

논문 2014-51-9-24

Cascade Extended Kalman Filter 기반의 차량동특성 및 도로종단경사 추정

(Vehicle Dynamics and Road Slope Estimation based on Cascade
Extended Kalman Filter)

김 문 식*, 김 창 일*, 이 광 수*

(Moon-sik Kim[Ⓞ], Chang-il Kim, and Kwang-soo Lee)

요 약

차선유지 제어시스템, 적응식순항 제어시스템과 같은 첨단운전 지원시스템은 기본적으로 차량의 거동 정보를 기반으로 구동되지만, 최근 도로의 기하학적 정보를 추가적으로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 도로의 종단경사는 차량의 가속 제어 및 항법알고리즘 구현에 있어 필수적인 정보로서 DGPS-RTK와 같은 고가의 장비로 직접 측정하는 방법과 디지털 맵에 저장된 속성정보를 활용하는 방식이 제안되고 있으나, 상용화 관점에서는 아직 많은 문제점이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 추가 센서의 장착없이 연속형 확장칼만필터를 활용하여 차량의 동특성과 도로종단경사를 효율적으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 도로종단경사를 포함하는 3자유도 차량동역학 모델과 차량의 내부 네트워크를 통해 수집할 수 있는 차량의 상태정보를 기반으로 확장칼만필터를 설계하여 차량의 동특성과 도로종단경사를 추정한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실차실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

Abstract

Vehicle dynamic states used in various advanced driving safety systems are influenced by road geometry. Among the road geometry information, the vehicle pitch angle influenced by road slope and acceleration-deceleration is essential parameter used in pose estimation including the navigation system, advanced adaptive cruise control and others on sag road. Although the road slope data is essential parameter, the method measuring the parameter is not commercialized. The digital map including the road geometry data and high-precision DGPS system such as DGPS(Differential Global Positioning System) based RTK(Real-Time Kinematics) are used unusually. In this paper, low-cost cascade extended Kalman filter(CEKF) based road slope estimation method is proposed. It use cascade two EKF's. The EKF's use several measured vehicle states such as yaw rate, longitudinal acceleration, lateral acceleration and wheel speed of the rear tires and 3 D.OF(Degree Of Freedom) vehicle dynamics model. The performance of proposed estimation algorithm is evaluated by simulation based on Carsim dynamics tool and T-car based experiment.

Keywords : cascade extended Kalman filter, road slope, vehicle dynamics, in-vehicle network, pitch angle

* 정희원, 자동차부품연구원 자율주행기술연구센터
(Vehicle Autonomous Driving Technology R&D
Center, Korea Automotive Technology Institute)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail: mskim@katech.re.kr)

※ 본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 산업기술진흥
지원(과제번호:R0001230)과 한국산업기술평가관리원
(과제번호:10043352)의 지원을 받아 수행된 결과임
접수일자: 2014년7월29일, 수정일자: 2014년8월31일
수정완료: 2014년9월11일

I. 서 론

최근 스마트카를 중심으로 개발되고 있는 안전 및 편의시스템의 성능을 향상시키기 위해 도로 속성 정보를 반영하는 연구를 활발히 진행하고 있다. 특히, 도로의 종방향 경사도 정보는 운전 구간에 따른 차량의 요구

동력을 예측 가능하게 하여 차량의 연비 개선 효과와 배기가스 저감, 고속도로 SAG 구간에서의 Cooperative ACC(Adaptive Cruise Control) 시스템의 성능 향상 등 매우 높은 활용성을 기대할 수 있다^[1]. 또한, 차량의 종횡방향가속도, 타이어 포스 등과 같은 차량의 동특성에도 영향을 미치기 때문에, 이에 대한 정보가 있으면 보다 정확한 차량의 동특성 추정을 통해 ABS(Anti-Lock Brake System), ESP(Electronic Stability Program) 등과 같은 기존의 안전장치의 성능향상에도 기여할 수 있다^[2]. 이에 타이어모델을 포함하는 차량동역학 모델을 기반으로 도로의 종단경사를 추정하는 연구가 수행되어 왔으나, 계산량이 많고 타이어 모델 파라미터를 확보해야 하는 어려움이 있으며, 자이로센서를 활용하는 방법도 있으나 센서를 추가 장착해야 하는 부담이 있다^[2-3].

본 논문에서는 타이어 모델을 포함하지 않는 3자유도 차량 동역학 모델을 기반으로 2개의 연속적인 EKF(Extended Kalman Filter)를 활용하여 차량의 동특성과 도로의 종단경사도를 동시에 추정한다. 3자유도 차량동역학 모델은 동특성 추정에 활용하며, 차량에서 측정되는 회전각속도, 종/횡방향 가속도 그리고 타이어 속도를 측정값으로 사용한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실차실험을 통해 그 유효성을 검증하였다. 특히, 현재 양산되는 차량을 대상으로 추가적인 센서의 장착 없이 차량네트워크(In-Vehicle Network : IVN)를 통해 수집할 수 있는 정보만을 이용하여 도로종단경사를 추정한다.

II. 차량모델

본 논문에서는 종/횡방향 병진운동 및 요방향 회전운동을 포함하는 3자유도 자전거 동역학 모델을 이용하였다^[4-5]. 종방향 모델식의 경우 도로종단경사도를 추정하

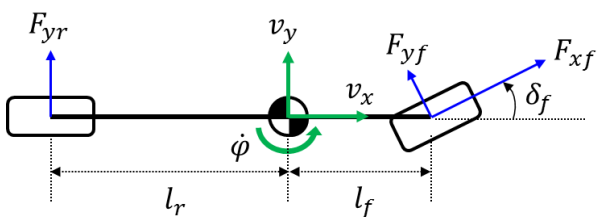


그림 1. 전륜구동 3자유도 차량 모델
Fig. 1. 3 D.O.F vehicle model.

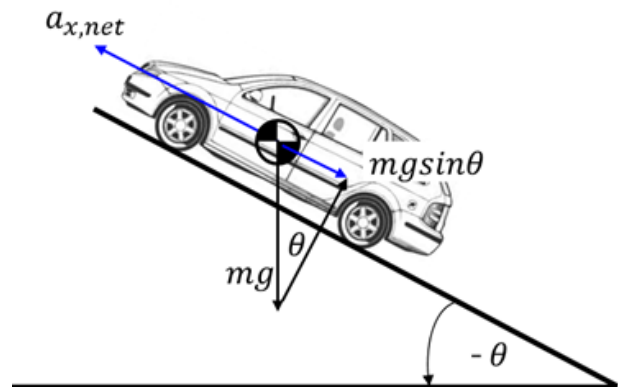


그림 2. 경사로에서의 차량 모델
Fig. 2. Vehicle model in slope road.

는 2차 EKF에서 한 번 더 활용된다. 차량 거동특성은 차량바디와 노면에 작용하는 타이어 외력에 의해 영향을 받으며, 이를 3자유도 차량 모델과 경사노면에서의 차량의 역학관계로 그림 1, 2에 나타내었다. 특히, 본 논문에서는 전륜구동 차량을 대상으로 전륜 타이어에만 종방향 힘이 있으며, 후륜 타이어에는 종방향 힘은 없는 것으로 가정하여 추정변수의 수를 최소화 하였다.

도로 종단경사도를 포함하는 3자유도 차량모델의 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m(\dot{v}_x - \dot{\psi}v_y + g\sin\theta) = F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f \\ \sum F_y &= m(\dot{v}_y + \dot{\psi}v_x) = F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr} \\ \sum M_z &= I_z\ddot{\psi} = l_r F_{xf}\sin\delta_f + l_f F_{yf}\cos\delta_f - l_r F_{yr} \end{aligned} \quad (1)$$

차량의 종방향 가속도는 도로종단경사에 의해 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$a_{x,mea} = a_{x,net} + mg\sin\theta \begin{cases} \text{if downhill, } \theta \geq 0 \\ \text{if uphill, } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $a_{x,mea}$ 는 차량에서 측정된 종방향 가속도(센서출력값)이고, $a_{x,net}$ 은 도로종단경사의 영향이 제거된 차량의 순수 가속도이다. 내리막길의 경우 θ 는 양수이며, 오르막길의 경우 θ 는 음의 부호를 가진다.

III. Cascade Extended Kalman Filter

1. 확장칼만필터

확장칼만필터는 비선형 방정식에도 활용할 수 있는

표 1. 확장칼만필터 알고리즘
Table 1. Extended Kalman filter algorithm.

1단계 : 초기값 선정
\hat{x}_0, P_0
2단계 : 추정값 및 오차 공분산 예측
$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1})$ $P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$
3단계 : 칼만 이득 계산
$K_k = P_k^- + H^T(HP_k^-H^T + R)^{-1}$
4단계 : 추정값 계산
$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-))$
5단계 : 오차 공분산 계산
$P_k = P_k^- - K_kHP_k^-$

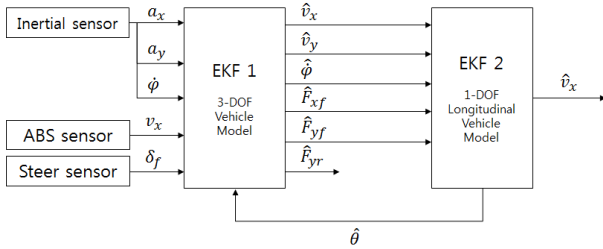


그림 3. CEKF의 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of CEKF.

선형칼만필터의 변형된 형태로, 초기값 선정, 추정값과 오차 공분산 예측, 칼만이득 계산, 추정값 계산, 오차 공분산 계산의 순서로 수행된다. 확장칼만필터는 시스템 모델식과 추정 모델식 자리에 비선형 모델의 관계식을 사용한다는 점이 선형칼만필터와 다르다. 시스템 모델과 추정 모델은 일반적으로 Jacobian을 사용하여 선형화 한다. 표 1은 확장칼만필터 알고리즘의 구현 순서를 보여준다.

본 논문에서는 차량동특성과 도로종단경사를 각각 추정하는 연속형 확장칼만필터(Cascade Extended Kalman Filter : CEKF)를 설계하여 사용하였으며, 그 구조는 그림 3과 같다. 하나의 확장칼만필터로는 차량동특성과 도로종단경사를 동시에 추정할 수 없기 때문이다.

2. 차량동특성 추정

차량동특성을 추정하기 위해 3자유도 차량모델을 6개의 상태변수를 포함하는 상태공간식의 형태로 표현하면 식(3)과 같다.

$$x = [v_x \ v_y \ \dot{\psi} \ F_{xf} \ F_{yf} \ F_{yr}]^T$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\psi} \\ \dot{F}_{xf} \\ \dot{F}_{yf} \\ \dot{F}_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}v_y + \frac{1}{m}(F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f - mg\sin\theta) \\ -\dot{\psi}v_x + \frac{1}{m}(F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr}) \\ \frac{1}{I_z}(l_f F_{xf}\sin\delta_f + l_f F_{yf}\cos\delta_f - l_r F_{yr}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서, 차량 IVN을 통해 측정 가능한 변수는 차량속도(전륜차량에서 후륜 2바퀴는 미끄럼이 없다는 가정하에 후륜 2바퀴의 속도를 평균하여 산출), 전륜의 조향각도, 종방향가속도, 횡방향 가속도이다. 따라서, 확장칼만 필터에서의 추정변수와 추정모델은 다음과 같이 표현할 수 있다. 특히, 종방향가속도의 경우 앞서 언급한 $a_{x,mea}$ 로 표현되어진다.

$$z = [v_x \ \dot{\psi} \ a_{x,mea} \ a_y]$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\psi} \\ a_{x,mea} \\ \dot{a}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\psi} \\ F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f \\ F_{xf}\sin\delta_f + F_{yf}\cos\delta_f + F_{yr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서, 식(3)의 비선형 상태방정식과 식(4)의 측정방정식을 바탕으로 차량동특성을 추정하는 첫 번째 확장칼만필터를 설계할 수 있다.

3. 도로종단경사 추정

도로종단경사는 1자유도 종방향 차량모델과 첫 번째 EKF의 결과값을 활용하여 두 번째 EKF를 통해 식(5)와 같이 추정한다.

$$x = [v_x \ \theta]^T$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}v_y + \frac{1}{m}(F_{xf}\cos\delta_f - F_{yf}\sin\delta_f - mg\sin\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안된 알고리즘을 현대자동차의 그랜저HG 모델을 대상으로 시뮬레이션과 실차실험을 통하

표 2. 차량 파라미터
Table 2. Vehicle parameters.

m [kg]	l_f [m]	l_r [m]	I_z [kg·m ²]
1999.1	0.54122	2.30378	2573.4

여 검증하였다. 이를 위해, 3자유도 차량모델에 사용되는 차량파라미터를 다양한 실차실험을 통해 추정하였으며, 표 2에 정리하여 표시하였다.

1. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 도로종단경사 추정 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해 실험에 앞서 차량동역학 해석틀인 Carsim을 사용하여 그랜저HG 차량을 모델링하고, 평지를 주행하는 도중 15deg의 종단경사를 가지는 오르막길을 주행하는 시나리오로 시뮬레이션을 수행하

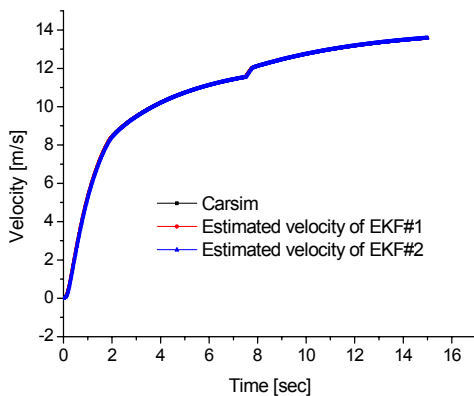


그림 4. 추정된 차량 속도 (시뮬레이션)
Fig. 4. Estimated vehicle velocity (simulation).

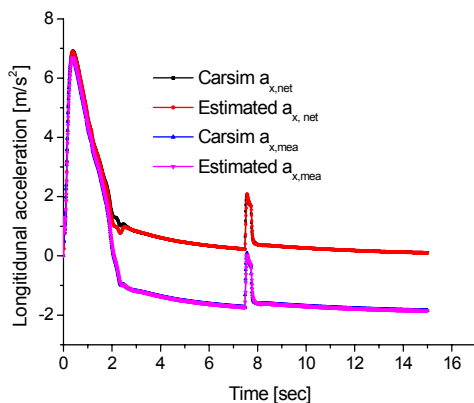


그림 5. 추정된 종방향 가속도 (시뮬레이션)
Fig. 5. Estimated longitudinal acceleration (simulation).

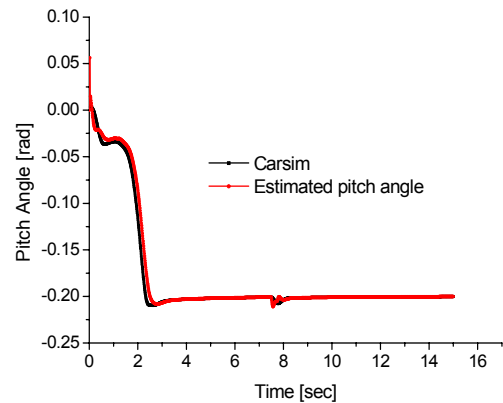


그림 6. 추정된 도로종단경사 (시뮬레이션)
Fig. 6. Estimated road slope (simulation).

였다.

시뮬레이션 결과 그림 4~6과 같이 Carsim의 해석결과와 매우 유사한 차량동특성 및 도로종단경사 추정결과를 보여주었다. 특히, 도로종단경사에 의해 영향을 받는 차량의 종방향 가속도 $a_{x,mea}$, $a_{x,net}$ 도 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 칼만필터 수렴에 따른 시간지연이 발생하고, 기어변속이 일어나는 8초 부근에서는 차체의 자체피치운동과 도로종단경사가 복합적으로 반영되어 추정치에 일부 편차가 발생함을 알 수 있다.

2. 실차실험

실차실험에 사용된 차량은 시뮬레이션과 동일한 그랜저HG 모델이며, 차량내부 네트워크인 CAN (Controller Area Network)을 통해 CEKF의 추정모식에 필요한 센서정보를 취득하였다. 또한, 추정한 도로종단경사도의 정확도를 비교분석하기 위해 Xbow사의 고정밀 IMU를 장착하여 차량의 피치각을 측정하였다. 주행구간은 자동차부품연구원 주행시험장에서의 평지주행과 정문 입구 경사도로면이며, 정문 입구 도로의 경우 과속방지턱을 포함하고 있다.

평지주행의 경우 그림 7~10을 통해 알 수 있듯이 추정된 도로종단경사는 실제 경사도가 아닌 차량의 가감속 운동에 의한 차체의 피치모션으로 약 ± 0.1 rad 안에서 움직임을 확인할 수 있으며, 차량의 가감속 시점에 따라 차량의 종방향 가속도와 타이어힘도 적절한 값으로 추정되고 있다. 특히 종방향 가속도의 경우 EKF에

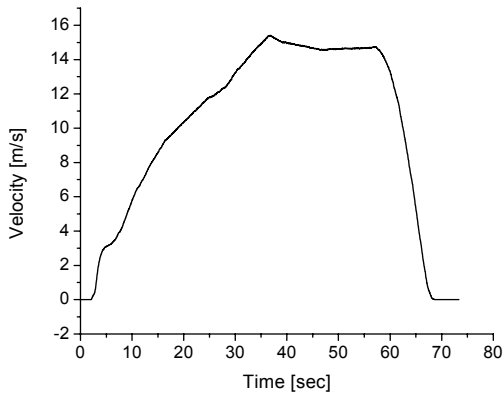


그림 7. 추정된 차량속도 (실차실험 - 평지)
 Fig. 7. Estimated vehicle velocity.
 (experiment - flat road)

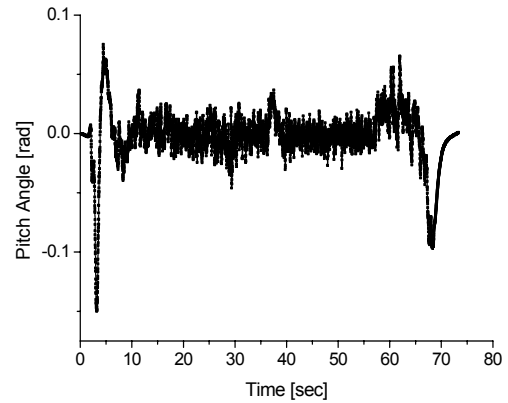


그림 10. 추정된 피치각 (실차실험 - 평지)
 Fig. 10. Estimated pitch angle (experiment - flat road).

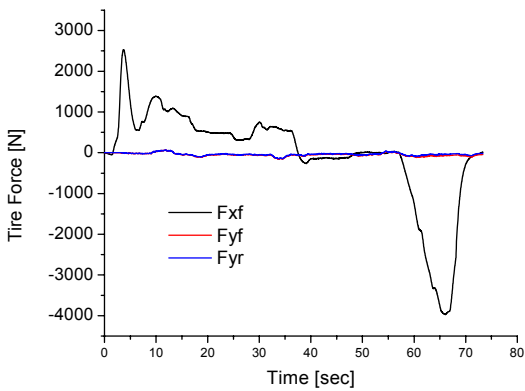


그림 8. 추정된 타이어힘 (실차실험 - 평지)
 Fig. 8. Estimated tyre force (experiment - flat road).

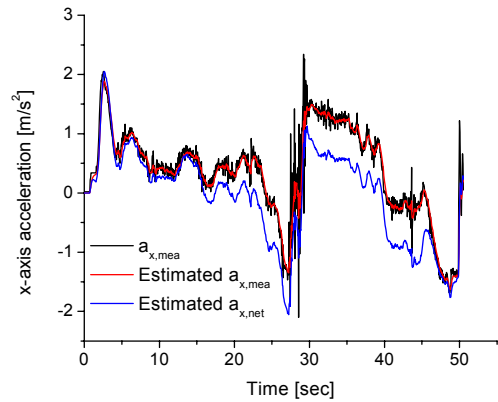


그림 11. 추정된 종방향 가속도 (실차실험 - 경사로)
 Fig. 11. Estimated longitudinal acceleration.
 (experiment - slope road)

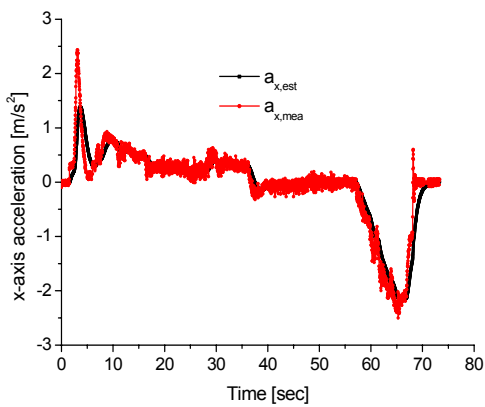


그림 9. 추정된 종방향 가속도 (실차실험 - 평지)
 Fig. 9. Estimated longitudinal acceleration (experiment - flat road).

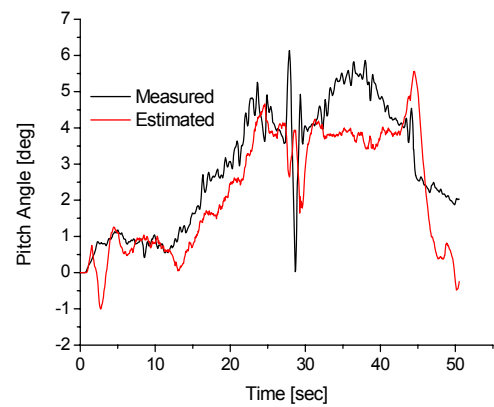


그림 12. 추정된 도로종단경사 (실차실험 - 경사로)
 Fig. 12. Estimated road slope.
 (experiment - slope road)

표 3. 종방향 가속도 분석 (실차실험 - 경사로)
Table 3. Analysis of longitudinal acceleration.
(experiment - slope road).

	표준편차	최소값	최대값
$a_{x,mea}$	0.77166	-2.1	2.34
Estimated a_x	0.73598	-1.63	1.89

의해 노이즈가 상당수 제거됨을 알 수 있다.

경사로주행에서는 그림 11, 12에서 알 수 있듯이 과속방지턱에 의한 진동이 30초 부근에서 발생하나 차량의 종방향 가속도와 도로종단경사를 적절히 추정함을 확인할 수 있다. 평지주행과 마찬가지로 차량의 종방향 가속도와 연계하여 분석하면 주행후 2초 부근과 50초 부근에서 차량피치모션과 종단경사값이 복합적으로 나타나 추정된 도로종단경사에 오차가 발생함을 알 수 있다. 표 3은 경사로에서의 종방향 가속도와 추정된 종방향 가속도를 신호분석한 결과이며, EKF에 의해 노이즈가 많이 제거되었음을 정량적으로 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 차세대 스마트카 및 자율주행 기술에 주요한 영향을 미치는 도로종단경사를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 3자유도 차량모델을 기반으로 Cascade EKF를 이용하여 차량의 동특성 및 도로종단경사를 추정하였으며, 특히, 센서의 추가 장착 없이 일반적인 차량의 내부 네트워크를 통해 측정할 수 있는 속도, 회전각속도, 종/횡방향 가속도 등을 측정변수로 활용하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실차실험을 통해 그 유효성을 확인하였으며, 실험결과 고정밀 IMU센서와의 신호상호상관계수가 약 84.0%로 나타났다. 본 논문에서 제안한 방법은 차체의 피치운동에 대한 자유도는 고려하고 있지 않아, 추정된 도로종단경사에 차량의 피치운동이 복합적으로 나타나므로, 향후 이 두 가지 요소를 구분하는 연구가 필요하다.

REFERENCES

[1] Y. G. Kim, J. S. Lee, H. S. Wi, J. I. Park and J. H. Lee, "Real-time measurement of the tilt road on vehicle," KSAE research field synthesize Conf., pp. 727-729, Korea, May, 2012.

[2] Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammam and J. Dakhllallah, "Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation," American Control Conf., FrB09.5, Washington, USA, June 2008.

[3] J. Y. Kim, J. H. Lee, J. M. Byun and S. H. Kim, "Localization Performance Improvement for Mobile Robot using Mutiple Sensors in Slope Road," Journal of IEIE, Vol. 47, no. 1, pp. 67-75, 2010.

[4] S. Y. Lee, E. G. Kim, D. H. Lee and G. S. Huh, "Vehicle longitudinal velocity estimation on inclined road," Transactions of KSAE, Vol. 20, no. 1, pp. 14-19, 2012.

[5] H. G. Byun, E. G. Kim, H. G. Kim and G. S. Huh, "Climbing angle estimation in yawing motion," KSAE research field synthesize Conf., pp. 731-733, Korea, May, 2013.

저 자 소 개



김 문 식(정회원)-교신저자
 2003년 부산대학교 기계공학부
 학사 졸업.
 2005년 부산대학교 지능기계
 공학과 석사 졸업.
 2011년 부산대학교 기계공학부
 박사 졸업.

2005년~현재 자동차부품연구원 자율주행기술
 연구센터 선임연구원
 <주관심분야 : 인공지능, 메카트로닉스, 계측제어,
 센서융합, 자율주행자동차>



김 창 일(정회원)
 2010년 한국기술교육대학교
 메카트로닉스공학부
 학사 졸업.
 2013년 한국기술교육대학교
 기계공학부 석사 졸업.

2013년~현재 자동차부품연구원 자율주행기술
 연구센터 연구원
 <주관심분야 : 자율주행자동차, 메카트로닉스, 비
 선형제어>



이 광 수(정회원)
 2011년 건양대학교 전자정보
 공학과 학사 졸업.
 2011년~현재 자동차부품연구원
 자율주행기술연구센터
 연구원

<주관심분야 : 자율주행자동차, 메카트로닉스, 센
 서융합, 회로설계 >