

감지시스템을 통한 차량의 횡 속도 및 슬립각 추정

한 상 오¹⁾ · 허 건 수^{*2)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Monitoring System Design for Estimating Lateral Velocity and Sideslip Angle

Sangoh Han¹⁾ · Kunssoo Huh^{*2)}

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

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

(Received 15 January 2010 / Accepted 11 October 2010)

Abstract : Information of the lateral velocity and the sideslip angle in a vehicle is very useful in many active vehicle safety applications such as yaw stability control and rollover prevention. Because cost-effective sensors to measure the lateral velocity and the sideslip angle are not available, reliable algorithms to estimation them are necessary. In this paper, a sliding mode observer is designed to estimate the lateral velocity. The side slip angle is estimated using the recursive least square with the disturbance observer and the pseudo integral. The estimated parameters from the combined estimation method are updated recursively to minimize the discrepancy between the model and the physical plant, and any possible effects caused by disturbances. The performance of the proposed monitoring system is evaluated through simulations and experiments.

Key words : Lateral velocity(횡 방향 속도), Sideslip angle(슬립각), Sliding mode observer with unknown inputs(미지입력을 고려한 슬라이딩 모드 관측기), Recursive least square(최소 자승법)

1. 서 론

차량의 횡 속도와 슬립각은 차량 안정성제어(vehicle stability control) 및 차량 샤시제어 시스템(global chassis control system)을 위해 차량의 횡 거동을 파악할 수 있는 중요한 차량 시스템의 변수이다. 이러한 횡 속도를 직접적으로 측정하기 위해 광학 센서나 GPS 센서 등이 사용되고 있으나 가격이 고가이며 차량에 장착할 만큼의 신뢰성과 경제성을 갖춘 센서가 없어 횡 가속도 센서를 통하여 간접적으로 추정된다. 횡 가속도를 적분하여 횡 속도를 추정할 수 있으나 이는 센싱 편차, 외란, 센싱 잡음 등으로 추정치를 신뢰할 수 없다. 횡 속도를 추정하기 위해 사용되는 Luengerger 관측기나 Kalman Filter¹⁾ 등

의 선형 관측기들은 불확실한 요소가 존재하거나 급속한 횡 거동으로 주행할 경우 횡 속도의 추정정도는 현저히 떨어진다. 이는 차량의 거동에 비선형성을 고려하지 않았기 때문이며 이를 고려한 비선형 관측기^{2,3)}나 비선형성을 고려한 선형관측기⁴⁾들을 통해 횡 속도를 추정하였다. 이는 복잡한 차량모델을 기반으로 관측기를 설계함으로써 차량모델의 자유도가 커지며 관측기의 연산량 또한 많아진다.

슬립각 추정의 방법으로는 타이어 모델을 포함하는 동역학 모델 기반의 추정, kinematics 기반의 추정 그리고 index 등을 활용한 추정방법^{5,6)} 등이 있다. 모델 기반의 추정^{1,3)}인 경우 도로의 횡 경사각, 센서오차, 바이어스 오차 등에 강인하나 차량의 상태변수 등에 대해 민감하다. 반면 kinematics 기반의 추정인 경우, 차량의 상태변수와 tire-road 조건 그리고 주행

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

조건에 강인하나 센서오차 도로의 횡 경사각에 민감하다.

본 논문은 차량의 계수변화와 미지의 외란입력이 존재할 경우의 2 자유도 차량모델을 대상으로 강인한 슬라이딩 모드 관측기(sliding mode observer with unknown inputs)^{7,8)}를 적용하여 횡 속도를 추정한다. 미지입력을 고려한 슬라이딩 모드 관측기는 이용할 수 없는 입력이 존재하더라도 시스템의 상태값을 정확히 추정할 수 있는 관측기이다. 또한 슬립각의 추정에 있어서는 외란으로 인한 추정성능의 저하를 막기 위하여 외란을 추정한 후 이를 보상해 주는 모델 기반의 외란 관측기를 최소 자승법(recursive least square with disturbance observer)⁹⁾을 도입하여 슬립각을 추정한다. 모델 기반의 관측기인 경우 차량의 상태변수에 민감함으로 이를 보상하기 위해 차량의 상태변수, 노면조건과 주행조건에 강인한 kinematics 기반의 관측기를 병합^{5,6)}하여 슬립각을 추정함으로써 모델 기반의 추정을 보완하였다. 제안된 알고리즘은 일반적인 차량주행의 모의실험과 실차 실험을 통해 성능을 검증한다.

구성은 다음과 같다. 2장에서는 각각의 차량 모델에 대해 횡 속도와 슬립각을 추정하기 위한 알고리즘을 다루고 있다. 3장과 4장에서는 모의실험과 실차 실험을 통하여 제시하고 있는 알고리즘의 타당성을 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 횡 거동 감지시스템

차량의 대표적인 횡 거동인 횡 속도와 슬립각을 추정하기 위하여 차량 모델 기반의 횡 속도 추정 알고리즘과 모델 기반인 외란 관측기와 kinematics 기반의 모델을 병합한 슬립각 추정 알고리즘을 제시한다. 제안된 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 차량의 횡 속도를 추정하기 위해 2 자유도 차량모델을 대상으로 Walcott과 Zak⁸⁾가 제안한 미지입력을 고려한 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 추정하며, 추정된 횡 속도를 이용하여 최소 자승법을 도입한 외란 관측기와 kinematics 기반의 모델을 병합하여 슬립각을 추정한다. 최소 자승법을 통해 추정된 코너링 강성(cornering stiffness)은 회귀하여 차량모델에 적용된다.

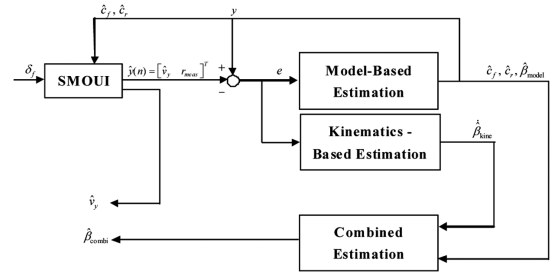


Fig. 1 The overall scheme for the proposed estimation

2.1 횡 속도 추정 알고리즘

2 자유도 차량모델은 단순화한 타이어 모델을 사용함으로써 식이 간단함에 비해 정확성이 뛰어나다. 차량의 횡 거동은 롤각과 급속한 조향에 의한 타이어의 횡력 그리고 요 모멘트 등의 비선형 영향을 미치며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_m(t, x, u) + B_\phi \phi(t, x) \quad (1)$$

$$y = Cx + Du$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_{af} + C_{ar}}{mV} & -V - \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mV} \\ \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{IV} & -\frac{a^2C_{af} + b^2C_{ar}}{IV} \end{bmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} \frac{C_{af}}{m} \\ \frac{aC_{af}}{I} \end{bmatrix}, \quad B_\phi = \begin{bmatrix} -g \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{C_{af} + C_{ar}}{mV} & -\frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mV} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \frac{C_{af}}{m} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$x = [v, r]^T, y = [a_y, r]^T$ 이며 제어입력 u 는 전륜 조향각 (δ_f)이다. $B_m(t, x, u)$ 는 횡력과 요 모멘트 등의 입력 외란, 모델링 오차의 비선형 효과이다. v, r 는 횡 속도와 요 속도이며 m 는 차량의 질량, I 는 관성모멘트, a 와 b 는 무게중심에서 전륜 및 후륜까지의 거리, V 는 차량의 종 속도, C_{af}, C_{ar} 는 코너링 강성 그리고 ϕ 는 차량의 롤각이다.

식 (1)에서 $B_m(t, x, u) = B_\phi h(t, x, u)$ 로 표현 가능하며 차량의 비선형성 변수와 롤 거동을 $h(t, x, u) + \phi(t, x)$

$\|2 \leq \rho$ 로 한정할 수 있다면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_\phi [h(t, x, u) + \phi(t, x)] \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

미지의 입력을 고려한 횡 속도를 추정하기 위해 Walcott과 Zak가 제안한 슬라이딩 모드 관측기 (sliding mode observer with unknown inputs)⁸⁾을 아래와 같이 설계하였다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B_u u + G(y - \hat{y}) - B_\phi E(y, \hat{y}, \eta) \quad (3)$$

여기서

$$E(y, \hat{y}, \eta) = \begin{cases} \eta \frac{F(\hat{y} - y)}{\|F(\hat{y} - y)\|_2} & \text{for } F(\hat{y} - y) \neq 0 \\ 0 & \text{for } F(\hat{y} - y) = 0 \end{cases}$$

여기서 $\eta \geq \rho$ 인 한정값, F 는 양의 한정대칭 행렬 (symmetric and positive definite matrix) 이다.

2.2 슬립각 추정알고리즘

횡 모델을 기반으로 외란 영향을 줄이기 위해 외란 추정기가 포함된 최소 자승법⁹⁻¹¹⁾(recursive least square with disturbance observer)을 사용하여 슬립각을 추정한다. 차량의 거동은 다음과 같은 횡 운동 방정식에 의해서 표현된다.

$$a_y = -\frac{C_{af} + C_{ar}}{mV} \hat{v} - \left(\frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mV} + V \right) r + \frac{C_{af}}{m} \delta_f + \zeta \quad (4)$$

여기서 \hat{v} 는 슬라이딩 모드 관측기에서 추정된 횡 속도이다. ζ 는 시스템에 존재하는 외란이며 모델링 오차나 노이즈 등을 포함할 수 있다. 식 (4)을 regression 모델로 정리하면 다음과 같다.

$$y = \phi^T \theta + \zeta \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \theta &= [C_{af} \quad C_{ar}]^T \\ \phi^T &= \left[-\frac{\hat{v}}{mV} - \frac{ar}{mV} - \frac{\delta_f}{m} \quad -\frac{\hat{v}}{mV} + \frac{br}{mV} \right] \end{aligned}$$

외란 관측기가 포함된 최소 자승법 알고리즘은 Q-filter를 포함하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + P(t)\phi(t) \left(y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) - \hat{\zeta}(t) \right) \\ P(t) &= P(t-1) - P(t-1)\phi(t) \left(I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t) \right)^{-1} \\ &\quad \cdot \phi^T(t)P(t-1) \\ \hat{\zeta}(t) &= Q(z) \left(y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\hat{\theta}$, $\hat{\zeta}$ 는 각각 추정되는 파라미터 벡터와 추정된 외란이며, $Q(z)$ 는 저주파대역 통과필터(low pass filter)의 특성을 갖으며 샘플링 시간, cutoff 주파수를 고려하여 설계하며 본 논문에서는 다음과 같은 1차 Q-filter를 사용하였다.

$$Q(z) = \frac{a_1}{1 + b_1 z^{-1}} \quad (7)$$

여기서

$$a_1 = \frac{1}{1 + \alpha}, \quad b_1 = \frac{-\alpha}{1 + \alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{h\omega_c}$$

이며 h 는 샘플링 시간, ω_c 는 cutoff 주파수이다.

차량의 횡 방향 힘 평형 방정식과 kinematics기반의 운동 방정식은 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$mV(\dot{\beta} + r) = C_{af} \left(\delta_f - \beta - \frac{ar}{V} \right) + C_{ar} \left(-\beta + \frac{br}{V} \right) + m\zeta \quad (8)$$

$$a_y = V(\dot{\beta} + r) - \zeta \quad (9)$$

위의 두 식을 재구성하면 아래와 같다.

$$\hat{\beta}_{\text{model}} = \frac{-a_y + \left(b \frac{\hat{C}_{ar}}{m} - a \frac{\hat{C}_{af}}{m} \right) \frac{r}{V} + \frac{\hat{C}_{af}}{m} \delta_f}{\frac{\hat{C}_{af}}{m} + \frac{\hat{C}_{ar}}{m}} \quad (10)$$

외란 관측기를 통해 추정된 \hat{C}_{af} , \hat{C}_{ar} 을 이용해 대수적으로 모델 기반의 슬립각을 추정하며 추정된 값들은 횡 속도와 요 속도 추정에 적용된다.

모델 기반의 관측기인 경우 도로의 횡 경사각, 센서잡음 등에 대해 민감하며 이를 보상하기 위해 차량의 상태변수, 노면조건, 주행조건 등에 강인한

kinematics 기반의 추정을 병합하여 슬립각을 추정한다.

식 (9)에서 슬립 각속도를 직접 적분하면 식 (11)과 같이 슬립각을 추정할 수 있다.

$$\hat{\beta}_{kine} = \int \hat{\dot{\beta}}_{kine} dt = \int \left(\frac{a_y + \hat{\zeta}}{V} - r \right) dt \quad (11)$$

여기서 $\hat{\zeta}$ 는 최소 자승법을 통하여 추정된 외란이다. 그러나 이는 제동 상황에서 추정이 우수하나 센서 신호의 왜곡이 있을 경우 적분오차를 누적시키며 도로의 횡 경사각이 있을 경우 추정이 쉽지 않다. 이를 보완하기 위해 Nishio⁵⁾는 직접 적분 대신 의사 (pseudo integral) 적분을 적용하였으며 Damorongrit. P. 등^{5,6)}은 모델 기반의 추정방법과 kinematics 기반의 추정방법을 병합함으로써 각각의 단점을 보상하며 추정성능을 향상시켰다.

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\tau S + 1} \hat{\beta}_{model} + \frac{\tau}{\tau S + 1} \hat{\dot{\beta}}_{kine} \quad (12)$$

식 (12)을 이산화시키면 식 (13)과 같이 표현된다.

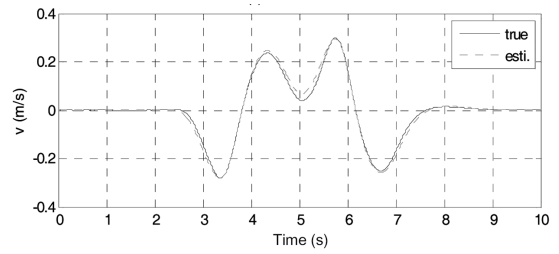
$$\hat{\beta} = \left(\frac{\tau}{h + \tau} \right) \hat{\beta}(t-1) + \left(\frac{h}{h + \tau} \right) \left(\hat{\beta}_{model}(t) + \tau \hat{\dot{\beta}}_{kine}(t) \right) \quad (13)$$

여기서 τ 는 양의 계인으로 모델 기반과 kinematics 기반의 추정에 가중치를 선정함으로써 슬립각의 추정성능을 향상시키며 h 는 샘플링 시간이다.

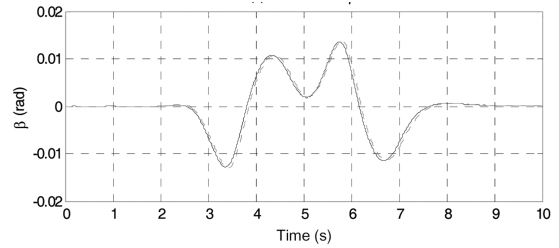
3. 모의실험

미지입력을 고려한 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 횡 속도의 추정성능을 검증하고 슬립각을 추정하기 위해 모델 기반의 외란 관측기와 kinematics 기반의 모델을 병합하여 추정성능을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 차량의 주행신호를 얻기 위하여 상용 소프트웨어인 Carsim® Ver. 6을 사용하였으며 불확실한 요소에 대한 관측기의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 불확실 요소가 존재한다고 가정하였다.

- (a) 모델링 오차: 행렬 A에서 3%의 모델링 오차
 - (b) 센싱 편차: 5% 출력 센싱 편차
- 제시된 관측기들을 이용하여 추정된 차량의 횡

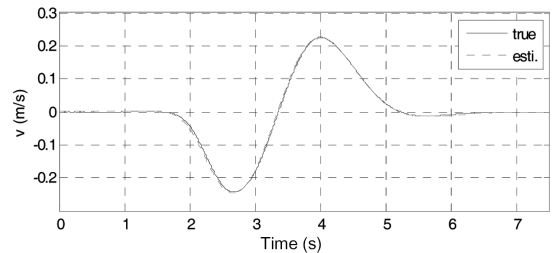


(a) Estimation of v

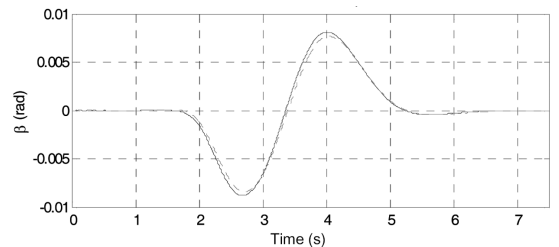


(b) Estimation of β

Fig. 2 Simulation results: DLC, 80 kph, $\mu=0.85$



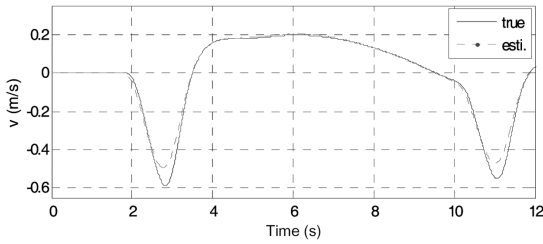
(a) Estimation of v



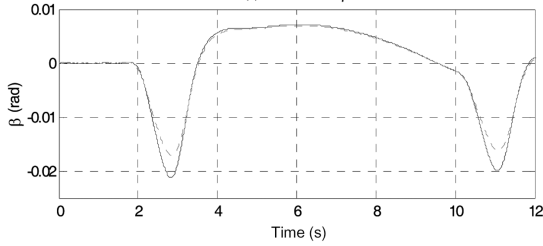
(b) Estimation of β

Fig. 3 Simulation results: LC, 100 kph, $\mu=0.85$

속도와 슬립각은 Fig. 2,3에서 나타내었다. 차량의 종속도는 각각 80, 100 kph의 double lane change(DLC)와 lane change(LC)의 조향을 하였을 경우에 대하여 모의실험 결과이다. Fig. 4는 저마찰인 경우 사인과 조향을 했을 경우이며 최대 슬립각은 약 1.9 degree이다. 고 마찰인 경우에 비해 저 마찰인 경우 추정성



(a) Estimation of v



(b) Estimation of β

Fig. 4 Simulation results: sine steer, 100 kph, $\mu=0.4$

능이 떨어지나 전체적으로 우수한 추정성능을 확인하였다.

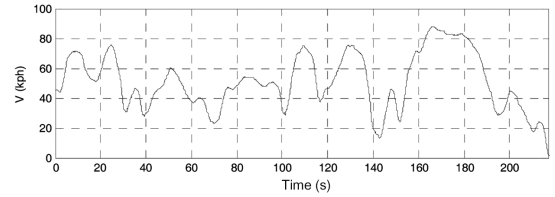
4. 실차실험

실험에 사용된 차량은 Opel사의 Antara이며 dSPACE사의 MicroAutoBox를 이용하여 bandrate: 500kb/s의 CAN 통신을 통하여 필요한 데이터를 획득하였다. 추정값과 실제값을 비교하기 위하여 Fig. 5와 같이 차량의 후미에 중·횡 속도와 슬립각을 측정할 수 있는 비접촉식 광학센서인 Datron사의 S-CE sensor를 통해 실제값을 측정하였다. 샘플시간은 6ms이며 해당길에서 실험을 수행하였다.

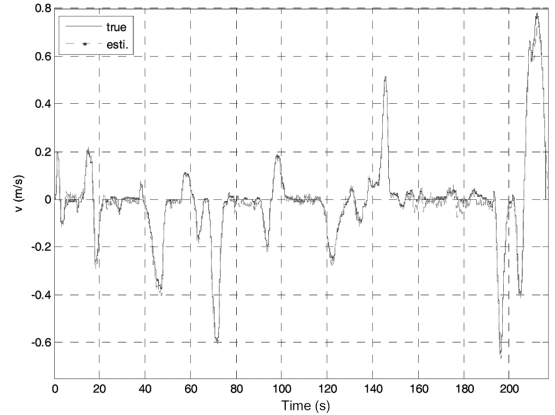
Fig. 6은 추정성능을 검증하기 위해 일반적인 건조한 아스팔트 노면상태에서 비교적 긴 시간인 220 sec 동안 추정정도를 확인하였다. Fig. 6(a)은 차량의



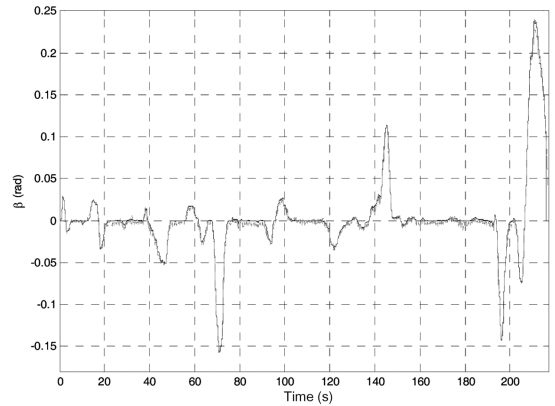
Fig. 5 Laboratory experimental vehicle



(a) Longitudinal speed



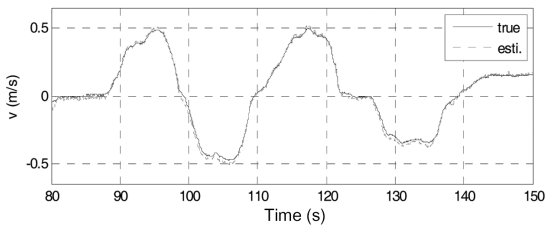
(b) Estimation of v



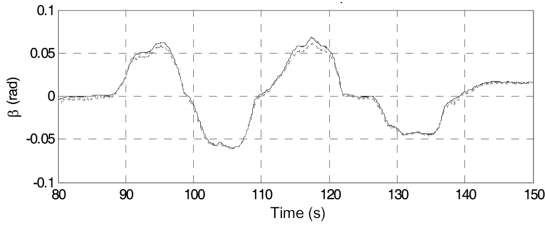
(c) Estimation of β

Fig. 6 Experimental results: Combined cornering 10~90 kph, $\mu=1.0$

중 속도를 나타내며 약 10~90 kph까지 가·감속하며 조향을 하였을 경우 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 횡 속도와 슬립각의 추정성능을 각각 나타냈다. Fig. 7은 차량의 중 속도가 약 56 kph에서 큰 조향을 하였을 경우 횡 속도와 슬립각을 추정된 결과이다. 정규화된 오차¹²⁾(ϵ_z , normalized error)는 식 (14)와 같으며 Fig. 6의 경우 횡 속도와 슬립각의 오차는 각각 10.42%, 5.84%이며 Fig. 7에는 15%와 10.11%이다.



(a) Estimation of v



(b) Estimation of β

Fig. 7 Experimental results: Combined cornering 50~65 kph, $\mu=1.0$

$$e_z = 100 \times \frac{\|\hat{z} - z_{measured}\|}{\max(\|z_{measured}\|)} \quad (14)$$

\hat{z} 는 추정되는 값이며 $z_{measured}$ 는 측정되는 값이다.

5. 결론

본 논문에는 차량의 주행 안정성 제어를 위해 주요한 상태변수 중 하나인 차량의 횡 속도와 선형 2 자유도 차량모델을 대상으로 강인한 슬라이딩 모드 관측기를 설계하였다. 미지입력을 고려한 슬라이딩 모드 관측기는 추정에 악영향을 미치는 모델링 오차, 센싱 편차 그리고 미지의 입력 등의 불확실 요소가 있음을 고려하여 슬립각 추정 알고리즘에 대해 기술하였다.

제안한 알고리즘은 차량의 계수변화와 미지의 외란입력이 존재함에 불구하고 우수한 추정성능을 가지며 모의실험과 실험을 통하여 우수한 횡 속도 추정성능을 확인하였다. 슬립각의 추정에 있어서는 외란으로 인한 추정성능의 저하를 막기 위하여 외란을 추정한 후 이를 보상해 주는 최소자승법을 도입하여 슬립각을 추정하였다. 모델 기반의 관측기인 경우 도로의 상태나 센서잡음 등에 대해 민감하며 이를 보상하기 위해 차량의 변수 및 주행조건 등

에 강인한 kinematics 기반의 추정을 병합하여 슬립각을 추정하였다. 모의실험과 실차실험을 통해 우수한 추정성능을 검증하였다.

후 기

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

References

- 1) J. Farrelly and P. Wellstead, "Estimation of Vehicle Lateral Velocity," Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, MI, pp.552-557, 1996.
- 2) L. R. Ray, "Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification, Simulation and Experiments," Automatica, Vol.33, No.10, pp.1819-1833, 1997.
- 3) G. Baffet, J. Stephant and A. Charara, "Vehicle Sideslip Angle and Lateral Tire-Force Estimations in Standard and Critical Driving Situations: Simulations and Experiments," The 8th International Symposium on AVEC, AVEC060026, 2006.
- 4) J. Ryu and J. C. Gerdes, "Estimation of Vehicle Roll and Road Bank Angle," Proceedings of the 2004 American Control Conference, Vol.3, pp.2110-2115, 2004.
- 5) A. Nishio, K. Tozu, H. Yamaguchi, K. Asano and Y. Amano, "Development of Vehicle Stability Control System Based on Vehicle Sideslip Angle Estimation," 2001 SAE World Congress, SAE 2001-01-0137, 2001.
- 6) D. Piyabongkarn, R. Rajamani, J. A. Grogg and J. Y. Lew, "Development and Experimental Evaluation of a Slip Angle Estimator for Vehicle Stability Control," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.17, No.1, pp.78-88, 2009.
- 7) B. L. Walcott and S. H. Zak, "Combined Observer-Controller Synthesis for Uncertain Dynamical Systems with Applications," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,

- Vol.18, No.1, pp.88-104, 1988.
- 8) B. L. Walcott and S. H. Zak, "Observer Design for Systems with Unknown Inputs," Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., Vol.15, No.1, pp. 431-446, 2005.
 - 9) S. Kwon and W. K. Chung, "A Discrete-Time Design and Analysis of Perturbation Observer for Motion Control Applications," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.11, No.3, pp.399-407, 2003.
 - 10) S. H. You, S. Yoo, J. O. Hahn and K. L. Lee, "Real-Time Estimation of Vehicle Lateral Velocity and Road-Bank Angle," KSAE 2005 Fall Conference, KSAE05-F0130, pp.829-835, 2005.
 - 11) W. Deng and H. Zhang, "RLS-Based Online Estimation on Vehicle Linear Sideslip," Proceedings of the 2006 American Control Conference, ThC13.3, 2006.
 - 12) G. Baffet, A. Charara and G. Dherbomez, "An Observer of Tire-Road Forces and Friction for Active Security Vehicle Systems," Mechatronics, IEEE/ASME, Vol.12, pp.651-661, 2007.