

차량 전복 방지를 위한 강건한 롤 상태 추정기 설계

박지인[†] · 이경수^{*}

Design of a Robust Estimator for Vehicle Roll State for Prevention of Vehicle Rollover

Jeein Park, Kyongsu Yi

Key Words : Model-based estimator(모델기반 추정기), Parameter adaptation(파라미터 적응 기법), Roll state estimation(롤상태 추정)

Abstract

This paper describes a robust model-based roll state estimator for application to the detection of impending vehicle rollover. The roll state estimator is based on a 2-D bicycle model and a roll model to estimate the maneuver-induced vehicle roll motion. The measurement signals are lateral acceleration, yaw rate, steering angle, and vehicle speed. Vehicle mass is adapted to obtain robust performance of the estimator. Computer simulation is conducted to evaluate the proposed roll state estimator by using a validated vehicle simulator. It is shown that the roll state estimator shows robust performance without exact vehicle mass information.

기호설명

a_y : 횡 가속도 (m/s^2)

M : 차량 전체 질량 (kg)

m_s : 스프링 상부 질량 (kg)

a : 앞바퀴 축과 질량 중심간 거리 (m)

b : 뒷바퀴 축과 질량 중심간 거리 (m)

ϕ : 롤각 (degree)

$\dot{\phi}$: 롤각속도 (degree/s)

u : 종방향 속도 (km/h)

γ : 요 각속도 (degree/s)

I_x : x축 방향 관성 모멘트 (kgm^2)

I_z : z축 방향 관성 모멘트 (kgm^2)

K_{roll} : 롤 강성 계수 (Nm/rad)

C_{roll} : 롤 댐핑 계수 (Nm/rad/s)

g : 중력 가속도 (m/s^2)

C_f : 앞바퀴 코너링 강성 계수 (N/rad)

C_r : 뒷바퀴 코너링 강성 계수 (N/rad)

v : 횡방향 속도 (m/s)

t : 차폭 (m)

δ_f : 앞바퀴 조향각 (degree)

h_{roll} : 롤 중심의 높이 (m)

M_z : 제어 입력 요 모멘트 (Nm)

1. 서론

최근 무게 중심이 높은 SUV(Sports Utility Vehicle)의 증가로 인해 차량의 전복 사고가 증가하고 있다. 전복 사고는 발생할 확률은 적지만 사고 발생시 탑승자에게 치명적인 부상을 입히는 것으로 알려져 있다. 실제로 2002년 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration) 보고서에 따르면 전복사고는 전체 교통 사고에서 3%의 낮은 비율을 차지하나 사망은 전체의 33%에 이르고

[†] 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : start11@snu.ac.kr

TEL : (02)888-7194 FAX : (02)123-1234

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

있다.⁽¹⁾ 이러한 이유로 차량의 전복을 방지하는 주행 안정성 제어 (Vehicle Stability Control) 연구가 진행되고 있다.

차량 전복의 위험도를 표현하기 위해 Hac과 Martens는 차량 전복 지수를 표현하였으며⁽²⁾ 또한 이를 기반으로 차량의 전복을 제어하는 시스템이 제안되어 있다.⁽³⁾ 차량 전복 지수를 표현하기 위해서는 롤각과 롤각속도, 횡가속도가 필요하다.^{(3),(4)} 횡가속도는 VSC장착 차량의 센서로 쉽게 측정이 가능하다. 그러나 롤각과 롤각속도는 측정이 어려우며 별도의 센서가 필요하기 때문에 차량의 비용을 증가시킨다. 따라서 사용 가능한 측정 신호로부터 롤각과 롤각속도를 추정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 차량의 롤각과 롤각속도를 추정하기 위해서 모델 기반 롤 상태 추정기를 제안하였다. 모델기반 롤 상태 추정기는 앞바퀴의 조향각, 횡가속도, 요각속도 등을 센서에서 측정할 수 있는 신호로 사용하였다. 이 신호들은 ESP시스템을 장착한 차량에서는 이미 사용되고 있다.⁽⁵⁾

또한 정확한 차량 상태 추정을 위해서는 차량 파라미터에 대한 적절한 정보가 있어야 한다.⁽⁶⁾ 주행 상황에 따라 차량 파라미터가 변할 때에도 변화된 값을 추정하여 상태 추정기에 갱신해줄 수 있어야 한다. 본 연구에서는 차량의 질량을 추정하여 롤 상태 추정기에 갱신해줌으로써 질량 변화에 강건한 롤 상태 추정기를 제안하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 모델기반 롤 상태 추정기의 성능을 검증하였으며, 질량 변화를 고려해준 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 차량 파라미터 추정의 필요성을 검증하였다.

2. 차량 전복 지수

차량의 전복 위험을 나타내기 위하여 횡가속도 a_y , 추정된 롤각 $\hat{\phi}$, 추정된 롤각속도 $\hat{\dot{\phi}}$ 를 이용하여 차량 전복 지수를 다음과 같이 표현하였다.

$$RI = f(a_y, \hat{\phi}, \hat{\dot{\phi}}) \quad (1)$$

차량 전복 지수는 임계 횡가속도, 임계 롤각등 차량 파라미터에 의존적이다. 임계 횡가속도와 임계 롤각은 차량의 정상상태 주행에서 차량의 바퀴가 지면에서 떨어지는 순간의 횡가속도와 롤각으로 정의하였다. 이를

바탕으로 롤각 롤각속도 Phase-plane analysis를 수행하여 차량의 바퀴가 지면에서 떨어지는 순간을 1로 나타내는 차량 전복 지수를 제안하였다.⁽³⁾

3. 모델 기반 추정기 설계

차량의 롤 운동은 운전자의 조향 입력과 노면 가진이 원인이 되어 발생한다. 롤 상태를 추정하기 위해서는 이 두 가지 원인을 모두 고려한 추정기가 필요하다. 운전자의 조향 입력과 노면 가진에 대해 독립적으로 롤 운동 모델을 설계하고 통합한 롤 상태 추정기가 제안되어 있다.⁽⁷⁾

노면 가진을 일반적인 도로에서 무시 할 수 있다고 가정하면 차량의 롤 운동은 운전자의 조향 입력에 지배적인 영향을 받는다. 본 연구에서는 운전자의 조향 입력에 의한 롤 운동 모델을 기반으로 롤 상태 추정기를 설계하였다.

3.1 조향 입력에 의한 롤 운동 모델⁽⁷⁾

조향 입력에 의한 롤 운동 모델을 정의하기 위해 본 연구에서는 Fig.1 의 2 자유도 차량 모델(bicycle model)과 Fig.2 의 롤 운동 모델을 사용하였다. 롤 운동 모델의 경우 Fig.2 과 같이 정상단계의 모델과 전복단계의 모델로 구분하였다.

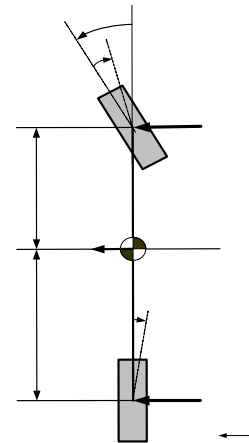
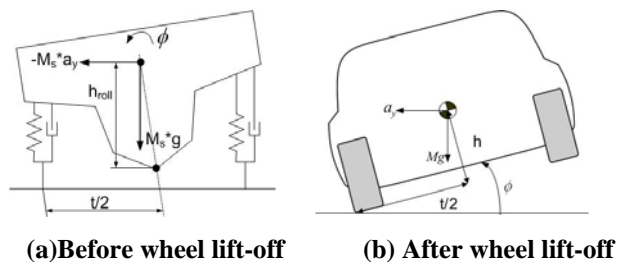


Fig. 1. Bicycle model



(a) Before wheel lift-off

(b) After wheel lift-off

Fig. 2 Roll model

운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{v} = -\frac{2(C_{af} + C_{ar})}{M \cdot u} v + \left[\frac{2(b \cdot C_{ar} - a \cdot C_{af})}{M \cdot u} - u \right] \gamma + \frac{2C_{af}}{M} \delta_f \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{2(a^2 C_{af} + b^2 C_{ar})}{I_z \cdot u} \gamma + \frac{2(b \cdot C_{ar} - a \cdot C_{af})}{I_z \cdot u} v + \frac{2a \cdot C_{af}}{I_z} \delta_f + \frac{M_z}{I_z} \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \begin{cases} \frac{C_{roll}}{I_{x1}} \dot{\phi} - \frac{K_{roll}}{I_{x1}} \phi + \frac{m_s(a_y + g \sin \phi) \cdot h_{roll}}{I_{x1}} & (\phi < \phi_{Wheel\ lift-off}) \\ \frac{M(a_y + g \sin \phi) \cdot h}{I_{x2}} - \frac{Mg(t/2) \cos \phi}{I_{x2}} & (\phi \geq \phi_{Wheel\ lift-off}) \end{cases} \quad (4)$$

이때 C_{roll} 은 롤 댐핑, K_{roll} 은 롤 강성, I_{x1} 과 I_{x2} 는 바퀴가 지면에서 떨어지기 전후의 롤 관성 모멘트, M 은 전체 질량 M_s 은 스프링 상부 질량, h_{roll} 는 롤 중심까지의 높이이다. 조향각과 롤각이 크지 않다고 가정하면 식 (2), (3), (4) 는 선형화 할 수 있다. 추정기가 가관측성을 갖도록 횡가속도를 식(5)로 바꾸어 식(4)에 대입한다.

$$a_y = \dot{v} + u\gamma = \frac{2C_{af} + C_{ar}}{M \cdot u} v + \frac{2(b \cdot C_{ar} - a \cdot C_{af})}{M \cdot u} \gamma + \frac{2C_{af}}{M} \delta_f \quad (5)$$

이 선형 모델을 상태 방정식으로 나타내면 식 (6) 과 같다.

$$x = [v \quad \gamma \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T \quad (6)$$

$$\dot{x} = Ax + B \cdot \delta_f$$

$$y = Cx + D \cdot \delta_f$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{2(C_f + C_r)}{mu} & \frac{2(bC_r - aC_f)}{mu} - u & 0 & 0 \\ \frac{2(bC_r - aC_f)}{I_z u} & \frac{2(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2m_s h_{roll}(C_f + C_r)}{I_{x1} mu} & \frac{2m_s h_{roll}(bC_r - aC_f)}{I_{x1} mu} & \frac{m_s g h_{roll} - K_{roll}}{I_{x1}} & -\frac{C_{roll}}{I_{x1}} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{2(C_f + C_r)}{Mu} & \frac{2(bC_r - aC_f)}{Mu} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{M} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{M} & \frac{2aC_f}{I_z} & 0 & \frac{2M_s h_{roll} C_f}{I_{x1} M} \\ 0 & \frac{1}{I_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

3.2 모델 기반 추정기

식 (6)과 같은 선형 모델을 이용하여 칼만 게인을 구하여 원래의 비선형 모델의 추정기에 적용한다. 선형 모델의 칼만 게인은 다음과 같은 Riccati Equation 으로부터 계산된다.

$$\dot{P} = AP + PA^T + B_w Q B_w^T - PC^T R^{-1} CR = 0 \quad (7)$$

$$K = PC^T R^{-1}$$

식 (7)은 본 연구에서 설계된 비선형 롤 상태 추정기이다

$$\dot{\hat{x}} = \hat{f}(x) + g(x) \cdot u + K (y - \hat{y})$$

$$y = [a_y \quad \gamma]^T \quad (8)$$

앞서서 설명한 것처럼 추정기의 측정값은 횡가속도와 요각속도이며, 제어 입력으로 앞 바퀴의 조향각이 측정된다. Fig.3 은 모델 기반 롤 상태 추정기 시스템의 개략도 이다.

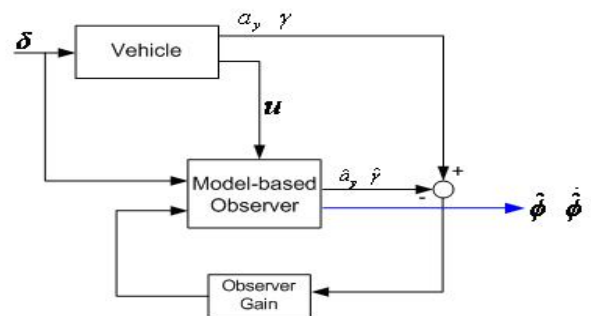


Fig. 3 Scheme if the model-based roll state estimator

3.3 모델 기반 추정기의 성능 검증

조향 입력에 의한 롤 모델 추정기의 성능 검증을 위해 80km/h 로 정속 주행 시 Fig.4 와 같이 정현파(sine wave)로 조향각을 주고 노면 가진이 없는 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다.

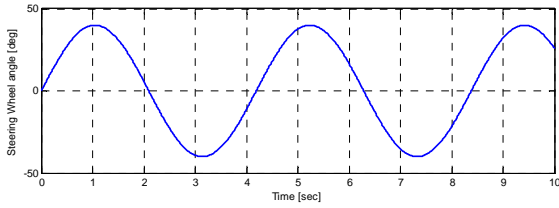
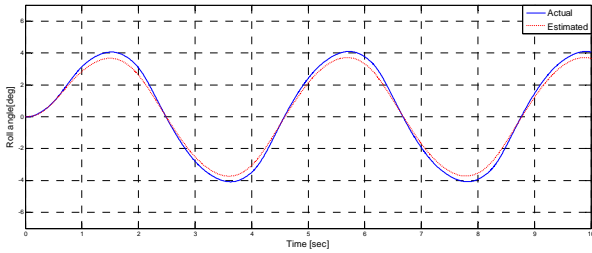
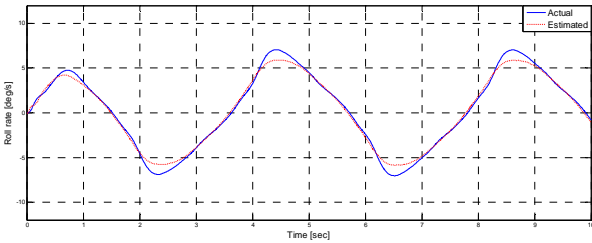


Fig.4 Steering Wheel angle

Fig.5 에서 노면 가진이 없는 경우 조향 입력에 의한 롤 모델 추정기의 성능이 우수함을 알 수 있다.



(a) Roll angle



(b) Roll rate

Fig.5 Model-based estimator validation

4. 모델 기반 추정기 설계

차량의 질량을 추정하기 위해 적응 제어 기법을 사용하였으며, 식 (6)의 선형 모델을 기반으로 수행하였다. 질량의 초기값 즉, 차량의 공차 질량을 알고 있다고 가정하였다. 추정된 차량의 질량 값은 실제로는 모르는 값이며 추정되어 수렴한 질량 값이 롤 상태 추정에 적용되었다.

4.1 파라미터 추정 알고리즘⁽⁸⁾

다음과 같은 적응제어 기법을 사용하여 질량 추정을 수행하였다.

$$\dot{x} = A_p x + B_p u \quad (9)$$

A_p, B_p 는 추정하려고 하는 안정적인 시스템 행렬들이다. x 와 u 에 대한 측정값을 알고 있다고 가

정하고 식 (10)과 같이 상태 변수의 추정 오차를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \hat{A}_p \hat{x} + \hat{B}_p \hat{u}, \quad \hat{x} \in R^n \\ \varepsilon_1 &\triangleq x - \hat{x}, \quad \dot{\varepsilon}_1 = A_p \varepsilon_1 - \tilde{A}_p \hat{x} - \tilde{B}_p u \end{aligned} \quad (10)$$

파라미터 행렬의 추정 오차를 식 (11)과 같이 정의하고 식 (12)와 같이 Lyapunov Equation 을 정의해 준다.

$$\tilde{A} \triangleq \hat{A}_p - A_p, \quad \tilde{B} \triangleq \hat{B}_p - B_p, \quad (11)$$

$$V(\varepsilon_1, \tilde{A}_p, \tilde{B}_p) = \varepsilon_1^T P \varepsilon_1 + tr\left(\frac{\tilde{A}_p^T P \tilde{A}_p}{a}\right) + tr\left(\frac{\tilde{B}_p^T P \tilde{B}_p}{b}\right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon_1^T P \varepsilon_1 + \varepsilon_1^T P \dot{\varepsilon}_1 + tr\left(\frac{\dot{\tilde{A}}_p^T P \tilde{A}_p}{a} + \frac{\tilde{A}_p^T P \dot{\tilde{A}}_p}{a}\right) + tr\left(\frac{\dot{\tilde{B}}_p^T P \tilde{B}_p}{b} + \frac{\tilde{B}_p^T P \dot{\tilde{B}}_p}{b}\right) \\ &= \varepsilon_1^T (PA_p + A_p^T P) \varepsilon_1 - 2\varepsilon_1^T P \tilde{A}_p \hat{x} - 2\varepsilon_1^T P \tilde{B}_p u + tr\left(2\frac{\tilde{A}_p^T P \dot{\tilde{A}}_p}{a} + 2\frac{\tilde{B}_p^T P \dot{\tilde{B}}_p}{a}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$a, b > 0, \quad P = P^T > 0 \quad (14)$$

$$PA_p + A_p^T P = -I$$

식 (14)의 조건을 만족하며 $\dot{V} < 0$ 이 되도록 $\dot{\tilde{A}}, \dot{\tilde{B}}$ 을 식 (15)와 같이 결정할 수 있으며 이 경우 상태 변수의 추정 오차가 0 으로 수렴한다.

$$\dot{\tilde{A}}_p = \dot{\hat{A}}_p = a \varepsilon_1 \hat{x}^T, \quad \dot{\tilde{B}}_p = \dot{\hat{B}}_p = b \varepsilon_1 u^T \quad (15)$$

식 (15)로부터 시스템 행렬의 초기값에 추정값의 미분항을 적분하여 더하여 줌으로써 식 (16)과 같이 시스템 행렬의 수렴 값을 구한다.

$$\hat{A}_p = \hat{A}_p(0) + \int \dot{\hat{A}} dt, \quad \hat{B}_p = \hat{B}_p(0) + \int \dot{\hat{B}} dt \quad (16)$$

4.2 차량의 질량 추정

4.1 절에서 설명한 것처럼 선형 시스템의 파라미터 행렬을 추정하려면 시스템의 상태 변수의 실제 값과 추정치의 정보가 있어야 한다. 실제 값은 측정값을 이용하며 추정 값은 식 (10)에서 정의한 것처럼 수렴된 시스템 행렬을 통해 연산된 상태의 추정치이다. 식 (6)에서 정의한 선형 모델의 상태 변수는 4 가지 이고 그 중 롤각과 롤각속도는 추정하고자 하는 변수이므로 횡속도와 요각속도만을 측정할 수 있는 변수로 가정하였다. 횡속도와 요각속도는 이미 식 (6)에서 정의한 선형 모델의 상태 변수로 정의되어 있기 때문에 시스템 행렬의

수렴 값이 있으면 추정할 수 있다. 식 (2)와 (3)에 롤각과 롤각속도를 포함하고 있지 않으므로 시스템의 차수는 낮추고 롤각과 롤각속도 항을 제외한 시스템으로 식 (17)과 같이 축소시킬 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{2(C_f + C_r)}{Mu} & \frac{2(bC_r - aC_f)}{Mu} - u & 0 & 0 \\ \frac{2(bC_r - aC_f)}{I_z u} & \frac{2(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2M_s h_{roll}(C_f + C_r)}{I_{x1} Mu} & \frac{2M_s h_{roll}(bC_r - aC_f)}{I_{x1} Mu} & \frac{M_s g h_{roll} - K_{roll}}{I_{x1}} & -\frac{C_{roll}}{I_{x1}} \end{bmatrix}$$

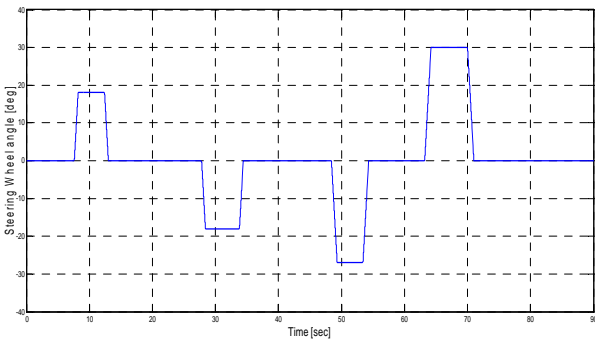
$$\rightarrow A = \begin{bmatrix} -\frac{2(C_f + C_r)}{Mu} & \frac{2(bC_r - aC_f)}{Mu} - u \\ \frac{2(bC_r - aC_f)}{I_z u} & \frac{2(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{M} & \frac{2aC_f}{I_z} & 0 & \frac{2M_s h_{roll} C_f}{I_{x1} M} \\ 0 & \frac{1}{I_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \rightarrow B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{M} & \frac{2aC_f}{I_z} \\ 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

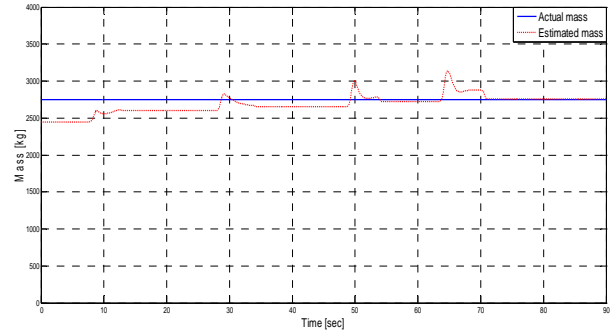
일반적인 C_f, C_r 값을 알고 있다고 가정하면 추정된 행렬 \hat{B}_p 을 통해 질량의 추정값을 구할 수 있다.

4.3 질량 추정 성능 검증

질량을 추정하기 위해서는 어느 정도 크기의 조향 입력이 필요하기 때문에, 극심하지 않은 일반적인 상황의 조향 입력을 설정해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 80km/h 의 정속 주행 상황에서 몇 번의 선회 주행 상황에서 질량의 초기 값인 공차 질량에서 승객이 타거나 짐을 적재한 경우의 실제 질량으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Steering Wheel Angle [deg]



(b) Estimated Vehicle mass [kg]
Fig. 6 Simulation for mass estimation

Fig (6) 에서와 같이 차량의 질량을 추정하여 롤 상태 추정기에 추정된 질량을 갱신함으로써 차량의 질량 변화에 강건한 추정기를 설계할 수 있다.

5. 강건한 롤 상태 추정기 설계

5.1 강건한 롤 상태 추정기

차량의 질량 변화에 강건한 롤 상태 추정기를 위해 Fig 7. 과 같이 파라미터를 추정하여 추정된 값을 롤 상태 추정기에 갱신하는 시스템을 설계하였다.

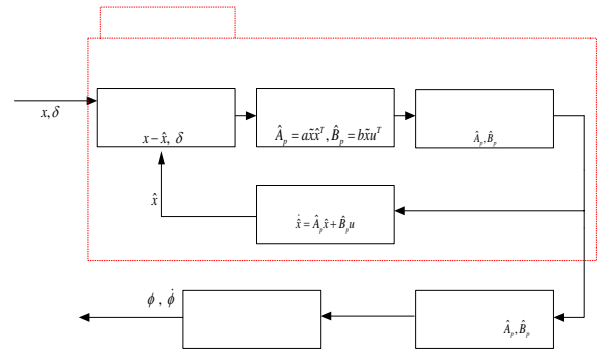


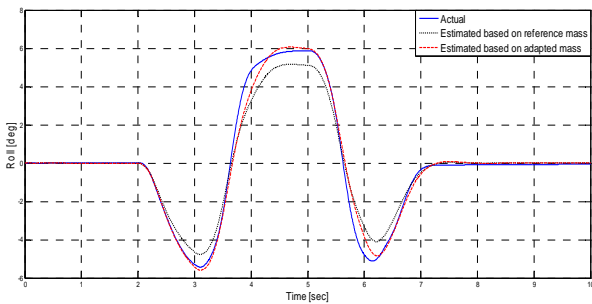
Fig. 7 Robust estimator with parameter update

Fig.7 의 시스템은 실시간으로 추정되는 차량의 질량을 롤 상태 추정기에 입력하는 것은 아니다. Fig.6 에서 나타난 것처럼 차량에 조향 입력이 주어질 때 추정되는 차량의 질량은 진동을 하면서 일정한 값에 수렴한다. 최종적으로는 실제 차량의 질량에 수렴하지만 중간 과정에서는 계단 형태로 수렴하는 값을 갖게 된다. 수렴하기 전의 진동하는 구간에서 나타나는 질량 값은 생략하고 수렴할 때의 질량 값을 롤 상태 추정기에 입력하도록 하

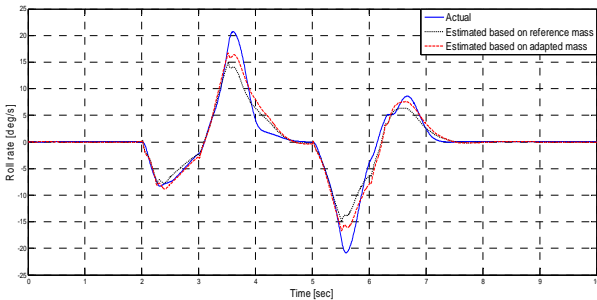
였다.

5.2 강건한 롤 상태 추정기의 성능검증

질량 변화에 대해 강건한 롤 상태 추정기의 성능을 검증하기 위해 80km/h 의 속도에 약 50 degree 의 조향 입력을 가하는 lane change 상황을 시뮬레이션하였다.



(a) Roll angle [deg]



(b) Roll rate [deg/s]

Fig. 8 Roll state estimate with mass variation

Fig. 8 은 차량의 질량을 추정하지 않고 공차 질량으로 롤 상태를 추정한 결과와 사람이 타거나 짐을 실은 경우의 총 질량을 추정하여 그 질량으로 롤 상태를 추정한 결과를 비교한 것이다. 질량의 초기값만(2450kg)으로 롤 각을 추정한 경우 실제 롤 각과 약 1 degree, 15% 정도의 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 차량의 실제 질량을 추정한 값(약 2760kg)을 이용하여 롤 각을 추정한 경우에는 그 오차가 약 0.2~0.3 degree 로 현저하게 감소하게 된다. 롤 각속도의 경우에도 약 20% 정도의 추정 성능 향상 효과를 확인할 수 있다.

따라서 차량에 사람이 타거나 짐을 실어 차량의 정확한 질량을 알 수 없는 경우에도 질량을 추정하여 롤 상태 추정기에 적용함으로써 좀 더 정확하게 롤 상태를 추정할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 횡방향 가속도와 요각속도, 조향 각 등을 측정값으로 사용하여 롤 각과 롤 각속도를 추정하는 모델을 제안하였고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다.

또한 차량의 일반적인 주행 상황인 승객의 승차나 하차, 짐을 실는 등의 조건으로 인해 쉽게 변할 수 있는 차량의 질량을 적응 제어 기법을 이용하여 적절한 값으로 추정하였다. 정확한 질량 정보 없이도 추정된 질량 값을 이용하여 롤 상태를 추정함으로써 질량 변화에 강건하고 우수한 추정 성능을 확인할 수 있었다. 차량의 질량은 차량의 거동에 지배적인 영향을 주는 파라미터 중 하나이기 때문에 적절하게 질량을 추정함으로써 롤 상태의 추정 성능을 향상시킬 수 있었다. 차량의 질량에 대한 추정으로 인한 성능 향상을 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증하였다.

참고문헌

- (1) NHTSA Technical Report, 2003, ““Motor Vehicle Traffic Crash Injury and Fatality Estimates, 2002 Early Assessment”, NCSA(National Center for Statistics and Analysis) Advanced Research and Analysis
- (2) Aleksander Hac, Todd Brown and John Martens, 2004, "Detection of Vehicle Rollover", SAE, Paper No. 2004-01-1757
- (3) Jangyeol Yoon and Kyongsu Yi, 2006, “A Rollover Mitigation Control Scheme Based on Rollover Index”, *American Control Conference*, pp. 5372~5377
- (4) Jihan Ryu and J. Christian Gerdes, 2004, “Estimation of Vehicle Roll and Road Bank Angle”, *American Control Conference*, Vol.3, pp 2110~2115
- (5) Joost Zuurbier, Paul Bremmer and TNO Automotive, 2002, “State Estimation for Integrated Vehicle Dynamics Control”, *Proceedings of AVEC 2002*, pp 355~360
- (6) Wenzel, T.A., Burnham, K.J., Blundell, M.V. and Williams, R.A., 2004, “Approach to vehicle state and parameter estimation using extended Kalman filtering.”, *Proceedings of AVEC 2004*, pp. 725~730.
- (7) Dongkeun Kwon, Kyongsu Yi, Seungjong Yi and Jangyeol Yoon, “Model-based Estimation of Vehicle Roll State for Rollover Mitigation Control”, 2006, KSAE 2006 Fall Conference Proceeding, Vol. 2, pp 814~819
- (8) Gang Tao, “Adaptive Control Design and Analysis”, 2003, *Wiley-Interscience*, pp 149~153