

# 멀티 모델 추정기를 활용한 3륜 틸팅 차량의 노면 경사각 추정

정기철<sup>1)</sup>·최세범<sup>\*2)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1),2)</sup>

## Tilting vehicle road angle estimation using multi model estimator

Kicheol Jeong<sup>1)</sup> · Seibum Choi<sup>\*2)</sup>

<sup>1),2)</sup>KAIST, Department of Mechanical Engineering, 34141 Daejeon, Republic of Korea

**Abstract** : This paper introduces the road angle observer. In this paper, the estimator that combines a kinematic model with a dynamic model of a three wheel vehicle is proposed. The dynamic model has four states, including lateral velocity, yaw rate, tilt angle, and tilt angle ratio. Likely, kinematic model has two states, including roll and pitch angles. According to the models, Kalman filter is used to estimate vehicle lateral speed, vehicle roll and pitch angle. To verify this proposed algorithm, simulation verification using Carsim ADAMS and Matlab&Simulink is performed and a discussion of the result is provided. In addition, this paper proposes a semi-active tilt system.

**Key words** : 3 wheel vehicle(3륜 차량), Road angle(노면경사각), Kalman filter(칼만필터), Tilting(틸팅), Estimation(추정),

<sup>3),4),5)</sup>

### 1. 서 론

최근, 종래의 교통 시스템은 많은 문제를 야기하고 있다. 환경적인 측면에서, 미세먼지와 같은 공기 오염과 화석연료 고갈에 대한 우려가 점차 증가하고 있다. 게다가, 최근 대도시화와 인구 집중화로 인하여 도시의 교통체증 또한 심각한 문제로 떠오르고 있다.

이러한 상황에서, 작은 마이크로-모빌리티가 새로운 대안으로 떠오르고 있다<sup>1),2)</sup>. 이러한 작은 전기차들은 배기가스 문제에서 자유롭고 또한 작은 차체로 인하여 주차와 교통체증 문제에서도 자유롭다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 이러한 특성 때문에 차량이 회전시 롤 안정성이 문제가 된다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 3륜 마이크로 모빌리티에는 차체를 기울일 수 있는 틸팅 시스템이 필수적으로 장착된다

차량의 틸팅 시스템을 제어할 때, 노면경사각은 필수적으로 고려되어야 한다. 노면 경사각은 센서에 의해 직접적으로 측정될수 없기 때문에, 차량에 부착된 센서들을 이용하여 간접추정되어야 한다. Kidane<sup>6)</sup>은 차량에 부착된 센서로 노면 경사각을 직접적으로 계산하는 방법을 제안하였다. 하지만 이러한 방법은 차량의 틸팅 각도가 작을 경우 계산식이 불안정해진다는 단점을 가지고 있다.

이 논문에서는 차량의 노면경사각을 운동학 모델과 동역학 모델을 기반으로 추정한다. 차량의 동역학 모델은 횡방향 속도, 요 레이트, 차량의 틸트 앵글과 틸트 각속도를 포함하는 네개의 상태량을 가진다. 마찬가지로, 운동학 모델은 차량의 롤과 피치앵글을 상태량으로 가진다. 차량의 질량중심에 six dimensional inertial measurement unit(6-D IMU)가 부착되어 있다고 가정한다.

이 논문에서 추정기는 다음과 같은 순서로 제안된다. 먼저 노면 경사각을 고려한 3륜 차량의 다이

나뭇 모델이 제안된다. 이 모델을 이용한 칼만 필터를 통하여, 차량의 횡방향 속도가 추정될 것이다. 다음으로, 차량의 주행상황에 따라 동역학 모델과 운동학 모델의 의존성을 변화시키는 칼만필터를 활용하여 차량의 롤과 피치가 추정된다. 마지막으로, 노면의 경사각을 추정된 롤 각도를 활용하여 계산한다.

이 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 2.1 장에서 삼륜 틸팅 차량의 동역학 모델이 제안될 것이다. 2.2 장에서는 칼만필터의 메저먼트 역할을 하는 가상 메저먼트를 계산하고 이것을 기반으로 차량의 롤과 피치를 추정하는 방법에 대하여 소개할 것이다. 2.3장은 추정된 차량의 롤각을 활용하여 노면 경사각을 계산하는 방법을 소개한다. 다음으로, 3장에서 알고리즘을 활용한 추정 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 4장에서 연구 결과를 제시할 것이다.

## 2. 노면 경사각 추정기

### 2.1 차량 동역학 모델

이번 장에서는 차량의 움직임을 묘사하기 위한 3륜 틸팅 차량에 특화된 차량 동역학 모델을 제안한다. 노면의 경사각이 차량의 틸트 각도에 영향을 미치기 때문에, 노면경사각을 고려한 모델이 수립된다.

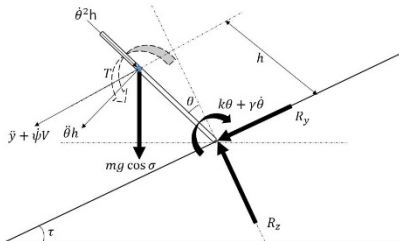


Fig. 1 Free body diagram

Fig. 1에서와 같이, 노면의 경사각은 틸팅 차량의 동역학에 큰 영향을 미친다. 상기한 그림을 참조하여 차량 동역학 모델을 수립할 수 있다. 이는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha}{mv}(2C_f + C_r) & -\left(v + \frac{\alpha}{mv}(2C_f l_f - C_r l_r)\right) & \frac{hk}{I_{xx}} \cdot \frac{mh^2}{I_{xx}} g & \frac{h\gamma}{I_{xx}} \\ \frac{C_f l_f - 2C_r l_r}{v l_z} & \frac{2C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{v l_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ h \frac{2C_f + C_r}{I_{xx} v} & h \frac{2l_f C_f - l_r C_r}{I_{xx} v} & \frac{mgh}{I_{xx}} \frac{k}{I_{xx}} & -\frac{\gamma}{I_{xx}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 행렬은 차량 동역학식을 state-space 형태

로 나타낸 것의 A 행렬을 나타낸다. 이 행렬은 차량의 횡방향 속도, 요 각속도, 틸트 각도, 틸트 각속도를 상태량으로 가진다. 이 논문에서, 차량에 작용하는 타이어 힘은 선형 타이어 모델을 기반으로 적용되었다. 이전 연구<sup>7)</sup>에서 알수있듯이 차량의 급격한 운동시에 요구되는 다른 타이어 모델이 존재하지만, 보통 3륜 마이크로 모빌리티는 속도가 엄격하게 제한된 도심 지역을 이동하기 때문에 차량의 속도가 낮고 급격한 움직임을 행하지 않다고 합리적인 가정을 수립하였다.

### 2.2 차량 롤 각도 추정

#### 2.2.1 동역학 모델 기반 가상 메저먼트 생성

이 장에서, 동역학 모델을 기반으로 하는 가상 메저먼트 생성이 소개된다. 차량의 롤과 피치는 센서에 의해 직접적으로 측정이 될 수 없기 때문에, 칼만 필터에 필요한 센서 메저먼트를 직접적으로 생성해 주어야 한다. 기존 연구에서, Eric<sup>8)</sup>은 타입 1 Euler angle을 기반으로 하는 가상 메저먼트 생성을 소개하였다. 그러나 이 연구는 차량의 횡방향 속도가 매우 작다는 가정을 전제로 진행되었다. 통상적인 사륜차량과 다르게, 삼륜 틸팅차량은 저속이라도 차체를 기울이는 틸트 모션에 의한 추가적인 횡방향 속도가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 차량의 횡방향 속도를 고려한 가상 메저먼트를 생성하기 위하여, 칼만 필터를 활용한 횡방향 속도 추정을 진행한다. 칼만필터는 이전 장에서 소개된 3륜 차량의 동역학 모델을 기반으로 설계되었다. 칼만필터의 추정결과로 얻어진 차량 횡방향 속도는 가상 메저먼트 보완에 사용되었다.

$$\begin{cases} \hat{x}_k^- = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \\ P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \\ \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k^-] \\ P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_{refM} = \sin^{-1} \left( \frac{\dot{v}_{wheel} - a_x - r \cdot \hat{v}_y}{g} \right) \quad (3)$$

$$\phi_{refM} = \sin^{-1} \left( \frac{-\hat{v}_y + a_y - r \cdot v_{wheel}}{g \cdot \cos \theta_{refM}} \right) \quad (4)$$

이 차량 동역학 모델 기반 칼만필터를 이용하여,

상대적으로 정확한 가상 메저먼트를 얻을 수 있다. 이 가상 메저먼트는 차량이 steady state 영역에 영 동작할 때 높은 정확도를 가진다. 하지만 차량이 급격한 transient 거동을 수행할 시, 이 가상 메저먼트의 정확도가 급격히 저하된다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 이 한계점을 극복하기 위해 운동학 모델을 사용한 보완이 요구된다.

2.2.2 운동학 모델 기반 칼만필터

이번 장에서는 운동학 모델을 기반으로 하는 칼만필터를 이용한 차량의 롤과 피치 추정을 소개한다.

$$\phi_{int} = \int p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta dt \quad (5)$$

$$\theta_{int} = \int q \cos \phi - r \sin \phi dt \quad (6)$$

식 (5)와 (6)은 차량의 롤과 피치 각을 type 1 euler 각도에 기반하여 표현한 것이다. 이 식을 선형화 하여 운동학 모델 기반 칼만 필터를 설계할 수 있다. 이 모델은 차량이 transient 거동을 할 때 높은 정확성을 가진다는 특징을 가지고 있다. 즉 이 칼만필터를 기반으로 차량의 steady state와 transient 상태에 대한 차량 롤, 피치를 구할 수 있다. 식 (2)에 따라, 칼만 필터는 메저먼트 오차에 대한 공분산과 모델링 오차에 대한 공분산을 디자인 계수로 가진다. 이때 차량의 상태에 따라 두 공분산을 조정한다면, steady state와 transient state에서 만족스러운 추정 결과를 얻을 수 있다. 따라서 차량의 상태를 표현할 수 있는 steady state factor (SF)를 제안하였다. 이 요소는 차량 가속도의 norm에 대한 함수로 나타내었다. 차량이 transient 상태일때, SF는 0에 가까워진다. 반대로 차량이 steady 상태일때, SF는 1에 가까워진다. Fig. 2는 동역학 모델과 운동학 모델 그리고 SF를 사용하여 차량의 롤과 피치를 추정하는 알고리즘의 개요를 나타낸다.

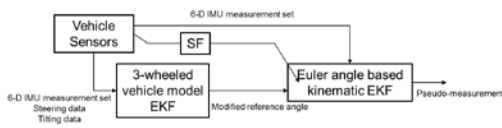


Fig. 2 Roll and pitch estimation scheme

2.2.3 노면 경사각 도출

노면 경사각 추정은 기존 차량동역학 연구에서 해결하기 어려운 주제중 하나였다. 그 이유는 GPS

와 GNS가 없이는, 차량의 서스펜션 변형에 의한 롤과 피치로 인하여 노면의 경사각을 독립적으로 도출하기 쉽지 않았기 때문이다. 하지만 본 연구에서 주로 다루는 톨팅 차량의 경우, 서스펜션에 의해 변형되는 롤각을 차량의 톨트 각도로 치환할 수 있다. 따라서 추정된 차량의 롤각도를 기반으로 노면 경사각을 도출할 수 있다.

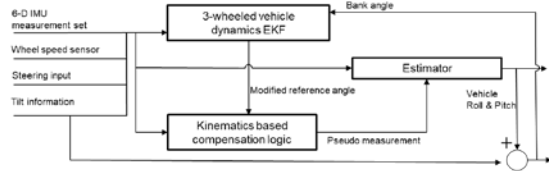


Fig. 3 Road bank angle calculation scheme

3. 시뮬레이션 결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여, 차량 시뮬레이터 Carsim, ADAMS 그리고 MATLAB&Simulink를 사용한 시뮬레이션을 진행하였다. 알고리즘의 강건성과 안정성을 검증하기 위하여 다양한 시나리오의 시뮬레이션 검증을 수행하였다. 아래의 표는 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션 시나리오를 나타낸 것이다,

Table 1 Simulation scenarios

	Road	Velocity	Behavior
Case 1	15 deg ramp bank	80kph	Straight+DLC
Case 2	Normal road	80kph	Normal driving
Case 3	5deg ramp bank	80kph	Fishhook
Case 4	Flat	20kph	Sine wave Steer
Case 5	Flat	40kph	Sine wave steer with tilting control

케이스 1은 노면의 경사각이 크면서 동시에 차량의 횡방향 속도가 큰 거동을 할 때의 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 수행되었다. 차량의 횡방향 속도를 보정하면서 운동학 모델과 동역학 모델을 활용하였기 때문에, 기존의 운동학 모델 기반 추정기에 비해 더 나은 성능을 기대할 수 있다. 그에 반하여 케이스 2는 차량이 급격한 거동을 하지

않는 일상 주행 상황에서의 알고리즘 성능을 확인하기 위하여 수행되었다. 소위 fishhook이라고 불리는 케이스 3는 추정 알고리즘의 안정성과 성능을 극한 상황에서 검증하기 위하여 고안되었다. 케이스 4와 케이스 5는 노면 경사각이 없는 평지 주행상황을 시뮬레이션하였다. 이 노면에서 차량의 스티어링 입력을 사인파의 형태로 주는 시뮬레이션 시나리오를 통하여, 노면 경사각이 없는 상황에서 노면경사각 추정이 어떻게 이루어지는지 관측할 수 있었다.

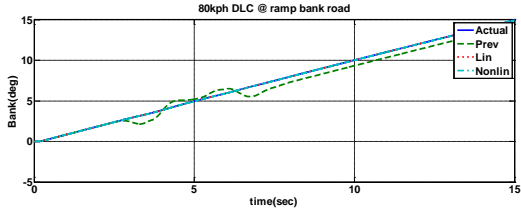


Fig. 4 Case 1 Road bank angle

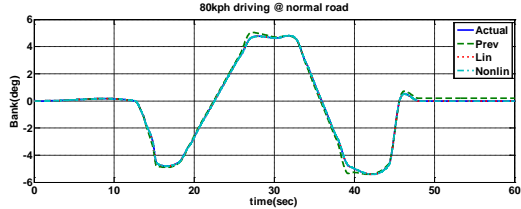


Fig. 5 Case 2 Road bank angle

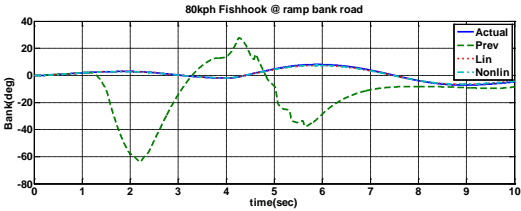


Fig. 6 Case 3 Road bank angle

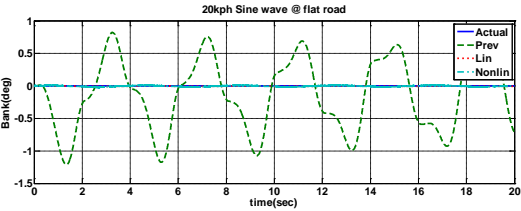


Fig. 7 Case 4 Road bank angle

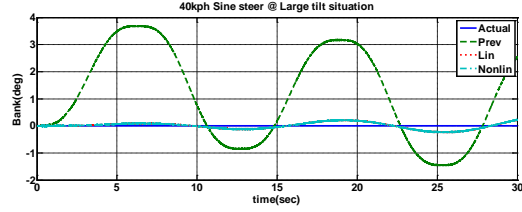


Fig. 8 Case 5 Road bank angle

그림에서, “Actual”은 카심과 아담스 모델을 활용하여 얻어낸 시뮬레이션 데이터이다. 이 데이터는 실차 실험결과의 데이터와 같다고 가정된다. “Prev”는 운동학 모델만을 사용하여 얻은 노면 경사각 추정 결과이다. “Lin”은 모델을 선형으로 가정하여 칼만필터를 적용할때의 결과값이고 “Nonlin”은 비선형 모델을 적용시킨 칼만필터의 결과이다. Case 1에서, 기존의 시뮬레이션 방법으로도 어느정도 합리적인 결과를 얻을 수 있었지만, 차량이 거동을 한 뒤 steady state 오차가 발생함을 알 수 있다. 하지만 새롭게 제안된 추정방법의 경우 그러한 오차가 없음이 나타났다. Case 2와 같은 일반 주행 상황에서, 기존의 추정방법과 본 논문에서 제안하는 추정방법은 큰 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 노면경사각도 작을 뿐더러 차량의 속도와 움직임 모두 운동학 모델만으로 충분히 표현할 수 있기 때문이다. 하지만 Case 3의 경우, 기존 알고리즘은 적용할 수 없을 정도로 부정확한 추정치를 나타내는 반면, 제안된 알고리즘은 정확한 노면 경사각을 추정함을 볼 수 있었다. 즉 제안된 알고리즘은 차량이 급격한 거동을 할 때에도 정확도를 유지한다는 것을 검증하였다. 특히, Case 4와 Case 5에서 알 수 있듯이, 차량의 틸트 각도가 커지는 거동에서, 기존의 추정방법은 그 유효성을 잃는다는 것을 볼 수 있다. 하지만 제안된 추정 알고리즘은 유효한 범위의 추정치를 나타내었다. 전체적으로, 선형 모델을 적용한 칼만필터와 비선형 모델을 적용한 칼만 필터와의 추정값 차이는 거의 발생하지 않았다.

#### 4. 결론

이 논문에서, 3륜 틸팅 차량에 적합하게 설계된 노면 경사각 추정기가 제안되었다. 차량 동역학 모델과 운동학 모델을 활용하여, steady 상태와

transient 상태 모두에 적합한 추정기를 제안하였다. 기존 연구와 다르게, 횡방향 차량 속도를 보정하여 더 나은 추정결과를 도출할 수 있었다. 기존의 다양한 차량 노면경사각 추정기의 경우 3륜 차량의 틸트 각도가 커지는 영역에서 정확도가 급격히 저하되기 때문에, 제안된 추정기를 사용하여 차량 틸트 각도 제어에 활용할 수 있을 것이다. 결론적으로, 이 논문에서는 차량에 부착된 6-D IMU 센서를 활용한 3륜 틸팅 차량 제어용 노면 경사각 추정기를 제안하고 시뮬레이션으로 검증하였다. 이 논문은 차량에 상태에 따라 동역학 모델과 운동학 모델을 취사선택하는 멀티 모델 추정기를 제안함으로써 다양한 환경에서 정확한 노면 경사각을 추정할 수 있다.

### 후기

이 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.10084619, 항복강도 60kPa급 MR물질을 활용한 차량용 속업소버(댐퍼)및 엔진 마운트 개발)

### References

- 1) Hibbard, Robin, and Dean Karnopp. "Twenty first century transportation system solutions-A new type of small, relatively tall and narrow active tilting commuter vehicle." *Vehicle system dynamics* **25.5** (1996):321-347.
- 2) Gohl, J., et al. "*Development of a novel tilt-controlled narrow commuter vehicle.*" (2006).
- 3) Robertson, James W., Jos Darling, and Andrew R. Plummer. "Combined steering-direct tilt control for the enhancement of narrow tilting vehicle stability." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **228.8** (2014): 847-862.
- 4) Piyabongkarn, D., T. Keviczky, and R. Rajamani. "Active direct tilt control for stability enhancement of a narrow commuter vehicle." *International Journal of Automotive Technology* **5.2** (2004): 77-88.
- 5) Gohl, J., et al. "Active roll mode control implementation on a narrow tilting vehicle." *Vehicle system dynamics* **42.5** (2004): 347-372.
- 6) Kidane, S., et al. "Road bank angle considerations in modeling and tilt stability controller design for narrow commuter vehicles." *American Control Conference*, 2006. IEEE, 2006.
- 7) Han, Kyoung Seok, et al. "Adaptive Scheme for the Real-Time Estimation of Tire-Road Friction Coefficient and Vehicle Velocity." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (2017).
- 8) Eric Tseng, H., Li Xu, and Davor Hrovat. "Estimation of land vehicle roll and pitch angles." *Vehicle System Dynamics* **45.5** (2007): 433-443.