

자이로와 가속도 센서를 이용한 차륜형 독립진자 이동로봇 제어

The Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot Control Using Gyroscope and Accelerometer Sensor

유환신*, 박형배**

Hwan-Shin Yu*, Hyung-Bae Park**

요 약

본 논문은 비선형성이 내재된 모바일 역진자형 로봇 시스템의 제어기 성능을 개선하고, 위치와 속도제어를 위하여 두 개의 다른 휠로 구동되는 역진자형 타입의 모바일 로봇으로 모델링하였다. 이 시스템은 파라미터의 변화를 실시간으로 체크하고, 제어신호는 여러 상황에서 시스템이 원하는 상태를 유지하도록 변화하게 구성하였고, PI 제어기로 설계하였다. 시스템이 불안정하므로 시스템의 안전성 판별을 통하여 PI 제어기의 게인 값을 설계하였다. 위 실험 결과로서 수동 튜닝 방법 보다 더 좋은 적절한 방법의 성능을 얻을 수 있었다.

Abstract

This paper proposes the improvement of control performance in the wheeled inverted mobile robot system. and describes the modeling of a wheeled inverted pendulum type mobile robot driven by two different wheels for the position and velocity control.

The system is sensitive on the parameter variation, therefore control signal should change to maintain desired state of the system in every instant. we designed proportional-plus-integral controller for our system, After linearization, the system was still unstable, throughout stability analysis of the system, we designed the values of the gains of a proportional-plus-integral controller. From the experimental results, we can find that the performance of the proposed method is better than of the manual tuning method.

Key words : 역진자형 모바일 로봇(Inverted Mobile robot system), PI제어기(Proportional plus Integral controller)

I. 서 론

현재 화석연료의 고갈이 다가오는 시점에서 신재생에너지를 에너지원으로 하는 친환경 전기자동차의 주제가 수면위로 떠오르고 있다. 또한 최근의 대중교

통의 대체 이동수단으로 이동도립진자형의 두 개의 바퀴를 가지고 있는 차량에 대한 연구가 진행되고 있다.

작은 크기와 줄어든 중량은 에너지 절약에 효과적이고 차량의 접근이 제한된 좁은 거리를 빠르게 이동

* 호원대학교 자동차기계공학과(Howon University)

** 경기과학기술대학교 자동차과(Kyeonggi college of science and technology)

· 제1저자('주저자' First Author): 유환신

· 교신저자(Corresponding Author): 박형배

· 투고일자: 2012년 7월 24일

· 심사(수정)일자 : 2012년 7월 24일 (수정일자 : 2012년 8월 26일)

· 게재일자 : 2012년 8월 30일

할 수 있는 장점이 있다. 대중교통수단이 아닌 개인용 이동 수단을 살펴보면 Dean Kamen에 의해 발명된 Segway[1]가 있다. Segway는 플랫폼 위에 사람을 두 개의 바퀴로 균형을 유지하고 좁은 공간에서 안정적인 주행이 가능하다. 조종 손잡이를 가지고 있어 좌우로 방향 전환이 가능하고 제자리에서 360° 회전이 가능하다. 그리고 기울기를 측정하기 위해 자이로 센서와 기울기 센서로 구성되어 있다.

1984년 K.Furuta[2]는 삼중 도립진자의 안정화를 위해 컴퓨터 제어를 행하였으며, 1988년 Q. Feng[3]은 극점 배치점과 최적제어기법을 비교하여 도립진자의 안정화에 대한 시뮬레이션 결과를 발표하였다.

2007년 S.Y.S[4]대는 이동도립진자의 자세제어에 대하여 기구학적으로 불안정한 도립진자 시스템의 제어이득 결정을 위하여 LQR 제어를 선택하였다.

본 연구에서는 차륜형 도립진자 이동로봇으로 몸체의 기울기 측정을 위하여 상용화된 저가의 자이로 센서와 가속도 센서를 사용하고 각 센서의 주파수 특성을 분석하여 자이로 센서의 누적오차 보상 및 센서 융합을 위한 필터 설계법을 사용하여 제어하였다.

II. 차륜형 도립진자 이동로봇 시스템 구성

본 장에서는 차륜형 도립진자 이동로봇 시스템의 하드웨어 구성 및 메커니즘에 대한 수학적 모델링, 그리고 제어기 구성에 대한 전체시스템을 구성하였다.

2-1 차륜형 도립진자의 하드웨어 구성도

본 절에서는 기구부에 대한 하드웨어 구성으로서 제어 시스템, 몸체, 두 개의 바퀴와 동일 축에 연결된 두 개의 엔코더 내장형 모터, 자이로 센서, 가속도 센서로 이루어져 있다. 제어시스템은 Micro Controller 인 Atmel 사의 ATmega 128을 모듈화한 ntc의 AM-128 을 사용하였고, 각도를 측정하기 위한 센서인 자이로 센서와 가속도 센서는 ntc 사의 AM-GYRO 시리즈와 AM-3AXIS 시리즈를 사용하였다. 모터제어를 위하여 H 회로를 내장하고 있는 L298n 모터제어

용 드라이버를 사용하였고 DC 모터는 50 : 1의 기어비를 가진 디엔지위드사의 제품 RB-35GM+Encoder 11TYPE(12V)를 사용하였다[6]. 시스템 구동을 위한 전원부는 배터리를 이용해 따로 제작하지 않고 UNION ELECOM 사의 제품 UP75512 12V 6.2A 제품을 사용하였다.

2-2 차륜형 도립진자의 제어기 구성도

본 시스템의 제어부는 데이터 수집과 시스템의 응답 그리고 디버그를 하기 위한 호스트부, 호스트와 데이터 통신을 하고 자이로 센서와 가속도 센서의 데이터를 수집하고 처리하며 작동기인 모터를 PWM으로 구동하고 작동기의 움직임을 엔코더를 통해 측정하는 ATmega 128 을 사용하는 마이크로 컨트롤러부, 자이로 센서와 가속도 센서로 각기 측정된 데이터를 마이크로 컨트롤러 부에 전달하는 센서부, 기구의 움직임을 좌우하는 작동기부로 구성되어 있다. 센서부의 측정값은 컨트롤러부에서 10bit ADC 를 이용해 1ms 를 주기로 측정하며 호스트부와 데이터 수집 또는 디버그를 위해 10ms 를 주기로 데이터 통신을 한다. 작동기의 구동은 10bit Fast PWM 모드를 이용해 구동하며 모터의 안정적인 구동을 위해 주파수를 최대로 하였다. 그림 1은 센서부와 마이크로 컨트롤러부 그리고 모터 드라이버를 하나의 보드에 탑재한 구성된 시스템이다.

2-3 차륜형 도립진자 시스템의 수학적 모델링

역진자형 모델의 수학적 모델링은 2차원 평면에서 바퀴와 연결된 도립진자를 나타내고 모형의 도립진자는 적당한 제어력이 항상 작용하지 않으면 항상 넘어지려고 하는 점에서 매우 불안정한 시스템이다. 이 진자가 2차원 평면에서 x, y 축으로만 움직이는 문제만을 고려한다. 진자의 막대와 수직을 이루는 각을 θ 라 하고 진자의 무게중심, 즉 축으로부터 $\frac{L}{2}$ 만큼 떨어진 점의 좌표를 x_g, y_g 라고 하면[7],

$$x_g = a + \frac{L}{2} \sin\theta, y_g = \frac{L}{2} \cos\theta \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 또 무게중심에 대한 진자막대의 회전운동은

$$\ddot{\theta} = V l \sin\theta - H l \cos\theta \quad (2)$$



그림 1. 차륜형 도립진자 이동로봇의 하드웨어 구성도
Fig. 1. The hardware schematic diagram of the Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot

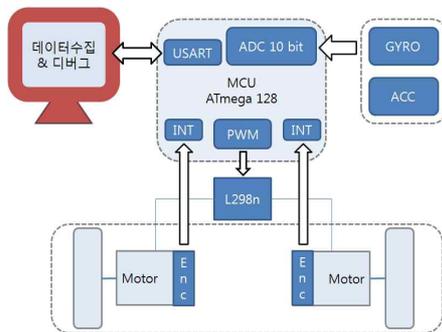


그림 2. 차륜형 도립진자 이동로봇의 제어기 구성도
Fig. 2. The control system schematic diagram of the Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot

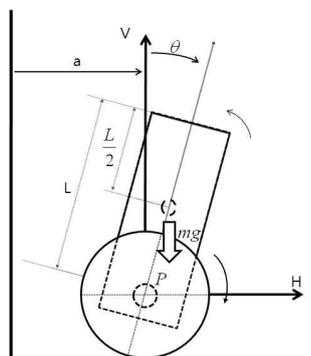


그림 3. 차륜형 도립진자 이동로봇의 좌표계 정의
Fig. 3. The coordinate define of the wheels inverted pendulum robot system.

이다. 식(2) 에서 I는 무게중심에 대한 진자막대의 관성 모멘트를 나타내는 것이다. 진자막대의 축으로부터 무게중심까지의 거리 $\frac{L}{2}$ 을 l 이라 두고, 진자막대의 무게중심의 수평운동 H 는

$$H = m \frac{d^2(x + l \sin\theta)}{dt^2} \quad (3)$$

이 되고, 수직운동 V는

$$V - mg = m \frac{d^2(l \cos\theta)}{dt^2} \quad (4)$$

로 주어지며 이때 바퀴의 운동은 바퀴의 질량을 M, 바퀴의 수평축으로 가해지는 힘을 u 라고 할 때

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = u - H \quad (5)$$

로 표현 할 수 있다. 수평운동은

$$(M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} = u \quad (6)$$

으로 얻을 수 있다. 그리고 수직과 수평 움직임을 표현한 식으로 표현하면

$$\ddot{\theta} = mlg\theta - l(m\ddot{x} + ml\ddot{\theta}) \quad (7)$$

의 운동방정식을 얻을 수 있으며 식(7)로부터

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + ml\ddot{x} = mlg\theta \quad (8)$$

를 얻을 수 있다. 식(8)을 무게중심에 대한 수직축 의 작은 무게중심에 대한 진자의 관성모멘트를 고려 하지 않으면

$$ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x} = mlg\theta \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

Ⅲ. 제어기 설계

본 장에서는 차륜형 독립진자 이동로봇에서 측정되는 각속도의 정밀성을 높이기 위하여 필터설계 및 기구부 자세제어에 대한 제어기를 설계하였다.

3-1 필터 설계

자이로 센서와 가속도 센서로 각도를 추정해 나갈 때 그 특성을 고려하여 주로 두 개의 센서를 병합하여 사용한다. 가속도 센서와 자이로 센서는 서로 특성이 다르지만 상호 보완이 가능하여 서로 융합하여 사용이 가능한데 필터링 기법 중에 칼만 필터를 사용하였다.

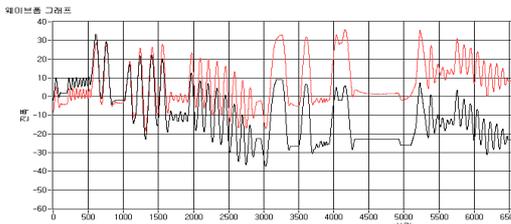


그림 4. 자이로센서의 각도와 실제 각도와의 차이

Fig. 4. The error of gyroscope sensor and real angle.

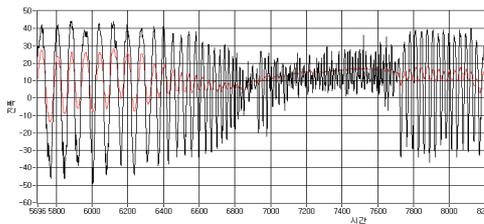


그림 5. 기구의 빠른 움직임 하에서 가속도 센서의 각도와 실제 각도

Fig. 5. The angle of acceleration sensor and real angle in past moving of kinematics.

그림 4와 그림 5에서 보면 자이로 센서로 각도를 추정한 값은 그 추세를 거의 정확히 반영하지만 누적되는 자이로 센서의 오차로 인해 측정 결과가 실제값과 점점 벌어지게 된다. 가속도 센서로 각도를 추정해낸 결과는 저주파에서는 그 추정 값이 실제 각도와 거의 일치하지만 고주파수의 움직임을 보일 때의 특성이 좋지 않다.

센서 상호간에 이를 보완하기 위하여 위와 같은 필터를 설계하였다. 위의 필터는 로우 패스 필터링한 가속도 센서의 각도 추정 값을 자이로센서의 각도 추정 값의 변동이 적을 때에 계인 값의 변화에 따라 가속도 센서가 추정한 각도에 맞춰나가는 방식으로 설계하였다.

3-2 기구의 자세제어

기구의 자세제어 원리는 기구가 일정 각도 기울어졌을 때 모터에서 기울어진 각도 만큼 기구의 각도를 일으켜줘야 하는 힘이 필요하고, 기구의 무게중심의 위치와 P점 사이를 이은 선이 지면과 직각을 이룰 때 기구의 무게중심에 남은 힘과 모터에 가해진 힘이 평행을 이루면 진자는 안정적으로 서 있어야 한다. 이를 위해 가장 잘 알려진 PID 제어를 사용한다. PID 제어를 통하여 바퀴의 속도를 센서를 이용해 진자의 이동하는 각속도와 비교하여 비례제어기는 상승시간을 감소시키는 효과를 가지고 있어 상승시간을 줄여 주나 결코 제거할 수는 없고 적분제어는 정상상태오차를 제거하는 효과가 있으나, 과도응답 상태를 더욱 더 나쁘게 할 수도 있다. 미분제어기는 시스템의 안정도를 증가시키는 효과가 있고 오버슈트를 줄여 주는 효과와 과도응답을 향상시키는 효과도 있다. 이를 도식화 하여 나타내면 아래와 같다[5].

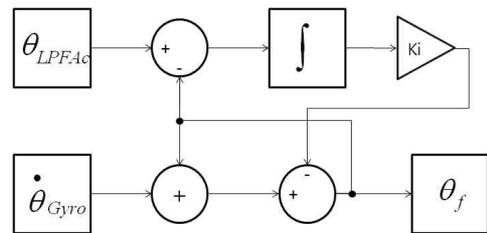


그림 6. 오차 적분제어

Fig. 6. Error Integrated control

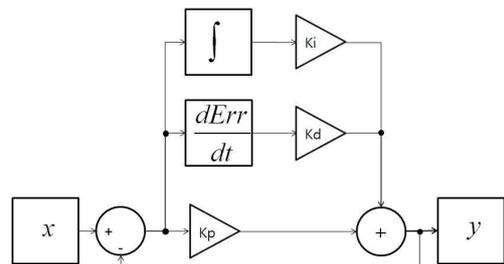


그림 7. PID 제어기

Fig. 7. PID controller

IV. 실험 결과

4-1 기초 실험

본 논문에서 기초실험으로 가속도 센서와 자이로 센서를 이용하여 기구의 각도를 측정하여 이 측정된 데이터를 이용해 제어를 해 보았다. 인터넷이나 여러 전문서적에서도 알려주는 바와 같이 자이로 센서와 가속도 센서를 각각 따로 사용할 시에 그 사용 범위가 매우 한정적인 것을 알 수 있으며 자이로 센서와 가속도 센서 사이의 오차를 적분제어 하는 것 만으로도 실제 각도의 값을 추정해 나가는 것을 볼 수 있었다.

그리고 표 1 과 같이 모터의 전진과 후진 시에 좌우 모터에 대한 최소 동작 듀티비와 최대 각속도에 대한 실험을 통하여 구하였고 이것을 실제 제어기 설계 시에 기초 데이터로 활용하였다.

4-2 PID 제어기 실험 결과

자이로 센서는 센서 자체를 회전시키면 센서가 회전한 각속도 ($\dot{\theta}$)를 전압으로 출력한 Mems 센서를 모델화 한 NTC 사의 2축 자이로 센서로서 기구부를 회전시켜서 얻은 자이로 센서의 출력 전압 값을 ATmega 128 의 ADC를 이용해 얻은 출력결과와 실제 기구가 회전한 각도를 실험한 결과이다.

그림 8과 그림 9는 실제 측정된 각도와 가속도 센서와 자이로 센서를 활용하여 측정된 결과에 대한 비교 분석결과이다.

표 1. 모터 구동범위 실험 결과

Table.1 The experiment result of driving range in motor

모터	최소동작 Duty	최대 각속도
좌 전진	65.88%	608 °/sec ~ 664 °/sec
우 전진	61.58%	608 °/sec ~ 664 °/sec
좌 후진	58.26%	608 °/sec ~ 664 °/sec
우 후진	48.68%	608 °/sec ~ 664 °/sec

실제 각도를 추정해내는데 있어서 가속도 센서로 각도를 추정해낸 결과는 매우 놀랍다. 그래프를 쭉 훑어보면 가속도 센서로 추정된 각도 값의 추세가

실제 각도와 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 하지만 센서 측정값에 노이즈 성분이 합쳐져 있음을 알 수 있는데 자세히 보면 그 주파수가 매우 높아 보인다. 이는 Low Pass Filter 처리를 하여 가속도 센서의 출력 각도에서 노이즈 성분을 충분히 제거할 수 있을 것으로 기대할 수 있었다.

그림 10은 PID 제어기를 활용한 실험결과로서 자세제어에 대한 응답결과가 안정적으로 플랫폼이 유지하면서 데이터에 대한 결과로 매우 안정적으로 얻을 수 있었다.

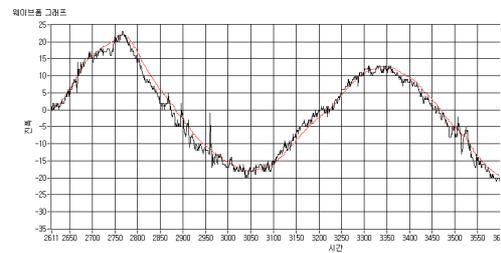


그림 8. 가속도 센서로 측정된 각도와 실제 각도의 비교

Fig. 8. The compare of real angle and measuring angle using acceleration sensor

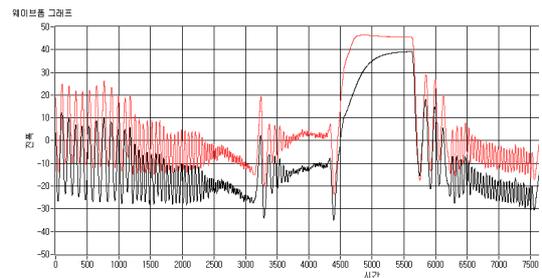


그림 9. 가속도 센서와 자이로 센서를 융합한 각도와 실제 각도의 비교

Fig. 9. The compare of real angle and measuring angle using gyroscope sensor

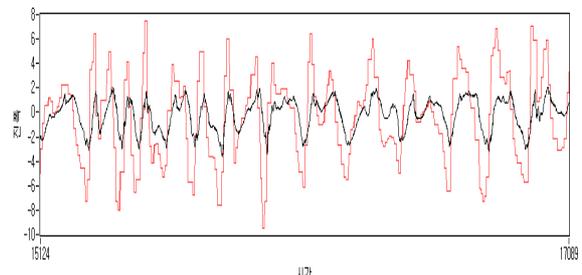


그림 10. 비례 미분 제어를 이용한 자세제어 결과
Fig.10. The result of attitude control using PID controller.

V. 결 론

본 논문에서는 스스로 자세를 제어하는 2륜 전동 장치에 관한 연구를 진행하였다. 2륜 전동장치를 구동함에 있어서 각도를 추정하는데 자이로 센서나 가속도 센서의 단일 사용은 자이로 센서의 시간이 경과함에 따라서 커지는 드리프트 오차와 저주파대 움직임에서의 불리함과 가속도 센서의 고주파대에서의 불리함, 그리고 잡음이 포함된 결과로 인하여 각각의 단일 사용이 가능한 하였지만 제어에 적합하지 않았으며, 두 개의 센서를 융합하여 사용하였을 때에는 단일로 사용하였을 때 보다 각도를 측정하는 능력이 매우 우수하였다.

센서를 융합하는 방법에는 여러 가지가 있었으나, 구현하기 가장 용이한 방법 중에 보상필터와 이와 유사한 오차적분제어 방법을 적용하였으며 가속도 센서와 자이로 센서간의 오차를 적분 제어하는 방법을 사용하였다.

그리고 플랫폼의 자세제어를 하기 위하여 PID 제어를 적용하여 제어한 결과로서 플랫폼이 안정적으로 자세제어를 할 수 있었고, 튜닝된 PID 제어기 게인 값이 시스템 제어에 매우 안정적으로 제어됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 호원대학교 교내 학술연구비에 의해 조성된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.hizook.com/blog/2010/06/16/tbot-reconfigurable-140kg-balancing-robot-us-military>.
- [2] K. Furuta, T. Ochiai and N. Ono, "Design and Simulation of a triple inverted pendulum", *International Journal of Control*, Vol.39, No.6, pp. 1351-1366, 1984.
- [3] Q. Feng and K. Yamafuji, "Design and Simulation of Control Systems of an Inverted Pendulum", *Roboutica*, Vol.6, pp.235-241, 1987
- [4] S.Y.S대, S.H.Kim, S.H.Lee, S.H.Han and H.S.Kim, "Simulation of Attitude Control of a Wheeled Inverted Pendulum", *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 2264~2269, 2007.
- [5] S.jung and S.S.Kim, "Control Experiment of a Wheel-Driven Mobile Inverted Pendulum using Neural Network", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.16, No.2, pp. 297~303, 2008
- [6] F.Grasser, A.D.Arrigo, S.Colombi and A.C.Rufer,"JOE: A Mobile Inverted Pendulum", *IEEE Trans. Indus. Elec.*, No.1, pp.107~114, 2002
- [7] B.Browning, P.E.Rybski, J.Searock and M.M.Velso,"Development of a Soccer-Playing Dynamically-Balancing Mobile Robot", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.1752~1757,2004

유 환 신 (劉桓臣)



1993년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)

2001년 2월: 국민대학교 자동차공학과 (공학석사)

2006년 2월: 국민대학교 자동차공학과 (공학박사)

2006 ~ 현재 : 호원대학교 자동차기계공학과 부교수
관심분야 : car electronics

박 형 배 (朴亨培)



1993년 2월: 서울산업대학교 기계공학과 (공학사)

1996년 2월: 홍익대학교 기계공학과 (공학석사)

2003년 8월: 홍익대학교 기계공학과 (공학박사)

2005 ~ 현재 : 경기과학기술대학교 자동차과 부교수
관심분야 : 유압 시스템 제어