

경사진 노면에서의 차량의 종 속도 추정

이 상 엽¹⁾ · 김 인 근¹⁾ · 이 동 훈¹⁾ · 허 건 수^{*2)}

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Vehicle Longitudinal Velocity Estimation on Inclined Road

Sangyeob Lee¹⁾ · Inkeun Kim¹⁾ · Donghun Lee¹⁾ · Kunsoo Huh^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 4 August 2010 / Revised 28 July 2011 / Accepted 8 August 2011)

Abstract : On-line and real-time information of the longitudinal velocity is the essential factor for the Advanced Vehicle Control Systems such as ABS(Anti-lock Brake System), TCS(Traction Control System), ESC(Electronic Stability Control) etc. However, the longitudinal velocity cannot be easily measured or calculated during braking maneuvering. A new algorithm is presented for the estimation of the longitudinal velocity with the measurements of the vehicle longitudinal/lateral acceleration, steering angle and yaw rate. The algorithm is designed utilizing the Extended Kalman Filter based on the 3 degree of freedom vehicle model. In order to compensate for the biased sensor signal on the inclined road, the inclined angle is also estimated. The performance of the proposed estimation algorithm is evaluated in field tests.

Key words : Longitudinal velocity(종 속도), Inclined angle estimation(경사각 추정), Longitudinal acceleration compensation(종 가속도 보정), Extended kalman filter(확장된 칼만필터)

Nomenclature

a_x : Longitudinal acceleration, m/s^2
 a_y : Lateral acceleration, m/s^2
 F_{xi} : Longitudinal tire force from i-th tire, N
 F_k : System jacobian matrix
 F_{yi} : Lateral tire force from i-th tire, N
 g : Gravitational acceleration, m/s^2
 H_k : Measurement jacobian matrix
 I_z : Vehicle moment of inertia about z-axis, $kg \cdot m^2$
 K_k : gain matrix
 l_f : Distance from c.g. to front axle, m
 l_r : Distance from c.g. to rear axle, m
 m : Vehicle mass, kg

P_k : Covariance matrix of state estimation uncertainty
 O_k : Covariance matrix of process noise
 R_k : covariance matrix of measurement uncertainty
 ψ : Yaw rate, rad/s
 r_w : Rolling radius of the tire, m
 t_f : Y-distance from c.g. to front tire, m
 t_r : Y-distance from c.g. to rear tire, m
 v_x : Longitudinal velocity, m/s
 v_y : Lateral velocity, m/s
 δ_f : steer angle of the front wheel, rad
 Θ : Inclined angle, deg
 ω_i : Wheel rotational speed from i-th tire, rad/s

1. 서론

차량 안정성제어 시스템은 일반적으로 조향성,

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

승차감 그리고 차량의 가·감속성능의 향상을 위해 중·횡 방향 운동을 제어하는 것이다. 이러한 안정성 제어 시스템을 구현하기 위해서는 차량의 정확한 상태 정보들이 필요하며 차량에 장착된 센서 신호만이 아닌 추가적인 상태정보를 필요로 하며 대표적으로 중·횡 속도, 차량과 타이어의 미끄럼 각, 노면과 타이어사이의 마찰계수, 노면 사이에 발생하는 타이어 힘 등이 추가로 필요하다. 이러한 추가적인 정보는 센서를 이용하여 측정가능 하지만 경제적인 요소와 장착문제 등으로 정보획득에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 상용차에 센서의 출력과 적절한 차량 모델을 통한 추정 알고리즘을 통하여 차량 정보를 획득해야 한다.

기존에 연구에서 차량의 속도를 추정하기 위해서 여러 방법이 제시되었다. 차량의 모델을 기반으로 한 추정기법^{2,4)}과, 차량의 휠 속도를 이용한 추정기법⁵⁻⁶⁾도 연구된 바 있다. Hong 등²⁾과 Dakhallah 등³⁾은 차량 모델을 기반으로 한 비선형 관측기를 이용하여 차량의 속도와 타이어 힘을 추정하였으며 Bae 등⁴⁾은 RLS(Recursive Least Square)방법을 사용하여 차량의 질량과 속도를 추정하였다. 휠 속도를 이용한 추정기법은 Fangjun과 Zhiqiang⁵⁾은 차량의 급제동시 ABS(Ant-lock Brake System)를 고려한 차량의 속도추정 방법을 연구하였으며 Tanelli 등⁶⁾은 차량의 주행성향에 따른 속도추정 연구를 하였다. 그러나 이들의 연구는 차량의 급·감속에 대한 연구는 수행되었으나 도로의 구배에 따른 종 속도에 대한 연구 수행되지 않았다. Bae⁴⁾ 등은 도로 구배가 있다 하더라도 GPS를 통해 구배 정보가 있다는 가정하에 차량의 종 속도를 추정하였다.

본 논문은 차량 사시제어 기술의 필수적인 파라미터인 차량의 종 속도를 추정하는 방법을 제시한다. 3 자유도 차량모델을 기반으로 확장된 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 이용하여 차량의 종 속도를 추정한다. 이에 필요한 신호는 상용차에서 측정 가능한 신호인 중·횡 가속도와 조향각, 휠 속도 그리고 요잉율 이다. 그러나 차량이 경사진 노면을 주행할 경우 도로의 구배와 차량의 피치각에 의해 차량의 종 가속도는 이에 영향을 받으며 이는 보정되어야 한다. 도로의 경사각과 피치각을 한꺼번에 추

정하여 가속도 센서로부터 획득되는 종 가속도 신호를 보정함으로써 차량의 종 속도 추정을 향상시켰다. 또한 차량의 가·감속, 등속 그리고 도로의 구배를 주행할 경우에 대하여 각각의 추정 알고리즘을 제시하며 이는 다양한 실차실험을 통하여 추정 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 차량의 종 속도 추정 알고리즘 설계

차량의 종 속도는 주행상태에 따라 휠 속도와 유사한 상태가 있는 반면 급·감속과 같은 주행상태에서는 휠의 슬립이 발생하여 휠 속도와 실제 차량의 종 속도와 차이가 발생한다. 본 연구는 차량의 종 가속도에 따라 각각 적합한 상황에서 차량의 종 속도를 추정하는 알고리즘을 설계하였다.

추정방법^{6,9)}은 3 가지로 나뉜다. 차량이 일정 가속도 이상($a \leq a_x$)일 경우를 가속상태라 지칭하며 그때의 상태(status)를 1로 정의한다. 가속 시에 구동륜은 타이어와 노면과의 미끄럼이 발생함으로 미끄럼이 발생하지 않는 비구동륜의 속도 평균값으로 종 속도를 추정한다. 다음으로, 일정한 범위($\beta < a_x < a$)안의 가속도의 값이 측정될 경우 등속상태라 하며 그때의 상태를 0으로 한다. 등속상태일 경우에는 모든 바퀴에 미끄럼이 발생하지 않으므로 네 바퀴의 속도의 평균값으로 속도를 추정 한다. 마지막으로 종 가속도의 값이 일정 가속도 이하($a_x \leq \beta$)일 경우는 이 구간에서는 바퀴속도를 통해 종 속도를 추정하지 않고 3 자유도 차량모델을 기반으로 확장된 칼만필터를 통하여 종 속도를 추정한다.

측정되는 종 가속도는 도로 구배와 피치각을 고려하여 보정하며 전체적인 추정 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

2.1 센서 경사각 추정을 통한 종 가속도 보정

차량에 장착된 가속도 센서는 차량의 무게중심에 스프링 질량(sprung mass)과 평행하게 장착된다. 센서는 차량의 스프링 질량과 고정되어 거동하기 때문에 도로 구배나 중력의 영향에 의한 차량의 피치 거동에 의해 측정되는 종 가속도 신호는 오차를 발생⁷⁾하게 된다. Fig. 2는 도로의 경사각(θ_{stop})과 주행 중에 발생할 수 있는 피치각(θ_{pitch})을 나타내었다. 이

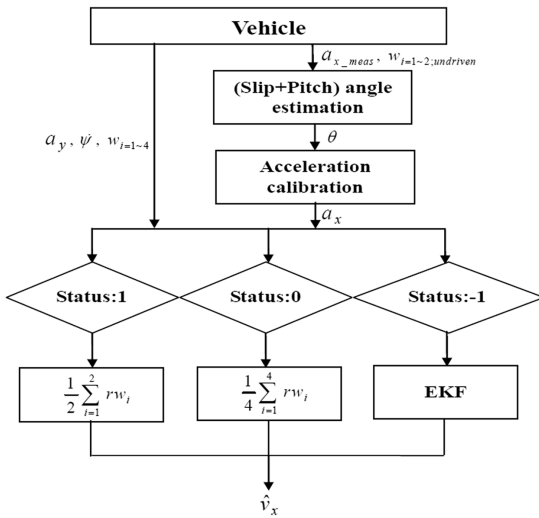


Fig. 1 Vehicle longitudinal estimation algorithm

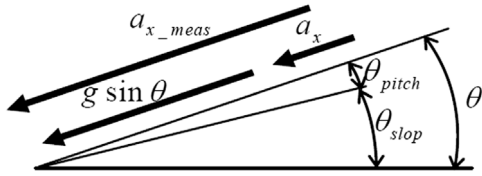


Fig. 2 Acceleration error by inclined angle

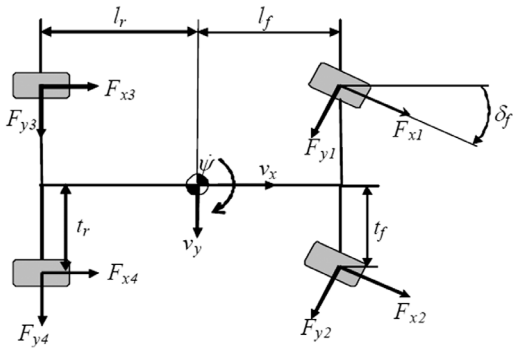


Fig. 3 Vehicle model

두 가지의 각의 합($\theta = \theta_{slop} + \theta_{pitch}$)은 가속도 센서가 지평면과 기울어진 각으로 정의한다.

가속도 센서는 이 각의 영향에 의해 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$a_{x_meas} = a_x + g \sin \theta \quad (1)$$

이와 같이 종 가속도를 보정하기 위해서는 가속도

는 휠 속도를 미분한 값과 같으며 도로 구배가 12 deg 이하라는 가정한다면 $\sin \theta \cong \theta$ 와 같이 근사화 할 수 있으며 경사각은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\theta = \frac{a_{x_meas} - a_x}{g} = \frac{a_{x_meas} - r\dot{w}}{g} \quad (2)$$

여기서 g 는 중력 가속도이며 r 은 휠의 구륵반경이다.

2.2 감속시 종 속도 추정

차량이 감속상태일 경우에는 3 자유도 차량모델을 기반으로 확장된 칼만필터를 이용하여 종 속도를 추정한다. 차량모델은 직진, 횡, 요우잉 운동으로 모델링되며 Fig. 3과 같다.

3 자유도 차량모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m(\dot{v}_x - \dot{\psi} v_y) \\ &= (F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f + (F_{x3} + F_{x4}) - 2F_{yf} \sin \delta_f \\ \sum F_y &= m(\dot{v}_y - \dot{\psi} v_x) \\ &= (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + 2F_{yf} \cos \delta_f + 2F_{yr} \\ \sum M_z &= I_z \ddot{\psi} \\ &= l_f (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + l_f (2F_{yf} \cos \delta_f) - 2l_r F_{yr} \\ &\quad + t_f (-F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f + t_r (-F_{x3} + F_{x4}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 속도추정 시스템의 간략화를 위해 타이어의 횡력은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{yf} &= \frac{(F_{y1} + F_{y2})}{2} \\ F_{yr} &= \frac{(F_{y3} + F_{y4})}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

추정기법으로는 확장된 칼만필터를 설계하였다. 식 (5)와 같이 추정 변수들을 상태변수로 확정하여 구성하였다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \dot{\psi} v_y + \frac{1}{m} \left((F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f \right. \\ &\quad \left. + (F_{x3} + F_{x4}) - 2F_{yf} \sin \delta_f \right) \\ \dot{v}_y &= -\dot{\psi} v_x + \frac{1}{m} \left((F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + 2F_{yf} \cos \delta_f + 2F_{yr} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} &= \frac{1}{I_z} \left(l_f (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + l_r (2F_{yf} \cos \delta_f) \right. \\ &\quad \left. - 2l_r F_{yr} + t_f (-F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f + t_r (-F_{x3} + F_{x4}) \right) \\ \dot{F}_{xi} &= 0, (i=1 \sim 4) \\ \dot{F}_{yf} &= 0 \\ \dot{F}_{yr} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

추정모델식의 상태변수는 9개이며, 측정변수는 차량의 종·횡 가속도, 요잉율로 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} x &= [v_x \ v_y \ \dot{\psi} \ F_{xi} \ F_{yf} \ F_{yr}]^T \\ y &= [a_x \ a_y \ \dot{\psi}]^T, (i=1 \sim 4) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 a_x 는 센서 경사각을 추정하여 보상한 종 가속도이며 a_y 는 센서에서 측정된 횡 가속도이다. 측정변수의 방정식은 식 (7)과 같다.

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} \left((F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f + (F_{x3} + F_{x4}) - 2F_{yf} \sin \delta_f \right) \\ \frac{1}{m} \left((F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + 2F_{yf} \cos \delta_f + 2F_{yr} \right) \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (5)의 비선형 상태방정식과 식 (7)의 출력방정식을 바탕으로 상태변수를 추정하는 확장된 칼만필터를 식 (8)과 같이 설계하여 종 속도를 추정하였다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(+) &= \hat{x}_k(-) + K_k (y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{x}_k(-) &= f(\hat{x}_{k-1}(+), k-1) \\ \hat{y}_k &= h(\hat{x}_k(-), k) \\ P_k(-) &= F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k &= P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \\ P_k(+) &= [I - K_k H_k] P_k(-) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} F_{k-1} &= \left. \frac{\partial f(x, k-1)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{k-1}(+)} \\ H_k &= \left. \frac{\partial h(x, k-1)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k(-)} \end{aligned}$$

확장된 칼만필터는 초기값 선정, 추정값과 오차 공분산 예측, 칼만 이득 계산, 추정값 계산, 오차 공분산 계산의 순서로 이루어진다. 여기서 $\hat{x}_k(+)$ 이 추정값 계산단계에서 나오는 값으로 결과 추정값이 된다. $\hat{x}_k(+), \hat{x}_k(-)$ 는 추정값으로 각각 계산 단계와 추정값 예측 단계에서 사용되는 상태변수이다. $P_k(+), P_k(-)$ 는 오차 공분산으로 각각 계산 단계와 예측 단계에서 사용되는 행렬이다. $f(\cdot)$ 와 $h(\cdot)$ 는 각각의 상태방정식과 출력방정식이며 $w_k \sim N(0, Q_k), v_k \sim N(0, R_k)$ 는 각각 플랜트 노이즈와 출력 노이즈를 나타낸다. K 는 칼만필터의 게인행렬이다. 추정오차 상호분산은 Boutayeb 등⁸⁾이 제안한 Lyapunov 안정성을 만족시키는 식 (9)와 같이 적용하였다.

$$R_k = \zeta_1 H_k P_k(-) H_k^T + \zeta_2 I \quad (9)$$

여기서 ζ_1, ζ_2 는 양의 한정값이다.

추정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(+) &= \hat{x}_k(-) + K_k (y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{x}_k(-) &= f(\hat{x}_{k-1}(+), k-1) \\ \hat{y}_k &= h(\hat{x}_k(-), k) \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 가속 및 등속시 종 속도 계산

종 속도 추정에 있어서 종 가속도의 상태를 통해 추정법을 달리하였다. 차량이 일정 가속도 a 이상일 경우 ($a \leq a_x$)는 비구동륜에 속도 평균값으로 한다. 다음으로 일정한 범위 ($\beta < a_x < \alpha$)의 가속도 값이 측정되는 경우에는 모든 구동륜의 평균값으로 추정되며 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_x &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 r w_i : \text{ when } \alpha \leq a_x \\ \hat{v}_x &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 r w_i : \text{ when } \beta < a_x < \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

3. 실차실험 및 결과

실험에 사용된 차량은 Opel사의 Antara이며 dSPACE사의 MicroAutoBox를 이용하여 bandrate: 500 kb/s의 CAN통신을 통하여 필요한 데이터를 획득하였다. 추정값과 실제값을 비교하기 위하여 Fig. 4

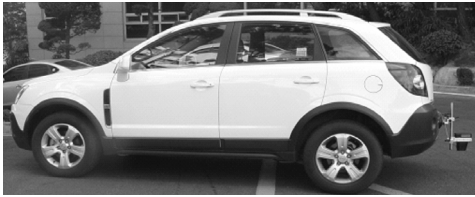


Fig. 4 Laboratory experimental vehicle

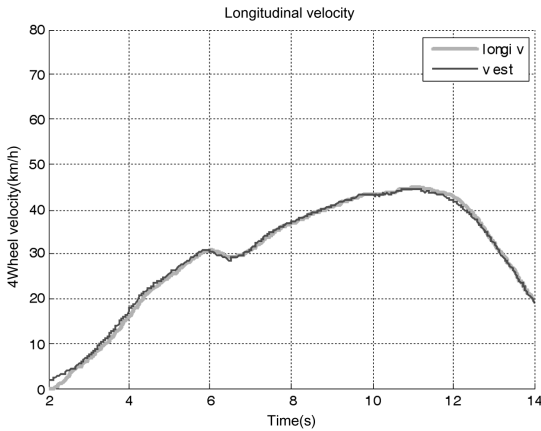


Fig. 5 Estimated longitudinal velocity

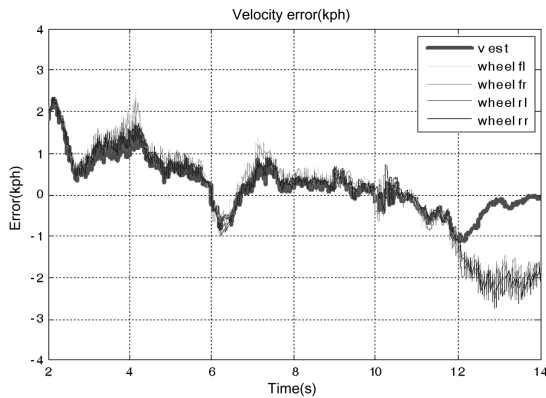


Fig. 6 Error of estimated longitudinal velocities

와 같이 차량의 후미에 종·횡 속도와 슬립각을 측정할 수 있는 비접촉식 광학센서인 Datron 사의 S-CE sensor를 통해 실제값을 측정하였다. 샘플시간은 6ms이며 해당길에서 실험을 수행하였다.

실험은 차량이 정지상태에서 일정하게 가속한 후 감속하며 이때 도로구배는 구배가 있는 도로를 주행한 후 평탄한 도로를 진입하는 시나리오를 수행하였다. Fig. 5는 추정된 차량의 종 속도와 추정된 종 속도를 나타내었다. Fig. 6은 실제 종속도와 추정된

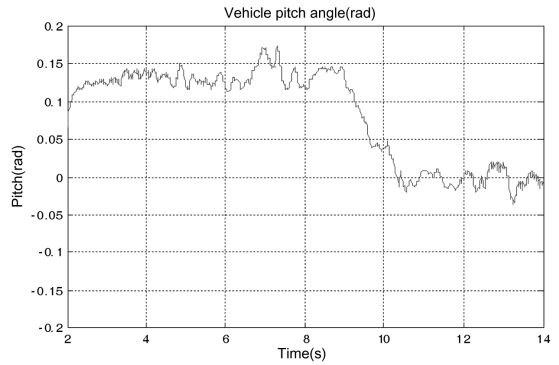


Fig. 7 Estimated inclined angle

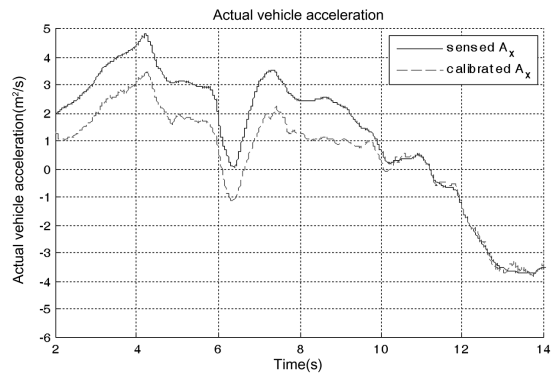


Fig. 8 Measured acc. and calibrated acc.

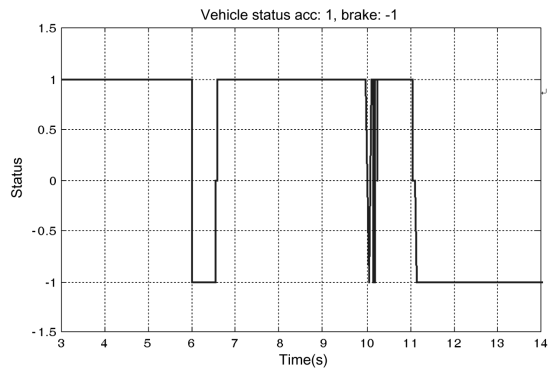


Fig. 9 Vehicle status

속도의 오차 그리고 실제 종속도와 휠 속도의 차이를 나타내고 있다. 가속상태에는 대체로 적은 오차를 확인할 수 있으나 감속상태에서는 모델기반의 확장된 칼만필터의 속도추정이 우수함을 확인할 수 있다. 약 10 deg의 도로구배가 있는 도로를 주행한 후 평탄한 도로로 진입하는데 Fig. 7은 추정되는 경사각이며 Fig. 8은 가속도 센서로부터 측정되는 가

속도와 추정되는 경사각을 통해 보정한 가속도 값을 나타내었다. 차량의 종 속도 추정알고리즘의 상태(status)는 Fig. 8에 나타내었다.

4. 결론

차량의 사시제어 기술에 주요한 영향을 미치는 변수인 종 속도를 추정하였다. 감속주행에서 차량 모델을 기반으로 한 확장된 칼만필터를 이용하여 종 속도를 추정하며 이때 필요한 신호들은 현재 승용차에서 쉽게 얻을 수 있다. 또한 휠 속도와 측정되는 가속도를 이용하여 도로 경사각과 피치각의 합을 추정하여 측정되는 종 가속도를 보정 함으로서 정확한 추정을 가능하게 하였다. 실차실험을 통한 결과는 다양한 차량주행 조건에서 제안한 알고리즘의 성능과 유용성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0015805).

이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업의 지원을 받아 수행된 결과임.

References

- 1) S. Semmler, R. Isermann, R. Schwarz and P. Rieth, "Wheel Slip Control for Antilock Braking Systems Using Brake-by Wire Actuators," SAE 2003-01-0325, 2003.
- 2) D. G. Hong, H. P. Yoon and K. Huh, "Development of a Vehicle Stability Control System Using Brake-by-wire Actuators," ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.130, No.011008, 2008.
- 3) J. Dakhllallah, S. Glaser, S. Mammam and Y. Sebsadji, "Tire-road Forces Estimation Using Extended Kalman Filter and Sideslip Angle Evaluation," American Control Conference, FrB09.4, pp.4597-4602, 2008.
- 4) H. S. Bae, J. Ryu and C. Gerdes, "Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS," IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2002.
- 5) F. Jiang and Z. Gao, "An Adaptive Nonlinear Filter Approach to the Vehicle Velocity Estimation for ABS," Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Application, 2000.
- 6) M. Tanelli, S. M. Savaresi and C. Cantoni, "Longitudinal Vehicle Speed Estimation for Traction and Braking Control Systems," Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, FrB06.2, pp.2790-2795, 2006.
- 7) H. Ohnishi, J. Ishii, M. Kayano and H. Katayama, "A Study on Road Slope Estimation for Automatic Transmission Control," 2000 Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. and Elsevier Science B.V., Vol.21, No.2, pp.235-240, 2000.
- 8) M. Boutayeb, H. Rafaralahy and M. Darouach, "Convergence Analysis of the Extended Kalman Filter Used as Observer for Nonlinear Deterministic Discrete-time Systems," IEEE Trans. Autom. Control, Vol.42, No.4, pp.581-586, 1997.
- 9) U. Kiencke and L. Nielsen, Automotive Control Systems, Springer Verlag, Berlin, 2000.