

# 제어모멘트 자이로의 제어 성능 평가를 위한 분석적 방법론: GYROBO

## Analytical Method for the Control Performance Evaluation of Control Moment Gyro: GYROBO

이 상 덕<sup>1</sup>, 정 슬<sup>2\*</sup>

<sup>1)</sup> 충남대학교 메카트로닉스공학과 (TEL: 042-821-7232, E-mail: sdcon.lee@cnu.ac.kr)

<sup>2)</sup> 충남대학교 메카트로닉스공학과 (TEL: 042-821-6876, E-mail: jungsl@cnu.ac.kr)

**Abstract** The performance of control moment gyro(CMG) is strongly coupled with the body system. The analytical method not only contains a step-by-step guide to realize the control purpose of the robot but also provides major parameters to evaluate the control performance of CMG. The feasibility of self-standing and balancing is illustrated and the major parameters for the performance evaluation of CMG are proposed

**Keywords** Performance evaluation, CMG, Analytical Method, GYROBO

### 1. 서론

한 바퀴 구동 이동로봇의 핵심은 자이로 효과를 생성하는 김벌시스템이다. 김벌 시스템은 고속으로 회전하는 플라이휠이 내장되어 있어 김벌 시스템의 움직임과 플라이휠의 회전 속도에 의해 자이로 효과가 발생한다. 이는 인공위성의 자세제어에 많이 사용하고 있는 control moment gyro(CMG)와 같은 개념 및 역할을 하고 있다 [1-4]. 그림 1은 다양한 형태의 CMG의 모습을 보여준다. 크기가 작은 것부터 큰 것까지 다양하게 제품으로 출시되고 있다.



그림 1. CMGs(L-3Com, Honeywell, Astrium, Honey-Bee, and CNU)

본 논문에서는 외바퀴 로봇의 자립제어 문제 해결 과정을 통해서 제어모멘트자이로의 성능 평가 지표를 분석적 방법으로 도출한다. 제어모멘트자이로(CMG)의 성능은 바디 시스템의 하드웨어 및 제어 목적과 무관하게 도출할 수 없는 특징을 갖고 있기 때문이다. 도출된 주요 성능 평가 지표를 바탕으로, 제어모멘트를 활용한 로봇 시스템 구축에 영향을 줄 수 있는 3개의 핵심 변수들을 제안한다.

### 2. 제어 문제 및 분석적 방법론

김벌시스템을 이용한 바디시스템의 자립 제어에 관한 문제는 그림 2에 나타나 있다. Direct actuation을 통한 김벌시스템은 indirect actuation으로 출력을 발생한다.

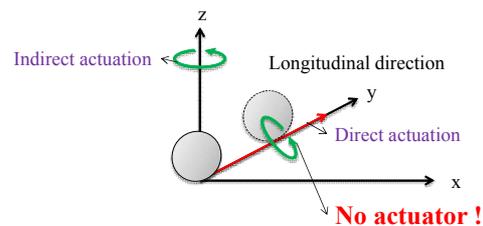


그림 2. 외바퀴 로봇의 자이로 효과

이러한 문제를 해결하는 방법으로 다음의 분석적인 방법을 제시한다.

- (1) 문제 정의 : 로봇의 자립제어 정의와 문제 관점에서의 시스템의 정의
- (2) 물리적 접근 : 김벌 모션과 바디 모션의 물리적인 관계로 자이로 효과를 표현하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증한다.
- (3) 메카트로닉스적 접근 : PWM 신호에 따른 김벌의 모션 분석, 김벌 최대 슬루율, 그리고 바디의 최대 슬루율을 찾는다. 김벌의 최대 슬루율을 로봇의 쓰러짐을 보상할 수 있는 유일한 액추에이션에 해당하

므로, 로봇의 자립을 위한 대안으로, 김벌의 최대 슬루율로 로봇의 쓰러짐을 보상할 수 없는 바디의 제어 가능각도를 로봇의 쓰러짐 실험을 통해 알아낸다.

(4) 자립 제어 검증 : (2)와 (3)에서의 결과들을 바탕으로 자립 제어와 밸런싱 제어가 가능한 제어 알고리즘을 개발한 다음 실험을 통해 이를 검증한다.

(5) 제어모멘트자이로의 제어성능 평가

그림 3은 위의 과정을 도식적으로 표현한다. 자이로의 변수들은 김벌시스템과 바디시스템의 실질적인 관계들을 표현하는 지표에 해당하므로, 이를 제어모멘트자이로의 제어성능 평가 지표로 활용할 수 있게 된다.

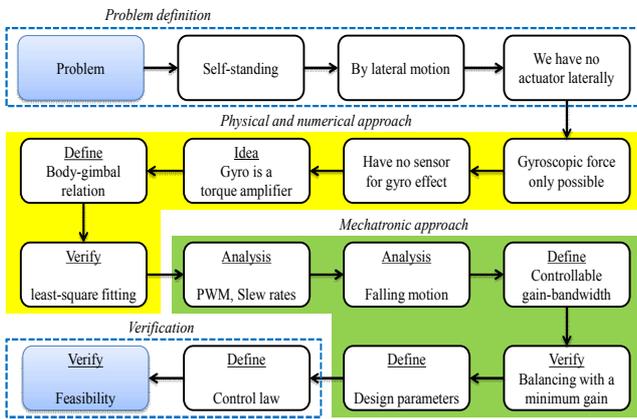


그림 3. 문제 해결을 위한 분석적 방법

### 3. 성능평가지수 비교

제안된 방법론을 통하여 도출된 CMG의 성능평가 지수는 그림 4와 같다. 성능 평가 지수를 정하여 기존의 다양한 CMG의 사양을 정리하였다.

Maker	CMG				
	L-3Com	Honeywell	Astrium	HONEY-BEE	CNU
Momentum(Nms)	4,760	25 to 75	15	0.056, 0.086MAX	3.525
Torque(Nm)	258	75	45	0.112, 0.172MAX	15.4
Rate(rad/sec)	0.054 (3.1 degree/sec)	1	3	2 (estimated)	4.371
Wheel Speed(rpm)	6,600	4500, 5000, 5500, 6,000, 6500	4,800	2,000 - 12,000	5,700
Mass(kg)	272	28	18	0.6	2.1 (flywheel only)
Power Consumption(W)		113	25	20	120watt/200watt peak
SIZE(cm)	130x137x125	D48xH72 (CMG) 24x27x10 (CON)	D27xH35 (CMG) 31x20x15 (CON)	48x48x91 (4CMG) 5x5x9 (1CMG)	32x22x11 (w/o con) 40x30x22 (with con)
Target(Kg)	272			100	12
Application	Spacecraft	Spacecraft	Spacecraft	Spacecraft	Vehicle
Controllable Angle					±5.5 degree
Controllable Rate					±35.25 degree
Controllable Period					0.45 second
Minimum Proportional Gain for Balancing Control					2

그림 4. CMG 성능평가 지수 비교

본 논문에서는 로봇 응용 관점에서 본 CMG 성능 평가를 위한 주요한 설계 변수들을 다음과 같이 제안한다.

1. 모멘텀 밀도 : 단위 김벌 체적 당 모멘텀

2. 파워 밀도 : 전기적 전력 당 기계적 전력

3. 바디-김벌 질량 비

모멘텀 밀도가 클수록, 파워 밀도가 클수록, 그리고 바디-김벌 질량비가 클수록 CMG의 성능변수는 우수하다.

표 1은 성능 평가 지수 비교를 통해 도출한 추후 개발할 CMG의 사양이다.

표 1. CMG 설계 변수 사양

Parameter	Value	Unit
Momentum density	133.5	Nms/(m^3)
Power ratio	0.337max 0.560con	-
Mass ratio	5.715	-

### 4. 결론

CMG의 로봇 응용을 위해서는, 그 성능에 대한 지표가 반드시 필요하다. 하지만, 단순 변수 비교를 통해서만 효율적인 시스템 개발 및 평가가 이루어 지기가 어렵다. 본 논문은 실증적인 접근 방법으로 CMG의 로봇응용을 위한 적용되어지고 있는 CMG의 성능 지표를 확인 할 수 있음을 보여준다. 또한, 새로운 설계를 위해 필요한 3개의 성능 지표를 명확하게 제안함으로써 CMG 기반의 로봇 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 2013년 한국연구재단 일반연구지원(NRF-2010-0024904)과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] Mumm, Erik, et al. "Miniature Control Moment Gyroscope development." *Aerospace Conference, 2014 IEEE*. IEEE, 2014.

[2] Lappas, V. J., W. H. Steyn, and C. I. Underwood. "Attitude control for small satellites using control moment gyros." *Acta Astronautica* 51.1 (2002): 101-111.

[3] Brown, Daniel, and Mason Peck. "Energetics of control moment gyroscopes as joint actuators." *Journal of guidance, control, and dynamics* 32.6 (2009): 1871-1883

[4] L. Morine L., et al. *Control Moment Gyroscope Gimbal Actuator Study*. BENDIX CORP TETERBORO NJ ECLIPSE-PIONEER DIV, 1966.