

추력 제약을 고려한 비행 매니플레이터의 안정적 물리 상호작용 제어 기법

Reliable Aerial Manipulator Control for Physical Interaction With Input Saturation Considerations

변 정 현¹, 김 현 진^{2*}

(Jeonghyun Byun¹ and H. Jin Kim^{2,*})

¹Automation and Systems Research Institute, Seoul National University

²Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

Abstract: Designing effective controllers for aerial manipulators remains challenging due to discontinuous disturbances from physical interactions and inherent motor thrust limitations. This paper introduces a disturbance-observer-based control framework that explicitly addresses both challenges to achieve reliable aerial physical interaction. We begin by modeling the full dynamics of an aerial manipulator comprising a hexarotor platform with tilted motors and a rigidly attached robotic arm. Building on this model, we design a disturbance observer to mitigate external disturbances and model uncertainties, and we integrate a sliding-mode control law to ensure robustness against discontinuous disturbances. Furthermore, we develop a reference compensation strategy that adapts the desired pose and twist in real time to satisfy motor thrust constraints. To validate the proposed approach, we conduct three aerial manipulation simulations involving physical contact with the environment. The results demonstrate that our controller achieves stable and robust physical interaction, even under severe disturbances and actuator saturation.

Keywords: Aerial manipulation, discontinuous disturbance, control input saturation, robust adaptive control

1. 서론

비행 매니플레이션(aerial manipulation)은 비행체의 기동성과 로봇팔의 다재다능함을 모두 활용할 수 있는 특징을 가지고 있어 로봇틱스 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 이와 관련하여 비행 매니플레이터를 활용한 센서 설치 및 회수 [1], 비파괴 검사 [2], 플러그 뽑기 [3], 밸브 회전 [4], 문 열기 [5], 나무 흔들기 [6], 태양광 패널 청소 [7]와 같은 물리적 상호작용 작업을 수행하는 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이러한 작업을 수행하면서 안정적인 비행을 보장하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 사항들을 해결해야 한다: 1) 정지 및 운동 마찰력 사이의 전환, 혹은 정적 구조물에 박혀 있는 물체를 뽑아내는 작업을 수행할 때 잡아당기는 힘이 갑자기 사라지는 등, 시간에 따라 변하고, 불연속적인(time-varying and discontinuous) 외란이 발생할 수 있다. 2) 모터 추력의 한계로 인한 제어 능력의 상실이 발생할 수 있다.

비행 매니플레이터의 제어에 있어서, 동역학 모델의 불확실성과 불연속적인 외란을 보상하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. [8]과 [9]에서는 노름(norm)과 시간에 따른 변화율(rate)이 유한한 값을 가지는 외란에 모두 강인한 제어기가 제안되었으며, [10]에서는 질량 중심(center of mass)의 이동을 명시적으로 고려하여 dual-arm manipulator를 가진 비행 매

니플레이터의 위치 추종 성능을 향상시키는 외란 관측기(disturbance-observer, DOB) 기반 제어를 제시하였다. 그러나 이 연구들은 모터 추력의 한계로 인해 발생할 수 있는 제어 능력 상실을 직접적으로 방지하는 방법은 제안하지 않는다.

이러한 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해, 비행 매니플레이터의 모터 추력 한계를 고려한 제어기 설계에 관해 여러 연구들이 또한 진행되었다. [11]에서는 멀티로터를 이루는 각 모터의 추력들을 선형 결합으로 더하여 구한 비행체의 일반화된 제어 입력(비행체의 6자유도 위치 및 자세와 일대일로 대응되는 제어 입력)에 제약을 걸어 모터 추력 제한을 간접적으로 고려하였고, [12]에서는 어떤 동적 시스템의 안정성을 나타내는 지표 중 하나인 수동성(passivity)에 대한 제약을 준수하는 방식으로 같은 문제를 해결하였다. 그러나 이러한 연구들은 모터 추력에 대한 제약을 간접적으로만 고려했기 때문에 제어기법의 엄밀성이 결여될 수 있다. [13], [14], [15], [16]에서는 각자의 제어 기법을 설계하는 과정에서 구동기 모터의 추력을 직접적으로 제한하는 방식을 사용하였지만, 불연속적인 외부 외란이 존재하는 상황에서 위치 추종 성능을 향상시키는 문제는 다루지 않았다.

본 논문에서는 학회 발표 논문 [17]을 확장하여, 불연속적 외란에 대한 강건성과 모터 추력 제약을 동시에 고려한

* Corresponding Author

Manuscript received August 28, 2025; revised October 6, 2025; accepted October 28, 2025

변정현: 서울대학교 자동화시스템공동연구소 연수연구원(quswjdgus97@snu.ac.kr,  0000-0001-7937-8564)

김현진: 서울대학교 항공우주공학과 교수(hjinkim@snu.ac.kr,  0000-0002-6819-1136)

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원·대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00437268).

※ 이 논문은 2025 제40회 제어·로봇·시스템학회 학술대회에 초안이 발표되었음.

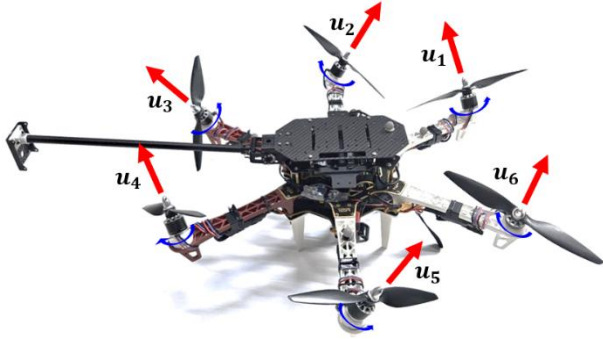


그림 1. 제어기의 성능 검증을 위한 시뮬레이션에서 사용된 완전 구동 비행 매니플레이터.

Fig. 1. Fully actuated aerial manipulator utilized in simulation to evaluate the performance of the controller.

외란 관측기 기반 제어기를 제안한다. 이를 위해 먼저, 그림 1에 나온 바와 같이 6개의 모터를 가진 헥사로터와 간단하게 부착된 로봇 팔로 이루어진 비행 매니플레이터를 설계했다. 이 때, 헥사로터에 부착된 프로펠러들이 추력을 내는 방향을 모두 비행체 평면에 대해 수직하도록 하지 않고, 약간씩 경사를 줌으로써 비행체의 자세 및 위치가 완전히 제어될 수 있도록 했다. 요-축 토크 보완의 효과를 극대화하기 위해서는 프로펠러의 회전 방향과 각 프로펠러의 기울기 값이 중요하다. 그러나 본 논문에서는 제한한 제어 방법이 추력 제약 조건, 모델 불확실성, 불연속적 외란에 대해 강건함을 보이는 데에 초점을 두었기 때문에, 회전 방향과 기울기 값은 이러한 요소를 고려하지 않고 완전 구동성을 확보할 수 있는 조합으로만 구성하였다. 다음으로, 모터 추력의 한계를 보장하기 위해 외부 경로 계획 기법으로 부터 주어진 목표 위치 및 자세를 기반으로 비행체가 실제 추종해야 할 위치 및 자세와 그 속도를 추력 제한에 따라 조정하는 참조 보상기(reference compensator)를 설계했다. 이어서, 불연속적 외란에 대한 강인성을 확보하기 위해 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어기를 개발했다. 마지막으로, 제안된 방법의 검증을 위해 비행체와 외부 환경과의 물리적 상호작용을 포함한 작업을 시뮬레이션을 통해 수행하고, 그 결과를 확인해보았다.

II. 기호 정의

본 논문에서는 다음과 같은 표기법을 사용한다.

$\mathbf{I}_i$: $i \times i$ 단위행렬 (identity matrix),

$\mathbf{0}_{i \times j}$: $i \times j$ 영행렬,

$\mathbf{e}_3$: $[0 \ 0 \ 1]^T$,

$[\alpha]_{\times} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$: $\alpha, \beta \in \mathbb{R}^3$ 에 대하여 $\alpha \times \beta = [\alpha]_{\times} \beta$ 를 만족하는 연산자,

$\text{blkdiag}\{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_N\}$: 행렬 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_N$ 을 블록 대각 형태로 정렬한 블록 대각 행렬 (block diagonal matrix),

c_* 와 s_* : $\cos*$ 와 $\sin*$

III. 동역학 모델

[16]에 따르면, 본 논문에서 활용하는 비행 매니플레이터의 Euler-Lagrange 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{u} + \mathbf{d} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^6$ 는 위치 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ 와 Euler 각 $\boldsymbol{\phi} \in \mathbb{R}^3$ 를 포함하는 일반화된 좌표를 의미하며, 이 좌표는 관성 좌표계를 기준으로 한 헥사로터의 위치 및 자세를 표현한다. 또한, $\mathbf{u} = [u_1 \dots u_6]^T$ 는 여섯 개의 모터 추력을 하나로 모은 열 벡터이며, $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^6$ 는 외부 외란을 표현한다. 아래 식들은 위 동역학에 사용된 모델 파라미터들의 정의를 보여준다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}) &\triangleq \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{Q}^T \mathbf{J} \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}) &\triangleq \text{blkdiag}\{\mathbf{R}, \mathbf{Q}^T\} \boldsymbol{\Xi}, \\ \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &\triangleq \begin{bmatrix} m\mathbf{g}\mathbf{e}_3 \\ \mathbf{Q}^T (\mathbf{J} \dot{\mathbf{Q}} \dot{\boldsymbol{\phi}} + [\mathbf{Q} \dot{\boldsymbol{\phi}}]_{\times} \mathbf{J} \mathbf{Q} \dot{\boldsymbol{\phi}}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 와 $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ 은 각각 (i) 각속도 $\boldsymbol{\omega}$ 에 대해 $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{Q} \dot{\boldsymbol{\phi}}$ 를 만족시키는 매핑 (mapping) 행렬과 (ii) 비행체의 좌표계에서 관성 좌표계로의 회전 행렬을 의미한다. 이 때, $\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^3$ 는 각속도 벡터, m 은 질량, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 관성 모멘트, $\mathbf{g}$ 는 중력 가속도를 의미한다. 한편, 믹서(mixer) 행렬 $\boldsymbol{\Xi} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\boldsymbol{\Xi} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}s_{\alpha} & -s_{\alpha} & \frac{1}{2}s_{\alpha} & \frac{1}{2}s_{\alpha} & -s_{\alpha} & \frac{1}{2}s_{\alpha} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}s_{\alpha} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}s_{\alpha} & -\frac{\sqrt{3}}{2}s_{\alpha} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}s_{\alpha} \\ c_{\alpha} & c_{\alpha} & c_{\alpha} & c_{\alpha} & c_{\alpha} & c_{\alpha} \\ -\frac{1}{2}P_1 & -P_1 & -\frac{1}{2}P_1 & \frac{1}{2}P_1 & P_1 & \frac{1}{2}P_1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}P_1 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}P_1 & -\frac{\sqrt{3}}{2}P_1 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}P_1 \\ P_2 & -P_2 & P_2 & -P_2 & P_2 & -P_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

여기서 P_1 은 $Lc_{\alpha} + k_f s_{\alpha}$, P_2 는 $Ls_{\alpha} - k_f c_{\alpha}$ 를 의미하며, 이 때 L 은 헥사로터의 중심에서 각 프로펠러까지의 거리, α 는 모터의 추력이 비행체에 수직한 방향에 비해 어느 각도로 틀어져 있는지, k_f 는 추력-토크(thrust-to-torque) 계수를 각각 나타낸다.

IV. 제어기

1. 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어기

전체 제어기 구조를 간략하게 도식화한 그림 2의 오른쪽 박스에 나온 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어 법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}(\hat{\mathbf{h}} + \hat{\mathbf{M}}(\Lambda \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}) - \hat{\mathbf{d}}_c) \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{s}$ 는 $\dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e}$, $\mathbf{e}$ 는 $\mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ 로 정의되며, $\mathbf{q}_d$ 와 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 는 각각 헥사로터가 추종해야 할 자세 및 위치, 그리고 그 속도를 의미한다. 또한, Λ , $\mathbf{A}$, $\mathbf{K}$ 는 각각 사용자가 임의로 정할 수 있는 6×6 양의 정부호 행렬이며, $\hat{\mathbf{h}}$ 와 $\hat{\mathbf{M}}$ 은 각각 $\mathbf{h}$ 와 $\mathbf{M}$ 의 기준 값(nominal value)을 의미한다. 여기서 주목할 점은 (3)에 있는 $\text{sign}(\mathbf{s})$ 항이 위치 추종 성능 향상에 중요한 역할을 한다는 것이다.

(3)에서 사용된 외란 추정 값 $\hat{\mathbf{d}}_c$ 는 [18]에서 제시된 외란 관측기 구조를 기반으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}_c &= -\hat{\mathbf{M}}(\mu^{-1} \Gamma_{\zeta}(\zeta - \dot{\mathbf{q}}) + \chi) + \hat{\mathbf{h}} \\ \dot{\zeta} &= -\mu^{-1} \Gamma_{\zeta}(\zeta - \dot{\mathbf{q}}), \quad \dot{\chi} = -\mu^{-1} \Gamma_{\chi}(\chi - \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (4)$$

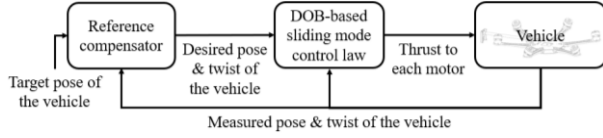


그림 2. 제어기 구조.

Fig. 2. Controller structure.

여기서 $\zeta, \chi \in \mathbb{R}^6$ 는 각각 $\dot{q}$ 와 $\hat{M}^{-1}Bu$ 의 필터링된 값이며, $\Gamma_\zeta, \Gamma_\chi \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 는 사용자가 설정할 수 있는 양의 정부호 행렬, $\mu \triangleq \begin{bmatrix} \mu_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mu_6 \end{bmatrix}$ 는 $0 < \mu_1, \dots, \mu_6 < 1$ 을 만족하는 대각 행렬이다.

2. 기준 보상기 (Reference Compensator)

외부 경로 계획기에서 계산된 비행체의 목표 위치 및 자세 값 q_t 에 기반하여 실제로 비행체가 추종해야 위치 및 자세 값 q_d 와 그 값의 시간에 대한 미분 값(twist) $\dot{q}_d$ 을 계산하는 기준 보상기(reference compensator)는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \min_{\dot{q}_d} \quad & w_v \dot{q}_d^T \dot{q}_d + w_h \frac{(q_d - q_t)^T}{\|q_d - q_t\|^2} \dot{q}_d \\ \text{s.t.} \quad & u_m + k_m \leq u \leq u_M + k_m \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $u_m, u_M \in \mathbb{R}^6$ 는 모터 추력 벡터 u 의 하한 및 상한을 각각 나타내며, 스칼라 w_v 와 w_h 는 각각 과도한 진동 억제를 위한 가중치와 목표 추종 성능 향상을 위한 가중치를 의미한다. 또한, $k_m = [k_{m,1} \cdots k_{m,6}]^T$ 와 $k_M = [k_{M,1} \cdots k_{M,6}]^T$ 는 제어 법칙 (3)의 sign항으로 인해 발생할 수 있는 추가적인 추력의 최소 및 최대 값을 각각 나타내며, 아래와 같이 계산된다.

$$k_{m,i} = -\sum_{j=1}^6 |K_{ij}^*|, \quad k_{M,i} = \sum_{j=1}^6 |K_{ij}^*| \quad (6)$$

여기서 $K^* \triangleq B^{-1}K = \begin{bmatrix} K_{11}^* & \cdots & K_{16}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{61}^* & \cdots & K_{66}^* \end{bmatrix}$ 이다.

V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 제어 기법을 검증하기 위해, 물리적 상호작용이 동반된 비행 매니플레이션 시뮬레이션 세 가지를 다음과 같이 수행하였다. 1) 도달 불가능한 목표 위치를 가진 정적인 벽을 밀기(Pushing a static wall), 2) 단단히 고정된 플러그 당기기(Pulling a firmly attached plug), 3) 마찰이 존재하는 표면 위에서의 밀며 미끄러지기(Push-and-slide). 이 때, 추력의 하한과(u_m) 및 상한(u_M)은 각각 $[1; 1; 1; 1; 1; 1]$ N과 $[15; 15; 15; 15; 15; 15]$ N으로 설정하였다.

시뮬레이션은 Ubuntu 20.04 운영체제와 ROS noetic 환경에서 진행하였으며, 완전구동 비행 매니플레이터의 동역학 및 외부와의 물리적 상호작용하는 환경 모두 식 (1)에 나온 식을 기반으로 직접 작성하였다. 제어기 또한 같은 환경에서 설계되었으며, 시뮬레이션 환경 및 제어기 모두 같은 컴퓨터 환경에서 구동되었으며, 결과는 RViz 환경에서 시각화되었다. 컴퓨터의 경우 12th Gen Intel® Core™ i7-1260 (2.10GHz) 프로세서를 사용하고 있으며, 8.00 GB RAM이 설치되어 있다. 또한 128 MB 크기의 Intel® Iris® Xe Graphics 그래픽 카드가 설치되

어 있다.

그림 3은 첫 번째와 두 번째 시뮬레이션 설정을 아래와 같이 더 자세히 설명한다.

① 벽 밀기 시나리오: 정적인 벽이 존재하는 상황에서, 벽 너머에 위치한 목표 지점을 향해 기체가 지속적으로 힘을 가한다.

② 플러그 당기기 시나리오: 소켓에 단단히 연결되어 빼낼 수 없는 플러그를 일정한 힘으로 계속 잡아당기고 있다.

한편, 그림 4는 세 번째 시뮬레이션인, 마찰이 있는 표면에서의 밀며 미끄러지는 작업을 수행하고 있는 RViz 환경을 보여준다.

첫 번째 시뮬레이션에서는 마찰 계수를 0.30으로, 세 번째 시뮬레이션에서는 마찰 계수를 0.50으로 설정하였다. 또한, 두 시뮬레이션 모두 강성 계수를 500 N/m으로 설정하였다. 한편, 두 번째 시뮬레이션에서는 엔드 이펙터 (end-effector)에 작용하는 힘을 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$f_e = 500(p_e - p_s) \quad (7)$$

여기서 $p_e \in \mathbb{R}^3$ 와 $p_s \in \mathbb{R}^3$ 는 각각 엔드 이펙터와 플러그를 잡고 있는 위치를 의미한다.

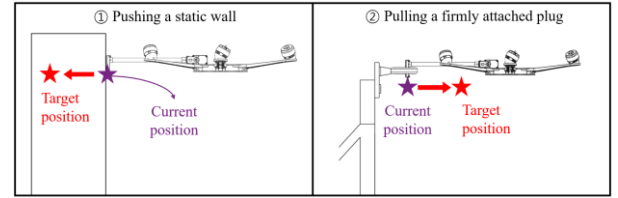


그림 3. 제어기 검증용 시뮬레이션 세팅. ① 정적인 벽 너머에 있는 목표 지점을 향해 지속적으로 밀는 동작. ② 소켓에 단단히 연결된 플러그를 계속해서 당기는 동작.

Fig. 3. Simulation setups for controller validation. ① A scenario where a static wall continuously exerts force toward a target point located beyond the wall. ② A scenario where a plug, tightly connected to a socket, is consistently pulled.

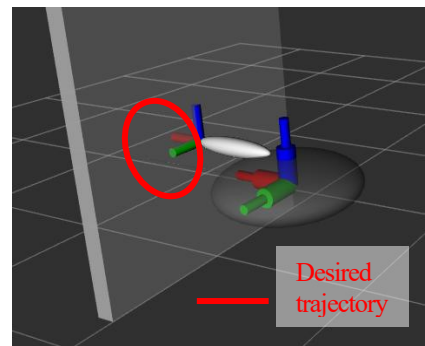


그림 4. 마찰이 있는 벽면 상에서 밀며 미끄러지는 동작을 수행하고 있는 비행 매니플레이터 시뮬레이션을 시각화한 화면.

Fig. 4. Visualization of the push-and-slide on a surface with friction simulation.

1. 정적인 벽 밀기(Pushing a static wall)

정적인 벽을 밀는 비행 매니퓰레이터 시뮬레이션의 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 이 결과를 통해 제안된 제어기를 적용한 비행 매니퓰레이터가 모터 추력의 제약 조건 하에서도 목표 자세를 조정하며 안정적으로 밀는 동작을 수행할 수 있음을 보여준다. 또한, 매 제어 루프가 평균적으로 9 ~ 11 ms의 시간 안으로 돌기 때문에 실시간성도 보장된다고 볼 수 있다.

2. 단단히 고정된 플러그 당기기(Pulling a firmly attached plug)

그림 6은 소켓에 단단히 연결된 플러그를 당기는 비행 매니퓰레이터 시뮬레이션 결과를 보여준다. 본 논문에서 제안된 제어기는 (7)에 나온 강한 제약력을 포함하는 외란 하에서도 안정적인 자세 추종 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특히, 모터 추력 제약을 고려했기 때문에, 비행체가 추력의 한계를 초과하지 않으면서도 조정된 목표 위치 및 자세를 정확

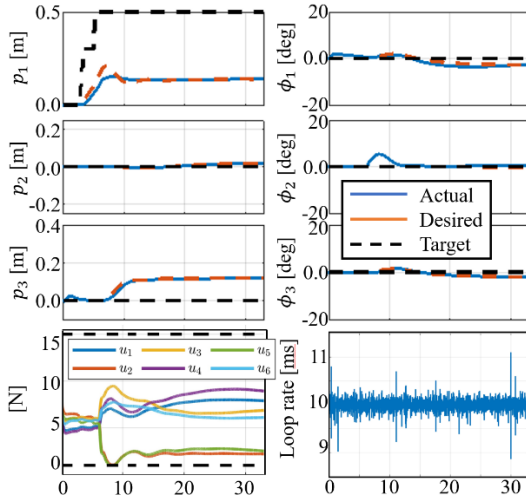


그림 5. 정적인 벽을 내부에 있는 목표 지점을 향해 계속 밀는 시뮬레이션의 결과.

Fig. 5. Simulation results of the first scenario.

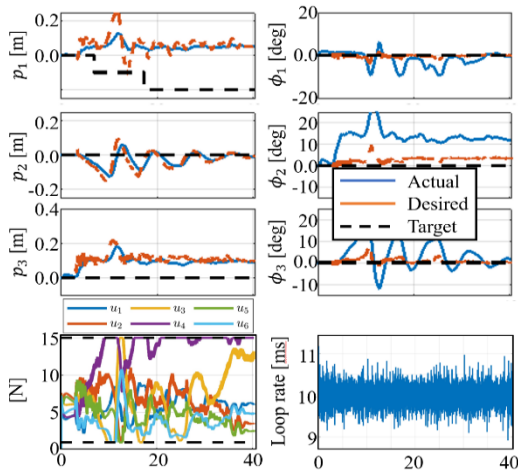


그림 6. 소켓에 단단히 연결된 플러그를 계속해서 당기는 시뮬레이션의 결과.

Fig. 6. Simulation results of the second scenario.

하게 추종하는 것 또한 확인할 수 있다. 해당 시나리오에서도, 매 제어 루프가 평균적으로 9 ~ 11 ms의 시간 안으로 돌아 실시간성을 보장하는 것을 확인할 수 있다.

3. 마찰이 있는 표면 위에서 밀며 미끄러지기(Push-and-slide on a surface with friction)

식 (3)에 포함된 부호(sign) 항이 자세 추종 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해, 마찰이 존재하는 표면에서의 위치 및 자세 추종 오차를 부호 항이 있는 경우와 없는 제어기를 사용했을 때의 결과를 비교해 보았다. 그림 4에서와 같이, 비행 매니퓰레이터의 엔드 이펙터는 반지름 0.15 m, 주기 30 s의 원 궤적을 따라 미끄러지도록 명령되었다. 이 때, 벽면보다 0.1m 더 들어가게끔 목표 지점을 잡았으며, $\hat{d}_c$ 의 첫 번째부터 세 번째 항들은 접촉하고 있을 경우 업데이트하지 않고, 접촉 전 값을 사용하여 외란 추정으로부터 발생할 수 있는 anti-windup 문제를 방지했다, sign 항에 들어가는 제어 게인 K 의 값은 $\text{blkdiag}\{5I_3, I_3\}$ 으로 설정하였다.

표 1. 제어기별 위치 추종 성능 비교.

Table 1. Position-tracking performance comparison among controllers.

	(a) Without the sign term (Baseline)	(b) With the sign term
Maximum tracking error of p_2 [cm]	7.70	2.00
Maximum tracking error of p_3 [cm]	5.10	0.70

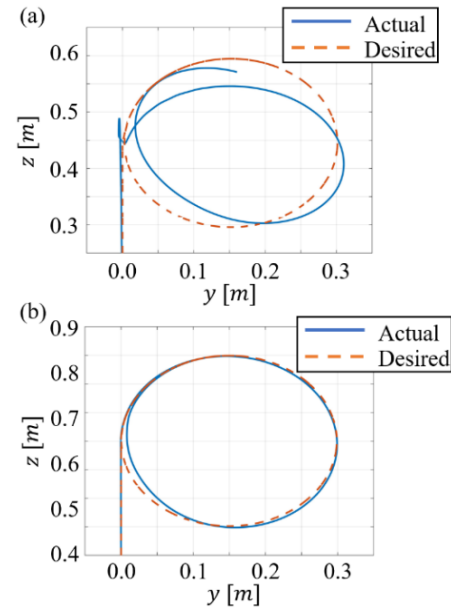


그림 7. 핵사로터의 위치 중 접촉면에 tangential한 성분인 y 및 z 좌표 값의 원하는 값 및 실제 값. (a) Sign 항이 없는 경우. (b) Sign 항이 있는 경우.

Fig. 7. Histories of desired and actual values of p_2 and p_3 , which are tangential to the contact surface. (a) Without the sign term. (b) With the sign term.

세 번째 시뮬레이션의 결과는 정량적 평가 및 그래프를 통한 평가가 모두 이루어진다. 정량적 비교 결과는 표 1에 요약되어 있으며, 미끄러지는 계적 추종에 대한 결과 그래프는 그림 7에 제시되어 있다. 이 결과는 부호 항의 존재가 자세 추적 성능을 소폭 향상시킴을 보여주며, 외란의 불연속성을 완화하는 데 효과적임을 입증한다.

VI. 결론

본 논문에서는 불연속적인 외란 환경에서의 성능 향상과 모터 추력 한계를 동시에 고려한 비행 매니플레이터용 외란 관측기 기반 제어를 제안하였다. 이를 위해 로봇 팔이 부착된 헬스로터 플랫폼을 설계하고, Euler-Lagrange 운동 방정식에 기초한 동역학 모델을 도출하였다. 이어서 모터 추력 한계를 보장하기 위해 목표 위치·자세 및 그 속도를 조정하는 참조 보상을 설계하였고, 이러한 목표 상태를 기반으로 불연속적인 외란에 대해 강인성을 확보하는 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어를 구성하였다. 제안된 방법의 타당성은 다양한 물리적 상호작용을 포함한 비행 매니플레이터 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 외부 환경과의 상호작용 안정성을 유지하면서도 불연속 외란 하에서의 위치 추종 성능이 향상됨을 확인하였다. 향후에는 충돌 회피와 수동성(passivity) 등의 추가 제약 조건을 통합하고, 실제 하드웨어 실험을 통해 본 방법을 확장 및 검증할 계획이다.

REFERENCES

- [1] S. Hamaza, I. Georgilas, M. Fernandez, P. Sanchez, T. Richardson, G. Heredia and A. Ollero, "Sensor installation and retrieval operations using an unmanned aerial manipulator," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 2793-2800, Jul. 2019.
- [2] T. Hui, E. Cuniato, M. Pantic, M. Tognon, M. Fumagalli, and R. Siegwart, "Passive aligning physical interaction of fully-actuated aerial vehicles for pushing tasks," *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6152-6158, May. 2024.
- [3] J. Byun, I. Jang, D. Lee, and H. J. Kim, "A hybrid controller enhancing transient performance for an aerial manipulator extracting a wedged object," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 3264-3273, Jul. 2023.
- [4] M. Brunner, G. Rizzi, M. Studiger, R. Siegwart, and M. Tognon, "A planning-and-control framework for aerial manipulation of articulated objects," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 10689-10696, Oct. 2022.
- [5] D. Lee, H. Seo, D. Kim, and H. J. Kim, "Aerial manipulation using model predictive control for opening a hinged door," *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1237-1242, Jun. 2020.
- [6] A. González-Morgado, E. Cuniato, M. Tognon, G. Heredia, R. Siegwart and A. Ollero, "Controlled shaking of trees with an aerial manipulator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 30, no. 2, pp. 1026-1037, Jun. 2024.
- [7] Y. J. Choi and S. Jung, "Experimental studies on solar panel cleaning task by a foldable robot arm of a drone," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (Korean)*, vol. 29, no. 11, pp. 887-892, Nov. 2023.
- [8] H. Cao, Y. Li, C. Liu, and S. Zhao, "ESO-based robust and high-precision tracking control for aerial manipulation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 2139-2155, Apr. 2023.
- [9] S. Lyu, Y. Zhang, J. Wang, C. C. Cheah, and X. Yu, "Toward air operation aerial manipulator control with a refined anti-disturbance architecture," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 22, pp. 4076-4091, Jun. 2024.
- [10] X. Liang, Y. Wang, H. Yu, Z. Zhang, J. Han, and Y. Fang, "Observer-based nonlinear control for dual-arm aerial manipulator systems suffering from uncertain center of mass," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 22, pp. 1984-1995, Mar. 2024.
- [11] E. Cuniato, N. Lawrance, M. Tognon, and R. Siegwart, "Power-based safety layer for aerial vehicles in physical interaction using lyapunov exponents," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 6774-6781, May. 2022.
- [12] R. Rashad, D. Bicego, J. Zult, S. Sanchez-Escalonilla, R. Jiao, A. Franchi and S. Stramigioli, "Energy-aware impedance control of a flying end-effector in the port-hamiltonian framework," *IEEE transactions on robotics*, vol. 38, no. 6, pp. 3936-3955, Jul. 2022.
- [13] S. Lee, T. J. Han, J. H. An and H. S. Kim, "T-S fuzzy-model-based robust controller design of a morphing quadrotor by considering input saturation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (Korean)*, vol. 29, no. 5, pp. 398-403, May. 2023.
- [14] D. Chaikalis and A. Tzes, "Optimization-based compliant controller for physical human-aerial manipulator interaction," *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp.1325-1331, Jun. 2024.
- [15] D. Lee and H. J. Kim, "Saturated RISE control for considering rotor thrust saturation of fully actuated multirotor," *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 39-44, Jun. 2024.
- [16] J. Byun, Y. Kim, D. Lee and H. J. Kim, "Safety-critical control for aerial physical interaction in uncertain environment," *2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.7526-7532, May. 2025.
- [17] J. Byun and H. J. Kim, "Disturbance-observer-based control of aerial manipulator considering discontinuous disturbances and thrust constraints," *Proc. of 2025 40th ICROS Annual Conference (ICROS 2025)*, pp.737-738, Jun. 2025.
- [18] W. Ha and J. Back, "A disturbance observer-based robust tracking controller for uncertain robot manipulators," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, pp. 417-425, Mar. 2018.



변 정 현

2020년 서울대학교 기계항공공학부 우주항공공학전공(공학사). 2025년 서울대학교 항공우주공학과(공학박사). 2025년~현재 서울대학교 자동화시스템공동연구소 연수연구원. 관심분야는 비행 로봇의 제어 및 경로 계획.



김 현 진

1995년 한국과학기술원 기계공학과(공학사). 1999년 University of California, Berkeley 기계공학과(공학석사). 2001년 University of California, Berkeley 기계공학과(공학박사). 2002년~2004년 University of California, Berkeley 전기전자컴퓨터공학부 Postdoc/Lecturer. 2004년~현재 서울대학교 항공우주공학과 교수. 관심분야는 자율 로봇 시스템의 항법 및 경로 계획.