

Centralized, Distributed, Hybrid Task Planning Framework for Multi-Robot System in Diverse Communication Status

Jiyoun Moon[†]

Department of Electronics Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

ABSTRACT

As the role of robots expands, flexible task planning methods are attracting attention from various domains. Many task planning frameworks are introduced to efficiently work in a wide range of areas. In order to work well in a broad region with multiple robots, various communication conditions should be controlled by task planning frameworks. However, few methods are proposed. In this paper, we propose mission planning methods according to the communication status of robots. The proposed method was verified through experiments assuming different communication states with a multi-robot system.

Keywords: hierarchical task planning, strategic and tactical planning, multi-robot system, centralized, distributed, hybrid, communication status

1. INTRODUCTION

다개체 로봇 시스템은 우주 탐사, 해양 탐사, 건설 현장, 공항 안내와 같은 다양한 분야에서 활용되고 있다 (Yan et al. 2013). 특히, 다개체 시스템은 광범위한 공간에서 서로 다른 임무를 효율적으로 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이에 다개체 시스템을 위한 효율적인 지도 생성, 충돌 회피, 경로 계획 알고리즘에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다 (Rizk et al. 2019). 하지만 다른 연구들에 비해 상대적으로 다개체 시스템을 위한 임무 계획에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 광범위한 영역에서 성공적으로 여러 개의 개체들이 함께 임무를 수행하기 위해서는 다양한 통신 상태에 대응할 수 있어야 한다.

Imeson & Smith (2015)은 다개체 시스템을 위한 높은 수준의 임무 계획 문제를 해결하기 위한 SAT-TSP language 기반의 방법을 제안하고 ROS 적용을 통해 검증했다. Dasgupta & Woosley (2013)는 어떠한 정보도 없는 환경에서 최소한의 비용과 에너지로 multi-robot task allocation (MRTA) 문제를 풀고자 했다. D* path planning 알고리즘과 greedy MRTA 알고리즘을 이용했다. Liu & Kroll (2012)는 A* 알고리즘과 유전 알고리즘 기반의 중앙

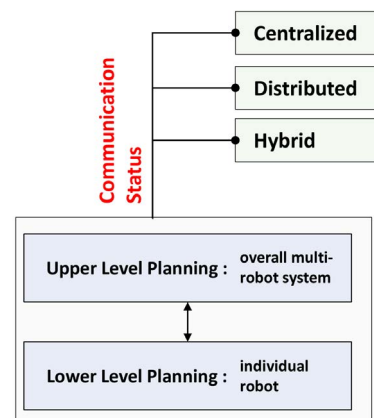


Fig. 1. Overall concept of hierarchical task planning.

식 방법을 소개했다. MRTA 문제를 완화했으며 산업 공장 검사 로봇의 임무 계획을 통해 기존의 방법과 비교하여 더 우수함을 보였다. 대부분의 다개체 시스템 임무 계획 연구들은 로봇들 간의 통신이 원활히 이루어진다고 가정한다. 하지만 실제 환경에서는 로봇과 로봇 간에 또는 로봇과 중앙 통제 시스템 간의 통신이 어려운 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1에서와 같이 다양한 통신 상태에 따른 다개체 로봇 시스템의 임무 계획 방법을 제안한다. 단일 로봇이 아닌 다개체 시스템을 위한 임무 계획 시스템은 개체 하나의 임무 수행 효율성도 중요하지만 전체 개체들의 효율성도 중요하다. 따라서 전체 시스템의 임무 계획을 담당

Received Aug 23, 2021 Revised Sep 03, 2021 Accepted Sep 04, 2021

[†]Corresponding Author

E-mail: jymoon@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7068 Fax: +82-62-608-5203

Jiyoun Moon <https://orcid.org/0000-0002-5208-7836>

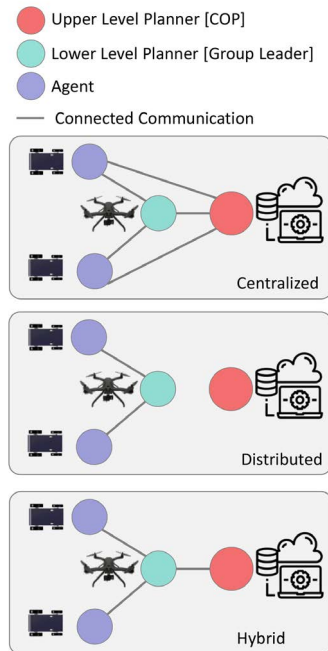


Fig. 2. Overall concept of hierarchical task planning considering communication status.

하는 상위 계층에서의 임무 계획과 각각의 단일 로봇들의 임무 계획을 담당하는 하위 계층의 임무 계획으로 구성된 프레임워크를 구성한다. 상위 임무를 담당하는 planner는 중앙 통제 시스템이 가지고 있으며 하위 임무 계획을 담당하는 planner는 단일 로봇이 가지고 있다. Planner 간의 정보는 통신을 통해 이루어지며 본 논문에서는 중앙 시스템과 모든 로봇들이 통신 가능한 경우, 중앙 시스템과 로봇들 간의 통신이 어려운 경우, 중앙 시스템과 일부 로봇들 간에 통신이 가능한 경우와 같은 세가지 경우를 다룬다. 중앙 시스템과 모든 로봇들이 통신 가능한 경우 중앙집중형 방식을 중앙 시스템과 일부 로봇들 간만 통신이 가능한 경우 융합형 방식을 중앙 시스템과 모든 로봇들 간의 통신이 어려운 경우 분산형 방식 기반의 계층적 임무 계획 방식을 제안한다.

2. MAIN TOPICS

다개체 시스템 임무 계획은 단일 로봇 임무 계획보다 더 복잡하고 고려해야 할 요소들이 많다. 또한 더 넓고 광범위한 영역에서 작업 계획을 하기 때문에 단일 planner만으로는 부족하다. 따라서 계층적 구조를 가지는 여러 개의 planner로 구성된 임무 계획 프레임워크를 제안한다. Fig 2에서와 같이 1개의 중앙 통제 시스템과 1개의 리더 로봇과 2개의 구성원으로 이루어진 1개의 그룹이 있다고 가정한 경우 통신 상태에 따라 서로 다른 세가지 형태의 프레임 워크를 따른다. 즉, 다개체 시스템은 통신 상태에 따라 각 상태에 적합한 다른 형태의 Fig. 2에서와 같은 계층적 구조를 활용한다. 계층적 구조는 Rosplan (Cashmore et al. 2015)을 따르며 임무계획 시스템의 과정은 Fig. 3과 같다. 환경 정보를 기반으로 자동적으로 임무 목표 및 초기 정보를 자동적으로 생성하고

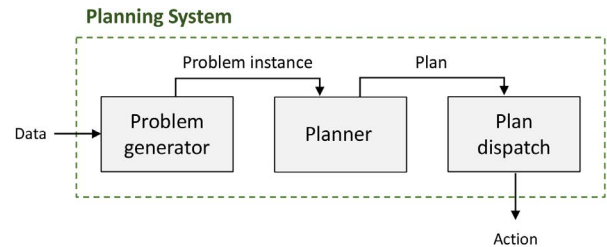


Fig. 3. Process of the planning system.

임무를 수행하기 위한 행위들의 순서를 생성한다.

다개체 시스템은 중앙 제어 센터와 몇 개의 다개체 그룹으로 구성된다. 중앙 제어 센터는 전체 로봇들에 대해 임무 계획할 수 있는 몇개의 planner를 가지고 있다. 다개체 그룹의 리더는 해당 그룹의 임무를 계획할 수 있는 planner를 가지고 있다. 각 개체들 간의 계획 결과는 통신을 통해 전달되고 수행된다. 모든 개체들이 원활하게 통신 가능할 때는 중앙집중형 방식을 따르며 전체 시스템의 통신이 어려울 때는 그 정도에 따라 분산형 또는 융합형 방식을 따른다. 제한한 세가지 프레임워크는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 전체 프레임워크의 Planner는 POPF (Coles et al. 2010), UPMur-phi (Penna et al. 2012), Temporal Fast Downward (Eyerich et al. 2012), LPG (Gerevini & Serina 2002)와 같은 Planning Domain Definition Language (PDDL) 기반 planner 사용이 가능하다.

2.1 Centralized Hierarchical Task Planning

중앙 제어 센터 및 모든 로봇들의 통신이 원활할 때는 최적의 해를 찾을 수 있는 중앙집중형 계층적 임무 계획 방법을 따른다. 따라서 중앙 제어 센터에서 모든 로봇들이 각각 목표한 임무를 수행할 수 있도록 계획한다. 그 과정은 Fig. 4a와 같다. 전체 임무는 사람에게 의해 주어진 후, 클러스터링 알고리즘을 기반으로 임무들을 나눈다. 본 논문에서는 임무 수행이 이루어지는 위치의 값을 입력으로 k-means 클러스터링 알고리즘을 통해 임무를 나눈다. 그 결과는 strategic controller에 PDDL언어 형태의 domain 및 problem 형태로 입력된다. Strategic controller에서는 planner를 통해 전체 시스템의 임무 goal을 작은 sub-goal들로 나누어 tactical goal을 설정한다. Tactical goal이란 큰 목표를 이루기 위한 작은 목표들로 구성된 것을 의미한다. Tactical goal들은 planner를 통해 자동적으로 하나의 큰 strategic goal을 구성하며 그 수는 다개체 시스템을 구성하는 개수만큼 생성될 수 있다. 중앙 제어 센터에서는 먼저 strategic goal을 달성을 위한 tactical goal과 strategic actions을 포함하는 strategic plan을 생성한다. 다음으로 tactical goal을 위한 tactical actions을 계획한다. 두가지 과정을 함께 실행해 전체 strategic goal과 tactical goal을 포함하는 계획을 생성하고 수행할 수 있도록 한다. 모든 strategic 및 tactical 행위들은 strategic plan execution을 통해서 제어된다. 결과적으로 중앙 통제 시스템에서 전체 다개체 시스템의 관점에서 가장 효율적인 개체들의 행위들의 시퀀스를 찾고 제어할 수 있다.

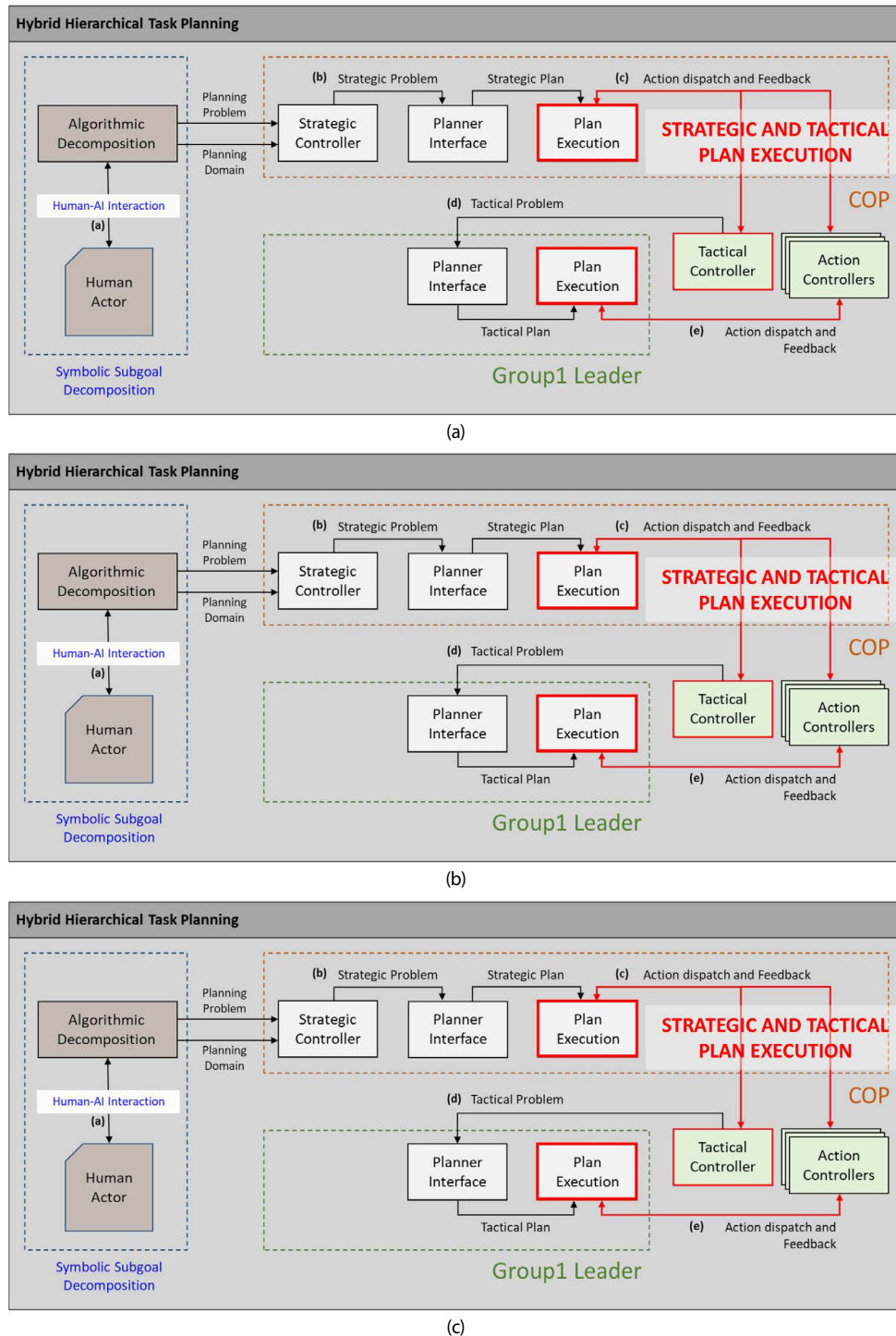


Fig. 4. Hierarchical task planning framework according to communication status. (a) Centralized task planning (b) Distributed task planning (c) Hybrid task planning

2.2 Distributed Hierarchical Task Planning

중앙 제어 센터와의 통신이 어려운 경우 Fig. 4b에서와 같이 계획을 생성한다. 중앙 제어 센터와 환경 또는 외부 요소들에 의해 모든 로봇들이 원활하게 통신이 어려운 경우 분산형 계층적 임무

계획 방법을 따른다. 이때, 각 로봇들은 중앙 제어 센터와 통신은 어렵지만 같은 그룹의 개체원의 리더와 통신이 가능한 경우에 적용을 목표로 한다. 각 그룹의 리더는 임무 계획 가능한 planner를 가지고 있으며 상황정보를 기반으로 임무 수행을 위한 목표를 설정하고 임무 수행을 위한 계획을 수립한다. 사람에 의해 설정된

Table 1. Hybrid hierarchical task planning procedure.

No	Procedure description
1	Automatically decompose a large problem into a set of smaller problems (sub-goals)
2	Construct a strategic problem, containing strategic actions for the whole mission
3	Execute strategic plans
4	Generate a tactical problem and plan for each sub-goal
5	Execute tactical plans while executing strategic plans

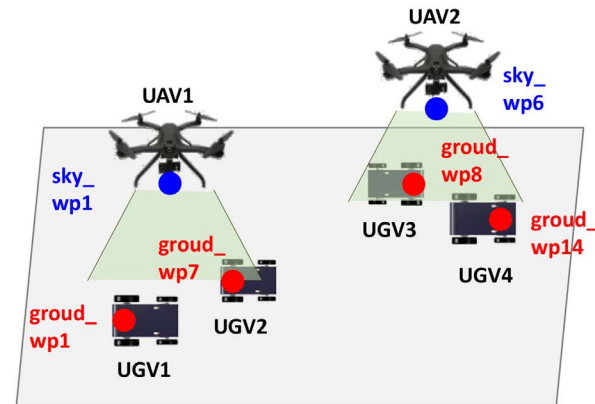
임무들은 초기에 strategic controller에 의해 각 다개체 그룹들에 인가된다. 하지만 각 개체들은 중앙 통제 시스템과 통신이 어렵기 때문에 개체들의 행위들을 계획하고 수행하는 데 있어 중앙 통제 시스템이 아닌 그룹의 리더들의 PDDL 기반 planner를 활용한다. 따라서, 전체 다개체 시스템을 구성하는 각각의 그룹의 리더들은 각 그룹에 배정된 임무의 목표에 따른 계획을 생성한다.

분산형 계층적 임무 계획 프레임워크는 Fig. 4b에서와 같이 초기에 tactical problem이 strategic controller에 의해 임무 수행 시작 전에 tactical problem이 각 다개체 시스템의 그룹에 전달된다. 그 후, 주기적인 통신 상태 확인을 통해 중앙 통제 센터에서 전체 시스템의 임무 계획 성공을 위한 더 효율적인 problem 제어를 위한 피드백을 한다. 만약, 통신 상태가 지속적으로 열악하다면 초기에 주어진 임무만을 수행하고 종료한다.

2.3 Hybrid Hierarchical Task Planning

영역이 광범위하거나 개체의 수가 많은 경우 중앙 제어 센터에서 모든 개체들과 통신 또는 제어하기 어렵다. 따라서 모든 개체들의 행위를 하나하나 중앙 통제 시스템에서 계획해주는 중앙 집중형 계층적 임무 계획 방법이 아닌 융합형 계층적 임무 계획 방법을 따른다. 이 때, 임무 계획을 위한 planner는 중앙 제어 센터와 각 그룹의 리더가 가지고 있으며 Fig. 4c에서와 같이 중앙 제어 센터의 planner는 upper level planner라 하고 각 그룹의 리더의 planner는 lower level planner라 한다. 먼저 upper level planner에서는 전체 다개체 시스템을 위한 임무 계획을 수립한다. Upper level planner의 결과에는 실제 수행되는 행위가 아닌 한 그룹에서 임무 계획을 수행해야하는 행위도 포함된다. 즉, upper level planner의 결과에는 lower level planner를 실행하는 행위를 포함한다.

융합형 방식은 중앙 제어 센터와 그룹의 리더가 각각 planner를 가지고 전체 목적을 달성하기 위한 행위를 계획한다. 전체 과정은 Table 1과 같으며 프레임워크 구조는 Fig. 4c와 같다. 중앙 제어 센터에서 큰 problem을 작은 sub-problem으로 나눈다. 먼저, 큰 problem에 대한 strategic action을 포함하는 strategic problem을 구성하고 plan을 생성한다. Strategic plan을 실행한다. Strategic plan은 각 그룹의 tactical goal을 포함하고 있으며 그룹별로 tactical goal을 전달 받고 tactical plan을 생성하고 실행한다. 융합형 임무 계획 프레임워크를 적용하는 경우 다개체 시스템의 문제를 중앙 통제 시스템이 가지고 있는 하나의 planner가 아닌 다개체 시스템의 개체들이 나누어서 여러 개의 planner로 계획 문제를 풀 수 있다는 장점을 갖는다.

**Fig. 5.** Experiment Scenario: Each UAV should monitor 2 UGV which are in their group.

3. SIMULATION RESULT

본 논문에서는 계획 생성을 위해 preferences 및 time-dependent goal-collection costs를 다룰 수 있는 temporal planner인 OPTIC planner (Benton et al. 2012)를 사용한다. 제안한 방법 검증에 위해 1개의 중앙집중 센터 COP와 6개의 개체로 구성된 2개의 그룹을 가지고 실험을 진행한다. 각 그룹은 1개의 UAV와 2개의 UGV로 구성된다. 각 그룹의 리더는 UAV로 planner를 가지고 있으며 그룹의 단일 개체의 행위를 계획한다. UAV01은 UGV01과 UGV02와 한 그룹이며 UAV02는 UGV03과 UGV04와 한 그룹이다.

다개체 시스템을 이용하여 광범위 영역을 공중 및 지상에서 정찰 및 감시한다. 각 UGV는 지상의 총 14개의 정찰 지점을 나누어서 순차적으로 돌아다니며 정찰해야 하며 Fig. 5에서와 같이 UAV는 공중에 있는 지정된 영역에서 같은 그룹에 있는 모든 UGV를 관찰해야 한다. 지상의 정찰 지점의 명칭은 ground_wp1~ground_wp14와 같으며 공중 정찰 지점의 명칭은 sky_wp1~sky_wp6이다. 이때, sky_wp1에서는 Fig. 5에서와 같이 ground_wp1과 ground_wp7 위치의 관찰이 가능하며 sky_wp2에서는 ground_wp2와 ground_wp6, sky_wp3에서는 ground_wp3와 ground_wp5 위치의 관찰이 가능하다. 따라서 UAV는 UGV의 정찰 움직임에 따라 UGV 관측이 가능한 위치로 이동할 수 있어야 한다. UAV의 가능한 움직임은 이륙, 정찰 지점 이동, UGV 관측, 착륙이며 각 움직임의 이름은 take_off, fly_waypoint, observe_ugv, land이다. UGV의 가능한 움직임은 정찰 지점 이동이며 해당 움직임의 이름은 goto_waypoint이다. 이와 같은 임무 계획 환경에서 총 3가지 상황을 가정하고 제안한 3가지 프레임워크를 검증했다. 먼저, 모든 로봇들이 원활하게 통신 가능하다고 가정하고 COP에서 각 개체들의 행위를 모두 계획한다. 각 그룹과 COP가 통신이 불가능한 경우, 분산형 프레임워크를 활용하여 각 그룹의 리더가 계획을 생성하였다. 그룹의 리더와 COP만 통신 가능한 경우 융합형 프레임워크를 이용하여 임무를 수행한다.

Table 2는 중앙 집중형 프레임워크를 통해 생성한 임무 계획 결과이다. COP 및 모든 다개체 시스템이 원활하게 통신이 된다

Table 2. Simulation result of centralized hierarchical task planning.

Planner	Sequence of actions
COP	take_off uav01 dock1 ground_wp0 sky_wp0
COP	take_off uav02 dock2 ground_wp15 sky_wp7
COP	flyto_waypoint uav01 sky_wp0 sky_wp1
COP	observe_ugv uav01 sky_wp1 ugv01 ugv02
COP	goto_waypoint ugv01 ground_wp1 ground_wp2
COP	goto_waypoint ugv02 ground_wp7 ground_wp6
COP	flyto_waypoint uav02 sky_wp7 sky_wp6
COP	observe_ugv uav02 sky_wp6 ugv03 ugv04
COP	goto_waypoint ugv03 ground_wp8 ground_wp9
COP	goto_waypoint ugv04 ground_wp14 ground_wp13
COP	flyto_waypoint uav01 sky_wp1 sky_wp2
COP	observe_ugv uav01 sky_wp2 ugv01 ugv02
COP	goto_waypoint ugv01 ground_wp2 ground_wp3
COP	goto_waypoint ugv02 ground_wp6 ground_wp5
COP	flyto_waypoint uav02 sky_wp6 sky_wp5
COP	observe_ugv uav02 sky_wp5 ugv03 ugv04
COP	goto_waypoint ugv03 ground_wp9 ground_wp10
COP	goto_waypoint ugv04 ground_wp13 ground_wp12
COP	flyto_waypoint uav01 sky_wp2 sky_wp3
COP	observe_ugv uav01 sky_wp3 ugv01 ugv02
COP	goto_waypoint ugv01 ground_wp3 ground_wp4
COP	flyto_waypoint uav02 sky_wp5 sky_wp4
COP	observe_ugv uav02 sky_wp4 ugv03 ugv04
COP	goto_waypoint ugv03 ground_wp10 ground_wp11
COP	land uav01 sky_wp3 dock1 ground_wp0
COP	land uav02 sky_wp4 dock2 ground_wp15

Table 3. Simulation result of distributed hierarchical task planning.

Planner	Sequence of actions
Group1	take_off uav01 dock1 ground_wp0 sky_wp0
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp0 sky_wp1
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp1 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp1 ground_wp2
Group1	goto_waypoint ugv02 ground_wp7 ground_wp6
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp1 sky_wp2
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp2 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp2 ground_wp3
Group1	goto_waypoint ugv02 ground_wp6 ground_wp5
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp2 sky_wp3
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp3 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp3 ground_wp4
Group1	land uav01 sky_wp3 dock1 ground_wp0
Group2	take_off uav02 dock2 ground_wp15 sky_wp7
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp7 sky_wp6
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp6 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv03 ground_wp8 ground_wp9
Group2	goto_waypoint ugv04 ground_wp14 ground_wp13
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp6 sky_wp5
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp5 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv03 ground_wp9 ground_wp10
Group2	goto_waypoint ugv04 ground_wp13 ground_wp12
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp5 sky_wp4
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp4 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv03 ground_wp10 ground_wp11
Group2	land uav02 sky_wp4 dock2 ground_wp15

고 가정했기 때문에 모든 임무 계획은 COP에 의해 생성되며 다 개체 시스템의 모든 로봇들을 제어한다. 결과를 보면 UAV01이 sky_wp1에서 각 ground_wp1에 위치한 UGV01과 ground_wp7에 위치한 UGV02를 관측하는 모습을 확인할 수 있다. 또한 나머지 결과를 확인하면 모든 지상 지점들은 UGV에 의해 정찰되었으며 정찰 동안 UAV에 의해 관찰되었음을 확인할 수 있다. 또한 Tables 3과 4를 통해 분산형 및 융합형 프레임워크에 해당하는 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있으며 중앙 집중형 방법과 동일하게 임무를

Table 4. Simulation result of hybrid hierarchical task planning.

Planner	Sequence of actions
COP	take_off uav01 dock1 ground_wp0 sky_wp0
COP	take_off uav02 dock2 ground_wp15 sky_wp7
COP	complete_mission uav01 mission0
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp0 sky_wp1
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp1 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp1 ground_wp2
Group1	goto_waypoint ugv02 ground_wp7 ground_wp6
COP	complete_mission uav02 mission0
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp7 sky_wp6
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp6 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv03 ground_wp8 ground_wp9
Group2	goto_waypoint ugv04 ground_wp14 ground_wp13
COP	complete_mission uav01 mission1
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp1 sky_wp2
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp2 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp2 ground_wp3
Group1	goto_waypoint ugv02 ground_wp6 ground_wp5
COP	complete_mission uav02 mission1
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp6 sky_wp5
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp5 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv03 ground_wp9 ground_wp10
Group2	goto_waypoint ugv04 ground_wp13 ground_wp12
COP	complete_mission uav01 mission2
Group1	flyto_waypoint uav01 sky_wp2 sky_wp3
Group1	observe_ugv uav01 sky_wp3 ugv01 ugv02
Group1	goto_waypoint ugv01 ground_wp3 ground_wp4
COP	complete_mission uav03 mission2
Group2	flyto_waypoint uav02 sky_wp5 sky_wp4
Group2	observe_ugv uav02 sky_wp4 ugv03 ugv04
Group2	goto_waypoint ugv02 ground_wp10 ground_wp11
COP	land uav01 sky_wp3 dock1 ground_wp0
COP	land uav02 sky_wp4 dock2 ground_wp15

성공적으로 수행함을 확인할 수 있다. 분산형 프레임워크는 Table 3에서와 같이 각 그룹이 나누어서 임무 계획을 생성함을 확인할 수 있으며 융합형 프레임워크는 Table 4에서와 같이 COP와 각 그룹의 리더가 가지고 있는 planner가 나누어서 각 개체들의 행위들을 계획하고 제어하고 있음을 확인할 수 있었다. 융합형 프레임워크에서는 COP와 그룹 리더가 나누어서 임무 계획을 하기 때문에 중앙집중형 프레임워크의 장점인 전체 시스템을 고려할 수 있는 동시에 각 그룹 리더가 병렬적으로 해당 그룹의 개체를 제어할 수 있다는 장점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 항상 통신이 잘되고 있다 가정하고 임무 계획을 수행하는 기존의 방법들과는 다르게 다양한 통신 상태에 대응가능한 서로 다른 프레임워크를 설계하고 시뮬레이션을 통해 검증해 볼 수 있었다.

4. CONCLUSIONS

다개체 시스템의 다양한 분야의 임무 작업 요구되고 있음에 따라 그 필요성이 매우 높아지고 있다. 다수의 로봇 기반의 임무 계획을 효율적으로 하기 위해서는 원활한 소통은 매우 중요한 문제이다. 따라서 다양한 통신 환경에서의 임무 작업 계획 연구는 필수적이다. 본 논문에서는 세가지 서로 다른 통신 상태에 중앙 집중형, 분산형, 융합형 임무 계획 프레임워크를 제안한다. 총 1개의 COP와 9개의 개체를 가지고 실험을 통해 제안한 프레임워크를 성공적으로 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2020학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, software, validation, investigation, J.Y. Moon.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Benton, J., Coles, A., & Coles, A. 2012, Temporal planning with preferences and time-dependent continuous costs, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 22, 2-10.
- Cashmore, M., Fox, M., Long, D., Magazzeni, D., Ridder, B., et al. 2015, Rosplan: Planning in the robot operating system, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 25, 333-341.
- Coles, A., Coles, A., Fox, M., & Long, D. 2010, Forward-Chaining Partial-Order Planning, *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Toronto, Ontario, Canada, May 12-16, 2010, pp.42-49.
- Dasgupta, P. & Woosley, B. 2013, Multirobot task allocation with real-time path planning, *The Twenty-Sixth International FLAIRS Conference*, May 22-24, 2013, St. Pete Beach, FL, pp.574-579.
- Eyerich, P., Mattmüller, R., & Röger, G. 2012, Using the context-enhanced additive heuristic for temporal and numeric planning, *Towards Service Robots for Everyday Environments*, 76, 49-64. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25116-0_6
- Gerevini, A. & Serina, I. 2002, LPG: A planner based on local search for planning graphs with Action Costs, *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, April 23-27, 2002, Toulouse, France.
- Imeson, F. & Smith, S. L. 2015, Multi-robot task planning and sequencing using the SAT-TSP language, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 26-30 May 2015, Seattle, WA, USA, pp.5397-5402. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139953>
- Liu, C. & Kroll, A. 2012, A centralized multi-robot task allocation for industrial plant inspection by using a* and genetic algorithms, *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, pp.466-474. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29350-4_56
- Penna, G. D., Magazzeni, D., & Mercorio, F. 2012, A universal planning system for hybrid domains, *Applied intelligence*, 36, 932-959. <https://doi.org/10.1007/s10489-011-0306-z>
- Rizk, Y., Awad, M., & Tunstel, E. W. 2019, Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey, *ACM Computing Surveys*, 52, 1-31. <https://doi.org/10.1145/3303848>
- Yan, Z., Jouandeau, N., & Cherif, A. A. 2013, A survey and analysis of multi-robot coordination, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 399. <https://doi.org/10.5772/57313>



Jiyoun Moon received the Doctor's degree in Electrical and Computer Engineering from Seoul National University in 2020. She is currently working at department of Electronics Engineering, College of IT Convergence, Chosun University. Her research interests include artificial general intelligence, collective intelligence planning, big data, cognitive robotics, semantic scene understanding, mission planning, and human-robot cooperation.