

공중 물체의 자세 제어를 위한 자이로 액추에이터 설계

정영구*, 이건영
광운대학교 전기공학과

Design of a Gyro Actuator for the Attitude Control of an Unstructured Object

Young Gu Chung*, Keon Young Yi
Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon University

Abstract - An intention of this paper is design of a gyro actuator for the attitude control of an unstructured object. It is well known that the attitude control of an object hanging with wire is not easy using usual actuators. Even though an actuator such as a pan can be used for control of the object, it is difficult to meet a desired control objectives. We, for this reason, propose a gyro actuator for the attitude control of an unstructured object.

The proposed gyro actuator consists of two motors. The first motor is responsible to spin the wheel and the second motor is used to turn the outer gimbal. Applying the torque to the second motor, which results in the turn of the outer gimbal, torque about the vertical axis will be obtained while a wheel of the gyro is spinning constantly. This torque is used to control the attitude of the object attached.

The aim of this paper is of deriving the transfer function of the actuator and presenting the guideline of the design parameters such as the weight and the dimension of the wheel, motors, and the load capacity. Simulations to the mathematical model which has a state feedback control are conducted to show the validity of the proposed gyro actuator.

1. 서론

본 논문에서는 현재 제어대상의 위치인식에 널리 사용되고있는 기계식 적분 자이로스코프의 기본적인 역학관계를 이용하여 공중 물체의 자세를 제어하기 위한 액추에이터(actuator) 설계에 그 목적을 둔다. 예를 들어, 크레인으로 빔을 끌어올릴 때 크레인 이동과 함께 빔의 자세가 임의의 방향으로 틀어지게 되는 경우, 또는 가벼운 물건을 건물벽면에 부착하는 경우, 바람 등의 외력에 의해 물체의 자세가 틀어지는 경우, 대상 물체를 원하는 위치로 정확하게 이동시키기가 매우 어렵다. 이 경우 제어대상에 별도의 지지장치를 설치하거나 팬(fan)을 부착하여 제어대상을 제어하는 방법이 이용되고 있지만, 실제로 원만한 제어 목적을 달성하기에는 많은 제약이 따르게 된다.

일반적인 기계식 적분 자이로스코프의 경우 일정 속도로 회전하는 휠(wheel)을 가지고 있고, 공간상에서 그 회전축을 현상대로 유지하려는 특성을 갖는다. 또, 회전축 이외의 축에 토크가 가해지면, 토크가 가해진 축에 대한 수직축을 중심으로 하는 회전하는 힘이 발생하게 된다.

이러한 자이로스코프의 특성을 역으로 이용하는 자이로 액추에이터는 회전하는 원판이 존재하고, 외력을 가하여 짐벌의 자세를 조정하여 휠 회전축의 위치를 변경시켜

서, 그 때 발생하는 토크를 사용하여 제어대상을 목적에 맞게 제어하는 것이다.

물체의 자세 안정화에 자이로를 사용한 예는 1997년 Ahmed, Miller등에 의해 이루어진 연구[1]와 1998년에 Li, Bainum등에 의해 이루어진 연구[2]등이 있다. 하지만 위의 연구들에서는 제어대상이 비행물체에 국한된 것이었다. [1]은 물체가 회전하고 있을 때, 질량의 불균형으로 인한 효과를 줄여서 물체의 자세를 안정화시키려는 연구이다. [2]는 비행물체가 회전하는 경우에 매달려 있는 부속물들의 자세 안정화에 관한 연구이다.

본 논문에서 제시한 자이로 액추에이터는 휠과 휠을 회전시키는 모터와, 외부 짐벌(gimbal)을 회전시키는 모터로 구성된다. 이 액추에이터에 대한 연구 범위는 운동방정식을 구하고, 이에 대한 모의실험을 통하여 액추에이터 설계를 위한 매개변수(휠의 무게 및 크기, 모터의 규격) 및 부하 수용능력을 결정하기 위한 기준을 제시하는데 있다.

2. 자이로 액추에이터 시스템

본 논문에서 제안하고 있는 자이로 액추에이터 시스템의 구성을 2.1에서 간략하게 언급하고, 그 이론적 배경을 2.2에 나타내었다. 2.2는 다시 자이로의 역학에 관한 부분과 본 논문에서 제안하고 있는 자이로 액추에이터의 모델링 부분으로 나뉜다.

2.1 자이로 액추에이터 시스템 구성도

자이로 액추에이터 시스템의 구성도는 그림 1과 같이 자이로 휠, 휠을 회전시키는 모터, 휠 및 모터를 고정하는 짐벌, 외부 짐벌을 회전시키는 모터로 구성되어진다.

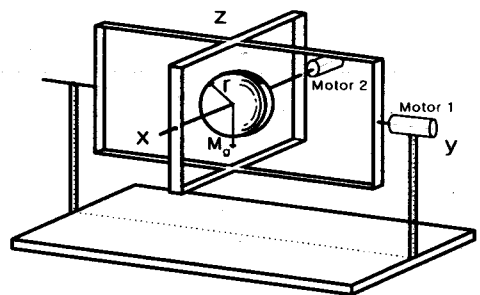


그림 1. 자이로 액추에이터의 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of the gyro actuator

휠 및 짐벌을 구동하기위한 모터는 직류모터를 사용한다. 모터 2에 연결된 휠의 반대쪽 회전축은 마찰이 거의 없는 베어링으로 지지되며, 짐벌의 반대편 축 또한 부하에 부착할 수 있는 얇은 육면체에 고정된 축에 마찰이 거

의 없는 베어링으로 지지된다.

2.2 수학적 배경과 모델링

원운동을 하는 물체는 회전축을 동일 위치에 유지하려는 성질이 있는데, 회전축이 아닌 다른 축에 토크를 가하면 그 축과 수직인 축을 중심으로하는 회전운동이 일어난다. 이 질에서는 이러한 자이로 효과를 설명하며, 이 효과를 이용한 자이로 액츄에이터의 모델링을 다룬다.

2.2.1 자이로의 역학

임의의 점 p에서 본 회전운동을 하는 물체에 의한 각운동량은 물체의 질량입자들 각각의 각운동량의 합인 다음 식으로 표시된다.

$$L = \sum_i (r_i - r_p) \times m_i (\dot{r}_i - \dot{r}_p) \quad (1)$$

여기서, r_i 는 원점에서 입자까지의 벡터, r_p 는 원점에서 임의의 점 p까지의 벡터, m_i 는 입자 질량이다.

위의 식을 미분하면,

$$\dot{L} = \sum_i (r_i - r_p) \times m_i (\ddot{r}_i - \ddot{r}_p) \quad (2)$$

이다. 질량중심까지의 벡터를 R이라 하고, 전체 질량을 M라 놓으면 (2)는 다음으로 표시할 수 있다.

$$\dot{L} = \sum_i (r_i - r_p) \times F_i^{ext} + M (r_p - R) \times \ddot{r}_p \quad (3)$$

위의 (3)에서, p점이 질량중심($r_p = R$)인 경우,

$$\dot{L} = N \quad (4)$$

이다(3).

위의 (3)을 이용하여 그림 2와 같이 x축을 회전축으로 하여 각속도 ω 로 회전하는 원판의 운동역학(자이로의 역학)을 설명하면 다음과 같다.

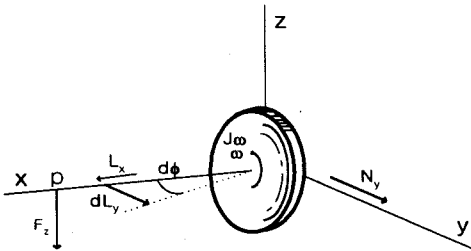


그림 2. 자이로의 역학
Fig. 2. Gyro dynamics

그림에서 L_x 는 x축 방향의 각운동량, N_y 는 y축 방향의 토크, J_w 는 휠의 관성을 나타낸다. 그림에서 x축상의 임의의 점 p에 힘을 가하면 y축을 기준으로 하는 토크(N_y)가 발생하는데, (4)로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{dL_y}{dt} = N_y \quad (5)$$

$$L = L_x + dL_y \quad (6)$$

여기서 L은 변화된 후의 각운동량이며, 각운동량의 변화량 dL_y 는 L_x 에 비하여 작으므로

$$d\phi = \frac{dL_y}{L_x} \quad (7)$$

로 표시할 수 있으며, 이는 다시 (4)로부터 다음과 같다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_y}{L_x} \quad (8)$$

위의 결과로부터 y축을 회전시키는 토크가 z축을 중심으로한 회전운동을 일으키는 자이로 효과가 일어남을 알 수 있다.

2.2.2 자이로 액츄에이터의 수학적 모델링

제안된 자이로 액츄에이터의 수학적 모델링은, 짐벌이 휠에 비해 상대적으로 질량이 매우 가볍고, 짐벌에 사용되는 베어링의 마찰력은 무시할 만큼 작다고 가정하고 유도하였다.

먼저 모터1에 인가되는 전압에 대한 짐벌의 자세변화는 원판부하를 갖는 모터의 위치제어로 해석되며, 이에 대한 운동방정식은 모터의 회전자 인덕턴스를 무시하는 경우 다음과 같이 표시된다.

$$G_1(s) = \frac{\theta_c(s)}{v_a(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad (9)$$

$$k_m = \frac{k_t}{(k_t k_b + f_m R_a)}$$

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

여기서, k_t 는 토크 상수, k_b 는 역기전력 상수, τ_m 은 직류 모터의 시정수, R_a 는 권선저항이다[4].

다음으로, 휠의 관성과 자이로 액츄에이터에 부하가 부착된 경우를 고려하여 (9)로부터 결정되는 θ_c 에 대한 부하로 전달되는 수직방향의 회전 ϕ 를 표시하면 다음과 같다.

$$(J_r + J_c) \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_c}{dt} = J_w \omega_w \frac{d\phi}{dt} - J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (10)$$

$$J_w = M_w \frac{r^2}{2}$$

$$J_c = M_w \frac{r^2}{4} + M_w \frac{h^2}{12}$$

$$J_L = M_L \frac{(a^2 + b^2)}{12}$$

여기서, J_r 은 모터 회전자의 관성, M_w 는 휠의 질량, r 은 휠의 반경, h 는 휠의 두께, M_L 은 부하의 질량, a 는 부하의 가로길이, b 는 부하의 세로길이, J_w , J_c 는 휠 자체의 회전축에 따른 관성이다. 따라서, ϕ 와 θ_c 사이의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{\phi(s)}{\theta_c(s)} = - \frac{(J_r + J_c) s + f_m}{J_L s - J_w \omega_w} \quad (11)$$

따라서, 시스템 전체의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = - G_1(s) G_2(s)$$

$$= \frac{1}{s} \frac{(J_r + J_c) k_m s + k_m f_m}{J_L \tau_m s^2 + (J_L - J_w \omega_w \tau_m) s - J_w \omega_w} \quad (12)$$

$$= \frac{1}{s} \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s - a_0}$$

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

3 시뮬레이션

액츄에이터의 동특성을 알아보기 위하여 불안정한 전달함수 (12)를 상태피드백 제어를 이용하여 안정화하였다. 동특성 개선을 위한 극점 재배치는 추후과제로 남기며, 편의상 s평면의 우반면에 존재하는 극점을 허수축을 중심으로 대칭 이동시켜 시스템을 안정화한 후 계단입력을 가하여 각종 매개변수 변화에 대한 응답특성을 알아보고자 한다.

주어진 전달함수를 가제어표준형의 상태방정식으로 표시하여 불안정한 극점을 대칭 이동시키기 위한 상태피드백이득은 다음과 같으며

$$k_1 = 2a_0, k_2 = -a_1 \sqrt{a_1^2 + 4a_0}, k_3 = 0 \quad (13)$$

휠의 반경 변화, 질량 변화, 그리고 부하 변화에 따른 단일 피드백 응답특성을 고찰하였다. 두께변화에 대한 특성 변화는 (10)에서 알 수 있듯이 두께가 반경에 비해 상당히 작으므로(휠의 두께변화에 의한 관성변화는 무시할만함) 논외로 한다.

실험에 필요한 매개변수는 표 1과 같으며, 휠을 설계하기 위한 앞의 두 실험에서는 부하를 표 1에 주어진 크기로 한다. 휠의 회전 속도는 2000 [rpm]으로 고정하였으며, 모터 1, 2는 각각 맥스사의 10W, 4.5W 모터를 사용하는 것으로 가정한다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 매개변수
Table 1. Parameter using in simulation

파라미터	값[단위]	설명
J_r	10.6 [gcm^2]	모터 1 회전자 관성 역기전력 상수 토크 상수 전자기 저항
k_b	23.5 [mNm/A]	
k_t	23.5 [mNm/A]	
R_a	2.13 [Ohm]	
f_m	0.001	
a	1 [m]	부하 가로길이 세로길이 높이
b	0.2 [m]	
h	0.004 [m]	
S_x	2.7	비중

먼저 반경이 0.05, 0.08, 0.1, 0.13, 0.15 [m]로 변하는 경우에 대해 실험을 하였다. 이 실험의 경우 휠의 질량과 두께는 각각 0.051 [kg]과 0.002 [m]로 일정하게 유지하였다.

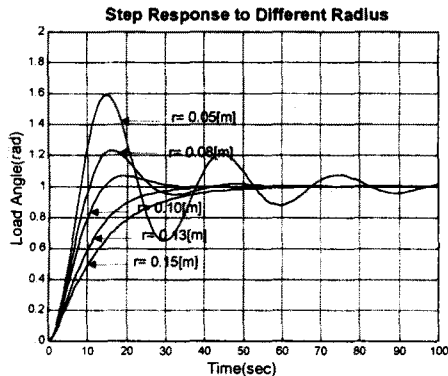


그림 3. 휠의 반경 변화에 따른 계단응답
Fig. 3. Step response to different radius

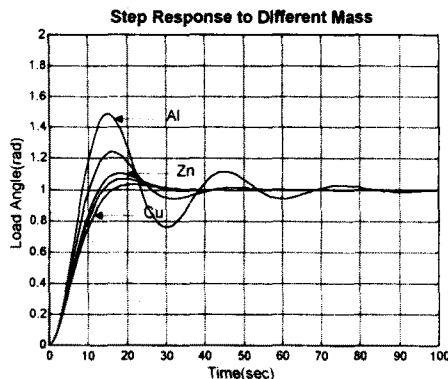


그림 4. 휠의 재질 변화에 따른 계단응답
Fig. 4. Step response to different mass

그림 3의 결과로 보면 휠의 반경이 클수록 제동이 커짐을 알 수 있다.

다음으로 재질 변화에 의한 시스템의 계단응답을 알아본다. 이는 휠의 크기는 고정하고, 휠의 재질 변화에 따른 계단응답을 알아본 것으로 휠 설계시 적절한 휠의 질량을 결정하기 위한 시뮬레이션이다. 휠의 재질을 대표적인 금속인 알루미늄과 야연, 그리고 구리로 하였으며 그 결과가 그림 4에 표시되었다.

그림 4 또한 휠이 동일한 크기인 경우 비중이 큰 재질일수록 제동이 커짐을 보여준다.

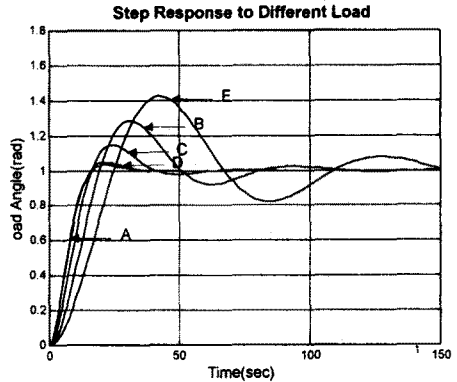


그림 5. 부하 변화에 따른 계단응답
Fig. 5. Step response to different load

마지막으로 앞의 두 실험을 토대로 정한 휠(휠의 재질을 구리로 정하고, 반경은 0.1 [m], 두께는 0.002 [m]로 하였음)에 대하여 부하 변화에 따른 시스템의 계단응답을 알아보았다. A는 표 1에 제시된 기본 부하이고, B는 가로를 2배, 높이를 0.5배로 한 경우, C는 높이를 2배로 한 경우, D는 세로를 2배, 높이를 0.5배로 한 경우, E는 가로를 2배로 바꾼 경우의 부하에 대한 응답특성 곡선을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 공중 물체의 자세를 제어하기 위한 자이로 액추에이터를 제안하였으며, 실제 실험모델 제작에 필요한 설계 기준을 제시하였다. 또, 제시된 자이로 액추에이터의 특성을 고찰하였고, 간단한 제어 예를 보임으로써 그 타당성을 입증하였다.

향후 실험모델을 이용한 적용연구를 통해 실용화를 목표로 한다.

(참고 문헌)

- (1) 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
- (2) 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
- (3) Vernon D. Barger, Martin G. Olsson, "Classical Mechanics," McGRAW-HILL, 1995
- (4) Chi-Tsong Chen, "Analysis and Synthesis of Linear Control System," Pond Woods Press, 1978
- (5) Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems," Prentice Hall, 1995