

연합형 칼만 필터를 이용한 차량항법시스템의 설계

Design of a Vehicle Navigation System Using the Federated Kalman Filter

°김진원*, 지규인**, 이장규***
(Jinwon Kim, Gyu-In Jee and Jang Gyu Lee)

*서울대학교 전기공학부 및 자동제어특화연구센터(Tel: 872-8190; Fax: 878-8198; E-mail: kjw@asrignc3.snu.ac.kr)
** 건국대학교 전자공학과(Tel:450-3070; Fax: 450-3488; E-mail: gjee@kkucc.konkuk.ac.kr)
*** 서울대학교 전기공학부 및 자동제어특화연구센터(Tel: 880-7308; Fax: 878-8198; E-mail: jgl@asrignc3.snu.ac.kr)

Abstract The federated Kalman filter(FKF) is being widely used in many multisensor navigation systems. It is known that the FKF has advantages of simplicity and fault-tolerance over other decentralized filter techniques. In this paper, optimal and suboptimal FKF configurations are mentioned and a covariance analysis technique for the suboptimal FKF is newly presented. The suboptimal FKF configuration, known as No-reset(NR) mode, has better fault tolerance capability than the optimal FKF configuration. In the suggested technique, a suboptimal fusion process of FKF is considered as well as suboptimal gains of local filters. An upper bound of error covariance for suboptimal FKF is derived. Also, it is mathematically shown that this bound is smaller than existing bound in the literature. A vehicle-navigation system is designed using the FKF. In this system, a map constraint equation is introduced and used as a measurement equation of Kalman filter. Performance analysis is done by the suggested covariance analysis techniques.

Keywords Federated Kalman filter, Covariance analysis, Dead-reckoning, GPS, Map matching, Vehicle navigation system

1. 서론

최근 GPS를 이용한 민간용 차량항법시스템이 많이 연구되어 실용화되는 단계에 있다[1]. 일반적으로 복잡한 도심 환경을 고려할 때 차량의 주행거리계와 같은 속도 센서 및 자이로와 같은 자세각 센서를 이용한 추측항법(Dead-Reckoning) 시스템이 GPS와 함께 이용되며, 항법 지도의 이용이 보편화되면서 지도의 정보를 차량항법시스템에 이용하는 방법도 연구되어 왔다. 현재까지 이러한 다중센서를 이용하는 경우의 시스템 통합 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 칼만 필터는 가우시안 분포를 갖는 백색잡음에 의하여 구동되는 선형시스템에 적용되는 경우 최적 필터이며, 다중센서를 이용하는 항법 시스템 통합에 가장 널리 쓰이고 있다[2].

다중센서로 이루어진 시스템 및 측정 모델을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F(k)x(k) + G(k)w(k) \\ z_i(k) &= H_i(k)x(k) + v_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 상태변수의 초기값, 공정잡음 및 측정잡음은 서로 관련이 없다고 가정한다. 위와 같이 모든 측정치를 함께 처리하는 중앙 집중형 칼만 필터는 시스템의 차수가 작은 경우 가장 쉽게 최적의 필터를 구현할 수 있다는 장점이 있으나, 시스템의 차수가 큰 경우 공분산 행렬의 역행렬 계산의 부담이 증가하여 실시간 계산이 어려우며 센서의 고장 발생시 여러 센서로부터 얻어진 측정치가 모두 필터를 통해 처리된 이후에야 고장의 판단을 내릴 수 있으므로 추정치로부터 잘못된 측정치의 영향을 분리하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 시스템을 여러 개의 부필터와 그 상위 개념인 주필터로 분산시켜 구성하는 분산 계층형 칼만 필터가 연구되어 왔다[9]. 본 논문에서는 분산 계층형 칼만 필터의 특수한 형태이며 최근 다중센서를 이용하는 항법 시스템에 많이 이용되는 연합형 칼만 필터의 구현 방법 중 최적의 추정치를 얻을 수 있는 최적 구조 및 고장 검출에 용이한 준 최적 구조에 대하여 논한다. 또한 준 최적 연합형 칼만 필터의 성능 분석을 위한 공분산 해석 기법을 제시한다. 마지막으로 제시된 공분산 해석 기법을 이용하여 GPS, DR 및 지도 정보를 통합하는 차량항법시스템의 성능 분석을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 연합형 칼만 필터의 이론적 배경 및 새로운 공분산 해석 기법을 제시한다. 3장에서는 연합형 칼만 필터의 응용 예로 GPS, DR 및 지도 정보를 이용한 차량항법시스템 구성에 대하여 설명하고 공분산 해석을

통하여 그 성능을 분석하며, 4장에서 결론을 맺는다.

2. 연합형 칼만 필터(Federated Kalman Filter)

연합형 칼만 필터는 Carlson에 의해 제시되었으며 분산 계층형 칼만 필터의 특수한 형태로 볼 수 있다. 그 특징을 간단히 요약하면, "정보량 분배 법칙(principle of information sharing)"을 각각의 부필터에 적용한 후 추정치를 융합하여 최적의 주필터 추정치를 얻는 것으로, 분배되는 정보량은 시스템의 공정잡음 및 상태변수의 초기조건이다[3-6]. 따라서 정보량 분배시 이용되는 계수의 이용 및 상태변수 융합-재분배 과정이 기존의 분산 계층형 칼만 필터와 다른 점이라 할 수 있으며, 일정한 조건을 만족시키는 경우 중앙 집중형 칼만 필터의 해와 같은 해를 얻을 수 있다. 또한, 필터링된 추정치 및 공분산만을 이용하므로 지역 칼만 필터에서 전달되어야 하는 변수의 수가 줄어든다는 장점이 있다. 본 장에서는 연합형 칼만 필터의 이론적 배경 및 구현 방법에 대하여 논하고, 성능 분석을 위한 공분산 해석 기법을 제시한다.

2.1 개요

그림 1과 같이 정의된 부필터 구조를 갖는 시스템에서, 최적 추정치 및 공분산은 식 (2) 및 (3)과 같이 구해진다.

$$P_m = [P_1^{-1} + P_2^{-1} + \dots + P_N^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

$$\hat{x}_m = P_m [P_1^{-1} \hat{x}_1 + P_2^{-1} \hat{x}_2 + \dots + P_N^{-1} \hat{x}_N] \quad (3)$$

여기서 각각의 지역 추정치 및 공분산은 예측된 추정치 및 공분산이 아니라 필터링된 추정치 및 공분산을 의미한다. 식 (2) 및 (3)의 결과는 다음 조건을 만족시키는 경우 중앙 집중형 칼만 필터의 해와 동일하다[3].

조건)

a) 공분산행렬의 초기값을 각 부필터에 다음과 같이 분배한다.

$$P_{0i} = \gamma_i P_0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

b) 공정잡음 행렬을 각 부필터에 다음과 같이 분배한다.

$$Q_i = \gamma_i Q \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

c) 식 (2) 및 (3)에 의해 계산된 추정치 및 공분산을 각 부필터

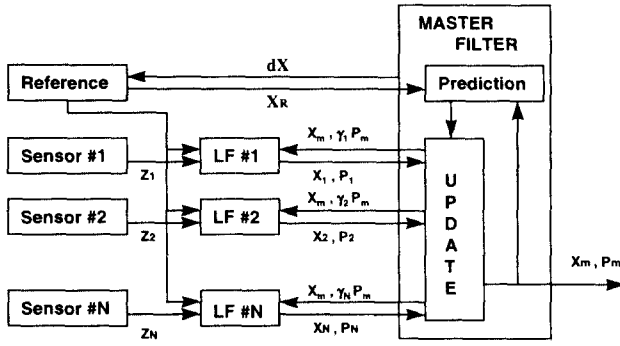


그림 1. 연합형 칼만 필터의 구성도
Fig. 1. Federated Kalman filter structure

에 다음과 같이 분배한다.

$$\begin{aligned} P_i &= \gamma_i P_m \quad i=1, \dots, N \\ \hat{x}_i &= \hat{x}_m \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

d) 식 (4)-(6)에서 정보량 분배를 위한 계수들은 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} = 1, \quad 0 \leq \frac{1}{\gamma_i} \leq 1 \quad (7)$$

연합형 칼만 필터의 구현 방법에는 최적인 Fusion-Reset(FR) 및 준 최적인 No-Reset(NR)의 두 방법이 있으며 각각 최적성 및 고장 검출성에서 장점이 있다. 먼저 FR mode는 그림 1과 같이 주필터에서 융합된 추정치 및 공분산을 정보량 분배 법칙에 의해 부필터로 분배하는 방식으로 최적성이 보장되나, 고장 발생시 잘못된 부필터 추정치가 모든 부필터에 영향을 미치므로 고장 검출 면에서 불리하다. 한편, NR mode는 Fault-Tolerant(FT) mode라고도 불리며, 주필터에서 융합된 추정치 및 공분산이 부필터로 분배되지 않아서 각 부필터는 완전히 독립적으로 동작한다. 따라서 주필터의 추정치 및 공분산은 최적성이 보장되지 않으나, 잘못된 부필터 추정치가 다른 부필터에 영향을 미치지 않으므로 센서의 고장 검출 및 분리에 용이하다는 장점이 있다.

2.2 연합형 칼만 필터의 공분산 해석

연합형 칼만 필터의 FT mode에서 각 지역 필터는 실제 값과 다른 초기 공분산 및 공경잡음을 가지므로 최적의 추정치 및 공분산을 계산할 수 없다. 또한 생략된 재분배 과정으로 인하여 각 지역 필터 간의 상호 연관성이 제거되지 않으므로 추정치 및 공분산의 융합 과정에서 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 상호 연관성 및 융합 과정을 함께 고려한 공분산 해석 기법이 필요하다. Felter는 준 최적인 연합형 칼만 필터의 FT mode에 적용 가능한 공분산 해석 기법을 제안하였다[6]. 식 (2) 및 (3)에 표현된 연합형 칼만 필터의 융합식을 FT mode의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{sm} = [P_{s1}^{-1} + P_{s2}^{-1} + \dots + P_{sN}^{-1}]^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_m = P_{sm} [P_{s1}^{-1} \ P_{s2}^{-1} \ \dots \ P_{sN}^{-1}] \begin{bmatrix} \hat{x}_{s1}^T \\ \hat{x}_{s2}^T \\ \dots \\ \hat{x}_{sN}^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 첨자 s는 준 최적 공분산 및 추정치임을 나타낸다. 한편, 추정 오차를 $\hat{x}_m - x = \tilde{x}_m$ 과 $\hat{x}_{si} - x = \tilde{x}_{si}$, $i=1, \dots, N$ 으로 정의하면 식 (9)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_m + x &= P_{sm} [P_{s1}^{-1} \ P_{s2}^{-1} \ \dots \ P_{sN}^{-1}] \begin{bmatrix} \tilde{x}_{s1}^T \\ \tilde{x}_{s2}^T \\ \dots \\ \tilde{x}_{sN}^T \end{bmatrix} \\ &+ P_{sm} \sum_{i=1}^N P_{si}^{-1} x. \end{aligned} \quad (10)$$

식 (8)을 (10)에 대입하면 식 (11)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_m &= P_{sm} [P_{s1}^{-1} \ P_{s2}^{-1} \ \dots \ P_{sN}^{-1}] \begin{bmatrix} \tilde{x}_{s1}^T \\ \tilde{x}_{s2}^T \\ \dots \\ \tilde{x}_{sN}^T \end{bmatrix} \\ &\equiv P_G \tilde{x}_G. \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 이용하면 준 최적 연합형 칼만 필터의 융합된 추정치 오차 공분산은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_m &= E[\tilde{x}_m \tilde{x}_m^T] \\ &= P_G E[\tilde{x}_G \tilde{x}_G^T] P_G^T \\ &= P_G \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & \dots & P_{1N} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & P_{22} & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & P_{NN} \end{bmatrix} P_G^T \equiv P_G P_T P_G^T \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $P_{ji} = E[\tilde{x}_i \tilde{x}_i^T]$ ($i, j=1, \dots, N$)는 부필터 추정치 간의 실제 오차 공분산을 의미하며, 필터에서 계산된 공분산과는 구별되는 값을 갖는다. 일반적으로 부필터의 수가 많은 경우 모든 부필터간의 연관성을 계산하기 어려우며 각 부필터의 공분산만을 이용한 해석 기법의 이용이 바람직하다. 따라서 식 (13)과 같은 대각화 된 상한을 이용하여 부필터간의 상호 연관성 문제를 해결할 수 있다.

$$P_T \leq \begin{bmatrix} NP_{11} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & NP_{22} & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & NP_{NN} \end{bmatrix} \equiv P_D. \quad (13)$$

이 상한을 이용하여 주 필터 추정치 오차 공분산에 대한 상한을 구하면 다음과 같다.

$$P_m \leq P_G P_D P_G^T \equiv P_{mB} \quad (14)$$

한편, 연합형 필터는 서로 연관된 지역 필터 추정치를 융합하기 위하여 필터의 시간 전과 단계에서 대각화를 통한 연관성 제거를 수행하는 과정으로, 측정치 갱신 문제에 대해서는 별도의 대각화 과정이 필요하지 않다. 그러나 Felter의 기법은 측정치를 이용하여 갱신된 필터의 공분산에 어떤 상한을 부여하여 대각화를 수행하는 것으로, 이것은 측정치에 의한 영향이 대각화를 통하여 잘못 반영되는 경우를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 측정치의 영향을 받지 않는 시간 전과 단계에서 공분산 행렬의 상한을 부여하여 대각화 과정을 수행함으로써 Felter의 방법보다 작은 상한을 계산할 수 있는 공분산 해석 기법을 제안한다. 상호 연관성을 고려한 지역 필터의 시간 전과 과정을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{11}^- & \dots & P_{1N}^- \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N1}^- & \dots & P_{NN}^- \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & F & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11}^+ & \dots & P_{1N}^+ \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N1}^+ & \dots & P_{NN}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^T & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & F^T & \dots \end{bmatrix} \\ &+ G \begin{bmatrix} Q & \dots & Q \\ \vdots & & \vdots \\ Q & \dots & Q \end{bmatrix} G^T \end{aligned} \quad (15)$$

위 식에서 공분산 행렬 및 공경 잡음 행렬의 상한을 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{11}^- & \dots & P_{1N}^- \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N1}^- & \dots & P_{NN}^- \end{bmatrix} &\leq \begin{bmatrix} F & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & F & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} NP_{11}^+ & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & NP_{NN}^+ & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^T & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & F^T & \dots \end{bmatrix} \\ &+ G \begin{bmatrix} NQ & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & NQ & \dots \end{bmatrix} G^T \\ &= \begin{bmatrix} NP_{11}^- & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & NP_{NN}^- & \dots \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \hat{P}_{11}^- & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \hat{P}_{NN}^- & \dots \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 얻어진 대각화 된 공분산의 상한에 측정치 갱신을 적용하는 경우 측정치 갱신에 의한 상호 연관성은 존재하지 않게 된다. 따라서 각 부필터의 공분산에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{P}_{ii}^+ = [(\hat{P}_{ii}^-)^{-1} + H_i^T R_i^{-1} H_i]^{-1} \\ = \left[\frac{1}{N} (P_{ii}^-)^{-1} + H_i^T R_i^{-1} H_i \right]^{-1} \quad (17)$$

한편, Felter의 상한에 이용되는 값은 다음과 같다.

$$NP_{ii}^+ = N[(P_{ii}^-)^{-1} + H_i^T R_i^{-1} H_i]^{-1} \\ = \left[\frac{1}{N} (P_{ii}^-)^{-1} + \frac{1}{N} H_i^T R_i^{-1} H_i \right]^{-1} \quad (18)$$

따라서, 다음 부등식이 성립한다.

$$\hat{P}_{ii}^+ \leq NP_{ii}^+ \quad (19)$$

$$P_T \leq \begin{bmatrix} \hat{P}_{11} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \hat{P}_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \hat{P}_{NN} \end{bmatrix} \equiv \hat{P}_D \leq P_D \quad (20)$$

식 (20)은 본 논문에서 제시된 공분산의 상한이 Felter가 제시한 상한보다 작음을 의미하며 주 필터 오차 공분산의 상한은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m \leq P_G \hat{P}_D P_G^T \equiv \hat{P}_{mB} \leq P_{mB} \quad (21)$$

한편, 준 최적 연합형 칼만 필터의 오차 공분산의 하한은 최적 연합형 칼만 필터로부터 얻어진 오차 공분산으로, 공분산 해석을 수행하는 경우 이러한 하한도 역시 계산되어야 한다. 3장에서는 이러한 연합형 칼만 필터의 응용 예로 차량항법시스템을 이용하며, 공분산 해석을 통해 그 성능을 분석한다.

3. 연합형 칼만 필터의 응용 - 차량항법시스템

본 장에서는 연합형 칼만 필터를 이용한 다중 센서 통합 기법의 응용으로 GPS, DR, Map 정보를 이용한 차량항법시스템의 오차 보정 방법에 대하여 논한다.

3.1 시스템 개요

DR은 항법 계산 주기 동안 항체의 진행 궤적을 직선으로 가정하여 위치 변화를 계산하고 그 값을 이전 시간까지의 값에 누적하여 위치를 계산하므로 시간이 경과함에 따라 위치오차가 누적된다. 따라서 대개의 경우 큰 정밀도가 요구되는 군용 시스템의 주 항법장치로 이용되기 보다는 고장 및 상태 변화로 인하여 주 항법 장치를 이용할 수 없는 경우 대체할 수 있는 보조 항법 장치 또는 저가, 저 정밀도로 구현할 수 있는 일반 차량용 항법 시스템으로 이용된다[2].

본 논문에서는 DR의 오차 모델을 다음과 같이 구성하였다.

$$\dot{x} = Ax + w \\ x = [\delta X \ \delta Y \ \delta K_o \ \delta \psi \ \delta K_s \ \delta B_s]^T \quad (22)$$

식 (22)에서 상태변수는 각각 x축, y축의 위치오차, 주행거리계 환산계수 오차, 자세 오차, 자이로스코프 환산계수 오차 및 바이어스 오차를 나타낸다. 식 (22)에 선형 섭동법을 적용하여 위치오차 식을 유도하였으며 실험을 통하여 센서의 오차 모델을 선정하였는데, 주행거리계 환산계수 오차, 자이로스코프의 환산계수 및 바이어스 오차는 각각 랜덤상수로 가정하였다[10].

한편, 민간용의 차량항법시스템을 구성하는 경우 사용자는 절대적인 위치 좌표(position)가 아닌 지도상의 위치(location)를 필요로 한다. 따라서 미리 구축된 지도 데이터베이스 위에서 사용자의 위치를 표시하고 사용자의 위치를 항상 지도 위의 한 점과 일치시키는 지도 매칭(map matching) 기법의 이용이 필요

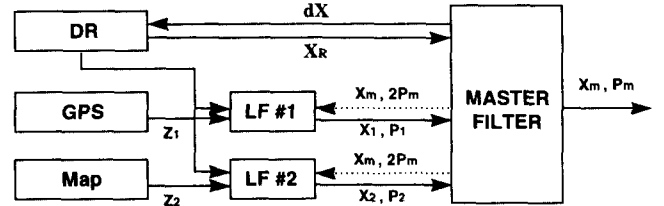


그림 2. GPS, Map 및 DR을 이용한 혼합항법시스템의 구성도.

Fig. 2. Structure of the hybrid navigation system using GPS, Map and DR.

하며, 지도 정보를 이용하여 DR의 오차를 보정하는 기법의 이용이 필요하다. 칼만 필터를 이용하여 DR의 오차를 보정하기 위하여 GPS의 경우와 마찬가지로 지도 정보를 이용한 측정 모델이 구성되어야 한다. 본 논문에서는 TM 좌표계에서 표시된 도로의 기하학적 특성을 이용하여 지도 정보의 측정 모델을 제시한다. 차량이 어떤 도로 위에 위치하였다고 판단된 경우 도로에서 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다.

$$aX + bY = c \quad (23)$$

여기서 a, b, c는 직선으로 간주된 도로 구간을 TM 좌표계에서 표시하는 경우 1차식의 계수에 해당한다. 식 (23)을 이용하여 측정 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$z_m = c - (aX_{DR} + bY_{DR}) + v_m \\ = (aX + bY) - (aX_{DR} + bY_{DR}) + v_m \\ = a\delta X + b\delta Y + v_m \\ = [a \ b \ 0 \ 0 \ 0]x + v_m \\ \equiv H_m x + v_m \quad (24)$$

식 (24)에서 Map 정보의 오차를 나타내는 v_m 은 다음과 같이 가우시안 분포를 갖는 백색잡음으로 가정된다.

$$v_m \sim N(0, W^2) \quad (25)$$

여기서 W는 도로의 폭을 의미한다. 식 (24)를 이용하는 경우 지도 정보의 측정 오차에 실제 도로 폭이 반영되므로 측정 오차가 실제적인 의미를 갖는다는 장점이 있다. 식 (24)에 나타난 측정 모델의 의미는 차량이 어떤 도로 위에 있다고 판단된 경우, 차량의 위치를 도로에 가깝도록 보정하는 것으로 도로의 방향만을 측정치로 이용하는 경우에 비해 차량의 위치에도 제한(constraint)을 줄 수 있다는 장점이 있으며, 교차로에서만 쓸 수 있는 위치 측정치에 비해 측정 주기를 빠르게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 측정치에 포함된 오차 성분이 실제 도로 폭과 관련된 물리적인 의미를 지닌다는 점에서 보다 실제적인 측정 모델이라 할 수 있다.

본 논문에서는 연속적인 항법 정보를 얻을 수 있는 DR을 기준 센서로 이용하고 GPS와 지도 정보를 보조 센서로 이용하는 연합형 칼만 필터를 구성하여 통합된 항법 정보를 얻을 수 있는 시스템을 구성하였다. 시스템의 구성도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 부필터 1은 GPS 정보 중 위치 및 속도 정보를 이용하여 DR의 오차를 추정하며, 부필터 2는 식 (24)로 표현되는 지도상의 도로 정보를 이용하여 DR의 오차를 추정한다. 최적 구조에서는 점선으로 표시된 재분배 과정이 수행되며 고장 검출 및 분리에 유리한 준 최적 구조에서는 재분배 과정을 수행하지 않는다. 위 구간의 장점은 다음과 같다. 식 (24)의 측정 모델은 일반적으로 도로가 긴 직선 구간일 경우 이용이 유리하므로, 부필터 2는 일정한 측정치 갱신 주기를 갖기 어렵다. 이러한 다중 주기(multi-rate)로 동작하는 필터의 경우 그림 2와 같은 구조에서는 두 부필터가 각각 다른 주기로 동작되므로 알고리즘의 구성이 용이하며 중앙 집중형 필터와 같이 측정식을 재구성(reconfiguration)할 필요가 없다. 또한, 측정치 검사를 통한 오류 판별(fault detection) 대신 부필터의 추정치를 이용한 오류 판별이 가능하며, 측정 모델이 분해되어 간단해지므로 역행렬 계산이 용이하다.

3.2 시뮬레이션

본 논문에서는 DR의 오차를 선형으로 모델링하여 공분산 해석을 수행하였다. 공분산 해석을 위하여 식 (22)에 제시한 오차 모델에 주행거리계 환산계수의 비선형 오차, 자이로 환산 계수의 비선형, 비대칭 오차 및 자이로 바이어스의 랜덤 워크 성분을 추가한 10차의 오차 모델을 구성하고 6차의 칼만 필터 모델을 이용하여 DR의 오차를 추정하였다. 시뮬레이션에 이용된 주요 오차 사양을 표 1에 나타내었다.

주행 계획으로는 5분씩 10 m/s의 등속도 운동을 수행하는 6개의 구간을 가정하였다. 총 주행 시간은 30분이며, 매 구간마다 차량은 정해진 각도를 회전하도록 하였다. DR 자체의 오차 특성을 CEP로 나타내었을 때 총 주행 거리의 26.9%에 해당하는 값을 얻었으며, 실험 결과와 비교하였을 때 선정된 시뮬레이션 사양이 타당함을 알 수 있었다. 또한, DR의 항법 알고리즘 및 공분산 행렬의 전파(propagation) 주기는 1초로 설정하였으며, 직선 구간에서 지도 제한식을 이용한 보정 주기는 10초, GPS의 위치 정보를 이용한 보정 주기는 30초로 선정하였으며, GPS 속도 정보의 경우 시간 영역에서의 연관성이 나타나지 않으므로 보정 주기는 1초로 선정하였다.

그림 3은 GPS 및 지도 제한식을 이용하여 DR의 항법 오차를 보정하는 경우에 대한 공분산 해석 결과를 나타낸 것으로, GPS의 경우 주행 궤적에 관계없이 항법 오차가 감소하나 지도 제한식의 경우 도로의 방향이 바뀌는 경우 오차가 크게 감소함을 알 수 있었다. 이것은 직선 도로만을 주행하는 경우, 시스템의 가관측성(observability)이 만족되지 않기 때문에 발생하는 결과이며, 주행 도로의 방향이 바뀌는 경우 가관측성이 만족되어 항법 오차가 감소하는 것을 의미한다. 이러한 시스템의 가관측성 해석을 위해서는 시변 시스템인 DR의 오차 모델 및 지도 제한식을 구간별 시불변 시스템(piece-wise constant system)으로 가정하여 해석할 수 있으며[7], 해석 결과 도로의 방향이 바뀌는 경우 항법 오차 중 위치 오차 및 자세 오차에 대한 가관측성이 만족되어 항법 오차를 잘 추정할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 도로의 방향이 바뀌지 않는 경우에는 자세 오차 상태변수는 가관측하나 위치 오차 상태변수는 관측할 수 없음을 알 수 있었다. 이렇게 지도 제한식을 GPS와 함께 이용하는 경우 초기에는 GPS에 의해 항법 오차가 감소하나 오차가 어느 정도 감소한 후에는 지도 정보에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 이러한 경우 GPS 신호가 관측되지 않더라도 항법 오차가 크게 증가하지 않을 것으로 판단된다. 이러한 해석 결과를 고려할 때 연합형 칼만 필터를 이용한 오차 보정 알고리즘은 실제 차량항법시스템에 적용되는 경우 좋은 성능을 보일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 연합형 칼만 필터의 구현 방법 중 최적의 추정치를 얻을 수 있는 최적 구조 및 고장 검출에 용이한 준 최적 구조에 대하여 설명하고, 부필터 추정치의 오차 공분산에 대한 상한을 이용한 준 최적 연합형 칼만 필터의 공분산 해석 기법을 제시하였으며, 제시된 기법을 이용하는 경우 기존에 발표된 결과에 비해 더 작은 상한을 계산할 수 있음을 수학적으로 증명하였다. 한편, DR의 오차 모델을 구성하고 GPS 및 지도 정보를 각각 보조 센서로 이용하는 지역 필터를 설계하였으며 이를 통합할 수 있는 연합형 필터 구조를 설계하고 공분산 해석을 통하여 최적 구조 및 준 최적 구조에 대한 성능 분석을 수행하였다. 연합형 칼만 필터의 공분산 해석 기법 및 그 응용을 보인 본 논문의 결과는 현재 널리 연구되고 있는 차량항법시스템의 구성 방법으로 고려될 수 있으며, 그에 대한 연구가 진행되고 있다. 따라서 주행 시험을 통한 성능 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 결과는 국방과학연구소 및 서울대학교 자동제어특화 연구센터의 지원에 의한 연구 결과입니다.

표 1. 공분산 해석을 위한 주요 시뮬레이션 사양
Table 1. Specification of simulation for covariance analysis.

오차 요소	성분	사양
초기 X축 위치오차		50m
초기 Y축 위치오차		50m
초기 자세오차		10deg
주행거리계 환산계수 오차	랜덤상수	5%
자이로 바이어스 오차	랜덤상수	0.025 deg/sec
GPS 위치 측정 잡음	백색잡음	50m
GPS 속도 측정 잡음	백색잡음	0.25m/s
Map 제한식에서의 도로 폭	백색잡음	20m

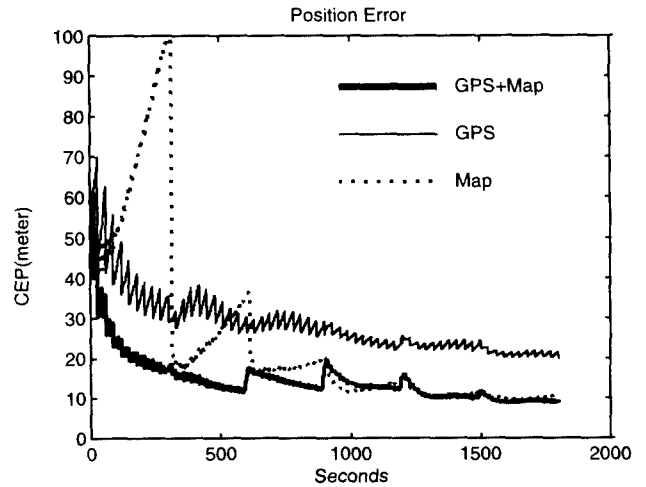


그림 3. GPS 및 Map 제한식을 이용한 DR의 오차 보정.
Fig. 3. Error correction of DR using GPS and Map constraint equation.

참고문헌

- [1] *Global Positioning System*, Vol. I, II, III, IV, The Institute of Navigation.
- [2] Siouris, G.M. *Aerospace Avionics Systems - A Modern Synthesis*, Academic Press, 1993.
- [3] Carlson, N. A., "Federated Square Root Filter for Decentralized Parallel Processes," *IEEE tr. on AES*, Vol. 26, May 1990, pp. 517.
- [4] Gao, Y., Krakiwsky, E. J. and Abousalem, M. A., "Comparison and Analysis of Centralized, Decentralized and Federated Kalman Filters," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 40, 1993, pp. 69.
- [5] Carlson, N. A., "Federated Kalman Filter Simulation Results," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 41, 1994, pp. 297.
- [6] Felter, S. C., *A Formation Flight Relative Navigation System*, Ph.D. Dissertation, 1995, State University of New York at Binghamton.
- [7] Lee, J. G., Park, C. G. and Park, H. W., "Multiposition Alignment of Strapdown Inertial Navigation System," *IEEE tr. on AES*, Vol. 29, No. 4, 1993.
- [8] Kim, J., Jee, G. I., Lee, J. G. and Sung, T. K., "Compensation of Gyroscope Errors and GPS/DR Integration," *Proceedings of IEEE PLANS '96*, pp. 464-470, April 1996.
- [9] 박흥원, 분산 계층형 스무딩필터 설계 및 보조 관성항법 시스템에의 응용, 공학박사 학위 논문, 1995. 2, 서울대학교 제어계측공학과.
- [10] 김진원, 지규인, 이장규, 이영재, "GPS와 Dead-Reckoning을 이용한 항법시스템 설계," *제어, 자동화, 시스템공학 논문지*, 제 2권, 제 3호, 1996. 9.