J. Space Technol. Appl. 5(2), 102-113 (2025)
https://doi.org/10.52912/jsta.2025.5.2.102

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

유전 알고리즘 기반 옵셋 보정 광학 추적 시스템의 PID(Proportional, Integral, Derivative) 이득 최적화

현 철[1†], 김동건[1], 김현승[1], 박승욱[2]

[1] 엘아이지넥스원 해양연구소
[2] 엘아이지넥스원 광정보융합연구소

Genetic Algorithm-Based Proportional, Integral, Derivative (PID) Gain Optimization in an Offset-Compensated Optical Tracking System

Chul Hyun[1†], Donggeon Kim[1], Hyunseung Kim[1], Seungwook Park[2]

[1]Maritime R&D Center, LIG Nex1, Seongnam 13488, Korea
[2]EO/IR Systems R&D Center, LIG Nex1, Seongnam 13486, Korea

Received: March 19, 2025
Revised: April 16, 2025
Accepted: April 20, 2025

†**Corresponding author :**
Chul Hyun
Tel: +82-31-5178-4293
E-mail: chul.hyun@gmail.com

Copyright © 2025 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Chul Hyun
https://orcid.org/0009-0006-7300-0740
Donggeon Kim
https://orcid.org/0009-0005-2374-1252
Hyunseung Kim
https://orcid.org/0000-0003-4021-5914
Seungwook Park
https://orcid.org/0009-0009-8817-7284

요 약

본 논문에서는 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 활용하여, 옵셋 보정 기반 광학 추적 시스템에서 PID(proportional, integral, derivative) 제어기의 이득 조합을 자동으로 최적화하고, 기존 수동 설정 방식과의 성능을 비교하였다. 본 시스템은 고해상도 망원경을 이용해 미지의 우주물체를 식별하기 위한 구조로, 초기 궤도결정(initial orbit determination, IOD)을 통해 예측된 궤도를 추종하되, 영상 중심으로부터의 옵셋(offset)을 실시간으로 보정하는 제어 구조를 갖는다. 기존에는 PID 이득 값을 실험적으로 수동 설정하였으나, 본 연구에서는 GA를 적용하여 RMS(root mean square) 오차를 최소화하는 최적 이득 조합을 자동으로 탐색하였다. 제안된 알고리즘은 경량 구조로 자체 구현되었으며, 시뮬레이션 결과를 통해 기존 조합 대비 RMS 오차와 추적 안정성 측면에서의 개선 효과를 정량적으로 확인하였다. 본 연구는 향후 다양한 환경 조건에서도 적용 가능한 자동화된 PID 조정 방법의 기반을 제시한다.

Abstract

This paper presents a genetic algorithm (GA)-based optimization method for tuning proportional, integral, derivative (PID) gains in an offset-compensated optical tracking system. The system is designed for high-resolution optical identification of unknown space objects and employs initial orbit determination (IOD) to estimate the target trajectory. The controller continuously compensates for image-based center offsets in real time. While prior studies used manually tuned PID gains, this work applies GA to automatically search for gain combinations that minimize root mean square (RMS) tracking errors. The GA was implemented in a lightweight custom framework, and simulation results demonstrate improved performance over the manually selected gains in terms of both RMS error and tracking stability. The proposed approach provides a foundation for automated and adaptive PID tuning in future optical tracking scenarios under varying conditions.

핵심어: 유전 알고리즘, PID(proportional, integral, derivative) 제어기, 옵셋 보정, 광학 추적, 우주물체 식별

Keywords: genetic algorithm, proportional, integral, derivative (PID) controller, offset compensation, optical tracking, space object identification

1. 서론

오늘날 우주 공간은 군사적·상업적 목적으로 다양한 우주물체(space objects)들이 궤도상에서 운용되고 있으며, 이에 따라 궤도상 우주물체에 대한 영역 인식(space domain awareness, SDA)의 중요성이 점차 강조되고 있다. SDA는 단순한 위치 파악을 넘어, 탐색(search), 감지(detection), 추적(tracking), 식별(identification), 목록화(cataloging), 지속 감시(monitoring)에 이르는 연속적인 정보 획득 및 분석 체계를 포함한다[1].

이러한 체계에서 지상기반 광학 시스템은 시각적 정보를 활용한 고정밀 식별 수단으로 특히 중요한 역할을 하며, 좁은 시야각(narrow field-of-view, FOV)을 갖는 고해상도 망원경은 추적 대상에 대한 세부 식별 영상 확보를 위한 최종 단계에서 사용된다. 실제로 미국의 GEODSS(ground-based electro-optical deep space surveillance) 시스템은 약 20,000마일 거리에서 농구공 크기의 물체까지 추적할 수 있는 고정밀 감시 체계로 미 우주군(Space Force)의 감시 네트워크(space surveillance network)에 핵심적으로 운용되고 있다[2]. 한국의 OWL-Net도 광학 기반 감시 체계로, 다국적 관측소 네트워크를 통해 저궤도 및 정지궤도 물체를 광학적으로 추적하고 있다[3].

본 연구에서 다루는 시스템은 신규 감지되었거나 궤도 정보가 부족한 미지 우주물체를 추적 대상으로 하며, 초기 추적은 각도 기반 IOD(initial orbit determination) 기법을 통해 수행된다. 각도 기반 IOD는 광학 관측으로 얻은 적경(right ascension, RA) 및 적위(declination) 데이터를 이용하여 초기 궤도 정보를 산출하는 방법으로, 거리 측정 없이도 궤도 복원이 가능하다는 점에서 광학 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다. 각도 기반 궤도 결정 방법에는 가우스(Gauss), 구딩(Gooding) 등의 다양한 알고리즘이 존재하며, 실제 광학 관측 데이터를 활용한 시뮬레이션에서도 안정적인 초기 궤도 복원이 가능함이 입증되었다[4].

그러나 각도 기반 IOD는 거리 정보 없이 제한된 수의 관측 데이터를 이용해 초기 궤도를 근사 추정하는 방식이기 때문에 관측 오차, 측정 간격, 궤도 역학적 불확실성 등에 따라 수렴 정확도가 제한될 수밖에 없다. 이로 인해 예측된 궤도 정보와 실제 표적 위치 간에는 불가피한 오차가 발생하게 되며, 결과적으로 관측 영상 상에서는 표적이 화면 중심에서 벗어나는 현상이 나타날 수 있다. 이를 보정하기 위해서는 관측된 화면상의 옵셋(offset) 정보를 활용하여 실시간으로 궤도 예측을 수정하는 피드백 제어 구조가 필요하다.

이전 연구에서는 옵셋 보정에 PID(proportional, integral, derivative) 제어기를 결합한 구조를 제안하고 시뮬레이션 기반의 성능 개선을 확인한 바 있다[5]. 하지만 PID 제어기의 이득 조합은 시스템의 수렴 특성이나 안정성에 영향을 줄 수 있으며, 조합 설정에 따라 원하는 성능이 달성되지 않거나 경우에 따라 발산할 수도 있기 때문에, 전체 탐색 공간 내에서 적절한 조합을 찾기 위해서는 보다 체계적인 최적화 접근이 요구된다.

본 연구에서는 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 활용하여 RMS(root mean square) 오차를 최소화하는 PID 이득의 최적 조합을 자동으로 탐색하고, 이를 기존 연구에서 사용된 수동 조합과 동일한 조건에서 비교함으로써 GA 기반 접근의 효과를 정량적으로 분석하고자

한다. GA는 생물학적 진화 메커니즘을 모방한 전역 최적화 기법으로, 기존 연구에서도 PID 튜닝 문제에 효과적으로 활용된 바 있다[6,7]. 이 논문에서는 시스템에 특화된 경량형 GA 구조를 자체 구현하여 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전체 시스템 구조 및 옵셋 기반 추적 흐름을 설명하고, 3장에서는 GA 기반 PID 이득 탐색 알고리즘의 구성과 적용 방법을 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션 조건 설정부터 성능 비교 및 결과 분석까지 전반적인 검증 과정을 다룬다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 가능성을 간단히 논의한다.

2. 시스템 구성 및 옵셋 보정 추적 구조

2.1 시스템 개요

본 연구에서 다루는 시스템은 좁은 시야각(FOV)을 갖는 고해상도 광학 망원경을 이용하여, 관측 시야 내에서 표적을 중심에 안정적으로 유지하며 고해상도 식별 영상을 확보하는 것을 목적으로 한다. 추적 대상은 사전 궤도 정보가 제한적인 미지의 우주 물체이며, 시스템 전체는 두 개의 주요 구성 요소인 탐색 망원경 시스템(search telescope system)과 식별 망원경 시스템(identification telescope system)으로 구성된다.

탐색 망원경 시스템에서는 표적의 최초 탐지 및 추적을 수행하고, 관측된 궤도상 각도 정보를 바탕으로 각도 기반 초기 궤도 결정(IOD)이 수행된다. 이때 생성된 예측 궤도 정보(predicted orbit information)는 식별 망원경 시스템으로 전달되며, 해당 시스템은 이를 기반으로 표적을 추적하며 고해상도 영상을 획득한다.

식별 망원경 시스템에서는 지속적인 영상 촬영을 통해 표적의 중심 위치를 영상에서 추출하고, 화면 중심으로부터의 오차(offset)를 계산한다. 이 옵셋 값은 FOV 평면 좌표계 기준으로 정의되며, 이를 제어 입력으로 활용하여 PID 기반의 보정 제어 루프를 구성한다. 이 제어 루프는 일정 주기로 반복되며, 옵셋 값을 줄이기 위한 보정 명령을 생성하고, 이를 통해 실제 추적 명령에 미세 조정을 가함으로써 영상 중심 유지 성능을 확보한다.

이러한 전체 흐름은 Fig. 1에 개략적으로 나타내었으며, 탐색 시스템과 식별 시스템의 협업 구조와 옵셋 보정 루프를 시각적으로 표현하고 있다.

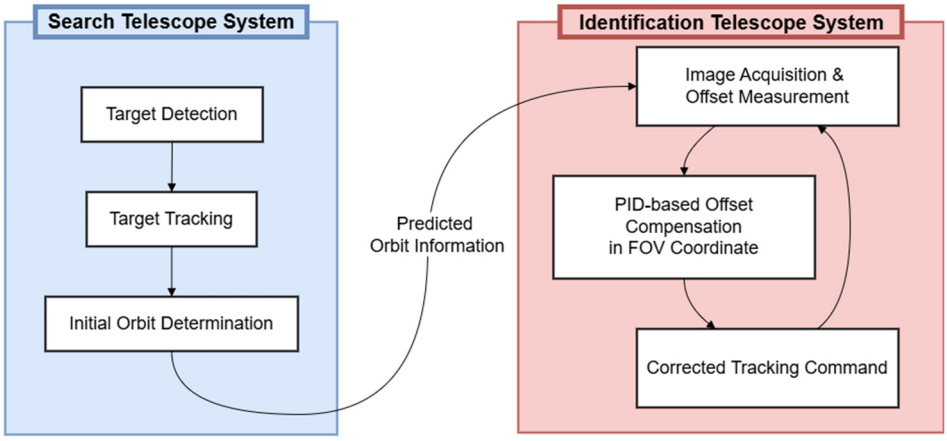

Fig. 1. System architecture and offset compensation loop.

2.2 옵셋 보정 기반 피드백 제어 구조

식별 망원경 시스템 내에서의 옵셋 보정 제어는, 영상 기반으로 추출된 중심 오차(offset)를 기준으로 FOV 평면 좌표계에서의 위치 보정을 수행하는 방식이다. 추적 과정 중 영상 내에서 측정된 표적의 중심 위치와 화면 중심 간의 차이를 옵셋 $e(t)$로 정의하며, 이 값에 대해 PID 제어기를 적용하여 보정량 $u(t)$를 계산한다. PID 제어식은 다음과 같다.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{1}$$

K_p, K_i, K_d는 각각 비례, 적분, 미분 이득 계수이며, 실제 구현 시에는 이산화된 제어기를 사용한다. 본 시스템에서는 약 5 Hz의 영상 획득 주기를 가정하고 있으며, 각 프레임마다 측정된 offset에 대해 제어 신호를 생성하여 누적 보정하는 구조로 운영된다.

이때 PID 이득 값의 조합은 추적 성능에 중요한 영향을 미치며, 수동 설정 시 성능 편차가 발생할 수 있다. 이와 관련하여 다음 장에서는 유전 알고리즘을 활용한 최적 이득 조합 탐색 기법을 제안하고자 한다.

3. 유전 알고리즘 기반 PID(Proportional, Integral, Derivative) 이득 최적화 기법

3.1 적용 배경 및 구조

유전 알고리즘은 생물학적 진화 과정을 모사한 휴리스틱 기반 전역 최적화 기법으로, 복잡한 비선형 문제나 탐색 공간이 넓은 경우에도 유용하게 활용된다. 특히, 본 연구 대상 시스템처럼 성능지표가 비선형이며, 탐색 공간 내에서의 성능 변화가 급격한 경우(비-볼록/비-선형), GA는 수치적 안정성과 전역 탐색 능력을 동시에 제공한다.

본 연구에서의 최적화 대상은 PID 제어기의 세 가지 이득 값 K_p, K_i, K_d이며, 이들의 최적 조합을 통해 중심 오차를 최소화하는 것이 목표이다. 최적화 구조는 다음과 같은 단계로 구성된다.

1. 초기 개체군 생성: K_p, K_i, K_d 조합을 랜덤하게 생성하여 초기 후보 세트를 구성
2. 적합도 평가(fitness evaluation): 각 조합에 대해 1회 또는 다회 시뮬레이션을 실행하고, 추적 성능을 평가
3. 선택(selection), 교차(crossover), 돌연변이(mutation): GA 표준 연산을 적용하여 다음 세대 개체군 생성
4. 수렴 조건 도달 시 종료: 정해진 세대 수 또는 성능 향상 정체에 따라 최종 조합 결정

3.2 성능지표 정의(Performance Index)

본 논문에서는 추적 성능을 평가하기 위한 성능지표(performance index, PI)로 전체 시뮬레이션 구간 동안의 RMS 오차만을 단일 기준으로 사용한다. 이는 옵셋 기반 추적의 평균 성능을 정량적으로 나타내는 지표로, 단위는 arcsecond이다. PI는 다음과 같이 정의된다.

$$PI = RMS\,error = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(e_i)^2} \tag{2}$$

여기서 e_i 는 i번째 프레임에서의 중심 offset이며, N은 전체 프레임 수이다.

3.3 구현 조건 및 파라미터 설정

최적화에 사용된 GA는 외부 라이브러리 없이 MATLAB 기반으로 자체 구현되었다. 개체군 초기화, 선택, 교차, 돌연변이, 적합도 평가 등 필수 기능만을 포함한 구조로 구성하여 복잡한 옵션 설정이나 GUI 기반 운용 없이 목적에 집중된 경량형 프레임워크로 구성하였다. 이를 통해 반복 실험과 성능 분석에 적합한 단순하고 효율적인 구조를 유지할 수 있었다. 주요 파라미터는 Table 1과 같다. 세팅 값은 기존 문헌[6,7]에서 일반적으로 활용되는 GA 설정 범위를 참고하였으며, 본 연구 대상 시스템에 대해 사전 실험을 통해 안정적인 수렴이 확인된 값을 사용하였다.

3.4 최적화 실행 절차

GA 기본 구조를 기반으로, 실제 PID 이득 조합 탐색을 위해 다음과 같은 구체적인 실행 절차를 적용하였다. 탐색 대상인 K_p, K_i, K_d는 설정된 범위 내에서 초기 개체군을 구성하며, 각 조합에 대해 RMS 오차를 성능 지표로 하는 시뮬레이션 기반 평가가 수행된다.

성능 평가는 10회 몬테카를로 시뮬레이션을 반복 수행한 결과로 얻어진 RMS 값들의 평균을 최종 평가 지표로 사용하였다. 이는 단일 실행 결과의 변동성을 완화하고 평가 안정성을 높이기 위한 조치로, 모든 시뮬레이션은 MATLAB 환경에서 병렬 연산 없이 순차적으로 진행되었다.

개체군 내에서 상대적으로 우수한 성능을 보인 상위 조합들은 부모로 선택되며, 이들 간의 교차(crossover) 및 돌연변이(mutation)를 통해 다음 세대의 후보군이 생성된다. 전체 세대 반복이 완료되면, 최종적으로 모든 평가된 조합 중 평균 RMS 오차가 가장 낮은 PID 이득 조합이 최적 이득 값으로 결정된다.

Table 1. Genetic algorithm setup and simulation configuration

Parameter	Setting
Search variable range	$K_p \in [0.9, 2.0], K_i \in [0.8, 2.0], K_d \in [0.00, 0.06]$
Population size	30
Maximum generations	50
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.1
Simulation method	Performance evaluation based on the average RMS over 10 Monte Carlo simulation runs

RMS, root mean square.

GA 기반 PID 이득 최적화 과정에서 각 세대별로 도출된 PID 이득(K_p, K_i, K_d)과 이에 대응하는 RMS 오차 변화를 분석하였다. Fig. 2의 상단에는 세대별 K_p, K_i, K_d 이득 값의 변화를 나타내었고, 하단에는 세대별 RMS 오차 값을 도시하였다.

세대 초반부에서는 K_p와 K_i값이 비교적 넓은 범위 내에서 변동하며 최적 조합을 탐색하는 경향이 나타났다. 특히, 초기 10세대 내에서는 K_p가 1.29-1.44 범위에서, K_i가 1.28-1.48 범위에서 변화하였다. 이에 따라 RMS 값도 약 5.86-6.00 arcsec 수준에서 소폭 등락을 반복하는 양상을 보였다. 이후 세대가 진행되면서, 특히 20세대 이후에는 K_p와 K_i가 각각 1.43 부근, 1.43-1.47 부근으로 점진적으로 수렴하는 경향을 보였으며, 이에 따라 RMS 오차도 5.7 arcsec 내외로 안정화되었다.

다만, 24, 40, 48세대 부근에서는 RMS 값이 비정상적으로 급등하는 현상이 관측되었다. 이는 선택된 PID 조합이 미세하게 달라지면서 시스템의 안정성이 급격히 악화된 경우로 해석된다. 특히 24세대에서는 RMS가 약 2,550 arcsec, 48세대에서는 약 1,179,737 arcsec까지 폭발적으로 증가하였다. 이러한 현상은 PID 이득 튜닝 과정에서 극단적인 조합에 따라 시스템이 발산할 수 있음을 보여주며, 적절한 이득 조합 선정의 중요성을 강조한다. 대상 시스템의 성능 지표 분포가 convex하지 않기 때문에, 세대별 RMS 수렴 곡선은 일관된 감소 추이를 보이지 않으며, 일부 세대에서 급격한 발산이나 진동이 관측될 수 있다. 이는 GA의 구조적 특성이라기보다는, 시스템 자체가 갖는 오차 민감성과 추적 실패 구간의 불연속성에서 비롯된 현상이라 볼 수 있다.

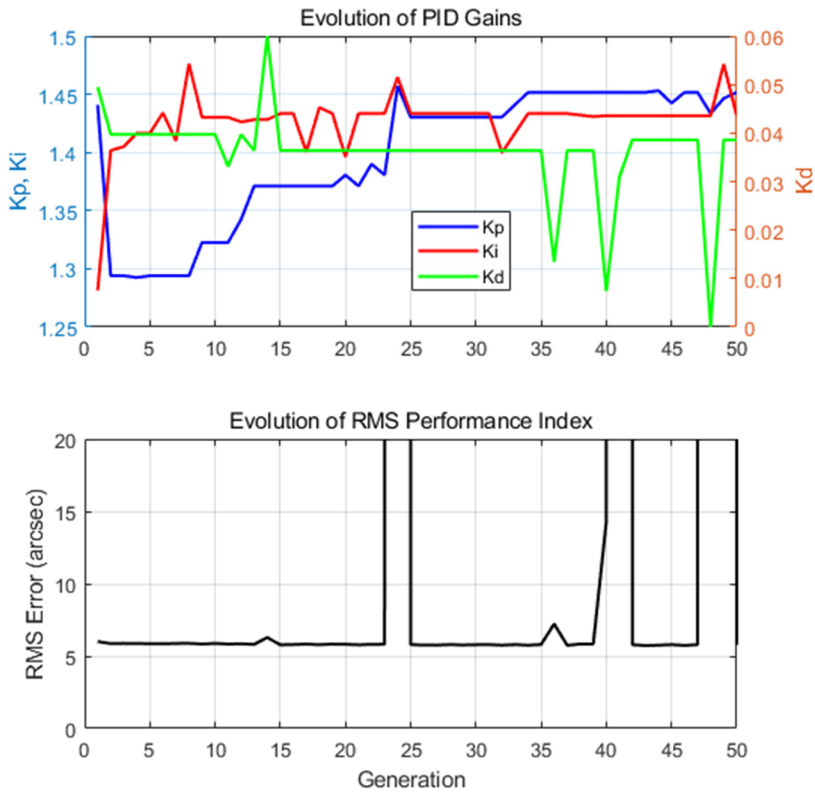

Fig. 2. Evolution of PID gains and RMS error across generations during genetic algorithm-based optimization. PID, proportional, integral, derivative; RMS, root mean square.

이와 같은 RMS 급등은 유전 알고리즘 탐색 도중 일부 발산 조합이 일시적으로 개체군 내에 포함되었기 때문에 발생한 것으로, 알고리즘의 구조상 탐색 초기나 중간 세대에서 자연스럽게 나타날 수 있는 현상이다. 실제 적용에서는 일정 임계값 이상의 RMS를 보이는 조합에 penalty를 부여하거나, 안정성 조건을 명시적으로 포함시킴으로써 해당 조합이 결과에 영향을 주지 않도록 제어할 수 있다.

결과적으로는 최종 수렴 구간에서 비교적 일관된 PID 이득 조합이 도출되었으며, 평균 RMS 오차 또한 안정적인 수준으로 유지되었다. 이 분석은 worst-case 궤적 조건을 대상으로 수행된 결과로, 초기 궤도 오차가 큰 경우에도 GA 기반 최적화가 효과적으로 수렴함을 확인할 수 있었다. 이는 전체 시스템의 최악 조건에 대한 견고한 PID 조합 도출 가능성을 시사한다.

전체 50세대의 반복 과정을 통해 GA를 이용하여 K_p= 1.3325, K_i = 1.4698, K_d = 0.0356의 PID 이득 조합을 도출할 수 있었다. 이 최적화된 이득 값은 이후 4장 시뮬레이션 단계에서 적용되어 기존 고정 조합과의 성능 비교를 통해 추적 성능 검증에 활용되었다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1 시뮬레이션 설정

사용된 궤적 데이터는 상용 소프트웨어인 STK(systems tool kit)를 기반으로 공개된 TLE(two-line element) 정보를 활용하여 생성되었다. 시나리오는 한반도 내 지상 관측소에서 실제로 관측 가능한 저궤도 위성들을 기준으로 구성하였으며, 고도 약 300, 500, 700 km 수준의 위성과 최대 고각 약 45, 60, 80도 구간에 걸친 조합을 중심으로 설정되었다.

고도가 낮을수록 위성을 관측할 수 있는 시간 구간이 짧아지고 관측 기준에서의 상대속도가 커지며, 최대 고각이 높아질수록 관측 각속도 증가 및 궤적의 비선형성이 두드러지는 특성이 있다. 이러한 조건은 광학 기반 보정 제어에 있어 높은 난이도를 유발하며, 시스템의 견고성과 반응성을 평가하기 위한 변수로 적합하다.

이러한 기준에 따라 총 11개의 궤적 시나리오를 구성하였다. 각각의 조건은 다양한 관측 환경에서 추적 제어기의 성능을 폭넓게 검증할 수 있도록 설계되었으며, 식별 망원경 시스템을 기준으로 옵셋 보정 기반 추적을 시뮬레이션하였다. 궤도 예측 정보는 STK 내의 ODTK (orbit determination tool kit)를 활용하여 생성되었고, 스트릭(streak) 영상 세 장을 얻었다는 가정을 바탕으로 초기 궤도결정을 수행한 후, 해당 결과를 추적 제어 입력으로 사용하였다.

이 중 하나의 궤적은 관측 각속도가 크고 IOD 기반 궤도 추정 오차가 상대적으로 크게 발생하는 조건을 보였으며, 추적 제어 성능이 가장 저하되는 양상을 나타냈다. 해당 시나리오는 worst case로 지정되었고, 실제 시뮬레이션에서는 IOD 오차가 특정 시점에 20도 이상까지 확대된 사례도 확인되었다. 이는 망원경의 FOV가 수 도(degree) 수준으로 제한되는 상황에서 옵셋 보정 수렴성을 위협할 수 있는 수준이다. 이러한 worst-case 조건을 기준으로, 제안한 GA 기반 PID 이득 최적화 기법의 견고성과 추적 성능을 집중적으로 평가하였다.

4.2 Worst Case에 대한 추적 성능 비교

본 절에서는 worst case 궤적 조건을 대상으로, 기존에 fixed-grid를 기반으로 선정된 PID 이득 조합과 이번 연구에서 GA 최적화를 통해 새롭게 도출한 PID 이득 조합을 각각 적용하여

추적 성능을 비교하였다.

기존 연구에서는 수작업 기반의 고정된 PID 조합(K_p= 1.24, K_i = 1.56, K_d = 0.03)이 사용되었으며, 이는 일정 범위 내에서 가능한 모든 PID 이득 조합에 대해 시뮬레이션을 수행한 후, RMS 오차를 성능지표(PI)로 활용하여 선정한 결과이다. 단순히 최소 RMS 오차를 보이는 조합만을 채택한 것은 아니며, 일부 조합은 국소적으로 매우 작은 RMS 값을 보이더라도 인접 영역에서 성능이 급격히 악화되거나 발산하는 현상이 확인되었기 때문에, 실제 선정 과정에서는 낮은 RMS 오차를 유지하면서도 주변 이득 값 변화에 대해 민감하지 않은 조합을 기준으로 삼았다.

이와 대비하여 본 연구에서는 GA 기반 최적화 기법을 적용하여 보다 체계적으로 이득 조합을 탐색하였다. 초기 개체군에서 시작하여 세대별 선택, 교차, 돌연변이 과정을 반복하면서 점차 우수한 성능을 보이는 이득 조합으로 진화하였으며, 최종적으로 도출된 최적 조합(K_p = 1.3325, K_i = 1.4698, K_d = 0.0356)은 RMS 오차 기준에서 가장 안정적인 성능을 보였다. 그리고 GA 기반 접근은 이득 값을 소수점 네 자리 수준까지 정밀하게 탐색함으로써, 기존보다 더 세밀한 성능 향상이 가능함을 기대할 수 있었다.

시뮬레이션 결과를 Azimuth 및 Elevation 각각에 대해 시간축에 따른 offset 보정 오차를 Fig. 3에 도시하였다. 그래프에서는 기존 PID 조합 결과를 파란색(blue) 선으로, 이번 GA 기반 최적화 PID 조합 결과를 초록색(green) 선으로 구분하여 표시하였다. Azimuth, Elevation 두 축 모두 20 arcsec 이내의 오차를 보였지만, GA 기반 조합이 전체 시계열 구간 동안 보다 중심에 가깝게 수렴하는 경향을 나타냈다.

추가로, FOV 기준 좌표계 상에서 Azimuth 및 Elevation 방향의 보정 오차 분포를 Fig. 4에 시각화하였다. X축은 Azimuth, Y축은 Elevation으로 시간에 따른 각 오차 값을 누적하여 분포를 도시하였다. 이 결과를 통해 화면 중심(0, 0)으로부터 얼마나 벗어났는지를 직관적으로 확인할 수 있다. Fig. 4. 역시 기존 고정 PID 조합 결과를 파란색 선으로, GA 최적화 PID 조합 결과를 초록색 선으로 구분하여 표시하였다.

전체 분포를 살펴보면, 두 방법 모두 대체로 화면 중앙에서 크게 벗어나지 않는 경향을 보이나, GA-최적화 PID 조합은 중심 주변에 더욱 밀집된 분포를 형성하고 있으며, 오차 범위 또한 전반적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4.3 다양한 궤적 조건에 대한 성능 비교

기존 연구[5]에서 정의한 11개의 다양한 궤적 시나리오를 대상으로, GA 기반으로 최적화된 PID 이득 조합을 적용하여 추적 성능을 평가하였다. 각 궤적에 대해 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 실험에서 산출된 RMS 오차의 평균값을 기준으로 비교 분석을 진행하였다. 이 반복 횟수는 측정 잡음의 영향을 고려한 통계적 신뢰도 확보를 위한 조치로 탐색 단계에서 사용된 10회 반복과는 구분된다.

비교는 다음과 같은 세 가지 조건을 기준으로 수행되었다.

1) 옵셋 값을 그대로 IOD 기반 예측 궤도에 적용시킨 경우
2) 기존 연구에서 Fixed-Grid 기반으로 선정한 고정 PID 이득 조합을 적용한 경우
3) 본 연구에서 GA 최적화를 통해 도출된 PID 이득 조합을 적용한 경우

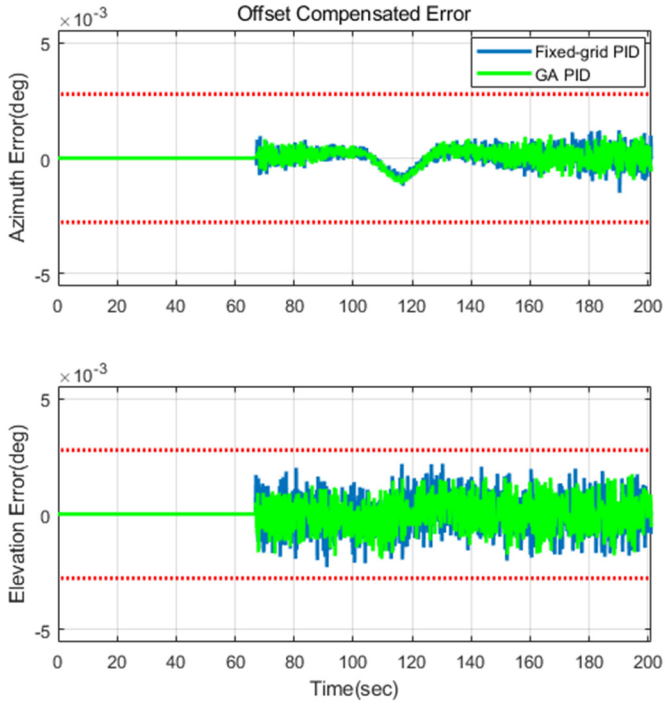

Fig. 3. Comparison of offset compensation error over time. PID, proportional, integral, derivative; GA, genetic algorithm.

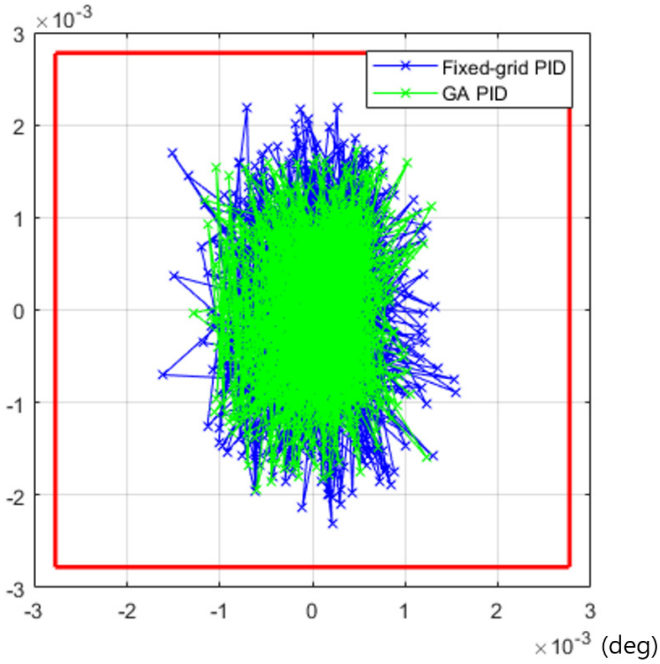

Fig. 4. Scatter plot of offset compensation errors in FOV (deg). PID, proportional, integral, derivative; GA, genetic algorithm; FOV, narrow field-of-view.

Table 2는 각 조건별로 획득된 RMS 오차를 정리한 결과를 나타낸다.

옵셋 값을 바로 보정한 경우에는 궤적 특성에 따라 RMS 오차가 크게 변동함을 볼 수 있다. 특히 궤적 10번과 11번과 같은 가혹 조건에서는 각각 64.85 arcsec, 301.24 arcsec에 달하는

Table 2. RMS error comparison across trajectories

Trajectory	RMS error (arcssec)		
	Offset compensation	Fixed-grid selected PID	GA-optimized PID
1	3.7048	4.2812	3.7053
2	20.6504	4.2973	3.7056
3	2.0109	4.2188	3.6369
4	10.9026	4.2840	3.6912
5	2.2754	4.2956	3.6976
6	3.2861	4.3279	3.7104
7	4.4383	4.2934	3.6967
8	4.2426	4.3088	3.7204
9	14.7516	4.3257	3.7232
10	64.8537	4.408	3.8532
11	301.2429	5.9209	5.7744

RMS, root mean square; PID, proportional, integral, derivative; GA, genetic algorithm.

매우 큰 오차가 발생하였다.

기존 Fixed-Grid 기반 PID 이득 조합을 적용한 경우, 모든 궤적에서 옵셋 보정 대비 RMS 오차가 대폭 감소하였다. 평균적으로 약 4 arcsec대 RMS 오차를 기록했으나, 특정 궤적에서는 여전히 미세한 성능 편차가 관찰되었다.

GA 기반 최적화 PID 조합을 적용한 결과는 모든 궤적에서 기존 Fixed-Grid 방법 대비 추가적인 성능 향상이 확인되었다. 특히, 가혹조건으로 분류할 수 있는 2, 4, 9, 10, 11번 궤적에서도 RMS 오차가 더욱 낮은 값으로 수렴하는 경향을 보였다.

GA-PID 조합은 기존 방법 대비 약 10% 내외의 추가 성능 개선을 확인할 수 있었고, worst-case 조건에서도 일관된 안정성을 유지하는 결과를 얻었다. 이는 GA 기반 접근법이 PID 이득 조합을 세밀하게 최적화함으로써, 전 영역에 걸쳐 강건한 추적 성능을 달성할 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있겠다.

5. 결론

본 논문에서는 광학 기반 우주 물체 추적 시스템에서 적용 가능한 PID 제어기의 이득 조합을 유전 알고리즘(GA)을 활용해 체계적으로 최적화하는 방안을 검토하였다.

기존에는 fixed-grid 방식으로 가능한 모든 조합에 대해 전수 시뮬레이션을 수행하고, 수작업 기반으로 발산 구간을 배제하며 조합을 선정해왔으나, 이러한 방식은 탐색 효율이 낮고 계산량이 과도하게 증가하는 한계가 있었다. 이에 따라 이번 연구에서는 GA 기반 탐색 구조를 적용하고, RMS 오차를 성능 지표로 설정하여 안정성과 추적 정밀도를 함께 고려한 최적 이득 조합을 도출하였다.

도출된 결과는 worst-case 조건을 포함한 다양한 궤적 시나리오에서 기존 고정 조합 대비 우수하거나 유사한 성능을 보였으며, 특히 시간에 따른 offset 수렴 속도와 평균 RMS 오차

관점에서 일관된 개선 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 복잡한 최적화 공간을 가지는 광학 기반 제어 문제에서도 GA와 같은 전역 탐색 기법이 반복적 수작업에 의존하던 기존 PID 이득 조합 방식에서 벗어나 알고리즘 기반 자동 탐색을 통해 실용성과 안정성을 동시에 확보할 수 있음을 보여준다.

향후에는 오차 응답 특성을 정량적으로 반영한 성능 지표 구조를 개선하거나, 운용 환경 변화에 따라 보정 이득을 실시간으로 조정할 수 있는 적응형 구조로 확장하는 방향도 고려할 수 있다. 이러한 접근은 옵셋 기반 추적 보정 로직의 적용 유연성과 실시간 대응성을 한층 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문에 대하여 중요한 지적과 코멘트를 하여 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

1. Katalyst Space, Space domain awareness (SDA) (2023) [Internet], viewed 2025 Apr 28, available from: https://www.katalystspace.com/space-domain-awareness
2. U.S. Space Force, Ground-based electro-optical deep space surveillance, Fact Sheets (2020) [Internet], viewed 2025 Apr 28, available from: https://www.spaceforce.mil/about-us/fact-sheets/article/2197760/ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance/
3. Hwang H, Park SY, Lee E, Angles-only initial orbit determination of low Earth orbit (LEO) satellites using real observational data, J. Astron. Space Sci. 36, 187-197 (2019). https://doi.org/10.5140/JASS.2019.36.3.187
4. Olmedo E, Sánchez-Ortiz N, Lerate MR, Belló-Mora M, Klinkrad H, et al., Initial orbit determination algorithms for cataloguing optical measurements of space debris, Mon. Not. R. Astron. Soc. 391, 1259-1272 (2008). https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13940.x
5. Hyun C, Kim D, Kim H, Park S, Improving optical tracking performance for space objects using PID-based offset compensation, J. Korean Inst. Intell. Comput. Eng. 28, 927-934 (2024). https://doi.org/10.6109/jkiice.2024.28.8.927
6. Cho BS, Han SH, Son SH, Kim JS, Park KB, et al., A modified genetic algorithm using SVM for PID gain optimization, in Control, Robotics and Systems Society: Conference Proceedings, Bangkok, Thailand, 25-27 Aug 2004.
7. Aboura F, Tuning PID controller using hybrid genetic algorithm particle swarm optimization method for AVR system, in Proceedings of the 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Istanbul, Turkey, 1-4 Sep 2019.

Author Information

현 철 chul.hyun@gmail.com

2011년 서울대학교에서 전기컴퓨터공학부 공학박사 학위를 취득한 후, 2011년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석, 딥러닝을 활용한 수중운동체 및 항법, 우주 물체 추적 및 감시 관련 연구를 수행하고 있다.

김 동 건 donggeon.kim@lignex1.com

2016년 중앙대학교에서 기계공학부 공학박사 학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 광학, 적외선, 열전달 관련 모델링/시뮬레이션을 통한 전자광학감시장비 효과도 분석을 수행 중이며, Generative AI를 적용한 감시체계 성능 분석 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

김 현 승 hyunseung.kim2@lignex1.com

2016년 인하대학교에서 항공우주공학과 제어 및 유도 전공으로 석사학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 선임연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석을 수행 중이며, 딥러닝을 활용한 제어기 설계 관련 연구를 하고 있다.

박 승 욱 seungwook.park@lignex1.com

2007년 고려대학교 전기전자전파공학부에서 학사 학위를 취득한 후, 2007년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 감시 · 정찰용 EO/IR 센서 연구개발을 중심으로, 장거리 감시 시스템 및 고해상도 광학시스템의 설계와 성능 개선을 수행해왔다. 대구경 망원경 개발을 비롯한 정밀 광학 시스템 최적화 및 운용 기술연구에 참여하고 있다.