



소형 CMG의 출력 토크에 대한 실험적 검증

An Experimental Study on the Validation of the Induced Torque of CMG

저자 (Authors)	김현우, 정슬 Hyun Woo Kim, Seul Jung
출처 (Source)	정보 및 제어 논문집 , 2017.10, 101-102 (2 pages) INFORMATION AND CONTROL SYMPOSIUM , 2017.10, 101-102 (2 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07261341
APA Style	김현우, 정슬 (2017). 소형 CMG의 출력 토크에 대한 실험적 검증. 정보 및 제어 논문집, 101-102.
이용정보 (Accessed)	충남대학교 168.***.117.203 2018/05/04 15:30 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

소형 CMG의 출력 토크에 대한 실험적 검증

김현우, 정슬

충남대학교 메카트로닉스 공학과

(Tel : 042-821-6876; E-mail : juns@cnu.ac.kr)

An Experimental Study on the Validation of the Induced Torque of CMG

Hyun Woo Kim and Seul Jung

Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

(Tel : +92-42-821-6876; E-mail : jung@cnu.ac.kr)

Abstract - Control Moment Gyroscope (CMG)는 고속으로 회전하는 휠과 짐벌로 이루어져 있는 구동기이다. 회전하는 휠이 생성하는 각운동량의 벡터 방향을 짐벌 모터를 이용해 변경함으로써 높은 토크를 생성할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 CMG에서 생성되는 토크의 실험적 검증에 대해 소개한다. 제작된 CMG는 단일 짐벌을 갖는 SGCMG의 형태이다. 짐벌 모터를 작동시켜 발생하는 토크를 힘 센서를 이용하여 측정하고, 이를 계산을 통해 얻은 토크와 비교한다. 실험 결과를 통해 제작된 CMG가 적절한 토크를 생성할 수 있음을 확인한다.

논문에서 사용한 CMG는 Single Gimbal CMG이다. 말 그대로 짐벌 축이 1축으로 간단한 구조를 갖는 것을 장점으로 한다. SGCMG는 그림 2와 같이 휠의 회전축과 짐벌의 회전축이 서로 수직이 되도록 배치되어 있다.

CMG가 토크를 발생시키는 원리는 기본적으로 자이로스코프 원리를 이용한다. 휠이 고속으로 회전하면 각운동량이 발생한다. 이 상태에서 짐벌 모터를 구동시켜 각운동량의 벡터 방향을 바꾸어주면, 짐벌 회전축과 휠의 회전축에 수직인 방향으로 토크가 발생하게 된다.

1. 서 론

CMG는 자이로스코프 원리에 의해 토크를 발생시키는 구동기이다. 원하는 축에 직접 구동기를 부착하지 못하는 환경에서 토크를 만들어 낼 수 있는 장점을 가지고 있으며 위성 분야에서 1970년대부터 위성 등의 기동 및 자세 안정화를 위해 CMG가 사용되어 왔다 [1]. 또한 위성의 소형화, 고기동성, 고정밀 기동을 위해 경량화된 CMG가 활발히 연구되어 왔다.

위성 분야뿐만 아니라 선박의 횡동요 현상을 억제하기 위해서도 CMG가 사용된다. 대표적으로 Seakeeper사에서 판매하고 있는 자이로스코프 안정기가 있다. 이 제품은 고속으로 회전하는 휠을 유압 피스톤을 이용하여 틸팅하고 이로써 만들어지는 토크를 이용하여 선박의 횡동요를 억제시킨다 [2].

또한 로봇 분야에서도 다양하게 적용되고 있다. 일본에서는 수중 로봇의 자세 제어에 CMG를 사용하였다 [3]. 그 외에 외바퀴 형태의 모바일 로봇에도 사용되었는데, 여기에서는 좌우 방향의 균형을 유지하는데 사용되었다 [4]. 비슷하게 외바퀴 형태의 개인 운송 수단의 자세 제어에도 적용되어 연구가 진행되었다 [5]. 이와 같이 CMG는 작동 효율이 높고, 원하는 방향으로 토크를 만들어 낼 수 있어 여러 분야에서 차세대 구동기로서 관심을 받고 있다.

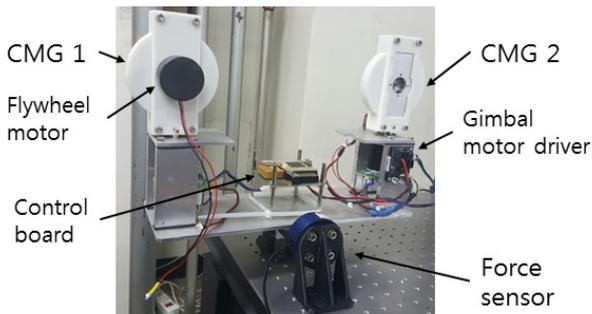
본 논문에서는 제작된 소형 CMG 시스템의 성능을 확인하기 위한 실험 연구를 소개한다. 제작된 CMG를 이동로봇 시스템의 균형유지에 사용하기 위해 실제로 생성되는 출력토크를 분석하고자 한다. 먼저 CMG 시스템을 수식으로 분석하고 실험을 통해 제작된 CMG 시스템의 출력 토크를 측정하여 비교한다. 휠의 모멘텀, 짐벌의 회전속도 등을 이용해 계산한 토크와 비교하여 성능을 확인하고자 한다.

2. 본 론

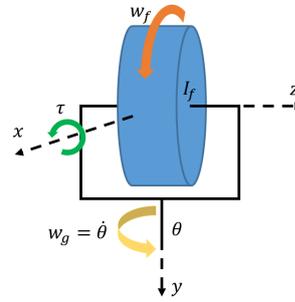
2.1 시스템 소개

그림 1은 구성된 전체 CMG 시스템의 모습을 나타낸다. 동일한 CMG 2개로 구성되어 있으며 중앙 부분에 DSP 28335 보드가 위치한다. DSP 28335는 각 CMG의 짐벌을 제어하여 CMG 시스템의 출력을 결정한다.

휠과 짐벌에는 모두 MAXON사의 BLDC 모터가 사용되었다. 휠에는 컨트롤러 내장형 BLDC 모터가 사용되어 전원만 넣어주면 일정한 속도로 휠을 돌려준다. 짐벌 모터는 EPOS2 컨트롤러와 연결되어 있고, 이 컨트롤러는 DSP와 CAN통신으로 연결이 되어 통신을 하는 구조이다.



〈그림 1〉 CMG 시스템



〈그림 2〉 SGCMG

그림 2를 기준으로 휠의 각운동량을 나타내면 수식 1과 같다.

$$\vec{H}_f = w_f I_f \cos\theta \vec{k} + w_f I_f \sin\theta \vec{i} \quad (1)$$

여기서 I_f 는 플라이휠의 관성 모멘트, w_f 는 플라이휠의 각속도이고 w_g 는 짐벌의 각속도 그리고 θ 는 짐벌의 각도이다.

짐벌의 각속도는 다음과 같다.

$$w_g = \dot{\theta} \vec{j} \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)을 이용해 수식 (3)과 같이 생성된 출력 토크를 각 운동량과 짐벌의 각속도와 외적으로 계산할 수 있다. 짐벌의 각도에 따라 두 방향으로 토크가 생성되는 것을 볼 수 있다. 짐벌의 각도 θ 가 영일 때 최대 토크가 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 2에서 x축으로 최적의 토크 효과를 내기 위해서는 짐벌의 각을 영으로 유지해야 하는 것을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau &= \vec{H}_f \times \vec{w}_g \\ &= \dot{\theta} w_f I_f \cos\theta \vec{i} - \dot{\theta} w_f I_f \sin\theta \vec{k} \end{aligned} \quad (3)$$

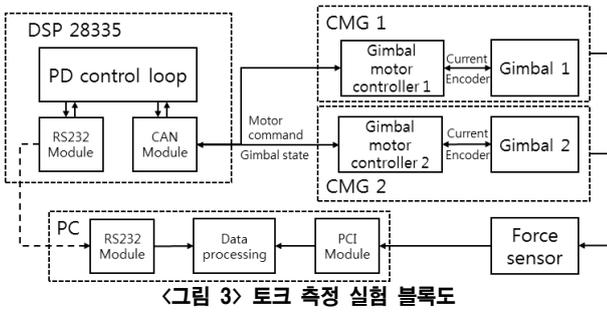
휠은 철 재질로 약 620g 이고 원판 형태의 휠을 사용하였다. 플라이휠의 각속도는 6000rpm이다.

2.2 토크 측정 실험

2.2.1 실험 구성

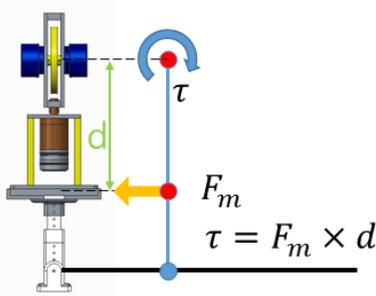
토크 측정 실험은 짐벌을 일정한 주기로 흔들면서 짐벌의 각도와 각속도, 힘을 측정하는 방식으로 진행된다. 이 때, 측정된 각도와 각속도를 이용하여 계산한 출력 토크와 힘 센서로 측정된 힘을 이용하여 계산한 출력 토크를 비교하여 설계대로 토크가 발생되는지 검증하게 된다.

짐벌의 주기적인 움직임은 DSP를 이용하여 만들어 준다. DSP는 CAN 통신을 이용하여 모터 컨트롤러에 짐벌 모터의 동작 명령을 보내고, 현재 짐벌의 각도와 각속도 정보를 받아온다. 또 이러한 정보들을 Bluetooth를 이용해 PC로 전송한다. 힘 센서는 PCI카드를 통해 PC에 직접 연결이 되고, MFC 프로그램을 이용하여 힘 데이터를 수신 및 저장한다(그림 3).



〈그림 3〉 토크 측정 실험 블록도

힘 센서는 휠 중심에서 어느 정도 떨어져 있는 곳에 고정된다. 이 상태에서 CMG가 작동하여 휠 중심에서 토크가 발생하면, 발생한 토크를 떨어져 있는 거리(그림 4의 d)로 나눈 만큼의 힘이 측정되게 된다(그림 4의 F_m). 따라서 측정된 힘 데이터에 거리를 곱해서 토크를 계산하게 된다. 토크 측정 방법의 환경은 그림 5에 나타나있다.



〈그림 4〉 토크 측정 방법 개략도

그림 5는 실제 시스템에 장착된 힘 센서를 보여준다. 휠의 중심으로부터 떨어진 거리는 약 17cm 정도이다. 센서는 6축으로 힘과 토크를 측정할 수 있지만 이번 실험에서는 단순히 한 축의 힘(Force)만을 측정하는 용도로 사용하였다.



〈그림 5〉 장착된 힘 센서

짐벌 모터를 일정한 주기로 동작시키기 위해 sine 함수를 사용해 주었다. DSP에서 모터 컨트롤러로 보내는 입력은 수식 (4)와 같다.

$$M = 1000 * \sin(2\pi ft) - K * \frac{\theta}{1 + \exp(-\theta)} \quad (4)$$

수식 (4)에서 앞의 1000은 전류를 의미한다. 1A에서 -1A까지 모터의 입력을 정한 것이다. 주파수는 3Hz로 설정하여 실험하였다. 식 (4)의 시그모이드 함수는 짐벌의 드리프트를 막기 위한 부분이다.

2.2.2 실험 결과

본 논문에서는 센서를 통해 구한 토크와 계산을 통해 구한 토크가 얼마나 비슷한지를 확인하여 검증한다. 힘 센서의 장착 위치상 원하지 않는 방향의 토크 성분은 무시하고, 다음 수식과 같이 각 짐벌의 토크를 계산하고 합하는 방식을 사용하여 원하는 방향의 토크 성분을 계산하였다.

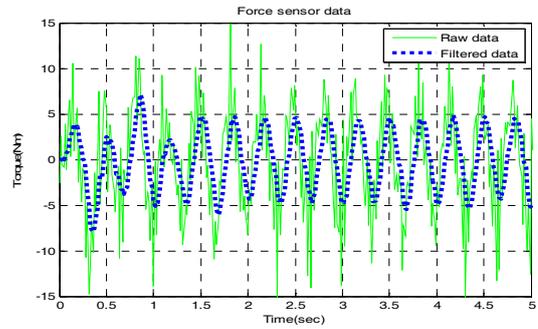
$$\tau_1 + \tau_2 = \dot{\theta}_1 w_f I_f \cos\theta_1 + \dot{\theta}_2 w_f I_f \cos\theta_2 \quad (5)$$

식(3)으로부터 결과적으로 x축 방향의 토크 성분만을 계산한 것이다. 두 짐벌의 각도와 각속도, 휠의 각운동량은 모두 알고 있는 값이기 때문에 토크 값을 계산할 수 있다.

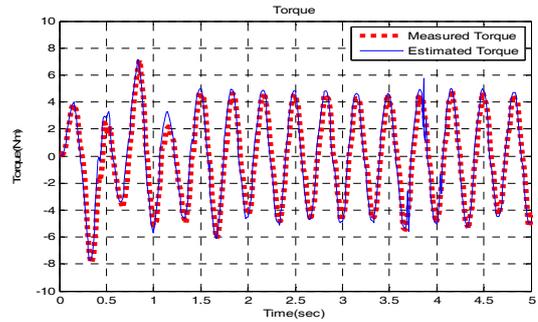
그림 6은 실제 힘 센서로 측정된 값이다. 저역통과 필터를 사용하여 측정 신호를 필터링하였다. 그림 7은 수식 (5)를 이용해 계산된 토크(그림 7의 Estimated Torque)와 힘 센서를 이용해 측정된 토크(그림 7의 Measured Torque)를 비교한 그래프이다. 두 값이 비슷한 경향을 보이며 변화하는 것을 볼 수 있다. 생성된 토크값은 약 5 Nm 정도 되는 것을 확인하였다.

이와 같은 실험을 총 5번 진행하여 분석값과 측정값과의 RMS 오차를 계산하였다. 그 결과는 표 1에 나타나 있다. 평균 오차는 약 0.745 Nm로 나

타났다.



〈그림 6〉 Force sensor data



〈그림 7〉 토크의 비교

〈표 1〉 RMSE

	1	2	3	4	5	Mean
RMSE (Nm)	0.922	0.731	0.414	0.938	0.720	0.745

3. 결 론

본 논문에서는 제작된 CMG의 성능 검증 실험을 진행하였다. 짐벌을 특정 주기로 흔들며 발생하는 토크를 힘 센서를 통해 측정하였다. 이 값을 휠의 각운동량, 짐벌의 각도 및 각속도를 계산한 토크 값과 비교하여 비슷한 토크를 출력하는지 확인하는 방식으로 진행하였다.

실험 결과 측정된 토크는 약 -4.78Nm에서 4.61Nm 값을 갖고 계산을 구한 토크는 약 -4.92Nm에서 4.85Nm의 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 실험은 5번 반복하였고, 그 결과 평균 RMS 오차는 0.745Nm가 나왔다. 실험에서 오차가 발생할 수 있는 요소는 휠의 고속 진동으로 인해 발생한 힘 센서의 잡음 성분, 엔코더를 이용해 측정된 짐벌의 회전 속도, d값 측정 오차 등이 있다. 하지만 실험 결과 오차는 적고 짐벌의 회전 방향 변화에 대한 토크의 전환 경향이 비슷하게 나오는 것을 보았을 때, 제작된 CMG는 적절한 토크를 발생시킨다는 것을 검증할 수 있었다. 즉, 짐벌의 회전 속도가 최대로 회전하고, 그 순간의 짐벌 각도가 0도라면 최대 출력 토크를 기대할 수 있다는 것이다. 또한 Scissored pair 구성의 효과로 2배의 최종 출력 토크를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 연구재단 이공분야 기초연구사업(2016R1A2B2012031)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Morse, A.R., "MSFC Skylab Apollo Telescope Mount," NASA Technical Memorandum, NASA TM X-64811, 1974.
- [2] "Seakeeper", <https://www.seakeeper.com>
- [3] B. Thornaton, T. Ura, Y. Nose, S. Turnock, "Zero-G Class Underwater Robots: Unrestricted Attitude Control Using Control Moment Gyros", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.32, Issue 3, pp.565-583, 2007.
- [4] 김필교, 박준형, 하민수, 정슬. "외박퀴 구동 GYROBO의 제작 및 밸런싱 제어 구현", 제어로봇시스템학회 논문지, 19(6), pp.501-507, 2013.
- [5] Y. Zhu, Y. Gao, C. Xu, J. Zhao, H. Jin, J. Lee, "Adaptive control of a gyroscopically stabilized pendulum and its application to a single-wheel pendulum robot", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 20, no. 5, pp. 2095-2106, Oct. 2015.
- [6] 이선호, "제어 모멘트 자이로의 기술과 산업동향", 한국항공우주학회지, 40(1), pp.86-92, 2012.