

제어모멘트자이로 클러스터의 구동법칙

이승목*, 서현호**, 이승우***, 손준원****

Steering Laws for Control Moment Gyro Cluster

Seung-Mok Lee*, Hyun-Ho Seo**, Seung-Wu Rhee***, Jun-Won Son****

Abstract

In this article, we discuss steering laws for control moment gyro cluster, which have been studied on the project, "Development of control moment gyro engineering model for middle-size spacecraft", supported by Ministry of Knowledge Economy, Korea. We compare performance of MP, SR, SR Escape/Avoidance steering laws and check each law's performance by simulations and experiments.

초 록

지식경제부 과제인 중형위성급 제어모멘트자이로 성능검증모델 개발 사업을 수행하면서 연구한 CMG 클러스터의 구동법칙에 대해 알아본다. 본 논문에서는 MP, SR, SR 탈출/회피 구동법칙에 대해 비교를 하고, 각 구동법칙의 성능을 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인해보았다.

키워드 : 자세제어(Attitude Control), 제어모멘트자이로 (Control Moment Gyro), 구동법칙(Steering Law)

1. 서 론

인공위성의 자세제어를 위해 사용되는 구동기에는 반작용 휠, 모멘텀 휠, 제어모멘트자이로 등이 있다. 이 중에서, 입력 토크 대비 출력 토크 비율이 가장 높은 구동기는 제어모멘트자이로이다. 이러한 고-토크 특성 때문에, 제어모멘트자이로는 소형 및 중형 위성의 고기동 자세 제어의 핵심 요소로 자리잡고 있다.

제어모멘트자이로는 휠 회전 부분, 김벌 회전 부분, 외부 지지 부분, 슬립링과 엔코더 부분, 휠과 김벌 구동 부분으로 이루어져 있다.

휠 회전 부분은 일정한 속도로 회전하는 회전 휠, 구동모터, 균형추 등으로 이루어져 있으며, 김벌 회전 부분은 구동모터와 기어박스로 구성되어 있다. 각 구동모터에 맞게 설계한 구동 전자기부가 이 두 모터에 대한 속도/위치 제어 역할을 수행한다. 외부지지부분은 제어모멘트자이로 전체를 지지하고, 위성체에 부착하는 부분이다. 또한 슬립링과 엔코더 부분은 고속으로 회전하는 회전휠에 전기 신호를 원활하게 공급하고, 김벌 각의 정보를 제공해준다.

제어모멘트자이로를 위성에 적용하여 3축 자세기동을 하고자 한다면, 여러 개의 제어모멘트

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

* 연합대학원/smlee06@kari.re.kr

** 위성제어팀/seo2h@kari.re.kr

*** 위성미래기술연구실/shree@kari.re.kr

**** 위성미래기술연구실/jwson@kari.re.kr

자이로를 이용한 클러스터의 구성이 필요하다. 하지만, 제어모멘트자이로의 클러스터를 구동할 경우 특정한 방향으로 원하는 토크를 발생시키지 못하는 김벌각 조합이 존재하는데 이를 특이점이라고 부른다. 따라서 이를 해결할 수 있는 구동 알고리즘을 개발해야한다. 본 연구에서는 특이점 회피 알고리즘에 대해서 조사해보았다.

2. 제어모멘트자이로 클러스터 구동 알고리즘

2.1 제어모멘트자이로 클러스터 모델링

일반적인 피라미드 형태의 제어모멘트자이로 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D\dot{\delta} = L_{\gamma} \quad (1)$$

여기서 L_{γ} 는 제어토크이며, D 는 제어모멘트자이로의 배치형상과 김벌의 위치를 고려하여 얻어지는 자코비안 행렬로 \cos 을 c 로 \sin 을 s 로 간략하게 표기할 경우 아래와 같다.

$$D = \begin{bmatrix} -c\beta\cos\delta_1 & \sin\delta_2 & c\beta\cos\delta_3 & -\sin\delta_4 \\ \sin\delta_1 & -c\beta\cos\delta_2 & \sin\delta_3 & c\beta\cos\delta_4 \\ s\beta\cos\delta_1 & \sin\beta\cos\delta_2 & \sin\beta\cos\delta_3 & \sin\beta\cos\delta_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

주어진 식을 만족하는 김벌속도 $\dot{\delta}$ 의 해는 여러 가지가 존재하지만 아래와 같은 제약 최소화 문제를 통하여 해를 구할 수 있다.

$$\min_{\dot{\delta}} \|\dot{\delta}\|^2 \text{ subject to } D\dot{\delta} = L_{\gamma} \quad (3)$$

$$\dot{\delta} = D^T(DD^T)^{-1}L_{\gamma} \quad (4)$$

위 방법이 대부분의 구동 법칙 중에서 가장 기본적인 형태인 MP 구동법칙(Moore-Penrose Pseudoinverse Steering

Law)이다. MP 구동법칙은 김벌 각속도에 대하여 최소한의 에너지로 구동할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 로봇의 관절운동과 마찬가지로 토크 명령에 대해 특정한 방향으로 원하는 토크를 발생시키지 못하는 김벌각의 조합이 존재하는데 이를 특이점이라고 부른다. MP 구동법칙은 이러한 특이점 근처에서 제어토크를 생성해 낼 수 없으며, 김벌의 각속도가 무한대로 증가하는 특성을 가지고 있다. 이를 회피하기 위한 특이점 회피 구동법칙(Singularity Avoidance Steering Law)가 필요하다. 대표적인 특이점 회피 구동법칙으로는 SR(Singularity Robustness) 구동법칙과 SR 탈출/회피(Singularity Escape/Avoidance) 구동법칙이 있다.

2.2 SR 구동 법칙

SR 구동법칙은 아래와 같은 방식으로 특이점 회피를 가능하게 한다 [1].

$$\min_{\dot{\delta}} \left\{ \frac{1}{2}\alpha\dot{\delta}^T\dot{\delta} + \frac{1}{2}(D\dot{\delta} - L_{\gamma})^T(D\dot{\delta} - L_{\gamma}) \right\} \quad (5)$$

$$\dot{\delta} = D^T(DD^T + \alpha I)^{-1}L_{\gamma} \quad (6)$$

특이점 회피 파라미터인 α 가 0이면, SR 구동법칙은 MP 구동법칙과 같아진다. SR 구동법칙에서는, 일반적인 경우 α 는 0로 두며, $\det(DD^T)$ 가 0에 가까워질수록 α 값을 증가시킨다. MP 구동법칙과는 달리, $\dot{\delta}$ 는 특이점 근처에서 항상 감소하며, 출력 토크는 목표값에서 벗어나게 된다. 하지만, 특이점에서 $\dot{\delta}$ 에 대한 해가 항상 존재한다.

2.3 SR 탈출/회피 구동법칙

특이점 회피를 위한 또 다른 구동법칙으로 아래와 같은 SR 탈출/회피 구동법칙이 있다 [2]-[3].

$$\dot{\delta} = D^\# L_\gamma \quad (7)$$

$$\min_{\delta} \left\{ (D\dot{\delta} - L_\gamma^T P (D\dot{\delta} - L_\gamma) + \delta^T Q \delta) \right\} \quad (8)$$

여기서 $D^\#, P$ 와 Q 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D^\# &= [D^T P D + Q]^{-1} D^T P \quad (9) \\ &= Q^{-1} D^T [D Q^{-1} D^T + P^{-1}]^{-1} \\ &= W D^T [D W D^T + V]^{-1} \end{aligned}$$

$$P^{-1} \equiv V = \alpha \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_3 & \epsilon_2 \\ \epsilon_3 & 1 & \epsilon_1 \\ \epsilon_2 & \epsilon_1 & 1 \end{bmatrix} > 0 \quad (10)$$

$$Q^{-1} \equiv W = \begin{bmatrix} W_1 & \alpha & \alpha & \alpha \\ \alpha & W_2 & \alpha & \alpha \\ \alpha & \alpha & W_3 & \alpha \\ \alpha & \alpha & \alpha & W_4 \end{bmatrix} > 0 \quad (11)$$

$$\alpha = \alpha_0 \exp[-\mu \det(DD^T)] \quad (12)$$

$$\epsilon_i = \epsilon_0 \sin(\omega t + \phi_i) \quad (13)$$

SR 탈출/회피 구동법칙은 일반적인 구동법칙과는 달리, 특이점에 다가가서 신속하게 회피를 하는 방식을 사용한다.

3. 성능 시험

제어모멘트자이로 클러스터 구동 알고리즘을 비교하기 위하여, 초기 김벌각은 0로 두고 $[0.05, 0, 0]^T$ 라는 토크 명령을 주어서, 시뮬레이션 및 실제 제어모멘트자이로 하드웨어를 이용하여 실험을 해보았다. 이 때 사용한 특이점 회피 파라미터는 다음과 같다.

• SR 구동법칙

$$\alpha = 0.01 \exp[-10 \det(DD^T)] \quad (14)$$

• SR 탈출/회피 구동법칙

$$W = \text{diag}[1 \ 2 \ 2 \ 3] \quad (15)$$

$$\alpha = 0.01 \exp(-10 \det(DD^T)) \quad (16)$$

$$\epsilon_i = \epsilon_0 \sin(t + \phi_i) \quad (17)$$

$$\text{where } \phi_1 = 0, \phi_2 = \pi/2, \phi_3 = \pi$$

아울러, 시뮬레이션에서는 하드웨어의 김벌 최대 각속도에 대한 제한사항을 고려하여, $\mu(\dot{\delta}) = \sqrt{\dot{\delta}^T \dot{\delta}}$, $\delta_{Imin} = \pm 0.7 \text{ rad/s}$ 로 설정한 아래와 같은 제한기를 사용하였다.

$$\text{sat}(\dot{\delta}_i) = \begin{cases} \dot{\delta}_i & \text{if } \max\{\dot{\delta}_i\} \leq \delta_{Imin} \\ \dot{\delta}_i / \mu(\dot{\delta}_i) & \text{if } \max\{\dot{\delta}_i\} \geq \delta_{Imin} \end{cases} \quad (18)$$

이를 토대로 시뮬레이션 및 실제 제어모멘트자이로를 이용하여 실험한 결과는 그림 1과 그림 2와 같다 [5].

초기 김벌각인 0에서 출발하여, 김벌각이 특이점으로 움직이는 것을 볼 수 있다. SR 구동법칙 및 SR 탈출/회피 구동법칙은 약 2초경에 특이점에 도달한다. 그림 1에서는 SR 구동법칙을 사용할 경우, 두 번째 특이점으로 신속하게 움직이지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이론적으로는 SR 구동법칙을 사용할 경우, 두 번째 특이점으로 움직일 수가 없지만, 실제 실험결과를 보면 약 20초경에 두 번째 특이점으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 이는 센서의 잡음이 에러 토크를 가하는 것과 비슷한 효과를 일으키기 때문이다.

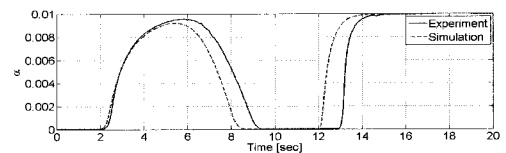
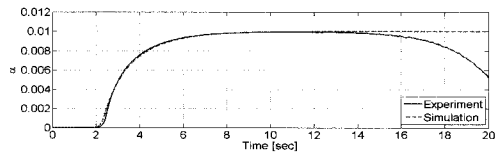
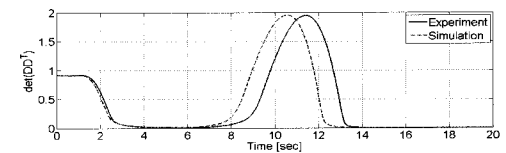
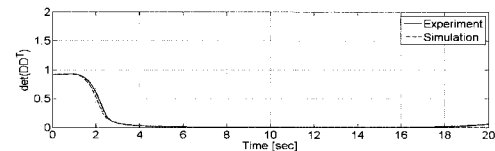
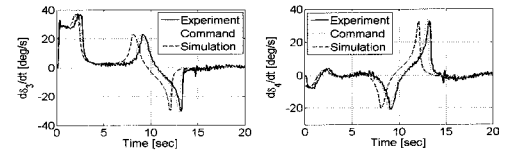
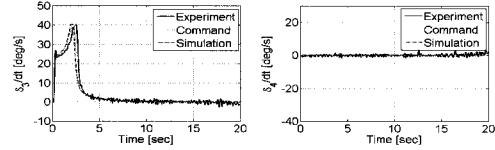
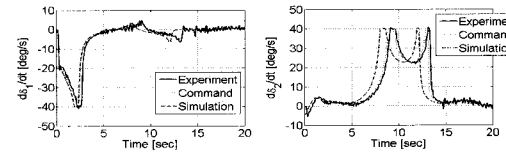
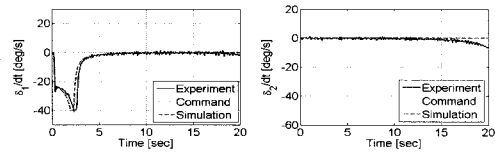
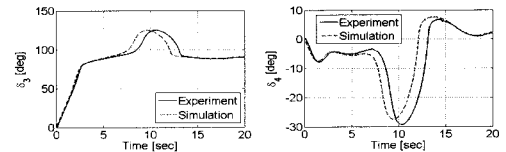
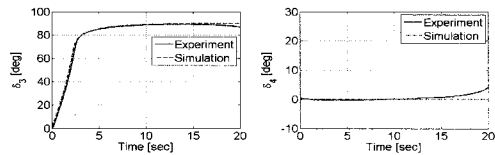
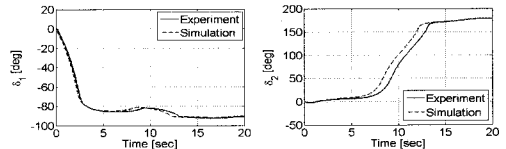
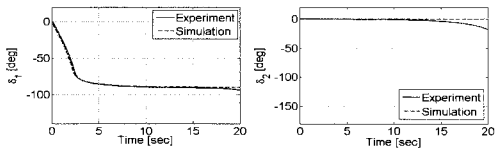
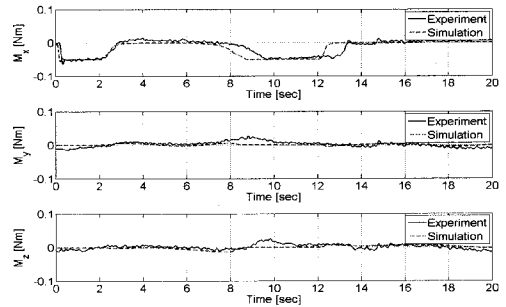
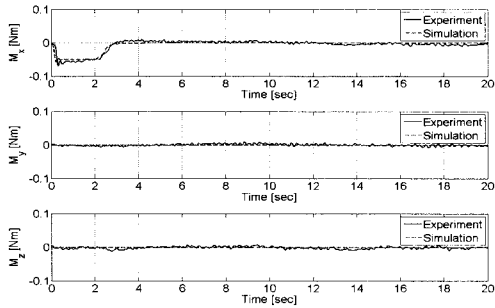


그림 1. SR 구동 법칙

그림 2. SR 탈출/회피 구동법칙

SR 구동법칙과는 달리, SR 탈출/회피 구동법칙은 약 8초경에 두 번째 특이점으로 신속하게 움직이는 것을 볼 수 있다. 그림 1과 그림 2에서 출력토크와 김벌 속도를 살펴보면, 특이점 근처에서 시뮬레이션값과 실제 실험값이 약간의 차이가 나는 것을 발견할 수 있는데, 이는 센서의 잡음으로 인해서 생기는 현상이다.

2007, pp. 1625-1629.

4. 결 론

제어모멘트자이로 클러스터의 특이점을 회피하기 위한 여러 가지 구동 알고리즘에 대해 살펴보았다. 특히, 시뮬레이션 및 실제 제어모멘트자이로 하드웨어를 통하여 구동 알고리즘을 시험하고, 장단점을 비교해보았다.

참 고 문 헌

1. Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator CONTROL", Journal of the Dynamic Systems, Vol. 108, No. 3, 1986, pp. 163-171.
2. B. Wie, D. Bailey, and C. Heiberg, "Singularity Robust Steering Logic for Redundant Single-Gimbal Control Moment Gyros", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 24, No. 5, 2001, pp. 865-872.
3. B. Wie, "Singularity Escape/Avoidance Steering Logic for Control Moment Gyro Systems," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 28, No. 5, 2005, pp. 948-956.
4. S. M. Lee and S.-W. Rhee, "Experiments of Singularity Avoidance Steering Control Laws for Redundant Single-Gimbal Control Moment Gyros", International Conference on Control, Automation and Systems 2007, Oct.