

극한 무인 로봇 차량을 위한 MEMS GPS/INS 항법 시스템

MEMS GPS/INS Navigation System for an Unmanned Ground Vehicle Operated in Severe Environment

김 성 철, 홍 진 석, 송 진 우*
(Sung Chul Kim, Jin Seok Hong, and Jin Woo Song)

Abstract : An unmanned ground vehicle can perform its mission automatically without human control in unknown environment. To move up to a destination in various surrounding situation, navigational information is indispensable. In order to be adopted for an unmanned vehicle, the navigation box is small, light weight and low power consumption. This paper suggests navigation system using a low grade MEMS IMU for supplying position, velocity, and attitude of an unmanned ground vehicle. This system consists of low cost and light weight MEMS sensors and a GPS receiver to meet unmanned vehicle requirements. The sensors are basically integrated by loosely coupled method using Kalman filter and internal algorithms are divided into initial alignment, sensor error compensation, and complex navigation algorithm. The performance of the designed navigation system has been analyzed by real time field test and compared to commercial tactical grade GPS/INS system.

Keywords : GPS/INS, GPS, MEMS, SDINS, IMU, navigation

I 서론

극한 무인로봇은 사람의 직접적인 제어가 미치지 않는 곳에서 작업을 수행할 수 있어야 하기 때문에 스스로 주변 상황을 인식하여 작업을 수행할 수 있어야 한다. 로봇이 계획된 작업을 수행하기 위하여 목적지로 이동하고 작업 중에 발생하는 변화에 대처하기 위해서는 경로 탐색, 자율주행 및 장애물 회피 등의 기능이 필요하고, 이를 위해 로봇의 위치, 자세를 파악하는 기술이 반드시 필요하다.

무인 로봇에 적용되는 항법 기술은 위성항법기술과 관성항법기술로 나눌 수 있다. 대표적인 위성항법 기술인 GPS는 현재 소형 수신기가 개발되어 판매되고 있으며 안테나와 전원만 연결하면 로봇의 위치, 속도, 시간 등의 정보를 얻을 수 있다. 그러나 GPS는 외부의 전파를 이용한 항법 기술이기 때문에 전파를 수신할 수 없는 상황이 되면 항법 정보를 구할 수 없으며, 항법 정보가 1Hz 정도의 낮은 속도로 제공되므로 제어를 위해 빠른 항법 정보를 요구하는 로봇 시스템에 단독으로 적용하기에는 어려움이 있다.

관성항법은 항체에 장착된 각속도와 가속도 센서 출력을 적분하여 속도와 위치를 계산하는 기술로 외부 정보에 의존하지 않고 내부 관성측정 정보만을 이용하여 매우 정확하게 항법 정보를 구할 수 있지만 적분을 통하여 항법정보를 구하기 때문에 시간이 지남에 따라 오차가 증가한다는 단점이 있다. 또한 항법이 가능한 수준의 기존의 관성항법 장치의 경우 크기가 크고, 전력 소모가 많기 때문에 소형 무인로봇에는 적합하지 않다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 12. 1., 채택확정 : 2006. 12. 22.

김성철, 홍진석, 송진우 : (주)마이크로인피니티

(sckim@minfinity.com/jshong@minfinity.com/sjw@minfinity.com)

※ 본 논문은 산업기술투입사업 ‘재난감시용 Hovering 로봇 기술 개발’ 사업의 지원으로 연구하였음.

최근에는 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술을 이용한 관성센서 개발이 이뤄지고 있으나, 센서의 오차가 크기 때문에 단독으로 항법을 수행할 수준까지의 센서기술은 아직 도달 하지 못한 상태이다. 따라서 이를 극복하기 위해 서로 상반된 특성을 가지는 GPS와 관성 센서 시스템을 결합한 항법 시스템 개발이 활발히 이뤄지고 있다.

본 논문에서는 극한 무인로봇에 사용가능한 MEMS 센서를 기반으로 GPS/INS 시스템을 설계 제작한 후 차량에 탑재하여 성능분석을 수행한 결과에 대하여 다룬다.

II. 항법 알고리즘 설계

INS(Inertial Navigation System)의 항법 알고리즘은 IMU(IMU: Inertial Measurement Unit)로부터 얻어진 자이로스코프와 가속도계의 출력을 이용하여 항체의 위치, 속도 및 자세 등의 항법 정보를 계산하는 알고리즘이며 크게 초기 정렬(alignment) 알고리즘, 항법 계산 알고리즘, 정규 오차 보상 알고리즘 및 항법 오차 보정 알고리즘 등으로 나누어진다.

1. SDINS 항법 알고리즘

SDINS(Strap Down Inertial Navigation System) 항법 알고리즘은 IMU의 자이로스코프와 가속도계 출력 값을 이용하여 항체의 위치, 속도 및 자세 등의 항법정보를 계산하는 알고리즘이다. 시스템은 크게 항법 알고리즘을 포함한 항법 소프트웨어와 이를 수행시키는 하드웨어로 나뉘고, 하드웨어는 자이로스코프와 가속도계를 포함한 IMU와 항법 컴퓨터 등으로 구성된다[1]. SDINS 항법 시스템의 알고리즘을 도시하면 그림 1과 같다.

1.1 초기 정렬 알고리즘

초기 정렬(initial alignment)이란 항법 시스템이 정상적인 항법 모드로 진입하기 이전에 가속도계와 자이로스코프의

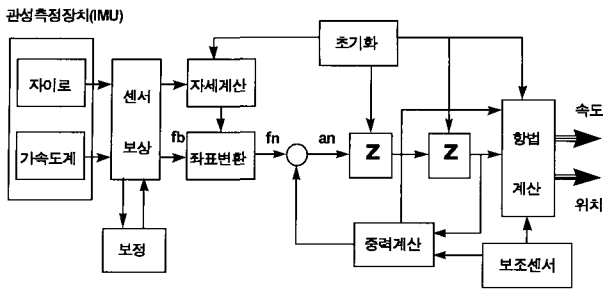


그림 1. SDINS 항법 알고리즘.
Fig. 1. SDINS navigation algorithm.

센서 측정치로부터 항법 좌표계에 대한 동체 좌표계의 초기 자세를 구하는 것이다[2].

초기 자세 오차는 항법 오차의 주요 오차 요인 중에 하나로 주로 자이로스코프 및 가속도계의 랜덤 바이어스 오차에 의해 발생한다. 초기 자세에서 오차가 발생하면 그 오차는 계속 누적되어 항법 시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

초기 정렬 과정은 크게 동체 좌표계의 대략적인 자세를 구하는 초기 개략 정렬(coarse alignment)과 초기 개략 정렬에서 구한 자세의 오차를 추정하여 보정하는 정밀 정렬(fine alignment)이 있다. 초기 개략 정렬은 항체가 정지한 상태에서 가속도계와 자이로 측정치를 이용하여 개루프(open loop)상태에서 항법좌표계와 동체좌표계 사이의 초기 좌표변환 행렬과 초기 자세각을 구하는 과정으로 정밀 정렬의 전단계로 이용된다. 개략정렬 알고리즘은 관성센서 출력력을 이용하여 다음 (1)과 같이 자세각의 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)각을 구한다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta g}{\cos \theta g}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}}\right)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{-\sin \phi \cos \theta g}{-\cos \phi \cos \theta g}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{f_x}{f_z}\right) \quad (1)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \psi \omega_N}{\cos \psi \omega_N}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-\omega_2}{\omega_1}\right)$$

1.2 오차 보상 알고리즘

IMU에 의해 측정된 자이로스코프 및 가속도계 측정치들은 각각 정규 오차(deterministic error)와 랜덤 오차(random error)를 포함하고 있다. 정규 오차는 외부의 환경에 의해 항상 일정하게 발생하는 오차로서, 이들 중 주요 오차 요인은 다음과 같다.

- 가속도계 바이어스(accelerometer bias error)
- 가속도계 환산계수 오차(accelerometer scale factor error)
- 가속도계 비정렬 오차(accelerometer misalignment error)
- 자이로 바이어스 오차(gyroscope bias error)
- 자이로 환산계수 오차(gyroscope scale factor error)
- 자이로 비정렬 오차 (gyroscope misalignment error)

이들 이외에도 자이로의 질량 불균형 오차(G-sensitive

error), 비등탄성 오차(G2-sensitive error), 각속도 교차 오차(cross axis rate error) 및 각가속도 오차(angular acceleration error) 등이 있으며 이러한 오차들은 IMU 실험을 통해 그 오차 계수를 추정된 후 항법 알고리즘 수행 전에 정규 오차 보상 알고리즘에서 보상해 주어야 한다. 오차 계수의 추정은 정적 다위치 시험(static multiposition test)과 레이트 테이블을 이용한 동적 시험 등을 이용하여 식별한다.

한편, 랜덤오차는 시간에 따라 불규칙적으로 변화하므로 대수적인 보상이 불가능하고 필터링 기법을 이용하여 확률적으로 가장 적합한 오차를 추정하여 보상한다. 따라서 랜덤오차의 모델링이 매우 중요하며, 일반적으로 백색잡음(white noise), 랜덤상수(random constant), 랜덤워크(random walk), 1차 마코프 프로세스(1st order Markov process), 2차 마코프 프로세스(2nd order Markov process) 등의 합으로 모델링 된다. 백색잡음을 제외한 나머지 오차 성분은 백색잡음을 입력으로 하는 일정의 유색잡음(colored noise)의 형태를 나타내며, 웨이핑 필터(shaping filter) 기법을 이용하여 칼만필터 모델에 부가(augmented)시켜 이러한 오차를 보상할 수 있다. 따라서 랜덤오차의 보상은 시스템의 오차 추정과 연계되어 이루어진다.

1.3 자세 및 항법 계산 알고리즘

자세 계산 및 항법 계산 알고리즘은 항법 알고리즘의 핵심에 해당하는 부분 중 하나로서, 센서 정규오차 보상 알고리즘을 거친 측정값들을 이용하여 항체의 자세와 속도 그리고 위치를 계산한다. 자세 계산은 주로 쿼터니언(quaternion)을 이용한 방법과 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을 이용한 방법이 있다. 문헌에 의하면 쿼터니언을 이용한 방법이 방향 코사인 행렬을 이용한 방법보다 더 우수하다는 것이 알려져 있다[3].

SDINS시스템에서는 동체 좌표계에서 측정된 선형 가속도 \$f^b\$와 자세계산 컴퓨터에서 계산된 좌표계 변환 행렬 \$C_b^n\$을 이용하여 항법 좌표계 상에서의 선형가속도 \$f^n\$으로 변환시킨 다음 항법 컴퓨터에서 항법방정식을 계산하여 항체의 위치와 속도를 얻는다. 이 때 속도를 계산하기 위한 항법 계산식은 다음 식과 같은 미분방정식으로 나타난다.

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \quad (2)$$

$$V^n = [V_N \quad V_E \quad V_D]^T$$

항체의 위치인 위도 (L), 경도 (l), 고도 (h)를 다음 (3)과 같이 계산하여 얻을 수 있다.

$$L = \int_0^t [V_N / (R_m + h)] d\tau + L(0)$$

$$l = \int_0^t [V_E / (R_t + h) \cos L] d\tau + l(0) \quad (3)$$

$$h = \int_0^t [-V_D] d\tau + h(0)$$

새로운 쿼터니언은 자이로 출력 \$\omega_{ib}^b\$와 항법 좌표계의 관성 좌표계에 대한 각속도 \$\omega_m^n\$을 이용하여 다음 (4)와 같은

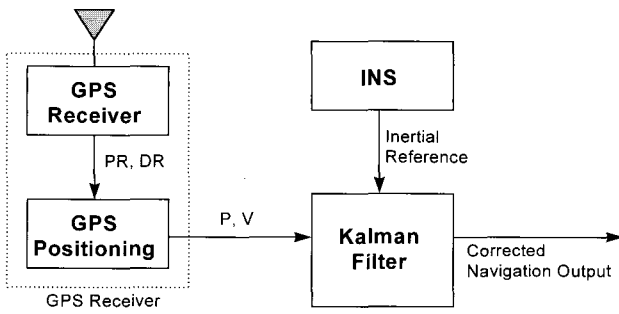


그림 2. GPS/INS 결합 구성도.
Fig. 2. Structure of GPS/INS.

쿼터니언 미분방정식으로 구한다.

$$\dot{Q} = \frac{1}{2}[\omega_{ib}^b]Q - \frac{1}{2}[\omega_{in}^n]Q \quad (4)$$

2. GPS/INS 결합 알고리즘

약결합 방식을 이용한 GPS/INS 통합에서 GPS 수신기의 위치 정보인 위도, 경도, 고도를 측정치로 이용하여 관성항법을 보조한다. 약결합 방식은 강결합 방식에 비하여 필터 차수가 작고 측정 모델이 간단해진다는 장점이 있다[4]. 본 시스템에 구현한 칼만필터는 온도센서를 이용한 보상 알고리즘을 추가하고 21차 칼만필터를 사용함으로써, 알고리즘의 정확도와 시스템의 성능을 증가시켰다.

GPS/INS 결합 칼만필터를 위한 시스템 오차 모델은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \delta p^n &= \delta \dot{v}^n \\ \delta v^n &= f^n \times \psi^n + C_b^n \delta f^b - 2(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n \\ &\quad - (2\delta \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n - \delta g^n \\ \psi^n &= -\omega_{in}^n \times \psi^n + \delta \omega_{in}^n - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \end{aligned} \quad (5)$$

III. 하드웨어 구성

개발한 GPS/INS 항법 시스템은 자이로스코프와 가속도계로 이루어진 IMU와 GPS 위성신호를 수신할 수 있는 GPS 수신기 그리고, 센서들로부터 수신된 정보를 연산해서 항법 데이터를 생성하는 항법 컴퓨터로 이루어져있다.

1. MEMS IMU

기존의 RLG(Ring Laser Gyroscope) 및 FOG(Fiber Optic Gyroscope) 자이로보다 초소형이라는 장점을 가진 MEMS IMU는 반도체 공정기술을 이용한 반도체 소자로 기계식 IMU에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 반도체 공정기술을 이용한 대량생산이 가능하고, 기계식 IMU에 비해서 온도 및 충격 등의 악조건의 환경에서도 좋은 강점을 가지고 있다. 또한 대량생산이 가능하므로 가격이 저렴하고, 초소형 반도체이기 때문에 전력소비량도 획기적으로 줄일 수 있다. 개발 시스템에 사용한 MEMS IMU는 ±1000deg/sec 급으로 성능 사양은 표 1과 같다.

표 1. MEMS IMU 성능 사양.

Table 1. The performance of a MEMS IMU.

Performance			
Accelerometer		Gyroscope	
Rate Range	0 to ± 13g	Rate Range	0 to ± 1000deg/sec
Typical non-linearity	± 60mv	Initial SF Accuracy	± 1%
Scale Factor(SF)	20mv/(deg/sec)	Scale Factor(SF)	20mv/(deg/sec)
Sensitivity	150mv/g	Bias	50% of Vdd
Sensitivity Error (Max:-40 ~ 125°C)	± 5%	Bias Initial Error	± 60mv

표 2. Lassen IQ 성능 사양.

Table 2. The performance of a lassen IQ.

제조사	Trimble	Channel	12 ch
Frequency	L1	Velocity Accuracy	0.06 m/s
Horizontal Accuracy	<5m(50%), <8m(90%)	Altitude Accuracy	<10m(50%), <16m(90%)
PPS Accuracy	±50NS	TTF Hot Start	10s(50%), 13s(90%)
TTF Warm Start	38s(50%), 42s(90%)	TTF Cold Start	50s(50%), 84s(90%)

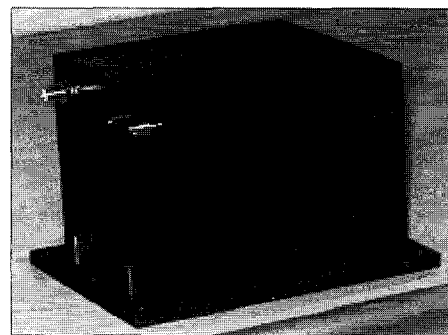


그림 3. 개발한 항법 시스템.

Fig. 3. The Microinfinity's navigation system. (NAVS).

2. GPS 수신기

GPS는 여러 가지 오차 요인과 신뢰성, 성능지수 등을 고려하고, 개발 항법 시스템의 저가, 초소형의 요구사항을 만족하는 Trimble 사의 Lassen IQ GPS Module을 선정하였다. 성능 사양은 표 2와 같다[5].

3. 항법 컴퓨터

본 논문에 사용되는 각종 센서들의 측정값을 받아서 자료 변환 및 연산 수행을 하는 항법 컴퓨터는 ARM9 Core의 32bit RISC칩을 사용하였다. 센서 정보를 입력 받아 항법 정보를 생성하기 위한 항법 알고리즘을 구현하고, 확장 SRAM 및 플래쉬 메모리를 이용해서 데이터를 처리한다.

IV. 항법 시스템 성능 분석

개발한 항법시스템의 항법 성능을 시험, 평가하기 위해서 차량 실험을 통한 성능 분석을 하였다. RLG 타입의 Tactical급 센서를 사용한 BDS를 기준시스템으로 이용하여, 개발한 항법 시스템의 자세각 오차 및 속도 오차를 측정하는 성능 분석 실험을 하였고, 실험 코스 중 터널 통과 구간을 설정하여 GPS의 궤적과 INS 궤적을 비교하는 방법을 이용하여 GPS/INS 항법시스템의 성능을 확인하였다. 다음 표 3은 기준 시스템으로 사용한 BDS의 성능 사양이다[6].

1. 성능분석 실험환경

시스템을 탑재한 차량은 가산동에서 산본IC까지 서부간선도로를 포함하는 왕복 약 42Km 정도의 거리를 가지는 코스를 주행하였고, 주행시간은 약 45분 정도 소요되었다. 초기 600초 동안 개략정렬과 정밀정렬을 포함한 초기정렬을 수행한 후 시험을 수행하였으며, 주행과정중의 항법컴퓨터에 의해서 연산되는 위치, 속도, 자세 등의 정보는 노트북의 시리얼 데이터 저장 프로그램을 사용하여 기록하였다. 기준 시스템으로 사용한 BDS는 개발 시스템 바로 옆에 장착하였으며, 차량마다에 고정할 수 있는 장착용 치구를 사용하여 장착 오차를 최소화 하였다.

2. 결합항법 위치 오차 성능 분석

GPS/INS 결합 항법 시스템의 성능을 차량실험을 통하여 분석하였다. BDS 기준시스템과 개발 시스템을 함께 탑재하여 자세각 오차 등의 성능 분석을 하였고, GPS 궤적과 INS 궤적을 비교함으로써, GPS/INS 항법 시스템의 성능을 분석했다. 그림 4, 5는 차량 실험한 코스의 궤적을 나타낸다.

차량 시험 결과 그림 4와 같은 궤적을 나타내었다. 부분적으로 GPS 신호가 미약하거나, 다중경로에(multi-path) 기인하여 GPS 위치해가 부정확한 곳이 있었으나, 이 경우 GPS/INS로 결합 항법 시스템을 구현할 경우, 원하는 궤적을 얻을 수 있었다. GPS가 가용하지 않은 경우의 INS 성능을 검증하기 위해 총 4번의 터널구간을 통과하였으며, 차량의 평균 주행 속도는 100Km/hr 정도 되었다. 그림 5의 GPS 신호가 차단된 경우가 터널통과 구간이며, 터널통과 이후 GPS 신호를 획득한 경우 위치오차를 줄이기 위해 바로 위치를 보정한다. GPS 신호가 양호한 구간에서는 GPS궤적과 INS궤적의 차이가 거의 없었고, 그림 5와 같이 1Km 이상의 터널을 통과하는 구간에서는 1분에 약 350m 정도 위치 오차가 발생했음을 알 수 있다.

표 3. BDS 성능사양.

Title 3. The performance of a BDS.

Performance	
Position Accuracy	Stand Alone : 0.5 to 2m RMS
Velocity Accuracy	0.02m/s
Attitude Accuracy	Pitch : 0.013deg, Roll : 0.013deg, Azimuth : 0.040deg
Acceleration accuracy	0.03m/s ²
Time Accuracy	20ns
Time to First Fix(TIFF)	Cold Start : 60s, Warm Start : 50s, Hot Start : 30s

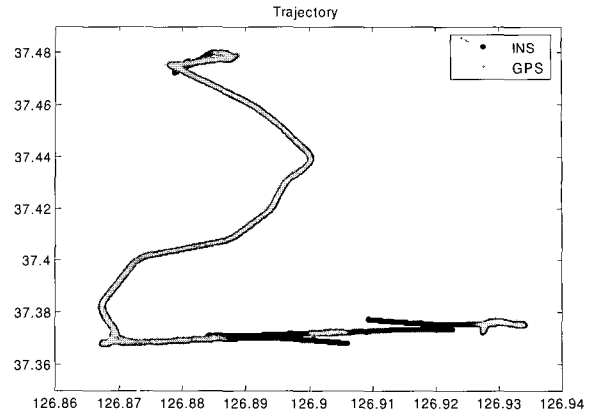


그림 4. 차량실험 전체 궤적.

Fig. 4. Trajectory of car test.

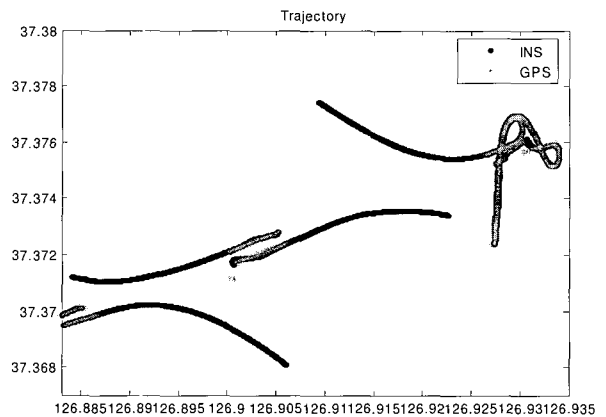


그림 5. 확대한 부분 궤적.

Fig. 5. Enlarged trajectory.

2.1 결합항법 자세 및 속도 오차 분석

차량을 이용하여 결합 항법 시스템의 자세 및 속도 오차를 분석 하였다. 차량 실험 궤적은 가산동에서 광명역까지 왕복하는 구간으로 약 24Km정도의 거리이다. 주행시간은 약 35분정도 소요되었고, 초기 600초 동안 개략정렬과 정밀정렬을 포함한 초기정렬 수행 후 시험을 수행하였다.

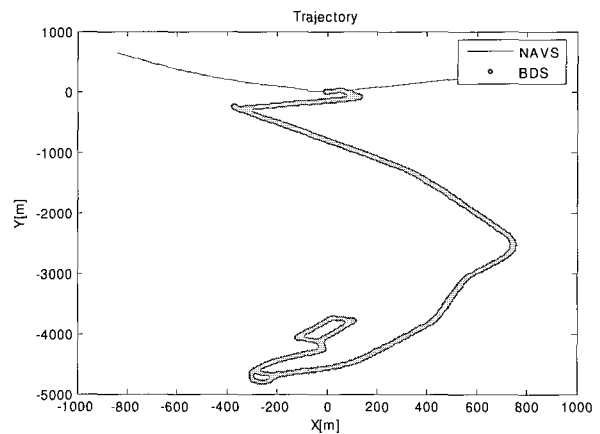


그림 6. 차량실험 전체 궤적.

Fig. 6. Trajectory of car test.

차량 시험 결과 그림 6과 같은 궤적을 나타내었고, 전 구간에서 GPS 신호는 양호하였으며, 전 구간에서 위치 정보를 정확하게 제공하는 것을 알 수 있다. 다음 그림들은 기준 시스템과 개발 시스템과의 속도를 비교한 그래프들이다.

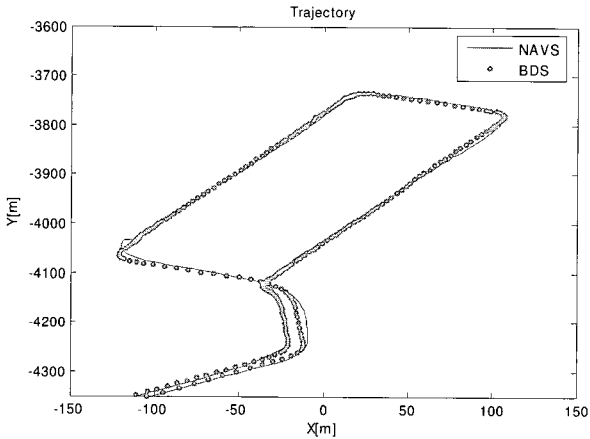


그림 7. 확대한 부분 궤적.
Fig. 7. Enlarged trajectory.

속도 그래프로부터 제작된 GPS/INS 항법 시스템이 속도 정보를 올바르게 추정하는 것을 알 수 있으며, 이 경우의 속도 오차의 표준편차는 2m/sec 이하였다. 다음은 기준 시스템과 개발 시스템과의 자세각 오차를 보여준다.

아래 그림들에서 초기 영속도 보정 부분에서 두 데이터

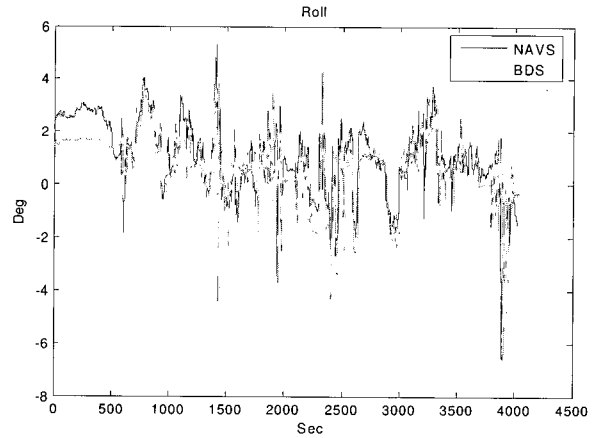


그림 10. 롤각.
Fig. 10. Roll.

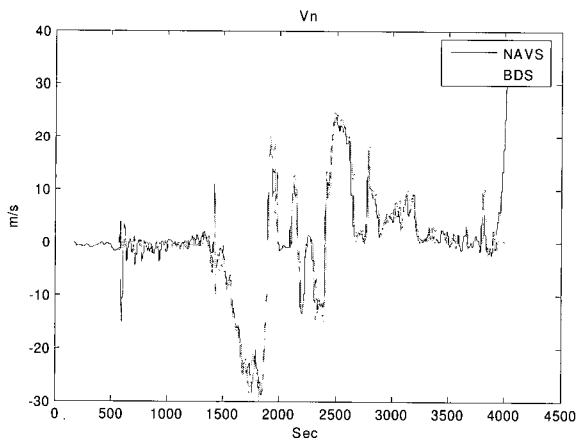


그림 8. 북쪽 방향 속도.
Fig. 8. North velocity.

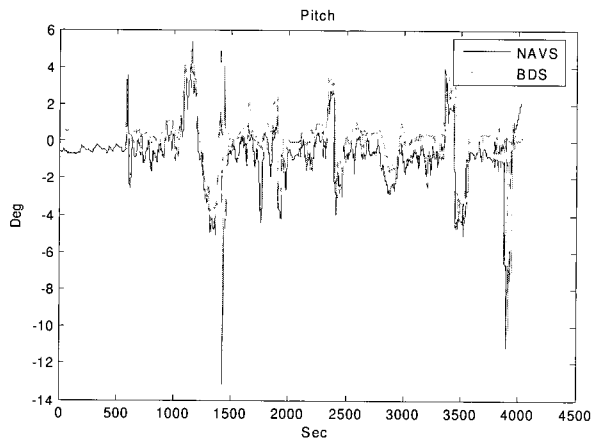


그림 11. 피치각.
Fig. 11. Pitch.

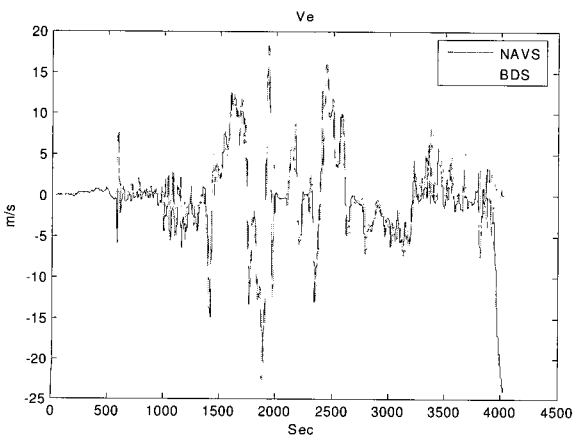


그림 9. 동쪽 방향 속도.
Fig. 9. East velocity.

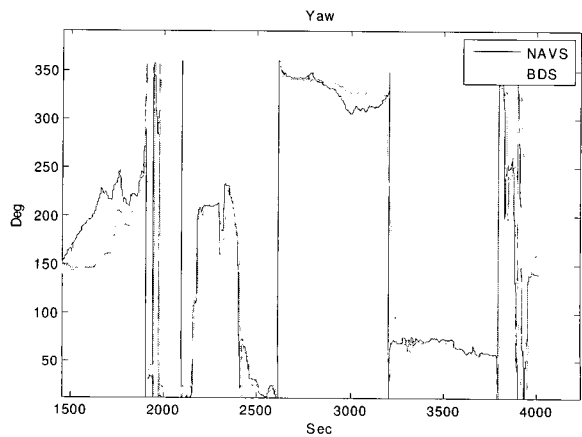


그림 12. 요각.
Fig. 12. Yaw.

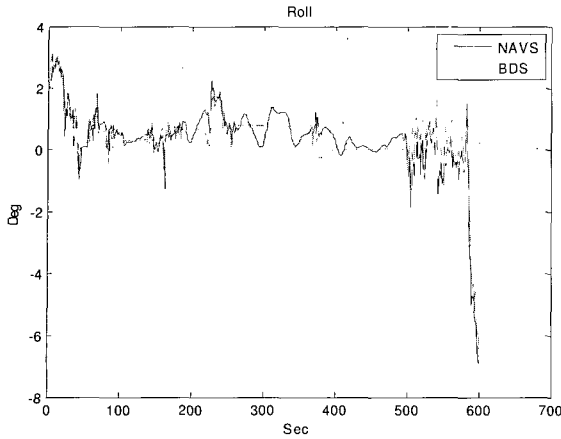


그림 13. 시각 동기화 및 장착 바이어스 롤각 보정.
Fig. 13. Time synchronize and compensated local bias roll.

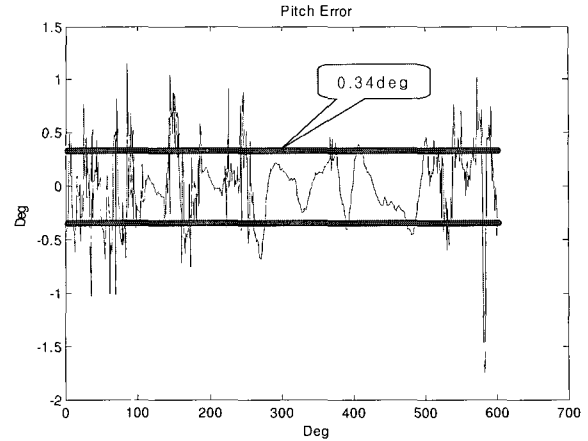


그림 16. 피치 오차.
Fig. 16. Pitch error.

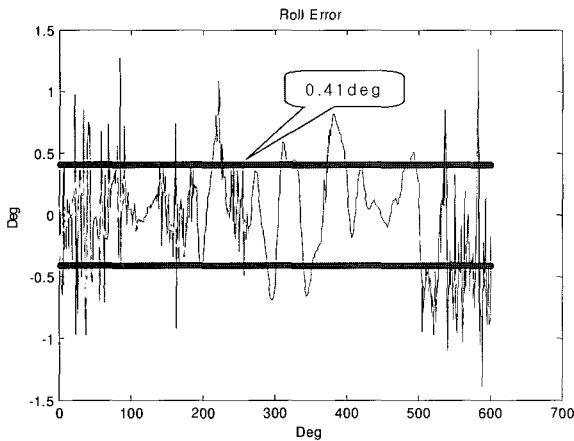


그림 14. 롤각 오차.
Fig. 14. Roll error.

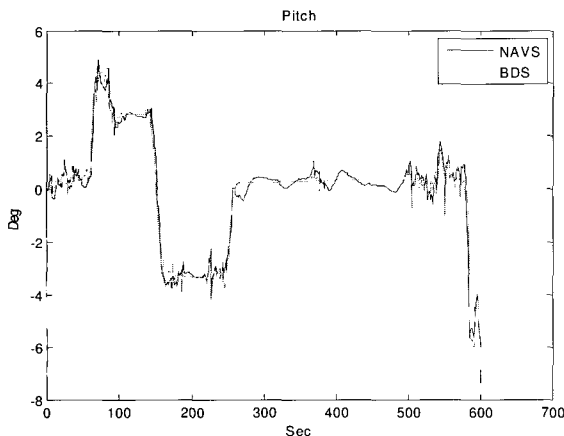


그림 15. 시각 동기화 및 장착 바이어스 피치각 보정.
Fig. 15. Time synchronize and compensated local bias pitch.

의 차이를 볼 수 있는데, 이는 장착 오차에 의한 것으로, 초기 오차에 해당하는 부분이 어느 정도 지속적으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 이 장착 오차는 바이어스 성분으로, 로봇에 장착한 후에 보상이 가능한 부분이다.

로봇 차량의 경우 롤각 오차보다는 피치가 오차가 더욱 중요하게 작용한다. 피치가 오차는 GPS가 가용하지 않은 경우 곧바로 위치 오차를 유발하게 되기 때문이다. 롤각 오차는 로봇 차량의 동특성에 대해 제한 조건을 부가하는 방식으로 오차를 최소화 할 수 있다. 자세각 오차를 더욱 자세하게 구하기 위해서 그림 13, 15와 같이 장착 바이어스 성분과 시각 동기화를 보정하였고, 그 결과 그림 14, 16과 같은 롤각, 피치가 오차성분을 구할 수 있었다. 개발 시스템의 롤각, 피치가 평균 오차는 각각 약 0.41도, 약 0.34도 정도를 나타냈다.

V. 결론

본 논문에서는 극한 무인 로봇 차량에 적용되는 GPS/INS 결합 항법 시스템을 개발하고, 실험차량에 탑재하여 성능 분석을 하였다. 작고 가벼운 MEMS 방식의 IMU를 선정하여 GPS/INS 시스템을 설계, 제작하였으며, 항법 알고리즘은 스트랩다운(strap down) 방식을 기반으로 약결합 GPS/INS 결합 항법 시스템을 구성하였다. 개발된 GPS/INS 항법시스템을 RLG를 이용한 시스템을 기준으로 성능 분석한 결과 결합항법 구간에서 자세각 오차 중 롤각, 피치가 오차는 각각 약 0.41도, 0.34도 정도 나타났으며, 위치 오차는 GPS가 없는 구간에서 1분에 약 350m 정도 발생하였다. 위치오차는 추후 극한 무인 로봇 차량의 odometer를 사용하여 오차를 보정하면 좀 더 나은 성능을 기대할 수 있고, 극한 무인 로봇 차량의 활동 환경이 개방된 곳이기에 GPS 신호가 차단되는 경우는 거의 드물다고 판단되어 개발된 시스템은 가볍고 조그만 항법 시스템을 필요로 하는 극한 무인 로봇 차량용 항법시스템에는 충분히 적용이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 이상중 외 3명, 스트랩다운 관성항법시스템 성능평가 시험, 항공우주기술 제 1 권 제 1 호.
- [2] 김종혁, 약결합 방식의 GPS/INS 통합시스템 구현, 석사학위논문, 1999.

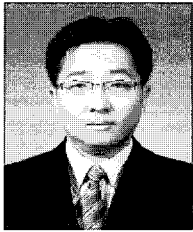
[3] 홍진석, 공분산해석 기법을 이용한 GPS/INS/고도계 결합항법 시스템 성능 분석, 유도무기학술대회, 2003.

[4] D. H. Titterton and J. L. Weston, "Strapdown inertial navigation technology," *IEE Radar, Sonar, Navigation*

and Avionics Series, 1997.

[5] Trimble, Lassen iQ GPS Module User Manual, 2004.

[6] Novatel, Black Diamond System(BDS) User Manual, 2001.



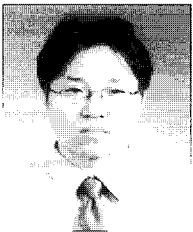
김 성 철

2004년 서울산업대학교 제어계측공학과 학사. 2006년 서울산업대학교 제어계측공학과 석사. 현재 (주)마이크로인피니티 전임연구원. 관심분야는 항법 시스템 및 칼만필터링.



홍 진 석

1994년 건국대학교 전자공학과 졸업. 1996년 건국대학교 전자공학과 석사. 2001년 건국대학교 전자공학과 박사. 2001년~현재 (주)마이크로인피니티 연구소. 관심분야는 소형 항법 시스템, 위성항법 수신기, 결합필터 등.



송 진 우

1995년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1997년 서울대학교 제어계측공학과 석사. 2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학과 박사. 2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 Post Doc. 현재 (주)마이크로인피니티 연구소장. 관심

분야는 MEMS 항법 센서 및 항법 시스템 등.