

# 팔 달린 이륜 변환 로봇의 외란 관측기를 사용한 롤 각의 균형 제어

## Balance Control of a Roll Angle of Two-wheeled Transformation Robot With Arms (TWT-A) Using a Disturbance Observer

류 호 주<sup>ID</sup>, 정 슬<sup>\*ID</sup>

(Ho Ju Yoo<sup>1</sup> and Seul Jung<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Intelligent Systems and Emotional Engineering Lab., Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

**Abstract:** In this paper, the roll angle balance control in the bicycle mode of a two-wheeled transformation robot with arms (TWT-A) for logistics is presented. TWT-A has two modes : Segway mode and bicycle mode. While in Segway mode, the pitch angle is controlled by two wheels, the roll angle in the bicycle mode is controlled by two synchronized reaction wheels. Since the reaction wheels are slow to respond to maintain balance, a disturbance observer (DOB) is designed to deal with any disturbing input to the roll angle balance. Balancing performance of DOB is evaluated through impact experiments. The disturbance observer reduced the disturbance by 47.7% more compared to the PID controller and showed the effect of suppressing vibration.

**Keywords:** logistics robot, balance control, disturbance observer, reaction wheel

### 1. 서론

최근 들어 온라인 쇼핑의 급격한 증가로 인해 그에 연관된 물류 산업도 급속도로 커지고 있다. 물류 산업이 커짐에 따라 인력도 많이 필요한데 작업자 인력공급을 채우지 못하고 있는 실정이다. 따라서 인력 부족으로 인한 과다한 노동은 사고로 이어지게 되고 이는 물량을 주어진 시간에 처리하지 못하는 악순환이 반복되고 있다.

따라서 인간을 대신하여 물건 운반을 도와주는 물류로봇에 대한 관심과 연구가 각광을 받고 있다. AGV (Automated Guided Vehicle)나 AMR (Autonomous Mobile Robot)와 같이 이동로봇 플랫폼 기반의 물류 로봇은 아마존이나 쿠팡 등과 같은 물류 기업에서 이미 사용하고 있다[1,2]. 물류로봇에서는 로봇에 물건을 탑재하여 목적장소까지 이동하는 것이 필요한 기술로 실내에서의 localization 문제를 해결해야 한다. 음식점에서는 서빙 로봇이 정해진 테이블로 음식을 배달하고 실외에서는 배달 로봇이 음식을 배달한다. 대부분이 물건을 실을 수 있는 플랫폼 구조와 자율주행을 수행할 수 있는 기술에 초점이 맞춰져 있다.

물류로봇은 배달도 중요하지만 인간의 하역작업을 대체하는 역할이 중요해지고 있다. 물류량의 급격한 증가로 인해 인간의 고된 하역작업 수행에 무리하게 수행하여 육체적인 고통과 질환을 얻게 되고 심지어 사망에까지 이르고 있다.

최근에는 도전적으로 2륜 이동로봇 플랫폼에 팔을 달아 사용하는 로봇들이 등장하고 있다. 단순히 물건을 운반하는

역할을 넘어 물건을 핸들링하는 작업으로의 확대를 목적으로 하고 있다. 기존의 4륜 이동로봇 구조를 벗어나 2륜으로 바뀌고 팔을 달아 물건을 잡을 수 있도록 하였다. Boston Dynamics의 한 팔 달린 로봇이 한 장소에서 박스를 픽업해서 컨베이어 벨트로 옮긴다[3]. Fraunhofer IML의 evoBOT이라는 로봇은 2륜 밸런싱 로봇에 팔 역할을 하는 링크가 1쌍 있어 물건을 잡을 수 있다[4]. 이 한 쌍의 링크는 접히고 펼치며 물건을 잡을 수 있다. 팔이 달린 2륜 로봇은 스스로 균형을 유지하며 물건을 운반하는 형태로 많이 연구되고 있다[5-17].

2륜 로봇은 세그웨이의 상업화를 통해 많은 연구가 진행되었다[5]. 2륜 로봇은 제자리에서 회전이 가능하여 효율적인 공간사용의 장점이 있지만 안정적으로 균형을 유지해야 하는 도전적인 문제가 있다[6-17]. 2륜 로봇의 경우 균형 유지가 중요한데 세그웨이와 같이 이를 해결하기 위한 많은 노력이 있었다[7]. 신경회로망 제어를 사용하거나 퍼지제어를 사용하여 2륜 로봇의 균형을 제어하였다[9-11]. 2륜 로봇에 팔이 추가되면 균형제어가 더욱 도전적이 된다[16,18,19]. 2륜로봇과 드론과의 합체 시스템의 균형제어도 소개되었다[20]. 표 1에 다양한 형태의 2륜 로봇이 나타나 있다.

본 논문에서는 물류를 위한 팔이 달린 이륜 변환 로봇의 바이시클 모드에서 균형제어를 수행하였다. 세그웨이 모드인 경우 균형을 유지하기 위해서 2 바퀴를 제어하면 되는데 바이시클 모드의 경우에는 롤 축의 균형을 유지하기 위해 추가적인 구동방식이 필요하게 된다. 이를 위해 반작용 휠을 사용하여 균형을 유지하고자 하였다. 반작용 휠의 속도 제어를

\* Corresponding Author

Manuscript received October 25, 2025; revised November 09, 2025; accepted January 7, 2026

류호주: 충남대학교 메카트로닉스공학과 대학원생(hoju7783@naver.com, ORCID<sup>ID</sup> 0009-0001-4150-3099)

정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수(jungs@cnu.ac.kr, ORCID<sup>ID</sup> 0000-0002-1670-4518)

※ 본 논문은 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 이루어진 연구(RS-2024-00406796, 2024년 산업혁신인재성장 지원사업)로 지원에 감사드립니다.

표 1. 2륜 로봇의 종류.

Table 1. Two wheeled robot.

| Robot                            | Figure                                                                            | Year | Reference |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----------|
| BalBOT                           |  | 2012 | [17]      |
| Two Balancing Robots cooperation |  | 2013 | [18]      |
| Balancing Robot with arms        |  | 2014 | [19]      |
| KOBOKER                          |  | 2018 | [20]      |
| Two wheel robot with a drone     |  | 2018 | [21]      |
| evoBOT                           |  | 2023 | [23]      |

통해 균형을 유지하는데 응답이 느린 특성이 있으므로 균형 성능을 높이기 위해 외란 관측기(disturbance observer, DOB)를 설계하고 충격 실험을 통해 성능을 평가하였다.

## II. TWT-A시스템

### 1. TWT-A 시스템 구조

그림 1은 실제 로봇의 모습이다. 기본적으로 세그웨이 형태의 2륜 로봇으로 두 바퀴의 회전으로 균형을 유지한다.

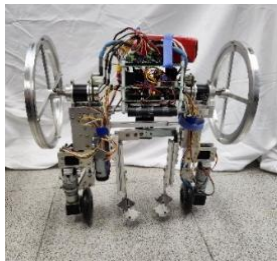


그림 1. 팔이 달린 이륜 변환 로봇(TWT-A).

Fig. 1. Two-wheeled transformation robot with arms (TWT-A).

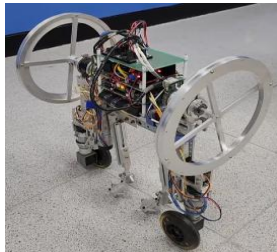


그림 2. 바이시클 모드.

Fig. 2. Bicycle mode.

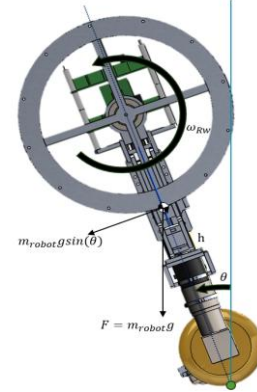


그림 3. 바이시클 로봇 모델링.

Fig. 3. Bicycle robot modelling.

구동 바퀴의 축은 90도 조향이 되어 그림 2와 같이 바이시클 모드로 변환될 수 있다. 그림 1의 기본 모드에서는 구동 바퀴로 로봇의 균형을 유지할 수 있지만 바이시클 모드에서는 상단의 반작용 휠로 균형을 유지한다. 그리고 가운데 팔로 물건을 잡고 들어올릴 수 있는데 이 경우에 무게 중심이 바뀌므로 외란으로 작용하여 균형이 어려워진다. 따라서 TWT-A의 균형제어는 매우 도전적이다. 본 논문에서는 그림 2의 바이시클 모드에서 반작용 휠의 속도를 제어하므로 균형제어를 수행하고자 한다.

### 2. TWT-A 바이시클 모드 모델링

바이시클 모드의 로봇 모델을 구하기 위해 그림 3과 같이 로봇의 변수를 정의하고 운동방정식을 식을 간단하게 유도하였다.

$$J_{robot}\ddot{\theta}(t) = -J_{wheel}\dot{\omega}_{Rw}(t) + \tau_{gravity}(t) \quad (1)$$

여기서  $J_{robot}$ 은 로봇의 바닥 회전 축 기준 관성 모멘트이고,  $\theta$ 는 로봇이 기울어진 각도(균형 각도),  $\omega_{Rw}$ 는 반작용 휠의 각속도,  $J_{wheel}$ 는 반작용 휠 2개의 관성 모멘트, 그리고  $\tau_{gravity}$ 는 중력에 의한 토크이다.

식 (1)에서  $-J_{wheel}\dot{\omega}_{Rw}(t)$ 는 반작용 휠에 의한 반대 방향 토크이므로 음의 기호로 표시된다.  $\tau_{gravity}$ 는 중력에 의한 토크로, 균형을 유지하는 것이 목적인 작은  $\theta$ 에서는  $\tau_{gravity} = mgh\sin(\theta) \approx mgh\theta$ 로 근사화할 수 있다.

근사화를 통한 선형 모델은 다음과 같다.

$$\hat{G}(s) = \frac{\theta(s)}{\Omega_{Rw}(s)} = \frac{-J_{wheel}s}{J_{robot}s^2 - mgh} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 로봇의 질량이고  $g$ 는 중력가속도이다.

## III. 톨각의 균형제어

### 1. PID 제어

바이시클 모드에서의 균형제어를 위해 로봇의 각도와 반작용 휠의 각속도의 PID 제어를 사용하였다. 균형을 유지하는 로봇의 각도는 0이므로 0도를 유지하기 위한 각도의 PID 제어는 다음과 같다.

$$u_{\theta}(t) = k_{p\theta}(\theta_d - \theta) + k_{i\theta} \int (\theta_d - \theta)dt + k_{d\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (3)$$

여기서  $\theta_d$ 는 목표 로봇 기울기 각도,  $\theta$ 는 로봇 기울기 각도,  $k_{p\theta}, k_{i\theta}, k_{d\theta}$ 는 제어기 이득값이다. 반작용 휠의 각속도 제어는 각속도를 최종적으로 0으로 만들기 위해 추가되었다. 반작용 휠이 최대 각속도에 도달하면 더 이상 회전하는 방향으로 각속도를 증가시킬 수 없게 되어 각 가속도를 발생시킬 수 없고 토크를 만들어내지 못해 제어가 되지 못한다.

$$u_w(t) = k_{pw}w + k_{iw} \int w dt + k_{dw} \dot{w} \quad (4)$$

여기서  $w$ 는 반작용 휠의 각속도,  $k_{pw}, k_{iw}, k_{dw}$ 는 제어기 이득값이다.

반작용 휠의 제어입력은 다음과 같다. 음의 기호는 반작용 휠의 회전 방향이 로봇의 기울어지는 방향과 반대임을 의미한다.

$$u_{rw}(t) = -(u_w(t) + u_\theta(t)) \quad (5)$$

## 2. 외란관측기

외란, 즉 무게 중심의 이동과 노면의 상태에 대한 대처 능력을 강화하기 위해 외란 관측기를 추가하였다. 그림 4는 균형 제어를 위한 외란 관측기 구조를 나타내는 제어블록선도다.

외란 관측기는 외란  $D(s)$ 를 측정하여 제거하는 제어기이다. 출력신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y(s) &= G(s)(D(s) + U'(s)) \\ &= G(s)(D(s) + U(s) - \hat{D}(s)) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $\hat{D}(s) = D(s)$ 이면 출력은 외란에 영향을 받지 않는다. 식 (6)으로부터 외란은 다음과 같이 측정된다.

$$\hat{D}(s) = \frac{1}{\hat{G}(s)} Y(s) - U'(s) \quad (7)$$

여기서  $\hat{G}(s)$ 는 시스템의 모델이다.

$Q(s)$  필터가 있을 경우에 제어 입력 신호  $U'(s)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$U'(s) = \frac{\hat{G}(s)U(s) - Q(s)G(s)D(s)}{\hat{G}(s) + Q(s)(G(s) - \hat{G}(s))} \quad (8)$$

(8)을 (6)에 대입하여 정리하면 측정된 외란 신호와  $Q(s)$  필터를 포함하는 출력은 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{G(s)\hat{G}(s)}{\hat{G}(s) + Q(s)(G(s) - \hat{G}(s))} U(s) + \frac{G(s)\hat{G}(s)(1 - Q(s))}{\hat{G}(s) + Q(s)(G(s) - \hat{G}(s))} D(s) \quad (9)$$

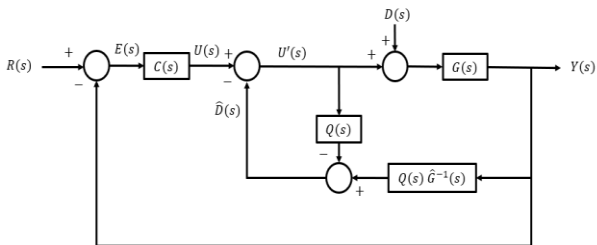


그림 4. 외란 관측기 제어 블록선도

Fig. 4. Disturbance observer control block diagram

식 (9)에서 보면  $Q(s)$  필터의 크기가 1인 저주파 필터로 선택하면 외란은 제거되지만 모델의 정확성에 위해 출력이 달라지게 됨을 알 수 있다.

그림 4에서  $C(s)$ 는 PID 제어기이며  $Q(s)$ 는  $\omega_c = 20\pi \text{ rad/s}$ 의 차단 주파수를 갖는 1차 저역통과 필터다.

그리고  $\hat{G}^{-1}(s)$ 는 로봇 역모델이며  $Q(s)\hat{G}^{-1}(s)$ 의 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$Q(s)\hat{G}^{-1}(s) = \frac{-J_{robot}\omega_c s^2 + mgh\omega_c}{J_{wheel}s^2 + J_{wheel}\omega_c s} \quad (10)$$

식 (10)에서  $J_{robot} = 0.6092 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 는 로봇의 바닥 회전축 기준 관성 모멘트,  $m = 7.42 \text{ kg}$ 은 로봇 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $h = 0.2479 \text{ m}$ 는 바닥부터 로봇 질량중심 거리,  $J_{wheel} = 0.01775 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 는 반작용 휠의 관성 모멘트이다. 표 2에 각 변수에 대해 정리하였다.

## IV. 시뮬레이션

설계한 외란 관측기를 Simulink로 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 입력은  $R(s) = 0 \text{ rad}$ 이다. 각도 제어를 위한 PID 제어기 이득은 표 2와 같다.

그리고 임의의 입력 외란  $D(s)$ 와 관측된 외란  $\hat{D}(s)$ 을 그림 5와 8에 나타내었다. 관측된 외란  $\hat{D}(s)$ 은 입력 외란  $D(s)$ 과 매우 유사하였다.

표 2. 각 변수 값.

Table 2. Parameter values.

| Parameters  | Description | Value   | Unit                         |
|-------------|-------------|---------|------------------------------|
| $J_{robot}$ | 로봇의 관성 모멘트  | 0.6092  | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ |
| $m$         | 로봇 질량       | 7.42    | $\text{kg}$                  |
| $g$         | 중력가속도       | 9.8     | $\text{m/s}^2$               |
| $J_{wheel}$ | 휠의 관성 모멘트   | 0.01775 | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ |

표 3. PID 제어기 이득.

Table 3. PID controller gain.

| $K_{p\theta}$ | $K_{d\theta}$ | $K_{i\theta}$ | $K_{p\omega}$ | $K_{d\omega}$ | $K_{i\omega}$ |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 3000          | 300           | 800           | 1             | 0.06          | 4             |

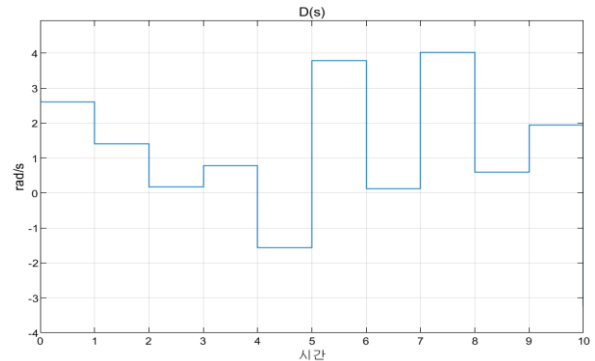


그림 5. 입력 외란  $D(s)$ .

Fig. 5. Input disturbance  $D(s)$ .

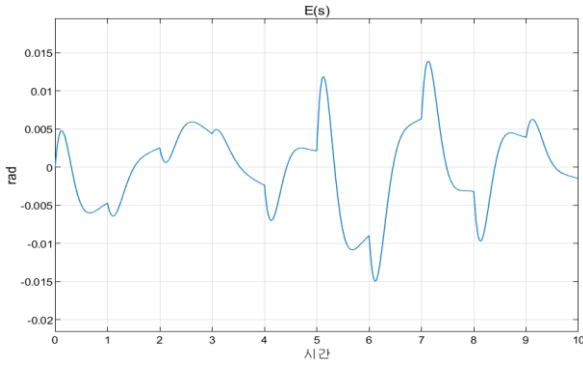


그림 6. PID 제어기의 오차 결과 시뮬레이션.  
Fig. 6. Simulation of error result of PID controller.

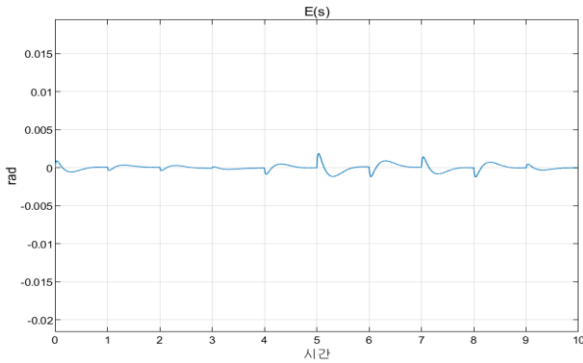


그림 7. 외란 관측기의 오차 결과 시뮬레이션.  
Fig. 7. Simulation of error result of the DOB.

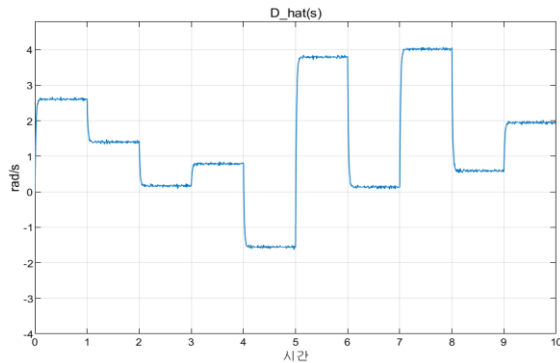


그림 8. 관측된 외란  $\hat{D}(s)$ .  
Fig. 8. Observed disturbance  $\hat{D}(s)$ .

PID 제어기만 사용한 오차 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 넘어지지지는 않지만 진동이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 같은 외란 입력에 대한 외란 관측기를 사용한 오차 결과를 그림 6에 나타내었다. 외란 관측기를 사용하면 오차가 크게 감소되는 결과를 나타내었다.

그림 8은 외란관측기로부터 외란을 측정된 값이다. 매우 유사함을 알 수 있다.

## V. 실험

### 1. 실험 환경

실제 로봇에 대해 외란 관측기 성능을 평가하고자, 질량  $0.509\text{ kg}$ 의 구형 추를 진자 운동으로 로봇 옆면에 충격하였다.

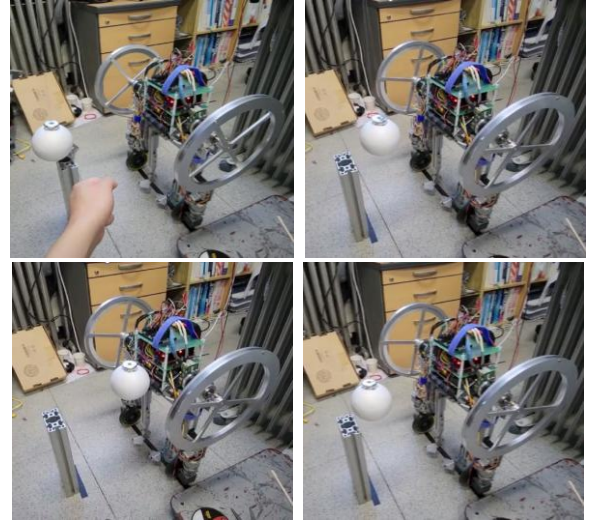


그림 9. 충격 실험 과정.  
Fig. 9. Impact test process.

이때 가해진 충격량을 계산하기 위해 동영상 분석하여 추의 충격 전후 속도를 알아 내었다. 충격 직전 추의 속도는  $0.311\text{ m/s}$  이고 충격 직후 추의 속도는  $0.230\text{ m/s}$  이므로 전후 운동량은 각각  $0.1548\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ,  $0.1172\text{ kg} \cdot \text{m/s}$  이다. 따라서 충격량은 운동량의 차이므로  $0.1548 - 0.1172 = 0.0412\text{ N} \cdot \text{s}$ 이다. 충격 후 5초간 균형 제어 오차를 관측하였다. 제어 샘플링 시간은  $0.01$ 초로 하였다.

그림 9에서 충격 실험 과정을 보여준다. 일정한 거리  $24\text{ cm}$ 에서 구형 추를 췌기로 고정하고, 췌기에 연결된 줄을 잡아당겨 고정을 해제하여 추의 진자 운동을 유도하였다. 이러한 방법으로 일정한 충격을 로봇에 주면서 실험할 수 있었다.

### 2. 실험 결과

#### 2.1 PID 제어

충격에 대한 PID 제어기를 사용한 실험 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서 보듯이 초기에 오버슈트가 크게 나타나고 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. PID 제어기를 사용했을 경우에 RMS 오차는  $0.00736267\text{ rad}$  이다. 표 3은 실험에 사용한 PID 게인 값이다.

#### 2.2 DOB 제어

다음으로 DOB를 추가하여 구현하였다. 그림 11은 외란 관측기를 사용한 결과를 나타낸다. 외란 관측기를 사용하였을 때 초기 오버슈트도 작아졌으며 전체적인 진동의 폭이 줄어든 것을 알 수 있다. 수치적인 비교를 위해 RMS 오차는  $0.00384949\text{ rad}$ 로 PID제어기의 경우보다 반 정도 줄어들어 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 그림 11에서 균형각의 오프셋은 로봇구조가 정확하게 대칭이 아니기 때문이다.

표 3. PID 제어기 이득.

Table 3. PID controller gain.

| Balancing angle |     | Wheel         |       |
|-----------------|-----|---------------|-------|
| $K_{p\theta}$   | 80  | $K_{p,wheel}$ | 0.06  |
| $K_{d\theta}$   | 0.6 | $K_{d,wheel}$ | 0.002 |
| $K_{i\theta}$   | 700 | $K_{i,wheel}$ | 4     |

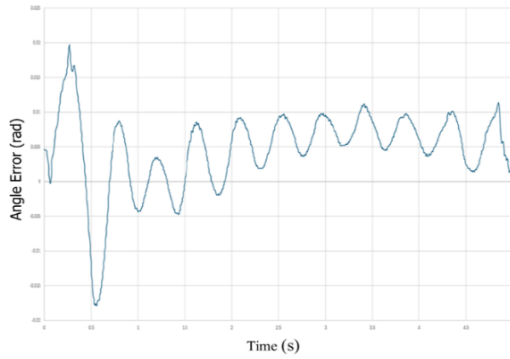


그림 10. PID 제어기의 롤 각 오차 결과.

Fig. 10. Roll angle error result of PID controller.

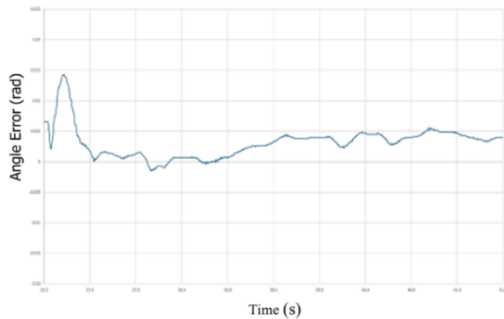


그림 11. 외란 관측기의 롤 각 오차 결과.

Fig. 11. Roll angle error result of the DOB.

## VI. 결론

본 논문에서는 팔이 달린 이륜 변환 로봇에서 바이시클 모드인 경우에 균형을 유지하는 실험을 수행하였다. 먼저 바이시클 모드에서 선형 모델을 구하였고 이 모델을 기반으로 외란 관측기를 설계하였다. 같은 환경에서 충격을 주었을 때 외란 관측기를 추가로 적용하여 PID제어기와 균형제어의 실험결과를 비교하였다. 외란 관측기를 사용하였을 경우, PID 제어기에 비해 초기 오버슈트도 작아지고 전체적인 진동이 47.7% 줄어들었다. 외란 관측기는 로봇에 가해진 외란을 신속하게 제거하고 진동을 억제하는 효과를 보여주었다. 이를 통해 두 팔로 물건을 들어 올렸을 때 나타나는 외란으로 인한 균형제어의 진동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 미래 연구로는 환경 변화나 외란의 다양성에 따른 적응 DOB나 게인 스케줄링을 적용함으로써 균형제어 성능을 높일 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] Amazon Robotics, "Amazon robotics: Meet the robots inside fulfillment centers,"
- [2] Coupang CLS, "Coupang Logistics Services | Coupang Careers,"
- [3] Handle Robot Reimagined for Logistics, [https://www.youtube.com/watch?v=5iV\\_hB08Uns](https://www.youtube.com/watch?v=5iV_hB08Uns)
- [4] evoBOT, [https://www.iml.fraunhofer.de/en/fields\\_of\\_activity/material-flow-systems/iot-and-embedded-systems/evobot.html](https://www.iml.fraunhofer.de/en/fields_of_activity/material-flow-systems/iot-and-embedded-systems/evobot.html).
- [5] Segway, <http://www.segway.com>

- [6] F. Grasser, A. Darrigo, S. Colombi, and A. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, No. 1, pp. 107-114, 2002.
- [7] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of lowcost sensors," *Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 95-105, 2012.
- [8] K. Pathak, J. Franch, and S. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, pp. 505-513, 2005.
- [9] S. S. Kim and S. Jung, "Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 297-303, 2008.
- [10] C. H. Huang, W. J. Wang, and C. H. Chiu, "Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2988-3001, 2011.
- [11] C. C. Tsai, H. C. Huang, and S. C. Lin, "Adaptive neural network control of self-balancing two-wheeled scooter," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1420-142, 2010.
- [12] P. K. W. Abeygunawardhana and T. Murakami, "Vibration suppression of two-wheel mobile manipulator using resonance-ratio-control-based null-space control," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 57, no.12, pp.4137-4146, 2010.
- [13] K. Teeyapan, J. Wang, T. Kunz, and M. Stilman, "Robot Limbo: Optimized planning and control for dynamically stable robots under vertical obstacles," *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automations*, 2010.
- [14] H. Timant, M. Baloh, L. Vermeiren, T. M. Guerra, and M. Parent, "B2, an alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system," *IEEE Intelligent Vehicle System*, pp.594-603, 2002.
- [15] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M Goza, P. Strawser, M. A. Diftler, I. Spain, and N. Radford, "Mobile manipulation using NASA's robonaut," *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp.2104-2109, 2004.
- [16] J. S. Noh, H. W. Kim, and S. Jung, "Neural network control of a two wheeled mobile inverted pendulum system with two arms," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol.20, no.5, pp.652-658, 2010.
- [17] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors," *Mechatronics*, vol. 22, no.1, pp.95-105, 2012.
- [18] S. J. Lee and S. Jung, "Object handling control among two-wheel robots and a human operator: an empirical approach," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 11, no.2, pp. 346-353, 2013
- [19] J. K. Ahn and S. Jung, "Development of a two-wheel mobile manipulator: balancing and interaction control," *ROBOTICA*, pp.1-13, 2013.
- [20] Y. G. Bae and S. Jung, "Balancing control of a mobile manipulator with two wheels by an acceleration-based disturbance observer," *IJHR*, 2018.

- [21] H. W. Kim and S. Jung, "Balancing and driving control of a combined system of a two-wheeled mobile robot and a drone by connector design," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 24, no. 4, pp. 309-314, 2018.
- [22] Y. J. Choi and S. Jung, "A study on a unified approach of denavit-hartenberg parameters on derivation of dynamics equations of two-wheel robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 27, no. 8, pp. 616-625., 2021.
- [23] P. Klokowski, J. Eber, N. Gramse, B. Pschera, M. Plitt, and F. Feldmeier, "evoBOT – design and learning-based control of a two-wheeled compound inverted pendulum robot," *IROS*, pp. 10425-10432, 2023.



### 류 호 주

2021년 국민대학교 기계공학부 졸업.  
2025년 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사졸업. 관심분야는 모바일 로봇, 물류로봇, 로봇제어.



### 정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능 로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 물류 로봇 시스템, 특수 로봇팔 설계 및 제어, 로봇팔 협제어, 자이로 구동기 응용, 로봇교육.