

Tightly-Coupled GPS/INS/Ultrasonic-Speedometer/Barometer Integrated Positioning for GPS-Denied Environments

Bu-Sung Choi, Won-Jae Yoo, Lawoo Kim, Yu-Dam Lee, Hyung-Keun Lee[†]

Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

ABSTRACT

Accuracy of an integrated Global Positioning System (GPS) / Inertial Navigation System (INS) relies heavily on the visibility of GPS satellites. Especially, its accuracy is dramatically degraded in urban canyon due to signal obstructions due to large structures. In this paper, we propose a new integrated positioning system that effectively combines INS, GPS, ultrasonic sensor, and barometer in GPS-denied environments. In the proposed system, the ultrasonic sensor provides velocity information along the forward direction of moving vehicle. The barometer output provides height information compensated for the pressure variation due to fast vehicle movements. To evaluate the performance of the proposed system, an experiment was carried out by mounting the proposed system on a test car. By the experiment result, it was confirmed that the proposed system bears good potential to maintain positioning accuracy in harsh urban environments.

Keywords: GPS-denied environment, Kalman filter, positioning system, ultrasonic speedometer, altimeter

1. INTRODUCTION

최근 이동체의 위치 정보를 획득하기 위하여 Global Positioning System (GPS)과 Inertial Navigation System (INS)의 결합 시스템이 활발히 활용되고 있다. GPS/INS 시스템은 GPS의 가시성에 의존하므로 정확한 측위 정보를 획득하기 위해서는 GPS가시성이 안정적으로 확보되어야 한다. 반면, 근래에 들어 도심지, 지하도, 터널 등과 같은 인공적인 구조물이 증가함에 따라 GPS 성능이 저해되는 환경이 증가하고 있다. 이에 따라, 열악한 GPS 신호 환경에서 보다 정확한 측위 정보를 획득하기 위하여 다양한 보조센서 및 필터를 활용한 다중 센서 기반의 측위 알고리즘이 활발하게 연구되고 있으며 주로 활용되는 보조센서로는 속도 센서, 이미지 센서, 지자기 센서, Light Detection And Ranging (LiDAR) 센서, RAdio Detecting And Ranging (Radar)

센서 등이 있다 (Han et al. 2013). 또한, INS와 GPS, 그리고 보조 센서는 칼만 필터, 파티클 필터 등을 활용하여 결합될 수 있으며 필터를 활용하여 각 시스템이 지닌 불규칙적인 오차를 제거하고 두 시스템의 정보를 결합하여 최적의 추정치를 획득할 수 있다.

칼만필터를 기반으로 하는 GPS/INS 시스템은 결합 강도에 따라 약결합, 강결합, 초강결합 기법으로 구분할 수 있다 (Lee 2015). 강결합 기법에서는 위성과 GPS 수신기 사이의 의사거리 및 의사거리 변화율 등의 Raw data를 활용하기 때문에 GPS 가시성에 관한 조건이 요구되지 않는다. 따라서 GPS 가시성이 불충분한 상황에서도 강결합 기반의 GPS/INS 시스템을 활용하여 위치 정보를 추정할 수 있다. 최근에 강결합 기반의 측위 및 항법 필터를 설계하는 연구가 이루어지고 있다. 강결합 기반의 관성/영상 복합항법에 대한 연구에서는 영상 센서에서 측정된 초점면상의 픽셀 위치를 측정치로 활용한다 (Park 2018). 또한, 수중 환경에서 INS의 속도 오차를 보정하기 위하여 Doppler Velocity Log (DVL), Revolution per minute (RPM) 등을 활용한 강결합 시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Yoo et al. 2019).

본 논문에서는 GPS 위성의 가시위성 수가 일시적으로 충분하지 못한 환경에서 다중센서의 장점을 효과적으로 활용하는 강결합 확장 칼만필터 기반의 복합 측위시스템을 제안한다. 다중센서 중 초음파 센서를 속도계로 활용하기 위하여 초음파의 전파특성을 활용한 초음파 속도계를 자체적으로 설계하였다. 초음파 속도계는 서로 마주보는 초음파 송신 센서와 수신 센서 사이에서 전

Received Sep 08, 2020 Revised Oct 05, 2020 Accepted Oct 13, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: hyknlee@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0131 Fax: +82-02-3158-5769

Bu Sung Choi <https://orcid.org/0000-0003-2822-3786>

Won Jae Yoo <https://orcid.org/0000-0002-6683-2120>

Lawoo Kim <https://orcid.org/0000-0002-7924-5355>

Yu Dam Lee <https://orcid.org/0000-0003-2044-922X>

Hyung Keun Lee <https://orcid.org/0000-0001-5210-1557>

파되는 초음파의 전파속도 차이를 활용하여 시스템이 탑재된 이동체의 속도를 추정하는 원리를 기반으로 한다. 설계된 초음파 속도계는 저가의 소형 초음파 센서를 활용하므로 보편화하기 쉬운 장점이 있으며 조명 환경의 영향을 받지 않기 때문에 야간이나 구름이 많은 날씨에서도 속도 측정치를 생성할 수 있다. 레이저 광선이나 전파가 피사체에 반사되어 돌아오는 특성을 활용한 LiDAR, Radar와는 달리 송신부에서 수신부로 직접적인 전파 과정만으로 시스템이 탑재된 이동체의 속도 측정치를 생성할 수 있으므로 반사 지점에서의 오차를 고려하지 않아도 된다. 또한, 차량의 Odometer Reference Unit (ORU)와는 달리 주행하는 노면의 상태, 이동체 바퀴의 노후 상태 등의 요인으로 인한 오차를 고려하지 않아도 된다는 이점이 있다.

정확한 절대 고도를 획득하기 위하여 기압 고도 모델로부터 획득한 측정치에 대하여 기준 파라미터 보정, 고도 변환, 그리고 환경변수로 인한 오차 보정을 수행하였다. 획득한 보조 센서 측정치들과 관측가능한 GPS 위성으로부터 획득한 반송파 위상을 융합하여 이동체의 위치 증분을 계산하였다. 계산된 위치 증분을 활용하여 현재 위치를 추정하고 이를 활용하여 위성과 수신기 사이의 의사거리 및 도플러 편이를 예측하였다. 의사거리 및 도플러 편이 예측치는 확장 칼만필터의 측정치 갱신 단계에서 간접 측정치로 활용하였으며 그 과정에서 시간간 차분 기법과 위성간 차분 기법을 적용하여 시스템 복잡도를 감소시켰다 (You et al. 2005).

다중센서 기반의 복합 측위시스템의 성능을 검증하기 위하여 GPS 위성의 가시성이 충분한 환경에서 차량 동적 실험을 수행하였으며 이에는 특정 구간에 대해 인위적으로 GPS 가시성을 저해시켜 GPS 성능 저해 상황을 생성하였다. 생성된 GPS 성능 저해 상황에 대해 제안된 다중 센서 기반의 복합 측위시스템을 적용하여 위치 정보를 추정한 후 RTK GPS 소프트웨어 패키지 GNSS Algorithm for Accuracy & Safety (GAFAS)로부터 기준 위치 정보를 추출하여 제안된 시스템의 위치 정확도를 분석하였다 (Lee & Shim 2006).

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 초음파 속도계와 기압고도계의 원리와 보상 과정을 다루었고, 3장에서는 제안된 강결합 기반의 복합 측위시스템의 구성과 칼만필터 측정 모델을 설명하였다. 4장에서는 실험과 성능 분석을 통하여 제안된 복합 측위시스템의 유용성을 제시하였고, 마지막 5장에서는 결론을 맺었다.

2. 초음파 속도계 및 기압 고도계

2.1 초음파 속도계 설계

초음파는 가청 주파수의 최대 한계인 20 kHz를 넘어서는 주파수에 의하여 전달되는 주기적인 음압 (sound pressure)이다. 초음파는 전파되는 과정에서 대기의 온도, 기류, 습도, 기압, 가스, 먼지 등의 다양한 요인으로부터 영향을 받는다. 이 중, 바람 또는 기류로 의해서 음파는 굴절되거나 전파속도가 변화한다.

바람이 존재하는 대기 환경에서 짧은 시간 동안의 대기의 온

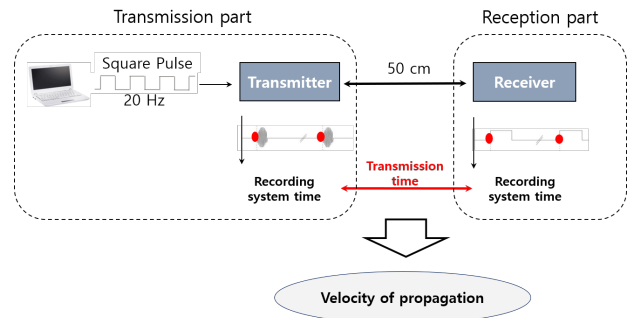


Fig. 1. System process of the proposed ultrasonic-speedometer.

도, 습도 등의 조건이 일정하다고 가정하였을 때, 초음파는 대기의 바람에 의해 전파속도가 변한다. 초음파의 진행 방향을 기준으로 바람의 운동 성분은 식 (1)과 같이 r, θ, z 를 축으로 하는 극좌표계 (polar coordinates)로 표현할 수 있다.

$$w(r, \theta, z) = (w_r, w_\theta, w_z) \quad (1)$$

본 연구에서는 초음파가 w_z 성분과 평행한 방향으로 방사되고 전파되는 것으로 가정하였다. 초음파가 전파되는 과정에서 초음파의 전파 방향과 수직인 방향으로 진행하는 바람에 의해서는 전파속도가 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다 (Salomons 2001). 따라서 바람의 영향을 받는 초음파의 전파속도를 식 (2)와 같이 근사화하여 표현할 수 있다.

$$u_{eff} = u + \|\vec{w}\| \approx u + \|\vec{w}_z\| \quad (2)$$

여기서, u 는 바람이 없는 상황에서의 초음파의 전파속도이며 w_z 는 초음파의 전파방향과 평행하여 초음파의 전파속도에 영향을 미치는 풍속 성분이다. 바람의 영향을 받은 초음파의 전파속도 u_{eff} 는 바람 영향을 받지 않은 초음파 전파속도 u 와 바람 벡터의 크기 $\|\vec{w}\|$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 또한, u_{eff} 를 식 (2)의 우변과 같이 초음파의 속도와 초음파의 진행 방향에 투영된 풍속 성분 w_z 크기의 합으로 근사화 할 수 있다. 초음파의 진행 방향과 바람의 방향이 같으면 초음파의 전파속도는 증가하고 초음파의 진행 방향과 바람의 방향이 반대이면 초음파의 속도는 상대적으로 감소하는 특성을 지닌다 (Oliveira 2012). 이러한 특성과 센서의 측정 잡음 그리고 초음파 속도계의 환산계수 (Scale factor)를 활용하면 이동체 전진 방향의 속도를 추정할 수 있다 (Choi 2020).

초음파의 전파속도를 획득하기 위하여 초음파 송신 및 수신 센서를 활용하였다. 송신 센서에서는 별도로 생성된 20 Hz의 구형파 (square pulse)가 송신 센서에 가해질 때마다 가해진 신호가 증폭되고 증폭된 신호의 상승 모서리 (rising edge)에서 송신 센서가 구동하여 초음파를 방사하게 된다. 방사된 초음파 신호를 감지하는 수신 센서에 의해 초음파는 다시 구형파로 변환된다. 송신 및 수신 센서에서의 상승 모서리를 비교하면 초음파 전달에 소요된 시간차를 얻을 수 있다. 송신 센서와 수신 센서의 거리는 일정하게 유지하므로 송신 및 수신 센서의 이격 거리를 시간차로 나누어 초음파의 전파속도를 계산한다. Fig. 1은 지금까지 설명된

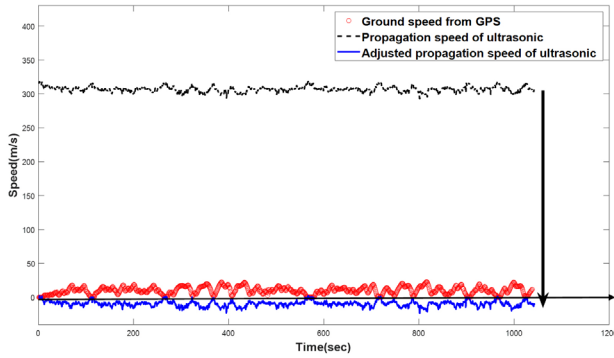


Fig. 2. Relationship between the propagation speed of ultrasonic waves and ground speed from GPS.

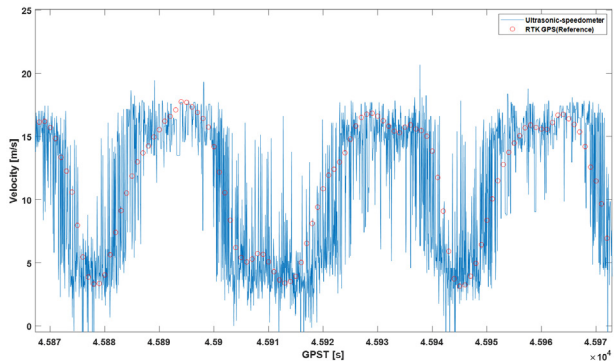


Fig. 3. Velocity comparison of the proposed ultrasonic-speedometer and RTK GPS.

내용을 그림으로 나타낸 것이다.

제안된 초음파 속도계의 활용 가능성을 분석하기 위해 GPS 수신기로부터 획득한 national marine electronics association (NMEA) 0183 포맷의 GPRMC 타입에 속한 대지 속력(Ground speed) 데이터를 기준 데이터로 활용하였다. 또한, Real-Time Kinematic (RTK) GPS로부터 획득한 속도 데이터를 기준 데이터로 활용하여 성능 분석을 수행하였다 (Choi 2020). Fig. 2는 초음파의 전파속도와 GPS로부터 획득한 대지 속력 사이의 관계를 확인하는 실험의 결과이다. 파선은 샘플링 주기가 20 Hz인 초음파 속도계의 측정 데이터에 대해 이동평균필터를 적용시킨 결과이다. 원형의 마커는 GPS로부터 획득한 대지 속력 데이터이며 실선은 초음파 속도계 측정치의 초기값을 기준으로 파선을 재배치한 결과이다. 재배치된 초음파의 전파속도는 GPS로부터 획득한 대지 속력과 가로축을 기준으로 대칭성을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 이동체의 속도가 증가하면 초음파의 전파속도는 감소하는 경향을 가짐을 확인하였다.

Fig. 3에서는 GPS 단일수신기와 기준국을 활용한 RTK GPS의 속도 정보를 기준으로 초음파 속도계의 성능을 분석한 결과이다. 초음파 속도계로부터 획득한 Raw Data와 관련하여 초음파 속도계의 환산계수를 추정하지 않고 일정한 계수를 곱하여 GPS 속도 정보와 비교한 그래프이다. 비교해본 결과, Fig. 3과 같이 초음파 속도계로부터 획득한 이동체의 속도 정보는 참값으로 가정된 RTK GPS의 속도 정보와 동일한 경향성을 나타냄을 확인하였다.

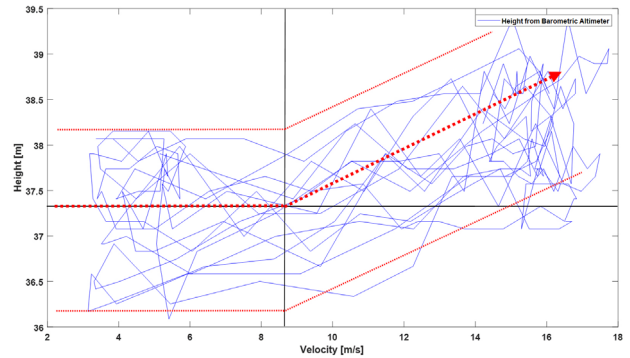


Fig. 4. Variation of height caused by environmental variable.

또한, 비정상적 데이터 (Spike)를 일부 제거하고 오차 분석을 수행한 결과, 최대 3 m/s의 오차 범위를 가짐을 확인하였다.

2.2 기압 고도계 활용 및 보정

기압 고도 모델에는 실시간으로 변화하는 기준 기압과 온도에 대한 파라미터가 존재한다. 정확도 높은 기압 고도를 획득하기 위해 측정 시점 및 장소에 대한 정확한 해면 파라미터가 요구된다. 따라서 자동기상관측장비 (Automatic Weather System, AWS)에서 산출되는 기상관측 데이터를 활용하여 기압 고도의 정확도를 확보하였다 (Kim 2017). 식 (3)은 일반적인 기압 고도 모델을 나타낸다.

$$H = \frac{273.15 + T_0}{\Gamma} \times \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\Gamma \times R}{g}} \right\} = \frac{273.15 + T_0}{0.0065} \times \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right\} \quad (3)$$

기압고도 센서는 주변의 압력 또는 기후 변화로부터 직접적인 영향을 받는다 (Jeong et al. 2018). 특히, 센서 주변에 대기압 이외의 압력 요소가 없어야 정확한 기압 및 고도 정보를 획득할 수 있다. 반면, 차량, 소형/무인 항공기 등의 이동체는 운동에 의하여 주변의 공기가 상대적으로 빠르게 이동한다. 이로 인해 이동체에 탑재된 기압 고도 센서의 다이어프램 (Diaphragm)에서 압력이 일시적으로 낮아지면서 기압 고도가 실제보다 높은 값으로 산출될 수 있다. 즉, 빠른 속도로 운동하는 이동체 주변의 유체로 인한 센서의 압력 변화가 기압 고도 측정에서의 환경변수로 영향을 미치게 된다.

이동체의 빠른 운동으로 인해 발생하는 환경변수를 제거하기 위하여 이동체의 속도에 따른 고도 측정치의 변화를 실험적으로 확인하고 보상 데이터를 구축하여 고도 보정을 수행하였다. Fig. 4는 일정한 고도로 측정된 환경에서 이동체의 속도에 따른 고도의 경향을 나타낸 것이다. 기압 고도 센서는 차량 내부에 탑재되었으며 차량 내부와 외부 간의 기체가 이동할 수 있는 통로의 면적은 일정한 것으로 가정한다. 실험 결과, 이동체의 속도가 8 m/s 이상으로 증가하면 이동체 내부와 외부의 기체 속도 차이로 인해 압력의 차이가 발생하기 시작하였으며 이동체의 속도에 비례하여 고도가 높게 산출되었다. 따라서 고도 오차를 보정하기 위

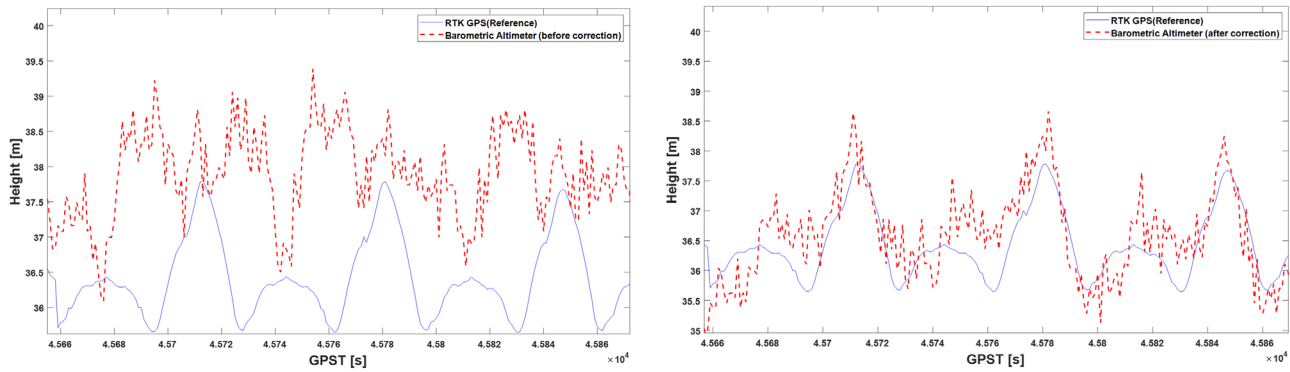


Fig. 5. Height before and after correcting environmental variables.

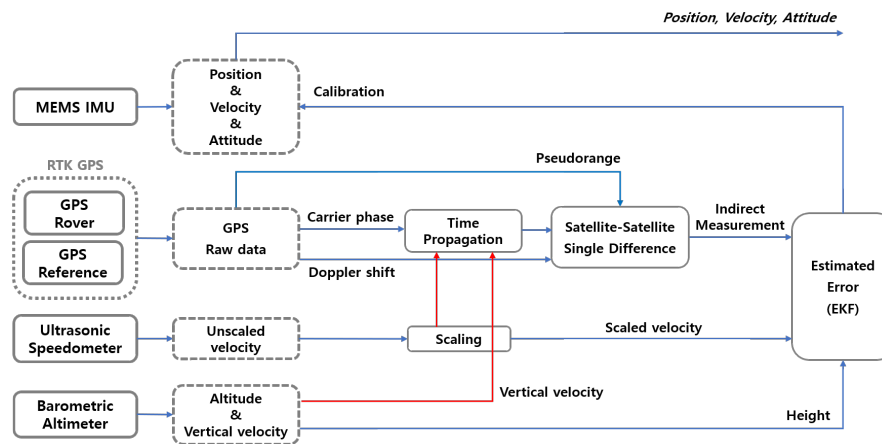


Fig. 6. Flowchart of GPS/INS/ultrasonic-speedometer/Barometer.

해 이동체의 속도가 8 m/s 이상으로 증가하는 구간에서는 속도가 증가함에 따라 고도가 선형적으로 증가하여 산출되는 것으로 가정하였으며 측정 고도에 이동체의 속도 증가에 따른 고도 증분을 감산하여 오차를 보정하였다. Fig. 5는 환경 변수를 제거하기 전과 후의 고도 측정치이다.

3. 강결합 기반의 GPS/INS/ULTRASONIC-SENSOR/BAROMETER

강결합 기반의 복합 측위시스템은 GPS 가시성이 불충분한 상황에서도 측위 정보를 추정할 수 있다. 측위 정확도를 확보하기 위하여 기존의 강결합 기반의 GPS/INS 복합 측위시스템에 초음파 속도계와 기압 고도계를 결합하였다. GPS 성능 저해 상황을 모사하기 위하여 GPS 가시위성의 수가 2개인 것으로 가정하여 2개의 GPS 위성에 대한 측정치를 활용하였다. Fig. 6은 GPS/INS/보조센서 복합 측위 알고리즘의 상세 흐름도이다.

제안된 강결합 복합 측위시스템에서 Micro Electro Mechanical System (MEMS) 기반의 Inertial Measurement Unit (IMU), 초음파 속도계, 그리고 기압 고도계로부터 획득된 측정치는 모두 GPS 시각을 기준으로 동기화된다. GPS로부터 획득한 반송파 위상, 초음파 속도계로부터 획득한 진행 방향의 속도, 그리

고 기압 고도계로부터 획득한 수직 속도를 활용하여 시전달 과정을 수행하여 현재 시점의 위치를 예측한다. 예측된 위치는 위성 과 수신기 간의 의사거리를 계산하는 단계에서 활용된다. 계산된 의사거리와 의사거리 측정치에 대하여 각각 위성간 차분기법을 적용함으로써 수신기 시계오차 항을 제거하여 시스템 차수를 감소시킨다. 마지막으로, 차분된 측정치, 차분된 도플러 편이, 환산 계수가 적용된 속도, 그리고 고도 측정치를 활용하여 강결합 기반의 확장칼만필터 측정치 갱신 단계를 수행한다.

3.1 상태변수 및 의사거리 예측

제안된 복합측위시스템의 확장 칼만필터는 상태변수 및 공분산 예측을 위하여 식 (4~5)와 같이 16차 상태 벡터와 상태 방정식을 활용한다.

$$X = [\delta P \quad \delta V \quad \Phi \quad \nabla \quad \varepsilon \quad \delta s]^T \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= F_{k \rightarrow k+1}(X_k) \\ P_{k+1} &= F_{k \rightarrow k+1} P_k F_{k \rightarrow k+1}^T + Q_k \\ F_{k \rightarrow k+1} &= \begin{bmatrix} F_{INS} & 0_{15 \times 1} \\ 0_{1 \times 15} & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)에서 상태 벡터는 위도, 경도, 고도 오차 δP , 3축 속도 오차 δV , 3축 자세 오차 Φ , 3축 가속도계 오차 ∇ , 3축 자이로 오차 ε , 초음파 속도계의 환산계수 오차 δs 로 각각 구성된다. 식 (5)의 상태방정식에서 $F_{k \rightarrow k+1}$ 는 상태변수로 지정된 오차 변수들에 대해 시간에 따른 변화를 정의하는 시스템 행렬이다. F_{INS} 는 SDINS의 시스템 행렬이며 Q_k 는 평균이 영벡터(Zero vector)인 공정잡음(Process noise), P_k 는 상태 공분산 행렬이다 (Lee et al. 1998, Choi 2020).

위성과 수신기 간의 의사거리를 예측하기 위해 관측가능한 위성으로부터 획득한 측정치와 초음파 속도계 및 기압 고도계로부터 획득한 측정치를 활용한다. 의사거리 예측은 위치 증분 예측과 의사거리 예측으로 구성된다. 위치 증분 예측에서는 반송파 위상과 센서 측정치들을 융합함으로써 위치 증분과 수신기 시계 오차의 증분을 계산하게 된다. 이를 위해, 3축 위치 증분과 수신기 시계오차의 증분을 예측 과정에서의 상태벡터로 정한다. 식 (6)은 수신기의 위치 증분과 시계오차의 증분 예측에서의 상태방정식과 상태벡터를 나타낸다.

$$\omega_k = h_k \Delta X_k + w_{i,k}$$

$$\Delta X_k = \begin{bmatrix} (\Delta x_{u,k})^T & \Delta b_{u,k} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

여기서, ω_k 는 관측가능한 GPS 위성으로부터 획득한 측정치와 보조 센서들의 측정치를 융합하여 생성한 측정치이다. 또한 $\Delta x_{u,k}$ 는 수신기 위치의 증분, $\Delta b_{u,k}$ 는 수신기 시계오차의 증분이다.

측정치들을 융합하는 과정에서는 GPS 수신기로부터 획득한 의사거리와 반송파 위상을 활용한다. 반송파 위상 측정치에는 미지정수가 포함되어 있다. 미지정수를 결정하지 않고 반송파 위상을 활용하기 위하여 반송파 위상에 대해 시각간 차분을 수행한다. 식 (7)은 시각간 차분 기법을 적용하여 미지정수를 제거한 결과이다. 식 (8)에서는 k 시점에서의 측정치는 $(k-1)$ 시점에서의 측정치와 k 시점에서 $(k-1)$ 시점에서의 증분의 합으로 정의하며 새로운 측정치 $\omega_{i,k}$ 를 생성한다 (Lee & Rizos 2008).

$$\tilde{\phi}_{i,k} - \tilde{\phi}_{i,k-1} = -\left(e_{i,k-1} + \Delta e_{i,k}\right)^T \Delta x_{u,k} + \Delta e_{i,k}^T (x_{i,k} - x_{u,k-1}) + e_{i,k-1}^T \Delta x_{i,k} + \Delta b_{u,k} + \Delta n_{i,k} \quad (7)$$

$$\omega_{i,k} = e_{i,k-1}^T \Delta x_{i,k} + \Delta e_{i,k}^T (x_{i,k} - \hat{x}_{u,k-1}) - (\tilde{\phi}_{i,k} - \tilde{\phi}_{i,k-1})$$

$$= h_{i,k} \begin{bmatrix} (\Delta x_{u,k})^T & \Delta b_{u,k} \end{bmatrix} + w_{i,k} \quad (8)$$

위치 증분을 추정하는 과정에서 상태변수는 위치 증분, 수신기 시계오차의 증분이 된다. 따라서, 가시위성이 2개인 상황에서는 두 변수의 추정을 시도할 경우에는 측정치의 개수가 상태변수의 개수보다 작게 되어 상태변수 관측행렬에 가관측성에 문제가 발생한다. 이와 같은 측정치 결여 상황에서 초음파 속도계와 기압 고도계를 활용하게 되면 가관측성 문제를 해결할 수 있다. 초음파 속도계의 측정치는 이동체의 전진 방향의 속도이고, 전진 방향의 속도는 전진 방향으로의 위치 증분에 해당된다. 또한, 고도 변화량은 수직 방향으로의 위치 증분을 측정할 수 있도록 해

준다. 식 (9)는 초음파 속도계의 불규칙적인 잡음을 고려한 측정식과 기압 고도계를 활용하여 모델링 한 간접측정치를 나타낸다 (Lim 2017).

$$\omega_{Ultrasonic,k} = (1 + \hat{s}_{k-1}) \tilde{a}_U + w_U$$

$$\omega_{Baro,k} = \Delta Alt_k = Alt_k - Alt_{k-1} + w_B \quad (9)$$

식 (10)은 이전 시점에서 추정된 위치와 위치 증분, 그리고 현재 위치 간의 관계를 나타낸다.

$$\bar{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta \bar{X}_k \quad (10)$$

여기서, $\hat{X}_{k-1}$ 는 확장 칼만필터를 활용하여 추정한 이전 시점의 위치 정보이다. 또한, 상태변수 $\Delta \bar{X}_k$ 는 위치 증분과 수신기 시계 바이어스 증분의 예측치를 각각 나타낸다. 식 (11)은 $\Delta \bar{X}_k$ 를 추정하기 위한 방정식을 나타낸다.

$$\Delta \bar{X}_k = U_k \Omega_k$$

$$U_k = \left(\bar{H}_k^T Q_k^{-1} \bar{H}_k \right)^{-1} \bar{H}_k^T Q_k^{-1}$$

$$\Omega_k = \begin{bmatrix} \omega_{i,k} \\ \omega_{j,k} \\ \omega_{Ultrasonic,k} \\ \omega_{Baro,k} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 측정모델

식 (12)는 의사거리 측정치를 나타내며 식 (13)은 관측가능한 두 위성인 i, j 번째 위성에 대해 의사거리 측정치를 활용하여 생성한 간접 측정치이다.

$$\tilde{\rho}_{i,k} = e_{i,k}^T (x_{i,k} - \bar{x}_{u,k}) + \bar{b}_{u,k} \quad (12)$$

$$\tilde{z}_{pr,k}^i = \tilde{\rho}_{i,k} - e_{i,k}^T (x_{i,k} - \bar{x}_{u,k}) - \bar{b}_{u,k}$$

$$\tilde{z}_{pr,k}^j = \tilde{\rho}_{j,k} - e_{j,k}^T (x_{j,k} - \bar{x}_{u,k}) - \bar{b}_{u,k} \quad (13)$$

$\bar{b}_{u,k}$ 의 오차를 추정하는 과정에서 시스템 차수가 증가한다. 이때 두 위성에 대한 측정치에 위성간 차분 기법을 적용하면 공통된 수신기의 시계 바이어스 항을 제거할 수 있으며 시스템 차수의 증가를 방지할 수 있다. 식 (14)는 위성간 차분 기법을 적용하여 생성한 측정치를 나타낸다.

$$\tilde{z}_{pr,k}^{SD} = \tilde{z}_{pr,k}^i - \tilde{z}_{pr,k}^j$$

$$= \tilde{\rho}_{i,k} - \tilde{\rho}_{j,k} + e_{j,k}^T (x_{j,k} - \bar{x}_{u,k}) - e_{i,k}^T (x_{i,k} - \bar{x}_{u,k}) \quad (14)$$

도플러 편이 측정치에 대해서 의사거리 측정치와 동일하게 위성간 차분 기법을 적용한다. 식 (15)는 도플러 편이 측정치를 활용하여 생성한 간접측정치를 나타낸다.



Fig. 7. Experiment area and artificially generated GPS-denied environment.

$$\begin{aligned} z_{dpl,k}^{SD} &= \tilde{z}_{dpl,k}^{SD} - \tilde{z}_{dpl,k}^{SD} \\ &= \tilde{z}_{dpl,k}^{SD} + \left((v_{i,k}^s - C_n^e v_{u,k-1})^T e_{i,k} - (v_{j,k}^s - C_n^e v_{u,k-1})^T e_{j,k} \right) \quad (15) \end{aligned}$$

마지막으로, 초음파 속도계와 기압 고도계로부터 획득한 측정치를 활용하여 INS로부터 추정된 속도와 고도를 보정한다. 식 (16)은 확장칼만필터 갱신 단계에서 활용되는 모든 측정치를 나타낸다.

$$\begin{aligned} Z &= \begin{bmatrix} z_{pr,k}^{SD} \\ z_{dpl,k}^{SD} \\ z_{ultrasonic,k} \\ z_{baro,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_k^{SD} - \tilde{\rho}_k^{SD} \\ \tilde{D}_k^{SD} - \tilde{D}_k^{SD} \\ \tilde{r}_{INS} - \tilde{r}_{Ultra} \\ \tilde{h}_{INS} - \tilde{h}_{Baro} \end{bmatrix} = H X_k + v \\ H &= \begin{bmatrix} h_{pr,k}^{SD} \\ h_{dpl,k}^{SD} \\ h_{ultrasonic,k} \\ h_{baro,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_{cef}^{th}(e_{i,k} - e_{j,k})]^T & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & [C_n^e(e_{i,k} - e_{j,k})]^T & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & -\langle \tilde{r}_U \rangle & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \\ v &= \begin{bmatrix} r_{pr,k}^{SD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{dpl,k}^{SD} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{ultrasonic} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{ultrasonic} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{ultrasonic} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{baro} \end{bmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

4. 실험 및 성능 분석

제한된 다중센서 기반의 복합 측위시스템의 성능을 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 차량에 실험 장비를 탑재하여 한국항공대학교 활주로 인근 도로에서 수행되었다. 실험 환경은 4개 이상의 GPS 위성이 지속적으로 관측되는 개활지(Open sky)에 해당된다. 실험을 위한 차량의 주행에는 총 15분이 소요되었으며, 실험 기간 동안의 차량 주행 속도는 0 ~ 80 km/h이다. 실험에는 MPU-6050 IMU 모듈, Ublox AEK-4T와 ProPak6 GPS 수신기 모듈, HG-M40TC/RC 초음파 센서 모듈, BMP-180 기압 고도계

모듈, 그리고 Beaglebone Black 임베디드 보드 등이 활용되었다 (Ublox 2006, Hagisonic 2010, Bosch Sensortec 2015, InvenSense 2013, NovAtel 2015). ProPak6 수신기를 제외한 모든 디바이스는 저가형 모듈이다. AEK-4T 수신기는 시각 동기를 위해 활용되었고, ProPak6 수신기는 GPS의 측정치 및 기준데이터로 활용되었다. 기준 데이터를 획득하기 위하여 활용한 수신기는 이중 주파수를 획득할 수 있는 수신기이다.

시스템 성능 분석을 위해 개활지 실험으로부터 측정치를 획득한 후, 인위적으로 10초 동안 GPS 가시위성의 수가 2개인 GPS 성능 저해 상황을 생성하였다. Fig. 7에서 실선은 실험 구간을 나타낸 것이며 점선은 인위적으로 생성된 GPS 성능 저해 구간을 나타낸 것이다. Fig. 8에서는 차량이 고층 빌딩 숲에서 주행하는 환경을 GPS 성능 저해 상황으로 가정하였으며 해당 지역을 음영으로 나타내었다. 또한, GPS 가시위성의 수 관점에서의 시스템 성능 분석을 위하여 다중 경로 오차는 고려하지 않았으며 반송파 사이클 슬립을 유발함으로써 별도 오차의 원인이 될 수 있는 낮은 양각을 가진 2개의 GPS 위성을 제거하였다 (Kim 2016). 선택된 GPS 위성의 양각은 78°, 71°이다.

시스템 성능 분석에서는 RTK GPS로부터 획득된 측위 정보를 기준으로 강결합 기반의 GPS/INS 시스템과 설계된 강결합 기반의 GPS/INS/초음파 속도계/기압 고도계 복합 측위시스템의 정확도를 비교하였다. 이때 기존의 강결합 기반 GPS/INS 시스템은 확장칼만필터의 측정치로 GPS 수신기로부터 획득한 의사거리와 의사거리 변화율을 활용하였으며 시스템 오차 모델은 GPS 수신기의 시계오차를 포함한 SDINS 오차 상태변수로 구성된다 (Park 2001).

Fig. 9는 GPS 저해 상황이 인위적으로 지속되어 위치 오차가 가장 크게 나타나는 10초 동안의 구간에서 수평 위치 추정치를 비교한 것이다. GPS 성능 저해 상황이 10초간 지속되어 위치 정확도가 가장 낮은 시점에서의 수평위치 최대오차는 RTK GPS 기준으로 기존의 강결합 기반GPS/INS 시스템의 경우 5.65 m이며 제안된 다중센서 기반의 시스템의 경우 1.25 m로 확인되었다. Table 1은 10초 동안 GPS 성능 저해가 지속되는 상황에서 계산한 속도 및 위치 Root Mean Square Error (RMSE)를 나타낸 것이다. 기존의 GPS/INS 복합 측위시스템을 활용하여 계산한 수평위치 RMSE는 3.6 m로 계산되었다. 반면, 제안된 다중센서 기반의 복합 측위시스템을 활용한 경우 수평위치 RMSE가 1.12 m로 계산되었다. 따라서, 제안된 복합 측위시스템이 기존의 강결합 기반 GPS/INS에 비하여 최대오차와 RMSE 관점에서 수평오차가 모두 크게 향상됨을 알 수 있다.

수직오차의 경우에는 고도계의 추가적인 활용으로 인하여 가시 위성 조건이 열악한 10초 구간에 걸쳐서 기존의 강결합 기반 GPS/INS 시스템의 RMSE가 1.17 m이며 제안된 복합 측위시스템의 RMSE가 0.51 m로 확인되었다. 즉, RMSE 관점에서 60% 이상의 정확도 향상을 가져오는 것으로 확인되었다.

Odometer의 속도 측정치를 활용하여 GPS/INS 시스템의 오차를 보정하는 연구에서는 특정 시간 동안 임의로 가시위성의 수를 3개 이하로 제한하여 성능 분석한 사례가 있다 (Park 2001). 본 논문에서는 10초 정도의 단기간에서 가시위성의 수가 2개인 열악한 상황이 지속되더라도 자체적으로 설계한 초음파 속도계와 기압

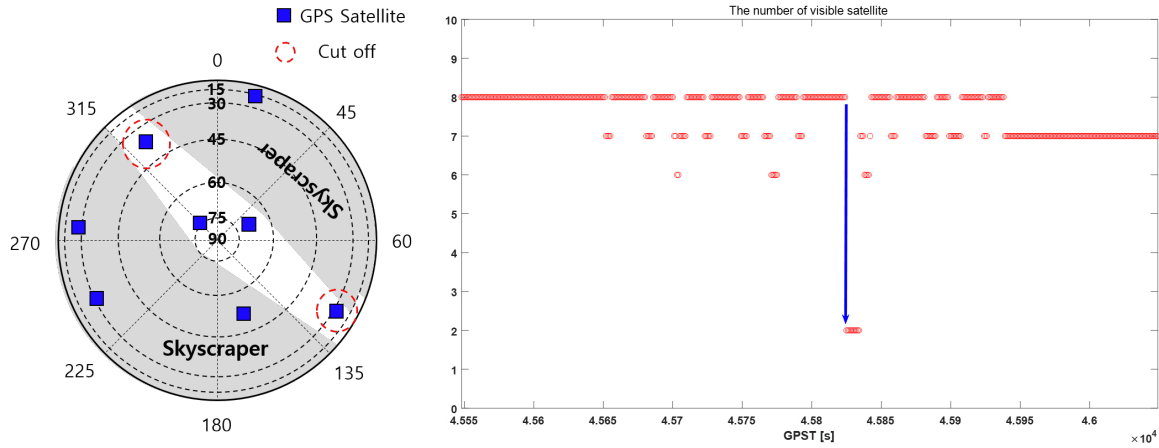


Fig. 8. Adjusted visibility of GPS satellites.

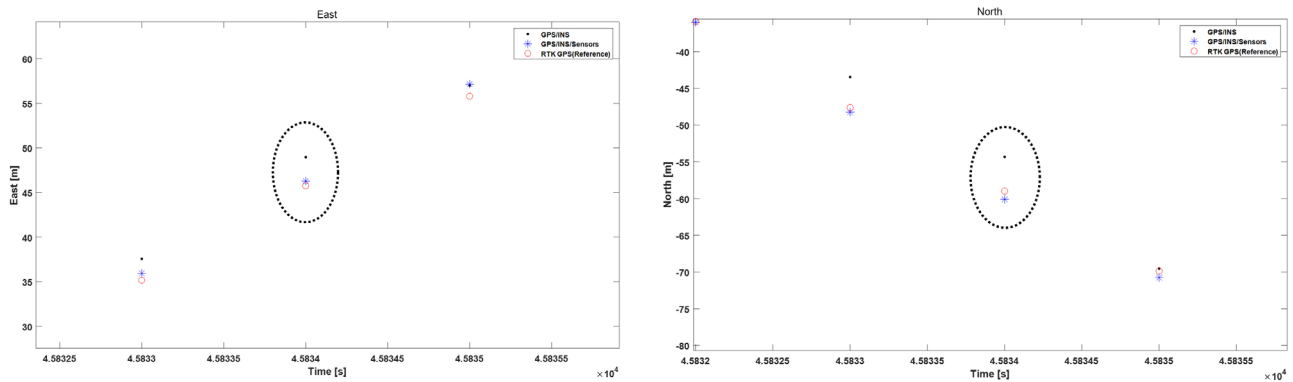


Fig. 9. Comparison of position at maximum error point in GPS-denied environment.

Table 1. Accuracy comparison of the conventional and proposed system in 10 seconds GPS-denied environment.

	Tightly-coupled system	
	GPS/INS (Conventional)	GPS/INS/Assistant-sensors (Proposed)
Horizontal velocity [m/s]	0.24	0.21
Vertical velocity [m/s]	0.23	0.21
Horizontal position [m]	3.6	1.12
Height [m]	1.17	0.51

고도계를 활용하여 GPS/INS 시스템의 수평 및 수직 정확도의 열화를 효과적으로 방지할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 GPS 가시성이 저해되는 환경에서 위치 정확도를 확보하기 위하여 GPS/INS 시스템과 설계된 초음파 속도계, 그리고 기압 고도계를 결합한 복합 측위시스템을 제안하였다. 효율적인 복합 측위를 위하여 초음파 센서를 속도계로 활용하기 위하여 초음파의 전파특성과 풍속을 고려한 초음파 속도 알고리즘을 설계하였다. 또한, 기압 고도계에 대한 기준 파라미터 보정, 고도 변환, 그리고 환경변수를 고려한 체계적인 오차보상 과정을 설계하였다. 다중센서와 GPS의 효율적인 결합을 위하여 차분된 의사

거리 및 도플러 편이에 대한 측정식 그리고 센서들로부터 획득한 측정식을 활용하여 확장칼만필터를 설계하였다.

차량 동적 실험을 통해 GPS 가시위성의 수가 인위적으로 2개로 제한된 상황에서 다중센서를 활용함으로써 측위 정확도 열화를 제한할 수 있음을 확인하였다. 제한된 강결합 기반의 복합 측위시스템의 경우 10초 동안 GPS 성능 저해 상황에서 기존의 강결합 기반 GPS/INS 시스템 대비 수평위치 정확도가 약 70% 향상되었고, 고도 정확도가 약 60% 향상됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the NRF (National Research Foundation) of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF2016R1D1A1B01009881).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

B. S. Choi; methodology, B. S. Choi, L. Kim and Y. D. Lee; software, B. S. Choi and Y. D. Lee; validation, B. S. Choi, L.

Kim, Y. D. Lee, W. J. Yoo; experiment, W. J. Yoo; resources, B. S. Choi; writing—original draft preparation, H. K. Lee; funding acquisition, supervision, project administration, writing—review and editing.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bosch Sensortec, BMP180 Data sheet [Internet], cited 2015 May 7, available from: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000.pdf
- Choi, B. S. 2020, Design of Integrated Navigation System Based on Multiple Sensors for GPS-Degraded Environments, M.S. Dissertation, Korea Aerospace University.
- Hagisonic, Ultrasonic Sensor Module for a Robot Datasheet [Internet], cited 2010 Dec 14, available from: <http://www.hagisonic.com>
- Han, J., Yoon, S., Lee, B., Lee, Y., & Sung, S. 2013, Research of magnetometer correction algorithm and verification using test data for INS/GPS/Magnetometer integrated navigation, in the Fall Conference of The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences, Jeju, Nov 2013, pp.1339-1344
- InvenSense, MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 [Internet], cited 2013 Aug 19, available from: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- Jeong, H., Yang, S., Kim, S., & Suk, J. 2018, A barometric altitude sensor and Laser Range finder fusion by using Kalman filter and comparison with Pixhawk measurement, in the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2018 Spring Conference, Goseong, April 2018, pp.210-212.
- Kim, L. W. 2017, Integrated GPS/BeiDou/Altimeter Based on Hatch Filter, M.S. dissertation, Korea Aerospace University.
- Kim, Y. S. 2016, A Study on Cycle Slip Detection of Single Frequency GNSS Receiver using Low Cost INS, Ph. D. dissertation, Seoul National University.
- Lee, H. & Shim, J. 2006, Performance Evaluation of GAFAS Software Package for Real-Time Kinematic Differential GPS/GNSS, in the Korean Navigation Institute Workshop, Goyang, Oct 2006, pp.273-278
- Lee, H. K., Lee, J. G., Roh, Y. K., & Park, C. G. 1998, Modeling quaternion errors in SDINS: computer frame approach, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34, 289-300. <https://doi.org/10.1109/7.640286>
- Lee, H. K. & Rizos, C. 2008, Position-Domain Hatch Filter for Kinematic Differential GPS/GNSS, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 44, 30-40. <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4516987>
- Lee, J. Y. 2015, Relative INS/GPS Integrated Navigation System based on Adaptive Filtering, Ph. D. dissertation, Korea Aerospace University.
- Lim, J. H. 2017, Design of GNSS/MEMS-IMU/OBD- II / Altimeter Integrated Navigation System for GNSS Denied, Ph. D. dissertation, Korea Aerospace University.
- NovAtel, ProPak6 Product Sheet [Internet], cited 2015 Nov 30, available from: <https://novatel.com/support/previous-generation-products-drop-down/previous-generation-products/propak6-receiver>
- Oliveira, A. F. G. P. 2012, The effect of wind and turbulence on sound propagation in the atmosphere, M.S. dissertation, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.
- Park, C. G. 2018, High precision/High reliability Integrated Navigation of the Lunar Lander: National Digital Science Library, Space Core Technology Development Project Final Report, 2013M1A3A3A02042468
- Park, Y. B. 2001, Design of Integrated INS/GPS/Odometer Navigation System and Its Performance Analysis, M.S. dissertation, Seoul National University.
- Salomons, E. M. 2001, Computational Atmospheric Acoustics (Amsterdam: Kluwer Academic Publishers)
- Ublox, AEK-4P, AEK-4H, AEK-4T ANTARIS 4 Evaluation Kits Automotive, Mobile Terminal and Infrastructure Applications [Internet], cited 2006 Aug 5, available from: <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/library/Datasheet-035/DSA007928.pdf>
- You, H., Lee, E., Lee, Y., Jee, G., Nam, G., et al. 2005, Time Difference Characteristics of GPS Carrier Phase, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 33, 66-72. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2005.33.9.066>
- Yoo, T.-S., Kim, M.-H., Yoon, S.-I., & Kim, D.-J. 2019, Design of Tightly Coupled INS/DVL/RPM Integrated Navigation System, Journal of Ocean Engineering and Technology, 33, 470-478. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.085>



Bu Sung Choi received the B.S and M.S degree in Electronics and Information Engineering from Korea Aerospace University, Republic of Korea, in 2018 and 2020 respectively. He is currently at Hyundai AutoEver as a R&D Center Engineer. His research interests include Integrated Navigation system and Indoor Positioning system.



Won Jae Yoo received the B.S. and M.S. degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University in 2014 and 2016, respectively. He is Ph.D. candidate at Navigation and Information Systems Laboratory (NISL), Korea Aerospace University. His research interests include Assisted GNSS, software GNSS receiver, Software Defined Radio and its applications.



Lawoo Kim is a Ph.D. candidate in Electronics and Information Engineering at Korea Aerospace University, South Korea. He obtained his B.S. and M.S. degrees from the same university in 2015 and 2017, respectively. His research focuses on urban positioning with multi-GNSS, INS, barometric altimeter, and position-domain Hatch filter.



Yu-Dam Lee received the B.S. and M.S. degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, in 2016 and 2018, respectively. He is a doctoral course student at Navigation and Information Systems Laboratory (NISL), Korea Aerospace University. His research interests include GPS/INS/Vision hybrid system, mapping system and its applications.



Hyung Keun Lee is a professor of Electronics and Information Engineering at Korea Aerospace University, South Korea. He obtained his Ph.D. in Electrical Engineering and Computer Science from Seoul National University, South Korea, in 2002. He was a Post- doctoral Research Fellow in Satellite Navigation and Positioning (SNAP) group at the University of New South Wales (UNSW), Australia, from 2002 to 2003. He was at the Central Research Institute, Hyundai Space and Aircraft Corporation, South Korea, from 1994 to 1998. His research interests include positioning and navigation systems, sensor networks, and avionics systems.

