

분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터 구현

An Implementation of a Decoupled GPS/DR Integration Kalman Filter

서 흥 석, 성 태 경, 이 상 정
(Hung Seok Seo, Tae Kyung Sung, and Sang Jeong Lee)

Abstract : In order to improve the performance of a GPS/DR integration system, the error sources of DR sensors should be modeled accurately, This results in the increase in the dimension of the integration filter and, consequently, computational load becomes large. To reduce the computational load, suggested in this paper is a decoupled GPS/DR integration scheme that consists of two cascaded Kalman filters. The GPS velocity output is used in the first filter to calibrate the DR sensor and to fix the velocity as well. The velocity from the first filter is fed to the second filter where the position is corrected using the GPS position output. Experimental results show that the proposed integration scheme has positioning performance comparable to the conventional coupled one, while its computation is reduced to about 2/3.

Keywords : GPS, dead reckoning, decoupled GPS/DR integration filter

I. 서론

최근 GPS 는 각종 항법 시스템에서 항체의 위치를 구하는데 많이 활용되고 있다[8]. GPS 를 이용할 경우 시간에 따른 오차 증가는 없으나, 도심과 같이 가시위성의 확보가 어려운 지역에서는 항법해를 구할 수 없는 경우가 종종 발생한다. DR(Dead Reckoning)은 GPS 와는 달리 외부의 환경에 영향을 받지 않고 항법을 수행할 수 있으나, 센서에 대한 보정을 수행하지 않을 경우에는 항법해의 오차가 계속해서 증가하는 단점이 있다. 이 두 시스템을 통합한 GPS/DR 통합 시스템은 두 시스템간에 상호 보완적인 관계를 유지할 수 있으며, 최근에는 두 시스템의 통합 필터에 대한 연구가 널리 진행되고 있다[1] [3] - [6] [9] - [13]. 차량 항법용 DR 센서로는 일반적으로 진동형 자이로스코프(혹은 지자기 센서)와 차속센서(혹은 가속도계)를 이용한다. 이중에서 지자기 센서는 절대적인 항체 자세각을 알아낼 수 있다는 장점은 있으나 지구 자장 이외에 외부의 자기장에 영향을 받는 특성이 있다는 단점이 있으며, 가속도계는 장착의 편리성은 좋으나 항체의 가속도 이외에 지구 중력의 영향을 받는다는 단점이 있다. 따라서, 최근에 발표되고 있는 다수의 논문 중 대부분의 경우는 DR 센서로 진동형 자이로스코프와 차속센서만을 이용하거나[5] [11] - [13], 이들 센서 이외에 고도 측정용 센서나 가속도계를 추가로 사용한다[1] [3].

진동형 자이로스코프(이하 자이로스코프)의 출력은 바이어스 오차와 환산계수 오차를 포함하며, 차속센서의 출력은 환산계수 오차를 포함하고 있다. 따라서 정

확한 DR 센서 보정을 위해서는 이러한 오차 성분을 포함하는 오차 모델을 이용하여야 한다[1] [3] [13]. DR 오차 모델을 이용한 기존의 일반적인 통합 방법에서는 GPS 위치 정보만을 이용하여 DR 센서의 오차 요소를 보정하였으나[1] [3] [5] [11], GPS 위치 해에 포함되어 있는 바이어스 오차로 인하여 부정확한 보정이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에 제안된 반송파 정보를 이용한 GPS/DR 통합 방법은 GPS 속도 및 위치 측정치를 이용하여 하나의 필터 내에서 DR 센서의 오차 요소와 속도 및 위치에 대한 보정을 수행한다[13]. 그러나 이 통합 방법은 상태변수의 차수가 높기 때문에 계산량이 많다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이와 같은 단점을 해결하기 위해 오차 모델을 속도 오차 모델과 위치 오차 모델로 분리하여 2 개의 필터를 이용하는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터를 제안하였다. 제안된 통합 필터는 두개의 칼만 필터가 직렬 연결(cascade connection)로 구성되어 있으며, 첫 번째 칼만 필터에서 GPS 반송파 속도 측정치를 이용하여 DR 센서 및 속도에 대한 보정을 수행하고, 두 번째 칼만 필터에서 GPS 코드 위치 측정치를 이용하여 DR 위치에 대한 보정을 수행한다. 제안한 분리형 통합 방법은 하나의 필터를 이용하는 기존의 비분리형 통합 방법과 비교할 때 같은 측정치를 이용하면서도 차수가 낮은 2 개의 필터로 구성이 되어있기 때문에 기존의 성능을 유지하면서도 계산량을 대폭 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 기존의 비분리형 통합 방법과 본 논문에서 제안하는 분리형 GPS/DR 통합 방법에 대해서 설명한다. 3 장에서는 실험을 통하여 기존의 통합 방법과 제안된 통합 방법의 성능을 평가하고, 마지막으로 4 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

접수일자 : 2000. 2. 24., 수정완료 : 2000. 6. 2.

서흥석 : 충남대학교

성태경, 이상정 : 충남대학교 정보통신공학부

※ 본 연구는 1997 년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제연구비에 의하여 연구되었음.

II. 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터

1. 반송파 속도 정보를 이용한 비분리형의 GPS/DR 통합 칼만 필터

본 논문에서는 차속센서와 자이로스코프를 이용하여 DR 센서를 구성하였다. GPS/DR 통합 항법 알고리즘을 구현하기 위해서는 DR 센서의 오차 모델이 필요하며, 차속센서와 자이로스코프로 구성된 DR 센서에 대한 기존의 오차 모델은 크게 두 가지로 구분 할 수 있다. 첫 번째 모델은 DR 센서의 오차 모델을 간략화 하여 방위각 오차와 차속센서의 환산계수 오차만을 상태 변수로 사용하는 방법이고 [5] [11], 다른 모델은 방위각 오차와 차속센서의 환산계수 오차 뿐만 아니라 자이로스코프의 환산계수 오차 및 자이로스코프의 출력 바이어스 전압 오차도 상태 변수에 포함하는 방법이다 [1] [13]. 후자의 방법을 이용하면 자이로스코프 환산계수 및 자이로스코프 출력 바이어스 전압을 연속적으로 추정하여 DR 센서의 보정에 사용할 수 있다. 그러므로 센서의 오 장착에 대한 보상이나 항체의 장시간 운항 상태의 자이로스코프 바이어스 보정이 가능하며, 그 결과 GPS 신호가 장시간 차단될 경우에도 전자의 방법 보다 정확한 위치해를 구할 수 있다. 그러나 상태 변수가 8 개가 되기 때문에 칼만 필터의 계산량이 증가하는 단점을 갖는다.

GPS 반송파 속도 정보는 GPS 코드 위치 정보에 비하여 상대적으로 매우 작은 약 0.5m/sec (SPS, Standard Positioning Service)의 오차를 가지며, 편향 오차도 매우 작다 [10]. 따라서 이를 이용하면 가시위성이 바뀌거나 가시 위성의 개수가 변화하여 GPS 코드 위치 해에 편향 오차가 변경되는 경우에도 정확한 항법 해를 구할 수 있다 [13]. GPS 반송파 정보를 이용하는 GPS/DR 통합 칼만 필터의 경우 DR 센서 오차 및 속도 오차는 GPS 반송파 속도 정보를 이용하여 보정하고 DR 위치 오차는 GPS 코드 위치 정보를 이용하여 보정한다. GPS 반송파 속도 정보를 이용하여 DR 센서를 보정하기 위해서는 오차 방정식에서 속도 오차가 DR 센서 오차와 연관되어야 한다. 반송파 정보를 이용한 GPS/DR 통합 칼만 필터에서의 오차 방정식은 (1)과 같다 [13].

(1)에서 Δt 는 측정주기, $\delta p_E(k)$ 와 $\delta p_N(k)$ 는 각각 동쪽과 북쪽 방향의 위치 오차, $\delta v_E(k)$ 과 $\delta v_N(k)$ 는 각각 동쪽, 북쪽 방향의 속도 오차이고, $\delta \psi(k)$ 는 항체 자세각 오차, $Sf_G(k)$ 과 $\delta Sf_G(k)$ 는 각각 자이로스코프 환산계수와 이의 오차, $V_{nom}(k)$ 과 $\delta V_{nom}(k)$ 은 각각 자이로스코프 바이어스 전압과 이의 오차, $V_g(k)$ 는 자이로스코프의 출력 전압, $Sf_N(k)$ 과 $\delta Sf_N(k)$ 은 각각 차속 센서 환산계수와 이의 오차이다. 그리고, $s(k)$ 는 차량 진행 방향으로의 속도, $\bar{V}_g(k)$ 는 Δt 동안의 자이로스코프 출력 평균 전압이고, $Sf_N(k)$ 와 $Sf_G(k)$ 및 $V_{nom}(k)$ 는 측정 주기(Δt)동안 일정하다고 가정하였다. $w(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{w(k)\}=Q(k)$ 을 갖는다.

기존의 반송파 속도 정보를 이용한 GPS/DR 통합 방법에서는 GPS의 코드 위치 및 반송파 속도 정보를

측정치로 사용하며, 다음과 같은 측정 방정식을 갖는다 [13]. (2)에서 $u(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{u(k)\}=R(k)$ 을 갖는다.

2. 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터

기존의 GPS 반송파 정보를 이용한 비분리형 통합 칼만 필터의 경우 GPS 반송파 정보를 이용하여 DR 센서에 대한 보정을 수행하기 때문에 보다 정확한 센서 보정이 가능하다. 그러나, 이 방법은 필터의 차수가 높기 때문에 계산량이 많다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이와 같은 단점을 해결하기 위해 속도 오차 모델과 위치 오차 모델을 분리하여 2 개의 필터를 이용하는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터를 제안한다. 제안된 통합 필터는 두 개의 분리된 필터로 구성되어 있으며, 첫 번째 필터에서 GPS 반송파 속도 측정치를 이용하여 DR 센서 오차 및 속도 오차에 대한 보정을 수행한다. 그리고 보정된 정보를 이용하여 새로이 위치를 추정하고 두 번째 필터에서 추정된 위치의 오차를 계산하여 위치를 보정한다.

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k) \hat{x}(k) + w(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & s(k) & \sin\psi(k)/Sf_N(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -s(k) & \sin\psi(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & (V_g(k) - V_{nom}(k)) \Delta t & -Sf_G(k) \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \\ \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{p_E}(k) \\ w_{p_N}(k) \\ w_{v_E}(k) \\ w_{v_N}(k) \\ w_{\psi}(k) \\ w_{Sf_G}(k) \\ w_{V_{nom}}(k) \\ w_{Sf_N}(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\delta z(k) = \begin{bmatrix} p_{E,DR}(k) - p_{E,GPS}(k) \\ p_{N,DR}(k) - p_{N,GPS}(k) \\ v_{E,DR}(k) - v_{E,GPS}(k) \\ v_{N,DR}(k) - v_{N,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \\ \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{p_E}(k) \\ u_{p_N}(k) \\ u_{v_E}(k) \\ u_{v_N}(k) \end{bmatrix} = H(k) \cdot \delta x(k) + u(k) \quad (2)$$

$$\delta x(k+1) = \Phi(k) \delta x(k) + \underline{w}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s(k) \cos\psi(k) & 0 & 0 & s(k) \sin\psi(k)/Sf_N(k) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -s(k) \sin\psi(k) & 0 & 0 & s(k) \cos\psi(k)/Sf_N(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (\bar{V}_g(k) - V_{nom}(k)) \Delta t & -Sf_G(k) \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \\ \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{p_E}(k) \\ w_{p_N}(k) \\ w_{v_E}(k) \\ w_{v_N}(k) \\ w_{\psi}(k) \\ w_{Sf_G}(k) \\ w_{V_{nom}}(k) \\ w_{Sf_N}(k) \end{bmatrix} = \Phi(k) \cdot \delta x(k) + \underline{w}(k) \quad (3)$$

$$\delta z_v = \begin{bmatrix} v_{E,DR}(k) - v_{E,GPS}(k) \\ v_{N,DR}(k) - v_{N,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{v_E}(k) \\ v_{v_N}(k) \end{bmatrix} = H_v(k) \cdot \delta x_v(k) + \underline{v}_v(k) \quad (4)$$

첫 번째 칼만 필터의 오차 방정식 및 측정 방정식은 앞에서 설명한 비분리형 통합 필터의 오차 방정식과

측정 방정식 중에서 속도 오차 및 DR 센서 오차에 관한 성분만을 분리하여 구성하였으며, 이를 각각 (3)과 (4)에 나타내었다. (3)과 (4)에서 $\underline{w}_v(k)$ 와 $\underline{v}_v(k)$ 는 서로 독립인 백색잡음이며, 각각 공분산 $\text{cov}\{\underline{w}_v(k)\} = \underline{Q}_v(k)$, $\text{cov}\{\underline{v}_v(k)\} = \underline{R}_v(k)$ 로 표시한다.

두 번째 칼만 필터의 오차 방정식을 유도하기 위하여 (1)의 기존의 오차 방정식으로부터 위치 오차에 관한 부분만을 표시하면 다음과 같다.

$$\delta \underline{x}_p(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{pE}(k) \\ w_{pN}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\equiv \Phi_p(k) \cdot \delta \underline{x}_p(k) + \Delta t \cdot I_{2 \times 2} \cdot \delta \underline{v}(k) + \underline{w}_p(k)$$

식에서 $\underline{w}_p(k)$ 는 백색잡음이며, 공분산 $\text{cov}\{\underline{w}_p(k)\} = \underline{Q}_p(k)$ 와 이의 오차 $\underline{\omega}_v(k)$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 경우 (5)을 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 두 번째 칼만 필터의 오차 방정식으로 사용한다. 만일 첫 번째 칼만 필터에서 속도 오차를 정확하게 추정하였다면 추정된 속도 오차에 포함되어 있는 오차 $\underline{\omega}_v(k)$ 의 크기는 0이다.

$$\delta \underline{x}_p(k+1) \equiv \Phi_p(k) \cdot \delta \underline{x}_p(k) + \Delta t \cdot I_{2 \times 2} \cdot [\delta \hat{v}(k/k) + \underline{\omega}_v(k)] + \underline{w}_p(k) \quad (6)$$

$$\equiv \Phi_p(k) \cdot \delta \underline{x}_p(k) + \Delta t \cdot \delta \hat{v}(k/k) + \Delta t \cdot \underline{\omega}_v(k) + \underline{w}_p(k)$$

$$\equiv \Phi_p(k) \cdot \delta \underline{x}_p(k) + \Delta t \cdot \delta \hat{v}(k/k) + \underline{w}(k)$$

식에서 $\underline{\omega}_v(k)$ 와 $\underline{w}_p(k)$ 를 서로 상관 관계가 없는 백색잡음으로 가정하면 $\underline{w}(k)$ 는 공분산 $\text{cov}\{\underline{w}(k)\} = \underline{Q}'(k)$ 를 갖는다. 두 번째 칼만 필터의 측정 방정식은 (2)에서 위치 측정치 부분을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta \underline{z}_p = \begin{bmatrix} p_E(k) - p_{E,GPS}(k) \\ p_N(k) - p_{N,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{pE}(k) \\ v_{pN}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\equiv H_p(k) \cdot \delta \underline{x}_p(k) + \underline{v}_p(k)$$

식에서 $\underline{v}_p(k)$ 는 백색잡음이며, 공분산 $\text{cov}\{\underline{v}_p(k)\} = R_p(k)$ 를 갖는다.

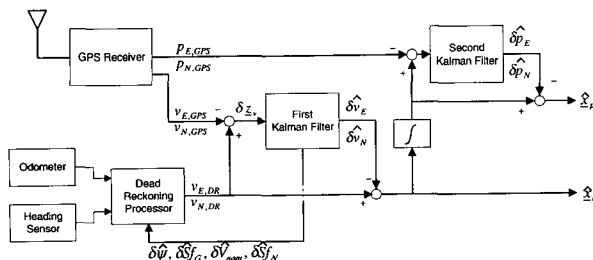


그림 1. 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터.

Fig. 1. A decoupled GPS/DR integration Kalman filter.

본 논문에서 제안하는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터의 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 통합 방법에서는 두 개의 분리된 칼

만 필터에서 각각 GPS 반송파와 속도 정보를 이용하여 DR 센서 오차 및 속도 오차를 보정하고 GPS 코드 위치 정보를 이용하여 위치 오차를 보정한다. 이 방법을 사용할 경우에는 하나의 필터로 구성되어진 기존의 비분리형 통합 방법보다 계산량을 대폭 줄일 수 있다. 각각의 통합 칼만 필터를 조셉형(Joseph form) 칼만 필터로 구현하였을 때 한번의 시간 갱신(time update) 및 측정치 갱신(measurement update)에 필요로 하는 연산 횟수를 표 1에 나타내었다[7]. 표에서 보는 바와 같이 제안된 통합 필터는 기존의 비분리형 통합 필터와 비교하여 덧셈은 약 36%, 곱셈은 약 41%을 필요로 한다.

$$P^-(k) = \Phi(k) \cdot P^-(k-1) \cdot \Phi(k)^T + Q(k)$$

$$= \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & \Delta t \cdot I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} & \Phi_{v \rightarrow DR} \\ 0 & 0 & \Phi_{DR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{p \rightarrow p} & P_{p \rightarrow v} & P_{p \rightarrow DR} \\ P_{v \rightarrow p} & P_{v \rightarrow v} & P_{v \rightarrow DR} \\ P_{DR \rightarrow p} & P_{DR \rightarrow v} & P_{DR \rightarrow DR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & \Delta t \cdot I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} & \Phi_{v \rightarrow DR} \\ 0 & 0 & \Phi_{DR} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} Q_p & 0 & 0 \\ 0 & Q_v & 0 \\ 0 & 0 & Q_{DR} \end{bmatrix}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} P_{p \rightarrow p}^- & P_{p \rightarrow v}^- & P_{p \rightarrow DR}^- \\ P_{v \rightarrow p}^- & P_{v \rightarrow v}^- & P_{v \rightarrow DR}^- \\ P_{DR \rightarrow p}^- & P_{DR \rightarrow v}^- & P_{DR \rightarrow DR}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_{p \rightarrow p}^- = P_{p \rightarrow p} + \Delta t \cdot P_{p \rightarrow v}^T + \Delta t \cdot (P_{p \rightarrow v} + \Delta t \cdot P_{v \rightarrow v}) + Q_p$$

$$P_{p \rightarrow v}^- = P_{p \rightarrow v} + \Delta t \cdot P_{v \rightarrow v} + (P_{p \rightarrow DR} + \Delta t \cdot P_{v \rightarrow DR}) \cdot \Phi_{v \rightarrow DR}^T + Q_{pv}$$

$$P_{p \rightarrow DR}^- = (P_{p \rightarrow DR} + \Delta t \cdot P_{v \rightarrow DR}) \cdot \Phi_{DR}^T$$

$$P_{v \rightarrow p}^- = P_{v \rightarrow p} + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P_{p \rightarrow DR}^T + (P_{v \rightarrow DR} + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P_{DR \rightarrow DR}) \cdot \Phi_{v \rightarrow DR}^T + Q_v$$

$$P_{v \rightarrow DR}^- = (P_{v \rightarrow DR} + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P_{DR \rightarrow DR}) \cdot \Phi_{DR}^T + Q_{v,DR}$$

$$P_{DR \rightarrow DR}^- = \Phi_{DR} \cdot P_{DR \rightarrow DR} \cdot \Phi_{DR}^T + Q_{DR}$$

$$K(k) = P^-(k) \cdot H(k)^T \cdot [H(k) \cdot P^-(k) \cdot H(k)^T + R(k)]^{-1}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} K_{p \rightarrow p}(k) & K_{v \rightarrow p}(k) \\ K_{p \rightarrow v}(k) & K_{v \rightarrow v}(k) \\ K_{p \rightarrow DR}(k) & K_{v \rightarrow DR}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K_{p \rightarrow p}(k) = P_{p \rightarrow p}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} + P_{p \rightarrow v}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} \cdot I_{2 \times 2} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot X^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^T \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1}$$

$$K_{p \rightarrow v}(k) = -P_{p \rightarrow v}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} + I_{2 \times 2} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot X^{-1}$$

$$K_{p \rightarrow DR}(k) = P_{p \rightarrow DR}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} + P_{p \rightarrow v}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot P_{p \rightarrow DR}^- \cdot X^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^T \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1}$$

$$K_{v \rightarrow p}(k) = -P_{v \rightarrow p}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot P_{p \rightarrow v}^T \cdot X^{-1}$$

$$K_{v \rightarrow DR}(k) = P_{v \rightarrow DR}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} + P_{v \rightarrow DR}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot P_{p \rightarrow DR}^- \cdot X^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^T \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1}$$

$$K_{v \rightarrow DR}(k) = -P_{v \rightarrow DR}^- \cdot (P_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}^- \cdot P_{p \rightarrow DR}^- \cdot X^{-1}$$

$$R(k) \equiv \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix}$$

$$X \equiv P_{v \rightarrow v} + R_v - P_{p \rightarrow v}^T \cdot (P_{p \rightarrow p} + R_p)^{-1} \cdot P_{p \rightarrow v}$$

$$\delta \hat{\underline{x}}(k) = \begin{bmatrix} \delta \hat{\underline{x}}_p(k) \\ \delta \hat{\underline{x}}_v(k) \end{bmatrix} = K(k) \cdot \begin{bmatrix} \delta \underline{z}_p(k) \\ \delta \underline{z}_v(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} K_{p \rightarrow p}(k) & K_{v \rightarrow p}(k) \\ K_{p \rightarrow v}(k) & K_{v \rightarrow v}(k) \\ K_{p \rightarrow DR}(k) & K_{v \rightarrow DR}(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta \underline{z}_p(k) \\ \delta \underline{z}_v(k) \end{bmatrix}$$

제안한 분리형 통합 필터는 두개의 칼만 필터가 직렬로 연결된 구조를 갖는다. 그러므로 첫 번째 필터에서 추정된 속도 정보가 두 번째 필터의 입력으로 제공된다. 만일 GPS 반송파와 속도 측정치의 잡음과 GPS

표 1. 통합 필터 수행시 필요한 계산량(조셉형 칼만 필터 기준).

Table 1. Comparisons of operations.

	계산 횟수(회)		
	덧셈	곱셈	나눗셈
비분리형 통합 필터	14316	18168	7
분리형 통합 필터	5220	7512	6

코드 위치 측정치의 잡음 사이에 상관관계가 있다면 두 번째 필터의 시스템 공정 잡음과 측정치 잡음 사이에 상관 관계가 존재하게 되며, 이러한 경우에는 칼만 필터의 공분산 및 칼만 이득을 계산할 때에 상관 오차에 대한 성분이 포함되어야 한다[4]. 그러나 GPS 반송파를 이용하여 생성하는 속도 측정치의 잡음은 GPS 코드를 이용하여 생성하는 위치 측정치의 잡음과 상관 관계가 아주 작기 때문에 [2] [8] 두 번째 필터에서도 칼만 필터 수식의 변형 없이 일반적인 칼만 필터를 그대로 적용할 수 있다.

기존의 비분리형 통합 칼만 필터와 제안하는 분리형 통합 칼만 필터의 다른점을 비교하기 위하여 두 가지 칼만 필터에 대한 공분산과 칼만 이득, 그리고 측정치 보정식(measurement update equation)을 비교하였다. 첫째로 비분리형 칼만 필터에서의 (k-1) 시점에서 측정치 보정 이후의 오차 공분산을 $P^+(k-1)$ 라고 하면 (k) 시점에서 시간 갱신 후의 오차 공분산과 칼만 이득 및 측정치 보정식은 (8)~(10)과 같다.

둘째로 분리형 칼만 필터에서의 (k-1) 시점에서 측정치 보정 이후의 첫 번째 칼만 필터 및 두 번째 칼만 필터의 오차 공분산을 각각 $P1^+(k-1)$ 와 $P2^+(k-1)$ 라고 하면, (k) 시점에서 시간 전과 후의 첫 번째 칼만 필터의 오차 공분산($P1^-(k)$)과 칼만 이득($K1(k)$) 및 두 번째 칼만 필터의 오차 공분산($P2^-(k)$)과 칼만 이득($K2(k)$), 그리고 첫 번째 칼만 필터의 측정치 보정식 및 두 번째 칼만 필터의 측정치 보정식은 (11)~(16)과 같다.

$$P1^-(k) = \Phi_v(k) \cdot P1^+(k-1) \cdot \Phi_v(k)^T + Q_v(k)$$

$$= \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & \Phi_{v \rightarrow DR} \\ 0 & \Phi_{DR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P1_{v \rightarrow v}^+ & P1_{v \rightarrow DR}^+ \\ P1_{DR \rightarrow v}^+ & P1_{DR \rightarrow DR}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & \Phi_{v \rightarrow DR} \\ 0 & \Phi_{DR} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} Q_v & Q_{v,DR} \\ Q_{v,DR} & Q_{DR} \end{bmatrix}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} P1_{v \rightarrow v}^- & P1_{v \rightarrow DR}^- \\ P1_{DR \rightarrow v}^- & P1_{DR \rightarrow DR}^- \end{bmatrix}$$

$$P1_{v \rightarrow v}^- = P1_{v \rightarrow v}^+ + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P1_{v \rightarrow DR}^+ + (P1_{v \rightarrow DR}^+ + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P1_{DR \rightarrow DR}^+) \cdot \Phi_{v \rightarrow DR}^T + Q_v$$

$$P1_{v \rightarrow DR}^- = (P1_{v \rightarrow DR}^+ + \Phi_{v \rightarrow DR} \cdot P1_{DR \rightarrow DR}^+) \cdot \Phi_{DR}^T + Q_{v,DR}$$

$$P1_{DR \rightarrow DR}^- = \Phi_{DR} \cdot P1_{DR \rightarrow DR}^+ \cdot \Phi_{DR}^T + Q_{DR}$$

$$K1(k) = P1^-(k) \cdot H_v(k)^T \cdot [H_v(k) \cdot P1^-(k) \cdot H_v(k)^T + R_v(k)]^{-1}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} K1_{v \rightarrow v}(k) \\ K1_{v \rightarrow DR}(k) \end{bmatrix}$$

$$K1_{v \rightarrow v}(k) = P1_{v \rightarrow v}^- \cdot (P1_{v \rightarrow v}^- + R_v)^{-1}$$

$$K1_{v \rightarrow DR}(k) = P1_{v \rightarrow DR}^- \cdot (P1_{v \rightarrow v}^- + R_v)^{-1}$$

$$P2^-(k) = \Phi_p(k) \cdot P2^+(k-1) \cdot \Phi_p(k)^T + Q_p(k)$$

$$\equiv P2_{p \rightarrow p}^- = P2_{p \rightarrow p}^+ + Q_p$$

$$K2(k) = P2^-(k) \cdot H_p(k)^T \cdot [H_p(k) \cdot P2^-(k) \cdot H_p(k)^T + R_p(k)]^{-1}$$

$$\equiv K2_{p \rightarrow p}(k) = P2_{p \rightarrow p}^- \cdot (P2_{p \rightarrow p}^- + R_p)^{-1}$$

$$\delta \hat{x}_v(k) = K1(k) \cdot \delta z_v(k)$$

$$= \begin{bmatrix} K1_{v \rightarrow v}(k) \\ K1_{v \rightarrow DR}(k) \end{bmatrix} \cdot \delta z_v(k)$$

$$\delta \hat{x}_p(k) = K2(k) \cdot \delta z_p(k)$$

$$= K2_{p \rightarrow p}(k) \cdot \delta z_p(k)$$

(10), (15), (16)으로부터 다음의 조건을 만족할 경우 두 가지 통합 필터에서 추정되는 상태 변수 값이 일치함을 알 수 있다.

$$K_{p \rightarrow p}(k) = K2_{p \rightarrow p}(k)$$

$$K_{v \rightarrow p}(k) = 0$$

$$K_{p \rightarrow v}(k) = 0$$

$$K_{p \rightarrow DR}(k) = 0$$

$$K_{v \rightarrow v}(k) = K1_{v \rightarrow v}(k)$$

$$K_{v \rightarrow DR}(k) = K1_{v \rightarrow DR}(k)$$

그리고 (9), (12), (14)로부터 두 칼만 필터의 초기치(오차 공분산 초기치, 측정치 오차 공분산 및 프로세스 오차 공분산) 및 필터 계수가 일치하고 다음의 조건을 만족하면 위의 (17)을 만족함을 알 수 있다.

$$P_{p \rightarrow v}^- = 0$$

$$P_{p \rightarrow DR}^- = 0$$

실험을 통하여 확인한 결과 대부분의 경우에 오차 공분산 행렬의 부 행렬인 식(17)의 모든 원소들이 모두 0에 가까운 값을 갖으나, 필터의 초기 구동시 또는 위성 배치가 좋지 않거나 위성 신호의 차단 시간이 길어질수록 점차 0이 아닌 값으로 변화함을 알 수 있었다. 따라서, 필터가 수렴한 이후에는 이 값들이 0에 가까워지므로 두 필터의 성능이 유사하게 나타나지만, 필터의 초기 구동시 또는 위성 배치가 좋지 않거나 위성 신호의 차단 시간이 길어질수록 두 통합 필터의 성능이 다소 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 차량 주행 중에 있어서 가시 위성 상태가 좋지 않거나 연속적인 위성 신호 단절 현상은 짧은 시간에만 발생되며, 이러한 경우에는 두 통합 필터의 성능 차이가 거의 나타나지 않는다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터는 기존의 비분리형 통합 칼만 필터와 비교하여 성능 차이가 거의 나타나지 않으면서도 계산량을 대폭 줄일 수 있는 알고리즘이라고 할 수 있다.

III. 실험 결과

기존의 비분리형 통합 방법과 제안된 분리형 통합 방법의 계산량을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 계산량 측정에 사용한 컴퓨터의 CPU 는 Pentium 3 500MHz 이고, 메인 메모리는 128MB 이며, MATLAB 소프트웨어의 PROFILE 함수를 이용하여 수행 시간을 측정하였다. 평균 수행 시간을 비교하기 위하여 동일한 측정치 및 센서 입력에 대하여 두 가지의 통합 필터를 10000 번 수행 시켜서 그 시간을 측정한 후 평균을 구하였으며, 측정된 수행시간을 표 2 에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 분리형 통합 필터의 계산량이 비분리형 통합 필터의 계산량과 비교하여 약 68% 가 소요됨을 알 수 있다.

표 2. 통합 필터 수행시간 비교.
Table 2. Comparisons of processing time.

		평균수행시간 (msec) (*)
비분리형 통합 필터		1.170
분리형 통합 필터	첫 번째 필터	0.713
	두 번째 필터	0.083
	총수행시간	0.796

(*)계산량 측정용 컴퓨터 사양 : Pentium3 550MHz, 128MB DRAM

비분리형 통합 방법과 분리형 통합 방법의 성능을 비교하기 위하여 도로 주행 시험을 수행하였다. 정확한 성능 비교를 위하여 같은 측정치를 이용하는 후처리 방식으로 수행하였다. 다양한 환경 조건에서의 성능을 알아보기 위하여 주변 장애물이 없는 도로, 아파트 주변 도로 등을 포함하는 코스를 실험 구간으로 선정하였다. 선정된 주행 코스는 대전광역시 충남대학교 부근이며, 실험 구간의 총 주행 거리는 약 11km, 총 주행 시간은 약 20 분이다. 그림 2(a)는 GPS 단독 주행 궤적 및 DGPS/DR 기준 궤적을 도시한 것이다. 주행 실험을 하는 동안 시간에 따른 가시 위성 수 및 DOP 의 상태는 그림 2(b)와 같다. 그림에서 A-B 구간 및 C-D 구간은 아파트 단지 옆 도로이고, 나머지 구간은 가시 위성의 확보가 용이한 도로이다. 그림에서 보는 바와 같이 아파트 단지 옆 도로를 지날 때인 260 초에서 300 초 시간의 구간 및 700 초에서 880 초 시간 구간에서는 가시위성의 개수가 현저히 줄고 DOP 도 나빠짐을 알 수 있다. 그러므로 이 구간에서는 DOP 이 좋지 않기 때문에 GPS 에서 측정치의 정확도가 저하되는 경우가 자주 발생된다. 실험 결과에 대한 오차 분석을 위해서는 시간에 따른 기준 위치 궤적이 필요하며, 본 논문에서는 고성능 자이로스코프 센서를 이용한 DGPS/DR 를 이용하여 이를 구하였다[12]. DGPS/DR 기준 궤적은 지도의 도로 상에 정확히 위치 하였으며, GPS 신호가 자주 차단되는 A-B 구간 및

C-D 구간에서도 DGPS/DR 을 이용하여 구한 궤적은 약 10m 이내의 오차를 갖는다.

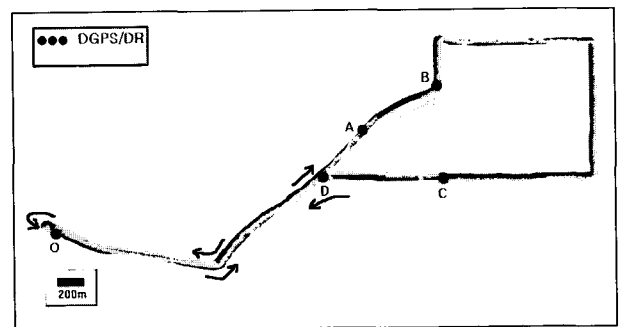
주행 시험은 여러 환경에서의 성능 분석을 위하여 다음과 같은 세 가지 경우에 대하여 수행하였다.

실험 1 : 센서의 장착 오차가 없는 정상적인 상태에서의 실험

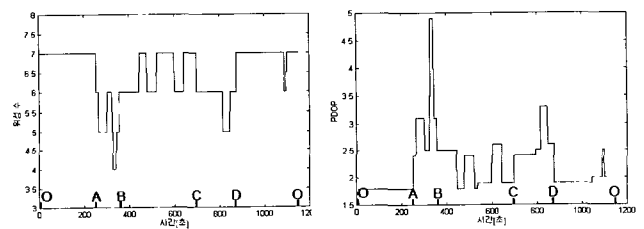
실험 2 : 장시간 동안 위성 가시 상태가 좋지 않은 경우의 실험

실험 3 : 자이로스코프를 임의로 기울여 장착한 경우의 실험

실험 2 는 실험 1 의 주행 실험 데이터를 이용하여 일정 구간에서 양각이 낮은 GPS 위성에 대한 신호를 임의로 차단시켜서 수행하였으며, 실험 3 은 자이로스코프를 기울여 장착한 후에 주행 실험을 하였다.



(a) 주행 궤적
(a) Vehicle trajectory



(b) GPS 가시 위성의 개수 및 PDOP
(b) The number of satellites in view and PDOP

그림 2. 주행 실험 구간의 궤적 및 GPS 위성 상태.
Fig. 2. Horizontal reference trajectory.

실험 1 을 통하여 추정된 위치해의 오차를 그림 3 에 나타내었다. 실험 시에 두 가지 통합 방법에서 모두 상태변수의 초기치를 대략적으로 설정하였다.

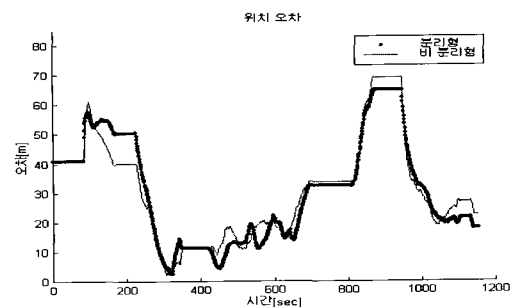
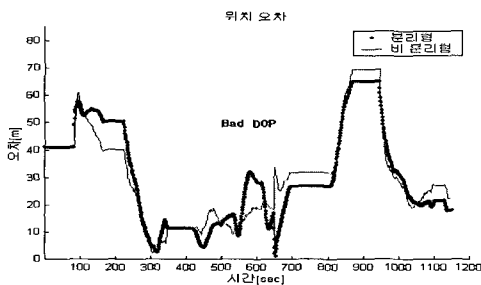


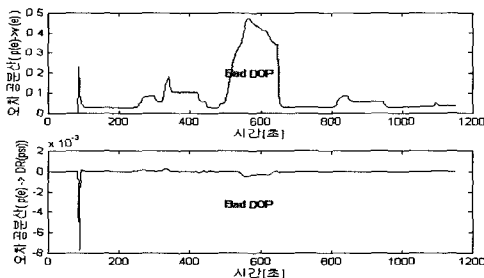
그림 3. 실험 1 에서의 위치 오차 비교.
Fig 3. Comparison of position errors in test 1.

그림에서 보는 바와 같이 칼만 필터의 초기 동작 시간의 구간에서는 두 통합 방법이 약간의 성능 차이를 보이지만, 이 구간을 제외한 나머지 구간에서는 비분리형 통합 방법과 분리형 통합 방법의 성능이 유사함을 알 수 있다.

실험 2 에서는 장시간 위성 가시 상태가 좋지 않은 경우에 대한 성능을 비교하기 위하여 일정 구간에서 양각이 낮은 GPS 위성에 대한 신호를 의도적으로 차단하는 실험을 수행하였다. 실험 1 에서 수집된 데이터를 이용하여 500 초에서 650 초 구간(B-C 구간의 일부)에서의 가시 위성 중 양각이 50° 이하의 위성에 대한 신호를 차단하였다. 이와 같은 일부 위성 신호 차단 구간에서의 가시 위성개수는 4 개이었으며, PDOP 은 평균 6.7 의 높은 값을 나타내었다. 두 가지의 통합 필터에 대하여 성능을 비교하여 추정된 위치해의 오차 및 식(18)의 비분리형 칼만 필터의 오차 공분산 행렬 중 부행렬($P_{p \rightarrow v}$ 및 $P_{p \rightarrow DR}$)의 1 행 1 열 값을 그림 4 에 나타내었다.



(a) 위치 오차 비교
(a) Comparison of position error

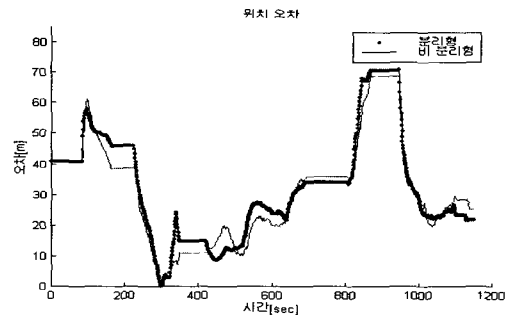


(b) 비분리형 통합 필터의 오차 공분산 값
(b) State error covariance

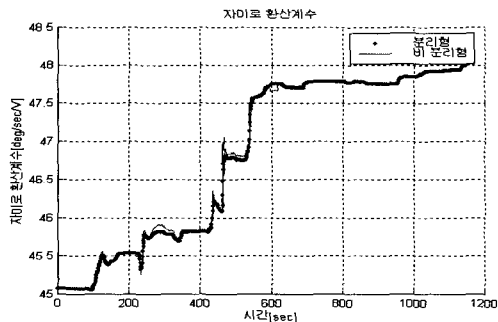
그림 4. 실험 2에서의 위치 오차 비교.
Fig 4. Comparison of position errors in test 2.

그림에서 일부의 위성 신호가 차단되어 장시간 동안 DOP 이 좋지 않은 구간(500 초에서 650 초 구간)에서는 두 통합 방법의 위치 오차가 다소 다르게 나타난다. 이는 그림 4 의 (b) 에서와 같이 GPS 로부터 DOP 이 좋지 않은 측정치가 장시간 들어올 경우에 오차 공분산 행렬의 부 행렬인 (17)의 원소들이 0 이 아닌 값을 갖기 때문이다. 그러나 실험 결과와 같이 두 통합 방법으로부터 추정된 위치해의 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

실험 3 은 자이로스코프를 장착할 때 기울임 오차가 발생하는 경우에 대한 실험으로 자이로스코프를 약 20° 기울여 장착한 후 주행 실험을 수행하였다. 두 가지 통합 방법을 통하여 추정된 위치해의 오차와 자이로스코프 환산계수를 그림 5 에 나타내었다. 비분리형 통합 방법과 분리형 통합 방법 모두 자이로스코프의 기울임 오차를 추정할 수 있기 때문에 자이로스코프에 기울임 오차가 발생되어도 정확한 항법해를 추정할 수 있다. 그림 5 에서와 같이 기울어진 자이로스코프의 환산계수를 추정하기 위해서는 필터 수행 초기에 대략 600 초 가량 소요된다. 앞의 실험 1 과 비교하여 볼 때 이 시간 동안에는 두 통합 필터에서의 성능이 다소 다르게 나타난다. 이 시간 동안은 DR 센서 계수의 완전한 보정이 이루어지지 않았기 때문이다. 그러나, 자이로스코프의 환산계수가 비교적 정확히 추정되는 600 초 이후의 구간에서는 두 통합 필터의 성능이 유사하게 나타남을 알 수 있다. 자이로스코프의 정상적인 환산계수(45.045 deg/sec/V)를 이용하여 20° 기울어져 있는 자이로스코프의 환산계수를 계산하면 $45.045 / \cos(20^\circ) = 47.936$ 이 되며, 필터가 수렴한 후의 두 통합 필터에서 추정된 자이로스코프 환산계수 추정치가 모두 이론치와 일치하였다. 또한 센서 장착시에 발생할 수 있는 기울임 오차는 변하지 않는 값이므로 추정된 계수값을 저장하여 다음 동작시에 이용하면 필터 초기 동작시에 나타날 수 있는 두 통합 방법의 성능 차이는 나타나지 않는다.



(a) 위치 오차 비교
(a) Comparison of position error



(b) 환산계수 비교
(b) Estimate of gyro scale factor

그림 5. 실험 3에서의 위치 오차 비교.
Fig 5. Comparison of position errors in test 3.

세 가지의 실험에 대하여 각 통합 방법에 따른 구간별 위치오차의 평균 및 표준 편차를 표 3에 나타내었다. 표에서와 같이 두 가지 통합 방법으로 추정된 위치는 전체 실험에 대하여 오차 평균이 약 30m 이고 표준 편차가 약 18m 이다. 앞에서 언급된 기준 궤적 자체의 오차를 고려할 때 본 논문에서 제안된 분리형 통합 방법의 성능은 기존의 비분리형 통합 방법의 성능과 전체적으로 거의 유사하다. 특히, 초기 동작 구간(O-A 구간)과 장시간 위성 가시 상태가 좋지 않은 경우(실험 2, B-C 구간)에도 유사한 성능을 보였다.

표 3. 구간별 오차 비교.
Table 3. Comparison of the position errors by course.

실험	주행 구간	비분리형 통합 방법		분리형 통합 방법	
		평균[m]	편차[m]	평균[m]	편차[m]
1	O-A	42.1	7.5	46.8	7.0
	A-B	9.5	6.3	10.7	6.2
	B-C	16.8	5.9	14.5	5.7
	C-D	40.7	11.9	39.1	11.1
	D-O	37.6	15.7	36.5	18.7
	전체	30.7	17.1	30.5	17.7
2	O-A	42.1	7.5	46.8	7.0
	A-B	9.5	6.3	10.7	6.2
	B-C	16.4	6.0	15.1	7.4
	C-D	39.3	12.7	34.9	13.3
	D-O	38.3	19.6	36.6	18.8
	전체	30.4	17.2	30.1	17.8
3	O-A	41.1	8.2	44.0	7.2
	A-B	7.5	4.1	10.4	7.2
	B-C	18.4	7.3	19.5	7.6
	C-D	42.3	11.0	42.5	13.8
	D-O	38.7	18.9	38.5	20.3
	전체	31.2	16.9	32.4	17.5

IV. 결론

본 논문에서는 속도 오차 모델과 위치 오차 모델을 분리하여 2 개의 필터를 이용하는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터를 제안하였다. 제안한 통합 방법의 성능 분석을 위하여 다양한 환경에서의 주행 시험을 수행하였으며, 제안한 통합 방법의 항법해 위치 오차 평균과 표준편차가 기존의 비분리형 통합 방법과 성능이 유사함을 알 수 있었다. 통합 필터의 수행 시간에 있어서는 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터가 약 1.5 배 정도 빠르게 수행되었다. 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터는 적은 계산량으로도 기존의 비분리형 통합 칼만 필터와

유사한 성능을 나타내므로 차량 항법 시스템과 같이 제한된 계산 용량을 가지고 많은 TASK를 실시간으로 수행해야 하는 시스템에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] E. Abbott and D. Powell, "An examination of the relative merits of various sensors for vehicle navigation," *Proceeding of the ION GPS-95*, Palm Springs, California, pp. 1269-1284, Sep., 1995.

[2] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Canada, 1997.

[3] R. Da and G. Dedes, "Nonlinear smoothing of dead reckoning data with GPS measurements," *Proceeding of the ION GPS-95*, Palm Springs, California, pp. 1285-1294, Sep., 1995.

[4] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering Theory and Practice*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.

[5] S. Ishikawa et. al., "Hybrid GPS for Land Vehicle," *Proceeding of the ION GPS-95*, Palm Springs, California, pp. 1301-1306, Sep., 1995.

[6] E. D. Kaplan, *Understanding GPS : Principles and Applications*, Artech House, MA, 1996.

[7] P. S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Navtech Book & Software Store, VA, 1994.

[8] B. W. Parkinson and J. J. Spilker, *Global Positioning System : Theory and Applications vol. I II*, AIAA, Washington, 1996.

[9] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, California, 1993.

[10] Y. Zhao, *Vehicle Location and Navigation Systems*, Artech House, MA, 1997.

[11] R. Zickel et al., "GPS aided Dead Reckoning Navigation," *Proceedings of the ION 1994 National Technical*, San Diego, California, pp. 577-586, Jan. 1994.

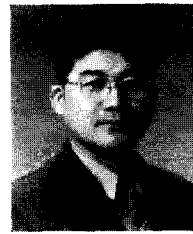
[12] 서홍석, 성태경, 이상정 외 2 인, "DGPS/DR 통합을 이용한 저가형 항법 시스템 구성," 제 6 회 항공기 개발기술 심포지엄, 국방과학연구소, pp. 262-271, 1998. 10.

[13] 서홍석, 성태경, 이상정, "반송파 정보를 이용한 GPS/DR 통합 방법," 대한전기학회, 48A 권 10 호, pp. 1279-1286, 1999. 10.



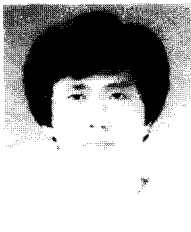
서 흥 석

1974년 1월 20일생. 1997년 충남대학교 전자공학교육과 졸업. 1999년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2000년 현재 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정.



성 태 경

1961년 4월 12일생. 1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 2000년 현재 충남대학교 정보통신공학부 조교수.



이 상 정

1957년 8월 15일 생. 1979년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1981년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 2000년 현재 충남대학교 정보통신공학부 교수.