

밸런스빔을 이용한 미지부하 정속도 회전

김 용 준, 이 건 영
 광운대학교 전기공학과

Constant Velocity Revolution of an Unknown Load
 Using a Balance Beam Controller

Yong Jun Kim, Keon Young Yi
 Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

Abstract - Using the gyro effect, Balance Beam Controller is developed with Samsung Corporation. Balance Beam Controller is possible to control the position of an object in air by controlling the attitude of inner gimbal. But in the unknown load inertia case, even a skilled worker it is not easy to operate a Balance Beam. That is caused by the difficulty to estimate the load inertia. If the amount of the gimbal operation is set excessively with a wrong load estimation, it can often cause accidents. To solve this problem, the control function which is revolving with velocity of the revolution has to be added to developed equipment.

In this research, we analyze the characteristics of a Balance Beam(the smaller load inertia, the bigger force of restitution) using the angular velocity sensor, and present constant velocity revolving controller with estimating value of the load using this moving characteristics.

1. 서 론

본 논문은 CMG(control moment gyro)를 이용하여 미지 부하를 정속도로 회전시키는 밸런스빔 제어기를 설계하고 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 변경하게 되며, 그 때 발생하는 토크를 사용하여 제어대상을 제어하는 것이다. 물체의 자세 안정화에 자이로를 사용한 응용 예는 Kanki, Nekomoto등의 연구(1994), Ahmed, Miller등에 의해 이루어진 연구(1997)와 Li, Bainum등에 의해 이루어진 연구(1998)들이 있다[3][4][5]. Kanki의 경우 곤도라의 자세 안정화에 CMG를 이용하여 바람에 의한 진동을 제거하는 연구를 수행하였으며, 실제로 곤도라의 자세 제어에 응용되었다. Ahmed는 물체가 회전하고 있을 때, 물체의 자세 안정화에 대하여 연구하였다. 그리고, Li는 비행물체가 회전하는 경우에 매달려 있는 부속물들의 자세 안정화에 대하여 연구하였다. 이처럼 Kanki의 연구를 제외한 대부분이 비행물체에 그 초점을 맞추고 있다.

본 연구실의 기존 연구에서는 구동장치를 이용한 공중 물체의 자세 제어 및 안정화에 대한 연구를 수행하였으며, 실제 상황에서 실용화할 목적으로 무선통신을 이용한 자이로 구동장치의 짐벌 자세 제어를 구현하였다[6][7][8]. 그러나 기존의 자이로 구동장치를 이용하면 제어대상인 물체의 질량이나 형상이 달라지는 경우에는 부하의 관성을 작업자가 정확히 알 수 없는 이유로 속린

자라 할지라도 조작이 간단하지 않으며 경우에 따라서는 작업장에서 안전사고를 야기 할 문제가 있다.

여기서는 위에서 언급한 자이로 구동장치를 이용한 자세 제어 안정화의 응용분야로 밸런스빔 제어기에 회전각 속도 센서를 설치하여 이 센서의 출력과 장치의 간단한 조작을 통하여 미지의 부하에 대한 관성을 자동으로 추정하여 밸런스빔을 정속도로 회전하게 하는 제어를 설계함으로써 기존 제어기의 신뢰성을 강화하고 운전이 용이하게 한다.

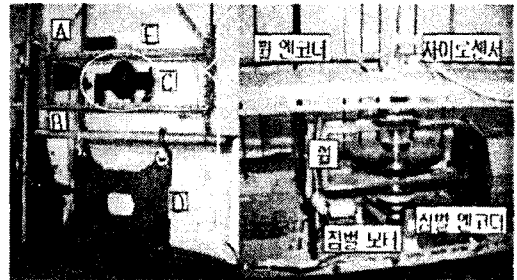


그림 1 자이로 구동장치 및 부하
 Fig. 1 Gyro actuator and load

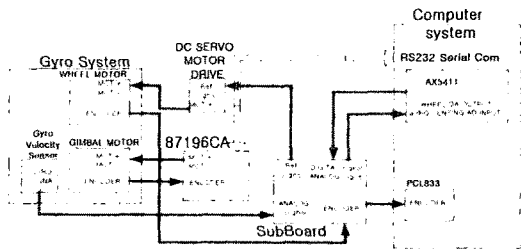


그림 2 시스템 구성도
 Fig. 2 System block diagram

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 실험실 규모의 밸런스빔을 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, (C)는 자이로 구동장치로 오른편의 확대된 그림과 같이 고속으로 회전하는 원판과 원판의 회전축에 외력을 가하여 자세 조정이 가능하도록 하는 짐벌로 구성되어있다. 그림의 (E)는 압전 진동 자이로 센서로 부하의 회전 속도를 측정하여 능동적으로

부하의 관성을 측정하기 위한 것이다. 또한 휠 및 짐벌에는 모터 및 엔코더가 부착되어 있다.

그림 1의 밸런스 빔 제어기 시스템의 구성은 그림 2와 같다. 밸런스 빔 제어기는 휠 모터의 구동부에 전류 구동 방식인 DC 서보 모터 드라이브(Advanced Motion Control의 12A8E)를 사용하여 모터 축에 부착된 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 컨버터를 이용하여 변환된 12비트 디지털 값을 측정할 수 있다. 짐벌 모터의 자세는 LMD18200을 이용하며, 연구실에서 개발한 87C196 제어보드의 위치제어를 통하여 구동된다.

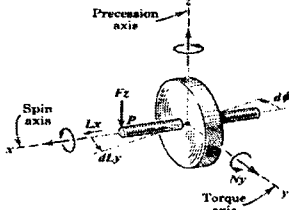


그림 3 자이로 역학
Fig. 3 Gyro dynamics

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 상의 임의의 점 p 에 힘을 가하면 y 축을 기준으로 하는 토크, N_y ,가 발생하며 그 이론적 배경은 아래와 같다.

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

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

여기서, L 은 변화된 후의 각 운동량이며, 각 운동량의 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 중심으로 한 회전운동을 일으키는 자이로 효과(gyroscopic moment effect, gyro effect)가 일어남을 알 수 있다.

구현된 밸런스 빔에서, y 축을 회전시키는 토크는 짐벌 모터를 이용하여 인가하며 그 때 부하의 회전 ϕ 는 z 축을 중심으로 발생하게 된다.

2.3 밸런스 빔 시스템

밸런스 빔 제어기 시스템의 모델링은 먼저 짐벌 모터에 인가되는 전압에 대한 짐벌의 자세변화의 관계를 구한 후 다시 짐벌 자세변화에 대한 부하 회전의 관계로부터 구해진다. 먼저 전자의 경우는 원판 부하를 갖는 모터의 위치제어로 해석할 수 있으며, 이에 대한 운동방정식은 모터의 회전자 인덕턴스를 무시하는 경우 다음과 같이 표현할 수 있다

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

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

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

다음으로, 휠의 질량이 짐벌의 질량보다 상대적으로 무겁다고 가정하고, 휠의 관성과 자이로 구동장치에 부하가 부착된 경우를 고려한다. 이때 식 (5)으로부터 결정되는 짐벌각(θ_c)에 대한 부하로 전달되는 수직방향의 회전 ϕ 를 표시하면 다음과 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 자체의 회전축에 따른 관성이다[2]. 따라서 ϕ 와 θ_c 사이의 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.

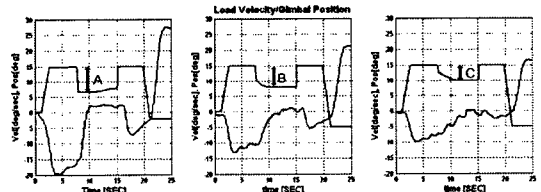


그림 4. 부하 각속도 센서 및 짐벌 궤적
(a): 무부하, (b): 부하 1, (c): 부하2

Fig. 4 The Load angular velocity and gimbal trajectory
(a): No Load, (b): Load 1, (c): Load 2

2.4 미지부하 추정과 정속도 운전

본 논문에서는 이론적인 모델링을 통한 미지 부하의 추정 보다는 실험을 통해 얻어진 각속도 센서 및 짐벌 궤적의 값을 분석하여 미지 부하를 추정한다.

그림 4는 짐벌 제어 명령에 따른 부하의 움직임(각속도 센서 값)과 짐벌의 실제 궤적을 나타낸 것이다. 그림의 A, B, C는 짐벌이 이동명령(800 ms에 15° 만큼 이동)을 수행 한 다음 7초 후에 짐벌모터 전원을 차단한 경우(부하 정지를 위한 안정화 모드)에 짐벌이 원위치로 복원한 양을 표시한 것이다. 이는, 부하 관성의 크기에 따라 부하회전에 사용되고 남은 복원력에 따라 다르며, 부하의 관성크기에 반비례함을 보여주고 있다. 이 값을 측정하여 미지부하의 관성 추정이 가능하다. 즉, 부하를 움직이기 전에 간단한 짐벌 움직임으로 부하를 추정하고, 이로부터 미지의 부하를 정속도로 회전시키기 위한 짐벌의 이동 명령값을 산정 하면 된다. 이에 관한 자세한 내용은 실험을 통하여 알아본다.

2.5 실험

실험 장치는 그림 2와 같이 구성되었다. 주 제어기는 펜티엄 PC를 사용하여 휠이 정속도 운전이 가능하도록

제어를 하고, 자이로 구동장치에 압전 진동 자이로 센서를 부착하여 부하의 회전속도를 측정한다. 실험에서는 표 1에서 보인 것과 같이 3종류의 미지의 부하를 사용하게 되며, 부하의 관성은 아래의 식 (9)를 이용하여 구한다.

$$J_{load} = \frac{1}{12} m(a^2 + l^2) \quad (9)$$

여기서, a 는 부하의 두께이며, l 은 부하의 가로길이이다. 즉 회전관성은 높이에 무관하기 때문에 부하 2와 부하 3은 같은 부하이지만 밸런스빔에 장착하는 방식을 달리(가로 및 세로) 하였기 때문에 관성 값이 다르게 나온다.

표 1. 부하의 무게와 관성
Table 1. Weight and inertia of load

부하	무게 [kg]	관성 [kgm ²]
부하 1	0	0.00
부하 2	55	0.74
부하 3	55	2.12

실험에서는 미지부하의 정속도 회전을 할 수 있는 부하별 짐벌 이동 각을 추정하기 위해 식 (9)에서 계산된 관성 값과 그림 4의 A, B, C값을 표 2와 그림 5를 통하여 비교 분석 하였다.

표 2. 관성에 따른 짐벌의 복원 각
Table 2. Gimbal restitution angle for load inertia

부하	짐벌명령	관성	복원각
부하 1	15	0	8.4 (A)
부하 2	15	0.74	7.1 (B)
부하 3	15	2.12	5 (C)

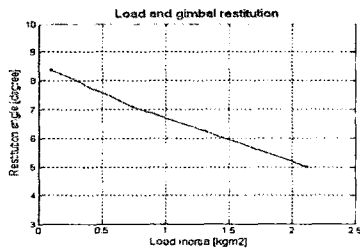


그림 5. 부하의 관성과 복원 각
Figure 5. Load inertia and gimbal restitution angle

그림 5와 표 2에서 보인 것처럼 관성에 따른 짐벌의 복원 각은 일정한 반비례 관계를 가지고 있다. 이를 이용하여 본 실험에서는 미지의 부하에 대하여 초기에 간단한 운동시험을 하여 복원 각 측정을 통하여 부하 관성을 추정하고, 부하속도와 부하관성 특성시험 또는 식 (7)로부터 구해지는 적절한 짐벌 이동 명령을 통하여 부하의 크기와 상관없이 부하가 정속도로 회전하게 하였다.

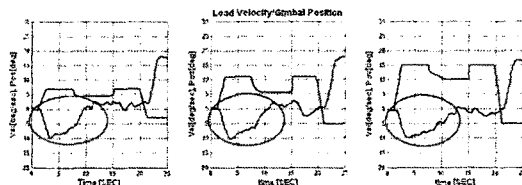


그림 6. 부하 각속도 센서 및 짐벌 궤적
((a): 무부하, (b): 부하 1, (c): 부하 2)
Fig. 6 The Load angular velocity and gimbal trajectory
((a): No Load (b): Load 1 (c) Load 2)

본 실험에서는 일정속도로 3종류의 부하를 90° 회전시키기 위한 짐벌 이동 명령으로 7°, 11°, 15°를 800ms에 이동하게 하였으며, 앞서의 실험에서와 같이 7초에서 안정화 모드를 동작시켜 부하가 정지하도록 한 것으로 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림에서 원으로 표시된 부분이 부하가 회전한 양을 표시한 것(면적이 90° 임)이며, 부하 회전 속도도 같음을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 CMG(control moment gyro)를 이용하여 미지부하의 관성을 추정하고 밸런스 빔을 정속도로 회전시키는 제이기를 설계하였다.

자이로 역학을 기본으로 하여 밸런스 빔 시스템을 모델링 하였다. 또한 실험을 통하여 짐벌 자세제어에 따른 부하의 움직임을 분석(복원각 측정)하여 부하를 추정하였다. 부하를 추정한 결과는 앞서 구한 짐벌자 자세변화에 대한 부하 회전의 전달함수를 통하여 부하를 일정속도로 회전시키기 위한 짐벌각을 구하는데 사용되었으며, 이 값으로 짐벌을 구동한 결과 미지의 부하를 밸런스빔으로 정속도로 회전시킬 수 있었다.

[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, 이건영, "공중 물체의 자세 제어를 위한 자이로 액추에이터 설계," 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, Vol. B, pp. 490-492, 1998.
- [8] 권만오, 김현성, 이건영, "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.