

## 이족보행로봇의 장애물극복 보행알고리즘에 관한 연구

# A Study on the Obstacle-Avoidance Walking Algorithm of a Biped Robot

김용태\* · 이은선\* · 이희영\*\*

Yong-Tae Kim, Eun-Seon Lee, Heyoung Lee

\* 한경대학교 정보제어공학과

\*\* 서울산업대학교 제어계측공학과

### 요 약

인간의 작업을 보조 혹은 대신하기 위해서 인간과 흡사한 이족보행로봇에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이족보행로봇이 인간을 대신해서 작업을 하기 위해서는 작업공간에서의 자유로운 이동과 장애물 대처능력은 반드시 필요한 기능이다. 본 논문에서는 안정된 정적보행 및 장애물을 지능적으로 대처하는 이족보행로봇의 보행알고리즘을 제안하였다. 먼저 장애물 대처 가능한 이족보행로봇의 기구 설계 및 원격제어 가능한 제어시스템 구현에 대하여 설명하고, 인간의 보행분석 결과를 바탕으로 정적보행 알고리즘을 제안하였다. 또한 발에 부착된 적외선센서로 장애물을 인식하여 장애물의 형태에 따라 좌우 회전 및 옆걸음을 통한 장애물 회피알고리즘, 거리보정 알고리즘을 사용한 장애물 넘어가기 알고리즘을 제안하였다. 제안한 보행알고리즘들은 이족보행로봇을 실제 제작하여 다양한 작업환경에서 실험으로 성능을 검증하였다.

### Abstract

In the paper, an intelligent biped walking robot that can overcome the obstacle is developed. Walking algorithms are designed based on the analysis of the human's manner of walking. Infrared sensors are used to detect the obstacles in the working environment and the remote controller of the biped robot use a RF module. The experiment results show that the developed biped walking robot can perform the stable static walking, attention walking, rotation and side stepping to avoid the obstacle, and hurdling the obstacle using the distance correction algorithm that is designed based on the distance information between the biped robot and the obstacle.

**Key words** : 지능형 이족보행로봇, 장애물 회피, 장애물 넘어가기, 회전 보행, 옆걸음, 거리보정

## 1. 서 론

최근 인간의 존엄성과 가치에 대한 관심이 높아짐에 따라 극한 환경의 작업현장에서 인간이 수행할 작업을 대신 할 수 있는 자율 이동 로봇의 요구가 증가하고 있다. 대부분의 로봇은 잘 정돈 된 작업환경에서만 운용할 수 있는 고정된 몸체를 지닌 형태이거나, 이동형 로봇 또한 한정된 범주를 벗어나지 못하고 있어 작업환경이 험난한 곳에서는 작업수행 능력이 크게 위축되어 있다. 자율이동 로봇의 이동 수단으로는 차륜이나 무한궤도가 이용될 수 있으나 에너지 효율은 높은 반면에 장애물이나 협소한 공간 등의 환경에 따른 제약을 많이 받는다. 따라서 인간이나 짐승 등 동물의 이동수단을 응용한 다리를 가지는 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 자율 이동 로봇 중에서도 이족 보행 로봇의 연구가 차지하는 비중은 점점 커지고 있다.

이족보행로봇은 인간과 가장 유사한 형태를 지니고 있으므로 현재 인간의 작업환경에 큰 변형없이 적용하는 것이 가능하며, 작업 환경에 따른 제약이 적다. 현재 일본의 혼다에

서 개발한 휴먼노이드는 계단 및 경사로 오르내리기, 제자리에서 방향전환, 공차기 등 인간과 거의 유사한 동작을 구현하는 단계까지 와있다. 국내에서도 이족보행로봇의 보행알고리즘을 구현하기 위하여 활발한 연구가 이루어지고 있다 [1]-[9]. 현재 이족보행로봇의 연구는 주로 인간과 비슷한 기구학적 메카니즘을 바탕으로 자연스러운 걸음새 구현 및 안정화에 중점을 두고 있으며, 인식 및 인지 등의 지능적 기능은 매우 단순하게만 적용되고 있다.

본 논문에서는 공간에 대한 제약을 최소한으로 하는 인간과 흡사한 자연스러운 정적보행을 하고, 센서를 통해 장애물을 인식하여 장애물의 형태에 따라 지능적으로 회피하거나 넘어가는 보행알고리즘을 수행하는 소형의 이족보행로봇을 제안하였다. 제안한 정적보행 및 장애물극복 알고리즘들은 실제 제작된 이족보행로봇의 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

## 2. 인간의 보행자세 분석

본 논문에서는 체계적으로 분석되어 있는 인간 보행자세의 분석 결과를 참고하여, 이족보행로봇의 안정된 보행알고리즘을 구현하였다. 인간의 보행주기는 한 다리의 발꿈치 당

접수일자 : 2003년 8월 27일

완료일자 : 2003년 12월 1일

기에서 같은 다리의 다음 발꿈치 닿기까지의 시간으로 간주할 수 있다[10]. 보행주기는 그림 1과 같이 중요한 자세별로, 한쪽 다리가 지면에서 떨어지기 시작하는 시기(초기유각기), 수직정렬자세를 이루기 위해 다리가 전진하는 시기(중간유각기), 대퇴의 감속이 일어나며 발의 앞부분이 지면에 접촉한 시기(종말유각기), 발꿈치가 지면에서 접촉하며 체중이 이동하는 시기, 한 쪽 다리가 지면에서 완전히 떨어지며 한 다리만으로 서있는 시기(중간입각기), 한 다리 지지가 계속되며 몸이 발보다 앞으로 이동하는 시기(종말입각기), 다시 한쪽 다리의 발꿈치 다시 닿으면서 유각기를 준비하는 시기(예비유각기)로 이루어진다[10].

본 논문에서는 인간보행주기에 있어서 중요한 시점에서의 각 관절의 값 및 체중부하를 참고하여 보행 알고리즘을 구현하였다.

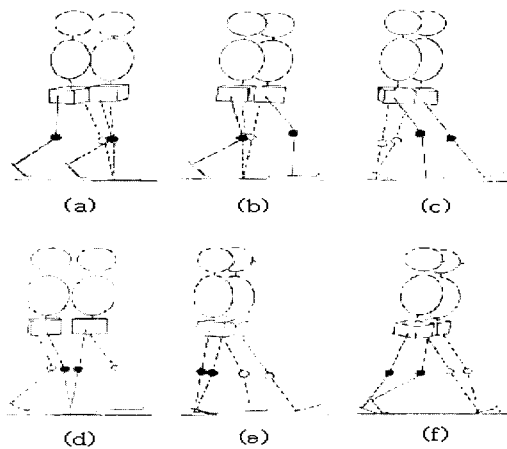


그림 1. 인간의 보행단계. (a) 초기유각기, (b) 중간유각기, (c) 종말유각기, (d) 중간 입각기, (e) 종말입각기, (f) 예비유각기.

Fig. 1. Human walking phase. (a) initial swing, (b) mid-swing, (c) terminal swing, (d) mid-stance, (e) terminal stance, (f) pre swing.

### 3. 이족보행로봇의 시스템 구성

#### 3.1 전체 시스템 구성

로봇의 전체구성은 로봇 기구부, 제어부, 모터제어부, 센서처리부, 원격조정부로 구성되어 있다. 로봇기구부는 전체적으로 12자유도로 12개의 RC 서보모터를 사용하였으며 장애물 인식을 위하여 적외선센서를 발바닥부분에 장착하였다. 제어부의 마이크로프로세서는 Intel사의 80C196을 사용하였으며, 모터제어부에는 ATMEL89C4051을 사용하여 12개의 모터를 동시에 제어할 수 있도록 구성하였다. 또한 90S2313과 RF모듈(BIF433F)를 사용하여 무선으로 로봇을 제어하기 위하여 원격제어를 구현하였다. 제어시스템은 적외선 센서로부터 장애물의 정보를 입력받아 장애물의 형태에 따라서 이족보행로봇이 장애물을 넘어가거나 회피할 수 있도록 보행자세를 제어한다. 또한 제어부는 센서로부터 측정된 데이터를 PC에 직렬통신을 통해 전달하도록 구성하였다. 이족보행로봇의 전체 시스템의 구성은 그림 2와 같다.

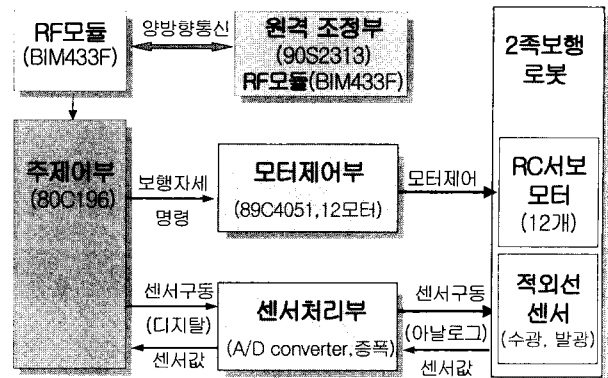


그림 2. 이족보행로봇의 전체 시스템 구성  
Fig. 2. Overall structure of a biped robot system

#### 3.2 이족보행로봇의 기구부 설계

로봇기구부는 가능한 사람과 비슷한 다리구조로 설계하였으며, 각 관절간의 연결은 자체 하중과 보행을 수행하기 위하여 주어진 하중을 지지할 수 있으며 전체의 무게가 모터에 충분한 토크를 내기 위하여 최대한 가벼운 구조로 설계하였다. 로봇 다리부는 그림 3과 같이 12개의 모터와 알루미늄 링으로 구성하였으며, 정지상태에서 전체 길이는 257mm이고, 총 무게는 1.05Kg이다. 관절에는 RC서보모터(HS945MG, HS645MG) 12개를 사용하였다.

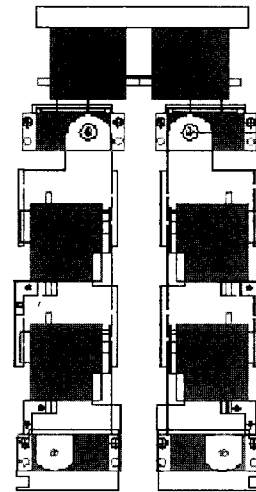


그림 3. 이족보행로봇의 기구부 설계  
Fig. 3. Mechanical design of a biped robot

제작된 이족보행로봇은 한쪽에 골반관절 3개, 무릎 관절 1개, 발목관절 2개의 자유도로 전체 12자유도를 가지고 있으며, 각 관절부는 그림 4와 같이 구성하였다. 골반 부분의 경우 인간은 3자유도를 가지고 있어 자유롭고 섬세한 움직임을 만들어 낼 수 있다. 그러나 3자유도를 만들어 내는 축이 모두 한 점에서 만나는 관절은 제작하기가 불가능하기 때문에 3자유도를 가지고는 있으나 한 점에서는 만나지 않고 거리를 두어 제작하였다. 무릎의 경우 인간이나 동물 모두 무릎 관절은 1축(pitch)으로 되어 있으므로 로봇 역시 무릎은 1자유도를 갖게 제작하였다. 발목부분의 경우 인간은 3자유도를 갖고 있어 위치나 방향의 섬세한 조절이 가능하지만 소형 로봇의 경우 모터 배치장소의 제한으로 2자유도를 갖는 구조로 설계하였다. 피치동작은 주로 보행에서 발을 들어 올리고 전

진하는 역할을 하며, 나머지 자유도들은 주로 로봇의 방향과 균형을 잡는데 사용된다. 또한 그림 5와 같이 장애물을 감지하기 위한 적외선 센서를 한쪽 발에 전면 2개, 측면 1개, 총 6개의 센서를 발 앞부분에 부착하였다.

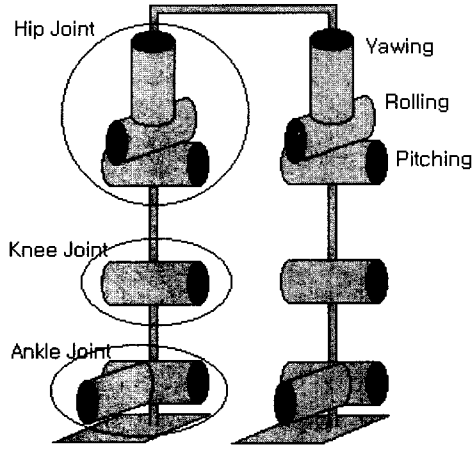


그림 4. 이족보행로봇의 관절 구성  
Fig. 4. Joint configuration of a biped robot

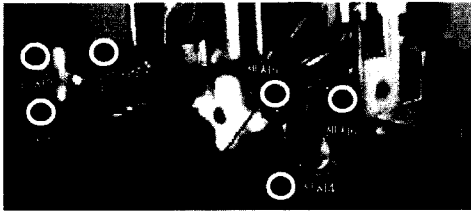


그림 5. 장애물 감지를 위한 센서 배치도  
Fig. 5. Infrared sensors of a biped robot

#### 4. 이족보행로봇의 보행 알고리즘

##### 4.1 정적보행 알고리즘

본 논문에서는 인간의 안정된 보행자세를 참고하여 정적 보행 알고리즘을 구현하였다. 로봇의 보폭과 발을 들었을 때의 발과 지면으로부터의 높이를 고려하여 로봇의 전진보행 궤적을 미리 결정하고, 그림 6과 같이 각 시기(phase)별로 발바닥 중심 좌표 값을 이용하여 기구학 및 ZMP를 분석하고 각 관절각을 구하여 이족보행로봇의 안정된 정적 보행 알고리즘을 구현하였다.

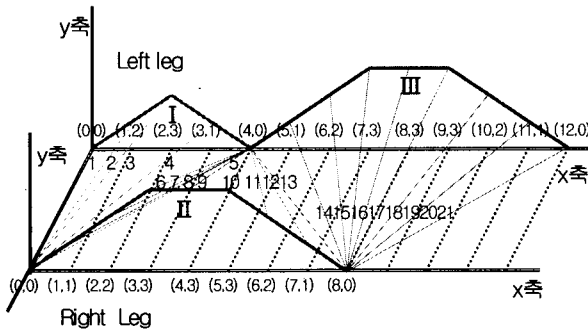


그림 6. 정적보행시 로봇의 발중심 좌표  
Fig. 6. Foot position for static walking algorithm

로봇의 보행에 있어서 ZMP를 만족하는 무게중심 이동이 중요하다. 그림 7은 로봇의 정적보행 한 주기에서의 발을 위치와 무게중심 이동을 보여준다. 즉 로봇이 우선 양발로 똑바로 서있는 상태에서 왼발을 들어올리기 위해 오른쪽 발에 무게중심을 이동하고 왼발을 들어 앞으로 내딛는다. 그리고 왼발이 지면에 착지하면 오른쪽으로 옮겼던 무게중심을 다시 왼쪽 발에 무게중심을 옮겨 오른쪽 다리가 지면에서 떨어질 수 있도록 한다. 그림 8은 그림 6의 보행궤적과 그림 7의 알고리즘을 이용하여 보행자세를 시뮬레이션한 결과이다.

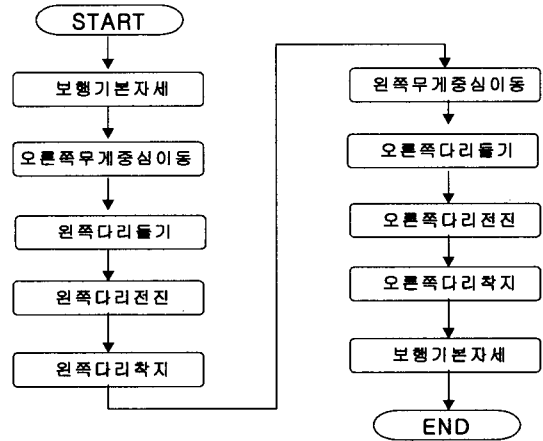


그림 7. 정적 보행 알고리즘  
Fig. 7. Static walking algorithm

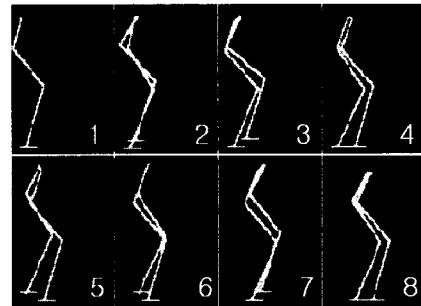


그림 8. 정적보행 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation of static walking algorithm

##### 4.2 장애물 인지 및 거리보정 알고리즘

장애물을 감지하기 위한 적외선 센서가 발에 부착이 되어 있는데, 총 6개의 센서와 장애물과의 거리측정 실험결과는 다음과 같다.

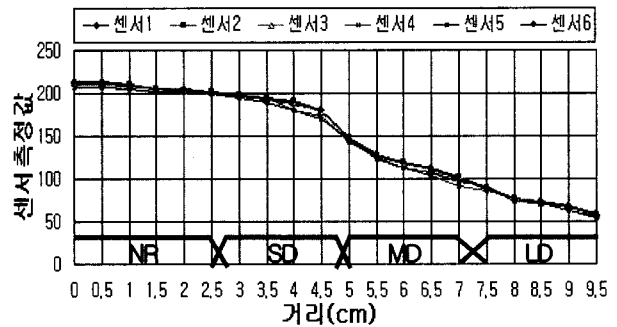


그림 9. 적외선 센서의 장애물 거리측정 실험결과  
Fig. 9. Experiment result of distance measurement using infrared sensors

이족보행로봇은 전면 적외선센서에서 장애물을 인식한 뒤 발과 장애물사이의 거리를 보정하기 위해 그림 10과 같은 거리보정 알고리즘을 수행한다. 센서측정 실험결과를 바탕으로 3가지 조건을 두어 거리보정을 실행하였다. 표 1에서와 같이 조건 1은 4개의 전면센서중 하나라도 NR(near)이 인식되면, 즉시 걸음을 멈추고 그림 11의 제자리걸음 알고리즘을 수행하여 두 발이 일직선이 되게 하고 장애물과의 거리를 현재 상태로 유지한다. 조건 2는 4개의 전면센서중 하나라도 SD(short distance)가 인식되면, 2cm 거리보정을 통해 두 발이 일직선이 되게 하고 장애물과의 거리를 3cm 이내로 조절한다. 4개의 전면센서중 하나라도 MD(medium distance)가 인식되면, 4cm 거리보정을 통해 두 발이 일직선이 되게 하고 장애물과의 거리를 3cm 이내로 조절한다.

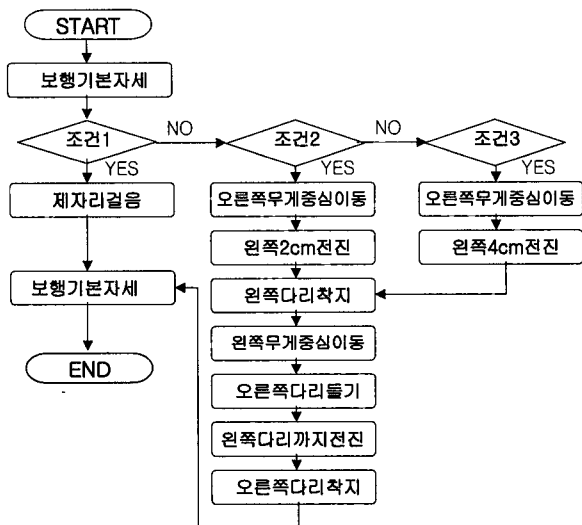


그림 10. 거리보정 알고리즘  
Fig. 10. Distance correction algorithm

표 1. 거리보정 알고리즘의 조건식  
Table 1. Condition of distance correction algorithm

| 조건  | 조건식                                  |
|-----|--------------------------------------|
| 조건1 | $NR_1$ or $NR_2$ or $NR_4$ or $NR_5$ |
| 조건2 | $SD_1$ or $SD_2$ or $SD_4$ or $SD_5$ |
| 조건3 | $MD_1$ or $MD_2$ or $MD_4$ or $MD_5$ |

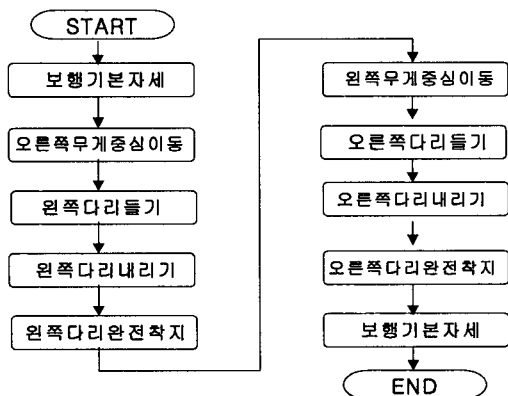


그림 11. 제자리 보행 알고리즘  
Fig. 11. Attention walking algorithm

### 4.3 회전보행 알고리즘

전면센서에는 벽이 감지되지 않고, 측면센서에서 벽이 감지되면 회전 보행을 수행하게 되는데, 왼쪽 측면센서에 벽이 감지되고, 오른쪽 측면센서에는 벽이 감지되지 않았다면 그림 12와 같이 좌회전 보행알고리즘을 수행하고, 오른쪽 측면센서에 벽이 감지되고, 왼쪽 측면센서에는 벽이 감지되지 않았다면 우회전 보행알고리즘을 수행한다. 오른쪽 왼쪽 모두 벽이 감지되었다면, 기본보행을 수행한다. 또한 전방 센서 4개에 모두 물체가 감지되어도 벽이 있다고 판단하여 기본적으로 우회전 보행을 수행한다. 회전보행은 다른 보행자세와는 달리 골반부의 좌우회전(yaw)에 의해 수행되며, 한쪽 관절모터의 회전각( $\theta$ )만큼 반대쪽 관절모터 또한  $\theta$ 만큼 반대 방향으로 회전한다.  $11.3^\circ$ 씩 회전할 때 이동 거리는 8.6mm이며, 왼쪽과 오른쪽 모터의 회전각 때문에 총 이동거리는 1.72cm씩 이동한다. 그림 13은 좌회전 보행시 발바닥의 위치를 보여준다.

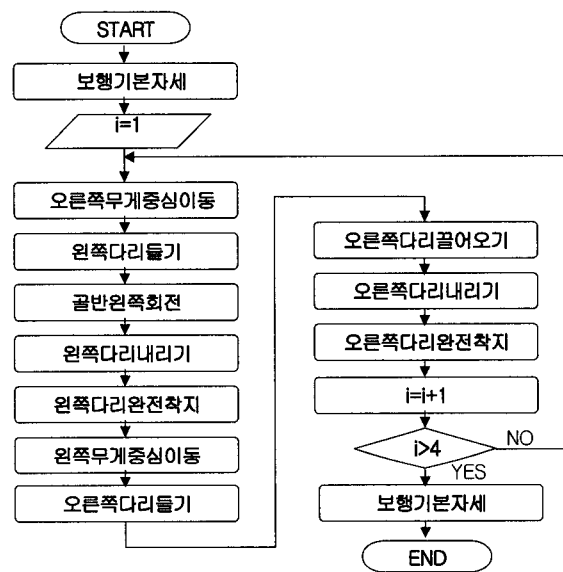


그림 12. 좌회전 보행 알고리즘  
Fig. 12. Left rotation algorithm

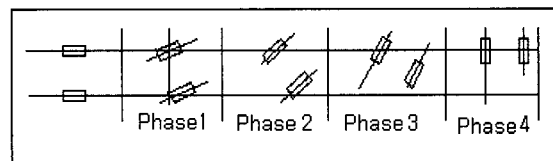


그림 13. 좌회전 보행시 발바닥 위치  
Fig. 13. Footprint of left rotation algorithm

### 4.4 옆걸음 알고리즘

오른쪽발의 센서에서는 장애물이 감지되고 왼쪽 발에서는 장애물이 감지가 되지 않았다면, 오른쪽으로 무게중심을 이동하고 왼쪽발을 좌측으로 뺀 내던고 다시 왼쪽으로 무게중심을 이동하여 오른쪽 발을 끌어오는 방식으로 그림 14와 같은 좌측 옆걸음 알고리즘을 수행하여 장애물을 회피한다. 반대의 경우에는 우측 옆걸음 알고리즘을 수행한다. 기본적으로 2번 알고리즘을 반복하여 장애물을 회피하고, 다시 센서를 통하여 장애물을 감지하여 장애물의 형태에 따라서 장애물 회피알고리즘을 수행하도록 구성하였다.

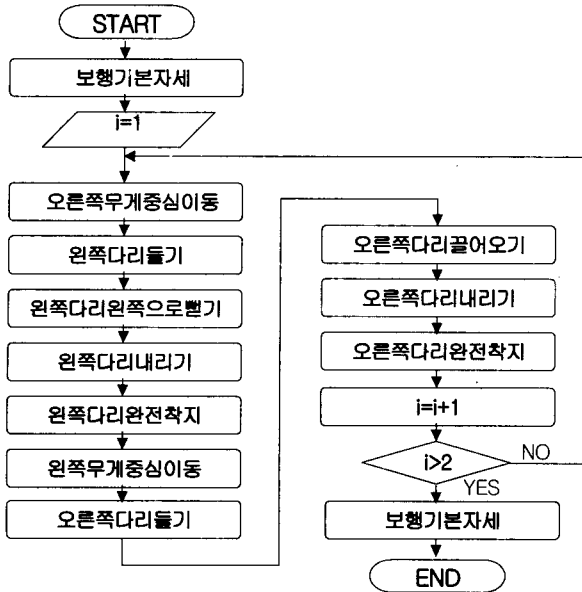


그림 14. 좌측 옆걸음 알고리즘  
Fig. 14. Left-side stepping algorithm

4.5 장애물 넘어가기 알고리즘

장애물에 이족보행로봇의 발이 부딪히지 않고 넘어가기 위해서는 로봇과 장애물이 항상 일정한 거리범위 안에서 일정한 자세로 넘어가기를 수행해야 한다. 본 연구에서는 장애물과 로봇발의 간격을 일정한 거리범위 안에 들어오게 하기 위해 먼저 그림 10과 같은 거리보정 알고리즘을 수행하고, 이를 바탕으로 그림 15와 같은 장애물 넘어가기 알고리즘을 수행하였다. 그림 16은 그림 15의 보행알고리즘을 바탕으로 한 장애물 넘어가기 동작의 시뮬레이션 결과이다.

이족보행로봇은 두 발 전방센서 4개중 1개라도 장애물이 있다고 감지하면 거리보정 알고리즘을 수행하고, 거리보정 후 전방센서의 위쪽 2개 센서는 장애물이 없다고 감지된 반면, 아래쪽 2개 센서는 장애물을 감지하면 장애물 넘어가기 알고리즘을 수행한다. 만약 전방센서의 위, 아래 센서 4개가 장애물이 있다고 감지하면 우회전 알고리즘을 수행한다.

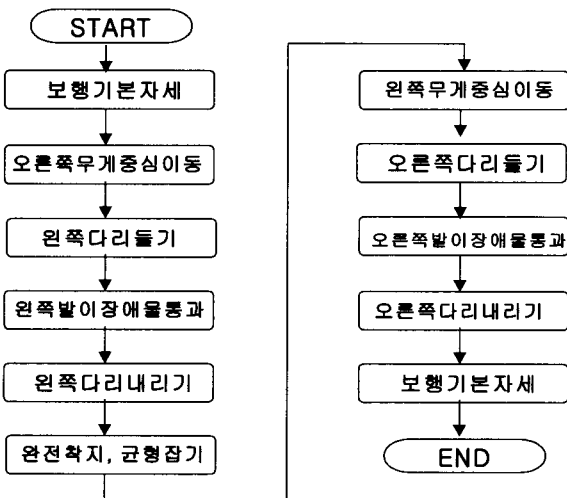


그림 15. 장애물 넘어가기 알고리즘  
Fig. 15. Obstacle hurdling algorithm

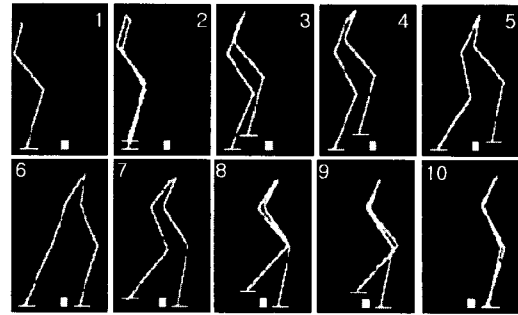


그림 16. 장애물 넘어가기 시뮬레이션 결과  
Fig. 16. Simulation result of obstacle hurdling algorithm

5. 보행 알고리즘의 실험결과

본 논문에서 제안된 장애물 회피 및 넘어가기 알고리즘은 실제 제작된 이족보행로봇을 다양한 장애물을 포함한 환경에서 실험하여 검증하였다. 그림 17은 제작된 이족보행로봇의 정적보행 실험 결과를 단계별로 보여준다. 정적보행은 단계별로 0.5초씩 2초가 걸린다. 그림 18은 거리보정 알고리즘에서 사용되는 제자리걸음 실험결과이다. 제자리걸음 동작은 갑자기 장애물이 로봇 발 가까이에서 감지되었을 때 수행하게 된다. 그림 19와 그림 20은 전방센서 4개가 큰 장애물이 있다고 감지하거나, 측면센서에서 장애물이 감지되면 수행되는 좌회전, 우회전 보행의 실험 결과이다. 오른쪽, 왼쪽 발 중 한쪽에만 장애물이 감지되면 수행되는 옆걸음 알고리즘의 실험 결과는 그림 21과 같다. 그림 22는 다양한 위치에서부터 장애물을 넘어가는 실험 결과이다. 제작된 이족보행로봇이 넘어갈 수 있는 장애물의 최대 높이는 기구적인 제약 때문에 2cm로 한정된다.



그림 17. 정적보행 실험 결과  
Fig. 17. Experiment result of static walking

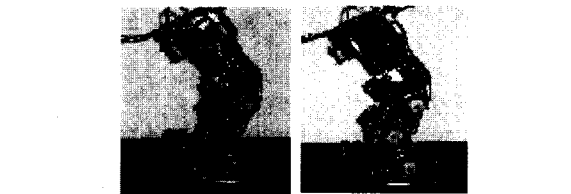


그림 18. 제자리걸음 실험 결과  
Fig. 18. Experiment result of attention walking

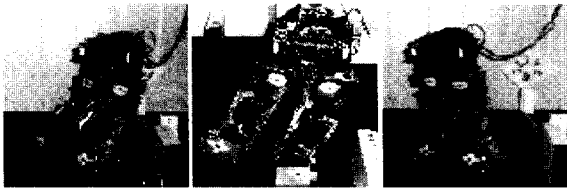


그림 19. 좌회전 보행 실험 결과  
Fig. 19. Experiment result of left rotation



그림 20. 우회전 보행 실험 결과  
Fig. 20. Experiment result of right rotation



그림 21. 옆걸음 보행 실험 결과  
Fig. 21. Experiment result of side stepping



그림 22. 장애물 넘어가기 실험 결과  
Fig. 22. Experiment result of obstacle hurdling

### 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 이족보행로봇이 장애물을 지능적으로 극복하기 위한 보행알고리즘들을 제안하고, 실제 개발된 이족보행로봇을 이용하여 검증하였다. 발에 부착된 적외선센서를 이용하여 장애물을 감지하고, 장애물의 구성과 형태를 판단한 후 회전보행, 제자리걸음, 옆걸음 등으로 장애물을 회피하거나, 낮은 장애물은 넘어가는 방법으로 장애물을 극복하였다. 본 연구에서는 평지에서 다양한 보행알고리즘을 제안하였으나, 보다 다양한 작업환경에서 이족보행로봇을 적용하기 위해서 앞으로 계단 및 경사지에서의 보행알고리즘을 연구할 예정이다.

### 참 고 문 헌

[1] 장중연, 이족보행로봇의 시스템 해석과 관절 토크에 관한 연구, 인하대학교 석사학위 논문, 2000.  
[2] 김병연, 2족 로봇의 동적 보행 알고리즘에 관한 연구, 경희대학교 석사학위 논문, 2001.  
[3] 박장우, 2족 로봇 제작 및 정적 보행 알고리즘 개발,

경희대학교 석사학위 논문, 2001.  
[4] 임삼일, 소형 2족 보행 로봇에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위 논문, 2001.  
[5] 강민구, 빠른 보행을 위한 이족 로봇의 설계, 명지대학교 석사학위 논문, 2000.  
[6] 성영휘, 이수영, "소형 휴머노이드 로봇 시스템 개발", 제어·자동화·시스템공학 논문지, vol. 7, no. 5, pp. 420-426, 2001.  
[7] 황재필, 김은태, 박민용, "소형 이족보행로봇 개발에 관한 연구", 2003년 대한전자공학회 하계종합학술대회, pp. 2791-2794, 2003.  
[8] M. Vukobratovic, B. Boravac, D. Surla, D. Stokic, "Biped Locomotion Dynamics, Stability, Control and Application", Springer-Verlag, 1990  
[9] J. H. Kim, D. H. Kim, Y.J. Kim, K. H. Park, "Humanoid Robot Hansaram: Recent Progress and Developments", HNICEM Int. Confrence, pp. 1-11, 2003.  
[10] 최재정, 물리치료 추정 및 평가, pp. 215-240, 2000.

### 저 자 소 개



**김용태(Yong-Tae Kim)**

1991년 연세대학교 전자공학과(학사)  
1993년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)  
1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)  
1998년~2000년 (주)삼성전자  
2000년~2001년 (주)네오다임소프트  
2002년~현재 한경대학교 정보 제어 공학과 조교수

관심분야: 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 학습제어  
E mail : ytkim@hnu.hankyong.ac.kr



**이은선(Eun-Seon Lee)**

2002년 한경대학교 정보 제어 공학과 졸업(학사)  
2002년~현재 동 대학원 석사과정

관심분야 : 이족보행로봇, 지능시스템  
E-mail : loyves@hanmail.net



**이희영(Heyoung Lee)**

1987년 고려대학교 전기공학과(학사)  
1989년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)  
1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)  
2002년~현재 서울산업대학교 제어계측 공학과 조교수

관심분야 : 지능시스템, 지능로봇, HCI  
E mail : leehy@snut.ac.kr