

모바일 역진자의 효율적 수평유지 기법

An Efficient Horizontal Maintenance Technique for the Mobile Inverted Pendulum

윤재무, 이재경, 이장명*
(Jae-Mu Yun, Jae-Kyoung Lee, and Jang-Myung Lee)

Abstract : A new dynamic balancing algorithm has been proposed to minimize the number of sensors necessary for the horizontal balancing of the mobile inverted pendulum while maintaining the same level of the commercial performance. The inverted pendulum technique is getting attention and there have been many researches on the Segway since the US inventor Dean Kamen commercialized. One of the major problems of the Segway is that many sensors are required for the control of the Segway, which results in the high price. In this research, a single gyro and a tilt sensor are fused to obtain the absolute tilt information, which is applied for the control of the mobile inverted pendulum. A dynamic balancing technique has been developed and applied for a robust control system against disturbances. The intelligent handling and stable curving of the Segway as a next generation mobile tool are verified with a human loading.

Keywords : mobile inverted pendulum, gyro sensor, tilt sensor, segway

I. 서론

최근 에너지 고갈 및 환경오염이 사회적 문제점으로 대두되고 있는 가운데 자동차의 연소방식, 연료 공급 방식, 배기가스 처리 등 친환경 엔진 개발 및 성능 향상을 위한 노력이 많이 이루어지고 있다. 하지만 기존의 운송 수단은 연료를 사용하기 때문에 언제나 환경에 대한 규제가 적용되기 마련이다. 이에 최근에는 연료 절약형으로 하이브리드 자동차에 이어 연료전지 자동차 및 전기자동차가 상용화되고 있지만 비교적 높은 가격과 함께 시간이 지날수록 증가하는 교통체증 문제로 인해 많은 국가에서는 도로가 포화상태에 이르고 있다. 이에 가격이 저렴하고 편리하게 이용할 수 있는 운송 수단으로 자전거를 많이 이용하고 있으나, 운전이 모든 사람들에게 용이하지 않고, 오르막길이 많은 거리를 운행하거나, 장거리 이동 시에는 신체적 피로가 누적되어 이동 거리에 있어 어느 정도 제한을 받게 된다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 2001년 미국의 발명가 Dean Kamen은 자전거를 대신할 차세대 운송 수단인 세그웨이(Segway)를 상업화하기 시작하였다. 세그웨이는 지금까지의 모바일 이동수단의 상식을 벗어난 이동수단으로써 자전거의 구조와는 달리 양 옆으로 부착된 두 개의 바퀴만으로도 오뎅이처럼 스스로 균형을 잡으며 넘어지지 않고 주행할 수 있다. 또한, 주행 시 보조바퀴가 요철 부분에 걸려 주 바퀴가 헛도는 현상이 없어 안정적인 주행이 가능하다. 또한, 브레이크나 Accelerator 페달 없이 사람의 신체 기울임으로 주행이 가능하다. 이러한 세그웨이는 성능이 우수하여 미국의 NASA를 포함한 많은 연구기관에서 모바일 플랫폼으로

사용되고 있는 실정이다[1,2]. 하지만, 다수의 고가 센서와 마이크로프로세서를 사용하므로 가격이 비싼 단점으로 인해 대중적으로 사용하기에 어려움이 많다. 이에 대비하여 저가의 상용화된 센서를 이용하고 신호처리를 통해 센서의 성능을 향상시키고, 고급 제어기인 신경망 제어기를 이용하여 시스템의 안정성을 높이는 연구가 진행되고 있다[3,4].

본 논문에서는 새롭게 제시한 동적 수평유지 알고리즘을 통해 센서와 마이크로프로세서의 개수를 줄임과 동시에 상품성과 유사한 성능을 발휘할 수 있는 모바일 역진자의 구조 및 제어기법을 소개하고자 한다.

II. 전체시스템의 구성

1. 모바일 역진자의 구조

모바일 역진자는 2개의 BLDC모터로 구동되며, 각각의 모터에는 인코더가 부착되어 실시간으로 위치를 측정하게 된다. 또한 자이로 센서와 기울기 센서를 이용하여 플랫폼의 각도를 측정할 수 있다. 이와 같은 형태의 로봇은 이전에 소개된 바 있다[5-8].

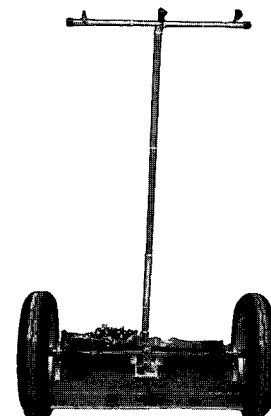


그림 1. 모바일 역진자의 구조.
Fig. 1. Structure of the mobile inverted pendulum.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 11. 20., 채택확정 : 2007. 3. 23.

윤재무, 이장명 : 부산대학교 전자공학과

이재경 : 충주대학교 정보제어공학과

(yunjaemu@pusan.ac.kr/jklee@cjnu.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

이것은 동적인 균형(dynamic stabilization)을 맞추는 기술을 적용하여 양쪽에 부착된 두 개의 바퀴 만으로 넘어지지 않고 주행할 수 있다. 인간의 귀속 달팽이 관이 기울어짐을 감지 하듯이 자이로 센서와 기울기 센서 그리고 소프트웨어와의 조합으로 실시간에 기울어짐을 인식하고 BLDC(Brushless DC) 모터를 제어하여 스스로 균형을 잡는다. 가속장치나 제동 장치는 따로 없으며, 사람이 모바일 역진자에 올라탄 체 몸을 앞으로 기울이면 전진하게 되고, 똑바로 서면 정지하고, 뒤로 몸을 기울이면 후진하게 된다. 핸들의 좌측에 부착된 Knob를 통해 방향을 전환할 수 있다. 모바일 역진자가 정지해 있을 때는 제자리에서 180°회전도 가능하다.

그림 1은 모바일 역진자의 구조를 나타내고 있다. 자이로 센서는 초당 86,960번 각속도 정보를 12Bit A/D(Analog to Digital) 변환 후, 이를 적분하여 각도 정보를 제공하며, 실시간 로봇의 기울기 각을 SPI(Serial Peripheral Interface) 통신을 통해 main DSP(Digital Signal Processing)로 보낸다. Main DSP는 초당 5,560번 PID 제어를 통해 BLDC 모터로 구동하게 된다. 전원으로는 60V(1.2V×50EA, 5000mA/h) 니켈 카드뮴 전지를 사용하였다. 양쪽모터가 구동되지 않을 때는 0.3A, 주행 시에는 평균 6A의 전류가 흐른다. 전기모터는 로터리 인코더 부착형 BLDC 모터 200W를 2개 사용하고 있다. 원활한 토크를 유지하기 위해 30:1의 기어 박스를 BLDC 모터와 결합하였다. 그리고 실험을 위해 모터의 구동 스위치를 따로 두었다.

2. 기존시스템과 제안된 시스템

기존의 상용품은 한 면의 길이가 3인치인 정사각형 박스 내부에 회전 속도를 측정하기 위해 코리올리 효과를 이용하는 3개의 자이로 센서와 2개의 기울기 센서가 내장되어 있다.

모바일 역진자는 탑재되어있는 5개의 마이크로프로세스를 통해 다섯 개의 센서로부터 끊임없이 자료를 비교하여 어떤 센서의 자료가 잘못되었는지 결정하고 이 조건에서 가장 신뢰성이 높은 센서의 자료를 사용해서 균형을 유지하고 있다. 5개의 마이크로프로세서로 구성된 메인보드는 2쌍이 구비 되어 있어 양쪽 보드가 동시에 센서로부터 데이터를 처리하여 광학으로 통신을 한 후 상호 신호를 비교하면서 한쪽 보드의 신호처리 결과가 좋지 않거나 마이크로프로세스가 멈추었을 때 여분의 보드를 통해서 올바른 정보로 활용하고 있다.

BLDC 모터는 두 쌍의 독립적인 권선으로 구성되어 있고 이것들은 각각의 메인보드에서 제어가 되도록 설계되어 있다. 정상상태에서는 두 개의 권선은 모터를 서로 공유하지만 고장을 일으킨 상태에서는 모터는 즉시 고장 난 부분을 정지시키고, 나머지 권선을 사용하여 모바일 역진자를 안정적으로 제어한다. 부착된 BLDC 모터는 8,000rpm까지 작동하도록 맞추어져 있고, 강자석으로 잘 알려진 네오디뮴을 회전자로 사용하는 모터는 작은 크기에 비해서 큰 힘을 낼 수 있도록 설계되어져 있다. 근본적으로 BLDC 모터는 증가형 인코더를 사용하여 위치 및 속도를 제어하나, 모터의 고장 여부를 신속히 판단하기 위해 회전자의 위치를 실시간 감지하는 여분의 홀 센서가 부착되어 있다. 또한 자이로 센서의 drift 오차를 줄이기 위해 온도센서가 각각의 보드에 구비 되어 있어 온도 변화에 따른 자이로 센서의 drift 오차를 실시간 보정해 주기 때문에 자이로 센서의 정밀도를 한층 높이도록 설계

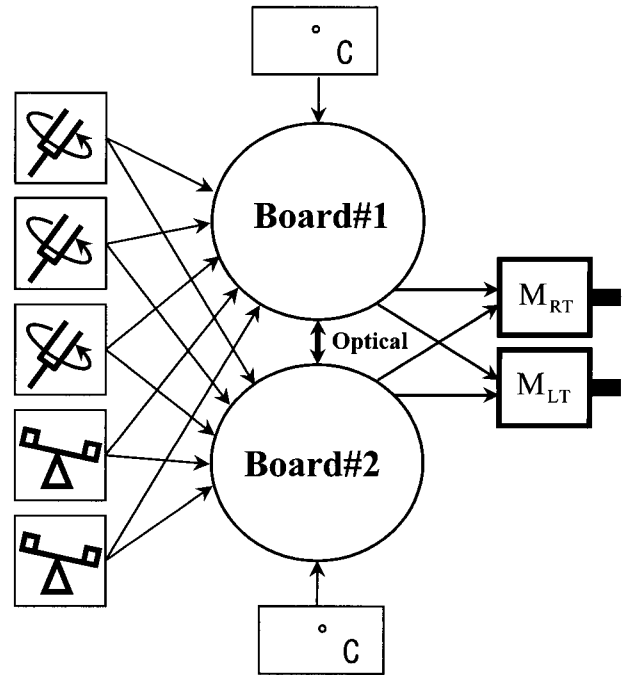


그림 2. 기존 시스템의 구조.
Fig. 2. Structure of a conventional system.

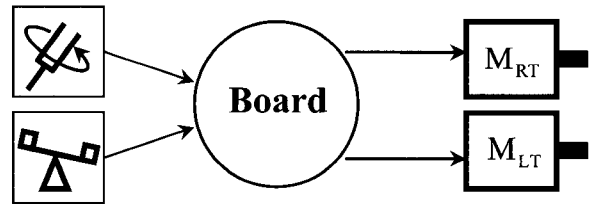


그림 3. 제안된 시스템의 구조.
Fig. 3. Structure of a proposed system.

되었다. 상기 시스템은 자이로 센서의 drift 오차를 온도 센서를 통해 먼저 보상하고, 모바일 역진자가 주행 시에 마이크로프로세서는 모든 센서의 기울기 정보를 동시에 감지한 후 가장 신뢰가 높은 센서의 기울기 정보를 참값으로 판단하여 제어하는 구조이다. 참값을 판단하는 척도로서 모터에 부착된 인코더의 펄스를 계산하여 모바일 역진자의 주행과 기울임에 따른 속도와 가속도 정보를 통해 5개의 센서와 상호 융합하고 동역학적 메커니즘에 의해 가장 신뢰가 높은 센서를 선정하게 된다. 그리고 나머지 센서는 실시간 기울기 정보를 갱신하게 된다. 이러한 방식은 기울기에 대한 신뢰성은 높으나 고가의 센서를 많이 사용하고, 복수개의 보드를 통해 신뢰성을 평가하므로 가격이 비싼 단점이 있다. 또한, 구체적인 동적 기울임 감지 및 제어기법은 센서의 특성과 시스템의 특성에 따라 정해지며 특정 제작회사마다 고유의 기술로 임베디드 시스템으로 내장시켜두고 있다.

그림 3은 본 논문에서 새롭게 제안한 시스템의 구조를 나타내고 있다. 가장 큰 특징으로는 하나의 기울기 센서와 하나의 자이로 센서를 사용하고 있는 것이다. 기울기 정보는 자이로 센서를 통해 획득되며, 자이로 센서의 drift에 의한 누

적오차를 기울기 센서의 정보를 적분하여 보정하는 방식을 취하고 있다. 이러한 구조는 센서의 개수를 줄일 수 있고, 시스템이 간단하여 저렴하게 구성할 수 있는 장점이 있다. 중앙 컨트롤러에서 SPI 통신을 통해 2개의 센서와 2개의 모터 컨트롤러로 통신을 한다. 중앙 컨트롤러는 실시간 기울기 센서와 자이로 센서의 정보를 입력 받아 신호처리를 행한 후 모터 컨트롤러로 회전 방향과 토크에 관한 정보를 지속적으로 보내어 BLDC 모터를 제어하게 된다. 자이로 센서의 drift 및 양자화 오차가 존재하더라도 기울기 센서를 통해서 실시간 보정하기 때문에 추가적인 온도 센서가 불필요하다. 또한 외란이 존재하더라도 기울어진 방향에 대해 기울기 센서의 정보가 적분되어 자동으로 보정되기 때문에 단순하면서도 효과적인 구조라고 할 수 있다.

3. 모바일 역진자의 기구학

모바일 역진자는 그림 4와 같이 위치와 방향을 가지는 벡터 $\vec{P}=[x, y, \theta]^T$ 로 정의 된다. 일반적으로 모바일 역진자는 이동로봇과 같은 구조로서 선형속도와 회전각속도는 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다[9-11].

$$u = \frac{1}{2}(u_{LT} - u_{RT}) \tag{1}$$

$$\omega = \frac{1}{L}(u_{LT} + u_{RT}) \tag{2}$$

그림 4와 같이 좌표계를 설정하면 이동로봇의 자코비안 (3), (4)를 얻을 수 있다. 여기서 u 는 이동로봇의 진행방향 속도이며, ω 는 이동로봇의 중심축에 대한 회전각속도를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{4}$$

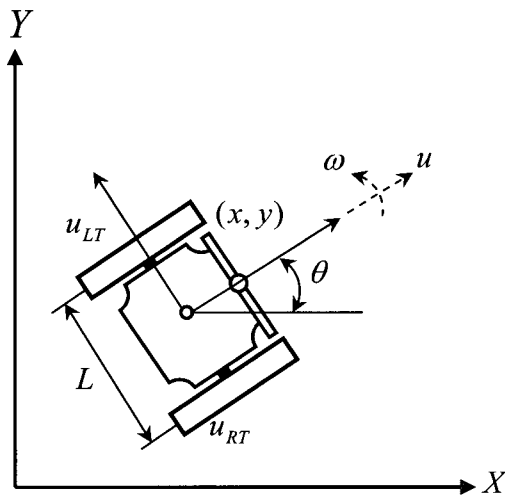


그림 4. 모바일 역진자의 기구학.
Fig. 4. Kinematics of the mobile inverted pendulum.

또한, (3), (4)를 실제의 바퀴의 선형속도와 회전각속도의 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{LT} \\ u_{RT} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서 L 은 두 바퀴 사이의 거리이다. 각 구동 바퀴의 인코더 신호로부터 이동로봇의 위치를 계산한다. 또한, 제어에서 계산되는 로봇의 진행속도와 회전각속도는 역기구학에 의해 각 바퀴의 속도로 변환되어 위치와 방향을 제어한다.

III. 자이로 센서와 기울기 센서

1. 자이로 센서와 기울기 센서의 특징

기울기 센서는 내부 구조가 액체 또는 스프링 형태로 되어 있어 외부의 작은 충격에도 가속도 성분이 더해져 외란에 민감하게 반응하기 때문에 실질적인 기울기 값을 획득하기에는 다소 어려운 점이 많다. 하지만 기울기 센서는 지구의 중력에 대해 절대적인 기울임 값을 측정할 수 있는 장점이 있다. 외란에 강인한 회전 측정 센서로써 자이로 센서를 사용할 수 있으나, 자이로 센서의 근본적인 목적은 각속도를 측정하는 데 있다. 각속도를 마이크로 프로세스를 통하여 실시간 적분 후 원하는 각도(기울어짐) 정보를 얻을 수 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 양자화, 온도, AD 변환 등의 요인에 의해 누적오차가 발생하는 단점이 있다.

모바일 역진자의 수평유지를 위해 자이로 센서를 단독으로 사용하여 제어하는 경우 초기에는 균형이 잘 잡힌 채 오뎅이처럼 서 있지만 시간이 지남에 따라 자이로 센서의 누적 오차로 인해 점차적으로 한쪽 방향으로 기울어지게 된다. 그리고 기울기 센서를 단독으로 사용하여 제어하는 경우 중력에 대하여 기울임 각도를 절대적으로 알 수 있어 제어가 용이하나, 모바일 역진자가 심하게 요동하게 된다. 이것은 지금까지 개발된 기울기 센서의 내부 구조는 액체 또는 스프링 방식을 사용하므로 기울임 각도뿐만 아니라 가속도에도 민감하게 반응하기 때문이다. 반면 각속도 센서로 주로 사용하고 있는 자이로 센서는 가속도 부분에 민감하게 반응하지 않기 때문에 각속도 정보를 적분하여 절대적인 기울기 정보로

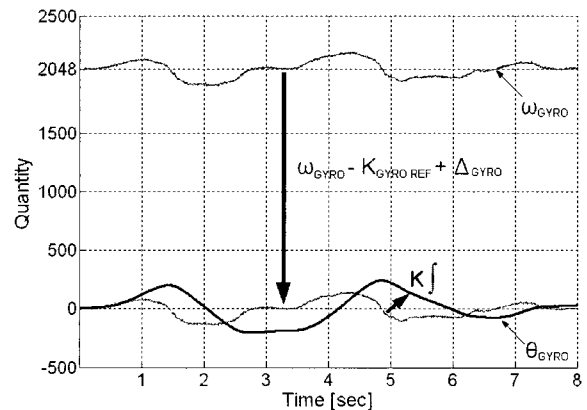


그림 5. 자이로센서 파형.
Fig. 5. Gyro sensor's waveform.

활용되고 있다. 하지만 시간이 지남에 따라 발생하는 누적오차를 실시간 보정해 주어야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 자이로 센서와 기울기 센서를 상호 융합하여 실시간 자이로 센서의 누적오차를 보상하여 안정적으로 모바일 역진자를 제어하고자 한다.

3. 각도 변환 알고리즘

근본적으로 자이로 센서는 각속도 정보를 출력한다. 이것을 각도 정보로 변환하기 위하여 각속도 정보를 적분한다. 그림 5는 12bit A/D 변환기를 이용하여 각속도 정보를 각도 정보로 변환하는 알고리즘을 파형으로 나타내고 있다.

자이로 센서의 각속도 정보를 적분하여 각도 정보로 변환하는 과정을 이산 시간으로 나타내면 다음과 같다.

$$\theta_{GYRO}[k] = K_{GYRO} \sum_{j=1}^k (\omega_{GYRO}[j] - K_{GYROREF} + \Delta_{GYRO}[j]) \quad (6)$$

여기서 자이로 센서의 출력 정보인 각속도, ω_{GYRO} 는 센서가 특정 방향으로 회전하지 않고 고정되어 있으면 12bit A/D 변환에 있어 중간 값인 2048을 출력하고, 자이로 센서가 특정 방향으로 회전하면 중간 값인 2048에서 양의 값 또는 음의 값만큼 감소되어 출력된다. 각속도 정보를 각도 정보로 변환하기 위하여 자이로 센서의 각속도, ω_{GYRO} 에서 기준치 상수, $K_{GYROREF}$ 값인 2048을 빼면 0레벨 정보로 변환된다. 미소 보정치, Δ_{GYRO} 는 온도, 양자화, A/D 변환 오차 등으로 기준치 상수가 중앙 값인 2048을 벗어났을 때 미소하게 보정해주는 값이다. 이것은 근본적인 자이로 센서의 bias drift error에서 비롯되는 것이다[12]. 이후 적분 과정을 행한 후 이득상수, K_{GYRO} 를 곱해 주면 원하는 각도 정보로 변환된다. 자이로 센서의 각, θ_{GYRO} 정보를 얻기 위한 이득상수, K_{GYRO} 는 1/sampling time으로 둔다.

3. 자이로 센서의 누적오차

그림 6은 모바일 역진자를 정상적으로 작동시킨 상태에서 모터에 전원을 인가하지 않고 사용자가 10초 간격으로 핸들을 앞 뒤로 15deg 정도 기울였을 때 각도 변화를 판독한 결과를 보여준다. 자이로 센서와 기울기 센서는 거의 유사한 파형을 나타내고 있으나, 30초가 경과한 후에 기울기 센서는 초기 상태와 같이 0deg를 나타내는 반면 자이로 센서는 누적오차가 5deg 정도 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 자이로 센서를 단독으로 사용하여 모바일 역진자를 제어하는 것은 초기에는 제어가 가능하나, 시간이 지날수록 누적오차로 인해 제어가 어렵게 됨을 알 수 있다.

4. 기울기 센서의 특성

그림 7은 앞의 조건과 동일하게 취한 후, 모바일 역진자의 핸들을 정, 역 방향으로 천천히 기울이거나 (2초~8초 구간) 빠르게 기울여 (8초~11초 구간) 본 실험의 결과를 보여준다. 처음 8초 동안은 자이로 센서와 기울기 센서의 출력 값은 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 8~11초 구간에서는 4회 정도로 빠르게 정, 역 방향으로 모바일 역진자의 핸들을 기울인 결과 자이로 센서는 기울인 각도에 정확하게 수렴하는 반면 기울기 센서는 가속도 향이 포함되어 실제 각도보다 2배 이상 큰 기울기 값으로 나타났다. 따라서 기울기 센서를 단

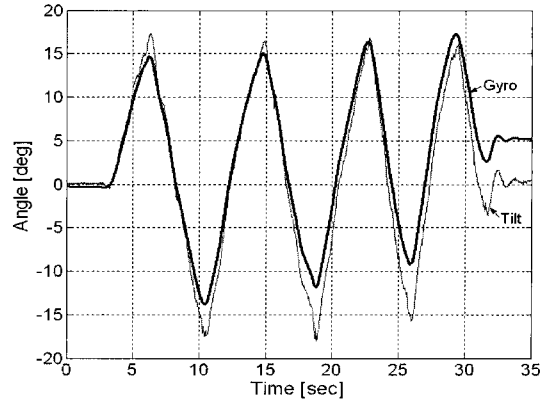


그림 6. 자이로 센서의 누적오차.
Fig. 6. Gyro sensor's accumulation error.

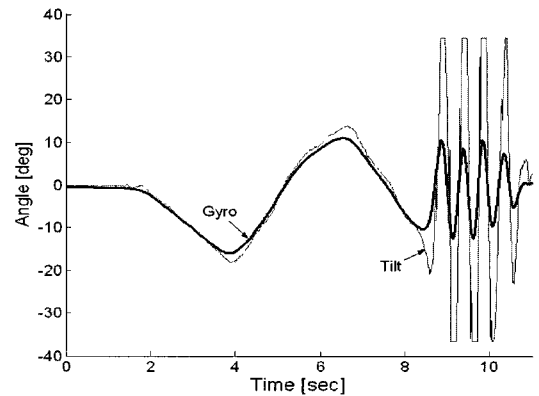


그림 7. 기울기 센서의 특성.
Fig. 7. Characteristics of the tilt sensor.

독으로 사용하여 모바일 역진자를 제어하는 것은 흔들림이 느린 부분에서는 제어가 용이 하나, 흔들림이 빠를수록 가속도 향이 증가하여 제어에 활용되어 질 수 없음을 알 수 있다.

IV. 제어부

본 논문에서 제어부의 근본적인 역할은 역진자의 동적인 기울임을 자이로 센서를 통해 감지하여 BLDC 모터를 기울어진 방향으로 시키는 것이다. BLDC모터는 상시 반작용에 의해 수평을 유지하도록 하는 기능을 수행하고 있다, 또한 모바일 역진자에 사람이 탑승했을 때 안정성 향상을 위하여 속도도에 따른 지능적 기울임 및 방향전환 알고리즘이 구현되어 있다.

1. 제어기의 구성

그림 8은 제어기의 구성도를 나타내고 있다. 제어기는 크게 A, B, C, D 4부분으로 구성된다. A 부분은 동적 기울기보상 알고리즘을 적용하여 실시간 자이로 센서의 누적오차를 보상하는 기능을 수행하며, PID 제어를 위한 목표 값과 실제 기울기의 차이에 의한 오차를 형성하는 부분이다. B 부분은 PID 제어를 구현하는 부분을 나타내고 있고, C 부분은 조향부로서 모바일 역진자에 부착된 Knob의 조작 각도와 주행 속도도에 따른 좌, 우 회전 비율을 결정한다. 마지막으로, D 부분은 좌, 우측 모터의 구동을 위한 신호를 증폭 및 제한하는 역할을 한다.

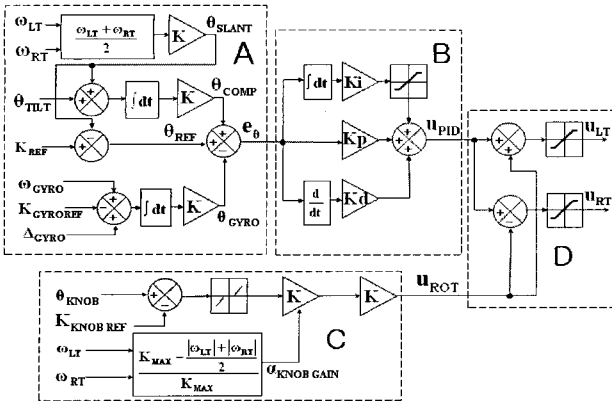


그림 8. 제어기의 구성도.
Fig. 8. Schematic diagram of the controller.

2. 동적 기울기 보상 및 오차 형성부(A)

A 부분의 주요 작용은 PID 제어를 위하여 목표 값과 실제 기울기의 차이에 의한 오차를 형성하는 부분이다.

사용자가 모바일 역진자에 올라타서 고속으로 주행할 때 BLDC 모터는 역기전력의 영향으로 속도가 빠를수록 상대적으로 토크가 약해진다. 이때 수평을 유지하고 있는 모바일 역진자에 탑승한 사용자가 전방으로 몸을 기울일 때 모터의 최대 토크보다 몸 동작의 힘이 크게 되면 앞으로 넘어질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 9와 같이 모바일 역진자가 고속으로 주행할수록 주행의 반대 방향으로 모바일 역진자는 점차적으로 기울어지도록 설계하였다.

이러한 구조는 모터가 회전할 때 최대 속도에 도달하기 이전에 더 이상 속도를 올릴 수 없도록 제한하는 역할도 함께 한다. 이러한, 속도에 따른 역진자의 기울임 각도를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta_{SLANT}[k] = K_{SLANT} \frac{\omega_{LT}[k] - \omega_{RT}[k]}{2} \quad (7)$$

이 식에서 속도에 따른 기울임 각 θ_{SLANT} 은 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 평균속도에 의해 결정됨을 보여주며, K_{SLANT} 는 기울임 각도 보정 상수로 실험적으로 결정한다. 모바일 역진자는 주행 시 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴는 구조상 서로 마주보는 형태이므로 서로 반대로 돌아가게 된다는 사실을 주목해야 한다. 즉, 왼쪽 바퀴의 속도 ω_{LT} 와 오른쪽 바퀴의 속도 ω_{RT} 를 뺄셈을 하여 2로 나누면 양쪽 바퀴의 평균 속도가 된다. 이것을 이득상수 K_{SLANT} 를 곱하여 원하는 기울임 각을 만들도록 한다. 속도가 빠를수록 기울임 각 θ_{SLANT} 이 비례적으로 증가하게 되는 것이다.

모바일 역진자의 기준각 θ_{REF} 은 정지상태에서는 0으로 유지되어야 한다. 그러나 속도에 따른 기울임 각과 더불어 다음과 같이 실시간 보정이 되어야 한다.

$$\theta_{REF}[k] = K_{REF} + \theta_{SLANT}[k] \quad (8)$$

이 식에서 기준 각 상수 K_{REF} 는 항상 0으로 지정하여 모바일 역진자가 수평을 유지하도록 설정되어 있다. 모바일 역

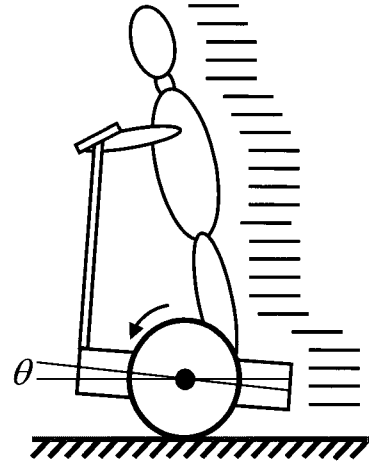


그림 9. 속도에 따른 경사각.
Fig. 9. Tilt angle according to the variation of the speed.

진자가 주행 시 속도에 비례적으로 기울임 각 θ_{SLANT} 과 음의 값으로 합산되어 기준 각 θ_{REF} 이 점차적으로 변하게 된다.

기울임 각의 존재와 더불어 자이로 센서의 누적오차도 다음과 같이 보정되어야 한다.

$$\theta_{COMP}[k] = K_{COMP} \sum_{j=1}^k (\theta_{TILT}[j] + \theta_{SLANT}[j]) \quad (9)$$

이식에서 기울기 센서의 각 θ_{TILT} 은 모바일 역진자가 수평을 유지하면 0의 값을 가진다.

또한 K_{COMP} 는 오차 보정 상수로 실험적으로 결정한다.

모바일 역진자에 외란을 가하거나 사람이 올라탄 체 앞, 뒤로 기울이면 기울기 센서의 각 θ_{TILT} 이 변화된다. 초기에 모바일 역진자가 수평을 유지할 때 자이로 센서의 각 θ_{GYRO} 은 0을 나타내지만 시간이 지남에 따라 변화되는 자이로 센서의 누적오차로 인해 실시간 값이 증가하거나 감소하게 된다. 이때 기울기 센서의 각 θ_{TILT} 을 실시간 적분하여 이득상수 K_{COMP} 를 곱해주면 자이로 센서의 보상 각 θ_{COMP} 를 얻을 수 있다. 이득상수 K_{COMP} 는 미소한 값을 지정해 주어야 한다는 것을 주의해야 한다. 이것은 마이크로 프로세서가 고속으로 동작하므로 이득상수 K_{COMP} 값이 커질수록 짧은 시간에 보상되어 모바일 역진자가 유연하게 수평을 잡지 못하고 흔들릴 수 있기 때문이다.

기울임 각 θ_{SLANT} 과 함께 합산하여 적분해주는 이유는, 모바일 역진자가 전방으로 주행 시 기울임 각 θ_{SLANT} 의 영향으로 약간 뒤로 처지게 되므로 기울기 센서의 각 θ_{TILT} 이 음수를 가질 때 기울임 각 θ_{SLANT} 은 상대적으로 양수를 가진다. 이때 자이로 센서의 누적오차가 없다고 가정하면 $\theta_{TILT} + \theta_{SLANT} = 0$ 가 된다. 이것은 자이로 센서의 보상 각 θ_{COMP} 산출에 있어 모바일 역진자의 기울임 각 θ_{SLANT} 에 영향을 받지 않고 수평을 유지할 때와 동일한 조건으로 해석되며, 자이로 센서의 누적오차 부분만을 보상하게 되는 것이다.

최종적으로 PID 제어를 위하여 목표 각 θ_{REF} 에 대한 오차

e_θ 는 다음과 같이 정의하여 구한다.

$$e_\theta[k] = \theta_{REF}[k] - \theta_{GYRO}[k] + \theta_{COMP}[k] \quad (10)$$

이식에서 목표 각 θ_{REF} 에서 자이로 센서의 각 θ_{GYRO} 을 빼면 오차 e_θ 가 정의될 수 있으나, 시간이 지남에 따라 누적오차가 발생하는 자이로 센서를 보정하기 위해 보정 각 θ_{COMP} 을 더하여 오차 e_θ 를 누적오차에 영향을 받지 않게 구하게 된다.

3. PID 제어부(B)

B 부분은 PID 제어 부분을 나타내는 것으로 제어입력을 다음과 같이 구한다.

$$u_{PID}[k] = K_p e_\theta[k] + K_I \sum_{j=1}^k e_\theta[j] + K_D (e_\theta[k] - e_\theta[k-1]) \quad (11)$$

이 식에서 PID 출력 중 비례 제어부, $K_p e_\theta$ 는 오차, e_θ 에 비례하여 상수 K_p 를 곱해서 구해진 값을 나타낸다. 따라서 모바일 역진자가 기울어져 목표 각도와 많은 차이를 보일수록 출력이 증가하지만 목표 각에 근접할수록 오차가 줄어들어 BLDC 모터의 출력이 감소하기 때문에 실질적으로는 수평을 유지 하지 못하고 약간 기울어진 상태인 정상상태 오차를 유발하게 된다.

이러한 정상상태 오차를 개선하기 위한 적분 제어부, $K_I \sum e_\theta$ 는 미소한 오차 e_θ 를 적분하여 적분제어 상수 K_I 에 비례적인 출력을 형성하여 정상 상태 오차를 개선하는 역할을 한다. 또한, 미분 제어부, $K_D (e_\theta[k] - e_\theta[k-1])$ 는 이전 각도 정보와 현재 각도 정보의 차이가 클수록 미분제어 상수 K_D 에 비례하는 출력을 형성하여 응답속도를 향상시키는 역할을 한다. 이러한 3가지 제어 부의 출력이 합산되어 PID 출력, u_{PID} 를 결정한다.

4. 조향부(C)

C 부분은 조향제어 알고리즘을 나타내며 조향 장치의 민감도 $\alpha_{KNOBGAIN}$ 는 다음의 수식으로 표현된다.

$$\alpha_{KNOBGAIN}[k] = \frac{K_{MAX} - \frac{|\omega_{LT}[k]| + |\omega_{RT}[k]|}{2}}{K_{MAX}} \quad (12)$$

이 식에 의해 조향 장치의 민감도 $\alpha_{KNOBGAIN}$ 는 좌측 바퀴의 속도, ω_{LT} 와 우측 바퀴의 속도, ω_{RT} 를 절대치 한 후 서로 더하여 2로 나누면 양쪽 바퀴의 평균 속도를 이용하여 구할 수 있다. 절대치를 취하는 이유는 전진과 후진 모두 동일하게 적용하기 위해서이다. 이것을 속도 최대 상수 K_{MAX} 와 뺄셈 연산을 하면 속도가 빠를수록 값이 감소하게 한다. 속도 최대 상수 K_{MAX} 는 모바일 역진자가 주행하는 최대 속도, ω_{MAX} 보다 큰 수치로 두어야 함을 주의해야 한다. 이것을 다시 속도 최대 상수 K_{MAX} 로 나누면 0~1 사이의 값으로 변환된다. 1에 근접할수록 저속을 의미하며 조향 장치에 민감하게 반응하여 모바일 역진자가 급회전하게 된다. 반면 고속으로 주행할수록 조향 장치에 비교적 둔감하게 작용하여 부드럽

게 회전하게 된다.

이 조향장치의 민감도 $\alpha_{KNOBGAIN}$ 를 활용하여 모바일 역진자의 회전 출력 u_{ROT} 은 다음과 같이 결정된다.

$$u_{ROT}[k] = K_{ROT} (\theta_{KNOB}[k] - K_{KNOBREF}) \alpha_{KNOBGAIN}[k] \quad (13)$$

이 식에서 출력 수치가 높을수록 회전 속도가 빨라지게 됨을 의미한다. 또한, 회전 출력 u_{ROT} 이 음수일 때는 좌회전을, 양수일 때는 우회전을 의미한다. 조향장치의 각도 θ_{KNOB} 는 모바일 역진자의 상측에 부착된 knob를 돌려 변화시키게 된다. Knob로부터 입력 받은 정보를 10bit A/D 변환을 수행한다고 가정했을 때, knob를 좌측으로 최대로 돌리면 0, 우측으로 최대로 돌리면 1023, 그리고 중앙에 위치 시키면 512의 값을 입력 받을 수 있다. 이것을 기준치 knob 상수, $\theta_{KNOBREF}$ 값인 512을 빼면 knob를 중앙에 위치시킬 때 0, 좌측 최대로 돌렸을 때 -512, 우측으로 최대로 돌렸을 때는 512가 된다. 사용자는 knob를 정확하게 중앙에 위치 시키기가 어려운 관계로 threshold 값을 제한해 두었다. 사용자는 knob의 중앙 위치로부터 \pm 임의의 값만큼 돌려도 중앙 값인 0으로 인식이 된다. 이러한 threshold 값을 통해 모바일 역진자가 직진으로 주행 시 한쪽으로 쏠리는 현상을 감소시킬 수 있다. 이득상수 K_{ROT} 는 비율을 맞추기 위한 상수이다.

5. 출력 조절부(D)

D 부분은 모바일 역진자의 회전을 위해 좌, 우측 모터의 출력을 결정하는 부분으로 좌, 우측 모터의 출력은 PID 출력 u_{PID} 과 회전 출력 u_{ROT} 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$u_{LT}[k] = u_{ROT}[k] + u_{PID}[k] \quad (14)$$

$$u_{RT}[k] = u_{ROT}[k] - u_{PID}[k] \quad (15)$$

위의 식에서 모바일 역진자가 회전하지 않고 주행할 때 좌측 바퀴와 우측 바퀴는 서로 반대 방향으로 돌아가기 때문에 좌측 출력 u_{LT} 이 증가할수록 우측 출력 u_{RT} 은 상대적으로 감소하게 된다. 만약 모바일 역진자가 주행하지 않고 제자리에 머물러 있을 때는 PID 출력 u_{PID} 이 거의 0에 가까우므로 이때 회전출력 u_{ROT} 이 주어지면 제자리에서 180°회전이 가능하다.

최종적으로 제어입력을 모터의 최대 토크 범위 이내로 제한하여 SPI 통신을 통해 컨트롤러로 신호를 보내어 실시간 BLDC 모터를 제어한다.

V. 실험결과

1. 자이로 센서의 보상 알고리즘

시간이 지남에 따라 누적오차가 발생하는 자이로 센서의 각(Gyro#1)을 보정하기 위해 기울기 센서의 각(tilt)을 적분하여 보정 각(compensation)을 산출하는 과정을 실험을 통하여 확인하였다.

그림 10에서 초기에는 기울기 센서의 각(tilt)과 자이로 센서의 각(Gyro#1)이 모두 평형 상태로서 0deg을 나타내고 있으나, 누적오차로 인해 자이로 센서의 각(Gyro#1)이 점차적으로 음의 값을 가질 때 모바일 역진자는 수평 유지를 위해 자

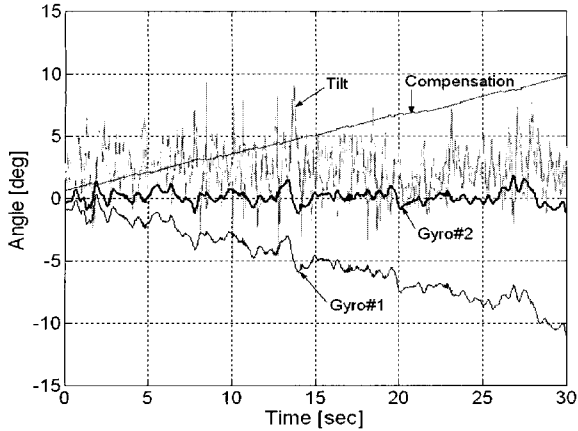


그림 10. 실시간 누적오차의 보상.
Fig. 10. Compensation of the real time accumulation error.

이로 센서의 각(Gyro#1)의 반대 방향으로 미소하게 기울어지게 됨을 보여준다.

이때 기울기 센서의 각(tilt)은 양의 값을 나타내며, 기울어진 각을 적분하고 소정의 상수와 연산하여 보정 각(compensation)을 산출한다. 보정 각(compensation)은 자이로 센서의 각(Gyro#1)과 합산하여 자이로 센서의 누적 오차를 보상하게 된다. 시간이 지날수록 자이로 센서의 누적오차가 증가할 때 부호가 반대인 보정 각(compensation)을 지속적으로 생성시킨 후, 기존의 자이로 센서의 각(Gyro#1) 정보와 합산하여 보정된 자이로 센서의 각(Gyro#2)을 생성하여 올바른 기울임 각도로 활용하게 된다.

2. 외란에 따른 보상

모바일 역진자의 외란에 대한 보상 기능을 점검하기 위하여 모바일 역진자가 스스로 균형을 유지하고 있을 때 사용자가 강제적으로 핸들을 잡고 앞, 뒤로 기울였을 때의 파형을 분석해 보았다.

그림 11에서 0~9초 구간에서 모바일 역진자를 앞으로 기울였을 때 기울기 센서의 각(tilt)은 전반적으로 양의 값을 나타낸다. 따라서 보정 각(compensation) 또한 양의 값으로 점차적으로 적분되며, 자이로 센서의 각(Gyro#1)과 합산되어 제어 신호로 사용되는 보정된 자이로 센서의 각(Gyro#2) 또한 값이 증가하게 된다. 이것은 제어 신호의 해석적 관점으로 볼 때 외란이 가해진 모바일 역진자가 실제 기울어진 각도보다 더욱 많이 기울어진 것으로 해석되어 외란을 무시하고 중심을 바로 잡기 위해 전방향으로 모터의 토크를 증가시키게 된다. 반대로 9~17초 구간에서 모바일 역진자를 뒤로 기울였을 때 기울기 센서의 각(tilt)은 전반적으로 음의 값을 나타내고 있다. 보정 각(compensation) 또한 음의 값으로 점차적으로 적분이 되고, 자이로 센서의 각(Gyro#1)과 합산되어 제어신호로 사용되는 보정된 자이로 센서의 각(Gyro#2)이 변화하게 된다. 13~16초 구간에서는 제어 신호 관점으로 해석하면 외란이 가해진 모바일 역진자가 실제 뒤로 기울어진 각도보다 더욱 많이 뒤로 기울어진 것으로 해석되어 외란을 무시하고 중심을 바로 잡기 위해 역방향으로 모터의 토크를 증가시키게 된다. 이러한 두 가지 경우에서 자이로 센서의 누적오차와 외란을 동시에 보정함을 알 수 있다.

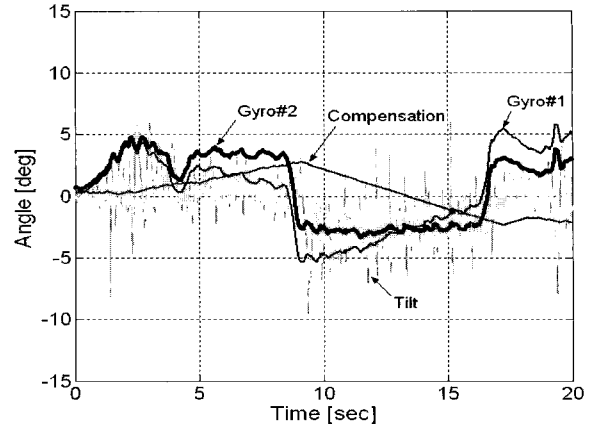


그림 11. 외란에 대한 반작용.
Fig. 11. Reaction to the external disturbances.

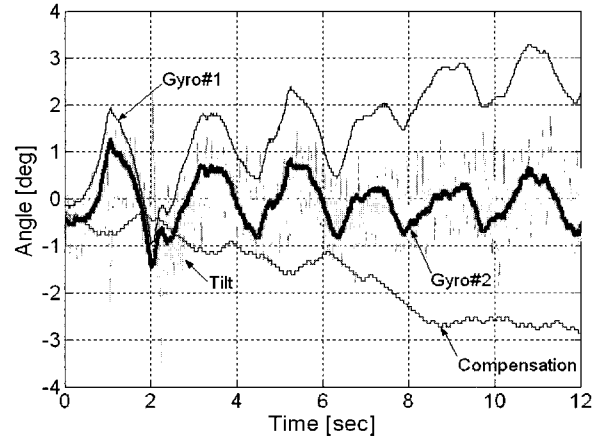


그림 12. 부하에 따른 수평유지.
Fig. 12. Horizontal maintenance with the load.

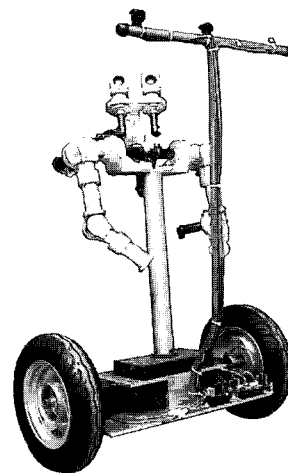


그림 13. 실제 개발된 모바일 역진자.
Fig. 13. A developed mobile inverted pendulum.

3. 수평유지

부하가 걸린 상태에서의 수평유지 기능을 점검하기 위하여 32Kg의 양팔 로봇을 모바일 역진자 플랫폼 위에 올린 후 전원을 인가하였을 때의 파형을 분석해 보았다.

그림 12에서 모바일 역진자는 대략 $\pm 0.8\text{Deg}$ 정도로 앞, 뒤로 살짝 흔들리면서 빠르게 중심을 잡고 있음을 알 수 있다. 기울기 센서의 각(tilt)이 실시간 적분되어 보정 각(compensation)을 형성하고 자이로 센서의 각(Gyro#1)과 합산되어 보정된 자이로 센서의 각(Gyro#2)을 형성하여 절대적인 기울기 정보를 형성하여 실시간 빠르게 제어되고 있다.

그림 13은 실제 사용중인 모바일 역진자이다.

VI. 결론

모바일 역진자의 수평유지를 위해 기울기 센서를 단독으로 사용할 경우 처음에는 쉽게 균형을 유지하지만 점차 몸체가 심하게 진동을 하면서 시스템이 불안정하게 되며, 자이로 센서를 단독으로 사용할 경우에는 시간이 지남에 따라 누적 오차가 더해져 실질적인 모바일 역진자 제어가 어렵게 된다. 기존의 상용품에서는 신뢰성 향상을 위하여 2개의 기울기 센서와 3개의 자이로 센서를 사용하여 모든 센서가 동시다발적으로 기울기를 감지한 후 가장 신뢰가 높은 센서 정보를 참값으로 판단하여 제어를 행하고, 나머지 센서의 정보를 그 참값을 기준으로 보정하는 방식을 사용하고 있었다. 이러한 기법은 많은 센서와 더불어 신뢰성이 높은 장점이 있지만 다수개의 센서들로 인하여 시스템의 가격이 높아지는 단점이 있었다. 본 논문에서는 저가의 상용화된 단일 자이로 센서와 단일 기울기 센서를 이용하여 저렴한 가격으로 시스템을 구성하였으며, 센서융합 기술과 동적 기울기 보상알고리즘을 통해 안정적인 수평유지가 가능한 모바일 역진자를 제안하였다. 본 논문에서 제시한 수평유지 기법은 모바일 역진자 뿐만 아니라 항공기, 선박, 이동 로봇, 자동차 등의 분야에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A.

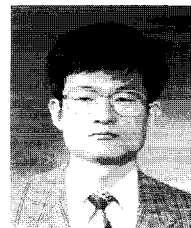
Diffler, I. Spain, and N. Radford, "Mobile manipulation using NASA's Robonaut," *IEEE ICRA*, pp. 2104-2109, 2004.

- [3] S. S. Kim and S. Jung, "Experimental studies of balancing an inverted pendulum and position control of a wheeled drive mobile robot using a neural network," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 10, pp. 888-892, Oct. 2005.
- [4] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network inverse control techniques for PD controlled robot manipulator," *Robotica*, vol. 19, no. 3, pp. 305-314, 2002.
- [5] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, "A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, Feb. 2002.
- [6] A. Sutherland and T. Braunl, "An experimental platform for researching robot balance," *Proceeding FIRA Robot World Congress*, pp. 14-19, 2002.
- [7] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, and A. C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, issue 1, pp. 107-114, Feb. 2002.
- [8] Y. S. Ha and S. Yuta, "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 17, issue 1-2, pp. 65-80, 1996.
- [9] J. W. Park, J. H. Park, K. S. Yun, and J. M. Lee, "Tracking and capturing a moving object using active camera mounted on a mobile robot," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 741-748, 2001.
- [10] Y. Zhao and S. L. Bement, "Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots," *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 91-96, May. 1992.
- [11] D. J. Kreigman, E. Triendl, and T. O. Binford, "Stereo vision and navigation in building for mobile robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. ra-2, pp. 14-23, 1986.
- [12] J. P. Ko, J. M. Yun, and J. M. Lee, "Precision calibration of gyroscopes for improving dead-reckoning accuracy in mobile robots," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 5, May. 2005.



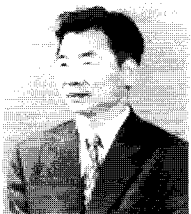
윤재무

2001년 경성대학교 전기전자공학과 졸업. 2007년 부산대학교 대학원 전자공학과 공학박사. 현재 삼성테크윈 선도개발팀. 관심분야는 마이크로프로세스 응용, 역진자 제어.



이재경

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 대학원 석사. 1996년 동 대학원 박사. 1997년~현재 충주대학교 정보제어공학과 교수. 관심분야는 이동로봇, 지능시스템, 컴퓨터 비전.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1990년 University of Southern California 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 다관절 로봇 시스템 설계 및 제어, 협동 제어, 이동 물체의 위치

추적, 마이크로 프로세스 응용 시스템 설계.