

UIO를 이용한 선회 시 등판각 추정

변형규¹⁾ · 김현규¹⁾ · 김인근¹⁾ · 허건수^{*2)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 미래자동차공학과²⁾

Climbing Angle Estimation in Yawing Motion by UIO

Hyeongkyu Byeon¹⁾ · Hyunkyung Kim¹⁾ · Inkeun Kim¹⁾ · Kunsoo Huh^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 19 November 2014 / Revised 18 March 2015 / Accepted 20 May 2015)

Abstract : Availability of the climbing angle information is crucial for the intelligent vehicle system. However, the climbing angle information can't be measured with the sensor mounted on the vehicle. In this paper, climbing angle estimation system is proposed. First, longitudinal acceleration obtained from gyro-sensor is compared with the actual longitudinal acceleration of the vehicle. If the vehicle is in yawing motion, actual longitudinal acceleration can't be approximated from time derivative of wheel speed, because lateral velocity and yaw rate affect actual longitudinal acceleration. Wheel speed and yaw rate can be obtained from the sensors mounted on the vehicle, but lateral velocity can't be measured from the sensor. Therefore, lateral velocity is estimated using unknown input observer with nonlinear tire model. Simulation results show that the compensated results using lateral velocity and yaw rate show better performance than uncompensated results.

Key words : Lateral velocity(횡속도), Climbing angle(등판각), Unknown input observer(미지입력관측기), Dugoff tire model(Dugoff 타이어 모델), Intelligent vehicle(지능형자동차)

Nomenclature

a_x	: longitudinal acceleration	w_i	: wheel speed of each tire
a_y	: lateral acceleration	R	: tire effective radius
C_{xxi}	: longitudinal stiffness of each tire	g	: gravitational acceleration
C_{yyi}	: lateral stiffness of each tire	α_i	: slip angle of each tire
F_{xi}	: longitudinal tire force of each tire	λ_i	: slip ratio of each tire
F_{yi}	: lateral tire force of each tire	δ	: steering angle of front tire
F_{zi}	: vertical tire force of each tire	γ	: yaw rate
m	: mass of vehicle	θ	: climbing angle
V_x	: longitudinal velocity	μ	: friction coefficient
V_y	: lateral velocity		
φ	: bank angle		

1. 서론

최근 지능형 자동차에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 그 중 자동차의 종방향 제어와 관련된 기술에는 ACC(Adaptive cruise control)이나 Hill holding

*Corresponding author, E-mail: khuh2@hanyang.ac.kr

같은 기술들이 있다. 이런 차량의 종방향 제어 시스템에서 차량이 느끼게 되는 등판각은 큰 외란으로 작용하게 된다. 이 뿐만 아니라 기존 자동차 기술과 IT기술이 접목되는 IT융합 기술 중 하나인 V2X기술이 있다. 이런 V2X기술에서 중요한 정보는 바로 차량들의 위치 정보인데 이 위치 정보를 얻기 위해 GPS를 사용하게 된다. 하지만 GPS를 이용한 위치 추정이 힘든 지역에서는 차량 내부 센서를 이용하여 차량의 위치를 추정하는 기술이 필요하다. 이 경우, 등판각 정보를 이용하면 위치 추정 기술의 신뢰성을 높일 수 있다. 이러한 이유로 차량이 느끼게 되는 등판각 정보가 점점 중요해지고 있다.

자동차의 등판각을 추정하는 연구에는 많은 방법들이 존재한다. 최근에는 여러 센서들을 사용하여 융합된 정보를 가지고 추정하거나 비선형 차량 모델을 사용하는 비선형 추정 방법들이 사용되고 있다. Sahlholm 등²⁾이 2010년에 발표한 논문과 Ganji 등³⁾이 2011년도에 발표한 논문은 GPS와 차량 내부 센서의 데이터를 융합하여 등판각을 추정하였다. Hsu 등⁴⁾은 2010년에 발표한 논문에서 GPS가 아닌 서스펜션 변위 센서와 차량 내부 센서의 데이터를 융합한 방법을 제안하였다. 이 밖에도 레이저 스캐너 데이터와 융합하거나 3D Map을 사용한 논문들도 있었다. 또 다른 대표적인 방법으로 비교적 모델 오차가 적은 비선형 차량모델과 가속도 센서에서 측정된 값들만을 이용하여 추정기를 설계하는 방법이 있다. Sebsadiji 등¹⁾은 2008년도에 발표한 논문에서 비선형 차량 모델에 Extended Kalman Filter와 Luenberger Observer를 융합하여 추정하였다. Katranitis 등⁵⁾은 종방향 차량 모델과 엔진으로부터 나오는 토크가 바퀴로 전달되는 토크 전달 모델을 사용, Kalman filter를 이용하여 추정하였다. 이렇듯 여러 센서의 데이터를 융합하거나 복잡한 모델들을 사용하여 등판각을 추정하는 방법들이 제시되고 있다. 하지만 위에서 소개한 연구들은 차량이 종방향 운동을 할 때에만 적용할 수 있으며, 차량이 조향을 할 때에는 추정 시스템의 신뢰성이 떨어진다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 종방향 제어나 V2X에서 필요한 위치 정보를 알아내기 위해 필요한 인자인 등판각

을 추정하는 시스템을 제안하고자 한다. 실제 차량의 가속도 정보와 차량에 장착된 가속도 센서 정보의 차이를 이용하여 등판각을 추정하는 방법이며, 차량이 조향 시에도 추정 시스템의 강인성 확보를 위해 횡속도와 요레이트를 이용한 보정 알고리즘을 제안하였다. 이때 필요한 횡속도는 Unknown Input Observer(UIO)와 Dugoff 타이어 모델을 이용하여 추정하는 방법을 제안하였다.

2. 등판각 추정 시스템

2.1 동역학 모델

등판각은 다음과 같은 종 방향 모델로부터 구할 수 있다.⁶⁾

$$a_{x,sensor} = a_{x,vehicle} + g \sin \theta \quad (1)$$

위 식을 통해 차량 내부에 장착된 센서에서 측정된 가속도와 차량의 실제 가속도의 차이를 이용하여 현재 차량이 주행 중인 도로의 경사각을 알 수 있다. 직진 상황에서는 실제 차량의 가속도를 후륜의 속도로부터 쉽게 산출해 낼 수 있지만 선회를 하게 되면 좌표계의 회전으로 인해 달라진다. 차량이 선회 시에는 전역좌표계에 대해 차량 좌표계가 회전하기 때문에 센서 가속도는 실제 가속도와 등판각의 영향뿐만 아니라 횡속도와 요 레이트의 영향도 함께 고려해야만 한다. 이를 식으로 나타내고 다시 등판각에 대해 정리하면 다음과 같다.⁷⁾

$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left[\frac{\{a_{x,sensor} - a_{x,vehicle}\}}{g} \right] \quad (2)$$

$$\text{where, } a_{x,vehicle} = \frac{d}{dt} \left(\frac{(w_{xrl} + w_{wrr})R}{2} \right) - V_y \gamma$$

상용 소프트웨어를 이용하여 실제 종방향 가속도와 보정하지 않은 가속도, 보정한 가속도에 대한 등판각 추정결과를 비교하여 보았다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 횡속도와 요 레이트의 영향을 고려한 것이 실제값과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 식 (2)에서 필요한 횡 속도와 요 레이트는 센서로부터 측정이 가능하다. 하지만 횡속도의 경우는 추가적인 센서를 장착하거나 추정을 통해 구해야하기 때문에 본 논문에서는 UIO를 사용하여 횡속도를 추정하였다.

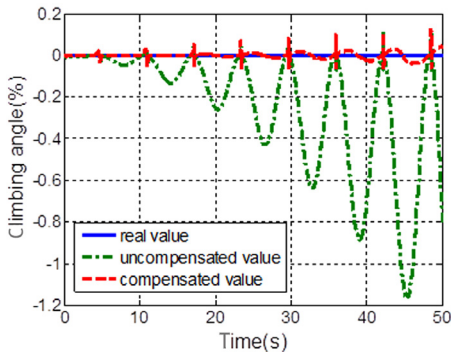


Fig. 1 Climbing angle comparison

2.2 Unknown Input Observer

UIO는 미지의 입력이 존재할 때 입력과는 무관하게 상태 변수를 추정할 수 있도록 해준다. 본 논문에서 사용된 시스템 모델은 다음과 같다. 횡방향 가속도 성분과 bank angle 항을 미지의 입력으로 놓아 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.^{8,9)}

$$\dot{v}_y = -v_x \gamma + a_y - \varphi \quad (3)$$

추정 모델은 횡속도로부터 대수적으로 구할 수 있는 횡력으로부터 나온 식을 이용한다.

$$\hat{a}_y = \frac{1}{m} f_y(V_y, u) \quad (4)$$

위 식의 f_y 는 비선형 타이어 모델이다. 여러 비선형 타이어 모델이 존재하지만 본 논문에서는 비교적 적은 파라미터로 구현이 가능한 타이어 모델인 Dugoff tire 모델을 이용하였다. u 는 알고 있는 상태 변수나 측정값을 의미한다. bank angle이 존재하는 도로에서 선회 시에는 차량에 물 각이 발생하게 되지만 bank angle의 영향에 비해 작기 때문에 고려하지 않는다. 식 (4)를 이용하여 UIO를 설계하면 추정 모델에 u 의 시간 미분항이 포함되기 때문에 하나의 추정 모델을 만들어야 한다. 만들어진 추정 모델은 식 (4)의 역함수로 a_y 로부터 구해지는 횡속도로 정한다.

$$v_y^c = f_y^{-1}(a_y, u) \quad (5)$$

여기서 v_y^c 는 센서로부터 측정된 a_y 로부터 구해진 횡속도를 의미한다. 이로써 UIO 설계에 대한 준비가 끝나게 되고 결국 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.^{9,10)}

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -L_1 z - L_2 \left(a_y - \frac{1}{m} f_y(\hat{v}_y, u) \right) \\ \hat{v}_y &= z + v_y^c \end{aligned} \quad (6)$$

하지만 이렇게 유도된 관측기는 z 와 v_y^c 가 타이어 모델에서 구해진 값이기 때문에 거의 타이어 모델에 의해 추정값이 좌지우지 된다. 따라서 두가지의 문제점이 존재한다. 첫번째는 측정 노이즈로 가속도 센서에서 나온 횡가속도나 조향각, 요 레이트 센서 등의 노이즈들이 다른 필터링 없이 타이어 모델에 의해 계산되어지기 때문에 추정값에도 많은 노이즈가 섞여 나오게 된다. 추가적인 필터를 이용하여 필터링을 할 수 있지만 동역학 모델을 사용하여 관측기를 만든다면 더 좋은 필터링을 구현해 낼 수 있다. 두번째 문제점은 추정 모델의 에러를 고려할 수 없다. 특정한 타이어 모델을 이용하였기 때문에 다른 추가적인 보정이 없으면 타이어의 상태나 도로의 상태에 따라 추정값이 다르게 나올 수 있다. 따라서 UIO는 아니지만 UIO에서 나온 식을 약간 변형하여 위의 두 가지 문제점을 제거한다. 동역학 모델을 이용해 변형한 관측기 모델은 식 (7)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}}_y &= -v_x \gamma + a_y - \hat{\varphi} - K_{v_y} \left(a_y - \frac{1}{m} f_y(\hat{v}_y, u) \right) \\ \dot{z} &= -K_{v_y} \left(a_y - \frac{1}{m} f_y(\hat{v}_y, u) \right) \\ v &= z + v_y^c \\ \hat{\varphi} &= K_w (\hat{v}_y - v) \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 Dugoff Tire Model

UIO에 사용된 타이어 모델은 다른 비선형 타이어 모델에 비해 알아야 하는 파라미터가 적은 Dugoff 타이어 모델을 이용하였다. Dugoff 타이어 모델의 식은 식 (8)과 같다.¹¹⁾

$$\begin{aligned} F_{x_i} &= C_{x_i} \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_i} f(\sigma_i) \\ F_{y_i} &= C_{y_i} \frac{\tan(\alpha_i)}{1 - \lambda_i} f(\sigma_i) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 λ_i 는 각 바퀴의 슬립율이고 α_i 는 각 바퀴의 슬립 앵글을 의미한다. C_{x_i} , C_{y_i} 는 각각 종방향, 횡방향 강성로 이미 알고 있는 값이라 가정한다.

$f(\sigma_i)$ 는 각 바퀴에서 나오는 힘의 계인값으로 식 (9)로 계산된다.

$$f(\sigma_i) = \begin{cases} (2 - \sigma_i)\sigma_i & (\sigma_i < 1) \\ 1 & (\sigma_i \geq 1) \end{cases} \quad (9)$$

where

$$\sigma_i = \frac{\mu F_{zi}(1 - \lambda_i)}{2\sqrt{C_{xxi}^2 \lambda_i^2 + C_{yyi}^2 \tan^2 \alpha_i}}$$

μ 는 바퀴와 타이어 사이의 노면 마찰계수로 본 논문에서는 일반적인 아스팔트라 가정하여 0.85를 사용하였다.¹²⁾ F_{zi} 는 각 바퀴의 수직항력이다. Dugoff 타이어 모델에서 구해진 종방향과 횡방향 힘을 이용하여 식 (4)에 대입하게 되면 계산된 횡방향 가속도는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{a}_y &= \frac{1}{m} f_y(V_y, u) \\ &= \frac{1}{m} ((F_{xfl} + F_{xfr}) \sin(\delta) + \\ &\quad (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos(\delta) + F_{yrl} + F_{yrr}) \end{aligned} \quad (10)$$

Dugoff 타이어 모델에서 구해져야 하는 다른 항인 v_y^c 는 비선형 함수의 역함수이기 때문에 수치해석법 중 이분법을 사용하였다. Iteration을 줄이기 위해 처음 구간의 범위를 다음과 같이 정하였다.

$$-V_x \tan\left(\frac{\pi}{9}\right) \leq v_y^c \leq V_x \tan\left(\frac{\pi}{9}\right) \quad (11)$$

만약 횡속도가 정한 범위 이상이 나오게 되는 것은 일반적인 주행 상황이 아니기 때문이다. 시뮬레이션과 실험결과 iteration이 10이하로 나오게 되어 충분히 빠른 시간안에 계산이 된다는 것을 알 수 있었다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘을 차량 시뮬레이터인 CarSim과 제어기 설계에 사용된 MATLAB/Simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다. CarSim에서 나오는 센서 데이터(휠속, 요 레이트, 조향각 등)가 추정기의 입력이 된다. 추정기의 성능을 등판각과 횡속도의 정보를 받아서 검증한다. CarSim을 사용한 시뮬레이션은 40 kph로 평지와 도로 기

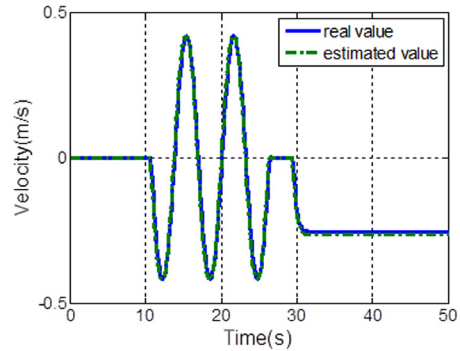


Fig. 2 Lateral velocity (scenario 1)

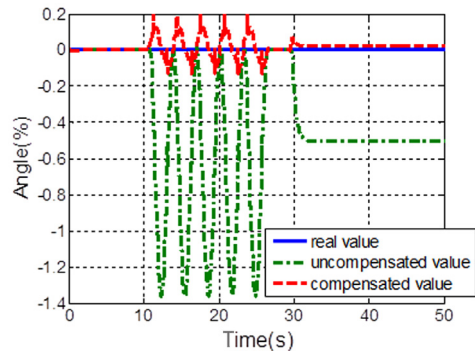


Fig. 3 Climbing angle (scenario 1)

울기가 10%인 도로에서 슬라럼 후 선회하는 시나리오이다.

알고리즘을 통해 추정된 횡속도와 등판각을 도시하였다. 첫번째 시나리오는 0%의 도로에서 슬라럼 후 선회하는 것이다. 슬라럼 테스트와 선회 테스트 결과 평지에 가까운 값을 보였다. 등판각 추정의 RMSE값은 보정한 경우 0.0448%였고, 보정하지 않은 경우 0.5611%였다. 등판각 추정의 최대 오차는 보정한 경우 0.1956%였고, 보정하지 않은 경우 1.3577% 였다.

두번째 시나리오는 10%의 도로에서 슬라럼 후 선회하는 것이다. 슬라럼 테스트와 선회 테스트 결과 실제 등판각과 거의 일치함을 볼 수 있다. 30초에서 40초 사이에 횡속도 오차가 발생하는 이유는 내리막에서 오르막으로 바뀌는 부분으로 롤 각의 값이 커져 발생하는 것이다. 하지만 이 오차가 등판각 추정결과에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있다. 등판각 추정의 RMSE값은 보정한 경우 0.078% 였

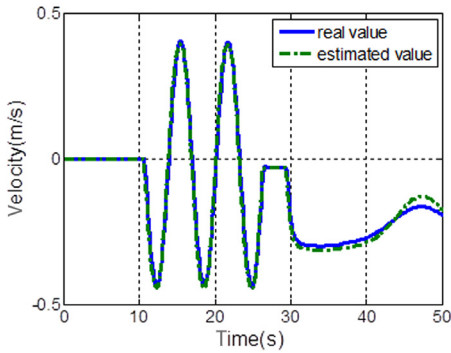


Fig. 4 Lateral velocity (scenario 2)

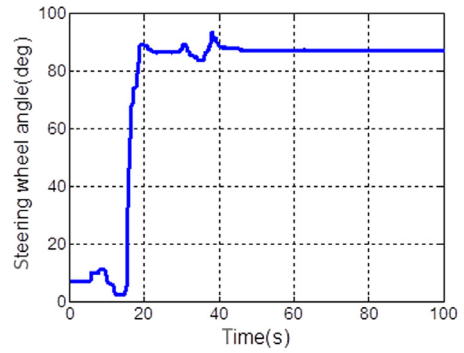


Fig. 6 Steering wheel angle (scenario 1)

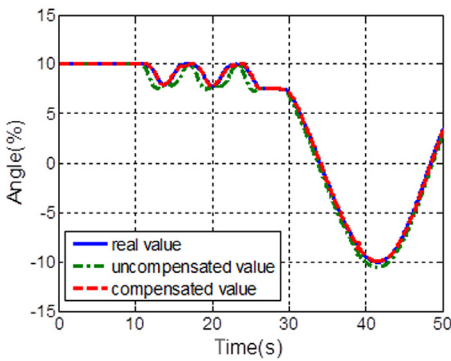


Fig. 5 Climbing angle (scenario 2)

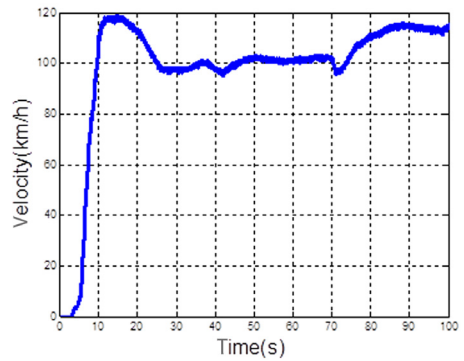


Fig. 7 Longitudinal velocity (scenario 1)

고, 보정하지 않은 경우 0.5752% 였다. 등판각 추정
의 최대 오차는 보정한 경우 0.5893% 였고, 보정하
지 않은 경우 1.4129% 였다.

4. 실차 실험

실차 시험은 평지에서 커브와 u-turn을 하였고,
실제 도로의 기울기를 이미 알고 있는 도로에서 슬
라럼을 실시하였다. 실차 실험에 사용된 장비에는
추정 알고리즘에 필요한 데이터를 얻기 위해 3축 자
이로 센서와 경사계센서, 광학 속도센서를 사용하
였으며 실시간 실험을 위해 MicroAutobox를 사용하
였다. 사용한 3축 자이로 센서의 정밀도는 0.02°/sec
이며, 경사계센서의 정밀도는 0.0035°, 광학 속도센
서의 정밀도는 ±0.5%이다.

알고리즘을 통해 추정된 횡속도와 등판각을 도시
하였다. 첫번째 시나리오는 0%의 도로에서 선회를
한 시나리오이다. Steering wheel angle과 속도는 Fig. 6
과 Fig. 7에 도시하였다. 이미 평지라는 것을 알고 있

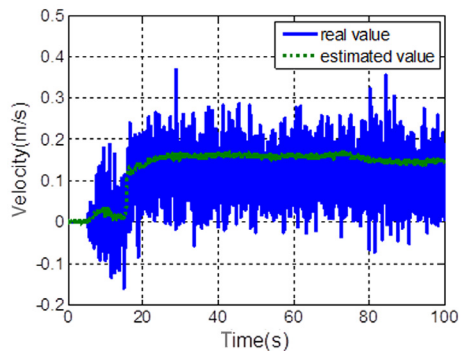


Fig. 8 Lateral velocity (scenario 1)

기 때문에 등판각의 실제 값은 0%로 하였다. Fig. 7
을 보면 약 10초까지 속도가 급격하게 증가하는 것
을 볼 수 있다. 이는 정지 상태에서 급출발을 하여서
생긴 것으로 pitch angle의 영향이 커서 추정 결과의
오차가 크다. 따라서 등판각 추정의 RMSE값과 최
대 오차는 10초 이후부터 100초까지로 구하였다.

RMSE의 값은 보정한 경우 0.0960% 였고, 보정하
지 않은 경우 0.3824% 였다. 등판각 추정의 최대 오

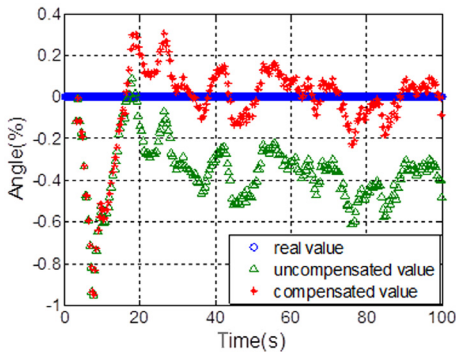


Fig. 9 Climbing angle (scenario 1)

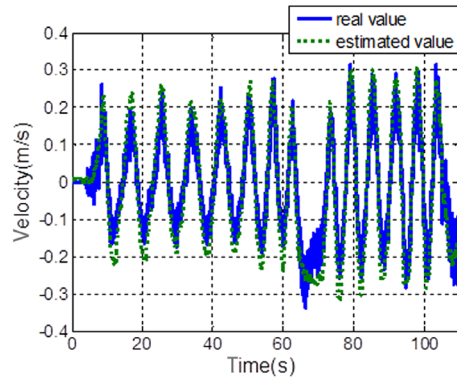


Fig. 12 Lateral velocity (scenario 2)

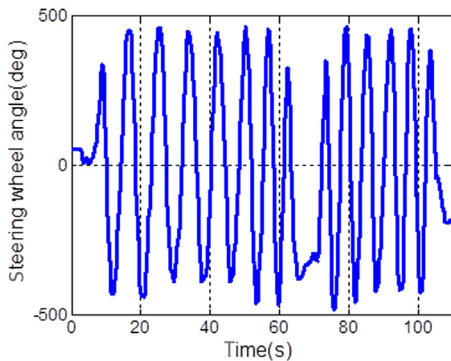


Fig. 10 Steering wheel angle (scenario 2)

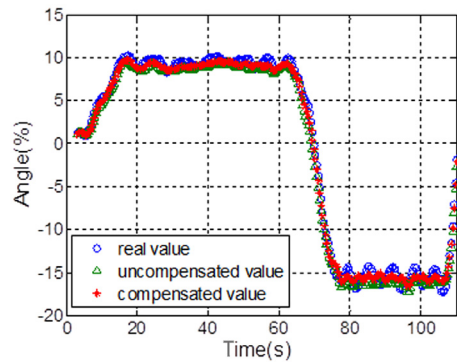


Fig. 13 Climbing angle (scenario 2)

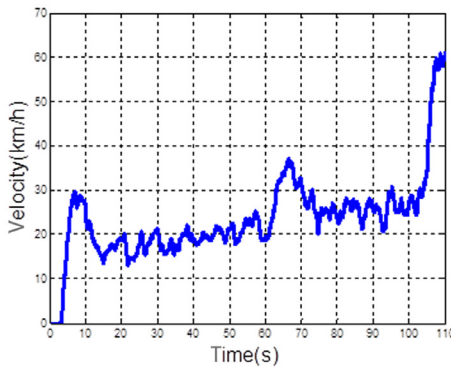


Fig. 11 Longitudinal velocity (scenario 2)

차는 보정한 경우 0.3058% 였고, 보정하지 않은 경우 0.6145% 였다.

두번째 시나리오는 10%의 도로와 -16% 도로에서 슬라럼을 한 시나리오 이다. steering wheel angle과 속도는 Fig. 10과 Fig. 11에 도시하였다. 경사가 있는 도로에서 슬라럼을 할 경우 선회시에는 등판각이 도로의 경사각보다 작게 된다.

따라서 이를 경사계 센서를 사용하여 실값으로 생각하였다. 경사계 센서 값과의 비교를 통해 RMSE 값과 최대 오차를 구하였다. RMSE의 값은 보정한 경우 0.5846% 였고, 보정하지 않은 경우 0.8131% 였다. 등판각 추정의 최대 오차는 보정한 경우 1.4635% 였고, 보정하지 않은 경우 2.2912% 였다. 첫 번째 시나리오와는 다르게 속도가 급격하게 증가하지 않았고 속도가 높지 않았기 때문에, pitch angle, roll angle의 영향이 미비하여 추정 결과의 오차가 적게 발생하는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 종방향 차량 모델과 횡속도를 추정하여 경사로를 주행중인 차량의 등판각 추정 방법을 제안하였다.

CarSim을 이용한 시뮬레이션을 통해 종방향 가속도를 보정한 결과와 보정하지 않은 결과를 실제값

과 비교해 보았다. 시뮬레이션 결과 보정하지 않은 결과의 최대 오차는 약 1.5% 였지만 보정한 결과의 최대 오차는 약 0.5% 였다. 시뮬레이션을 통해 알고리즘 검증에 마친 후 실차 실험을 통해 성능을 평가해 보았다. 실차 실험에서는 보정하지 않은 결과의 최대 오차는 약 2.3% 였고, 보정한 결과의 최대 오차는 약 1.5% 였다. 따라서, 시뮬레이션과 실차 실험 모두 가속도를 보정해 준 결과 약 1%의 오차를 줄일 수 있었다. 이때, 경사각 1% 오차는 중량 1500kg 인 차량에 작용하는 중 방향 힘으로 환산할 경우 최대 147N의 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 경사각 추정 성능 향상은 경사각 정보를 활용하는 각종 차량 중 방향 제어 시스템의 성능 향상에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 급격하게 속도를 줄이며 u-turn을 할 경우 오차가 많이 발생함을 확인할 수 있었다. 이런 현상은 pitch angle이나 롤 각의 영향이 가속도 센서에 크게 작용하기 때문이다. 따라서 이러한 현상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

횡속도 추정에 Dugoff 타이어 모델의 사용으로 slip-angle이 큰 경우 횡속도 추정 성능이 저하될 수 있다. 따라서 Magic Formula 같은 타이어 모델을 이용한다면 좀 더 좋은 성능을 기대할 수 있다.

본 논문의 연구를 통해 추정된 등판각은 ACC나 Hill holding 같은 중방향 제어의 성능을 향상시킬 수 있으며, 현재 많은 관심을 받고 있는 V2X기술에서 중요한 정보인 차량의 절대 위치 정보의 오차를 줄여줄 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 2008년도 건설핵심 기술연구개발사업(07기술혁신A01)의 지원으로 이루어졌다.

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A2008054).

References

- 1) Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammam and J. Dakhllallah, "Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation," American Control Conference, Seattle, Washington, USA, pp.4603-4608, 2008.
- 2) P. Sahlholm and K. H. Johansson, "Road Grade Estimation for Look-ahead Vehicle Control Using Multiple Measurement Runs," Control Engineering Practice, Vol.18, No.11, pp.1328-1341, 2010.
- 3) B. Ganji and A. Z. Kouzani, "A Look-ahead Road Grade Determination Method for HEVs," Electrical Engineering and Control, Springer, Vol.98, pp.703-711, 2011.
- 4) L. Y. Hsu and T. L. Chen, "Estimating Road Angles with the Knowledge of the Vehicle Yaw Angle," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.132, No.3, 2010.
- 5) P. F. Katranitsas, A. W. Ordys, P. M. Darnell and J. Jimmy, "Road Gradient Detection Using Kalman Filter," IEEE, EUROCON, pp.1492-1497, 2013.
- 6) H. Ohnishi, J. Ishii, M. Kayano and H. Katayama, "A Study on Road Slope Estimation for Automatic Transmission Control," JSAE Review, Vol.21, No.2, pp.235-240, 2000.
- 7) D. W. Pi, N. Chen, J. X. Wang and B. J. Zhang, "Design and Evaluation of Sideslip Angle Observer for Vehicle Stability Control," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.3, pp.391-399, 2011.
- 8) L. Imsland, H. F. Grip, T. A. Johansen and T. I. Fossen, "Nonlinear Observer for Vehicle Velocity with Friction and Road Bank Angle Adaptation - Validation and Comparison with an Extended Kalman Filter," SAE 2007-01-0808, 2007.
- 9) L. Imsland, T. A. Johansen, H. F. Grip and T. I. Fossen, "On Nonlinear Unknown Input Observers Applied to Lateral Vehicle Velocity Estimation on Banked Roads," International Journal of Control, Vol.80, No.11, pp.1741-1750, 2007.
- 10) S. Mammam, S. Glaser and M. Netto, "Vehicle Lateral Dynamics Estimation Using Unknown Input Proportional Integral Observers," American Control Conference, Minneapolis, Minnesota,

- USA, pp.4658-4663, 2006.
- 11) R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd Edn., Springer, New York, pp.389-393, 2012.
 - 12) C. S. Lim and Y. W. Choi, "The Experimental Study on the Transient Brake Time of Vehicles by Road Pavement and Friction Coefficient," *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.30, No.6, pp.587-597, 2010.