

유무인복합체계 구성 및 협업통제 자동화

이호주^{*1)} · 김도현¹⁾ · 박원익¹⁾ · 최준성¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 국방AI센터

Autonomous Collaboration Control for Manned-Unmanned Complex Systems and Its Compositions

Hojoo Lee^{*1)} · Dohyun Kim¹⁾ · Wonik Park¹⁾ · Joonsung Choi¹⁾

¹⁾ Defense AI Center, Agency for Defense Development, Korea

(Received 19 July 2024 / Revised 26 August 2024 / Accepted 10 October 2024)

Abstract

The emergence of MUCS(Manned-Unmanned Complex System), incorporating numerous robots surpassing human's control capabilities, is inevitable on future battlefields and necessitates revolutionary robot operation technology. Since MUCS should be structured over the current command and control networks in Korean military binding its constituent elements ranging from small echelons to joint forces, various types of MUCS configurations and manned-unmanned teaming(MUM-T) types are also defined. Then a methodology for robot collaboration with aiming at real-time situation response is proposed. The method is basing on the situational response decision-making model in order to operate multiple robots cooperatively in respond to serial events occurring in real-time using the concept of control measure which is the origin/object triggering a task. In addition, a set of decision-making rules is devised and compared to decisions optimized by the model. Through illustrative experiments the suggested method is checked to be viable for realizing MUM-T and operating multiple robots in MUCSs.

Key Words : Manned-Unmanned Complex System(유무인복합체계), MUM-T(유무인협업), Autonomous Decision Making (자율의사결정)

1. 서론

미래 전장에는 인간의 직접적인 통제/제어 능력과 범위를 초과하는 다수의 로봇을 포함한 유무인복합체

계의 등장에 불가피하며, 이는 획기적인 로봇체계 운용기술을 요구한다. 본 논문은 유무인복합체계 내 인간과 로봇 간의 효과적인 협업과 관련하여 먼저 유무인복합체계 구성과 그 지휘통제 방안을 제시하고, 이를 토대로 유인 및 로봇을 상호 협력적으로 운용하기 위한 유무인협업(MUM-T) 모델과 로봇의 지속적인 임무 수행을 가능하게 해주는 협업통제 의사결정 자동

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

화 방법을 제안한다.

최근 유무인복합체계에 대한 관심 증대와 함께 한국 국방부는 유무인복합체계를 ‘AI 기반 초연결 네트워크로 유인체계와 로봇을 통합하여 생존성, 치명성, 작전템포 향상으로 전투 작전 효율을 증대하는 복합 운용 체계’(출처 : AI 기반 유무인복합체계 구축 추진 계획, 국방개혁실, '23.7.21)로 정의하고 있다. 이에 유무인복합체계가 소수의 운용자 통제/제어 능력을 벗어나는 많은 수의 로봇들을 포함할 경우에는 그에 대한 효과적인 운용 방법의 개발/적용을 통하여 그 운용효과 발휘를 보장할 필요가 있다.

유무인복합체계는 그 구성 요소/개체들을 한데 묶는 지휘통제 네트워크를 토대로 구현 가능한데, 그 지휘통제 구축 방안은 한국군의 현 지휘통제체계를 토대로 해야 하며, 향후 다양한 유무인복합체계 운용까지 가능하도록 육·해·공군 소부대급부터 합동군까지 그 고려 대상에 포함한다. 먼저 유무인복합체계 지휘통제 관점에서 유무인복합체계 구성 유형을 3가지로 정의하고, 유무인협업(MUM-T : Manned-Unmanned Teaming)을 구현하기 위한 협업유형 7가지를 제시한다. 유무인복합체계의 효과적인 운용과 지속적인 임무 수행을 위한 협업통제 의사결정 자동화 방법은 최초 임무계획 간에 고려하지 못한 사건 또는 우발상황 발생 시 실시간 상황대응 관점에서 고안된 것으로써 운용자 개입 없이도 실시간 상황대응 의사결정을 자동적으로 생성하고, 제안된 임무달성도 최적화 모델을 통하여 그 의사결정 품질을 개선함으로써 궁극적으로 유무인복합체계의 운용효과 증대에 기여할 수 있다.

2. 유무인복합체계 구성 및 지휘통제

2.1 유무인복합체계 구성 유형

유무인복합체계는 로봇과 전투원을 포함하는 유인체계를 합한 것인데, 이를 구성하기 위해서는 먼저 로봇 운용체계의 구성을 이해할 필요가 있다. 로봇 운용체계는 통상 C2(Command & Control, 지휘통제), GCS (Ground Control System, 지상통제스테이션), OCU (Operational Control Unit, 운용통제기), RCU(Remote Control Unit, 휴대형 조종기), UGV(Unmanned Ground Vehicle, 지상무인차량), UxV(Unmanned X Vehicle, 로봇), DL(Data Link)로 구성된다. 여기에 전투원을 포함한 유인체계를 추가하여 유·무인 팀 내지 체대를 구

성할 수 있는데, 이를 유무인복합체계(MUCS: Manned-Unmanned Complex System)라고 할 수 있다.

유무인복합체계는 그 운용 방식, 즉 운용 주체와 방법(지휘통제, DL 등)에 따라서 Fig. 1과 같이 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 그림의 유형 1은 현재 로봇 운용 간에 흔히 볼 수 있는 운용 방식으로서 유무인복합체계 내의 전투원 또는 유인체계 탑승자가 직접적인 통신망을 통하여 로봇을 운용하는 형태이다. 통상적으로 RCU는 그 운용 대상을 가시권 내에 두며, 반면 OCU는 확장된 통신 성능을 기반으로 비가시권에서도 로봇 운용이 가능하다.

유무인복합체계 내에 편성된 로봇의 효과적인 운용 및 유인체계와의 협업을 위해서는 어떤 로봇에 대하여 통신거리, 작전반경, 전장상황 변동 등에 적절히 대처하기 위해 그 운용주체를 변경함이 요구된다. 이는 곧 GCS·OCU·RCU 간의 통제/제어권 이양의 필요성을 부각시킨다. 또한, GCS·OCU·RCU를 통한 로봇 운용 시 상황공유를 위해서는 기존 지휘통제체계의 적절한 수준/범위의 연동성도 고려해야 함은 필수적이다.

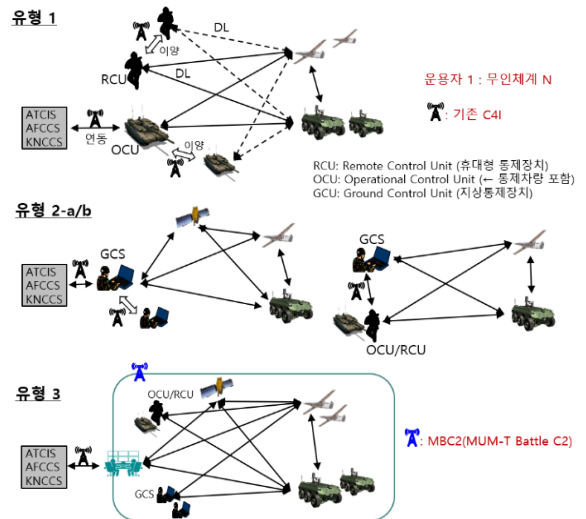


Fig. 1. Types of MUCS composition

유형 2는 GCS 기반의 로봇 운용 또는 유무인협업을 구현하는 방식이다. GCS는 통상 고정적인 로봇 운용스테이션을 의미하며, OCU/RCU 대비 확장된 통신 성능을 기반으로 고성능의 로봇을 운용함에 적합하고, 그 운용 대상 역시 OCU/RCU 보다 고가치 표적이 통상적이다. 따라서 임무 수행 간에 큰 비중을 차지하는

GCS 기반의 로봇은 지엽적인 운용반경을 갖는 OCU/RCU 보다 기존 지휘통제체계와의 연동성은 더 필수적이며, 그 운용효과가 운용 대상을 넘어 유무인복합체계 제대 이상에까지 영향을 미치기 때문에 상황공유는 매우 중요하다. 하지만, 실시간 변화하는 전장정보 및 그 상황 파악에 있어서 현장에 근접한 OCU/RCU 가 유리한 경우가 있을 수 있으므로 이와의 이양 문제 역시 고려할 필요가 있다.

마지막으로, 유형 3은 기존의 지휘통제체계와는 별도의 유무인복합체계 전용 C2 네트워크(예, MBC2: MUM-T Battle C2)을 구축하여 로봇을 운용하거나 유무인 협업을 구현하는 방식이다. 이 전용 C2 방식은 유형 1과 2 대비 매우 향상된 상황정보 공유가 가능할 것이며, 이양 관련 융통성이 증대된다. 하지만 기존 지휘통제체계와의 연동성에 있어서는 두 체계가 각각 독립적으로 구축/운용됨에 따른 연동 소요 식별 및 이를 해소해야 하는 부가적인 요구사항이 존재한다. 또한, 유형 3은 유형 1과 2에서는 검토할 필요가 없는 지휘통제체계의 중복성 문제도 감수해야 한다.

2.2 유무인복합체계 지휘통제

한국군은 3군이 각각의 지휘통제체계를 구축, 운용 중에 있다. 따라서, 기존 지휘통제체계를 유지/발전시키고 중복성과 비용절감 관점에서 앞서 살펴본 유무인복합체계 유형 중에서 별도의 로봇 운용 전용망을 구축하는 유형 3을 본격적으로 고려하기에는 제한이 있을 수 있다. 이는 아직 그에 대한 타당성과 효용성이 검증되지 않음에도 기인한다.

향후 유무인복합체계 운용을 위한 그 C2 구축에 있어서, 한국 육군의 경우에는 군단에서 대대급에 이르는 ATCIS(Army Tactical Command Information System)를 근간으로 하는 현 지휘통제체계를 활용 가능하다. 이는 ATCIS와 핵심적인 로봇 운용정보를 연동 가능한 GCS 및 필요시 OCU/RCU를 위한 지엽적인 통신망을 추가로 구축하여 Fig. 2와 같이 육군 유무인복합체계 C2를 제시한다. 그림에서 GCS 편성 체대를 연대~군단급으로 고려했고, 사각형은 신규로 구축해야 할 GCS/OCU/DL를 나타내며, 점선은 기존 지휘통제체계와의 연동 소요를 의미한다. 이와 함께 운용주체 변경, 즉 GCS-GCS, GCS-OCU/RCU 간의 이양 등도 함께 고려되었다. 로봇 전담부대 또는 일부 유무인복합체계 제대를 대상으로 필요시 유형 3의 전용망을 부분적으로 추가할 수도 있을 것이다.

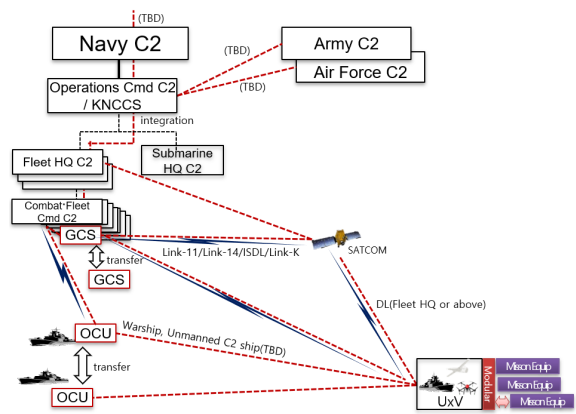


Fig. 3. South Korea's Navy MUCS C2

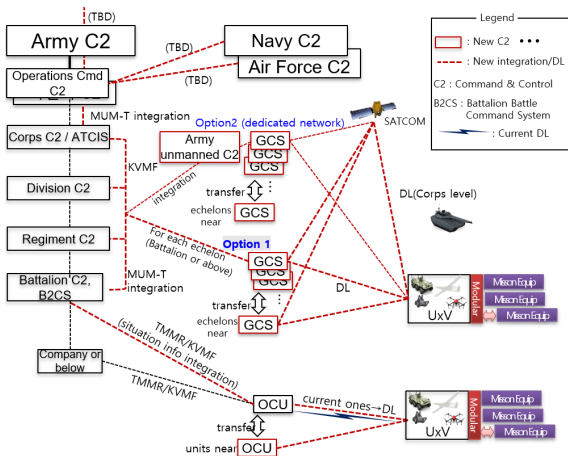


Fig. 2. South Korea's Army MUCS C2

한국 해군은 그 편성 및 무기체계에 적합한 지휘통제체계 KNCCS(Korea Naval Command & Control System)를 구축, 지속적으로 발전시켜 왔다. 따라서, 이를 기반으로 육군과 유사한 개념으로 KNCCS와의 연동 소요, 추가적인 GCS/DL, GCS-GCS 간의 이양 등을 해결할 수 있는 해군 유무인복합체계 C2를 Fig. 3과 같이 제시한다. 하지만, 해군의 제대/편성이 육군과는 매우 상이함에 따라서 GCS 편성을 위한 대표급 체대를 선정함에 있어서 보다 신중할 필요가 있다.

한국 해군이 한반도 동해, 남해 및 서해를 각각 관장하는 함대사령부를 두고 있고 그 예하에 전투·전단·전대를 편성하고 있음을 감안할 때, 본 논문에서는 전투·전단·전대~함대사령부에 GCS를 편성/운용함이 적

절할 것으로 제안한다. 따라서, GCS를 기반으로 전략적 로봇을 장거리 원격 운용하고, 그 하위 제대급인 구축함, 전투함 등에 OCU를 편성/운용함이 효과적일 것이다.

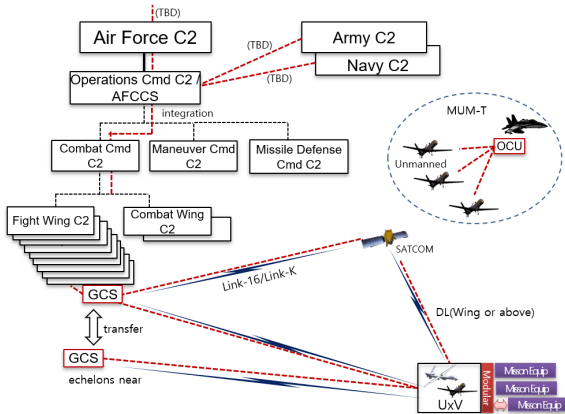


Fig. 4. South Korea's Air Force MUCS C2

한국 공군의 현 지휘통제체계는 AFCCS(Air Force Command & Control System)이다. 따라서, 공군 역사이를 기반으로 Fig. 4와 같이 유무인복합체계에 편성된 로봇의 운용반경을 고려하여 공군 작전사령부 예하 전투비행단 위주로 GCS를 편성/운용함이 적절하다. 만일 한반도 영역 전체를 대상으로 로봇을 운용해야 할 경우에는 GCS를 전투사령부에 편성해야 하나 그 운용을 위한 인프라와 유지비용을 감안 시 효용성 관점의 추가적인 검토가 필요하다. 로봇이 궁극적으로 유인체계를 대신·지원하는 역할에 충실할 수 있도록 공군 핵심 전투력(전투기)의 운용반경 등을 고려하여 통신성능, AFCCS-GCS 간 연동 소요, GCS-GCS 간의 이양 등을 해결해야 한다. 만일 기존 지휘통제체계에 의한 로봇 통제/제어 및 연동성이 해소되지 않을 경우에는 별도의 GCS/DL를 추가로 구축함이 요구된다.

현재 한국군의 각 군 간 지휘통제체계 연동에 있어서 일부 제한이 있고, 그 연동 수준/범위에 대한 효용성도 완전히 검증되지 않은 상황에서 3군 확대·연동 가능한 합동 유무인복합체계 C2를 정립함에는 추가적인 검토와 검증이 요구된다. 하지만, 앞서 제시한 각군의 유무인복합체계 C2 정립 개념을 단순 통합하고, 미래 JADC2(Joint All-Domain C2)를 감안함으로써 Fig. 5와 같이 3군 확대·연동 가능한 합동 유무인복합체계 C2 구축 방안을 제시할 수 있다. 이때 각 군에서 가

장 전투 효용성이 클 것으로 판단되는 GCS 편성 제대 및 그와 관련된 상황공유를 중심으로 연동성을 우선적으로 구현함으로써 합동성 및 실효성을 보장하고 이후 확대해야 할 것이다.

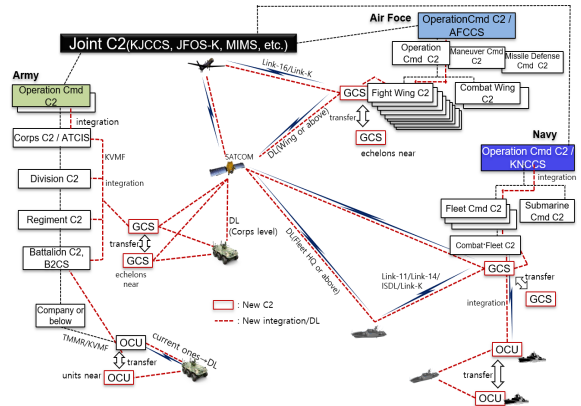


Fig. 5. South Korea's Joint Forces MUCS C2

3. 협업통제 및 유무인협업

3.1 통제수단 기반의 협업통제

다중로봇을 포함하는 유무인복합체계의 효과적인 운용, 즉 임무계획, 임무할당, 임무계획 스케줄 기반 임무실행 자동화 등에 대한 연구는 과거 활발히 수행되었고, 실제 시스템에도 효과적으로 적용 중에 있다^[1]. 반면, 유무인복합체계는 10여년 전부터 관심을 끌기 시작해서 그와 관련된 일부 개념들이 아직 정립 중이다. 또한, 다중로봇 협업운용 관련 분야에 대한 연구는 현재 본격적으로 진행 중이고, 한국군도 최근 그에 대한 관심 증대와 함께 연구를 수행 중이다. 관련 연구 중 일부를 살펴보면, 로봇의 능력 및 과업 소요 추정을 기반으로 다수의 로봇들에게 최적 과업 할당을 가능하게 하는 프레임워크와 부분적 미지의 환경 하에서 최적 경로 탐색을 위한 인간-로봇 매칭/이동 보조 방법론 등이 제안된 바 있다^[2,3]. 또한, Guzzi와 Liu는 다중로봇 시스템에서 로봇들의 협업적 이동을 위한 알고리즘^[4]과 더불어 로봇이 자율적으로 실패를 인식하고 보상을 추구하여 운용효율을 향상시키는 조정메커니즘^[5]을 제안하였다.

유무인복합체계 내 편성된 로봇들에 대하여 통제수단을 부여/관리함으로써 무인-무인 간 협업, 유인-무인

간 협업, 체계 내 팀 구성 등 다양한 형태의 협업통제가 가능하다. 본 논문에서 제안하는 통제수단(Control measure)은 어떤 로봇에게 부여된 지향 또는 주목해야 할 과업의 원천(대상)이며, 사건(또는 우발상황)이 발생되지 않는 한 최초 임무계획에 의거 부여된 통제수단의 순서대로 관련 임무(과업들)가 순차적으로 진행된다. 특히, 통제수단은 임무계획 단계에서 미처 고려하지 못한 사건 발생 시 그 상황대응에 있어서 효과적인 해결 수단이며, 실시간 로봇에 부여, 삭제 등 관리함으로써 다양한 형태의 무인-무인 또는 무인-유인 협업을 유도할 수 있다.

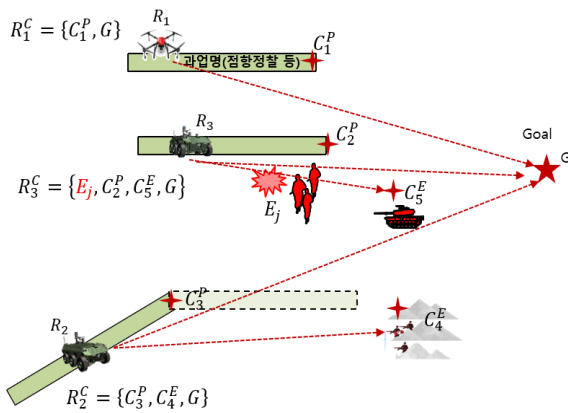


Fig. 6. Collaboration control by control measures

Fig. 6은 로봇에 대하여 통제수단을 부여/관리하는 개념을 예시적으로 보여준다. 어떤 로봇 R_i 에게 부여된 통제수단을 집합기호 {}를 사용하여 표기하고, 그 원소인 통제수단들은 유무인복합체계에 주어진 목표 달성 간에 R_i 가 순차적으로 수행해야 할 과업들이다. R_i 에 부여된 각 통제수단은 그림에서 R_i 와 점선(화살표)으로 연결하여 표시하였고, 녹색 사각형은 R_i 가 수행 중인 과업(실선) 또는 예정 과업(점선)을 의미하는데, R_i 가 현재 수행 중인 과업의 지향점(종료점, 통제수단)에 대해서는 단순화 차원에서 그 화살표를 생략한다.

통제수단 표기 및 부여/관리에 대하여 구체적으로 설명하면, 3대의 로봇들은 최초 임무계획에 의거 각각 $R_1^C = \{C_1^P, G\}$, $R_2^C = \{C_3^P, C_4^E, G\}$, $R_3^C = \{C_2^P, C_5^E, G\}$ 와 같이 통제수단을 부여받았다. 그런데 임무 진행 중에 예기치 못한 사건(E_j : 적 병사 출현)이 발생되고, 그

에 대한 상황대응 의사결정 결과로서 R_2 가 상황대응하게 됨으로써 R_3^C 에 E_j 가 실시간적으로 추가된 상황을 그림에서 볼 수 있다.

R_i^C 내 원소의 순서는 R_i 가 수행해야 할 과업들의 진행 순서를 의미하는데, 표적, 지형지물, 아군 개체 등 임무에 영향을 미치는 다양한 것들이 통제수단으로 지정될 수 있다. 로봇에 통제수단을 부여/관리함에 있어서 두 가지 기본적인 개념이 있는데, ‘전장정보의 통제수단화’와 ‘통제수단의 사건화’이다.

먼저, 전장정보의 통제수단화는 여러 전장정보 중에서 목표 달성 내지 임무 수행에 영향을 준다고 판단되는 핵심적인 정보(표적, 지형지물 등)를 통제수단으로 등재함을 말하며, 등재된 이후에야 비로소 로봇에 부여 가능하다. 반면, 통제수단의 사건화는 적, 표적과 같은 통제수단이 시간의 흐름에 따라 점차 R_i 에 근접하게 되고 마침내 피아 감시권 또는 사정권 내에 도달되는 시점에서 상황대응해야 할 사건으로 간주됨을 의미한다. 사건 발생 시 누군가가 신속히 그 사건에 상황대응하여야 함은 지극히 당연하다.

사건화된 통제수단은 운용자 또는 상황대응 의사결정에 의거 선택된 R_i 에게 최우선적으로 부여된다. 즉, R_i^C 의 첫째 자리에 추가됨으로써 기존에 하던 과업을 중단하고 사건에 상황대응하게 되는 것이다. 통제수단의 사건화에 있어서 그 대상은 기존 통제수단 외에도 Fig. 6에서와 같이 통제수단으로 간주되지 않았던 돌발적인 상황(적 출현, 피격 등)도 될 수 있다. Fig. 6의 통제수단 표기 중에서 $C_k^{P/E}$ 에 대해 설명하면, k 는 통제수단 일련번호이고, P (Place)는 통제수단의 속성이 공간(장소)임을, E (Enemy)는 적 또는 표적임을, F (Friendly)는 아군 개체임을 의미한다. G (Goal)는 임무의 최종 목표점 내지 종착점이다. 지형지물, 표적, 아군 개체 외에도 어떤 통제수단과 연관된 시간적인 제약(완료시점 등)을 통제수단에 추가할 수 있다.

3.2 유무인협업(MUM-T) 유형

로봇에 통제수단을 부여/관리함으로써 다양한 형태의 유무인협업(MUM-T)을 유도, 구현할 수 있다. 본 논문에서는 대표적인 유무인협업 유형을 Fig. 7과 같이 7가지로 정의한다. 그림의 (a)-(g)는 각각 **집중 분담**, **정보 보완 대체**, **동기**, **예비협업**이며, 좌측은 무인-무인, 우측은 무인-유인 간 협업을 예시적으로 표현한다.

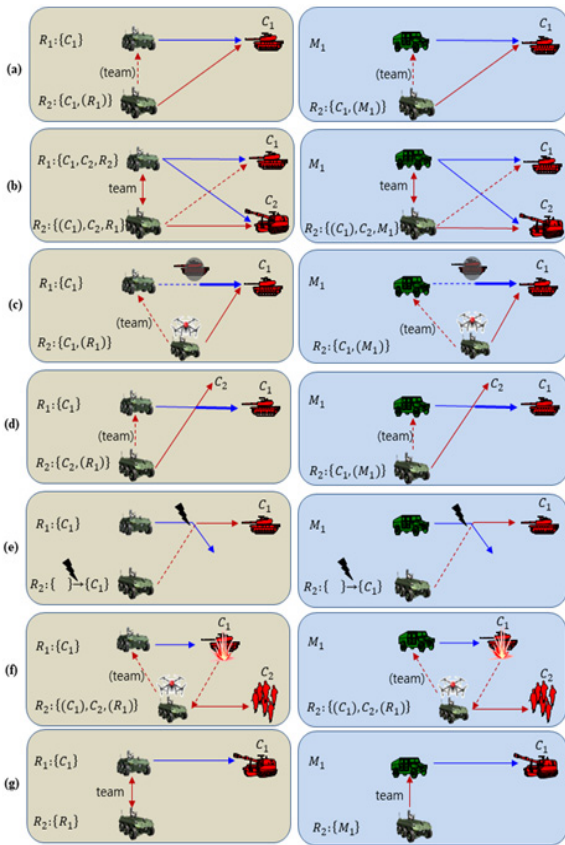


Fig. 7. Types models of MUM-T

각 협업유형에 대하여 구체적으로 설명하면, 먼저 집중협업(a)은 어떤 통제수단에 대하여 2대 이상의 로봇들에게 그 통제수단을 동시 부여하거나, 그러한 로봇과 함께 유인체계 역시 그 통제수단을 주목함으로써 노력을 집중시키거나 과업 수행시간을 단축하려는 협업 방법이다.

분담협업(b)은 2개 이상의 통제수단에 대하여 2대 이상의 로봇들을 팀으로 엮거나, 각 로봇에 그 통제수단 중 1개 이상을 부여하거나, 그러한 로봇과 함께 유인체계 역시 1개 이상의 통제수단에 주목함으로써 노력을 공동하거나 과업부하 경감 내지 위험 분담을 추구하는 협업 방법이다.

정보협업(c)은 어떤 통제수단에 대하여 로봇 A에게 통제수단을 부여한 상황에서 로봇 B가 그 통제수단에 대해 획득한 정보를 A와 공유하거나, 그러한 정보를 유인체계가 공유함으로써 보다 효과적인 과업 수행 또는 생존성을 증대하려는 협업 방법이다.

보완협업(d)은 2개 이상의 통제수단에 대하여 2대 이상의 로봇들이 서로 다른 통제수단을 부여받은 상황에서 한 로봇이 수행한 과업의 과정 또는 결과가 타 로봇의 과업 수행에 도움 내지 유리한 여건을 조성하거나, 그러한 로봇과 함께 하는 유인체계에 그 효과를 제공하려는 협업 방법이다.

대체협업(e)은 1개 이상의 통제수단에 대하여 그를 부여받은 로봇이 과업을 수행하던 도중에 어떤 사유로 더이상 과업을 지속할 수 없는 상황이 발생될 때 타 로봇이 그 통제수단을 그대로 부여받아 중단된 과업에 투입되거나, 유인체계가 수행하다가 중단된 과업을 로봇에게 통제수단으로 부여함으로써 과업 수행을 대신시켜려는 협업 방법이다.

동기협업(f)은 2개 이상의 통제수단에 대하여 로봇 A가 한 통제수단을 부여받아 수행하는 과업의 개시 또는 종료한 시점을 타 통제수단을 부여받은 로봇 B의 과업을 개시 또는 종료함과 연계시키거나, 유인체계가 수행하는 어떤 과업의 개시 또는 종료 시점을 타 통제수단을 부여받은 로봇의 과업과 동기·연계시키는 협업 방법이다.

마지막으로, 예비협업(g)은 1개 이상의 통제수단에 대하여 로봇 A가 어떤 통제수단을 부여받아 과업을 수행함에 있어서 타 로봇이 A 자체를 통제수단으로 부여받아 A를 지원하거나, 어떤 유인체계를 로봇에게 통제수단으로 부여함으로써 로봇으로 하여금 예비 내지 지원적 역할을 도모시키는 협업 방법이다.

유무인협업은 수동 또는 자동적인 통제수단 부여 방법을 통하여 유도/통제 가능해야 하는데, 먼저 유무인복합체계에 포함된 다중 로봇을 대상으로 운용자에 의한 수동적인 통제수단을 부여/관리를 위한 통제수단 연산 및 관련 인터페이스(User Interface)를 우선적으로 구현함이 필요하고, 이후 의사결정 자동화 방법과 연계하여 운용자 개입 없이도 구현될 수 있다.

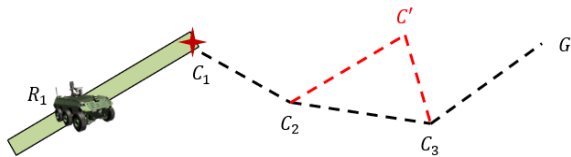
3.3 통제수단 연산

운용자의 통제/제어 능력을 초과하지 않는 적정 수의 로봇들에 있어서 그 운용효과는 운용자가 직접 관여할 때 극대화될 수 있음은 당연하다. 따라서 앞서 기술한 유무인협업의 실질적인 구현에 있어서 운용자가 직접 통제수단을 부여/관리 가능한 방법은 필수적으로 개발, 적용되어야 한다. 이에 다중 로봇을 대상으로 하는 수동적인 통제수단 부여/관리 방법으로서 ‘통제수단 연산’ 개념과 방법을 제안한다.

다수의 로봇들에 대한 통제수단 부여/관리를 위하여 고안된 통제수단 연산 방법은 1대의 로봇은 물론 여러 로봇들에 대해서도 실시간적으로 동시에 통제수단의 부여/삭제가 가능하다. 또한, 사전에 통제수단으로 등재되지 않고 발생된 사건에 대해서도 신속히 통제수단화함으로써 처리 가능하다.

R_i 에게 부여된 통제수단 R_i^C 가 $\{C_1, C_2, \dots, C_k, G\}$ 일 때, 통제수단 연산은 운용자 개입 없이도 자동적인 의사결정에 의해서도 가능해야 함을 감안하여 2가지 전제 조건이 필요하다. 첫째, 통제수단의 신규 등재는 운용자가 직접 수행하여야 한다. 이는 어떤 표적, 지형지물 등이 임무 수행에 있어서 영향을 줄 수 있다고 판단, 통제수단으로 등재하는 주체가 운용자이어야 하고 이러한 판단은 전술·전략적 식견을 요구하기 때문이다. 둘째, R_i^C 에 통제수단을 추가하거나 R_i^C 의 원소(통제수단)에 대하여 배치순서를 최신화할 때 R_i 와 C_k 간의 거리, $dist(R_i, C_k)$ 가 적은 순서로 재배치한다. 즉, $dist(R_i, C_k) > dist(R_i, C_{k+1})$ 이면 $exch(C_k, C_{k+1})$ 를 실행한다. 여기서 $exch(a, b)$ 는 입력 원소 2개의 순서를 서로 바꾸어 주는 함수이다. 이러한 전제 하에서 운용자가 R_i 에게 신규로 부여하고자 하는 통제수단을 C' 라고 할 때 통제수단 연산규칙은 다음과 같다. 이 때 C' 는 사건화되기 이전 상태이다.

- ① 현재 진행 중인 과업이 있을 경우, 그 이후의 위치에 C' 를 추가(이는 C' 가 사건화되지 않았기 때문임)
- ② 목표(G) 이전의 위치에 C' 추가 후 순서(k) 갱신 (C' 는 목표 달성 이전에 수행되어야 함)
- ③ $R_i^C + C'$: $dist(R_i, C_k) < dist(R_i, C')$ 를 충족하지 않는 C_k 에 대하여 $\min dist(R_i, C_k)$ 인 C_k 앞에 C' 삽입 후 순서 갱신(신규 통제수단을 추가함에 있어서 R_i 의 과업 수행 간 이동거리 최소화, Fig. 8 참조)



$$R_1^C = \{C_1, C_2, C_3, G\} \rightarrow R_1^C = \{C_1, C_2, C', C_3, G\}$$

Fig. 8. Distance based control measure insertion

- ④ $R_i^C - C_k$: R_i^C 에서 C_k 삭제 후 순서 갱신
- ⑤ $R_i^C - C_1$: 현재 과업 진행 중인 통제수단(C_1)을 삭제할 경우에는 그 과업을 중단 후 삭제하고 순서 갱신 이후 다음 과업 개시
- ⑥ $R_i^C - G$: 목표(G)의 부여/삭제 가능(단, 삭제 시 R_i 는 C_k 에서 과업이 종료되므로 제대/팀의 임무 종결점으로 이동 여부 추가 고려 필요)
- ⑦ 식 (1)에 의거 다수의 로봇들에 대하여 C' 동시 부여

$$(R_1^C, R_2^C, \dots, R_i^C) \otimes C' = (R_1^C + C') \wedge (R_2^C + C') \wedge \dots \wedge (R_i^C + C') \quad (1)$$

- ⑧ 식 (2)에 의거 다수의 로봇들에 대하여 C_k 동시 삭제

$$(R_1^C, R_2^C, \dots, R_i^C) \oslash C_k = (R_1^C - C_k) \wedge (R_2^C - C_k) \wedge \dots \wedge (R_i^C - C_k) \quad (2)$$

4. 협업통제 자동화 및 임무달성도

4.1 실시간 협업통제 : 상황대응 의사결정

최근 다중로봇의 효과적인 운용을 위한 의사결정 방법론에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 의사결정 방법은 인간의 개입 없이도 다중로봇의 지속적인 운용을 위해 반드시 요구되는 기술이다. 그 중 일부 연구 내용을 살펴보면, 부분적 예측 가능한 다중로봇 의사결정 문제에 있어서 그 계산 부하를 줄이기 위한 다단계 예견 알고리즘^[6]이 제안되었는데, 이 알고리즘은 여러 로봇 간의 협업 요구를 충족시키면서도 계산량을 크게 줄여준다. Viryasov는 지엽적인 정보를 기반의 의사결정 생성에도 불구하고 전반적인 로봇 간 협업 성과 달성을 보장하는 알고리즘과 함께 통신제약을 야기하는 환경에 대한 조정전략^[7]을 제안하였다. 또한, 다중로봇의 분산적 운용을 위하여 고안된 단순 룰(rule) 기반 행동 제어 프레임워크^[8]이 로봇들로 하여금 복잡도 높은 단체적 행동들을 추구할 수 있음이 시뮬레이션을 통해 확인되었다. 반면, Cheng과 Nakamura는 불확실한 환경 하에서 다중로봇 의사결정과 밀접히 연관된 적응형 과업 할당을 위한 조정 메커니즘, 분산제어 및 협업계획에 관련 구현전략^[9]을

제시한 바 있다.

유무인복합체계 내 다중로봇은 운용자의 직접적인 개입 없이도 운용될 필요가 있다. 이는 사건 발생 시 적절한 상황대응을 위한 의사결정을 운용자 개입 없이도 실시간적으로 자동적으로 생성함을 의미하는데, 앞서 기술한 통제수단 연산 및 유무인협업 유형을 토대로 실시간 상황대응 의사결정 모델을 제안한다.

최초 임무계획에 의거 R_i 는 부여받은 통제수단의 순서대로 해당 과업을 수행한다. 하지만, 사건(E_j)이 발생하게 되면 이에 반드시 대응해야 함이 요구되는데, 제안되는 의사결정 모델은 사건에 대한 대응, 즉 상황대응 의사결정을 운용자 개입 없이도 자동적으로 생성함으로써 임무를 지속하게 해주며 궁극적으로 임무달성도를 증대시켜 준다.

시점 t 에서 발생한 E_j 에 대한 각 R_i 의 상황대응 의사결정 D_{ijt} 는 R_i 가 현재 수행 중인 과업(통제수단)을 중단하고 E_j 에 상황대응 여부를 결정하는 이진변수이다. 만일 상황대응함으로 결정되면, 즉 $D_{ijt} = 1$ 이면 R_i 의 구체적인 상황대응 행동은 R_i 및 E_j 의 성능(무장, 감시 등)을 고려하여 로봇별로 기 정의된 상황대응 행동 옵션들 중 하나를 자동 선택한다.

D_{ijt} 결정 간 여러 요소를 고려하여야 하는데, 제안되는 모델은 사건에 상황대응하는 로봇(즉, $D_{ijt} = 1$)을 포함한 모든 R_i 의 기대보상(ER : Expected Reward, A_{ijt}) 값을 예측하고, 그 합이 최대화하기 위한 식 (3)의 상황대응도(SR : Situational Response, S_{jt})를 최대화하도록 D_{ijt} 을 결정한다. 기대보상 예측 간에 작전형태, 지휘관의도, 지형조건, 피아 능력 등의 다양한 요소들이 함께 고려되어야 함은 당연하다.

$$S_{jt} = \text{Max} \sum_i \sum_t A_{ijt}(D_{ijt}) \quad (3)$$

E_j 에 대한 상황대응 의사결정 이후 다음 사건 발생 시점 t' 에서 개별 R_i 가 아닌 제대 관점에서 과연 의사결정이 적절했는지를 평가할 필요가 있는데, 이는 식 (4)의 전장평가($P_{t'}$) 값을 예측함으로써 가능하다. 상황대응도 및 전장평가를 계상함에 있어서, 적과의 교전, 지뢰지대 탐지·개척 등과 같은 사건에 상황대응하는 경우에는 사건 종료 시까지 또는 다음 사건 발생될 때까지 특정 시간 간격을 두고 지속적으로 상황대응

수준 및 전장변화(피아손실, 표적 제압 등)를 반복 평가할 필요가 있는데, 이 역시 식에 반영되어 있다.

$$P_{t'} = \sum_i \sum_{t'} f_i(B_t - B_{t-1}) \quad (4)$$

기대보상, 상황대응도 및 전장평가 개념을 토대로 유무인복합체계의 임무달성 수준, 즉 임무달성도(MA)를 정의 가능하다. MA는 통제수단 부여/관리 방법에 의거하여 사건이 발생될 때마다 최대의 상황대응도와 전장평가를 주는 의사결정을 지속적으로 최적 결정함으로써 최대화 가능한데, 이를 모델링한 결과는 식 (5)과 같다. 식에서 w 는 전장상황을 적절히 고려하기 위한 가중치이고, J_A 는 임무달성도 계상 간 여전히 유효한 사건 셋(set)이다. 마지막으로, 식 (5)에 식 (3)를 대입함으로써 상황대응 의사결정에 의한 임무달성도 최대화 모델은 식 (6)과 같이 정의될 수 있다.

$$\text{Max } w_R \sum_{t'} \sum_{j \in J_A} (S_{jt'} - S_{j(t'-1)}) + w_B \sum_{t'} (P_{t'} - P_{t'-1}) \quad (5)$$

$$\text{Max } w_R \sum_{t'} \sum_{j \in J_A} \left(\sum_i \sum_t A_{ijt}(D_{ijt}) - \sum_i \sum_t A_{ijt}(D_{ijt}) \right) + w_B \sum_{t'} \left[\sum_i \sum_t f_i(B_t - B_{t-1}) - \sum_i \sum_t f_i(B_t - B_{t-1}) \right] \quad (6)$$

4.2 예시적 적용 및 분석

상황대응 의사결정 모델의 적용 예시를 통하여 이해를 돕고자 한다. 5대의 로봇(blue in Fig. 9)들로 구성된 MUCS에 있어서 4개의 통제수단(적, red)이 주어진 전제 하에 의사결정 모델을 적용하기 위한 피아 상황, 최초 임무계획, 개체 이동 등에 대한 구체적인 설정 조건은 다음과 같다.

- 로봇 및 통제수단의 위치는 좌측 상단을 (1, 1)로 시점으로 하여 우/하 방향으로 진행되는 셀의 좌표로 표시된다. $R_1 \sim R_5$ 및 $C_1 \sim C_4$ 의 최초 위치는 Fig. 9와 같이 각각 (14, 7), (4, 5), (7, 2), (10, 4), (6, 2), (4, 27), (13, 29), (17, 30), (14, 38)이다.
- 피아 개체들의 이동속도는 동일하며, 인접 격자(상, 하, 좌, 우)로만 이동 가능하다.

- 작전지역 내 통신 및 제어에 대한 무결성은 확보된 상태이다.
- 최초 임무계획에 의거, R_1, R_2, R_3 는 각각 통제수단으로 C_1, C_2, C_3 를 부여받았고, R_4, R_5 는 예비로써 각각 R_1, R_3 를 부여받았다. (즉, $R_1^C = \{C_1\}, R_2^C = \{C_2\}, R_3^C = \{C_3\}, R_4^C = \{R_1\}, R_5^C = \{R_3\}$)
- 통제수단(적) C_1, C_2 는 적 임무계획(가정)에 의거 각각 R_1, R_2 를 지향하고, C_3 는 좌표 (10, 20)으로 이동한다. 반면, C_4 는 예비로써 C_3 을 추종한다.

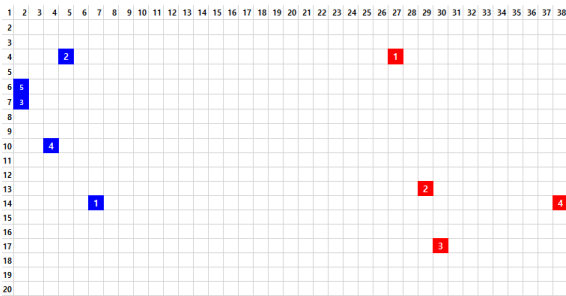


Fig. 9. Initial positions of R_i and C_k

Table 1. Criteria for measuring ER

계측 기준	내용	가중치(%)
적극성 (Proactiveness)	표적 대상 통제수단 할당 여부	w_1^G
신속대응성 (Agility)	사건에의 근접도	w_2^G
일관성 (Consistency)	사건의 통제수단 포함 여부	w_3^G
융통성 (Flexibility)	예비 보유 여부	w_4^G
협업성 (Collaboration)	집중협업 등 협업 구현 여부	w_5^G
지속성 (Persistence)	과업의 지속 여부	w_6^G
산개성 (Dispersibility)	전술적 산개 및 밀집 지양	w_7^G
전개성 (Deployability)	예비 로봇의 투입 여부 (적/표적의 통제수단 추가)	w_8^G

R_i 과 C_k 가 이동함에 따라 서로 근접하게 되고 특정 거리 이내로 들어오는 통제수단은 사건화되어 그에 대한 상황대응 의사결정이 요구된다. 이는 사건 발생 시마다 반복된다. 본 예시는 단순화를 위해 사건 발생을 3회로 한정하여 상황대응하고 그 이후로는 추가적인 사건 발생 없이 적에 교전 등으로 대응하게 된다. 또한, 상황대응도 계상에 있어서 사건에 대한 특정 시간 간격별 지속적인 평가 대신 사건 발생 시 한번만 계상한다.

상황대응 의사결정 모델의 최적화에 있어서 기대보상은 8개 기준에 의해 계측되는데, 그 내용 및 부여된 가중치는 Table 1과 같다. 기대보상 계측에 의한 상황대응도 계상 결과 최종적인 임무달성도(MA) 값은 최대 100점으로 정규화하였고, 전장평가 부분은 본 예시에서 고려하지 않는다.

사건 E_j 에 대한 상황대응 의사결정(D_{ijl})에 따른 전체 로봇들에 대한 그 기대보상 합은 8개 계측기준에 의거 R_i 의 기대보상(A_{ijl})을 계측하여 그 합인 상황대응도(S_{ij})를 식 (8)과 같이 계상할 수 있다. 식에서 $d(E_j, R_i), d_{\min}(E_j, R_i), C_k^E$, 및 $C(\delta)$ 은 각각 E_j 와 R_i 간의 거리, 식 (7)의 그 거리들 중에서 최소값, 속성이 적(Enemy)인 통제수단, 그리고 R_i 와의 이격거리가 δ 이 하인 타 R_i 의 수를 의미한다. $C_i(\delta)$ 가 2 이상일 경우는 R_i 자신을 포함하여 3대 이상의 로봇들이 특정 지점에 밀집되어 있음을 말하며, 이는 전술적 산개 정도가 바람직하지 않음을 의미한다. 실험 간에 $w_1^G, w_2^G, \dots, w_8^G$ 는 각각 10, 15, 8, 13, 16, 13, 10 및 15로 설정되었다.

$$d_{\min}(E_j, R_i) = \arg \min_{R_i} \| E_j - R_i \| \tag{7}$$

$$\sum_i \frac{1}{100} [w_1^G \times 1(\exists C_k^E \in R_i^C) + w_2^G \times 1(d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i)) + w_3^G \times 1(E_j \in R_i^C) + w_4^G \times 1(R_i \in \exists R_r: r \neq i) + w_5^G \times 1(E_j \in \exists R_r: r \neq i) + w_6^G \times 1(D_{ijl} \neq 1) + w_7^G \times 1(C_i(\delta) \leq 1) + w_8^G \times 1(D_{ijl} = 1 \wedge \exists R_r: r \neq i \in R_i^C)] \tag{8}$$

MA는 모든 사건들이 발생된 이후에 계상 가능하므로 실시간 의사결정 간에 적용하기에는 제한이 있다.

따라서, 별도의 상황대응 의사결정을 실시간 자동적으로 생성/추천하는 방법은 제시된 모델과 연계하여 유용하게 활용될 수 있으며, 이를 통해 협업통제 자동화가 가능하다. 본 논문에서는 Table 2와 같이 의사결정 생성 룰(DMR : Decision Making Rule)을 고안하고 그 적용 우선순위 설정한다. 어떤 룰을 충족하는 R_i 가 E_j 에 상황대응하게 되는 것이다. 룰 3에 있어서 ω_d 는 E_j 에 비록 최근접하지 않는 R_i 가 선택되는 경우를 위한 $d_{\min}(E_j, R_i)$ 대비 수용 가능한 이격 정도를 설정하는 가중치이며, 본 실험에서는 1.3을 적용하였다.

Table 2. DMRs and priority

DMR	조건	적용순위
Rule 1	$R_i : d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i) \wedge E_j \in R_i^C$	1
Rule 2	$R_r : d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i) \wedge R_i \in \exists R_r^C : r \neq i$	3
Rule 3	$R_i : E_j \in R_i^C \wedge d(E_j, R_i) > \omega_d \times d_{\min}(E_j, R_i)$	6
Rule 4	$R_i : d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i) \wedge E_j \notin R_i^C \wedge R_i \notin \forall R_r^C : r \neq i$	4
Rule 5	$R_i : E_j \in R_i^C \wedge d(E_j, R_i) \leq \omega_d \times d_{\min}(E_j, R_i)$	2
Rule 6	$R_r : d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i) \wedge R_r \in \exists R_i^C : i \neq r$	5
Rule 7	$R_i : d(E_j, R_i) = d_{\min}(E_j, R_i) \wedge E_j \notin \forall R_i^C$	7

Fig. 9의 피아 초기위치 및 설정 조건들, 그리고 Table 1의 기대보상 계측 방법에 의거 MA 최대값과 최소값을 주는 의사결정 결과는 각각 Table 3의 Case 1, 2와 같다. 반면, Table 2의 DMR에 의해 실시간적으로 추천(생성)되는 의사결정은 Case 3에 해당된다. 표에서 $R_i \parallel C_k$ 는 C_k 가 R_i 에 근접함에 따라서 사건화(E_j)됨을 의미한다. 3회의 사건 발생에 대한 상황대응 의사결정 이후 최종적인 R_i 및 C_k 위치는 Fig. 10~12과 같다.

Table 3에서 최대 MA를 주는 Case 1의 의사결정은 E_1, E_2, E_3 에 대하여 각각 R_5, R_3, R_4 이고, 최소값을 주는 Case 2의 의사결정은 각각 R_1, R_1, R_1 이다. DMR에 의거 각 E_j 에 대한 의사결정 추천 결과는 Case 3에 해당되며, 각각 R_2, R_5, R_2 이다. 마지막 Case 4는 운용자(육군 대령급 장교)가 선택한 의사결정이다.

Table 3. Eventualizations, decisions and MAs

구분	E_1		E_2		E_3		MA
	$R_i \parallel C_k$	D_{ijt}	$R_i \parallel C_k$	D_{ijt}	$R_i \parallel C_k$	D_{ijt}	
Case 1	$R_2 \parallel C_1$	R_5	$R_3 \parallel C_2$	R_3	$R_4 \parallel C_1$	R_4	90.7
Case 2	$R_2 \parallel C_1$	R_1	$R_3 \parallel C_2$	R_1	$R_2 \parallel C_1$	R_1	62.0
Case 3	$R_2 \parallel C_1$	R_2	$R_3 \parallel C_2$	R_5	$R_4 \parallel C_1$	R_2	76.0
Case 4	$R_2 \parallel C_1$	R_2	$R_3 \parallel C_2$	R_1	$R_4 \parallel C_1$	R_2	62.2

Case 1은 Table 1의 기대보상 계측 방법에 의거 MA가 90.7로 계상되었으며, 그 결과 최종적인 R_i 및 C_k 위치는 Fig. 10과 같다. Case 2의 MA는 60.0에 불과하며, 그 최종적인 위치(Fig. 11)는 전술적 관점에서도 바람직한 배치 형상이라 볼 수 없는데, 이는 R_i 가 서로 밀집해 있고 C_k 에 의해 포위당한 모습을 보이기 때문이다.

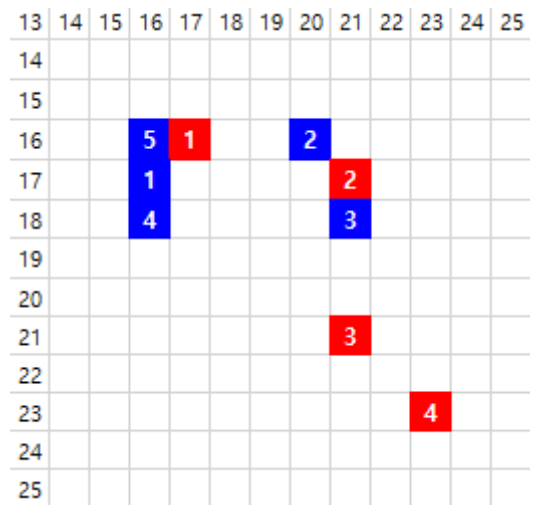


Fig. 10. Final positions of Case 1

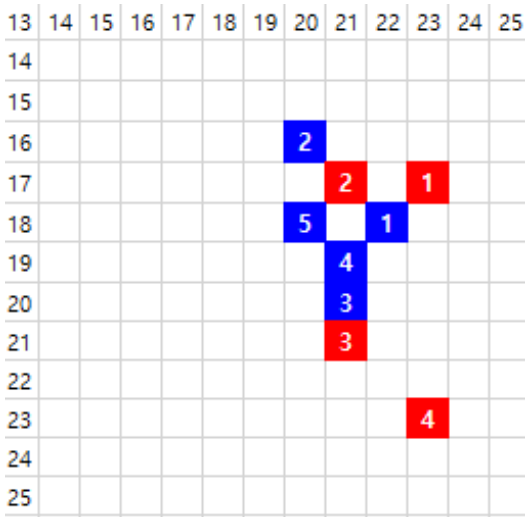


Fig. 11. Final positions of Case 2

Case 3의 DMR에 의거 추천된 의사결정 결과인 Fig. 12는 로봇들의 배치 형상에 있어서 일부 밀집된 경향은 있으나 적 대응, 교전 등의 관점에서 치명적인 문제가 있다고 보기는 어렵다. 그 의사결정 결과인 R_3 , R_5 , R_2 는 각각 Rule 4, Rule 2, Rule 5에 따른 것이며, MA는 76.0 수준에 불과하다.

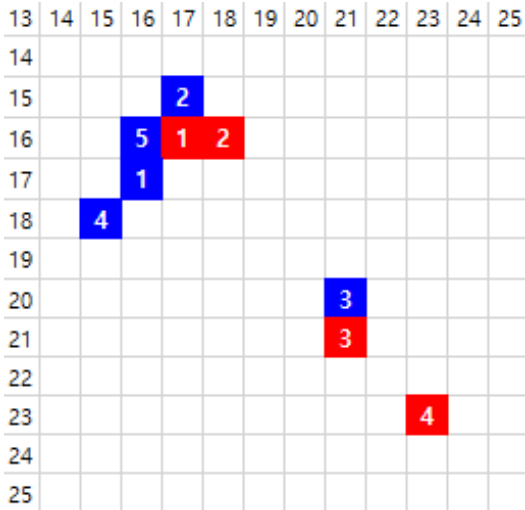


Fig. 12. Final positions of Case 3

마지막으로, Fig. 13은 Case 4의 의사결정 결과를 보여준다. 표에서는 확인되지 않으나 그 구체적인 과정

을 살펴보면, $E_1(C_1)$ 발생시 최근접한 R_2 가 상황대응하고, $E_2(C_2)$ 발생시 최근접은 R_3 이나 $R_1^C = \{C_1\}$ 인 R_1 으로 하여금 E_2 에 상황대응 한다. 이는 첫번째 의사결정에서 R_2 가 C_1 을 통제수단에 추가했으므로 R_1 이 C_1 을 통제수단으로 유지할 필요성이 약화되었기 때문이다. 이후 $E_3(C_1)$ 발생 시 R_2 로 하여금 상황대응하는데, 이는 이전 E_1 에 대한 의사결정(R_2)에 따라 C_1 을 지속 유지함이 효과적이라고 판단하기 때문이다. Case 4의 MA는 62.2에 불과하다. 하지만, 이것이 실제로 좋지 못한 의사결정이라고 보기에는 무리가 있다. 이는 제안된 기대보상 계측 방법이 전략·전술적 개념, 군사적 식견, 경험치 등을 모두 적절히 고려했다고 볼 수는 없기 때문이다. 제안된 상황대응 의사결정 모델과 DMR은 실제 상황에서 하나의 의사결정 대안으로써 활용될 수 있을 것이다.

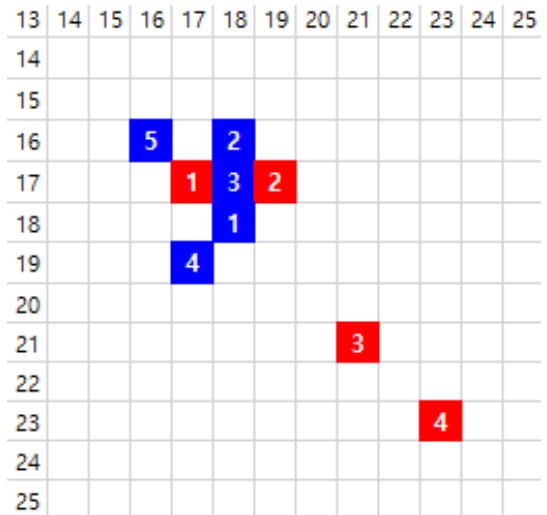


Fig. 13. Final positions of Case 4

5. 결론

가까운 미래에 등장하게 될 다양한 유무인복합체계에 포함된 다중로봇은 현재의 운전자 기반의 물리적인 통제/제어 능력과 범위를 벗어난 획기적인 운용통제 기술을 필요로 할 것이다. 또한, 향후 로봇을 포함하여 유무인복합체계를 어떻게 구성하고, 그를 통제/제어하기 위한 지휘통제 네트워크를 기존 유인체계용

지휘통제체계와 어떻게 연계/운용하고 발전시킬 것인가는 중요한 이슈임에 분명하다.

본 논문이 고려하는 유무인복합체계 구성 유형, 관련 지휘통제 구축 방안 및 유무인협업(MUM-T) 모델은 유무인복합체계 운용에 있어서 반드시 반영해야 할 사항들이다. 이와 함께 제안된 협업통제 자동화, 즉 상황대응 의사결정 모델은 극소수의 운용자가 다중로봇을 상호 협력적으로 운용하고 필요시 운용자 개입 없이도 각종 사건에 실시간 자동적으로 상황대응 가능하게 함으로써 로봇의 지속적인 임무 수행은 물론, 제대 관점에서의 임무달성 수준을 향상시키는데 적용될 수 있다.

따라서, 유무인복합체계 운용에 있어서 제안된 협업통제 자동화 방법은 효과적인 유무인협업 구현을 위한 실용적인 대안 및 참고 자료로 활용될 수 있을 것이며, 그 효용성을 증대하기 위한 몇 가지 제언으로 논고를 마치고자 한다.

첫째, 의사결정 생성 룰(DMR) 등 실시간 의사결정 생성은 협업통제 자동화를 위한 핵심 요소이므로 제안된 의사결정 모델과 연계하여 파라미터 튜닝 등 학습을 통하여 그 품질 및 실효성이 강화되어야 한다.

둘째, 제안된 의사결정 최적화 모델을 활용한 다양한 시나리오 적용/분석은 최적 의사결정 과정/결과에 대한 변화추세, 패턴 등의 통찰을 제공 가능하며, 이를 기반으로 기대보상 계측 기준/방법 등 모델의 현실성을 높일 필요가 있다.

셋째, 본 논문에서는 언급하지 않았지만 교전모델을 포함하는 전장평가를 기대보상과 연계함은 모델의 실효성을 강화할 수 있음을 일부 확인함에 따라 그들의 조합 및 계측 방법 개선은 실시간 의사결정 생성과 연계되어야 한다.

후 기

본 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임. 논문에 대한 심사평 반영 차원에서 본 논문에 포함된 모든 그림은 저자의 주관에 따라 직접 그린 것임을 밝힙니다.

References

- [1] W. I. Park, H. J. Lee and J. H. Lee, "Multi-swarming robots collaboration control methodology," Defense Science Technology Plus, Vol. 2018, No. 242, pp. 62-68, 2018.
- [2] B. Fu, W. Smith, D. Rizzo, M. Castanier, M. Ghaffari, and K. Barton, "Learning Task Requirements and Agent Capabilities for Multi-agent Task Allocation," International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 567-584, 2022.
- [3] B. Fu, T. Kathuria, "Simultaneous Human-Robot Matching and Routing for Multi-Robot Tour Guiding Under Time Uncertainty," Journal of Autonomous Vehicles and Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 210-235, 2021.
- [4] J. Guzzi, "Path Planning in Multi-Robot Systems: Efficient and Scalable Approaches," Autonomous Robots, Vol. 44, No. 5, pp. 665-682, 2020.
- [5] D. Liu and G. Bekey, "Robust Multi-Robot Coordination with Fault Detection and Recovery," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 2, pp. 234-241, 2020.
- [6] S. Bhattacharya, S. Kailas, S. Badyal, S. Gil, and D. Bertsekas, "Multiagent Rollout and Policy Iteration for POMDP with Application to Multi-Robot Repair Problems," in Proc. 4th Conference on Robot Learning, Vol. 1, No. 1, pp. 45-60, 2020.
- [7] A. Viryasov and M. Hirche, "Coordination Strategies for Multi-Robot Systems under Communication Constraints," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 37, No. 1, pp. 45-60, 2021.
- [8] S. Kumar and R. Arkin, "Behavior-Based Control for Multi-Robot Systems: A Decentralized Approach," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 102, No. 3, pp. 1-12, 2018.
- [9] H. Cheng and Y. Nakamura, "Coordination Mechanisms for Multi-Robot Systems in Uncertain Environments," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 333-347, 2023.