



Received: 2025/08/26
Revised: 2025/09/03
Accepted: 2025/09/29
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Sejun Lee

Center of Engagement Control System for Anti-air Weapons, LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-4996
Fax: +82-31-5179-7088
E-mail: sejun.lee@lignex1.com

위협 예측 기반 적 항공기 회피기동 시뮬레이션 및 내장형 훈련모드 개발 연구

Research on Threat Prediction-based Evasive Maneuver Simulation for Enemy Aircraft and Embedded Training Mode Development

이세준^{1*}, 윤희승², 김윤환³, 이상준³, 배재효³

¹LIG넥스원 미사일시스템통제기술연구소 선임연구원

²LIG넥스원 미사일시스템통제기술연구소 연구원

³LIG넥스원 미사일시스템통제기술연구소 수석연구원

Sejun Lee^{1*}, Heeseung Yoon², Yunhwan Kim³, Sangjun Lee³, Jaehyo Bae³

¹Research engineer, Center of Engagement Control System for Anti-air Weapons, LIG Nex1

²Research engineer, Center of Engagement Control System for Anti-air Weapons, LIG Nex1

³Chief research engineer, Center of Engagement Control System for Anti-air Weapons, LIG Nex1

Abstract

본 논문은 군용 전술기의 내장형 훈련모드에 활용할 수 있는 시나리오 생성 및 분석 기법을 제안한다. 운용자가 입력한 적 항공기의 경유점 정보를 기반으로, 통제소는 충돌 가능성이 높은 위협 구역을 예측하고, 해당 지점을 회피하고 아군의 요격 확률을 낮추는 방향으로 적 항공기의 회피 경로를 실시간으로 스무딩한다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 효과성을 검증하였으며, 본 기법은 훈련 상황에서 전술적 다양성을 제공하며, 운용자의 대응 능력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

This paper proposes a scenario generation and analysis for embedded training systems involving tactical aircraft. Based on defined waypoints for enemy aircraft, the control center predicts potential threat zones and a path smoothing algorithm adjusts enemy evasive maneuvers in real-time for reducing the interception probability. The proposed method is evaluated by simulation and enhances operator decision-making and adaptability.

Keywords

교전(Engagement), 경유점(Waypoint), CHOMP(Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning), 내장형 훈련모드(Embedded Training Mode), 성능 분석(Performance Analysis)

1. 서론

현대의 항공 전장 환경은 빠르게 변화하고 있으며, 적 항공기의 위협 및 회피 기동을 시뮬레이션하여 교전 성능을 분석하는 훈련의 필요성이 높아지고 있다. 특히, 통제소 또는 지상 통제기관의 관점에서 운용자가 적 항공기의 궤적에 대한 위협을 사전 예측하고 그로 인해 발생할 수 있는 회피 기동 패턴을 이해하는 것은 전술적 판단과 요격 성공률에 직결될 수 있다. 이러한 훈련은 단순한 비행 궤적 시뮬레이션만으로는 불가능하며, 실제 상황과 유사한 위협 인식, 회피 판단, 궤적 변화의 시각화가 함께 이루어져야 한다.

기존의 훈련 시스템은 대부분 사전에 설정한 고정된 경유점에 기반하여 적 항공기의 궤적을 구성하며, 위협에 대한 반응은 포함되지 않거나 단순 회전 또는 고도 변경과 같은 정형화된 기동만을 표현하였다. 그러나 실제 전장에서 적기는 상황에 따라 예측 불가능한 회피 기동을 수행하며, 이로 인해 아군 요격기의 교전 성공률은 급격히 낮아질 수 있다. 따라서 위협 인지와 기동 판단, 그리고 현실적인 궤적 변화가 결합된 내장형 훈련모드를 개발하고 이를 반복

학습함으로써 운용자의 대응 능력을 향상시킬 수 있는 체계가 요구된다.

이에 따라 본 논문은 적 항공기의 경우점 기반 경로 정보를 입력 데이터로 하여, 위협 예측 및 회피 기동 경로를 생성하고 이를 내장형 훈련모드 시뮬레이션에 반영하는 통합 구조를 제안한다. 특히 위협 예측 알고리즘은 진행 방향과 속도를 기반으로 위협 접근을 판단하며, 회피 경로는 Bezier 곡선 및 CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning) 최적화 알고리즘을 통해 스무딩하여 현실적인 기동이 가능하도록 구성하였다. 다양한 교전 시나리오에서 제공하는 적 항공기에 대한 위협 예측 및 경로 스무딩 시뮬레이션을 통해 운용자는 회피 전후의 요격 성공률 변화를 시각적으로 경험할 수 있다.

따라서 본 논문은 실제 적 항공기의 회피기동이 아군 요격 성공률에 미치는 영향을 수치적으로 검증하고, 이를 반복 가능한 시나리오 기반 내장형 훈련모드로 통합함으로써, 운용자의 위협 인지 및 회피 판단 능력을 강화할 수 있으며, 궁극적으로는 전술적 숙련도 향상을 위한 실용적 프레임워크의 개발에 기여할 수 있다.

2. 관련 연구

실제 교전 상황과 유사한 전술적 시나리오 구현 및 위협 인지·회피 기동 반영이 가능한 훈련 시스템 개발을 목표로 한 다양한 연구가 무인 항공기의 충돌 회피, 유도무기의 교전 전략 수립 등을 위해 활발히 진행되었다.

먼저 항공기의 현실적인 회피 궤적을 생성하기 위한 다양한 경로 계획 알고리즘이 제안되었으며, 그 중에서도 Bezier 곡선은 매끄럽고 물리적으로 타당한 궤적 생성을 가능하게 하는 수학적 모델로 널리 활용된다[1,2]. 이를 활용한 궤적 스무딩 기법은 무인항공기의 경로 계획에 널리 활용되고 있으며, 단순 회전이나 급격한 방향 전환 없이 자연스러운 기동을 구현하는데 효과적이지만, 단순 경로 생성에 집중되어 있으며 회피에 따른 요격 성공률 감소 효과를 훈련자에게 직관적으로 전달하는 구조는 구축되어 있지 않다.

최근에는 CHOMP와 같은 최적화 기반의 경로 계획 기법이 도입되어, 복잡한 환경에서의 회피 기동을 보다 자연스럽게 구현할 수 있는 방향으로 발전하고 있

다[3]. 하지만 이들 알고리즘은 주로 장애물 회피 혹은 자율 항공기의 안전 비행을 목적으로 사용되며, 전술적 교전 상황에서의 실시간 위협 예측과 운용자 시뮬레이션 연동은 다루지 않는다는 미흡함이 있다.

또한, 기계 학습 기반의 전투 행동 모델링 연구도 활발히 진행되고 있다[4]. 최근에는 심층 강화학습 및 모방학습을 기반으로 한 적기 교전 행동 예측 모델이 제안되었으며, 이를 통해 비가시권 환경에서의 적기 행동 예측 및 협력적 요격 전략에 관한 연구가 이루어지고 있다[5,6]. 다만, 이러한 연구들은 주로 AI 기반의 적기 조종 알고리즘 개발에 집중되어 있으며, 적 항공기의 회피 기동이 아군 통제소 요격 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 이를 시나리오 형태로 반복 훈련하는 구조는 전례가 적다. Air Combat Maneuvering Instrumentation(ACMI) 시스템은 실제 비행 중 수집된 항공기 데이터를 기반으로 3차원 디브리핑 환경을 제공하며, 교전 결과 및 행동 분석에 널리 활용되고 있다[7]. 그러나 ACMI는 사후 분석 중심의 시스템으로, 위협 인지 및 회피 판단을 실시간으로 반영하거나 운용자의 판단 능력 향상 목적의 반복 학습 환경으로 활용하기에는 충분하지 않다.

이에 따라 본 논문은 적 항공기의 경우점 기반 궤적을 입력 데이터로 하여 위협 예측을 수행하고, Bezier 및 CHOMP 기반의 경로 최적화 기법을 통합한 회피 궤적을 생성한다. 이로부터 회피 기동이 요격 성공률에 미치는 영향을 수치화하여 훈련자에게 피드백하고, 반복 학습이 가능한 내장형 훈련 프레임워크를 제안한다.

3. 위협 예측 및 회피기동 경로 생성

본 장에서는 적 항공기 위협 예측 및 회피 기동 기반 내장형 훈련 시뮬레이션 시스템의 전체 구조와 각 모듈의 동작 원리를 설명한다. 본 시스템은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 적 항공기의 비행 궤적에 대한 실시간 위협 예측, 회피 기동 궤적 생성, 시뮬레이션 반영 및 평가의 단계로 구성된다. 이때 입력 정보는 적 항공기의 경우점과 속도, 고도, 진행 방향 등의 비행 궤적이며, 출력 정보는 위협 구역 회피에 따른 요격 성공률 및 적 항공기의 총 기동량으로, 임베디드 훈련 시뮬레이터에 내장되어 반복 시뮬레이션이 가능하도록 한다.

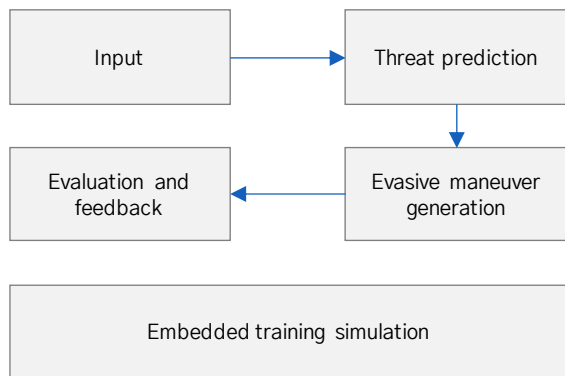


Fig. 1. Embedded training simulation system module

3.1 경유점 기반 초기 경로 구성

적 항공기의 초기 비행경로는 운용자가 입력한 고정된 경유점 집합을 기준으로 선형 연결되어 있고, 각 구간 간 비행 속도는 일정하다고 가정한다. 이 경로는 훈련자가 시뮬레이터를 통해 직접 구성할 수 있다.

3.2 위협 예측 알고리즘

적 항공기가 사전에 정해진 경유점 기반의 궤적을 따라 비행할 때, 아군 자산에 대한 위협 수준을 정량화하기 위해 위협 밀도 함수 기반 알고리즘을 설계하였다. 기존의 단순 거리 임계값 접근법은 적기가 비선형 기동하거나 다수의 적기가 진입할 경우 오탐 발생 가능성이 높기 때문에, 본 논문에서는 시간에 따른 적기와 아군 자산 간 상대적인 거리와 속도, 접근 방향을 통합하여 확률적 위협 밀도를 산출하고, 이로부터 국소 및 전역 위협 점수를 정의하였다.

특정 시간 t 에서의 위협 구역 중심 위치 $\vec{x}_c(t)$ 를 기준으로 적 항공기의 위치 $\vec{x}_i(t)$ 가 분포할 확률 밀도는 가우시안 형태의 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho(x, t) = \exp\left(-\frac{\|\vec{x}(t) - \vec{x}_i(t)\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

여기서, x 는 평가 지점의 공간 좌표, α 는 위협 확산 계수로서 적 항공기의 영향 범위를 반영한 상수이다.

위협 판정을 위해 특정 위협 중심 x_c 에 대해 실시간 평가하는 국소 위협 점수 $TS_{local}(t)$ 와 전체 위협 구역 Ω_c 에서의 총합적인 전역 위협 점수 $TS_{global}(t)$ 를 이용하며, 이는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$TS_{local}(t) = \rho(x_c, t) \quad (2)$$

$$TS_{global}(t) = \int_{\Omega_c} TS_{local}(t) \quad (3)$$

이때, 국소 위협 점수가 임계값 τ_{local} 을 초과할 경우 적 항공기가 위협 중심으로 직접 접근하는 것으로 판정하여 회피 기동을 수행해야 하며, 전역 위협 점수가 임계값 τ_{global} 을 초과할 경우 적 항공기가 위협 구역에 진입 중이거나 장기적으로 충돌 가능성이 높은 것으로 간주하고 위협 인지 플래그를 회피 기동 모듈에 전달하게 된다. 이와 같은 이중 위협 판정 구조를 통해 개별 자산 단위의 즉각적 대응과 체계적 수준의 전술 판단이 동시에 가능해진다.

3.3 회피 기동 궤적 생성

위협 구역 진입 가능성이 탐지되면, 적 항공기는 기존의 경유점 기반 직선 경로 대신 새로운 회피 궤적을 따라 비행해야 한다. 본 연구에서는 Bezier 곡선으로 초기 경로 생성을 수행하고, CHOMP 최적화를 통해 현실적인 제약을 반영한 최종 회피 경로를 도출한다.

먼저, Bezier 곡선은 제어점을 기반으로 매끄러운 경로를 생성할 수 있으며 제어점은 적 항공기의 현재 위치와 위협 구역에 대한 회피 방향, 고도 변화 지점을 반영하여 식 (4)와 같이 설정한다. 이를 통해 단순 기하학적 회피 경로를 생성할 수 있다.

$$Bz(t) = \sum_{i=0}^n (1-t)^{n-i} t^i P^i, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4)$$

여기서, P^i 는 제어점, n 은 곡선의 차수를 의미한다.

초기 Bezier 궤적을 기반으로 CHOMP 최적화를 적용하여 위협 구역 회피와 항공기의 동역학적 제약을 동시에 만족하는 경로를 산출할 수 있다. CHOMP는 주어진 초기 궤적으로부터 수치적 최적화를 통해 충돌 가능성은 최소화하고 부드러운 경로를 유지하는 방법론으로, 목적함수는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$J(\theta) = J_{smooth}(\theta) + \lambda J_{threat}(\theta) \quad (5)$$

이때, J_{smooth} 는 곡률 및 가속도 변화를 최소화하여 항공기의 실제 기동 가능 범위를 초과하지 않는 범위 내에서 부드러운 기동을 보장하고, J_{threat} 는 식 (1)의 위협 밀도가 높은 영역을 페널티로 반영한다. λ 는 두

목적함수 간의 가중치를 조정하는 계수로, 본 논문에서는 위협 회피에 중점을 두어 1.5로 설정하였다.

J_{smooth} 는 식 (6)을 통해 계산된다.

$$J_{smooth}(\theta) = \sum_{t=1}^{T-1} \|x_{i,t+1} - 2x_{i,t} + x_{i,t-1}\|^2 \quad (6)$$

여기서, 변수 θ 는 적 항공기의 위치를 이산화하여 $\theta = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,T}\}$ 로 정의할 수 있다.

J_{threat} 는 거리 기반의 비용함수인 $\phi(d)$ 를 이용하여 정의할 수 있고, 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$J_{threat}(\theta) = \sum_{t=1}^T \phi(d(x_t)) \quad (7)$$

$$\phi(d) = \begin{cases} \exp(-\alpha d(x_t)) & \text{for } d(x_t) \leq d_{safe} \\ 0 & \text{for } d(x_t) > d_{safe} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, α 는 위협 구역 접근에 따른 비용 민감도 계수이고, d_{safe} 는 안전 거리 임계값이다.

위협 구역에 대해 반경 R , 중심 C 일 때의 거리함수 $d(x_t)$ 는 식 (9)에 정의하였다.

$$d(x_t) = \|x_t - C\| - R \quad (9)$$

식 (5)의 목적함수가 최소화되도록 경사 하강법을 활용하여 궤적을 반복적으로 업데이트하며, 그 과정은 식 (10)과 같다.

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \eta \nabla J(\theta^{(k)}) \quad (10)$$

여기서, η 는 학습률, $\nabla J(\theta^{(k)})$ 는 목적함수의 기울기이다.

이를 통해 초기 Bezier 경로의 부드러움은 유지하면서, 위협 구역 및 제한 영역과의 충돌 가능성은 최소화하도록 현실적인 회피 기동을 생성할 수 있다.

3.4 내장형 훈련 시뮬레이션 구성

생성된 회피 궤적은 훈련 시뮬레이션에 반영되며, 적 항공기의 원래 궤적과 회피 궤적을 시각화하여 비교할 수 있다. 또한, 아군 방공망의 위치나 위협 구역 반경을 반영하여 요격 상황을 재현함으로써 요격 성공률 변화를 정량화하여 피드백을 제공할 수 있다.

다양한 교전 시나리오에 대해서 위협을 예측하고 회피 궤적을 생성하고 평가를 반복 시뮬레이션함으

로써 회피 전·후 시나리오를 나란히 제시하여 훈련자에게 요격률 차이를 직관적으로 인지시킬 수 있다. 또한 위협 밀도 지도를 색상 히트맵으로 시각화하여 회피 판단 근거를 제공하고 위협 판단 정확도와 회피율 변화에 대한 분석이 가능해진다.

4. 시뮬레이션 및 결과분석

제안한 위협 예측 및 회피 기동 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 이때, 시뮬레이션 환경은 아군 방공망과 적 항공기의 교전 상황을 가정하여 통제소가 적 항공기의 예상 경유점을 사전에 입력하고, 경로상의 위협을 예측하여 회피 기동이 수행되는지를 관찰하였다. 위협 예측 정확도 및 회피 기동의 효과성을 요격 성공률 지표를 통해 평가하였다. 또한, 경로 구간별 방향 벡터의 변화량을 누적하여 적 항공기의 비행종료까지의 총 기동량을 분석하였다.

시나리오는 크게 3가지로 Table 1에 정의하였고, 입력 변수는 Table 2에 기술하였다.

Table 1. Scenario for analyzing the performance of algorithm

Scenario	Center axis of threat (km)	Threat radius (km)
A (no threat)	-	-
B (one threat)	[5 0]	0.25
C (two threats)	[4 0], [7.5 0]	0.25

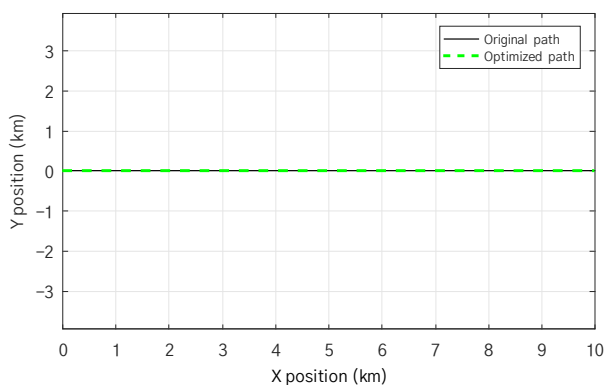
Table 2. Scenario input parameters for simulation

Parameter	Unit	Value	Description
\vec{P}_0	km	[0 0]	Target initial position for NE axis
\vec{P}_f	km	[10 0]	Target final position for NE axis
\vec{P}_1	km	[3.7 0]	Waypoint 1 for NE axis
\vec{P}_2	km	[7.1 0]	Waypoint 2 for NE axis
v	m/s	200	Speed
Δt	sec	0.1	Simulation time step
t	sec	50	Total simulation time
η	-	0.01	CHOMP leaning rate
R_{safe}	km	2	Safe range threshold
Mon	-	10	Monte Carlo

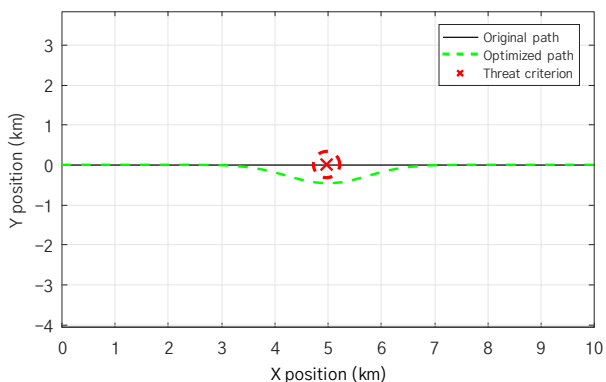
Fig. 2는 세 가지 시나리오에 대한 적 항공기의 기준 궤적과 위협 구역에 대한 회피 궤적을 가시화한 것이다. 시나리오 A(Fig. 2(a) 참조)의 경우 초기 Bezier 궤적을 따라 비행하고, 위협 구역이 존재하지 않으므로 경로 보정이 수행되지 않았다. 시나리오 B(Fig. 2(b) 참조), 시나리오 C(Fig. 2(c) 참조)의 경우 CHOMP 최적화를 적용하여 경로가 위협 구역 외곽을 따라 우회하는 것을 확인하였고, 위협 밀도는 회피 전 급상승하고 회피한 후에 감소하는 것을 확인하였다. 특히 시나

리오 C에서 회피가 2번 이루어짐에 따라 경로가 길어지고 곡률이 증가하였지만, 매끄러운 회피 기동을 유지함을 볼 수 있다.

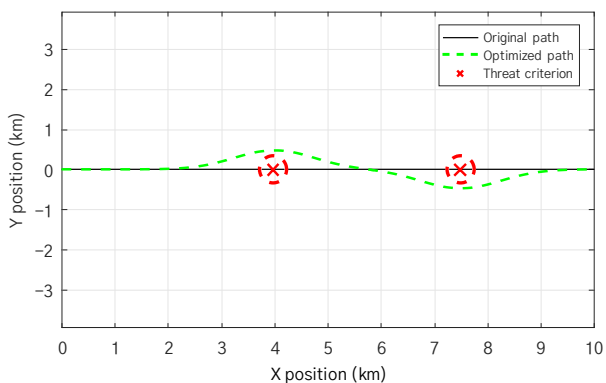
Fig. 3는 세 가지 시나리오에 대해서 식 (1)의 위협 밀도를 가시화한 것이다. 시나리오 B(Fig. 3(b) 참조)의 경우 경로상의 중간 지점인 5 km에 위협 구역이 존재하고, 시나리오 C(Fig. 3(c) 참조)의 경우 경로 상에서 약 40 %, 75 % 지점에 위협 구역이 존재하기 때문에 안전거리 임계치인 2 km 전부터 위협 밀도가 증



(a) Scenario A (no threat)

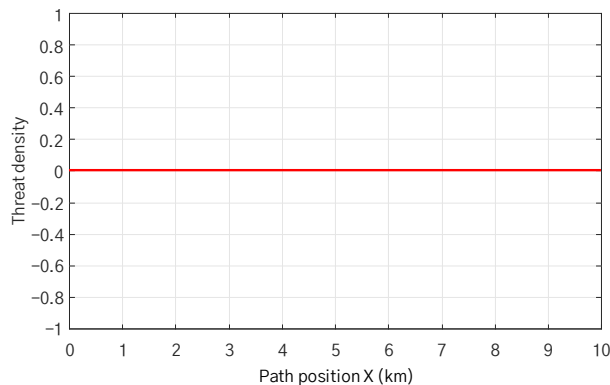


(b) Scenario B (one threat)

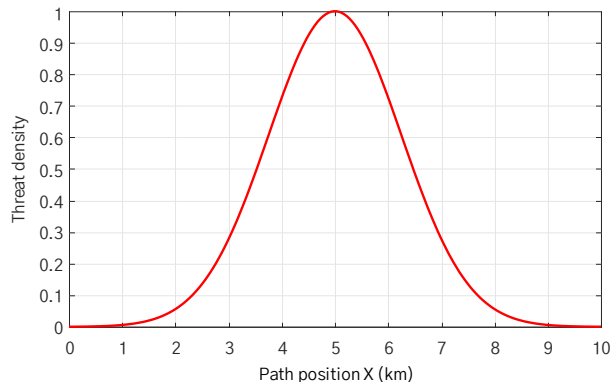


(c) Scenario C (two threats)

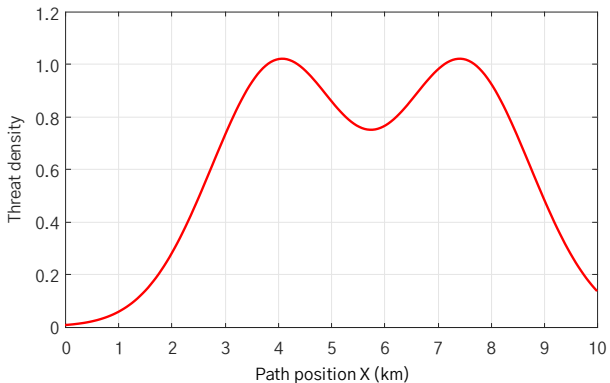
Fig. 2. Enemy aircraft trajectory for Scenario A – C



(a) Scenario A (no threat)



(b) Scenario B (one threat)



(c) Scenario C (two threats)

Fig. 3. Threat density score for Scenario A – C

가함을 확인할 수 있다.

Table 3는 세 가지 시나리오의 요격 성공률 계산 결과를 나타낸 것으로, 위협 구역이 존재하지 않는 시나리오 A의 경우 적 항공기가 아군 방어자산 영역으로 직격한다는 가정 하에 요격 성공률을 100 %로 설정하였고, 위협 구역 개수가 증가함에 따라 위협 구역에 대한 진입률을 낮춤으로써 아군의 요격 성공률도 통계적으로 감소함을 확인하였다. 시나리오 B의 경우 85.1 %, 시나리오 C의 경우 71.3 %로 감소하였다.

Table 3. Calculation result of interception success rate for 3 scenarios

Scenario	Interception success rate (%)
A	100
B	85.1
C	71.3

Table 4는 시나리오 A 대비 적 항공기가 위협 구역에 대한 예측을 통해 회피 경로를 생성함으로써 발생하는 침로 변화량을 누적한 총 기동량을 기술한 것이다. 위협 구역이 존재하지 않는 시나리오 A의 경우 직선 주행으로 인해 침로 변화가 존재하지 않으므로 총 기동량을 0으로 가정하였고, 위협 구역 개수가 증가함에 따라 회피 기동을 다수 수행함으로써 침로 변화가 늘어나 총 기동량이 증가함을 확인하였다. 설정한 시나리오에서는 Bezier 곡선만을 적용한 회피기동 수행 시 위협 구역이 1개씩 증가함에 따라 약 5.27도의 침로 변화가 발생하는 반면 CHOMP를 통해 최적 회피 기동을 수행하면 약 49 % 수준의 2.58도의 침로 변화만 발생함을 확인할 수 있다.

Table 4. Calculation result of total maneuver for 3 scenarios

Scenario	Scenario/total maneuver (deg)	
	Bezier	Bezier + CHOMP
A	0	0
B	5.271	2.582
C	11.069	5.293

분석 결과를 통해 적 항공기가 아군 방공망에 진입

할 때 위협 지역을 예측하고 최적화된 회피기동을 수행하여 위협 지역에 대한 노출을 줄임으로써 아군의 요격 성공률을 저하시킬 수 있다.

5. 결론

본 논문은 내장형 훈련모드 내에서 적 항공기의 경유점을 기반으로 위협을 예측하고, 기동을 회피하는 경로를 생성함으로써 아군의 요격 성공률을 낮추고, 이를 통해 운용자가 상황 예측 및 대응 전략을 학습할 수 있는 방안을 제시하였다. 특히 단순 경로점 기반의 기존 궤적 설정만으로는 위협 지역을 사전에 인지하거나 회피하는 전략 설계가 어려웠으나, Bezier 곡선을 활용한 초기 회피 경로와 CHOMP 최적화를 통한 궤적 보정을 결합함으로써, 단순 기하학적 경로 생성 방식 대비 현실적인 위협 회피 성능을 확보함을 확인하였다.

시뮬레이션 및 결과 분석을 통해 본 연구에서 제안하는 방법은 크게 다음과 같은 특징을 보인다. 첫째, 위협 예측 기능을 탑재한 훈련 시나리오 프레임워크를 설계하여, 적 항공기의 사전 경로 설정이 훈련 환경에 반영될 수 있도록 구성함으로써 경로 기반 시뮬레이션에서 발생하는 비현실적 기동 문제를 개선하였다. 둘째, Bezier 기반 경로 스무딩 알고리즘을 적용하여 경유점 간의 불연속 기동을 제거하고, CHOMP 기반의 동역학적 제약과 위협 회피를 동시에 고려한 궤적 변경에 대한 연동이 용이하도록 하였다. 마지막으로, 실제 시뮬레이션 결과를 통해 위협 지역 배치에 따라 위협 진입 횟수와 기동량이 어떻게 변화하는지를 정량적으로 분석하였다. 위협 구역의 개수가 증가할수록 적 항공기의 위협 진입 횟수는 증가하여 위협 점수가 상승하며, 회피기동 알고리즘이 추가될 경우 그에 따른 기동량 증가와 위협 회피율 개선이 동시에 기대된다.

향후 본 연구 결과를 확장하여 교전 공간에 대한 3차원 공간 확장 및 강화학습 기반 적응형 위협 예측·대응 전략을 도입하여 보다 정교하고 효과적인 전술 시뮬레이션 훈련체계를 구축하는 후속 연구를 고려할 수 있다.

마지막으로, 제안한 훈련 시나리오 프레임워크는 운용자의 위협 회피 판단 능력을 향상시키기 위한 시뮬레이션 기반 훈련 시스템에 바로 적용 가능하다. 특

히 통제소 관점에서 실제 전장과 유사한 적의 복잡한 기동 환경을 재현하여 시각화하고 회피 가능성을 평가할 수 있기 때문에, 운용자의 전술적 숙련도와 대응 능력 증진에 실질적으로 기여할 수 있다. 나아가 요격 성공률 저하 분석을 통해 위협 회피 학습 효과를 검증하고, 아군의 요격 성공률을 향상시키기 위한 전술 계획 수립 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] T. Zhang, Y. Dong and H. Li, "Trajectory Generation Based on Bezier Curve and Its Application to Cooperative Transportation," *Journal of Systems Science and Complexity*, Vol. 38, No. 4, pp. 1499-1523, Jul, 2025.
- [2] Z. Turkkol, N. Altuntas and S. C. Yavuz, "A Smooth Global Path Planning Method for Unmanned Surface Vehicles Using a Novel Combination of Rapidly Exploring Random Tree and Bezier Curves," *MDPI Sensors*, Vol. 24, No. 24, pp. 1-7, Dec, 2024.
- [3] N. Ratliff, M. Zucker, J. A. Bagnell and S. Srinivasa, "CHOMP: Gradient Optimization Techniques for Efficient Motion Planning," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 489-454, May, 2009.
- [4] Richard. A and How. J. P, "Aircraft Trajectory Planning with Collision Avoidance Using Mixed Integer Linear Programming," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1936-1941, May, 2022.
- [5] X. Bai, H. Jiang, J. Cui and K. Lu, "UAV Path Planning Based on A* and DWA Algorithms," *International Journal of Aerospace Engineering*, pp. 1-12, Sep, 2021.
- [6] J. Huang, P. Wu, X. Li and Y. Liu, "A 3D Multipath Planning Method for Guided Vehicles using Improved A* Algorithm Based on Multiple Avoidance Tactics and Terminal Attack Angles," *International Journal of Aerospace Engineering*, pp. 1-44, May, 2025.
- [7] M. Tan, H. Sun, D. Ding, H. Zhou, T. Han and Y. Luo, "Hierarchical Online Air Combat Maneuver Decision Making and Control Based on Surrogate-Assisted Differential Evolution Algorithm," *MDPI Drones*, Vol. 9, No. 2, pp.1-8, Jan, 2025.