

이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터

A GPS/DR Integration Kalman Filter with Integration Mode

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

Abstract : In land navigation applications, two kinds of GPS/DR integration schemes are commonly used; the loosely-coupled integration scheme and the tightly-coupled one. The loosely-coupled integration filter has a simple structure and is easy to implement. When the number of visible satellites is insufficient, however, it cannot calibrate the errors of the DR sensors. On the contrary, the tightly-coupled integration filter can suppress the growth of the error in the DR output even when the visibility is poor. However, it has larger computation load due to the larger state dimension and is inconsistent because of the variation in the measurement dimension. This paper presents a GPS/DR integration scheme with dual integration mode. During when the number of visible satellites is sufficient, the proposed scheme operates in a loosely-coupled integration mode. When the visibility becomes poor, it is switched into a tightly-coupled integration mode. Consequently, the proposed scheme can calibrate the DR sensors even when the visibility is poor. In addition, its computation time remains constant even if the number of visible satellites increases. Field experiment results show that the performance of the proposed integration method is almost similar to that of the tightly-coupled one.

Keywords : GPS, dead reckoning, tightly-coupled, loosely-coupled, dual integration mode

I. 서론

GPS(Global Positioning System)와 DR(Dead Reckoning)을 결합한 항법은 두 시스템의 장점을 이용하여 서로의 단점을 보완하는 방법으로서 최근에 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[3]-[10]. GPS는 위성 신호가 단절되었을 때 항법 해를 제공할 수 없으며 단시간의 항법 해 오차 변화가 크다는 단점을 갖는 반면 유한한 크기의 오차를 갖는 절대좌표 값의 항법 해를 제공한다라는 장점이 있다. DR은 짧은 시간의 항법 정보는 정확하지만 시간이 지날수록 오차가 누적되며, 초기 위치를 알아야 항법이 가능하다는 단점을 갖는다. 따라서, 두 가지 항법 시스템을 결합하면 단시간 및 장시간에 대한 항법 해의 안정성을 향상시킬 수 있으며, 연속적인 항법 해의 제공이 가능하다[3]-[10].

항법 시스템을 결합하는 방식으로는 크게 약 결합 방식(loosely-coupled integration method)과 강 결합 방식(tightly-coupled integration method)로 나누어 볼 수 있다[4]. 약 결합 방식은 GPS 항법 해를 이용하여 DR 센서 오차에 대한 보정을 수행하는 방식으로, 구조가 간단하기 때문에 계산량이 적고 구현하기가 용이하다[4]. 그러나, 가시위성 개수가 부족하여 GPS 수신기에서 항법 해를 구하지 못할 경우에는 DR 센서 오차

에 대한 보정을 할 수 없다는 단점이 있다. 이에 비하여 강 결합 방식은 GPS 원시 측정치(raw measurements)인 코드 의사거리(pseudorange)나 반송파 의사거리 변화율(pseudorange rate)을 이용하여 DR 센서 오차에 대한 보정을 수행하는 방식으로 1개 이상의 가시 위성만 확보되면 측정치 갱신이 가능하므로 가시 위성 개수가 부족한 경우에 약 결합 방식에 비하여 DR 센서의 오차 증가율을 낮출 수 있다. 강 결합 방식은 최적의 해를 제공하여 준다고 알려져 있으나 구조가 복잡하여 구현하기가 어려우며, 특히 위성 측정치가 증가할수록 계산량이 증가한다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터를 제안하였다. 제안하는 통합 필터는 GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있을 만큼의 가시위성 개수가 확보되는 동안에는 약 결합 방식의 칼만필터이며 가시성이 나쁠 때에는 강 결합 방식의 칼만필터로 전환된다. 이는 약 결합 방식과 강 결합 방식의 장점만을 이용함으로써 통합 시스템의 성능 향상을 시도한 구조이지만, 하나의 시스템에서 두 개의 서로 다른 방식의 필터들이 전환되어 가며 동작하기 위해서는 두 필터의 상태변수가 일치하여야 한다는 문제가 있다. 강 결합 방식의 통합 필터는 약 결합 방식의 통합 필터의 상태 변수 이외에 수신기 시계 오차에 대한 상태 변수를 필요로 한다. 본 논문에서는 수신기 시계 오차 모델을 약 결합 방식의 통합 필터에 추가함으로써 두 가지 방식의 통합 필터의 상태 변수가 일치하도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 약 결합 방식의 통합 필터와 강 결합 방식의 통합 필터를 소개

접수일자 : 2000. 8. 19., 수정완료 : 2000. 12. 15.

서흥석, 이재호 : 충남대학교 전자공학과(s_serk@hanbat.cnu.ac.kr/s_wogh@hanbat.cnu.ac.kr)

성태경, 이상정 : 충남대학교 정보통신공학부(tksaint@ee.cnu.ac.kr/eesjl@cslab.cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제연구비에 의하여 연구되었음.

하고, 본 논문에서 제안하는 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터에 대하여 설명한다. 3장에서는 실험을 통하여 제안한 통합 칼만필터의 성능을 평가하고 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터

1. 약 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터

GPS/DR 통합 필터는 DR 센서 오차의 보정에 사용하는 GPS 정보의 종류에 따라 유형을 분류할 수 있다. 즉, GPS 위치 정보를 이용하여 DR 센서 오차를 보정하는 방법[5][7]과 GPS 속도 정보를 이용하여 DR 센서 오차를 보정하는 방법[2][9][10]으로 구분된다. GPS 위치 정보를 이용하여 DR 센서 오차를 보정하는 통합 방법은 적은 차수의 필터로 구성되어 있기 때문에 계산량이 적다는 장점이 있다. 이에 비하여 GPS 속도 정보를 이용하여 DR 센서 오차를 보정하는 방법은 계산량은 증가하지만 보다 정확하게 DR 센서 오차 보정을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 특히, GPS 위치 정보에 포함되어 있는 편향 오차가 변경되는 경우에도 DR 센서에 대한 오차 보정을 정확히 수행할 수 있다. GPS 속도 정보를 이용하여 DR 센서 오차를 보정하는 방법에서의 계산량 증가 문제는 속도 필터와 위치 필터를 분리함으로써 개선할 수 있으며, 이러한 내용은 [10]에서 이미 검증되었다. 또한, 위치 정보가 속도 및 센서의 오차 보정에 영향을 주는 양이 속도 정보가 속도 및 센서의 오차 보정에 영향을 주는 양보다 아주 미세하기 때문에 위치 필터 및 속도 필터를 분리 가능하다는 이론 또한 기존의 연구 결과에서 검증되었다 [10]. 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터는 기존의 비 분리형 GPS/DR 통합 칼만 필터에 비하여 적은 계산량을 필요로 하면서도 유사한 성능을 보이므로 차량 항법 시스템에서 유용하게 사용되어진다[2]. 따라서, 본 논문에서 사용하는 약 결합 방식의 통합 필터는 분리형 GPS/DR 통합 방식을 이용하였다. 이 방식의 통합 필터는 위치 정보를 이용하여 DR 센서를 보정하는 통합 필터와 비교하여 DR 센서 오차에 대한 보정을 보다 정확하게 수행할 수 있으며, 속도 정보를 이용하여 DR 센서를 보정하는 비 분리형 통합 필터보다 계산량을 적게 필요로 한다[10].

GPS/DR 통합 항법을 구현하기 위해서는 먼저 DR 센서에 대한 오차 모델을 세워야 한다. 본 논문에서는 차량에 널리 사용되는 압전 진동형 자이로스코프(piezoelectric vibrating gyroscope)와 차속계를 DR 센서로 사용하였다. DR 센서에 대한 오차 모델은 자세각 오차 및 자이로의 바이어스 오차, 환산계수 오차, 그리고 차속계의 환산계수 오차로 이루어진 오차 모델을 이용하였으며[8]-[10], 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta\psi(k+1) \\ \delta Sf_G(k+1) \\ \delta V_{nom}(k+1) \\ \delta Sf_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (\bar{V}_x(k) - V_{nom}(k)) \cdot \Delta t & -Sf_G(k) \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\psi(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_\psi(k) \\ w_{Sf_G}(k) \\ w_{V_{nom}}(k) \\ w_{Sf_N}(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)에서 Δt 는 측정 주기, $\delta\psi(\cdot)$ 는 차량 자세각 오차, $\delta Sf_G(\cdot)$ 는 자이로 환산계수 오차, $\delta V_{nom}(\cdot)$ 은 자이로 바이어스 전압 오차, $\delta Sf_N(k)$ 은 차속계 환산계수 오차, 그리고 $\bar{v}_x(\cdot)$ 는 Δt 동안의 자이로 출력 평균 전압이다. 이와 같은 오차 모델을 이용하면 고속도로에서와 같이 차량이 정지하지 않고 장시간 주행하는 경우에도 자이로 바이어스 전압에 대한 보정을 해줄 수 있으며, 자이로 설치 시에 기울임 오차가 존재하는 경우에도 정확한 항법 해를 구할 수 있다[8]-[10].

[10]에서 제안한 통합 필터는 차량이 평면을 주행한다는 가정하에 2차원에 대한 오차 방정식을 이용하였다. 그러나 본 논문에서 제안하는 이중 모드 방식에서는 의사거리 및 의사거리 변화율을 이용하는 강 결합 방식과 상태변수가 일치하여야 하므로 3차원으로 오차 방정식을 세워야 한다. 따라서 본 논문에서는 고도 방향의 가속도를 0으로 가정하고 [10]의 기존의 분리형 GPS/DR 통합 칼만필터에 고도 방향에 대한 속도 오차 및 위치 오차에 대한 상태 변수를 추가하였다. (2)는 첫 번째 칼만필터의 상태 방정식이고, (3)은 두 번째 칼만필터의 상태 방정식이다.

$$\delta \underline{x}_1(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s(k) \cdot \sin\psi(k) & 0 & 0 & s(k) \cdot \sin\psi(k) / Sf_N(k) \\ 0 & 1 & 0 & -s(k) \cdot \sin\psi(k) & 0 & 0 & s(k) \cdot \cos\psi(k) / Sf_N(k) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & (\bar{V}_x(k) - V_{nom}(k)) \cdot \Delta t & -Sf_G(k) \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_E(k) \\ \delta x_N(k) \\ \delta v_E(k) \\ \delta v_N(k) \\ \delta Sf_G(k) \\ \delta V_{nom}(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{x_E}(k) \\ w_{x_N}(k) \\ w_{v_E}(k) \\ w_{v_N}(k) \\ w_{Sf_G}(k) \\ w_{V_{nom}}(k) \\ w_{Sf_N}(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \Phi_1(k) \cdot \delta \underline{x}_1(k) + \underline{w}_1(k)$$

$$\delta \underline{x}_p(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \\ \delta p_U(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \dot{v}_E(k/k) \\ \delta \dot{v}_N(k/k) \\ \delta \dot{v}_U(k/k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{p_E}(k) \\ w_{p_N}(k) \\ w_{p_U}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

(2)에서 $\delta v_E(k)$, $\delta v_N(k)$, $\delta v_U(k)$ 는 각각 동쪽, 북쪽, 고도 방향의 속력 오차이고, $\underline{w}_1(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며 공분산 $cov\{\underline{w}_1(k)\} = Q_1(k)$ 을 갖는다. 그리고 (3)에서 $\delta p_E(k)$, $\delta p_N(k)$, $\delta p_U(k)$ 는 각각 동쪽, 북쪽, 고도 방향의 위치 오차이고, $\delta \dot{\underline{v}}(k/k)$ 는 첫 번째 칼만필터에서 추정된 속도이며, $\underline{w}_p(k)$ 는 백색잡음으로 가정하고 공분산 $cov\{\underline{w}_p(k)\} = Q_p(k)$ 을 갖는다.

약 결합 방식의 분리형 GPS/DR 통합 칼만필터의 측정 방정식은 다음과 같다. (4)는 첫 번째 칼만필터의 측정 방정식이고, (5)는 두 번째 칼만필터의 측정 방정식이다.

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

$$= H_v(k) \cdot \delta \underline{x}_v(k) + \underline{v}_v(k)$$

$$\delta z_p(k) = \begin{bmatrix} p_E(k) - p_{E,GPS}(k) \\ p_N(k) - p_{N,GPS}(k) \\ p_U(k) - p_{U,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta p_E(k) \\ \delta p_N(k) \\ \delta p_U(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{p_E}(k) \\ v_{p_N}(k) \\ v_{p_U}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\equiv H_p(k) \cdot \delta x_p(k) + v_p(k)$$

(4)에서 $v_{E,DR}(k)$, $v_{N,DR}(k)$ 와 $v_{U,DR}(k)$ 및 $v_{E,GPS}(k)$, $v_{N,GPS}(k)$ 와 $v_{U,GPS}(k)$ 는 각각 DR과 GPS수신기에서 측정된 동쪽, 북쪽 그리고 고도 방향의 속력이고 $v_v(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{v_v(k)\}=R_v(k)$ 를 갖는다. 그리고 (5)에서 $p_E(k)$, $p_N(k)$ 과 $p_U(k)$ 및 $p_{E,GPS}(k)$, $p_{N,GPS}(k)$ 과 $p_{U,GPS}(k)$ 는 각각 DR과 GPS수신기에서 측정된 동쪽, 북쪽 그리고 고도 방향의 위치이고 $v_p(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{v_p(k)\}=R_p(k)$ 를 갖는다.

2. 강 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터

약 결합 방식의 통합필터와 마찬가지로 강 결합 방식의 통합필터에서도 DR 센서 오차의 보정에 사용하는 GPS 정보의 종류에 따라 유형을 분류할 수 있으며, 본 논문에서 제안하는 이중 모드 방식에서의 원활한 모드 전환을 위하여 강 결합 방식의 통합 필터도 분리형의 구조를 갖도록 하였다. 즉, 통합필터는 두개의 부필터(sub-filter)로 구성하였으며, 각각 GPS의 원시 측정치인 각 위성에 대한 의사거리 및 의사거리 변화율 정보를 측정치로 이용한다. 이러한 구조의 강 결합 방식 통합 칼만필터는 GPS 코드 의사거리 정보보다 오차가 작은 GPS 반송파 의사거리 변화율 정보를 이용하여 DR 센서 오차에 대한 보정을 수행하므로 GPS 코드 의사거리 정보만을 사용하는 다른 강 결합 방식의 통합 필터에 비하여 정확한DR 센서 오차 보정이 가능하다. 강 결합 방식의 통합 필터를 설계함에 있어서 GPS 수신기내에서 항법 해를 계산할 때 고려해야 하는 수신기 시계 바이어스 오차 및 드리프트 오차에 대한 보상을 고려해야 하기 때문에 이에 대한 오차 모델을 추가해야 하며, 그 결과 약 결합 방식의 통합 필터보다 많은 계산량이 필요하다.

제안한 이중 모드 방식에서 사용하는 강 결합 방식의 통합 필터는 두개의 칼만필터로 구성되며, (6)은 첫 번째 칼만필터의 상태 방정식, (7)은 두 번째 칼만필터의 상태 방정식이다.

$$\begin{bmatrix} \delta x_v(k+1) \\ f(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_v(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_v(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_v(k) \\ w_f(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \delta x_p(k+1) \\ cb(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_p(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_p(k) \\ cb(k) \end{bmatrix} + \Delta t \cdot \begin{bmatrix} \delta \dot{x}(k/k) \\ \dot{f}(k/k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_p(k) \\ w_{cb}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6)에서 $f(\cdot)$ 는 수신기 시계의 드리프트 오차이고, $w_v(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며 공분산 $cov\{w_v(k)\}=Q_v(k)$ 를 갖는다. 그리고, (7)에서 $cb(\cdot)$ 는 수신기 시계의 바이어스 오차이고, $\dot{f}(k/k)$ 는 첫 번째 칼만필터에서 추정된 수신기 시계의 드리프트 오차이며, $w_{cb}(k)$ 는 백색잡음으로 가정하고 공분산 $cov\{w_{cb}(k)\}=Q_{cb}(k)$ 를 갖

는다. 또한 $\delta x_v(k)$, $\delta x_p(k)$ 는 (2)~(3)에서 정의한 바와 같다.

강 결합 방식의 분리형 GPS/DR 통합 칼만필터의 측정 방정식도 다음과 같이 2개로 구성되어 있으며, (8)은 첫 번째 칼만필터의 측정 방정식이고, (9)는 두 번째 칼만필터의 측정 방정식이다[1][6].

$$\delta z_p(k) \equiv \begin{bmatrix} \delta z_{\rho_1}(k) \\ \delta z_{\rho_2}(k) \\ \vdots \\ \delta z_{\rho_i}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{1,DR}(k) - \hat{\rho}_{1,GPS}(k) \\ \hat{\rho}_{2,DR}(k) - \hat{\rho}_{2,GPS}(k) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_{i,DR}(k) - \hat{\rho}_{i,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1_1^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \\ -1_2^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1_i^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_v(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\rho_1}(k) \\ v_{\rho_2}(k) \\ \vdots \\ v_{\rho_i}(k) \end{bmatrix}$$

$$\equiv H_p(k) \cdot \begin{bmatrix} \delta x_v(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + v_p(k) \quad (8)$$

$$\delta z_p(k) \equiv \begin{bmatrix} \delta z_{\rho_1}(k) \\ \delta z_{\rho_2}(k) \\ \vdots \\ \delta z_{\rho_i}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1,DR}(k) - \rho_{1,GPS}(k) \\ \rho_{2,DR}(k) - \rho_{2,GPS}(k) \\ \vdots \\ \rho_{i,DR}(k) - \rho_{i,GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1_1^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \\ -1_2^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1_i^T(k) & 0_{1 \times 4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_p(k) \\ cb(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\rho_1}(k) \\ v_{\rho_2}(k) \\ \vdots \\ v_{\rho_i}(k) \end{bmatrix}$$

$$\equiv H_p(k) \cdot \begin{bmatrix} \delta x_p(k) \\ cb(k) \end{bmatrix} + v_p(k) \quad (9)$$

(8)에서 $\hat{\rho}_{i,DR}(k)$ 와 $\hat{\rho}_{i,GPS}(k)$ 는 각각 i번째 위성에 대한 DR에서 추정된 반송파 의사거리 변화율과 GPS에서 추정된 반송파 의사거리 변화율이고 $1_i^T(k)$ 는 ENU 좌표계에서의 i번째 위성에 대한 시선각 벡터이다. $v_{\rho_i}(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{v_{\rho_i}(k)\}=R_{\rho_i}(k)$ 를 갖는다. (9)에서 $\rho_{i,DR}(k)$ 와 $\rho_{i,GPS}(k)$ 는 각각 i번째 위성에 대한 DR에서 추정된 코드 의사거리와 GPS에서 추정된 코드 의사거리이고 $v_{\rho_i}(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{v_{\rho_i}(k)\}=R_{\rho_i}(k)$ 를 갖는다.

3. 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터

약 결합 방식은 강 결합 방식에 비하여 그 구조가 간단하고 센서의 고장 검출 등에 용이하지만 최적의 해를 구하기 어렵다고 알려져 있다. 또한 약 결합 방식은 GPS 수신기에서 제공되어지는 항법 해를 이용하여 측정치 보정(measurements update)을 수행하므로 GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있을 만큼의 가시 위성 수를 확보하지 못하거나 충분한 개수의 가시 위성 수를 확보하더라도 DOP 상태가 불량하여 GPS 수신기에서 항법 해를 구하지 못하는 경우에는 측정치 보정을 수행할 수 없다. 이에 비하여 강 결합 방식의 통합 필터는 (8)~(9)와 같은 GPS 원시 측정치를 이용하기 때문에 GPS 단독으로 항법 해를 구할 수 없는 때에도 1개 이상의 가시 위성 측정치가 유용한 경우에는 측정치 보정을 수행할 수 있다. 한편, 강 결합 방식의 통합 필터의 측정 방정식의 차원은 GPS 수신기에서 확보한 가시 위성의 개수에 의하여 결정된다. 즉, (8)~(9)에서와 같이 통합 필터에서 n개의 GPS 위성에 대한 의사거리 측정치와 의사거리 변화율 측정치를 사용하면 통합 필터의 측정치 개수는 2n개가 된다. 따라서 GPS 가시 위성의 개수가 증가할수록 통합 필터 구동에 필요한 메모리 용량과 계산량이 증가한다. 이에 비하여 약 결합 방식은 GPS 수신기에서 추정된 항체

의 위치 및 속도 측정치를 이용하기 때문에 획득한 위성 신호의 개수에 상관없이 일정한 메모리 용량과 계산량이 소요된다.

본 논문에서 제안하는 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터는 약 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터와 강 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터를 혼용하여 사용하는 방식이다. GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있을 만큼의 가시 위성 개수를 확보하면 약 결합 방식을 이용하고, 그렇지 않으면 강 결합 방식으로 전환하여 사용한다. 그러므로 제안한 GPS/DR 통합방식은 가시 위성이 부족한 경우에는 강 결합 방식의 장점을 그대로 이용할 수 있으며, 가시 위성을 충분히 확보하였을 경우에는 약 결합 방식으로 전환함으로써 위성 측정치 증가로 인한 계산량 증가 문제를 해결할 수 있다.

두 가지 방식의 필터를 서로 전환하여 사용하기 위해서는 두 필터의 상태 변수가 일치하여야 한다[4]. 그러나 앞 절에서 설명한 강 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터는 약 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터와 비교할 때 수신기 시계 오차에 대한 상태 변수가 추가되어 있기 때문에 모드 전환이 불가능함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 약 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터에 수신기 시계 오차에 대한 모델을 추가하여 강 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만필터와 상태 변수가 일치하도록 하였다. 변형된 약 결합 방식의 GPS/DR 통합 칼만 필터의 상태 방정식은 앞 절에서 설명한 강결합 방식의 상태방정식인 (6) 및 (7)과 같으며, 측정 방정식은 다음과 같다. (10)은 첫 번째 칼만필터의 측정 방정식이고 (11)는 두 번째 칼만필터의 측정 방정식이다.

$$\begin{bmatrix} \delta z_v(k) \\ f_{GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_v(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_v(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_v(k) \\ v_f(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \delta z_p(k) \\ cb_{GPS}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_p(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_p(k) \\ cb(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_p(k) \\ v_{cb}(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

(10)과 (11)에서 $f_{GPS}(k)$ 와 $cb_{GPS}(k)$ 는 각각 GPS 수신기내에서 계산된 수신기 시계의 드리프트 오차와 바이어스 오차의 추정치이다. $v_v(k)$ 와 $v_{cb}(k)$ 는 모두 백색잡음으로 가정하며, 공분산 $cov\{v_f(k)\}=R_f(k)$ 와 공분산 $cov\{v_{cb}(k)\}=R_{cb}(k)$ 를 갖는다.

본 논문에서 제안된 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만 필터의 구조는 그림1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 GPS/DR 통합 칼만필터는 강 결합 방식의 통합 필터와 수신기 시계 오차 모델이 추가된 약 결합 방식의 통합 필터로 구성되어 있다. GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있을 경우에는 GPS 항법 해를 이용하여 약 결합 방식의 통합 필터를 구동하고, 그렇지 않을 경우에는 GPS 수신기에서 측정된 원시 측정치를 이용하여 강 결합 방식의 통합 필터를 구동한다. 이중

모드 통합 방식은 강 결합 방식의 단점을 보완하면서 장점을 이용하고자 제안한 방식이다. 각각의 통합 칼만 필터를 구현하였을 때 한번의 시간 갱신(time update) 및 측정치 갱신(measurement update)에 필요로 하는 연산 횟수를 표 1에 나타내었다[4].

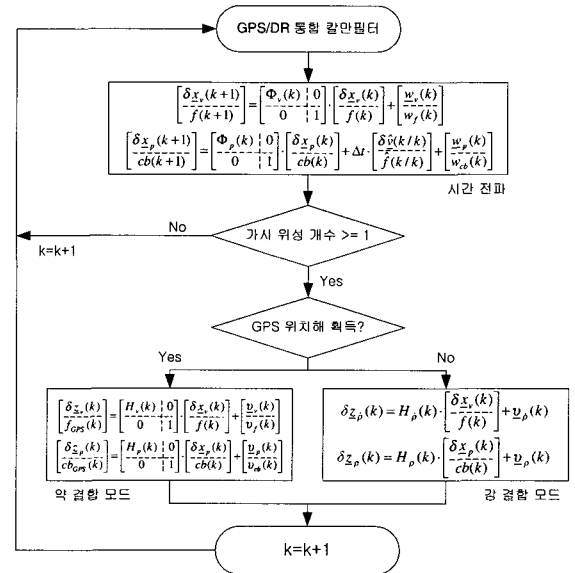


그림 1. 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터.

Fig. 1. A GPS/DR integration Kalman filter with dual integration mode.

표 1. 통합 필터 계산 횟수 비교.

Table 1. Comparisons of processing burden.

가시위성 개수	계산 횟수 [회] (덧셈 / 곱셈 / 나눗셈)		
	약 결합 방식	강 결합 방식	이중 모드 방식
1	NA	11316/15384/2	11316/15384/2
2	NA	12924/17280/6	12924/17280/6
3	9876/13416/10	14796/19500/10	10158/14004/13
4	9876/13416/10	16968/22080/14	10158/14004/13
5	9876/13416/10	19476/25056/18	10158/14004/13
6	9876/13416/10	22356/28464/22	10158/14004/13
7	9876/13416/10	25644/32340/26	10158/14004/13
8	9876/13416/10	29376/36720/30	10158/14004/13

표 1에서의 연산 횟수는 조셉형(Joseph form) 칼만 필터를 기준으로 계산하였으며, 가시 위성 개수가 3개 이상 일 때에 GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있다고 가정하였다. 표에서 보는 바와 같이 약 결합 방식의 경우 일정한 연산 횟수가 소요된다. 또한 강 결합 방식은 가시 위성 개수가 증가할수록 계산 횟수가 증가하지만 약 결합 방식과 이중 모드 방식은 가시 위성 개수가 증가하여도 계산 횟수가 증가하지 않음을 알 수 있다.

III. 실험 결과

본 논문에서 제안된 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만

필터와 강 결합 방식의 통합 필터, 그리고 약 결합 방식의 통합 필터의 가시 위성 개수에 따른 계산량을 비교하였다. 계산량 측정에 사용되어진 개인용 컴퓨터(PC)의 메인 프로세서는 펜티엄III 550MHz이고 메인 메모리는 256Mbyte이다. MATLAB 소프트웨어를 이용하여 각 통합 필터를 수행시킨 후에 각각의 수행 시간을 측정하였다. 평균 수행 시간을 비교하기 위하여 같은 측정치에 대하여 필터를 10000번 수행 시켜서 그 시간을 측정한 후 평균을 구하였으며, 측정된 수행 시간은 표2과 같다. 약 결합 방식은 조셉형 칼만 필터를 이용하였으나, 강 결합 방식은 실시간 구현을 위하여 UD 분해법을 이용한 칼만 필터를 사용하였다. 수행 시간 측정에 있어서 가시 위성 개수가 3개 이상일 때에 GPS 수신기에서 항법 해를 구할 수 있다고 가정하였다. 표2에서 보는 바와 같이 GPS 수신기에서 8개의 가시 위성을 확보하였을 경우 이중 모드 방식의 계산량이 강 결합 방식의 계산량과 비교하여 약 19% 적음을 알 수 있다.

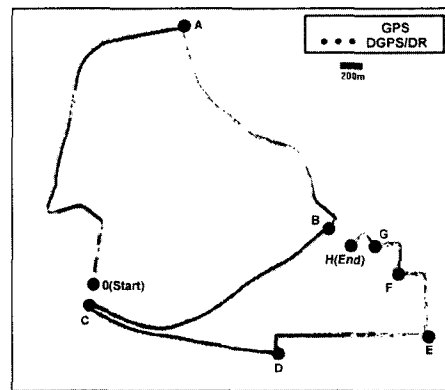
표 2. 통합 필터 수행시간 비교.
Table 2. Comparisons of processing time.

가시 위성 개수	계산량[단위 : msec] ^(*)		
	약 결합 방식	강 결합 방식	이중 모드 방식
1	0.72	0.81	0.81
2	0.72	0.86	0.86
3	0.84	0.92	1.04
4	0.84	0.98	1.04
5	0.84	1.05	1.04
6	0.84	1.17	1.04
7	0.84	1.31	1.04
8	0.84	1.55	1.04

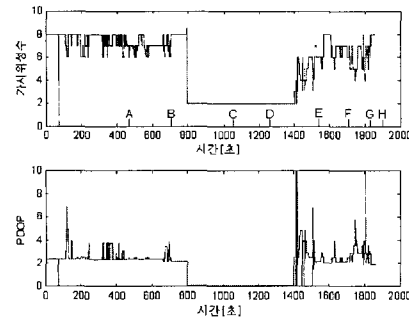
도로 주행 실험을 통하여 본 논문에서 제안된 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터와 강 결합 방식의 통합 필터, 그리고 약 결합 방식의 통합 필터의 성능을 비교하였다. 도로 주행 시험은 1999년 2월에 수행 되었으며, 이때에는 SA(Selective Availability) 가 동작 중인 상태였다. 정확한 성능 비교를 위하여 같은 측정치를 이용하는 후처리 방식으로 수행하였다. 실험 결과에 대한 오차 분석을 위해서는 시간에 따른 기준 위치 궤적이 필요하며, 본 논문에서는 DGPS/DR을 이용하여 이를 구하였다. DGPS/DR 기준 궤적은 GPS신호가 차단된 지역에서 약 10m이내의 오차를 갖는다[8].

선정된 주행 코스는 대전광역시 충남대학교 부근이며, 실험 구간의 총 주행 거리는 약13km, 총 주행 시간은 약 32분이다. 가시 위성 상태가 좋은 경우에는 제안된 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터와 강 결합 방식의 통합 필터, 그리고 약 결합 방식의 통합 필터의 성능이 모두 유사하기 때문에 일정 구간에서GPS 가시 위성 개수를 2개로 제한하는 실험을 수행하였다.

GPS 가시 위성 개수를 제한하지 않았을 때의 DGPS/DR 기준 궤적과 위성 개수를 2개로 제한하였을 때의 GPS 단독 궤적은 그림 2(a)와 같다. B지점과 C 지점 중간 지점부터 위성개수 제한하였으며, D지점을 지난 지점까지 지속하였다. 주행 실험을 하는 동안 시간에 따른 가시 위성 수 및 DOP의 상태는 그림 2(b)와 같다. 그림에서 A-B 구간은 가로수가 우거진 도로이고, B-C-D 구간은 가시 위성의 확보가 용이한 도로, D-E 구간 및 F-G-H 구간은 아파트 단지 내 도로이다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 800초에서 1400초 구간에서 GPS 가시 위성 개수는 2개로 제한하였으며, 이때의 PDOP은 0으로 출력됨을 알 수 있다.



(a) 주행 궤적



(b) GPS 가시 위성의 개수 및 PDOP

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

각각의 통합 방식에 대한 주행 실험을 수행한 후 시간에 따른 세 가지 통합 방식의 위치 오차를 그림 3에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 GPS 가시 위성 개수를 제한하기 이전까지의 구간에서는 세가지의 통합 필터의 성능이 모두 유사함을 알 수 있다. 가시 위성수가 2개로 제한된 구간(800~1400초)에서는 위치 오차가 증가한다. 이는 측정치의 부재 또는 측정치 개수의 부족으로 인하여 DR 센서의 보정을 하지 못하거나 충분하지 못하기 때문이다. 약 결합 방식은 GPS 항법

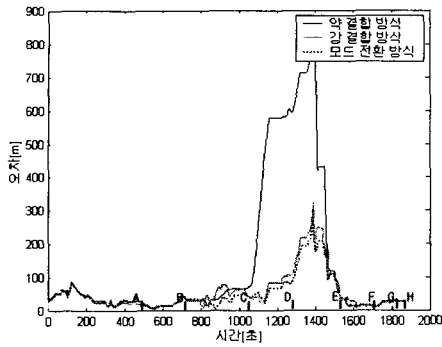


그림 3. 위치 오차 비교.
Fig. 3. Comparison of the position errors.

해를 측정치로 사용하기 때문에 가시 위성수가 부족한 경우에는 측정치 보정을 수행할 수 없다. 강 결합 방식은 GPS 순수 측정치를 이용하여 측정치 보정을 수행하기 때문에 가시 위성수가 1개 또는 2개가 되어도 측정치 보정을 수행 할 수 있으나, 측정치가 3개 미만이면 가관측성(observability)을 만족하지 않으므로 추정된 항법 해의 오차는 증가한다. 그러나 약 결합 방식과 같이 측정치 보정을 수행하지 않는 것 보다는 부족하지만 적은 개수의 측정치를 이용하여 측정치 보정을 수행함으로써 항법 해의 오차 증가율을 낮출 수 있다. 다만, 가시 위성 개수가 1개일 때는 가시 위성 수가 2개일 때보다 추정되는 항법해의 오차가 증가한다. 표 3은 각 통합 방식에 따른 구간별 위치오차의 평균 및 분산을 나타낸 것이다.

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

주행 구간	약 결합 방식		강 결합 방식		이중 모드 방식	
	평균 [m]	분산 [m ²]	평균 [m]	분산 [m ²]	평균 [m]	분산 [m ²]
A-B	15.5	129.5	15.2	81.0	15.5	129.5
B-C	41.9	255.8	43.6	328.1	29.5	114.6
C-D	422.2	38347.7	60.9	812.4	54.0	291.9
D-E	432.7	81693.5	157.1	5841.1	140.4	4089.3
E-F	17.5	54.8	10.4	5.6	12.9	5.0
F-G	23.4	4.5	21.9	4.8	23.3	4.3
G-H	25.9	7.5	24.8	4.6	25.7	6.9
전구간	179.9	62040.6	60.5	4378.0	52.8	3297.1

표 3에서 위성 신호가 단절되지 않는 구간(A-B 및 E-H 구간)에서는 세 가지 통합 방식의 성능이 모두 유사하지만, 가시 위성 개수가 2개로 제한되는 구간(B-E 구간)에서는 강 결합 방식과 이중 모드 방식은 약 결합 방식과 비교하여 작은 오차 평균과 분산을 갖음을 알 수 있다. 표 3의 B-E 구간에서는 이중 통합 모드 방식이 강 결합 통합 모드 방식에 비하여 약간의 성능 개선이 있는 것과 같이 보이지만, 이는 같은 센서 및 같은 항법 필터를 이용하였다 하더라도 항법 필터의 초기치가 다른 경우에는 항법해의 오차 성능이

다르게 나기 때문으로 판단된다. 본 논문에서의 실험에서는 800초 부근에서 위성 신호의 일부가 단절되었다. 이 지점에서 약결합 방식의 통합 필터와 강결합 방식의 통합 필터에는 각기 다른 항법해 추정치를 가지고 있으며, 이로 인하여 약결합 방식의 통합 필터에서의 최종 항법해를 초기치로 이용하는 이중 통합 모드 방식의 통합 필터와 강 결합 방식의 통합 필터는 각기 다른 오차 성능을 갖을 수 있다. 실험 결과, 위성 신호의 일부가 단절된 구간에서의 강 결합 방식과 이중 모드 방식의 위치해 오차 증가율은 약 결합 방식의 위치해 오차 증가율의 1/2 이하이다.

IV. 결론

본 논문에서는GPS 수신기에서 확보한 가시 위성의 환경에 따라 약 결합 방식과 강 결합 방식을 전환해서 사용하는 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터를 제안하였다. 제안된 통합 방법의 성능 분석을 위하여 GPS 가시 위성 개수를 임의로 제한하는 주행 시험을 수행하였으며, 제안된 통합 방법의 성능이 가시 위성의 확보가 어려운 지역에서도 강 결합 방식의 성능과 유사함을 알 수 있었다. 통합 필터의 계산 시간에 있어서 제안한 통합 방법은 가시 위성이 3개 이상인 경우에 가시 위성 수에 상관없이 일정한 계산량을 가지며, 특히 가시 위성수가 6개 이상인 경우에는 강 결합 방식보다 빠르게 수행되었다. 제안된 이중 모드 GPS/DR 통합 칼만필터는 가시 위성의 개수가 적을 때에도 우수한 항법 성능을 나타내는 동시에 가시 위성 수에 관계없이 적은 계산시간을 일관적으로 유지하기 때문에 지상 항법 시스템의 실제 구현에 유용하게 적용할 수 있다.

참고문헌

- [1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker, "Global positioning system : Theory and applications" vol. I II. AIAA, Washington, 1996.
- [2] K. Brodie, "SiRF's federated filter architecture for automotive dead reckoning," *Proceedings of the ION GPS-99*, Nashville, Tennessee, pp. 1251-1257, Sep., 1999.
- [3] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews, "Kalman filtering theory and practice. Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [4] Peter S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control* vol. I II III. Navtech Book & Software Store, VA, 1994.
- [5] R. Da and G. Dedes, "Nonlinear smoothing of dead reckoning data with GPS measurements," *Proceedings of the ION GPS-95*, Palm Springs, California, pp. 1285-1294, Sep., 1995.
- [6] R. G. Brown and Patric Y. C. Hwang, "Introduction to random signals and applied kalman

filtering.” John Wiley & Sons, Canada, 1997.

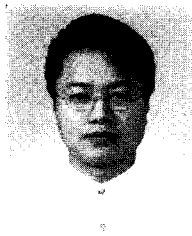
[7] R. Zickel et al., “GPS aided dead reckoning navigation,” *Proceedings of the ION 1994 National Technical Meeting*, San Diego, California, pp. 577-586, Jan., 1994.

[8] 서홍석, 성태경, 이상정 외 2인, “DGPS/DR 통합을 이용한 저가형 항법 시스템 구성,” 제6회 항공기 개발기술 심포지엄, 국방과학연구소, pp. 262-271,

1998.

[9] 서홍석, 성태경, 이상정, “반송파 정보를 이용한 GPS/DR 통합 방법,” 대한전기학회 논문지, 48A권 10호, pp. 1279-1286, 1999년 10월.

[10] 서홍석, 성태경, 이상정, “분리형 GPS/DR 통합 칼만필터 구현,” 제어자동화시스템공학회 논문지, 6권 10호, pp. 928-935, 2000. 10.



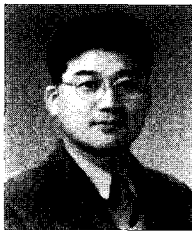
서 홍 석

1974년 1월 20일 생. 1997년 충남대학교 전자공학교육과 졸업. 1999년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년~현재 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정.



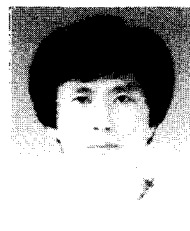
이 재 호

1975년 10월 17일 생. 1998년 충남대학교 전자공학과 졸업. 2000년 충남대학교 전자공학과 졸업(석사). 2000년~현재 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정.



성 태 경

1961년 4월 12일 생. 1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 1997년~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). 1988년~현재 충남대학교 정보통신공학부 교수.