

비전과 관성센서를 이용한 2 바퀴 이동장치 개발

권효근, 박상경, 서영수
울산대학교 전기전자정보시스템공학과

Development of two wheel vehicle using vision and inertial sensor

Hyo Geun Kwon, Sang Kyeong Park, Young Soo Suh
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

Abstract - 본 논문에서는 비전과 관성센서를 이용하여 2바퀴를 가지는 이동장치를 개발하였고, 이에 대한 역학 모델을 제안한다. 본 이동장치에서 바퀴 부분은 바퀴의 축에 직접 연결되어 있으므로 물리적인 결속이 필요한 기존의 센서로는 진자의 기울어짐을 알 수 없다. 따라서 바퀴의 기울어짐을 측정하기 위하여 관성센서를 사용하였다. 보다 안정된 주행을 위해 바퀴의 기울어짐을 측정하기 위해 비전을 이용하였다.

1. 서 론

도립진자(inverted pendulum) 시스템이란 거꾸로 매달린 물체가 넘어지지 않도록 앞·뒤로 움직이면서 균형을 유지 하는 시스템을 말한다. 누구나 어린 시절 이런 놀이를 해본 적이 있을 것이다. 손 위에 긴 막대나 우산을 올려놓고 그것을 똑바로 세우는 놀이이다. 막대를 오래 세우기 위해서는 막대가 넘어지는 반대 방향으로 힘을 주어야 할 것이다. 실제 제어에서도 위 놀이와 같은 방법으로 제어 하게 된다. 도립진자 시스템은 불안정한 시스템으로 제어 시스템의 성능을 평가하기 위한 제어 대상으로 많이 다루어져 왔으며, 2족 보행 로봇이나 미사일의 비행 자세를 제어하는 문제에 많이 응용되고 있다. 많은 연구자들은 다양한 구조의 도립진자 시스템에 다양한 이론을 적용하는 연구를 해왔다. LQR기법, 신경망(neural network), 가변 구조(variable-structure) 제어, 입출력 선형화, H_{∞} 제어, 그리고 퍼지(fuzzy) 제어 기법을 하나의 진자, 두 개의 진자의 직렬 연결형, 그리고 세 개의 진자를 직렬 연결한 타입의 도립진자 시스템들에 적용하고 있다. [1].

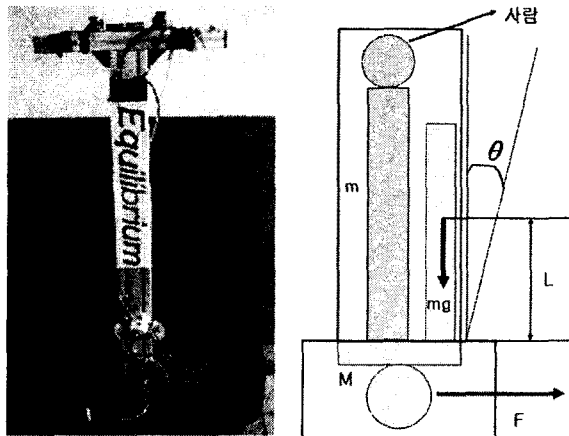
본 논문에서는 도립진자 시스템을 기반으로 하여 개인용 이동장치를 개발하였다. 관성센서를 이용하여 바퀴의 기울어짐을 측정하였고 경사가 있는 곳에서 보다 나은 주행을 위해 비전 센서를 장착하여 바퀴의 경사를 측정하고 장애물을 검사 할 수 있다. 실제 제어에서는 PID 제어를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 2바퀴 이동장치의 구성

2.1.1 2바퀴 이동장치

2바퀴 이동장치는 크게 기구부와 하드웨어 부로 나눈다. 기구부는 모델링과 관련된 하드웨어 부는 컨트롤러와 센서부, 모터 드라이버 등이다. 기구적인 모델링은 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 2바퀴 이동장치의 기구적인 모델링

m은 사람과 바의 무게(kg), M은 발판과 바퀴 그리고 모터의 무게(kg), L은 바의 1/2 길이(m), θ 는 바의 기울어진 정도($^{\circ}$), g는 중력 가속도 $9.81(mg/s^2)$, F는 모터의 출력이다.

2바퀴 이동장치에 사용된 주요 부품은 <표1>과 같다.

<표 1> 주요 부품 및 특성

부품	품명	비고
가속도계	ADXL202	$\pm 2g$ dual axis
자이로스코프	ADXRS150EB	$\pm 150^{\circ}/s$ single axis
레이저	LM-6505NDW	line beam shape
카메라	Lebeca PLUS	320x240으로 사용

2.1.2 Dynamics

오른쪽 수평방향을 x 방향으로 두고, x 방향에 대해서 뉴턴의 운동 법칙 $\sum F = m\ddot{x}$ 을 적용하고 θ 방향에 대해서 뉴턴의 운동 법칙 $\sum \tau = I\ddot{\theta}$ 을 적용하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}_g + M\ddot{x} = u \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = mgL\sin\theta - m\ddot{x}_g L\cos\theta$$

여기서 $x_g = x + L\sin\theta$ 이다.

(1)식을 θ 가 거의 0 근처에 머무른다고 가정하면 $\sin\theta \approx \theta$ 이고 $\cos\theta \approx 1$ 이다. 그리고 관성모멘트 $I \approx 0$ 으로 가정한다. 2바퀴 이동장치의 선형화된 최종 운동방정식은 다음과 같다.

$$(m + M)\ddot{x} = u - m\ddot{\theta}L \quad (2)$$

$$mL^2\ddot{\theta} + m\ddot{x}L = mgL\theta$$

(2)식을 상태방정식 $\dot{x} = Ax + Bu$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1000 \\ \frac{M+m}{ML}g & 000 \\ 0 & 001 \\ -\frac{m}{ML}g & 000 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{ML} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \end{bmatrix} x + 0 \cdot u$$

여기서 $x = [\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]'$ 이다.

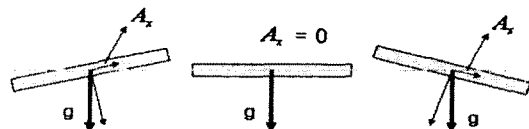
2.2 주행 알고리즘

2.2.1 센서 측정

본 논문에서의 2바퀴 이동장치는 바퀴 부분이 바퀴의 축에 직접 연결되어 있으므로 물리적인 결속이 필요한 기존의 센서로는 진자의 기울어짐을 알 수 없다. 따라서 관성센서를 사용하였다. 사용한 센서는 물체의 가속도를 측정하는 가속도계와 각속도를 측정하는 자이로스코프이다. 가속도계를 한 축이 발판의 수평방향으로 장치하여 그 한축만을 사용하여 측정된 가속도와 중력가속도 사이의 관계를 이용하여 각도를 측정하였다. 바퀴 자체의 가속도는 거의 존재하지 않는다고 가정하였다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{A_x}{g} \quad (4)$$

여기서 A_x 는 발판의 수평방향으로 측정된 가속도이다. <그림 2>와 같이 발판의 각도에 변화에 따라 A_x 가 변한다..



<그림 2> 기울어짐에 따른 A_x 의 측정

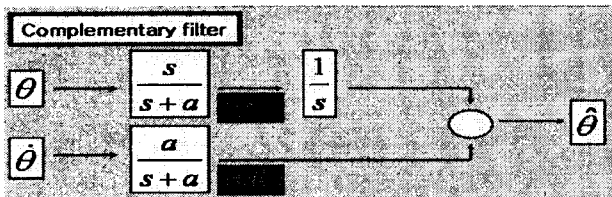
또한 자이로스코프로 바퀴의 움직임은 각속도($\dot{\theta}$)를 측정한다. 가속도계로 측정된 θ 와 자이로스코프로 측정된 $\dot{\theta}$ 를 제어기의 출력으로 직접 사용하는 것은 각각 센서의 노이즈 특성상 거의 불가능 하였다. 따라서 보상필터를 사용하여 사용 가능한 값으로 필터링하였다.

2.2.2 보상필터 (complementary filter)

보상필터는 하나의 물리량을 측정 잡음 주파수 특성이 서로 다른 두 개의 센서를 사용하여 물리량을 측정하는 경우에 유용하게 사용된다. 자이로스코프는 각속도를 측정한다. 이를 적분을 통해 각도를 계산할 수 있다. 그러나 자이로스코프의 가장 큰 문제점은 바이어스 값이다. 이 바이어스 값은 적분을 통해 각도를 계산 할 때 누적되어 큰 오차가 생겨난다. 바이어스 값은 상수이거나 아주 천천히 변함으로 자이로스코프의 측정 잡음은 저주파 영역에 있다 할 수 있다. 반면 가속도계는 중력가속도와 A_z 의 관계를 통해 각도를 측정하는데 외부 가속도와 진동 등의 영향을 받는다. 이 가속도계의 측정 잡음은 주로 고주파영역에 있다고 가정한다. <그림 3>과 같이 보상필터를 설계하였다. θ 은 자이로스코프의 출력이다. 여기는 주로 저주파영역에러가 포함되어 있다. $\dot{\theta}$ 는 가속도계의 출력이다. 여기는 주로 고주파영역에러가 포함되어 있다. 다음 보상필터의 출력을 식은 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \frac{s}{s+a} \frac{1}{s} (\dot{\theta} + e_L) + \frac{a}{s+a} (\theta + e_H) \quad (5)$$

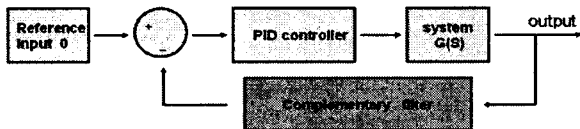
보상필터에서 $\frac{a}{s+a}$ 는 저주파 통과 필터이고 $\frac{s}{s+a}$ 는 고주파 통과 필터이다. 따라서 각 센서의 서로 다른 주파수영역의 에러 성분들은 거의 무시할 수 있게 되어 보상필터의 최종 출력은 $\hat{\theta} \approx \theta$ 가 된다. 보상필터는 중요한 파라미터인 a 에 의해서 자세를 추정하는데 어느 센서를 더 많이 사용하는지를 결정하게 된다. a 가 크면 클수록 자세를 추정하는데 상대적으로 자이로스코프보다 가속도계를 더 많이 사용하게 된다.



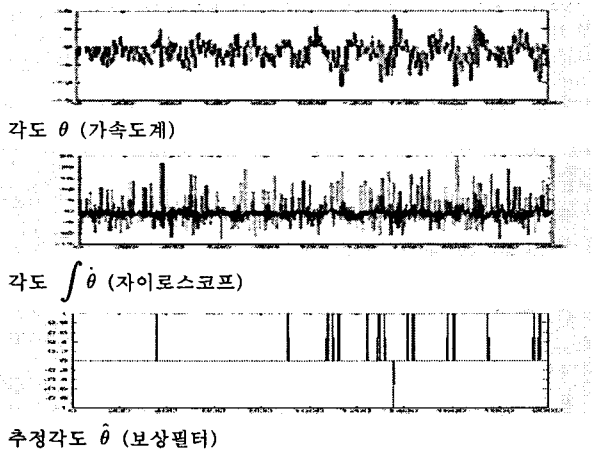
<그림 3> 보상필터 블록도

2.2.3 PID 제어와 주행 알고리즘

가속도계로 측정된 각도(θ)와 자이로스코프로 측정된 각속도($\dot{\theta}$)를 입력으로 하는 보상필터를 통해 필터링 한 추정 각도($\hat{\theta}$)와 자이로스코프의 각속도($\dot{\theta}$)를 출력으로 사용하여 <그림 4>와 같은 PID 제어기를 구현하였다. 제어 목표는 각도가 0°를 유지함이다. 따라서 2바퀴 이동장치는 항상 0°를 유지하여 한다.



<그림 4> PID 제어 블록도

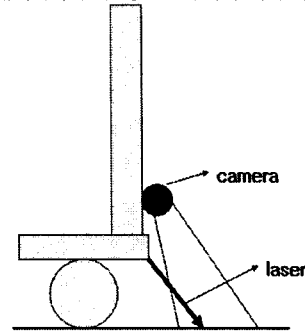


<그림 5> 0° 유지 실험 결과

따라서 2바퀴 이동장치를 전·후진하기 위해서는 탑승자가 손잡이를 잡고 밀거나 당겨야 한다. 탑승자가 손잡이를 밀거나 당길 때에 생기는 각도에 의해 2바퀴 이동장치는 항상 0°를 유지하기 위해 전·후진하게 된다. <그림 5>는 사람에 탑승하지 않은 상태에서 0°를 유지하면서 자이로스코프, 가속도계, 그리고 보상필터를 통과한 추정각도이다. 가속도계와 자이로스코프만으로 각각 측정하였을 때는 $\pm 10^\circ$ 이상 이었다. 그러나 보상필터를 통과 시킨 결과는 $\pm 1^\circ$ 정도의 에러를 보인다.

2.2.4 바닥 경사 검사

주행 시 바닥에 급격한 경사 변화로 인해서 탑승자의 불안함을 줄 수 있다. 이를 보완하기 위하여 바닥 경사를 검사하여 바닥 경사 정보를 탑승자에게 알려준다. 바닥 경사 검사를 위해 <그림 6>과 같이 라인레이저와 CCD 카메라를 사용하였다. 라인레이저를 바닥에 평행한 방향으로 쏘고 CCD 카메라로 라인레이저의 행 평균을 구하여 바닥 경사를 측정하였다.

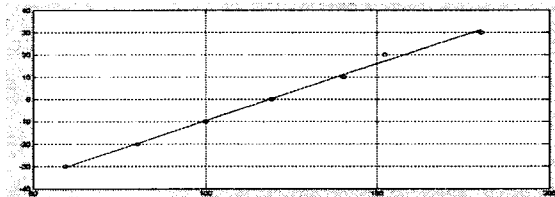


<그림 6> 바닥 경사 측정 방법

각도를 변화 시켜가면서 실험을 통해 라인레이저의 행 픽셀의 평균과 각도를 저장하여 이를 pseudo-inverse를 통하여 선형화 하였다. 다음 식(6)은 선형화 한 식이다.

$$b_d = 0.5100 \times C_p - 60.5628 \quad (6)$$

b_d 는 바닥 경사이고, C_p 는 행 픽셀의 평균이다. <그림 7>은 행 픽셀 평균 당 바닥 경사에 대한 선형화이다.



<그림 7> 행 픽셀 평균 당 바닥 경사 선형화

3. 결 론

본 논문에서는 비전과 관성센서를 이용하여 독립전자 시스템을 기반으로 하는 개인용 이동장치를 개발하였다. 연구를 통해 얻은 성과는 가속도계와 자이로스코프를 이용한 자세 추정 시스템을 구현한 것과 PID 제어기의 유용성을 확인한 것이다.

현재 유럽에서는 새로운 도시 교통 수단인 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 기존의 개인용 이동장치는 자가용이나 오토바이 같은 부피가 크고 화석 연료를 사용하는 것이 대부분이다. 본 논문에서의 이동장치는 2바퀴만을 가지기 때문에 부피가 기존의 것보다 작고 회전 반경 역시 매우 작다. 또한 화석연료가 아닌 전기에너지를 이용하였으므로 대기 가스 배출도 전혀 없다. 실용화되기 위해서는 보다 안정된 주행이 요구된다. 또한 소형, 저중량의 고용량, 고효율 배터리에 관한 연구가 이루어 져야 한다. [3].

향후에 과제로는 매우 작은 1°이하의 각에서는 진동이 남아있는데 이를 없애야 한다. 그리고 보다 나은 자율 주행을 위해서는 바닥 경사 검사 값에 제어 루프 안으로 포함 시켜 보다 안정된 제어기를 구현해야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Un Sik Park, Joo Ho Kim, Sin Jong Kim, Jae Weon Choi, Jong Shik Kim "Development of a parallel inverted pendulum system and its control" SICE Annual, 38th Annual Conference Proceedings of the , pp.943-948, 1999.
- [2] Baerveldt A.J. and R. Klang "A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter" Intelligent Engineering Systems, INES '97. Proceedings., IEEE International Conference on , pp.391-395, 1997.
- [3] Tirmant. H, Baloh. M , Vermeiren. L, Guerra. T.M, Parent. M "B2, an alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system " Intelligent Vehicle Symposium, IEEE, pp.594-603, 2002.