방위각 개선을 위한 SDINS/GPS/ZUPT 결합 지상 항법 시스템

SDINS/GPS/ZUPT Integration Land Navigation System for Azimuth Improvement

이 태 규* 조 윤 철* 장 석 원* 박 재 용* 성 창 기*
Lee, Tae-Gyoo Cho, Yun-Cheol Jang, Suk-Won Park, Jai-Yong Sung, Chang-Ky

ABSTRACT

This study describes an SDINS/GPS/ZUPT integration algorithm for land navigation systems. The SDINS error can be decoupled in two parts. The first part is the the Schuler component, which does not depend on object motion parameters, and the other is the Non-Schuler part which depends on the product of object acceleration and azimuth error. Azimuth error causes SDINS error in proportion to the traversed distance. The proposed system consists of a GPS/SDINS integration system and an SDINS/ZUPT integration system, which are both realized by an indirect feedforward Kalman filter. The main difference between the two is whether the estimate includes the Non-Schuler error or not, which is decided by the measurement type. Consequently, subtracting GPS/SDINS outputs from SDINS/ZUPT outputs provide the Non-Schuler error information which can be applied to improving azimuth accuracy. Simulation results using the raw data obtained from a van test attest that the proposed SDINS/GPS/ZUPT system is capable of providing azimuth improvement.

주요기술용어(주제어) : SDINS(스트랩다운 관성 항법 장치), GPS(전지구 위치 확인 시스템), ZUPT(영속도 보정), Integration system(결합 시스템), Azimuth(방위각), Kalman filter(칼만 필터)

1. 머리말

관성 항법 시스템(Inertial Navigation System, INS)은 외부 장치의 도움 없이 연속적으로 항법정보를 제공하는데 시간에 따라 항법 오차가 증가하는 특성을 가진다. INS의 오차는 두 부분으로 분리될 수 있는데, 첫째는 동체의 운동과 관계없이 나타나는 Schuler 요소이며, 둘째 요소는 동체의 가속 및 방위각에 관계하는 Non-Schuler 요소이다. INS의 방위각 오차는 동체의 이동 거리에 비례하는 위치 오차를 유발하는 특성을 가진다[1~3].

영속도 보정(ZUPT, Zero velocity UPdaTe)은 동체가 정지했을 때 INS의 속도 정보를 이용하여 오차를 보상하는 방법으로 차량과 같이 지상에서 이동하는 운반체에 적합한 방법이라 할 수 있다. ZUPT는 영속도 사이의 영속도가 아닌 부분은 순수 INS에 의한 항법을 하거나 예측하는 과정을 포함하게 되므로 INS 성능과 ZUPT 최종 단계의 추정치에 의

† 2005년 10월 25일 접수~2006년 2월 15일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
주저자 이메일 : tglee@add.re.kr

한 영향을 받게 된다. 그러나 ZUPT는 매우 손쉽게 구현할 수 있으며 INS의 정지 상태와 관련된 특정한 오차가 보상되므로 그 용도가 다양하다 할 수 있으며 더 나아가 ZUPT를 주기적으로 하지 않더라도 적절히 적용할 수 있다면 INS의 성능 개선을 가져올 수 있다[2~4].

GPS(Global Positioning System)는 위성 항법 시스템으로 세계 전역에서 위치, 속도, 시간을 적절한 수신 장비를 갖춘 사용자에게 공급한다. GPS 항법 오차는 INS와는 달리 시간에 따른 누적이나 증가가 없이 장시간 동안의 안정도를 가진다는 장점이 있으나, 주위의 지리적 환경이나 전파 방해(jamming)등에 의하여 영향을 받는다는 단점을 가진다[5,6].

두 가지 이상의 항법을 병행 또는 부수적으로 이용하는 항법 시스템을 설계할 수 있는데, 그 형태의 하나가 INS와 GPS가 서로의 단점을 보완하는 항법 시스템을 구성하여 보다 정확하고 안정적인 정보를 얻는 방법이다. 그런데 GPS는 지형 및 위성의 배치, 관측되는 위성의 개수 등에 의하여 영향을 받기 때문에 순간적으로 오차가 커지는 경우가 발생할 수 있으며, 더 나아가 항법 해를 제공하지 못할 수 있다. 이러한 경우 GPS/INS 결합시스템은 상대적으로 큰 오차를 유발하게 되거나 안정성이 깨질 우려가 있다[1,7,8].

본 연구에서는 방위각 개선을 위한 SDINS, GPS, ZUPT 결합 지상 항법 시스템을 개발한다. 통합 항법 시스템은 GPS/SDINS 결합시스템과 ZUPT를 이용한 SDINS 보정 시스템으로 구성하였으며, 모두 간접 앞먹임 칼만 필터에 의하여 구현되었다. 두 시스템의 차이는 추정치에 Non-Schuler 오차의 포함 여부이며, 이는 측정치에 의하여 결정된다. 따라서 두 시스템의 추정치를 이용하여 Non-Schuler 오차의 정보를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 방위각 오차를 추정할 수 있다. 결국, 추정된 방위각에 의하여 SDINS/ZUPT 시스템의 성능 향상을 가져올 수 있다. 제시된 시스템은 차량 시험의 raw 데이터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 효용성을 보였다.

2. SDINS 오차모델 및 칼만 필터 설계

지상 항법 시스템의 경우, 항법 좌표계의 수평 채널 위치 및 속도 그리고 자세 오차는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[3,4].

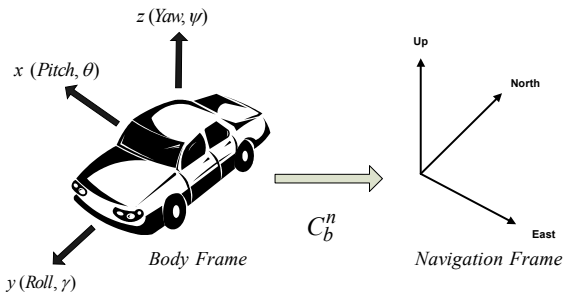
$$\begin{cases} \dot{\delta\lambda} & = R^{-1} \cdot sin\phi \cdot \delta V_E \\ \dot{\delta\phi} & = R^{-1} \cdot \delta V_N \\ \dot{\delta v_E} & = a_N \cdot \Phi_U - G \cdot \Phi_N + \delta a_E \\ \dot{\delta v_N} & = G \cdot \Phi_E - a_E \cdot \Phi_U + \delta a_N \\ \dot{\Phi_E} & = - R^{-1} \cdot \delta v_N - \delta\omega_E \\ \dot{\Phi_N} & = R^{-1} \cdot \delta v_E - \delta\omega_N \\ \dot{\Phi_U} & = R^{-1} \cdot \tan\phi \cdot \delta v_E - \delta\omega_U \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

E, N, U : 항법좌표계 축(동, 북, 위)
$\delta\lambda, \delta\phi$: 경도, 위도 오차
$\delta v_E, \delta v_N$: 속도 오차
Φ_E, Φ_N : 수평 자세 오차
Φ_U : 수직 자세 오차(방위각 오차)
ϕ : 위도
G : 중력 가속도
R : 구형으로 가정한 지구 반경
a_E, a_N : 실제 가속도
$\delta a_E, \delta a_N$: 가속도 오차
$\delta\omega_E, \delta\omega_N, \delta\omega_U$: 각속도 오차

가속도 및 각속도 오차($\delta a_E, \delta a_N$, $\delta\omega_E, \delta\omega_N, \delta\omega_U$)는 동체의 자세($C_b^n$)와 자이로 및 가속도계 오차에 의하여 발생하는 항이며, 더 나아가 가속도 오차는 가속(a_E, a_N)과 관계되는 가속도계 척도계수 오차를 포함하게 된다. SDINS의 수직 채널 오차는 기하급수적으로 증가하므로 다른 센서에 의하여 보정된다고 가정한다. 그림 1에 본 연구에서 대상으로 하는 시스템의 좌표축 및 변환행렬(C_b^n)을 나타내었다.

동체의 가속도 오차($\delta a_x, \delta a_y, \delta a_z$)와 각속도 오차($\delta\beta_x, \delta\beta_y, \delta\beta_z$)를 랜덤 상수로 가정하여 다음과 같은 상태 변수 벡터를 선정할 수 있다.



$$C_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\psi + \sin\theta\sin\gamma\sin\psi & \cos\theta\sin\psi & \sin\gamma\cos\psi - \sin\theta\cos\gamma\sin\psi \\ -\cos\gamma\sin\psi + \sin\theta\sin\gamma\cos\psi & \cos\theta\cos\psi & -\sin\gamma\sin\psi - \sin\theta\cos\gamma\cos\psi \\ -\cos\theta\sin\gamma & \sin\theta & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix}$$

[그림 1] 시스템, 좌표축 및 변환행렬

$$x = [\ \delta\lambda\ \ \delta\phi\ \ \delta v_E\ \ \delta v_N\ \ \Phi_E\ \ \Phi_N\ \ \Phi_U \\ \delta\alpha_x\ \ \delta\alpha_y\ \ \delta\alpha_z\ \ \delta\beta_x\ \ \delta\beta_y\ \ \delta\beta_z]^T \tag{2}$$

식 (1)의 모델과 식 (2)의 상태 변수에 의하여 SDINS 오차는 다음과 같은 상태 공간 모델로 나타낼 수 있다[1,5].

$$x(k) = F(k-1)\cdot x(k-1) + w(k-1) \\ z(k) = H\cdot x(k) + \nu(k) \tag{3}$$

여기서,

$x(k) \in \mathbb{R}^n$: 시스템 상태 변수
$F(k) \in \mathbb{R}^{n\times n}$: 시스템 천이행렬
$w(k) \in \mathbb{R}^m$: 시스템 잡음~ $(0, Q)$
$z(k) \in \mathbb{R}^p$: 측정치
$H \in \mathbb{R}^{p\times n}$: 측정 행렬
$\nu(k) \in \mathbb{R}^p$: 측정 잡음~ $(0, R)$
n, m, p : 시스템, 잡음, 측정치의 차원

식 (3)과 같이 주어진 시스템의 최적 추정(Kalman filter)은 다음과 같이 설계될 수 있다[1,9,10].

Prediction

$$\hat{x}(k/k-1) = F(k-1)\hat{x}(k-1) \\ P(k/k-1) = F(k-1)P(k-1)F(k-1)^T + Q \tag{4}$$

Measurement Update

$$P(k)^{-1} = P(k/k-1)^{-1} + H^T R^{-1} H \\ P(k)^{-1}\hat{x}(k) = P(k/k-1)^{-1}\hat{x}(k/k-1) \\ + H^T R^{-1} z(k) \tag{5}$$

여기서,

$\hat{x}(k/k-1) \in \mathbb{R}^n$: $x(k)$의 선행(priori) 추정치
$\hat{x}(k) \in \mathbb{R}^n$: $x(k)$의 추정치
$P(k/k-1) \in \mathbb{R}^{n\times n}$: 선행 추정오차의 공분산행렬
$P(k) \in \mathbb{R}^{n\times n}$: 추정오차의 공분산행렬

차량이 정지했을 때 SDINS의 항법 속도 출력은 오차를 의미하므로 ZUPT의 경우 식 (2), 식 (3)의 시스템에 대하여 다음과 같은 측정 행렬을 가지게 된다.

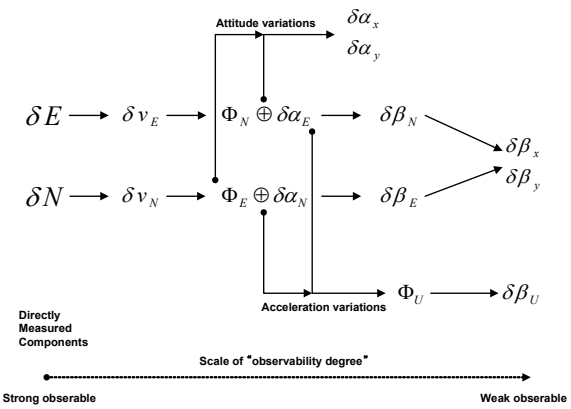
$$H = \begin{bmatrix} 0_{1\times 2} & 1 & 0 & 0_{1\times 9} \\ 0_{1\times 2} & 0 & 1 & 0_{1\times 9} \end{bmatrix} \tag{6}$$

ZUPT는 차량이 이동할 경우 SDINS 정보를 이용하거나 식 (4)의 예측에 의한 정보를 이용한다.

SDINS/GPS 결합의 경우, SDINS 위치와 GPS 위치의 차를 이용할 수 있으며 측정 행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0_{1\times 2} & 0_{1\times 9} \\ 0 & 1 & 0_{1\times 2} & 0_{1\times 9} \end{bmatrix} \tag{7}$$

SDINS/GPS 칼만 필터 역시 GPS 신호가 유용하지 않을 때는 SDINS를 이용하거나 예측 정보를 이용한다. 식 (6), 식 (7)과 동체의 운동에 의하여 설계된 필터의 상태변수에 대한 가관측성이 결정되는데 그림 2에 SDINS 오차 모델에 의한 가관측성에 대하



[그림 2] 가관측성 개념도

여 간략히 도시하였다. 방위각의 추정을 위해서는 가속도의 변화가 있어야 하며, 식 (6), 식 (7)의 측정치에 의하여 가속도의 변화를 가질지라도 가관측성이 우수하지 않음을 알 수 있다[2,3,9].

3. 방위각 추정 및 결합 시스템 구성

본 연구에서는 위치를 이용하여 직접 방위각을 추정하는 기법을 제시한다. SDINS 오차는 다음과 같이 두 부분으로 분리될 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta E &= \delta E^{S} + \delta E^{NS} \\ \delta N &= \delta N^{S} + \delta N^{NS}\end{aligned} \tag{8}$$

여기서, S, NS는 Schuler 오차와 Non-Schuler 오차를 의미하며, $\delta E, \delta N$는 이동 거리 오차이다. 따라서, 식 (1)의 속도 및 자세 오차 역시 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$\begin{cases}\dot{\delta v_E^S} &= -G\cdot\Phi_N^S + \delta a_E \\ \dot{\delta v_N^S} &= G\cdot\Phi_E^S + \delta a_N \\ \dot{\Phi_E^S} &= -R^{-1}\cdot\delta v_N^S - \delta\omega_E \\ \dot{\Phi_N^S} &= R^{-1}\cdot\delta v_E^S - \delta\omega_N\end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases}\dot{\delta v_E^{NS}} &= -G\cdot\Phi_N^{NS} + a_N\cdot\Phi_U \\ \dot{\delta v_N^{NS}} &= G\cdot\Phi_E^{NS} - a_E\cdot\Phi_U \\ \dot{\Phi_N^{NS}} &= R^{-1}\cdot\delta v_E^{NS} \\ \dot{\Phi_E^{NS}} &= -R^{-1}\cdot\delta v_N^{NS}\end{cases} \tag{10}$$

Non-Schuler 속도 오차, 식 (10)은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases}\delta v_E^{NS} &= v_N\cdot\Phi_U \\ \delta v_N^{NS} &= -v_E\cdot\Phi_U\end{cases} \tag{11}$$

여기서, v_E, v_N은 실제 동체의 속도이다. 식 (11)은 다시 다음과 같이 이동 거리의 형태로 나타낼 수 있다.[3]

$$\begin{cases}\delta E^{NS} &= \Delta N\cdot\Phi_U \\ \delta N^{NS} &= -\Delta E\cdot\Phi_U\end{cases} \tag{12}$$

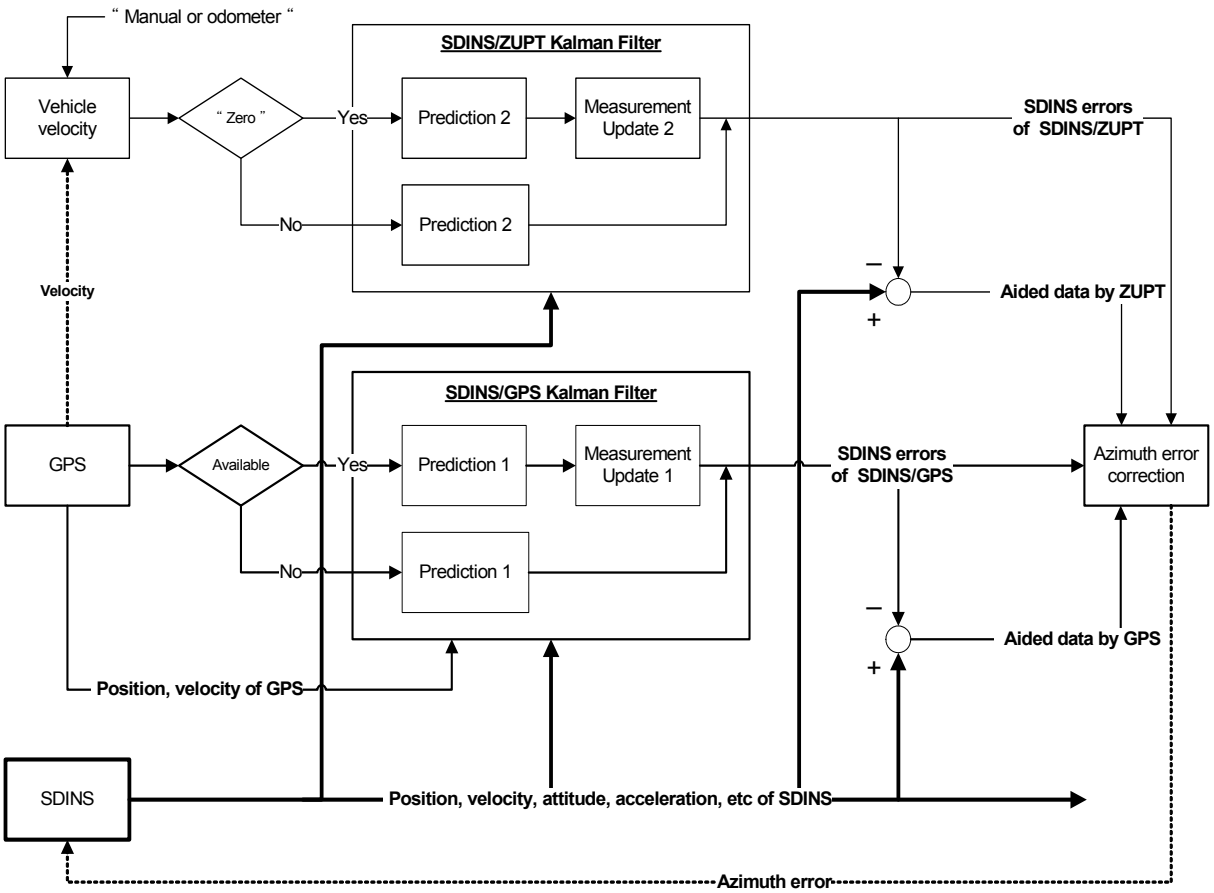
여기서, $\Delta E, \Delta N$은 동체의 이동거리이다. 식 (12)는 SDINS의 잘 알려진 방위각 오차는 이동 거리에 비례하는 오차를 유발한다는 특성을 나타내고 있다. 식 (12)로부터 최소 제곱 추정에 의하여 방위각 오차를 구하면 다음과 같다.

$$\Phi_U = \frac{\Delta N\cdot\delta E^{NS} - \Delta E\cdot\delta N^{NS}}{\Delta E^2 + \Delta N^2} \tag{13}$$

SDINS/ZUPT 시스템은 측정치로 정지 상태에서 속도를 이용하므로 식 (9)의 Schuler 오차에 대한 추정을 한다고 할 수 있다. 즉, ZUPT에 의한 이동거리 오차 추정치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta E^{ZUPT} &\approx \delta E^{S} \\ \delta N^{ZUPT} &\approx \delta N^{S}\end{aligned} \tag{14}$$

여기서, δE^{ZUPT}, δN^{ZUPT}는 ZUPT에 의한 이동거리 오차 추정치이다. 그리고 SDINS/GPS 결합 시스템은 위치를 측정치로 이용하므로 전체적인 위치 오



[그림 3] SDINS/GPS/ZUPT 결합 시스템 구성도

차 정보를 가진다. 즉, SDINS/GPS 결합 시스템의 이동 거리 오차 추정치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta E^{SDINS/GPS} &\approx \delta E \\ \delta N^{SDINS/GPS} &\approx \delta N \end{aligned} \tag{15}$$

여기서, $\delta E^{SDINS/GPS}$, $\delta N^{SDINS/GPS}$는 SDINS/GPS 시스템에 의한 이동거리 오차 추정치이다.

따라서 두 시스템에 의하여 Non-Schuler 오차를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \hat{E}^{NS} &= \delta E^{SDINS/GPS} - \delta E^{ZUPT} \\ \delta \hat{N}^{NS} &= \delta N^{SDINS/GPS} - \delta N^{ZUPT} \end{aligned} \tag{16}$$

결국, 식 (13)과 식 (16)을 이용하여 다음과 같이 방위각 오차를 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_U = & \frac{\Delta N^{SDINS/GPS} \cdot \delta \hat{E}^{NS}}{(\Delta E^{SDINS/GPS})^2 + (\Delta N^{SDINS/GPS})^2} \\ & + \frac{-\Delta E^{SDINS/GPS} \cdot \delta \hat{N}^{NS}}{(\Delta E^{SDINS/GPS})^2 + (\Delta N^{SDINS/GPS})^2} \end{aligned} \tag{17}$$

그림 3에 방위각 추정을 위한 SDINS/GPS/ZUPT 결합 시스템의 구성도를 나타내었다.

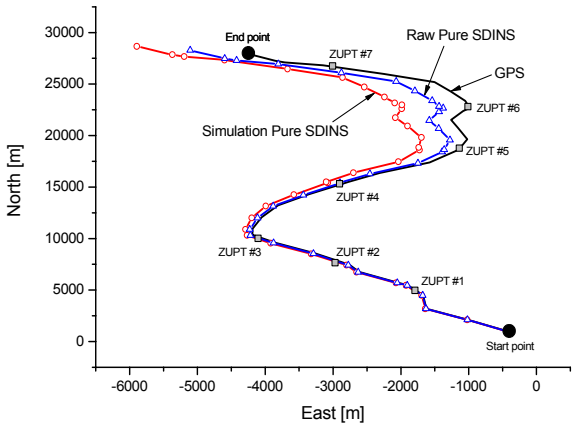
4. Raw 데이터에 의한 시뮬레이션

제시된 SDINS/GPS/ZUPT 결합에 의한 방위각 추정 성능은 그림 4의 궤적에 대한 차량 시험의 센서 raw 데이터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 효용성을 보인다. 시뮬레이션 데이터는 raw 데이터에 x축, y축 자이로에 각각 0.02d/hr, -0.02d/hr의 바이어스를 추가하였다. 이에 따라 정렬에 의하여 raw와 시뮬레이션 데이터의 방위각은 약 -0.13deg 차이를 가지게 된다. 또한, 식 (1)에서 알 수 있듯이 자이로 오차 및 방위각 오차의 차이에 의하여 SDINS 순수 항법 오차 역시 다르게 나타난다.

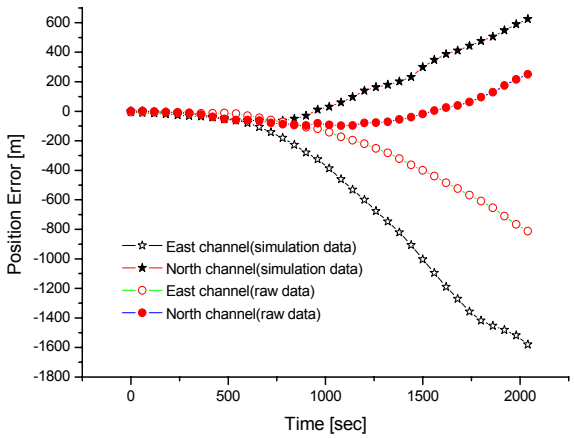
본 연구에서의 위치 오차는 SDINS/GPS 결합 칼만 필터(DGPS를 이용하여 성능을 평가한 결과 GPS에 비하여 1.5~2배 성능이 우수한 것으로 판정된 시스템)를 기준으로 한다.

그림 4와 그림 5에 raw 및 시뮬레이션에 의한 궤적 및 순수 항법 오차를 도시하였다. 자이로 바이어스 인가에 의하여 오차가 매우 증가함 알 수 있다.

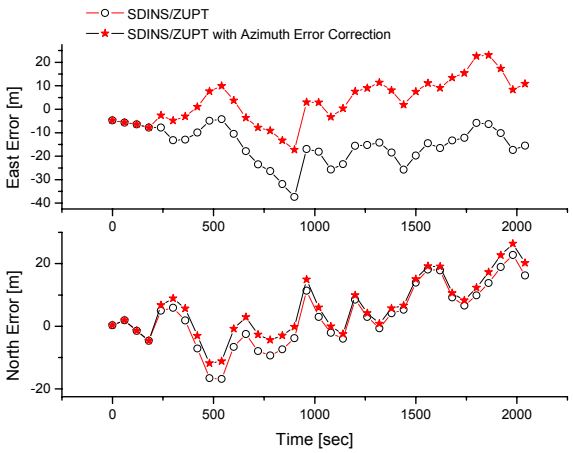
그림 4에 ZUPT 위치를 나타내고 있으며 영속도 시간은 30~60sec 이다. 그림 6과 7의 -○-는 raw 및 시뮬레이션에 의한 SDINS/ZUPT 오차를 나타내고 있다. 순수 항법 오차의 증가에 따라 시뮬레이션



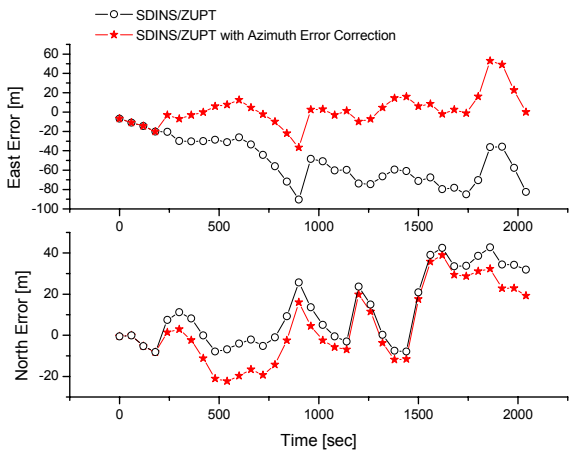
[그림 4] 이동궤적



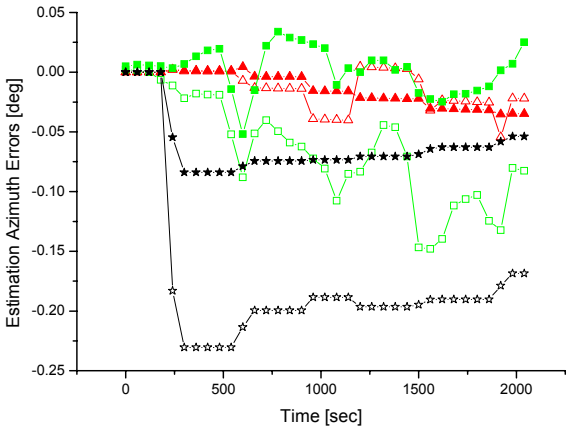
[그림 5] SDINS 순수항법오차



[그림 6] ZUPT를 포한한 시스템의 항법오차 (Raw Data)



[그림 7] ZUPT를 포한한 시스템의 항법오차 (Simulation Data)



[그림 8] 방위각 오차 추정 특성

-▲- : SDINS/ZUPT에 의한 방위각 추정(Raw)
-△- : SDINS/ZUPT에 의한 방위각 추정(Simulation)
-■- : SDINS/GPS에 의한 방위각 추정(Raw)
-□- : SDINS/GPS에 의한 방위각 추정(Simulation)
-★- : SDINS/GPS/ZUPT에 의한 방위각 추정(Raw)
-☆- : SDINS/GPS/ZUPT에 의한 방위각 추정(Simulation)

[표 1] Raw 및 시뮬레이션 데이터 비교

구분	Raw	Simulation
센서 데이터	궤적(그림 4)의 실제 자이로, 가속도계 데이터	Raw 센서 데이터에 x-자이로에 0.02d/hr y-자이로에 -0.02d/hr 추가
방위각 오차	δHdeg	δH+0.13deg
항법 오차	- SDINS 그림 5의 -●-와 -○- - SDINS/ZUPT 그림 6의 -○- - SDINS/ZUPT+방위각보정 그림 6의 -★-	- SDINS 그림 5의 -★-와 -☆- - SDINS/ZUPT 그림 7의 -○- - SDINS/ZUPT+방위각보정 그림 7의 -★-
방위각 오차 추정	- ZUPT : 그림 8의 -▲- - SDINS/GPS 그림 8의 -■- - SDINS/GPS/ZUPT 그림 8의 -★-	- ZUPT : 그림 8의 -△- - SDINS/GPS 그림 8의 -□- - SDINS/GPS/ZUPT 그림 8의 -☆-

에 의한 오차가 다소 크게 나타남을 알 수 있으며, ZUPT에 의하여 순수 항법 오차를 현저히 개선할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 raw 및 시뮬레이션 데이터에 대한 각 시스템에 의한 방위각 오차 추정 특성을 나타내고 있다. 이 경우 raw 데이터와 시뮬레이션 데이터는 방위각의 차이가 -0.13deg를 가지고 있으므로 두 데이터 간의 추정치는 -0.13deg에 준하는 값을 가져야 한다. 따라서 SDINS/ZUPT에 의한 방위각 오차 추정(-▲-, -△-)을 나타내고 있는데, 이 경우 추정이 거의 이루어지고 있지 않음을 알 수 있으며, SDINS/GPS에 의한 방위각 오차 추정(-■-, -□-)은 어느 정도 이루어지나 수렴성이 좋지 않음을 알 수 있다. 제시된 SDINS/GPS/ZUPT(-★-, -☆-)의 경우 앞의 두 경우에 비하여 추정 성능이 우수함을 그림 8로부터 파악할 수 있다. 그림 6, 7의 -★-는 SDINS/ZUPT에 제시된 방법에 의한 추정 방위각 오차를 이용하여 Non-Schuler 오차를 보상한 결과이다.

표 1에 시뮬레이션 조건 및 그림 4-그림 8에 대하여 간략히 정리하였다.

5. 맺음말

본 연구에서는 SDINS의 오차 특성과 SDINS/GPS 그리고 SDINS/ZUPT의 추정특성을 이용하여, 방위각 개선을 위한 SDINS/GPS/ZUPT 결합 알고리즘을 제시하였으며, 차량 시험 raw 데이터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 효용성을 보였다.

지상 항법 시스템의 경우 일반적으로 방위각 오차에 의한 오차에 비하여 시간에 의한 오차가 크게 나타난다. 만약, 지상 항법 차량이 단시간에 장거리를 이동하는 장치를 탑재하고 이동하며, 그 장치가 지상 항법 장치의 방위각을 이용하여 전달정렬을 한다고 하면 제시된 기법은 보다 더 유용할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 이태규, 김광진, 제창해, “INS/GPS 결합 칼만필터의 측정치 스무딩 및 예측”, 제어, 자동화, 시스템 공학회. Vol. 7. No. 11, Nov. 2001.

[2] 박홍원, 분산계층형 스무딩 필터 및 보조 관성항법 시스템에의 응용, 공학박사학위논문, 1995, 2. 서울대학교 제어계측공학과.
[3] O. Salychev, Inertial Systems in Navigation and Geophysics, Bauman MSTU Press Moscow, 1998.
[4] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology,* Peper Peregrinus Ltd, 1997.
[5] S. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, 1993.
[6] P. H. Dana, Global positioning system overview, University of Texas, 1994.
[7] C. D. Evans, Design and Analysis of integrated navigation systems using real INS and GPS data, AFIT/GE/ENG, 1994.
[8] R. M. Rogers, "Kalman Filter inertial navigation system error model based on filter stability consideration", AIAA-94-3547.CP, pp.65~70, 1994.
[9] P. S. Maybeck, Stochastic models, estimation and control volume 1, Academic Press, 1979.
[10] 박영범, INS/GPS/속도계 결합항법시스템의 구성 및 성능분석, 공학석사학위논문, 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 2001. 2.