

# 경로가 주어진 임무 상황에서 분산 임무할당 알고리즘의 적용 방안 연구

김성훈  
국방기술품질원

## Application for en-Route mission to Decentralized Task Allocation

Sung-Hoon Kim  
Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 복수 무인기를 운영하는 환경에서 분산 임무 할당 알고리즘의 사용은 임무를 지휘 통제하는 중앙 관제 시스템이 없기 때문에 중앙 집중식 임무 할당 방식에 비해 무인기의 임무 중 탈락 이벤트로부터 보다 큰 강건성을 가지게 된다. 또한 무인기 스스로 상황을 인지하고 통신을 통해 임무를 재할당 하는 방식이기 때문에 임무 변경 또한 더욱 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있다. 하드웨어 성능이 향상되고 비용이 감소함에 따라 임무 환경에서의 복수 무인기 운용에 대한 필요성이 증대되고 있으며, 작전 환경이 넓고 단일 고장에 강건한 분산 임무 할당 알고리즘에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다. 본 논문은 대표적인 분산 임무할당 알고리즘인 CBBA를 기반으로 하여, 기존에 점 좌표로 단순화 되어 설정된 임무 종류를 점 좌표에 대한 감시 업무와 선형 경로의 정찰 임무로 구분하여 보다 현실에서의 임무 상황을 반영할 수 있도록 발전시켰다. 본 연구의 결과로서 복수무인기가 과다 임무가 부여된 상황에서 동일한 임무위치 및 보상을 갖는 상황을 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 최종 보상합(global reward)을 비교한다.

**Abstract** In an environment that operates multiple UAVs, the use of a decentralized task allocation algorithm has more robustness from a single failure of UAV on the mission because there is no central command center. In addition, UAVs have situational awareness and redistribute tasks among themselves, which can expand the mission range. The use of multiple UAVs in a mission has increased as the agent hardware has decreased in size and cost. The decentralized mission-planning algorithm has the advantages of a larger mission range and robustness to a single failure during the mission. This paper extended the type of mission the uses CBBA, which is the most well-known decentralized task allocation algorithm, to the point mission and en-route mission. This will describe the real mission situation that has the purpose of surveillance. A Monte-Carlo simulation was conducted in the case of multiple agents in the task-rich environment, and the global rewards of each case were compared.

**Keywords** : Uav, CBBA, Decentralized, En-Route Mission, Monte-Carlo

### 1. 서론

기술의 발전과 더불어 현대의 전투 체계도 큰 변화를 맞이하게 되었다. 기존에 재래식 무기를 통하여 전장을 장악하여 영토를 확보하던 전투에서 적의 주요 시설 및

인사를 국지적으로 공격함으로써 적의 전투의지 및 기능을 마비시키는 외과수술적 전투로 양상이 변화함에 따라 작전 지역의 정찰의 중요성이 크게 증대되었다. 하드웨어의 크기와 가격의 하락은 무인기의 임무 및 통신반경을 향상시켰고 이로 인하여 복수 무인기의 운용 효율성이

\*Corresponding Author : Sung-Hoon Kim(Defense Agency for Technology and Quality)

email: shkim86@dtqaq.re.kr

Received May 25, 2020

Accepted July 3, 2020

Revised June 19, 2020

Published July 31, 2020

향상되었다. 더불어 분산 임무할당 알고리즘의 발달 [1~4]은 운용 가능한 무인기의 수와 임무 환경을 획기적으로 증가시키게 되었는데 분산 임무 할당 알고리즘의 경우 중앙 임무 처리가 필요없기 때문에 적진에서도 주어진 임무 수행이 가능하며, 발생하는 돌발 상황에도 유연하게 대처할 수 있다. 또한 중앙 시스템의 공격으로부터 전체 시스템이 불능이 되어버리는 위험으로부터 안전하기 때문에 임무 강건성이 증대되는 장점이 있다. CBBA는 복수 무인기 분산 임무할당 알고리즘 중 가장 널리 연구되는 알고리즘 중 하나로 임무가 서로 종속적인 관계에 있거나 무인기의 통신 환경에 제약이 있는 경우 등 다양한 운용 조건 하에서 적용할 수 있도록 발전되었다.[5~6]

무인기에 할당되는 임무는 크게 정찰 및 감시로 구분할 수 있으며, 이를 구분하는 기준은 표적의 형태로 나눌 수 있다. 정찰의 경우 넓은 범위에서 적의 동향을 파악하는 것으로 무인기에 장착된 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 이용한 지역 정찰을 예로 들 수 있다. 감시는 특정 표적을 지속적으로 파악하는 것으로 고정 표적 혹은 이동 표적을 감시함에 따라 그 범위가 구분될 수 있으나 임무 범위와 비교했을 때 점 표적으로 정의할 수 있다. 같은 임무라 하더라도 정찰임무의 경우 그 경로가 지정되어 있기 때문에 임무의 시작점과 끝점의 서로 다르며, 점 표적을 추적하는 감시임무의 경우 표적을 중심으로 선형화하는 궤적을 주로 그리기에 임무의 시작점과 끝점이 동일하다 하겠다.

본 논문에서는 선형 궤적을 갖는 임무를 추가하여 CBBA 알고리즘을 확장함으로써 점 표적만 할당하여 임무를 수행한 기존 CBBA와 어떠한 차이를 발생시키는지 확인하도록 한다. 이를 위해서 다음의 가정을 설정하였는데 첫째, 궤적을 갖는 임무는 선형으로 무인기가 임무에 대해서 경매(bidding)에 참여할 때 자신이 받게 될 보상에 대하여 예측이 가능하도록 하였다. 둘째로 경로 임무를 수행하는 무인기의 경우 새로운 임무할당 프로세스에 참여하지 않음으로써 중간에 새로운 임무에 할당되지 않도록 하였다.

2장에서는 본 논문에서 다룰 문제를 정의한 뒤, 임무 할당 알고리즘 중 가장 널리 사용되는 CBBA에 대하여 설명하도록 한다. CBBA 알고리즘의 가장 큰 구성요소인 번들 생성 단계와 충돌 해소 단계를 설명함으로써 알고리즘의 전체적인 이해를 도모한다. 이후 임무 형태를 기존의 점방식에서 선형으로 발전한 en-Route CBBA를 제시하고 기존 CBBA 알고리즘과의 차이점을 밝힌다. 이

후 3장에서는 두 알고리즘을 동일한 조건에서 몬테 카를로 방법을 사용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 얻은 결과를 비교하며 4장에서 최종 알고리즘에 대한 평가를 내린다.

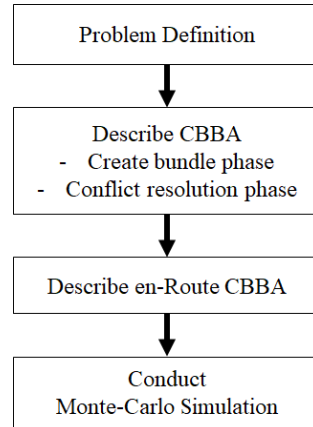


Fig. 1. Configuration of research model

## 2. 본론

### 2.1 임무할당문제

#### 2.1.1 문제 정의

임무할당의 목표는  $N_t$ 개의 임무를  $N_u$ 개의 무인기에 전체 보상값이 최대가 되도록 임무의 중복 없이 할당하는 것이다. 각 무인기에 할당할 수 있는 최대 임무 수량을  $L_t$ 라고 할 때, 임무할당문제를 다음과 같이 선형계획법(Integer Programming)으로 표현할 수 있다[7].

$$\max \sum_{i=1}^{N_u} \left( \sum_{j=1}^{N_t} c_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) x_{ij} \right) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} \leq L_t \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_u} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} = N_{\min} = \min\{N_t, N_u L_t\} \quad (4)$$

무인기  $i$ 가  $j$ 번째 임무에 할당되었을 때,  $x_{ij} = 1$ , 그렇지 않은 경우 0으로 표시한다.  $\mathbf{x}_i$  벡터는  $j$ 번째 요

소가  $x_{ij}$  인 0 또는 1로만 구성되는 벡터이다.  $\mathbf{p}_i$  는 무인기  $i$ 에 할당된 임무를 순차적으로 나타낸 벡터이다. 점수 함수  $c_{ij}(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}_i) \geq 0$  는 무인기에 할당된 임무  $\mathbf{x}_i$  나 무인기 경로  $\mathbf{p}_i$  에 대한 함수로 표현할 수 있으며, 항상 0 이상의 값을 갖으며, 보통의 경우 동선의 길이, 임무 완료 시간, 임무 수행 지연 시간에 관한 식으로 표현된다.

## 2.2 CBBA

CBBA의 중요한 컨셉으로는 경매 알고리즘(Auction Algorithm)과 의견 합치 알고리즘(Consensus Algorithm)으로 나눌 수 있다. 옥션 알고리즘은 [26]에 의해서 처음 제안된 알고리즘으로 단일 임무 할당 알고리즘으로 고안되어 현재의 복수 임무 알고리즘으로 발전하기까지 많은 변형과 발전을 거친 알고리즘이다. 경매 알고리즘의 경우 지속적으로 무인기들이 임무에 대하여 수행 시 부여되는 보상과 비용에 대하여 계산하고 경매에 참여함으로써 가장 큰 점수(global score)을 얻게 된다. 분산 임무 할당 알고리즘의 경우 각 무인기는 자신의 입장에서의 비용을 계산하여 경매에 참여하기 때문에 각 무인기가 할당된 자신의 임무가 중복될 수 있는데 이를 해결하기 위한 절차가 의견합치 알고리즘이다. 무인기들은 이 과정에서 상황인식(SA : Situational Awareness)를 하게 되는데 CBBA에서는 완벽한 SA가 아닌 각자 상황 파악을 기반으로 자신의 임무 계획을 설정하고 주변 무인기와의 정보 교환을 통해서 임무 계획에 충돌이 발생할 시 정보를 수정하여 준 최적의 결과를 얻게 된다[8].

### 2.2.1 번들 생성(Bundle Construction)

CBBA의 첫 번째 과정은 번들 생성과정이다. 번들 생성 과정에서 무인기는 주변에 인지하고 있는 임무들을 자신이 기 생성한 번들에 순차적으로 추가하면서 보상합이 커지는 방향을 찾는데 이 보상이 가장 크게 증가하는 위치에 주위에 추가할 임무가 없거나 무인기가 추가할 수 있는 최대한의 임무 개수만큼 추가할 때까지 임무를 추가시킨다.

각각의 무인기는 번들(bundle)과 경로(path)의 두 가지 종류의 리스트를 생성한다. 번들은 임무가 추가되는 순차적으로 생성되는 리스트이고 경로는 무인기가 임무를 수행하는 순서에 따라 나열되는 리스트이다. 따라서 하나의 경로에 대하여 다양한 번들이 존재 가능하다.

### 2.2.1 충돌 해소 (Conflict Resolution)

충돌 해소 단계에서는 무인기간에 통신을 통하여 각 임무에 대하여 다른 무인기가 초과 점수를 비당한 경우 해당 무인기에서 그 임무 및 그 이후 임무를 탈락시키게 된다. 본 과정에서 3개의 벡터를 이용하게 되는데 입찰 경매가 목록(winning bids,  $\mathbf{y}_i \in R_+^{N_t}$ ), 입찰 무인기 목록(winning agents,  $\mathbf{z}_i \in I^{N_t}$ ), 그리고 시간 스탬프(time stamp,  $\mathbf{s}_i \in R^{N_u}$ )이다. 시간 스탬프의 기록을 통해 어느 무인기의 기록이 가장 최신 업데이트 기록인지를 판단하며, 이를 기반으로 자신의 정보를 업데이트 할 것인지, 초기화 할 것인지, 유지할 것인지를 판단하게 된다.

## 2.3 en-Route CBBA

### 2.3.1 개요

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 기존의 CBBA 알고리즘의 임무 형태를 변형시킨 것으로서 점으로만 설정되어 있던 임무를 경로를 포함하도록 한다.

임무에 경로가 포함됨으로써 무인기의 임무 수행 묘사가 실제와 더욱 더 가까워지게 된다. 실제로 무인기의 임무 프로파일은 최단시간안에 정찰하고자하는 대상으로부터의 위협으로부터 안전한 경계까지 이동하여 경계를 따라 대상을 모니터링하는 방향으로 구성되는 것이 대부분이다. 때문에 정찰 임무는 다음 임무와 연계된 경로가 주어진 형태로 나타내는 것이 정확하다. 경로가 주어짐으로써 임무를 수행하고 난 뒤에 다음 임무까지의 평균 거리가 감소하게 되며 이는 다음 임무 지역에 주어진 시간안에 도달할 가능성을 높이게 되고 전체적인 보상값을 높이는 결과를 가져오게 된다. 임무 경로를 이동하는 과정에서 추가의 연료 소모가 생기지만 이를 다음 임무까지의 짧은 거리로 만회하기 때문에 전체적인 보상합은 증가함을 기대할 수 있다.

Table 1. Comparisons between Original and en-Route CBBA

Criteria	Original CBBA	en-Route CBBA
Maneuver during mission	impossible	possible
Fuel consumption during mission	small	large
Mean distance to next mission	long	short

아래 왼쪽의 그림과 같이 기존에 이전 임무( $x_p$ )와 다음 임무( $x_n$ ) 사이에 점으로 설정되어 있는 임무를 시작 지점( $x_{cs}$ )과 종료지점( $x_{ce}$ )을 구분함으로써 무인기가 임무지점에 도착한 뒤 임무시작과 함께 임무 종료지점으로 이동하게 된다. 이 과정에서 무인기는 장착된 센서를 이용하여 목표지점에 대한 정찰을 수행하게 되며, 임무를 완수하고 난 뒤 다음 임무를 할당받아 이동한다.

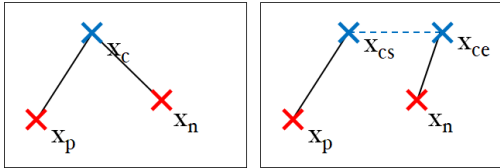


Fig. 2. en-Route task configuration

### 2.3.2 점수 부여 방안

앞서 제시한 바와 같이 변들 생성 과정에서 각 무인기는 자신의 변들에 포함되지 않은 수행 가능한 임무 가운데에서 가장 높은 점수를 획득할 수 있는 임무를 자신의 변들에 할당하게 되는데 이 때 점수는 임무를 수행 완료할 경우 얻게 되는 보상과 임무를 수행하면서 발생하는 비용의 차로 계산하게 된다. 추가하려는 임무의 위치를  $x_c$ , 추가 임무 전에 수행 예정인 임무 위치를  $x_p$  라고 할 때 비용은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{prev} = |x_c - x_p| p_f \quad (5)$$

$p_f$ 는 연료 패널리티 값이며, 임무 간 거리에 비례하여 비용이 발생하므로 나타낼 수 있다. 변들에 추가하는 임무 다음에 수행되는 임무의 위치를  $x_n$  라고 할 경우 동일하게 발생하는 비용은

$$C_{next} = |x_n - x_c| p_f \quad (6)$$

로 나타내게 된다. 기존에 하나의 좌표로 설정된 임무의 좌표를 직선의 경로로 표현하게 되면 경로의 시작과 종료 지점이 생성되게 되는데 이를 각각  $x_{cs}$ ,  $x_{ce}$  로 나타낼 수 있다. 위에서 설정한 (5), (6) 수식은 다음과 같이 변경된다.

$$C_{prev} = |x_{cs} - x_p| p_f \quad (7)$$

$$C_{next} = |x_n - x_{ce}| p_f \quad (8)$$

이와 더불어 추가되는 비용은 경로를 따라서 임무를 수행할 때 소모되는 연료에 대한 내용으로

$$C_{route} = |x_{ce} - x_{cp}| p_f \quad (9)$$

로 표현되게 되며,  $C_{route}$ 는 추가되는 임무의 점수를 계산할 때 받게되는 보상에서  $C_{prev}$ 와 더불어 차감되게 된다.

## 3. 시뮬레이션 결과

위 모델을 바탕으로 임무를 변경한 뒤 시뮬레이션을 수행한 뒤 기존의 CBBA와 임무 보상 합산값을 비교해 보았다. 시뮬레이션은 아래의 표와 같은 사양을 갖는 컴퓨터에서 MATLAB 기반으로 수행하였다.

Table 2. Simulation Environments

Category	Specification
CPU	i7-6700HQ 2.60GHz
RAM	16.0GB
GRAPHIC	NVIDIA GeForce GTX 950M
OS	Windows10
PROGRAM	MATLAB R2020a

동일한 무인기와 동일한 위치와 보상을 갖는 임무를 설정한 뒤 임무 중 절반을 경로를 포함하는 감시 정찰 임무로 할당함에 따라 무인기 부대가 수행할 수 있는 임무의 수보다 많은 임무가 발생할 경우 기존의 CBBA 알고리즘에 비해서 얻게되는 점수의 변화를 살펴보았다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하여 100회의 알고리즘 수행을 한 뒤 각각 얻게되는 모든 점수의 평균 수치 및 분산 정보를 비교하였다. 무인기는 총 6대로 운영하였으며, 모두 공중에서 임무를 수행하는 UAV로 설정하였다. 초기 임무는 12개로 임무지역 내 임의의 위치에 위치하게 되며, 무인기는 시뮬레이션 초반 수행한 임무 할당 알고리즘에 따라 초기 임무지로 이동하게 된다. 임무는 두가지 종류로 구분이 되는데 50%의 임무는 점 표적에 도달하여 일정 시간동안 머무르게 되면 보상을 얻는 감시 업무와 경로를 진행하여 종료 지점에 도달하여야 보상을 얻는 정찰 업무로 구분하였다. 임무의 시작지점과 종료지점의 거리는 임무구역의 최대거리의 약 10%로 설정하였다.

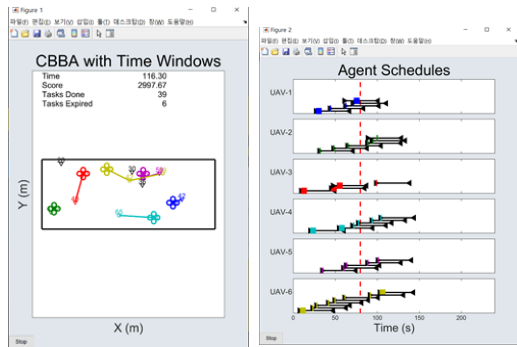


Fig. 3. simulation environment (MATLAB)

두 CBBA는 모두 10초의 간격으로 알고리즘을 수행 하면서 주위의 변화된 상황에 따라 임무를 재할당하게 된다. 또한 새로운 임무가 매 10초마다 임의의 장소에 발생함으로써 무인기가 시뮬레이션 시간동안 지속적으로 임무를 할당받을 수 있도록 하였다. 위의 시뮬레이션 조건을 정리하면 다음과 같다.

Table 3. Simulation Initial Condition

번호	Condition	Value
1	Number of agents	6
2	Initial mission quantity	12
3	Mission allocation frequency	10s
4	New mission create duration	10s
5	Number of created mission	4/10s
6	Simulation Time	200s

이를 기반으로 시뮬레이션을 수행한 결과는 Table. 4와 같다.

Table 4. Simulation Result (Earning Score)

	mean	covariance
Original CBBA	5297.3	283.67
en-Route CBBA	4921.4	324.19

두 경우에 대하여 완료한 임무의 수의 값은 다음과 같다.

Table 5. Simulation Result (tasks completion quantity)

	task done (mean)	covariance
Original CBBA	66.06	3.2778
en-Route CBBA	66.93	3.5767

위의 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있듯이 en-Route CBBA에서 최종적으로 얻는 점수의 크기가 기존의 CBBA에 비하여 약 7% 정도 작음으로 확인할 수 있다. 이 7%의 점수차이는 무인기가 임무지역에 도달한 뒤 임무 종료지점까지의 이동하면서 발생하는 연료 패널티로 인한 감소값으로 파악할 수 있다. 또한 두 알고리즘의 임무 완수 개수를 비교하면 en-Route CBBA가 약 1.3%정도 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 오차범위 안에 있는 값으로 거의 차이가 없다고 볼 수 있다. 임무의 종료 지점이 랜덤하게 생성되기 때문에 임무 수행하면서 하는 이동이 다음 task를 수행하는데 긍정적인 영향을 주지 않았음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존에 점 좌표로만 주어졌던 CBBA 알고리즘의 임무를 선형 경로를 갖는 임무로 다양화함에 따라 발생하는 변화에 대하여 살펴보았다. 임무 수행 중의 이동으로 인한 연료 소모로 인해서 전체적으로 얻는 점수의 값을 낮아지는데 반하여 임무를 완수하는 개수의 차이는 거의 없음을 확인하였다. 즉 임무의 종료를 위해 하나의 임무로부터 멀어지는 만큼 랜덤하게 생성된 다른 임무로부터 가까워지기 때문에 큰 차이가 발생하지 않은 것으로 해석이 가능하다. 만약 임무의 연계를 고려하여 임무가 설정되었다면 en-Route CBBA의 임무 완수 개수가 보다 높았을 것으로 예상할 수 있다.

센서의 발달과 더불어 무인기를 인공위성을 대체하는 정찰 자산으로의 중요성이 커짐에 따라서 기존에 단순화된 임무 역시 이에 맞춰 변화하고 구체적인 상황을 묘사할 수 있어야 한다. 알고리즘의 효율성과 더불어 세부적으로 알고리즘을 구성하고 있는 요소들의 현실 반영 정도가 높아짐에 따라서 알고리즘을 향후 발전할 무인기 체계 운영에 적용할 가능성이 더욱 높아질 수 있을 것이라 기대한다.

#### References

[1] D. P. Bertsekas, "The auction algorithm for assignment and other network flow problems", The Practice of Mathematical Programming, Vol.20, No.4, pp.133-149, Jul. 1990.  
DOI : <https://doi.org/10.1287/inte.20.4.133>

- [2] Butenko, Sergiy, Murphey, Robert, Pardalos, "Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms", p.364, Springer, 2003, pp.23-41.  
DOI : <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3758-5>
- [3] D. Turra, L. Pollini, and M. Innocenti, "Fast unmanned vehicles task allocation with moving targets," *IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, Nassau, Vol.4, pp. 4280-4285, Dec. 2004.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/CDC.2004.1429424>
- [4] M. Alighanbari and J. How, *Robust and Decentralized Task Assignment Algorithms for UAVs*, Ph.D. Dissertation, MIT, pp3-4, 2007
- [5] K. Kim and H. Choi, "A decentralized task allocation approach for cooperative transportation missions," *Control automation robotics vision (ICARCV)*, IEEE, Singapore, pp. 1479-1483, Dec 2014.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064534>
- [6] L. Johnson, H. Choi, and J. P. How, "Convergence analysis of the hybrid information and plan consensus algorithm," *American control conference (ACC)*, IEEE, Portland, pp. 3171-3176, June 2014.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859325>
- [7] H. L. Choi, L. Brunet, J. P. How, "Consensus-Based Decentralized Auction for Robust Task Allocation", *IEEE Transactions on robotics*, Vol.25, No. 4, pp 912-926, Aug. 2009.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2022423>
- [8] S. H. Kim, H. L. Choi, "CBBA-Based Task Planning for Persistent Mission with Refueling", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference*, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Jeong-Sun, pp 460~465, Apr. 2012.

김 성 훈(Sung-Hoon Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 항공우주공학과(공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

임무 할당 알고리즘, RAM분석