

시선안정화 제어시스템의 실시간 불균형 모멘트 보상기법

Real-time Unbalance Moment Compensation Method for Line of Sight(LOS) Stabilization Control System

조 시 훈[†]
Sihun Jo

(Received April 7, 2016 ; Revised May 3, 2016 ; Accepted May 3, 2016)

Key Words : Line of Sight(LOS) Stabilization Control(시선안정화 제어), Unbalance Moment(불균형 모멘트), Compensation Controller(보상 제어기)

ABSTRACT

This paper describes real-time unbalance moment compensation method for line of sight(LOS) stabilization control systems. The factors of system inertia, frictions and unbalance moment affect the control accuracy of drive systems that are equipped to on the move(OTM) platforms requiring LOS stabilization function. In case of the unbalance moment among those factors is continuously changed as variation of relative angle between gravity vector and drive torque vector. Then, consideration of the effect in real-time is very complicate. Therefore, its effect should be designed to be minimized, however, designing it almost zero is impossible in real condition. In other words, it is hard to achieve target performance overcoming stability issue of highly unbalanced systems. To solve these problems, this paper proposes calculation method of unbalance moment by using measured sensor data for LOS stabilization control and its use for control compensation. Also, kinematical converting process and control structure for compensation are explained. The effectiveness of the proposed method as variation of unbalance moment is verified under simulation circumstance modeled by assuming LOS control system with 2-axis gimbal structure.

1. 서 론

시선안정화 제어 분야는 과거 국방기술로써 기동간 정밀표적지향이나 위성통신안테나의 위성지향을 목적으로 연구^(1,2)되었지만, 최근 민간영역에서도 위성통신이 활성화됨에 따라 선박, 기차, 차량 등의 OTM(on the move)용 통신단말 적용이 상용부분에서도 확대되는 추세이다⁽³⁾. 위성통신안테나의 시선안정화 제어는 이동하는 플랫폼의 자세와 관계없이

안테나 지향방향이 항상 위성을 향하도록 유지하여 통신단절방지 및 최대전송용량을 보장을 위한 필수적인 기술이다.

일반적으로 시스템의 요구나 목적에 따라 2축 또는 3축 직렬형 김발에 부하를 장착하여 시선안정화 제어를 수행하는데, 설계 및 성능조건은 시스템마다 다르다. 예를 들어, 정밀표적지향을 위해서는 2축 김발에 명중률용, 선박용으로는 3축 김발에 위성통신 사용 주파수대역을 고려하여 다른 제어 정확도가 요구된다. 이러한 성능은 기술이 발전하면서 고정밀

[†] Corresponding Author; Member, Agency for Defense Development
E-mail: shjo@add.re.kr

[‡] Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

표적지향을 통한 높은 명중률이나 고주파대역의 통신주파수에 따라 높은 수준의 제어 정확도가 요구되고 있다.

구동제어에 있어서 시스템의 관성, 마찰, 불균형 모멘트 등은 제어성능 확보에 직접적으로 영향을 미치는 대표적인 요인으로 최소화되도록 설계 및 제어에 반드시 고려되어야 한다. 이 중에 시스템 관성의 경우 모델링 상에서 충분히 예측 및 통제가 가능한 물성이고, 마찰의 경우 다양한 연구에서 제시된 마찰모델을 가정하여 실험적으로 모델링하여 제어에 보상하는 방식으로 영향을 줄일 수 있다. 불균형 모멘트도 최소화되도록 설계에서 고려해야 한다. 하지만, 현실적으로 시스템의 목적 및 크기, 중량 등 요구사항에 맞게 구현하다 보면 한계가 있다. 특히, 시선안정화 제어시스템에서는 플랫폼의 거동에 따라 질량중심, 구동각도, 중력방향에 따라 불균형 모멘트도 순시적으로 변하기 때문에 실시간으로 제어에 보상한 모델을 가정하기 어렵다. 이는 제어 안정성과 성능 간 트레이드오프(trade-off) 관계에 의해 높은 수준의 시선안정화 제어성능을 확보하는데 한계로 작용한다.

다양한 연구에서 시선안정화 제어 성능향상을 위한 기법들이 소개되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾. 대부분 비선형제어기 등을 활용하여 수식적으로 모의하기 어려운 특성을 극복하는 연구들이지만, 제어대상의 성능 저해요인들이 제거되지 않고 제어루프 안에서 고려되는 연구들이다.

이 논문에서는 시선안정화 제어를 수행하면서 실시간으로 불균형 모멘트를 산출하여 제어에 보상하는 방법을 제안한다. 제안된 방식은 제어대상의 불균형 모멘트를 제어출력에 직접 보상하여 제어루프 상에 해당 영향을 배제시켜 안정도를 확보할 수 있도록 한다. 이때, 산출을 위해 별도의 센서가 불필요하고, 시선안정화 제어를 위해 일반적으로 사용되는 플랫폼 외란과 구동각도 계측 값을 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다.

이 논문의 구성은 2.1절과 2.2절에서 시선안정화 제어의 일반론을 기술하고, 2.3절에서 불균형 모멘트 보상방법을 상세히 설명되었다. 또한, 2.4절과 2.5절에서 제안된 알고리즘의 성능을 모의실험을 통해 검증하였고, 3절의 결론으로 마무리되었다.

2. 불균형 모멘트 보상기법

2.1 시선안정화

시선안정화의 개념은 외란인자로 인한 플랫폼의 자세변화에도 목표지향벡터가 유지되도록 하는 제어시스템을 의미한다. 일반적으로 외란 정보 등 실시간 데이터를 활용하여 역기구학 연산을 통해 구동명령을 생성하고, 2축 또는 3축 직렬형 구동장치를 통해 지향벡터 유지한다. Fig. 1은 구동축과 플랫폼 외란이 단축인 시선안정화 시스템을 표현한 개략도이다. 기준면에서 목표물까지의 지향각(θ_{target})을 유지하지 위해 플랫폼에 피치(pitch) 방향의 자세변화(θ_p)가 발생하면, 각각(θ_{EL})의 크기를 제어하여 목표까지의 지향벡터를 유지한다. 이러한 개념은 플랫폼의 요(yaw), 피치(pitch), 롤(roll) 자세변화를 고려하는 3축 시선안정화 제어로 확장될 수 있다.

시선안정화를 위해서 부하 자이로를 장착하여 부하 각속도를 활용하는 시스템도 존재하지만, 일반적으로 플랫폼 자세변화를 측정하는 INS(initial navigation system)와 각 축의 구동제어를 위한 엔코더는 필수적이다. 이러한 센서 계측 데이터는 안정화의 핵심인 좌표계 변환을 통해 절대좌표계에서의 목표각을 추종하기 위한 구동축좌표계로 변환된 구동명령을 생성하여 시선안정화 제어에 활용된다. 좌표계 변환과 관련한 상세내용은 기존 연구^(3,4)에 소개되어 이 논문에서는 별도로 언급하진 않는다.

2.2 불균형 모멘트가 있는 시스템의 시선안정화 제어

시선안정화 제어성능에 영향을 미치는 마찰, 불균형

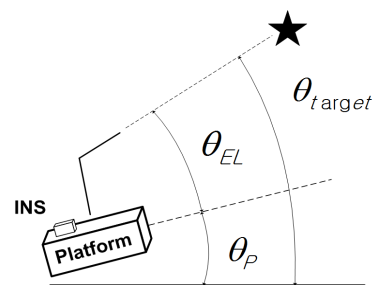


Fig. 1 Concept of single-axis LOS control system

모멘트, 백래시, 센서특성 등 다양한 요인이 존재한다. 이 중, 시스템 마찰은 구동방향과 반대방향으로 작용하는 힘으로 급격한 구동지령을 추종하여 구동기가 동작하는데 방해요소로 작용한다. 하지만, 시스템 댄핑에 도움을 주어 제어안정성 측면에서는 발산을 막는 역할도 한다. 이러한 마찰은 제작공정 및 조립절차에 영향을 받아 설계 시에 예측하여 관리하기가 어렵다. 일반적으로 마찰이 작고 균일하도록 시스템 조립절차를 정의하여 영향이 최소화되도록 관리하는 방법이 제어측면에서 가장 쉬운 방법이다. 그럼에도 존재하는 마찰의 비선형적 특성은 마찰-속도 관계에 따른 모델링에 따라 제어기에 보상하여 제어성능 향상에 활용한다^(5,6).

불균형 모멘트는 회전축에서 이격된 질량중심점에 작용하는 중력에 의해 발생하는 힘으로 동일한 크기의 구동지령이라도 구동방향에 따라 소요구동력이 달라진다. 예를 들어, 중력방향으로 구동하면, 불균형토크와 구동토크의 방향이 같아 작은 제어이득으로도 쉽게 지령을 추종하지만, 이득을 조금만 올려도 발산할 수 있다. 반대로 중력방향과 반대로 구동 시에 앞의 경우와 같은 성능을 달성하기 위해서는 큰 제어이득이 필요하게 된다. 즉, 제어안정성 측면에서 발산하지 않는 제어이득으로 제어를 설계해야 하며, 결국 평균적인 제어성능은 하락하게 된다.

이러한 문제는 질량중심의 위치와 중력방향이 결정된 고정형 플랫폼에서는 위치에 따른 불균형 모멘트 참조표를 활용한 제어적 보상이 용이하다. 하지만, 플랫폼의 자세가 실시간으로 변하는 시선안정화 시스템의 경우는 구동토크벡터와 무게중심에 작용하는 중력벡터 사이각이 실시간으로 바뀌기 때문에 사실상 참조표 활용이 어렵다. 물론 형상적으로 질량중심이 회전축에 위치하도록 설계하면 불균형 모멘트를 별도로 고려할 필요가 없지만, 시스템의 목적 및 크기, 중량 등 요구사항에 맞게 구현하다 보면 현실적으로는 불가능한 경우가 많다. 따라서, 질량 불균형이 존재하는 시스템의 시선안정화 제어성능 및 안정성을 확보하기 위해서는 실시간 불균형토크를 보상하는 알고리즘이 필요하다.

2.3 실시간 불균형 모멘트 산출방법

Fig.2는 시스템의 불균형 모멘트를 실시간으로

보상하여 시선안정화 제어를 수행하는 제어기의 간략한 다이어그램이다.

플랫폼의 자세변화에 따른 제어대상의 기준면 변화는 특정 시선벡터 유지를 방해하는 외란으로 작용하고, 이러한 외란을 계측하여 역기구학 연산을 통해 구동각도로 환산하여 시선안정화 제어명령으로 인가된다. 앞서 언급한 것과 같이 불균형 모멘트는 마찰과 더불어 원활한 구동제어를 방해하는 요소로써, 이를 실시간으로 계산하여 제어기 출력단에 보상하면 안정적인 제어성능 향상에 기여할 수 있다.

시스템에 작용하는 불균형 모멘트 계산을 위해서는 시선안정화 제어명령 계산과 마찬가지로 플랫폼의 자세와 구동기의 축각도가 필요하다. 따라서, 안정화 제어를 수행하기 위해서 기본적으로 장

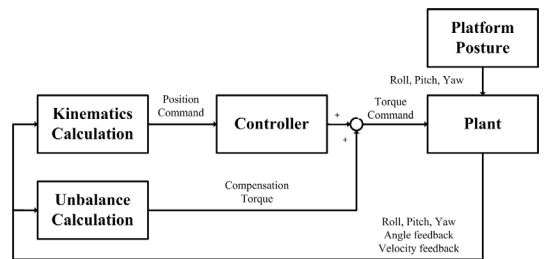


Fig. 2 One-line diagram of unbalance moment compensation control logic

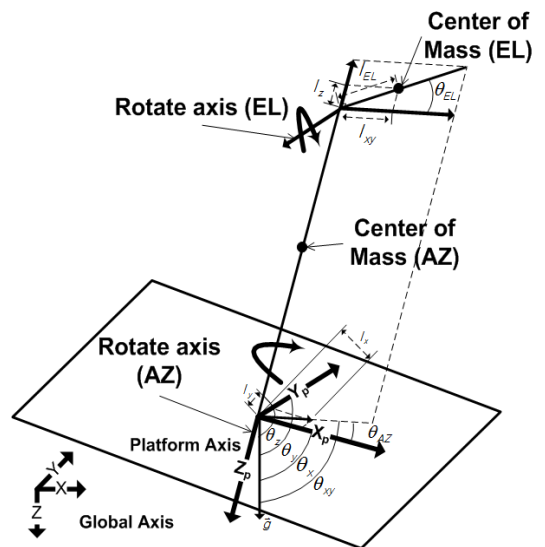


Fig. 3 Simplified model of 2-axis drive system

작되는 센서의 계측정보를 활용하면, 안정화 제어 명령생성과 불균형 모멘트 계산을 동시에 수행할 수 있다.

불균형 모멘트에 의한 회전토크는 회전축에서 이격된 위치의 질량중심에 작용하는 중력을 회전벡터와 그에 수직인 벡터로 분리하여 산출한다. 앞서 언급했듯이, 플랫폼 자세와 구동각도 정보를 이용하는 데, 각각의 정보는 서로 다른 좌표계에서 표현되어 계측되기 때문에 계측값 자체를 바로 활용할 수는 없다. 플랫폼 자세는 중력벡터와 동일한 좌표계로 표현될 수 있지만, 구동각도는 구동축을 기준의 상대각으로 좌표변환과정 없이 다른 정보들과 상호계산이 불가능하다. 따라서, 플랫폼 자세계측 센서와 구동 각도계측 센서의 측정치를 중력과 동일한 좌표계로 변환하여야 한다. 좌표계 변환 및 불균형 모멘트 계산은 Fig. 3의 2축 구동시스템의 단순화 모델로 설명한다.

Fig. 3의 2축 구동시스템은 방위각 회전축 중심의 좌우 대칭형 구조를 가정하여 방위각 구동부 질량중심이 축상에 위치하고, 고각 구동부는 회전축에서 이격된 회전암에 질량중심이 존재하는 단순화 모델을 표현한 것이다. 여기서, X, Y, Z 는 전역좌표계, X_P, Y_P, Z_P 는 플랫폼좌표계, \vec{g} 는 중력벡터를 의미한다. θ_{AZ}, θ_{EL} 는 각각 방위각, 고각 회전각, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 각각 X_P, Y_P, Z_P 축과 중력벡터 간 사이각, θ_{xy} 는 고각 지향벡터를 $X_P - Y_P$ 평면으로 투영한 벡터와 중력벡터 간 사이각을 의미한다. l_{EL} 은 고각구동축에서 질량중심까지의 거리, l_{xy}, l_z 는 각각 고각구동축에서 l_{EL} 을 $X_P - Y_P$ 평면과 Z_P 축으로 투영한 지점까지의 거리, l_x, l_y 는 각각 l_{xy} 을 X_P 축, Y_P 축으로 투영한 지점까지의 거리이다.

이제 불균형 모멘트는 Fig. 3의 $\theta_x, \theta_y, \theta_z, \theta_{xy}$ 를 계산하는 문제로 생각할 수 있다. 이를 위해, 전역 좌표계로 표현된 중력의 단위벡터, $\vec{g}_{-g} = [0, 0, 1]^T$ 와 플랫폼좌표계에서 표현되는 $\vec{x}_{P-P} = [1, 0, 0]^T$, $\vec{y}_{P-P} = [0, 1, 0]^T$, $\vec{z}_{P-P} = [0, 0, 1]^T$, $\vec{\theta}_{AZ-P} = [\cos(\theta_{AZ}), \sin(\theta_{AZ}), 0]^T$ 벡터들과의 상호계산이 필요하다. 이때, 좌표계가 다른 벡터를 연산하려면 모든 벡터를 동일 좌표계로 변환하는 과정이 필요한데, 플랫폼좌표계를 전역좌표계를 변환하는 좌표변환행렬, M 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} c(Y)c(P) & -s(Y)c(R) + c(Y)s(P)s(R) \\ s(Y)c(P) & c(Y)c(R) + s(Y)s(P)s(R) \\ -s(P) & c(P)s(R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(Y)s(R) + c(Y)s(P)s(R) \\ c(Y)s(R) + s(Y)s(P)s(R) \\ c(P)c(R) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 플랫폼 자세계측 센서에서 측정된 요(yaw), 피치(pitch), 롤(roll)을 각각 $\theta_y, \theta_p, \theta_r$ 으로 정의할 때, $c(Y), c(P), c(R), s(Y), s(P), s(R)$ 은 각각 $\cos(\theta_y), \cos(\theta_p), \cos(\theta_r), \sin(\theta_y), \sin(\theta_p), \sin(\theta_r)$ 을 나타낸다.

식 (1)의 변환행렬을 이용하면 플랫폼좌표에서의 벡터들은 변환행렬, 전역좌표계에서의 벡터 $\vec{x}_{P-g}, \vec{y}_{P-g}, \vec{z}_{P-g}, \vec{\theta}_{AZ-g}$ 로 변환할 수 있고, 변환된 벡터들과 중력벡터 간 사이각은 식 (2)로 산출된다.

$$\begin{aligned} \theta_{xy} &= \cos^{-1}(\vec{\theta}_{AZ-g} \cdot \vec{g}_{-g}) \\ \theta_x &= \cos^{-1}(\vec{x}_{P-g} \cdot \vec{g}_{-g}) \\ \theta_y &= \cos^{-1}(\vec{y}_{P-g} \cdot \vec{g}_{-g}) \\ \theta_z &= \cos^{-1}(\vec{z}_{P-g} \cdot \vec{g}_{-g}) \end{aligned} \quad (2)$$

또한, 중력에 의한 불균형모멘트를 플랫폼좌표계의 축방향 분리한 힘은 식 (3)으로 계산된다.

$$\begin{aligned} F_{xy} &= m_{EL} \times g \times \cos(\theta_{xy}) \\ F_x &= m_{EL} \times g \times \cos(\theta_x) \\ F_y &= m_{EL} \times g \times \cos(\theta_y) \\ F_z &= m_{EL} \times g \times \cos(\theta_z) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, m_{EL}, g 는 각각 구각구동부 질량, 중력가속도이다. 마지막으로 식 (3)에서 계산된 힘을 방위각과 고각구동부에 작용하는 불균형토크로 환산한 값은 식 (4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} T_{un}(AZ) &= F_x \times l_y - F_y \times l_x \\ T_{un}(EL) &= -F_{xy} \times l_z - F_z \times l_{xy} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 실시간으로 산출된 불균형 모멘트는 Fig. 2의 제어기 토크출력에 보상되어 시스템을 제어한다.

2.4 시뮬레이션 구성

이 논문에서 제안한 불균형 모멘트 보상알고리즘

의 유효성은 시뮬레이션을 통해 검증한다. Fig. 2에 표현된 다이어그램을 MATLAB R2012a Simulink를 활용하여 구현하고, 성능을 비교한다. 이때, 제어 대상인 플랫폼은 단순한 수식모델로 모사하지 않고, SimMechanics Toolbox를 활용하여 Fig. 4와 같이 2축 직렬형 김발에 부하가 장착된 것으로 가정하여 모의실험 환경을 구성하였다.

플랫폼자세 변화에 따른 시스템 외란은 3자유도를 가지는 김벌 블록을 활용하여 각 자유도에 롤, 피치, 요의 회전 움직임을 인가하도록 하고, 이를 INS에서 계측되는 자세변화로 데이터로 활용한다. 여기서, INS의 정확도, 잡음, 드리프트 등의 센서 고유특성은 시뮬레이션 목적상 별도로 고려하지 않는다. 제어대상인 구동시스템은 플랫폼 상부에 회전형 연결블록을 직렬로 구성하여 2축 구동기로 모사하고, 각 연결부위에 구동토크 명령을 인가되도록 한다. 이때, 각 축 회전부에는 구동에 따른 시스템 마찰토크가 입력되도록 하고, 점성마찰과 쿨롱마찰로 표현되는 고전적인 모델을 활용하여 마찰특성을 모사한다. 마지막으로 구동기의 움직임을 엔코더를 모사하는 출력 센서 블록으로 확인하고, 센서 고유특성은 고려하지 않는다.

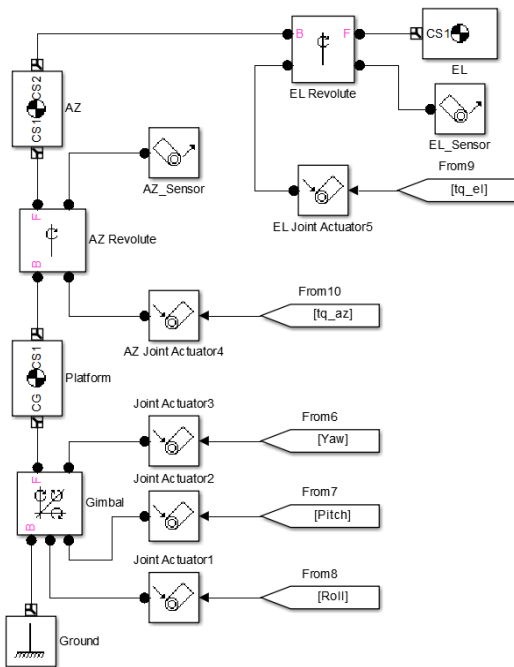


Fig. 4 Plant modeling by using simulink

다음으로 고각 질량을 제외한 각 구동부하의 모멘트 길이(l), 질량(m), 관성질량(J)은 상수로 설정한다. 방위각 질량은 Fig. 3에서 표현한 것과 같이 구동축 사이에 질량중심이 존재하므로 불균형 모멘트에 영향을 주지 않는다. 모의환경에서는 l_{AZ} , m_{AZ} , J_{AZ} , l_{EL} , J_{EL} 을 각각 1, 20, 0.6, 0.2, 0.6으로 설정하고, m_{EL} 는 변수로 설정하여 불균형모멘트 변화가 제어성능에 미치는 영향을 시뮬레이션한다. 이때, Fig. 2에 제어블록에는 단순 PI제어기를 삽입하고, m_{EL} 의 변화에도 강건한 제어이득을 설정하여 입력한다.

마지막으로 플랫폼에는 Fig. 5와 같이 크기가 5° 이고, 주파수가 0.5 Hz의 정현파를 인가하여 롤, 피치, 요의 외란을 모사한다. 이때, 각 방향의 위상은 30° 씩 차이가 나도록 하고, 20초간 시뮬레이션 한다.

2.5 시뮬레이션 결과

2.4절에서의 모의환경을 구성하여 시뮬레이션한 결과와 식 (5)로 정의되는 제어오차에 대한 제곱평균 제곱근(RMS : root mean square)은 Figs. 6 ~ 10과 Tables 1, 2에 기술하였다.

$$\theta_{Error} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k^c - x_k^f)^2}{n}} \quad (5)$$

여기서, x^c , x^f , n 은 각각 제어명령, 계측값, 데이터 개수를 나타낸다. Figs. 6, 7, 8은 각각 m_{EL} 을 5, 25, 30으로 설정하여 모의실험을 수행한 결과이며, 각 그림 내의 그래프는 보상 알고리즘을 적용유무에 따른 제어오차이다.

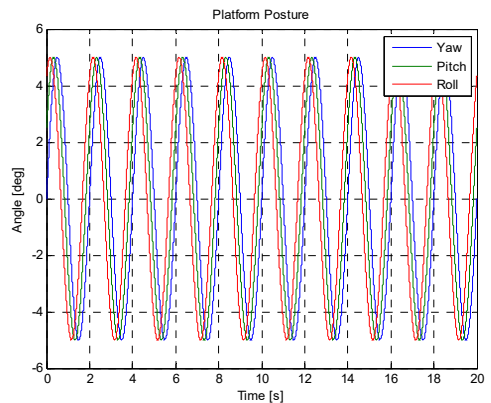


Fig. 5 Waveform applied for platform disturbance

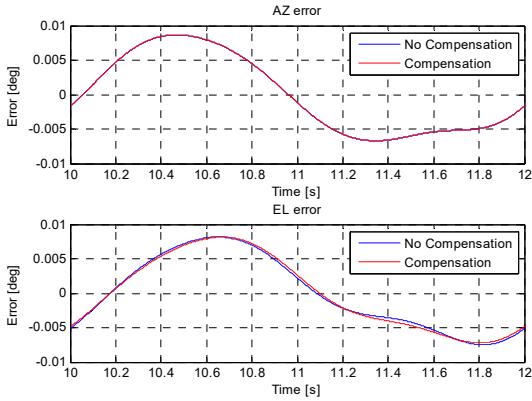


Fig. 6 Control error according to unbalance moment compensation($m_{EL} = 5$)

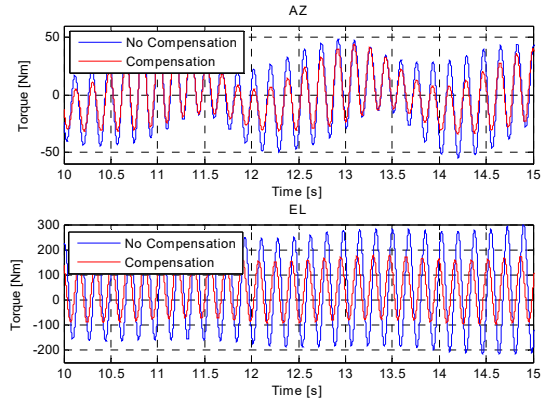


Fig. 9 Output torque according to unbalance moment compensation($m_{EL} = 30$)

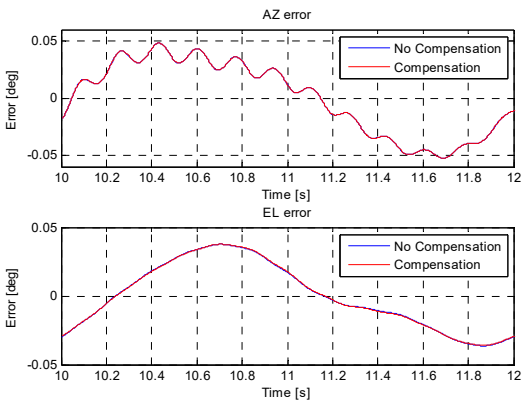


Fig. 7 Control error according to unbalance moment compensation($m_{EL} = 25$)

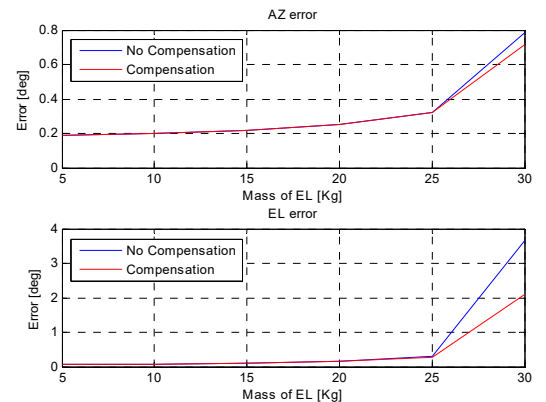


Fig. 10 Control error as change of unbalance moment

Table 1 Azimuth control error according to unbalance compensation(RMS)

m_{EL}	Compensation (X)	Compensation (O)
5	0.1872	0.1872
25	0.3240	0.3240
30	0.7858	0.7139

Table 2 Elevation control error according to unbalance compensation(RMS)

m_{EL}	Compensation (X)	Compensation (O)
5	0.0766	0.0766
25	0.2987	0.2714
30	3.6671	2.1030

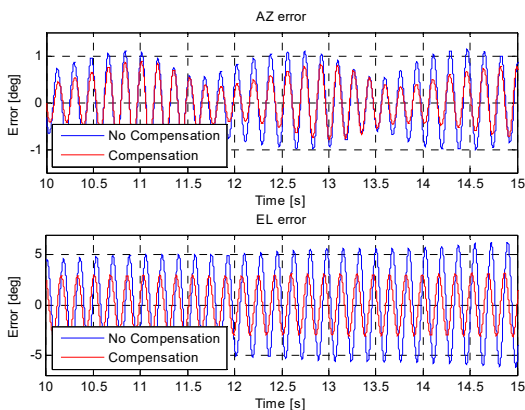


Fig. 8 Control error according to unbalance moment compensation($m_{EL} = 30$)

먼저, Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 불균형토크가 크지 않은 경우($m_{EL} = 5$)에는 이 논문에서 제안한 보상 알고리즘이 제어성능에 영향을 거의 미치지 않는다. 특히, 방위각 제어오차는 동일하며, 고각 제어 오차는 그래프 상 약간 차이가 있어 보이지만 Table 2에서 확인할 수 있는 오차의 RMS는 동일하다. 이는 모의실험 목적상 시스템 부하를 단순모델(1차)로 가정하였기 때문에, 불균형 모멘트가 크지 않은 경우는 제어기 자체 성능만으로도 그것의 악영향을 극복하는 결과가 확인된 것이다.

다음으로 시스템 불균형 영향이 증가된 시뮬레이션 결과($m_{EL} = 25$)는 Fig. 7과 같다. 앞선 경우보다 전반적인 제어오차가 커져 그래프에서는 불균형 모멘트 보상 알고리즘이 유효하게 작용하는지 명확하게 확인하기는 어렵지만 Tables 1, 2에서는 제어성능이 향상되는 것을 확인된다. 단순한 제어기의 출력만으로 순시적으로 발생하는 시스템의 외란에 대응하여 생성되는 제어명령의 동적 특성을 추종하는데 한계가 있다는 것을 의미하며, 실시간으로 계산된 불균형 영향을 제어기 출력이 보상하여 구동토크를 보완하는 알고리즘이 제어성능을 향상시킨다. 이러한 특성은 과도구간에서 더욱 효과적이며, 동적 외란환경에서 유효하게 작용한다.

마지막으로 Fig. 8은 시스템 불균형 영향이 큰 경우($m_{EL} = 30$), 적절한 보상제어 없이는 시선안정화 제어를 수행하지 못하고 시스템이 발산하는 결과를 나타낸다. 방위각은 발산을 하지는 않지만 보상제어를 수행하는 경우 제어정확도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 고각은 시스템이 시간에 따라 점점 발산한다. 이는 작은 제어오차를 추종하기 위한 제어이득이 부하에 전달되는 토크명령을 급격하게 변화시켜 시스템을 발산시키는 경우로써 Fig. 9의 출력토크 명령에서 시스템 발산의 전형적인 양상을 확인할 수 있다. 반면 제어기 출력에 적절한 보상은 플랜트의 불안요소를 줄여 주기 때문에 제어기의 부담도 줄어들어 출력토크가 안정적으로 유지된다. 따라서, 시스템 발산을 막기 위한 적절한 보상제어 구조가 고려되지 못하면 제어이득을 낮추는 등의 조정을 통해 시스템 안정도는 증가시켜야 하고, 이로 인해 제어성능은 낮아질 것이다. 이는 2.2절에서 언급한 것과 같이 시스템 안정성을 위해 제어성능 저하를 감수하는 트레이드오프(trade-off)가 필요하다.

Fig. 10은 불균형 영향에 따른 제어오차 양상의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 특정 구간까지는 보상 제어 유무가 제어성능에 많은 영향을 주지 않는 것처럼 보이지만, 그 구간은 넘어서면 시스템 제어성능이 급격하게 하락하고, 결국에는 발산하게 된다.

3. 결 론

이 논문에서는 시선안정화 구동제어 시스템에서의 실시간 불균형 모멘트 보상하는 방법에 관한 내용을 기술하였다. 이동하는 플랫폼에서 구동장치의 불균형 모멘트는 질량중심, 구동각도, 중력방향에 따라 순시적으로 변한다. 이러한 불균형 모멘트는 제어성능을 저하시키는 요인으로 영향이 최소화되도록 설계하는 것이 바람직하며, 그 영향을 실시간으로 제어에 고려하기 어려웠다. 이러한 문제를 극복하기 위해 이 논문에서는 시선안정화 제어를 수행하기 위해 계측되는 값들을 활용하여 실시간으로 불균형 모멘트를 산출하여 구동토크 명령에 보상하는 제어방법을 제안하였다. 불균형 모멘트 산출에 관련된 기구학적인 변환과정을 기술하였고, 구동토크 보상 제어기 구조를 제안하였다. 제안된 방법은 2축 구동시스템의 시선안정화 제어모델로 가정된 모의환경 하에서 불균형 모멘트 변화에 따른 제어 영향성을 모의실험 분석으로 검증하였고, 성능을 확인하였다. 제안된 방법은 시제품의 제어기에 적용하여 실험을 통해 성능을 검증할 예정이다.

References

- (1) Kang, M. S., Lim, J. K., Choi, Y. J., Lyou, J., Seok, H. D. and Kim, B. U., 2005, Adaptive Disturbance Compensation Control for Heavy Load Target Aiming Systems to Improve Stabilization Performances, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol 15, No. 11, pp. 1303~1310.
- (2) Lee, D. O., Kang, T.-H., Kim, H.-S. and Park, K.-W., 2001, Nonlinear Control of High Precision Pointing Stabilization Systems with Heavy Loads, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 157~178.
- (3) Kang, M. S. and Cho, Y. W., 2010, Stabilization

Control of Line of Sight of OTM Antenna, Trans. KIEE, Vol. 59, No. 11, pp. 2073~2082.

(4) Kennedy, P. J. and Kennedy, R. L., 2003, Direct Versus Indirect Line of Sight(LOS) Stabilization, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 11, NO. 1, pp. 3~15.

(5) Marton, L. and Lantos, B., 2007, Modeling, Identification and Compensation of Stick Slip Friction, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 511~521.

(6) Kang, M. S., 1999, Precision Stabilization Control of Servo System by Using Friction Compensation, J. of

the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 109~115.



Sihun Jo received the B.S. and M.S. degrees from the Department of Electrical and Electronic engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, in 2009 and 2011, respectively. He is currently a researcher in the Agency for Defense Development, Daejeon, Korea.