

탐지 및 공격 임무를 수행하는 로봇팀의 효율적 자원관리를 통한 작업할당방식

김민혁^{*,1)}

¹⁾ 육군 분석평가단

Task Allocation Framework Incorporated with Effective Resource Management for Robot Team in Search and Attack Mission

Min-Hyuk Kim^{*,1)}

¹⁾ Center for Army Analysis and Simulation, Korea

(Received 23 December 2013 / Revised 17 February 2014 / Accepted 21 February 2014)

ABSTRACT

In this paper, we address a task allocation problem for a robot team that performs a search and attack mission. The robots are limited in sensing and communication capabilities, and carry different types of resources that are used to attack a target. The environment is uncertain and dynamic where no prior information about targets is given and dynamic events unpredictably happen. The goal of robot team is to collect total utilities as much as possible by destroying targets in a mission horizon. To solve the problem, we propose a distributed task allocation framework incorporated with effective resource management based on resource welfare. The framework we propose enables the robot team to retain more robots available by balancing resources among robots, and respond smoothly to dynamic events, which results in system performance improvement.

Key Words : Robot Team, Search and Attack Mission, Distributed Task Allocation, Local Communication Group, Resource Welfare, Auction Protocol

1. 서론

현대 전장에서 군사용 로봇은 인간병사를 대신하여 다양한 임무를 수행하고 있으며 미래전에서도 그 활용 분야는 더욱 증대될 것으로 예상된다. 로봇을 군사

작전에 활용하는 경우 단일로봇을 투입하는 것보다 다수의 로봇으로 구성된 로봇팀을 투입하면 임무를 보다 신속하고 효율적으로 달성할 수 있다. 로봇팀을 활용할 수 있는 대표적인 군사작전으로서 탐지 및 공격(search and attack) 임무가 있다¹⁻³⁾. 이 임무에서 로봇팀은 작전지역으로 전개되어 식별되지 않은 표적을 탐지하는 태스크(search task)와 탐지된 표적을 공격하는 태스크(attack task)를 수행한다. 투입된 로봇은 일반적

* Corresponding author, E-mail: minhyuk64@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

으로 탐지능력 및 통신능력에서 제한되고, 한정된 자원(탄약, 연료 등)을 사용하여 임무를 수행한다. 또한 로봇팀이 임무를 수행하는 환경은 주어진 정보가 불충분하거나 불확실하며, 로봇의 피격 및 고장 등 다양한 이벤트가 발생하는 동적인 환경이다⁴⁾.

이러한 불확실하고 동적인 환경에서 로봇팀은 발생하는 태스크를 신속하게 처리하고 다양한 이벤트에 적시적으로 대응해야 시스템 퍼포먼스를 향상시킬 수 있으며, 이를 위해서는 한정된 자원을 효과적으로 관리할 수 있는 전략과 이를 고려한 효율적인 태스크 할당방식이 요구된다⁵⁻⁶⁾. 본 논문에서는 탐지 및 공격 임무를 수행하는 로봇팀이 한정된 자원을 효율적으로 관리하기 위한 전략과 이를 태스크 수행을 위한 로봇 선정의 기준으로 적용하는 새로운 개념의 태스크 할당방식을 제안한다.

2. 탐색 및 공격임무 수행 로봇팀의 태스크 할당 문제

임의의 지역에 탐색 및 공격 임무를 수행하기 위하여 전개된 n개의 로봇으로 구성된 로봇팀을 고려한다. 지역 내에는 고정표적들이 산재되어 있으며 표적의 수, 위치, 가치(value), 파괴하기 위하여 소요되는 자원(resource)의 종류와 량(quantity) 등에 대한 정보는 주어지지 않는다. 각 로봇은 장착된 탐지기의 능력 범위(탐지반경, sensing radius) 내에서 표적을 식별할 수 있으며, 식별된 표적에 대해서는 그 표적과 관련된 위와 같은 일체의 정보를 확인할 수 있다고 가정한다. 로봇은 다양한 종류의 탄약을 자원으로 보유하고 있으며, 자원을 활용하여 공격작업(attack task)을 수행한다. 자원의 량은 제한되어 있으며, 태스크를 수행하면서 소모되고, 임무수행 동안에는 재충전이 불가능하다. 각 로봇의 보유 자원은 수식 (1)과 같이 벡터 형태로 표현한다.

$$b_{a_i} = [b_{a_i}^1, b_{a_i}^2, \dots, b_{a_i}^m] \quad (1)$$

수식 (1)에서 $b_{a_i}^k$ 는 로봇 a_i 의 자원 k 에 대한 보유량을 나타낸다.

표적을 공격하기 위하여 사용되는 자원량은 표적의 자원요구량(resource requirement)이라 하며 수식 (2)와 같이 벡터로 표현한다.

$$b_{t_j} = [b_{t_j}^1, b_{t_j}^2, \dots, b_{t_j}^m] \quad (2)$$

수식 (2)에서 $b_{t_j}^k$ 는 표적 t_j 의 자원 k 에 대한 요구량을 나타낸다. 각 표적은 중요도에 따라 가치가 부여되며, 로봇팀은 표적을 공격·파괴함으로써 수식 (3)에 따라 유틸리티를 획득한다.

$$U_{t_j}(\tau) = V_{t_j} \delta_{t_j}(\tau) \quad (3)$$

수식 (3)에서 $U_{t_j}(\tau)$ 는 시간 t 에서 표적 t_j 를 파괴함으로써 부여되는 유틸리티, V_{t_j} 는 표적 t_j 의 최초 가치, $\delta_{t_j}(\tau) \in [0, 1]$ 는 비증가함수(non-increasing function)이다. 유틸리티는 시간이 경과함에 따라 점차 감소하므로 로봇팀은 유틸리티를 최대화하기 위하여 가급적 단시간 내에 많은 표적을 탐지하여 파괴하여야 한다.

표적을 탐지하기 위해 각 로봇은 랜덤서치(random search)를 수행한다. 즉, 로봇은 일정 방향으로 이동하며 탐색을 수행하다가 임무수행지역의 경계(boundary)에 도달하면 임의의 방향으로 전환하여 탐색을 계속 수행한다. 로봇은 임무를 수행하는 동안 기능고장 및 피격 등으로 손실될 수 있다.

로봇의 직접적인 통신소통은 통신반경으로 제한된다. 그러나 한 로봇의 통신반경 내에 위치하지 않은 로봇이더라도 그 로봇의 통신반경 내에 있는 다른 로봇의 통신중계를 통해 연결될 수 있으며, 이러한 로봇은 그 로봇의 인접로봇(neighboring robots)으로 불린다 (Fig. 1 참조). 이렇게 커뮤니케이션 링크를 따라 연결되는 로봇 a_i 의 모든 인접로봇들을 로봇 a_i 의 지역통신그룹(local communication group) $L(a_i)$ 로 정의한다. 지역통신그룹 내에서 로봇들은 탐지된 표적 및 인접로봇에 대한 정보를 공유한다. 한정된 통신 능력으로 인해 로봇팀 전체 구성원들 간의 정보공유가 제한될 수 있으며, 따라서 지역통신그룹 별로 분산화된 의사결정(distributed decision making)이 온라인 방식으로 이루어진다. 지역통신그룹은 로봇들이 이동함에 따라 수시로 변경 및 재설정된다.

탐지된 표적에 대해 단일 로봇의 공격능력을 초과하는 경우(표적 공격에 요구되는 자원 종류나 량을 충분히 보유하지 못한 경우) 가용한 다수의 로봇이 일시적으로 연합하여 공격팀을 구성한다. 공격팀 구성로봇들은 탐지작업을 중단하고 표적공격을 위해 이동한다. 공격팀은 공격 효과를 최대화하기 위해 표적에 대해

동시공격(simultaneous strike)을 수행하며, 따라서 표적 공격에 대한 공격팀의 반응시간은 공격팀 구성로봇들 각각의 표적 이동시간 중 최대 이동시간으로 결정된다. 표적을 공격하면서 공격팀 구성로봇들은 표적이 요구하는 자원에 따라 각각 일정량의 자원을 분담하여 사용한다. 로봇이 자원을 모두 소모하게 되면 더 이상 공격임무에 참여할 수 없으나 탐지임무는 계속 수행할 수 있다.

탐지 및 공격 임무를 수행하는 로봇팀의 최종적인 목표는 주어진 임무수행 시간 내에 표적을 탐지, 파괴하여 획득되는 유틸리티를 최대화하는 것이다. 이를 위해 로봇팀은 효율적인 자원관리와 함께 유틸리티를 극대화할 수 있는 태스크 할당방법을 최적화해야 한다.

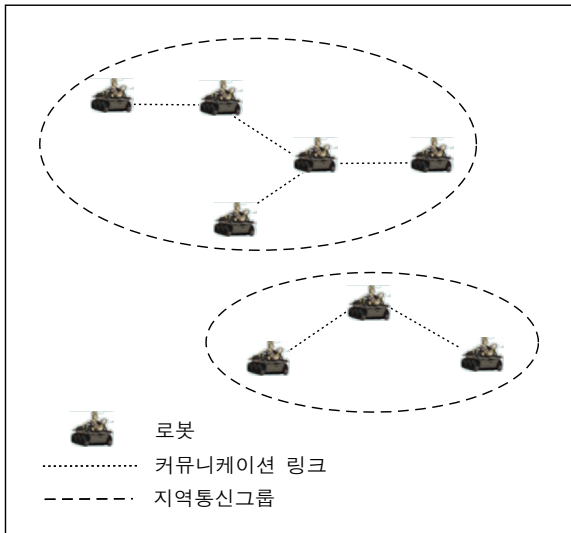


Fig. 1. Local Communication groups of robots formed with communication links

3. 불확실한 환경에서의 효율적인 자원관리

불확실한 환경에서 제한된 자원으로 임무를 수행하는 로봇팀은 효율적인 방법으로 자원을 소모함으로써 가급적 많은 로봇들을 가용한 상태로 보유하여야 발생하는 이벤트에 대해 즉각 대응할 수 있다.

3.1 자원의 균형 소모

동적이고 불확실한 환경에서 일반적으로 많이 사용되는 태스크 할당방법은 탐욕적 방식(greedy method)이

다. 이 방식은 임무환경에서 태스크(예, 공격작업 등)가 발생할 때마다 가장 유용한 로봇에게 해당 작업을 할당한다^{3,7)}. 가장 유용한 로봇이란 태스크를 완료하면(시스템 퍼포먼스에 따라) 획득되는 유틸리티를 최대화하거나 사용되는 비용을 최소화할 수 있는 로봇으로 정의된다. 이 방식은 한정된 자원의 분포상태를 고려하지 않고 로봇을 선택하여 태스크를 할당함으로써 비록 현재는 최선의 결과를 도출할 수 있지만 비효율적인 자원 소모를 촉진할 수 있다. 일부 로봇은 시간이 경과함에 따라 자원을 조기에 소모함으로써 미래 발생할 이벤트나 태스크에 가용하지 않으므로 로봇팀은 보다 긴 시간이나 큰 비용(자원)으로 대응하게 되고 따라서 장기적으로 시스템의 퍼포먼스는 저하된다.

예를 들어, 각각의 자원 보유량이 [8, 0], [0, 8], [10, 10]인 로봇1, 로봇2, 로봇3이 한 지역통신그룹에 있다고 가정해보자. 어떤 표적이 탐지되었고 그 표적의 자원요구량은 [4, 4]이다. 로봇1, 로봇2, 로봇3은 그 표적에 도달하여 공격임무를 수행하는 반응시간이 각각 2분, 4분, 5분이 소요된다. 공격태스크 수행시 확보되는 유틸리티는 공격반응시간이 경과함으로써 감소되므로 최대 유틸리티를 확보하기 위해서는 최단시간 내에 공격이 가능한 로봇에게 할당해야 한다. 따라서 탐욕적 작업할당 방식은 로봇1과 로봇2를 선정하여 공격태스크를 할당할 것이다. 공격태스크가 완료되면 로봇1과 로봇2의 자원은 각각 [4, 0]과 [0, 4]으로 감소된다. 로봇3은 탐색 업무수행을 위해 다른 위치로 이동하여 지역통신그룹은 로봇1과 로봇2로 재구성되고, 자원요구량이 [5, 5]인 또 다른 표적이 출현했다고 가정해보자. 로봇1과 로봇2는 보유 자원이 부족하므로 그 표적을 공격할 수 없고 다른 가용로봇이 공격할 때까지 공격반응시간이 지체되어 이후 그 표적을 공격하여 얻게 되는 유틸리티는 감소될 것이다. 최초 표적에 대한 공격반응시간이 다른 두 로봇에 비해 지연되어 확보되는 유틸리티가 비록 적더라도 로봇3이 수행하였다면 지역통신그룹 지역에 출현한 두 번째 표적에 대해 로봇1과 로봇2가 충분한 자원을 보유하고 있어 즉시 공격태스크 수행이 가능하였을 것이다.

위의 예처럼 태스크 예측이 곤란한 불확실한 환경에서는 로봇팀이 현재 발생한 태스크에 대해 근시안적으로만 처리하지 않고 미래 발생할 태스크를 고려하여 자원을 균등하게 소모하여 가급적 많은 로봇들을 가용한 상태로 보유해야 한다. 따라서 불확실한 환경에서 자원이 제한된 로봇팀은 태스크 발생시 로봇의 자원

보유량과 분포상태를 고려하여 태스크를 할당하는 메커니즘을 고려해야 한다.

3.2 로봇팀의 자원복지(resource welfare)

로봇팀에 부여된 한정된 자원의 효율적 관리를 위해서는 자원의 전반적인 보유량과 균형적인 분포 정도를 판단할 수 있는 척도가 필요하다. 이에 상응하는 개념으로 경제학에서 사용하는 사회복지(social welfare)라는 평가척도가 있다. 한 사회의 사회복지 수준은 그 사회의 전반적인 평균 소득수준(average income)과 소득의 불균등 분포(inequality) 정도에 따라 정의될 수 있으며, 사회복지함수(social welfare function)를 사용하여 정량적으로 측정할 수 있다. 대표적인 사회복지함수로서 Atkinson은 수식 (4)와 같은 사회복지함수를 제안하였다^[8].

$$SW_A = \frac{1}{n_A} \left(\sum_{a \in A} P_a^{1-\epsilon} \right)^{\frac{1}{1-\epsilon}} \tag{4}$$

수식 (4)에서 n_A 는 그룹 A의 구성원 수, P_a 는 구성원 a의 소득, ϵ 는 불균등 분포에 대한 페널티를 반영하는 불균등 반감 파라미터(inequality aversion parameter)를 나타낸다. ϵ 값은 일반적으로 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 등이 사용되며, 높은 값일수록 불균등 분포에 대해 강한 페널티를 부여한다^[9].

이 개념을 로봇팀의 자원관리에 도입하여 로봇팀의 전반적인 자원 보유수준과 균형적 분포정도를 동시에 계량화하는 척도로서 자원복지(resource welfare)를 정의한다. 로봇팀의 자원복지는 Atkinson의 사회복지함수를 변형한 수식 (5)와 같은 자원복지함수(resource welfare function)를 정의하여 측정한다.

$$RW_{L_j}^k = \begin{cases} \frac{1}{n_{L_j}} \left(\sum_{a_i \in L_j} (b_{a_i}^k)^{1-\epsilon_k} \right)^{\frac{1}{1-\epsilon_k}} & \text{if } \epsilon \neq 1 \\ \exp \left(\frac{1}{n_{L_j}} \sum_{a_i \in L_j} \ln b_{a_i}^k \right) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

수식 (5)에서 n_{L_j} 는 지역통신그룹 L_j 의 구성원 수, $b_{a_i}^k$ 는 로봇 a_i 의 자원 k 에 대한 보유량, ϵ_k 는 자원 k 에 대한 불균등 반감 파라미터를 나타낸다. 어느 특정 시점에서 로봇팀의 자원복지란 그 로봇팀이 얼마나 많은 자원량을 보유하고 있는지 또한 보유한 자원은 얼마

나 균형 있게 분포되어 있는지를 나타낸다. 높은 수치의 자원복지일수록 로봇팀은 더 많은 자원을 보다 균등하게 보유하고 있다는 것을 의미한다.

로봇팀이 다종류의 자원을 운용하는 경우 각 자원에 대한 자원복지를 결합한 단일한 척도인 통합자원복지(combined resource welfare)를 사용한다. 통합자원복지는 수식 (6)과 같이 정의한다.

$$CW_{L_i} = \sum_{k=1}^m \alpha^k RW_{L_i}^k \tag{6}$$

수식 (6)에서 d^k 는 자원 k 의 자원복지 수준에 대한 가중치를 나타낸다. 일부 자원이 다른 자원에 비해 희소하여 자원소모나 균등분포에 관리가 요구되는 경우 해당 자원복지 수준에 높은 가중치를 부여할 수 있다. 로봇팀은 통합자원복지를 통해 자원소모 및 분포 수준을 확인하고, 발생하는 태스크에 대하여 자원관리를 고려하여 최적의 로봇을 할당하는 의사결정의 기준으로 활용한다.

3.3 공격팀 구성 로봇의 자원의 소모

탐지된 표적을 공격하기 위해 구성된 공격팀 로봇들은 표적 공격에 요구되는 자원들을 가급적 균등하게 소비할 수 있도록 배분한다. 즉, 상대적으로 많은 자원을 보유한 로봇은 더 지출하고, 자원 보유량이 적은 로봇은 소량을 소비하거나 자원 지출을 면제하기도 한다. 이러한 목적은 공격태스크를 완료한 후, 공격팀의 자원 보유량이 가능한 범위 내에서 동등하게 만들어 궁극적으로 공격팀이 속한 지역통신그룹 전체의 자원복지를 향상시키는 것이다.

예를 들어, 각각의 자원 보유량이 [9, 11]과 [15, 4]인 로봇1과 로봇2가 있다고 가정해보자. 공격해야할 표적은 [10, 6]의 자원을 요구한다. 두 로봇 중 어느 한 로봇도 표적을 공격하기에 충분한 자원을 보유하지 않았으므로 연합팀을 구성하여 공격태스크를 수행한다. 첫 번째 자원에 대해서는 로봇2가 로봇1보다 보유량이 많은 반면 두 번째 자원에 대해서는 로봇1이 로봇2보다 보유량이 많다. 따라서 각각 보유량이 많은 자원에 대해 보다 더 소모하여 공격 이후 자원의 보유량이 비슷해지도록 만든다. 이러한 자원소모 개념에 따르면 로봇1은 각 자원에 대해 2유닛과 6유닛을 소모하고, 로봇2는 각각 8유닛과 0유닛을 소모하여 태스크 완료 후에는 각 로봇은 자원 [7, 5]와 [7, 4]를 보유하게 된

다. 지역통신그룹 내에서 연합 공격팀이 구성될 때마다 자원을 균등하게 소모케함으로써 궁극적으로는 지역통신그룹 전체의 자원복지 향상에 기여하게 된다.

4. 자원복지 기반 분산화 태스크 할당방법

로봇의 한정된 통신능력이 인해 로봇팀 전체에 대한 실시간 정보공유는 제한되나 지역통신그룹 내에서는 탐지된 표적 및 그룹 내 다른 로봇들에 대한 정보 공유가 가능하다. 각 로봇은 수집 및 전파된 정보를 바탕으로 분권화된 의사결정을 내리며, 이를 위해 옥션 프로토콜(auction protocol)를 사용한다.

로봇이 표적을 탐지하면 표적의 위치, 자원 요구량, 유틸리티를 확인하고 (다수 표적이 동시에 탐지된 경우 최대 유틸리티를 가진 표적을 선정하여) 관련 정보를 지역통신그룹 내의 다른 로봇에게 전파하면서 옥션을 개시한다. 다수의 로봇이 동일 표적에 대해 옥션을 개시하려 할 경우 옥션 매니저는 그 표적과 근거리에 있는 로봇이 수행한다.

지역통신그룹 내 인접로봇들로부터 탐지 표적에 대한 정보를 수신한 로봇들은 공격태스크 수행에 적합한 표적을 선정하여 공격태스크 참여의사를 입찰(bid) 형태로 제시한다. 공격태스크 입찰을 위해서 로봇은 옥션 발표된 표적 중 최대 유틸리티를 갖는 표적을 선정하되 공격대상 표적이 요구하는 자원 중 일부를 보유하고 있어야 한다. 로봇의 공격태스크 입찰정보는 로봇의 현위치(표적까지 이동시간), 보유자원 종류와 량 등이 포함된다. 옥션매니저는 이러한 정보를 수집한 후 표적 공격에 최적의 로봇을 선정하기 위하여 Fig. 2에 제시된 알고리즘을 수행한다.

공격팀을 최소 규모로 편성하면 보다 많은 로봇을 가용한 상태로 유지하여 탐지태스크를 통해 표적탐지 기회를 증대시키고, 다른 공격태스크에 투입하여 반응 시간을 감소시킬 수 있다. 만약 옥션 간 공격팀 구성에 실패하면 옥션 매니저는 일정시간 이후 옥션을 다시 개시한다. 표적탐지는 분산적으로 발생하므로 다수의 옥션이 동시에 개시되어 태스크 할당프로세스가 진행될 수 있다.

제시된 자원복지 기반의 로봇-태스크 할당 알고리즘은 불균등 파라미터 값을 조절함으로써 시스템의 환경에 따라 융통성 있게 적용할 수 있는 장점을 제공한다. 예를 들어, 파라미터 $\alpha_k = 0, \forall k$ 으로 고정하면 로

봇팀의 자원복지는

$$RW_{L_j}^k = \frac{1}{n_{L_j, a_i \in L_j}} \sum_{a_i \in L_j} b_{a_i}^k \quad (7)$$

으로 정의되며 이는 곧 자원 k 의 평균치를 나타낸다. 따라서 공격태스크를 수행할 수 있는 모든 후보팀들은 태스크 완료 이후 동일한 자원복지 수준(즉, 지역통신그룹의 전체 보유자원 평균치)을 생산하므로 이를 공격팀 선정 기준으로 고려할 수 없다. 그러므로 제2의 선정기준으로 최단 공격반응시간을 고려할 수 있으며 이 경우 탐욕적 작업할당방식과 동일하다.

- (1) Form a list of robots that submit a bid.
- (2) Identify eligible attack team of minimum size.
 - (i) Set minimum attack team size $s_m = 1$.
 - (ii) Compute all team candidates of size s_m .
 - (iii) Check if the team's total resource requirements satisfies target's resource requirements. If so, include the team into eligible attack team set.
 - (iv) Check if the eligible attack team set = \emptyset . If so, increase s_m by 1 and go to (ii). Otherwise proceed.
- (3) Select the best attack team. For each candidate, perform the following.
 - (i) For each resource type, compute expected resource welfare of the local society using equation (5) after the team completes the attack task.
 - (ii) Compute a combined resource welfare using equation (6).
- (4) Choose the best team that produces the highest combined resource welfare.

Fig. 2. Algorithm of resource welfare based task allocation(Pseudo code)

5. 시뮬레이션 실험 결과

자원복지 기반 로봇-태스크 할당방식의 퍼포먼스를 다음의 두 할당방식과 비교하는 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 각 할당방식의 퍼포먼스는 공격태스크를 완료함으로써 확보되는 유틸리티의 총합으로 측정된다.

- (1) 탐욕적 작업할당방식(Greedy task allocation) : 탐욕적 작업할당방식은 탐지된 표적에 대해 공격태스크 수행이 가능한 팀들 가운데 최단 공격반응시간을 제공하여 최대 유틸리티를 확보하는 팀에게 공격태스크를 할당한다. 팀 구성 로봇들이 표적 공격에 사용하는 자원은 특정한 규칙 없이 무작위로 분담하여 소모한다.
- (2) 최단공격시간 기반 작업할당방식(Shortest time based task allocation) : 이 작업할당방식은 탐욕적 작업할당방식과 동일하나 공격태스크 수행로봇들은 팀의 자원복지 향상을 고려하지 않되 3장 ‘다’에서 언급한 방법대로 자원의 단순한 균등보유를 위해 자원을 소모한다.

시뮬레이션의 전장(battle space)은 50km×50km이고, 최초 자원보유량이 각기 다른 세 종류의 로봇이 투입되어(Table 1 참조) 3시간 동안 임무를 수행한다. 세 종류의 자원이 사용되며, 표적의 자원요구량은 0~10 유닛 사이에서 무작위로 주어진다. 표적을 파괴함으로써 획득되는 유틸리티는 수식 (8)에 따라 주어진다.

$$U_{t_j}(\tau) = V_{t_j} \left(\frac{1}{1 + 0.01\tau} \right) \quad (8)$$

로봇의 손실(파괴, 고장 등으로 임무수행 불가)은 임무수행시간 동안 0.15의 확률로 발생한다. 자원복지 기반 작업할당방식에 사용된 파라미터는 $\alpha_k = 1.5 \forall k$, $\alpha_k = 1/3 \forall k$ 으로 주어졌다. 각 할당방식의 퍼포먼스는 시뮬레이션 50회의 평균값이며, 각 시뮬레이션마다 동일한 환경(표적 수량/위치/유틸리티와 로봇팀 수량/구성/최초 자원량 등)을 적용한다.

Table 1. Type and initial resource quantity of robots in simulation

로봇	최초 자원량(유닛)		
	A	B	C
로봇I형	30	50	0
로봇II형	50	0	60
로봇III형	10	30	30

5.1 모의실험 I

첫 번째 모의실험에서는 30개의 표적이 주어진 가

운데 로봇의 수를 4~10대로 변화시켜가며 각 방식의 퍼포먼스를 평가하였다. Table 2는 각 작업할당방식에 따라 로봇팀이 획득한 평균 유틸리티를 나타낸다. 최단공격시간 기반 방식은 전반적으로 탐욕적 할당방식에 비해 더 많은 유틸리티를 획득하였고, 자원복지 기반 방식 또한 대등하거나 우수한 퍼포먼스를 보였다. Fig. 3은 탐욕적 할당방식 대비 각 할당방식의 퍼포먼스 향상도를 나타낸다. 4 로봇과 8 로봇이 투입된 경우 자원복지 기반 작업할당방식은 가장 높은 퍼포먼스 향상도를 보였으나 나머지 두 경우에는 저조하였다. 모의실험 I의 결과 자원복지 기반 작업할당방식은 다른 방식에 비해 월등한 퍼포먼스를 제공하지는 못하지만 일부 상황에 대해 최상의 결과를 생산하므로 로봇팀의 퍼포먼스를 향상시킬 수 있는 잠재력이 있음을 확인하였다.

Table 2. Utilities obtained by each task allocation method in case study 1

	Greedy	Shortest	Welfare
4 robots	435	441	444
6 robots	689	698	688
8 robots	828	852	874
10 robots	1138	1151	1137

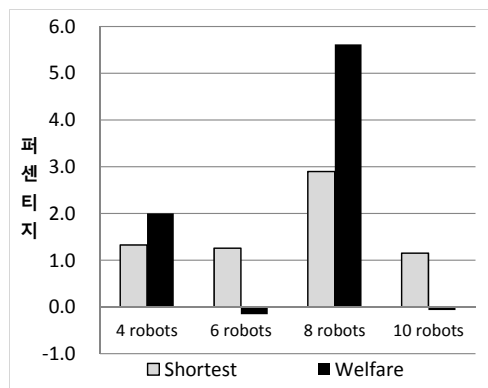


Fig. 3. Performance improvement of shortest time and resource welfare based task allocation in case study 1

5.2 모의실험 II

두 번째 모의실험에서는 9대의 로봇으로 구성된 팀에게 다양한 표적의 수를 제공해가며 각 방식의 퍼포

먼스를 평가하였다. Table 3은 각 작업할당방식이 획득한 평균 유틸리티를, Fig. 4는 각 할당방식의 퍼포먼스 향상도를 나타낸다. 일부 경우를 제외하고는 최단 시간 기반 작업할당방식과 자원복지 기반 작업할당방식이 탐욕적 할당방식 보다 나은 퍼포먼스를 보였으며, 그 중 자원복지기반 할당방식은 대부분의 경우 최상의 퍼포먼스를 제공하였다. 모의실험I의 결과와 마찬가지로 자원복지 기반 할당방식이 월등한 퍼포먼스 향상 효과를 가져오지는 않으나 전반적으로 로봇팀의 퍼포먼스를 향상시킬 수 있는 가능성을 제공한다.

Table 3. Utilities obtained by each task allocation method in case study 2

	Greedy	Shortest	Welfare
10 targets	427	429	425
20 targets	748	748	762
30 targets	1028	1047	1064
40 targets	1265	1295	1300

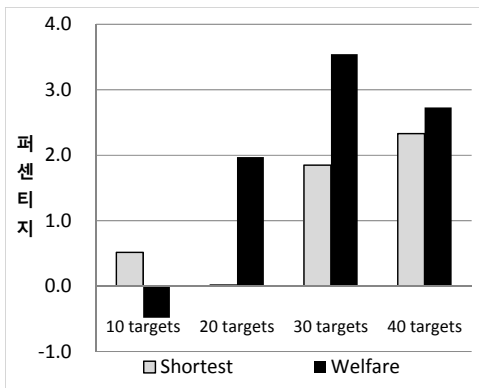


Fig. 4. Performance improvement of shortest time and resource welfare based task allocation in case study 2

5.3 모의실험 III

세 번째 모의실험에서는 9대의 로봇과 30개의 표적이 사용되었으며 로봇의 통신능력(반경)과 탐지능력(반경)을 변화시키면서 퍼포먼스를 측정하였다. Fig. 5와 6은 통신/탐지반경에 따른 각 할당방식의 평균 획득 유틸리티를 나타낸다. 일반적으로 통신/탐지반경이 증가할수록 각 방식의 획득 유틸리티는 증가하였다. 이는 통신반경이 증가하면서 지역통신그룹에 보다 많

은 로봇을 포함하여 공격팀 구성이 용이하기 때문이며, 탐지반경이 증가할수록 표적 탐지율이 증가하여 탐지된 다수의 표적에 대해 동시에 신속하게 작업할당 프로세스를 수행할 수 있기 때문이다. 자원복지 기반 할당방식은 모든 통신/탐지능력에서 다른 두 방식 보다 우수한 퍼포먼스를 제공하였다. Fig. 7과 8은 각 할당방식의 퍼포먼스 향상도를 보여준다. 자원복지 기반 할당방식은 탐욕적 할당방식 대비 통신능력 변화에서 평균 5.0%, 최대 6.1%의 퍼포먼스를 향상시켰고, 탐지능력 변화에서 평균 5.5%, 최대 8.1%의 퍼포먼스를 증가시켰다. 모의실험III의 결과 자원복지 기반 할당방식은 기존 방식에 비해 시스템 퍼포먼스를 개선시키는 효과를 가져올 수 있음을 확인하였다.

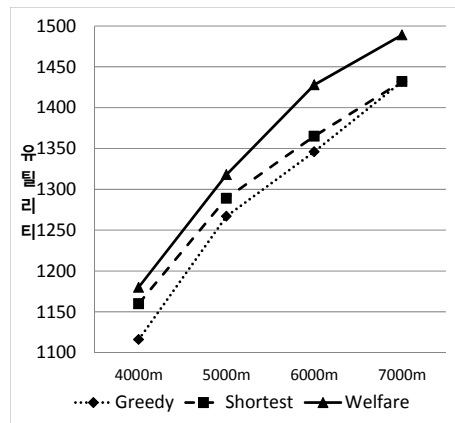


Fig. 5. Utilities obtained by each task allocation method according to robot communication range

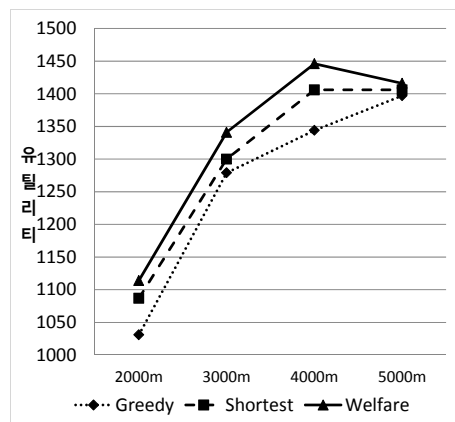


Fig. 6. Utilities obtained by each task allocation method according to robot sensing radius

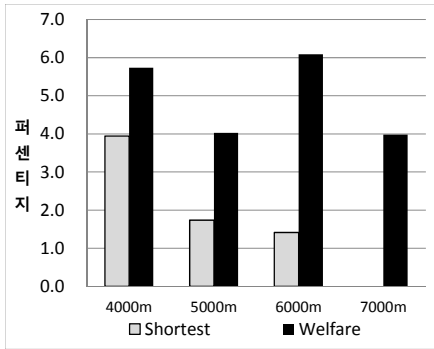


Fig. 7. Performance improvement of shortest time and resource welfare based task allocation according to robot communication range

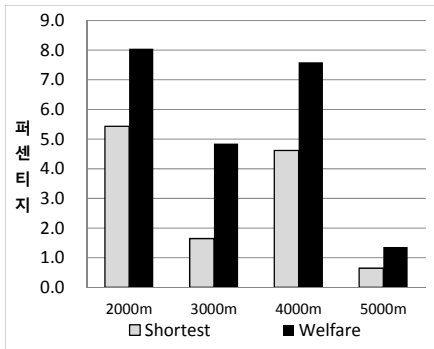


Fig. 8. Performance improvement of shortest time and resource welfare based task allocation according to robot sensing radius

6. 결론

본 논문에서는 불확실한 환경에서 한정된 자원으로 탐색 및 공격임무를 수행하는 로봇팀의 작업할당방식을 연구하였다. 로봇팀은 한정된 자원을 효율적이고 균형적인 방법으로 소모함으로써 자원 고갈에 의한 작업수행 불가 로봇을 최소화하고 많은 로봇을 가용한 상태로 보유할 수 있으며, 따라서 불확실한 환경에서 발생하는 다양한 이벤트에 즉시 대응하여 시스템의 퍼포먼스를 향상시킬 수 있다. 로봇팀의 효율적인 자원관리를 위해 자원복지 개념을 도입하였으며, 이를 태스크 할당의 의사결정 기준으로 활용하는 새로운 로봇-태스크할당방식을 제안하였다. 제안된 방식은 시뮬레이션 환경에서 기존 작업할당방식과 비교 분석되

었으며, 여러 경우에서 시스템 퍼포먼스를 향상시키는 효과를 확인하였다. 향후 연구는 기존 탐욕적 할당방식의 장점과 자원복지 기반 방식의 강점을 결합하여 효율적 자원관리와 동시에 신속한 공격반응시간을 고려한 작업할당방식을 제안할 필요가 있다. 또한 자원복지 기반 방식의 파라미터가 시스템에 미치는 영향을 분석하여 시스템 환경에 따라 최적의 파라미터를 선정, 적용할 수 있는 연구가 수행되어야 한다.

References

- [1] Shima, T., Rasmussen, S., Sparks, A., and Passino, K., "Multiple Task Assignments for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms," *Comput. Oper. Res.*, Vol. 33, pp. 3252-3269, 2006.
- [2] Lemaire, T., Alami, R., and Lacroix, S., "A Distributed Task Allocation Scheme in Multi-UAV Context," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1157-1162, 2004.
- [3] Sujit, P. B., George, G. M., and Beard, R., "Multiple UAV Coalition Formation," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2010-2015, 2008.
- [4] Vig, L., and Adams, J. A., "Multi-Robot Coalition Formation," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 22, No. 4, pp. 637-649, 2005.
- [5] Kim, Min-Hyuk, "Resource Welfare Based Task Allocation for Robot Team with Resource Constraints," *Proceedings of the Korea Institute of Military Science and Technology Conference*, 2013.
- [6] Kim, Min-Hyuk and Lee, Seokcheon, "Resource Welfare Based Distributed Task Allocation Scheme for Multiple UAVs," *Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference*, 2010.
- [7] Gerkey, B. P., and Mataric, M. J., "Sold! Auction Methods for Multi-Robot Coordination," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 18, No. 5, pp. 758-768, 2002.
- [8] Atkinson, A. B., "On The Measurement of Inequality", *J. Econo. Theory*, Vol. 2, pp. 244-263, 1970.
- [9] Sen, A. K., and Foster, J. E., "On Economic Inequality," *Oxford: Clarendon Press*, 1997.