

반도체형 관성 센서를 이용한 도립진자 제어

최호준, 이준범, 홍석교
아주대학교 전자공학부

Control of an Inverted Pendulum System with a Solid-State Inertial Sensor

Ho-Joon Choi, Jun-Beom Lee, Suk-Kyo Hong
School of Electronics Engineering, Ajou University

Abstract - This paper presents a method to compensate the drift of solid-state inertial sensors for control applications. A solid-state gyroscope is evaluated via both theoretical and experimental analyses. From the analytical results, a heuristic compensation method for the drift of the gyroscope is proposed. Experimental results on inverted pendulum control show that the proposed method is feasible since compensated signals from the gyroscope are successfully used in the feedback loop to control the inverted pendulum system.

러 보조 센서들의 혼합을 통해 성능을 개선할 수 있다. 그러나 이러한 센서들은 진동과 같은 외부환경에 노출되었을 때에는 정확한 정보를 기대하기 어렵다.

자이로스코프나 가속도계와 같은 관성 센서는 센서가 장착된 축에서의 회전 속도와 가속도를 측정하는데 사용된다. 이러한 센서들의 측정치를 적분하면 자세 및 위치, 속도 등을 구할 수가 있다.

2.2 실험에 사용한 센서 사양

실험에 사용된 자이로는 Silicon Sensing System의 CRS 03-02 이다. MEMS 기술을 이용해 제작된 실리콘 자이로스코프로 코리올리 힘의 원리를 이용하여 외부 회전속도(각속도)를 감지해 내는 센서이다[2].

표 1에 실험에 사용된 자이로스코프의 규격을 나타내었다.

그리고 그림 1에서와 같은 방식으로 자이로센서와 엔코더 센서를 진자의 회전축에 부착했다.

이러한 관성센서의 바이어스 오차특성은 식(1)과 같이 비선형 파라미터 오차모델로 모델링 할 수 있다[3].

$$e_{\text{model}}(k) = C_1(1 - e^{-\frac{k}{T}}) + C_2 \quad (1)$$

표 1. 자이로스코프 규격

특 성	범 위
Rate Range	±100 deg/sec
Output Scale Factor	200 mV/(deg/sec)
Bias initial error	± 60 mV
Bias var. over Temp	± 60 mV
Bias ratiometric error	± 20 mV
Bandwidth	> 10 Hz
Quiescent noise	< 1 mVrms

1. 서 론

도립진자 시스템은 제어기의 성능 평가에 주로 이용되어 왔으며 실제로 헬기의 자세 제어나 로켓의 자세 제어, 전차의 이동 중 포신 제어, 보행 로봇 등 많은 분야에 응용된다[1]. 헬기 자세 제어나 로켓의 자세 제어 등은 실제 대상을 이용해 실험하기에는 많은 위험이 따르므로 이와 유사한 형태의 불안정한 시스템인 도립진자를 이용하여 제어기의 성능 평가를 한다. 그런데 도립진자 시스템에서 진자의 기울어진 각도를 측정하기 위해 이용하는 엔코더(encoder) 센서는 접촉식 센서이므로 헬기의 자세 제어와 같은 공간에서 각을 측정해야 하는 경우 실험 환경과는 많은 차이가 생긴다. 그러나 관성 센서를 이용하여 진자의 기울어진 각도를 측정하면 실제로 공간에서 각을 측정하는 경우와 유사하게 되고 또한 수레의 기울어진 값 같은 외란이 진자의 기울어짐에 영향을 미치지 않게 된다.

이 논문에서는 1-자유도를 갖는 도립진자 시스템에서 관성센서를 이용하여 진자의 기울기를 측정하는 방법을 제시한다. 논문의 2장에서는 사용한 관성 센서에 대해 알아본 후 실험에 사용된 도립진자 시스템에 대한 LQ제어기를 설계한 뒤 이것을 바탕으로 자이로를 사용한 도립진자와 엔코더를 사용한 도립진자에 대해 실험하고 결과를 비교·분석한다. 끝으로 3장에서는 2장의 결과 바탕으로 도립진자 자세 제어를 위한 관성센서 사용의 타당성을 평가한다.

2. 반도체형 관성 센서

2.1 관성 센서

일반적으로 군수산업이나 항공우주 산업에 사용되는 관성 센서는 매우 고가일 뿐만 아니라 크기와 무게 면에 있어서 사용 분야가 극히 제한되어 왔다. 이에 비해 저가의 관성 센서들은 제공하는 자세 및 위치 정보가 부정확하나 소형, 경량이므로 높은 정밀도를 필요로 하지 않는 시스템에 주로 사용되며, 이러한 저가의 센서들도 여

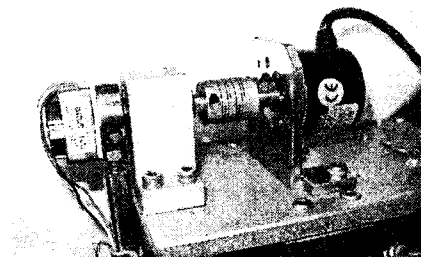


그림 1. 센서 부착 모습

C_1, C_2, T 는 센서 유형 및 온도에 따라 변화하는 값이다. 전원이 인가된 시점에서는 자이로의 출력이 안정되어 있지 않기 때문에 이상적인 출력과 동일하지 않다. 그러나 시간이 지남에 따라 점차 지수 함수 형태로 감소하여 일정한 값으로 수렴된다[4]. 이 논문에서는 상온(20°C)의 환경에서 충분히 오랜 시간 동안 센서에 전원을 인가한 뒤 상대적으로 짧은 시간 동안 실험하기 때문에 일정한 바이어스만 존재한다고 가정한다. 반복 실험을 통해 측정된 값을 이용하여 이 바이어스 값을 구한다.

3. 독립진자 시스템

3.1 시스템 구성

전체 시스템은 그림 2와 같이 구성하였다. 진자의 회전축에 부착되어있는 자이로 센서는 12-bit의 AD 변환기를 이용해서 변환하였고, 엔코더를 이용한 측정 분해능은 0.036°이다.

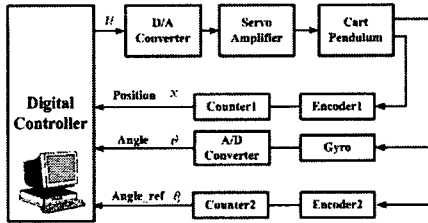


그림 2. 시스템 구성 블록도

3.2 독립진자 모델

일반적으로 수레형 독립진자에 대한 좌표계는 그림 3과 같고, 선형화한 평지 모델은 식(2), 식(3)과 같다.

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

$$\frac{4}{3} m l^2 \ddot{\theta} + m l \ddot{x} - m g l \theta = 0 \quad (3)$$

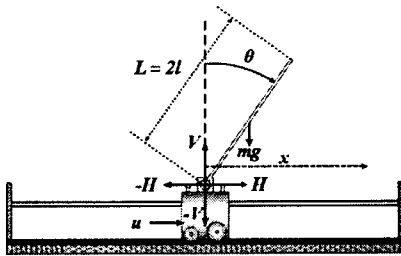


그림 3. 독립진자 좌표계

여기에서 g 는 중력가속도, M 은 수레의 질량, m 은 진자의 질량, θ 는 기준으로부터 진자의 기울어진 각도, L 은 진자의 기울기, H 는 수평 반작용, V 는 수직 반작용을 나타낸다.

실험에 사용할 모터 드라이브를 포함한 시스템의 동역학 방정식은 다음 식과 같다[5].

$$\frac{1}{\tau}(K_v u - \dot{x}) \quad (4)$$

$$\frac{3g}{4l}\theta + \frac{3}{4\tau l}\dot{x} - \frac{3K_v}{4\tau l}u, \quad (5)$$

이 시스템의 상수는 표 2에 나타내었다.

표 2. 시스템 상수

g	τ	l	K_v
9.8	0.046	0.3	0.1661

여기서 τ 는 모터의 시상수, K_v 는 모터 드라이브 상수이다.

위의 식 (2),(3),(4),(5)에 표 3의 상수들을 대입한 후 이산화 하여 상태 방정식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\underline{x}(k+1) = \mathbf{A}\underline{x}(k) + \mathbf{B}u \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0.0090 & 0 \\ 0 & 1.0012 & 0.0025 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0.8046 & 0 \\ 0 & 0.2451 & 0.4887 & 1.0012 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = [0.0002 \quad -0.0004 \quad 0.0325 \quad -0.0812]^T \quad (8)$$

$$\underline{x} = [x \quad \dot{x} \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T \quad (9)$$

식(9)의 상태변수에서 x 는 수레의 위치, θ 는 진자의 기울기이다.

4. LQR을 이용한 상태 궤환 제어기 설계

선형 제어기의 일종인 LQR은 성능지수(Performance index)를 최소화시키는 조건을 찾는 것이다. 위의 식 (6)과 같은 선형 시스템이 주어지면 성능지수는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$J(\underline{x}, u) = \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k) Q x(k) + u^T(k) R u(k)] \quad (10)$$

식 (10)에서 가중치 행렬 Q 와 R 값에 따라 페루프의 극점 위치가 결정된다. LQ Regulator 설계하기 위하여 Q 와 R 값은 Bryson[6]이 제안한 방법을 이용하여 구하였다.

$$Q = \text{Diag}[1000, 10, 0, 0] \quad (11)$$

$$R = 25 \quad (12)$$

위의 가중치 행렬을 통해 얻은 상태 궤환 이득은 다음과 같다.

$$\mathbf{K} = [-5.9883 \quad -34.4285 \quad -14.4406 \quad -6.9546] \quad (13)$$

5. 실험

5.1 자이로스코프에 대한 실험 결과

자이로스코프로부터 측정된 진자축의 회전 각속도는 그림 4에서 알 수 있듯이 일정한 바이어스 오차를 포함하고 있기 때문에 이 데이터로부터 아무런 처리 없이 진자의 기울어진 각도를 구하면 그림 5에서와 같이 발산함을 확인할 수 있다.

이러한 바이어스 오차 성분은 전원을 인가한 후 충분히 오랜 시간이 지나면 일정한 값으로 수렴한다[4]. 여러 차례 반복 실험을 통해 평균값을 구하고 이 값을 제거한 후 진자의 기울기를 구하면 그림 6에서와 같이 일정한 범위 내에서 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

5.2 도립진자의 Regulation 실험 결과

도립진자의 Regulation 문제에 2.6에서 구한 결과를 적용한 자이로 센서로부터 얻은 실험 데이터와 엔코더를 이용한 실험으로부터 얻은 데이터를 비교해 보면 그림 7,8,9,10과 같다.

경우 1은 일반적인 Regulation 실험으로 평지에서 도립진자를 세운 경우이다. 자이로나 엔코더를 이용하였을 때 모두 진자의 기울기를 0 rad으로 유지하였다. 하지만 자이로를 이용하였을 경우 수레의 위치가 시간이 지남에 따라 한쪽 방향으로 발산하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 진자의 기울기가 기준 엔코더 센서 측정값에 비해 미세하게 발산하기 때문인데 수레의 이동시에 발생하는 진동이 자이로스코프에 잡음으로 가해지고 이를 제거하지 못한 상태에서 기울기를 구하기 때문에 발생하는 오차이다.

경우 2는 수레의 바닥면에 급격한 기울기 변화를 가함으로써 외란을 가한 실험이다. 엔코더를 이용한 경우 바닥의 기울어짐이 진자의 기울어짐에도 영향을 주기 때문에 바닥면의 기울기를 급격하게 변화시킨 경우 진자가 쓰러지지만, 자이로를 이용한 경우 바닥면의 기울어짐이 진자의 기울어짐에 영향을 주지 않기 때문에 기존의 LQ 제어기를 이용해서도 쓰러지지 않고 제어 가능한 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

이 논문에서는 최근 개발되고 있는 저가의 반도체형 자이로스코프를 이용하여 도립진자를 제어한 실험적 결과를 제시하였다. 자이로스코프를 이용해서 진자의 기울기를 측정할 경우 Regulation 문제를 해결하는 것이 충분히 가능하였고, 또한 진자의 기울어짐이 바닥의 급격한 기울기 변화에도 큰 영향을 받는지 않는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 정확한 오차모델의 구현이 필요성 또한 실험 결과를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 칼만 필터 등을 이용해 노이즈를 제거하고 특성이 다른 여러 보조 센서들을 혼합하여 사용하여야 한다. 앞으로는 1-자유도를 갖는 도립진자를 이동로봇에 장착시켜 다양한 환경에서 센서 성능 평가 연구가 수행될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 황인두, 박민호, 이상혁, "LQR 제어 알고리즘을 이용한 원운동형 2축 도립진자의 제어", 대한 전기 학회 하계 학술대회 논문집, D권, pp. 2240-2242, 2001.
- [2] Silicon Sensing Systems Japan Ltd, <http://www.spp.co.jp/sssi/sirikon-e.html>
- [3] B. Barchan and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial navigation system for mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, No.3, pp. 328-342, June 1995.
- [4] 박문수, "저급 관성 센서의 오차 분석 및 성능 향상에 관한 연구", 한국 자동제어 학술회의 논문집, 2000.
- [5] 김승진, 홍석교 "외란 극복을 위한 역진자의 Fuzzy Supervisory 제어", 아주대학교 공학 석사학위 논문, 2002.
- [6] A. E. Bryson and Y. C. Ho, *Applied Optimal Control*, Hemisphere Pub. Co., 1975.

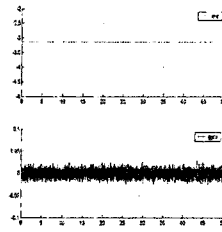


그림 4. 측정 데이터

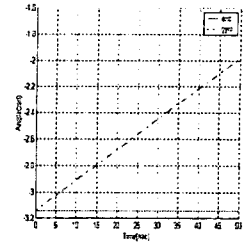


그림 5. 각도 비교

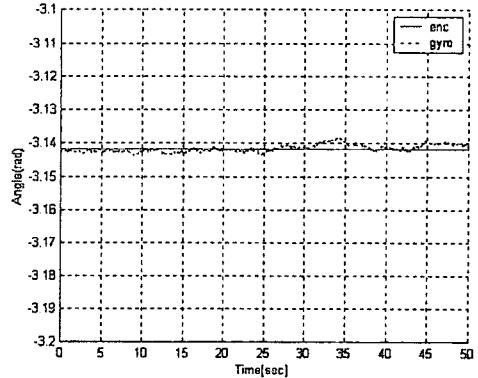


그림 6. 자이로의 바이어스 오차 제거 후 기울기 비교

[경우 1 : 평지]

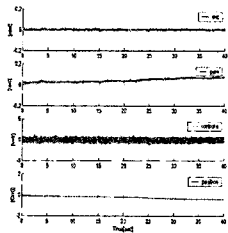


그림 7. 자이로스코프이용

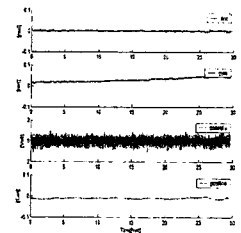


그림 8. 엔코더 이용

[경우 2 : 경사]

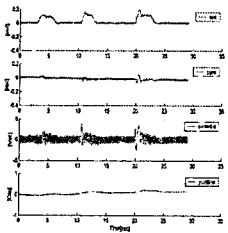


그림 9. 자이로스코프이용

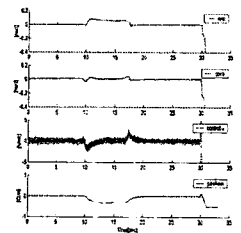


그림 10. 엔코더 이용