

2축식 드론 추적 로봇의 제어기 설계 및 선정 방안 연구

Study on the Design and Selection of Controller for Two Axial Drone Tracking Robot

박승운¹ · 김보겸¹ · 박창대¹ · 임현준¹ · 이철희^{1*}

Seungwoon Park, Bo Gyum Kim, Chang Dae Park, Hyeon Jun Lim and Chul-Hee Lee

Received: 18 Jul. 2024, Revised: 1 Aug. 2024, Accepted: 12 Aug. 2024

Key Words : 2DOF robot(2자유도 로봇), Ttracking(추적), PID(비례제어기), SMC(슬라이딩모드제어), MPC(모델 예측제어)

Abstract: This study compared performances of PID (Proportional Integral Derivative), SMC (Sliding Mode Control), and MPC (Model Predictive Control) strategies applied to a 2DOF (Degree Of Freedom) drone tracking robot. The developed 2DOF robot utilized a depth camera with an IMU (Inertial Measurement Unit), laser pointers, and servo motors to rapidly detect and track objects. Image processing was conducted using the YOLO deep learning model. Through this setup, controllers were attached to the robot to track random drone movements, comparing performances in terms of accuracy and energy consumption. This study revealed that while SMC demonstrated precise tracking without deviating from the path, both PID and MPC controllers showed deviations. Performance-wise, SMC is superior. However, considering economic aspects, PID is more advantageous due to its lower power consumption and relatively minor tracking errors.

기호 설명

a_i : distance from Z_i to Z_{i+1} measured along X_i , m

d_i : distance from X_{i-1} to X_i measured along Z_i , m

FP : false negative

fx, fy : camera internal parameters

L_1 : length of first link, mm

L_2 : length of second link, mm

MV : manipulated variable

m_2 : mass of the YZ plane motor, g

O : origin point of world coordinates

O_{camera} : origin point of local coordinates

TP : true positive

v_1 : resultant vector

x_{im}, y_{im} : The coordinate of the drone the camera is looking at.

α_i : angle between Z_i and Z_{i+1} measured around X_i , rad

θ_i : angle between X_{i-1} and X_i measured around Z_i , rad

θ_1 : angle of first motor, rad

θ_2 : angle of second motor, rad

τ_1, τ_2 : control torque in the XY, YZ plane, Nm

1. 서론

로봇 기술의 발전은 다양한 산업 분야에서 그 중요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 로봇의 성능을 최적화하기 위해서는 정밀하고 강건한 제어 시스템의 개발이 필수적이다.¹⁾ 다양한 제어 방식이 연구되고 구현되고 있는 가운데, 2DOF로봇은 그 중요성이 더

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

¹ Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

속 부각되고 있다.²⁾ 이 로봇들은 CCTV, 태양 추적 시스템, 협동 로봇 등에서 필수적인 역할을 하며, 빠르고 정확한 제어가 요구되는 분야에서 그 필요성이 더욱 증가하고 있다.³⁻⁴⁾ 최근에는 드론 기술의 급속한 발전과 함께 보안, 감시, 재난 관리 등 다양한 산업 분야에서 드론의 활용이 증가하고 있다.⁵⁾ 드론은 다양한 이점을 제공하지만, 동시에 비인가 지역의 침입, 불법 촬영과 같이 심각한 사회적 문제를 일으키는 위협 요소로도 작용한다.⁶⁾ 이러한 드론에 의한 위협에 효과적으로 대응하기 위해서는 자동으로 드론을 감지하고 추적할 수 있는 기술의 개발이 요구되며,⁷⁾ 기술 개발에 경로 추정의 정확도가 중요한 요소로 차지하고 있다.⁸⁻⁹⁾ 제어 방법에 따라 시스템의 성능은 상이하다.¹⁰⁻¹²⁾ 이에 본 연구에서는 고도로 발전된 2축 드론 추적 시스템을 이용하여 자동으로 드론을 감지하고 추적하는 기술을 개발하였으며 추적을 위해 필요한 제어기 설계를 위해 3가지의 제어 방법: PID 제어가 결합된 CTC(Computed Torque Control), SMC(Sliding Mode Control), MPC(Model Predictive Control)를 적용하여 실시간으로 드론의 움직임을 추적하였으며, 각 제어 방법 간의 성능을 비교 분석하여 적절한 제어기 설계를 위한 설계 방안을 도출하는 것을 목적으로 하였다. 드론 추적 과정에서 발생하는 제어기별 오차를 분석하였으며, 각 제어기의 소비전력을 비교하여 상황에 따른 적절한 제어기 설계를 위한 방안을 제시하였다. 따라서 본 연구는 향후 드론을 이용한 보안 위협에 대응하는 드론 추적 시스템 개발을 위해 요구되는 정밀한 제어기를 설계할 때 기존에 사용되는 다양한 제어 방법의 비교를 통해 가장 고성능의 제어 방법을 선택하는 전략을 제시하며 무단 비행, 비인가 지역 침입 등 드론에 의한 다양한 보안 위협 상황에 대처할 수 있는 적절한 시스템 구축에 기여할 것으로 기대된다.

2. 2DOF 로봇 모델링

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 2축식 추적을 위해 대상 물체를 RGB 이미지로 확인하고 거리 측정 및 자세를 추정 가능한 IMU가 내장된 Depth Camera, 추적 상태를 가시화하기 위한 레이저 포인터, 그리고 제어 시스템을 구현할 수 있는 전류제어가 가능한 서보모터 2개를 사용한다. 이러한 구성품을 활용하여 2DOF 로봇의 H/W를 설계하였으며, 관절 운동, H/W 거치를 위한 암 (Arm)부는 3D 프린터를 통해 설계되었다.

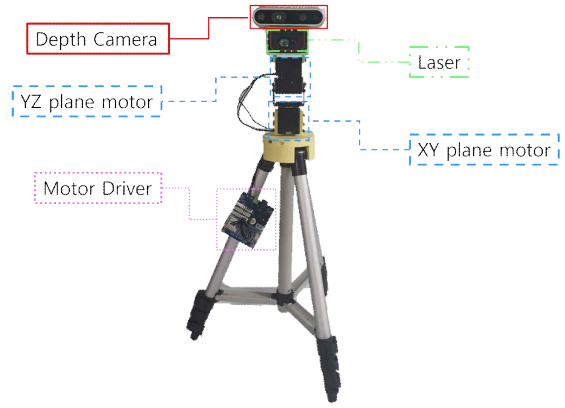


Fig. 1 2DOF robotic system for drone tracking

3. 물체 인식 영상처리

3.1 로봇 영상처리 시스템 구성

드론은 사용자의 목적에 따라 이동하는 속도가 매우 빠르며, 이를 탐지하기 위해 빠른 예측 속도를 가진 딥러닝 모델인 YOLO를 사용하였다.¹³⁾ YOLO의 One stage 방식인 영역 제안 방법과 분류 알고리즘인 CNN을 통해 데이터 처리 속도가 빠르지만 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.¹⁴⁾ 이를 보완하기 위해 드론의 비전 학습 데이터양을 늘리고 인식이 잘되지 않는 상황에서의 이미지들을 추가로 학습하여 정확성을 높였다. 또한 드론 모델의 사이즈는 Nano부터 Xtra Large까지 다양하게 존재하지만 Small 사이즈부터 FPS 성능이 저하되는 현상이 발생하여 Nano 사이즈를 기반으로 학습하였다.

학습한 모델의 정확도를 분석하기 위해 Precision-Recall 곡선의 아래 면적에 해당하는 AP(Average Precision)를 모든 class를 기준으로 평균을 낸 mAP(mean Average Precision)를 통해서 비교하였다. 이때, Precision은 예측한 결과가 얼마나 정확한지를 평가하는 식으로, Precision 산출식은 식(1)과 같다. 여기서 TP(True Positive)는 실제 드론을 드론으로 정확히 예측한 항목 수이며, FP(False Positive)는 드론이 아닌 객체를 드론으로 잘못 예측한 항목 수이다. Recall은 검출해내어야 하는 객체중에서 정확하게 검출된 객체의 비율을 의미하는 것으로 식(2)와 같다. 이때 FN(False Negative)는 드론이 아닌 객체를 정확히 드론이 아님으로 예측한 항목 수이다.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

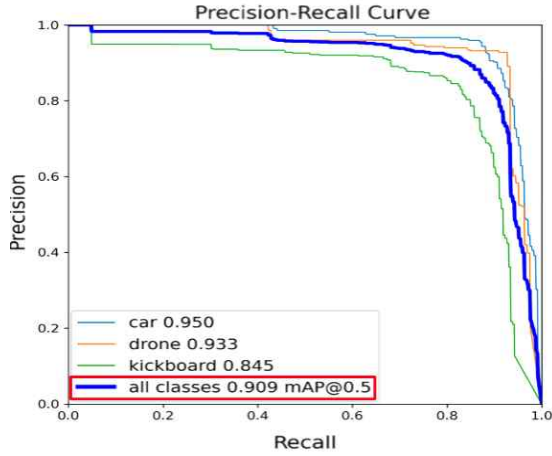


Fig. 2 Precision-Recall Curve for Learning Drone, Car and Kickboard with YOLOv5

이와 같이 식 (1), (2)의 두 성능 평가 지표를 통해 YOLO의 인식 성능을 평가할 수 있으며, 평가 결과는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 YOLOv5 모델의 학습한 Precision-Recall Curve를 나타내며, 모든 클래스에 대한 정확도 지표인 mAP가 0.909임을 확인할 수 있어 드론 인식율의 정확도가 높은 것을 확인할 수 있다.

3.2 좌표계 변환

월드 좌표계에서 바라본 드론의 좌표를 카메라 로컬 좌표계에서 바라본 드론의 좌표로 변환하는 행렬을 카메라 내부 파라미터와 카메라 외부 파라미터로 나눌 수 있다. 식 (3)에서 S는 월드 좌표계에서 바라본 드론까지의 거리를 나타낸다.

$$S \begin{bmatrix} x_{im} \\ y_{im} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} & t'_x \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} & t'_y \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} & t'_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{drone} \\ y_{drone} \\ z_{drone} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

카메라의 내부 파라미터에는 초점거리, 주점, 비대칭계수의 값이 있으며, 이는 공식 Python 소프트웨어를 통해 얻을 수 있다. 카메라 외부 파라미터는 대너빗 하텐버그 매개변수(DH Paramter)를 통해 수학적으로 표현할 수 있으며 식 (4)와 같이 로봇 내의 연결된 링크들의 위치 및 자세의 관계를 나타낼 수 있다.¹⁵⁾ 설계한 로봇의 링크 간의 관계를 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_{camera} = O \times \begin{matrix} link1 \\ O \end{matrix} T \times \begin{matrix} link2 \\ link1 \end{matrix} T \times \begin{matrix} camera \\ link2 \end{matrix} T \quad (4)$$

$${}_{i-1}^{-1}T = R_x(\alpha_{i-1}) D_x(a_{i-1}) R_z(\theta_i) D_z(d_i) \quad (5)$$

월드 좌표계에서 바라본 드론의 좌표가 필요하므로 식 (6)과 같이 카메라 좌표계에서의 드론 위치 정보를 월드 좌표계에서의 드론의 좌표로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{drone} \\ y_{drone} \\ z_{drone} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{im} \\ y_{im} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 역기구학 해법

추적 카메라에 대한 드론의 위치 좌표 계산을 위해 Fig. 3 와 같이 해석적 방법으로 삼각함수를 이용하여 모터와 레이저 포인터의 위치를 유도하였다. 먼저, 로봇이 지면과 맞닿는 지점을 원점으로 두고, 유클리드 공간을 가정하여 드론의 좌표를 (x, y, z)로 두었다. 이때 드론을 추종하기 위해 지면에 수직인 축으로 회전하는 첫 번째 모터가 회전해야 하는 각도는 어느 상황에서나 항상 식 (7)을 따른다.

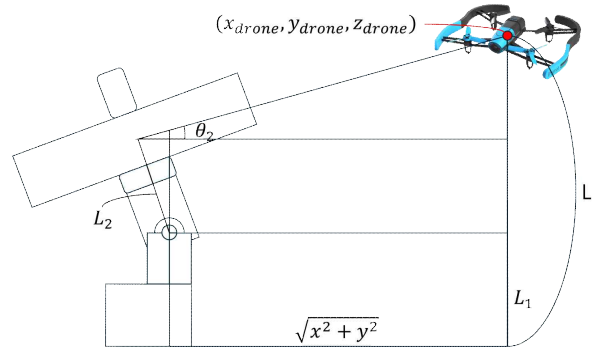


Fig. 3 Analysis of the position of the motor and laser pointer using the trigonometric function

$$\theta_1 = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (7)$$

두 번째 모터 회전 각도는 로봇과 드론 간의 기하학적 관계를 이용하여 식 (8)과 같이 θ_2 를 계산할 수 있다. 이와 같이 드론 추적을 위한 2축 로봇의 회전 각도는 식 (7), (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_2 = \text{acos}(L_2 A + \sqrt{(L_2 A)^2 + (A^2 + B)(B - L_2^2)}) \quad (8)$$

$$A = z - L_1, \quad B = x^2 + y^2$$

3.4 동역학 모델링

드론의 추적을 위해 필요한 각 로봇의 회전 각도를 이전 절에서 계산되었고, 실제 모터가 회전할 때 필요한 토크는 이번 절에서 설명한다. 먼저 라그랑지안 방정식을 이용해 로봇의 운동에너지와 위치에너지를 기반으로 라그랑지안(L)을 구한다. 이후 식 (9), (10), (11)과 같이 로봇의 운동방정식을 계산하여 모터의 작동 토크를 구할 수 있다. 이때 $i=1,2$ 는 두 개의 관절에서 사용된 각 모터를 의미한다.

$$L(\text{Lagrangian}) = E_{\text{kinetic}} - E_{\text{potential}} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (11)$$

여기서, $M(q)$: Inertia matrix

$G(q)$: gravity Vector

$V(q, \dot{q})$: coriolis/centripetal Vector

식 (9-11)을 정리하면 식 (12)와 같이 요구되는 각도, 각속도, 각가속도에 대한 모터 작동 토크를 계산할 수 있다. 이때 A, B는 로봇의 관절과 링크의 기하학적 관계를 나타낸다. 이처럼 2축 로봇이 회전할 때 필요한 토크량을 구할 수 있으며, 본 시스템의 Plant 모델에 입력된다.

$$\begin{bmatrix} m_2 A^2 & 0 \\ 0 & m_2 (l_2^2 + l_3^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2m_2 AB\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ -m_2 A B\dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -m_2 Ag \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A = l_2 \sin\theta_2 - l_3 \cos\theta_2 \quad \text{and} \quad B = l_2 \cos\theta_2 + l_3 \sin\theta_2$$

4. 제어기 설계

4.1 PID 결합 CTC 제어기

PID 제어는 피드백 메커니즘을 기반으로 하여, 특정 대상의 현재 출력을 측정하고 그 값을 목표치인 참조값이나 설정값과 비교함으로써 오차를 도출한다. 얻어진 오차를 바탕으로, 제어가 필요한 입력값을 결정한다.¹⁶⁾ 전형적인 PID 제어기는 식(13)와 같이 세 가지 주요 요소인 K_p 비례(Proportional), K_i 적분(Integral), K_d 미분(Derivative) 항의 합을 이용하여 입력값을 계산하는 방식으로 설계되었다.

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (13)$$

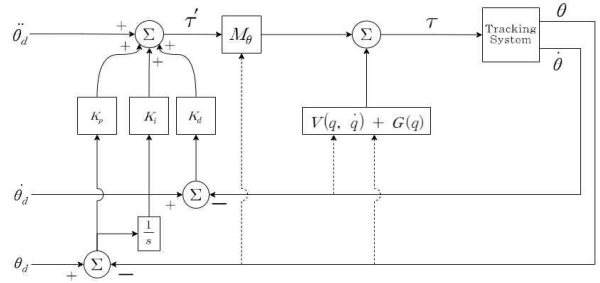


Fig. 4 Block diagram of CTC controller

PID 제어기만을 이용하는 경우 시스템의 비선형성에 의한 제어 성능 저하에 의해 추정 성능 또한 저하되는 단점이 존재하지만 CTC(Computed Torque Control) 방법과 같이 적용되면 이와 같은 단점이 보완되어 강건한 제어 성능을 보여주는 장점이 있다.¹⁷⁾ 제어 대상인 로봇팔 회전 각도(θ)와 각속도(ω)에 대한 오차를 기반으로 제어 신호를 계산하여 모터에 전달함으로써, 드론의 위치와 방향을 추적한다. Fig. 4와 같이 로봇의 CTC제어 시스템은 입력된 현재 각도와 각속도에 대한 정보를 피드백 받고, 목표하는 각도와 각속도의 값을 비교하여 오차 값을 계산한다. 오차 값은 Gain 값들과 곱해져서 τ' (토크 수정 값)을 생성한다. 이후, 현재 각도 정보는 질량 매트릭스를 통해 처리되고, 이 결과는 τ' 와 곱해져 CTC에 의해 최종 토크 τ 를 계산한다. PID 제어기의 게인 값인 K_p, K_i, K_d 는 시뮬레이션을 통해 시스템의 응답 시간, 안정성, 그리고 정밀도 사이의 최적 균형을 고려하여 최적의 게인 값을 결정했다.

4.2 SMC 제어기

SMC는 상태공간 좌표계에 상태 값들이 0으로 수렴하도록 설계된 슬라이딩표면을 두어 해당 표면을 따라가도록 불연속적인 제어입력을 주며, 시스템 제어 중 발생하는 외란에 대해 강건한 특징이 있다.¹⁸⁾ 상태공간 방정식은 관절의 각도와 각속도에 대해 표현하며 SMC의 슬라이딩표면은 각도와 각속도에 대한 오차를 이용하여 표현된다. 따라서 동역학 모델 기반으로 도출된 상태공간 방정식은 식 (14), (15)과 같으며,

$$\dot{x}_2 = -\frac{2B}{A}x_2x_4 + \frac{1}{m_2A^2}\tau_1 \quad (14)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{AB}{C}x_2^2 + \frac{Ag}{C} + \frac{1}{m_2C}\tau_2$$

여기서, $C = l_2^2 + l_3^2$

$$x_1 = \theta_1, x_2 = \dot{\theta}_1, x_3 = \theta_2, x_4 = \dot{\theta}_2 \quad (15)$$

슬라이딩표면은 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} s_1 &= c_1 e_1 + e_2 \\ s_2 &= c_2 e_3 + e_4 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $c_1 > 0, c_2 > 0$

$$e_1 = \theta_{d1} - \theta_1, e_2 = \dot{\theta}_{d1} - \dot{\theta}_1, e_3 = \theta_{d2} - \theta_2, e_4 = \dot{\theta}_{d2} - \dot{\theta}_2$$

Fig. 5의 블록선도와 같이 제어 시스템은 경로 계획에서 얻은 값들을 입력으로 받아 시작된다. 이 시스템은 입력된 현재 각도와 각속도에 대한 정보를 피드백 받고, 이를 목표 각도와 각속도의 값과 비교하여 오차값을 계산한다. 매니플레이터가 토크를 받아 움직이고, 결과로 현재 각과 각속도는 다시 시스템에 피드백된다. 제어 시스템이 목표 각도와 각속도에 도달할 때까지 반복적으로 진행된다. 이 과정에서 SMC 제어기의 게인값인 C (sliding surface gain), K (switching gain), W (saturation function threshold gain) 는 시뮬레이션을 통해 시스템의 응답 시간, 안정성, 그리고 정밀도 사이의 최적 균형을 고려하여 최적의 게인 값을 선정하였다.

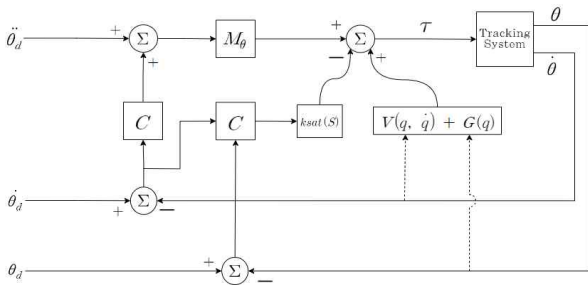


Fig. 5 Block diagram of SMC controller

4.3 MPC 제어기

MPC 제어는 일정 제어 구간에서의 제어 성능을 손실함수로 두어 평가하고 단위 시간마다 손실함수 계산을 바탕으로 제어입력을 최적화하는 방법이다. 실험에 사용한 시스템은 비선형 로봇 동역학 모델이기 때문에 먼저 피드백 선형화 제어기법을 통해 부분적인 선형화를 진행하였다.¹⁹⁾ 첫 번째 순서로, 식 (17), (18)과 같이 제어 input이 나올 때까지 아웃풋 벡터 Y를 미분하고 이를 합성 벡터 v로 치환한다. 해당 시스템의 경우 Y를 두 번 미분 했을 때, 제어 input인 토크가 나오기 때문에 $\ddot{\theta}$ 을 v로 치환하였다.

$$\ddot{Y} = \ddot{\theta} = M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) + \tau) = v \quad (17)$$

$$v = [v_1 \ v_2]^T \quad (18)$$

Guechi의 연구를 바탕으로 제어 input인 토크 항을 포함하고 있는 합성 벡터 v를 미래를 내다볼 [t t+h] 시간 구간 동안 일정하다고 가정하는 것으로 부분적 선형화를 진행하였다.¹⁹⁾ 첫 번째 관절을 예로 들면 [t t+h] 시간 구간 동안 $v1(t) = v1$ 으로 일정하다고 가정하고 t+h 시간대에서의 예러 값을 기반으로 식(19)과 같이 목적함수를 설정하였다.

$$J = e_1^2(t+h) + \rho e_1^2(t+h) \quad (19)$$

목적 함수를 v1에 대하여 편미분을 하게 되면 목적함수를 최소화하는 v1 값을 구할 수 있다. [t t+h] 시간 구간 동안 $v1(t) = v1$ 으로 일정하다고 가정했으므로, 식 (20), (21)을 기반으로 해당 예측구간에서 최적의 v1을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1(t+h) &= v_1 h + \dot{\theta}_1(t) \\ \theta_1(t+h) &= \frac{1}{2} v_1 h^2 + \dot{\theta}_1(t)h + \theta_1(t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$v_1(t) = k_3 \theta_{1d} - k_1 \theta_1(t) - k_2 \dot{\theta}_1(t) \quad (21)$$

구한 v1을 기반으로 2자유도 매니플레이터 동역학 식을 이용하여 Fig. 6과 같이 토크값으로 변환한 후 해당토크값에 맞는 전류값을 모터에 흘려보내 원하는 추종값을 따라가게 하였다. 전류를 모터에 흘려준 다음, 엔코더를 이용해 출력값을 다시받아와 새로운 예측구간에 맞는 MPC를 반복적으로 시행한다.

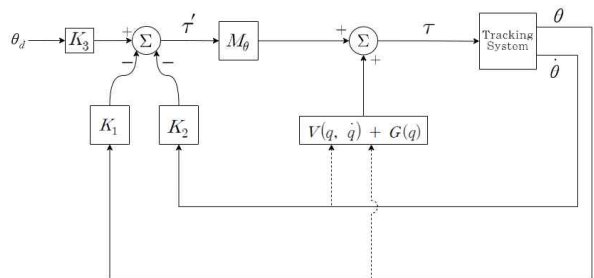


Fig. 6 Block diagram of MPC controller

본 연구에서 설계된 드론 추적 시스템은 위의 3가지 제어기 타입에 대해 드론 추적 성능 분석을 위한 실험이 진행되었다.

5. 실험 및 결과

야외에서 드론을 인식하여 추적하는 실험을 진행했다. Fig. 7과 같이 로봇이 바라보는 영역에 드론을 위치하고 드론을 초기 호버링부터 정해지지 않은 경로를 비행하여 로봇이 물체 인식 영상처리를 기반으로 제어기를 통해 트래킹하고 드론의 경로를 기록하였다. 모터의 샘플링 시간은 1/200이고 최대 속도는 44rpm이다. 목표와 로봇의 각도 차이를 로봇 최대속도를 고려하여 최소 0.2초 이내에 다음 목표로 도달할 수 있도록 하였다.

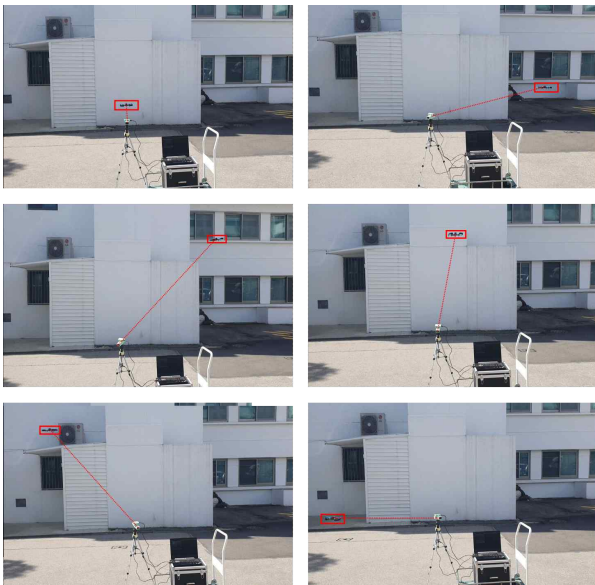


Fig. 7 Generate a drone path to a random location

Table 1 Root mean square errors of drone path and robot motor power consumption

Control type	XY RMSE	YZ RMSE	XY motor Power consumption(W)	YZ motor Power consumption(W)
CTC	1.201	0.428	1.000	4.957
SMC	0.809	0.493	6.754	2.662
MPC	1.398	0.550	1.520	4.315

기록한 같은 경로에서 로봇의 제어기 CTC, SMC, MPC를 각각 실행하여 경로에 대한 로봇의 경로, 각도 오차, 전력 소모량을 통해 랜덤한 목표를 트래킹하는 각 제어기에 따른 로봇의 효율을 비교한다.

Fig. 8은 각각 제어기를 통해 경로를 추종하는 동안 드론과 로봇의 경로를 XY 평면과 YZ 평면을 추적하는 각도를 나타낸다. 실선과 점선은 로봇의 각도이며 도형은 시스템에 대한 드론의 각도이다. 각 제어기의 특성에 따라 성능의 차이가 존재하고 세 가지의 제어기는 모두 성공적인 제어를 했음을 확인할 수 있다. 이를 통해 드론과 로봇 간의 각도를 RMSE로 계산하고 모터의 움직임에 따른 소비 전력을 Table. 1으로 정리하여 비교하였다.

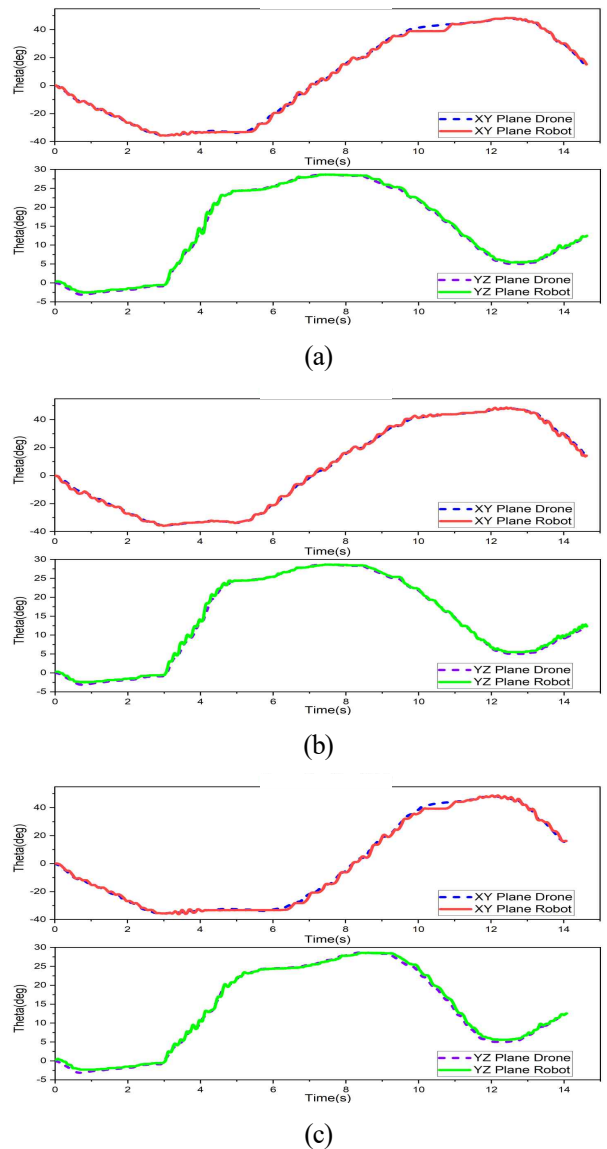


Fig. 8 Tracking performance for each controller: (a) Drone tracking using CTC controller; (b) Drone tracking using SMC controller; (c) Drone tracking using MPC controller

먼저 PID가 결합된 CTC를 보면 XY 평면에서 높은 오차율을 보여주었지만 이에 따른 낮은 토크 계산 시간에 의해 적은 소비 전력을 보여주었다. 한편 YZ 평면에서는 가장 낮은 오차율을 보여주었으며, 타 제어기에 비해 가장 높은 소비 전력을 보여주었다. CTC는 로봇 시스템의 토크 계산을 기반으로 제어가 이루어지며 낮은 오차율 확보를 위해 더 정밀한 토크 계산 및 제어가 이루어질 수 있으며, PID 파라미터 최적화가 우선될 시 더 낮은 오차율을 보여줄 것으로 기대할 수 있다.

XY 평면을 기준으로 SMC는 가장 적은 오차를 도출한 반면 소비전력은 가장 컸으며, CTC 제어에 비해 오차는 약 30% 감소하였지만 소비전력은 7배 가량 증가하였다. 한편 YZ 평면을 기준으로 할 시 XY 평면에 비해 적은 오차 변화율을 보여준 반면 SMC는 타 제어기에 비해 약 40~50%의 전력을 소비하였다. SMC는 CTC와 달리 별도의 토크 계산이 이루어지지 않아 제어기 파라미터에 따라 토크 입력 값이 달라질 수 있으므로 YZ 평면과 같이 파라미터가 정밀하게 이루어지면 상대적으로 낮은 소비 전력으로 제어가 정확하게 이루어질 수 있음을 기대할 수 있다. 그러나 XY 평면과 같이 낮은 오차율을 확정적으로 확보하기 어려우므로 SMC는 낮은 오차율보다는 외란에 대한 강건성 유지를 목적으로 사용하는 것을 고려할 수 있다.

마지막으로 MPC는 CTC와 달리 실시간으로 제어 파라미터의 최적화가 이루어진다. 이에 따라 CTC와 비교할 때 오차에 대한 소비 전력은 SMC에 비해 더 높은 유사성을 보여주었으나 CTC에 비해 XY 평면 제어에서 더 낮은 효율을 보여주었으나 소비 전력을 기반으로 제어를 평가할 시 MPC는 CTC와 비교하면 제어기 파라미터 설정에 의한 오차를 감안하면 서로 큰 차이가 발생하지 않았으므로 PID의 Gain 값 설정의 어려움을 고려하면 동역학 모델을 기반으로 제어기 파라미터의 최적화가 이루어지는 MPC를 선택하는 것을 고려할 수 있다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서 CTC, SMC, MPC 세 가지의 제어기를 사용하여 드론 추적 시스템을 구축하고 추적 알고리즘을 개발하였다. 딥러닝 기반 추적 시스템을 통해 드론을 인식하고 신뢰도가 가장 높은 드론을 추적하였으며, 카메라를 이용해 로컬 2D 좌표를 월드 3D

좌표로 변환하여 드론의 위치를 추정하고 개발한 시스템을 통해 드론을 추적하였다. 결과적으로 각 제어기는 XY, YZ 평면에 대해 서로 다른 오차율과 소비 전력을 보여주었다. PID가 결합된 CTC는 토크를 계산하여 제어가 이루어지므로 최적화된 PID 파라미터를 기반하면 가장 낮은 오차율을 확보할 수 있어 정밀한 제어가 요구될 시 CTC를 고려할 수 있다. 한편 제어기 설계 시 PID 파라미터 최적화가 진행되는 것에 어려움이 있을 경우 파라미터가 단위 시간 별로 최적화가 이루어질 수 있는 MPC 제어를 사용하는 것을 고려하여 CTC와 유사한 소비 전력 효율을 기대할 수 있다. CTC와 MPC는 동역학 모델이 기반되어야 하므로 공통적으로 낮은 오차율 확보를 위해 더 높은 소비 전력을 요구하지만 실험 결과와 같이 1.2~1.4의 RMSE 달성을 목적으로 하면 SMC에 비해 낮은 소비 전력을 보여줄 수 있다. YZ 평면을 기준으로 SMC는 유사한 오차율에 비해 낮은 소비 전력을 보여주었다.

종합적으로 지면과 수평한 방향으로 제어가 이루어지는 첫 번째 관절 제어에서는 CTC와 MPC가 높은 전력 효율을 보여준 반면 SMC가 가장 적은 오차율을 나타내었으며, 지면과 수직인 방향으로 제어가 이루어지는 두 번째 관절 제어에서는 SMC가 가장 높은 전력 효율을 보여준 반면 CTC가 가장 낮은 오차율을 나타내었다.

결론적으로 세 가지 제어기는 그 방식이 서로 달라 보편화된 최적의 제어기 설계가 이루어지는 것은 적절하지 않으며, 추적 시스템의 주변 환경과 드론 추적 시스템이 요구 정밀도, 시스템 운영 시 요구되는 소비 전력 효율을 종합적으로 고려하여 각 관절마다 제어 타입에 대한 성능을 비교 분석하여 적절한 제어기를 설계해야 함을 알 수 있다.

한편 목표 물체가 카메라의 FPS보다 빠르게 이탈하여 목표가 벗어나는 경우가 있을 수 있어 카메라의 FPS를 향상하게 시킬 수 있는 알고리즘 혹은 딥러닝 모델의 개발이 필요하며 향후 더 빠르고 정확한 제어 성능 확보를 위해 최대 회전 속도와 sampling rate가 높은 모터를 사용해 2축식 드론 추적 제어 시스템을 보완할 계획이다.

후 기

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연

구입 (P0012769, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Haviland, Jesse, and Peter Corke. "Robotics Software: Past, Present, and Future." Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems pp. 7, 2023.
- 2) Lochan, K., & Roy, B. K. Control of two-link 2-DOF robot manipulator using fuzzy logic techniques: a review. In Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2014, vol. 1, pp. 499-51, 2014.
- 3) Srang, S., & Ath, S. Dynamic Modeling and Simulation for 2DOF Parallel Mechanism Solar Tracker. In 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) pp. 283-288, 2019.
- 4) HAMEED, Ayesha, et al. Control system design and methods for collaborative robots. Applied Sciences, vol. 13, no. 1, 675, 2023.
- 5) Ahmed, Faiyaz, et al. "Recent advances in unmanned aerial vehicles: a review." Arabian Journal for Science and Engineering vol. 47, no. 7, pp. 7963-7984, 2022.
- 6) Lee, Peter. "Drones—opportunities, threats and challenges." The Palgrave Handbook of Security, Risk and Intelligence: pp. 229-245, 2017.
- 7) WU, Manjia, et al. Real-time drone detection using deep learning approach. In: Machine Learning and Intelligent Communications: Third International Conference, MLICOM 2018, Proceedings vol. 3, Springer International Publishing, pp. 22-32, 2018.
- 8) Dong Ho Shin. "Design of Adaptive Neural Networks Based Path Following Controller Under Vehicle Parameter Variations." Journal of Drive and Control, vol. 17, no. 1, pp. 13-20, 2020.
- 9) Yeong Jun Yu, SeongHoon Kang, JuHwan Kim, SeongIn No, GiHyeon Lee, Seung Yong Lee, & Chul-hee Lee. Study of Deep Learning Based Specific Person Following Mobility Control for Logistics Transportation. Journal of Drive and Control, vol. 20, no. 4, pp. 1-8, 2023
- 10) Kwang Seok Oh, Ja Ho Seo, & Geun Ho Lee. Phase Portrait Analysis-Based Safety Control for Excavator Using Adaptive Sliding Mode Control Algorithm. Journal of Drive and Control, vol. 15, no. 3, pp. 8-13, 2018
- 11) Gyuhong Jung. Trajectory Control of Excavator Actuators Using IMV. Journal of Drive and Control, vol. 17, no. 2, pp. 45-54, 2020.
- 12) Kang, Chang Ho, and Sun Young Kim. "Real-time object detection and segmentation technology: an analysis of the YOLO algorithm." JMST Advances vol. 5, no. 2, pp. 69-76, 2023.
- 13) Yan, Bin, et al. "A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5." Remote Sensing vol. 13, no. 9, pp. 1619, 2021.
- 14) Rocha, C. R., C. P. Tonetto, and Altamir Dias. "A comparison between the Denavit–Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing vol. 27, no. 4, pp. 723-728, 2011.
- 15) Jun Young Huh. Position Control of an Electro-hydraulic Servo System with Sliding Mode. Journal of Drive and Control, vol. 18, no. 3, pp. 16-22, 2021
- 16) Sariyildiz, Emre, Haoyong Yu, and Kouhei Ohnishi. "A practical tuning method for the robust PID controller with velocity feed-back." Machines vol. 3, no. 3, pp. 208-222, 2015.
- 17) Tatjewski, P, Effective Nonlinear Predictive and CTC-PID Control of Rigid Manipulators. Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, pp. 1-16, 2024.
- 18) Shtessel, Yuri, et al. Sliding mode control and observation. vol. 10. New York: Springer New York, 2014.
- 19) Guechi, El-Hadi, et al. "MPC control and LQ optimal control of a two-link robot arm: A comparative study." Machines vol. 6, no 3, pp. 37, 2018.