

차량의 횡방향 모델분석 및 제어기 설계

김은주*, 하성기*, 배종일**, 이만형*

(* : 부산대학교 기계공학과, ** : 부경대학교 전기공학과)

The Robust Controller Design for Lateral Control of Vehicles

E. J. Kim*, S. K. Ha*, S. K. Jeong*, B. J. Il** and M. H. Lee*

(*: Mech. Eng. Dept., PNU, **: Elec. Eng. Dept., PNU.)

ABSTRACT

The LQG/LTR controller is a robust and stable control which is systematic method with a view of engineering. And the H^∞ scheme is adopted for the design of the controller to reduce the effects of the disturbances. In this paper, LQG/LTR and H^∞ Controller Design of Lateral Control System for an Automobile is developed with 3 DOF (degree-of-freedom) model. The performance has been compared for the employed two types of controllers via computed simulations. The results show that the H^∞ controller provides more robustness property for the disturbances and lower control input.

Key Words : lateral control of vehicle, LQG/LTR, H^∞ , singular system

1. 서론

도로상에서 차량의 무인 주행을 위해서는 차량의 종방향 제어 및 횡방향 제어가 수행되어야 한다. 종방향 제어는 차량의 속도를 조정하여 차량간의 간격이 적절하도록 조절하는 것이다. 횡방향 제어는 운전자가 편안한 승차감을 느끼면서 도로의 차선을 따라 주행을 하도록 하는 자동 조향을 말한다. 횡방향 제어는 차선의 유지 및 차선변경 등의 기동 시에 필요하며 센서를 통해 기준선 및 차선을 인식하고 이로부터 측정된 횡방향 거리오차를 제어에 사용하게 된다[1][2]. 차량의 횡방향 제어에 관련한 연구는 선형과 비선형 제어 이론을 함께 사용하여 왔다. 선형 이론으로는 궤환 조향 제어 설계를 위해 근계적을 사용한 방법이 있으나, 조향제어를 위해서 곡률 같은 전방 제어 정보를 사용하지 못하였다. 또한 횡방향의 동역학은 차량의 중량, 관성모멘트, 종방향 속도, 타이어의 강성 및 노면과의 마찰 등의 영향을 받으며, 이러한 파라미터는 실제 주행상황에서 시간에 따른 변화가 심하다. 이는 결국 횡방향 제어시스템에 있어서 커다란 불확실성으로 작용하게 되고 이러한 불확실성을 보상할 수 있는 견실한 성능을 보장하는 견실 제어기법이 요구된다. H^∞ 제어기 설계 기법은 외란

및 잡음에 대한 강인성과 공칭안정성을 보장하는 LQG/LTR 제어기의 특성과 함께 페루프 전달함수의 크기를 최소화하는 안정한 제어기를 얻는 제어기법이다. 본 논문에서는 차량을 모델링 할 때 발생하는 구조적 또는 비 구조적인 오차와 외란에 강인한 LQG/LTR 및 H^∞ 제어기를 설계하고 성능을 비교 분석하기로 한다.[3].

2. 차량의 횡방향 모델링

본 논문에 도입된 차량의 횡방향 모델링은 버클리대에서 개발한 6자유도의 복합 차량 모델을 단순화한 3자유도 단순 차량 모델이다. 6자유도의 복합 차량 모델은 총 16개의 상태 변수로 표현되는데, 주요 관심이 되는 제어 관점이 조향이기 때문에, 차량의 피치 운동과 수직운동은 무시한다. 또한 평탄한 도로를 주행한다고 가정하면, 도로의 경사면, 측면 미끄럼 각과 요각의 오차가 작다고 가정할 수 있고 차량의 길이방향으로 속도가 일정하다고 한다면 복합 차량 모델식은 아래와 같이 단순화한 상태방정식으로 표현될 수 있다[4].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1 A_1}{V} & -A_1 A_1 & \frac{A_2 A_1}{V} & R_1 & R_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_3}{V} & -A_3 & \frac{A_4}{V} & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{A_1 A_2}{V} & -A_1 A_2 & \frac{A_2 A_2}{V} & R_1 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 A_1 \\ 0 \\ B_2 \\ 0 \\ B_1 A_2 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ d_2 \\ 0 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. LQG / LTR 제어기 설계

본 시스템은 rank=5인 특이 단일입출력 시스템이므로 이에 대한 설계기법을 도입하여 제어기를 설계하기로 한다[5]. 먼저 목표필터루프(TFL)설계는 최적루프형성(optimal loop shaping)을 이용하여 플랜트 자체의 자유적분요소만 남겨 놓고 플랜트의 모든 극점을 제거하여 바람직한 목표필터루프를 형성하는 단계이다. 시스템 파라미터 Ap를 대각선 형태(Canonical form)로 변환하고 설계파라미터 L을 선정한다.

$$L = Z_c^{-1} Z_d = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

다음으로 설계파라미터 μ 를 설계사양을 만족하도록 $\mu=0.01$ 로 선정함으로써 목표 필터루프를 형성한 후, 필터게인행렬 H를 다음과 같이 선정한다.

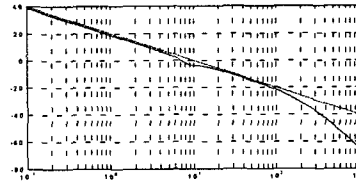
$$H = [10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

다음으로 보상된 플랜트의 루프전달함수 G(s)K(s)의 특이값을 설계된 목표필터루프 $G_f(s)$ 로 회복시킨다. 최소위상시스템의 경우 ρ 가 0으로 접근할수록 루프전달회복은 잘 이루어지지만 제어입력의 크기를 증가시키는 효과가 있다. 따라서 교차주파수의 10배 가되는 주파수까지 회복시킬 수 있는 $\rho=10^{-6}$ 을 선정하며 ρ 값을 가지고 LQG/LRT 보상의 설계파라미터인 G를 식 (5)와 식 (6)으로부터 선정한다.

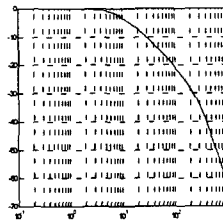
$$KA + A^T K + C^T C - \frac{1}{\rho} K B B^T K = 0 \quad (5)$$

$$G = \frac{1}{B^T} K \quad (6)$$

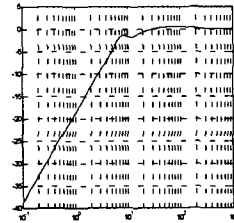
이와 같이 LQG/LTR제어기를 설계하고, 플랜트와 제어기를 결합한 제어시스템에 대하여 성능평가를 수행한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1(a) LTR state of open loop T.F.
(b) Bode plot of close loop T.F.
(c) Bode plot of Sensitivity T.F.

Fig. 1(a)은 LTR(Loop transfer recovery)상태를 나타내며 (b)와(c)는 각각 폐루프 전달함수, 감도 전달함수를 보여준다. 고주파에서 노이즈에 강인하고, 저주파에서 외란에 강인한 목표필터루프를 추종하는 LQG/LTR 제어기의 성능을 볼 수 있다.

4. H^∞ 제어기 설계

일반적인 H^∞ 제어시스템의 Two-Port 블록 앞섬을 도입하면 Fig. 3.1과 같이 표현할 수 있다.

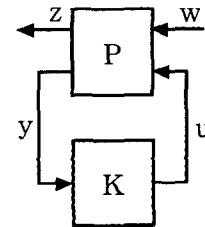


Fig. 2 Two-Port Feedforward for H^∞

여기서, w는 외란, 소음 그리고 명령신호와 같은 외부 입력신호를 나타내며, z는 오차, 제어입력 그리

고 출력과 같이 조정되어야 할 변수들을 나타낸다. 그리고 u 는 제어입력을 나타내고, y 는 측정된 출력값을 나타낸다. P 는 표준 플랜트를 표현하는 전달함수로서 모델링 된 시스템과 더불어 강인성과 성능향상을 위해 사용되는 가중치 함수를 포함하고 있다. 시스템의 입, 출력 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$z = P_{11} w + P_{12} u \quad (7)$$

$$y = P_{21} w + P_{22} u \quad (8)$$

$$u = K y \quad (9)$$

위 식을 정리하여 외부입력 w 에 대한 제어 변수 z 의 관계를 구하면 식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} z &= P_{11} w + P_{12} K(1 - P_{22}K)^{-1}P_{21} w \\ &= [P_{11} + P_{12} K(1 - P_{22}K)^{-1}P_{21}] w \quad (10) \\ &= T_{zw} w \end{aligned}$$

식(10)으로부터 H^∞ 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|T_{zw}\|_\infty \leq \gamma \quad (11)$$

즉 H^∞ 제어 문제는 페루프 전달함수 T_{zw} 의 ∞ 노름이 주어진 기준 γ (양의 스칼라)보다 작게 유지되도록 플랜트 P 에 대하여 내부적으로 안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것이다.

H^∞ 제어기 설계시 Glover와 Doyle이 제시한 방법을 이용하여 전달함수 P 를 결정하면 H^∞ 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\begin{vmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \\ W_3 T \end{vmatrix}_\infty \leq \gamma \quad (12)$$

식 (12)는 가중함수를 적절히 조절하여 원하는 설계사양을 만족하는 시스템을 설계할 수 있음을 보여준다. 이때 가중함수는 플랜트의 감도함수와 루프 전달함수의 형상정보를 이용해 결정한다. 먼저 외란 제거성과 명령추종성을 향상시키도록 W_1 을 다음과 같이 결정한다.

$$W_1 = \frac{10(S+10)}{(15S+1)} \quad (13)$$

그리고 센서잡음에 대한 강인성을 가지도록 W_3 을 결정한다.

$$W_3 = \frac{S^2}{300} \quad (14)$$

Fig. 3(a)은 감도전달함수와 W_1^{-1} , Fig. 3(b)는 루프전달함수와 W_3^{-1} 의 보데선도(bode plot)를 나타낸다.

모든 주파수 영역에서 감도함수의 크기는 W_1^{-1} 보다 작아야 하며, 루프전달함수의 크기는 W_3^{-1} 보다 작아야 한다.

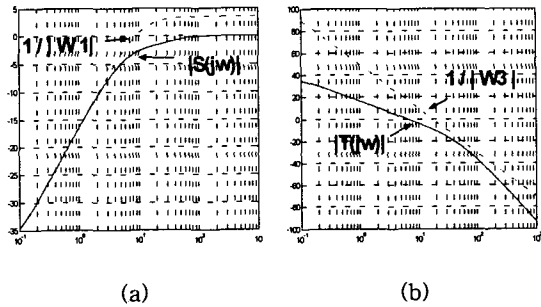


Fig. 3(a) Sensitivity T.F and W_1^{-1} weighting

(b) Feed forward T.F and W_3^{-1} weighting

이와 같이 선정된 가중함수를 이용하여 제어기를 구성하고 명령추종성을 파악하기 위하여 스텝입력(step input)을 인가했다.

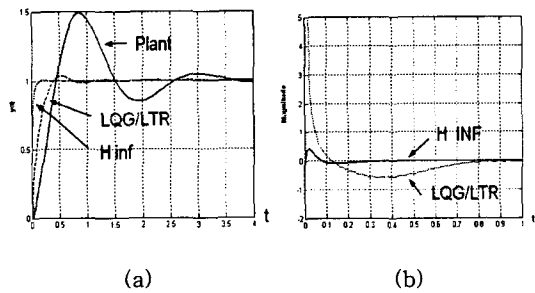


Fig. 4(a) Step response of Plant, LQG/LTR and H^∞ controller

(b) Control input of LQG/LTR and H^∞ controller

Fig. 4(a)에서는 각각 플랜트, LQG/LTR, 그리고 H^∞ 제어기를 구성하였을때의 시간역 응답을 나타낸다. H^∞ 제어기의 시간역 응답성이 LQG/LTR보다 개선됨을 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 LQG/LTR 과 H^∞ 제어기의 제어입력을 각각 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 H^∞ 에서의 제어입력은 최소화 되어 LQG/LTR 보다 작게 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 차량의 횡방향 모델링을 도입하여 LQG/LTR 및 H^∞ 제어를 설계하였다. LQG/LTR 제어기의 경우 노이즈와 외란에 강인한 성능사양을 나타내나 이러한 주파수역 성능사양을 만족키 위한 과도한 입력이 나타남을 볼 수 있으며, H^∞ 제어는 페루프 전달함수의 크기를 최소화하여 이를 개선시킴을 알 수 있다.

후기

본 논문은 부산경남 테크노 센터의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

1. Mahlom Heller and Mimi Huie, "Vehicle Lateral Guidance using Vision, Passive Wire and Radar Sensors," Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference Society of Automotive Engineers, pp. 505-508, 1993.
2. Meihua Tai and Masayoshi Tomizuka, "Robust Longitudinal Velocity Tracking of Vehicles Using Traction and Brake Control," Advanced Motion Control, Proceedings of the 6th International Workshop , pp. 305-310, 2000.
3. J. Y. Wang and M. Tomizuka, "Robust H^∞ Lateral Control of Heavy-Duty Vehicles in Automated Highway System," Proc. of the American Control Conference, pp. 3671-3675, June, 1999.
4. H. Peng and M. Tomizuka, "Lateral Control of Front-Wheel-Steering Rubber-Tire Vehicles," PATH Research Report, May, 1990.
5. 김종식, 한성익, 남세규, "특이 다변수 시스템의 LQG/LTR 제어," 대한기계학회 논문지, 제17권, 제4호, pp. 817-826, 1993.
6. Glover, k. and Doyle, J. C., "State Space Formulae For All Stabilizing Controllers That Satisfy a NormBound and Relations to Risk Sensitivity," System and Control Letters, Vol. 11, pp. 167~172, 1988.