

# 관절형 크로라 이동 로봇를 이용한 휠체어의 자동 계단 승월 시스템

신재호<sup>o</sup>·한영환<sup>\*\*\*</sup>·이응혁<sup>\*\*</sup>·김병수<sup>\*</sup>·김승호<sup>\*</sup>·홍승홍

= Abstract =

## Automatic Stair Climbing System of Wheelchair Using Articulated Crawler Type Mobile Robot

Jae-Ho Shin<sup>o</sup>, Young-Hwan Han<sup>\*\*\*</sup>, Eung-Hyuk Lee<sup>\*\*</sup>,  
Byung-Soo Kim<sup>\*</sup>, Seung-Ho Kim<sup>\*</sup>, Seung-Hong Hong

In this paper, describe the automatic climbing wheelchair system use an articulated crawler mobile robot. This wheelchair system(call system) is composed of sensor detecting part and wireless communication part with PC. The sensor parts are consisted of sloping sensor and ultrasonic sensor part. The sloping sensor measures the sloping angle of system, and the ultrasonic sensor measures the distance of system's front wheel center from stair. PC will generate the operation data to climb up the stair using the measured data and make primitives for the system. At first, This system transfer from sensor data to the PC. PC calculate the operation data to climb up the stair from the internal algorithm. We simulated the system in various stair angle slope(25°, 30°, 45°), and tested it on the real staircase with width 37cm, high 18cm, Angle 26°. There were 0.350° - 1.060° Angle errors while climbing because adapted sensor has a precision 0.35° in resolution. Finally, We implemented the sensor detecting part and the wireless communication part, and practiced our system in 4cm/sec speed.

**Key words** : Climbing method, Articulated crawler type wheelchair

### 서 론

전자공학의 발전으로 의용 공학의 여러 분야에서 응용 및 개발이 이루어 지고 있다. 특히, 재활공학에 대한 인식이 재 조명되어 이 분야에 대한 연구가 중요시 되고 있으며 의용 전자공학이나 생체공학, 정보처리공학등의 영역에 대한 기초적인 연구성과를 토대로 하여 장애자의 보

조를 위한 다기능 휠체어의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다<sup>1,2)</sup>.

일반적으로 다기능 휠체어는 장애자의 조작 편리를 위하여 조이스틱 방식, 터치 스위치 방식, 호흡기 스위치 방식, 음성 제어에 의한 구동 방식<sup>3)</sup>등 여러 가지 입력 조작 방식이 고려되어 있고, 또한 자율 주행을 위하여 비전을 통한 경로제어<sup>4)</sup>, 거리감지 센서를 이용한 장애물 회피

인하대학교 전자공학과

Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon, Korea

\* 한국원자력 연구소

\* Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

\*\* 건양대학교 컴퓨터 공학과

\*\* Department of Computer Engineering, Kunyang University

\*\*\* 상지대학교 컴퓨터 공학과

\*\*\* Department of Computer Science, Sangji University

<sup>o</sup> 메디슨 연구소 생체신호실

<sup>o</sup> Bio-Signal Lab Medison Institute, Seoul, Korea

통신저자 : 신재호, 4th medison B/D chungmoro-5ga, 22-5, Jung-gu, Seoul, Korea



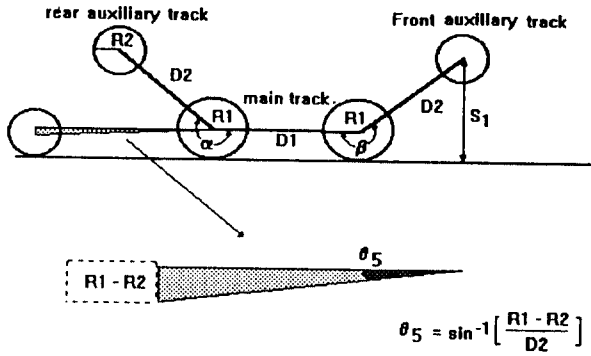


그림 3. 관절형 크로라 휠체어의 기본 자세(1)  
Fig. 3. Basic posture of articulated crawler wheelchair(1)

본 연구에서 적용한 자동 승월을 위한 시스템 구성은 그림2와 같이 관절형 크로라 휠체어에 초음파 거리 측정부를 부착하고 여기서 부터 발생하는 계단 및 장애물 감지 데이터를 전송 받아 pc에서 승월 알고리즘을 적용하여 다시 관절형 크로라 휠체어에 명령을 주는 것이다.

초음파 거리 측정부는 앞 보조 트랙에 부착된 초음파 센서를 사용하여 지면과 트랙 중심간의 거리를 측정하고 무선으로 관리제어부에 데이터를 송신하도록 구성하였고, 관리제어부는 제어 콘솔로부터의 평지 주행 명령과, 초음파 거리 측정부로 부터의 계단 승월시 로봇트 자세에 대한 데이터를 전송 받아서 휠체어가 최적의 자세를 유지하며 계단을 승월할 수 있도록 각 트랙의 제어 명령을 휠체어 제어부에 전송하도록 되어 있다.

## 2. 승월 알고리즘

### 1) 관절형 크로라 휠체어의 승월 기본 자세

본 연구에서 적용한 관절형 크로라 휠체어가 가질 수 있는 기본8세는 주 트랙과 보조 트랙의 형태에 따라 총 6가지로 나누어진다. 6가지의 기본자세를 승월시 5 단계 별 자세를 ① 평지 주행 자세, ② 계단 진입 단계, ③ 계단 승월 단계, ④ 승월 마지막 단계, ⑤ 승월이 끝난 단계로 나눌수 있다.

이때 1,3,5자세는 그림 3에서, 그림 4, 그림 5로 나타낼수 있다. 계단을 안정하게 승월하기 위하여 그림3에서 보여주는 것처럼 앞 보조 트랙이나 지면과 계단면과의 거리  $S_1$ 과 관절형 크로라 휠체어의 승월각과 같은 주트랙의 경사각  $\theta_5$ 의 입력값으로 관절형 휠체어의 이동 형태에서 중요한 주 트랙과 앞뒤 보조 트랙의 각  $\alpha, \beta$  사이의 조건을 구해야 한다.

그림 3은 관절형 크로라 휠체어가 승월시 취할 수 있는 1,3,5번째 자세로써 앞보조 트랙의 중심과 지면까지의 거리인  $S_1$ 은 앞 보조 트랙에 부착된 초음파 센서의 값이

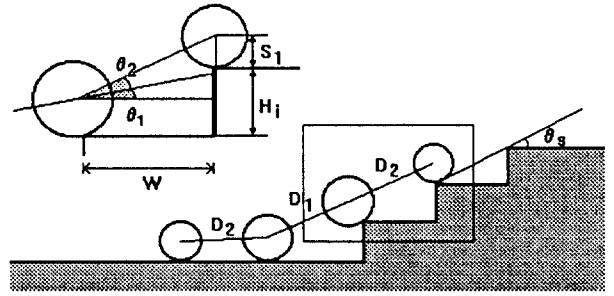


그림 4. 관절형 크로라 휠체어의 기본 자세(2)  
Fig. 4. Basic posture of articulated wheelchair(2)

고, 주 트랙에 부착된 경사각 센서 값은 0또는 변화가 없는 상태이다. 이 때  $\alpha, \beta$ 가 가질 수 있는 최소 각도의 조건은

$$\alpha \geq \pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_1 - R_2}{D_2} \right) \quad \beta \geq \pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_1 - R_2}{D_2} \right) \quad (2.1)$$

이다. 또한 보조 트랙이 평면에 닿아 주 트랙과 수평이 되었을 때, 주 트랙과 보조 트랙의 각은  $\pi$ 아니라  $R_1$ 과  $R_2$ 의 반지름 차에 의해서 생기는  $\theta_5$ 를 뺀  $\pi - \theta_5$ 가 이 자세에서는 주 트랙과 보조트랙의 최소각  $\alpha, \beta$ 가 된다.

그림 4는 관절형 크로라 휠체어가 승월시 가질 수 있는 2번째 자세로 관절형 크로라 휠체어가 계단에 진입했을때 최대의 계단 경사도를  $45^\circ$ 로 하기 위해서  $\theta_1 + \theta_2 = 45$ 로 설정한다. 여기서  $\theta_1$ 은 주트랙과 계단면과의 각이고,  $\theta_2$ 는 주 트랙에서 앞 보조 트랙을 든 만큼의 각이다.

계단의 경사각은

$$\tan(\theta_1 + \theta_2) = \frac{H_1 + S_1}{W}, \quad W = \frac{H_1 + S_1}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.2)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{H_1}{W}, \quad W = \frac{H_1}{\tan \theta_2} \quad (2.3)$$

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{H_1}{H_1 + S_1} \quad (2.4)$$

$$\therefore \theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{H_1}{H_1 + S_1} \tan(\theta_1 + \theta_2) \right] \quad (2.5)$$

이고, 이때  $\alpha, \beta$ 는

$$\alpha = \pi - \theta_5 + \theta_s, \quad \beta = \pi - \theta_5 + \theta_1 \quad (2.6)$$

이다.

그림 5는 관절형 크로라 휠체어가 승월시 가질 수 있

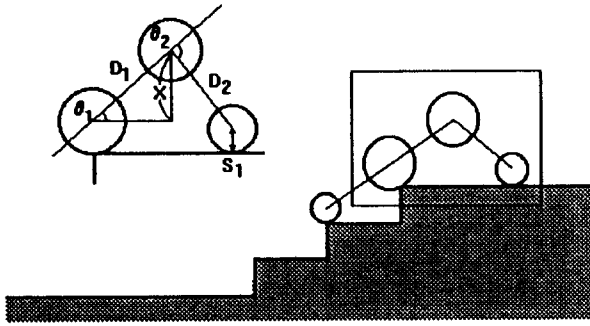


그림 5. 관절형 크로라 휠체어의 기본 자세(3)  
Fig. 5. Basic posture of articulated wheelchair(3)

는 4번째 자세로 계단의 마지막 부분에서 감지되는  $S_1$ 의 값을  $R_2$ 와 같게 하기 위해서 계산식의  $\theta_2$ 로 앞 보조 트랙을 내려줌으로써 관리자부에서  $\alpha$ 를 제어하는 명령을 준다.  $S_1$ 값과  $R_2$ 의 값이 일치할때  $\theta_2$ 의 값이 0이 되도록  $\alpha$ 를 제어한다.

계단의 마지막은  $S_1 > H_i + offset$  일때 이고, 측정값  $H_i$  보다 설정 offset인  $\pm 3cm$  보다 커졌을때 계단의 마지막 부분임을 인지할 수 있다.

여기서  $\theta_2$ 는 계단의 폭과 높이에서 가질 수 있는 기울기를 말한다.

계산치의 식은

$$X = D_1 \sin \theta_1 \quad (2.7)$$

$$\frac{X}{D_2} = \sin(\theta_2 + \theta_5 - \theta_1) \quad (2.8)$$

$$\therefore \theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{D_1 \sin \theta_1}{D_2} \right) \theta_5 - \theta_1 \quad (2.9)$$

이때  $\alpha, \beta$ 는

$$\alpha = 180 - \theta_2 - \theta_5 \quad \beta = \pi - \theta_5 \quad (2.10)$$

이다.

## 2) 계단 승월 알고리즘

본 연구에서는 관절형 크로라 휠체어가 계단 승월시 안정성을 향상시키기 위해서 주 트랙과 앞뒤 보조 트랙의  $\alpha, \beta$ 를 제어하여 3개의 트랙이 계단과 최대한 접촉되도록 제어할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘에서는 각 앞 보조 트랙에 초음파 센서를 부착하고 감지된 계단과의 거리 데이터를 사용하여 승월시 휠체어의 자세를 주 트랙과 보조 트랙간의 각도가 최소가 되면서 계단과 최대한 접촉을 할 수 있게 제어한다.

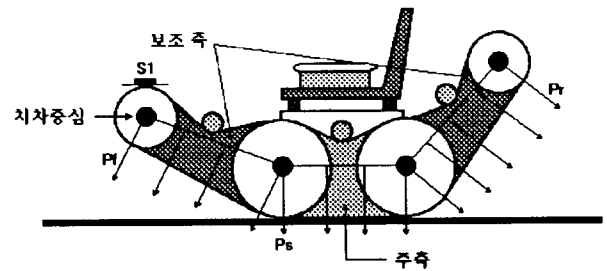


그림 6. 관절형 휠체어의 작용 힘 벡터  
Fig. 6. Forces acted by articulated wheelchair

[가정] - 계단 승월시 휠체어의 진행 방향은 계단과 수직으로 승월 된다.

[원리] 휠체어의 무게에 의한 주트랙과 보조 트랙에 작용하는 힘 벡터( $P_f, P_r, P_s$ )는 그림 6과 같이 주 트랙과 보조 트랙이 지면 또는 계단에 닿으면서 작용하는 힘으로 힘 벡터가 계단과 각 트랙에 일정하게 분산시킬 수 있도록 즉 안정된 승월을 이룰수 있도록 주 트랙과 보조트랙 사이의 각을 제어하여 안정적인 승월이 이루어지도록 한다.

## 계단 승월 과정을 단계별로 나타낸다

- [1 단계] 그림3에서 보여주는 자세로써 그림 10(a)의 시물레이션에 보여 주는 것처럼 장애물 및 계단이 없는 평지를 주행하는 자세.
- [2 단계] 그림 10(b)의 시물레이션에서 보여주는 것처럼  $S_1$ 에서 계단을 감지하고 앞 보조트랙이 계단을 걸치며 승월하는 자세로써  $S_1$ 에서 감지되는 데이터로 구해지는 계단의 경사도에 따라 이 자세의  $\alpha$  조건이 되도록 앞 보조 트랙의 위치를 변화 제어하고 식2.8로  $\beta$  또한 제어함으로써 뒤 보조 트랙의 위치를 변화하며 승월하는 자세.
- [3 단계] 그림 10(c)의 시물레이션에서 보여 주는 것처럼 앞 뒤 보조 트랙과 주 트랙을 계단에 모두 걸쳐  $S_1$ 에서 계단의 마지막 부분을 감지하며 승월하는 자세.
- [4 단계] 그림 10(d)의 시물레이션에서 보여주는 것처럼  $S_1$ 의 감지 데이터가 계단 하나의 높이 보다 커졌을 경우 앞 보조 트랙을 내려  $\alpha$ 의 조건으로 앞 보조 트랙과 주 트랙을 제어하고  $\beta$ 의 조건으로 뒤 보조 트랙을 제어하는 자세.
- [5 단계] 그림 10(e)의 시물레이션에서 보여 주는 것처럼 승월 과정이 끝나고 단계1과 같이 평지를 주행하는 자세.

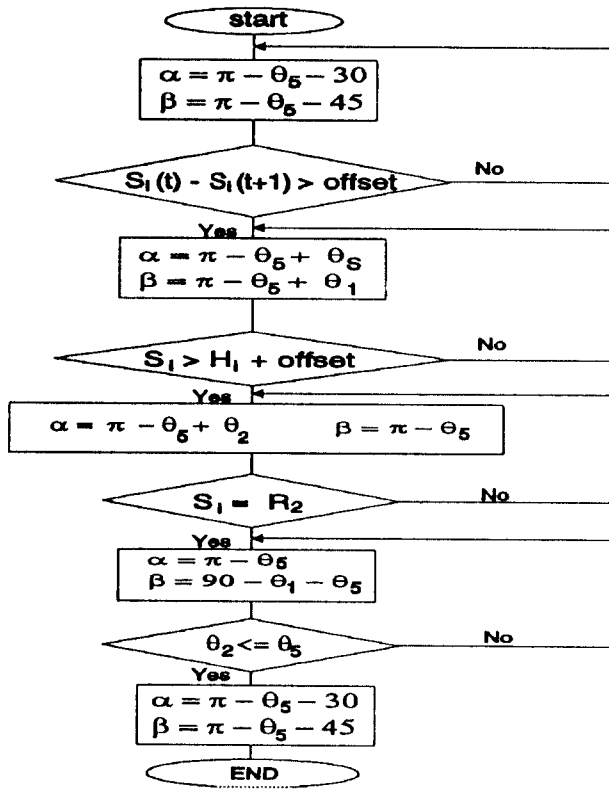


그림 7. 계단 승월 알고리즘  
Fig. 7. Algorithm of stair climbing

여기서 t 는 주행 및 승월시 시간(sec)을 나타내고 t + 1 은 시간의 흐름을 나타낸다.

그림 7은 계단 승월 알고리즘의 과정을 나타낸다.

### 시뮬레이션 및 실험결과

본 연구에서 제안하고 제작한 초음파 센서 거리 측정부

표 1. 관절형 크로라 휠체어의 실제원

Table 1. Real dimensions of Articulated crawler wheelchair

파라메타	실측값
R1	13(cm)
R2	11(cm)
D1	38(cm)
D2	43(cm)
200 계단까지 계단높이	16(cm)
300 계단까지 계단높이	18(cm)
450 계단까지 계단높이	23(cm)
앞 치차 각( $\alpha$ )	+450~ -900
뒷 치차 각( $\beta$ )	+500~ -900

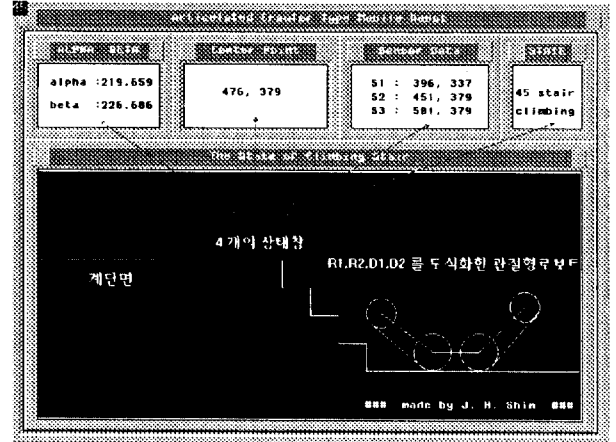


그림 8. 계단 승월 시뮬레이션  
Fig. 8. Simulation of stair climbing

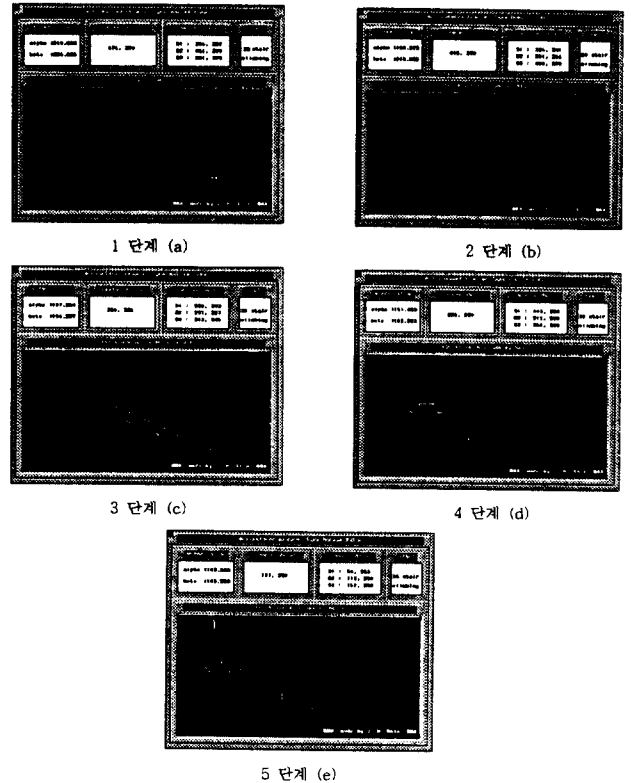


그림 9. 계단 승월 과정  
Fig. 9. Stair climbing process

를 관절형 크로라 로봇트에 부착하고 자동 승월 시스템을 실험하였다. 먼저, 시뮬레이션에 사용된 제원은 표 5.1에 나타내고 PC486DX 상에서 제안한 자동 승월 알고리즘을

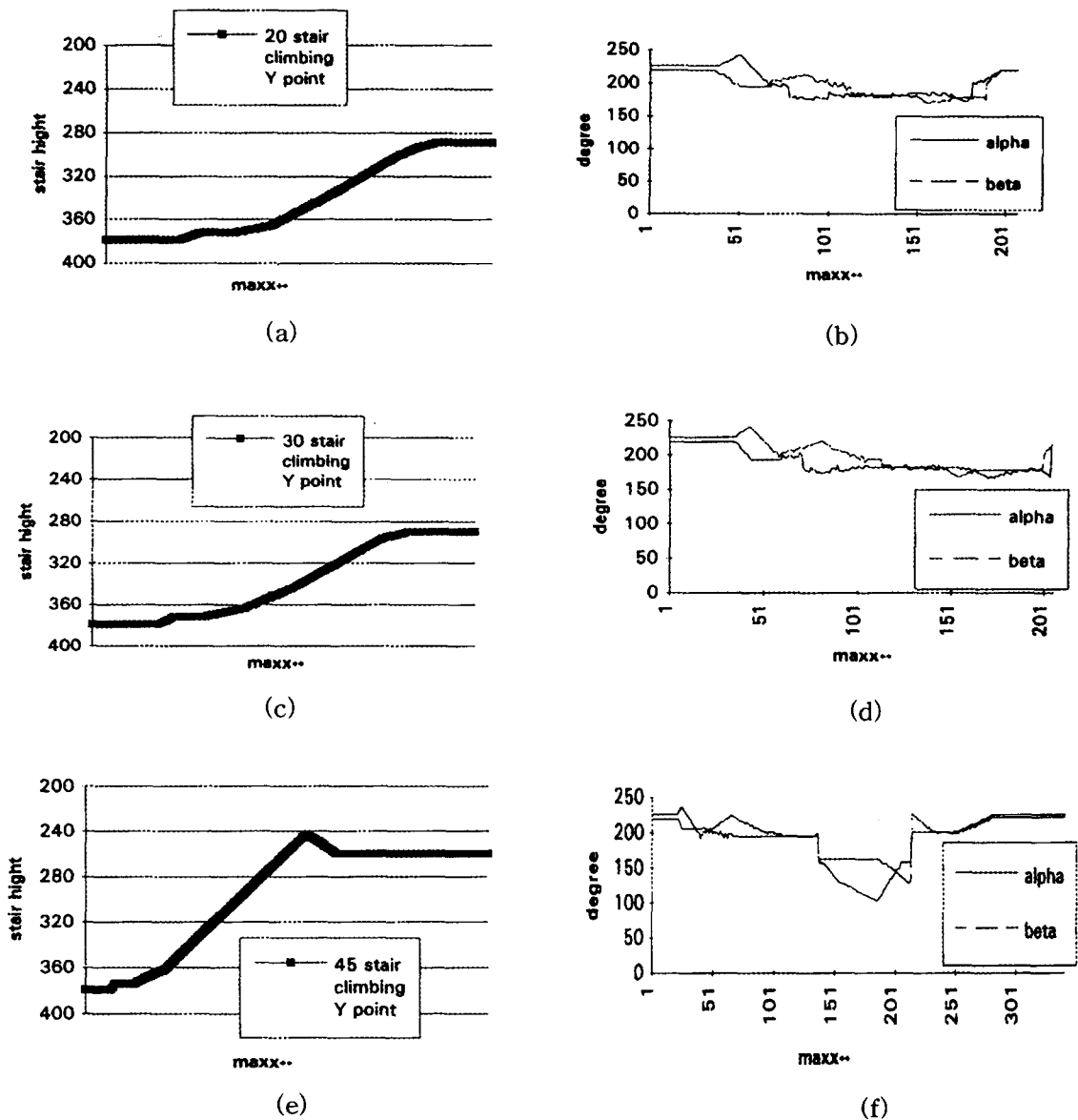


그림 10. 승월시 주 트랙 중심점과  $\alpha, \beta$ 의 변화 비교  
 Fig. 10. Time curves of the track center point,  $\alpha$  and  $\beta$

시뮬레이션 하였다. 또한, 실제 실험에서는 높이 18cm, 폭 37cm 인 약 26도의 계단각에서 실제 실험을 하였다.

### 1. 시뮬레이션 및 결과

본 시뮬레이션에 적용한 관절형 크로라 로봇의 실제 제원을 표1 에서 나타내고 그림 8 에서 보여주는 시뮬레이션 결과에서는 4개의 상태창을 열어 상태를 보면서 시뮬레이션을 하였다. 첫번째 창에서는 주 트랙과 각 앞뒤 보조 트랙간의 각도인  $\alpha, \beta$ 의 변화를 나타내었고, 두번째 창에서는 관절형 크로라 로봇의 중심점인 P(MAXX,

MAYY)의 변화를 보면서 로봇이 계단 승월시 좌표축의 변화를 나타내었다.

세번째창은 치차 중심에 부착한 초음파 센서( $S_1, S_2, S_3$ )의 감지를 나타내었다. 네번째창은 승월하는 계단각의 상태를 보여 주게 하였다.

다음의 그림 9에서는 관절형 크로라 휠체어가 30° 계단의 승월 과정을 5단계로 나누어 나타내었다. 초기의 평지 주행 자세부터 승월이 끝난시점까지 일련의 과정을 5 단계로 나누어 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

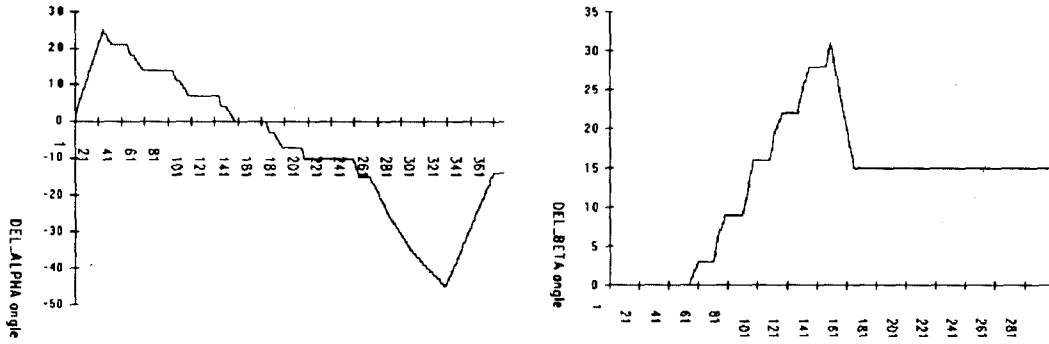


그림 11. 승월시  $\alpha, \beta$ 의 변화  
Fig. 11. Change of  $\alpha, \beta$ , when climbing

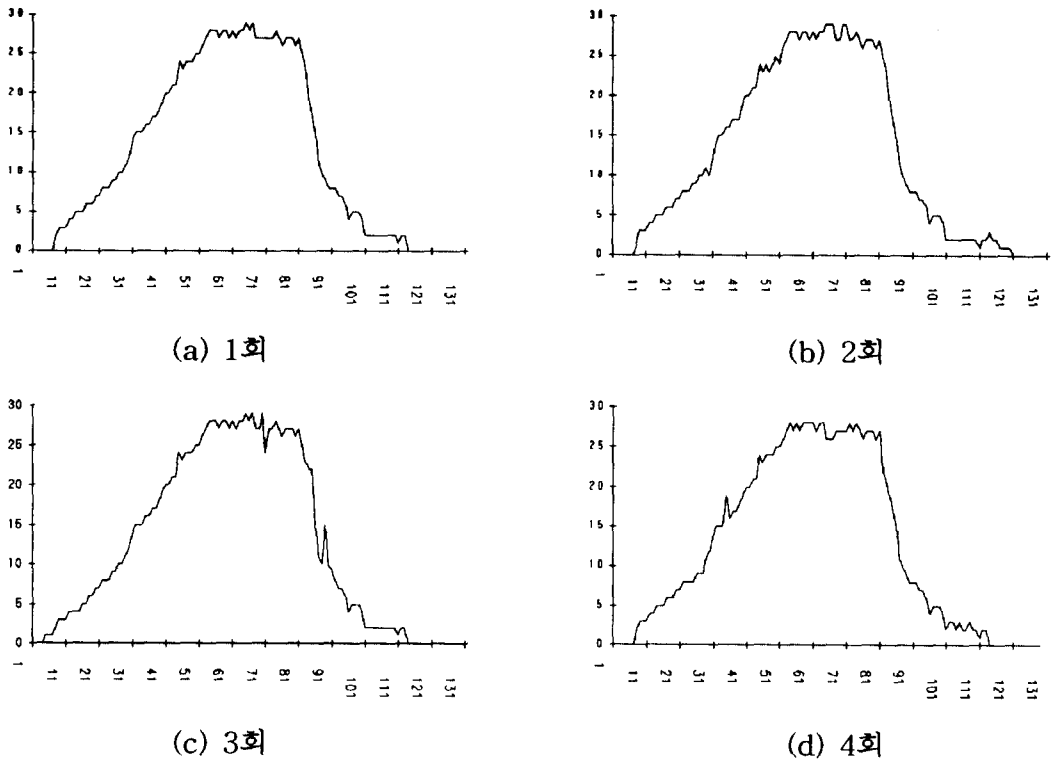


그림 12. 승월시 경사각 센서각의 변화  
Fig. 12. Change of inclination angle, when climbing

## 2. 승월시 휠체어의 주 트랙 중심 변화 및

### $\alpha, \beta$ 의 변화

관절형 크로라 휠체어의 안정적인 계단 승월은 각 트랙 간의 각도의 변화를 최소화 하고 또한 휠체어의 주 트랙 중심점이 계단과 거의 접촉한 상태로 승월이 이루어 졌을 때라고 할 수 있다.

그림 10 에서는 계단 경사도를 각각  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 변화시켜 주었을 때  $\alpha, \beta$ 의 변화와 또한 휠체어의 중심점이 그리는 승월 궤적을 비교한다. 계단의 경사도가 커질수록 휠체어 주 트랙의 형태에 의해 생기는 계단 마지

막에서 유동이 심함을 알 수 있고 이때의 유동을 최소화 하여 승월의 안정성을 높이기 위해  $\alpha, \beta$ 의 변화가 커짐을 알 수 있다.

## 3. 실험 결과

시뮬레이션 결과처럼 실험 결과에서도 트랙면과 계단을 최대한으로 접촉하는 적용 알고리즘에 의한 휠체어의 승월을 보였다. 그러나 승월시 생기는 휠체어의 유동 때문에 경사각 센서에서 측정된 각의 미약한 변화에 따라 초음파 센서 거리 측정부의 스톱모터 또한 미약한 변화를

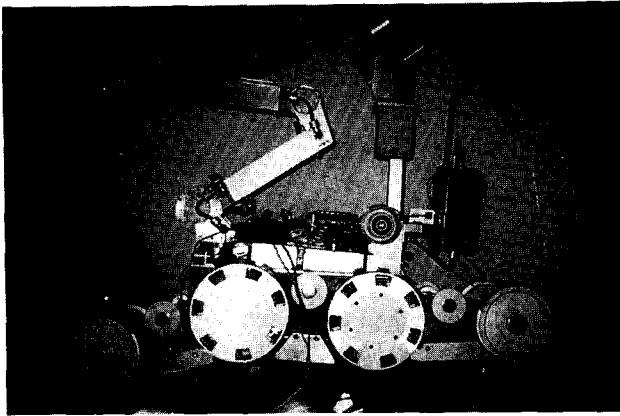


그림 13. 계단 승월 중인 관절형 크로라 휠체어  
Fig. 13. Stair climbing of Articulated crawler wheelchair

보였다. 하지만 데이터를 Moving average 기법으로 평균함으로써 이 변화를 줄이는데 많은 효과를 보았다.

실제 승월시 주 트랙과 앞뒤 보조 트랙의 각인  $\alpha, \beta$ 의 변화를 보여 준다. 시뮬레이션과 마찬가지로 승월시작부분과 끝나는 부분에서 각의 변화가 커짐을 보여 준다. 그림 11에서 실제 승월시  $\alpha, \beta$  변화를 보여 준다.

초음파 센서 거리 측정부에서 경사각 센서에서 감지된 데이터를 그림 12에서 보여 준다. 경사각 센서의 감지 데이터는 관절형 크로라 로봇의 승월시 주 트랙의 승월각과 일치한다. 실험시 로봇은 4cm/sec의 속도로 셋팅을 하였다. 왜냐하면 로봇의 진행시 발생하는 유동에 의한 경사각 센서 데이터의 미약한 변화를 최소로 해 주기 위해서이다. 그림 13에서는 실제 승월중인 관절형 크로라 휠체어를 보여 준다.

## 결 론

본 연구에서는 여러 형태의 이동형 경작업 로봇 중 무궤도식의 관절형 크로라 로봇의 관절형 크로라 방식의 트랙을 승월용 휠체어에 채택하였다.

관절형 크로라 휠체어 시스템의 앞 보조 트랙에 초음파 센서를 부착하여 초음파 감지 데이터를 받아 관리제어부로 데이터를 전송하고 이 데이터를 바탕으로 계단 승월 알고리즘을 적용하여 자동으로 계단을 승월할수 있는 자동 승월 관절형 크로라 휠체어를 위한 승월 알고리즘을 개발하였다.

본 승월알고리즘에서는 초음파 센서( $S_1$ )의 감지데이터로 승월시 변화하는 주 트랙과 보조 트랙 각을 제어하였고 결론적으로 휠체어의 주 트랙 중심 변화를 비교하였다.

각각 25°, 30°, 45°의 계단에서 관절형 크로라 휠체어의 구조상 계단의 마지막 부분을 제외하고 거의 계단과

접촉하면서 승월함을 휠체어의 주 트랙 중심의 변화에서 보여 주었다.

본 승월 알고리즘에서는 초음파 센서 거리 측정부의 감지 데이터로써 승월시 변화하는 주 트랙과 보조 트랙 각을 제어하여 트랙면과 계단을 최대한 접촉할 수 있도록 하면서 안정적인 승월을 이루었다. 여기서 초음파 센서는 최소 감지 거리인 30cm 이하의 거리를 감지 할 수는 없었으나 계단의 유무와 승월 마지막 부분에서 계단의 끝남을 인지하는데는 문제가 없었다.

이상과 같은 실험 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 시뮬레이션상에서는 각각 25°, 30°, 45°의 계단에서 관절형 크로라 휠체어의 구조상 계단의 마지막 부분을 제외하고 거의 계단과 접촉하면서 승월함을 휠체어 중심의 변화에서 보여 주었다.

휠체어의 중심 변화 궤적에서는 최대한 접촉하며 승월 하지만 각축의 미세한 유동 및 뒷보조축의 받침이 승월 마지막 단계에서 불안정한 자세를 보였다.

2. 초음파 센서 거리 측정부는 메인 모듈, 거리 측정 모듈, 각도 측정 모듈의 3부분으로 나누어지고 메인 모듈의 CPU를 8051로 하여 VME버스 스타일로 각각 거리 측정 모듈과 각도 측정 모듈로 인터페이스를 이루어 초음파 센서의 감지데이터와 경사각 센서의 경사각 데이터로 스텝 모터를 제어하여 초음파 센서 거리 측정부가 항상 평면 및 계단면을 수직으로 측정 할 수 있게 제작하였다.

3. 폭 37cm, 높이 18cm 약 26°의 실제 계단에서 3회 실험한 결과 승월시 발생하는 휠체어 몸체의 유동으로 0.350의 분해능을 가지고 있는 경사각 센서로써는 0.35° ~ 1.06°의 유동 오차가 생겼으나 Moving average 소프트웨어 기법을 이용하여 A/D 컨버터된 데이터의 에러를 최소화 시켜 줄 수 있었다.

4. 본 실험에서 이용한 초음파 센서의 최소 감지거리 (30cm)내에서는 감지오차가 생겼으나 계단의 유무 판단에는 문제가 없으므로 4cm/sec의 속도로 관절형 크로라 휠체어가 계단을 안정적으로 승월함으로써 자동 계단 승월 시스템을 구축하였다.

추후 연구과제로는 관절형 크로라 로봇의 이동 형태를 휠체어에 적용 환자 및 지체부자유자의 계단 승월에 대한 불안정성을 해소하고 또한 본 연구의 자동 승월 시스템을 간략화시켜 실제 승월용 휠체어 개발에 응용되어야 한다. 현재의 관절형 크로라 로봇의 형태 구조상 주 트랙의 반경으로 회전 반경을 최소화 할 수 있고 주 트랙과 보조 트랙의 변화로 휠체어의 수직 이동의 효과도 기대 된다.



## 참 고 문 헌

1. '지체부자유자를 위한 다기능 전동 휠체어의 연구 개발', 과학기술처 1차년도 최종 보고서
2. 이 창훈, 백 승우, 한 영환, 정 동명, 홍 승홍, "실용화를 위한 전동화 수동 휠체어(INMEL-6)의 개발", 대한전자공학회 하계 종합학술대회 논문집, Vol. 15, no. 1, 1992
3. 大林豊明, システムとセンサ, 産業圖書, pp.249-54, 1988.
4. 문 철홍, "시각정보를 이용한 전동 휠체어의 자동 주행 시스템 설계", 인하대학교 석사학위 청구 논문, 1989.
5. Y. Kanayama, S. Yuta and Y. Kubotera, "A Sonic Range Finding Module for Mobile Robots", 14th I.S.I.R & 7th I.C.I.R.T, pp.643-52, 1984.
6. P. Blazevic, S. Delaplace, J. G. Fontaine and J. Rabit, "Mobile Robot Using Ultrasonic sensors: study of a degraded mode", Robotica, Volume 9, pp. 365-70, 1991.
7. 원전용 로봇트 시스템 개발, 한국 원자력 연구소 제2차년도 연차 보고서, Report No. KAERI/RR-1359, 1993.
8. 이동형 경작업 로봇트 기술 개발, 한국 원자력 연구소 기술보고서, Report No. KAERI/TR-377/93, 1993.
9. 관절형 크로라 로봇트 이동 기술 개발, 한국 원자력 연구소 기술 보고서, Report No. KAERI/TR-484/94 1995.
10. C.Chen and M.M. Trivedi, "A Simulation, visualization and interactive control environment for mobile robots", International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence Vol.7 No. 1993.
11. C. Chen and M. M. Trivedi, "Mobile robots with articulated tracks and manipulators: Intelligent control and graphical interface for teleoperation", Proc. SPIE Conf. on Intelligent Robotics and Computer Vision, Mobile Robots VII, Boston, MA, Nov. 1992.