

강결합 기법을 이용한 WNS/GPS 결합 시스템

WNS/GPS Integrated System Using Tightly Coupled Method

조성윤, 박찬국

(Seong Yun Cho and Chan Gook Park).

Abstract : The system error model for the compensation of the low-cost personal navigation system is derived and the error compensation method using GPS is also proposed. The walking navigation system (WNS) that calculates navigation information through walking detection has small error than INS, but the error also increases with time. In order to improve reliability of the system regardless of time, WNS is integrated with GPS. Since WNS is usually used in urban area, the blockage of GPS signal is frequently occurred. Therefore tightly coupled Kalman filter is used for the integration of WNS and GPS. In this paper, the system model for the design of tightly coupled Kalman filter is designed and measurement is linearized in consideration of moving distance error. It is shown by Monte Carlo simulation that the error is bounded even through the number of visible satellite is less than 4.

Keywords : WNS(Walking Navigation System), tightly coupled WNS/GPS, Kalman filter

I. 서론

개인항법장치(PNS : Personal Navigation System)는 기존의 군사용, 항해용으로 사용되던 항법장치가 민수용으로 사용 범위가 확대되면서 자리 잡게 된 응용 분야로 응급시 휴대폰 사용자의 위치 파악 및 인력의 효율적 관리, 가상현실(virtual reality), 스포츠용 데이터 입력 장치 등에 이용될 수 있다. 개인항법장치는 노천지역 뿐 아니라 건물 내에서의 사용자의 위치 정보 또한 정해진 오차 범위 내의 정확도를 가지고 제공할 수 있어야 하므로 이에 적합한 하드웨어 및 항법 알고리즘이 필요하다.

GPS(Global Positioning System)는 위성항법 시스템으로 가장 큰 오차 요인이었던 SA(Selective Availability)가 2000년 5월에 제거됨으로써 사용 범위와 가용성이 커졌다. 그러나 GPS는 가시위성의 수가 4개 이상이어야 사용할 수 있으므로 개인항법장치가 많이 사용될 도심지, 숲속, 건물내부와 같이 위성 전파의 수신에 제한되는 곳에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다[1,2].

관성항법장치(INS : Inertial Navigation System)는 관성 센서를 사용하여 운동체의 관성을 측정함으로써 움직임을 계산하는 장치로 사용 장소에 관계없이 항법 정보를 연속적으로 제공한다. 그러나 지금까지 관성 센서는 고가이며 구입이 제한되어 군사용으로 주로 사용되었다. 또한 센서 데이터의 적분연산을 통하여 항법 정보를 계산하므로 시간에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다. 그러므로 외부 정보를 이용하는 오차 보상 필터를 사용해야만 오차의 발산을 막을 수 있다[1,2,3,4,5].

최근 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술의 발달로 인하여 저가의 반도체형 관성 센서가 개발됨으로써, 관성항법의 원리를 민수용으로 전환하고자 하는 연구가 진

행되고 있다. 그러나 성능이 기존의 관성 센서에 비하여 현저하게 떨어지므로 단순한 적분연산을 통하여 계산된 항법 정보를 그대로 사용할 수 없다. 또한 기존에 많이 연구된 INS/GPS 결합 알고리즘을 저가형 개인항법장치에 그대로 적용하면, GPS 정보를 사용할 수 없는 경우에 오차가 짧은 시간 내에 발산하게 되므로 사용할 수 없다. 따라서 일반적으로 저급 센서라고 할 수 있는 0.05[deg/s] 이하의 분해능을 갖는 반도체형 관성 센서를 사용하여 개인항법장치를 구성하는 경우에 사용될 새로운 항법 알고리즘의 연구가 필요하게 되었으며 최근에 많이 연구되고 있는 보행항법장치(WNS : Walking Navigation System)가 그 대표적인 한 가지 예라 할 수 있다[6,7,8,9].

보행항법장치는 사람의 보행 특성을 항법 알고리즘에 반영하여 걸음 검출, 회전 검출 및 보폭 결정을 통하여 항법 정보를 계산하는 새로운 항법 알고리즘이다. 기존의 항법 알고리즘에서 가속도계 출력의 적분을 통해 이동 거리를 계산한 것에 비하여 보행항법장치에서는 검출된 걸음 수에 보폭을 곱하여 사람의 이동 거리를 계산하는 것이 주요한 특징이다. 따라서 걸음 검출 기법과 보폭 결정 기법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

기존의 관성항법장치는 주로 가속도계와 자이로 바이어스에 의하여 오차가 발산하게 된다. 따라서 항법 정보의 정확성을 유지하기 위하여 관성센서의 오차 추정 및 위치, 속도, 자세를 보정하는 필터를 이용하였다[1,2,3,4]. 걸음 검출에 의한 보행항법장치 또한 걸음 검출 오차, 보폭 오차, 및 회전을 측정하는 자이로의 오차 등에 의하여 오차가 커지게 된다. 따라서 보행항법장치에 적합한 오차 보정 필터가 필요하다[6,7].

이러한 배경아래 본 논문에서는 보행항법장치와 GPS의 결합 기법을 제안하고자 한다. 보행항법이 주로 사용될 도심지역에서는 GPS의 위성 개수가 위치 해를 구할 수 있는 최소 개수보다 작은 경우가 많으므로 이런 경우에도 사용 가능한 강결합 기법을 선택하였다. 2절에서는 보행항법장치의 오차 보정을 위한 오차 모델을 제시하고 3절에서는 강결

논문접수 : 2002. 4. 29., 채택확정 : 2002. 10. 31.

조성윤 : 광운대학교 제어계측공학과(Syuni@shinbiro.com)

박찬국 : 광운대학교 정보제어공학과(cgpark@daisy.gwu.ac.kr)

※ 이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2000-E00321)

합 기법의 GPS와의 결합을 위한 칼만 필터의 시스템 모델과 측정치 모델을 제시하며, 특히 강결합 기법에서 필요한 GPS 측정치의 선형화 과정에서 항법좌표계 상의 이동 거리 오차에 따른 의사거리 변화를 유도하여 적용한다. 그리고 4절에서는 보행항법장치의 적용 가능한 환경에서의 결합 기법의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션 결과를 제시하고 5절에서 결론을 맺는다.

II. 보행항법장치 모델

1. 좌표계 정의

본 논문의 보행항법장치에 쓰이는 좌표계는 다음과 같으며 그림 1에 나타내었다.

- 항법좌표계(navigation frame : NED)
- 동체좌표계(body frame : xyz)

항법좌표계는 사람의 속도, 이동 거리 등이 표시되는 좌표계로 지역수평(local level)좌표계로 하며 본 논문에서는 NED 좌표계를 항법좌표계로 정한다. 동체 좌표계는 사람의 몸에 고정된 좌표계로서 전진 방향을 x축, 오른쪽 측면 방향을 y축, 그리고 수직 아래 방향을 z축으로 한다.

항법좌표계와 동체좌표계 사이의 자세각은 롤각, 피치각, 방위각으로 나타내지만 항법장치를 허리에 장착하고 정상적인 보행으로 항법을 수행하는 경우에 동체좌표계는 항법좌표계에 대하여 거의 레벨링이 되어 있다고 가정할 수 있으므로 롤각과 피치각은 미세 각오차를 갖는 0도로 가정하고 방위각만으로 자세각을 나타내며 그림 1에서와 같이 ψ 로 정의한다.

2. 항법장치 모델

일반적인 스트랩다운 관성항법장치는 관성측정장치(IMU : Inertial Measurement Unit)의 출력을 적분하여 자세 및 속도, 위치를 계산한다. 그러나 저급 관성센서를 이용하여 IMU를 구성하고 이를 사람의 몸에 장착하고 항법을 수행하는 개인항법장치에서는 기존의 항법 알고리즘으로는 원하는 정확도를 갖는 항법 정보를 계산할 수 없다. 첫째 이유는 저급 관성센서가 갖는 성능의 한계 때문이며, 두 번째 이유는 장착 비정렬에 의한 오차 때문이다[9]. 센서 오차 및 장착 오차는 적분 연산에 의하여 시간에 따라 누적되며 그 결과 항법 정보는 짧은 시간 내에 발산하게 된다. 따라서 저급 관성센서를 사용하는 개인항법장치에서는 새로운 항법 알고리즘이 사용되어야 한다. 본 논문에서는 사람의 걸음 정보를 이용하여 항법을 수행하는 보행항법장치(WNS : Walking Navigation System)를 개인항법장치로 사용한다[6,7].

알고리즘의 기본 구성도는 그림 2와 같다. 사람이 보행할 때 몸의 움직임은 걸음마다 비슷하므로 몸에 장착된 IMU의 출력 또한 매 걸음마다 몸의 움직임이 반영되어 유사한 패턴을 갖고 나타나게 된다. 이 패턴의 유사성을 이용하여 걸음을 검출할 수 있다. 저역 통과 필터링(LPF : Low Pass Filter)된 IMU 출력의 패턴을 이용하여 걸음을 검출하고 걸음 검출 시간적 간격을 이용하여 걸음 주파수를 계산한다[9]. 이렇게 계산된 걸음 주파수와 IMU의 출력 패턴을 이용하여 이동 거리 계산에 필요한 보폭을 추정한다. 보폭을 추

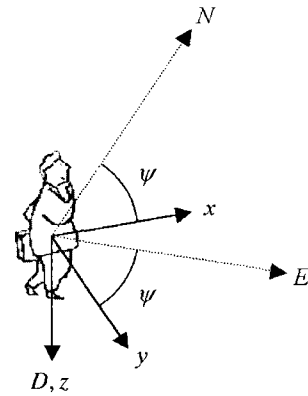


그림 1. WNS 좌표계.

Fig. 1. Coordinate frames of WNS.

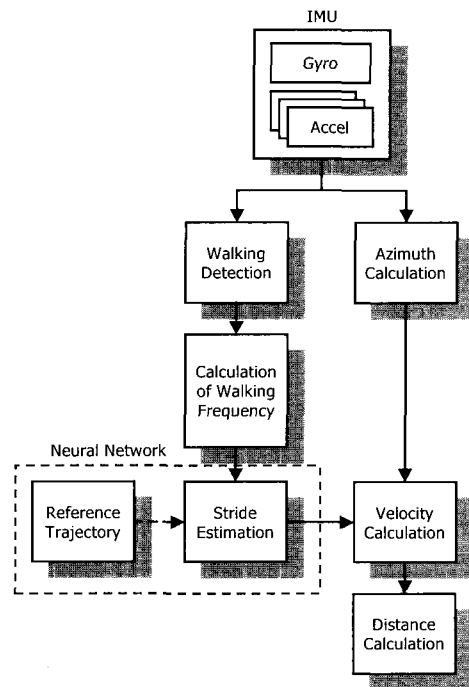


그림 2. WNS 알고리즘 구성도.

Fig. 2. Block diagram of WNS algorithm.

정할 수 있는 방법으로는 실제 알고 있는 거리를 걸어 걸음수로 나누는 평균보폭 방법과 GPS를 이용하는 실시간 보폭 추정 방법, 전진 방향 가속도를 이용하여 방법, 신경 회로망(neural network)을 이용하는 방법 등이 있다[7,8,9].

본 논문에서는 보폭 추정을 위하여 걸음 속도에 따라 변하는 보폭을 반영하고 GPS를 사용할 수 있는 구간에서는 성능을 향상시킬 수 있는 신경 회로망을 이용하였다[7,12,13,14]. 추정된 보폭과 계산된 걸음 주파수를 이용하여 (1)과 같이 사람의 이동 속도를 구한다.

$$V^b = \begin{bmatrix} s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cdot f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 s는 전진 방향 속력이며, l은 보폭, f는 걸음 주파수를 나타낸 것이다.

보행항법에서 자세는 방위각만을 고려하여 다음과 같이 방향코사인 행렬로 동체좌표계에 대한 항법좌표계의 관계를 나타낸다.

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 연속적인 자세계산을 위한 방향코사인 행렬의 미분방정식은 다음과 같다.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{nb}^b \quad (3)$$

여기서 $\Omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & 0 \\ \dot{\psi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 은 자이로 출력을 이용하여 계산된다.

(1)과 (2)를 이용하여 항법좌표계 상의 걸음 속도를 나타내면 (4)와 같고 속도계산 미분방정식은 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V^n = C_b^n V^b = \begin{bmatrix} s \cos \psi \\ s \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\dot{V}^n = \begin{bmatrix} \dot{s} \cos \psi - s \dot{\psi} \sin \psi \\ \dot{s} \sin \psi + s \dot{\psi} \cos \psi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이렇게 계산되어진 속도와 걸음 주파수를 이용하여 이동 거리를 계산할 때 미분방정식은 다음과 같다.

$$D = V^n / f \quad (6)$$

여기서 D 는 항법좌표계 상의 이동 거리를 나타낸 것이다.

보행항법에서 자세 계산은 IMU의 자이로 데이터 출력 주기에 맞추어 이루어지며, 보폭, 속도 및 이동 거리는 걸음 주파수에 동기 되어 계산된다.

3. 항법장치 오차 모델

걸음 검출에 의하여 항법이 수행되는 보행항법장치는 2.2 절에서 설명한 것과 같이 걸음 주파수와 보폭 그리고 방위각 계산에 의하여 수행되며 항법 알고리즘은 DR(Dead Reckoning)의 형태로 이루어진다.

일반적인 관성항법 알고리즘을 이용하여 항법을 수행하는 경우, 저급 가속도계가 10 mg의 바이어스를 가질 때 17.66 m/min의 거리 오차를 유발한다. 이에 비하여 2Hz의 걸음 주파수를 갖고 보행하는 사람이 보행항법 알고리즘을 사용하여 항법을 수행하는 경우, 신경 회로망을 이용하여 보폭을 결정할 때 3 cm 이내의 보폭 오차를 갖게 되므로 약 3.6 m/min의 거리 오차가 발생한다[7]. 따라서 보행항법 알고리즘이 갖는 성능의 우수함을 예측할 수 있다. 그러나 보행 항법에서도 걸음 검출 오차, 항법장치 프로세서의 시각 오차, 자이로 바이어스 등에 의하여 보폭 오차 뿐 아니라 자세 오차 또한 발생하며, 이 오차는 시간이 지남에 따라 발산하는 특성을 가지고 있으므로 오차 보정 기법이 반드시 필요하다.

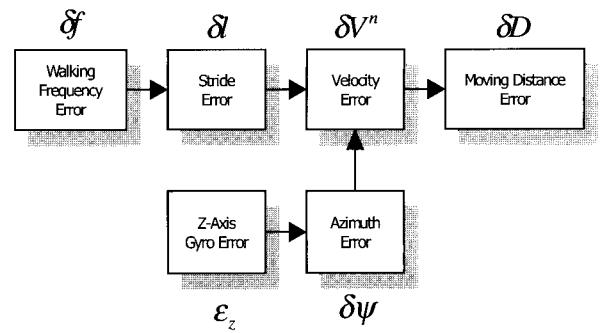


그림 3. 오차 전파 순서도.

Fig. 3. Error propagation.

오차 보정을 위하여 필터를 구성하는 경우 오차 모델이 필요하다. 이 오차 모델은 그림 3에 나타낸 오차 전파 순서를 바탕으로 앞에서 구한 항법 알고리즘 식들을 이용하여 유도된다. 일반적으로 오차 모델은 미분방정식 형태로 나타내어지며 선형 섭동법(linear perturbation) 방법에 의하여 유도된다.

먼저 걸음 주파수 오차는 걸음 검출을 통해 측정되는 시간을 계산하기 위한 프로세서의 시각 오차와 걸음 검출 시점의 오차로 인하여 발생하며 다음과 같이 표현된다.

$$\delta f = w_f, \quad w_f \sim N(0, Q_f) \quad (7)$$

보폭 오차는 신경 회로망을 통하여 학습된 보폭이 걸음 주파수에 따라 갖는 바이어스와 걸음을 걸을 때마다 발생하는 보폭의 백색 잡음 오차로 다음과 같이 표현한다[5].

$$\delta l = \nabla_l + w_l \quad (8)$$

여기서 ∇_l 은 보폭 오차의 랜덤 상수를 나타내며, w_l 은 백색 잡음을 의미하며 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$\nabla_l = 0, \quad \nabla_l(0) \sim N(0, P_l), \quad w_l \sim N(0, Q_l)$$

방위각 오차는 자이로 오차에 의한 것이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \psi = (\delta \omega_{ib}^b)_z = \varepsilon_z + w_\varepsilon \quad (9)$$

여기서 $\varepsilon_z = 0, \quad \varepsilon_z(0) \sim N(0, P_\varepsilon), \quad w_\varepsilon \sim N(0, Q_\varepsilon)$

속도 오차 모델은 (4)를 이용하여 구한다. 먼저 (4)의 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}^n = C_b^n \dot{V}^b + \dot{C}_b^n V^b \quad (10)$$

(10)을 선형 섭동법에 의하여 전개하면 다음과 같다.

$$\dot{V}^n + \delta \dot{V}^n = \hat{C}_b^n (\dot{V}^b + \delta \dot{V}^b) + \dot{\hat{C}}_b^n (V^b + \delta V^b) \quad (11)$$

여기서 \hat{C}_b^n 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{C}_b^n &= \begin{bmatrix} 1 & -\delta\psi & 0 \\ \delta\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} C_b^n \\ &\equiv E_\psi C_b^n \\ &\equiv C_b^n + \delta C_b^n \end{aligned} \quad (12)$$

그리고 $\hat{C}_b^n = \hat{C}_b^n \hat{\Omega}_{nb}^b$ 와 (12)를 (11)에 대입하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \delta V^n &= \hat{C}_b^n \hat{\Omega}_{nb}^b (\dot{V}^b + \delta V^b) + \hat{C}_b^n (V^b + \delta V^b) \\ &\quad - C_b^n V^b - C_b^n \dot{V}^b \\ &= (C_b^n + \delta C_b^n)(\Omega_{nb}^b + \delta\Omega_{nb}^b)(V^b + \delta V^b) \\ &\quad + (C_b^n + \delta C_b^n)(\dot{V}^b + \delta \dot{V}^b) \\ &\quad - C_b^n V^b - C_b^n \dot{V}^b \\ &= C_b^n \Omega_{nb}^b \delta V^b + C_b^n \delta\Omega_{nb}^b V^b + C_b^n \delta \dot{V}^b \\ &\quad + (E_\psi - I)C_b^n(\Omega_{nb}^b V^b + \dot{V}^b) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\delta\Omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z & 0 \\ \varepsilon_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 이며 오차의 곱은 매우 작을 것이므로 무시한다.

마지막으로 이동 거리 오차 모델을 (6)을 이용하여 구한다. (6)을 선형 섭동법을 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$D + \delta D = \frac{V^n + \delta V^n}{f} \quad (14)$$

(14)를 이동 거리 오차 모델로 나타내기 위하여 곱셈 주파수의 오차는 매우 작다고 가정하면 (14)는 다음과 같이 된다.

$$\delta D = \frac{1}{f} \delta V^n \quad (15)$$

III. 강결합 방식의 WNS/GPS

보행항법을 통해 제공되는 항법 정보는 그림 3에서 나타난 오차의 흐름에 따라 오차를 포함하게 되며 이 오차는 시간이 지남에 따라 발산하는 특성을 가지고 있으므로 오차 보정 필터의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 GPS와의 결합을 통하여 오차를 추정하는 칼만 필터를 구성하였다. 보행항법은 주로 가시 GPS 위성의 개수가 작은 도심 지역에서 사용되어지므로 GPS의 의사거리를 측정치로 사용하는 강결합 방식을 사용하여 칼만 필터를 구성하였다. 강결합 기법은 수신기가 위치 해를 제공할 수 있는 최소 위성 개수보다 작은 경우에도 사용할 수 있다는 장점이 있으므로 GPS 위성의 가시성이 좋지 않은 도심지역에서 사용하는데 적합하다[1,11].

강결합 방식은 의사거리, 의사거리 변화율 및 반송파 위상 등의 GPS 정보를 다른 가공 없이 직접 WNS 오차 추정 칼만 필터의 측정치로 사용하는 센서 레벨에서의 결합이다. 이러한 구조는 GPS 정보의 가공이 WNS의 필터 안에서 이루어지며 구성은 그림 4와 같다[1,11].

1. 시스템 모델

칼만 필터의 측정치는 GPS 수신기가 수신한 의사거리와

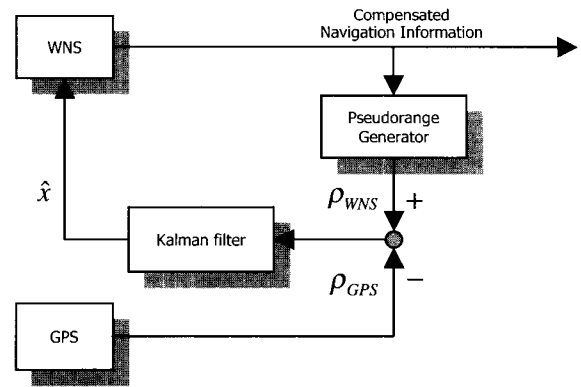


그림 4. 강결합 방식의 WNS/GPS 구성도.

Fig. 4. Block diagram of the WNS/GPS with tightly coupled method.

의사거리 변화율 정보를 이용하는 방법으로 의사거리와 의사거리 변화율 정보에 포함된 수신기 시계 바이어스 오차와 시계 바이어스 변화율 오차를 추정하여 보정해 주어야 한다. 따라서 시스템 오차 모델은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} F_{WNS} & 0 \\ 0 & F_{clock} \end{bmatrix} x(t) + w(t), w(t) \sim (0, Q) \quad (16)$$

여기서 상태변수는 이동 거리 오차, 속도 오차, 방위각 오차, 보폭 오차, 자이로 바이어스, 수신기 시계 바이어스 그리고 수신기 시계 드리프트로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$x = [\delta D_N \quad \delta D_E \quad \delta V_N^n \quad \delta V_E^n \quad \delta\psi \quad \delta l \quad \varepsilon_z \quad \delta C_{bias} \quad \delta C_{drift}]^T$$

(16)에서 F_{WNS} 는 2.3절에서 유도한 보행항법장치 오차 모델을 이용하여 다음과 같이 구성된다.

$$F_{WNS} = \begin{bmatrix} 0 & I_{2 \times 2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{va} & F_{vl} & F_{vgb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 속도 오차는 (13)을 각 성분으로 분리하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$F_{va} = [-s \sin \psi - s \psi \cos \psi \quad s \cos \psi - s \psi \sin \psi]^T$$

$$F_{vl} = [-s \sin \psi - s \psi \cos \psi \quad s \cos \psi - s \psi \sin \psi]^T$$

$$F_{vgb} = [-s \sin \psi \quad s \cos \psi]^T$$

또한 F_{clock} 은 다음과 같이 표현할 수 있다[9].

$$F_{clock} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

그리고 시스템 공정 잡음 $w(t)$ 는 다음과 같이 설정하였다.

$$w(t) = [0 \quad 0 \quad w_{vn} \quad w_{ve} \quad w_\psi \quad w_l \quad 0 \quad w_{cb} \quad w_{cd}]^T$$

2. 측정치 모델

강결합 방식에서 측정치로 사용하는 GPS 정보는 비선형 특성을 가지므로 보행항법장치의 항법 정보를 기준으로 선형화 과정을 수행하여야 한다. 이것은 시건(line of sight) 벡터에서 얻어지는 GPS 측정치를 보행항법에서 사용하는 항법좌표계로 변환시키는 문제가 된다. 기존의 강결합 INS/GPS에서는 경위도 좌표계를 GPS 측정치의 선형화를 위한 기준 위치 좌표계로 사용하였다. 그러나 보행항법에서는 그림 2에서 나타낸 것과 같이 경위도에 의한 위치보다 이동 거리 정보가 중요하며 칼만 필터의 상태변수에 이동 거리 오차가 포함되어 있으므로 본 논문에서는 이동 거리 정보를 GPS 측정치의 선형화 기준점으로 사용한다.

먼저, 의사거리에 대한 칼만 필터의 측정치를 구하기 위하여 의사거리 표현식에서 주어진 i 번째 위성에 대한 의사거리 측정식을 다음과 같이 경위도로 표현된 항체의 초기 위치와 항법좌표계 상의 이동 거리에 대한 함수로 나타낸다.

$$\rho_i = \{ (x_i - x_u(P_0, D))^2 + (y_i - y_u(P_0, D))^2 + (z_i - z_u(P_0, D))^2 \}^{1/2} + c_{bias} + v_\rho \quad (19)$$

여기서 P_0 는 항체의 초기 위치이며, D 는 이동 거리를 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$D = \left[\frac{D_N}{R_e + h_0 + D_D} \quad \frac{D_E \sec L}{R_e + h_0 + D_D} \quad 0 \right]^T \quad (20)$$

(19)를 이동 거리와 시계 바이어스에 대해서 선형화 하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\delta \rho_i = \left[\frac{\partial \rho_i}{\partial D_N} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial D_E} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial D_D} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial c_{bias}} \right] \Bigg|_{u_0} \delta u \quad (21)$$

(19)에서 위성의 위치는 지구 좌표계로 표시되므로 (21)을 구하기 위해서는 (22)의 체인 룰(chain rule)과 지구 고정 좌표계에서의 변수, 그리고 이동 거리와의 변환 관계식을 이용하여야 한다.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial D_N} = \frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} \frac{\partial x_u}{\partial D_N} + \frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} \frac{\partial y_u}{\partial D_N} + \frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} \frac{\partial z_u}{\partial D_N} \quad (22a)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial D_E} = \frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} \frac{\partial x_u}{\partial D_E} + \frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} \frac{\partial y_u}{\partial D_E} + \frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} \frac{\partial z_u}{\partial D_E} \quad (22b)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial D_D} = \frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} \frac{\partial x_u}{\partial D_D} + \frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} \frac{\partial y_u}{\partial D_D} + \frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} \frac{\partial z_u}{\partial D_D} \quad (22c)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial c_{bias}} = 1 \quad (22d)$$

보행항법장치의 초기 위치 및 이동 거리를 이용하여 지구 고정 좌표계에서의 위치($u = [x_u \ y_u \ z_u]$)를 선형화 기준점으로 설정하면 의사거리에 대한 지구 고정 좌표계에서의 위치의 변화율은 다음과 같은 시선벡터로 구할 수 있다[11].

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i}{\partial x_u} & \frac{\partial \rho_i}{\partial y_u} & \frac{\partial \rho_i}{\partial z_u} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{x_u - x_i}{r_i} & \frac{y_u - y_i}{r_i} & \frac{z_u - z_i}{r_i} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

여기서 $r_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}$ 이다

지구 고정 좌표계에서의 보행항법장치의 위치를 나타내면 다음과 같다[11].

$$x_u = (R_e + h_1) \cos L_1 \cos l_1 \quad (24a)$$

$$y_u = (R_e + h_1) \cos L_1 \sin l_1 \quad (24b)$$

$$z_u = (R_e + h_1) \sin L_1 \quad (24c)$$

여기서 R_e 는 지구를 완전한 구로 가정하여 계산된 지구 평균 반지름이다. 그리고

$$\begin{bmatrix} L_1 & l_1 & h_1 \end{bmatrix}^T = \left[L_0 + \frac{D_N}{R_e + h_0 + D_D} \quad l_0 + \frac{D_E \sec L_1}{R_e + h_0 + D_D} \quad h_0 + D_D \right]^T$$

으로 보행항법장치의 초기위치(L_0, l_0, h_0)에서 이동한 현재의 위치를 위도, 경도, 고도로 나타낸 것이다.

(24)를 이용하여 (22)에서 필요한 요소를 다음과 같이 구한다.

$$\frac{\partial x_u}{\partial D_N} = -\sin L_1 \cos l_1 \quad (25a)$$

$$\frac{\partial y_u}{\partial D_N} = -\sin L_1 \sin l_1 \quad (25b)$$

$$\frac{\partial z_u}{\partial D_N} = \cos L_1 \quad (25c)$$

$$\frac{\partial x_u}{\partial D_E} = -\sin l_1 \quad (26a)$$

$$\frac{\partial y_u}{\partial D_E} = \cos l_1 \quad (26b)$$

$$\frac{\partial z_u}{\partial D_E} = 0 \quad (26c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_u}{\partial D_D} &= \cos L_1 \cos l_1 \\ &+ \frac{D_N}{R_e + h_1} \sin L_1 \cos l_1 + \frac{D_E \sec L_1}{R_e + h_1} \sin l_1 \end{aligned} \quad (27a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_u}{\partial D_D} &= \cos L_1 \sin l_1 \\ &+ \frac{D_N}{R_e + h_1} \sin L_1 \sin l_1 - \frac{D_E \sec L_1}{R_e + h_1} \cos l_1 \end{aligned} \quad (27b)$$

$$\frac{\partial z_u}{\partial D_D} = \sin L_1 - \frac{D_N}{R_e + h_1} \cos L_1 \quad (27c)$$

따라서 (23)과 (25)-(27)을 (22)에 대입하고 n 개의 위성에 대한 칼만 필터의 측정치 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$H(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial D_N} & \frac{\partial \rho_1}{\partial D_E} & 0_{1 \times 5} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial D_N} & \frac{\partial \rho_n}{\partial D_E} & 0_{1 \times 5} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

본 논문에서 보행방법은 고도 변화가 없는 평지에서 수행되는 경우를 가정한 것이므로 측정치 행렬은 고도 오차에 대한 부분을 무시하고 구성한 것이다. 따라서 칼만 필터 전체 측정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z(t) = \begin{bmatrix} \rho_{WNS_1} \\ \vdots \\ \rho_{WNS_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_{GPS_1} \\ \vdots \\ \rho_{GPS_n} \end{bmatrix} = H(t)x(t) + v(t), v(t) \sim N(0, R) \quad (29)$$

IV. 시뮬레이션

강결합 기법을 이용한 WNS/GPS의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션의 수행 결과를 제시한다. 먼저 수행할 시뮬레이션의 기준 궤적을 만든 후 그 궤적을 보행할 걸음의 주파수 및 보폭을 결정한다. 신경 회로망을 통하여 학습된 보폭 정보를 이용하여 실제 오차가 포함된 보폭 및 주파수 정보를 생성한 다음 기준 궤적을 보행한 결과를 분석한다. 그 다음 GPS와의 결합 필터를 통하여 보행방법장치의 오차를 추정, 보상한 후의 결과를 선행된 결과와 비교 분석한다. 마지막으로 GPS의 가시 위성의 개수가 4개 이하인 경우에 수행된 시뮬레이션의 결과를 분석함으로써 제시한 결합 기법의 성능을 확인한다. 시뮬레이션의 대상 시스템은 저급 관성 센서로 구성된 IMU를 몸에 장착하고 고도 변화가 없는 지표면을 보행하는 사람이다. 시뮬레이션에서 사용된 궤적은 그림 5와 같으며, 보행 사양 및 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

시뮬레이션 도구는 MATLAB 5.3이고 GPS 관련 함수는 Satellite Navigation Toolbox를 사용한다. GPS 신호의 오차는 수신기 내부 백색 잡음과 다중 경로 오차를 기본적으로 가지며 대류권 오차를 부분적으로 포함한다. 논문에서 제시하는 결과는 몬테칼로 시뮬레이션을 100회 수행하여 평균을 구한 값이다.

그림 6은 순수 보행방법을 수행한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통해서 계산된 방위각은 시간이 지남에 따라 점점 일정한 속도로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 자이로 바이어스에 의한 영향이다. 방위각 오차, 보폭 오차 등의 영향에 의해서 결국 속도 오차와 위치 오차를 유발시킨다. 위치 오차는 점점 증가하며 선형 궤적을 보행하는 경우 2차 함수의 형태로 위치 오차가 발생하게 된다. 보행방법에서는 이동 거리 오차는 매우 작으나 방향을 고려하는 경우 방위각 오차에 의하여 전체 시스템의 오차가 발산하게 되므로 IMU만을 사용하는 보행방법장치 단독으로는 원하는 성능을 얻을 수 없다.

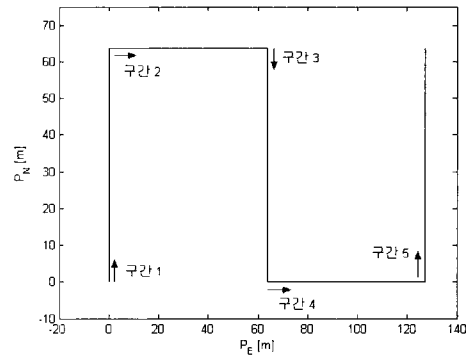
그림 7은 강결합 방식으로 GPS와 결합한 보행방법의 결과이다. 그림 7(a)의 궤적을 보행하면서 이동 방위각이 변하게 되어 칼만 필터의 오차 상태 변수의 가관측성이 향상된다.

표 1. 시뮬레이션 A 조건.

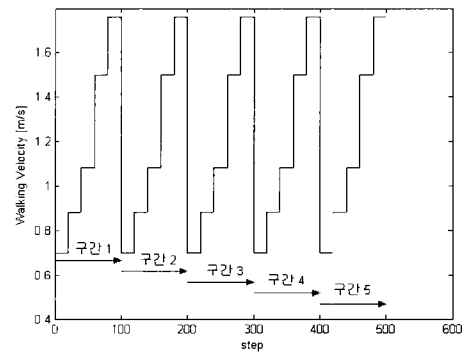
Table I. Conditions of simulation A.

	구간 1	구간 2	구간 3	구간 4	구간 5
걸음 수(step)	0 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500
방위각(deg)	0	90	180	90	0
가시 위성의 수	6	6	6	6	6
매 구간 보행 사양					
걸음 수(step)	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
걸음 주파수(Hz)	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
보폭(m)	0.5	0.55	0.6	0.75	0.8
걸음 속도(m/s)	0.7	0.88	1.08	1.5	1.76

- 자이로의 오차(1 σ) = 0.1 [deg/s]
- 초기 방위각 오차 = 10 [deg]



(a) 보행 궤적

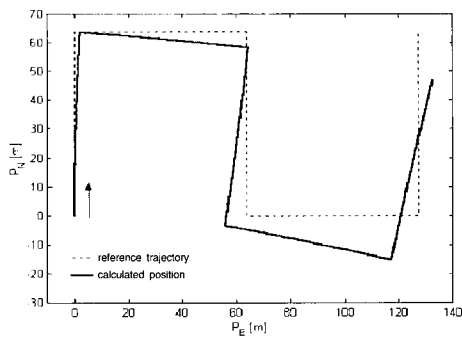


(b) 보행 속도

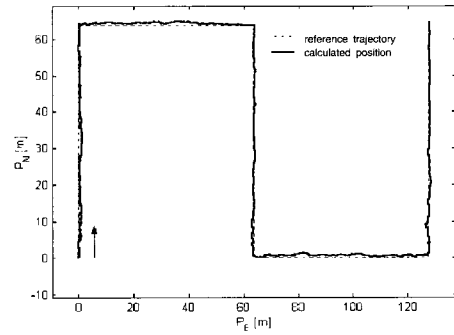
그림 5. 시뮬레이션 궤적.

Fig. 5. Simulation trajectory.

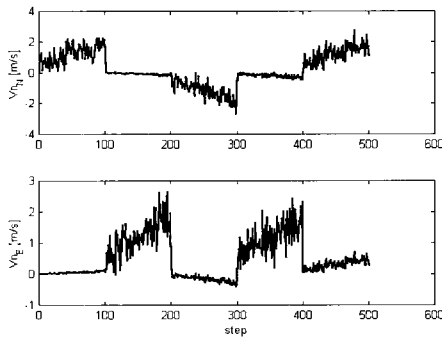
이로 인하여 자이로 바이어스가 정확하게 추정되고 보상됨을 그림 7(d)에서 확인할 수 있다. 또한 그림 7(c)에 의하여 10[deg]의 초기 방위각 오차를 갖고 방법을 수행하는 경우 시간이 지남에 따라 방위각 오차가 잘 보상되는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 다른 오차 상태 변수도 가관측하여 제대



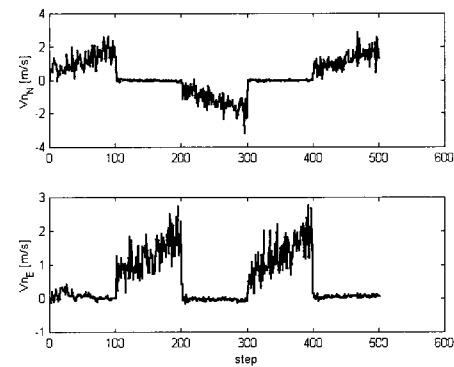
(a) 위치



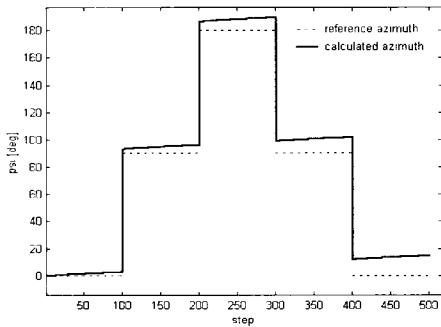
(a) 위치



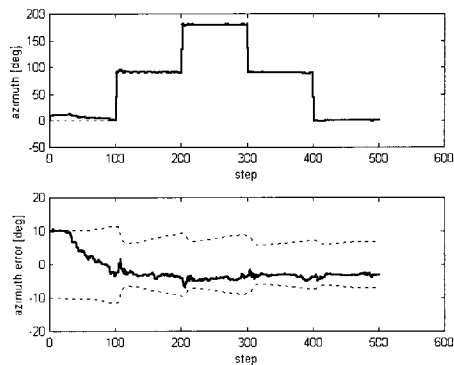
(b) 속도



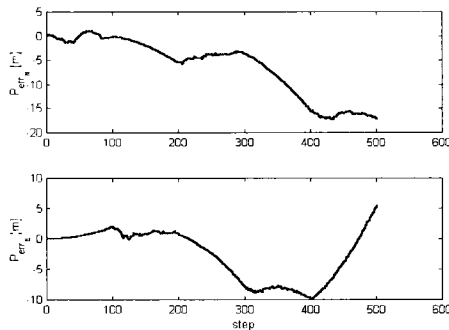
(b) 속도



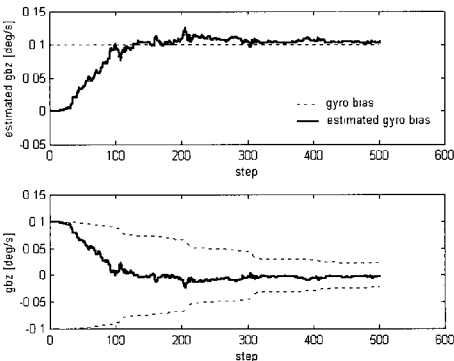
(c) 방위각



(c) 방위각



(d) 위치 오차



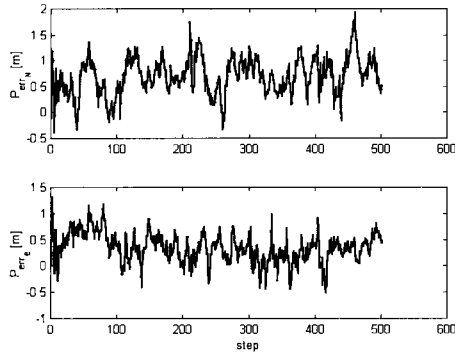
(d) 자이로 바이어스

그림 6. 시뮬레이션 A : 순수 WNS 오차.

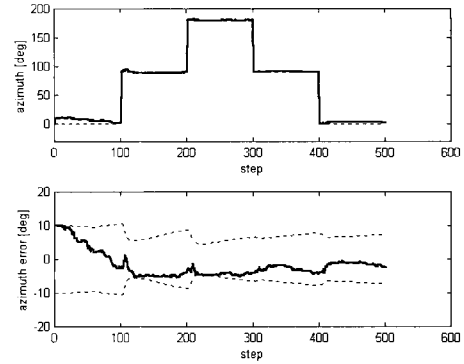
Fig. 6. Simulation A : Errors of pure WNS.

로 추정됨으로써 방위각 뿐 아니라 속도, 위치 정보 또한 정확하게 제공할 수 있음을 알 수 있다. 마지막으로 위치오차도 2[m] 이내에서 동작한다는 것을 확인함으로써 제시한 칼만 필터가 효과적으로 동작함을 알 수 있다.

그림 8은 도심지역에서 항법을 수행하는 경우에 빈번하게 발생할 수 있는 위성의 가시성 약화에 따른 영향을 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 조건은 표 2에 나타내었다.



(e) 위치 오차



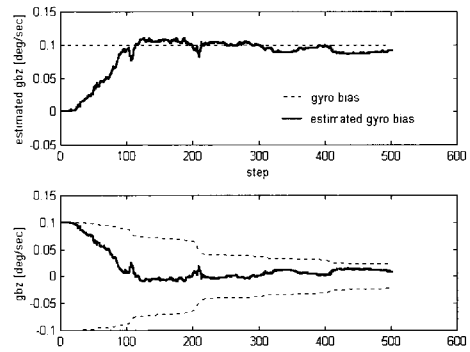
(c) 방위각

그림 7. 시뮬레이션 A : WNS/GPS 오차.
Fig. 7. Simulation A : Errors of WNS/GPS.

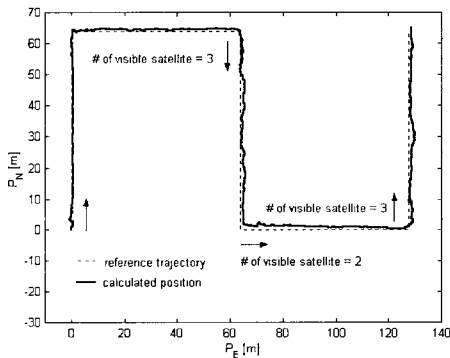
표 2. 시뮬레이션 B 조건.

Table 2. Conditions of simulation B.

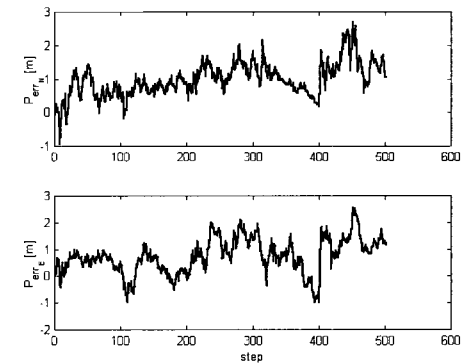
	구간 1	구간 2	구간 3	구간 4
걸음 수(step)	0 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500
가시 위성의 수	6	3	2	3



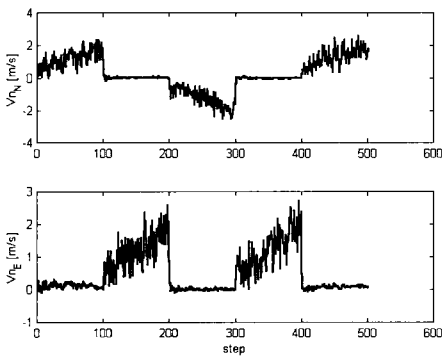
(d) 자이로 바이어스



(a) 위치



(e) 위치 오차



(b) 속도

그림 8. 시뮬레이션 B : 가시 위성의 개수가 4개 미만인 경우의 WNS/GPS 오차.

Fig. 8. Simulation B : Errors of WNS/GPS when the number of visible satellites is less than 4.

시뮬레이션 결과를 통하여 가시 위성의 개수가 3개 이상인 경우에는 오차의 증가 없이 그림 7의 결과와 동일하게 나오는 것을 알 수 있다. 가시 위성의 개수가 2개인 경우.

는 이동 방위각이 변해도 가관측성은 향상되지 않는 것을 그림 8(c), (d)를 통해서 알 수 있다. 그러나 이 구간에서도 칼만 필터는 구동 가능하며, 가시 위성의 개수가 3개 이상인 구간에서 추정된 자이로 바이어스와 방위각 오차에 의해서 전체 시스템의 오차는 크게 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 위치 오차의 경우 가시 위성의 개수가 항상 4개 이상인 경우에 비하여 다소 크기가 커졌으나 그 크기가 3[m]를 넘지 않았으므로써 제시한 강결합 칼만 필터를 이용한 WNS/GPS 결합 기법의 성능의 우수함을 알 수 있다

V. 결론

본 논문에서는 저급 관성센서를 사용하여 개인항법장치를 구성할 때 필요한 오차 모델을 제시하였다. 그리고 강결합 기법을 이용하여 GPS와 결합하기 위한 시스템 및 측정치 모델을 제시하고 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 확인하였다. 가속도계 출력의 적분을 통하여 항법 정보를 계산하지 않고 사람의 걸음 검출을 통하여 항법을 수행하는 경우 항법 정보 계산에 필요한 정보와 계산 주기의 변화에 따른 영향을 고려하여 오차 모델을 유도하였다. GPS와 결합할 때 필요한 측정치의 선형화 과정에서 항법좌표계 상의 이동 거리 오차에 따른 측정치의 변화를 고려하여 측정치를 선형화 하였다. 이를 이용하여 설계한 칼만 필터는 초기 방위각 오차와 자이로 바이어스를 정확하게 추정하며 위치 오차의 발산을 막아준다. 또한 가시 위성의 개수가 4개 미만인 경우에도 강결합 기법의 특징에 의하여 속도 및 위치 오차, 자이로 바이어스, 초기 방위각 오차 등을 제대로 추정, 보상하는 것을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 제시한 알고리즘은 고도에 대한 부분은 무시한 것이므로 실제 환경에서 적용하기 위해서는 이 부분을 고려한 알고리즘이 추후 설계되어야 할 것이다. 이를 위해서 계단보행 등에 의하여 변화된 고도를 계산할 수 있는 보행항법알고리즘 개발이 필요하다.

본 논문에서 제시한 강결합 기법의 WNS/GPS 시스템은 고도 변화가 없는 곳에서 보행항법을 수행 할 때에도 좋은 항법 정보를 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Jay A. Farrell, Matthew Barth, *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] M. S. Grewal, L. R. Weill, A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, Wiley-Interscience, 2001.
- [3] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems : A Model Synthesis*, Academic Press, 1993.
- [4] Robert Grover Brown, Patrick Y. C. Hwang, *Introduction*

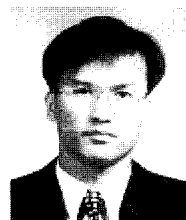
to Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons, 1985.

- [5] H. Liu, G. Pang, "Accelerometer for mobile robot positioning," *Proceedings of IEEE Industry Applications Society Conference*, October 1999.
- [6] 홍진석, 윤선일 지규인, "GPS와 추측항법을 이용한 개인휴대 항법시스템," *제어·자동화·시스템공학회 논문지* 제 7 권 제 5 호, 2001.5.
- [7] 조성윤, 박찬국, "보행항법장치의 모델링 및 오차 보정," *대한전기학회 논문지* 제 51D 권 제 6 호, 2002, 6.
- [8] K. Sagawa, M. Susumago, H. Inooka, "Unrestricted measurement method of Three-dimensional walking distance utilizing body acceleration and terrestrial magnetism," *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.707-710, October 2001.
- [9] Q. Ladetto, "On foot navigation : continuous step calibration using both Kalman filtering," *ION GPS 2000*, pp.1735-1740, September 2000.
- [10] 이준호, 조성윤, 진용, 박찬국, "개인 항법 시스템을 위한 가속도 측정장치의 배치에 따른 보행 특성 분석," *한국 자동제어학술회의 논문집*, 2000.
- [11] 김진원, "GPS 반송파 위상과 INS를 상호 보완적으로 이용한 자세 추정," *서울대학교 대학원 박사학위논문*, 1998.
- [12] M. Cao, A. Kawamura, "A design method of neural oscillatory networks for generation of humanoid biped walking patterns," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, May 1998.
- [13] K. Aminian, Ph. Robert, E. Jequier and Y. Schutz, "Level downhill and uphill walking identification using neural networks," *Electronics Letters* Vol. 29, pp. 563- 1565 , August, 1993.
- [14] K. Aminian, E. Jequier and Y. Schutz, "Estimation of speed and incline of walking using neural network," *IEEE IMTC*, pp.160-162, May 1994.



조 성 윤

1974년 6월 11일생. 1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 동대학원(석사). 2000년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야 : 개인항법시스템, INS/GPS 결합기법, 칼만필터링.



박 찬 국

1961년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1987년 동대학원(석사). 1993년 동 대학원(박사). 1993년 서울대 제어계측신기술연구센터 박사후 연구원. 1994년~현재 광운대학교 제어계측공학과 조교수/부교수. 1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 관심분야는 관성항법시스템 개발, GPS/INS 결합기법, 저급 IMU 응용, 칼만필터 설계.