

조이스틱 명령에 따른 Electro-Optical Targeting Pod의 LOS 이동 알고리즘 설계

LOS Moving Algorithm Design of Electro-Optical Targeting Pod for Joystick Command

서형규[†] · 박재영^{*} · 안정훈^{*}
(Hyoungkyu Seo · Jaeyoung Park · Jung-Hun Ahn)

Abstract - EO TGP(Electro-Optical Targeting Pod) is an optical tracking system which has various functions such as target tracking and image stabilization and LOS(Line of Sight) change. Especially, it is very important to move the LOS into a interest point for joystick command. When pilot move joystick in order to observe different scene, EO TGP gimbals should be operated properly. Generally, most EOTS just operate corresponding gimbal for joystick command. For example, if pilot input horizontal command in order to observe right hand screen, it just drive azimuth gimbal at any position. But in the screen, the image dosen't move in a horizontal direction because gimbal structure is Euler angle. And image rotation is occurred by elevation gimbal angle. So we need to move Pitch gimbal.

So in the paper, we designed LOS moving algorithm which convert LOS command to gimbal velocity command to move LOS properly. We modeled a differential kinematic equation and then change the joystick command into velocity command of gimbals. This algorithm generate velocity command of each gimbal for same horizontal direction command. Finally, we verified performance through MATLAB/Simulink.

Key Words : EO TGP, 3 aixe gimbal control, Dynamic equation, Kinetic analysis, LOS moving controller

1. 서론

항공기에 장착되는 전자광학추적장비(Electro-Optical Tracking System)는 표적을 추적하고 영상을 안정화하는 기능과 더불어 조종사의 명령에 따라 시선을 이동하여 원하는 지역의 영상을 전시하는 등의 다양한 기능이 요구된다[1-3]. 특히 전투기에 사용되는 EO TGP(Electronic Optical Targeting Pod)는 조종사의 조이스틱 명령에 대한 시선 이동 기능이 더욱 중요하게 요구된다.

일반적인 관측용 ETOS는 조이스틱 명령에 대해 단순히 대응되는 방향의 김발을 구동하는 것으로 시선 이동이 이루어진다. 예를 들어 조이스틱 명령을 가로 방향으로 입력하였을 경우 단순히 방위각 김발을 구동시키고, 세로 방향의 명령에 대해서는 고저각 김발을 구동시킴으로써 LOS를 이동시킨다.

하지만 대부분의 EOTS에서 사용하는 김발은 Euler 각으로 구성된 2축 구조를 가지고 있는데, 이러한 시스템은 Euler 각의 특성상 고저각 각도에 따라 방위각 회전에 대해 LOS가 단순히 가로방향으로 변하는 것이 아니라 영상의 회전이 발생하면서 세로 방향의 변화도 함께 나타난다. EO TGP의 경우도 Roll, Pitch,

Yaw 3축으로 구성되어 있지만 Roll 김발이 Yaw 김발을 추종하는 방식의 제어기법을 사용함으로써 최종적으로 2축 김발구조가 된다. Pitch 김발의 각도에 의해 LOS가 Roll 김발과 직교가 아닌 자세에서 조종사가 영상의 수평 방향에 존재하는 물체를 관측하기 위해 조이스틱을 가로 방향으로 움직인다면, 기존의 방식으로 Roll 김발 또는 방위각 김발을 구동시킬 경우 영상이 회전하면서 원하는 방향으로 LOS가 이동하지 않을 것이다.

따라서 본 연구에서는 EO TGP 김발의 기구학적 분석을 통해 김발의 자세에 따라 조이스틱 명령에 대해 적절한 LOS 이동이 이루어질 수 있는 알고리즘을 설계하였다. 조종사가 입력하는 조이스틱 명령에 따라 원하는 방향으로 LOS가 이동하는 가상의 김발 좌표계와 실제 EO TGP 김발좌표계의 LOS 벡터를 일치시키는 방법으로 알고리즘을 구현하였고, 최종적으로 시뮬레이션을 통해 검증하였다[5-7].

2. 시스템 구성

2.1 EO TGP 김발

EO TGP는 그림 1과 같이 Roll → Pitch → Yaw 순서로 회전하는 3축 김발 구조를 가지고 있다. Pitch 김발과 Yaw 김발에는 각속도를 측정할 수 있는 자이로 센서가 부착되어 있고, 각 김발에는 위치 정보를 획득하기 위한 엔코더 센서가 부착되어 있다.

[†] Corresponding Author : Power Control Team, Hanwha Systems Co., Ltd.

E-mail : hyoungkyu.seo@hanwha.com

* Power Control Team, Hanwha Systems Co., Ltd

Received : August 30, 2018; Accepted : September 14, 2018

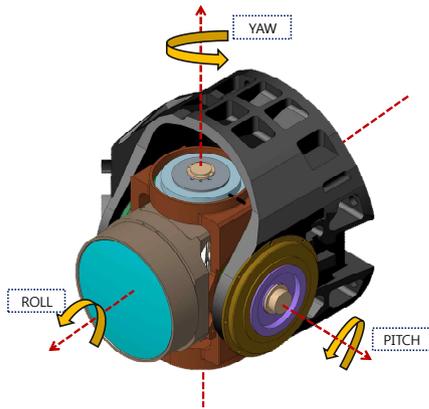


그림 1 EO TGP 형상
Fig. 1 Shape of EO TGP

아래 표 1에서는 Roll, Pitch, Yaw gimbal에 필요한 요구 성능을 정리해 놓았다.

표 1 EO TGP gimbal 특성
Table 1 Characteristic of EO TGP Gimbal

gimbal	관성 [kg · m · s ²]	구동범위 [deg]
Roll	0.7	360
Pitch	0.05	-155~35
Yaw	0.05	-5~+5

표 1에서 확인할 수 있듯이 Yaw gimbal의 구동 범위가 Roll, Pitch gimbal에 비해 작기 때문에 Roll gimbal이 Yaw gimbal을 추종하는 추종제어 방식을 기본 제어 구조로 설정하였다. 즉, Yaw gimbal은 자이로 센서의 각속도 정보를 입력 받아 속도 제어(안정화)를 구현하고 Roll gimbal은 Yaw gimbal의 엔코더 정보를 오차로 입력 받아 추종 제어를 하게 된다[4].

3. 제어기 설계

3.1.1 제어기 블록도

그림 2는 LOS 이동 제어기의 블록도이다. 크게 LOS 이동 알고리즘 블록과 Roll, Yaw gimbal 속도 제어기 블록, Pitch gimbal 속도 제어기 블록으로 구성되어 있다. 앞에서 언급한바와 같이 Roll gimbal이 Yaw gimbal을 추종하는 종속제어 방식으로 구성하였다. Yaw gimbal은 부착된 자이로 센서에서 측정된 회전 속도를 피드백 받아 속도 제어를 하게 되고 Roll gimbal은 Yaw gimbal의 엔코더 센서 값을 오차로 입력 받아 Roll gimbal과 Yaw gimbal 사이의 각도차가 발생하지 않도록 추종하게 된다. Pitch gimbal의 속도 제어기는 Yaw gimbal과 마찬가지로 자이로 센서 데이터를 입력받아 속도 제

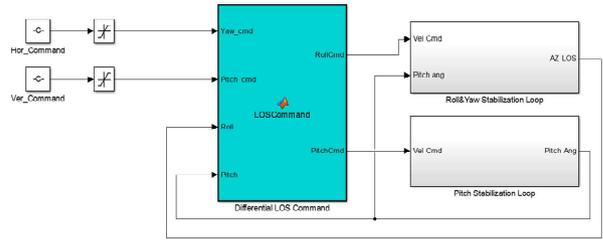


그림 2 LOS 이동 제어기 블록도
Fig. 2 LOS Moving Controller Block Diagram

어를 하게 된다. 그리고 gimbal 속도 제어기 전단에 LOS 이동 알고리즘을 추가하여 조이스틱 명령을 gimbal의 속도 명령으로 변환하여 인가하도록 하였다.

3.1.2 EO TGP LOS 벡터

그림 1의 EO TGP gimbal 좌표계는 Roll → Pitch → Yaw 순서의 Euler 각으로 구성되어 있다. Roll gimbal이 Yaw gimbal을 추종하는 종속제어를 기본으로 적용한다면 최종 구동 자유도는 Roll, Pitch의 2축 gimbal 형태를 가지게 된다. 따라서 EO TGP의 LOS 벡터를 계산하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$R_{TGP} = R(\phi)R(\theta)R(\psi) \tag{4}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\theta\sin\psi & \sin\theta \\ \cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi & \cos\theta\cos\psi - \sin\theta\sin\psi\sin\phi - \sin\phi\cos\theta \\ \sin\theta\sin\psi - \cos\theta\sin\psi\cos\phi & \sin\theta\cos\psi + \cos\theta\sin\psi\sin\phi & \cos\phi\sin\theta \end{bmatrix}$$

$$R_{TGP} = R(\phi)R(\theta)R(\psi=0) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta - \sin\phi\cos\theta \\ -\cos\theta\sin\phi & \sin\phi & \cos\phi\sin\theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$R_{TGP,LOS} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta\sin\phi \\ -\cos\theta\sin\phi \end{bmatrix} \tag{6}$$

식 (6)은 최종적으로 계산된 EO TGP의 LOS 벡터이다. 식 (5)의 회전행렬에서 첫 번째 열이 EO TGP의 LOS 벡터를 의미한다. 위 벡터를 이용하여 Pitch 각도에 따라 Roll gimbal을 구동시켰을 때 LOS가 어떻게 변하는지 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 Pitch 각도가 0°에 가까워질수록 LOS는 밑면의 넓이가 작아지는 원뿔형상을 이룬다. 그림과 같이 가로방향 명령에 대해 Roll gimbal을 구동하고 세로방향 명령에 대해서는 Pitch gimbal을 구동한다며 gimbal에 부착된 카메라에서 촬영된 영상의 이동은 다음과 같이 발생하게 될 것이다.

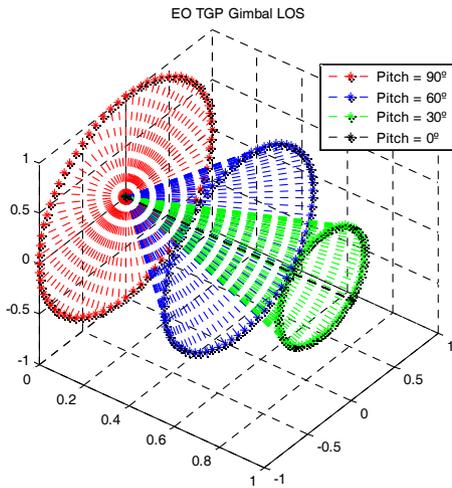
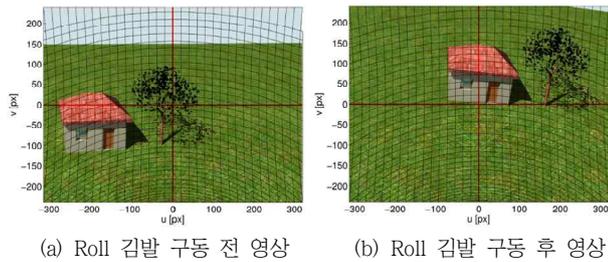


그림 3 김발 각도에 따른 EO TGP LOS 변화
Fig. 3 Change of LOS by Gimbal Angle



(a) Roll 김발 구동 전 영상 (b) Roll 김발 구동 후 영상

그림 4 Roll 김발 구동에 따른 영상 회전
Fig. 4 Image Rotation by Roll Gimbal Operating

그림 4와 같이 Pitch 각도가 존재할 때 Roll 김발을 구동하게 되면 영상에서 Roll 구동에 의한 회전이 발생하게 된다. 따라서 조종사가 (a) 위치에서 수평으로 시선을 이동하기 위해 가로 방향의 명령을 입력하게 되면 (b)와 같이 회전된 영상을 얻게 된다. 따라서 김발 각도에 따라 조이스틱 명령과 동일한 LOS 이동이 가능한 알고리즘이 필요하다.

3.1.3 가상 LOS 좌표계

LOS 이동 알고리즘은 가상 좌표계설정과 미분운동 방정식 모델링 두 단계로 나뉜다. 먼저 조종사가 원하는 향으로 LOS를 이동시킬 수 있는 가상의 좌표계를 설정해야 한다. 목표 좌표계를 설정하는 것이다. 그 다음으로 EO TGP의 LOS 벡터와 가상좌표계를 맵핑시킨 후 미분 운동 방정식을 모델링하여 LOS 이동 명령을 각 김발의 속도 명령으로 변환하여 김발을 제어하게 된다.

먼저 조종사가 조이스틱 명령을 인가하였을 때 이동해야 하는 LOS에 대한 정의가 필요하다.

그림 5는 조이스틱 명령에 따라 이동한 가상 좌표계의 LOS 변화를 나타낸 그림이다. 3축의 가상좌표계에서 가로방향, 세로방향 명령에 대한 LOS 이동을 순서대로 나타내었다. 그림 5의 왼

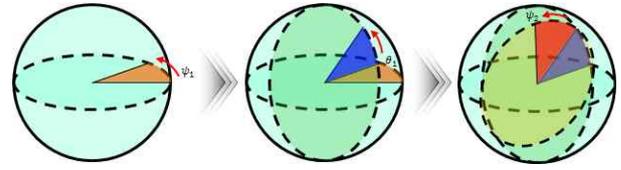


그림 5 가상 좌표계의 LOS 이동
Fig. 5 LOS Change of Virtual Coordinate

쪽 그림은 가로 방향에 대해 ψ_1 만큼 회전하였을 때 LOS 이동이다. 가로방향의 회전은 3축의 Euler 좌표계에서 Yaw축을 회전시켰을 경우와 동일한 움직임이다. 위의 움직임을 아래와 같이 회전 행렬로 표현할 수 있다.

$$R_v = R(\psi_1) \tag{7}$$

식 (7)에서 R_v 는 조이스틱 명령에 의해 이동되는 가상 좌표계를 의미한다.

그 다음으로 가운데 그림은 세로 방향의 명령에 대해 θ_1 만큼 회전하였을 때의 LOS 이동이다. 세로방향의 회전은 Pitch 축을 회전시켰을 경우와 동일하다. 식 (7)과 마찬가지로 회전행렬은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$R_v = R_0 R(\theta_1) \quad (R_0 = R(\psi_1)) \tag{8}$$

식 (8)에서 R_0 는 식 (7)과 같다. 즉, 새로운 조이스틱 명령에 대한 이동은 현재 자세에서 입력된 명령과 대응되는 축으로의 회전과 같다.

마지막으로 오른쪽 그림은 다시 가로방향으로 ψ_2 만큼 이동하였을 때의 LOS 이동이다. 마찬가지로 회전행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$R_v = R_0 R(\psi_2) \quad (R_0 = R(\psi_1) R(\theta_1)) \tag{9}$$

식 (9)에서도 R_0 는 식 (8)과 같다. 따라서 위의 계산들을 통해 조이스틱 명령에 대한 가상 좌표계를 일반화 시키면 다음과 같이 표현된다.

$$R_v = R_0 R(\theta_i) R(\psi_i) \tag{10}$$

3.3.4 미분 운동 방정식 모델링

앞 절에서 계산한 EO TGP의 LOS 벡터와 가상 좌표계의 LOS 벡터를 맵핑하여 일치시킨 후 미분 운동 방정식을 통해 최종적으로 구동 모터로 입력되는 명령을 생성해야 한다.

먼저 가상 좌표계의 LOS와 같이 EO TGP의 LOS가 이동할 수 있도록 두 벡터의 맵핑이 필요하다.

$$R_{v,LOS} = R_{TGP,LOS} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} R_{0_{12}} \sin \psi_i + \cos \psi_i \{ R_{0_{11}} \cos \theta_i - R_{0_{13}} \sin \theta_i \} \\ R_{0_{22}} \sin \psi_i + \cos \psi_i \{ R_{0_{21}} \cos \theta_i - R_{0_{23}} \sin \theta_i \} \\ R_{0_{32}} \sin \psi_i + \cos \psi_i \{ R_{0_{31}} \cos \theta_i - R_{0_{33}} \sin \theta_i \} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \phi \sin \theta \\ -\cos \phi \sin \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (21)은 두 LOS 벡터를 맵핑시킨 수식이다.

다음으로 위 수식을 이용해 LOS 이동 명령을 생성해야 한다. 조종사가 조이스틱으로 입력하는 명령은 어느 한 지역에 대한 좌표 명령이 아니라 지속적으로 LOS를 이동시킬 수 있는 속도 명령이다. 즉 조종사가 영상을 기준으로 조이스틱 명령을 인가하면 이를 Roll, Pitch 김발의 속도 명령으로 변화 시켜 일정한 속도로 LOS가 이동할 수 있도록 해야 한다. 따라서 위에서 맵핑된 두 좌표계의 LOS 벡터의 Jacobian을 이용하여 미분 운동 방정식을 모델링하고 이를 통해 최종적으로 김발의 속도 명령을 계산해야 한다. Jacobian은 벡터 미적분학에서 다변수 벡터 함수의 도함수 행렬을 의미한다.

$$\omega(p)\dot{p} = J_\omega(q)\dot{q}, \quad \left(p = \begin{bmatrix} \theta_i \\ \psi_i \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} \right) \quad (13)$$

$$\dot{q} = J_\omega(q)^{-1} \omega(p)\dot{p} \quad (14)$$

식 (13)은 Jacobian을 이용한 미분 운동 방정식이다. 좌측의 $\omega(p)$ 는 가상 좌표계의 미분을 통해 계산된 LOS의 속도 이고, $J_\omega(q)$ 는 EO TGP 좌표계의 미분식으로 계산된 Jacobian 행렬이다. 그리고 식 (14)가 최종적으로 계산된 김발의 속도 명령이다.

위 식에서 $\omega(p)$ 는 다음과 같은 계산식으로 나타낼 수 있다.

$$\omega(p)\dot{p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{v,LOS}}{\partial \psi_i} & \frac{\partial R_{v,LOS}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ \dot{\psi}_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)는 가상 좌표계의 미분으로 계산된 미분 행렬이다. 여기서 \dot{p} 는 조이스틱을 통해 입력되는 LOS 속도 명령이 된다.

그 다음으로 오른쪽 항의 Jacobian 행렬인 $J_\omega(q)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_\omega(q)\dot{q} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{TGP,LOS}}{\partial \phi} & \frac{\partial R_{TGP,LOS}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta \\ \cos \phi \sin \theta & \sin \phi \cos \theta \\ \sin \phi \sin \theta & -\cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi}_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)은 EO TGP LOS 벡터를 미분하여 계산된 Jacobian 행렬이다. 이제 식 (14)와 같은 수식을 만들기 위해 Jacobian 역행렬을 이용하여 \dot{q} 를 계산해야 한다. 하지만 식 (16)에서 볼 수 있듯이 $J_\omega(q)$ 는 정방행렬이 아니므로 역행렬을 계산할 수 없다. 따라서 수도 역행렬을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\left(J_\omega^T(q) J_\omega(q) \right)^{-1} J_\omega^T(q) \omega(p) \dot{p} = \dot{q} \quad (17)$$

$$\therefore \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \phi \sin \theta}{\sin^2 \theta} & \frac{\sin \phi \sin \theta}{\sin^2 \theta} \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & -\cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \omega(p) \dot{q} \quad (18)$$

최종적으로 식 (18)과 같이 Roll, Pitch 김발에 대한 속도로 계산될 수 있다.

3.3.4 시뮬레이션 결과

앞에서 계산한 수식을 이용하여 조이스틱 명령에 대한 LOS 이동 제어기의 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 가로방향, 세로방향, 대각방향 명령에 대해 진행하였다.

- 가로방향 조이스틱 명령

먼저 가로방향 명령에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 시험조건은 아래 표 2와 같다.

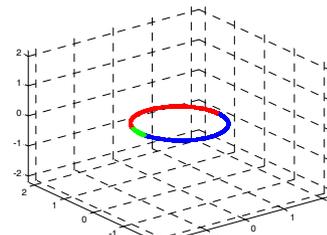
표 2 가로방향 조이스틱 명령 시험조건

Table 2 Test condition of horizontal direction joystick command

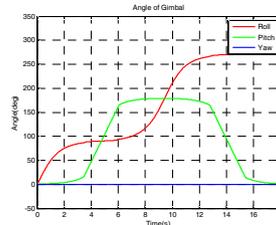
Roll 김발 초기 위치 [deg]	Pitch 김발 초기 위치 [deg]	가로 방향 명령 [rad/s]	세로 방향 명령 [rad/s]
0	1	1	0

위 조건에서 Pitch 김발의 초기 위치를 0°로 설정하지 않은 이유는 Roll 김발과 Yaw 김발의 추종제어에서 Pitch 김발이 0°가 되면 NADIR 포인트가 되면서 Roll 김발의 구동이 발산하게 된다.

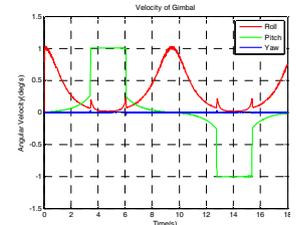
그림 6은 가로방향 명령에 대한 LOS 이동 시뮬레이션 결과이다. 초기 위치에서 Roll, Pitch 김발이 동시에 구동하면서 LOS가 가로 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 위 시뮬레이션에서 Pitch 김발이 0° 근처일 때, Roll 김발이 발산하지 않도록



(a) EO TGP LOS 이동



(b) 김발 각도



(c) 김발 속도

그림 6 가로방향 조이스틱 명령 시뮬레이션

Fig. 6 Horizontal Joystick Command Simulation

LOS 이동 명령을 감소시켜 시스템에 입력시켰다. 따라서 실제 시스템 운용상에서도 Pitch 각도가 특정 범위 안에 위치할 경우 LOS 이동 명령을 제한시키도록 해야 한다.

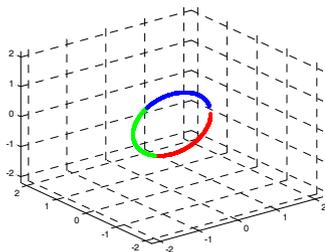
- 세로방향 조이스틱 명령

다음으로는 세로방향 명령에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 세로방향 명령에 대해서는 Pitch 각도만 구동함으로써 LOS를 이동시킬 수 있다. 시험 조건은 표 3과 같다.

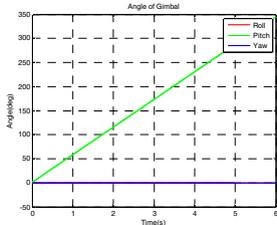
표 3 세로방향 조이스틱 명령 시험조건

Table 3 Test condition of vertical direction joystick command

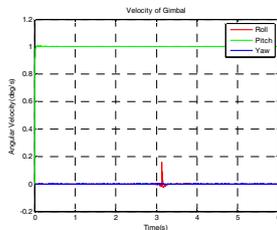
Roll 각도 초기 위치 [deg]	Pitch 각도 초기 위치 [deg]	가로 방향 명령 [rad/s]	세로 방향 명령 [rad/s]
0	1	0	1



(a)EO TGP LOS 이동



(b)각도



(c)속도

그림 7 세로방향 조이스틱 명령 시뮬레이션

Fig. 7 Vertical Joystick Command Simulation

그림 7은 세로방향 조이스틱 명령에 대한 시뮬레이션 결과이다. (b)의 각도를 확인해 보면 세로방향으로 LOS를 이동하기 위해서 단순히 Pitch 각도만 이동한 것을 알 수 있다. 이를 통해 LOS 이동 알고리즘에서 가로, 세로 방향으로의 LOS 이동을 위해 적절하게 각도의 속도 명령을 생성하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

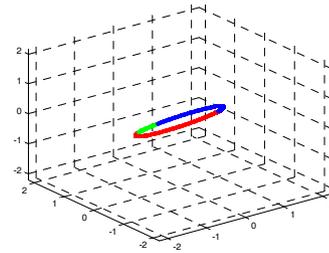
- 대각방향 조이스틱 명령

마지막으로 대각방향으로 조이스틱 명령을 인가한 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 대각방향 명령은 가로, 세로 방향의 명령이 혼합된 상태를 의미한다. 시험 조건은 표 4와 같다.

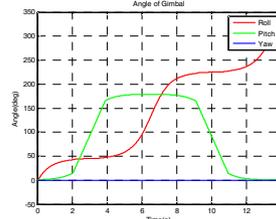
표 4 대각방향 조이스틱 명령 시험조건

Table 4 Test condition of diagonal direction joystick command

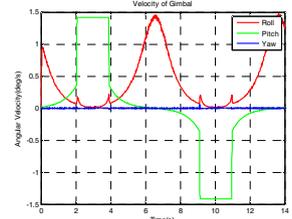
Roll 각도 초기 위치 [deg]	Pitch 각도 초기 위치 [deg]	가로 방향 명령 [rad/s]	세로 방향 명령 [rad/s]
0	1	1	1



(a)EO TGP LOS 이동



(b)각도



(c)속도

그림 8 대각방향 조이스틱 명령 시뮬레이션

Fig. 8 Diagonal Joystick Command Simulation

그림 8은 대각방향 조이스틱 명령에 대한 시뮬레이션 결과이다. (b)의 각도를 보면 앞 절의 가로방향 명령 결과와 비슷해 보이지만, Pitch 각도가 훨씬 더 빠르게 움직이면서 세로 방향의 LOS 변화를 만들어 내고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 조종사가 조이스틱을 통해 입력한 LOS 이동 명령을 EO TGP의 각도 명령으로 변환시키는 알고리즘을 설계하고 검증하였다. 조종사가 화면상에서 관측하고 싶은 영역으로 LOS를 이동시키기 위해 조이스틱 명령을 인가하였을 때, 각도의 현재 자세와 상관없이 영상을 기준으로 LOS가 이동되어야 한다.

먼저 조종사의 조이스틱 명령에 따라 원하는 방향으로 움직일 수 있는 목표 가상 좌표계를 설정하였다. 그리고 Roll 각도와 Yaw 각도를 종속제어로 구성하여 EO TGP를 Roll → Pitch로 구동되는 2축 좌표계로 가정하였고, 가상 좌표계의 LOS 벡터와 EO TGP의 LOS 벡터를 맵핑시킨 후 미분 운동 방정식을 모델링하여 Roll, Pitch 각도의 속도 명령으로 변환할 수 있는 알고리즘을 설계하였다. 그리고 최종적으로 MATLAB Simulink를 이용한 시뮬

레이션을 통해 각 방향으로 인가되는 조이스틱 명령에 대한 LOS 이동을 검증하였다.

하지만 본 논문에서 계산한 Jacobian 수식에서 Pitch 김발의 위치가 0°가 되면 특이점이 발생하여 발산하게 된다. Roll 김발이 Yaw 김발을 추종하는 종속제어 방식이기 때문에 Pitch 각도가 0°가 되면 Roll 김발과 Yaw 김발이 직각이 되면서 Roll 김발이 발산하게 된다. 따라서 실제 시스템에 적용하기 전에 Pitch 각도에 따라 시스템이 불안정해지지 않도록 해당 위치를 회피할 수 있는 추가적인 알고리즘이 필요하다. 때문에 추후 실제 장비를 이용하여 위 내용에 대한 추가적인 연구와 실험이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 한화시스템 연구개발본부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Ma Myint Aye, "Analysis of Euler Angles in a Simple Two Axis Gimbals Set", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, No. 9, Vol. 5, 2011.
- [2] Per Skoglar, "Modelling and Control of IR/EO-Gimbal for UAV surveillance application", 2002.
- [3] Ing. Martin Rezac, "Inertial Stabilization, Estimation and Visual servoing for aerial surveillance", *Electrical Engineering and Information Technology in the branch of study Control Engineering and Robotics, Czech Technical University in Prague*, 2013.
- [4] Jung-Bin Yim, Sung-Su Kim and Joon Lyou, "Maneuverability Improvement of EOTS by Driving the Outer Gimbal First", *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, pp. 873-878, 2013.
- [5] Herman Bruyninckx, "Robot Kinematics and Dynamics", Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universityeit Leuven, 2010.
- [6] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr, William E. Clausen, "Vector Mechanics for Engineers Dynamics", 2005.
- [7] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo, "Robotics Modelling, Planning and Control", *Springer*, 2010.

저 자 소 개



서형규 (Hyoungkyu Seo)

2013년 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(학사), 2015년 서울과학기술대학교 일반대학원 로봇설계공학과(석사), 2015년~현재 한화시스템 전원제어팀 선임연구원
관심분야 : 로보틱스, 임베디드 시스템
Email : hyoungkyu.seo@hanwha.com



박재영 (Jeayoung Park)

2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부(학사), 2018년 한양대학교 일반대학원 전기공학과(석사), 2007년~현재 한화시스템 전원제어팀 전문연구원
관심분야 : 서보제어, 임베디드 제어시스템
Email : jy07.park@hanwha.com



안정훈 (Jung-Hun Ahn)

1999년 한국해양대학교 제어계측공학과(학사), 2001년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(석사), 2000년~현재 한화시스템 전원제어팀 수석연구원.
관심분야 : 로보틱스, 모션제어, 임베디드 시스템
Email : junghun.ahn@hanwha.com