

도로상 자기표지의 인식을 통한 주행차량 위치 추정

윤경한¹, 변운섭², 민경득¹, 김영철¹,
¹충북대학교 전자공학과, ²한국철도기술연구원

Estimation of Vehicle Position Based on Magnet Marker Sensing System

Kyoung-Han Yun¹, Yun-Seob Byun², Kyung-Deuk Min¹, Young-Chol Kim¹

¹Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Korea

²Bimodal Transportation Research Cdnter, Korea Railroad Research Institute, Korea

Abstract - 본 논문은 도로상에 매설된 자기표지의 인식을 통해 주행 중인 바이모달 트램의 위치를 추정하는 추정알고리즘 설계 및 검증에 대한 내용을 다룬다. 바이모달 트램은 자동 안내제어를 위해 도로상에 4m 간격으로 매설된 자기표지를 인식하여 차량과 기준경로사이의 경로오차를 추정하고, 이 때 측정된 정보를 이용하여 차량의 위치를 계산한다. 경로오차 측정 정보는 125msec간격으로 이산적으로 주어지며, 차량의 선형모델에 근거한 관측기를 이용하여 차량의 위치를 실시간으로 추정하는 알고리즘을 설계하고, 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

바이모달 트램이라고 불리는 차량은 버스를 2~3대 연결한 구조이고, 모든 바퀴가 조향되도록 설계되어 일반도로를 마치 기차처럼 운행할 수 있도록 개발되고 있는 신 개념의 교통기술이다. 이 차량은 운전자의 조향조작 없이 자동으로 주행할 수 있는 안내제어 기능을 갖도록 설계되는데, 이 시스템에는 도로의 중앙 차선과 차량사이의 편차를 정밀하게 인지해야 하는 기능이 필수적으로 요구된다.

본 논문에서는 도로 중앙을 따라 4m 간격으로 매입되는 자기표지를 센서로 감지하여 이 데이터로부터 주행 중인 차량의 위치를 실시간으로 추정하는 기법을 제시한다. 이 관측기 설계는 차량의 속도, 각 바퀴의 조향각, 도로에 대한 곡률반경 데이터, 자기표지의 위치정보를 입력으로 하는 차량의 선형동역학모델을 근거로 하였다. 2량1편성 굴절차량에 대한 비선형 횡방향 동역학 모델을 이용하여 시뮬레이션을 통해 제시한 방식의 검증 결과를 보인다.

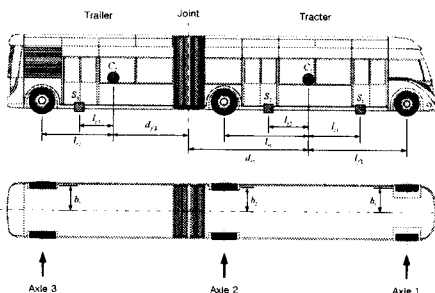
2. 선형 동적모델을 이용한 위치정보 추정

바이모달 트램의 선형 동적모델은 관성좌표계에서 유도된 비선형 동적모델을 회전변환을 통해 차량중심좌표계로 변환한 후 다음과 같은 가정 아래에서 선형화된다.

- 가정 1. 차량 진행방향의 가속이 매우 작다.
- 가정 2. 차량과 경로가 이루는 상대각이 작다.
- 가정 3. 2량 1편성에서 첫 번째 객차와 두 번째 객차가 이루는 각도(굴절각)이 작다.
- 가정 4. 차량의 미끄러짐이 매우 작다.
- 가정 5. 차량의 횡방향 운동은 선형화된 타이어 모델에 의해 표현된다.

2.1 바이모달 트램의 파라미터

바이모달 트램의 형태는 아래의 그림 1과 같다. 여기서 C_1 과 C_2 는 각각 첫 번째 객차와 두 번째 객차의 무게중심을 의미한다. S_1, S_2, S_3 는 기준경로와의 편차를 측정할 자기센서의 위치이다.



〈그림 1〉 바이모달 트램

2.2 선형 동적모델

식 (1)과 같이 유도된 바이모달 트램의 비선형 동적모델 식으로부터 위의 다섯 가지 가정을 이용하여 선형모델을 유도하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다. [참고문헌]

$${}^wM({}^wq) {}^wq' + {}^wC({}^wq, {}^wq') {}^wq' = {}^wT_{\text{tire}} \quad (1)$$

$${}^wT_{\text{tire}} = \sum_{i=1}^2 \{ {}^wL_{\text{long}} R_{\text{rot}}^{-1} T_{\text{dr}_i} + {}^wL_{\text{lat}_i} (R_{\text{rot}}^{-1} D(T_{\text{dr}_i}) \delta_i + C_i(\delta_i - \beta_{H_i})) \}$$

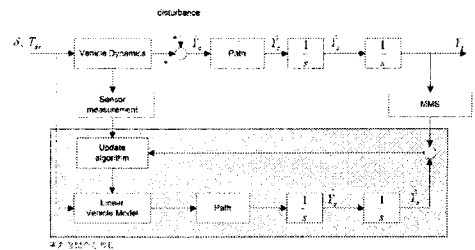
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K_r - M^{-1}C_r & \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_r \end{bmatrix}$$

$$x = [{}^{c1}y_{w,c1} \quad {}^w\epsilon_{c1} \quad {}^w\epsilon_{c2} \quad {}^{c1}y_{w,c1} \quad {}^w\epsilon_{c1} \quad {}^w\epsilon_{c2}]^T$$

2.3 위치추정 알고리즘

위치추정 알고리즘은 그림 2에서와 같이 실제 차량에서 측정된 정보를 이용하여 선형모델에서 계산한 위치 좌표를 주기적으로 보정하는 형태로 구성된다. 측정되는 정보는 각 바퀴의 조향각, 자기표지 위치정보, 차량 방향각, 굴절각, 주행속도 등이며, 제어기는 추정시스템에서 필터링된 데이터를 이용할 수 있기 때문에 측정잡음에 대한 문제는 고려하지 않는다.



〈그림 2〉 위치추정 알고리즘 적용 블록도

센서를 통해 측정되는 정보를 이용하여 선형모델에서 계산된 차량위치를 보정하는 방법은 측정되는 정보를 조합하는 방법에 따라 여러 가지가 있으며, 본 논문에서는 자기센서와 자이로스코프, 굴절각 센서의 조합을 이용하는 방법과 휠엔코더, 자이로스코프, 조향각센서의 조합을 이용하는 방법을 사용하였다. 이러한 조합은 KRRI에서 제작중인 바이모달 트램의 센서시스템을 기준으로 고려한 것으로써, 실제 차량에서 사용하는 센서시스템에 따라 여러 가지 조합을 이용할 수 있다.

첫째, 자기센서와 자이로스코프, 조향각센서의 조합을 이용할 경우 안내제어기에서 필요한 횡방향 속도 ${}^{c1}y_{w,c1}$ 을 구할 수 있다.

차량에 설치된 자기표지가 자기표지를 감지할 때 얻는 정보는 관성좌표계에서 자기표지의 위치 및 방향각, 자기센서와 자기표지 사이의 거리이다. 자기센서 S_1 이 자기표지를 감지했을 때, 감지된 자기표지의 위치좌표와 방향각을 각각 $({}^w x_{m1}, {}^w y_{m1})$ 과 ${}^w\epsilon_{m1}$ 이라고 하고, 자기센서와 자기표지 사이의 거리를 y_{r1} 이라고 하면, 이 값들을 이용하여 첫 번째 객차의 무게중심점 좌표를 식 (3)에서와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^w x_{c1} &= {}^w x_{m1} - y_{r1} \sin {}^w\epsilon_{m1} - l_{s1} \cos {}^w\epsilon_{c1} \\ {}^w y_{c1} &= {}^w y_{m1} + y_{r1} \cos {}^w\epsilon_{m1} - l_{s1} \sin {}^w\epsilon_{c1} \end{aligned} \quad (3)$$

마찬가지 방법으로 자기센서 S_2 와 S_3 가 각각 $({}^w x_{m2}, {}^w y_{m2})$, $({}^w x_{m3}, {}^w y_{m3})$, ${}^w\epsilon_{m3}$ 에 위치한 자기표지를 감지하고, 이 때 자기센서와 자기표지 사이의 거리를 각각 y_{r2} , y_{r3} 라 할 경우 위와 같은 방법으로 첫 번째 객차의 무게중심점 좌표를 식 (4) 및 식 (5)에서와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^w x_{c1} &= {}^w x_{m2} - y_{r2} \sin {}^w\epsilon_{m2} + l_{s2} \cos {}^w\epsilon_{c1} \\ {}^w y_{c1} &= {}^w y_{m2} + y_{r2} \cos {}^w\epsilon_{m2} + l_{s2} \sin {}^w\epsilon_{c1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} {}^w x_{c1} &= {}^w x_{m3} - y_{r3} \sin {}^w\epsilon_{m3} + (l_{s3} + d_{f2}) \cos {}^w\epsilon_{c2} + d_{r1} \cos {}^w\epsilon_{c1} \\ {}^w y_{c1} &= {}^w y_{m3} + y_{r3} \cos {}^w\epsilon_{m3} + (l_{s3} + d_{f2}) \cos {}^w\epsilon_{c2} + d_{r1} \sin {}^w\epsilon_{c1} \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같이 구한 첫 번째 객차의 무게중심점 좌표 (${}^w x_{w,c1}$, ${}^w y_{w,c1}$)는 관성좌표계에서의 값이며, 식 (2)의 선형 동적모델은 차량중심 좌표계에서 표현된 모델이므로 식 (3) ~ 식(5)의 결과로 선형모델을 보정하기 위해서는 식 (6)과 같은 회전변환을 이용하여 관성좌표계의 좌표를 차량중심좌표계의 좌표로 변환할 필요가 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^{cl} \dot{x}_{w,c1} \\ {}^{cl} \dot{y}_{w,c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos {}^w \epsilon_{c1} & \sin {}^w \epsilon_{c1} \\ -\sin {}^w \epsilon_{c1} & \cos {}^w \epsilon_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w \dot{x}_{w,c1} \\ {}^w \dot{y}_{w,c1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 식 (3)을 미분한 후 회전변환하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} {}^{cl} \dot{x}_{c1} &= y_{r1} \sin({}^w \epsilon_{c1} - {}^w \epsilon_{m1}) - y_{r1} {}^w \dot{\epsilon}_{m1} \cos({}^w \epsilon_{c1} - {}^w \epsilon_{m1}) \\ {}^{cl} \dot{y}_{c1} &= y_{r1} \cos({}^w \epsilon_{c1} - {}^w \epsilon_{m1}) + y_{r1} {}^w \dot{\epsilon}_{m1} \sin({}^w \epsilon_{c1} - {}^w \epsilon_{m1}) - l_{s1} {}^w \dot{\epsilon}_{c1} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)로부터 구한 ${}^{cl} \dot{y}_{w,c1}$ 과 자이로스코프 및 굴절각 센서를 이용하여 측정된 $[{}^w \epsilon_{c1} \quad {}^w \epsilon_{c2} \quad {}^w \dot{\epsilon}_{c1} \quad {}^w \dot{\epsilon}_{c2}]$ 를 이용하면 식 (2)의 상태벡터 \mathbf{x} 를 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 측정값들이 주어지는 125msec 간격으로 상태벡터 \mathbf{x} 를 구할 수 있으며, 측정값이 주어지지 않는 구간에 대해서는 측정값으로부터 구해진 상태벡터를 초기값으로 하여 식 (2)를 적분함으로써 구할 수 있다.

둘째, 휠엔코더와 조향각센서, 자이로스코프, 굴절각센서의 조합을 이용하면 추진제어기에 필요한 차량의 주행속도 V_x 를 구할 수 있다.

휠 엔코더를 이용하여 각 차륜의 회전속도를 측정할 수 있으며, 타이어의 미끄러짐이 매우 작다고 가정할 경우 첫 번째 차축의 좌우측 휠에서 측정된 회전속도 w_{11} 와 w_{21} 및 조향각센서를 통해 측정된 좌우측 휠의 조향각 δ_{11} 과 δ_{21} 을 이용하여 식 (8)의 관계로부터 차량의 종방향 속도 V_x 를 구할 수 있다.

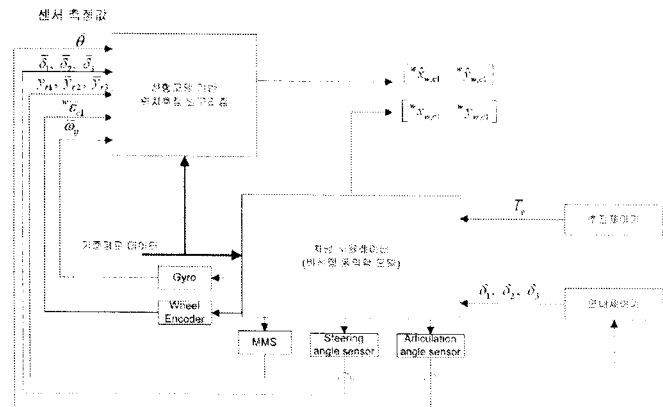
$$V_x = {}^{cl} \dot{x}_{w,c1} = \frac{1}{2} (r_1 w_{11} \cos \delta_{11} + r_1 w_{21} \cos \delta_{21}) \quad (8)$$

3. 위치추정 알고리즘 시뮬레이션

설계된 위치추정 알고리즘은 바이모달 트래픽의 비선형 동역학 모델을 기반으로 설계된 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다.

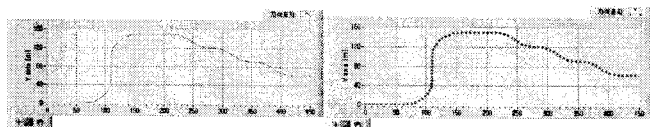
실제 차량에서는 각종 측정값들이 125msec 간격으로 이산적으로 주어지지만, 시뮬레이션 결과의 검증을 위해 시뮬레이터에서는 연속적으로 주어진다 가정하였다.

이와 같은 가정을 이용하여, 시뮬레이터에서 계산된 차량의 위치정보와 시뮬레이터로부터 이산적으로 주어지는 측정값을 이용하여 선형모델을 기반으로 위치추정 알고리즘을 통해 계산된 차량의 위치정보를 비교하였다.



<그림 3> 위치추정 알고리즘 시뮬레이션 블록도

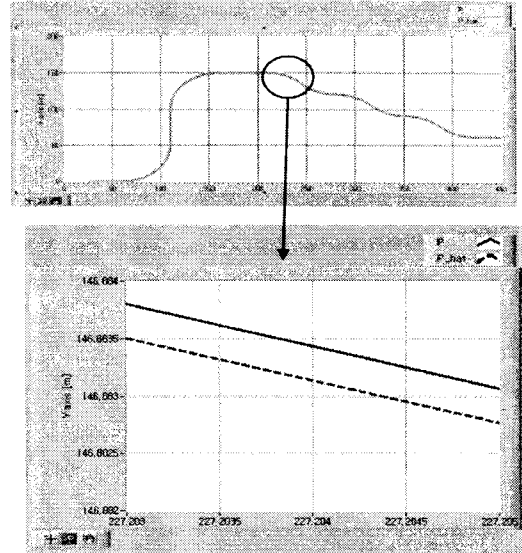
그림 4는 시뮬레이션에 사용된 기준 주행경로와 기준 경로에 4m 간격으로 매설된 자기표지의 위치를 관성좌표계에서 나타낸 것이다.



좌 : 기준경로, 우 : 자기표지 위치
<그림 4> 기준경로 및 자기표지 위치

그림 5는 위치추정 알고리즘의 시뮬레이션 결과로써, 시뮬레이터에서 계산된 실제 차량의 위치 $[{}^w x_{w,c1} \quad {}^w y_{w,c1}]$ 와 위치추정 알고리즘에서 계산된 차량의 위치 $[{}^w \hat{x}_{w,c1} \quad {}^w \hat{y}_{w,c1}]$ 를 비교한 것이다.

그림에서 실선은 시뮬레이터에서 계산된 결과이며, 점선은 위치추정 알고리즘에서 계산된 결과이다.



<그림 5> 위치추정 알고리즘 시뮬레이션 결과

기준경로는 회전반경 50m의 곡률을 갖는 곡선경로와 직선경로의 조합으로 구성되어 있으며, 선형모델이 직선경로를 일정한 속도로 주행한다는 가정에 수립된 것이므로 실제 차량의 위치와 선형모델 기반으로 설계된 위치추정 알고리즘에서 계산된 위치사이의 오차는 곡선경로에서 최대값을 갖게 된다. 시뮬레이션결과 직선경로에서는 오차가 거의 없으며, 곡선경로에서는 관성좌표계에서 x-축과 y-축으로 각각 0.5cm 이내로 계산되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 바이모달 트래픽의 선형모델기반 위치추정알고리즘을 설계하고, 자기표지를 통해 이산적으로 측정되는 경로오차 정보를 이용하여 주행 차량의 추정된 위치를 통해 설계된 알고리즘의 성능검증에 대한 내용을 다루었다. 시뮬레이션 결과 설계된 알고리즘의 추정오차는 x-축, y-축 각각 0.5cm 이내로 나타났으며, 이 값은 안내제어기가 기준경로와 바이모달 트래픽 사이의 경로오차를 10cm 이내로 유지하는 것을 목표로 한다는 점을 고려할 때 비교적 양호한 결과라고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 위탁과제(과제명 : 굴절차량의 자동 안내/추진제어 기술 개발) 지원으로 이루어진 연구임.

[참고문헌]

- [1] C. Chen and M. Tomizuka, "Dynamic modeling of articulated vehicles for automated highway systems," *Proc. of American Control Conf.*, pp.653-757, Seattle, June 1995.
- [2] D. de Bruin and P.P.J. van den Boach, "Modeling and control of a double articulated vehicle with four steerable axles," *Proc. of American Control Conf.*, pp. 3250-3254, San Diego, June 1999.
- [3] C. Chen and M. Tomizuka, "Dynamic modeling of tractor-semitrailer vehicles in automated highway systems," *PATH Technical Report*, ITS, U.C. Berkeley, 1995
- [4] M.Tai and M. Tomizuka, "Robust lateral control of heavy vehicles for AHS," *Proc. of the 14th IFAC World Congress*, Peking, 1999.
- [5] 김영철, 윤경환, 민경득, 변운섭, 목재균, "A Lateral Dynamic Model of an All Wheel Steered Bimodal Vehicle," *Proc. of ICCAS*, pp.1734 ~1737, 2007
- [6] 김영철, 윤경환, 민경득, 변운섭, 목재균, "KRRI 전륜조향 차량의 횡 방향 선형 동역학 모델", *정보 및 제어 심포지엄 2008*, 230~231, 2008년
- [7] Y. C. Kim et al. 4, "Steering Control for Lateral Guidance of an all wheel Steered Vehicle", *Proc. of ICCAS 2008*, pp. 24-29, Seoul, Korea, 2008.