

저자 (Authors)	이상덕, 정슬 Sang-Deok Lee, Seul Jung
출처 (Source)	대한전기학회 학술대회 논문집 , 2018.7, 1107-1108(2 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07532676
APA Style	이상덕, 정슬 (2018). 실시간 김벌 속도 관측기 기반 자이로 구동기 토크 추정에 관한 연구. 대한전기학회 학술대회 논문집, 1107-1108
이용정보 (Accessed)	충남대학교 168.***.117.183 2019/09/03 11:07 (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.

실시간 김벌 속도 관측기 기반 자이로 구동기 토크 추정에 관한 연구

이상덕*, 정슬**

충남대학교 메카트로닉스공학과 지능 및 감성 공학 실험실***

Study on a CMG Torque Estimation Based on a Real-Time Gimbal Speed Observer

Sang-Deok Lee*, Seul Jung**

I.S.E.E, Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University***

Abstract - 신규 개발하는 자이로 구동기의 자이로 토크 생성 능력을 직접 측정하는 것은 결코 쉽지 않다. 본 연구는 자이로 구동기의 토크 생성 능력을 추정하기 위해 실시간 김벌 축 속도 상태 관측기를 설계하여 성능을 검증하고 자이로 토크를 추정하는 방법을 제시한다.

1. 서 론

Control moment gyroscope(CMG)는 자이로 효과를 이용하는 간접구동기로 다양한 분야에 적용되고 있다. CMG는 각운동량 벡터의 크기나 방향을 변경했을 때 발생하는 반작용 힘이나 자이로 힘이 하우징 시스템에 유도되는 것을 기본 원리로 한다.

각운동량 벡터 크기를 제어하는 방식으로 반작용 휠 구동기가 있고 각운동량 벡터 방향을 제어하는 방식으로 제어모멘트자이로 구동기가 있다. 리액션 휠의 장점은 제어가 쉽고 반작용 힘의 방향을 일정하게 할 수 있다는 것이고 Control Moment Gyroscope(CMG) 방식의 장점은 고속 김벌 축 장착을 통해 상대적으로 큰 힘을 전달할 수 있다는 점이다. 하지만 CMG의 경우 유도되는 자이로 토크의 방향이 항상 두 개의 방향을 갖는 평면 토크 특징을 갖고 있기 때문에 하나의 CMG 모듈을 이용하여 특정 방향에 지향성을 갖는 토크 생성이 어려운 단점이 있다 [1].

CMG가 생성하는 자이로 토크의 복잡함으로 인해 실제 생성하는 자이로 토크를 측정하는 것은 결코 쉽지 않다. 하우징에 유도된 토크 측정을 통해 자이로 토크를 추정하는 방식을 사용하지만 하우징의 동적 시스템이 함께 고려되어야만 자이로 구동기의 자이로 토크 생성 능력을 정확하게 검증 가능하다.

본 논문은 생성된 자이로 토크를 추정하는 방법으로 김벌 축의 속도 상태를 실시간 관측한다. 김벌 축에 고분해능의 엔코더를 장착하더라도 시간 미분을 사용하는 고전적인 문제가 발생되기 때문이다.

본문에서는 CMG의 생성 토크를 추정하는 방법과 김벌 축의 속도를 실시간 관측하는 방법을 제시하고 설계된 관측기의 성능을 실험 검증한다. 결론에서는 제안한 방법의 장점과 단점을 정리하고 향후 연구 내용을 소개한다.

2. 본 론

2.1 CMG 생성 토크

그림 1에서 보면 CMG가 생성하는 자이로 토크는 다음 식에 근거한다.

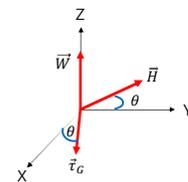
$$\vec{\tau}_G = \vec{H} \times \vec{W} = \vec{a}_G(HW \sin\theta_{HW}) = \vec{a}_G(HW), \text{when } (\vec{a}_H \perp \vec{a}_W) \quad (1)$$

여기서 $\vec{\tau}_G$ 는 생성된 자이로 토크 벡터, \vec{H} 는 각운동량 벡터, \vec{W} 는 김벌 속도, \vec{a}_x 는 x벡터에 대한 단위 벡터이다.

(1)에서 생성 자이로 토크의 방향은 다음과 같다.

$$\vec{a}_G = \vec{a}_H \times \vec{a}_W \quad (2)$$

(2)에서 \vec{a}_W 가 고정되었을 경우, 자이로 토크 방향의 변화는 각운동량 벡터의 방향 변화에 따라 함께 변하는 특징을 갖는다. (1)에서 \vec{W} 가 0 일 경우 $\vec{\tau}_G$ 는 생성되지 못하고 \vec{W} 가 0 이 아닐 경우 \vec{H} 의 방향이 반드시 변화하게 되므로 \vec{W} 의 방향은 결국 특정 축에 고정되지 못하는 문제를 발생하게 된다. 이러한 문제점은 CMG 제어와 생성 자이로 토크 측정을 어렵게 하는 주요한 원인이라 할 수 있다.



〈그림 1〉 CMG 생성 토크

그러므로 생성된 자이로 토크는 다음과 같다.

$$\vec{\tau}_G = \vec{a}_x(HW \cos\theta) + \vec{a}_y(HW \sin\theta) \quad (3)$$

2.2 속도 관측기

엔코더가 장착된 김벌 축을 가정할 때 θ 는 측정이 가능하다. 입력된 토크 $\vec{\tau}_G$ 와 출력 θ 의 관계는 재귀최소자승법을 사용하여 임의의 적응 Infinite Impulse Response (IIR) Filter 로 모델링이 가능하다. 일반화된 2차 시스템으로 모델링을 할 경우 이산 영역에서 다음과 같은 IIR 필터로 구현된다.

$$\frac{\theta[z]}{T[z]} = \frac{\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2 z^{-1} + \hat{\phi}_3 z^{-2}}{1 + \hat{\phi}_4 z^{-1} + \hat{\phi}_5 z^{-2}} \quad (4)$$

여기서 $T[z]$ 는 김벌 축 입력 토크 $\tau[k]$ 의 주파수 영역 값이다.

(4)의 5개의 변수는 재귀최소자승법을 이용하여 구할 수가 있고 불안정 모델의 경우 필터링에 의해 안정화 할 수가 있다.

(3)에서 H 는 상수이고 θ 는 측정 가능하므로 W 값이 필요하다는 것을 알 수 있다. 속도 W 값은 (4)를 이용하여 추정한다.

물론 W 값은 1차 필터를 사용하여 다음과 같이 쉽게 추정이 가능하다.

$$\hat{W} = \frac{\theta[k] - \theta[k-1]}{T_s} \quad (5)$$

여기서 T_s 는 샘플링 시간이다.

하지만 (5)는 샘플링 간격 T_s 가 작을수록 \hat{W} 값이 크게 변하는 전형적인 문제를 갖고 있으므로 일반적으로 관측기를 사용하게 된다.

(4)의 상태를 $\mathbf{x}[k] = [\theta \ W]^T$ 라고 정의 할 때 (4)에 대한 상태 공간 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\hat{\phi}_4 - \hat{\phi}_5 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = [0 \ 1]^T, \mathbf{C} = [\hat{\phi}_3 - \hat{\phi}_1 \ \hat{\phi}_5 \ \hat{\phi}_2 - \hat{\phi}_1 \ \hat{\phi}_4], \mathbf{D} = \hat{\phi}_1 \quad (6)$$

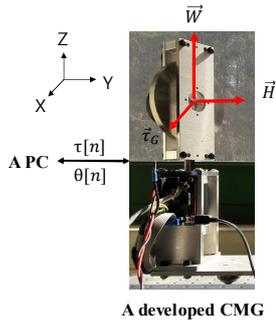
선형 관측기는 다음과 같이 설계된다.

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}[k]\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}[k]\tau[k] + \mathbf{L}[k](\theta[k] - \hat{\theta}[k]) \quad (7)$$

여기서 $\hat{\theta}[k]$ 는 재귀최소자승법의 변수 업데이트 법칙에 의해 추정할 수가 있다 [2].

2.3 속도 관측기 성능 실험

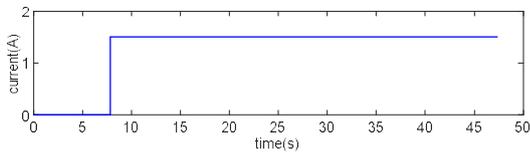
설계된 재귀최소자승법 기반의 속도 \dot{W} 관측기는 1.2 Nm-5Hz 자이로 토크 성능을 갖도록 개발된 CMG 제어기에 탑재되어 생성 자이로 토크 추정 실험을 수행한다 [3]. 실험 환경은 그림 2와 같다.



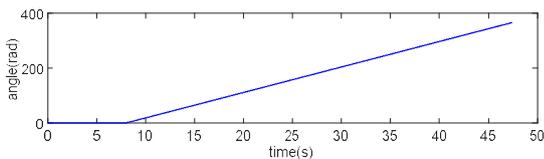
〈그림 2〉 실험 환경

2.3.1 스텝 성능 실험

설계된 실시간 속도 관측기에 대한 스텝 성능을 확인한다. 실험 방법은 입력 속도를 0에서 일정 시간 후 약 9.3 (rad/s)로 변화시킬 경우 기준 속도와 설계된 관측기의 속도 결과를 비교한다. 실험에 사용된 입력 출력 신호는 그림 3과 같다.



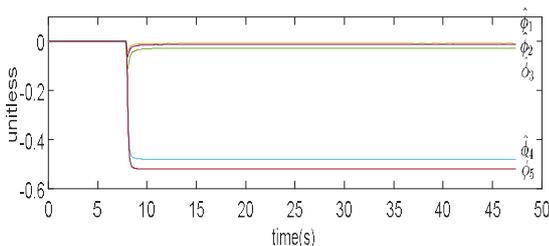
(a) 입력 신호



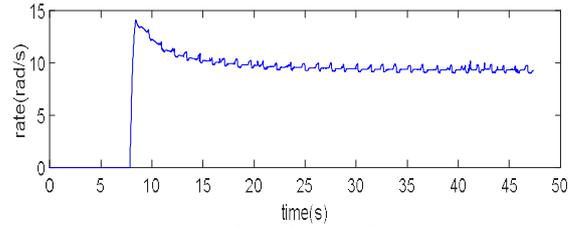
(b) 출력 신호

〈그림 3〉 입력 출력 신호

제안한 (4)에 의한 변수 인식 결과는 그림 4 (a)와 같고 추정된 속도는 그림 4 (b)와 같다.



(a) 변수 인식 결과



(b) 속도 추정 결과

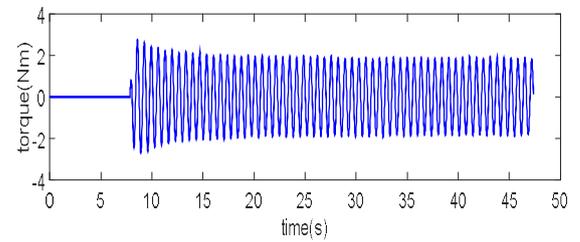
〈그림 4〉 변수 인식과 속도 추정 결과

2.3.2 자이로 토크 추정

스텝 성능 실험 결과를 바탕으로 그림 2의 X축과 Y축 방향으로 생성되는 자이로 토크의 크기를 추정한다. 추정 식은 다음과 같다.

$$\hat{\tau}_{G,X} = 0.2 \hat{W} \cos \theta, \hat{\tau}_{G,Y} = 0.2 \hat{W} \sin \theta \quad (8)$$

제안한 방법을 사용했을 경우 자이로 토크 추정 결과는 그림 5와 같다.



〈그림 5〉 자이로 토크 추정 결과

그림 5에서 보면 초기 변수 추정과정의 오차 발생 이후 시간에서는 균일한 토크 추정이 가능함을 알 수가 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 실시간 관측기 기반 CMG 생성 자이로 토크 추정 방법을 제안하였고 실험을 통해 검증하였다. 변수 변동이 심하지 않은 스텝 속도 명령에 대해서도 안정적인 속도 추정 성능과 CMG 생성 자이로 토크 추정 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 향후에는 보다 정확한 모델링에 기반한 자이로 토크 추정기 개발에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 연구재단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 지원에 감사드립니다 (2016R1A2B2012031).

[참고 문헌]

- [1] E. Mumm, K. Davis, M. Mahin, D. Neal, and R. Hayes, "Miniature control moment gyroscope development", *Aerospace Conference*, pp. 1-8, 2014.
- [2] D. Luenberger, "An introduction to observers", *IEE Transactions on Automatic Control*, vol. 16, no. 6, pp. 596-602, 1971.
- [3] S. D. Lee and S. Jung, "Experimental verification of singularity-robust torque control for a 1.2-Nm-5-Hz SGCMG", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 6, pp. 4871-4879, 2018.