

# 계단 승강 로봇의 계단 승강 시 랜딩기어를 활용한 자율 승강 기법에 관한 연구

## A Study on Autonomous Stair-climbing System Using Landing Gear for Stair-climbing Robot

황 현 창<sup>★</sup>, 이 원 영<sup>\*</sup>, 하 중 희<sup>\*\*</sup>, 이 응 혁<sup>\*\*</sup>

Hyun-Chang Hwang<sup>★</sup>, Won-Young Lee<sup>\*</sup>, Jong-Hee Ha<sup>\*\*</sup>, Eung-Hyuck Lee<sup>\*\*</sup>

### Abstract

In this paper, we propose the Autonomous Stair-climbing system based on data from ToF sensors and IMU in developing stair-climbing robots to passive wheelchair users. Autonomous stair-climbing system are controlled by separating the timing of landing gear operation by location and utilizing state machines. To prove the theory, we construct and experiment with standard model stairs. Through an experiment to get the Attack angle, the average error of operating landing gear was 2.19% and the average error of the Attack angle was 2.78%, and the step division and status transition of the autonomous stair-climbing system were verified. As a result, the performance of the proposed techniques will reduce constraints of transportation handicapped.

### 요 약

본 논문에서는 휠체어 사용자의 이동권 확보를 위한 계단 승강 로봇 개발에 있어 ToF센서 및 IMU의 데이터를 기반으로 자율 계단 승강 기법을 제시하였다. 자율 계단 승강 기법은 랜딩기어 동작 시점을 위치로 구분하고 상태 머신을 활용하여 제어하였다. 본 연구에서 제시한 이론의 검증을 위해 표준 기준의 모형 계단을 제작하여 실험하였다. 진입각 확보 실험을 통해 랜딩기어의 동작 길이 평균 오차는 2.19%, Pitching 기준 진입각 평균 오차는 2.78%로 부드러운 진입을 확인하였고, 자율 계단 승강 기법의 단계 구분 및 상태 전이를 검증하였다. 제안된 기법의 실적용 시 교통약자들의 이동제약을 줄일 수 있을 것이고, 이동권 보장을 통한 자립심의 고취가 기대된다.

*Key words : Embedded System, Stair-Climbing Robots, Wheelchair, State Machine, Environment Detection*

\* Dept. of Information & Communication Eng. Korea Polytechnic University

\*\* Dept. of Electronics Eng. Korea Polytechnic University

★ Corresponding author

E-mail : rozmari01@kpu.ac.kr, Tel : +82-32-327-8838

※ Acknowledgment

- This research was supported by a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute(KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea(HJ20C0058020020)  
- This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.20180014260041001)  
- This study was conducted under the support of Korea Evaluation Institute of Industrial Technology with the financial support of the government (South Korean Ministry of Trade, Industry and Energy) in 2021” (No.10084565, Core Technology Development Project for the Robot Industry-Robot Product Technology in the Cooperation of Governmental Departments)

Manuscript received May. 24, 2021; revised June. 21, 2021; accepted June. 24, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

최근 고령화 시대의 진입과 보행 장애인의 증가로 일상의 이동에 어려움을 겪는 교통약자의 수가 매우 증가하고 있다. 국토교통부에 따르면 2019년도의 교통약자 수는 약 1,522만 명으로 전체 인구의 약 30% 차지한 것으로 나타났다[1]. 이는 교통약자의 주요 이동 수단인 휠체어의 수요 증가로 이어졌고, 다양한 환경에서 이동권 확보 움직임이 보였다. 특히 휠체어 사용자들의 외출 시 가장 불편한 환경으로 '계단 및 단차(20%)'가 선정되었다[2]. 이에 계단 극복을 위한 다양한 연구 및 개발이 진행되고 있고, 대표적인 연구로 '무한궤도 기반의 계단 승강 로봇'이 있다[3].

본 연구에서 사용된 계단 승강 로봇은 안전한 승강을 위한 무한궤도 메커니즘을 사용한다[4]. 무한궤도는 다른 메커니즘과 비교하여 굴곡면 접촉 성능이 뛰어나 계단 및 장애물 주행에 있어도 안정적으로 진행할 수 있는 장점이 있다[5]. 하지만 일반궤도 메커니즘의 경우 계단에서 평지로 이어지는 지형에서 충격에 취약한 단점이 있고, 탑승자가 존재할 경우 전복 및 낙상 등 큰 사고로 이어질 수 있다[6].

이를 방지하고자 재활공학연구소의 계단 승월 휠체어는 기기 하부에 무게를 지탱하여 이동할 수 있는 랜딩기어를 설계하여 탑승자에 가해지는 충격량을 줄였다[7]. 랜딩기어는 고정된 궤도 메커니즘에 일정 각도를 생성해주어, 계단 하단으로의 부드러운 진입을 돕고, 평지 진입 시 충격을 방지한다. 하지만 탑승자는 로봇 하부에 위치한 랜딩기어를 수동으로 조작하기 어렵고, 무리한 움직임으로 위험을 초래할 수 있어 자율 조정 시스템이 필요하다.

자율 조정 시스템은 계단과 로봇 사이 환경을 파악해야 한다. 대표적인 환경감지 센서로 카메라, ToF(Time of Flight) 센서(초음파, 레이저)가 있다. 카메라는 3차원의 실시간 이미지를 기반으로 주변 환경을 파악한다. 해당 이미지 분석작업은 신뢰도가 높고 활발한 연구가 진행되고 있으나, 데이터 연산량이 많고 거리 산출에 단점을 보인다[8]. ToF 센서는 빛 또는 음파 등의 매질을 피사체를 향해 발사한 후 돌아오는 시간으로 거리를 계산하는 방식을 활용한 센서이다[9]. 그 중 초음파 센서는 음파를 활용한 센서로 데이터의 신뢰도가 높으나 측

정 가능 거리가 짧고 방사형의 과장으로 장애물의 영향이 큰 단점이 있다. 반면 레이저 센서는 빛을 이용하며, 반사체에 따라 신뢰도에 영향을 받는 단점이 있지만, 빠른 응답시간, 간단한 회로 구성, 낮은 연산처리 양이 장점이다. 따라서 본 연구에서는 랜딩기어의 자율 조정 시스템을 위해 계단과 로봇 사이 짧은 거리에서 데이터 취득이 가능하고 가벼운 연산처리 양으로 임베디드 시스템에 적합한 ToF(레이저) 센서를 사용한다.

본 논문의 계단 승강 로봇은 승강 중 탑승자의 안정성을 높이기 위해 계단에 등을 지고 승강하여 계단과 COG(Center of Gravity) 사이 거리를 최소화한다. 이때 탑승자는 제한된 시야 때문에 주행 조작성이 힘들다. 따라서 탑승자의 직접조작이 아닌 로봇의 자율 조정으로 운용하며, 승강 중 오동작을 방지하기 위한 상태 머신을 활용하여 계단의 위치에 따른 동작을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 본 연구에서 사용된 계단 승강 로봇 플랫폼에 대하여 설명한다. III장에서는 계단 승강 시나리오에 대하여 설명하고, 자율 계단 승강 상태 머신과 상태 전이 조건인 진입 및 착지 각도 생성 식을 제시한다. IV장은 실험으로 실험 조건과 상태 머신의 동작 확인을 한다. 마지막으로 V장은 본 논문의 결론을 내리며 논문을 마친다.

## II. 계단 승강 로봇 플랫폼

### 1. 계단 승강 로봇 구성

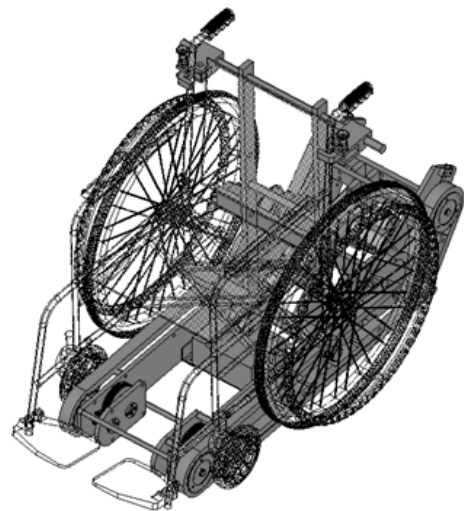


Fig. 1. Passive Wheelchair Joined Stair-climbing Robot.  
그림 1. 수동휠체어가 결합된 계단 승강 로봇

무한궤도 기반 로봇이 장애물을 넘을 수 있는 턱의 높이는 전륜 바퀴의 반지름보다 낮아야 하는데 전륜 바퀴의 반지름을 키우게 되면 COG가 높아져 불안정한 상태가 지속되는 구조적 한계가 발생한다[10]. 따라서 그림 1과 같이 로봇의 후면에 계단 표준 단높이보다 높은 위치에 활차를 두고 궤도를 빗면으로 설계하여 계단을 지지하며 오를 수 있도록 하였다.

2. 계단 승강 로봇의 센서 배치 구성도

계단 승강 로봇은 계단을 파악하는 환경감지 센서와 기울기를 파악하는 IMU, 그리고 충격을 완화시키는 랜딩기어로 구성되어있다. 그림 2는 계단 승강 로봇의 구성도이다.

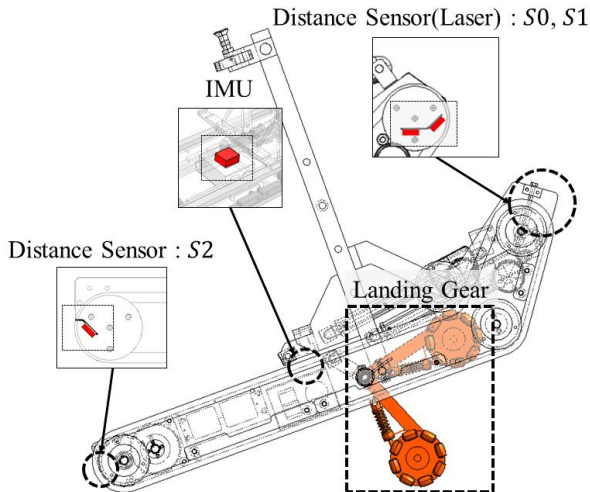


Fig. 2. Sensors and Landing Gear Configuration Diagram. 그림 2. 센서 및 랜딩기어 구성도

ToF센서는 S0, S1, S2에 위치하고, S0와 S2는 각 방향의 76° 아래를, S1은 지면과 수직의 거리를 감지한다. IMU는 로봇의 COG에 부착하여 기울기 변화를 확인한다. 랜딩기어는 회전축을 중심으로 각도를 생성하여 불규칙한 노면에 대응할 수 있도록 설계하였다.

III. 계단 승강 알고리즘

1. 계단 승강 시나리오

계단 승강은 그림 3과 같이 랜딩기어의 동작에 맞춰 상승과 하강으로 구분하였고, 계단의 위치에 따라 각각 6단계의 시나리오로 구성하였다.

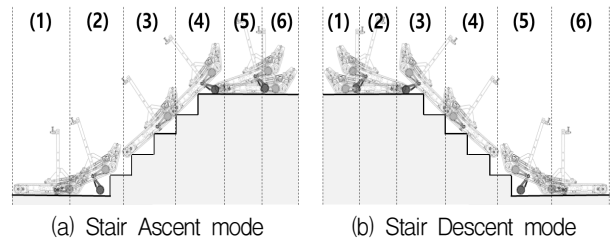


Fig. 3. How Landing Gear Works during Stair Driving. 그림 3. 계단 상승/하강 주행 중 랜딩기어 운용 방법

가. 계단 상승 시나리오

상승 시나리오의 1단계는 주행 시작 전 대기 상태이다. 2단계는 주행 시작 시 계단 하단부에서 랜딩기어를 펼치 후진을 하고, 3단계는 첫 계단 지지 후 랜딩기어를 접은 뒤 승강을 시작한다. 이후 상단부 착지 시 충격 완화를 위한 랜딩기어를 펼치는 4단계, 평지 진입 후 랜딩기어를 접는 5단계, 마무리 및 대기 동작 6단계로 구분된다.

나. 계단 하강 시나리오

하강 시나리오의 1단계는 시작 전 대기 상태, 2단계는 상단부에서 계단 진입 시 충격량을 줄이기 위해 랜딩기어를 동작하여 계단과 수평 진입각(Attack Angle)을 만드는 단계이다. 3단계는 랜딩기어를 접고 하강 주행을 시작하는 단계이고, 착지 전 충격 완화를 위해 랜딩기어를 펼치는 4단계, 평지 진입 후 랜딩기어를 접는 5단계와 마무리 및 대기 동작의 6단계로 구분된다.

따라서 자율 승강 알고리즘은 계단 하단부/상단부에서 랜딩기어의 동작 조건을 포함해야 한다.

2. 자율 승강 상태 머신

1절에서 제시한 계단 승강 시나리오를 바탕으로 본 절에서는 탑승자에 가해지는 충격량을 줄이기 위한 자율 승강 상태 머신을 제시한다. 로봇의 계단 상승 및 하강 주행 모드로 구분하였으며, 각 주행 별 상태는 공유되어 어느 상태에서든 탑승자의 의지에 따라 모드 전환이 가능하다.

가. 상승 주행 모드 상태 머신

로봇의 상승 주행 모드는 계단 하단부에서 상단부로의 승강 과정이다. 승강 중 로봇의 위치와 랜딩기어 동작에 따라 총 6단계로 구분하였다.

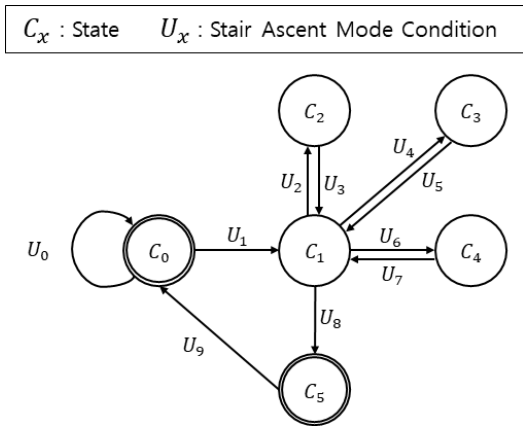


Fig. 4. State Machine of Stair Ascent mode.  
그림 4. 계단 상승 주행 모드의 상태 머신

그림 4는 상승 주행 시 상태 머신을 나타내었다.  $C_x$ 는 각 상태로 승강 로봇의 동작을 나타내고,  $U_x$ 는 상승 주행 시 전이 조건이다. 표 1은 각 상태를 설명한다.

Table 1. State of Stair Ascent mode.  
표 1. 계단 상승 주행 모드의 상태

State	Action
$C_0$	Wait for action
$C_1$	Reverse
$C_2$	Motor stops and creates an Attack angle (Landing Gear Unfolding)
$C_3$	Motor stops and Landing Gear folded
$C_4$	Motor stops and creates an Landing angle (Landing Gear Unfolding)
$C_5$	Drive Motor Stop and Shut Down (Landing Gear Folding)

다음은 그림 4의 설명이다. 시작 스위치가 눌리지 않을 경우( $U_0$ ),  $C_0$ 를 반복하고, 눌린 경우( $U_1$ )  $C_1$ 으로 전이되어 후진 동작을 수행한다. 센서 S0로 계단 모서리를 감지한 경우( $U_2$ ) 구동 모터 정지 후 진입각을 생성하는  $C_2$ 로 전이된다. 진입각 생성 과정은 다음 그림 6과 같다.

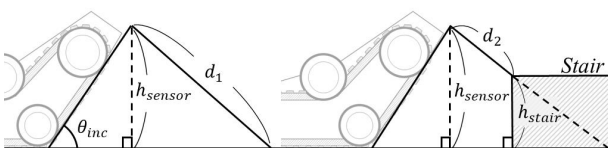


Fig. 5. Create Attack Angle on Stair Climb.  
그림 5. 계단 상승 주행 시 진입각 생성 과정

$$h_{sensor} : d_1 = h_{stair} : d_1 - d_2$$

$$\therefore h_{stair} = h_{sensor} \left( \frac{d_1 - d_2}{d_1} \right) \tag{1}$$

$$\theta_{land} = \tan^{-1} \left( h_{sensor} \left( 1 - \frac{d_2}{L \tan(\theta_{inc})} \right) \right)$$

$$= \tan^{-1} \left( \frac{h_{sensor}}{L^2} \left( \frac{1}{\cos(\theta_{inc})} - \frac{d_2}{L \sin(\theta_{inc})} \right) \right) \tag{2}$$

식 (1), (2)는 계단 판별 요소인 첫 계단 높이  $h_{stair}$ 와, 진입각  $\theta_{land}$ 를 구하는 식이다.  $\theta_{inc}$ 는 웨도 빔변의 각도,  $h_{sensor}$ 는 지면으로부터의 높이를 구하기 위한 센서 S1 데이터이다.

랜딩기어를 펼치며 진입각과 로봇의 기울기가 일치할 경우( $U_3$ )  $C_1$ 으로 전이되어 후진한다. 이후 S0의 데이터인  $d_2$ 가 계단 접촉 거리  $t_0$ 보다 작을 경우( $U_4$ )  $C_3$ 로 전이되어 랜딩기어를 접는다. 랜딩기어의 동작 완료 시 완료 신호를 감지할 경우( $U_5$ )  $C_1$ 으로 전이되어 후진한다. 이후 마지막 계단을 확인하고 평지 착지를 위한 착지각을 구하면( $U_6$ )  $C_4$ 로 전이되어 랜딩기어를 펼친다. 착지각은 더이상 지지할 계단이 없는 상황에서 웨도의 최대 체공거리 계산을 통해 얻어진다. 착지각 계산 과정은 다음 그림 6과 같고 계산식은 식 (3)에 설명하였다.

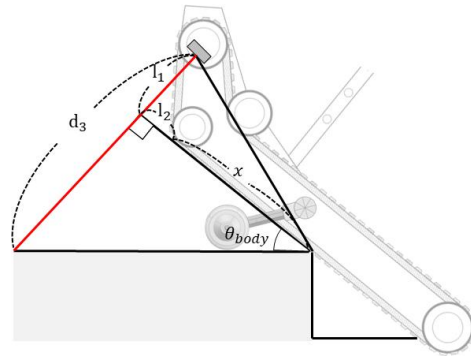


Fig. 6. Create Landing Angle on Stair Climb.  
그림 6. 계단 상승 주행 시 착지각 생성 과정

$$x = (d_3 - l_1) \tan \theta_{body} - l_2 \tag{3}$$

$d_3$ 는 S1의 거리 데이터이고,  $x$ 는 웨도의 최대 체공 길이,  $\theta_{body}$ 는 로봇의 기울기를 나타낸다.

랜딩기어가 착지각 만큼 펼쳐지면( $U_7$ )  $C_1$ 으로 전이되어 평지로 후진한다. 센서 S1의 데이터가  $t_1$ 보다 작고, 센서 S2의 거리 데이터가  $t_2$ 보다 작을 때( $U_8$ ) 평지로 감지하여  $C_5$ 로 전이되어 랜딩기어를 모두 접고, 완료 시( $U_9$ ) 동작 대기 상태( $C_0$ )가 된다.

나. 하강 주행 모드 상태 머신

하강 주행 모드는 계단 상단부에서 하단부로의 승강 과정이고, 총 5단계로 구분하였다.

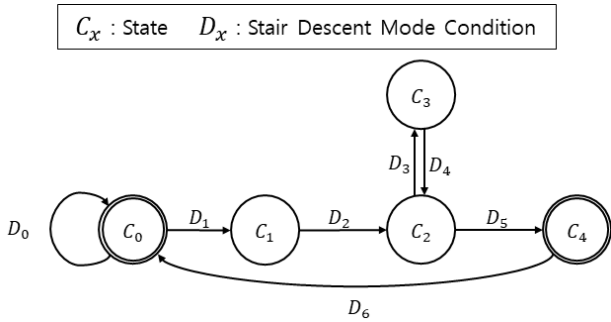


Fig. 7. Sensors and Landing Gear Configuration Diagram. 그림 7. 계단 하강 주행 모드의 상태 머신

그림 7의  $C_x$ 는 각 상태이고,  $D_x$ 는 하강 주행 시 전이 조건이다. 표 2는 각 상태에 대한 설명이다.

Table 2. State of Stair Descent mode.

표 2 계단 하강 주행 모드의 상태

State	Action
$C_0$	Wait for action
$C_1$	Motor stops and creates an Attack angle (Landing Gear Unfolding)
$C_2$	Forward
$C_3$	Motor stops and Landing Gear folded
$C_4$	Drive Motor Stop and Shut Down (Landing Gear Folding)

다음은 그림 7의 설명이다. 시작 스위치가 눌리지 않을 경우( $D_0$ ),  $C_0$ 를 반복하고, 눌린 경우( $D_1$ )  $C_1$ 로 전이되어 랜딩기어를 최대로 펼쳐 하강 모드 진입각을 생성한다. 완료 시( $D_2$ )  $C_2$ 로 전이되어 전진하며 계단의 상단부로 진입한다. 이후 랜딩기어를 접기 위해 랜딩기어의 동작 범위를 감지해야 하고, 이는 상승 주행 모드 중  $U_6$ 의 식 3 계산과 같다. 랜딩기어 동작 범위 확보 시( $D_3$ )  $C_3$ 로 전이되어 랜딩기어를 접고, 완료 시( $D_4$ )  $C_2$ 로 전이되어 전진한다. 다음 상태 전이를 위해서는 계단 하단부에서 평지로 진입해야 한다. 센서 S0의 거리 데이터가  $t_4$  이상, S2는  $t_5$ 이상이 될 때 평지 도착으로 감지하고 ( $D_5$ )  $C_4$ 로 전이되어 랜딩기어를 모두 접고, 완료 시( $D_6$ ) 동작 대기 상태( $C_0$ )가 된다.

3. 상승/하강 주행 모드 별 자율 승강 알고리즘

계단 승강 로봇의 알고리즘은 상승 주행 모드와 하강 주행 모드로 구분된다.

가. 상승 주행 모드 알고리즘

다음 그림 8은 상승 주행 모드 상에서 시스템 동작 흐름을 나타냈다.

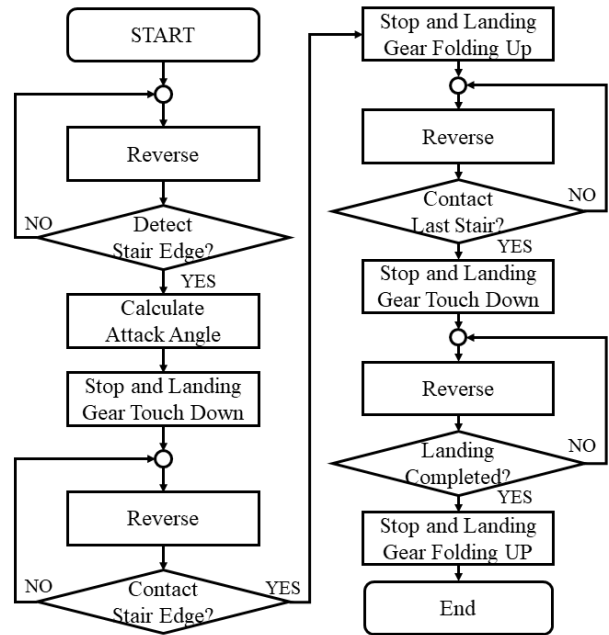


Fig. 8. Stair Ascent Mode Flowchart.

그림 8. 상승 주행 모드 순서도

상승 주행 모드는 사용자가 후진으로 계단에 접근한 뒤 스위치를 눌러 기능을 실행한다. 자율 승강 시작 시 로봇은 후진하며 ToF 센서는 거리 데이터를 수집한다. S0 데이터의 미분을 통해 계단의 모서리를 파악 및 정지 후 진입각 계산을 수행한다. 랜딩기어를 내리며 진입각과 로봇의 기울기를 비교하며 목표값까지 제어한다. 이후 후진하며 첫 번째 계단에 진입하고 S1를 통해 궤도 일부분이 걸쳐짐을 확인하면 정지 후 랜딩기어를 접는다. 그리고 후진하며 계단 상단의 마지막 계단을 찾고 랜딩기어 동작 공간을 확보한다. 계산된 착지각만큼 랜딩기어를 내리고 후진하며 평지 진입 여부를 파악한 뒤, 정지 후 랜딩기어를 접고 모드를 종료한다.

나. 하강 주행 모드 알고리즘

다음 그림 9은 하강 주행 모드 상에서 시스템 동작 흐름을 나타냈다.

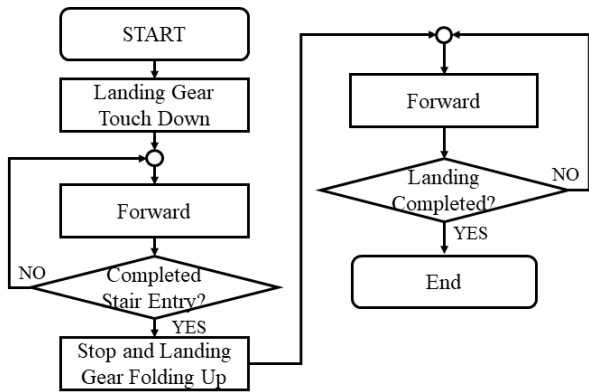


Fig. 9. Stair Descent Mode Flowchart.

그림 9. 하강 주행 모드 순서도

하강 주행 모드는 랜딩기어를 펼친 후 전진하여 계단에 접근하며 시작한다. 로봇의 COG가 계단 안쪽에 위치하고 랜딩기어 동작 범위가 확보되면 정지 후 랜딩기어를 접는다. 이후 전진하며 평지로 진입하며 S1, S2 데이터를 통해 평지확인 후 정지한 뒤 랜딩기어를 접고 모드를 종료한다.

IV. 실험

본 장에서는 실제 계단 환경을 구성하여 자율 계단 승강 알고리즘을 검증한다. 상태 머신은 상승, 하강 방향으로 나눠 실험을 진행하고, 랜딩기어 동작에 따른 진입각과 착지 공간 확보 여부를 확인한다.

1. 계단 승강 실험 환경 구성

본 실험은 휠체어를 이용하는 교통약자의 이동과정 중 접할 수 있는 가장 보편적인 규격의 계단을 대상으로 하기 위해, 국토교통부령 제548호에서 제시한 범위인 단높이 180mm 이하, 단너비 260mm 이상으로 제작하여 그림 10과 같다.

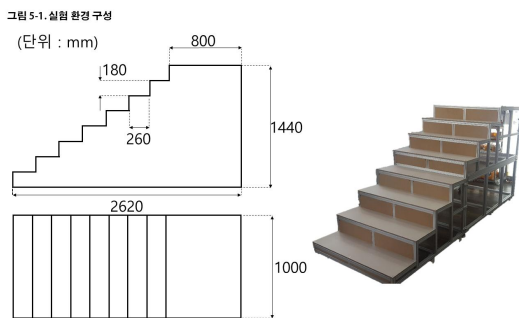


Fig. 10. Experimental Conditions.

그림 10. 실험 환경 구성

계단 승강 로봇의 제어기를 구성하는 MCU는 STM32F407VGT이고 168MHz의 주파수를 활용하여 빠르게 대응 및 제어가 가능하다. 그림 2의 센서 배치를 기준으로 센서 정보는 표 3과 같다.

Table 3. Specification of the sensors used in the experiment.

표 3. 실험에 사용한 센서의 제원

GY-VL53L0X			
	Power source	2.6~3.5	VDC
	Measuring area	2,000	mm
	Interface	I2C(Up to 400 kHz)	
MW-AHRSv1			
	Power source	4.5~10	VDC
	Gyroscope Range	±2000	%s
	Magnetometer Range	±4800	μT
	Interface	CAN, RS-232	

2. 계단 진·출입 시 자율 승강 실험

가. 자율 계단 승강(상승)

상승 방향 자율 승강 실험은 하단부 계단 진입 시 진입각 확보와 상승 주행 상태 머신 검증 실험을 진행한다.

(1) 하단부 계단 진입 시 진입각 확보 실험

본 실험에서는 첫 계단 높이를 100mm, 160mm, 180mm 세 가지 기준으로 나눠 랜딩기어가 목표 진입각 생성 후 후진하며 부드럽게 계단에 진입하는지 확인하였다. 실험 결과는 표 4에 나타내었다.

Table 4. Landing Gear Test that Calculate an Attack Angle.

표 4. 진입각에 따른 랜딩기어 동작 실험

	First Step Height		
	100mm	160mm	185mm
1			
2			
3			

표 4의 세로축 (1)은 실험 사진, (2)는 거리감지 데이터에 따른 목푫값 도달 정도를 나타내었다. (3)은 목푫값 도달 시 Pitching의 평균값을 측정하였다. 데이터별 예측값과의 오차율은 다음 표 5에 나타내었다.

Table 5. Error rate for First Stair Landing Gear Test.

표 5. 첫 계단 랜딩기어 동작 실험의 오차율

	First Step Height Data			Pitching Data		
	Expected	Result	Error Rate	Expected	Result	Error Rate
1	100.0mm	100.2mm	0.20%	6.68°	6.76°	1.24%
2	160.0mm	163.0mm	1.88%	10.72°	10.89°	1.57%
3	180.0mm	188.1mm	4.50%	12.42°	13.11°	5.54%

계단까지의 거리 데이터는 계단을 마주하고 급격히 감소하는 모습을 보였고, 모서리 판별 후 목푫값에 맞춰 랜딩기어를 동작하는 모습을 관찰할 수 있다. 각 단높이 별 진입각 확보 오차는 순차적으로 0.20%, 1.88%, 4.50%로 나타났다.

또한, 랜딩기어를 펼친 뒤 계단에 진입하는 과정을 Pitching 측정을 통해 확인하였고 표 4의 3이 부드러운 곡선을 그린 것으로 보아 충격량이 크게 발생하지 않고 진입했음을 확인할 수 있었다. Pitching 데이터 기준 진입각 확보 오차는 1.24%, 1.57%, 5.54%로 나타났다.

(2) 상승 주행 상태 머신 검증

다음은 자율 승강 알고리즘의 상승 주행 실험이다. 총 9단계로 구분되며 거리감지 센서 S0과 S1, S2를 사용하였고 측정 그래프는 그림 10와 같다.

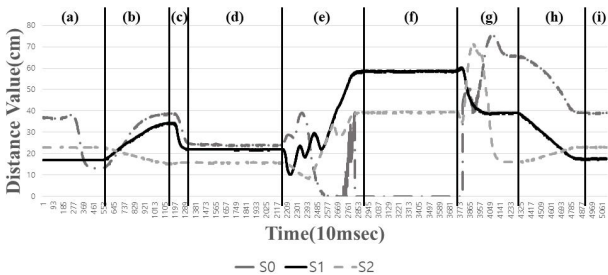


Fig. 10. Step of Stair Ascent State Machine. 그림 10. 상승 주행 시 거리 감지 데이터에 따른 단계 구분

센서 S0는 첫 계단을 감지하고 진입각을 계산하는 센서로 (a)와 (b) 단계에서 사용되고 이후의 단

계에선 사용되지 않는다. 따라서 (f) 단계에서 S0의 데이터는 최대 감지 범위 밖으로 벗어나 감지되지 않았다. 다음 그림 11은 자율 승강 시 단계별 동작 사진이다.

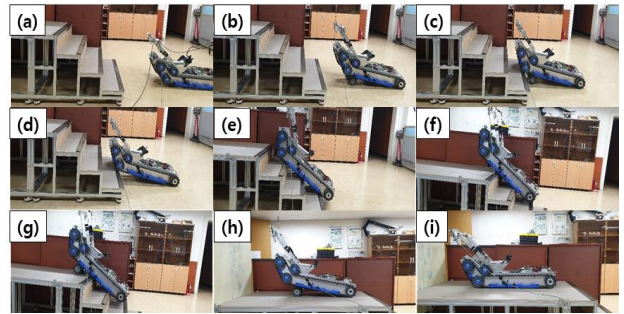


Fig. 11. Stair Ascent State Machine Test. 그림 11. 상승 주행 실험 사진

(a)에서 후진하며 센서 S0를 활용하여 진입각을 계산 후 (b)에서 랜딩기어를 펼친다. 이후 (c)에서 후진하며 센서 S1 데이터를 기반으로 첫 계단을 감지한 후 정지한다. (d)에서 랜딩기어를 접고 계단을 올라간다. 승강 단계인 (e)에서 S1의 파형이 계단 모서리에 맞춰 굴곡을 보이므로 계단을 올라가고 있음을 알 수 있다. (f)에서 센서 S1 데이터에 따라 착지각을 확보한 후 정지한다. (g)에서 랜딩기어를 펼쳐 충격을 줄이고 평지로 진입한다. (h)에서 평지를 확인한 후 (i)에서 동작을 마친다.

나. 자율 계단 주행 (하강)

(1) 하강 주행 상태 머신 검증

다음은 자율 승강 알고리즘의 하강 주행 실험이다. 총 6단계로 구분되며 거리감지 센서 S1과 S2를 사용하였고 측정 그래프는 그림 12와 같다.

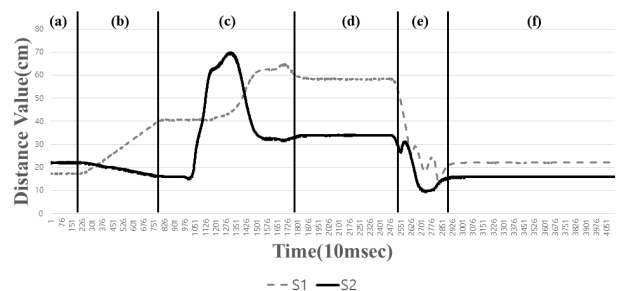


Fig. 12. Step of Stair Descent State Machine. 그림 12. 하강 주행 시 거리 감지 데이터에 따른 단계 구분

단계별 실제 사진은 그림 13과 같다.

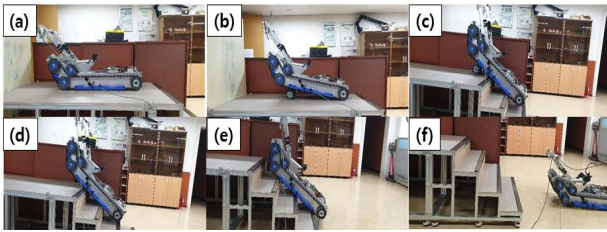


Fig. 13. Stair Descent State Machine Test.  
그림 13. 하강 주행 실험 사진

(a)는 시작단계이고 (b)에서 랜딩기어를 최대로 펼친다. 모두 펼쳐졌으면 (c)에서 진진하며 계단에 진입하고, 센서 S1의 데이터를 기반으로 COG가 계단에 접해있는지 확인 후 정지한다. (d)에서 랜딩기어를 접고, (e)에서 계단을 내려간다. 로봇과 수직한 계단을 감지하는 S1의 파형이 계단 모서리에 맞춰 굴곡을 보이므로 계단을 내려가고 있음을 알 수 있다. (f)에서 안정적으로 평지에 착지한 후 동작을 마친 모습을 볼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 수동휠체어를 사용하는 교통약자의 계단 승강을 돕기 위한 무한궤도형 계단 승강 로봇을 통하여 자율 계단 승강 상태 머신을 제시하였다. 자율 계단 승강 상태 머신은 거리감지 센서와 IMU의 데이터를 활용하여 단계를 구분하였고 거리 데이터를 활용하여 정상 승강 동작을 확인하였다. 특히 상승 주행 시 진입각 확보 실험을 통해 랜딩기어의 정상 동작과 부드러운 계단 진입을 확인하였다. 100.0mm, 160.0mm, 185.0mm 세 번의 실험을 통하여 랜딩기어의 동작 길이 오차는 0.20%, 1.88%, 4.50%로 나타났고, Pitching 기준 진입각 확보 오차는 1.24%, 1.57%, 5.54%로 나타났다.

본 논문에서는 계단 승강에 있어 전반적인 제어 및 탑승자의 안전을 위한 알고리즘에 대한 실험을 진행했다. 본 연구의 실험은 표준 규격의 계단을 대상으로 진행하여, 향후 다양한 규격의 계단을 대상으로 실험을 진행하여 여러 노면 환경에 영향 받지 않는 알고리즘 보완이 필요하다. 해당 기술의 실생활 적용 시 교통약자들의 이동제약을 줄일 수 있을 것이고, 나아가 휠체어 이용자들의 안전한 이동권의 보장으로 자립심을 고취할 것으로 기대된다.

## References

- [1] MOLIT, "Factual Survey of Transportation Convenience for the Transportation Vulnerable in 2019," 2019.
- [2] editorial department, "Wheelchair safety accident investigation," safety report, pp.1-33, 2011. UCI: I410-ECN-0101-2014-320-002721155
- [3] Hwang Hyun-Chang, Jung Ji-An, Lee Won-Young, Lee Eung-Hyuck, "A Study on the Recognition of Stairway Steps in Wheelchair Movement Assistants," *INFORMATION AND CONTROL SYMPOSIUM*, pp.77-80, 2019.
- [4] S. Abdulatif, B. Kleiner, F. Aziz, C. Riehs, R. Cooper and U. Schneider, "Stairs detection for enhancing wheelchair capabilities based on radar sensors," *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.1-5, 2017. DOI: 10.1109/GCCE.2017.8229270
- [5] D. J Seo, I. G Jeong, S. W Im, "Development of a wireless controller for stair climbing powered wheelchair," *Institute of Control, Robotics and Systems*, pp.16-18, 2010.
- [6] Homayoun Rastan, "Mechanical Design for Track Robot Climbing Stairs," *MASTER OF APPLIED SCIENCES*, University of Ottawa, 2011. DOI: 10.20381/ruor-4951
- [7] W. Cho, J. K. Kim, S. K. Kim, M. S. Moon, "A study on automatic driving algorithm for stair climbing wheelcha," *Korean Society for Precision Engineering*, pp.683-684, 2011.
- [8] Danilo Cáceres Hernández, Kang-Hyun Jo, "Stairway Tracking Based on Automatic Target Selection Using Directional Filters," *2011 17th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, pp.9-11, 2011.
- [9] Lee, Moohyun, Hur, Soojung, Park, Yongwan, "Obstacle Classification Method using Multi Feature Comparison Based on Single 2D LiDAR," *Journal of institute of control, robotics and systems*, vol.22, no.4, pp.253-265, 2016. DOI: 10.5302/J.ICROS.2016.15.0183
- [10] Sang-ho Lee, Jin-suk Ko, Yeon-ha Jung,



Hyun-Soo Shin, Chang-Joon Kim, Seoung-yeol Lee, Chang-soo Han, "A Study on the Driving Analysis of Tracked Robot," *Proceedings of the KSME Conference*, pp.142-147, 2007.

## BIOGRAPHY

### Hyun-Chang Hwang (Member)



2019 : BS degree in Electronic Engineering, Korea Polytechnic University.

2021 : MS degree in Advanced Convergence Technology Engineering, Korea Polytechnic University.

2021 ~ : PhD degree in Information & Communication Engineering, Korea Polytechnic University.

*Interest* : Rehabilitation Engineering, Embedded System, Intelligent Service Robot

### Won-Young Lee (Member)



2011 : BS degree in Electronic Engineering, Korea Polytechnic University.

2013 : MS degree in Electronic Engineering, Korea Polytechnic University.

2021 : PhD degree in Information & Communication Engineering, Korea Polytechnic University.

*Interest* : Rehabilitation Engineering, Embedded System, Intelligent Service Robot

### Jong-Hee Ha (Member)



2021 : BS degree in Electronic Engineering, Korea Polytechnic University.

2021 ~ : MS degree in Electronic Engineering, Korea Polytechnic University.

*Interest* : Rehabilitation Engineering, Embedded System, Intelligent Service Robot

### Eung-Hyuk Lee (Member)



1985 : BS degree in Electronic Engineering, Inha University.

1987 : MS degree in Electronic Engineering, Inha University.

1992 : PhD degree in Electronic Engineering, Inha University.

2000 ~ : Professor of Electronics Engineering, Korea Polytechnic University.

*Interest* : Rehabilitation Engineering, Mobile Healthcare System, Intelligent Service Robot