \tag{11}$$

$$\delta \psi^e = \psi_{eb,INS}^e - \psi_{eb,Magnetometer}^e \tag{12}$$

융합 필터는 Kalman 필터로 구성된다. 상태값 $x = [\varepsilon_{eb}^e \ \delta v_{eb}^e \ \delta r_{eb}^e \ b_a^T \ b_g^T]^T$ 은 가속도계 바이어스 (ba)와 자이로스코프 바이어스 (bg)를 포함한다. $\varepsilon_{eb}^e, \delta v_{eb}^e, \delta r_{eb}^e$ 은 각각 자세오차, 속도오차, 그리고 위치오차를 나타낸다. 식 (13-15)를 통해 상태 예측값 \hat{x}_k^- 과 그것의 오차 공분산 P_k^- 를 계산하고 Kalman 이득 K_k 를 계산한다. 아래첨자 k 는 샘플링 주기 Δ 에서 이산시간 색인 $t_k = k\Delta$ 를 나타낸다.

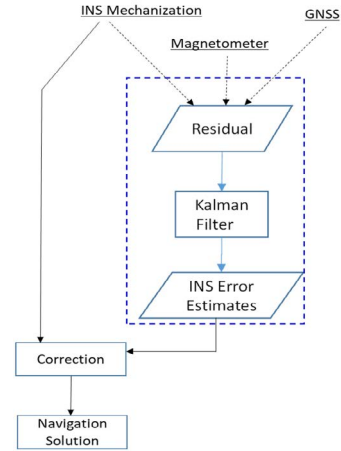


Fig. 4. Loosely coupled integration algorithm.

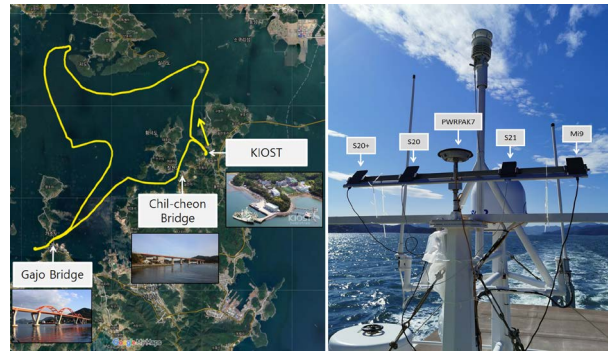


Fig. 5. Trajectory of vessel (left), Experimental setup on a vessel (right).

$$\hat{x}_k^- = \phi_{k-1} \hat{x}_{k-1} \tag{13}$$

$$P_k^- = \phi_{k-1} P_{k-1} \phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \tag{14}$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \tag{15}$$

여기서 ϕ_{k-1} 과 Q_{k-1} 은 각각 상태전이행렬과 상태값 프로세스 공분산 행렬을 나타낸다. 식 (16)을 통해 상태값을 갱신하고 식 (17)을 통해 오차 공분산 갱신을 수행한다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \delta Z^{e-} \tag{16}$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \tag{17}$$

상태값이 갱신되면 식 (18-20)과 같이 위치, 속도, 및 방향코사인행렬 C_b^e 을 갱신한다.

$$\hat{r}_{eb,k}^e = \hat{r}_{eb,k}^- + \delta \hat{r}_{eb,k}^e \tag{18}$$

$$\hat{v}_{eb,k}^e = \hat{v}_{eb,k}^- + \delta \hat{v}_{eb,k}^e \tag{19}$$

$$\hat{C}_{b,k}^e = [I - \text{skew}(\hat{\varepsilon}_{eb,k}^e)] \hat{C}_{b,k}^- \tag{20}$$

Table 1. Horizontal positioning accuracy.

	S20+	S20	MI9
	L1 / L1+L5	L1 / L1+L5	L1 / L1+L5
Samples	15054	15220	14144
Bias	2.39 / 2.91 m	2.06 / 2.77 m	2.4 / 3.07 m
1 Sigma	3.14 / 2.62 m	4.12 / 4.42 m	3.67 / 3.27 m
RMS	3.95 / 3.92 m	4.6 / 4.42 m	4.39 / 4.49 m
Accuracy (95%)	7 / 6.42 m	7.3 / 6.73 m	7.54 / 8.09 m

4. EXPERIMENTAL RESULTS

4.1 Experiment at Sea

설계 및 구축한 라이브러리를 사용하는 안드로이드 어플리케이션을 제작하여 스마트기기에 설치하고 실험역 측위 실험을 수행하였다. 실험장비를 탑재한 장목 2호는 2021년 10월 19일 10시경 한국해양과학기술원 남해연구소를 출항하여 거제도 북서 해안을 따라 Fig. 5와 같이 반시계 방향으로 항진하여 14시경 남해 연구소에 입항하였다.

Samsung S20+, S20, S21 모델과 Xiaomi Mi9 모델을 설치하고 데이터를 수집하였다. S21은 기기 고장으로 일부 데이터를 얻을 수 없었다. 궤도력은 NTRIP을 통하여 IGS의 방송 궤도력을 실시간 수집하여 이용하였다. 측위정확도 분석을 위한 기준 위치는 NovAtel 사의 위성기반 정밀측위 서비스 (TerraStar)를 이용하여 수집하였다.

Table 1은 개발 라이브러리를 이용한 해상실험 결과를 GNSS 측위정확도 측면에서 정리한 표이다. 단일/이중 주파수 GNSS 측위 결과는 모두 95% 확률 10 m 미만의 정확도로 나타났다. 이는 실험결과가 해양 항법에서 요구하는 항만 진입로와 항만 인근 해역에서 요구되는 항법 정확도 (IMO 2004)를 만족했음을 의미한다. 관련하여 스마트기기 기반 GNSS 이중 주파수를 이용한 측위 결과가 항만입출항 정확도 요구사항 (IMO 2002)을 충족할 수 있음을 확인한 연구가 있었다 (Seo et al. 2021).

Fig. 6은 Samsung S20+ 단일 주파수 GNSS를 이용한 경우의 측위정확도를 나타낸다. RMS 3.95 m를 얻었다. Empirical CDF 곡선을 참고하면 95% 정확도로 7.00 m이다.

Fig. 7은 GNSS/IMU 통합 측위 결과로 얻은 선박의 궤적을 나타낸다. 본 실험에서는 선박 거동의 제약으로 자력계 교정을 수행할 수 없었다. 약 100 Hz로 기록되었고 기준 위치의 부재로 정확도 측면의 분석은 이루어지지 않았다.

Fig. 8은 GNSS/IMU 통합을 통해 도출된 구면좌표계 상 코스와 속도 그리고 선수 방위를 나타낸다. 푸른색 선은 GNSS/INS 통합에 의해 결정된 선수 방위이다. 초록색 선은 GNSS에 의한 코스이다. 검정색 선은 자력계에 의한 선수 방위이다. 붉은색 선은 GNSS/INS 통합에 의한 속력을 나타낸다.

4.2 Experiment on Land

2022년 4월 1일 대산항에서 궁평항까지 해안 도로를 따라 이동하며 항법 데이터를 수집하였다. 스마트기기는 Samsung S20

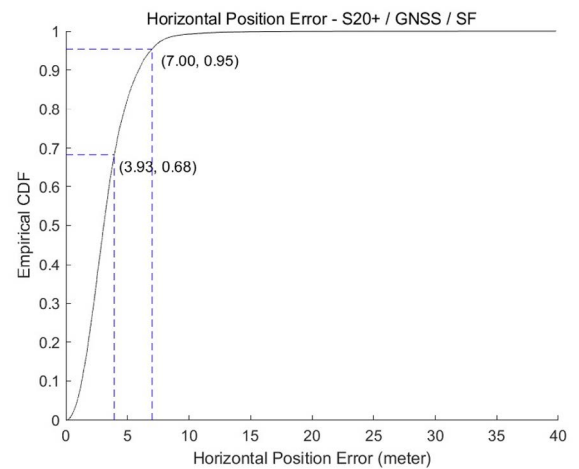
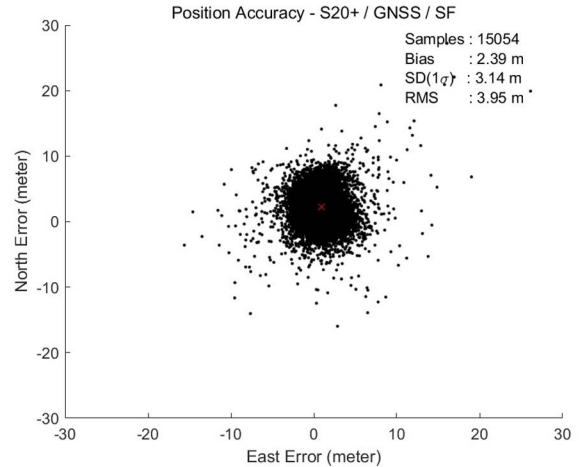


Fig. 6. Position accuracy – Horizontal position error.

을 사용하였고 차량 내부에 설치하였다. 원활한 GNSS 신호 수신을 위하여 SuperGain GPS 증계기를 이용하여 차량 외부에서 수신한 GNSS 신호를 차량 내부에 방사하였다. Fig. 9의 궤적과 같이 실험 전 차량을 회전시켰다. 이를 통해 자력계 교정 계수를 산출할 수 있었다.

Fig. 10은 GNSS/INS 통합 항법 중 계산된 선수 방위, 대지 침로, 대지 속력을 나타낸다. 푸른색 선은 GNSS/INS 통합에 의한 선수 방위, 초록색 선은 GNSS에 의한 대지 침로, 검은색 선은 자력계에 의한 선수 방위이다.

5. CONCLUSIONS

본 연구에서는 안드로이드 스마트기기에 내장된 GNSS 칩셋과 자이로스코프, 가속도계 및 자력계가 제공하는 원시 데이터를 이용하여 GNSS/INS 통합 항법을 수행하는 라이브러리를 설계했다. 다음으로 설계된 라이브러리와 그 라이브러리를 사용하는 어플리케이션을 개발하고 이를 이용하여 해상과 육상 환경에서 실험을 수행하였다. 실험 결과, 라이브러리 설계 시 목적인 항법 정보인 3차원 위치와 속도, 대지 침로 (COG), 대지 속도

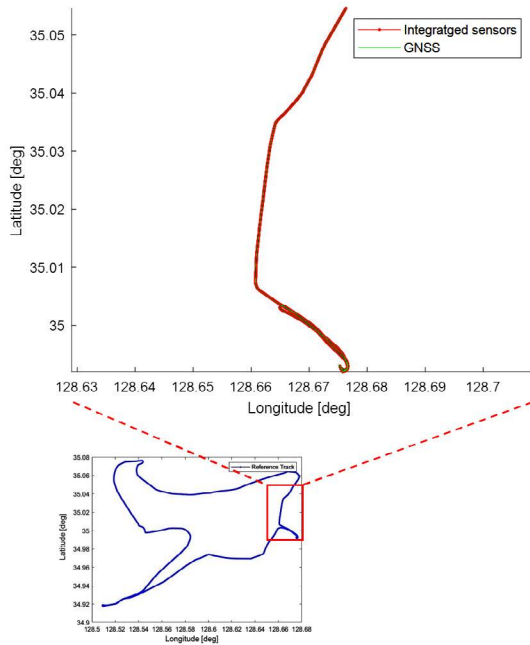


Fig. 7. Vessel trajectory by GNSS/INS integrated.

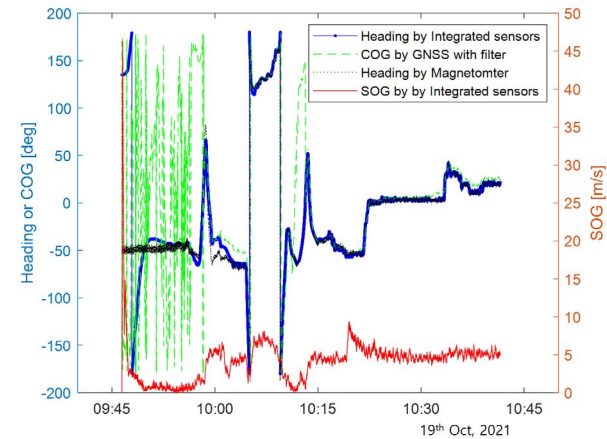
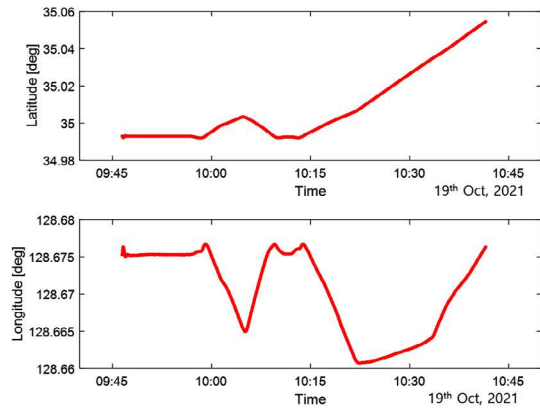


Fig. 8. Result of multi-Source integrated positioning – COG / SOG / Heading.

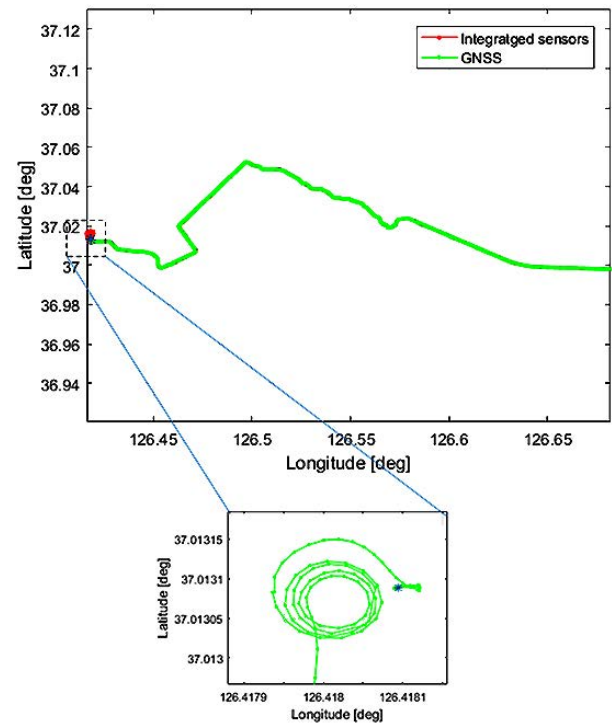


Fig. 9. Result of multi-source integrated positioning – Position.

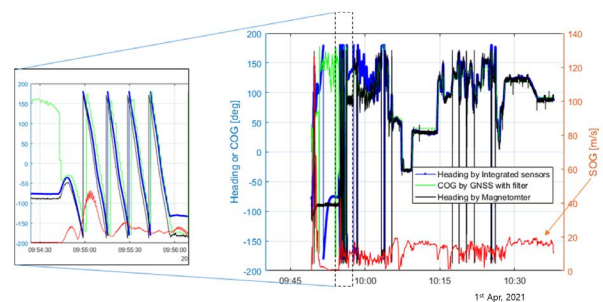


Fig. 10. Result of multi-source integrated positioning – Heading / COG / SOG.

(SOG), 선수 방향 및 보호 수준을 구할 수 있음을 확인하였다. 또한, 단일 주파수를 이용한 GNSS 측위 결과는 10 m 미만으로 나타나 해양항법 분야에서 요구되는 항만 진입로 및 인근 해역 항해 시 요구 정확도를 만족했다. 실험 중 안드로이드 API가 제공하는 GNSS 항법 데이터는 얻을 수 없었기에 NTRIP을 통해 IGS로부터 RTCM 3.0 형식의 항법 데이터를 받아 사용하였다.

본 연구의 결과는 스마트기기에 탑재된 전자 해도 상에 선박의 안전항법영역을 표현하고 항로표지나 AIS에 의한 해상 장애물과의 위험도를 식별하는 연구에 활용될 예정이다. 또한, 스마트기기 기반 eNAV 해상 내비게이션, 해로드 2.0 및 전자해도 기반 해양항법시스템에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

스마트기기 기반 해양항법 어플리케이션은 전문적인 항법 장치를 설치하기 어렵거나 설치하더라도 선박 조종실에 설치되어

어로나 기타 레저 활동 중 실시간으로 활용하기 어렵다는 한계를 극복하는데 도움이 될 것으로 전망한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “스마트기기 기반 해상교통 안전용 측위·항법 핵심기술 개발”에 의해 수행되었습니다 (PES4440).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Y. Kim, T.-H. Fang, and K. Seo; methodology, Y. Kim, and T.-H. Fang; software, Y. Kim, and T.-H. Fang; validation, Y. Kim, T.-H. Fang and K. Seo; formal analysis, Y. Kim; investigation, Y. Kim; data curation, Y. Kim, and T.-H. Fang; writing—original draft preparation, Y. Kim; writing—review and editing, T.-H. Fang and K. Seo; project administration, K. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Android developer guide, Raw GNSS Measurements [Internet], cited 2022a Aug 1, available from: <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>
- Android developer guide, Raw GNSS Measurements [Internet], cited 2022b Aug 1, available from: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview
- Campos-Vega, C. J., Watts, T. M., Martin, S. M., Chen, H., & Bevly, D. M. 2021, Navigation through the Processing of Android Data with a High-Order Kalman Filter, Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021), September 20-24, 2021, St. Louis, Missouri, pp.2957-2973. <https://doi.org/10.33012/2021.18042>
- Groves, P. D. 2013, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- GSA 2017, Using GNSS Raw Measurements on Android Devices, European Global Navigation Satellite Systems Agency. https://www.euspa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf
- GSA 2020, GNSS User Technology Report Issue 3, European Global Navigation Satellite Systems Agency. https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/uploads/technology_report_2020.pdf
- GSA 2022, EUSPA EO and GNSS Market Report 2022 Issue 1, European Global Navigation Satellite Systems Agency. https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/uploads/euspa_market_report_2022.pdf
- IMO 2002, Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS), IMO Resolution A.915 (22), International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf)
- IMO 2004, World-Wide Radionavigation System, IMO Resolution A.953 (23), International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.953\(23\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.953(23).pdf)
- Institute of Navigation, Smartphone Decimeter Challenge [Internet], cited 2022 Aug 1, available from: https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm?cssearch=44939_1
- KMST 2021, Marine Accident Statistics Report 2021, Korea Maritime Safety Tribunal. https://www.kmst.go.kr/boardFileDownload.do?file_idx=103064
- Li, G. & Geng, J. 2019, Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices, GPS Solution, 23:90. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0885-4>
- Robustelli, U., Paziewski, J., & Pugliano, G. 2021, Observation Quality Assessment and Performance of GNSS Standalone Positioning with Code Pseudoranges of Dual-Frequency Android Smartphones, Sensors, 21, 2125. <https://doi.org/10.3390/s21062125>
- Seo, K., Kim, Y., Jeon, T.-H., & Son, P.-W. 2021, Performance Analysis of Multi-GNSS Positioning Accuracy with Code Pseudorange of Dual-Frequency Android Smartphone in Maritime Environment, JKIIICE, 25, 1588-1595. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.11.1588>
- Szot, T., Specht, C., Specht, M., & Dabrowski, P. S. 2019, Comparative analysis of positioning accuracy of Samsung Galaxy smartphones in stationary measurements, PLoS ONE 14, e0215562. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215562>
- Zangenehnejad, F. & Gao, Y. 2021, GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives, Satellite Navigation, 2:24. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y>



Youngki Kim received his B.S. and M.S. degrees from Mokpo National Maritime University, Republic of Korea. He is a research engineer at Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). His research interests include PNT Integrity Technology and resilient PNT systems for safety navigation.



Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States. Since 2005, he has been with Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.



Kiyeol Seo is currently a principal researcher with the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received his Ph.D. degree in maritime information measurement engineering from the Mokpo National Maritime University, Republic of Korea, in 2003. He has been involved in the development of integrated R-Mode navigation system. His research interests include resilient PNT system and integrity monitoring, GNSS reflectometry (GNSS-R), and precise positioning technology for maritime applications.