

이중모터 Steer-by-Wire(SbW)시스템의 양방향 모션제어

김 기 범¹⁾, 남 강 현^{*1)}

영남대학교 기계공학과¹⁾

Bilateral Control of Dual Actuating Steer-by-Wire(SbW) System

Gibeom Kim¹⁾ · Kanghyun Nam^{*1)}

Yeungnam University¹⁾

Key words : Disturbance Observer(외란 관측기), Dual Mdps(이중 모터 조향 시스템), Rack Force Feedback (랙 추력 피드백), Steer-by-Wire(전자식 조향 시스템), Synchronization Control(동기제어)

교신저자, E-mail: khnam@yu.ac.kr

자율주행 기술의 급속한 발전과 함께 차량의 조향 시스템 또한 지속적인 진화를 거듭하고 있습니다. 기존의 전자 유압식 파워 스티어링(EHPS)과 전기 파워 스티어링(EPS)은 기계적인 연결을 유지한 채 전자적 보조 기능을 제공하는 방식이었으나, 최근에는 스티어링 휠과 차량의 휠 사이의 기계적 연결을 완전히 제거한 전자식 조향 시스템(SbW, Steer-by-Wire)으로 전환되고 있습니다. SbW는 조향 명령을 전기 신호로 전달함으로써 조향 기구에서 기계 요소를 제거하고, 와이어 기반으로 설계를 단순화할 수 있습니다. 이러한 구조는 차량의 경량화 및 공간 효율성 향상에 기여하며, 전기적 제어를 통해 진동 차단이나 조향 감각 개선 등의 이점도 제공합니다.

그러나 SbW 시스템은 기계적 연결이 존재하지 않기 때문에 시스템 고장 시 운전자의 조작이 차량에 직접 전달되지 않는다는 한계가 있습니다. 특히 랙 구동 모터에 고장이 발생할 경우 전체 조향 제어를 상실할 수 있으므로, 이에 대한 안전성 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있습니다. 이를 해결하기 위해 두 개의 모터를 병렬로 장착하여 랙을 구동하는 이중 모터 방식, 즉 Dual MDPS(Motor Driven Power Steering) 시스템이 제안되고 있습니다. 이 방식은 단일 모터 고장 시에도 나머지 모터로 일부 조향 기능을 유지할 수 있어 시스템의 내고장성(fault tolerance)을 향상시킬 수 있습니다.

Dual MDPS 시스템에서는 두 모터가 동일한 조향 동작을 수행해야 하므로 정밀한 동기제어가 필수적입니다. 모터 간 부하가 균등하게 분배되지 않거나, 전기 시스템 내 급격한 전류 변화가 발생할 경우 간섭 현상이 나타나며, 이는 시스템의 안정성을 저하시킬 수 있습니다. 본 연구에서는 Dual MDPS 시스템에 다양한 동기제어 구조를 적용하고, 각 제어기 간의 성능을 비교하였습니다. 동기제어는 시스템 간 상호작용 여부에 따라 Non-Coupling(Master Command, Master-Slave)과 Coupling(Cross Coupling, Relative Coupling, Virtual Shaft) 구조로 나뉘며, 평균값과 차이값을 분리하여 제어하는 Mean-Difference 구조도 함께 분석하였습니다. 각 제어 방식에 대해 사다리꼴 및 사인파 형태의 조향 지령을 입력하고, Peak 오차 및 RMS 오차를 기반으로 성능을 정량적으로 평가하였습니다.

한편, SbW 시스템에서는 기계적 연결이 제거됨에 따라 운전자가 도로 상태나 타이어 접지 상태를 조향휠을 통해 직접적으로 느낄 수 없게 됩니다. 이로 인해 미끄러짐과 같은 위험 상황을 운전자가 즉각적으로 인지하기 어려워지고, 조향 안정성에도 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 랙에 가해지는 추력을 추정하고 이를 스티어링 휠에 피드백하는 제어 로직을 설계하였습니다.

랙 추력을 센서 없이 추정하기 위해 DOB(Disturbance Observer)를 적용하였습니다. 일반적인 제어 구조에서는 각 모터에 개별 DOB가 적용되기 때문에, 랙 추력이 두 DOB로 분산되어 측정되고, 외란이나 마찰, 모델 불확실성 등의 영향을 함께 받게 되어 데이터 해석 및 처리가 복잡해질 수 있습니다. 반면, Mean-Difference 제어기를 사용할 경우 Mean 제어기가 전체 조향 동작을 담당하고 Difference 제어기가 모터 간 위치 차이를 보정하게 되므로, Mean 제어기의 DOB 출력만으로 랙 추력을 일관되게 추정할 수 있습니다. 이를 통해 하나의 DOB만으로 제어 로직을 간결하게 구성할 수 있습니다.

본 연구에서는 또한 랙의 한쪽에만 스프링 부하를 설치한 조건에서 실험을 수행하였습니다. 스프링이 설치되지 않은 방향에서는 기존 로직과 유사한 조향 토크가 측정되었으나, 스프링이 설치된 방향에서는 스프링 부하에 의

해 더 큰 조향 토크가 발생하는 것이 확인되었습니다. $T-\theta$ 커브 분석에서도 해당 방향에서 더 큰 토크가 관측되었으며, 이를 통해 랙 추력 기반 피드백 제어 로직이 실제 노면 반력 변화를 운전자에게 효과적으로 전달할 수 있음을 실험적으로 입증하였습니다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1C1C1011785).

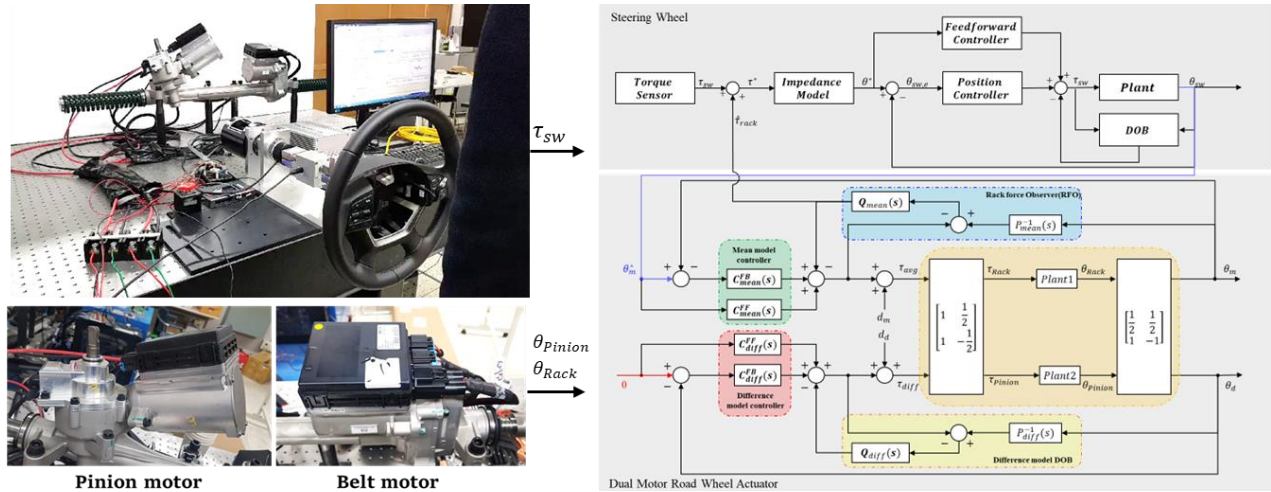


Figure 1 Dual actuating Steer-by-Wire(SbW) System Control Logic

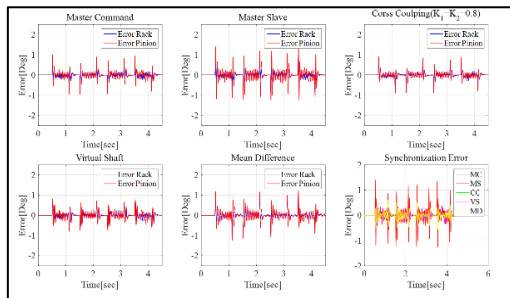


Figure 2 Synchronization Results(Trapezoidal Signal)

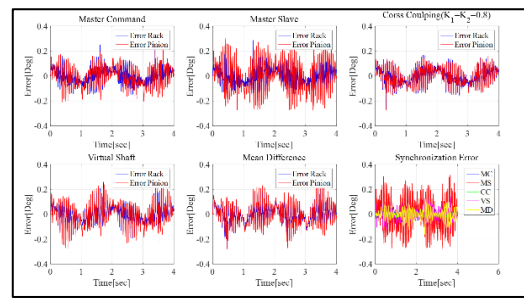


Figure 3 Synchronization Results(Sine Signal)

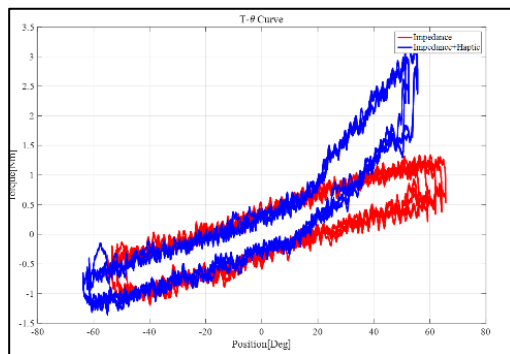


Figure 4 $T - \theta$ curve