

외란 추정을 이용한 Steer-by-wire 시스템의 모델 기반 제어기 설계

정상훈¹⁾, 최세범^{*2)}

한국과학기술원 기계공학과 ¹⁾한국과학기술원 기계공학과²⁾

Design of Model-based Controller using Disturbance estimation in Steer-by-wire System

Sanghun Jung¹⁾ · Seibum Choi^{*2)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

^{*2)} Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

Abstract: The steer-by-wire system is a next generation steering control technology that has been actively studied. Because it has many advantages such as fast response, space efficiency due to removal of mechanical elements, and high connectivity with vehicle chassis control. Disturbance of steer-by-wire system is composed of tire friction torque and self-aligning torque. This disturbance vary widely due to the weight change and tire-road friction coefficient variation. Therefore, disturbance compensation logic is strongly required to obtain desired performance. This paper proposes model-based controller using disturbance estimation to achieve the robust control performance. Targeted steer-by-wire system is identified through the experiment and system identification method. Disturbance of targeted steer-by-wire system is estimated using disturbance observer (DOB). The model-based controller is generated using identified model and estimated disturbance information. Experiment of various scenarios are conducted to validate the robust performance of proposed model-based controller.

Key words: Steer-by-wire system(Steer-by-wire 시스템), System identification(시스템 규명), Disturbance observer(외란 관측기), Model-based controller(모델 기반 제어기)

Nomenclature

θ_s : steering wheel angle
 θ_m : measured steering wheel angle
 T_m : motor torque
 I_m : inertial of motor
 B_m : damping of motor
 N : total gear ration of steering system
 I_s : inertial of steering wheel
 B_s : damping of steering wheel

Subscripts

SBW : steer-by-wire
DOB : disturbance observer

1. 서론

Steer-by-wire (SBW) 시스템은 각광받고있는 차세대 조향 제어 기술로서, 자동차 산업 내에 큰 주목을 받고 있다^{1), 2)}. SBW 시스템은 기존의 조향 시스템의 기계적인 요소를 모두 제거하고, 운전자의

* 정상훈, shjung0225@kaist.ac.kr

조향 입력을 측정하여 모터를 통하여 바퀴에 토크를 전달하는 방식으로 구동된다. 랙-피니언과 같은 기존 조향 시스템의 기계적인 요소가 제거되기 때문에 차량의 경량화가 가능하며, 모터로 제어 입력이 들어가기 때문에 active steering control과 같은 사시 통합 제어와의 연계성도 뛰어나다는 장점을 가진다.

하지만, SBW 시스템은 운전자와 조향 바퀴가 물리적으로 분리되어 있기 때문에 강건한 제어 성능이 필수적으로 요구된다. SBW 시스템은 타이어 마찰 토크 및 자가 정렬 모멘트 등의 큰 범위로 변화하는 외란을 가진 시스템이다. 큰 폭으로 변화하는 외란에도 운전자의 입력을 추종하는 제어 성능을 가져야 하기 때문에, 외란에 강건한 제어기를 구성하는 것이 중요하다³⁾. 본 연구에서는 SBW 시스템의 강건한 제어 성능을 위하여 모델 기반 제어를 제안한다. 2장에서는 모델 기반 제어를 위한 시스템 규명 및 외란 추정에 대한 내용을 다룬다. 3장에서는 2장에서 규명된 모델을 이용하여 모델 기반 제어기를 구성하고, 4장에서 이를 실험적으로 검증하는 내용을 다룬다.

2. SBW 시스템 규명

본 연구에서는 초 경량 micro-mobility 차량의 SBW 시스템을 목표 시스템으로 정의한다. 본 장에서는 해당 SBW 시스템을 모델링 및 규명, SBW 시스템의 외란을 추정하는 내용을 다룬다.

2.1 SBW 시스템 모델링 & 규명

일반적으로 SBW 시스템의 기계적 파트의 모델링은 간단한 2차 질량 댐퍼 시스템으로 모델링 된다.^{4), 5)}. 대상으로 하는 SBW 시스템은 두 개의 BLDC 모터로 구동되며, 각 모터에서 나오는 토크는 감속기를 거쳐 증폭되어 조향 휠에 전달된다. 따라서, 전체적인 시스템은 다음과 같은 등가 식으로 모델링 될 수 있다.

$$I_{eq} \ddot{\theta}_s + B_{eq} \dot{\theta}_s + T_{dist} = 2NT_m = u \quad (1)$$

$$I_{eq} = I_s + 2N^2 I_m \quad (2)$$

$$B_{eq} = B_s + 2N^2 B_m \quad (3)$$

시스템은 위와 같은 식으로 모델링될 수 있다. 모델 기반 제어를 구성하기 위해서는 시스템 알 수 없는 인자들에 대한 정보가 필요하다. 따라서 시스템 규명이 필요하다. 본 연구에서는 시스템의 변수를 추정하기 위하여 closed loop system 전달함수를 계산하여, 주파수 영역에서의 분석을 통해 변수를 찾는 Empirical transfer function estimation(ETFE) 방법을 사용하였다. 대상 시스템의 closed loop 전달함수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{I_{eq}s^2 + B_{eq}s} \quad (4)$$

약 0~5Hz의 입력 신호를 시스템에 주고, 나온 시스템 출력값을 비교하여 Bode 선도를 얻어낼 수 있다. 그 결과는 Fig. 1에 나타난다.

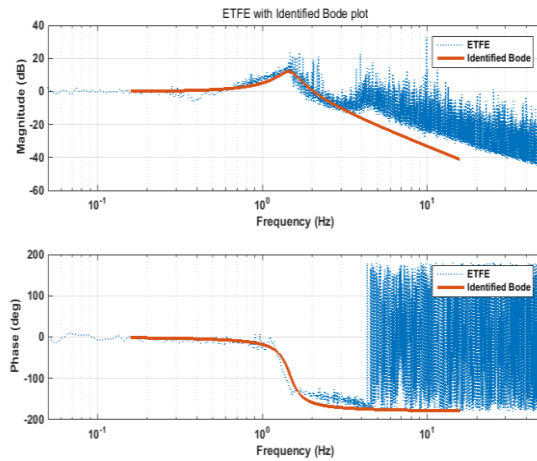


Fig. 1 ETFE with Identified bode plot

위와 같은 과정을 통하여, 식 (1)에서 모델링 된 시스템 식 중 모르는 변수인 I_{eq}, B_{eq} 를 규명할 수 있다.

2.2 SBW 시스템의 외란 추정

앞선 절에서는 SBW 시스템의 변수를 추정하는 내용에 대해 다뤘다. 하지만, 식 (1)에서 SBW 시스템의 외란을 의미하는 T_{dist} 에 해당하는 부분은 규명되지 않았다. 본 논문에서는 SBW 시스템의 외란을 추정하기 위해 외란 추정기를 이용하여 외란을 추정한다.

단일 입력 단일 출력 시스템의 간단한 외란 추정기의 구조는 Fig. 2에 나타난다. Fig 2.의 표기 P_n, P 는 각각 규명된 플랜트의 전달함수, 실제 플

랜트의 전달함수를 의미한다.

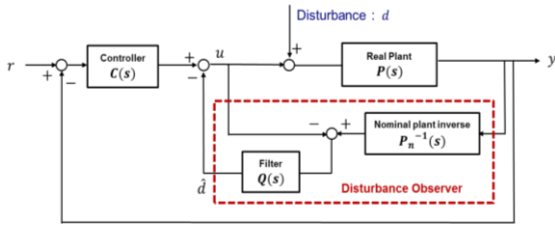


Fig. 2 단일 입력-단일 출력 시스템의 외란 추정기

시스템의 최종 출력 값 y 는 아래 식과 같이 목표 입력 r 과 외란 d 에 대한 식으로 표현된다.

$$Y(s) = T_{yr}(s)Y_r(s) + T_{yd}(s)D(s) \quad (5)$$

T_{ry}, T_{dy} 는 입력 r 과 외란 d 에 대한 출력 y 의 전달함수를 나타낸다. 만약 Q-filter가 설계가 잘 되었다면, Q-filter의 대역폭 이하의 주파수에서는 다음과 같은 결과가 나오는 것을 확인할 수 있다.

$$T_{ry}(s) = \frac{P_n(s)C(s)}{1 + P_n(s)C(s)}, \quad T_{dy}(s) = 0 \quad (6)$$

따라서, 외란 추정기를 이용하여 외란이 잘 추정되면 시스템의 출력은 외란이 없는 규명된 플랜트의 출력과 같아짐을 확인할 수 있다.

위와 같은 결과를 대상으로 하는 SBW 시스템에 접목시키면 다음과 같은 식을 얻어낼 수 있다.

$$I_{eq}\ddot{\theta} + B_{eq}\dot{\theta} + T_{dist} = u \quad (7)$$

$$I_n\ddot{\theta} + B_n\dot{\theta} = u + \hat{d} \quad (8)$$

추정된 외란 $\hat{d}$ 은 식 (7), (8)을 이용하여 계산할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\hat{d} = -\Delta I\ddot{\theta} - \Delta B\dot{\theta} - T_{dist} \quad (9) \quad \ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d - \frac{1}{I_{eq}}(u - B_{eq}\dot{\theta} - T_{dist}) = -3\lambda\dot{e} - 3\lambda^2e - \lambda^3\int e \quad (12)$$

식 (9)에서 ΔI 와 ΔB 는 실제 플랜트와 규명된 플랜트의 변수의 차이를 의미한다. 시스템이 2.1절에서 잘 규명되었다고 가정하면, $\Delta I = \Delta B = 0$ 로 가정할 수 있으며 추정된 외란

$\hat{d}$ 는 $-T_{dist}$ 와 같아지게 된다. 따라서, 시스템의 외란을 정확하게 추정할 수 있게 된다.

3. 모델 기반 제어기 설계

앞선 2장에서 대상으로 하는 SBW 시스템의 기계적 시스템을 규명하였으며, 외란 추정기를 이용하여 시스템의 외란을 추정하였다. 본 장에서는 규명된 시스템 및 추정된 외란을 이용하여 모델 기반 제어기를 구성하였다.

목표로 하는 제어는 운전자의 핸들 입력에 따른 조향 휠의 추종 제어이다. 따라서, 제어 오차는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$e = \theta_d - \theta \quad (10)$$

최종 제어 목표는 위 오차를 시간이 지남에 따라 0으로 수렴시키는 것이다. 따라서, 오차 dynamics를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\ddot{e} + 3\lambda\dot{e} + 3\lambda^2e + \lambda^3\int e = 0 \quad (11)$$

기본적으로, 식 (1)과 같이 시스템이 2차 시스템으로 모델링이 되었으므로 오차 dynamics 또한 2차로 구성하는 것이 일반적이다. 하지만, 본 연구에서 대상으로 하는 시스템은 마찰 토크와 같은 외란이 큰 시스템으로 적분 제어기를 추가하기 위하여 시스템 차수를 3차로 설정하였다. 위와 같은 방법을 이용하면, 시스템의 pole을 모두 한 곳으로 모으고 제어기의 gain을 더 편리하게 튜닝할 수 있다는 장점을 가진다.

위 식과 시스템 모델 식 (1)과 연립하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d - \frac{1}{I_{eq}}(u - B_{eq}\dot{\theta} - T_{dist}) = -3\lambda\dot{e} - 3\lambda^2e - \lambda^3\int e \quad (12)$$

위 식을 정리하면 최종 제어 입력을 계산할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$u = I_{eq} \ddot{\theta} + B_{eq} \dot{\theta} + T_{dist} + 3\lambda^2 I_{eq} e + 3\lambda I_{eq} \dot{e} + \lambda^3 I_{eq} \int e \quad (13)$$

식 (13)을 살펴보면, 최종 제어 입력은 모델 식 및 관측된 외란의 정보가 포함된 피드 포워드 항과 PID 제어기가 결합된 형태임을 알 수 있다. 따라서, 식 (13)과 같이 대상으로 하는 SBW 시스템을 제어하기 위한 모델 기반 제어기를 구성할 수 있다.

4. 모델 기반 제어기의 실험적 검증

제안된 모델 기반 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실험을 진행하였다. 제어기의 강건성을 검증하기 위하여 세 가지 상황에 대한 실험을 진행하였다. 세 가지 상황은 각기 다른 마찰 토크가 인가되는 상황에서 진행되었다. SBW 시스템의 외란은 타이어 마찰 토크와 자가 정렬 모멘트로 구성된다. 본 연구에서는 외란에 대한 대응을 보기 위하여 정차된 상태, 즉 자가 정렬 모멘트가 0인 상황에서 실험을 진행하였다. 마찰 토크는 다음 식과 같이 모델링된다.

$$T_{fric} = k \cdot \mu F_z \quad (14)$$

따라서, 마찰 토크를 다양하게 인가하기 위하여 조향 휠에 인가되는 하중을 바꿔가며 실험을 진행하였다. 세 가지 상황의 바뀌에 걸리는 하중 및 각 상황이 시사하는 물리적 의미는 Table 1. 에 정리되었다.

Table 1 실험 시나리오 및 시사하는 물리적 상황

No.	Measured F_z	Case information
1	100 kgf	Normal driving
2	145 kgf	High-mu surface, loaded vehicle
3	0 kgf	Low-mu surface: ice, snow road

Table 1. 에서 시사하는 다양한 상황에서도 상황에 따른 gain 변화 없이 제어 성능이 만족된다면, 제안하는 제어기가 강건한 제어 성능을 가진다고 할 수 있다.

각 시나리오의 실험은 운전자가 가장 많이 인가하는 0.3Hz의 사인과 신호 입력을 인가하여서 진행하였다. 제안하는 모델 기반 제어기의 성능을 비교, 분석하기 위하여 단순 피드백 제어기와 제안하는 모델 기반 제어기를 비교하였다. 실험이 진행되는 동안, 피드백 gain값은 한 세트의 값으로 고정되었다.

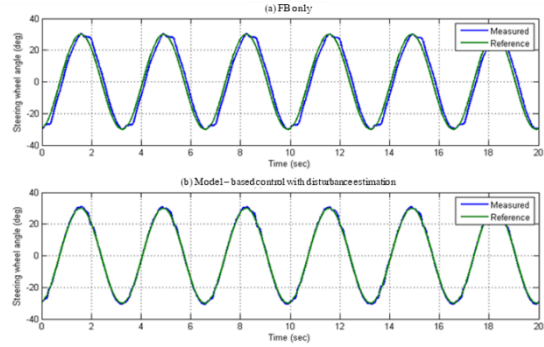


Fig. 3 실험 결과: 시나리오 1. Normal driving 상황

시나리오 1의 실험 결과는 Fig 3. 에 나타난다. 피드백 제어만 할 경우, 출력값은 마찰로 인하여 입력 값에 비하여 뒤쳐지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 제안하는 모델 기반 제어기는 이러한 마찰을 추정 및 보상 해주기 때문에 훨씬 더 좋은 추종 성능을 보여줄 수 있다.

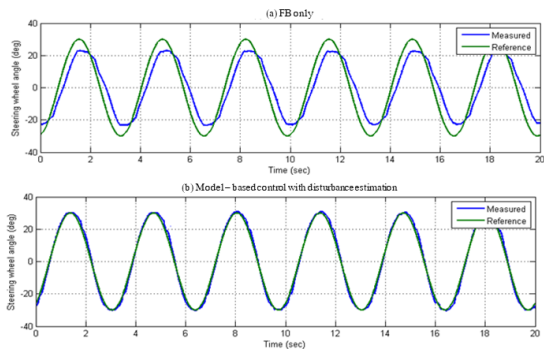


Fig. 4 실험 결과: 시나리오 2. High-mu surface 상황

시나리오 2의 실험 결과는 Fig 4. 에 나타난다. 큰 외란, 즉 큰 마찰 토크의 영향으로 인하여 피드백 제어만 수행한 경우 시스템의 반응성이 낮아져 입력 추종 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 제안하는 모델 기반 제어기는 마찰 토크를 보상하기 때문에 큰 외란이 있는 경우에도 좋은 추

종 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

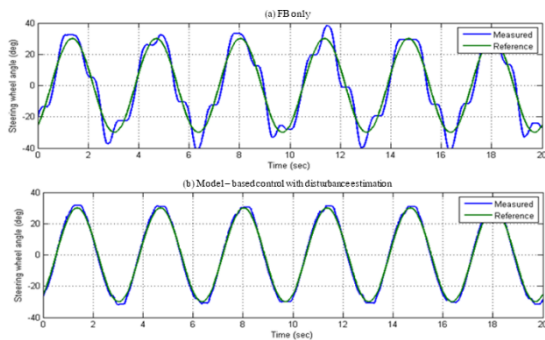


Fig. 5 실험 결과: 시나리오 3. Low- μ surface 상황

시나리오 3의 실험 결과는 Fig 5. 에 나타난다. 본 시스템의 경우, 마찰 토크가 시스템 제어 입력의 주요한 부분을 차지한다. 따라서, 마찰 토크가 사라질 경우 시스템은 high-gain 시스템으로 변화하고, 시스템의 불안정성이 증가하여 위와 같은 결과가 나타나게 된다. 하지만, 제안하는 모델 기반 제어기는 외란 관측기 기반 제어기로, 시스템의 불안정성 및 모델 오차 또한 보상을 해주기 때문에 안정적인 출력을 얻을 수 있다.

따라서, 세 가지 다양한 외란의 상황에서도 제안하는 모델 기반 제어기는 입력에 대한 좋은 추종 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서 대상으로 한 초 경량 차량의 SBW 시스템에서는 외란이 제어 입력에 주요한 요소로 작용된다. 따라서, SBW 시스템의 입력 추종 제어기 구성 시 외란을 보상하는 로직이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 SBW 시스템의 외란을 추정하여 보상해주는 모델 기반 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실험이 진행되었다. 실험은 세 가지 외란의 상황에 따라 진행되었으며, 외란 관측을 이용한 모델 기반 제어기는 다양한 상황에서도 모두 좋은 입력 추종 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 추후 초 경량 자동차의 SBW 시스템의 제어 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 한국 교육부가 후원하는 NRF를 통한 BK21+ 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4004116). 이 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리위원회의 지원을 받아 수행된 연구임(No.10084619, 항복강도 60kPa급 MR물질을 활용한 차량용 속업소버(댐퍼) 및 엔진 마운트 개발)

References

- 1) Y.H.Ki, I.Oh, J.Jeon, J.Chun, H.S.Ahn, "A new type of clamping force estimator for electromechanical brake systems", IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.10, December, (2005)
- 2) Yung-Hsiang Judy Hsu, "Estimation and Control of Lateral Tire Forces Using Steering Torque", Ph.D Dissertation, Stanford University, U.S., (2009)
- 3) Seok-Hwan Jang, Tong-Jin Park, Chang-soo Han, "A control of vehicle using steer-by-wire system with hardware-in-the-loop-simulation system", IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.10, December, (2005)
- 4) Hiraku Ogura, Toshiyuki Murakami, "Reaction Force Control on Accelerator Pedal and Steering Wheel based on Tire-Road Friction Forces", 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, (2009)
- 5) Sanket Amberkar, Farhad Bolourcho, "A Control System Methodology for Steer by Wire Systems", SAE technical paper series, Steering and Suspension Technology Symposium (2004)
- 6) D.S. Cheo, K.H. Nam, "Steering torque control using variable impedance models for a steer-by-wire system", International Journal of Automotive Technology, Vol.18, Issue 2, pp 263-270