

센서융합에 의한 열차위치 추정방법

Estimation of Train Position Using Sensor Fusion Technique

윤희상* 박태형** 윤용기*** 황중규*** 이재호****
H. S. Yoon* T. H. Park** Y. K. Yoon*** J. K. Hwang*** J. H. Lee****

ABSTRACT

We propose a train position estimation method for automatic train control system. The accurate train position should be continuously feedback to control system for safe and efficient operation of trains in railway. In this paper, we propose the sensor fusion method integrating the tachometer, the transponder, and the doppler sensor for estimation of train position. The external sensors(transponder, doppler sensor) are used to compensate for the error of internal sensor(tachometer). The Kalman filter is also applied to reduce the measurement error of the sensors. Simulation results are then presented to verify the usefulness of the proposed method.

1. 서론

열차제어시스템은 열차의 진로제어 및 간격제어를 목표로 하며, 각 제어목표의 수행을 위해서는 정확한 열차위치검지가 전제되어야 한다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 열차위치검지 방식은 궤도회도[1]를 사용하는 방식이다. 궤도회도방식은 신뢰성이 높으나, 설치비 및 유지비용이 많이 들며, 특히 연속적인 열차위치검지가 어렵다. 고속, 고밀도 수송을 위한 효과적 열차제어를 위해서는 기존의 고정궤색방식의 열차제어를 이동궤색방식[2]으로 전환하여야 하며, 이를 위해서는 연속적이고 정확한 열차위치검지가 필수적이다.

궤도회도방식을 대체하기 위한 다양한 열차위치검지방식이 제시되고 있다. 미국의 BART[3]는 전과시간차방식을 사용하고, 유럽 ETCS[4]는 타코미터, 유로발리스 및 와전류센서를 사용한다. 미국 NYCT[5] 및 일본 CARAT[6]은 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서 사용하여 열차위치를 검지한다. 열차운행의 안전 및 열차검지의 신뢰성 확보를 위하여 단일 센서가 아닌 다중센서를 함께 사용하는 것이 일반적이다. 여러 개의 측정값으로부터 원하는 값을 추정하는 것은 센서융합의 범주에 속하며, 항법 및 로보틱스 분야 등에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 철도분야의 경우 GPS 및 INS를 융합한 사례[7]가 발표되었다.

본 논문은 궤도회도를 대체하여 열차의 위치를 검지하기 위한 여러 가지 검지기법을 나열하고 장단점을 비교한다. 특히 위치검출의 신뢰성을 높이기 위해 여러 개의 센서를 복합적으로 사용하는 방안을 검토한다. 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서를 사용하여 열차의 위치를 정확하게 추정하기 위한 융합기법을 제시하며, 칼만 필터를 적용하여 추정오차를 최소화하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 제시하고 제안된 방법의 유용성을 검증한다.

* 충북대학교 석사과정, 학생회원
** 충북대학교 교수, 정회원
*** 원도기술연구원 선임연구원, 정회원
**** 철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 열차위치검지방식

(1) 레도회로

레도회로는 1872년 보빈슨에 의해 발명되어 보급된 가장 오래되고 광범위하게 사용되는 열차위치검지기기술이다. 레도회로는 레일과 차량의 차축을 전기회로의 일부로 사용하여 열차의 존재유무를 검지하게 되며 효과적이며 안정적인 열차검지를 제공한다. 그러나 설치 및 유지보수 비용이 크고, 고정폐색방식으로 인하여 고속 및 고밀도 수송을 위한 열차제어에 사용하기 어렵다.

(2) 타코미터(Tachometer)

타코미터는 자기센서 및 광학센서 등과 같은 센서를 통해 차축 또는 바퀴의 회전수를 계수하여 위치를 검지하는 방식이다. 차량이 움직인 거리와 속도를 연속적으로 검지할 수 있다는 장점이 있으나, 바퀴의 미끄러짐 및 슬립 현상[8]으로 오차가 발생하게 되어 시간이 지남에 따라 오차가 점점 누적되는 단점이 있다.

(3) 트랜스폰더(Transponder)

트랜스폰더 위치시스템은 무선인식(RFID: Radio Frequency Identification)기술을 이용한 것으로 리더기에서는 요청신호를 계속해서 보내주며 트랜스폰더는 이를 받아 자신의 데이터를 리더기에 전송하는 방식이다.[9] 열차시스템에서는 차량에 리더기를 달고 선로에 열정구간마다 위치정보가 들어있는 트랜스폰더를 설치하여 열차와 트랜스폰더의 송수신을 통해 위치검지를 하게 된다. 이 방식은 레도회로와 마찬가지로 연속적으로 위치를 검지할 수 있으나 타코미터와 같은 다른 다른 기술과 혼용 시 절대위치 보정용으로 사용할 수 있다.[8]

(4) 도플러 센서

도플러센서는 다가오는 물체에는 반사파의 주파수가 높아지고 반대로 멀어지는 물체에는 반사파의 주파수가 낮아지는 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 센서이다.[8] 열차에 도플러 센서를 장착하여 일정한 주파수를 바닥에 쏘면 반사파가 다시 돌아오게 되고 이때의 주파수를 측정하여 속도를 알아내게 된다.

(5) 와전류 센서

와전류센서는 가변 자기장 내에 도체의 유무에 따른 자기장의 변화를 통해 존재여부를 검지한다. 철도에서는 차량에 와전류센서를 장착하여 선로의 요철을 검지하여 속도를 통해 위치를 알아낼 수 있으며 선로분기점에서 진행 경로 예측도 가능하다.[10] 구조가 간단하며 환경에의 영향을 거의 받지 않는 장점이 있지만 자성체를 검지하는 방식이므로 선로에 자성체가 없는 경우에는 검지가 불가능하다.

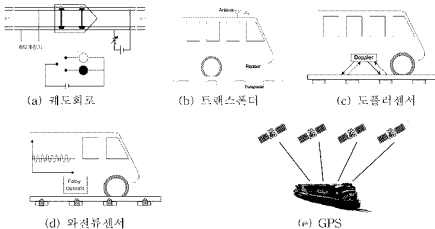


그림1. 열차위치검지방식의 예

(6) GPS(Global Positioning System)

GPS는 위성항법시스템으로 위성 네트워크를 이용하여 위성과의 통신시간차를 통해 위치를 검지하는 방식이다. GPS는 군사용으로 개발 되었으나 현재는 자동차와 같은 개인항법에도 사용될 정도로 설치가 용이하고 많은 응용이 가능하다. 그러나 위성이 보이지 않는 도시지하철이나 터널과 같은 곳에서는 사용이 불가능하다는 단점이 있다.

(7) INS(Inertial Navigation System)

INS는 관성항법 시스템으로 관성센서인 가속도계와 자이로스코프를 이용하여 위치를 검지한다. 가속도계는 이동물체의 병진운동을 감지하고 자이로스코프는 회전운동을 감지한다. 시간에 따라 누적오차가 발생하는 단점이 있다.

그림 1 은 열차위치검지방식의 예를 보여준다.

3. 다중센서에 의한 열차위치검지방식

(1) GPS+INS

GPS는 위성을 통해 절대위치정보를 얻게 되지만 위성 수신이 불가능한 지역에서는 위치를 확인할 수 없다. INS는 가속도계와 자이로를 통해 연속적으로 위치를 확인할 수 있지만 시간이 지남에 따라 누적오차가 발생하게 된다. 이렇게 각각의 단점들을 GPS와 INS를 통합함으로써 INS의 누적오차는 GPS를 통해 방지하고 GPS의 위성신호 수신이 불가능지역에서는 INS를 통해 위치를 추적할 수 있다.[7]

(2) 타코미터+트랜스폰더

타코미터는 바퀴의 회전을 통해 누적거리를 측정하므로 시간에 따라 누적오차가 발생하게 된다. 이런 타코미터를 트랜스폰더와 결합하여 일정 거리 또는 구간에 트랜스폰더를 설치하여 타코미터의 누적오차를 트랜스폰더로 보정하게 된다. 타코미터와 트랜스폰더를 결합하게 되면 트랜스폰더의 잠정인 신호정보와 신호분기 시 신호 식별과 위치검지를 동시에 할 수 있는 장점이 생긴다. 즉 열차의 간격제어 및 진로제어에 모두 동일하게 사용될 수 있다.

(3) 타코미터+트랜스폰더+도플러센서

타코미터와 트랜스폰더를 융합한 것에 도플러센서를 추가하게 되면, 타코미터에서 발생하는 미끄러짐 및 슬립오차를 도플러센서에 의해 보정할 수 있다. 따라서 열차위치검지를 좀 더 신뢰성 있게 검지할 수 있으며 이는 열차의 안정성과 효과적 운용에도 도움이 된다.

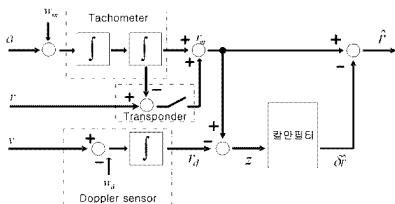
4. 다중센서의 융합에 의한 열차위치추정

앞 장에서 논한 바와 같이, 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서의 다중센서를 사용하는 방식은 열차의 간격제어 및 진로제어에 모두 적용할 수 있고, 경제성 및 신뢰성 측면에서 우수한 열차위치검지 방식이다. 그러나 측정 물리량과 특성이 서로 다른 다수의 센서를 사용하기 위해서는 각 센서 측정값으로부터 열차위치를 정확히 추정하기 위한 융합기술이 필요하다. 센서융합에 대한 연구는 항법 분야 및 로보틱스 분야에서 활발히 진행되고 있으며, 이들 연구결과를 응용하여 철도위치검지에 적용할 수 있다.

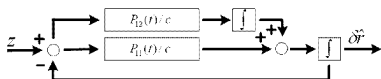
그림 2 는 본 논문에서 제안하는 열차위치추정을 위한 다중센서의 융합방법을 보여준다. 타코미터를 주 센서로 하고, 트랜스폰더 및 도플러센서를 보조센서로 하여, 주 센서의 위치오차를 보정하는 방법이다. 타코미터는 열차바퀴의 회전수를 계수하여 열차 위치 값을 출력하며, 레일에 부착된 트랜스폰더는 일정 위치 간격마다 열차의 절대 위치 값을 출력하여 타코미터에서 발생하는 누적위치오차를 보정한다. 도플러센서는 반사파를 사용하여 별도의 열차위치 값을 출력한다. 타코미

터에서 발생하는 누적거리오차는 열차가속도의 잡음으로 모델링하며, 도플러센서에서 발생하는 오차도 잡음으로 모델링한다. 타코미터와 도플러센서의 출력 값의 차이는 칼만 필터로 입력되어 오차보정치가 출력되며, 이 값으로부터 열차위치의 추정치를 얻는다.

열차의 실제 가속도, 속도, 위치를 각각 a, v, r 이라 표시하며, 타코미터 및 도플러센서의 위치



a) 전체시스템 블록도



b) 칼만 필터 블록도

그림 2. 다중센서융합에 의한 열차위치추정

측정값을 각각 r_m, r_d 라 표시한다. 또한 타코미터 및 도플러센서의 잡음을 각각 w_m, w_d 라 표시한다. 이 때 타코미터의 위치추정오차 δr 및 속도측정오차 δv 는 다음과 같다.[11],[12]

$$\delta r = r_m - r \quad (1)$$

$$\delta v = v_m - v \quad (2)$$

타코미터 위치추정값과 도플러센서 위치추정값의 차이 z 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z &= r_m - r_d \\ &= (r + \delta r) - (r - w_d) \\ &= \delta r + w_d \end{aligned} \quad (3)$$

이로부터 다음의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r} \\ \delta \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r \\ \delta v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_m \quad (4)$$

$$z = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \delta r \\ \delta v \end{bmatrix} + w_d \quad (5)$$

위치측정오차의 보정치 $\hat{\delta r}$ 및 속도측정오차의 보정치 $\hat{\delta v}$ 는 다음의 칼만 필터 방정식으로부터 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\delta r} \\ \hat{\delta v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta r} \\ \hat{\delta v} \end{bmatrix} + \frac{1}{c} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} (z - \delta r) \quad (6)$$

단, c 는 상수이며, 잡음 w_d 에 대한 공분산이다. 칼만 이득값 P_{11}, P_{12} 는 다음 방정식에 의하여 그 값이 갱신된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_{11} \\ \hat{P}_{12} \end{bmatrix} \frac{P_{11}}{P_{12}} \begin{bmatrix} 2P_{12} & P_{22} \\ P_{22} & q \end{bmatrix} - \frac{1}{c} \begin{bmatrix} P_{11}^2 & P_{11}P_{12} \\ P_{11}P_{12} & P_{12}^2 \end{bmatrix}$$

(7)

단 q 는 상수이며 잡음 w_m 에 대한 공분산이다.

칼만 필터에서 출력되는 위치특정오차의 보정치 $\hat{\delta r}$ 에 의하여 타코미터의 위치측정값 r_m 을 보 상하여, 최종적으로 위치 추정값 \hat{r} 을 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{r} = r_m - \hat{\delta r} \quad (8)$$

5. 시뮬레이션

제안된 열차위치감지 시스템의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 차량에 장착 된 타코미터의 바퀴 당 펄스 수는 200pulse/1cycle 로 가정하였고 열차는 1 바퀴 회전 시 2m 진 행된다고 가정하였다. 또한 트랜스폰더는 2km 간격으로 설치되어 있다고 가정하였다. 타코미터 및 도플러센서에 입력되는 잡음은 평균이 0 인 백색잡음으로 가정하였다. 칼만 필터는 C 언어로 구현되어 윈도우즈 운영체제의 개인용 컴퓨터에서 수행되었다.

시뮬레이션은 타코미터를 단독으로 사용하였을 경우(Tacho), 타코미터와 트랜스폰더를 병행해서 사용하였을 경우(Tacho+Transponder), 타코미터, 트랜스폰더, 도플러센서를 사용하였을 경우 (Tacho+Transponder+Doppler), 타코미터, 트랜스폰더, 도플러센서를 칼만 필터로 융합하였을 경우 (Tacho+Transponder+Doppler+K-Filter) 등 4 가지를 비교하여 수행하였다. 그림 3 은 측정오차 그래프이다. 72 km/h 의 속도로 이동하는 열차에서 발생하는 위치오차류 600 초 까지 보여준다. 타코미터를 단독으로 사용하였을 경우, 시간이 지남에 따라 누적오차가 발생하는 것을 볼 수 있 다. 타코미터와 트랜스폰더를 사용하였을 경우 오차가 증가하다가 트랜스폰더신호가 들어오면 보 정이 되는 것을 볼 수 있다. 또한 타코미터와 트랜스폰더 도플러센서를 병행해서 시뮬레이션 하였 을 경우는 타코미터와 트랜스폰더를 병행해서 사용 시보다 오차가 줄어는 것을 확인할 수 있으며 마지막으로 칼만 필터를 적용하여 센서 융합 하였을 경우는 오차가 최소화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4 는 t=580초 지점에서의 열차의 실제이동거리와 측정거리를 비교하여 보여준다. 타코미터 단독으로 사용했을 경우가 실제거리와 약 300m 정도 차이가 발생하는 것을 볼 수 있으며 타코미 터+트랜스폰더의 경우는 약 40m, 타코미터+트랜스폰더+도플러의 경우는 약 20m , 타코미터+트랜 스폰더+도플러+칼만 필터는 약 14m 의 위치오차가 발생됨을 보여준다.

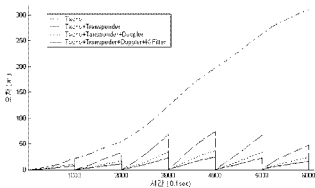


그림 3. 위치추정오차 그래프

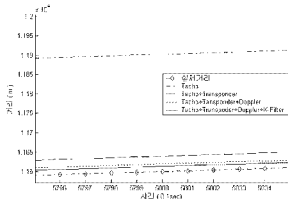


그림 4. 정확거리 그래프

6. 결론

열차의 전로제어 및 간격제어에 모두 사용이 가능하고, 경제성 및 신뢰성 측면에서 우수한 열차 위치검지방식으로서 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서를 융합하여 사용하는 방법을 제안하였다. 타코미터를 주 센서로 하고 트랜스폰더 및 도플러센서를 보조센서로 활용하는 방법이며, 다중센서 사용 시 성능향상을 위하여 필요한 센서융합기법을 적용하였다. 확률적으로 발생되는 위치측정오차를 고려하여 칼만 필터를 설계하여 적용하였으며, 이를 위한 열차위치추정 시스템의 동적특성을 모델링하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안방법의 타당성을 검증하였으며, 후속 열차제어시스템과의 통합에 대한 연구를 진행하고자 한다.

참고문헌

1. 김영태(2003), "신호제어시스템", 테크미디어.
2. 김종기 외(2002), "Smart-Rail 기술개발", 한국철도기술연구원.
3. 조봉관(2002), "무선에 의한 열차위치검지 기술개발 동향", 철도기술정보시스템.
4. A. Zimmermann, G. Hommel (2003), "A train control system case study in model-based real time system design", Proc. of Parallel and Distributed Processing Symposium, pp.22-26.
5. E. Schaefer, E. Mortlock, "Engineering the CBTC interface with the NYCT R143 vehicle",

- Railroad Conference, Proc. of of the 2001 IEEE/ASME Joint Conf. Railroad, pp17-28.
6. Y. Hasegawa, H. Nakamura(1994), "Experimental system of CARAT on the Joetsu Shinkansen line", Vehicular Technology Conference, pp1122-1125.
 7. A. Filip, J. Taufer, H. Mocek, L. Bazant, V. Maixner(2004), "The high integrity GNSS/ INS based train position locator", Computers in Railways IX, pp.497-506, Wit Press.
 8. A. Mirabadi, N.Mort, F.Schmid(1996), "Application of Sensor Fusion to Railway Systems", IEEE/SICE/RSJ International Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.185 ~ 192.
 9. 윤상문, 백선기, 김윤집, 박면규, 이기서(2002), "고속연식이 가능한 무선인식 시스템에 관한 연구", 한국철도학회 02 춘계학술대회논문집, pp.522-529.
 10. J. Allan, C. A .Brescia, R. J. Hill, G. Sciutto, S. Sone(2004), "Detection and classification of turnouts using eddy current sensors", Computers in Railways IX, pp.467-476, Wit Press.
 11. P. S Maybeck(1979), "Stochastic Models, Estimation, and Control Volume1", Academic Press. Inc.
 12. C. K. Chui, G. Chen(1998), "Kalman Filtering with Real-Time Applications", Springer Verlag