

초고속 표적에 대한 신속대응을 위한 무기할당 알고리즘

An Algorithm for Weapon Allocation for Quick Reaction toward Hyper-velocity Targets

김 지 은, 박 준 호, 조 길 석
국방과학연구소 제기술연구본부

Jieun Kim, Junho Park, Kilseok Cho
The 1st(PGM) R&D Institute, Agency for Defense Development

요약

무기-표적할당(Weapon-Target Allocation: WTA)은 방어 무기체계의 신속하고 정확한 교전결심을 지원하기 위한 핵심적인 기술로서, 다수의 표적이 아군을 위협하는 상황에서 다수의 표적을 효과적으로 요격할 수 있도록 제한적인 무기자산을 효율적으로 할당하는 최적의 해를 찾는 문제이다. 최적의 해에 대한 평가 기준은 무기-표적 쌍들에 대한 요격확률의 합으로 계산된다. 요격확률은 무기가 표적을 요격하는 시점에 따라서 달라지므로, 정밀한 교전결심을 위해서는 요격 시점을 고려하여 무기를 할당하는 것이 중요하다. 특히나 초고속표적을 대응할 때는 표적의 속도가 매우 빨라 요격할 수 있는 시간이 매우 짧기 때문에 더욱 중요하다. 이러한 요구사항에도 불구하고 기존 연구에서는 요격 시점을 고려한 무기할당에 대한 연구가 미진하였다. 본 논문에서는 요격 시점을 고려한 무기할당 알고리즘을 제안하고자 하며 알고리즘에 대한 성능으로 표적에 대한 요격률뿐만 아니라, 표적 출현부터 요격까지의 소요시간인 교전반응시간을 분석하여 신속대응에 대한 성능도 함께 제시한다.

I. 서론

무기할당은 다 표적 동시 교전상황에서 다수 표적과 다수 무기의 가능한 모든 조합 중에서 무기자산의 제약조건과 교전효율성을 고려하여 최적화된 무기-표적 쌍을 집합을 찾는 문제이다. 이 때 하나의 표적에 무기를 할당하는 것이 다른 표적의 무기 할당에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 향후 수행될 모든 교전에 대해 총체적으로 가장 효율적인 무기 할당을 수행하는 것을 목표로 한다.

무기-표적 할당 문제는 표적 및 무기가 증가할수록 가능한 해집합이 기하급수적으로 증가하는 전형적인 NP-완전(NP-Complete) 문제[1]로써 다양한 휴리스틱(Heuristic) 알고리즘[2-4]을 활용하여 최적의 해를 도출하는 연구가 진행되고 있다. 일반적인 해탐색 알고리즘은 정확한 해를 도출하는 것은 가능하지만, 이는 매우 소규모의 전장 환경일 경우에 한정된다. 다시 말해, 다수의 표적과 아군의 무기가 존재하는 대규모의 전장 환경에서 이러한 일반적인 해탐색 알고리즘을 적용하는 것은 불가능하다. 이와 달리, 휴리스틱 알고리즘은 임의로 하나의 해를 선택하여 그 해를 조금씩 개선시켜 최적의 해를 도출함으로써 NP-완전 문제의 해결이 가능하다. 이를 고려하여 기존의 무기-표적 할당 연구에서는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm), 분기한정법(Branch and bound), 모의 담금질 알고리즘(Simulated annealing algorithm), 타부 검색 알고리즘(Taboo search algorithm)과 같은 알고리즘을 활용하여 목적에 가장 최적화된 결과를 도출하는 것에 집중하였다. 무기할당에서 해에 대한 평가는 무기-표적 쌍의 요격확률의 합으로 계산할 수 있다. 표적에 대한 무기의 요격함수는 요격하는 시점에 따라서 달라지므로, 해에 대한 평가 시 요격 시점이 고려되어야 한다. 이러한 요구사항에도 불구하고 기존 연구에서는 요격 시점에 대한 연구가 미진하였다.

본 논문에서는 요격 시점을 고려한 무기할당 알고리즘

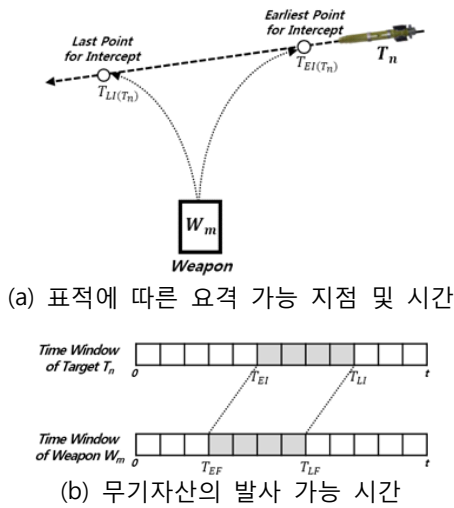
을 제안하고자 하며 알고리즘에 대한 성능으로 표적에 대한 요격률뿐만 아니라, 표적 출현부터 요격까지의 소요시간인 교전반응시간을 분석하여 신속대응에 대한 성능도 함께 제시하고자 한다. 더불어, 요격 확률뿐만 아니라 신속대응 요소를 반영한 평가함수를 통해 최적의 무기 할당 결과를 도출한다.

II. 제안하는 신속대응을 위한 무기할당 알고리즘

본 논문의 목적은 초고속 표적에 대한 신속대응을 위한 평가함수를 도출하고, 이를 통해 최단 시간에 수행 가능한 무기할당을 생성하는 것이다. 이를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

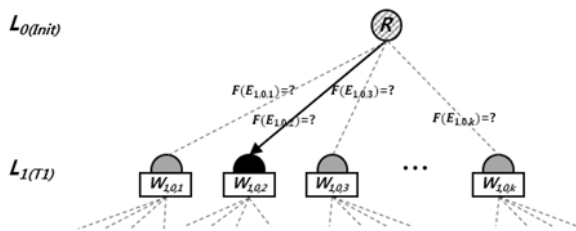
모든 발사대에서는 특정 표적에 대한 이동 궤적을 예측하여 기준 요격확률 이상으로 표적을 요격할 수 있는 최초 요격가능지점과 최후 요격가능지점을 도출할 수 있다. (단, 본 논문에서 표적의 이동 궤적 예측에 대한 방법은 고려하지 않는다.) 표적의 이동 궤적과 속도 정보를 이용하여 최초 요격가능지점과 최후 요격가능지점에 대응하는 최초 요격가능시간 및 최후 요격가능시간을 산출할 수 있다. 무기자산의 반응 시간과 거리에 따른 유도탄의 비행시간을 고려하여 최초 요격가능시간과 최후 요격가능시간으로부터 최초발사가능시간과 최후발사가능시간을 산출하는 것이 가능하다.

무기-표적 할당 문제는 NP-완전 문제로써 최적의 해탐색을 위한 다양한 해 탐색 알고리즘이나 인공지능 기법들에 기반을 둔 학습 알고리즘 등이 활용되는데, 무기자산의 제약사항 및 표적 간에 무기할당이 미치는 영향을 고려하고, 요격시점을 반영하기 위해서는 무기할당 문제를 탐색트리로 모델링하는 것이 유효하다. 그러므로 본 논문에서는 무기할당 문제를 상태 공간 트리로 모델링하고, 분기한정법을 기반으로 접근한다.



▶▶ 그림 1. 요격 가능 시간 및 발사 가능 시간

그림 2는 상태 공간 트리의 구성 요소인 레벨, 노드, 엣지 및 경로를 표현한다. 공간 트리의 레벨($L_i, i = \{0 \leq i \leq m\}$)은 위협 표적을 나타내는 구성 요소로써, 트리의 깊이는 위협 표적의 수(m)와 같다. 각 레벨 상의 노드 ($W_{i,j,k}, i = \{0 \leq i \leq m\}, j = \{0 \leq j \leq n\}, k = \{0 \leq k \leq n\}$)는 위협 표적에 할당되는 무기자산을 나타내는 구성 요소로써, 리프 노드를 제외한 모든 노드는 항상 무기자산의 수 (n)만큼의 자식 노드를 생성하고, 이는 다음 레벨의 후보 노드 집합이 된다. 공간 트리의 기반이 되는 루트(Root) 노드는 위협 표적이나 무기자산에 연관되지 않으며, 트리 구조의 시작을 표현하기 위해 필요로 하는 가상의 노드이다. 노드와 노드 사이를 연결하는 엣지($E_{i,j,k}, i = \{0 \leq i \leq m\}, j = \{0 \leq j \leq n\}, k = \{0 \leq k \leq n\}$)는 적용 비용 ($F(E_{i,j,k}), i = \{0 \leq i \leq m\}, j = \{0 \leq j \leq n\}, k = \{0 \leq k \leq n\}$)을 가진다. 적용 비용은 표적을 특정 무기자산으로 요격에 필요로 하는 비용으로써 요격을 및 발사 시점을 기반으로 산출된다. 그러므로 적용 비용의 산출 후 비용이 가장 작은 엣지가 경로로 선택된다. 이러한 과정을 반복하여, 루트 노드에서 리프 노드까지 완전한 경로가 생성되었을 경우 모든 위협 표적에 대한 무기 할당 과정이 완료된다.



▶▶ 그림 2. 상태 공간 트리의 구성 요소

표적에 무기자산 할당하기 위해 각 레벨에서 적절한 노드를 선택하는데, 이 때 가정 사항을 기반으로 유효성 평가를 함께 수행하여 무기자산이 보유한 유도탄이 없거나 교전 영역 외부에 표적이 존재하여 표적에 대한 요격 가능 시간을 산출하는 것이 불가능할 경우에는 새로운 표적의 수용 불가 상태로 간주한다. 또한, 새로운 표적을 할당하는 과정에서 기존 할당을 이동함으로써 기존 할당이 불가능해질 경우에도 새로운 표적의 수용 불가 상태로 간주한다. 무기자산을 점유하는 시간을 계산하기 위해서는 아래와 같이 세 가지의 규칙을 정의한다.

- 규칙 (1) - 빈 시간 슬롯에 할당
- 규칙 (2) - 기 할당된 표적을 위해 점유된 시간을 지연시킨 후 할당
- 규칙 (3) - 새로운 할당을 지연시킨 후 할당

새로운 표적을 수용 가능한 무기자산을 대상으로 적용 비용 연산을 수행한다. 위에서 지속적으로 언급한 바와 같이, 주로 요격 확률 극대화에 집중하였던 기존 연구들과 달리 제안하는 기법은 일정한 요격 확률을 보장하는 수준 내에서 신속대응에 초점을 둔다. 제안하는 무기-표적 간의 적용 비용은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 $TimeToIntercept(T_i, W_{i,j,k})$ 은 표적 T_i 를 무기자산 $W_{i,j,k}$ 에 할당했을 경우의 요격 가능 시간을 의미한다. 또한, $ProbabilityofKill(T_i, W_{i,j,k})$ 는 표적 T_i 를 무기자산 $W_{i,j,k}$ 에 할당했을 경우의 요격률을 나타내므로, $(1 - ProbabilityofKill(T_i, W_{i,j,k}))$ 는 표적 T_i 의 생존률을 의미한다. 이 때, β 는 신속대응과 요격률 사이의 가중치를 의미한다. 그러므로 식 (1)은 해당 표적의 요격 가능 시간이 늦어지거나 혹은 생존률이 높아질수록 적용 비용이 증가하므로, 가장 작은 적용 비용을 갖는 무기자산에 표적의 할당을 우선적으로 고려한다. 제안하는 알고리즘에서는 요격 가능 시간에 초점을 둔 적용 비용 연산을 통해 최적의 무기 할당을 수행하므로 기존의 연구에 비해 전장에서의 신속 대응이 가능하다.

$$F(E_{i,j,k}) = \beta(TimeToIntercept(T_i, W_{i,j,k}) + (1 - \beta)(1 - ProbabilityofKill(T_i, W_{i,j,k}))) \quad \text{식(1)}$$

III. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 기존에 제안된 무기할당 기법의 문제점을 분석하고, 초고속 표적에 대한 신속대응을 위한 요격 시점을 고려한 무기할당 알고리즘을 제안하였다. 기존 연구의 경우, 요격 확률의 극대화에만 집중하여 실 전장 환경에서 활용하기 위한 발사 시점에 대한 고려 및 다수의 표적에 대한 반응 시간 분석이 부족하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 제안하는 알고리즘은 요격 확률 뿐만 아니라 신속대응 요소를 반영한 평가함수를 통해 최적의 무기할당 결과를 도출한다. 이를 통해, 높은 수준의 요격확률을 보장하면서도 표적에 대한 반응시간을 현저하게 줄이는 것이 가능하다. 향후 연구로는 다양한 성능 평가를 통해 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증하는 것이다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] S. P. Lloyd and H. S. Witsenhausen, "Weapons allocation is NP-complete," Proc. of the IEEE Summer Computer Simulation Conference, pp. 1054-1058, 1986.
- [2] R. K. Ahuja, J. B. Orlin and A. Tiwari, "A Greedy Genetic Algorithm for the Quadratic Assignment Problem," Computers and Operations Research, Vol. 27, No. 10, pp. 917-934, 2000.
- [3] C. A. Cullenbine, "Tabu Search Approach to the Weapons Assignment Model," Ph.D. Dissertation, Air Force Institute of Technology (USA), 2000.
- [4] H. R. Li and Y. Miao, "WTA with the Maximum Kill Probability based on Simulated Annealing Algorithms," Proc. of the Conference Special Committee C2 and Computer of Electronic Technology Academic Committee of China, Ship Engineering Society, pp. 436-440, 2000.