

이기종 모바일 매니플레이터 간 협동 운반을 위한 비선형 최적화 기반 실시간 경로 계획

Nonlinear Optimization-based Real-time Trajectory Planning for Cooperative Transport of Heterogeneous Mobile Manipulators

황 석 환¹, 오 지 환², 이 정 수³, 황 순 웅⁴, 김 완 수^{*1}

(Seokhwan Hwang¹, Jihwan Oh², Jungsoo Lee³, Soonwoong Hwang⁴, and Wansoo Kim^{*1})

¹Department of Intelligence and Information Engineering, Hanyang University

²Department of Robotics, Hanyang University

³Department of Applied Artificial Intelligence, Hanyang University

⁴Department of Robotics, Hanyang University ERICA

Abstract: This paper proposes a real-time trajectory planning method using nonlinear optimization and whole-body control for cooperative transport with heterogeneous mobile manipulators. Unlike conventional approaches that rely on passive path following, the proposed method enables the follower robot to actively generate its own trajectory by laterally offsetting the leader's path and refining it through nonlinear optimization. The optimization process simultaneously considers inter-robot distance maintenance, geometric consistency, and obstacle avoidance in cluttered environments. The optimized trajectory is executed through a generalized hierarchical control framework that integrates impedance-based coordination between the mobile base and manipulator. Experimental validation with two mobile manipulators—, featuring different locomotion and control characteristics—, demonstrates that the system maintains a consistent end-effector distance while adapting to environmental changes. The proposed method achieves high-fidelity trajectory tracking (average error: 0.037 m, standard deviation: 0.039 m) and maintains inter-robot spacing within a 1.05–1.65 m range for 96.09% of the task duration. The results demonstrate the framework's relevance to real-world cooperative transport situations, emphasizing the need for adaptability, precision, and inter-robot coordination.

Keywords: leader-follower, mobile manipulator, nonlinear optimization, whole-body control

1. 서론

모바일 매니플레이터는 이동성과 조작 기능을 동시에 갖춘 로봇 플랫폼으로, 제조, 물류, 건설 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 주목받고 있다[1]. 특히 모바일 매니플레이터가 협력하여 복잡한 작업을 수행하는 경우, 각 로봇이 역할을 분담함으로써 단일 로봇의 물리적·기능적 한계를 극복하고 시스템의 효율성과 유연성을 향상시킬 수 있어, 협력 제어 기술의 중요성이 커지고 있다[2,4].

기존 협동 운반 연구는 주로 리더-팔로워 구조를 기반으로 하며, 운반 경로를 사전에 계획한 후 이를 팔로워가 수동적으로 추종하는 방식으로 이루어져 왔다[5]. 이러한 방식은 팔로워가 리더와의 기하적 거리 제약을 유지하면서 단순히 경로를 따르기 때문에, 운반 중 예상치 못한 장애물이 출현하는 경우 실시간으로 회피하거나 경로를 재계산하기 어렵다는 한계가 있다[6]. 그 결과, 장애물과의 충돌이나 운반 실패와 같은 문제가 발생할 수 있다[7].

한편, Zhang et al. [8]은 리더-팔로워 구조 대신, 중앙 계층에서 물체의 전체 경로를 사전에 오프라인으로 계획한 후, 각 로봇이 해당 경로를 따라 자신의 자세를 분산적으로 최적화하는 계층적 모션 계획 프레임워크를 제안하였다. 이 방식은 페루프 제약, 형상 제약, 로봇의 여유 자유도 등을 함께 고려함으로써 물리적으로 실행 가능한 경로를 생성하는 데 효과적이다. 그러나 경로 계획은 사전에 저장된 정적 환경 정보를 기반으로 수행되며, 물체의 경로는 계획 후 고정되기 때문에, 환경 변화나 장애물 출현에 따른 실시간 경로 재계산에는 제약이 존재한다.

이러한 기존 연구들의 한계를 극복하고자, 최근에는 각 로봇이 능동적으로 경로를 계획하고 환경 변화에 적응할 수 있도록 하는 방식이 제안되고 있다. 예를 들어, 각 로봇이 독립 센서를 활용하여 환경을 분산적으로 인식하고 자율적으로 행동을 결정하는 구조가 시도되고 있다[9]. 그러나 이러한 접근들은 대부분 동일 기종 로봇을 대상으로 하며, 이기종 로봇 간의 물리적 구조와 시스템 구성의 차이로 인해 협동

* Corresponding Author

Manuscript received April 18, 2025; revised May 11, 2025; accepted June 21, 2025

황석환: 한양대학교 지능정보융합공학과 대학원생(pop0479@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0000-6277-6769)

오지환: 한양대학교 로봇공학과 대학원생(iitty10@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0000-3649-3626)

이정수: 한양대학교 인공지능융합학과 대학원생(lpigeon@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0009-0002-0782-4048)

황순웅: 한양대학교 ERICA캠퍼스 로봇공학과 연구부교수(hswfile@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-4845-7416)

김완수: 한양대학교 ERICA캠퍼스 로봇공학과 교수(wansookim@hanyang.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-3254-3929)

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1C1C1008306).

※ 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00403540)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

운반에서 발생하는 복잡성을 충분히 다루지 못하는 한계가 있다[10].

본 연구에서는 이러한 한계를 해결하고자, 이기종 모바일 매니플레이터 간 실시간 협동 운반을 위한 제어 프레임워크를 제안한다. 제안하는 프레임워크는 리더와 팔로워로 구성되며, 각각 Swerve drive 기반의 리더(MOBY) [11]와 Mecanum wheel 기반의 팔로워(MOCA) [12]로 구성된다. 리더는 Timed-Elastic Band (TEB) [13] 기반 경로 계획 알고리즘을 통해 정적 장애물을 회피하면서 실시간으로 운반 경로를 생성해내고 팔로워는 리더의 궤적 정보와 자체 LiDAR 센서를 통해 인식한 장애물 정보를 바탕으로, 기준 경로(reference path)를 생성하고 리더와의 거리 유지, 장애물 회피, 기하학적 일관성 확보 등을 고려한 비선형 최적화를 수행하여 경로를 생성한다. 생성된 경로는 GHC (Generalized Hierarchical Control) 기반 전신 제어기를 통해 추종된다.

특히, 본 연구는 팔로워가 단순히 리더의 궤적을 추종하는 데 그치지 않고, 구동방식이 다른 이기종 로봇 간의 협업에서 발생하는 기구학적 차이를 비선형 최적화를 통해서 해결하고, 능동적으로 경로를 생성한다는 점에서 기존 연구들과 차별성을 갖는다. 리더와 팔로워는 서로 다른 구동 방식과 제어 특성을 가지며, 이러한 플랫폼 간 이질성을 반영한 제어 구조를 통해 이기종 로봇 간 안정적인 협력이 가능함을 보여준다. 제안된 방식은 비정형 환경에서도 협동 운반의 안정성과 유연성을 동시에 확보하며, 실제 이기종 플랫폼을 활용한 실험을 통해 프레임워크의 유효성을 입증하였다.

본 연구에서는 로봇 간 거리 제약을 soft constraint로 모델링하고 있으며, 실험에서는 해당 구조의 유효성을 검증하기 위해 강체 대신 유연한 끈을 사용한 협동 운반 시나리오를 구성하였다. 이는 실제 상황에서 무거운 물체를 끈 등으로 묶어 협력 운반하는 환경을 단순화한 형태로 간주할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 전체 제어 프레임워크와 경로 생성 구조를 설명하고, 제III장에서는 팔로워의 비선형 최적화 기반 경로 생성 기법과 GHC 기반 제어 구조를 제시한다. 제IV장에서는 실제 실험을 통한 성능 검증 결과를 제시하고, 마지막으로 제V장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

II. 실시간 경로 계획 및 제어 구조

본 논문에서 제안하는 제어 프레임워크는 그림 1과 같다. 전체 시스템은 리더-팔로워 구조로 구성되며, 리더 및 팔로워 로봇 각각에 부착된 마커를 OptiTrack 시스템을 통해 두 모바일 매니플레이터의 odometry 정보를 획득한다. 또한, 리더 로봇에 탑재된 2D LiDAR를 기반으로 주변 환경에 대한 장애물 정보를 실시간으로 수집하고, 이 데이터를 기반으로 장애물 탐지 모듈에서 밀도 기반 클러스터링 Obstacle Detection이 수행된다.

이후, 메인 제어 PC에서는 리더의 odometry와 실시간 장애물 정보를 종합적으로 활용하여 TEB 기반의 local planner를 통해 리더 로봇의 자율주행을 위한 velocity command를 생성한다. 경로 생성 시 로컬 맵 상의 장애물을 고려한 동적 경로 생성이 이루어지며, 이를 통해 충돌 회피와 부드러운 경로 계획이 가능하다.

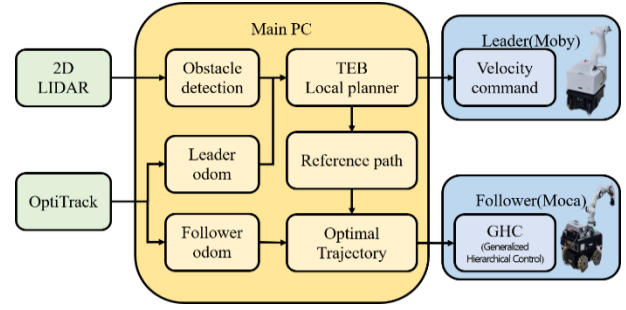


그림 1. 이기종 모바일 매니플레이터의 실시간 협동 운반을 위한 제어 프레임워크 구성도.

Fig. 1. Configuration diagram of a control framework for real-time cooperative transport using heterogeneous mobile manipulators.

이때 생성된 리더의 경로는 팔로워 로봇의 경로 생성 기준으로 사용된다. 메인 PC는 리더의 trajectory를 기반으로 기준 경로(reference path)를 구성하고, 비선형 최적화 문제를 통해 팔로워가 추종해야 할 최적 경로를 산출한다. 해당 최적 경로는 리더와의 기하학적 일관성, 로봇 간 간격 유지, 장애물 회피를 고려한다. 팔로워 로봇은 생성된 최적 경로를 기반으로 GHC 기반의 전신 제어 구조를 통해 경로를 추종한다. GHC는 임피던스 제어를 기반으로 작업 공간에서의 오차에 따라 가상 힘을 생성하고, 이를 각 제어 작업의 계층적 우선순위에 따라 투영함으로써, 매니플레이터와 모바일 베이스를 통합적으로 제어한다. 이를 통해 물체 운반 중에도 안정적이고 유연한 협동 동작을 구현할 수 있다.

1. 팔로워의 reference path 설계

리더 로봇이 생성한 로컬 경로를 기준으로, 기구학적 관계를 통해 end-effector의 경로를 계산할 수 있다. 이 경로는 시간에 따른 pose의 시퀀스로 정의되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathcal{P}_{leader} = \left\{ p_{leader}^{(i)} \in \mathbb{R}^2 \mid p_{leader}^{(i)} = \begin{bmatrix} x_M^{(i)} \\ y_M^{(i)} \end{bmatrix}, i = 1, \dots, N \right\} \quad (1)$$

팔로워 로봇의 reference path는 리더의 경로를 기반으로 각 시점의 법선 방향으로 일정 거리 d_{ref} 만큼 떨어진 기준점으로 구성된다. 이를 위해 먼저 각 pose간 접선 벡터 $d^{(i)}$ 와 단위 법선 벡터 $n^{(i)}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$d^{(i)} = \begin{bmatrix} \Delta x^{(i)} \\ \Delta y^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M^{(i+1)} - x_M^{(i)} \\ y_M^{(i+1)} - y_M^{(i)} \end{bmatrix}, \quad \ell^{(i)} = \|d^{(i)}\| + \epsilon \quad (2)$$

$$n^{(i)} = \frac{1}{\ell^{(i)}} \begin{bmatrix} -\Delta y^{(i)} \\ \Delta x^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\Delta x^{(i)}, \Delta y^{(i)}$ 는 시점 i 와 $i+1$ 사이의 리더의 end-effector 경로에서의 x 및 y 방향 위치 차이를 의미하며, $\ell^{(i)}$ 는 접선 벡터의 크기이다. $\epsilon=10^{-9}$ 는 벡터의 크기가 0에 수렴하는 경우를 방지하기 위한 수치 안정성 상수이다. $n^{(i)}$ 는 $d^{(i)}$ 에 수직인 단위 접선 벡터를 나타낸다. 이를 바탕으로 기준점 $p_{ref}^{(i)}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$p_{ref}^{(i)} = p_{leader}^{(i)} + d_{ref} \cdot n_i \quad (4)$$

본 연구에서는 팔로워의 작업 반경 및 충돌 여유 공간을 고려하여 $d_{ref} = 1.35\text{m}$ 로 설정하였다. 이로써 리더의 경로부터 기하학적으로 정렬된 기준 경로 $\mathcal{P}_{ref} = \{p_{ref}^{(i)}\}_{i=1}^N$ 를 생성할 수 있다.

2. 팔로워의 경로 최적화를 위한 목적함수 설계

팔로워 로봇의 경로는 리더로부터 생성된 기준 경로 $\{p_{ref}^{(i)}\}_{i=1}^N$ 와 주변 환경 정보를 바탕으로 비선형 최적화 문제를 통해 실시간으로 생성된다. 이 최적화는 다음의 목적함수 J (식 5)를 최소화하는 방식으로 구성되며 각 목적함수는 협동 운반시 로봇 간 거리 유지, 기하학적 일관성, 외부 환경과의 충돌 회피를 동시에 달성하기 위한 것으로, 각 항은 이러한 물리적 요구를 수치적으로 반영하도록 설계되었다.

$$\min_{p_{follower}^{(i)}} J = \omega_{dist} \cdot J_{dist} + \omega_{ref} \cdot J_{ref} + \omega_{obs} \cdot J_{obs} \quad (5)$$

subject to $p_{follower}^{(0)} = p_{moca_ee}^{init}$

초기 제약 조건은 실제 팔로워의 말단 위치 $p_{moca_ee}^{init}$ 와 경로의 첫 지점 $p_{follower}^{(0)}$ 을 일치시켜 경로의 불연속성으로 인한 초기 추종 오차를 방지하고 안정적인 궤적 계획을 가능하게 하였다.

각 목적함수는 아래와 같이 구성되었다.

$$J_{dist} = \sum_{i=0}^N (\|p_{follower}^{(i)} - p_{leader}^{(i)}\| - d_{ref})^2 - \delta^2 \quad (6)$$

$$J_{ref} = \sum_{i=0}^N (\|p_{follower}^{(i)} - p_{ref}^{(i)}\|)^2 \quad (7)$$

$$J_{obj} = \sum_{i=0}^N \exp(-(\|p_{follower}^{(i)} - p_{obj}\| - d_{safe})) \quad (8)$$

세 목적함수 항은 각기 다른 물리적 목적을 지니며, 서로 상충적인 특성을 갖는다.

J_{dist} (식 6)은 팔로워가 리더와의 일정한 간격 d_{ref} 을 유지하도록 유도한다. 이는 양 로봇 간 간격이 과도하게 좁아지거나 벌어지는 것을 방지하기 위한 것으로, 협동 운반 중 로봇간 안정적인 상대 거리 유지를 목표로 한다.

또한 장애물 회피 상황에서는 거리 조절이 필요하므로, 허용 오차 δ 를 두어 일정 범위 내에서의 유연한 거리 변화가 가능하도록 하였다. δ 는 로봇 간의 이상적인 기준 거리 d_{ref} 로부터의 허용 가능한 오차 범위를 정의하며, 이는 실제 운반 상황에서 장애물 회피 또는 급격한 방향 전환 시 발생할 수 있는 일시적인 거리 변화를 수용하기 위한 것이다. 예를 들어, 팔로워가 장애물을 피하기 위해 잠시 기준 거리보다 멀어져야 하는 상황에서, δ 가 없으면 해당 해가 높은 페널티를 받아 비현실적인 경로를 생성할 수 있다. 반면, δ 를 적절히 설정하면 이러한 상황을 허용하면서도 전체적인 협동 구조는 유지된다.

본 연구에서는 팔로워 로봇의 조작 범위와 작업 환경을 고려하여 $d_{ref} = 1.35\text{m}$, 허용 오차 $\delta = 0.3\text{m}$ 로 설정하였다.

J_{ref} (식 7)은 팔로워가 기준 경로 $p_{ref}^{(i)}$ 를 추종하도록 유도하는 항이다. 이를 통해 팔로워가 기하학적 일관성을 유지하며 리더의 진행 방향과 유사한 경로를 따라가도록 유도한다. 이를 통해 물체의 회전이나 왜곡 없이 안정적인 이송이 가능해진다.

J_{obj} (식 8)은 팔로워가 주변 장애물 p_{obj} 로부터 일정 거리 d_{safe} 이상을 유지하도록 한다. 지수 함수 형태를 사용함으로써, 장애물에 가까워질수록 기하급수적으로 페널티를 증가시켜 회피 동작을 유도한다. 본 실험에서는 d_{safe} 는 로봇의 크기를 고려해 0.4m 로 설정하였다.

세 항은 각기 다른 물리적 목적을 지니기 때문에, 전체 목적함수 내에서 이들 간의 상충 관계를 조율하기 위해 가중치를 적절히 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 장애물 회피의 중요성을 가장 크게 반영하여 해당 항의 가중치를 가장 높게 설정하고, 그 다음으로 로봇 간 거리 유지 및 기준 경로 추종의 중요도를 고려하였다. 구체적으로 $\omega_{dist} = 10.0$, $\omega_{ref} = 5.0$, $\omega_{obs} = 50.0$ 으로 설정하였다.

이러한 가중치 설정은 시스템이 어떤 상황에 더 민감하게 반응할지를 결정짓는다. ω_{dist} 가 클 경우, 팔로워는 리더와의 기준 거리를 유지하는 데 더 집중하게 되어, 장애물을 회피해야 하는 상황에서도 간격 유지를 우선시하는 비효율적인 경로를 생성할 수 있다. 반면 ω_{ref} 가 클 경우, 팔로워는 기준 경로의 기하학적 일관성을 유지하려는 경향이 강해져, 리더의 이동 방향을 보다 정확히 따르지만, 급격한 회피 기동이 필요한 상황에서는 경직된 움직임을 유발할 수 있다. 마지막으로 ω_{obs} 가 클 경우, 팔로워는 장애물과의 충돌 회피를 최우선으로 고려하여 안전한 경로를 확보하려고 하며, 그 과정에서 리더와의 거리나 기준 경로를 일시적으로 이탈하는 것도 허용된다.

따라서 각 항의 가중치는 작업 환경, 로봇의 기구적 특성, 목표 과제의 우선순위에 따라 신중하게 조정되어야 하며, 가중치 간의 균형은 협동 운반의 성공 여부에 큰 영향을 미친다.

앞서 정의한 목적함수의 최소화를 통해 팔로워 로봇의 목표 궤적이 생성되며, 생성된 궤적 중에서 현재 시점에서 팔로워 로봇과 가장 가까운 지점을 desired pose로 추출하여 제어기로 전달된다. 이후 최적화는 주기적으로 반복 수행되며, 이를 통해 팔로워는 환경 변화에 실시간으로 대응하면서 안정적으로 협동 경로를 추종할 수 있다.

3. GHC 기반 전신제어

팔로워 로봇이 생성한 최적 경로를 정확하게 추종하기 위해 GHC[14] 기반의 전신 제어 프레임워크를 적용하였다.

최적화 문제로부터 생성된 경로 $\{p_{follower}^{(i)}\}_{i=1}^N$ 에서 도출된 팔로워 로봇의 목표 pose $x_d \in \mathbb{R}^6$ 는 다음과 같이 구성된다.

$$x_d = \begin{bmatrix} p_d \\ r_d \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} p_{ee} \\ R_{ee} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 p_d , r_d 는 최적화된 경로에서 유도된 end-effector의 목표 위치 및 회전 벡터이고 p_{ee} , r_{ee} 는 현재 end-effector의 실제 위치와 자세를 의미한다. 이에 따라 작업공간 기준의 가상 임피던스 힘 $f_{imp} \in \mathbb{R}^6$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$f_{imp} = K_e(x_d - x) + D_e(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (10)$$

여기서 K_e , $D_e \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 는 작업공간 기준 강성 및 감쇠 행렬로 구성된다.

이때 생성된 가상 힘 f_{imp} 는 end-effector 프레임에 대한 야코비안 J_{imp} 를 통해 다음과 같이 joint torque로 변환되어 매니플레이터를 제어할 수 있다.

$$\tau_{imp} = J_{imp}^T \cdot f_{imp} \quad (11)$$

한편, 모바일 베이스는 GHC 프레임워크 내에서 처리된 가상 힘 $f_{m-imp} \in \mathbb{R}^3$ 을 받아 속도 명령으로 변환되며, 이는 별도의 Admittance 제어기를 통해 처리된다. 먼저, GHC 내부에서 생성되는 모바일 가상 힘은 다음과 같다.

$$f_{m-imp} = K_m(x_{m,d} - x_m) + D_m \cdot \dot{x}_m \quad (12)$$

여기서 x_m 은 모바일 베이스의 현재 pose를, $x_{m,d}$ 는 end-effector 경로를 기준으로 생성된 모바일 목표 pose를 나타낸다.

K_m , $D_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 각각 모바일 베이스용 강성 및 감쇠 행렬이다.

이 힘 또한 GHC 내부 토크 생성 단계에서 다음과 같이 토크로 변환된다.

$$\tau_{m-imp} = J_{m-imp}^T \cdot f_{m-imp} \quad (13)$$

이후 모바일 제어기에서는 위 가상 힘을 기반으로 discrete admittance [15]제어 방식을 통해 속도 명령을 계산하며, 해당 방식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_{m,t}(t) = (M_m + \Delta t \cdot D_m)^{-1}(M_m \cdot \dot{x}_{m,d}(t - \Delta t) + \Delta t \cdot f_{m-imp}(t)) \quad (14)$$

여기서 $M_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 모바일 베이스의 관성 행렬이며, Δt 는 제어 주기이다. 위 식은 시간에 따른 모바일 베이스의 속도 명령을 계산하는 데 활용되며, 최종적으로 플랫폼의 구동 시스템에 전달되어 실제 이동 동작을 유도한다.

4. GHC 기반 계층 제어 구조

GHC는 모바일 베이스와 매니플레이터를 통합된 하나의 동역학 시스템으로 간주하며, 각 제어 작업 우선순위에 따라 계층적으로 배치하고, null-space projection을 통해 상위 작업의 성능을 보존한 채 하위 제어를 수행한다.

표 1은 본 연구에서 적용한 계층별 제어 작업의 구성을 정리한 것으로, 각 작업의 이름, 자유도(DoFs), 표기법(Notation), 그리고 우선순위(Priority)를 포함한다.

관절 한계 회피는 7자유도 매니플레이터의 각 관절에 대해 개별적으로 적용되는 총 6개의 작업으로 구성되며, 각 작업은 하나의 자유도를 제어한다. 이때 말단 관절은 작업공간에서의 기여도가 낮고 운동 범위가 제한적이므로 제어 대상에서 제외하였다. 두 번째 우선순위에는 매니플레이터의

표 1. 계층별 작업, 자유도, 및 제어 토크 기호 정리.

Table 1. Hierarchical control tasks, degrees of freedom, and corresponding control torque notations.

Task	DoFs	Notation	Priority
관절 한계 회피	1	$T_{lim,j}$	1
작업공간 임피던스 제어	6	T_{imp}	2
모바일 임피던스 제어	3	T_{m-imp}	3

움직임을 제어하는 작업공간 임피던스 제어가 위치하며, 모바일 베이스의 움직임을 제어하는 모바일 임피던스 제어가 세 번째 우선순위에 배치된다.

우선순위가 가장 높은 작업은 관절 한계 회피로, 각 관절이 물리적 한계에 접근하는 것을 방지하기 위해 반발 토크를 생성한다. 제어 토크는 아래와 같이 정의된다.

$$\tau_{lim,j} = \begin{cases} k_j(q_j^{ref} - q_j) - b_j\dot{q}_j, & \text{if } q_j \text{ is near limit} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

여기서 q_j^{ref} 는 관절 한계에서 떨어진 기준 위치이며, k_j , b_j 는 각각 강성 및 감쇠 계수이다.

두 번째 작업은 작업공간 임피던스 제어 식으로, 식 (10-11)에 정의된 가상 임피던스 힘을 기반으로 end-effector가 최적화 경로를 따라 목표 위치 및 자세를 추종하도록 한다.

세 번째 계층은 모바일 임피던스 제어로, 식 (12-14)를 기반으로 end-effector 경로를 기준으로 생성된 모바일 목표 위치를 추종할 수 있도록 모바일 베이스의 속도 명령을 유도한다.

각 계층의 제어 토크는 null-space projection을 통해 누적되며, 전체 제어 토크는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{total} = \tau_1 + P_1\tau_2 + P_2\tau_3 \quad (16)$$

각 계층의 투영 행렬 P_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_i = I - J_i^T(J_i M^{-1} J_i)^{-1} J_i M^{-1} \quad (17)$$

J_i 는 i 번째 작업의 야코비안이며, M 은 전체 시스템의 관절 공간 관성 행렬이다.

III. 실험

1. 실험세팅

본 실험은 두 대의 이기종 모바일 매니플레이터 MOBY (리더)와 MOCA (팔로워)를 활용하여 실제 환경에서 수행되었다. MOBY는 Swerve drive 방식의 모바일 베이스에 7자유도 매니플레이터를 탑재하고 있으며, 주변 환경 인식을 위해 2개의 2D LiDAR 센서를 장착하였다. MOCA는 Robotnik 사의 SUMMIT-XL-STEEL 모바일 베이스를 기반으로 하며, 4륜 독립 구동 및 조향이 가능한 Mecanum 휠 구조를 갖추고 있다. 또한, MOCA에는 Franka Emika 사의 7자유도 매니플레이터(Franka Research 3)가 장착되어 있어 정밀한 조작이 가능하다.

두 로봇 간의 통신은 robot operating system (ROS)을 기반으로 구성되었으며, 각 로봇의 센서 데이터와 경로 정보는 중앙 제어 PC에서 수집·처리된 후, 실시간으로 각 로봇에 제어 명령이 전달된다.

장애물 회피는 리더 로봇에 장착된 2D LiDAR 센서를 통해 주변 환경을 인식하고, TEB 알고리즘을 활용하여 실시간으로 회피 경로를 생성함으로써 이루어진다. 실험 결과의 정량적 분석을 위해 OptiTrack 모션 캡처 시스템을 사용하여 각 로봇의 모바일 베이스 위치와 매니플레이터 end-effector의 위치를 기록하였으며, 이를 바탕으로 전체 이동 궤적 및 양 로봇 간 end-effector 거리 변화, 팔로워 로봇의 추적 오차를 측정하였다.

실험은 6.4m × 3.2m 크기의 실내 공간에서 수행되었으며 두 개의 장애물이 배치된 환경에서 로봇 간 협동 운반 시나리오를 구성하였다. 장애물은 로봇의 경로 상에서 회피 동작을 유도하기 위해 배치되었으며, 각각의 장애물은 반지름 0.3m의 원형 구조물로 구성되었다.

첫 번째 장애물은 (x,y) = (1.3m, -0.75m) 지점에, 두 번째 장애물은 (x,y) = (3.0 m, 0.9m) 지점에 위치하며 이는 로봇의 초기 이동 방향과 중간 회전 지점에 영향을 주도록 설계되었다. 이러한 배치는 협동 운반 중 리더가 자율적으로 생성한 회피 경로를 따를 때, 팔로워가 단순 추종이 아닌 최적화된 경로를 따라야만 장애물을 피할 수 있도록 하기 위함이다.

실험 시 두 로봇은 각자의 매니플레이터 그리퍼를 통해 끈의 양 끝단을 잡고 있으며, 리더의 자율 이동 경로를 기준으로 팔로워가 협동하여 물체를 운반하는 구조이다. 두 로봇은 평균 약 0.167m/s의 속도로 이동하였으며, TEB 경로 계획 알고리즘을 통해 리더가 실시간으로 회피 경로를 생성하고, 팔로워는 이를 기반으로 최적화된 추종 경로를 생성하여 실행하였다. 실험은 총 114초 동안 진행되었으며, 해당 시간 동안 두 로봇은 충돌 없이 안정적으로 장애물을 회피하며 목적지까지 물체를 협동 운반하였다.

2. 실험 결과

그림 2는 두 이기종 모바일 매니플레이터의 협동 운반 실험 궤적을 보여준다. 리더 로봇은 TEB 알고리즘으로 장애물을 성공적으로 회피하며 경로를 생성하였고, 팔로워 로봇은 최적화된 궤적을 따라 안정적으로 협업하였다. 실험 결과, 장애물 구간에서도 두 로봇 간 목표 거리와 장애물 안전 거리가 유지되었으며, 부드러운 경로 조정으로 충돌 없이 목표 지점까지 이동하였다.

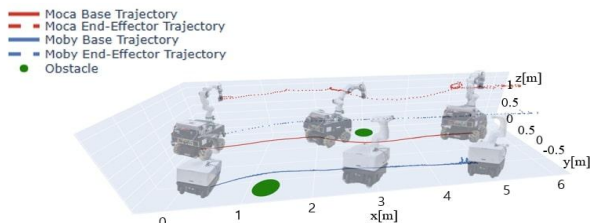


그림 2. 리더(MOBY)와 팔로워(MOCA) 로봇이 장애물을 회피하며 협동 운반을 수행한 실험 궤적. 빨간 선과 파란 선은 각각 팔로워와 리더의 베이스 및 end-effector 궤적을 나타내며, 초록색 원은 인식된 장애물이다.

Fig. 2. Experimental trajectories of the leader (MOBY) and follower (MOCA) robots during cooperative transport with obstacle avoidance. Red and blue lines represent the base and end-effector trajectories of the follower and leader, respectively, and green circles indicate detected obstacles.

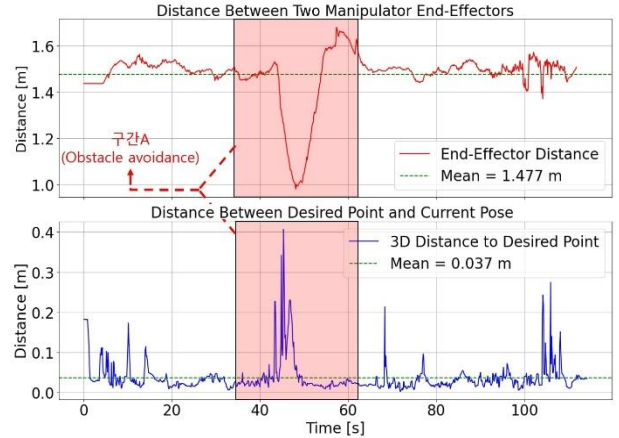


그림 3. 협동 운반 수행 중 시간에 따른 두 로봇의 end-effector 간 거리(상)와 팔로워 로봇의 목표 위치 추적 오차(하)를 나타낸다. 상단 그래프의 붉은 선은 두 로봇 end-effector 간의 유클리디안 거리를, 하단 그래프의 파란 선은 팔로워 로봇의 추적 오차를 나타낸다. 구간 A (Obstacle avoidance)는 장애물 회피가 발생한 시점으로, 두 그래프에 동일하게 표시되었다.

Fig. 3. This figure illustrates the variation in the distance between the end-effectors of the two robots (top) and the tracking error of the follower robot with respect to the target position (bottom) during cooperative transportation. The red line in the upper graph represents the Euclidean distance between the two end-effectors, while the blue line in the lower graph shows the tracking error of the follower robot. Section A (Obstacle avoidance) indicates the time period when obstacle avoidance occurred, and is marked identically in both graphs.

그림 3은 협동 운반 수행 중 시간에 따른 두 로봇의 end-effector 간 거리(상)와 팔로워 로봇의 목표 위치 추적 오차(하)의 변화를 나타낸다. end-effector간 거리의 분석 결과, 전체 실험 구간에서 최대값은 1.680m, 최소값은 0.980m로 나타났으며, 전체 시점 중 96.09%에 해당하는 데이터가 1.05m에서 1.65m사이의 기준 거리 범위 내에 분포하였다.

특히 최대값 및 최소값은 모두 장애물 회피가 수행된 구간 A (Obstacle avoidance)에서 발생하였으며, 이는 팔로워 로봇이 장애물을 피하기 위해 경로를 능동적으로 조정하는 과정에서 일시적으로 기준 거리 범위를 벗어났기 때문이다. 그 외 대부분의 구간에서는 리더와 팔로워 간의 기하학적 제약이 안정적으로 유지되었다.

또한, 하단의 추적 오차 그래프에서 확인할 수 있듯이, 장애물 회피가 수행된 구간 A에서는 경로 상에 급격한 변화가 발생하며 목표 지점과 현재 위치 간의 오차가 일시적으로 최대 0.406m까지 증가하였다.

그러나 팔로워 로봇은 이러한 환경 변화에 빠르게 대응하여 경로를 지속적으로 추종하였고, 오차는 빠르게 감소하여 평균 0.037±0.039m 수준의 정밀도를 유지하였다. 장애물 회피 구간 이후 빠르게 안정적인 상태로 수렴하는 것을 통해, 동적 궤적 변화에도 불구하고 시스템이 빠르게 원래의 안정 상태로 회복함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 이기종 모바일 매니플레이터 간 협동 운반을 위한 제어 프레임워크를 제안하였다. 제안된 프레임워크는 리더 로봇의 실시간 경로 생성과 팔로워 로봇의 비선형 최적화 기반 경로 계획을 통합하고, 이를 GHC 기반 전신 제어를 통해 실행함으로써 리더-팔로워 간의 기하학적 제약 유지와 장애물 회피를 동시에 실현하였다. 실제 환경에서 수행된 실험을 통해 경로 추종 정밀도, 협동 안정성, 환경 적응 능력을 정량적으로 평가하였으며, 특히 장애물 회피 중에도 거리 제약과 추적 오차가 효과적으로 유지됨을 확인하였다.

이러한 결과는 좁은 공간에서 복수의 이동 조작 로봇이 협동 운반을 수행하는 실제 작업 환경에도 적용 가능성을 보여준다. 특히 사전에 경로를 정의하지 않고, 실시간으로 생성되는 경로를 기반으로 팔로워가 능동적으로 협동 운반을 수행하는 구조는, 기존의 단순 추종 방식 대비 높은 유연성과 적응성을 제공한다. 이는 물류 자동화, 건설 현장 자재 운반, 비정형 환경에서의 협동 작업 등 다양한 산업 응용 분야로의 확장 가능성을 갖는다.

실험은 정적인 장애물 환경과 두 대의 로봇 간 협동을 대상으로 수행되었기 때문에, 동적 장애물 대응, 더욱 복잡한 구조물 회피, 다수 로봇 확장성과 같은 요소는 추가적인 고려가 필요하다. 향후 연구에서는 동적 장애물 인식 및 회피, 다양한 장애물 형태에 대한 일반화된 대응, 세 대 이상의 로봇 간 충돌 회피 및 협업 구조 확장에 대해 다룰 예정이다. 또한, 제안된 제어 구조를 인간-로봇 협업 시나리오에 적용하여, 인간의 움직임에 유연하게 반응하며 리더-팔로워 역할을 동적으로 조정할 수 있는 상호작용 기반 협동 운반 시스템으로 확장하고자 한다.

REFERENCES

- [1] T. Sandakalum and M. H. Ang, "Motion planning for mobile manipulators—a systematic review," *Machines*, vol. 10, no. 2, p. 97, Jan. 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/machines10020097>
- [2] H. Farivamejad and S. Berman, "Multirobot control strategies for collective transport," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 5, no. 1, Nov. 2021. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-042920-095844>
- [3] L. E. Parker, "Path planning and motion coordination in multiple mobile robot teams," *Encyclopedia of complexity and system science*, pp. 5783-5800, 2009.
- [4] J. Park, D. Oh, and H. Jin. Kim, "A survey on collision avoidance for multi-robot systems," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 4, pp. 402-411, Apr. 2024. doi: <https://doi.org/10.5302/j.icros.2024.24.0033>
- [5] J. Chen and S. Kai, "Cooperative transportation control of multiple mobile manipulators through distributed optimization," *Science China Information Sciences*, vol. 61, no. 12, Nov. 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9588-0>
- [6] C. P. Bechlioulis and K. J. Kyriakopoulos, "Collaborative multi-robot transportation in obstacle-cluttered environments via implicit communication," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, Aug. 2018. doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00090>
- [7] J.-U. Lee and S.-M. Lee, "Sequential path planning considering collision avoidance in multi-robots," *Journal of Institute of*

Control Robotics and Systems (in Korean), vol. 29, no. 3, pp. 217-224, Mar. 2023.

doi: <https://doi.org/10.5302/j.icros.2023.22.0210>.

- [8] H. Zhang, H. Song, W. Liu, X. Sheng, Z. Xiong, and X. Zhu, "A novel semi-coupled hierarchical motion planning framework for cooperative transportation of multiple mobile manipulators," arXiv.org, 2022. <https://arxiv.org/abs/2208.08054> (accessed May 22, 2025).
- [9] H. Ebel, M. Rosenfelder, and P. Eberhard, "Cooperative object transportation with differential-drive mobile robots: Control and experimentation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 173, p. 104612, Mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104612>
- [10] E. Simetti, G. Casalino, F. Wanderlingh, and M. Aicardi, "A task priority approach to cooperative mobile manipulation: Theory and experiments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 122, p. 103287, Dec. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103287>
- [11] J. Shin, J. Shin, H. Jung, J. Won, E. Auh, and H. Moon, "On-site implementation of external wrench measurement via non-linear optimization in six-axis force-torque sensor calibration and crosstalk compensation," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 3, pp. 1510-1510, Feb. 2025. doi: <https://doi.org/10.3390/app15031510>
- [12] W. Kim, P. Balatti, E. Lamon, and A. Ajoudani, "MOCA-MAN: A mobile and reconfigurable Collaborative Robot Assistant for conjoined huMAN-robot actions," *IEEE Xplore*, May 01, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9197115> (accessed Feb. 24, 2023)
- [13] C. Rösmann, W. Feiten, T. Wösch, F. Hoffmann, and T. Bertram, "Efficient trajectory optimization using a sparse model," *2013 European Conference on Mobile Robots*, Barcelona, Spain, pp. 138-143, 2013. doi: 10.1109/ECMR.2013.6698833
- [14] M. Liu, Y. Tan, and V. Padois, "Generalized hierarchical control," *Autonomous Robots*, vol. 40, no. 1, pp. 17-31, May 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9436-1>.
- [15] K. Li, X. Xiong, A. Wang, Y. Qu, and Y. Lou, "Implicit euler discrete-time set-valued admittance control for impact-contact force control," arXiv (Cornell University), Sep. 2024. doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2409.19275>



황석환

2024년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 졸업. 2024년~현재 한양대학교 대학원 지능정보융합공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 모바일 매니플레이터, 제어.



오지환

2025년 한국공학대학교 기계설계공학부 졸업. 2025~현재 한양대학교 대학원 로봇공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 소프트 엑소스켈레톤.



이정수

2023년 한양대학교 ERICA 로봇공학과 졸업. 2023년~현재 한양대학교 대학원 인공지능융합학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 인공지능.



황순웅

2007년 한양대학교 ERICA 기계공학과 졸업 2016년 한양대학교 메카트로닉스 공학과 박사 졸업 2016-2019년 한양대학교 ERICA 산학협력단 박사후연구원, 2018~2023 제조혁신기술원 책임연구원 2023~현재 한양대 학교 ERICA 로봇공학과 연구부교수.



김완수

2008년 한양대학교 ERICA 기계공학과 졸업. 2015년 한양대학교 기계공학과 박사 졸업. 2015-2016 한양대학교 ERICA 공학기술연구소 박사후연구원. 2016-2021 IIT 박사후연구원 2021-2024 한양대학교 ERICA로봇공학과 조교수. 2024~현재 한양대학교 ERICA 로봇공학과 부교수.