

역진자 제어를 위한 지능연구의 진화

김 성 수, 정 슬
충남대학교 메카트로닉스공학과

1. 서론

역진자 시스템은 모터 제어를 통해 진자의 각도와 카트의 위치를 동시에 제어해야 하는 SIMO 시스템의 전형적인 예이다. 비선형 시스템의 특성을 갖는 역진자 시스템은 PID제어기와 같은 기본적인 제어기 뿐만 아니라, LQR, 최적제어, 적응제어, 그리고 퍼지, 신경망과 같은 지능 제어기 성능 검증에 위한 실험 도구로 많이 사용되고 있다. 이러한 이유로 제어시스템 교육의 가장 많이 사용되는 기자재임에 틀림이 없다[1][2].

가장 기본적인 역진자 시스템은 고정된 프레임에서 한 축으로 움직이는 카트에 진자가 연결된 시스템이다. 신경망, 퍼지와 같은 다양한 제어기들이 이런 구조의 역진자 시스템을 사용하여 각각의 성능을 검증하였으며, 최근에는 상업용 기자재로 출시되고 있다.

한 축의 연장으로 두 축으로 움직이는 카트 위의 역진자 제어에 대한 연구가 실행되었다[3]. 그림 1에 보여진 것처럼 각축을 각각 따로 분리시켜 제어하는 분리 지능 제어 기법을 사용하여 카트뿐만 아니라 진자도 제어하는 데 성공하였다.

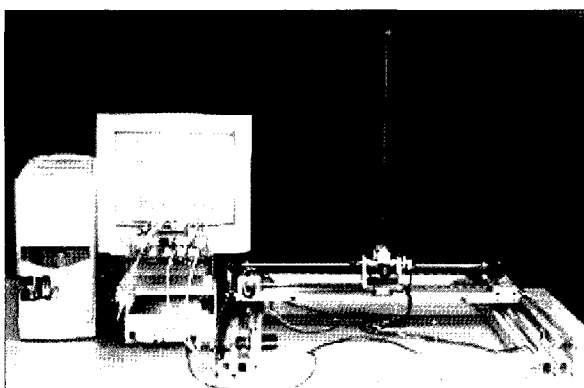


그림 1. x-y 테이블 로봇 위의 역진자.

비슷한 형태의 역진자 시스템으로서 그림 2와 같은 모바일 역진자 시스템을 들 수 있다. 두 개의 바퀴를 이용하여 진자의 균형을 유지하면서 움직일 수 있는 구조이다. 이는 그림 1의 고정된 프레임에서 움직이는 카트를 그림 2에서처럼 바퀴로 구동되는 이동 로봇 형태의 프레임으로 전환한 것으로 제어문제는 더욱 도전적이다.

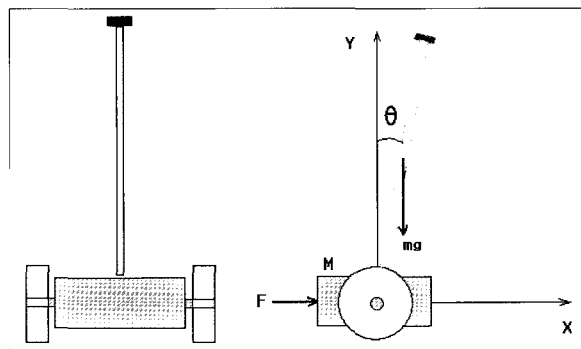


그림 2. 모바일 역진자 시스템.

이전의 고정된 프레임에서 구동되는 역진자 시스템과는 달리 바퀴를 이용하여 움직이기 때문에 이동성의 제한이 없는 특징을 갖고 있다. 그림 3은 실제로 개발된 모바일 역진자 시스템을 보여준다[4].

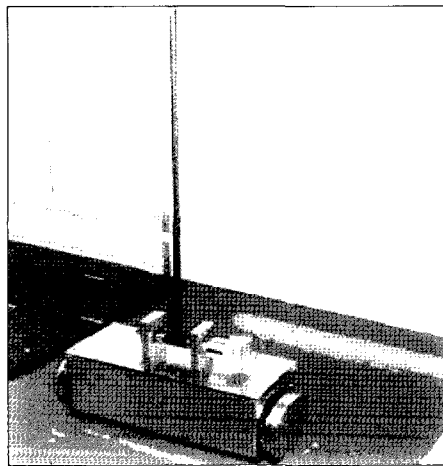


그림 3. 실제 개발된 소형 모바일 역진자.

더 나아가 같은 형태이지만 사람의 운송 수단을 목적으로 개발된 'Segway'라는 제품의 등장으로 역진자의 연구는 절정을 맞이한다. 역진자 시스템의 안정성이 입증되고 상업적으로 널리 판매되면서 이러한 시스템은 알려지게 되었다[5]. 그림 4에 보여진 'Segway'는 충분한 안정성을 검증 받은 상태에서 널리 보급되었지만, 매우 비싼 가격에 판매되고 있다. 이것은 고급 사양의 센서를 여러 개 사용함으로써 제작 단가가 비싸 대중적으로 사용되기 보다는 군사용이나 우주사업용으로 사용되고 있는 실정이다[5].



그림 4. Segway 사의 모바일 역진자 시스템.

우리는 지금까지 여러 종류의 역진자 시스템의 연구를 통해 신경망 제어기의 성능 및 안정성을 검증하였다(1-4). 또한 Segway의 가격 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 모바일 역진자 시스템을 응용하여 저가의 이동 수단을 개발하는 연구를 수행하였다. 저가의 상용화된 센서를 이용하여 신호처리를 통해 센서의 성능을 향상시키고 고급 제어기인 신경망 제어기를 이용하여 시스템의 안정성을 높임으로써 제품의 개발비용을 줄임과 동시에 판매 단가를 감소시킬 수 있다.

2. 전체 시스템

그림 5는 제작된 모바일 역진자 시스템의 모습을 나타내고 있다.



그림 5. 모바일 역진자 시스템.

프레임은 사람의 무게를 충분히 지탱할 수 있도록 설계 되었으며, 높은 토크를 얻기 위해 BLDC 모터를 사용하였다. 역진자의 기울어진 각도를 측정하기 위해 1축 자이로 센서를 사용하고, 역진자의 위치를 측정하기 위해 광학 엔코더를 사용하였다.

3. 지능제어 알고리즘

기존의 역진자 시스템의 경우 진자가 시스템의 중심에 위치하며 진자의 중심을 잡기 위해 카트가 움직이는 구조로 되어 있다. 그와 유사하게 본 시스템은 사람이 진자가 되어 중심을 앞으로 기울이면 쓰러지지 않기 위해 시스템이 앞으로 이동을 하고 뒤로 움직이면 시스템이 뒤로 움직임으로써 균형을 유지할 수 있다. 따라서 사람이 무게 중심을 앞, 뒤로 움직임으로써 시스템을 조종할 수 있다.

3.1. 신경망 제어기

시스템을 제어하기 위해 사용되는 제어기는 그림 6과 같은 입력 보상 방식의 신경망 제어기이다(6). 신경회로망이 PID 제어기로 들어가는 기준입력신호를 보상해주는 방식이다. 이렇게 보상된 신호는PID제어기에서 개인값과 곱해져서 증폭된다. 이러한 방식을 사용함으로써 신경망이 공정대상의 역모델을 학습하는 것이 아니라 PID제어기로 제어된 공정의 역모델을 학습하고 신경망 제어기의 안정성을 확보할 수 있다.

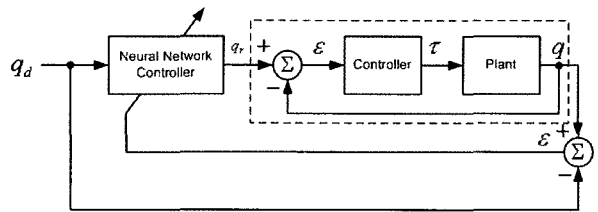


그림 6. 입력 보상 방식 신경망 제어블록.

모바일 역진자 시스템의 세부적인 제어기 구조는 그림 7과 같다.

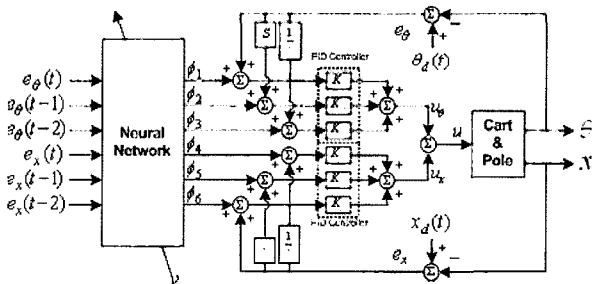


그림 7. 신경망 제어기 블록 다이어그램.

3.2. 제어기의 하드웨어 구현

그림 8은 신경망 지능제어기의 하드웨어적 구성을 보여 주고 있다. 고속 연산 처리가 가능한 DSP에는 신경망 알고리즘이 적용되고, FPGA에는 엔코더의 신호 처리, 모터 구동을 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 신호 발생 회로, AD컨버터 구동 회로, 그리고 DSP로부터의 명령을 해독하는 명령 해독기 회로가 FPGA에 포함된다.

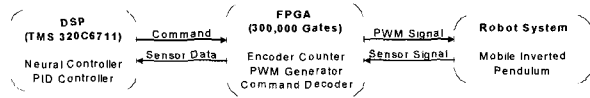


그림 8. 제어기의 하드웨어적 구성.

DSP와 FPGA간의 통신은 32비트 데이터 버스를 이용하여 이루어지며 제어를 위해 사용되는 각각의 명령들은 어드레스에 의해 구분된다. 사용된 DSP는 TI사의 TMS320C6711 이고, FPGA는 Altera사의 APEXII EP20K300EQC240이며, 그림 9와 같이 구성되었다.

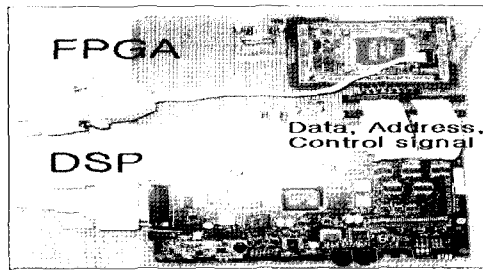


그림 9. DSP-FPGA 신경망 하드웨어 제어기.

4. 센서 신호처리

역진자의 각도를 측정하기 위해 저가의 자이로 센서가 사용되었다. 사용된 자이로 센서의 특성을 파악하기 위해 엔코더 신호와 자이로 센서 신호를 획득하여 비교해 보았다. 이때 장치를 진자처럼 동작하도록 하고 두 센서의 데이터를 비교해본 결과 그림 10과 같이 약 0.05초의 위상 지연이 발생하는 것을 볼 수 있다.

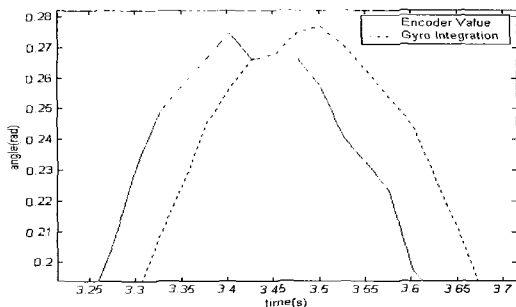


그림 10. 자이로 센서와 엔코더 신호 출력.

위상 지연을 보상하기 2차 lowpass IIR 필터를 설계하고 그림 11과 같이 진상 보상을 설계하여 사용하였다. 그 결과 그림 12와 같이 오차가 줄어들었음을 볼 수 있다.

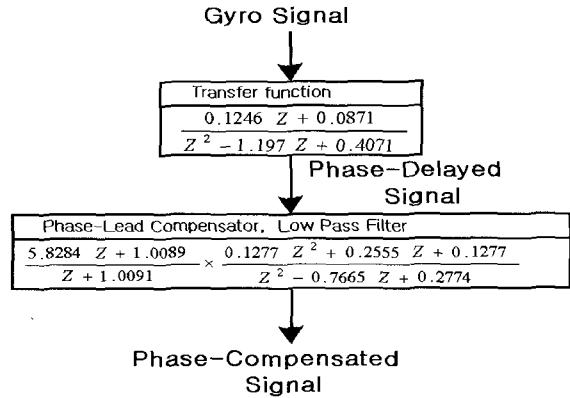


그림 11. 자이로 센서의 진상 보상기.

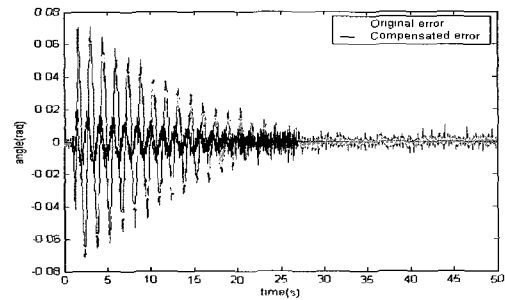


그림 12. 자이로 센서의 보상 전과 보상 후의 오차 비교.

5. 실험 결과

그림 13은 모바일 역진자 시스템의 사진을 보여 주고 있다.



그림 13. 모바일 역진자 시스템 실험 환경.

사람이 모바일 역진자 시스템 위에서 앞, 뒤로 무게 중심을 이동함으로써 모바일 역진자 시스템을 조종하는 실험을

하였다. 그림 14와 15는 각각 모바일 역진자 시스템의 위치와 각도 데이터를 나타내고 있다.

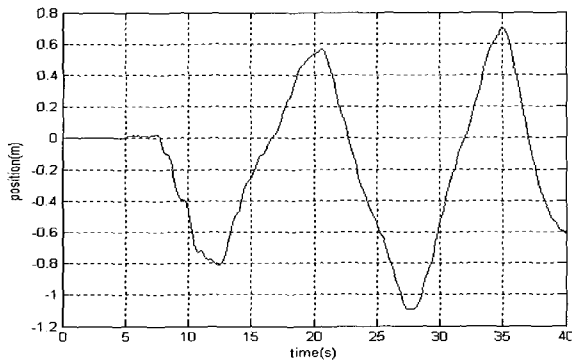


그림 14. 모바일 역진자 시스템의 위치.

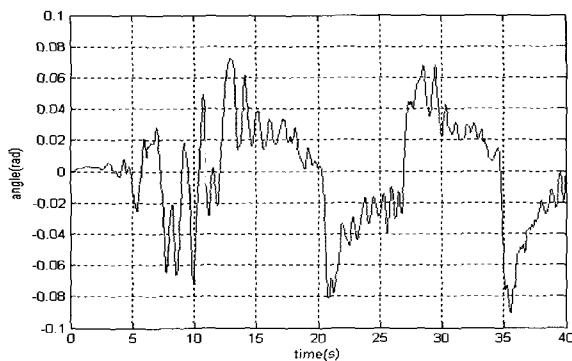


그림 15. 모바일 역진자 시스템의 각도.

모바일 역진자 시스템의 위치는 사용자가 조종 한 대로 움직이는 것을 볼 수 있다. 그리고 각도 데이터에서 확인 할 수 있는 것은 사람이 방향을 바꿀 때 마다 각도가 커졌다가 시스템이 이동하면서 각도도 점점 작아지는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 모바일 역진자 시스템을 응용하여 저가의 이동 수단을 개발하는 내용을 기술하였다. 사람이 타고서 시스템을 조종하는 실험을 성공적으로 수행함으로써 그 가능성을 확인할 수 있었다.

그러나 로봇의 각도를 측정하는 자이로 센서를 오랜 시간 동안 사용할 경우 센서의 드리프트 문제 때문에 시스템의 각도를 측정함에 있어서 오차가 발생하게 된다. 추후 연구 과제로는 가속도 센서, 틸트 센서를 자이로 센서와 융합함으로써 자이로 센서의 드리프트 문제를 해결하는 것이다. 또한 본 논문에 언급한 신경망 제어를 좀 더 효과적으로 적용하여 시스템의 중요한 요소인 안정성을 높임으로써 안정적이면서 저가인 1인용 운송 수단을 완성하는 연구가 추후에 계속될 것이다.

참고 문헌

1. T. H. Hung, M. F. Yeh, and H. C. Lu, "A pi-like fuzzy controller implementation for the inverted pendulum system," *Proc. of IEEE Conference on Intelligent Processing Systems*, pp. 218-222, 1997.
2. M. E. Magana, and F. Holzapfel, "Fuzzy-logic control of an inverted pendulum with vision feedback," *IEEE Trans. on Education*, vol. 41, no. 2, pp. 165-170, 1998.
3. S. S. Kim and S. Jung, "Hardware implementation of a real time neural network controller with a DSP and a FPGA board," *IEEE ICRA*, pp. 4639-4644, 2004.
4. S. S. Kim, T. I. Kim, K. S. Jang, and S. Jung, "Control Experiment of a Wheeled Drive Mobile Pendulum Using Neural Network," *IEEE Conf. on Industrial Electronics*, 2004.
5. B. J. Thibodeau, S. W. Hart, D. R. Karuppiah, J. D. Seeney, and O. Block, "Cascaded Filter Approach to Multi-Objective Control," *IEEE ICRA*, pp. 3877-3882, 2004.
6. S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network Inverse Control Techniques for PD Controlled Robot Manipulator," pp. 305-314, vol. 19, no. 3, *ROBOTICA*, 2002.

저자약력



〈김성수(a741103@hanmail.net)〉

- 1974년 12월 22일생.
- 2001년 경일대학교 제어계측공학과 졸업.
- 2003년 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사.

• 관심분야 : S.o.C 제어기 설계, DSP 및 마이크로프로세서 응용, 로봇틱스.



〈정슬(jungs@cnu.ac.kr)〉

- 1964년 9월 11일 생.
- 1988년 미국 웨인 주립대학 전기 컴퓨터 공학과 졸업.
- 미국 캘리포니아 데이비스 대학 전기공학

과 석사 박사 (지능 로봇 전공)졸업.
 • 1997년~현재 충남대 메카트로닉스공학과 부교수.
 • 관심분야 : 로봇 설계, 제작 및 제어, 지능 시스템 및 감성 공학, 임베디드 제어기 설계.