

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.919>

JCCT 2023-11-110

EOTS의 동적 안정성을 위한 속도 프로파일에 대한 연구

Study of Speed Profile for Dynamic Stability of EOTS

이규찬*, 광동기**

Gyu-Chan Lee*, Dong-Gi Kwag**

요약 현대의 드론에 장착되고 있는 임무 장비들의 소형화되고, 감시, 정찰 등의 여러 임무를 수행한다. 이에 따라 임무 장비는 풍하중, 모터 회전 등에 외란에 노출이 되어있으며, EOTS 구동에 있어 불안정성을 야기할 수 있다. 특히 EOTS의 시선의 위치 변경에 있어 단순 Step 입력은 급격한 속도의 변화를 일으켜 오버슈트를 발생시키며 여러 외란과 함께 불안정성을 야기할 수 있다. 따라서 EOTS의 시선의 변경을 할 시에 각속도가 사다리꼴 형태로 움직일 수 있도록 프로파일을 설정하고, 이를 이중 루프 제어기를 설계하여 위치 피드백을 받는 외부 루프의 Input에 적용 후 시스템의 안정성 비교와 최대 속도, 최대 가속도를 변화시키면서, 시스템이 안정적인 범위 내에서 속도 프로파일의 최적화를 연구하였다.

주요어 : 속도 프로파일, 시스템 모델링, 시선 안정화, 이중 루프 제어기

Abstract Modern drones are equipped with miniaturized mission equipment capable of performing various tasks such as surveillance and reconnaissance. Consequently, these mission equipment are exposed to disturbances like wind loads and motor rotations, which can lead to instability in the operation of the Electro-Optical Targeting System (EOTS). Specifically, simple step inputs for changing the line of sight in EOTS can cause abrupt changes in speed, inducing overshoot and potentially creating instability along with other disturbances. To address this, a velocity profile was designed so that the angular velocity moves in a trapezoidal shape when changing the EOTS line of sight. A Double-loop controller was designed to apply this profile as an input to the external loop receiving position feedback. The system's stability was then compared, and the velocity profile was optimized within a stable range by varying maximum speed and acceleration.

Key words : Velocity profile, system modeling, LOS stabilization, Double loop controller

*준회원, 한서대학교 항공시스템공학과 석사과정 (제1저자)

**정회원, 한서대학교 항공기계학과 부교수 (교신저자)

접수일: 2023년 10월 3일, 수정완료일: 2023년 10월 25일

게재확정일: 2023년 11월 10일

Received: October 3, 2023 / Revised: October 25, 2023

Accepted: November 10, 2023

**Corresponding Author: dgkwag@hanseo.ac.kr

Dept. of Aeronautical Engineering, Hanseo Univ, Korea

I. 서 론

현대에 기술이 발전함에 따라 무인기의 임무가 확대되고 있으며, 특히 군사 산업에서 더욱 중요성이 커지고 있는 추세다. 1950년 이후 미 국방부는 적에 대한 정찰 감시, 정보수집과 같은 임무를 대부분 무인기를 활용하고 있으며, 군사 분야 뿐만 아니라 자연 재난 및 사회 재난의 공공분야 또는 레저와 같은 사업용 드론이 개발 중에 있다.[1] 따라서 무인기에 장착된 EOTS와 같은 임무 장비들이 감시, 정찰 등의 위협할 수 있는 임무를 수행하기 위해서는 비행 중에 구동할 때에 안정적으로 움직일 수 있도록 구동 시스템을 구축하여야 한다. 이때 EOTS의 안정적인 구동을 위하여 가감속 제어 방식이 사용되고 있으며, 가감속 제어는 모터의 가속, 감속 시 급변하는 속도를 줄이고, 최대 토크를 설정하여 모터에 부하를 줄여줘서 모터에 무리가 가지 않으면서 원하는 위치에 원하는 시간에 도달할 수 있도록 하는 제어방식이다.[2]. 속도 프로파일 알고리즘 사용 시 사용자가 어떠한 명령 값을 입력하였을 때 급격한 명령을 주는 Step 모양의 명령이 아닌, 곡선과 직선의 조합으로 부드러운 구동 명령을 생성해주는 알고리즘을 의미한다. 속도 프로파일 알고리즘으로 만들어진 속도의 그래프는 사다리꼴 혹은 삼각형의 그래프가 나타나게 되며, 이는 가속-등속-감속 혹은 가속-감속의 운동을 한다는 것을 나타낸다. 이러한 구동은 제어 시스템의 응답에서 오버슈트가 발생하지 않는다는 장점이 있다. 속도 프로파일을 생성하는 방법은 여러 가지가 있는데 첫 번째 방법은 필터의 임펄스 응답을 이산 시간 중첩을 통해 구현하는 방법이고, 두 번째 방법은 다항식 함수를 이용하는 것으로 제어 주기마다 속도를 계산하는 방법이다[3]. 본 논문에서는 다항식 함수를 이용하였으며, EOTS의 운용환경을 고려하여, 고주파수의 외란에 대한 안정화를 수행해야 함에 따라서 속도 프로파일의 제한된 속도, 가속도의 변화에 따른 빠른 응답성을 보이는 속도, 가속도를 시뮬레이션을 통해 확인하며, 속도 프로파일의 최적화를 진행하였다.

II. 속도 프로파일 설계

1. 속도 프로파일의 작동 수학적 모델링

1) 본 논문에서 사용된 다항식을 이용한 속도 프로파일의 플로우 차트는 다음과 같다.

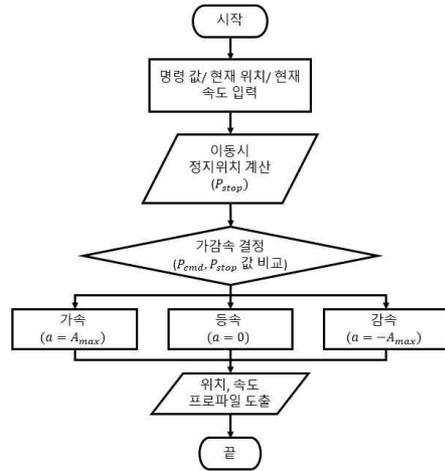


그림 1. 속도 프로파일의 플로우 차트
Figure 1. Velocity profile flow chart

위의 플로우 차트에서 P_{stop} 은 정지 위치 P_{cmd} 는 사용자가 입력하는 명령 값을 의미한다. P_{stop} 의 계산식은 다음과 같다.

$$P_{stop} = \text{sgn}(V_k) \times \frac{V_k^2}{2A_{max}} + P_k \quad (1)$$

$$V_{k+1} = V_k + aT_s, P_{k+1} = P_k + V_k T_s + \frac{1}{2} a T_s^2$$

식 (1)에서 P_k 는 시스템의 현재 위치, V_k 는 현재 속도를 의미하며, P_{stop} 의 값에는 현재의 위치가 포함되어 있기 때문에 프로파일의 가감속을 결정할 때 P_{stop} 과 P_{cmd} 를 비교하여 판별한다. 따라서 P_{stop} 와 P_{cmd} 를 이용한 가감속 판별식은 다음과 같다.

$$\text{if } V_k \geq 0, a = \begin{cases} A_{max} (P_{cmd} > P_{stop}) \\ -A_{max} (P_{cmd} \leq P_{stop}) \end{cases} \quad (2)$$

(단, if $V_k \geq V_{max}$ $a = 0$)

$$\text{if } V_k < 0, a = \begin{cases} A_{max} (P_{cmd} \geq P_{stop}) \\ -A_{max} (P_{cmd} < P_{stop}) \end{cases}$$

(단, if $V_k < -V_{max}$ $a = 0$)

위의 식 (2)에서 V_{max} 는 최대 속도, A_{max} 는 최대 가속도를 의미하며, 속도가 양의 방향일 때와 음의 방향일 때에 P_{cmd} 와 P_{stop} 의 판별식은 반대로 작용하며, 두 경우 모두 가속 도중 최대 속도보다 더 빨라지면 가속도를 0으로 만들어 등속 운동을 할 수 있도록 하였다.[4] 단 본 속도 프로파일만 적용하면 정찰 후에도 미

제한 떨림이 발생하는 것을 확인하였다. 이를 방지하기 위하여, 현재 위치와 명령 값의 차이가 일정 값 이하로 떨어지면 속도를 0으로 하는 판별식을 추가하였다.

$$\begin{aligned} & \text{if } |P_{cmd} - P_k| < Z \\ & V_{kl} = 0 \\ & P_{kl} = P_k \end{aligned} \quad (3)$$

위의 알고리즘으로 생성된 속도, 위치 프로파일의 그래프는 다음과 같다. 가속-감속 프로파일 시뮬레이션은 명령 값은 모터와 센서의 성능을 고려하여 최소 1°로 잡았으며, 최대 100°로 설정하였다. 최소 각도는 EOTS의 감시 범위가 최대 500m로 가정하였을 때 1°는 약 8.73m로 이 이하의 값은 시스템이 움직여도 카메라의 시선 안에 들어오며, 또한 타겟이 EOTS의 정중앙이 아닐 때를 가정해야 하므로 어느 정도 여유를 두어 최소 시뮬레이션 값을 1°로 설정하였다. 최대 시뮬레이션 값은 EOTS의 구동 범위가 +20° ~ -80° 이기 때문에 최대 로 움직일 수 있는 각도로 설정하였다.

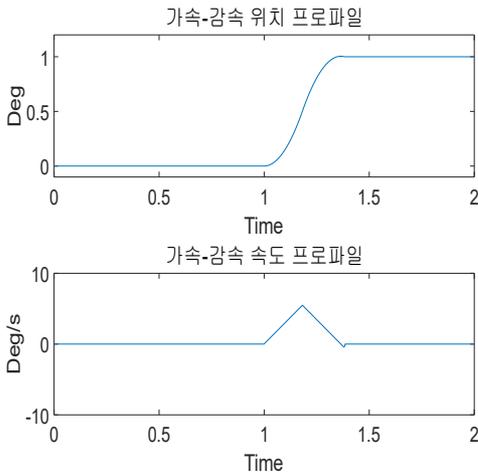


그림 2. 가속-감속 프로파일.
 Figure 2. Acceleration-deceleration profile.

그림 2는 등속 운동이 없는 가속, 감속 속도 프로파일이다. 0° ~ 1°를 이동하였으며 속도 프로파일 그래프에서 마지막 부분이 급격하게 속도 변화가 일어나는 부분은 시스템을 정지시키는 알고리즘 부분에서 0.001°의 근소한 값을 설정하였지만, 1° 직전에서 이미 목표 값에 도달한 것으로 알고리즘이 판단하여 정지한 것으로 추정된다.

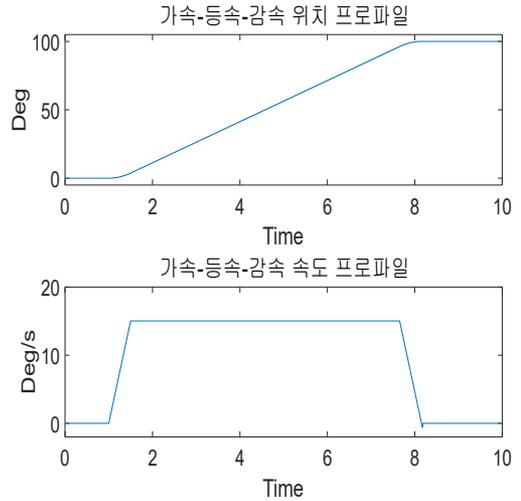


그림 3. 가속-등속-감속 프로파일
 Figure 3. Acceleration-constant-deceleration profile.

그림 3는 가속-등속-감속 프로파일 그래프이다. 가속-감속 속도 프로파일과 마찬가지로 오버슈트가 거의 없으며, 그래프상에선 보이지 않지만, 속도 프로파일의 마지막 부분에서 직전에 가까운 속도의 변화가 일어났으나 변화의 폭이 시스템에 영향을 주지 않을 정도라고 판단하였다.

III. EOTS 시스템 Parameter 도출

1. Parameter 측정을 위한 HILS 시스템 구축

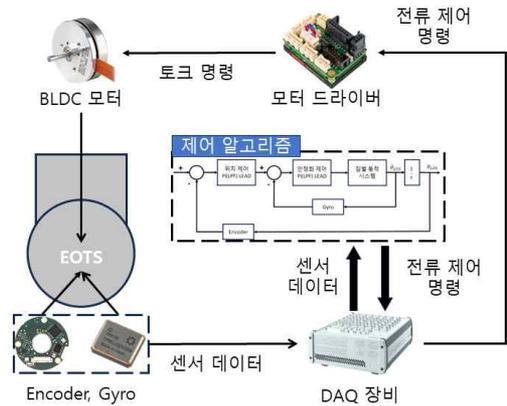


그림 4. 파라미터 측정을 위한 HIS 시스템.
 Figure 4. HIS system for parameter measurement.

그림 4는 EOTS 시스템의 Parameter를 구하기 위한

HILS 시스템의 블록 다이어그램이다. EOTS 시스템의 내부에 구동을 위한 BLDC 모터, 각도 값 측정을 위한 Encoder, 각속도 취득을 위한 Gyro 센서가 내장되어 있다. DAQ 장비는 Simulink와 연동하여, 제어 알고리즘으로부터 전류 제어 명령을 모터 드라이브로 송신하고, EOTS 내부의 센서 데이터를 기록하는 역할을 한다. 시스템의 동작을 모사하는 데 필요한 변수는 다음과 같다.

표 1. EOTS 시스템 구성 파라미터
Table 1. EOTS system configuration parameters

기호	구분
J	시스템의 관성모멘트
C1	시스템의 정지 마찰
C2	시스템의 점성 마찰

2. 관성 모멘트 측정

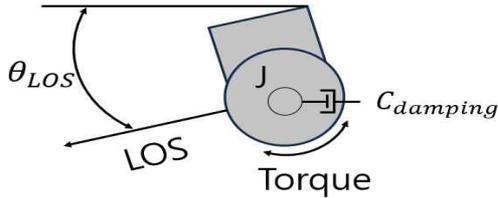


그림 5. EOTS 시스템의 간략도
Figure 5. Simplified diagram of the EOTS system.

그림 5는 EOTS 시스템을 간략하게 나타낸 그림이다. 시스템의 관성 모멘트는 EOTS에 가해지는 토크 명령과 EOTS 시스템의 각속도 응답을 바탕으로 측정할 수 있다.

$$\left| \frac{\dot{\theta}}{T_m} \right| = \left| \frac{1}{Js+c} \right| = \sqrt{\left(\frac{1}{j(J\omega+c)} \right)^2} \quad (4)$$

$$\left| \frac{\dot{\theta}}{T_m} \right| \cong \frac{1}{Js} \rightarrow J = \frac{T_m}{\dot{\theta} \omega}$$

식 (4)에서 $\dot{\theta}$ 는 EOTS의 각속도 응답의 최댓값을 의미한다. J는 시스템의 관성 모멘트를 의미한다. ω 는 시스템에 가진 된 주파수를 의미한다. T_m 은 시스템에 인가된 토크 값을 의미한다.

시스템의 관성 모멘트를 측정하기 위해 적용할 실험 Parameter는 다음과 같다.

표 2. 관성 측정 실험 파라미터
Table 2. Inertia measurement experiment parameters

기호	구분	크기
I	전류 (전폭)	1000mA
Hz	가진 주파수	10Hz
T_c	토크 상수	0.0272Nm/A

그림 4에서 나타낸 HILS 시스템을 통하여 각 실험 Parameter를 입력한 후 시스템의 응답을 나타낸 그림은 다음과 같다.

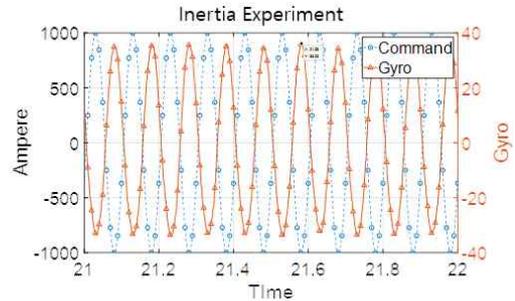


그림 6. 관성 측정 실험 결과
Figure 6. Inertia measurement experiment results.

그림 6에서 EOTS에 인가된 전류 명령의 최댓값은 1000mA이며, 최대 각속도 응답은 36.21deg/s이다. 측정된 값을 이용하여 EOTS 시스템의 관성 모멘트를 구하는 식은 다음과 같다.

$$J = \frac{T_m}{\dot{\theta} * \omega} = \frac{0.001 * I * T_c}{\dot{\theta} * \frac{\pi}{180} * Hz * 2 * \pi} \quad (5)$$

$$= 0.00068499kg * mm^2$$

식 (5)는 관성 모멘트를 측정하기 위한 식이며 각 변수는 다음과 같다. I는 전류 명령의 최댓값, T_c 는 모터의 토크 상수, $\dot{\theta}$ 는 시스템의 각속도 응답의 최댓값 (deg/s), Hz는 전류 명령의 가진 주파수이다.

2. 정지 마찰 측정

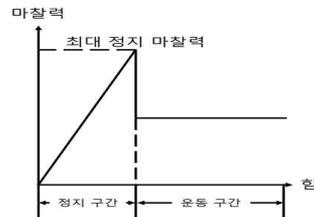


그림 7. 정지 마찰의 예시
Figure 7. Examples of static friction.

그림 7는 정지 마찰력에 간단한 예시를 설명하는 그림이다. 최대 정지 마찰력이란 물체가 정지 상태일 때 작용하는 마찰력을 의미하며, 운동을 시작하는 순간은 다시 마찰력이 낮아지게 된다. 따라서 시스템 모사에 필요한 최대 정지 마찰계수를 구하기 위하여, 아주 느린 주파수의 Saw파를 EOTS에 입력하여 EOTS가 움직이기 시작한 순간의 전류를 측정하고 그때의 토크 값을 이용하여 정지 마찰의 크기를 구하였다.

정지 마찰 측정을 위한 실험 Parameter는 다음의 표와 같다.

표 3. 정지 마찰 실험 파라미터
 Table 3. Static friction experiment parameters

파형	구분	크기
Saw파	진폭	160mA
	주파수	0.1Hz

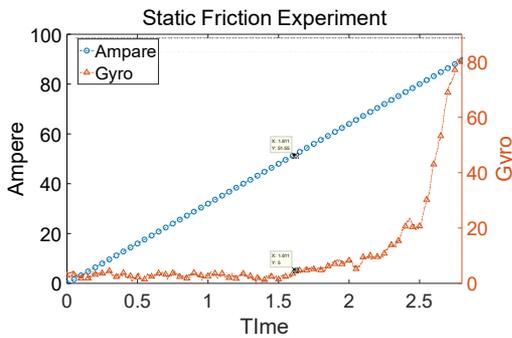


그림 8. 정지 마찰 측정 실험 결과
 Figure 8. Static friction measurement experiment results.

그림 8는 표 3에 나와 있는 신호를 인가하였을 때 EOTS 시스템의 Gyro 응답을 나타낸 그래프이다. 전류가 51.55mA일 때 Gyro에 움직임이 감지되었으며, 이를 통해 정지 마찰을 도출하면 다음과 같다.

$$c_1 = 0.0272 * 0.001 * 51.55 = 0.001402 Nm \quad (6)$$

3. 점성 마찰 측정

시스템의 동적 모델링을 위한 마지막 Parameter는 점성 마찰이며, 점성 마찰은 실험을 직접 진행하여 구한 것이 아닌 Matlab의 선형 분석 도구 중 하나인 Parameter Estimation을 이용하여, 도출하였으며 다음 그림과 같다 [5].

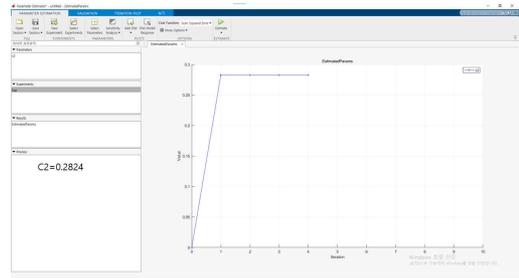


그림 9. 점성 마찰 측정 결과.
 Figure 9. Viscous friction Parameter Estimation results.

4. EOTS 시스템 모델링

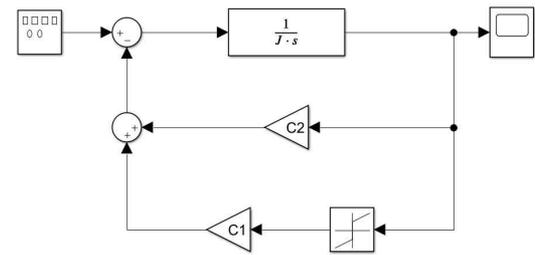


그림 10. EOTS 시스템 모델의 블록 다이어그램.
 Figure 10. Block diagram of the EOTS system mode.

그림 10는 시스템의 구동을 모사하기 위한 시스템이며 J^*s 는 시스템의 관성 모멘트에 대한 전달함수를 의미한다. 각각 C_1 , C_2 는 정지 마찰과 점성 마찰을 의미하며, 시스템의 움직임을 방해하는 요소로 작용하게 된다.

표 4. EOTS 시스템 구성 파라미터 측정 결과
 Table 4. Measurement results of the EOTS system configuration parameters

기호	구분
J	0.00068499 kg*mm ²
c1	0.001402
c2	0.2824

표 4는 실험을 통해 측정된 시스템의 동적 파라미터 값이며, 이를 그림 10에 시스템을 모사한 블록 다이어그램에 적용하여 EOTS를 시뮬레이션 하기 위한 시스템을 모사하였다.

IV. EOTS 제어 시스템 설계

1. 이중 PI-Lead 제어기

본 논문에서는 EOTS의 제어를 위하여 이중 PI-Lead 제어기를 설계하였다. 가장 기본적인 제어기의 형태는

PID 제어기이며, 각각 비례, 적분, 미분 항을 의미한다. PID는 제어에 있어서 가장 기본적이고, 우수한 성능을 낼 수 있다. 하지만 2kg급 EOTS는 주로 드론에 장착해서 사용하며 운용환경은 풍하중과 모터에 의한 진동으로 고주파수 대역의 외란을 받게 된다. 이때 PID의 D 제어가 일종의 High Pass Filter의 역할을 하기 때문에 본 시스템에 적용하기에는 적절하지 않다고 판단하였다[4]. PI 제어기로 위치 및 속도 제어를 시행하면서, 부족한 위상 여유를 만족하기 위하여 Lead 제어기와 Global Gain을 추가하여 원하는 dB와 위상 여유를 확보할 수 있도록 하였다[6].

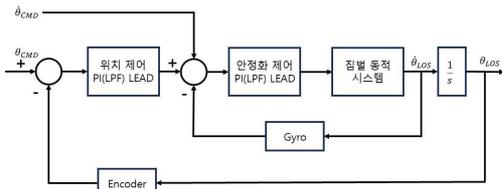


그림 11. 이중 PI-Lead 제어기 블록 다이어그램
Figure 11. Double PI-Lead controller block diagram.

본 제어 시스템은 외부 루프는 Encoder 피드백을 받으면서 위치 제어를 수행한다. 또한 내부 루프는 Gyro 센서의 피드백을 받으면서 안정화 제어를 수행하는 루프이다. 각 루프의 PI 제어기의 각각의 Gain은 경험상의 수치를 적용하였으며 다음 표와 같다.

표 5. 이중 루프 제어기 게인 값
Table 5. Double loop controller gain value

구분	수치
P Gain	4
I Gain	$4.5 * 2 * \pi$
외부 Lead Gain	$\frac{0.11447s + 1}{0.00882s + 1}$
내부 Lead Gain	$\frac{0.01969s + 1}{0.00321s + 1}$

2. 속도 프로파일 최적화 시뮬레이션

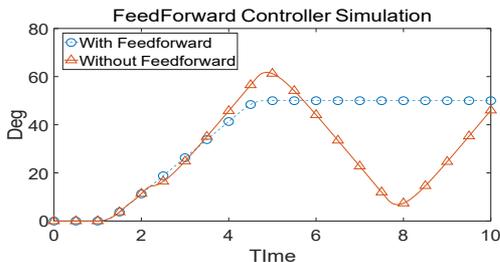


그림 12. FeedForward 제어기 시뮬레이션
Figure 12. FeedForward controller simulation.

가장 먼저 Feed-Forward 제어기의 유무에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 일반적인 비행 상황을 가정하였을 때 구동 범위인 +20° ~ -80° 전체를 구동할 상황은 드물기 때문에 100°의 절반인 50°만 움직이도록 시뮬레이션을 진행하였으며, Feed-Forward 제어기가 없을 때 제어 시스템의 응답이 발산하는 결과가 나타났다. 따라서 속도 프로파일과 안정화 제어기에 Feed-Forward 제어기를 사용했을 때 응답이 안정적이었다.

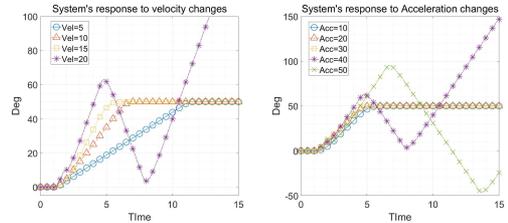


그림 13. 속도, 가속도 변화에 따른 시스템 응답결과
Figure 13. System response results due to changes in velocity and acceleration.

그림 12는 속도 프로파일의 최적화를 위하여, 속도 및 가속도의 변화에 따른 시스템의 응답을 비교한 그래프이다. 왼쪽의 그래프를 속도의 변화에 따른 시스템의 응답에 대한 그래프이며, 가속도의 값은 일정하게 두고 최대 속도만을 5deg/s씩 늘려가며 응답을 확인하였을 때 최대 속도만을 15deg/s이다. 마찬가지로 가속도 변화에 따른 시스템의 응답은 속도는 고정된 후 가속도를 10 deg/s²씩 늘려가며 시뮬레이션을 진행하였다. 그때 40 deg/s²이 되었을 때 시스템이 발산하지 않으면서 가장 빠른 응답을 보였다. 따라서 본 논문에서 설계한 제어 시스템과 EOTS에 동적 모델링에서 가장 적절한 각속도는 15deg/s 각가속도는 40deg/s²라는 결론을 도출하였다.

V. 결론

본 시스템에서는 다항 함수를 이용한 실시간 속도 프로파일에 대하여 알고리즘을 설계하였고, EOTS의 시뮬레이션을 위한 동적 시스템의 모델링을 진행하였다. EOTS의 토크와 응답 각속도 사이의 주파수 대역에서의 전달함수 수식을 이용하여, 일정한 전류를 인가하였을 때 EOTS의 응답을 Gyro 센서를 이용하여 취득한 후 관성 모멘트를 측정하였다. 시스템 모델링을 위한 마찰은 정지 마찰, 점성 마찰 두 가지를 도출하기 위하여 정지 마찰을 매우 느린 주파수의 Saw파를 이용하여

Gyro가 움직이기 시작하는 시점의 데이터를 이용하여 정지 마찰을 도출하였으며, 점성 마찰은 Matlab의 Parameter Estimation을 이용하여 시스템의 모델링을 하였다. 그리고 이중 PI-Lead 제어를 장착하고 속도 프로파일의 최대 속도와 가속도의 변화에 따른 시뮬레이션을 진행하여 최적의 최대 속도와 가속도를 선정하여 속도 프로파일의 최적화를 진행하였다. 추후 연구는 실제 EOTS에 외란 데이터를 적용하였을 때 속도 프로파일을 장착한 이중 PI-Lead 제어기의 성능을 검증할 예정이다.

※ 본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (협약번호 UD1000 44TU)

References

- [1] H. Hoon, “Analysis of the Status of Basic Industries in Military Drone”, The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol 6, No 4, pp493-498 November, 2020
- [2] J. Y. Lee and C. H. Hyun, “Torque Control of Dc Motor Using Velocity Profile Based Acceleration/Deceleration Control”, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 22, No. 1, pp 36-41 February 2012 <http://dx.doi.org/10.5391/JKIS.2012.22.1.36>
- [3] Samsung Electronics Co., Ltd., “Velocity profile generating device and control method thereof”, Korea Patent, 10-0722857(2007)
- [4] J. B. Yim and L. Joon, “EOTS Position Control Using Constant Acceleration and Deceleration Profile”, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol 16, No. 1, pp 89-94, February, 2013
- [5] J. B. Lee and H. G. Choi, “The Control for the 2-Axis Stabilized Gimbal using the PI-LEAD Algorithm”, The Journal of Korea Institute of Convergence Signal Processing, Vol 14, No. 2 pp 117-123 2013
- [6] J. W. Kim, G. C. Lee, D. G. Kwag, “Study on Design of Two-Axis Image Stabilization Controller through Drone Flight Test Data Standardization”, International Journal of Advanced Culture Technology, Vol. 10, No. 1, pp 470-477, December, 2022 <https://doi.org/10.17703/IJACT.2022.10.4.470>