

밸런스 빔 제어를 이용한 자동부하 인식에 관한 연구

이 필 주, 사 영 호, 이 건 영
 광운대학교 전기공학과

A Study of Automatic Load Estimator for a Balance Beam Controller

Phill Ju Lee, Young Ho Sa and Keon Young Yi
 Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

Abstract - This paper presents an Intelligent Balance Beam Controller (IBBC) which can estimate the inertia of load automatically. Balance Beam controller is a kind of construction tool which can control the attitude of the load hanging in the air such as a beam carried by crane. In our previous work, Balance Beam had been built to control the object in air using a mechanical gyro system having a position controllable gimbal structure.

In field application the load inertia for operation is not easy to figure out because the weight and shape, which determines the inertia, varies depending on the object to be carried. Therefore it is difficult for a worker to operate a Balance Beam and an accident could be caused occasionally. We designed an automatic load estimator to measure the inertia of arbitrary load by using an angular velocity sensor that is installed on the Balance Beam. Simulation results and current status for implementation are presented.

의 질량이나 형상이 달라지는 경우에는 부하의 관성을 작업자가 정확히 알 수 없는 이유로 숙련자라 할지라도 조작이 간단하지 않으며 경우에 따라서는 작업장에서 안전사고를 야기 할 문제가 있다.

여기서는 위에서 언급한 자이로 구동장치를 이용한 자세 제어 안정화의 응용분야로 밸런스 빔 제어기에 회전각속도 센서를 설치하여 이 센서의 출력과 장치의 간단한 조작을 통하여 임의의 부하에 대한 관성을 자동으로 추정하는 제어를 설계함으로써 기존 제어기의 신뢰성을 강화하고 운전이 용이하게 한다.

1. 서 론

본 논문은 CMG(control moment gyro)를 이용하여 임의의 부하의 관성을 자동으로 측정하는 부하 추정기를 설계하는데 있다. 자이로는 일정 속도로 회전하는 휠(wheel)을 가지고 있고, 공간상에서 그 회전축을 현재의 상태로 유지하려는 특성을 갖는다. 또, 휠의 회전축 이외의 축에 토크(torque)가 가해지면, 토크가 가해진 축에 대한 수직 축을 중심으로 회전하는 힘이 발생하게 된다[1][2]. 자이로 구동장치는 회전하는 원판이 있고, 외부 힘을 가하여 짐벌(gimbal)의 자세를 조정하게 되면 휠의 회전축이 위치를 변경하게되며, 그 때 발생하는 토크를 사용하여 제어대상을 제어하는 것이다. 물체의 자세 안정화에 자이로를 사용한 응용 예는 Kanki, Nekomoto 등의 연구(1994), Ahmed, Miller 등에 의해 이루어진 연구(1997)와 Li, Bainum 등에 의해 이루어진 연구(1998)들이 있다[3][4][5]. 그러나, 위의 연구대상은 비행물체나 곤도라(Gondola) 등 이었다. (3)의 경우 바람 등의 외란에 의한 진동을 CMG(control moment gyro)를 이용하여 곤도라의 자세를 안정화하는 연구이고, (4)는 물체가 회전하고 있을 때, 물체의 자세를 안정화시키려는 연구이다. (5)는 비행물체가 회전하는 경우에 매달려 있는 물체의 자세 안정화에 관한 연구이다. 기존 연구에서는 구동장치를 이용한 공중물체의 자세 제어 및 안정화에 대한 연구를 수행하였으며, 실제 상황에서 실용화할 목적으로 무선통신을 이용한 자이로 구동장치의 짐벌 자세 제어기를 구현하였다[6][7].

기존의 자이로 구동장치를 이용하여 제어대상인 물체

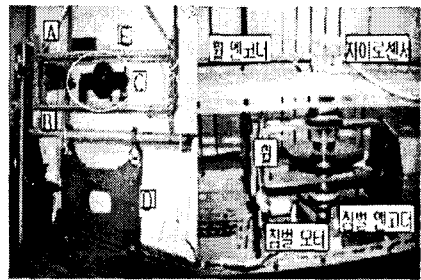


그림 1 자이로 구동장치 및 부하
 Fig. 1 Gyro actuator and load

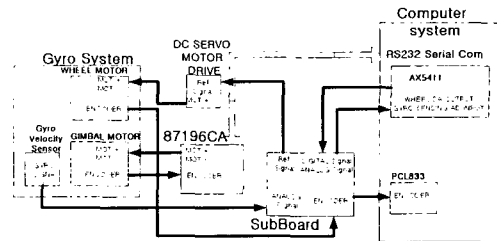


그림 2 시스템 구성도
 Fig. 2 System block diagram

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 실험실 규모의 밸런스 빔을 표시한 것으로 그림의 우측에 자이로 구동장치(C)를 확대 표시하였다. 그림에서 자이로 구동장치는 마찰력이 거의 없는 회전고리(swivel hook)로, 지지물에 매달려 있으므로(A) 평면상에서의 회전운동은 자유롭다. 그림의 B는 부하(D)를 매달기 위한 구조물이며, C는 자이로 구동장치로 오른쪽의 확대된 그림과 같이 고속으로 회전하는 원판과 원판의 회전축에 외력을 가하여 자세 조정이 가능하도록 하는 짐벌로 구성되어 있다. 그림의 E는 압전 진동 자이로 센서로 부하의 회전 속도를 측정하여 능동적으로 부

하의 관성을 측정하기 위한 것이다. 또한 휠 및 짐벌에
는 모터 및 엔코더가 부착되어 있다.

그림 1의 밸런스 빔 제어기 시스템의 구성은 그림 2
와 같다. 밸런스 빔 제어기는 휠 모터의 구동부에 전류
구동 방식인 DC 서보 모터 드라이브(Advanced
Motion Control의 12A8E)를 사용하여 모터 축에 부
착된 엔코더로부터의 펄스를 카운터(어드벤처사의
PCL833 3축 펄스 카운터)로 읽어 들여 정속도 제어를
한다. 또한, 부하의 회전을 감지하기 위해 압전 자이로
센서를 장착하고 컴퓨터의 AX5411 A/D-D/A 컨버터
를 이용하여 변환된 12비트 디지털 값을 측정할 수 있
다. 짐벌 모터의 자세는 연구실에서 개발한
LMD18200을 이용한 87C196 제어보드의 위치제어를
통하여 수행된다.

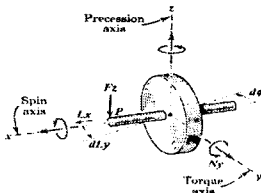


그림 3 자이로 역학
Fig. 3 Gyro dynamics

2.2 자이로 역학

그림 3에서 L_x 는 x 축 방향의 각 운동량, N_y 는 y 축
방향의 토크, J_w 는 휠의 관성이다. 그림 3에서 x 축 상
의 임의의 점 p 에 힘을 가하면 y 축을 기준으로 하는 토크
 N_y 가 발생하며 그 이론적 배경은 아래와 같다.

$$\frac{dL_x}{dt} = N_y \quad (1)$$

$$L = L_x + dL_y \quad (2)$$

여기서, L 은 변화된 후의 각 운동량이며, 각 운동량
의 변화량 dL_y 는 L_x 에 비하여 작으므로 다음의 식(3)
과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\phi = \frac{dL_y}{L_x} \quad (3)$$

이는 다시 식(1)로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_y}{L_x} \quad (4)$$

위의 결과로부터 y 축을 회전시키는 토크가 z 축을 중
심으로 한 회전운동을 일으키는 자이로 효과(gyroscopic
moment effect, gyro effect)가 일어남을 알 수 있다.

2.3 밸런스 빔 시스템

밸런스 빔 제어기 시스템의 전체 모델링은 다음과 같
다. 짐벌 모터에 인가되는 전압에 대한 짐벌의 자세변화
의 운동방정식은 모터의 회전자 인덕턴스를 무시하는 경
우 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{\theta_c(s)}{v_a(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad (5)$$

$$k_m = \frac{k_t}{(k_t k_b + f_m R_a)}, \quad \tau_m = \frac{(J_r + J_c)R_a}{(k_t k_b + f_m R_a)}$$

여기서, k_t 는 토크 상수, k_b 는 역기전력 상수, τ_m 은
시정수이며, R_a 는 권선저항이다[9].

다음으로, 휠의 관성과 자이로 구동장치에 부하가 부
착된 경우를 고려하여 (5)로부터 결정되는 θ_c 에 대한
부하로 전달되는 수직방향의 회전, ϕ ,을 표시하면 다음
과 같다.

$$(J_r + J_c) \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_c}{dt} = J_w \omega_w \frac{d\phi}{dt} - J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (6)$$

$$J_w = M_w \frac{r^2}{2}, \quad J_c = M_w \frac{r^2}{4} + M_w \frac{h^2}{12}, \quad J_L = M_L \frac{(a^2 + b^2)}{12}$$

여기서, J_r 은 모터 회전자의 관성, M_w 는 휠의 질량,
 r , h 는 각각 휠의 반경과 두께, M_L 은 부하의 질량, a ,
 b 는 각각 부하의 가로, 세로길이이며, J_w , J_c 는 휠 자
체의 회전축에 따른 관성이다[2]. 따라서, ϕ 와 θ_c 사이
의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{\phi(s)}{\theta_c(s)} = - \frac{(J_r + J_c)s + f_m}{J_L s - J_w \omega_w} \quad (7)$$

그러므로, 시스템 전체의 전달함수 $G(s)$ 는 다음의 식
(8)과 같다.

$$\begin{aligned} G(s) &= -G_1(s)G_2(s) \\ &= \frac{1}{s} \frac{(J_r + J_c)k_m s + k_m f_m}{J_L \tau_m s^2 + (J_L - J_w \omega_w \tau_m)s - J_w \omega_w} \\ &= \frac{1}{s} \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s - a_0} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, a_0 , b_0 , b_1 은 휠의 형상 및 회전속도, 그리고
짐벌 모터의 규격으로부터 결정되는 양의 상수이며, a_1
은 부하의 관성에 따라 양 또는 음의 상수가 된다. 즉,
위의 전달함수는 하나의 불안정한 극점을 갖는다.

2.4 적응 추정 제어기

앞 절의 식(8)에서 휠 및 부하의 관성을 측정하는
것은 쉽지 않다. 특히 부하의 관성은 작업대상에 따라
그 무게와 형상이 달라짐으로 고정된 값이 아니다. 즉,
위 시스템의 파라미터를 오프라인으로 추정하여 사용하
다 할지라도 시스템의 안전한 운전에 필요한 부하정보는
온라인으로 추정하여야 한다. 따라서, 본 절에서는 이
를 위한 추정기를 설계한다.

시스템 전체 전달함수 $G(s)$ 에서 출력을 부하 각속도로
한 제어기 플랜트 상태방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{J_w W_w}{J_L \tau_m} x_2(t) - k_m f_m u \\ \dot{x}_2(t) &= x_1(t) + \frac{(J_L - J_w W_w)}{J_L \tau_m} x_2(t) - (J_r + J_c) k_m u \\ y_p(t) &= x_2(t) \end{aligned} \quad (9)$$

그림 4는 적응 추정 제어기의 블록 다이어그램으로 입
력 u 는 짐벌 모터의 각도이며 출력 y 는 부하의 회전에
로 부하를 추정하는 관계식이 된다.

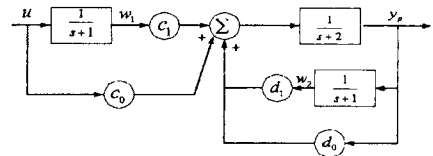


그림 4 적응 추정 제어기
Fig.4 Adaptive Estimator Controller

제어기의 전달 함수는 다음과 같이 나타나며, 플랜트가
제어기에 적용하기 위한 보조 식으로 사용된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= (d_0 + d_1 - 2)x_2(t) + (c_0 + c_1)u(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_1(t) + (d_0 - 3)x_2(t) + c_0 u(t) \\ y(t) &= x_2(t) \end{aligned} \quad (10)$$

제어기의 전달함수가 점근적으로 안정한 목표 값을 추정
하기 위한 변수들은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(t) = \begin{bmatrix} \hat{c}_0 \\ \hat{c}_1 \\ \hat{d}_0 \\ \hat{d}_1 \end{bmatrix}, \quad \hat{w}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ w_1 \\ y_p \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

또한, 플랜트가 목표 값으로 도달하기 위하여 필요한 적 용 방정식과 에러 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_p(t) = \hat{x}_2(t)$$

$$\dot{\hat{y}}_p(t) = -2\hat{x}_2(t) + \hat{c}_0 u + \hat{c}_1 w_1 + \hat{d}_0 y + d_1 w_2 \quad (12)$$

$$e_1 = \hat{y}_p - y_p \quad (13)$$

자이로 시스템의 파라미터 중 c_0, c_1, d_1 은 시스템이 완성되면 그 값을 오프라인으로 추정이 가능함으로 위 플랜트 방정식(9)에서 부하의 관성(J_L)만을 미지의 값 으로 생각하여 \hat{d}_0 만 추정하며, 이때의 적응칙은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{d}}_0 = -\lambda e_1 y \quad (14)$$

여기서 적응 이득인 λ 는 임의의 양수 값이다. 식 (14)에서 \hat{d}_0 가 추정이 되면 부하 관성을 추정할 수 있 게 되는데, 그 값은 다음 식으로부터 얻어진다.

$$J_L = \frac{J_w W_w}{\hat{d}_0 \tau_m - 3\tau_m + 1} \quad (15)$$

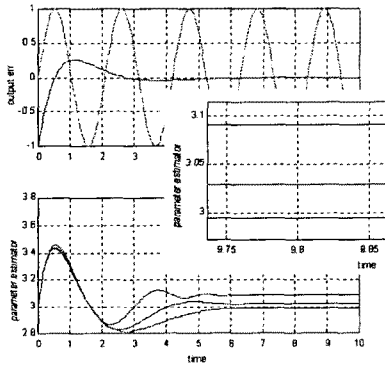


그림 5 추정 제어기 시뮬레이션
Fig. 5 Estimator controller simulation

그림 5는 적응 이득(λ)을 2로 한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에서 사용된 시스템 파라미터는 $k_m = 16.144$, $\tau_s = 34[s]$, $f_m = 0.001$, $W_w = 3000[rpm]$

$J_r = 0.245 \times 10^{-5} [kgm^2]$, $J_w = 1.37 \times 10^{-3} [kgm^2]$
 $J_c = 0.69 \times 10^{-3} [kgm^2]$, $J_L = 2.045 \times 10^{-3} [kgm^2]$ 이다.

짐벌 자세 명령으로는 식(9)에 $\sin(3t)$ 입력으로 짐벌이 초기 위치에서 좌우로 약 45도 움직이게 하였다.

위의 그림에서 출력 오차가 6초 이후에 거의 사라짐을 알 수 있으며, 좌우로 45도 움직이는데 약 2초 정도 걸리는 것을 알 수 있다. 이때 파라미터는 그림 아래 부분에서와 같이 목표 값으로 수렴함을 알 수 있다. 시뮬레이션에 사용된 부하 관성은 그림1에 표시된 부하 ($2.045 [kgm^2]$)를 기준으로 하여 1. 2045, 5 $[kgm^2]$ 로 하였으며 이 경우 \hat{d}_0 의 목표 수렴 값은 3.091, 3.028, 2.994이다. 그림에 확대된 부분에서 \hat{d}_0 가 목표 값에 수렴하고 있음을 보여주고 있다.

2.5 실험

실험 장치는 그림 2와 같이 구성되었다. 주 제어기는 펜티엄 PC를 사용하여 휠이 정속도 운전이 가능하도록 제어할 하고, 자이로 구동장치에 압전 진동 자이로 센서를 부착하여 부하의 회전속도를 측정한다. 엔코더는 커풀러를 통하여 휠 회전축에 결합되어 있으며, 엔코더 데이터는 2차 버터워스 필터(Butter worth filter)를 통하여

진동 및 축 이음새에 의한 잡음을 최소화하여 사용한다. 그림 6은 손으로 부하를 회전시켰다가 정지시킨 경우의 센서 출력을 회전속도로 환산하여 표시한 것이다. 그림의 잡음은 손으로 회전시킬 때 발생하는 진동에 기인한 것으로 부하를 인가했을 경우 진동이 감소하였음을 보여 준다.

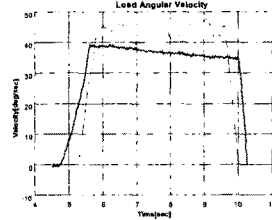


그림 6 부하의 회전 속도 변화
Fig. 6 Variation of load angular velocity

이 신호는 식 (13)의 추정 오차식의 입력으로 사용되며 식(14)의 파라미터 추정에 이용된다. 실제 부하 추정에 대한 실험(센서의 잡음제거에 관한 문제 해결을 진행 중)과 부하 추정 값을 통한 전체 제어기 구성에 대한 실험이 다양한 부하에 대하여 진행 중이다.

3. 결 론

본 논문에서는 임의의 부하에 대한 관성을 추정하는 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능검증은 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통하여 하였으며, 임의의 부하 관성을 자동으로 추정할 수 있다는 것을 보여주었다. 현재 제시한 추정기를 포함한 밸런스 빔 제어기를 다양한 부하에 대하여 적용하는 실험이 진행 중에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Vernon D. Barger, Martin G. Olsson, *Classical Mechanics*, McGRAW-HILL, 1995.
- [2] J. L. Merian, L. G Kraige, *ENGINEERING MECHANICS*, WILEY, 1993.
- [3] Hiroshi Kanki, Yoshitsugu Nekomoto, Hiroyuki Monobe, Hironobu Ogura, Kiichi Kobayashi, "Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondola," JSME Int. J. Series C. Vol. 37, No. 3, 1994.
- [4] Jasim Ahmed, Robert H. Miller, Edward H. Hoopman, Vincent T. Coppola, Dennis S. Bernstein, Tracie Andrusiak, David Action, "An Actively Controlled Control Moment Gyro/GyroPendulum Testbed," Proc. 97 IEEE Int. Conf. on Control Applications, pp. 250-252, 1997.
- [5] Feiyue Li, Peter M. Bainum, N. Glenn Creamer, Shalom Fisher, "Rapid Reorientation Maneuvers of Experimental Spacecraft with a Pendulum Appendage," J. of Guidance Control & Dynamics, V.21 N.1, pp. 164-171, 1998.
- [6] Keon Young Yi, Young Gu Chung, "An Implementation of a Gyro Actuator for the Attitude Control of an Unstructured Object," IEEE Int. Conf. Robotic and Automation, Vol. 2, pp. 1626 - 1631, 1999.
- [7] 정영구, 이진영, "공중 물체의 자세 제어를 위한 자이로 액추에이터 설계," 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, Vol. B, pp. 490-492, 1998.
- [8] 권만오, 김현성, 이진영, "무선통신을 이용한 CMG의 짐벌 자세 제어기 구현," 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, Vol. D, pp. 253-256, 1999.
- [9] Chi-Tsong Chen, *Analysis and Synthesis of Linear Control System*, Pond Woods Press, 1978.
- [10] Benjamin C. Kuo, *Automatic Control Systems*, Prentice Hall, 1995.
- [11] Kumpati S. Narendra, *Stable Adaptive System*, Prentice Hall, 1989.