

센서융합에 의한 열차위치 추정방법

Estimation of Train Position Using Sensor Fusion Technique

윤희상¹ · 박태형² · 윤용기³ · 황종규³ · 이재호⁴

Hee-Sang Yoon · Tae-Hyoung Park · Yong-Gi Yoon · Jong-Gyu Hwang · Jae-Ho 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 a tachometer, a transponder, and a 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.

Keywords : Train Position Estimation(열차위치추정), Sensor Fusion(센서융합), Kalman Filter(칼만 필터)

1. 서론

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

궤도회로방식을 대체하기 위한 다양한 열차위치검지방식이 제시되고 있다. 미국의 BART[3]는 전파시간차방식을 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 확

보를 위하여 단일 센서가 아닌 다중센서를 함께 사용하는 것이 일반적이다. 여러 개의 측정값으로부터 원하는 값을 추정하는 것은 센서융합의 범주에 속하며, 항법 및 로봇틱스 분야 등에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 철도분야의 경우 GPS 및 INS를 융합한 기술과 트랜스폰더와 타코미터를 융합한 기술이 발표되었다[7].

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

2. 열차위치검지방식

2.1 단일센서 방식

하나의 센서 또는 검지장치를 사용하여 열차의 위치를 검지하는 방식이다. Fig. 1은 위치검지방식의 예를 보여준다.

1. 정회원 충북대학교 제어계측공학과 석사과정.
2. 정회원 충북대학교 제어계측공학과 교수.
3. 정회원 철도기술연구원 선임연구원.
4. 정회원 철도기술연구원 책임연구원.

A. 궤도회로(Track Circuit)

궤도회로는 1872년 로빈슨에 의해 발명되어 보급된 가장 오래되고 광범위하게 사용되는 열차위치검지방식이다. 궤도회로는 레일과 차량의 차축을 전기회로의 일부로 사용하여 열차의 존재유무를 검지하게 되며 효과적이며 안정적인 열차검지를 제공한다. 그러나 설치 및 유지보수 비용이 크고, 고정색방식으로 인하여 고속 및 고밀도 수송을 위한 열차제어에 사용하기 어렵다. 특히 최근 경량전철에 사용되는 고무바퀴 형 차량에는 적용이 불가능하다.

B. 타코미터(Tachometer)

타코미터는 자기센서 및 광량센서 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 현상으로 오차가 발생하게 되어 이동거리가 증가함에 따라 오차가 점점 누적되는 단점이 있다.

C. 트랜스폰더(Transponder)

트랜스폰더 위치시스템은 무선인식(RFID: radio frequency identification)기술을 이용한 것으로 리더기에서는 요청 신호를 계속해서 보내주며 트랜스폰더는 이를 받아, 미리 지정된 자신의 위치데이터를 리더기에 전송하는 방식이다[8]. 열차시스템에서는 차량에 리더기를 달고 선로에 일정구간마다 위치정보가 들어있는 트랜스폰더를 설치하여 열차와 트랜스폰더의 송수신을 통해 위치검지를 하게 된다. 이 방식은 궤도회로와 마찬가지로 연속적으로 위치를 검지할 수 없으나 타코미터와 같은 다른 기술과 혼

용 시 절대위치 보정용으로 사용할 수 있다.

D. 도플러 센서(Doppler Sensor)

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

E. GPS(Global Positioning System)

GPS는 위성항법시스템으로 위성 네트워크를 이용하여 위성과의 통신 시간차를 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 어렵다는 단점이 있다.

F. INS(Inertial Navigation System)

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

2.2. 다중센서 방식

하나의 센서를 사용하는 경우의 문제점을 보완하기 위하여 여러 개의 센서 또는 검지장치를 사용하여 열차위치를

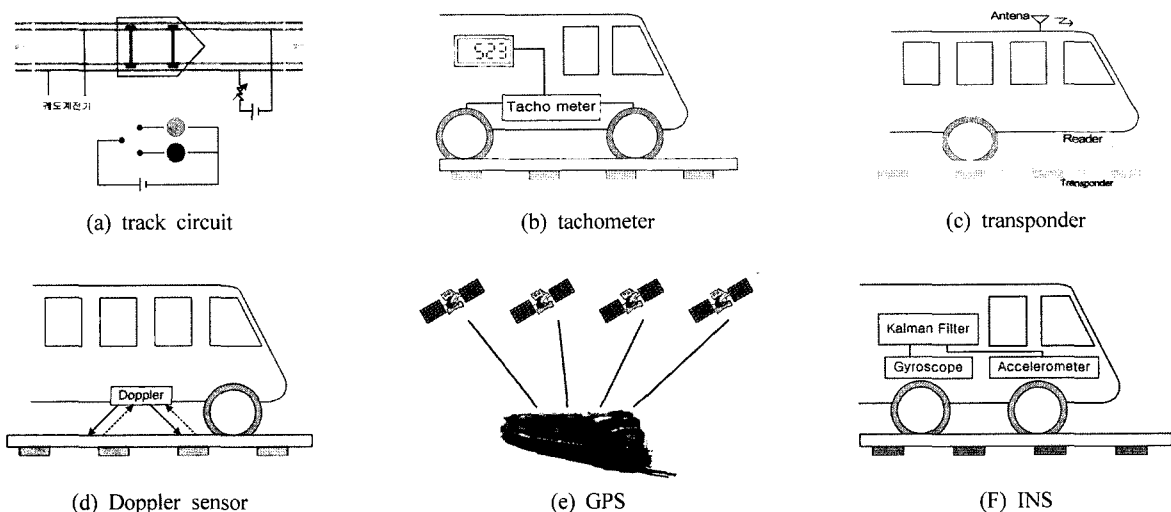


Fig. 1. Examples of train position sensor

검지하는 방식이다.

A. 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[10]. 그러나 지하에서 대부분 운행되는 우리나라 도시철도의 경우, 그 적용이 적절하지 않다.

B. 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 장점인 선로정보와 선로분기 시 선로 식별과 위치검지를 동시에 할 수 있는 장점이 생긴다. 즉 열차의 간격제어 및 진로제어에 모두 동일하게 사용될 수 있다.

C. 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.

3. 다중센서의 융합에 의한 열차위치추정

앞 장에서 논한 바와 같이, 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서의 다중센서를 사용하는 방식은 열차의 간격제어 및 진로제어에 모두 적용할 수 있다. 또한 해외 적용사례에서 확인된 바와 같이 경제성 및 신뢰성 측면에서 우수한 열차위치검지 방식이다.

그러나 측정 물리량과 특성이 서로 다른 다수의 센서를 사용하기 위해서는 각 센서 측정값으로부터 원하는 값을 정확히 추정하기 위한 융합기술이 필요하다. 센서융합에 대한 연구는 항법 분야 및 로봇틱스 분야에서 활발히 진행되고 있으며[11], 이들 연구결과를 응용하여 철도위치검지에 적용할 수 있다.

3.1. 시스템 모델

Fig. 2는 본 논문에서 제안하는 열차위치추정을 위한 다중센서의 융합방법을 보여준다. 타코미터를 주 센서로 하고, 트랜스폰더 및 도플러센서를 보조센서로 하여, 주 센서의 위치오차를 보조센서가 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. 타코미터에서 발생하는 누적거리오차 및 도플러센서에서 발생하는 오차는 모두 잡음으로 모델링한다. 타코미터와 도플러센서의 출력 값의 차이는 칼만필터로 입력되어 오차보정치가 출력되며, 이 값으로부터 열차위치의 추정치를 얻는다.

열차 가속도, 속도 및 위치의 참값을 각각 a, v, r 이라 표시하며, 타코미터의 위치측정값 및 속도측정값을 각각 r^m, v^m 으로 표시한다. 이 때 타코미터의 위치측정오차 δr 및 속도측정오차 δv 는 다음과 같이 정의한다.

$$\delta r = r^m - r \tag{1}$$

$$\delta v = v^m - v \tag{2}$$

또한 타코미터에 포함된 잡음값을 w 라 하면, 다음 관계가 성립된다.

$$\dot{v}^m = a + w = \dot{v} + w \tag{3}$$

위의 식 (1)-(3)으로부터 다음의 관계식이 유도된다.

$$\delta \dot{r} = \delta \dot{v} \tag{4}$$

$$\delta \dot{v} = w \tag{5}$$

도플러센서의 위치측정값 r^d 는 열차 위치의 참값 r 과 도플러센서의 위치잡음값 d 의 차이로서 다음과 같이 정의한다.

$$r^d = r - d \tag{6}$$

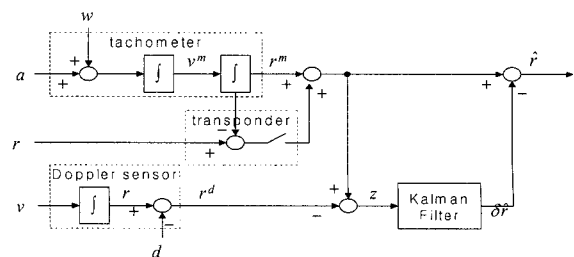


Fig. 2. System model

타코미터 위치측정값과 도플러센서 위치측정값의 차이 z 는, 식 (1) 및 식 (6) 에 의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= r^m - r^d \\ &= (r + \delta r) - (r - d) \\ &= \delta r + d \end{aligned} \quad (7)$$

칼만필터는 위의 z 값을 입력으로 하여, 위치측정오차 δr 의 추정치 $\delta \hat{r}$ 을 출력한다. 최종적으로 타코미터 측정값 r^m 에 $\delta \hat{r}$ 을 빼서, 열차의 위치추정치 \hat{r} 을 출력시킨다. 트랜스폰더가 연결된 경우에는 칼만필터 동작이 불필요하며, 위치추정치에 열차 위치의 참값 r 이 직접 출력된다. 또한 δr 및 δv 값을 모두 0으로 초기화 시킨다. 즉, 열차의 최종 위치추정치는 다음과 같다.

$$\hat{r} = \begin{cases} r^m - \delta \hat{r}, & \text{transponder off} \\ r, & \text{transponder on} \end{cases} \quad (8)$$

3.2. 칼만필터 설계

칼만필터는 잡음이 포함된 측정치로부터 시스템의 상태 변수를 추정하는 방법으로서, 영평균의 가우시안 잡음에 대하여 최적의 추정치를 추출할 수 있다[11-12].

칼만필터를 열차위치검지에 적용하기 위하여 시스템의 동적방정식이 필요하다. 식 (4), (5), (7)로부터 다음의 이산화된 형태의 방정식을 구할 수 있다.

$$\delta r_{k+1} = \delta r_k + \Delta t \delta v_k \quad (9)$$

$$\delta v_{k+1} = \delta v_k + \Delta t w_k \quad (10)$$

$$z_k = \delta r_k + d_k \quad (11)$$

단, k 는 이산화된 시간의 k 번째 시점을 표시하며, Δt 는 시간간격을 표시한다. 위의 식은 다음과 같은 상태방정식으로 표현될 수 있다.

$$x_{k+1} = A x_k + B w_k \quad (12)$$

$$z_k = C x_k + d_k \quad (13)$$

이 때 상태변수는 $x_k = [\delta r_k \ \delta v_k]^T$ 이며, 각 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta t \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0] \quad (14)$$

식 (12)-(13)의 시스템 모델을 칼만필터방정식[12]에 적용하면 다음과 같은 계산식을 얻을 수 있다.

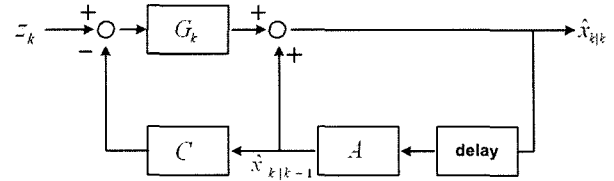


Fig. 3. Kalman filter

$$P_{k,k-1} = A P_{k-1,k-1} A^T + B Q B^T \quad (15)$$

$$G_k = P_{k,k-1} C^T (C P_{k,k-1} C^T + R)^{-1} \quad (16)$$

$$P_{k,k} = (I - G_k C) P_{k,k-1} \quad (17)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = A \hat{x}_{k-1|k-1} \quad (18)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + G_k (z_k - C \hat{x}_{k|k-1}) \quad (19)$$

단, Q, R 은 각각 잡음 w_k 및 d_k 의 분산 값이다. 또한 $P_{0,0} = \text{Var}(x_0)$, $\hat{x}_{0|0} = E(x_0)$ 이다.

위의 식은 측정값 z_k 로부터, 상태변수 x_k 의 추정치 $\hat{x}_{k|k}$ 를 계산하는 과정으로서, G_k 는 칼만이득이며, 블록선도는 Fig. 3과 같다. 추정치 $\hat{x}_{k|k}$ 는 벡터로서 위치성분 원소가 $\delta \hat{r}$ 이며, 식 (8)과 같이 열차위치추정값 \hat{r} 계산에 사용된다.

4. 시뮬레이션

제안된 열차위치검지 시스템의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 차량에 장착된 타코미터의 바퀴당 펄스 수는 200pulse/1cycle로 가정하였고, 열차는 1바퀴 회전 시 2m 진행한다고 가정하였다. 또한 트랜스폰더는 2km 간격으로 설치되어 있다고 가정하였다. 타코미터 및 도플러 센서에 입력되는 잡음은 분산이 각각 0.001m/sec, 0.01m/sec 이고 평균이 0인 백색잡음으로 가정하였다. 열차이동시간은 총 600초로 하였다.

시뮬레이션은 IBM-PC, Microsoft Window XP 환경에서 Matlab 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. Fig. 4는 실제 열차의 가속, 등속, 감속으로 총 20km 구간을 이동하였을 경우의 시뮬레이션 데이터로 Fig. 4(a)는 실제 열차의 이동 거리이며 Fig. 4(b)는 실제 속도 그래프이다. 이 데이터를 사용하여 위치검지방식을 두 가지 경우로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫째, 트랜스폰더를 사용하지 않은 경우로 다음의 3가지 위치검지방식을 비교하여 테스트 하였다.

- ① 타코미터
- ② 타코미터+도플러 센서
- ③ 타코미터+도플러 센서+칼만필터

둘째, 트랜스폰더를 사용한 경우로 다음의 3가지 방식을 비교하여 테스트 하였다.

- ①' 타코미터+트랜스폰더
- ②' 타코미터+트랜스폰더+도플러 센서
- ③' 타코미터+트랜스폰더+도플러 센서+칼만필터

Fig. 5 는 트랜스폰더를 사용하지 않은 경우의 비교 대상에 대한 오차를 보여준다. 오차의 크기는 ①>②>③ 순으로

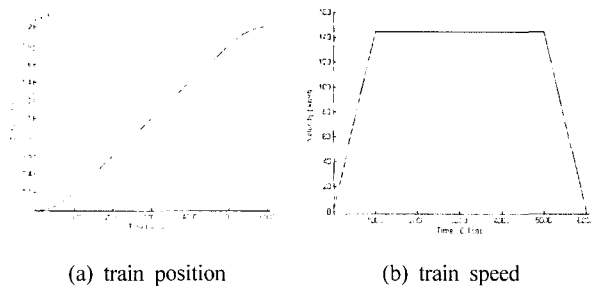


Fig. 4. Simulation data

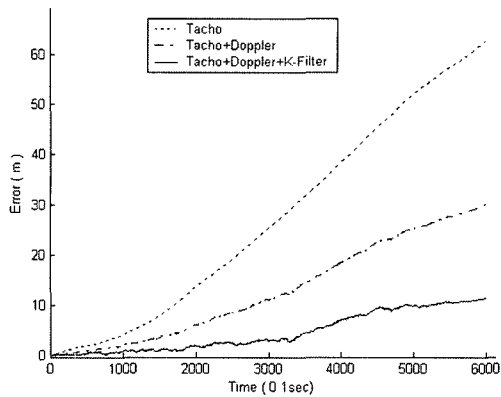


Fig. 5. Position estimation error(without transponder)

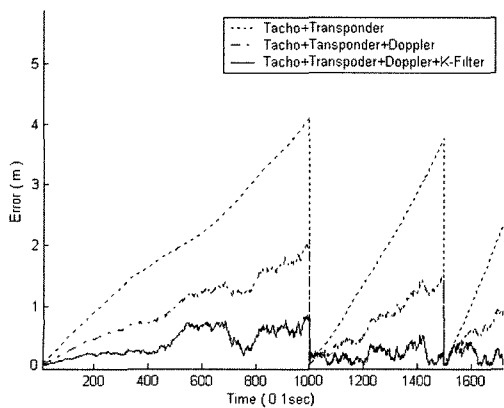


Fig. 6. Position estimation error(with transponder)

감소되는 것을 확인 할 수 있으며 각 방식 별 평균오차는 ①27.3m, ②12.9m, ③4.6m 이다. 테스트 결과를 보면 타코미터를 단독으로 사용하는 것 보다 도플러 센서를 칼만필터를 통해 센서 융합하여 사용한 것이 좀 더 적은 오차를 가진다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 6 은 트랜스폰더를 사용한 경우의 비교 대상에 대한 오차를 보여준다. 누적된 위치오차가 2km 간격으로 설치된 트랜스폰더에 의해 보정이 되는 것을 볼 수 있다. 오차의 크기는 앞의 경우와 마찬가지로 ①'>②'>③' 순으로 감소되는 것을 확인 할 수 있으며 각 방식 별 평균오차는 ①' 3.2m, ②' 1.5m, ③' 0.5m 이다.

시뮬레이션 결과 트랜스폰더를 사용하지 않은 경우는 오차 보정이 이루어 지지 않아 오차가 누적되는 것을 확인할 수 있다. 또한 트랜스폰더의 사용 유무에 관계없이 타코미터와 도플러센서를 칼만필터를 이용해 융합하여 사용한 경우, 상호 위치 보정에 의하여 위치오차가 감소함을 확인 하였으며, 칼만필터의 적용으로 잡음에 보다 강한 위치추정치를 얻을 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

열차의 진로제어 및 간격제어에 모두 사용이 가능하고, 경제성 및 신뢰성 측면에서 우수한 열차위치검지방식으로 타코미터, 트랜스폰더 및 도플러센서를 융합하여 사용하는 방법을 제안하였다. 타코미터를 주 센서로 하고 트랜스폰더 및 도플러센서를 보조센서로 활용하는 방법이며, 다중 센서 사용 시 성능향상을 위하여 필요한 센서융합기법을 적용하였다. 확률적으로 발생하는 위치추정오차를 고려하여 칼만필터를 설계하여 적용하였으며, 이를 위한 열차위치추정 시스템의 동적특성을 모델링하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안방법의 타당성을 검증하였다.

본 연구의 결과는 열차위치 제어시스템에 적용되어 보다 정확한 위치제어에 활용될 수 있다. 또한 타코미터 및 도플러센서에서 발생하는 누적위치오차를 감소시킴으로서, 트랜스폰더의 설치간격을 상대적으로 넓게 할 수 있다. 즉 저비용 센서인 타코미터, 도플러센서의 활용을 극대화하여, 고비용 센서인 트랜스폰더의 설치비를 줄이는 효과가 있으리라 기대된다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영태, 신호제어시스템, 테크미디어, 2003.
2. 김종기 외, Smart-Rail 기술개발, KRRRI 연구 02-60, 한국철도기술 연구원, 2002.
3. 조봉관, “무선에 의한 열차위치검지 기술개발 동향”, 철도기술 동향, 철도기술연구원, 2002.
4. A. Zimmermann, G. Hommel, “A Train Control System Case Study in Model-Based Real Time System Design”, Proc. of Parallel and Distributed Processing Symposium, pp.22-26, 2003.
5. E. Schaefer, E. Mortlock, “Engineering the CBTC Interface with the NYCT R143 Vehicle”, Proc. of the 2001 IEEE/ASME Joint, Conf on Railroad, pp.17-28, 2001.
6. Y. Hasegawa, H. Nakamura, “Experimental System of CARAT on the Joetsu Shinkansen Line”, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Vehicular Technology, vol.2, pp.1122-1125, 1994.
7. A. Mirabadi, N.Mort, F.Schmid, “Application of Sensor Fusion to Railway Systems”, IEEE/SICE/RSJ Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.185-192, 1996.
8. 강민수, 이정석, 광철성, 이기서, “무선주파수를 이용한 철도 차량 인식에 관한 연구”, 한국철도학회 2000년 추계학술대회논문집, pp.571-577, 2000.
9. J. Allan, C. A .Brebba, R. J. Hill, G. Scitutto, S. Sone, “Detection and Classification of Turnouts Using Eddy Current Sensors”, Computers in Railways IX, pp.467-476, Wit Press, 2004.
10. A. Filip, J. Taufer, H. Mocek, L. Bazant, V. Maixner, “The High Integrity GNSS/ INS Based Train Position Locator”, Computers in Railways IX, pp.497-506, Wit Press, 2004.
11. P. S Maybeck, Stochastic Models, Estimation, and Control Volume1, Academic Press Inc., 1979.
12. C. K. Chui, G. Chen, Kalman Filtering with Real-Time Applications, Springer Verlag, 1998.