

# 기동형 표적의 회피기동 패턴 기반 예측 보정 유도 알고리즘 설계 및 검증

Design and Verification of a Prediction-Corrected Guidance Algorithm Based on Evasive Maneuver Patterns of Maneuvering Targets

김현승<sup>\*1)</sup> · 장재덕<sup>1)</sup> · 현 철<sup>1)</sup> · 고진용<sup>1)</sup>

Hyunseung Kim<sup>\*1)</sup> · Jaedeok Jang<sup>1)</sup> · Chul Hyun<sup>1)</sup> · Jinyong Go<sup>1)</sup>

## [ 초 록 ]

최근 미사일 요격체계의 정밀도 향상에 대응하기 위해 기동형 표적은 반복적 방향 전환을 포함한 회피기동을 통해 기존의 비례항법 기반 유도 알고리즘에 큰 예측 오차를 유발한다. 이에 따라 본 논문에서는 기동형 표적의 회피기동 특성을 실시간으로 분석하고, 이를 기반으로 향후 기동 방향을 예측하여 유도 명령에 보정항으로 반영하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 유도 방식 대비 높은 요격 정확도를 보임을 확인하였고, 유도무기 체계의 대응 능력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## [ ABSTRACT ]

To counter the increased precision of modern missile interception systems, maneuvering targets employ evasive maneuvers characterized by repetitive directional changes, which induce significant prediction errors in conventional Proportional Navigation(PN) guidance algorithms. This study proposes a real-time guidance correction method that analyzes evasive maneuver patterns and predicts the target's future heading to generate compensation terms for the PN guidance law. Simulation results demonstrate that the proposed method improves interception accuracy compared to conventional PN guidance and is expected to enhance the overall responsiveness of missile guidance systems against highly maneuverable targets.

**Key Words** : Maneuvering Target(기동형 표적), Evasive Maneuver(회피기동), Proportional Navigation(비례항법), Prediction-Corrected Guidance(예측 보정 유도), Interception Accuracy(요격 정확도)

## 1. 서 론

최근 미사일 요격 시스템의 성능이 고도화 되면서, 표적이 회피기동을 통해 요격 확률을 낮추려는 전략이 활발히 사용되고 있다. 특히, 순항 미사일과 같은 기동형 표적은 요격체 접근에 따라 의도적인 방향 변경 또는 불규칙 패턴의 회피기동을 수행함으로써 유도탄의 예측 정확도를 저하시킬 수 있다. 이에 따라 기존의 유도 알고리즘만으로는 기동형 표적에 대한 정확하고 효과적인 요격이 어려워지고 있는 실정이다.

기존 유도체계에서는 대부분 비례항법(Proportional Navigation, PN)이나 비례항법 보강 방식(Augmented PN)을 적용하고 있으며, 이는 표적이 직선 등속운동을 한다는 가정 하에 설계되어 있다. 이러한 방식은 계산이 간단하기 때문에 실시간 운용이 가능하다는 장점이 있지만, 실제 표적의 궤적이 비선형이거나 급격한 방향 변경을 수반할 경우에는 유도 오차가 누적되면서 요격 성공률이 급감하게 된다. 기동형 표적이 수행하는 회피기동은 대부분 반복적인 방향 전환을 포함하는 지그재그, barrel roll, S턴 기동의 패턴으로 나타난다. 이는 표적의 의도적인 궤적 변경을 통해 요격기의 유도 예측을 무력화하고, 추진력을 소모시킴으로써 교란을 발생시키는 것이다.

따라서 이러한 회피기동 패턴을 사전에 인식하고, 표적의 향후 방향을 예측하는 기능이 유도 시스템에 내장된다면 보다 정확한 궤적 추종 및 요격에 활용될 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 기동형 표적의 회피 패턴을 실시간으로 분석하고, 이를 기반으로 향후 이동 방향을 예측하여 유도 명령을 보정하

1) LIG넥스원 해양연구소.2팀

(Maritime R&D Center, LIG Nex1, Korea)

\*Corresponding author, E-mail: hyunseung.kim2@lignex1.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : August 28, 2025 Revised : September 29, 2025

Accepted : September 30, 2025

는 알고리즘을 설계하였다. 제안하는 알고리즘은 계산량을 최소화하기 위해 단순 패턴 기반으로 구성되며, 회피기동의 방향 변화 특성을 추출하여 다음 기동 방향을 추정하는 방식을 이용하였다. 이후 기존 PN 유도 명령에 예측 결과를 보정항 형태로 반영함으로써, 표적의 비선형 기동에 대응 가능하도록 설계하였다.

## 2. 관련 연구

유도탄의 명령 생성에 가장 널리 사용되는 방식은 비례항법(Proportional Navigation, PN)으로, 요격기와 표적 간의 시선각 속도(LOS rate)를 기반으로 가속도 명령을 산출한다. PN은 구조가 단순하여 실시간 구현이 용이하지만, 표적이 직선 등속 운동을 한다는 가정을 전제로 설계되었다는 한계가 있다. 실제 교전에서는 표적이 요격기의 접근을 감지하여 급격한 회피기동을 개시하는 경우가 빈번하며, 이로 인해 시선각의 변화율이 비선형적으로 변화하여 유도 오차가 증가한다. 또한 PN 기반 유도법칙은 현재의 표적 위치·속도 정보에만 의존하기 때문에 표적의 회피 기동을 사전에 식별·예측하지 못해 예측 실패로 이어질 가능성이 크다. 결과적으로 PN 계열 방법은 동적인 전장 환경에 대한 적응력이 부족하다.

이러한 한계들은 지능화되는 표적에 대응하기 위해 유도 시스템이 상황 인지 및 예측 기반의 유도 보정 능력을 가져야 함을 시사한다. 특히 표적이 일정 주기성을 갖는 패턴 기반의 회피기동을 수행하는 경우, 최소한 그 방향성 정도는 실시간으로 추정하여 유도에 반영해야 한다는 것이다. 이러한 필요성에 따라 유도 알고리즘 개선에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 먼저 강화학습을 활용하여 환경 적응형 유도기를 설계하는 연구가 있다[1-3]. 대표적으로 PPO(Proximal Policy Optimization)나 DQN(Deep Q-Network) 알고리즘을 활용해서 요격 성공률을 최대화하도록 보상함수를 구성하는 방식이 있고, 이들은 복잡한 회피 기동에 대해 높은 적응력을 보이지만 실시간 구현 측면에서는 계산 부하가 크다는 한계가 있다. 다음으로는 표적의 미래 궤적을 예측하여 이를 반영한 유도기법을 설계하는 연구가 있다[4-5]. 확장 칼만필터(EKF), MPC(Model Predictive Control)의 기법이 주로 적용되어 보다 정확한 예측이 가능하지만, 사전에 표적의 정확한 기동모델이나 잡음 모델을 알고 있어야한다는 단점이 있다.

다양한 예측 모델과 보정 유도기가 연구되었지만, 대부분 위치 기반의 회피 패턴 예측 방식을 사용하여 계산 구조가 복잡하고, 외부 정보에 대한 의존도가 높다는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 회피기동의 패턴성에 기반한 경량 예측 알고리즘이 제안되었다[6]. 이 방식은 표적의 방향 변화율이나 궤적의 곡률 등을 실시간으로 추정하여 일정 규칙성이 관측될 경우 회피기동으로 간주하여 유도 명령을 조정하는 방식이다. 이러한 접근은 실제 무기시스템에 탑재 가능성이 높은 구조로 평가되고 있다.

이에 따라 본 연구는 단순한 방향 예측 기반으로 회피기동의 방향 패턴을 실시간으로 감지하고, 기존 PN 유도기의 약점을 보완하는 경량 통합 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 연

산량이 적고 구조가 단순하기 때문에 회피기동 표적에 대한 대응능력을 실시간으로 향상시킬 수 있다. 또한 보정 가중치 설정을 통해 안정적인 성능을 확보할 수 있다.

## 3. 회피기동 예측 알고리즘 설계

회피기동을 수행하는 표적은 일반적으로 단순 직선운동에서 벗어나 반복적이고 비선형적인 방향 변화를 보인다[7]. 특히 지그재그, barrel roll, S턴은 방향 전환이 규칙적으로 반복되고, 특정 주기를 가지는 특징이 있어 이를 실시간으로 감지하여 예측하는 알고리즘 설계가 가능하다. 알고리즘 설계를 위해 회피기동의 주요 특성을 분석하고, 실시간 방향 변화율을 기반으로 회피 패턴을 감지하여 향후 이동 방향을 예측하는 경량 알고리즘을 기술하였다.

### 3.1 회피기동 특성 분석

표적이 회피기동을 수행할 때, 대부분 시간 또는 거리 기준으로 방향을 반복 전환하는 구조를 가진다. 표적의 위치 벡터  $\vec{p}_t$ 는 시간 간격  $\Delta t$ 마다 업데이트되며, 각 시점에서의 이동 방향 벡터는 수식 1과 같이 계산할 수 있고, 이동 방향 각도는 수식 2와 같다.

$$\vec{v}_t(t) = \frac{\vec{p}_t(t) - \vec{p}_t(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{v_{t,y}(t)}{v_{t,x}(t)} \right) \quad (2)$$

이 때, 방향 벡터  $\theta$ 의 변화율을 추적하면 회피 패턴의 존재 여부를 감지할 수 있고 이는 수식 3과 같다. 회피 기동이 존재하면 수식 4와 같이  $\Delta\theta$ 의 부호가 반복적으로 바뀐다.

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta(t-1) \quad (3)$$

$$\text{sign}(\Delta\theta(t)) \cdot \text{sign}(\Delta\theta(t-1)) < 0 \quad (4)$$

일정 시간 간격 내에 방향 변화율의 부호가 2회 이상 바뀐다면 회피기동이 존재하는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 예측 방향 벡터 산출

회피 기동 패턴이 감지되는 경우, 가장 최근의 이동 방향 벡터 2개를 이용하여 다음 이동 방향을 예측할 수 있고, 수식 5와 같다. 이로부터 예측 벡터는 수식 6, 7을 통해 계산할 수 있다. 여기서  $v_t$ 는 표적의 속력이며 등속이라고 가정한다.

$$\Delta\theta_{avg} = \frac{\theta(t) - \theta(t-1)}{2} \quad (5)$$

$$\theta_{pred} = \theta(t) + \Delta\theta_{avg} \quad (6)$$

$$\vec{v}_{pred} = v_t \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{pred} \\ \sin \theta_{pred} \end{bmatrix} \quad (7)$$

예측한 속도 벡터는 향후 일정 시간 구간 동안 표적이 이동할 방향으로 간주하여, 이 방향을 기준으로 유도 명령을 조정한다.

### 3.3 예측 신뢰도 기반 적용 조건

예측 알고리즘은 Table 1의 두 가지 조건을 만족할 때만 유도 시스템에 적용하도록 가정하였다. 이 조건이 만족되지 않으면 예측은 수행되더라도 유도 명령에는 반영되지 않으며, 기본적인 PN 명령만 유지된다. 이러한 조건을 추가하는 이유는 오탐으로 인한 불필요한 조작을 방지하기 위한 보완 설계이다.

표 1. 예측 알고리즘 유지 조건

Table 1. The Condition for Maintaining the Prediction Algorithm

| 조건                          | 설명                                     |
|-----------------------------|--|
| 회피 패턴 신호가 충분히 감지된 경우        | 부호 변화 2회 이상<br>각도 변화 $\geq$ 임계값        |
| 예측 각도가 직전 방향과 일정 이상 차이나는 경우 | $ \theta_{pred} - \theta(t)  \geq$ 임계값 |

## 4. 예측 기반 유도 명령 보정

본 장에서는 앞서 제안한 회피기동 방향 예측 알고리즘을 기존의 PN 유도기와 통합하는 구조를 설명하고, 수식을 정립한다. 제안하는 구조는 기존의 유도기 구조를 유지하면서도 예측 정보를 보조 정보로 활용함으로써 기동형 표적에 대한 적응성과 정밀도를 향상시키는 것을 목표로 한다. 전체 흐름은 Fig. 1에 도시한 바와 같다.

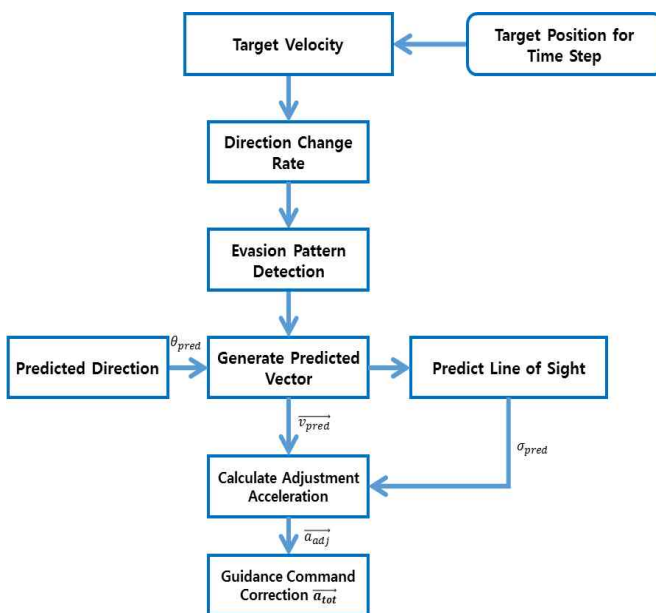


그림 1. 예측 기반 유도 명령 보정 흐름도

Fig. 1. Flowchart of Guidance Command Adjustment based on Predicted Direction

먼저 비례항법은 수식 8과 같이 정의되며, 이 구조는 시선각 변화율만을 고려하므로, 표적의 미래 기동 의도를 반영하지 못한다는 근본적인 한계를 가진다. 여기서 항법 상수  $N$ 은 유도 탄에 적용되는 3.0 값을 고정으로 하였고,  $V_c$ 는 표적이 요격체에 접근하는 속도이다.  $\dot{\sigma}$ 은 시선각속도로 수식 9와 같다.  $\hat{n}$ 은 시선각에 수직인 단위 벡터로 수식 10, 11과 같이 산출할 수 있다. 여기서  $\vec{p}_t$ 는 표적 위치,  $\vec{p}_c$ 는 요격체의 위치를 의미한다.

$$\vec{a}_{PN} = NV_c \dot{\sigma} \hat{n} \quad (8)$$

$$\dot{\sigma} = \vec{r} \times \vec{v}_{rel} \quad (9)$$

$$\hat{n} = \frac{1}{\|\vec{r}\|} \cdot \begin{bmatrix} -r_y \\ r_x \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} = \vec{p}_t - \vec{p}_c \quad (11)$$

표적이 회피기동을 수행하고 있는 상황을 감지한 경우, 기존 유도 명령을 보완하기 위한 예측 기반 보정 항  $\vec{a}_{adj}$ 을 수식 12와 같이 정립하였다. 여기서 시선각속도는 수식 13, 시선각 수직 단위 벡터는 수식 14와 15를 통해 산출할 수 있다.

$$\vec{a}_{adj} = NV_c \sigma_{pred} \hat{n}_{pred} \quad (12)$$

$$\sigma_{pred} = \frac{\vec{r}_{pred} \times \vec{v}_{pred}}{\|\vec{r}_{pred}\|^2} \quad (13)$$

$$\hat{n}_{pred} = \frac{1}{\|\vec{r}_{pred}\|} \cdot \begin{bmatrix} -r_{y,pred} \\ r_{x,pred} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\vec{r}_{pred} = \vec{p}_t + \vec{v}_{pred} \Delta t - \vec{p}_c \quad (15)$$

이로부터 최종적으로 보정된 유도 명령은 기존의 PN 명령과 예측 기반 보정 명령을 가중 평균으로 통합하여 수식 16과 같이 생성할 수 있다. 여기서 보정 가중치  $\alpha$ 는 회피기동이 명확히 감지된 경우 높은 값을 가지도록 설정하며, 일반적으로 0.2~0.5 수준으로 설정해야 안정적인 성능 향상이 가능하다.

$$\vec{a}_{tot} = (1 - \alpha) \vec{a}_{PN} + \alpha \vec{a}_{adj} \quad (16)$$

이 방식은 기존 유도기 내부 구조를 크게 변경하지 않고도 회피기동에 대한 예측 정보를 통합할 수 있는 유연한 구조를

가지며, 보정항 크기를 조정함으로써 시스템 응답 특성을 미세 조정할 수 있다.

## 5. 시뮬레이션 및 결과 분석

제안한 회피기동 예측 기반 유도 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하기 위해, 다양한 표적 기동 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석한다. 비교 대상은 기존 비례항법 유도 알고리즘과 제안하는 알고리즘이며, 시뮬레이션을 위한 설정은 Table 2에 기술한 바와 같다.

표 2. 시나리오 입력 변수 정의

Table 2. Scenario Input Parameter Definition

| 항목         | 값                  | 단위    |
|------------|--------------------|-------|
| 시뮬레이션 시간   | 10                 | sec   |
| 시간 간격      | 0.1                | sec   |
| 표적 초기 위치   | [0 0]              | m     |
| 요격체 초기 위치  | [1000 -2000]       | m     |
| 표적 속도      | 250                | m/s   |
| 요격체 속도     | 350                | m/s   |
| 표적 회피기동 유형 | zigzag for 90      | deg   |
|            | barrel roll for 30 | deg/s |
|            | s-turn for 20      | deg   |
| 유도 알고리즘    | 1) PN              | -     |
|            | 2) 제안 예측 보정 유도     | -     |

시나리오 분석 지표는 Table 3과 같이 동일한 초기 조건에서 각 방식의 요격 성공률, 궤적 오차, 총 기동량을 분석 지표로 비교한다. 이 때, 총 기동량이 증가할수록 추진제 소모가 증가하므로 군사적 효과가 감소하지만, 본 연구에서 설정한 시나리오 상에서는 최종 요격까지 추진제가 충분하다는 가정을 하였다.

표 3. 성능 분석 지표

Table 3. Scenario Input Parameter Definition

| 지표               | 설명                       |
|------------------|--------------------------|
| 최종 요격 오차         | 최종 시점에서 요격체와 표적 간 거리     |
| 요격 성공 여부         | 오차가 10m 이하인 경우 성공        |
| 총 기동량            | 요격체의 가속도 총 변화량           |
| 예측 알고리즘 적용 시간 비율 | 전체 비행 중 예측 알고리즘이 활성화된 비율 |

Fig. 2는 표적이 진북 기준 90도 방향으로 3초의 주기로 지그재그 기동을 수행함에 있어, 요격체가 현재 시점 기준의 PN으로 유도기법이 적용된 경우와 0.5초 후의 예측된 지점으로 보정 유도 기법을 적용한 경우에 대한 궤적을 비교하여 가시화한 것이다. Fig. 3은 표적이 반시계 방향으로 초 당 선회율 30도로 barrel roll 기동을 수행할 때의 궤적, Fig. 4는 표적이

진행 방향으로 20도의 각도로 s turn 기동을 수행하는 경우에 대한 궤적을 비교하여 가시화한 것이다.

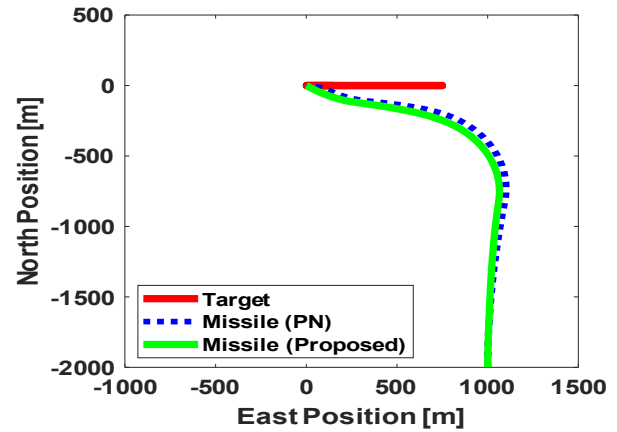


그림 2. 지그재그 기동 시나리오에 대한 유도 결과  
Fig. 2. Guidance Result for Zig-Zag Maneuver Scenario

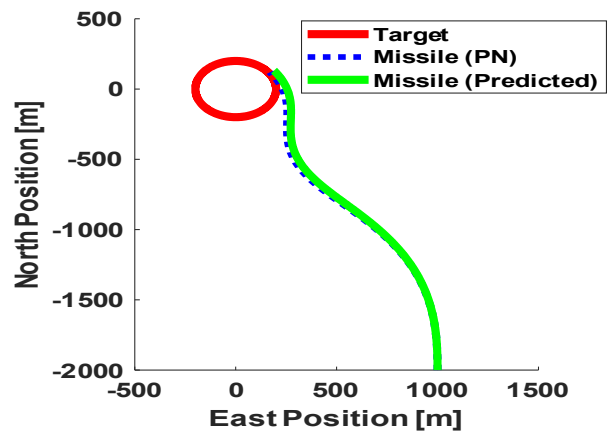


그림 3. Barrel Roll 기동 시나리오에 대한 유도 결과  
Fig. 3. Guidance Result for Barrel Roll Maneuver Scenario

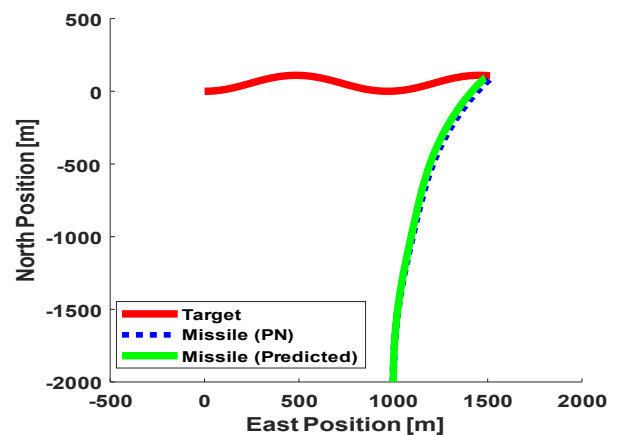


그림 4. S-turn 기동 시나리오에 대한 유도 결과  
Fig. 4. Guidance Result for S-Turn Maneuver Scenario

Table. 4는 Table. 3의 분석 지표에 대하여 표적 기동 3가지 시나리오에 대한 결과를 기술한 것이다. 표적이 동서 방향으로 지그재그 기동하는 경우 본 논문에서 제시하는 예측 알고리즘이 유지되는 조건을 만족하기 위해서는 2번 주기 이상 지그재그 기동이 나타났을 때, 예측 알고리즘을 적용하여 유도 명령을 보정하기 때문에 전체 비행 중 활성화 비율이 약 15%로 요격체 발사 이후 종말단계에서 이루어짐을 확인하였다. 또한, 단순히 좌우 구간에 대한 예측이 이루어지기 때문에 예측 지점에 대한 정확도가 높아지므로 최종 요격 오차와 요격체의 총 기동량이 감소함을 볼 수 있다. 두 번째로 표적이 barrel roll 기동을 하는 경우 선회를 시작하고 사분원을 지나는 시점부터 예측 알고리즘이 수행되기 때문에 약 67%의 비율로 적용됨을 볼 수 있다. 이 경우 선회경 상에서의 지점을 예측하므로 요격체의 총 기동량은 클 수 밖에 없고, 최종 요격 오차는 PN 유도법칙을 적용한 경우와 제안하는 기법을 적용한 경우 유사함을 확인하였다. 마지막으로 s턴 하는 표적의 경우 지그재그 기동과 유사하게 예측 알고리즘을 적용하는 경우에 대해 최종 요격 오차가 약 15% 감소하고, 총 기동량 또한 감소하지만 각도 변화가 빠르게 이루어짐으로 예측 알고리즘 적용 시간 비율이 약 61%로 높다.

표 4. 표적 기동 시나리오에 따른 분석 결과

Table 4. Analysis Result for Target Maneuver Scenario

| 시나리오        |          | 최종 요격 오차 [m] | 총 기동량 [m/s] | 예측 알고리즘 적용 시간 비율 [%] |
|-------------|----------|--------------|-------------|----------------------|
| Zigzag      | PN       | 7.97         | 913.37      | -                    |
|             | Proposed | 5.38         | 838.84      | 15.03                |
| Barrel Roll | PN       | 6.21         | 1209.53     | -                    |
|             | Proposed | 6.17         | 1230.67     | 67.51                |
| S Turn      | PN       | 8.23         | 344.2       | -                    |
|             | Proposed | 6.97         | 323.05      | 61.34                |

## 6. 국방 적용성 및 향후 개선 방향

본 연구에서 제안한 기동형 표적 회피 패턴 예측 기반 유도 알고리즘은 기존의 유도기법의 한계를 보완하고자 하였다. 특히 반복적이고 비선형적인 회피기동을 수행하는 표적의 궤적을 실시간으로 분석하여 향후 이동 방향을 예측하여 요격체의 궤적 추종 능력을 향상시켰고, 기존 PN 유도 명령에 예측 보정항을 가중치 형태로 추가하는 방식으로 설계되어, 현재 운용 중인 유도체계에 손쉽게 통합할 수 있다는 장점이 있다.

다만 본 연구를 토대로 알고리즘의 성능과 적용 범위를 확장하는 연구가 필요하다. 먼저, 현재 적용된 예측 알고리즘은 단순 회피기동 패턴에 국한되어 있어, 실제 전장 환경에서 나타나는 불규칙적이고 복잡한 표적 기동을 완벽히 반영하지 못한다. 이를 개선하기 위해서 딥러닝 기반 패턴 인식을 통한 복합 회피기동 예측 성능 향상이 요구된다. 다음으로 실제 공중전 상황에서는 고도 변화와 3차원 기동이 필수적이므로, 2차원에서 3차원으로의 공간 확장을 통한 알고리즘 실용성이 확보되어야 한다. 마지막으로 요격체의 기동량을 최소화하면서도 요

격 성공률을 극대화하기 위한 추진체 소모를 고려한 최적 제어 문제를 고려함으로써 사거리 연장 및 생존성 향상에 대한 연구가 함께 진행되어야 할 것이다.

## 7. 결 론

실제 교전 상황에 있어서 고도화된 미사일 요격 시스템 성능에 대응하기 위해 표적이 요격 확률을 낮추려는 회피기동 전략이 활발히 사용되고 있다. 이에 따라 기존의 유도 알고리즘만으로는 기동형 표적에 대한 정확하고 효과적인 요격이 어려워지고 있는 실정이다. 이러한 회피기동 패턴을 사전에 인식하고, 표적의 향후 방향을 예측하여 유도기법을 보정하는 것은 정확한 궤적 추종 및 요격에 필요한 연구이다.

이에 따라 본 논문에서는 기동형 표적이 수행하는 반복적이고 비선형적인 회피기동 패턴을 실시간으로 분석하고, 이를 기반으로 향후 방향 벡터를 예측하여 기존 PN 유도 명령에 보정항 형태로 반영하는 새로운 유도 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘은 단순한 수학적 모델을 바탕으로 설계되어 실시간 운용이 가능하며, 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 표적의 지그재그, S턴, Barrel Roll의 회피기동 상황에서 기존 PN 방식 대비 최종 요격 오차를 유의미하게 감소시키는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 복잡한 비선형 및 불규칙 기동에 대한 대응력 강화를 위해 패턴 인식 기법의 고도화, 3차원 공간 적용, 최적 제어 이론과의 연계 등 다양한 기술적 확장 방향을 탐색할 계획이다.

이를 통해 현대 전장 환경에서 고기동 표적에 대한 효과적인 대응책으로서 무기체계의 핵심 구성 요소로 발전하여, 국방력 향상에 실질적 기여를 할 것으로 기대한다.

## References

- [1] B. Sharmam, "Improvements in Classical Proportional Navigation Guidance Using Fuzzy Logic", Journal of Aerospace Sciences and Technologies, Vol. 72, No.4, pp. 229-238, 2023.
- [2] B. Gaudet and R. Furfaro, "Integrated and Adaptive Guidance and Control for Endoatmospheric Missiles via Reinforcement Meta-Learning", Systems and Control, pp. 1-22, 2022.
- [3] H. Kang, P. Wang, S. Wei and S. Song, "Three-dimensional impact-time-constrained proportional navigation guidance using range-varying gain", Aerospace Science and Technology, Vol. 140, No. 3, pp.1-22, 2023.
- [4] S. Verma and D. S. Bernstein, "Frenet-Serret-Based Trajectory Prediction", Systems and Control, pp. 1-8, 2025.
- [5] A. H. Baradaran, "Advanced Prediction of

- Hypersonic Missile Trajectories with CNN-LSTM-GRU Architectures", IEEE Conference on Artificial Intelligence, pp. 1409-1416, 2025.
- [6] K. Yu, X. Li, J. Yu, C. Jiang, Q. Tan and Y. Wang, "Trajectory Prediction and Cooperative Interception Strategy for Maneuverable Hypersonic Target", International Conference on Guidance, Navigation and Control, pp. 496-505, 2025.
- [7] Y. Luo, Z. Wei, D. Ding, F. Wang, H. An, M. Tan and J. Ma, "Unmanned Aerial Vehicle Tactical Maneuver Trajectory Prediction Based on Hierarchical Strategy in Air-to-Air Confrontation Scenarios", MDPI Aerospace, Vol. 12, No. 8, pp. 1-34, 2025.