

외바퀴 로봇의 역자이로 효과에 의한 바디 모션과 김벌 모션의 실험을 통한 관계 분석

Analysis of Relationship between Body and Gimbal Motion Through Experiment of a Single-wheel Robot Based on an Inverse Gyroscopic Effect

이 상 덕, 정 슬*

(Sang-Deok Lee¹ and Seul Jung^{1,*})

¹Mechatronics Engineering Department, Chungnam National University

Abstract: Control Moment Gyro (CMG) has been used as an indirect actuator of a single-wheel robot system GYROBO, developed at Chungnam National University. The flip motion of the gimbal system produces the gyroscopic motion onto the body system while the body motion also produces the gyroscopic motion onto the gimbal system inversely. In this paper, the intuitive equation of the inverse gyroscopic effect is derived as the direct relation between the rate of the body system and the rate of the gimbal system. Experiments on the inverse gyroscopic effect under the chaotically generated disturbance are conducted. Experimental data are approximated by a linear equation using the least square method.

Keywords: GYROBO, CMG, inverse gyroscopic effect, least square method

I. 서론

제어모멘트자이로는 1960년대 NASA의 “Skylab” 위성과 “ATM” 장치에서 처음 응용되었다[1]. 이 후, 우주항공 분야의 다양한 기업과 연구소에서 우주항공용 구동기로서의 제어모멘트자이로에 관한 개발과 연구가 지속되어 왔다[2]. 최근에는 특정 목적에 적합한 소형 위성의 수요가 증가함에 따라 작고 빠르게 반응할 수 있는 소형 제어모멘트자이로에 대한 연구가 진행되어지고 있다. Honey-Bee Robotics 사의 경우가 그러한 예이다[3]. 제어모멘트자이로는 소형의 김벌 모션을 이용해서 큰 토크의 바디모션을 생성할 수 있다는 점과 지면과의 마찰력을 무시할 수 있다는 점에서 우주항공용 구동기로서 매우 용이하게 사용될 수 있다는 장점을 갖고 있다.

구동기로서의 제어모멘트자이로는 로봇 분야에서도 지속적으로 연구되어 왔다[4-9]. 카네기멜론대학은 제어모멘트자이로를 이용하여 외바퀴 로봇이 균형을 유지하면서 네비게이션을 수행할 수 있는 자이로버(Gyrover)를 소개했다[5-7]. 이와 유사한 개념으로, 충남대학교에서는 외바퀴 균형 제어 로봇인 자이로보(GYROBO)를 개발하였고 균형제

어와 주행 성능을 시연했다[8,9]. 자이로보는 김벌시스템에 내장된 플라이휠을 정속으로 회전시켜서 생성된 각운동량을 김벌의 모션 변화와 결합시켜 바디시스템에 자이로스코픽 효과를 발생시켜서 로봇의 쓰러짐을 억제하는 원리를 이용하고 있다.

하지만, 이러한 시스템은 김벌시스템에 있는 플라이휠의 위치가 항상 제어 가능한 범위 내에 존재해야만 한다는 어려운 문제를 갖고 있다. 만약 김벌시스템에 있는 플라이휠의 위치가 제어 가능한 범위에 있지 않을 경우에는 바디시스템에 유도되는 자이로효과가 로봇의 쓰러짐을 억제하지 못하고 오히려 가속시키는 문제를 발생시키기 때문이다.

플라이휠의 원하지 않는 위치 변화는 외란에 의해서도 생성될 수 있다[10-15]. 즉, 외란에 의해서 바디시스템의 모션이 변하게 될 경우, 김벌시스템에 있는 플라이휠의 위치에 변화가 생기는 문제가 발생하게 된다. 이러한 현상을 본 논문에서는 역자이로효과라고 정의한다.

본 논문에서는 역자이로효과에 의해 발생하는 바디 모션과 김벌 모션의 물리적인 관계를 유도하고 실험을 통해 이를 검증하고자 한다. 실험과정은 다음과 같다. 먼저 로봇과 지면의 마찰 영향을 제거하고 속도제어기를 사용해서 플라이휠을 실제 제어에 사용하는 속도 대역으로 고정시킨다. 다음으로, 바디 시스템에 수동으로 외란을 발생시키고 AHRS (Attitude and Heading Reference System) 센서를 사용하여 취득한 바디 모션과 김벌 모션의 데이터들을 최소사승법을 이용해서 선형화 한다. 끝으로, 수식에 의해 유도된 두 시스템의 비례상수와 실험치를 비교한다.

* Corresponding Author

Manuscript received June 8, 2015 / revised July 24, 2015 / accepted September 24, 2015

이상덕, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(sdcon.lee@cnu.ac.kr/jungs@cnu.ac.kr)

* 본 논문은 2015년 제30회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음[14].

* 본 논문은 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원 받음.

II. 역자이로효과 원리

각운동량이 킴벌의 모션과 결합되면 자이로 토크가 바디 시스템에 유도된다. 그와 반대로, 바디의 모션이 각운동량과 결합할 경우 역자이로효과가 발생하게 된다. 역자이로효과가 발생하게 되면 플라이휠의 위치가 원하는 위치와는 다른 상태로 변할 수 있기 때문에 역자이로효과는 제어모멘트자이로를 활용하는 시스템에서는 반드시 고려가 되어야만 하는 문제이다. 만약 플라이휠의 위치가 지정된 위치를 벗어날 경우 제어모멘트자이로의 순방향 제어 성능이 변하게 된다. 이러한 문제는 위성의 자세 제어나 에너지 저장 플라이휠뿐만 아니라 제어모멘트자이로를 이용한 외바퀴 로봇에서도 고려되어야 하는 공통된 문제이다.

따라서, 본 논문에서는 역자이로효과에 의한 킴벌시스템과 바디시스템의 물리적인 관계를 검증하고자 한다.

1. 제한 조건

역자이로효과와 토크방정식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{dH}{dt} = \frac{d^*H}{dt} + V \times H \tag{1}$$

(1)에서, $\tau(Nm)$ 는 역자이로효과에 의해 유도된 토크이고, $H(kgm^2/s)$ 는 플라이휠의 각운동량이고, $V(rad/s)$ 는 외란에 의한 바디 모션이고, $\frac{d}{dt}$ 는 벡터 H 에 대한 고정축의

시간에 따른 변화이고, $\frac{d^*}{dt}$ 은 벡터 H 에 대한 이동축의 시간에 따른 변화이다. 벡터 H 는 플라이휠로부터 생성되므로 킴벌축을 고정축이라고 할 수 있고 상대적으로 바디축은 이동축이라고 할 수 있다. 즉, 역자이로효과 의해 $t = dt$ 동안 발생하는 킴벌의 모션 변화는 이동축에 해당하는 바디축에 의한 영향과 바디모션과 각운동량 벡터 H 의 외적에 의한 모션의 영향의 합으로 표현된다.

또한, 자이로보의 시스템적인 제한 조건이 고려가 되어야만 한다. 자이로보는 킴벌시스템과 바디시스템 간에 그림 1과 같은 제한 조건을 갖고 있다. 바디축의 좌표를 (X, Y, Z) 라고 할 때, 그림 1(a)에서는 Y축을 중심으로 킴벌 모션이 가능함을 나타내고 있고 그림 1(b)는 Z축을 중심으로 하는 킴벌 모션이 가능하지 않다는 것을 나타낸다. 따라서, 역자이로효과에 두 시스템간 모션 변화의 물리적 의미를 분석하는 과정은 이러한 제한 조건이 반영되어 이루어져야 한다.

2. 바디 요잉 모션에 의한 킴벌 모션 관계

(1)로부터 바디 요잉 모션에 의해 예상되는 역자이로 효과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 시간 $t=0$ 상태에서 바디축의 좌표는 (X, Y, Z) 라고 하면 시간 $t = dt$ 상태에서 바디축의 좌표는 바디축의 요잉 모션에 의해서 (X', Y', Z') 만큼의 변화가 발생하게 된다. dt 의 시간 변화 동안 바디 모션 V 와 수직 상태에 있는 각운동량 벡터 H 에 의해서 각각의 두 벡터에 대한 수직 방향에 $V \times H$ 의 회전 벡터가 발생하게 된다. 이 때, $V \times H$ 의 회전 방향은 Y축을 중심으로 하는 회전 운동이기 때문에 그림 1 제한 조건에 의해 유효한 모션이라 할 수 있다.

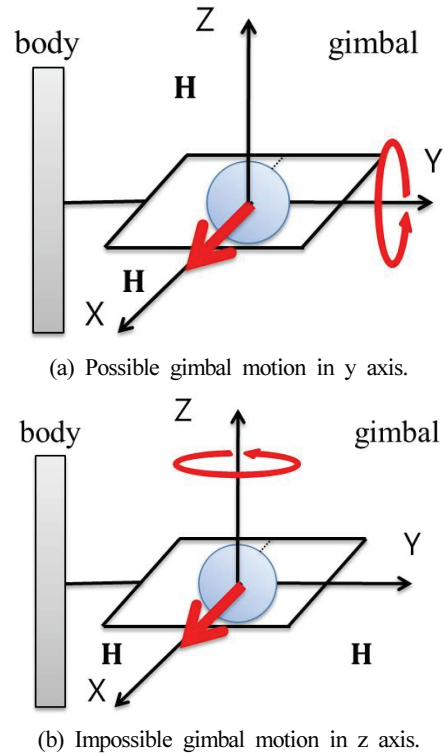


그림 1. 제한 조건.

Fig. 1. Limited condition.

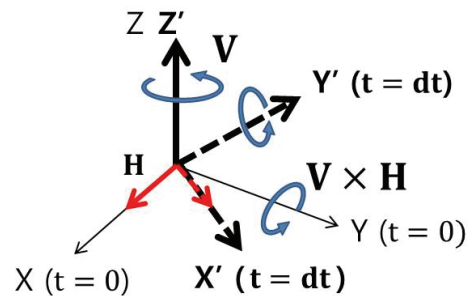


그림 2. 바디 요잉에 따른 예상 킴벌 모션.

Fig. 2. Expected gimbal motion due to the body yawing motion.

벡터 H 에 대한 이동축인 바디축의 속도 변화 $\frac{d^*H}{dt}$ 는 그림 1(b)의 제한조건에 의해서 실질적으로 그 변화량이 발생하지 않게 된다. 즉, 그림 2에서의 Y 방향으로의 킴벌의 모션 변화는 발생하지 않게 된다. 실제로 발생하게 되는 바디 요잉 모션에 따른 킴벌의 모션 변화는 그림 3을 통해 직관적으로 설명할 수 있게 된다. 그림 3에서 $\Omega(rad/s)$ 는 킴벌의 모션에 해당한다.

그러므로, (1)로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$-\Omega = 0 + V \times H \tag{2}$$

바디 모션 V 와 각운동량 벡터 H 가 서로 수직이라 할 경우 벡터의 크기에 관한 식으로 (2)를 정리하면 (3)과 같은 물리적 관계가 있는 식이 성립된다.

$$\Omega = -VH \tag{3}$$

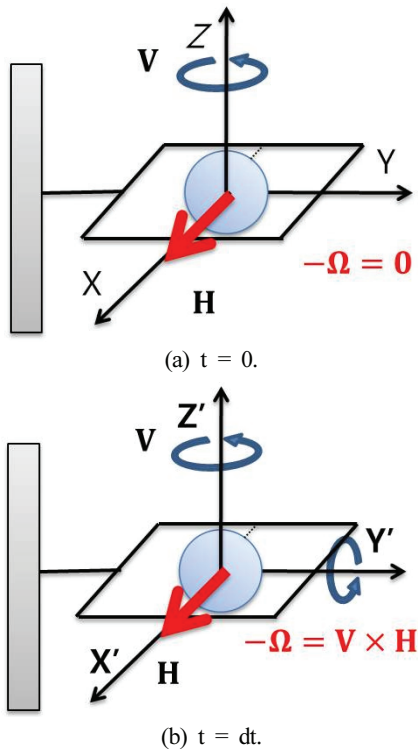


그림 3. 바디 요잉에 따른 실제 짐벌 모션.
Fig. 3. Real gimbal motion due to body yawing motion.

(3)에서 마이너스 부호는 축의 반대 방향을 나타낸다. (3)은 물리적으로 다음과 같은 의미를 갖고 있다. 바디 요잉 모션이 발생했을 경우 짐벌시스템은 각운동량의 크기에 비해하면서 짐벌축의 반대 방향으로 바디 요잉 모션이 증폭된 모션을 발생시키게 된다. 각운동량 모멘텀이 클수록 바디 요잉 모션에 의한 역자이로효과는 매우 크게 작용하게 됨을 의미한다. 즉, 바디 요잉 모션에 따른 역자이로효과에 의해서 바디축에 작은 모션의 변화가 발생할 경우 짐벌축에는 공유된 플라이휠의 각운동량만큼 증폭된 모션의 변화가 발생할 수 있게 된다.

바디의 요잉 모션은 짐벌시스템에 내장된 플라이휠의 위치가 항상 제어 가능한 범위 내에 있어야 하는 자이로보시스템에서 역자이로효과의 영향을 크게 발생시키게 된다.

III. 자이로보

1. 시스템구성

본 논문에서 제안하고 있는 바디 모션과 짐벌 모션 간의 관계 관점에서의 시스템 구성은 그림 4와 같다. 플라이휠을 각속도 $\Omega_f(\text{rad/s})$ 로 회전했을 때 각운동량 벡터를 \mathbf{H} 가 발생하게 된다. 각운동량이 생성된 상태에서 바디시스템에서 그림과 같이 $\mathbf{V}(\text{rad/s})$ 와 같은 요 방향의 모션이 발생했을 경우 내부 짐벌에는 $\Omega(\text{rad/s})$ 의 모션이 발생하게 된다.

자이로보 시스템은 자이로 효과에 의해서 발생하는 힘을 이용하여 바디시스템의 모션을 변화하는 원리를 사용하고 있다. 그러나 그림 4에서와 같이 두 모션의 관계와 밀접한 연관성이 있을 것으로 추정되는 플라이휠은 짐벌시스템의

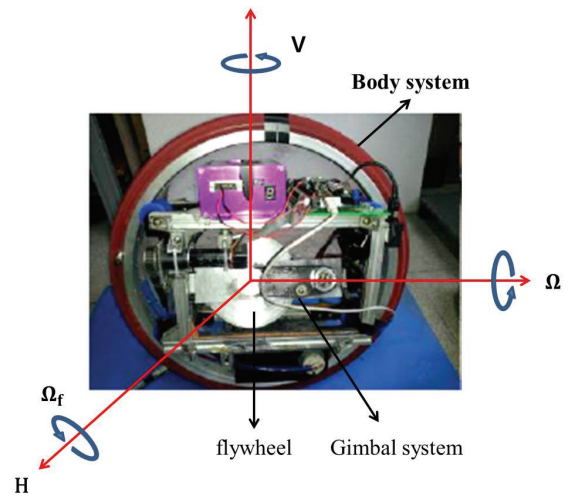


그림 4. 시스템 구성.
Fig. 4. System configuration.

Ω 모션 이외에도 외란에 의해 생성될 수 있는 \mathbf{V} 와도 관련될 수 있는 구조를 갖고 있다.

이러한 시스템 구조에서, 본 논문에서는 외란으로 추정할 수 있는 바디 모션에 의해 역으로 발생할 수 있는 짐벌 모션에 대한 관계를 제안하고자 하고 그 관계가 (2)와 같음을 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 플라이휠 각운동량

플라이휠의 관성모멘텀은 (4)와 같다.

$$I = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{2} \times 2.1 \times 0.075^2 = 0.005906(\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (4)$$

(4)으로부터, 플라이휠의 각 운동량은 (5)와 같다.

$$H(\text{kgm}^2/\text{s}) = 0.005906 \times \Omega_f(\text{rad/s}) \quad (5)$$

(5)에서 Ω_f 는 플라이휠의 회전 속도를 나타낸다.

IV. 역자이로효과 실험

1. 실험환경 및 방법

역자이로효과에 대한 실험방법은 다음과 같다.

- (a) 마찰력 영향의 제거를 위해 지면과 시스템 분리
- (b) 플라이휠의 속도를 지정된 크기로 고정
- (c) 수동으로 외란을 반복적으로 가함
- (d) 모션 데이터 취득용 센서 부착
- (e) 데이터 분석

자이로보의 균형제어 개념은 자이로효과에 의해 발생하는 바디의 요잉 방향 힘과 지면의 마찰력에 의한 반발력에 의한 메커니즘을 이용하는 것이다. 하지만, 역자이로효과의 순수한 영향을 분석하기 위해서는 로봇을 지면으로부터 분리해야만 한다.

그림 5는 제시된 실험 환경이 구축된 모습이다. 케이블을 사용하여 로봇을 지면으로부터 분리 시킨 다음 플라이휠의 정속성을 위해서 로봇에 탑재된 배터리 대신 전원공급장치를 활용하였다. 센싱된 데이터는 데이터 로거에 의해 수집되었다.

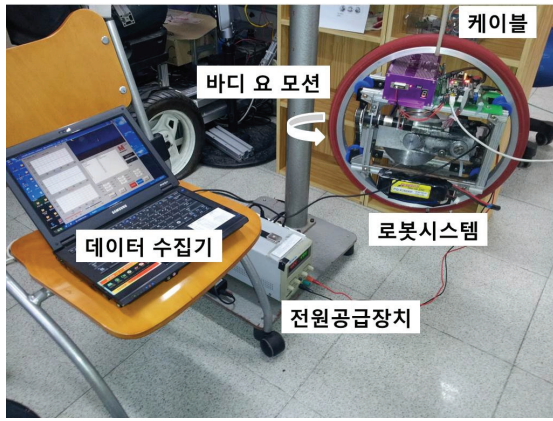


그림 5. 실험 환경.
Fig. 5. Experimental setup.

그림 6은 바디 모션에 대한 실험 내용이다. 먼저 플라이휠의 속도를 정해진 일정한 속도로 고정한 다음에 휠의 속도가 정속으로 되도록 기다린다. 다음으로, 손을 이용하여 바디에 요 모션을 가하게 된다. 요 모션은 지면과 수평적으로 발생하는 회전 운동이라고 볼 수 있다. 무작위로 가해지는 요 모션에 대해 짐벌에 있는 플라이휠에 틸트 모션이 발생함을 확인할 수가 있었다. 이렇게 유도된 틸트 모션을 AHRS 센서를 활용하여 수집하게 된다. 플라이휠의 속도에 변화를 주면서 같은 방법으로 그림 6과 같은 실험을 반복한다. 실험 방법을 정리하면 다음과 같다.

- (a) 로봇의 바디를 손을 이용해서 요 방향으로 반복적인 모션을 생성시켜 준다.
- (b) 이 때 로봇 내부에 있는 플라이휠의 틸트 모션이 유도된다.
- (c) AHRS 센서를 이용하여, 입력과 출력의 모션 신호들을 수집한 다음 분석한다.

그림 7(a)는 플라이휠을 4650rpm으로 고정했을 때의 바디 모션과 짐벌 모션의 변화를 나타내고 그림 7(b)는 플라이휠을 5350rpm으로 고정했을 때의 바디 모션과 짐벌 모션의 변화를 나타낸다.

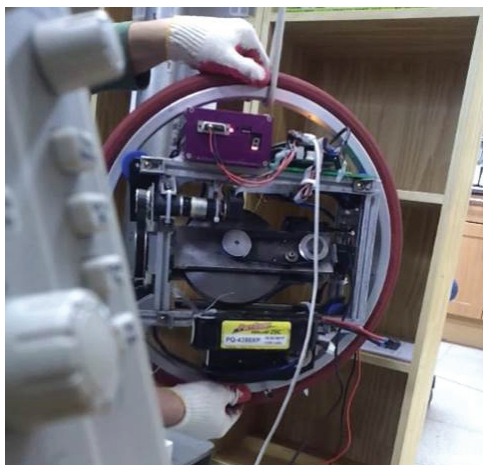
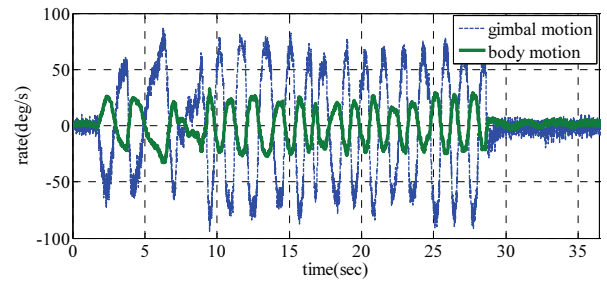
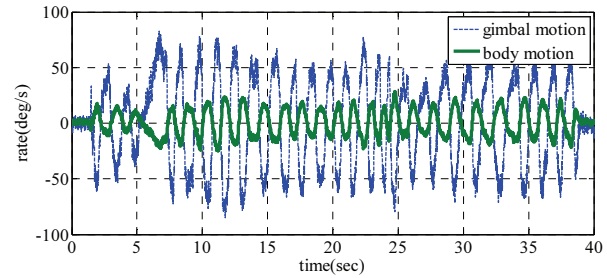


그림 6. 바디 모션 실험.
Fig. 6. Body motion experiments.



(a) Gimbal and body motion at 4650rpm.



(b) Gimbal and body motion at 5350rpm.

그림 7. 바디 요잉 실험.
Fig. 7. Body yawing experiments.

2. 데이터 취득 및 분석

플라이 휠의 속도를 달리하며 실험을 하였다. 데이터 취득을 위해서 Microinfinite사의 AHRS센서 사용하였다. 취득한 데이터는 표 1에 정리하였다.

취득된 데이터의 분석을 위해 Least Square 방법을 사용한다. 이 방법은, 데이터를 직선에 정렬하는데 있어서 가장 적합한 라인을 결정하는 알고리즘이다.

이 때, 계수 b 값은 다음과 같이 거의 0 값에 가까우므로 두 변수 x 와 y 는 선형 관계가 있다고 할 수 있다.

측정된 데이터에 대한 분석 결과는 그림 8과 같다. 플라이휠의 속도를 고정한 상태에서 외란에 해당하는 바디의 모션을 수동적인 방법으로 무작위로 생성시킨 다음에 그때의 바디와 짐벌의 모션을 측정된 결과를 보여준다.

비교 결과, 역자이로효과에 의해서 짐벌에 유도되는 모션은 바디의 모션에 대해 각운동량에 비례하는 물리적 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

표 1. 결과 비교 (a: 기울기, b: y절편).

Table 1. The result comparison (a: slope, b: y-intersection).

	실험1	실험2	실험3	실험4	실험5
플라이휠속도 (RPM)	1,000	1700	2,400	4,650	5,350
플라이휠속도 (rad/s)	104.72	178.02	251.32	489.947	560.25
각운동량 계산치(Nms)	0.618	1.051	1.484	2.876	3.309
각운동량 실험치(Nms)	0.632	0.908	1.393	2.9033	3.316
편차	-0.014	0.143	0.091	-0.0273	-0.007
a	-0.6318	-0.9081	-1.393	-2.9033	-3.3164
b	0.0008	0.0037	-0.0052	0.0094	0.0369

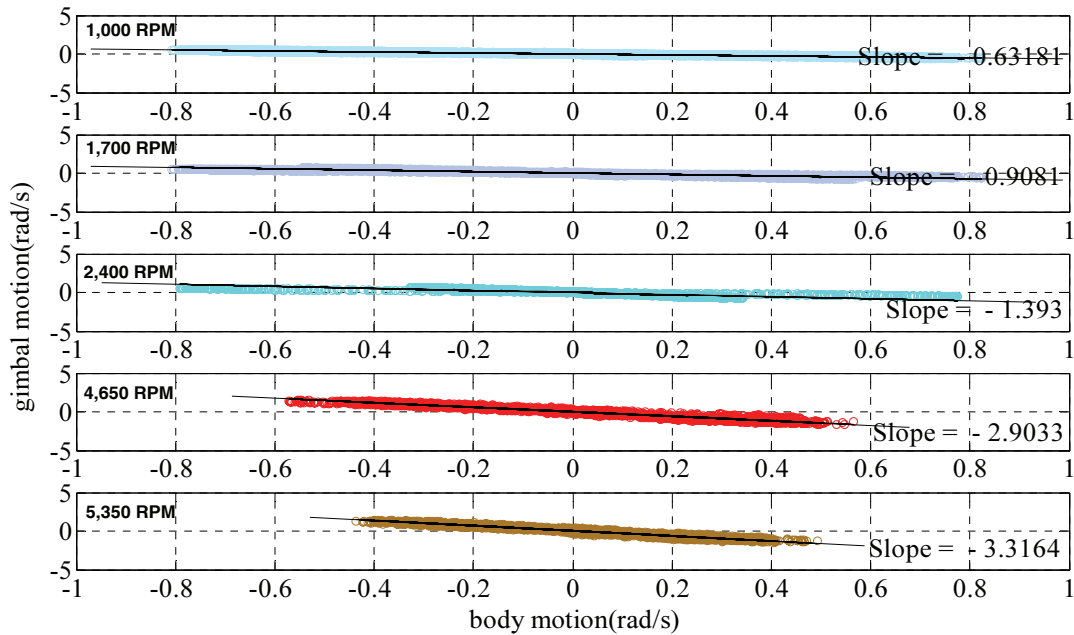


그림 8. 수집된 데이터와 모션 기울기 관계.

Fig. 8. Collected data and the relation of motion slope.

실험 4에서는 총 3683개의 데이터를 취득했고 평균은 0.0061(rad/s)이고 분산은 0.2505(rad/s)였다. 실험 5에서는 총 4018개의 데이터를 수집했고 평균은 0.0093(rad/s)이고 분산은 0.2083(rad/s)였다.

V. 결론

외마퀴 로봇인 자이로보는 김벌에 있는 플라이휠의 위치가 제어 성능에 매우 큰 영향을 주는 시스템이다. 본 논문은 역자이로효과에 대한 직관적인 분석 결과를 제안하였고 실험을 통해 분석적으로 유도된 결과와 실험결과의 오차가 매우 적음을 확인하였다. 또한 역자이로효과는 바디시스템과 김벌시스템 간에 플라이휠의 각운동량을 공유할 경우에 발생할 수 있는 플라이휠의 각운동량 변환 작용이라는 점을 확인할 수 있었다. 이는 외란에 민감한 자이로보의 제어 성능을 위해서 활용되어질 수 있고 유사한 문제에 대해서 보다 쉽고 빠르게 접근하는데 그 활용성이 높다.

REFERENCES

- [1] L. Morine, T. O'Connor, J. Carnazza, H. Varner, and D. Pool, *Control Moment Gyroscope Gimbal Actuator Study*, Bendix Corp. TETERBORO NJ ECLIPSE-PIONEER DIV, 1966.
- [2] V. J. Lappas, W. H. Steyn, and C. I. Underwood, "Attitude control for small satellites using control moment gyros," *Acta Astronautica*, vol. 51, pp. 101-111, 2002.
- [3] E. Mumm, K. Davis, M. Mahihn, D. Neal, and R. Hyayes, "Miniature control moment gyroscope development," *IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-9, 2014.
- [4] S. B. Cardini, "A history of the monocycle stability and control from inside the wheel," *IEEE Control System*, vol. 26, no. 5, pp. 22-26, 2006.
- [5] H. B. Brown and Y. S. Xu, "A single wheel, gyroscopically stabilized robot," *Proc. of the IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 39-44, 1997.
- [6] Y. S. Xu, H. B. Brown, and A. W. Kwok, "Dynamic mobility with single-wheel configuration," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 7, pp. 728-738, 1999.
- [7] Y. Xu and K. W. Au, "Stabilization and path following of a single wheel robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 407-419, Jun. 2004.
- [8] P. K. Kim, J. H. Park, M. S. Ha, and S. Jung, "Implementation and balancing control of on-wheeled robot, GYROBO," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 6, pp. 501-507, 2013.
- [9] J. H. Park and S. Jung, "Development and control of a single-wheel robot: Practical mechatronics approach," *Mechatronics*, vol. 23, no. 6 pp. 594-606, 2013.
- [10] J. Fang and Y. Ren, "Decoupling control of a magnetically suspended rotor system in control moment gyros based on an inverse system method," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 17, no. 6, pp. 1133-1144, Dec. 2012.
- [11] J. Fang and Y. Ren, "High-precision control for a single-gimbal magnetically suspended control moment gyro based on inverse system method," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 58, no. 9, pp. 4331-4342, 2011.
- [12] Z. S. Wang, "Application of adaptive interference suppressor to gimbal of MSCMG," *2013 Fourth*

International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), pp. 267-269, 2013.

- [13] S. R. Vadali, H. Oh, and S. Walker, "Preferred gimbal angles for single-gimbal control moment gyroscopes," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 13, no. 6, pp. 1090-1095, 1990.
- [14] S. D. Lee and S. Jung, "An experimental approach to inverse gyroscopic effect: GYROBO," *Proc. of 2015 30th ICROS Annual Conference (in Korean)*, Daejeon Korea, May 2015.
- [15] S. D. Lee and S. Jung, "Vibration control of a single-wheel robot using filter design," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 9, pp. 863-868, 2015.



이 상 덕

1998년 전북대학교 전자공학과 졸업. 1998년~2000년 LG정밀 근무. 2003년 전북대학교 전자공학과 석사. 2003년~2014년 삼성중공업연구원. 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 CMG, 외바퀴 로봇.



정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능

로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 로봇교육.