

사용자 추종 및 도난 방지를 위한 스마트 캐리어 설계 및 구현

도은주*¹, 이준호*², 유효근*³, 김선호*⁴, 권송미*⁵, 이인수**

Design and Implementation of a Smart Suitcase with User-Following and Anti-Theft Features

Eun-Ju Do*¹, Jun-Ho Lee*², Hyo-Geun Yoo*³, Sun-Ho Kim*⁴, Song-Mi Kwon*⁵, and In-Soo Lee**

요 약

본 연구에서는 자동 추종 기능과 능동적 도난 방지 메커니즘을 통합한 스마트 캐리어를 제안한다. 제안된 시스템은 BLE RSSI를 활용한 거리 추정과 IMU 기반 헤딩 정보를 통해 사용자의 이동을 안정적으로 추종하며, 엔코더 기반 바퀴 잠금, ToF 센서를 이용한 들림 감지, 사이렌 알람을 연동하여 도난 시도에 실시간 대응할 수 있도록 설계하였다. 실험 결과, 제안된 스마트 캐리어는 2m 이내 거리 추정에서 높은 정확도를 보였고, 헤딩 추종 과정에서 약 6° 이하의 오차만 발생하여 안정적인 제어 성능을 입증하였다. 이를 통해 본 연구는 기존 제품이 단순 추종과 사후 신고에 머물렀던 한계를 넘어, 도난 예방과 사후 대응을 동시에 제공하는 지능형 이동 플랫폼으로 발전할 수 있음을 보여준다.

Abstract

This study proposes a smart luggage system that integrates autonomous following and active theft-prevention mechanisms. The proposed design estimates the user's distance using BLE RSSI and calculates heading information with an IMU to achieve stable tracking. For theft prevention, the system incorporates wheel-lock control via encoders, lifting detection using a ToF sensor, and an audible siren alarm for real-time response. Experimental results demonstrate that the smart luggage achieved high accuracy in distance estimation within 2m and maintained a heading error of less than 6°, ensuring reliable control performance. These findings indicate that, unlike conventional luggage limited to simple following and post-theft reporting, the proposed smart luggage provides both prevention and reactive theft responses, thereby advancing toward an intelligent mobile platform with enhanced security.

Keywords

smart luggage, autonomous following, active theft prevention, BLE RSSI, IMU-based heading

* 경북대학교 전자공학부

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0000-9412-7368>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0009-5384-1923>

- ORCID³: <https://orcid.org/0009-0009-1331-1362>

- ORCID⁴: <https://orcid.org/0009-0005-9438-3851>

- ORCID⁵: <https://orcid.org/0009-0002-0109-227x>

** 경북대학교 전자전기공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9773-4710>

• Received: Jul. 30, 2025, Revised: Aug. 29, 2025, Accepted: Sep. 01, 2025

• Corresponding Author: In-Soo Lee

School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 702-701, Korea

Tel.: +82-53-950-7843, Email: insoolee@knu.ac.kr

I. 서 론

최근 항공 여행 수요가 빠르게 회복되며 수하물 처리량도 함께 증가하고 있다. 그림 1의 그래프에서 확인할 수 있듯, 코로나19 팬데믹 기간에 일시적으로 감소했던 수하물 사고 발생 건수는 2021년 이후 다시 증가세를 보이고 있으며, 2023년과 2024년에는 모두 연간 약 3,500만 건 이상의 사고가 발생하는 등 팬데믹 이전보다 더 높은 수준을 기록하고 있다 [1]. 이는 여행객 수의 증가와 함께 여전히 수하물 분실 및 도난 문제가 해결되지 않았음을 의미하며, 항공 여행에서의 불안 요소로 작용하고 있다.

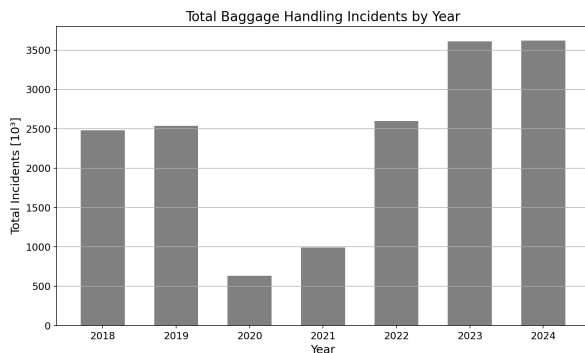


그림 1. 연도별 전세계 수하물 사고 발생 건수 (2018-2024)

Fig. 1. Annual trends in mishandled baggage incidents (2018-2024)

표 1을 보면 기존의 스마트 캐리어 기술은 주로 자동 추종이나 분실 이후의 확인에 초점이 맞추어져 있어, 도난 발생 시 소극적인 대응에 그치고 있다. 다수의 관련 특허 및 상용 제품들 역시 사후 대처 방식에 머무르고 있으며, 캐리어가 누군가에 의해서 들러 나가거나 내부 물품이 탈취된 경우, 사용자가 실시간으로 이를 감지하거나 차단하는 기능은 부족한 실정이다[2]-[6].

이에 본 연구는, 기존 접근 방식의 한계를 극복하고 도난 방지에 중점을 두는 능동적 시스템을 목표로 한다. 사용자를 자율적으로 따라다니는 기능과 더불어, 도난 의심 상황을 사전에 인지하고 바퀴 잠금, 경고 사이렌 등 실시간 반응 기능을 갖춘 스마트 캐리어를 개발함으로써, 수하물 보안의 새로운 기준을 제시하고자 한다.

표 1. 기존 스마트 캐리어와 제안 스마트 캐리어의 비교
Table 1. Comparison between conventional and proposed smart suitcase

Category	Conventional smart suitcase	Proposed smart suitcase
Main objective	Simple following	Integrated functions (following + security + real-time response)
Incident Response	Reactive Response only	Proactive + Reactive Response
Limitation	Limited security functions	Increased system complexity and power consumption

II. 소프트웨어 설계

본 시스템은 자동추종 기능과 도난 방지를 위한 능동적 대응 기능을 갖춘 스마트 캐리어로, 하드웨어 구성과 앱 기반 소프트웨어 제어가 유기적으로 연동되어 동작한다. 앱은 Flutter 개발 환경을 활용하여 구현했다.

2.1 소프트웨어 및 앱 설계

스마트 캐리어 시스템은 BLE(Bluetooth Low Energy) 통신 기반의 앱 제어 구조와 마이크로컨트롤러 중심의 센서 처리 및 모터 제어로 구성되어 있으며, 사용자와의 상호작용을 중심으로 설계되었다.

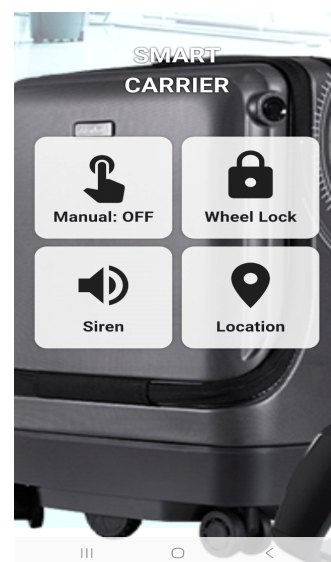


그림 2. 앱 구현도

Fig. 2. App diagram

그림 2는 앱 구현도로서 총 4개의 주요 기능(Manual mode, wheel lock, siren control, location)이 있으며, 각각의 버튼은 실시간으로 하드웨어 동작과 연동된다.

2.1.1 자동 추종 모드

사용자가 앱에서 수동 모드(Manual mode) 버튼을 OFF로 설정하면 캐리어는 자동 추종 모드로 전환된다. 이 모드에서는 ESP32의 BLE 기능을 이용하여 스마트폰과의 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 값을 지속해서 측정하며, 이를 식 (1)과 같이 실시간 거리값으로 환산해 라즈베리파이에서 모터 속도를 제어한다. n 은 경로 손실 지수로 주변 환경(벽 또는 장애물의 여부 등)에 따라 2~4의 값을 가진다. d 는 거리이고, a 는 수신기로부터 측정된 기본 RSSI 값이다.

$$d = 10^{\frac{a - \text{RSSI}}{10n}} \quad (1)$$

특히, RSSI 기반 거리 추정은 칼만 필터(Kalman Filter)를 부분 적용하여 신호 잡음을 보정하였다. 이를 통해 급격한 거리값 변화로 인한 캐리어의 급발진 현상을 예방하고, 보다 부드럽고 안정적인 추종 동작을 구현할 수 있다.

기본 목표 거리는 0.4m로 설정되어 있으며, 사용자가 이보다 멀어질 경우 모터 속도는 거리 차이에 비례하여 선형적으로 증가하도록 설계되었다. 또한 사용자가 1.5m 이상 떨어지면, 캐리어는 설정된 최고 속도로 동작하여 빠르게 추적을 수행하며, 실내외 어느 환경에서도 자연스럽게 따라올 수 있도록 하였다. 거리 정보는 100ms 주기로 갱신되며, 이 갱신 주기에 따라 모터 속도 제어가 실시간으로 피드백 제어되기 때문에 반응성이 높다.

이와 함께, 사용자의 진행 방향에 따라 캐리어가 정확히 추종할 수 있도록 헤딩(Heading) 기반 방향 제어를 적용하였다. 이를 위해 스마트폰과 캐리어 간에 실시간 헤딩 정보 공유 기능을 구현하였다.

사용자의 스마트폰(송신자)은 내장 나침반 센서를 활용하여 헤딩각(0° =북, 시계방향 증가)을 측정하고, 이를 BLE를 이용하여 캐리어(ESP32)에 전송한다. 캐리어는 자체 IMU(Inertial Measurement Unit)

센서를 통해 자신의 헤딩각을 계산한 뒤, 스마트폰으로부터 수신한 헤딩각과 비교하여 각도 차(Δ)를 산출한다. 헤딩 기반 각도 차이 계산 과정은 다음과 같은 절차로 구성된다.

1. 캐리어는 IMU로부터 쿼터니언 데이터 $q(t) = (q_w, q_w, q_y, q_z)$ 를 획득하고, yaw 계산을 위해 이를 내부적으로 3×3 회전행렬 R 로 변환한다.
2. 회전행렬 R 에서 캐리어의 전방 방향 벡터에 해당하는 수평 성분을 식 (2)와 같이 추출한다.

$$f_x = -R_{01}, f_y = -R_{11} \quad (2)$$

3. 기울기(roll, pitch)에 의한 영향을 제거하기 위해 식 (3)과 같이 추출한 벡터를 정규화한다.

$$n = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \tilde{f}_x = \frac{f_x}{n}, \tilde{f}_y = \frac{f_y}{n} \quad (3)$$

4. 정규화된 수평 벡터로부터 캐리어의 yaw(방위각)를 식 (4)와 같이 계산하고, 값을 $0^\circ \sim 360^\circ$ 범위로 정규화한다.

$$\theta_c(t) = \text{atan2}(\tilde{f}_x, \tilde{f}_y) \times \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

5. 스마트폰에서 BLE로 수신한 헤딩각을 $\theta_u(t)$ 라 할 때, 헤딩 차이는 식 (5)와 같이 계산하고 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 범위로 조정한다.

$$\Delta(t) = \theta_c(t) - \theta_u(t) \quad (5)$$

계산된 Δ 는 다음 기준에 따라 모터 속도 차이를 결정하며, 좌우 회전 또는 직진 명령으로 변환된다.

$|\Delta| \leq 10^\circ$: 직진 유지

$\Delta > 10^\circ$: 좌회전 (왼쪽 바퀴 속도↓, 오른쪽 바퀴 속도↑)

$\Delta < -10^\circ$: 우회전 (왼쪽 바퀴 속도↑, 오른쪽 바퀴 속도↓)

방향 보정은 거리 제어 루프(100ms 주기)와 동일한 주기로 수행되어, 거리-방향 통합 피드백 제어가 가능하다. 즉, 캐리어는 사용자가 앞에 있을 때는

전진하면서 일정 간격을 유지하고, 사용자가 방향을 전환할 경우 Δ 값에 따라 즉시 회전하여 진행 방향을 일치시킨다.

이와 같은 헤딩 기반 방향 제어를 추가함으로써, 캐리어는 단순히 거리를 유지하는 수준을 넘어 사용자의 진행 궤적을 따라 안정적으로 추종할 수 있으며, 좁은 실내 환경이나 회전이 잦은 보행 경로에서도 자연스럽게 동작할 수 있다.

2.1.2 수동 모드

사용자가 앱에서 수동 모드(Manual mode) 버튼을 ON으로 설정하면, 자동 추종 기능은 비활성화되며, 사용자 조작 기반의 수동 조작 모드로 활성화된다. 이때 인터페이스에는 그림 3과 같이 드래그 방식의 가상 조이스틱이 표시되어, 사용자의 조작 방향과 강도에 따라 캐리어의 이동 방향 및 속도가 실시간으로 제어된다. 사용자 조작 정보는 BLE 통신을 통해 ESP32로 전송되고, I2C(Inter-Integrated Circuit) 통신을 통해 라즈베리파이로 전달되어 구동계에 즉시 반영된다.

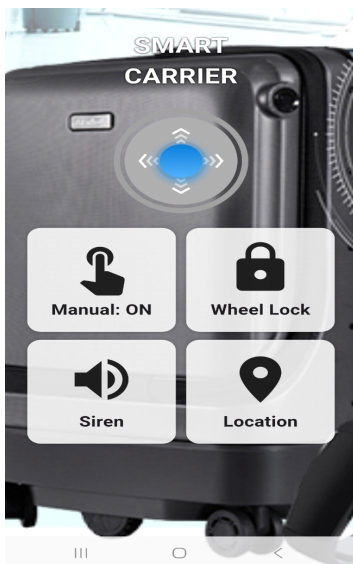


그림 3. 수동모드
Fig. 3. Manual mode

또한 사용자는 수동 조작 모드에서 캐리어를 물리적으로 끌어서 이동시킬 수 있다. 이러한 수동 제어 방식을 통해 협소하거나 복잡한 환경에서도 사용자

가 캐리어를 정밀하게 조작할 수 있으며, 자동 추종 모드의 한계를 보완한다.

2.1.3 위치 확인

사용자가 앱에서 위치확인(Location) 버튼을 활성화하면, 캐리어에 탑재된 ESP32가 GPS 모듈로부터 수신한 현재 위치 정보(위도, 경도)를 BLE를 통해 앱으로 전송한다. 앱은 수신된 위치 데이터를 Google Maps API 기반의 지도 인터페이스에 시각화하여, 사용자가 캐리어의 현재 위치를 직관적으로 파악할 수 있도록 한다.

따라서 이 기능은 도난 또는 분실 상황에 효과적인 대응 방안을 제공한다. 위치 정보는 일정 주기마다 앱으로 전송되어 위치 히스토리 로그로 저장된다. 이를 통해 사용자는 캐리어의 이동 경로를 추적할 수 있다. 그림 4는 실제 위치 확인(Location) 버튼을 눌렀을 때 나타나는 화면을 보여준다[7].

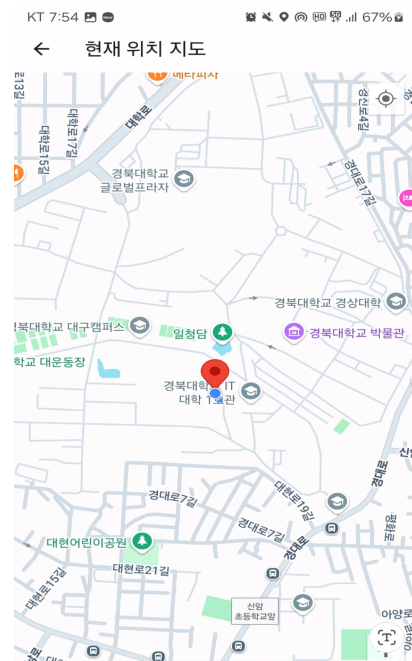


그림 4. GPS 위치 추적 화면
Fig. 4. GPS location tracking interface

2.1.4 바퀴 잠금 모드

그림 5는 바퀴 잠금(Wheel lock) 기능을 활용하여 도난 대응 알고리즘의 동작 과정을 나타낸다. 여기

서 바퀴 잠금 기능은 도난 방지 시스템의 핵심 구성요소이며, 본 알고리즘은 크게 바퀴 잠금 모드 전환, 역제동 기반 도난 억제, 사이렌 경보의 세 단계로 구성된다.

첫째, 바퀴 잠금 모드 전환 단계에서는 GPS 기반으로 사용자와 캐리어 간 거리가 20m 이상 떨어진 상태가 1분 이상 지속되면 시스템은 자동으로 바퀴 잠금 모드로 전환된다. 또한, 사용자가 스마트폰 애플리케이션을 통해 직접 바퀴 잠금(Wheel Lock) 버튼을 누를 경우에도 동일하게 모드 전환이 이루어진다. 전환 신호가 ESP32로 전달되면, ESP32는 즉시 하부에 장착된 ToF(Time-of-Flight) 센서를 활성화함과 동시에 바퀴 잠금 신호를 라즈베리파이에 전달한다.

둘째, 역제동 기반 도난 억제 단계에서는 라즈베리파이는 바퀴 잠금 신호를 수신한 뒤 각 바퀴 구동 모터에 역방향 전류를 인가하여 모터 역제동을 실행함으로써 바퀴의 회전을 억제한다. 이러한 전기적 제동 방식은 외부의 힘에 의해 캐리어를 강제로 끌고 가려고 할 때, 회전 방향에 전기적 저항을 생성하여 바퀴 회전을 강하게 억제하는 효과를 제공한다. 이를 통해 절도범이 캐리어를 끌고 이동하는 행위를 효과적으로 차단할 수 있다.

셋째, 사이렌 경보 단계에서는 모터 역제동 상태에서 3초 이상 끌림이 지속되거나, ToF 센서가 캐리어가 0.1m 이상 들어 올려진 상태를 감지하면 시스템은 즉시 사이렌 부저를 구동하여 90dB 이상의 경고음을 발생시킨다. 이를 통해 주변 사람들의 주의를 집중시키고, 절도 시도를 효과적으로 억제한다.

실험 과정에서 고출력 모터의 경우 사용자가 강제로 캐리어를 끌면 끌림 현상이 일부 발생하는 것을 확인하였다. 이에 따라 역제동 상태에서 끌림이 일정 시간(3초) 이상 지속될 경우를 도난 시도로 간주하여, 자동으로 사이렌을 울리도록 설정하였다. 그러나 역제동 상태에서는 안정적으로 바퀴를 구동하기 어려우므로, 절도범이 캐리어를 들고 이동할 가능성이 크다. 이에 따라 ToF 센서를 이용한 0.1m 이상 들림 감지 시 사이렌을 울리도록 한 것이다.

이러한 보안 메커니즘은 ESP32와 라즈베리파이 간의 신호 처리, ToF 센서 기반의 물리적 상태 감지, 모터 제어부의 역제동, 그리고 부저 경보 기능

이 유기적으로 연동되어 동작함으로써, 외부의 다양한 도난 시도를 실시간으로 감지하고 효과적으로 차단할 수 있음을 보여준다.

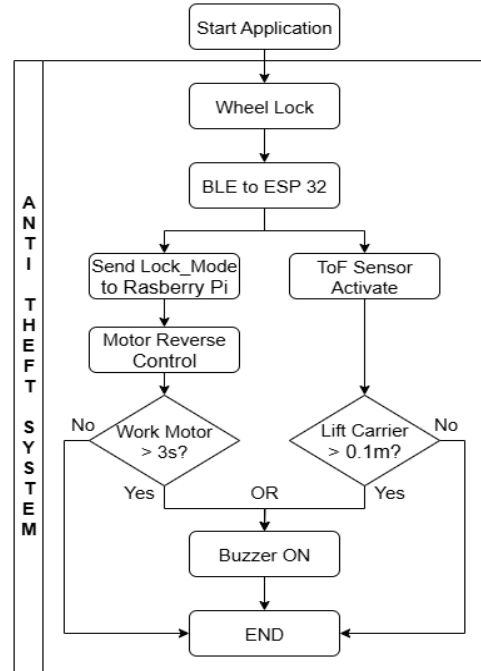


그림 5. 도난 방지 알고리즘

Fig. 5. Anti-theft algorithm

2.1.5 사이렌 제어 모드

사이렌 제어(Siren control) 기능은 사이렌의 강도, 반복 주기, 지속시간을 사용자가 직접 조절할 수 있도록 하는 제어 인터페이스이다. 이 기능을 통해 사용자는 수동으로 사이렌을 작동시킬 수 있으며, 도난 발생이 의심되는 상황에서 즉각적인 경고 신호를 발생시켜 주변의 주의를 환기시키는 역할을 수행한다. 특히 시각적 확인이 어려운 환경에서 사이렌 음향을 추적함으로써 캐리어의 위치를 파악할 수 있는 청각적 위치 추적 기능을 제공한다. 사용자가 사이렌 소리의 방향과 강도를 통해 캐리어의 대략적인 위치를 추정하고 접근할 수 있도록 지원한다. 이러한 방식은 GPS 신호가 불안정한 실내 환경이나 복잡한 공간에서 효과적인 보완 수단으로 활용될 수 있다. 사이렌은 사용자가 사이렌 제어(Siren control) 모드에서 수동으로 해제하기 전까지 캐리어 배터리가 소진될 때까지 계속 동작하도록 설계되었다.

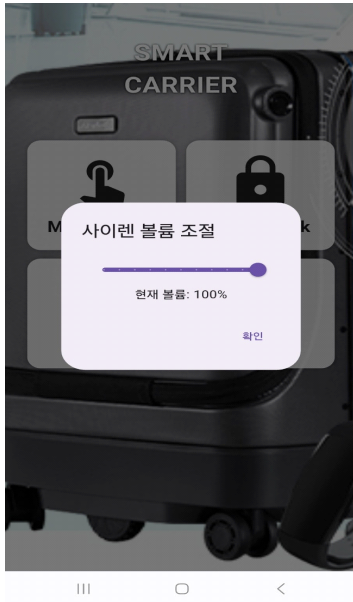


그림 6. 사이렌 볼륨조절
Fig. 6. Volume of siren

III. 스마트 캐리어 하드웨어 구성

그림 7은 본 연구에서 개발한 스마트 캐리어의 하드웨어 구성도이다. 전체 하드웨어 구성은 크게 센서·제어부와 구동부로 나뉘며, 각각 ESP32와 라즈베리파이5를 중심으로 구성된다.

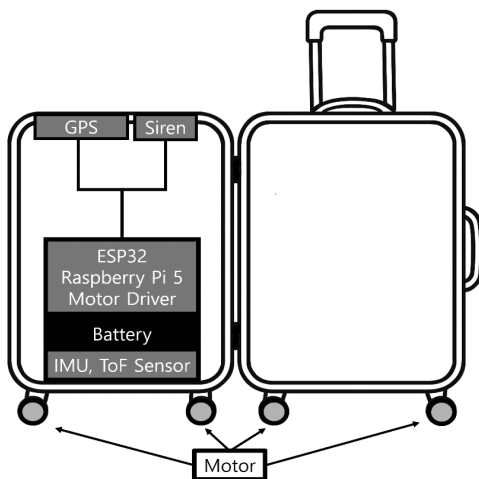


그림 7. 캐리어 내부구조
Fig. 7. Structural layout of the carrier

캐리어 내부를 두 개의 보드로 분리하여 구성한 이유는, 각 보드의 특성과 장점을 고려하여 역할을 명확히 분리하고 시스템의 효율성과 안정성을 동시

에 확보하기 위함이다. 저전력 통신 및 센서 관리에는 ESP32가 적합하며, 고속 연산 및 멀티 프로세싱이 필요한 구동 제어는 라즈베리파이가 더욱 유리하다. 또한, 이러한 구조는 향후 시스템 확장이나 유지보수 시에도 모듈화된 구조로서 높은 유연성을 제공한다.

3.1 센서 및 제어부

본 시스템은 실시간 데이터 수집 및 BLE 통신에 적합한 ESP32를 제어부로 사용하였다. 시스템은 제어부를 중심으로 센서(GPS, IMU, ToF)로부터 값을 입력받고, 출력부(사이렌 부저)를 구동하며, ESP32에 내장된 BLE 기능을 활용하여 스마트폰과 통신하도록 설계하였다.

ESP32에 내장된 BLE 기능은 스마트폰과의 직접적인 무선 연결을 담당하며, 스마트폰 신호의 RSSI 값을 실시간으로 측정하여 사용자와의 상대적 거리를 추정하고, 이를 통해 캐리어가 사용자를 자동으로 추종하는 Human Following 시스템의 핵심 제어 알고리즘을 구현한다.[8]

GPS모듈(Neo-6M)은 실외 환경에서 Human Following 기능의 위치 정확도를 향상시키고, 실시간 위치 정보를 스마트폰 앱에 제공하는 역할을 수행한다. 최소 4개 이상의 위성 신호를 수신하여, 현재 위치의 위도, 경도, 고도 정보를 산출하며, 이는 사용자 위치 추적 및 경로 안내 기능에 직접 활용된다. GPS 데이터는 I2C 방식으로 ESP32로 전송되어 실시간 처리된다[9][10].

IMU 센서는 캐리어의 기울기 및 회전 움직임을 감지하여 사용자와 캐리어 간의 위치 오차를 보정하는 기능을 담당한다. IMU에서 측정된 가속도 및 자이로스코프 데이터는 I2C 통신을 통해 ESP32로 전달되며, 칼만 필터링 및 센서 융합 과정을 거쳐 GPS 위치 데이터와 결합되어 보다 정확한 위치 및 방향 추정을 가능하게 한다.

ToF센서는 캐리어 하부에 설치되어 지면과의 거리를 지속적으로 모니터링하며, 측정된 거리 데이터는 I2C를 통해 ESP32로 전송되어 실시간 분석된다. 이때 설정된 임계값을 초과하는 변위 감지 시 캐리어 들림 상황으로 판단한다.

사이렌 모듈은 ToF 센서의 이상 감지 신호에 따라 자동으로 활성화되며, 고출력 경보음을 발생시켜 주변 환경의 주의를 집중시키고 도난 방지한다. 경보 작동과 동시에 사용자 스마트폰으로 즉각적인 알림 메시지가 전송된다.

전체 시스템은 센서 데이터 수집, ESP32 기반 신호 처리, BLE 통신을 통한 데이터 전송, 앱 제어 및 사용자 알림의 순차적 흐름으로 구성되어 통합적으로 캐리어를 관리한다.

3.2 구동부

구동부는 캐리어의 자율 이동 및 도난 대응 기능을 물리적으로 실현하는 핵심 구성요소이다. 본 시스템은 전륜구동 방식을 채택하여, 전방에는 엔코더가 장착된 2개의 DC 모터 구동 바퀴를, 후방에는 자유 회전이 가능한 2개의 캐스터 바퀴를 배치하였다. 구동부는 라즈베리파이 5에 TB6612FNG 모터 드라이버를 거쳐 2개의 DC 모터가 연결되는 구조이다. 라즈베리파이 5는 ESP32로부터 전달받은 이동 제어 신호(거리 및 방향 데이터, 수동 제어 명령)를 처리하여 모터 드라이버를 통해 좌·우 바퀴를 독립적으로 구동하며, 차동구동 방식을 통해 정밀한 속도 조절 및 방향 제어를 구현한다.

본 시스템에서는 도난 방지 메커니즘의 핵심 기술로서 엔코더 기반 바퀴 잠금 기능을 개발하였다. 바퀴 잠금 모드에서는 외부의 힘에 의해 캐리어를 끌고 가는 것을 실시간으로 감지하고 대응하는 능동적 보안 시스템이 요구된다. 이를 위해, 각 바퀴에 장착된 엔코더의 회전 펄스 신호를 지속적으로 모니터링하며, 모터 구동 명령이 인가되지 않은 상황에서 예상치 못한 바퀴 회전이 검출될 경우 즉시 역방향 저속 토크를 발생시켜 기계적 저항력을 생성한다. 이러한 엔코더 피드백 기반 저항 제어 방식은 단순한 기계적 잠금장치와는 차별화되는 지능형 대응 시스템으로, 외부 힘의 크기와 방향에 따라 적응적으로 저항 강도를 조절할 수 있다. 이는 센서 융합 기반의 상황 인식 능력과 실시간 대응 기능을 결합한 능동적 물리 보안 시스템으로서 확장 가능성을 제시한다.

이러한 구동 제어 구조는 BLE 기반 자동 추종

모드, 사용자 수동 조작 모드, 도난 대응 모드 등 다양한 운용 시나리오에 대해 통합적으로 적용되며, 실내외 환경 조건 변화에 관계없이 안정적인 동작 성능과 보안 기능을 동시에 제공한다. 모터 알고리즘의 모듈화를 통해 각 운용 모드 간의 신속한 전환이 가능하도록 설계되어 보안 효과를 극대화한다.

3.3 배터리

본 연구에서는 실험 단계에서 7.4 V 및 3.7 V 리튬 배터리를 사용하여 기능 검증을 진행하였다. 그러나 추후 실제 상용화 단계에서는 안전 인증과 항공 규정을 충족하는 전용 배터리 팩의 개발이 필수적으로 요구된다. 항공 규정에 따르면 단일 팩의 용량은 100 Wh 이하로 제한되므로[11], 이를 준수하기 위해 소형 배터리 팩을 잠금식 푸시-버튼 이젝션 구조로 설계하여 손쉽게 교체할 수 있도록 추후 제작할 예정이다. 이러한 구조는 장시간 운용 시에도 안정적인 전원 공급을 보장한다.

아울러 상용화 과정에서 개발될 전용 배터리 팩에는 절전 모드가 탑재될 예정이다. 캐리어가 일정 시간 이상 정지 상태일 경우 슬립 모드로 전환되며, 이동이 감지되면 즉시 복귀하도록 구현한다. 이와 같은 전력 관리 기능은 실용성을 높일 뿐만 아니라, 기내용 스마트 캐리어라는 사용 환경에서 반드시 요구되는 요소라 할 수 있다.

IV. 실험 및 성능 평가

4.1 BLE 기반 거리 측정 정확도 및 속도 변화

본 실험은 RSSI 신호를 기반으로 측정된 스마트폰과 캐리어 사이의 거리 값의 정확도와 해당 거리 기반 모터 속도 제어의 반응성을 확인해 시스템의 자동 추종 성능을 평가하는 데 목적이 있다. 실험은 외부 환경에서 진행되었으며, 캐리어를 사용자 뒤에 위치시키고, 사용자가 스마트폰을 소지한 채 수평 방향으로 직진하였다. 사용자가 앱에서 Manual Mode: OFF를 선택하면, ESP32는 스마트폰으로부터 계산된 거리값을 수신하고 이를 I2C 통신으로 라즈

베리파이에 전송한다. 라즈베리파이는 해당 거리 값을 기반으로 기본 목표 거리 0.4m를 기준 임계점으로 설정해 구간별 선형 비례 제어 방식을 사용한다. 이를 통해 PWM(Pulse Width Modulation) 신호 세기를 결정하고, DC 모터를 구동한다.

실험은 0.0m부터 2.1m까지 일정 간격으로 나누어 진행되었으며, 각 거리마다 BLE 거리 측정 및 PWM 출력값을 5회씩 반복 측정하여 평균값을 기록하였다. 이 과정을 통해 각 구간의 RSSI 기반 거리 추정 정확도 및 구동 속도를 산출하였고, 이를 바탕으로 시스템의 추종 성능을 정량적으로 평가하였다.

그림 8에서 실험 결과에 따르면, 1.5m 이내 거리에서는 BLE RSSI 기반 거리 측정이 80% 이상의 높은 정확도를 유지하는 것으로 나타났으며, 실제 캐리어 속도 역시 거리에 비례하여 자연스럽게 증가하는 양상을 보였다. 그러나 1.8m 이상 거리부터는 정확도가 75% 이하로 하락하면서, RSSI 기반 거리 추정의 불안정성이 증가하기 시작했다. 그럼에도 불구하고 속도는 모터 속력 최댓값(8.5km/h)으로 유지되어, 장거리에서도 빠른 추종이 가능하다는 점에서 실용성이 입증되었다.

따라서 본 실험을 통해, BLE RSSI 기반 거리 추정은 2m 이내의 근거리 환경에서는 높은 정확도와 적절한 속도 반응성을 확보할 수 있었으며, 본 시스템의 자동 추종 기능이 실내외 환경에서 실시간 동작 가능성을 지님을 확인하였다.

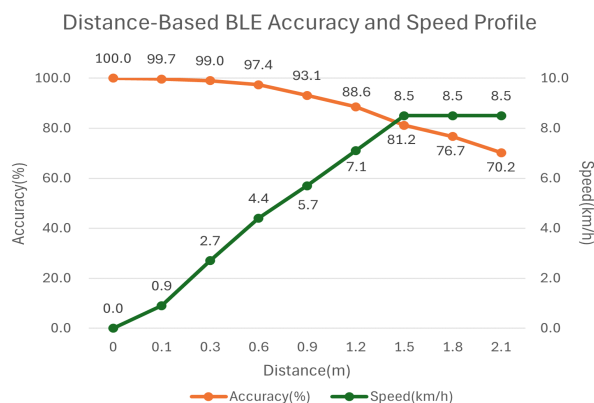


그림 8. BLE 기반 거리 측정 정확도 및 속도 변화 그래프

Fig. 8. Distance-based BLE accuracy and speed profile

4.2 스마트폰 헤딩을 활용한 방향 제어 정확도 검증

본 실험에서는 스마트폰의 헤딩(Heading) 값을 기준으로 캐리어의 이동 방향 제어 방식을 검증하였다. 실험은 사용자의 이동 방향이 스마트폰의 방향과 일치한다고 가정하고 진행하였다.

이를 위해 스마트폰의 헤딩각과 캐리어에 장착된 IMU 센서를 기반으로 계산된 헤딩각을 비교하여 방향 제어 성능을 평가하였다. 사용자는 스마트폰을 손에 쥔 상태에서 직선 및 회전 동작을 수행하였으며, 두 장치 간 헤딩각 차이를 산출하여 방향 추정 결과를 도출하였다.

실험에서는 헤딩 기반으로 측정된 각도와 실제 각도기를 이용한 측정값을 비교하였다. 그림 9는 그 결과를 나타낸 것으로, 좌측 30° 회전, 우측 30° 회전, 우측 90° 회전, 정반대 방향(180°) 총 4가지 상황에서 측정값을 비교하였다.

그림 9의 실험 결과에 따르면, 스마트폰 헤딩 기반 측정값은 실제 측정값과 최대 약 6° 오차 이내의 차이를 보였다. 이는 100ms 주기로 헤딩각이 갱신되는 특성을 고려할 때, 제어 알고리즘에 큰 영향을 주지 않는 수준의 미소한 오차에 해당한다. 따라서 캐리어의 방향 제어 알고리즘에 적용하기에 충분한 정확도를 확보했다고 결론지을 수 있다.

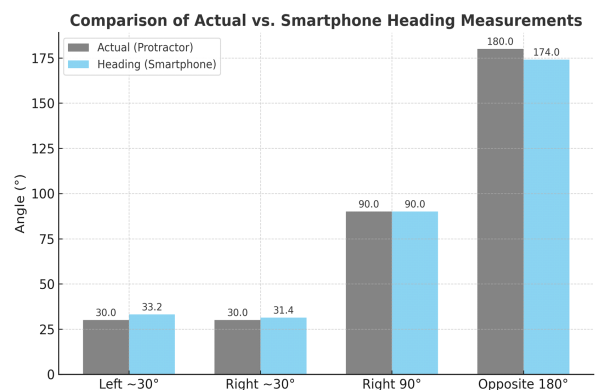


그림 9. 헤딩각 측정 오차 분석 결과

Fig. 9. Error analysis of smartphone-based heading measurement

4.3 ToF센서 감지 정확도 실험 및 적용

ToF 센서의 들림 감지 성능을 평가하기 위한 실

험을 진행하였다. ToF 센서를 ESP32와 I2C 통신으로 연결한 후, Arduino IDE 환경에서 거리 측정 알고리즘을 구현하였다. 센서로부터 획득한 거리 데이터를 실시간 모니터링하면서 물리적 기준값과의 비교 분석을 수행하였다. 표 2는 각 거리 기준값에 대해 10회 측정한 결과를 평균한 값으로, ToF 센서가 다양한 측정 구간에서 실제 거리와 평균 오차 1.5 mm의 높은 정밀도를 나타냄을 보여준다. 캐리어 운용 환경에서 예상되는 높이 구간에서 측정 안정성이 높게 유지되었으며, 측정값 오차도 허용 범위 내에서 제어되었다.

표 2. ToF센서 거리 측정 데이터

Table 2. ToF sensor distance measurement data

Measurement	Distance	Error
51mm	50mm	+ 1mm
102mm	100mm	+ 2mm
201mm	200mm	+ 1mm
252mm	250mm	+ 2mm

이러한 기초 성능 검증을 바탕으로 도난 방지 시나리오에 적용하였다. 들림 감지 알고리즘의 실효성 검증을 위해 0.1m를 임계값으로 설정하고 Flutter 기반 모바일 앱과의 연동 실험을 실시하였다. 이 임계값은 캐리어의 물리적 구조를 고려하여 결정되었으며, 구체적으로 바퀴의 반지름이 약 43mm이고 캐리어 하단부에서 지면까지의 거리가 60mm로 설계된 점을 반영하였다. 따라서 정상 운용 상태에서 ToF 센서가 측정하는 지면과의 거리는 0.1m 미만으로 유지되며, 캐리어가 들어 올려질 경우에 이 값이 임계값을 초과하게 되어 효과적인 들림 감지가 가능하다. BLE통신을 통해 ESP32에서 측정된 거리 정보가 실시간으로 앱에 전달되며, 임계값을 초과할 경우 그림 10과 같이 "캐리어 이상 감지" 알림이 자동 생성되는 시스템을 구축하였다. 동시에 ToF센서의 임계값을 초과할 경우 사이렌이 즉시 작동되도록 시스템을 구축하였다. 반복 실험을 통해 정상 상태에서의 오경보 발생률은 0%를 기록하였고, 실제 들림 상황 시뮬레이션에서는 모든 케이스에서 정확한 감지가 이루어졌고 알림과 사이렌이 정상적으로 동작하였다. 이는 오작동 없이 일관된 성능을 유지함으로써 실용적 적용 가능성을 입증하였다.

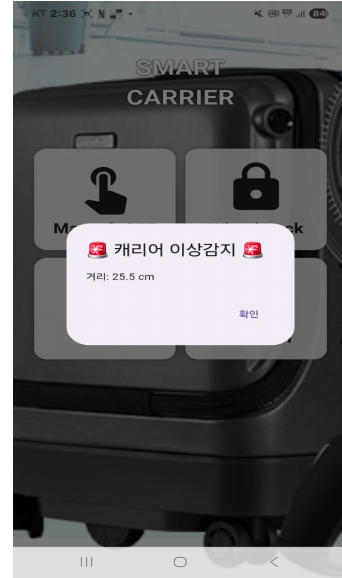


그림 10. 캐리어 이상 감지 알림 화면

Fig. 10. Carrier notification screen

4.4 바퀴 잠금 효과 검증 실험

Wheel Lock 시스템의 효과를 검증하기 위해 라즈베리파이 기반 TB6612FNG 모터 드라이버와 DC 모터를 사용해 실험 환경을 구축하였다. Wheel Lock 제어 알고리즘은 100ms 주기로 엔코더 변화량을 감지하여, 회전 방향과 반대로 80% PWM 저항력을 적용하는 방식으로 구현하였다.

엔코더 속도 변화를 정확히 측정하기 위해 바퀴를 캐리어 시스템에서 분리하여 독립적인 실험을 수행하였다. 손으로 직접 바퀴를 앞뒤 방향으로 교대로 굴리면서 엔코더의 step값 변화를 측정하였다. 이때 한 방향으로만 굴리는 것이 아니라 정방향과 역방향을 지속적으로 반복하여 실제 사용 환경에서 발생할 수 있는 다양한 회전 패턴을 모사하였다. 이러한 실험 방법을 통해 Wheel Lock 시스템이 양방향 회전에 대해 어떻게 반응하는지 전반적인 성능을 평가할 수 있었다. 그림 11은 Wheel Lock ON/OFF에 따른 엔코더 속도 변화를 보여준다. Wheel Lock OFF구간(0~5s)에서는 외부 힘에 의해 휠이 자유롭게 회전하여 최대 $\pm 1200\text{steps/s}$ 의 큰 진폭을 보이며 진동 패턴을 나타냈다. 이는 수동으로 가해지는 앞뒤 교대 회전에 대해 아무런 저항없이 자유롭게 움직이는 상태를 의미한다. 반면 Wheel Lock ON 구간(5s 이후)에서는 Wheel Lock 모드 할

성화와 동시에 속도 진폭이 현저히 감소하여 최대 $\pm 400\text{steps/s}$ 로 약 66% 감소하였다. 동일한 강도로 앞뒤 교대 회전을 시도했음에도 불구하고 일정한 저진폭 진동 패턴으로 안정화되어 엔코더 피드백 기반의 실시간 저항 제어가 양방향 회전에 대해 효과적인 저항력을 제공함을 확인할 수 있다.

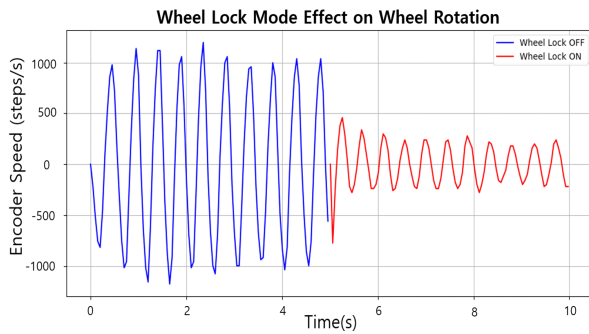


그림 11. Wheel Lock ON/OFF 엔코더 측정값
Fig. 11. Wheel Lock ON/OFF encoder speed

표 3. 캐리어 평균 이동거리 & 감소율

Table 3. Carrier average distance & reduction rate

Mode	Average distance(m)	Reduction rate(%)
Wheel lock OFF	10.5	-
Wheel lock ON	2.4	77.1

V. 결론 및 추후과제

본 연구에서는 자동 추종 기능과 능동적 도난 방지 메커니즘을 통합한 스마트 캐리어를 설계하였다. 스마트폰 - 캐리어 간 BLE RSSI를 활용한 거리 추정, GPS 및 IMU 기반 헤딩 정보를 이용한 방향 계산을 통해 안정적인 자동 추종 기능을 구현하였으며, 엔코더 기반 바퀴 잠금 제어, ToF 센서와 사이렌 알람을 연동하여 도난 시도에 단계적으로 대응할 수 있음을 검증하였다. 실험 결과, BLE RSSI 기반 거리 측정은 2 m 이내에서 높은 정확도를 보였고, 스마트폰 헤딩 정보와의 비교를 통한 방향 보정으로 캐리어가 사용자의 실제 진행 방향을 안정적으로 추종함을 확인하였다. 또한 바퀴 잠금(Wheel lock) 기능은 활성화 여부에 따라 엔코더 속도와 이동 거리에서 뚜렷한 차이를 보였으며, ToF 기반 들림 감지 및 사이렌 시스템 역시 신속하고 안정적으

로 동작함을 확인하였다.

결론적으로, 본 연구는 기존 스마트 캐리어가 제공하던 단순 위치 추적 기능을 넘어, 사용자 추종과 도난 방지를 동시에 구현하고 사후 대응 기능까지 확보함으로써 캐리어의 활용 범위를 크게 확장하였다. 이는 스마트 캐리어가 단순 이동 편의 장치를 넘어 보안성과 안전성을 갖춘 지능형 이동 플랫폼으로 발전할 수 있음을 보여준다.

다만 본 연구에는 한계가 존재한다. 첫째, BLE 기반 추종은 복잡한 환경에서 장애물 회피와 안정적인 거리 유지가 어렵다. 둘째, 사용자의 진행 방향 추정이 스마트폰 헤딩 정보에 의존하여 사용자가 반드시 스마트폰을 진행 방향에 맞추어 들고 있어야 한다는 제약이 있다. 셋째, 리튬 배터리를 사용한 실험에서는 구동 시간이 제한적이었으며, 실제 제품화를 위해서는 장시간 운용 가능한 배터리 시스템이 필요하다. 특히 항공 운송 규정에서는 고정식 대용량 배터리 사용이 제한되므로, 용량 문제를 보완하면서도 항공 규정에 부합하는 탈부착형 모듈식 배터리 시스템 개발이 요구된다.

향후 연구에서는 카메라나 초음파 센서를 추가하여 장애물 인식 및 회피 성능을 보완하고, 다중 안테나 기반 AoA(Angle of Arrival) 기법을 적용해 스마트폰 헤딩 의존도를 낮출 예정이다. 아울러 모듈형 교체식 배터리 팩과 절전 모드를 도입하여 실제 환경에서 장시간 안정적으로 운용 가능한 지능형 스마트 캐리어로 발전시킬 계획이다.

Acknowledgment

2025년도 한국정보기술학회 하계종합학술대회에서 금상을 수상한 논문(자율주행 및 도난 방지 시스템을 갖춘 스마트캐리어 개발)을 확장한 것임[12].

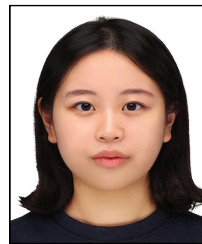
References

- [1] SITA, Baggage IT Insights, 2019-2025, <https://www.sita.aero/resources/type/surveys-reports/baggage-it-insights-2025/>. [accessed: Aug. 17, 2025]
- [2] A. Sutar, T. Kocharekar, P. Mestry, P.

- Sawantdesai, and S. S. Goilkar, "Smart Bag with Theft Prevention and Real Time Tracking", International Journal of Trend in Scientific Research and Development, Vol. 2, No. 2, pp. 1118-1120, Feb. 2018. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd9571>.
- [3] S.-M. Huang, H.-Y. Chan, P.-C. Wu, Z.-C. Huang, P.-Z. Wu, and Z.-Y. Lu, Smart luggage. Taiwan Patent TW M648367 U, Nov. 2023.
- [4] Y. Zhang and H. Lee, "Review of Development Trends in Smart Bags' Research and Applications", Sensor Review, Emerald Publishing, Vol. 44, No. 3, pp. 256-270, Mar. 2024.
- [5] M. H. Farooq, M. Zain, M. B. Khalid, and S. Zafar, "Easy-Weigh-Out: Design and Implementation of Internet of Things-based Smart Luggage System", International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), Vol. 17, No. 3, pp. 37-48, Mar. 2021. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i03.17165>.
- [6] S. J. Olickal, A. Yohannan, M. Ajayan, and A. Alias, "SMART BAG (It can follow you)", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 4, No. 4, pp. 2815-2817, Apr. 2017.
- [7] D. E. Kim, J. M. Lee, K. Hwang, and I. Jung, "Development of Location Sharing App with Encryption", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 23, No. 6, pp. 27-32, Dec. 2023. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.6.27>.
- [8] T. Hwang, Y. Lee, K. Park, and I. Koo, "Worker Location Tracking System of Shipyard using Power Line Communication and Beacon", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 24, No. 2, pp. 41-49, Apr. 2024. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.2.41>.
- [9] M. F. M. A. Hakeem, N. A. Sulaiman, M. Kassim, and N. M. Isa, "IoT Bus Monitoring System via Mobile Application", IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, Shah Alam, Malaysia, pp. 125-130, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS54679.2022.9815268>.
- [10] T. A. Salih and N. K. Younis, "Designing an Intelligent Real-Time Public Transportation Monitoring System Based on IoT", Open Access Library Journal, Vol. 8, No. 10, pp. 1-14, Oct. 2021. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107985>.
- [11] Federal Aviation Administration, PackSafe: Batteries Carried by Airline Passengers, U.S. Department of Transportation, <https://www.faa.gov/hazmat/packsafe/resources/airline-passengers-batteries/>. [accessed: Aug. 17, 2025]
- [12] E. J. Do, J. H. Lee, H. G. Yoo, S. H. Kim, S. M. Kwon, and I. S. Lee, "Development of a Smart Carrier with Autonomous Navigation and Anti-Theft Systems", Proc. of the KIIT Conference, Jeju, Korea, pp. 1115-1118, Jun. 2025.

저자소개

도 은 주 (Eun-Ju Do)



2021년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 학사과정
관심분야 : 임베디드 제어 및 통신

이 준 호 (Jun-Ho Lee)



2020년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 학사과정
관심분야 : 임베디드 하드웨어 및 제어

유 효 근 (Hyo-Geun Yoo)



2020년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 사과정
관심분야 : 임베디드 하드웨어 및
제어

김 선 호 (Sun-Ho Kim)



2020년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 학사과정
관심분야 : 임베디드 하드웨어 및
제어

권 송 미 (Song-Mi Kwon)



2021년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 학사과정
관심분야 : 임베디드 제어 및 통신

이 인 수 (In-Soo Lee)



1986년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학사)
1989년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학석사)
1997년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학박사)
1997년 3월 ~ 2008년 2월 :

상주대학교 전자 및 전기 공학 교수

2005년 8월 ~ 2007년 1월 : 미국 샌디에고 주립대학교
방문학자

2008년 3월 ~ 2014년 10월 : 경북대학교 전자전기공학부
교수

2014년 11월 ~ 현재 : 경북대학교 전자공학부 교수
관심분야 : 시스템 고장진단 및 고장허용제어, 배터리
SOC 및 SOH 추정, 신경회로망 기반 지능제어,
지능형 센서 시스템