



Received: 2025/07/21
Revised: 2025/08/02
Accepted: 2025/09/15
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Hyunseung Kim

Marine R&D Center, LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7272
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: hyunseung.kim2@lignex1.com

요격 정확도 향상을 위한 유전 알고리즘 기반 반응속도 최적화 기법 연구

Research on Genetic Algorithm-based Optimization of Response Time for Improved Interception Accuracy

김현승^{1*}, 현철², 이성균², 고진용², 김창환²

¹LIG넥스원 해양연구소 선임연구원

²LIG넥스원 해양연구소 수석연구원

Hyunseung Kim^{1*}, Chul Hyun², Sungkyun Lee², Jinyong Go², Changhwan Kim²

¹Research engineer, Marine R&D Center, LIG Nex1

²Chief research engineer, Marine R&D Center, LIG Nex1

Abstract

본 논문에서는 등속 운동 표적을 요격하기 위한 기하 기반 예상 요격 지점 산출과 반응 지연 보정 기법을 제안하였다. 요격체 지연 특성 모델과 유전 알고리즘을 통한 최적 반응속도 계수 산출을 통합 설계하였다. 다양한 교전 상황에서 최적 반응속도 계수를 적용한 결과가 고정 계수를 적용한 결과 대비 요격 오차가 유의미하게 감소되는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제시하는 프레임워크는 실시간 유도 전략 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

In this paper, a geometry-based method for predicting interception points and a delay compensation technique are proposed to intercept constant-velocity maneuvering target. An integrated model is designed combining the interceptor's delay characteristic model and optimization of the reaction rate coefficient via a genetic algorithm. Applying the optimizing reaction rate coefficient in various engagement scenarios showed a significant reduction in interception error compared to using a fixed coefficient. The proposed method is expected to use for establishing real-time guidance strategies.

Keywords

예상 요격 지점(Predicted Intercept Point),
유전 알고리즘(Genetic Algorithm),
기하 모델(Geometric Modeling),
반응속도 계수(Reaction Rate Coefficient),
자율 유도 제어(Autonomous Guidance Control)

1. 서론

대함전에서 자함을 기준으로 표적으로부터 방어자산을 보호하고, 적으로 식별되는 객체에 대한 요격 성공률을 높이기 위해서 실시간 유도 명령을 생성할 수 있다[1]. 이때, 표적의 위치와 속도, 침로에 따라 기하해석을 기반으로 요격 지점을 도출하고, 자함의 방어무기가 표적을 추종하여 유도하게 되는데, 특히 회피기동 패턴을 보이는 표적에 대해서는 정밀 유도 명령 생성을 통해 격추 확률을 높이는 것이 중요하다.

이러한 방어 유도탄의 증기 유도를 위해 예상 요격 지점을 산출하고[2], 적군에 대해 아군의 방어자산이 협업 전술을 해야 하는 상황에서 예상 요격 지점까지의 도달 시간을 도출하기 위한 연구가 수행되었다[3]. 표적의 고도가 해수면과 유사한 경우 2차원 평면상에서 예상 요격 지점을 산출할 수 있고, 표적이 이 지점까지 도달하는 시간을 직관적으로 계산할 수 있지만, 실제 고기동을 하며 진입하는 표적에 대해서는 실제 수치 시뮬레이션을 수행하여 반복 갱신함으로써 예상 요격 지점을 산출하고 그 지점으로 방어 유도탄을 유도하는 방식이 적용된다[4].

하지만 실제 요격체는 유도 명령에 대한 즉각적인 반응이 어려우며, 기동 한계, 제어 시스템 지연, 환경 요인 등에 따라 이상적인 궤적을 추종하지 못한다. 이러한 유도 명령의 반응속도 차이는 예상 요격 지점과 실제 요격 위치 간의 오차를 유발하여, 요격 성공률

을 크게 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 예측 기반의 피드백 알고리즘이 시도되었지만, 대부분 고정된 파라미터 기반이거나 시나리오에 대한 적응성이 부족하다.

이에 따라 본 논문에서는 표적 요격을 위한 방위 및 고각 방향 유도 명령을 일정 주기에 맞추어 계산하고, 요격체의 반응속도 계수를 주요 설계 변수로 정의하여 유전 알고리즘을 통해 자동 탐색함으로써 방어 신뢰도를 증대시켰다. 이때, 표적 요격은 예상 요격 지점에서의 표적과 방어자산 간의 거리 오차인 원형공산오차가 3 m 이내로 들어올 때로 판단하였다[5]. 이를 통해 본 연구는 지연 특성을 반영한 현실적인 3차원 요격 모델을 정립하고, 유전 알고리즘을 활용하여 반응속도 계수를 최적화하여 요격 오차를 감소시킴으로써, 최적의 무장 할당과 자함의 방어 전략 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 관련 연구

기동 표적에 대한 요격 알고리즘은 물리 기반의 기하적 해석과 유도 이론을 중심으로 발전해 왔다. 대표적으로 비례항법(proportional Navigation) 기법은 표적의 시선각을 추적함으로써 안정적이고 구현이 간편한 유도 알고리즘으로 널리 사용된다. 비례항법은 등속 직선 운동을 가정한 2차원 상대 운동 모델 기반으로 설계되었으며, 이를 3차원으로 확장하는 다양한 기법들이 제안되었다[1].

3차원 공간에서 요격할 때, 상대 위치 및 속도 벡터 관계를 고려하여 요격 지점을 예측하는 방식이 일반적이다. 대표적으로 상대 운동 벡터의 교차점을 계산함으로써 이상적인 요격점을 산출하는 기법이 있고[2], 이는 다양한 미사일 유도 시스템에 적용되었다. 하지만 이러한 기법은 현실 환경에서 발생하는 센서 지연, 제어기 응답 한계, 유도 명령 처리 지연 등의 요소를 고려하지 않기 때문에 실제 요격 정확도와 오차가 발생하는 문제가 있다.

이에 따라 유도 지연을 수치적으로 모델링하거나, 시스템의 동특성을 반영한 유도 명령 최적화 방법이 제안되었다[3,4]. 지연을 시간 상수 기반으로 모델링한 후 이를 보정하는 방식이 사용되며, 경로 예측 기반의 피드백 보정 설계로 확장되었다. 하지만 기존 연구는 지연 파라미터를 고정하는 방식으로, 다양한

시나리오에 적응형으로 대응하기에는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 시스템 파라미터를 자동으로 탐색하기 위한 휴리스틱 최적화 기법이 적용되며, 특히 유전 알고리즘(genetic algorithm)은 전역 탐색 능력과 간단한 구조로 제어기 튜닝이나 유도 계수 최적화 등의 분야에 활용되고 있다[5,6]. 유전 알고리즘은 비선형적이거나 연속적인 환경에서도 안정적으로 수렴하며, 실시간에 가까운 반응을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구는 위와 같은 연구 흐름에 기반하여, 3차원 기하 관계 기반의 요격 모델과 유도 지연 보정 개념을 통합하고, 유전 알고리즘을 통해 요격체의 반응속도 계수를 자동 최적화하는 기법을 제안한다. 이는 기존의 고정 파라미터 기반의 기법과는 달리 시나리오에 따라 적응적으로 반응속도를 조절할 수 있어 실제 시스템의 비선형적 동특성을 수치적으로 반영할 수 있다.

3. 유전 알고리즘 기반 반응속도 최적화 모델

제안하는 모델의 흐름도는 Fig. 1에 도시하였다. 이때 표적과 요격체의 초기 위치와 속도, 방위각, 고각 정보가 입력되어야 하며, 이들 정보는 3차원 기하 관계를 생성하기 위해 필요하다.

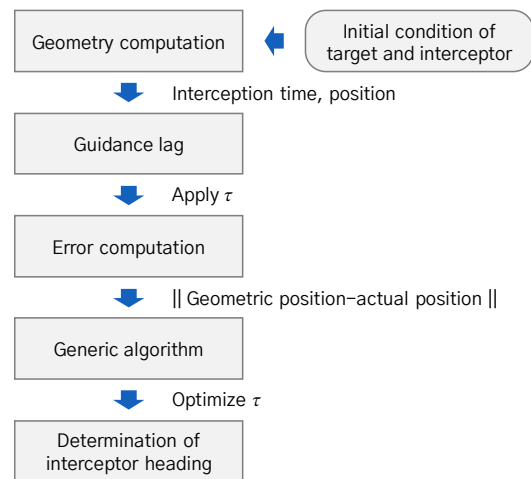


Fig. 1. Flowchart of the proposed GA-based response time optimization for 3D interception

3.1 3차원 기하 기반 요격 모델

표적과 요격체 간의 기하적 요격 조건을 3차원 공

간에서 정의하기 위하여 Fig. 2와 같이 도시할 수 있다. 여기서 표적은 초기 위치($P_{T,0}$), 속도 (v_T), 방위각 (α_T), 고각(θ_T) 정보가 필요하고, 표적의 속도벡터는 식 (1)과 같다.

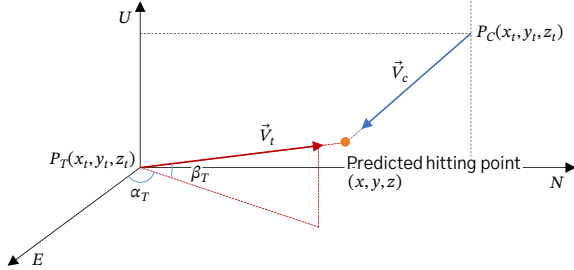


Fig. 2. Conceptual diagram of 3D interception using geometric prediction

$$\vec{v}_T = v_T \widehat{v}_T \quad (1a)$$

$$\widehat{v}_T = \begin{bmatrix} \cos \alpha_T \cos \theta_T \\ \sin \alpha_T \cos \theta_T \\ \sin \theta_T \end{bmatrix} \quad (1b)$$

여기서, v_T 는 표적의 진행 방향에 대한 속력이다.

이에 따른 표적의 초기 위치로부터 시간에 따른 위치 변화는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$\vec{P}_T(t) = P_{T,0} + \vec{v}_T t \quad (2)$$

요격체 또한 초기 위치($P_{C,0}$), 속도(v_C) 정보를 이용하여 표적과 요격체가 동일한 시점 t_i 에서 동일한 위치에 도달해야 요격이 이루어진다. 하지만 요격체의 이동 방향은 요격 지점에 의해 결정되므로, 식 (3), 식 (4)에 나타난 두 물체 간의 거리 등식을 활용하여 요격 시간을 식 (5)와 같이 2차 방정식의 해로 산출할 수 있다. 이때 요격 시간 t_i 가 0보다 큰 경우에만 요격이 가능하다.

$$r_T(t) = P_{T,0} + v_T t \widehat{v}_T \quad (3a)$$

$$r_C(t) = P_{C,0} + v_C t \widehat{v}_C \quad (3b)$$

$$\|d + v_T t_i \widehat{v}_T\| = v_C t_i \widehat{v}_C \quad (4a)$$

$$d = P_{T,0} - P_{C,0} \quad (4b)$$

$$(v_T^2 - v_C^2)t_i^2 + 2v_T(d \cdot \widehat{v}_T)t_i + d^2 = 0 \quad (5)$$

산출한 요격 시간을 기반으로 식 (6)의 예상 위치 요격 지점 P_i 로 접근하는 요격체의 진행 방향 벡터 \widehat{v}_C 를 식 (7)과 같이 산출할 수 있다.

$$P_i = P_{T,0} + v_T t_i \widehat{v}_T \quad (6)$$

$$\widehat{v}_C = \frac{P_i - P_{C,0}}{\|P_i - P_{C,0}\|} \quad (7)$$

3.2 반응속도 지연 모델

현실적으로 요격체의 유도 시스템은 센서 지연, 제어기 응답 지연, 기동 한계 등의 요인으로 기하적으로 계산한 유도 명령을 즉각 수행하지 못하고, 시간 지연이 발생한다. 본 연구에서는 반응 지연을 수학적으로 표현하기 위해 시정수 τ 를 이용하여 1차 지연 모델을 적용하였다. 이는 식 (8)과 같다.

$$\widehat{v}_C^r(t + \Delta t) = \widehat{v}_C^r(t) + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right)(\widehat{v}_C - \widehat{v}_C^r) \quad (8)$$

여기서, \widehat{v}_C 는 명령 벡터, \widehat{v}_C^r 은 추종 벡터이다. τ 는 시스템의 반응속도를 나타내며 값이 작을수록 지연이 작음을 의미한다.

이로부터 계산한 요격 지점 P_i 와 명령 지연을 반영한 요격체의 도달 위치 $r_i^r(t_i)$ 사이의 거리 오차 η 는 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\eta(\tau) = \|P_i - r_i^r(t_i; \tau)\| \quad (9)$$

3.3 유전 알고리즘

3.1절과 3.2절에서 산출한 기하 기반의 예상 요격 지점과 실제 요격 지점 간의 오차(η)를 최소화하기 위해 본 연구는 유전 알고리즘을 활용하였다. 유전 알고리즘은 후보 해 집합에 대해 진화 연산을 통해 개선하는 메타 휴리스틱 최적화 기법으로서, 반응속도 계수 τ 를 자동으로 최적화하는 방식의 기법이다. 전체 알고리즘은 목적함수, 선택, 교차, 돌연변이 생성, 정지조건으로 구성된다.

먼저 목적함수는 식 (9)의 오차를 최소화하기 위한 적합도 함수를 설정하여 식 (10)과 같이 정의된다.

$$F(\tau) = -\eta(\tau) \quad (10)$$

두 번째로 선택 연산에서는 현재 세대에서 높은 적합도를 가진 개체를 다음 세대의 부모로 선출하는 과정으로, 본 연구에서는 두 개의 랜덤 개체 τ_i, τ_j 를 선택하여 적합도를 비교한다. 이는 식 (11)과 같으며, 이 식은 적합도가 높은 개체가 선택될 확률을 높이면서도, 우연적으로 낮은 적합도를 지닌 개체가 선택될 가능성을 남겨둔다.

$$\text{Parent} = \begin{cases} \tau_i & \text{if } F(\tau_i) > F(\tau_j) \\ \tau_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

다음으로 교차 연산은 부모 개체의 정보를 조합하여 새로운 자식 개체를 생성하는 과정으로, 본 논문에서는 blend crossover 방식의 실수형 교차 기법을 적용하였다. 두 부모 개체에 대한 자식 개체 τ^c 는 식 (12)와 같이 균등 분포를 통해 생성된다. 여기서 α 는 0과 1 사이의 교차 범위 확장으로, 본 논문에서는 0.3으로 설정하여 부모 범위 외부까지도 탐색할 수 있도록 설정하였다. 이는 지역 최적해에 수렴하는 것을 방지하고, 전역 최적해로의 접근 가능성을 높인다.

$$\tau^{\min} = \min(\tau^1, \tau^2) \quad (12a)$$

$$\tau^{\max} = \max(\tau^1, \tau^2) \quad (12b)$$

$$d = \tau^{\max} - \tau^{\min} \quad (12c)$$

$$\tau^c = \text{uniform}(\tau^{\min} - \alpha d, \tau^{\max} + \alpha d) \quad (12d)$$

네 번째로 돌연변이 연산은 자식 개체에 미소한 변화를 주어 유전자 다양성을 확보하고, 국소적 수렴을 방지하는 역할을 한다. 본 논문에서는 정규분포 기반의 실수형 돌연변이 방식을 적용하였고, 해당 수식은

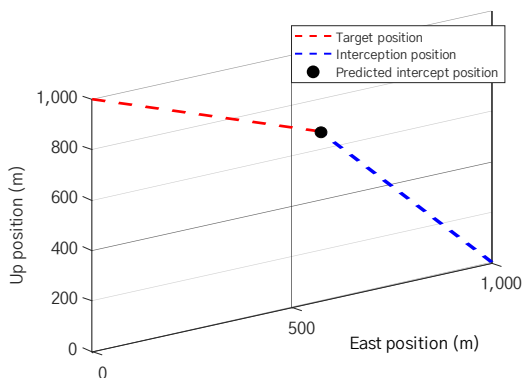


Fig. 3. Target Interception under the descending target scenario

식 (13)과 같다. 여기서 분포의 표준편차는 0.05를 적용하였고, 돌연변이 후 유전자가 유효 탐색 범위를 벗어나는 것을 방지하기 위해 식 (14)와 같이 클리핑을 수행하였다.

$$\tau^c = \tau^c + N(0, \sigma^2) \quad (13)$$

$$\tau^c = \min(\max(\tau^c, \tau^{\min}), \tau^{\max}) \quad (14)$$

마지막으로 정지조건은 학습 종료를 위한 조건을 가리키며, 유전 알고리즘 반복 수행 중에 Table 1의 3가지 조건 중 하나 이상을 충족시켰을 때 학습이 종료된다. 이때, 세대 수는 최대 100회로 설정하였다. 이를 통해 유전 알고리즘의 불필요한 반복을 방지하고 계산 자원의 효율성을 확보하였다.

Table 1. Termination condition for genetic algorithm

Criteria	Conditions
Maximum generation count	Terminate if the number of generations exceeds maximum count
Fitness improvement rate	$\frac{F_g^{best} - F_{g-k}^{best}}{F_{g-k}^{best}} < 0.001$
Stability generation count	Terminate if the improvement condition is satisfied for 10 consecutive generations

4. 시뮬레이션 결과 분석

3차원 상에서 요격체의 명령 속도 벡터에 대해 유전 알고리즘을 적용한 반응속도 최적화를 분석하기 위한 요격 시나리오를 Fig. 3, Fig. 4와 같이 수립하였

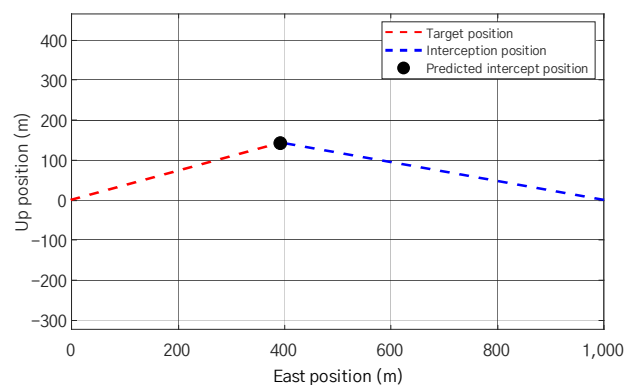


Fig. 4. Target interception under the ascending target scenario

Table 2. Scenario input parameters for target with negative elevation

Parameters	Unit	Value	Description
$\vec{P}_{T,0}$	m	[0 0 1000]	Target initial position for NED axis
$\vec{P}_{C,0}$	m	[1000 0 0]	Interceptor initial position for NED axis
v_T	m/s	250	Target speed
α_T	deg	0	Target azimuth
θ_T	deg	-30	Target elevation
v_C	m/s	300	Interceptor speed
Δt	sec	0.1	Simulation time step
t	sec	10	Total simulation time
$[\tau^{\min}, \tau^{\max}]$	-	[0.1 5.0]	Bounds for reaction time optimization
g_{\max}	-	40	Maximum generation count
α	-	0.3	Crossover probability
β	-	0.05	Probability of applying mutation

고, 관련 입력 변수는 Table 2, Table 3에 기술하였다. 이때, 표적은 요격체로부터 x 방향으로 1 km 떨어진 거리에 있고, Fig. 3에서는 고도 1 km부터 -30도로 하강하며, Fig. 4에서는 지면에서 20도로 상승하는 시나리오로 정의하였다. 이를 통해 예상 요격 지점과 실제 지연 모델 기반의 표적과 요격체의 조우 거리 오차를 계산하였다. 유전 알고리즘은 반복적으로 τ 값을 조정하면서 최적 반응속도를 탐색하여 분석하였다. 이때, 유전 알고리즘에서 한 세대는 후보 해를 30개로 설정하여 탐색과 계산량을 최적화하였다.

Table 4는 표적이 하강하거나 상승하는 두 가지 시나리오에 대하여, 지연모델을 적용하였을 때의 요격 오차와 유전 알고리즘을 통해 최적화한 반응속도 계수를 적용하였을 때의 요격 오차를 기술한 것이다. 시나리오 1에서의 유전 알고리즘을 통해 최적화한 반응속도 계수 $\tau = 4.413$, 시나리오 2에서는 $\tau = 2.414$ 로 선정되었다. 요격 시점의 위치 오차는 반응속도 계수가 최적화되지 않은 경우에 비하여 두 가지 시나리오 모두 약 80% 이상 감소하였고, 이는 단일 반응속도 계수 조정만으로도 요격 성능에 중대한 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

Table 3. Scenario input parameters for target with positive elevation

Parameters	Unit	Value	Description
$\vec{P}_{T,0}$	m	[0 0 0]	Target initial position for NED axis
$\vec{P}_{C,0}$	m	[1000 0 0]	Interceptor initial position for NED axis
v_T	m/s	200	Target speed
α_T	deg	0	Target azimuth
θ_T	deg	20	Target elevation
v_C	m/s	300	Interceptor speed
Δt	sec	0.1	Simulation time step
t	sec	10	Total simulation time
$[\tau^{\min}, \tau^{\max}]$	-	[0.1 5.0]	Bounds for reaction time optimization
g_{\max}	-	40	Maximum generation count
α	-	0.3	Crossover probability
β	-	0.05	Probability of applying mutation

Table 4. Termination condition for genetic algorithm

Scenario	Distance error	
	Delay model ($\tau = 5.0$)	Genetic algorithm ($\tau = \text{optimization}$)
(1) Descending target	10.495	1.772
(2) Ascending target	5.499	1.086

Fig. 5, Fig. 6는 시나리오 각각에 대해 유전 알고리즘 세대에 따른 요격 거리 오차의 최솟값을 도시한 것으로 세대에 따른 오차 수렴 과정을 보여준다. 두 경우 모두 15개 이내의 비교적 적은 세대에서도 요격 거리 오차를 2 m 내로 줄임으로써, 수렴 결과를 도출하였으며 이는 실제 시스템에의 적용 가능성을 높임을 검증하였다. 이를 통해 유전 알고리즘이 반응속도 지연 효과를 보정하였음을 확인할 수 있다. 요격체의 궤적은 초기 구간에서는 명령 추종 지연으로 인해 이상적인 침로를 완전히 추적하지 못하나, 시간이 지남에 따라 명령 벡터를 점진적으로 따라가면서 최종 요격 지점에서는 표적과 거의 동일한 위치에 도달하는 것을 확인하였다.

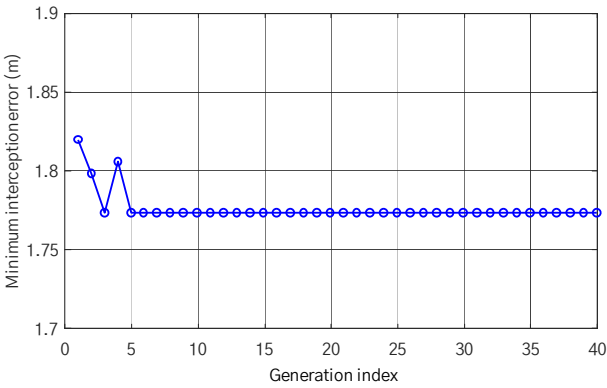


Fig. 5. Convergence of interception error for generation with the descending target scenario

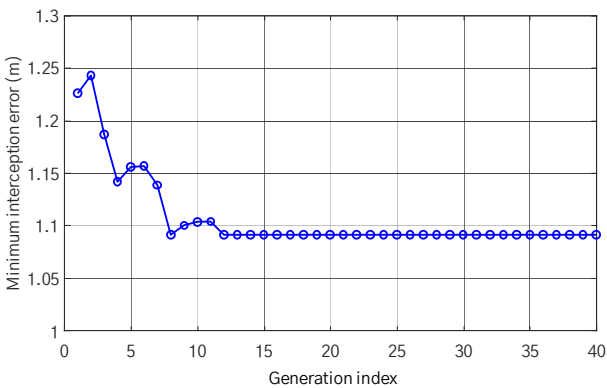


Fig. 6. Convergence of interception error for generation with the ascending target scenario

5. 결론

표적이 기동하는 상황에서 아군은 예상 요격 지점을 실시간 계산하여 적절한 무장을 할당하고 방어할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 3차원 공간에서 등속 직선 운동하는 표적에 대해 요격체의 반응 지연 특성을 고려한 효과적인 요격 전략을 수립하기 위해 기하 기반의 예상 요격 지점 산출과 유전 알고리즘 기반 반응속도 최적화 기법을 적용한 프레임워크를 제안하였다.

기하적 접근을 통해 이상적인 요격 시간과 그때의 요격 지점을 계산하고 실제 유도 시스템의 반응 지연을 1차 지연 모델로 수식화함으로써 현실적 조건 하에서의 요격 오차를 정량화하였다. 이후 유전 알고리즘을 적용하여 반응속도 계수를 자동으로 최적화함으로써, 지연 특성에 따른 위치예상 요격 지점에서의 조우 오차를 최소화하도록 설계하였다. 표적이 상승하거나 하강하는 시나리오에 있어, 고정된 반응속도

계수 대비 유전 알고리즘으로 도출한 최적 계수를 적용하는 경우 최종 요격 위치의 오차가 약 80% 이상 감소함을 입증하였다. 특히 유전 알고리즘에서 적은 세대 수로도 빠른 수렴을 확인함으로써, 실시간 적용 가능성을 평가하였다.

하지만 실제 표적은 종말 단계에서 회피기동 등의 급(急)기동을 수행하는 경우가 많기 때문에 이에 대한 요격 성능 분석과 회피 패턴 예측 기반의 대응 알고리즘 개발이 추가로 필요할 것으로 보인다. 이에 따라 향후 연구에서는 반응속도 계수의 실시간 최적화 구조를 도입하여, 다양한 교전 상황에 따라 최적화된 값을 실시간으로 자동 산출하여 강인 제어 기반의 유도기법과의 결합으로 보다 빠르고 정확한 요격 성능을 확보할 필요가 있다.

본 논문에서 제안하는 기법은 기하 기반의 3차원 요격 지점 산출 모델을 정립하고, 이를 실제 시스템의 반응 지연 특성과 통합함으로써 요격 오차를 정량화하는 분석 틀을 제시하였다. 또한 유전 알고리즘을 통해 반응속도 계수를 최적화함으로써 요격 정확도를 개선할 수 있음을 보였다. 이러한 통합적 접근은 현실적인 유도 시스템에 대한 적용 가능성을 높이고, 다양한 환경에 대응 가능한 유연한 요격 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] C. Qu, J. He, J. Li, C. Fang and Y. Mo, "Moving Target Interception Considering Dynamic Environment," 2022 American Control Conference, pp. 1194-1199, Jun. 2022.
- [2] K. Ding, X. Cui, Z. Wang, Z. Qiu, Y. Hu and H. Zhang, "Research on Interception Model of Surface-to-air Missile Anti-cruise Missile Weapon System," Journal of Physics: Conference Series 2890, pp. 1-14, Aug. 2024.
- [3] A. Dastider, H. Fang and M. Lin, "Unified Control Framework for Real-Time Interception and Obstacle Avoidance of Fast-Moving Objects with Diffusion Variational Auto-encoder," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 14-18, Oct. 2024.
- [4] A. Stair, U. Demir, G. Sever and N. Ure, "Nonlinear Model Based Guidance with Deep Learning Based Target Trajectory Prediction Against Aerial Agile Attack Patterns," 2021 American Control Conference, pp. 2607-2612, May. 2021.
- [5] Y. Zhang, X. Gao, J. Zong, Z. Leng and Z. Hou, "Real-Time Trajectory Planning and Effectiveness Analysis of Intercepting Large-scale Invading UAV Swarms Based on Motion Primitives," Journal of the MDPI Drones, Vol. 8,

No. 10, pp. 1–25, Oct. 2024.

[6] Z. Gyenes, L. Boloni and E. Kardoss, “Can Genetic Algorithms Be Used for Real-time Obstacle Avoidance for LiDAR-Equipped Mobile Robots?” *Journal of the MDPI Sensors*, Vol. 23, No. 6, pp. 1–17, Mar. 2023.