



제어모멘트 자이로스코프를 이용한 무인 자전거 균형제어

Balancing Control for Unmanned Bike Using Control Moment Gyroscope

박상형 · 이수영[†]

Sang-Hyung Park and Soo-Yeong Yi[†]

서울과학기술대학교 전기정보공학과

Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약

무인 자전거의 균형 자세 제어를 위해 CMG(Control Moment Gyroscope)를 이용할 수 있다. 그러나 단일 CMG의 경우에는 균형 자세 제어를 위한 토크 외에 의도하지 않은 방향으로 토크가 발생하며, 이로 인해 자세가 불안정해질 수 있다. 또한 무인 자전거가 선회 주행을 하는 경우에 CMG의 접벌에 외란이 발생한다는 문제점이 있다. 가위쌍 구조의 CMG는 무인 자전거의 균형 자세제어 수행 시 원치 않는 회전방향으로의 토크를 적게 발생시키며, 선회 주행에서 불필요한 토크를 상쇄함으로써 제어 효율을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 소형 무인 자전거의 균형 유지 제어를 위해 가위 쌍 CMG를 이용한 무인 자전거의 동적 모델과 자세 제어 알고리즘을 제시하였다. 무인 바이크 제어 시스템의 모델 매개변수 추출을 위해 동역학 솔리드 시뮬레이션 프로그램을 활용하였으며, 동역학 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 성능을 검증하였다.

키워드 : 균형제어, 제어 모멘트 자이로스코프, CMG 가위 쌍, 무인 자전거, 동역학 제어

Abstract

A CMG(Control Moment Gyroscope) can be used for balancing control of an unmanned bike. Beside the torque for the balancing control, A single CMG generates unwanted directional torque that may cause instability of the unmanned bike. In addition, the single CMG makes unwanted torque while the unmanned bike is in turning motion. The CMG scissored pair improves the performance of the balancing control by canceling out the unwanted torque. This paper presents the dynamics model and the balancing control algorithm using the CMG scissored pair for a miniaturized unmanned bike. A dynamic solid simulation program was used to obtain the parameters of the dynamics model of the bike. Performances of the proposed balancing control algorithm are verified by computer simulations.

Key Words : Balancing Control, Control Moment Gyroscope, CMG Scissored Pair, Unmanned Bike

Received: Mar, 6, 2018

Revised: Oct, 5, 2018

Accepted: Oct, 8, 2018

[†]Corresponding authors

suylee@seoultech.ac.kr

1. 서론

자전거나 오토바이가 일정 속도 이상으로 전진하고 있으면 쉽게 옆으로 쓰러지지 않는다는 사실은 익히 알려져 있다 [1]. 그러나 정지해 있거나 저속으로 움직이는 경우에는 자전거가 스스로 서 있지 못한다. 쓰러진 자전거를 일으켜 세우는 데에는 큰 힘이 필요하기 때문에 자율주행 무인 자전거를 실현하기 위해서는 저속이나 정지 상태에서도 쓰러지지 않고 자세를 안정하게 계속 유지해야 한다.

이동로봇의 균형 자세제어를 수행할 때, 로봇의 이동 방향과 로봇이 쓰러지는 방향이 같은 경우에는 참고문헌 [2]와 같이 로봇 하부의 마퀴를 구동하여 자세를 제어할 수 있다. 하지만 무인 자전거는 자전거가 쓰러지는 방향과 자전거의 이동 방향이 일치하지 않으므로 별도의 토크 발생 장치가 이용되는데, 이러한 토크발생 장치로는 반작용 휠(reaction wheel)이나 기계적 자이로스코프가 있다. 반작용 휠은 큰 관성 모멘트를 가지는 원판을 모터로 연결한 단순한 구동기이다.

모터에서 원판으로 토크를 가하면 그 반작용 토크가 모터가 고정된 무인 자전거의 몸통으로 전달되는 간단한 원리로 작동한다 [3, 4]. 반작용 휠은 구조가 단순하다는 장점이 있으나, 모터의

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

역기전력이 회전자의 회전속도에 비례하므로 회전자 속도가 빨라질수록 모터의 토크는 감소하며, 강한 토크를 무인 자전거의 몸체에 지속적으로 전달하기 위해서는 원판의 크기를 충분히 키워야 한다. 또한 반작용 휠이 무인 자전거에 전달하는 토크의 크기는 온전히 모터의 토크에 의존하기 때문에 토크가 강한 모터가 필요하다.

한편 제어 모멘트 자이로스코프(CMG)는 짐벌과 짐벌에 고정된 고속으로 회전하는 원판(flywheel)으로 구성되어 있으며, 원판이 바라보는 방향을 짐벌로 회전시킬 때 발생하는 세차운동 토크를 이용하는 구동기이다 [5]. CMG의 토크 전달 지속 능력은 원판의 관성모멘트와 최고 회전속도에 비례하기 때문에 CMG의 원판을 회전시키는 모터는 강한 토크출력을 가지기 보다는 높은 회전 속도를 가지는 것이 유리하며, 짐벌 모터 역시 반작용 휠의 모터에 비하여 비교적 작은 토크출력을 갖는 것으로 충분하다. 참고문헌 [6, 7, 8]에서는 단일 CMG의 세차운동 원리를 이용하여 무인 자전거의 균형을 유지하는 방법을 제안하였다.

일반적으로 CMG는 반작용 휠에 비하여 지속적인 외란에 대하여 에너지 효율성이 높다고 알려져 있다 [9]. 그러나 단일 CMG의 경우 CMG 짐벌의 구동각에 따라, 혹은 무인 자전거의 선회운동시 원치 않는 방향 토크를 발생시킨다는 문제점이 있다. 이 때 발생하는 토크는 무인 자전거의 균형 자세 제어에 있어서는 방해 요소이며, 또한 CMG는 자전거의 모든 방향 회전에 대하여 회전 댐퍼와 비슷한 역할을 하므로 [10] 무인 자전거 선회 운동의 에너지 효율성을 떨어뜨린다.

상술한 단일 CMG 이용 방법의 문제점들은 원판과 짐벌이 서로 반대방향으로 회전하도록 설계된 CMG 가위 쌍(CMG scissored pair)을 이용하여 크게 완화할 수 있다. CMG 가위 쌍은 높은 에너지 효율성 [11], 제어하고자 하지 않는 회전 방향으로 토크가 발생하지 않는다는 장점 [12, 13] 때문에 가격 효율성이 떨어진다는 단점에도 불구하고 [14], 한 회전축으로 움직이는 우주선 외부에 장착된 트러스와 같이 하나의 회전 축으로만 토크를 발생하여 자세를 제어하려 하는 경우나 [15, 16], 여러 회전축으로 토크를 발생하고자 하더라도 토크를 발생시키지 않고 싶은 회전축이 있는 경우에 많이 사용된다 [17].

본 논문에서는 CMG 가위 쌍을 이용한 무인 자전거의 동역학 모델과 짐벌 제어 알고리즘을 제시한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서 가위쌍 CMG의 원리와 이를 적용한 무인 자전거 동역학 모델에 관해 설명하고, 3절에서 균형유지 제어를 위한 LQR 제어기 설계에 관해 기술한다. 그리고 4장에서 시뮬레이션 결과를 제시한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. CMG를 이용한 무인 자전거

본 논문에서 사용한 CMG를 이용하는 무인 자전거의 구조는 그림 1과 같다. 가위쌍 CMG 모듈은 자전거의 상부에 설치되고, CMG의 원판은 원판 모터에 의해 항상 정속으로 회전하며, 짐벌은 별도의 짐벌 모터에 의해 구동된다.

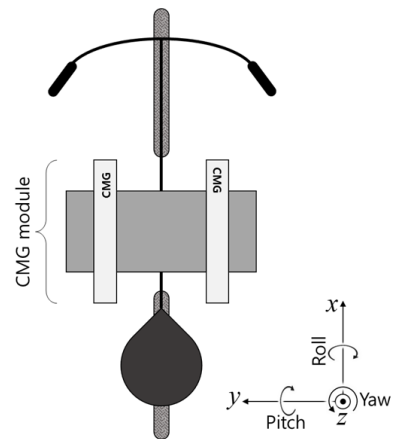


그림 1. CMG를 갖는 무인자전거의 구조 (상면도)

Fig. 1. Structure of unmanned bike with CMG (Top view)

2.1 CMG 원리 및 가위쌍 CMG

CMG는 짐벌에 연결된 고속으로 회전하는 원판의 세차운동을 이용한 토크 발생 구동기이다. 토크는 각운동량 벡터의 변화율이므로 그림 2 (a)와 같이 짐벌 모터에 의해 원판의 각운동량 벡터가 회전($\dot{\phi}$) 하면 그 순시 변화율이 토크이며, 그 반작용 토크가 자전거의 몸통에 전달된다. 이 반작용 토크가 자전거 몸체가 균형을 잃음으로써 발생하는 롤(roll) 방향의 회전($\dot{\theta}$)을 극복하는 복원력이 된다.

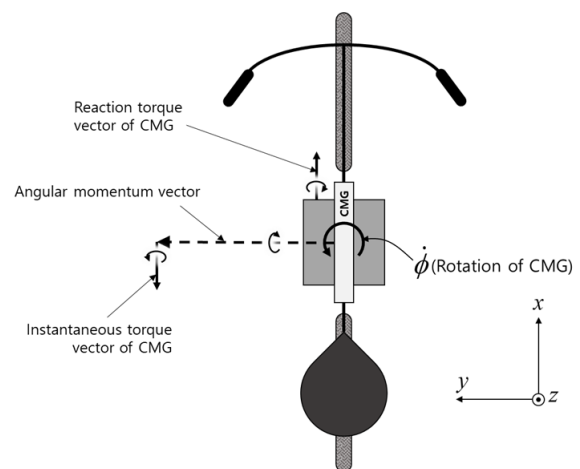


그림 2. CMG의 원리 (단일 CMG)

Fig. 2. Principle of CMG (Single CMG)

무인자전거의 롤 각도 제어를 위해 CMG를 이용하는 경우, CMG의 짐벌 방향각에 따라, 아래 그림 3과 같이 토크 벡터의 방향 성분들이 발생하게 된다. 이 때 CMG 토크 벡터를 롤 방향 복원 토크 방향과 이 방향에 직각인 방향으로 분해할 수 있으며, 이 때 롤 방향 복원 토크 이외의 토크 성분은 계산 가능한 물리량임에도 불구하고, 제어 목적에 따라 불필요하기 때문에, 경우에 따라 설계자의 입장에서 외란으로 간주할 수 있다. 따라서 CMG의 각운동량 벡터는 가능한 한 롤 방향축과 직각인 방향에 가까운 상태로 유지되어야 한다.

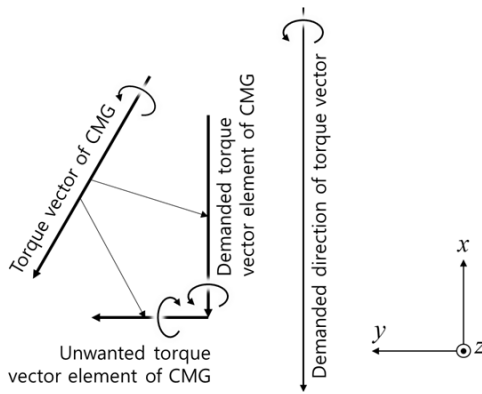


그림 3. CMG 토크 벡터의 분해
Fig. 3. Decomposition of CMG torque vector

불필요한 방향 토크를 외란으로 간주한다면, 해당 외란 문제는 가위쌍 구조의 CMG(CMG scissored pair)를 이용함으로써 해소할 수 있다. 가위쌍 CMG는 그림 4와 같이 짐벌의 회전 방향이 서로 반대이고, 대칭적 구조를 갖는 두 개의 CMG 모듈을 일컫는다. 두 CMG 원판의 회전속력은 동일하고, 회전방향은 서로 반대이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 CMG에서 발생한 불필요한 방향의 토크들이 서로 상쇄되어 피치(pitch) 방향 토크만 남게 되며, 이는 무인자전거의 균형에 영향을 미치지 않는다.

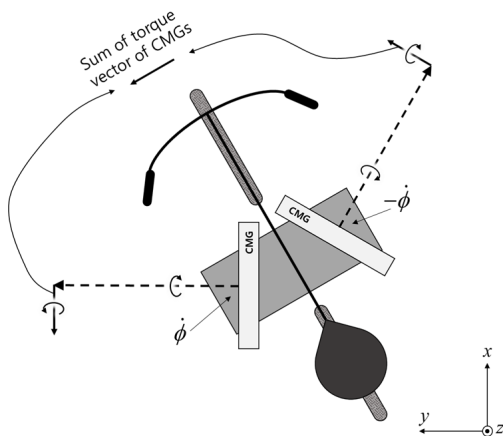


그림 4. CMG 가위쌍
Fig. 4. CMG scissored pair

2.2 무인자전거 동역학 모델

CMG 가위 쌍을 이용하는 무인자전거의 모델 기반 제어를 수행하기 위해서는 시스템의 동역학 모델이 필요하다. 무인자전거의 동역학은 참고문헌 [1]과 같이 복잡하게 구해진다. 하지만 본 논문에서는 무인자전거의 균형 자세제어에 관해서만 논할 것이며, 자전거가 고속 이동을 수행할 때에는 자체적으로 도립하는 성질을 가지고 있다. 따라서 무인자전거가 정지해 있거나, 혹은 저속으로 움직인다는 준 정적(Quasi-static) 가정하에 근사화된 역전자 모델로 표현할 수 있다. 동역학 표현식에서 사용될 기호들은 아래 표 1과 같다.

표 1. 매개변수들
Table 1. Parameters

θ	Lean angle of the bike body
ϕ	Angle of a CMG gimbal
τ	Gimbal motor's torque
τ_{CMG}	Torque applied to a CMG gimbal
τ_{bike}	Torque applied to the bike's body
J_{bike}	Moment of inertia of bike including CMGs for leaning rotational axis
τ_{CMG}	Moment of inertia of a CMG for rotational driving axis
m	Mass of the bike including CMGs
l	Distance between the ground and the center of mass of the bike including CMGs
g	Gravitational acceleration
L	Angular momentum of a flywheel

무인자전거의 동체와 CMG 짐벌의 각속도($\dot{\theta}, \dot{\phi}$)는, 각속도와 토크의 관계에 의해 식 (1-1)과 같이 표현된다. 이때, τ_{bike} 는 자전거의 기울기(θ)에 따라 중력에 의해 발생하는 토크 항($mgl \sin \theta$)과 CMG 짐벌의 회전에 의해 발생하는 토크 항($2L\dot{\phi} \cos \phi$)의 합으로 표현되며, τ_{CMG} 는 CMG가 무인자전거의 동체와 함께 기울어지면서 발생하는 짐벌 회전 축 방향 토크 항($-L\dot{\theta} \cos \phi$)과 CMG 짐벌 모터 토크 항(τ)의 합이다. 이러한 관계는 식 (1-2)와 같이 표현된다. 한편, 식 (1-2)에서 짐벌의 회전속도에 의해 발생하는 토크 항의 크기가 짐벌의 회전각에 따라 줄어드는 것은 짐벌의 회전에 의해 발생하는 토크 벡터의 방향과 자전거가 쓰러지는 회전축의 방향이 같지 않기 때문이다. CMG가 몸통에 전달하는 토크의 크기는 CMG 가위 쌍이 두 개의 CMG를 이용하기 때문에 $-L\dot{\theta} \cos \phi$ 의 두 배이다.

$$J_{bike} \ddot{\theta} = \tau_{bike} \quad (1-1)$$

$$J_{CMG} \ddot{\phi} = \tau_{CMG}$$

$$\begin{aligned}\tau_{bike} &= mgl \sin \theta + 2L\dot{\phi} \cos \phi \\ \tau_{CMG} &= -L\dot{\theta} \cos \phi + \tau\end{aligned}\quad (1-2)$$

여기서 원판의 회전 운동량, L 은 원판의 관성 모멘트와 회전속도의 곱으로 정해진다.

3. 균형유지를 위한 LQR 제어

3.1 상태공간 모델

무인 자전거와 가위쌍 CMG의 동역학 모델 식 (1-1)과 식 (1-2)를 정리하여 선형화하면 다음 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}J_{bike}\ddot{\theta} &= mgl\theta + 2L\dot{\phi} \\ J_{CMG}\ddot{\phi} &= -L\dot{\theta} + \tau\end{aligned}\quad (2)$$

선형 식 (2)를 상태 방정식으로 정리하면 아래 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + Bu \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mgl}{J_{bike}} & 0 & 0 & \frac{2L}{J_{bike}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-L}{J_{CMG}} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_{CMG} \end{bmatrix} \\ X &= \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad u = \tau\end{aligned}\quad (3)$$

적분 제어를 통해 짐벌의 구동각을 평형점으로 수렴시키기 위하여 식 (3)의 상태 방정식을 아래 식 (4)와 같이 확장한다.

$$\begin{aligned}\dot{X}_{aug} &= A_{aug}X_{aug} + B_{aug}u \\ A_{aug} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{mgl}{J_{bike}} & 0 & 0 & \frac{2L}{J_{bike}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-L}{J_{CMG}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{aug} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ X_{aug} &= \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \phi_I \end{bmatrix}, \quad \phi_I = \int_0^t \phi dt, \quad u = \tau\end{aligned}\quad (4)$$

3.2 LQR 제어가 설계

LQR 제어 알고리즘은 선형 궤환 제어 알고리즘으로서 각각의 상태 변수들에 대한 성능 지표 가중치를 간단하게 지정할 수 있으며, 그 구현 방법이 간단하다. 따라서 본 논문에서 무인 자전거 균형제어 알고리즘으로 LQR 제어 알고리즘을 이용하였다.

이제 선형 상태 방정식 (4)를 이용하여 LQR 제어를 수행하기 위해 성능 지수를 식 (5)와 같이 설정한다. 이 때 K 는 짐벌 모터로부터의 토크 입력 제어값에 이용될 선형 상태궤환 이득이다.

$$\begin{aligned}J &= \int_0^\infty (X_{aug}^T Q X_{aug} + u^2 R) dt \\ u &= -K X_{aug}\end{aligned}\quad (5)$$

이 때 Q 는 상태 벡터 X_{aug} 에 대한 가중치 행렬, R 은 제어 입력, u 에 대한 가중치로서 식 (6)과 같이 설정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 15^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1^2 \end{bmatrix}, \quad R = 1\quad (6)$$

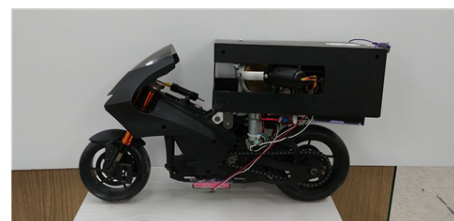
이 때 가중치 행렬 Q 는 중력의 영향을 직접적으로 받는 θ 에 가장 높은 가중치를 부여하였으며, θ 의 속도인 $\dot{\theta}$ 와 CMG의 비선형적 특성을 보이는 ϕ 에 다음으로 높은 가중치를 부여하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 동역학 매개변수 추출

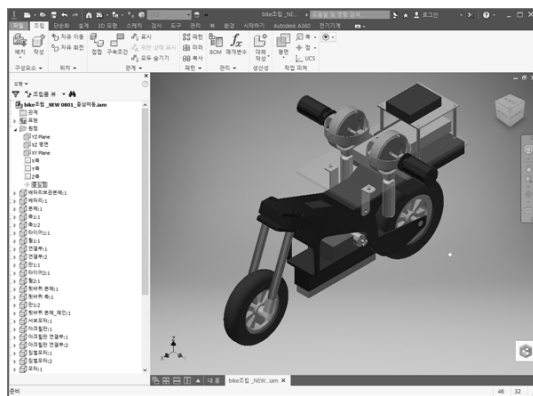
4.1.1 동역학 솔리드 모델

CMG 가위 쌍을 이용한 무인 자전거의 사실적인 시뮬레이션을 위하여 동역학 솔리드 모델을 작성하였다. 동역학 솔리드 모델은 상용 3D CAD 프로그램으로 작성되었으며[18], 작성된 모델은 아래 그림 5와 같다. 솔리드 모델 과정에서 자전거 각 부품들의 치수는 실제의 모형 자전거를 참조하였으며, 상용 CMG[19]를 장착하고 사양표상의 치수 값을 참조하였다.



(a) CMG를 장착한 모형 자전거(바이크)

(a) Miniaturized Bike with CMG



(b) 동역학 솔리드 모델

(b) Dynamic solid model

그림 5. 소형 자전거의 동역학 솔리드 모델

Fig. 5. Dynamic solid model of miniaturized bike

4.1.2 동역학 모델의 매개변수 값

작성된 동역학 솔리드 모델에 실제 재질을 대입하여 각 부품의 관성 모멘트와 무게를 구하였다. 회전하는 원판의 속도는 실제 상용 CMG의 사양에 따른 원판의 최고 회전속도를 참고하였다. 원판의 동역학 솔리드 모델이 항상 최고 속도로 회전하고 있으므로 원판의 각운동량의 크기는 간단히 원판의 관성 모멘트와 원판의 최고 회전속도의 곱으로 구할 수 있다. 표 2에 동역학 모델의 매개변수 값들을 정리하였다.

표 2. 동역학 모델의 매개변수 값

Table 2. Parameter values of dynamic model

m	2.359 kg
q	9.81 m/s^2
l	$1.48 \times 10^{-1} \text{ m}$
L	$5.825 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
J_{bike}	$6.52 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J_{CMG}	$2.285 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

동역학 시뮬레이션을 위해 동역학 솔리드 모델을 상용 동역학 시뮬레이션 프로그램[20]에 옮겨 수치 해석 프로그램과 연동하였으며, 이 때 IQR 상태회환 이득 K 는 식 (7)과 같이 설정하였다.

$$K = [106.682 \ 15.349 \ -5.5 \ 1.005 \ -1] \quad (7)$$

4.2 초기 기울기에 대한 자립

동역학 솔리드 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 단순화 된 역진자형 모델을 이용한 초기 기울기에 대한 자립 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과는 아래 그림 6과 같으며, 이

때 무인 자전거의 초기 기울기는 -8° 이다.

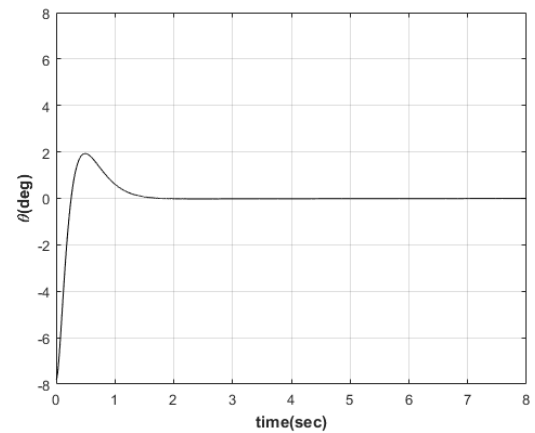
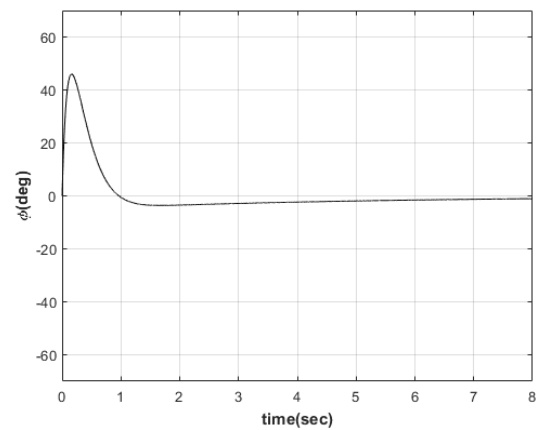
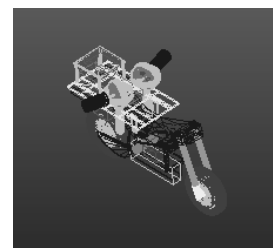
(a) Lean angle, θ of unmanned bike(b) Driving angle, ϕ of CMG gimbal

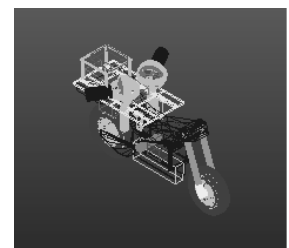
그림 6. 초기 기울기에 대한 CMG 역진자 모델 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulation result for initial lean angle of CMG inverted pendulum model

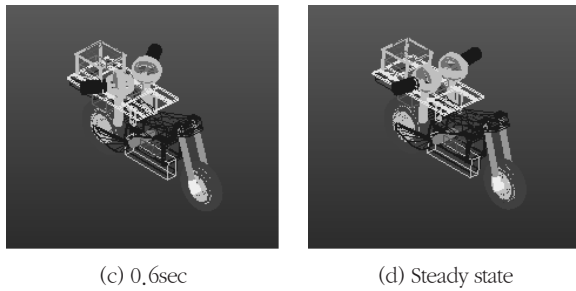
아래의 그림 7 (a)부터 그림 7 (d)까지는 각각 -8° 의 초기 기울기가 주어졌을 때에 동역학 솔리드 시뮬레이션이 시작된 후 정상상태에 이르기까지의 모습을 보여준다.



(a) 0.2sec



(b) 0.4sec



(c) 0.6sec (d) Steady state

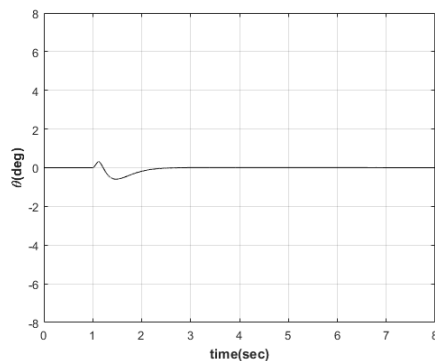
그림 7. 동역학 솔리드 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Result of dynamic solid simulation

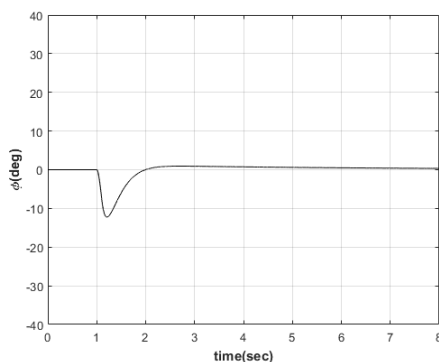
CMG 가위 쌍을 이용한 자전거 균형유지 제어를 위한 동역학 시뮬레이션으로부터 안정한 제어수행 결과를 볼 수 있다.

4.3 외란에 대한 안정성

외란에 대한 안정성을 확인하기 위해 앞 절과 같이 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 결과는 아래 그림 8과 같으며, 1초 시점에 0.1초동안 무인 자전거 몸통에 왼쪽에서



(a) Lean angle, θ of unmanned bike



(b) Driving angle, ϕ of CMG's gimbal

그림 8. 외란에 대한 CMG 역진자 모델 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulation result for external disturbance of CMG inverted pendulum model

오른쪽으로 $0.175N$ 크기의 충격으로 외란을 인가하였다. 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 무인자전거의 기울기가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 가위쌍 CMG를 이용한 무인 자전거의 균형 유지 제어 알고리즘을 제안하였다. CMG 가위쌍은 롤 방향 복원력을 증가시키고 불필요한 방향 토크를 자체적으로 상쇄하므로, 불필요한 방향 토크를 제어하는 추가적인 알고리즘 없이 간단히 안정화 제어를 수행할 수 있다는 특징이 있다. 동역학 제어를 위해 자전거에 대한 단순화된 역진자 모델을 구하였으며, 상용 모형 자전거를 대상으로 동역학 솔리드 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 동역학 모델 매개변수들의 실제 값을 구하였다. 또한 균형 자세제어 알고리즘으로 LQR 방법을 사용하였고, 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 제어 안정성을 검증하였다. 본 논문에서 제시한 가위쌍 CMG를 이용한 자세제어 알고리즘은 무인 자전거 뿐만 아니라 모노레일과 같은 독립진자형 이동수단에 적용할 수 있다.

References

- [1] J. Papadopoulos, "Bicycle steering dynamics and self-stability: a summary report on work in progress," *Cornell Bicycle Research Project, Cornell University*, pp. 1-23, 1987.
- [2] S. Cho, S. Jung, "Experimental Studies of a Time-delayed Controller for Balancing Control of a Two-wheel Mobile Robot," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 26, No. 1, pp.23-29, 2016.
- [3] D. Block, K. Astrom, M. Spong, "The Reaction Wheel Pendulum," *Morgan and Claypool*, 2007.
- [4] <https://www.murata.com/ko-kr/about/mboyngirl/mboy>
- [5] C. Stevens, S. Fiske, "Control moment gyroscope," U.S. patent US8205514 B2, 2008.
- [6] P. Lam, "Gyroscopic stabilization of a kid-size bicycle," *Cybernetics and Intelligent Systems, Proc. 2011 IEEE 5th International Conference*, pp. 247-252, China, 2011.
- [7] M. Ha, S. Jung, "Balancing Control of a Single-wheel Mobile Robot by Compensation of a Fuzzified Balancing Angle," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 25, No. 1, pp.1-6, 2015.

- [8] M. Ha, S. Jung, "Balancing Control of a Single-Wheel Robot by a Fuzzy Method," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 23, No. 1, pp.56-57, 2013.
- [9] H. Kurokawa, "A Geometric Study of Single Gimbal Control Moment Gyros — Singularity Problems and Steering Law —," *Report of Mechanical Engineering Laboratory*, No.175, pp.75-108, 1998.
- [10] J. Aubrun, G. Margulies, "Gyroclamps for Large Space Structures," NASA, 159171, 1979
- [11] D. Brown, M. Peck, "Scissored-Pair Control-Moment Gyros: A Mechanical Constraint Saves Power," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 6, pp. 1823-1826, 2008.
- [12] D. Brown, "Control Moment Gyros as Space-Robotics Actuators," AIAA Guidance, *Proc. of Navigation and Control Conference and Exhibit*, Hawaii, 2008.
- [13] A. Lopez, J. Ratcliff, and J. Havill, "Results of Studies on a Twin-Gyro Attitude-Control System for Space Vehicles," *AIAA Guidance and Controls Conference*, Aug. 12, 1963.
- [14] L. Jones, M. Peck, "A Generalized Framework for Linearly-Constrained Singularity-Free Control Moment Gyro Steering Laws," AIAA Guidance, *Proc. of Navigation and Control Conference*, Illinois, 2009.
- [15] L. Yang, W. Chang, "Synchronization of twin-gyro precession under cross-coupled adaptive feedforward control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 3, pp. 534-539, 1996.
- [16] M. Carpenter, M. Peck, "Reducing Base Reactions With Gyroscopic Actuation of Space-Robotic Systems," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.25, No.6, pp.1262-1270, 2009.
- [17] S. Park, S. Yi, "Balancing control of one-wheeled mobile robot using control moment gyroscope," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 27, No. 2, pp.89-98, 2017.
- [18] Autodesk®Inventor 2017, Autodesk
- [19] <https://www.gyroscope.com/d.asp?product=CMG>

[20] ADAMS 2017.2, MSC Software Corporation.

저자 소개



박상형(Sang-Hyung Park)

2016년 2월 : 서울과학기술대학교
전기정보공학과(공학사)

2018년 2월 : 서울과학기술대학교
전기정보공학과(공학석사)

관심분야 : Nonlinear System, Mobile Robot, Balancing Control

Phone : +82-10-9925-3009

E-mail : scrtrees@gmail.com



이수영(Soo-Yeong Yi)

1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사).

1990년 2월 : KAIST 전기및전자공학과(공학석사)

1994년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~1999년 8월 : KIST 시스템연구부 선임연구원

1997년 2월~1998년 2월 : Univ. of Southern California 박사후과정

1999년 9월~2007년 2월 : 전북대학교 전자정보공학부 부교수

2005년 6월~2006년 8월 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign
방문교수

2007년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

관심분야 : Walking Robot, Robot Vision, Mobile Robot

Phone : +82-2-970-6407

E-mail : suyee@seoultech.ac.kr