

안정적인 추적 구동을 위한 2축 짐벌 회전축에 대한 고찰

김 정 호, 고 현 서
한화시스템

A study on the two-axis gimbal rotation axis for stable tracking drive

Kim Jung Ho, Ko Hyun Seo
Hanwha Systems

ABSTRACT

본 논문에서는 전자광학 장비를 탑재한 짐벌의 시선과 회전축이 일치할 때 발생하는 현상인 2축 짐벌락(Gimbal Lock)의 위치를 이동시킬 수 있는 2축 짐벌의 회전축 형태를 제안한다. 연직선 주위의 물체를 주요 타겟으로하는 장비의 안정적인 추적 구동을 위하여 기존 좌표계에 기반한 방위각/고각이 아닌 pitch-yaw 회전축을 채택할 수 있으며 이를 통해 중요 추적 범위에 존재했던 짐벌락 위치를 비관심 범위로 이동시킬 수 있다.

1. 서론

1.1. 2축 전자광학 시스템

2축 전자광학 시스템은 미상의 비행체를 타겟으로 하고, 타겟을 추적/식별하기 위한 장비이며 타겟의 영상을 획득하는 광학 센서와 타겟의 움직임에 따라 광학 센서를 회전시킬 수 있는 2축 짐벌을 포함한다. 광학 센서가 정확한 영상을 획득하기 위해서는 짐벌이 타겟의 움직임을 정확하게 추적할 수 있어야 하지만 타겟 추적 중 타겟의 궤적과 축의 형태에 따라 Gimbal Lock 문제가 발생할 수 있다.

1.2. Gimbal Lock

외부 회전축, 내부 회전축, 광학계 시선(Line Of Sight, 이하 LOS)이 모두 서로 orthogonal인 2 자유도 2축 전자광학 시스템에서 짐벌의 내부 회전이 90도에 가까워질 때 외부 회전축과 LOS가 일치하는 특이점이 발생한다. 이 특이점 부근에서는 LOS의 작은 변화에도 큰 외부 회전이 필요하며 특이점에 도달하면 내부 회전의 변화 없이는 외부 회전이 LOS 이동에 영향을 미치지 못한다. 즉, 짐벌의 LOS가 짐벌락 부근의 물체를 추적하기 위해서는 구동부 회전의 각가속도가 비정상적인 수준까지 급격하게 상승되어야 한다. 이는 짐벌락(Gimbal Lock)이라 알려져 있으며 대표적인 예로는 천문학에서 지칭하는 경위대식 마운트의 Zenith/Nadir point가 있다.

2. 본론

2.1. 타겟 궤적 및 회전축 설계

타겟은 일반적으로 등고/등속/직진 이동한다. 타겟이 짐벌의 연직선과 가까워질수록 장비와 타겟의 직선거리가 작아져 타겟의 동일 거리 이동 대비 큰 상대 각도 변화로 이어지며 짐벌락에 의한 각속도 증가를 심화시킨다. 각 장비의 특성에 따라 그 한계 범위가 달라질 수 있으나 내부 회전이 90도에 가까워질수록 타겟 추적을 위해 필요한 외부 회전의 각가속도가 기하급수적으로 증가하므로 짐벌락 부근에서는 안정적인 추적을 위한 구동 용량의 한계가 항상 존재한다. 하지만 필요 추적 범위가 크지 않은 경우, 짐벌 설계 단계에서 비관심 범위에 짐벌락을 갖는 회전축을 선택하여 이 문제를 해소할 수 있다.

2.2. 추적 각가속도 및 LOS 비교

이하에서는 장비의 주요 추적범위가 연직선 부근인 2축 짐벌 장비가 가질 수 있는 두 가지 축 형태와 같은 연직선 궤적 타겟을 추적할 때의 각가속도를 비교하였으며, 시선 벡터를 이용하여 두 축의 LOS가 같음을 증명하였다.

표 1 설명 표

Table 1 Table of Description

name	description	name	description
AZ_{YP}	Yaw 구동각 (외부 회전, 방위각)	N_p	타겟 북쪽 거리 (장비 원점 지평 좌표계)
EL_{YP}	Pitch 구동각 (내부 회전, 고각)	W_p	타겟 서쪽 거리 (장비 원점 지평 좌표계)
α_{PY}	Pitch 구동각 (외부 회전)	Z_p	타겟 높이 (장비 원점 지평 좌표계)
β_{PY}	Yaw 구동각 (내부 회전)	추적 Target1	최대고각 88deg
R_y	Pitch 축 오일러 회전행렬	추적 Target1	최대고각 89deg
R_z	Yaw 축 오일러 회전행렬	추적 Target1	최대고각 89.5deg

2.2.1. Azimuth - Elevation

$$AZ_{YP} = \arctan\left(\frac{W_p}{N_p}\right) \quad (1)$$

$$EL = {}_{YP} = \arctan\left(\frac{Z_p}{\sqrt{N_p^2 + W_p^2}}\right) \quad (2)$$

타겟의 위치와 식(1)과 식(2)를 이용하여 타겟 지향 회전각을 구할 수 있는 Azimuth - Elevation 회전축은 구 좌표계를 기반으로 하며 연직선 부근에서 Azimuth축의 짐벌락을 겪는다. 그림 1에서와 같이 내부 짐벌에 해당하는 최대 고도각이 90도에 가까울수록 큰 추적 각가속도를 확인할 수 있다.

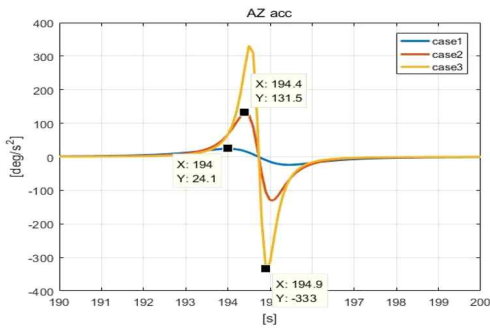


그림 1 AZ-EL 추적 각가속도
Fig. 1 AZ-EL tracking angular acceleration

2.2.2. Pitch - Yaw

$$\alpha_{PY} = \arctan\left(\frac{Z_p}{N_p}\right) \quad (3)$$

$$\beta_{PY} = \arctan\left(\frac{W_p}{\sqrt{N_p^2 + Z_p^2}}\right) \quad (4)$$

타겟의 위치와 식(3)과 식(4)를 이용하여 타겟 지향 회전각을 구할 수 있는 Pitch-Yaw 회전축은 특정 좌표계에 기반하지 않으며 지평선 부근에서 Pitch축의 짐벌락을 겪는다. 그림 2에서와 같이 같은 궤적을 이용한 추적 시뮬레이션에서 미세할 정도로 작은 추적 각가속도를 확인할 수 있다.

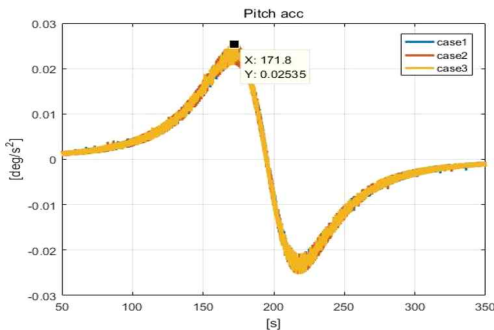


그림 2 Pitch-YAW 추적 각가속도
Fig. 2 Pitch-YAW tracking angular acceleration

표 2 추적 각가속도 비교 표

Table 2 Comparison table of tracking angular acceleration

	AZ-EL 축 짐벌 추적 각가속도 (AZ)	Pitch-Yaw 축 짐벌 추적 각가속도 (Pitch)
Target1	24.1 [deg/s ²]	0.025 [deg/s ²]
Target2	131.5 [deg/s ²]	0.025 [deg/s ²]
Target3	333 [deg/s ²]	0.025 [deg/s ²]

2.3. 각도 변환 및 구동방식 증명

$$LOS_{AZEL} = R_z(AZ) * R_y^T(EL) * [100]^T \quad (5)$$

$$LOS_{\alpha\beta} = R_y^T(\alpha) * R_z(\beta) * [100]^T \quad (6)$$

$$\alpha_{PY} = \arctan\left(\left(EL_{YP} * \sqrt{\tan^2(AZ_{YP}) + 1}\right)\right) \quad (7)$$

$$\beta_{PY} = \arctan\left(\frac{\tan(AZ_{YP})}{\sqrt{\tan^2(AZ_{YP}) * \tan^2(EL_{YP}) + \tan^2(EL_{YP}) + 1}}\right) \quad (8)$$

식(5)와 식(6)를 이용하여 일반적으로 사용하는 AZ-EL 회전각을 P-Y회전각으로 변환할 수 있으며 필요에 따라 90도, 270도 특이점 및 사분면 정의가 필요하다.

Pitch-Yaw 방식은 특정 좌표계에 기반하지 않으므로 이미 널리 증명되어있는 구좌표계 Azimuth-Elevation 축과 모든 좌표의 LOS를 비교하여 같은 지점을 지향하고 있음을 증명하였다. 식 (5), (6)으로 각각의 LOS를 구한 후 그 차이를 확인하여 모든 좌표에서 같은 곳을 지향하고 있음을 확인하였다.

3. 결론

Pitch-yaw 축 짐벌은 타겟이 짐벌락 부근에 접근할수록 타겟과의 직선 거리가 증가한다는 점에서 직진 타겟 추迹에 용이하며 특히, 지형지물의 시야 방해로 저고도는 추적범위가 아닌 지구를 중심으로 공전하는 위성추迹에 유리하다.

주요 구동 범위가 장비의 연직선 부근이라면 Pitch-Yaw 축 짐벌, 장비의 지평선 부근이라면 Azimuth-Elevation 축 짐벌로 설계하여 비정상적인 추적 각가속도 증가를 막을 수 있다. 본 내용은 운용 범위가 큰 시스템에서는 적용할 수 없다는 점에서 짐벌락의 근본적 해결책은 아니지만 내/외짐벌 축 추가와 같은 재화의 소비 없이 채택할 수 있다는 점에서 상황에 따라 매우 강력한 해결책이 될 수 있다.

참고 문헌

- [1] 김정호, "추적 장치 및 추적 방법", 특허청, 대한민국 특허번호 :10-2544345, 2022, 12
- [2] David Hoag, "Apollo Guidance and Navigation Considerations of Apollo IMU Gimbal Lock", MIT Instrumentation Laboratory Documents, E-1344, 1963, April