

차상기반 열차위치검지방식의 구성방안 연구

신경호, 정의진, 김종기  
한국철도기술연구원

The study on configuration method for the vehicle-based train position detection

Kyung Ho Shin, Eui Jin Jung, Jong Ki Kim  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - For the method of train position detection, ground-based train position estimation mainly has been applied so far. Ground-based position detection is the way to detect train current positions by installing train position equipments on railroad lines. However, the ground-based methods should install detection equipments on each section, and can only be able to detect train positions from main command center. So this method has several disadvantages such as an discontinuous position detection, an increment in cost of installation and maintenance. To make possible continuous train position detection, and to minimize amount of the cost, the vehicle-based position detection method should be chosen to determine train positions by loading position equipments on vehicles. In this paper, to realize the vehicle-based train position detection method, configuration scheme of train position detection equipment is suggested by using GPS, inertial sensor, speed sensor and its performance is verified by simulations.

이 가능하다.

2.1.1 GPS

GPS는 미국 DoD(Department of Defense)소유의 전지구적 위성측위 시스템이다[3]. GPS는 위성과 사용자간의 통신지연시간을 측정하여 위치를 검지하는 방식이다. GPS를 이용하여 위치검지를 하기 위해서는 4개 이상의 GPS위성 신호를 수신해야만 하며, SPS (Standard Positioning Service) GPS receiver의 위치 정확도는 약 10m(CEP)를 가진다. 위치검지를 하기 위해서는 위성신호의 수신이 반드시 이루어져야 하기 때문에 위성의 가시성이 나쁜 환경에서는 위치 검지가 불가능 하다. 하지만 위성의 가시성이 보장되는 환경에서는 운행시간, 운행거리에 따른 오차 누적이 없는 절대적인 위치검지가 가능하다. GPS의 위치 정확도를 높이기 위해서는 DGPS(Differential GPS)를 사용할 수 있다. DGPS는 기준이 되는 실제 위치를 알고 있는 기준국으로부터 GPS 위성신호에 포함된 오차의 보정정보를 전송 받아 GPS의 위치정확도를 증가시키는 방법이다. DGPS 사용 시 위치 정확도는 약 1m 이하를 가진다. 또한 GPS는 정확한 시각 정보의 제공도 가능하기 때문에 차량과 지상 시각시스템간의 시각동기용으로도 사용이 가능하다.

1. 서 론

열차제어시스템은 열차의 진로 및 선형열차와의 간격 제어를 수행하는 시스템이다. 정밀한 열차제어를 위해서는 열차위치의 정확한 검지가 반드시 요구된다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 열차검지방법은 궤도회로를 이용한 방식으로써 구성이 비교적 단순하고, 오랜 시간동안 검증되어 신뢰성이 확보되었다는 장점이 있다[1]. 하지만 열차가 운행하는 모든 지상구간에 궤도회로를 설치해야 하므로 설치 및 유지보수에 많은 비용이 소요된다. 최근 통신기술의 발달로 인하여 열차의 차상제어장치가 지능화 및 첨단화됨에 따라 열차위치검지는 열차에서 직접 검지하기 위한 방법이 연구되고 있다. 차상중심의 위치 검지방식은 해당 차량이 자신의 위치, 속도, 시각 정보를 연속적으로 측정하여 열차제어를 위한 정보로 사용하는 방식이다. 이러한 차상중심의 위치검지방식은 무선기반 열차제어 및 자기부상열차제어와 같이 궤도회로의 사용을 최소화 하고 있는 최근 열차제어시스템의 개발동향으로써, 유럽의 열차제어시스템관련 기준인 ERTMS/ETCS의 Level 3로 현재 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다[2].

2.1.2 관성센서

대표적인 관성센서로는 가속도계와 자이로스코프가 있다. 가속도계는 병진운동에 대한 가속도를 측정하고 자이로스코프는 회전 각속도를 측정한다. 가속도계와 자이로스코프의 측정치에 대한 적분을 통해 사용자의 위치를 계산할 수 있으며 이러한 장치가 관성항법장치(Inertial Navigation System)이다. 관성센서는 비접촉 센서로서 주위의 환경에 강인한 특징이 있으며, 위치와 속도, 자세를 연속적으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 하지만 계산량이 많고, 운행시간에 증가함에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다. 근래에는 마이크로프로세서의 발달로 인하여 관성센서가 body-fixed된 strap-down INS가 많이 사용되고 있다[4].

본 논문에서는 차상기반 위치검지방식의 구현을 위하여 GPS, 관성센서, 속도센서를 사용한 차량 위치검지장치의 구성방식을 제안하고, 제안된 방식에 의한 열차위치검지의 정확성을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

2.1.3 속도센서

철도차량의 속도를 측정하기 위하여 타코메타와 도플러 센서와 같은 속도센서가 주로 사용된다. 타코메타는 자기 또는 광학센서를 사용하여 차륜의 회전수를 세는 센서로서 차륜경과 단위시간동안의 회전수를 알면 상대적인 이동거리를 연속적으로 계산할 수 있다. 하지만 차륜 마모에 따른 차륜경의 감소 또는 slip/slide에 의하여 오차가 발생하며, 이동거리가 증가함에 따라 위치오차가 증가하는 단점이 있다.

2. 차상기반 위치검지용 센서 및 방법

2.1 차상기반 위치검지용 센서

지상장치의 도움 없이 차량이 자신의 위치를 연속적으로 파악하기 위하여 GPS, 관성센서, 속도센서 등의 사용

도플러 센서는 파장이 반사되어 돌아올 때에 속도에 관계되어 주파수가 변화되어 돌아오는 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 센서이다. 도플러센서는 비접촉 센서로서 차량의 구동방식에 강인한 장점이 있지만 저속

도에서는 차량의 움직임을 검출하지 못하는 단점이 있다.

## 2.2 차상기반 위치검지를 위한 항법의 종류

### 2.2.1 GPS를 이용한 항법

GPS는 위성으로부터의 신호를 수신하여 삼각 측량법에 의해 사용자의 위치를 계산하는 시스템이다. 따라서 사용자의 3차원 위치정보와 GPS 위성과 수신기 사이의 시계오차를 계산하기 위해서는 최소 4개 이상의 위성으로부터 수신이 가능해야 한다. GPS와 사용자 사이의 거리는 비선형방정식으로 표현되므로 선형화 과정이 필요하며 최소자승법(Least Square), 칼만필터(Kalman Filter) 등을 이용하여 항법해를 추정할 수 있다[3] [5].

### 2.2.2 DR(Dead Reckoning)을 이용한 항법

DR항법은 이미 위치를 알고 있는 한 지점에서 진행 방향 속도 및 자세각을 이용하여 항법의 새로운 위치를 계산하는 항법이다. 그림 1과 같이 ENU(East North Up) 좌표계로 정의한 차량의 속도  $v(k)$ 는 식(1)과 같다.

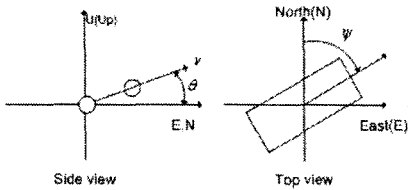


그림 1 DR 좌표계 정의

$$v(k) = \begin{bmatrix} v_E(k) \\ v_N(k) \\ v_U(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(k)\cos\theta(k)\sin\psi(k) \\ s(k)\cos\theta(k)\cos\psi(k) \\ s(k)\sin\theta(k) \end{bmatrix} \quad \text{식(1)}$$

여기서  $v_E(k), v_N(k), v_U(k)$ 는 각각 동쪽, 북쪽, 수직방향의 속도이고  $s(k)$ 는 차량 진행방향으로의 속력이며,  $\theta(k)$ 는 차량의 등판각,  $\psi(k)$ 는 자세각이다. 차량이 수평으로만 움직인다고 가정하면 식(1)은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v(k) = \begin{bmatrix} v_E(k) \\ v_N(k) \\ v_U(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(k)\sin\psi(k) \\ s(k)\cos\psi(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{식(2)}$$

차량의 초기 위치에 대한 오차가 없다고 가정하고 위의 속도를 적분하여 차량의 위치를 계산할 수 있다. 측정주기 동안 차량의 속도가 변하지 않는다고 가정하면, DR항법을 사용하여 계산한 차량의 위치는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{DR}(k) = P_{DR}(k-1) + v(k)\Delta t \quad \text{식(3)}$$

여기서  $P_{DR}(k)$ 는 차량의 위치,  $P_{DR}(k-1)$ 은 차량의 이전 위치이다.

## 3. 차상기반 열차검지를 위한 센서구성방법

### 3.1 센서 모델

차상기반 위치검지방식의 구현을 위하여 GPS항법과 자이로스코프, 타코메타를 사용하는 DR항법을 결합하여 차량의 위치를 결정한다. DR항법을 구현하기 위하여 속력과 자세각에 대한 모델링이 필요하며 타코메타로부터의 속력  $s(k)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(k) \approx \frac{Sf_N(k) \cdot N(k)}{\Delta t} \quad \text{식(4)}$$

여기서  $N(k)$ 는  $\Delta t$ 동안의 타코메타 출력 펄스 개수이며,  $Sf_N(k)$ 는 타코메타의 환산계수이다.

자이로스코프로부터의 자세각  $\psi(k)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi(k) \approx \psi(k-1) + \frac{\Delta t}{M} \cdot \left[ \sum_{i=1}^M w(k + \frac{i}{M}) \right] \quad \text{식(5)}$$

여기서  $M$ 은  $\Delta t$ 동안의 샘플링횟수,  $w(k)$ 는 각속도로 정의할 수 있다.

### 3.2 센서통합 방법

타코메타, 자이로스코프를 사용하는 DR항법과 GPS항법을 결합하기 위하여 그림 2와 같이 구성하여 센서를 통합한다.

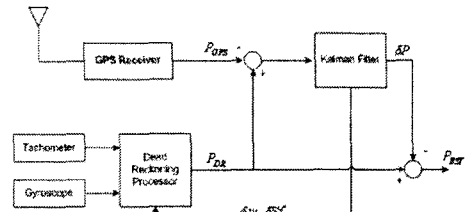


그림 2 센서통합구성도

DR로부터 결정된 위치  $P_{DR}$ 과 GPS 수신기로부터 결정된 위치  $P_{GPS}$ 의 차를 측정치로 하고, 3차원 위치오차, 자세각오차, 타코메타 환산계수오차를 상태변수로 하는 칼만필터를 구성한다. 칼만필터로부터 갱신된 자세각오차와 타코메타 환산계수오차는 DR항법처리에 되먹임되며 DR로부터 결정된 위치  $P_{DR}$ 에 칼만필터로부터 갱신된 위치오차  $\delta P$ 를 보정하여 최적의 위치 추정치  $P_{EST}$ 를 결정한다.

### 3.3 센서통합필터

센서통합필터로서 5차 칼만필터를 사용한다. 상태변수  $\delta x(k)$ 는  $[\delta P_E(k) \delta P_N(k) \delta P_U(k) \delta \psi(k) \delta Sf_N(k)]$ 로 정의하며 각각 3차원위치 오차, 자세각 오차, 타코메타 환산계수 오차이다. 시스템모델은 식(6), 측정치 모델은 식(7)과 같고, 칼만필터의 갱신주기는  $\Delta t$ 이다.

$$\begin{aligned} \delta x(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s(k)\cos\psi(k)\Delta t & \frac{s(k)\sin\psi(k)\Delta t}{Sf_N} \\ 0 & 1 & 0 & -s(k)\sin\psi(k)\Delta t & \frac{s(k)\cos\psi(k)\Delta t}{Sf_N} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta P_E(k) \\ \delta P_N(k) \\ \delta P_U(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta Sf_N(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} w_{PE}(k) \\ w_{PN}(k) \\ w_{PU}(k) \\ w_\psi(k) \\ w_{Sf_N}(k) \end{bmatrix} = \Phi(k)\delta x(k) + w(k) \end{aligned} \quad \text{식(6)}$$

식(6)에서 공정잡음  $w(k)$ 와 (7)에서 측정잡음  $v(k)$ 는 백색잡음으로 가정하며, 공정잡음에 대한 공분산은  $Q(k)$ , 측정잡음에 대한 공분산  $R(k)$ 로 한다.

$$\delta z = \begin{bmatrix} P_{E,DR}(k) - P_{E,GPS}(k) \\ P_{N,DR}(k) - P_{N,GPS}(k) \\ P_{U,DR}(k) - P_{U,GPS}(k) \end{bmatrix} \quad \text{식(7)}$$

$$= \begin{bmatrix} 10000 \\ 01000 \\ 00100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta P_E(k) \\ \delta P_N(k) \\ \delta P_U(k) \\ \delta \psi(k) \\ \delta S f_N(k) \end{bmatrix} + v(k)$$

$$= H \delta x(k) + v(k)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 성능확인

제안한 차상기반의 열차위치검지장치의 성능확인을 위하여 본 논문에서는 북쪽방향으로 10초간 2g로 가속하여 19.62m/s의 속도로 등속도 평면 운동하는 타원궤적을 사용하였다. 생성된 타원궤적은 2045초 동안 시계방향으로 총 3회 회전을 하는 궤적이며 그림 3과 같다.

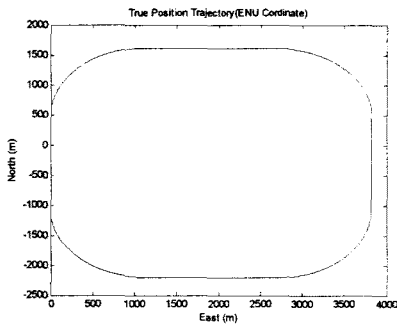


그림 3 시뮬레이션 궤적

DR항법부의 실행주기는 10Hz로 하고 GPS항법부와 칼만필터부의 실행주기는 1Hz로 하여 DR항법부의 오차를 1초마다 보정하도록 구성하였다. 타코메타의 오차는 백색잡음으로 하였으며 자이로스코프의 오차는 랜덤바이어스와 백색잡음을 가지도록 하였다. GPS항법부의 오차요소로서 열잡음오차, 이온층지연오차, 대류권지연오차를 고려하였으며 GPS항법알고리즘으로는 최소자승법(Least Square)을 사용하였다. 칼만필터는 3차원위치 오차, 자세각 오차, 타코메타 환산계수 오차를 상태변수로 하는 5차 칼만필터를 사용하였다.

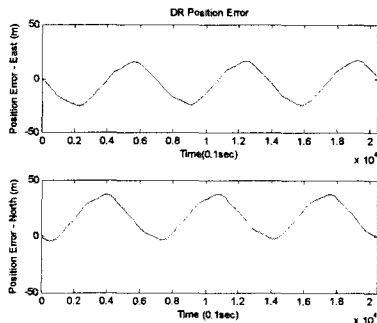


그림 4 DR항법 위치오차

그림 4는 DR항법만 수행하였을 때의 위치오차이다. 시험궤적이 3회전을 하는 타원궤적이므로 위치오차가 정현파의 형상으로 나타나며 속도오차와 자세각 오차의 누적으로 인하여 위치오차가 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

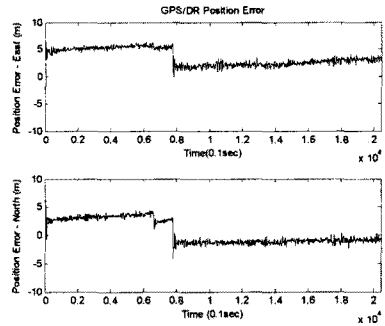


그림 5 GPS/DR 항법의 위치오차

표1 위치오차 비교

구성방식	위치오차	평균 (m)	표준편차 (m)
DR	동쪽방향	-4.12	13.87
	북쪽방향	17.14	13.70
GPS/DR	동쪽방향	3.46	1.52
	북쪽방향	0.49	2.13

GPS/DR 항법의 위치오차는 그림 5와 같다. 구성방식에 따른 위치오차를 표 1에서 비교하였다. GPS/DR항법 오차는 시간에 독립적인 GPS의 위치오차특성에 의해 감소됨을 볼 수 있다. 하지만 GPS/DR 구성방식은 GPS항법의 오차특성을 추종하는 특성을 가진다. 약 800초 구간에서 위치오차의 특성이 급격히 변하는 특성은 가시 GPS위성수의 변화가 있는 부분이다. GPS항법필터로서 시스템모델과 측정치모델을 모두 고려하는 칼만필터를 사용하면 가시위성 수에 따른 위치오차의 급격한 변화를 줄일 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 차상기반 위치검지방식의 구현을 위하여 GPS, 자이로스코프, 타코메타를 사용하는 GPS/DR기반의 차량 위치검지장치를 구성하였고, 3차원 위치 오차, 자세각 오차, 타코메타 환산계수 오차를 상태변수로 하는 5차 칼만필터를 사용하여 최적의 항법해 결정이 가능하도록 필터를 설계하였다. 19.62m/s의 속도로 진행하는 타원궤적을 적용한 시뮬레이션으로 위치검지성능을 확인하였으며 GPS/DR기반의 구성방법이 DR항법 보다 위치오차가 감소되었음을 확인하였다. 하지만 GPS/DR기반의 구성방법은 GPS의 위치 오차특성을 추종하는 특징을 가지므로 GPS 항법이 오랜 시간동안 불가능한 구간에서 GPS를 대신하여 기준위치를 제공하는 보조 장치가 필요하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김영태, "신호처리시스템", 3<sup>rd</sup> ed, Tech-media, 2004
- [2] R. J. Hill, "Electric Railway Traction.V. Train Detection, Communications and Supervision", Power Engineering Journal, vol.10, no.2, pp.87-95, 1996.4.
- [3] E. D. Kaplan, "Understanding GPS Principles and Applications", Artech House, 1996
- [4] J. A. Farrell, M. Barth, "The Global Positioning System & Inertial Navigation", McGraw-Hill, 1998
- [5] R. G. Brown, Patrik Y. C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, 1997