

論文96-33B-9-1

# 외력 대처 기능을 갖는 사각 보행 로봇 적응 걸음새에 관한 연구

## (A Study on an Adaptive Gait for a Quadruped Walking Robot under External Forces)

姜 東 吾 \*, 李 然 定 \*\*, 李 承 夏 \*\*, 洪 藝 善 \*\*\*, 卞 增 男 \*

(Dong-Oh Kang, Lee Yun-jung, Lee Seung-ha, Yeh Sun Hong, and Zeungnam Bien)

### 요 약

본 논문에서는 외란이 작용하는 경우에도 사각 보행 로봇이 보행할 수 있도록 하는 적응 걸음새를 제안하였다. 이 적응 걸음새는 사각 보행 로봇이 걸음새를 적절히 변화시켜, 다양한 외부 환경 요소에 의하여 작용하는 외란에 적응하여 보행할 수 있게 한다. 본 논문에서는 외란이 사각 보행 로봇의 몸체에 작용하는 외력으로 환산이 가능하다는 가정하에 외력에 대처하는 적응 걸음새를 제안하였다. 외력 작용 시 사각 보행 로봇의 안정도 판별법으로 ZMP에 바탕을 둔 실효 무게중심을 이용한 방법을 제안하고, 외력에 대처하는 적응 걸음새 방법으로 높이 제어와 반사적 방향 제어 방법을 제안하였다. 또한, 반사적 방향 제어를 행하거나 행한 후 임의의 자세에서 기준 자세로 변환할 때, 걸음새 안정도를 최대화하는 최적의 보폭을 결정하는 알고리즘적인 탐색법을 제안하였다. 제안된 적응 걸음새를 검증하기 위하여 실제적인 상황의 시뮬레이션을 행하였다.

### Abstract

In this paper, we propose an adaptive gait by which a quadruped walking robot can walk against external disturbances. This adaptive gait mechanism makes it possible for a quadruped walking robot to change its gait and accommodate external disturbances from various external environmental factors. Under the assumption that external disturbances can be converted to an external force acting on the body of a quadruped walking robot, we propose a method of an adaptive gait against the external force. More specifically, we propose a new criterion for the stability margin of a walking robot by using an effective mass center based on the zero moment point under unknown external force. And for a solution of an adaptive gait against external disturbances, a method of altitude control and reflexive direction control is suggested. An algorithmic search method for an optimal stride of the quadruped walking robot that walks from any configuration to a standard configuration is also proposed. By the method, the gait stability margin of a quadruped walking robot is optimized in changing its direction at any instance for and after the reflexive direction control. To verify the efficiency of the proposed approach, some simulation results are provided.

### I. 서 론

#### 1. 연구 동기

보행 로봇(walking robot)은 연구실이나 공장 등의 안정된 환경에서 작업하는 산업용 로봇(industrial robot)와는 달리, 알려져 있지 않은 다양한 환경 속을 보행한다. 이와 같이 다양한 환경에서 보행하는 보행 로봇은 외부 환경과 여러 가지 상호작용(interaction)을 하게 된다. 기존의 보행 로봇의 보행

\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., KAIST)

\*\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic and Electric Eng., Kyung Pook Univ.)

\*\*\* 正會員, 韓國科學技術研究院 機電研究部

(Div. of mechanical and control system, KIST)

接受日字:1996年2月17日, 수정완료일:1996年8月21日

제어는 보행 로봇트의 보행 시 생기는 외부 환경과의 상호 작용을 보행 로봇트가 보행을 수행하기 이전에, 센서를 통한 외부 환경의 정보로 미리 예상하고 이를 바탕으로 보행 로봇트의 동작을 계획하고 수행하는 방식이다. 즉, 보행 로봇트가 보행을 수행하기 이전에 외부 환경에 대한 정보를 바탕으로, 보행 로봇트의 걸음새를 오프라인(off line)으로 계획하여 수행하는 방식이다. 그러나, 이러한 보행 제어 방식은, 외부의 환경이 보행 로봇트의 동작을 계획하여 수행하는 도중 달라지면, 미리 계획된 동작을 수행하지 못하거나 불안정한 상태가 되어 보행이 불가능하게 될 위험성이 있다. 이 경우 외부 환경의 작용은 보행 로봇트의 보행에 외란으로 작용하게 된다. 따라서, 이러한 외란이 작용하는 경우에도 외란에 적절히 대처하도록 걸음새를 변화시켜 안정된 보행을 수행하는, 외란에 적응 능력을 가지는 적응 걸음새의 연구가 필요하다. 본 논문에서는 센서의 정보로 매순간 사각 보행 로봇트와 외부 환경과의 상호 작용을 감지하고, 이를 바탕으로 온라인(on line) 보행 제어를 수행하여, 외란이 작용하는 경우에도 걸음새를 적절히 변화시켜 안정된 보행이 가능하게 하는, 즉, 외란에 적응하는 적응 걸음새를 연구한다.

## 2. 문헌 조사와 논문 구성

기존의 보행 로봇트의 적응 걸음새에 관한 연구는 불규칙한 지형을 보행할 때, 이러한 지형에 잘 적응하도록 걸음새를 수정하여 보행하는 연구가 진행되어 왔다.<sup>[1-8]</sup> 즉, 불규칙한 지형이 존재할 때 일정한 다리 이동 순서와 미리 정해진 착지점을 이용하여 보행하는 것이 아니라, 시각 센서를 통하여 지형에 대한 모델을 오프라인으로 만든 후, 이를 바탕으로 착지가 가능한 영역을 찾아 교착상태(deadlock)가 발생하지 않도록 착지점을 선택하고, 다리 이동 순서를 결정하는 여러 가지 적응 걸음새가 제안되었다. 그러나, 이상의 적응 걸음새 연구는 오프라인으로 한 주기의 걸음새를 미리 계획한 후 보행하는 방법의 연구이다. 따라서, 계획된 걸음새를 수행하는 도중 외란이 발생하는 경우 이에 온라인으로 적응하는 연구가 미진한 상태이다.

온라인으로 센서의 정보를 이용하여 보행 로봇트의 동작을 결정하는 연구는 1980년 Klein과 Briggs에 의하여 OSU(Ohio State University)의 육각 보행 로봇트에 대하여 발 끝의 힘 센서를 이용한 능동 순응성(active compliance) 방법이 제안된 이후 1984년

Klein과 Briggs는 자세 센서와 힘 센서를 이용하여 비평탄 지형을 보행하는 방법을 연구하였다<sup>[9][10]</sup>. 1984년 Hirose는 접촉 센서, 자세 센서를 이용하여 상위의 제어부의 관여 없이 몸체의 높이, 몸체의 자세, 각 다리의 착지 실현 등을 제어하는 반사 동작 조절부(reflex-motion regulation system)를 구상하였다<sup>[3]</sup>. 1984년 Orin은 유압을 이용한 각 다리의 제어를 유한 상태 기계(finite state machine)로 모델링한 후 센서의 정보를 이용하여 인간의 반사 동작과 같은 반사 제어(reflexive control)를 행하는 연구를 하였다<sup>[13]</sup>. 이상의 논문들은 센서의 정보를 온라인으로 이용하여 이를 보행 로봇트의 제어에 이용하였지만 이 역시 미리 계획된 걸음새를 바탕으로 하여 이전에 걸음새 계획 시의 정보를 이용하거나 외란의 영향을 고려하지 않고 보행 로봇트의 부분적인 동작을 수정하는데 국한되어 있다.

보행 로봇트의 보행 시 작용하는 외란에 대처하는 연구는 1989년 Y.F. Zheng에 의하여 이각 보행 로봇트의 한 다리의 착지 시 발생하는 예상하지 못한 순간력(impulsive force)에 대하여 각 관절의 액츄에이터의 가속도를 이용하여 이를 보상하는 연구가 있었고, 1990년 Takanish 등에 의하여 이각 보행 로봇트에 외력이 작용하는 경우 ZMP(Zero Moment Point)를 이용한 트렁크 운동(trunk motion)을 통하여 이각 보행 로봇트의 동적 걸음새를 구현하는 연구가 있었다<sup>[14][15]</sup>. 그러나, 이러한 연구들은 동적 걸음새로 보행하는 이각 보행 로봇트의 착지 시 발생하는 외력에 대처하는 방법에 대한 연구로 사각 보행 로봇트와 같이 다리의 이동 순서 등의 걸음새 방법이 문제가 되는 경우에는 그대로 적용하기가 곤란하다.

이상의 문헌에서 알 수 있듯이 외란에 대처하고 적응하여 사각 보행 로봇트를 안정되게 보행하게 하는 방법에 대한 연구가 미진하였다. 임의의 순간에 작용하는 외란의 특징상 센서의 정보를 온라인으로 이용하여 이에 대한 제어가 실시간으로 이루어지도록 하는 연구가 필요하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 제 2장은 대상 사각 보행 로봇트와 보행 로봇트에 작용하는 외란에 대한 설명이다. 제 3장은 외란을 외력으로 환산했을 때 이의 영향을 센서를 통하여 감지하는 방법과 이 때 보행 로봇트의 안정도를 판별하는 방법을 제시한다. 제 4장은 3장에서 제시한 외력이 작용하는 경우의 보행 로

보트의 안정도 판별법을 이용하여 사각 보행 로봇을 안정되게 보행하도록 하는 보행 제어 알고리즘과 적응 걸음새를 제안한다. 5장에서는 4장의 보행 제어 알고리즘 및 적응 걸음새를 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

## II. 보행 로봇과 외란

### 1. 대상 사각 보행 로봇

본 논문의 연구 대상이 되는 사각 보행 로봇은 KIST(Korea Institute of Science and Technology)에서 수행하고 있는 KIST-2000 연구프로그램 휴먼로봇 시스템 개발 연구 과제인 CENTAUR이다. CENTAUR는 회전 관절(revolute joint) 3개로 구성된 다리를 가지고 있으므로 총 12개의 다리 관절을 가지고 있다.

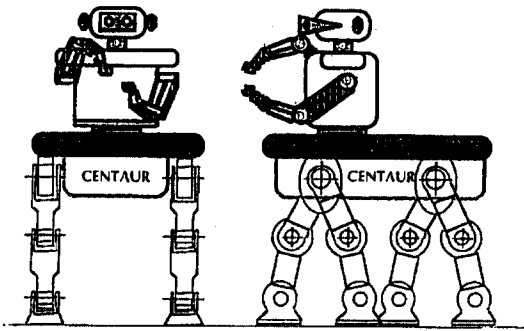


그림 1. 대상 사각 보행 로봇 CENTAUR  
Fig. 1. CENTAUR.

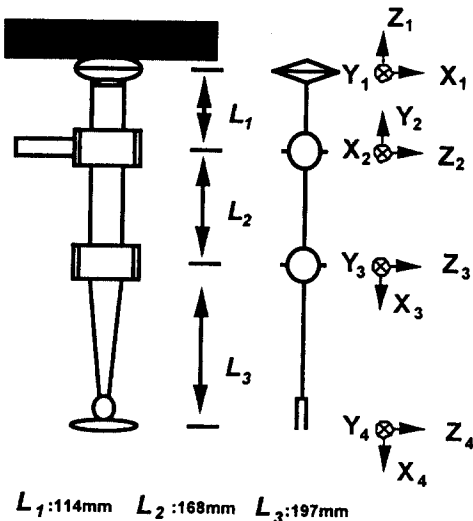


그림 2. CENTAUR의 다리  
Fig. 2. A leg of CENTAUR.

$L_1:114\text{mm}$   $L_2:168\text{mm}$   $L_3:197\text{mm}$

### 2. 보행 로봇에 작용하는 외란

보행 로봇은 걸음새 계획을 통하여 보행 로봇과 외부 환경과의 상호작용을 미리 예상할 수 있다. 그런데, 보행 로봇이 보행을 수행하는 도중 외부 환경이 변화하든지, 걸음새 계획 시에 이용한 외부 환경에 대한 정보에 오류가 있을 경우에는 미리 계획한 걸음새가 원하는 보행을 수행하지 못할 수 있다. 이 경우에는 보행 로봇이 센서를 이용하여 미리 예상한 것과 다른 외부 환경과의 상호작용이 생기게 된다. 이러한 예상하지 못한 외부 환경과의 상호작용에 의하여 보행 로봇은 원하는 보행을 수행하지 못할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 말하는 보행 로봇에 작용하는 외란이란, 보행 로봇이 걸음새 계획 시 미리 예상한 것과 다른, 보행 로봇과 외부 환경과의 상호작용이다.

이러한 실제와 계획 시의 보행 로봇과 외부 환경과의 상호작용의 차이가 생기는 원인에 따라 외란을 다음과 같이 분류할 수 있다.

첫째, 변화하는 환경에 의하여 작용하는 외란이다. 이는 외부 환경이 보행 로봇이 걸음새를 계획하고 보행하는 도중 달라져 생기는 외란이다. 예로 보행 로봇이 보행 이외의 작업을 통하여 외부 환경과 상호작용을 하여 보행 로봇에 예상하지 못한 외력을 가하는 경우, 보행 로봇에 물건을 운반하여 예상하지 못한 물건의 무게가 가해지는 경우, 장애물과의 충돌로 인한 외력의 발생 등의 경우가 이러한 외란에 해당한다. 실제 대상 로봇인 CENTAUR의 경우는 몸체에 상체가 붙어 있고 상체에는 작업이 가능한 로봇 팔과 손이 부착되어 있다. 따라서, 실제로 보행 이외의 작업으로 인한 외력이 작용할 가능성이 매우 높다.

둘째, 걸음새 계획 시 사용하는 외부 정보에 대한 정보의 오류로 인한 외란이다. 이는 보행 로봇이 걸음새를 계획하는 시점에 외부 환경에 대한 잘못된 정보를 가지고 걸음새를 계획함으로써 생기는 외란이다. 이는 센서 정보가 잡음(noise) 등에 의하여 잘못되어 있든지, 이를 해석하는 알고리즘의 오류로 인하여 그 정보를 잘못 해석하는 경우이다. 예로 지형의 굴곡을 잘못 해석한 경우, 장애물을 파악하지 못한 경우, 지형의 단단함(stiffness)을 잘못 알았을 경우 등이 있다.

셋째, 걸음새 계획 시 문제의 간략화를 위해 설정한 가정이, 실제 보행 로봇의 보행 수행에 있어서는 합당하지 않아 생기는 외란이다. 예로 보행 로봇의 다리의 질량을 무시하고 설계한 걸음새의 경우 실제 보

행 로봇트의 각 다리의 질량이 매우 큰 경우에는 원하는 보행을 수행하지 못하게 된다.

넷째, 기타의 원인으로 인한 외란이다. 즉, 보행 로봇트의 기계적인 고장이 그 예이다.

본 논문에서는 이상의 다양한 원인에 의하여 발생하는 외란을 몸체에 작용하는 외력으로 간략화 시키고 여기에 대한 대처 방법을 연구한다. 즉, 다양한 원인에 의해서 발생하는 외란은, 보행 로봇트에 외력의 형태로 작용하게 되고, 이것이 보행 로봇트의 보행 수행에 방해가 된다. 보행 이외의 작업으로 인한 외력과 장애물과의 충돌이나 각 다리의 질량으로 인한 외력들은, 외력의 형태로 작용하는 외란의 예이다. 이러한 외란에 의한 외력은 보행 로봇트의 몸체와 다리의 여러 부분에 작용할 수 있다. 본 논문에서는 이 중 몸체에 작용하는 외력에 대하여 사각 보행 로봇트가 안정되게 보행하는 방법을 연구한다.

### III. 외력 작용 시 보행 로봇트의 안정도 판별법

#### 1. 실효 무게중심을 이용한 안정도 판별법

기존의 보행 로봇트의 정적 안정도 판별법은 지지 다각형을 이용한 방법이다. 즉, 몸체의 무게중심이 지지 다각형의 내부에 존재하면 보행 로봇트가 정적으로 안정되어 있다고 말한다. 그런데 외란에 의하여 몸체에 외력이 작용하는 경우에는 기존의 지지 다각형을 이용한 보행 로봇트의 안정도 판별법을 이용할 수 없다. 즉, 무게중심이 지지 다각형 내부에 존재하더라도 보행 로봇트가 불안정하게 될 수 있다는 것이다. 따라서, 외력이 작용하는 경우에는 기존의 방법과는 다른, 보행 로봇트의 안정도 판별법이 필요하다.

본 논문에서는 마찰력이 충분히 커서 보행 로봇트의 몸체에 작용하는 수평력과 수직축에 작용하는 회전력에 의하여 미끄러짐이 발생하지 않는다고 가정하고, 보행 로봇트의 몸체에 작용하는 수직력과 수평축에 작용하는 회전력의 효과를 바탕으로 보행 로봇트의 안정도를 다루고자 한다.

● 가정: 지면의 마찰력이 충분히 커서 보행 로봇트에

요오(yaw) 방향의 미끄러짐이 발생하지 않는다.

기존의 연구에서 외력이 작용하는 경우에 보행 로봇트의 안정도를 판별하는 방법으로 이각 보행 로봇트의 동적 걸음새 연구에서 자체 중량의 가속과 감속에 의

한 관성력의 효과를 ZMP(Zero Moment Point)로 표시하여 제어하는 연구가 있었다<sup>[15]</sup>. 이 ZMP는 또한 외력이 작용하는 경우의 사각 보행 로봇트의 정적 안정도 판별에도 사용할 수 있다. ZMP는 외력에 의한 회전력과 보행 로봇트의 자체 중량에 의한 회전력의 합이 0이 되는 점이다.

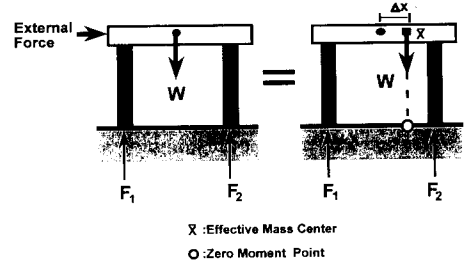


그림 3. 실효 무게중심

Fig. 3. Effective mass center.

이 점이 실제 무게중심과 달라지는 것은 외력의 영향으로 그림 3에서와 같이 무게중심이 이동하는 것과 같은 효과이다. 이 점은 실효 무게중심으로 기존의 보행 로봇트의 안정도 판정 시 보행 로봇트의 무게중심과 같은 역할을 한다. 따라서, 이 점을 마치 외력이 작용하지 않을 경우의 무게중심과 같이 해석하여 안정도를 판별한다면 기존의 안정도 판별법을 그대로 외력이 작용하는 경우에도 적용할 수 있다.

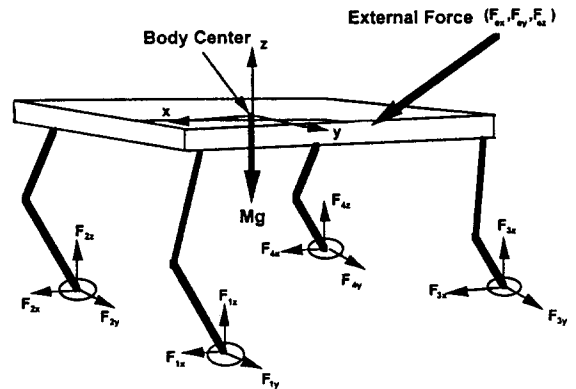


그림 4. 외력과 좌표계

Fig. 4. External force and coordinate frame.

사각 보행로봇트에서 실효 무게중심은 그림 4와 같이 외력 ( $F_{ex}$ ,  $F_{ey}$ ,  $F_{ez}$ )가 작용할 때 정적 안정 상태를 바탕으로 한 정역학적 계산을 통하여 (1)식과 같이 표현된다. 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 변위량인 ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ )가 각각의 외력 성분  $F_{ex}$ ,  $F_{ey}$ 와 높이  $h$ , 수직력  $F_{ez}$ 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x_w + \Delta x \\ \bar{y} &= y_w + \Delta y \\ \Delta x &= \frac{\tau_y + hF_{ex}}{F_{ex} - W} \\ \Delta y &= \frac{\tau_x + hF_{ey}}{F_{ex} - W} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $(\bar{x}, \bar{y})$ :실효 무게중심의 좌표  
 $(x_w, y_w)$ :실제 무게중심의 좌표  
 $(\Delta x, \Delta y)$ :실효 무게중심과 실제 무게중심의 변위량  
 $(F_{ex}, F_{ey}, F_{ez})$ :외력의 성분  
 $\tau_x$ :외력에 의한 x방향 회전력  
 $\tau_y$ :외력에 의한 y방향 회전력  
 $h$ :보행 로봇트 몸체의 높이  
 $W$ :보행 로봇트 자체의 무게

2. 실효 무게중심의 센싱

대상 사각 보행 로봇트는 각 다리의 발끝에 힘 센서를 부착하고 있다. 이 힘 센서는 각 다리의 발끝의 x, y, z축 방향의 힘을 센싱한다. 이 발 끝에서의 힘 분포를 이용하여 실효 무게중심을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x_1 F_{1z} + x_2 F_{2z} + x_3 F_{3z} + x_4 F_{4z}}{W - F_{ez}} \\ \Delta y &= \frac{y_1 F_{1z} + y_2 F_{2z} + y_3 F_{3z} + y_4 F_{4z}}{W - F_{ez}} \\ F_z &= F_{ez} - W = -(F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ :각 다리의 발끝의 2차원 좌표  
 $F_{1z}, F_{2z}, F_{3z}, F_{4z}$ :센서를 통하여 측정 한 각 다리의 발끝에 작용하는 z축 방향의 힘  
 $W$ :보행 로봇트 자체의 무게

(2)식에서 알 수 있듯이 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 차이  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는, x나 y축 방향의 힘을 센싱하지 않고서도 z축 방향의 힘 센서 값만을 이용하여 계산할 수 있다.

IV. 외란에 대처하는 보행 제어

1. 제안하는 보행 제어 방법

기존의 걸음새 제어 방법이 경로 계획부에서 계획된

경로를 오프라인으로 수행하는 데 반하여 제안된 보행 제어 방법은 외란 대처 적응부가 추가되어 센서의 정보를 온라인으로 감지하여 외란의 유무와 정도를 알아 이에 대처하는 동작을 결정하여 걸음새 제어부에 지시한다. 외란 대처 적응부는 그림 6과 같은 구조를 가지고 있다.

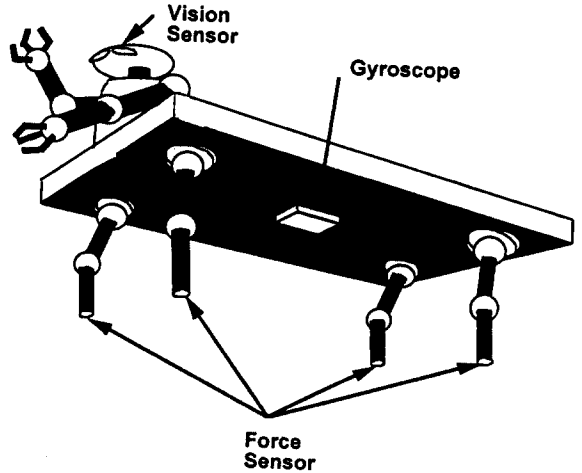


그림 5. CENTAUR의 센서  
 Fig. 5. Sensors of CENTAUR.

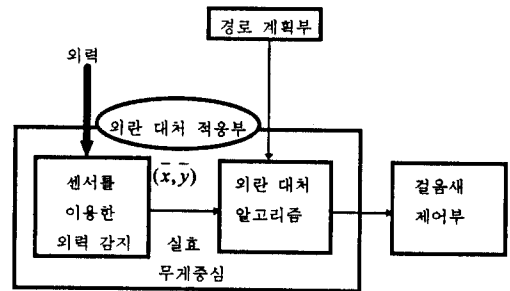


그림 6. 외란 대처 적응부의 구조  
 Fig. 6. Structure of disturbance adaptation module.

2. 기본 가정

외란에 대처하여 보행 로봇트를 안정되게 보행하게 하는 걸음새 연구는 다음과 같은 가정 아래 이루어진다.

- 가정 1)지면은 단단하고(rigid) 굴곡이 없고(regular) 경사가 없는(even) 평탄 지형이다.
- 가정 2)지면에 의한 마찰력이 충분히 커 미끄러짐이 발생하지 않는다.
- 가정 3)사각 보행 로봇트는 지면과 평행한 자세로

보행한다.

가정 4) 사각 보행 로봇트는 충분히 느린 속도로 보행하기 때문에 정적인 상태로 보행하며 동적인 효과는 무시할 수 있는 준정적인(quasi-static) 상태이다<sup>[11]</sup>.

### 3. 외란 대처 적응부

외란 대처 적응부는 외란의 유무를 센서를 이용하여 매순간 감지하여 외란이 작용하면 이에 대처하는 적절한 동작을 걸음새 제어부에 지시한다. 그리고 이를 상위의 경로 계획부에 알린다. 외란 대처 적응부가 외란에 대처하여 보행 로봇트가 넘어지지 않고 안정된 보행이 가능하도록 걸음새 제어부에 지시하는 동작으로 본 논문에서는 높이 제어(altitude control)와 반사적 방향 제어(reflexive direction control)의 두 가지 방법을 제시한다.

- 높이 제어는 사각 보행 로봇트가 보행 시 몸체의 높이를 변화시켜 보행 로봇트에 가해지는 외력의 효과를 줄이는 방법이다. 높이 제어는 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 오차를 줄이는 효과가 있으므로 외란이 작용하는 경우 높이 제어를 통하여 본래 경로 계획부에서 계획한 경로를 벗어나지 않고 보행할 수 있다.

- 반사적 방향 제어는 사각 보행 로봇트가 불안정한 자세가 되었을 때 반사적인 빠른 방향 전환을 통하여 사각 보행 로봇트가 안정한 자세가 되는 위치에 몸체의 무게중심을 이동시키는 방법이다.

이상의 두 가지 방법을 사용하여 그림 7과 같이 외란 대처 적응부를 구성한다.

그림 7에서  $lim_x$ 와  $lim_y$ 는 각각 높이 제어를 시작하는 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 차이의 x, y 성분이다. 이 값은 센서의 잡음을 고려하여 결정할 값이다. 즉, 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 차이가 외력에 의해서가 아니라 센서 측정 시 잡음에 의한 것일 수 있기 때문이다.

### 4. 높이 제어(altitude control)

보행 로봇트의 몸체의 높이를 적절한 높이로 제어하여 줌으로써 외력에 의한 효과를 줄일 수 있다.  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 보행 로봇트의 높이를 변화시켜 바꿀 수 있는 값이다.

따라서, 외란에 의하여 보행 로봇트의 실효 무게중심과 실제 무게중심이 달라지는 경우에는 보행 중인 보행

로봇트의 높이를 변화시켜 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이를 줄일 수 있다. 미리 계획된 걸음새가 보행 로봇트의 안정된 걸음새를 보장하므로  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 를 줄임으로써 실효 무게중심이 보행 로봇트가 안정되게 보행 가능하도록 하는 곳에 위치하게 한다.

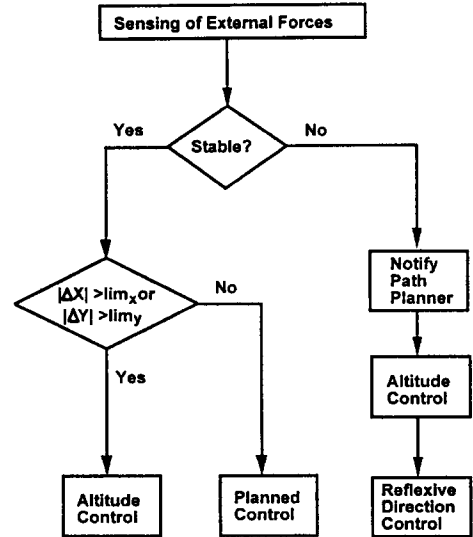


그림 7. 외란 대처 적응부의 흐름도

Fig. 7. Flowchart of disturbance adaptation module.

$$\Delta x = 0 \Rightarrow \bar{h} = \frac{-\tau_y}{F_{ex}} \quad \text{if } F_{ex} \neq 0 \quad (3)$$

$$\Delta y = 0 \Rightarrow \bar{h} = \frac{-\tau_x}{F_{ey}} \quad \text{if } F_{ey} \neq 0$$

(3)식에서 알 수 있듯이  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 를 동시에 0으로 만들 수는 없다. 따라서, 다음의 두 가지 방법을 이용하여  $\Delta x^2 + \Delta y^2$ 을 최소화하는 높이를 구할 수 있다.

- 최소 자승법(Least squares method)

$$E^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad (4)$$

$$\frac{dE^2}{dh} = 0 \Rightarrow \bar{h} = \frac{\tau_x F_{ey} - \tau_y F_{ex}}{F_{ex}^2 + F_{ey}^2}$$

- 가중 최소 자승법(Weighted least squares method)

$\Delta x$ 와  $\Delta y$ 에 중요도에서 차이가 날 수가 있다. 이때 지지 다각형에서의 거리를 이용하여 가중치(weighting)를 부가하는 방법을 사용한다. 가중 최소 자승법(weighted least squares method)을 이용하여 이러한 방법을 구현할 수 있다.

$$E^2 = w_x^2 \Delta x^2 + w_y^2 \Delta y^2$$

$$\frac{dE^2}{dh} = 0 \Rightarrow \bar{h} = \frac{w_y^2 \tau_x F_{ey} - w_x^2 \tau_y F_{ex}}{w_x^2 F_{ex}^2 + w_y^2 F_{ey}^2}$$

$$w_x = \frac{Y_L}{X_L + Y_L}$$

$$w_y = \frac{X_L}{X_L + Y_L} \tag{5}$$

$$X_L = \min(L_x)$$

$$Y_L = \min(L_y)$$

여기서,  $L_x$ 와  $L_y$ 는 실효 무게중심에서 지지 다각형의 각 변까지의 거리의 x성분과 y성분이다. 가중치(weighting)를 이것들에 반비례하게 각각의 에러 성분에 가하게 되면 지지 다각형에 가까운 에러가 빨리 0으로 감소하게 된다. 따라서, 그림 8과 같이  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 가 감소하는 방향은 실효 무게중심이 지지 다각형 중 가장 가까운 변에서 수직에 가까운 방향으로 이동함을 의미한다.

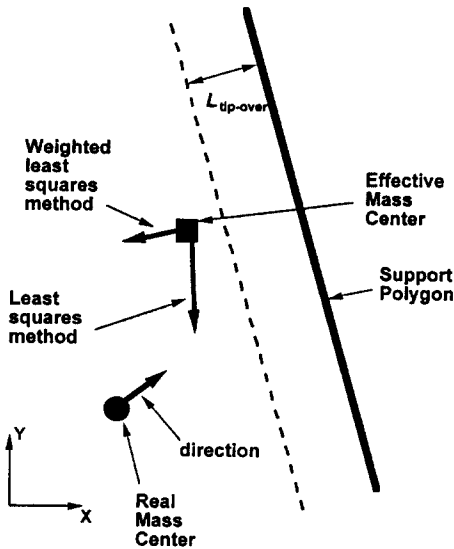


그림 8. 높이 제어에 의한 실효 무게중심의 이동  
Fig. 8. The movement of the effective mass center by altitude control.

이상과 같은 높이 제어는 보행 로봇의 방향 등의 다른 여러 가지 요소를 바꾸지 않고 경로 계획부의 간섭 없이 외란 대처 적응부 이하의 보행 제어 요소들만으로도 외란에 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 높이 제어의 단점은 제어할 수 있는 높이에 제한이 존재한다는 것과 수평력이 아닌 수직력의 효과는 보상하지 못하다는 점이다. 이러한 것을 고려할 때  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 를 완전히 0으로 만드는 데는 어려움이 있다. 따라서, 높이 제어 외에도 방향 제어 등의 방법이 필요

하다.

5. 반사적 방향 제어

높이 제어는 한계를 가지므로 보행 로봇의 방향을 변화시켜 외력의 영향을 줄이는 방법이 필요하다. 이러한 방향 제어는 보행 로봇의 경로를 벗어나게 하므로 방향 제어를 수행하면서 상위의 경로 계획부에 이 사실을 알리고 새로운 경로를 계획해야 한다. 본 논문에서는 외력이 작용하는 경우에 보행 로봇이 넘어질 가능성이 있는 영역(forbidden area)을 두어 이 영역으로 실효 무게중심이 위치하게 되면 반사적인 빠른 방향전환으로 안정된 자세를 취하게 하는 방법을 사용한다. 넘어질 가능성이 있는 영역이란, 무게중심이 지지 다각형 내에 놓일 지라도 여러 가지 외란에 의하여 보행 로봇이 불안정해져 넘어질 가능성이 있는 영역을 말한다. 이것은 허용 걸음세 안정여유도 만큼 지지 다각형 내로 이동한 영역이고 허용 걸음세 안정여유도가 크면 이 영역도 커진다. 반사적 방향전환 시 보행 로봇의 진행 방향은 실제 무게중심의 방향으로 향하게 하고 몸체의 속도를 순간적으로 매우 빨리 변화시켜 보행 로봇을 안정된 자세가 되게 한다.

$$\text{if } S_o^E \leq L_{tip-over} \tag{6}$$

$$\alpha = \text{atan2}(-\Delta y, -\Delta x)$$

여기서,  $S_o^E$ 는 현재의 실효 무게중심을 이용한 안정여유도이고  $L_{tip-over}$ 은 보행 로봇이 넘어질 위험이 있는 한계를 표시하는 허용 안정 여유도이다.  $\alpha$ 는 보행 로봇의 진행 방향이다.

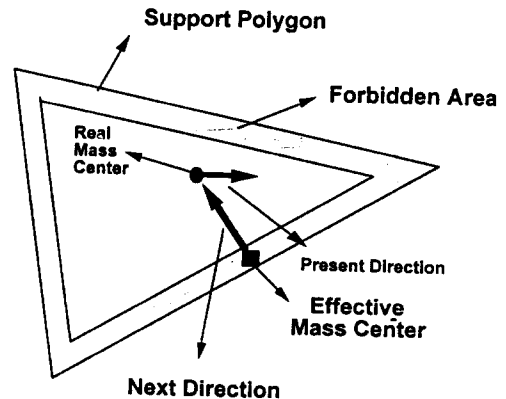


그림 9. 반사적 방향 제어  
Fig. 9. Reflexive direction control.

1) 임의의 순간에 방향 전환이 가능한 걸음새

반사적 방향 제어를 수행할 때 사각 보행 로봇트는 임의의 순간에 방향 전환이 가능해야 한다. 즉, 주기 걸음새나 계획된 비주기 걸음새와 같이 한 주기 단위로 방향을 전환하는 것이 아니라, 어떠한 순간에도 사각 보행 로봇트의 몸체의 방향을 전환하는 것이 가능해야 한다. 또한, 반사적 방향 제어를 수행한 후, 사각 보행 로봇트가 안정된 자세가 된 이 후에 다시 반사적 방향 제어 이전의 방향으로 이동할 때도 역시 임의의 순간에 방향 전환이 가능해야 한다. 따라서, 본 논문에서 연구하는 외란에 대처하는 적응 걸음새에서, 임의의 순간에 방향 전환이 필요한 상황은 다음과 같다.

- 반사적 방향 제어 수행 시
- 반사적 방향 제어를 수행한 후

임의의 순간에 방향을 전환할 때 사각 보행 로봇트가 3점 지지 상태일 때와 4점 지지 상태일 때 다른 방법을 사용한다.

3점 지지 상태에서는 현재 이륙 중인 다리를 착지하면서 몸체의 무게중심을 이동시킨다. 따라서, 현재 이륙 중인 다리를 착지할 때까지 즉, 4점 지지 상태가 될 때까지의 보행 로봇트의 몸체의 궤적을 결정하면 된다. 4점 지지 상태에서는 다음의 탐색을 이용한 최적의 보폭 결정 방법을 이용하여 몸체의 궤적을 결정하게 된다.

가. 임의의 착지점을 가진 자세에서 기준 자세로 이동할 때 걸음새 안정도를 최대화하는 보폭 결정

Lee의 비주기 걸음새는 착지점이 상위의 경로 계획부에서 주어진다고 가정하였다<sup>[11]</sup>. 그러나, 외란에 대한 적응 걸음새는 계획된 한 주기내에서도 방향전환이 가능해야 하므로 다음 착지점을 결정하는 방법이 필요하다. 이것은 해석의 단순화를 위하여 보행 로봇트가 기준 자세에서 기준 자세로 한 주기 동안 이동한다고 가정하였던 기존의 걸음새가 아닌 임의의 착지점을 가진 자세에서 한 주기의 보행 후에 임의의 착지점을 가진 자세로 이동하는 걸음새가 필요하다. 본 논문에서는 한 주기의 보행 이후에 보행 로봇트의 자세가 기준 자세가 되도록 정하여 보폭만 결정하면 다음 주기의 각 다리의 착지점을 모두 분리하여 결정할 필요 없이 착지점들이 결정되도록 하였다. 이것은 경로 계획이 기준 자세에서 이루어지므로 외란에 대처하기 위하여 방향을 전환한 후 경로 계획부에서 새로이 경로를 선택할 때 추가의 기준 자세로 이동하는 걸음새가 필요 없이

그대로 경로 계획을 수행할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 임의의 착지점을 가진 자세에서 한 주기 보행 이후 기준 자세로 전환할 때 걸음새 안정도를 최적화하는 보폭을 결정하는 알고리즘적인 방법을 연구한다.

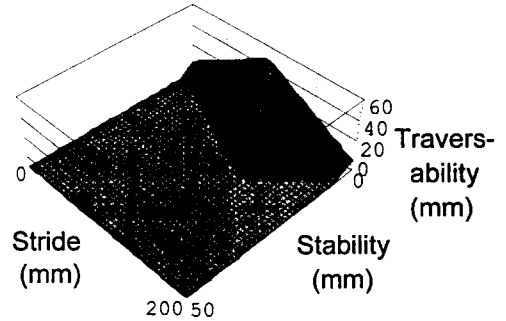


그림 10. 보폭과 걸음새 안정 여유도와 이동 가능성  
Fig. 10. Stride, gait stability margin and traversability.

그림 10은 계 걸음각이 0도일 때의 보폭과 걸음새 안정 여유도와 이동 가능성과의 관계이다. 걸음새 안정 여유도는 보폭과 초기 착지점, 계 걸음각의 함수이고 폐형식(closed form)의 수식으로 표현되지 않기 때문에 해석적인 방법으로 최적의 해를 구하기가 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이분법을 응용한 탐색을 통하여 최적의 걸음새 안정 여유도를 가지는 보폭을 결정하는 방법을 연구한다.

**[문제 정의]** 계 걸음각  $\alpha$ 와 초기 착지점이 입력으로 주어지고 초기 착지점을 가진 자세에서 기준 자세로 이동할 때 걸음새 안정 여유도  $S_0$ 를 최대화하는 보폭  $\lambda_{opt}$ 를 탐색을 통하여 결정한다.

Lee의 이분법 알고리즘은 최적의 걸음새 안정 여유도를 유도할 때 보폭을 일정하게 하고 걸음새 안정 여유도와 이동 가능성의 반비례 관계를 이용한다<sup>[11]</sup>. 이에 반하여 본 논문에서는 먼저 걸음새 안정 여유도를 고정시킨 다음, 보폭을 이분법으로 변화시켜, 이동 가능성이 0 이상인 최대 보폭을 구한다. 그리고, 이러한 동작을 이분법으로 걸음새 안정 여유도를 변화시키며 반복하여 최대 걸음새 안정 여유도를 구한다. 전체 탐색 알고리즘은 그림 11과 같다.

그림 12는 오프라인으로 계산한 최대 걸음새 안정 여유도와 최적의 보폭과, 제안된 알고리즘으로 계산한 것을 보여주며 그림 13은 이 두 가지의 오차를 보여준다.



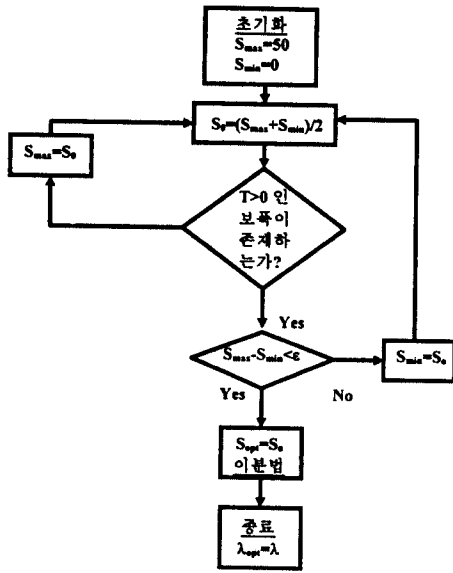


그림 11. 최적의 보폭 탐색 알고리즘  
Fig. 11. Optimal stride search algorithm.

그림 13에서 알 수 있듯이 탐색을 통하여 걸음새 안정 여유도를 최대화하는 최적의 보폭을 결정하는 제안된 알고리즘은 최적의 보폭의 경우 ±5%의 오차를 넘지 않고, 가능한 최대 걸음새 안정도의 경우는 15%의 오차를 넘지 않음을 알 수 있다. 그리고 본 논문에서 제시한 탐색 알고리즘의 탐색 시간은 0.89초 내외이다.(Sun Sparc 20)

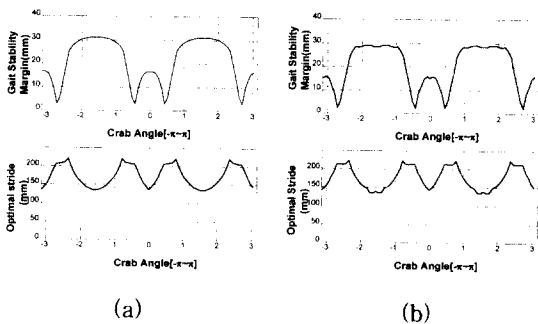


그림 12. 최적의 걸음새 안정 여유도와 보폭  
(a) 오프라인 (b) 제안된 알고리즘  
Fig. 12. Optimal gait stability margin and stride  
(a) by off-line (b) by the proposed algorithm

V. 시뮬레이션

본 논문에서는, 실제 보행 로봇트와 같은 지면 반발

력 계산을 위하여, Pseudo-inverse방법을 이용하고, 이 값을 실제 보행 로봇트의 보행 시 센서를 통하여 측정된 값으로 간주하여 시뮬레이션을 행하였다<sup>[12]</sup>.

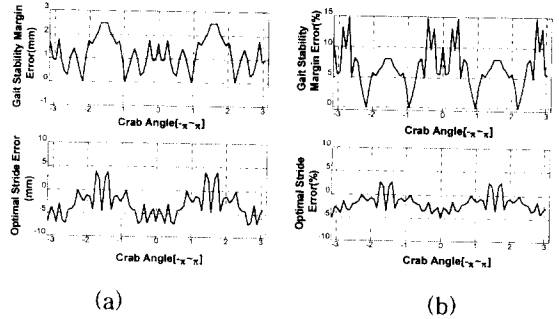


그림 13. 탐색 알고리즘과 최적의 해와의 오차  
(a)오차 (b)백분율 오차  
Fig. 13. Error between the optimal solution and the solution by search  
(a) error (b)percent error

시뮬레이션은 다음과 같은 내용으로 행하여졌다.

- 사각 보행 로봇트의 보행 도중 측면력이 갑자기 일정 기간 동안 작용하는 경우
- 사각 보행 로봇트에 화물(load)을 실은 경우에 해당하는 일정한 수직력이 작용하는 경우
- 사각 보행 로봇트가 보행 이외의 작업을 행하는 경우

시뮬레이션에 이용된 보행 로봇트는 Pitch 678mm, Width 339mm, 무게 500Kg을 가진다. 그리고, 이상의 모든 시뮬레이션에서 기본 게 걸음각은 0도로 하고 주기는 10초이고 최소 허용 안정 여유도는 5mm로 하였다.

1. 측면력이 일정 기간 작용하는 경우

사각 보행 로봇트의 보행 도중  $t=0.2\sim 5$ 초 동안 측면력  $F_{ex}=-50(N)$ ,  $F_{ey}=150(N)$ 을 작용하는 경우이다. 수평력이 작용하므로 높이 제어에 의하여 실패 무게중심과 실제 무게중심의 차이가 감소한다.(그림 14)  $t=1.4$ 초에 안정 여유도가 허용 안정 여유도보다 작아지므로 반사적 방향 제어에 의하여 안정 여유도가 허용 안정 여유도보다 커진다.(그림 15)

2. 일정한 수직력이 계속 작용하는 경우(화물을 실은 경우)

사각 보행 로봇트가 100kg의 물건을 실고 보행하는 경우로 실제 무게중심에서 (-50mm, 50mm)의 위치에

물건이 놓여 있다. 수직력이 작용하므로 높이 제어에 의하여 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이가 줄어들지 않는다.(그림 16)

실효 무게중심이 불안정한 위치에 놓이는 t=1.7, 5, 17.3초에 반사적 방향 제어로 허용 안정 여유도보다 큰 안정 여유도를 가지게 한다.(그림 17)

3. 보행 이외의 작업을 하는 경우

사각 보행 로봇트가 보행 이외의 작업을 하는 경우로 보행 로봇트가 50kg의 물건을 자신의 몸체 주변으로 회전시키는 것을 가정하였다. 수직력이 작용하므로 높이 제어에 의하여 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이가 줄어들지 않는다.(그림 18)

실효 무게중심이 불안정한 위치에 놓이는 t=3.5, 6.4, 11.5, 14.3, 17.2초에 반사적 방향 제어가 이루어진다.(그림 19)

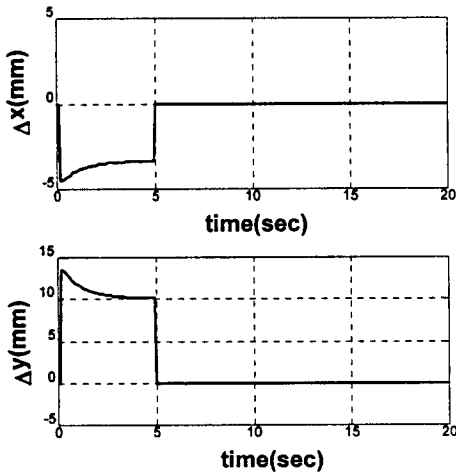


그림 14. 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이  
Fig. 14. Difference between real mass center and effective mass center.

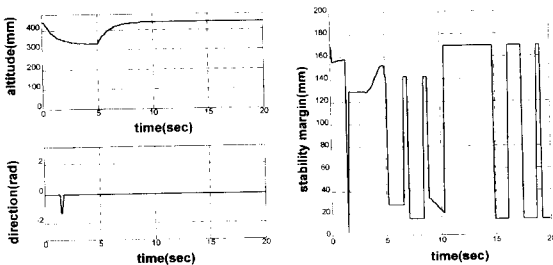


그림 15. 높이, 방향, 안정 여유도  
Fig. 15. Altitude, direction, stability margin.

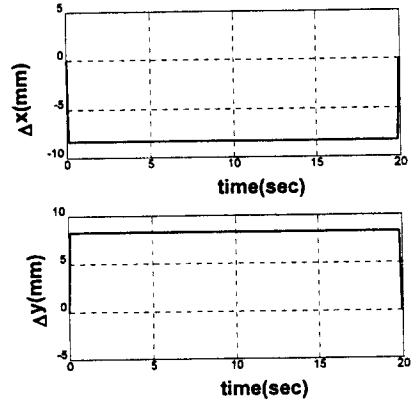


그림 16. 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이  
Fig. 16. Difference between real mass center and effective mass center.

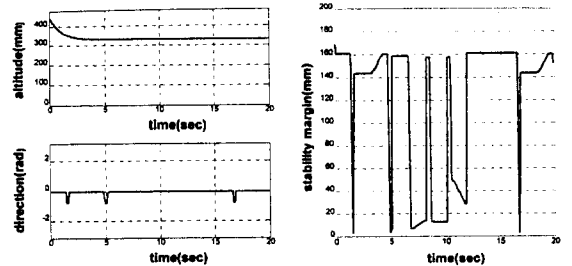


그림 17. 높이, 방향, 안정 여유도  
Fig. 17. Altitude, direction, stability margin.

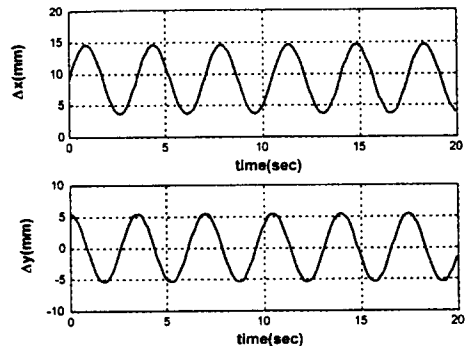


그림 18. 실효 무게중심과 실제 무게중심과의 차이  
Fig. 18. Difference between real mass center and effective mass center.

VI. 결론

본 논문에서는 보행 로봇트에 작용하는 외란을 보행 로봇트의 몸체에 작용하는 외력으로 환산하고, 이 외력

에 대처하여 안정되게 보행하는 적응 걸음새를 연구하였다. 외력이 작용하는 경우, 실효 무게중심을 이용한 보행 로봇의 안정도 판별법과, 실효 무게중심의 위치를 센서를 이용하여 파악하는 방법을 제시하고, 매순간 외란을 감지하고 실시간으로 이에 대처하는 보행 제어 방법을 사용하였다. 외란 대처 적응부에서는 실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이를 줄이는 방법으로 높이 제어와 반사적 방향 제어 방법을 사용하였다.

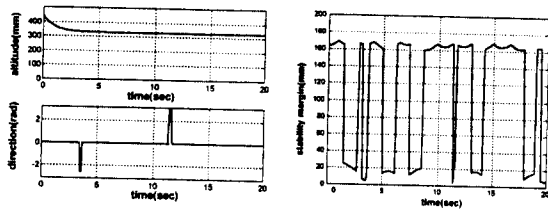


그림 19. 높이, 방향, 안정 여유도  
Fig. 19. Altitude, direction, stability margin.

실효 무게중심과 실제 무게중심의 차이를 줄이는 높이 제어 방법으로 최소 자승법(least squares method)과, 최소 지지 다각형까지의 거리, 안정 여유도를 가중치로 사용하는 가중 최소 자승법(weighted least squares method)을 제시하였다. 또한 이 높이 제어가 여러 가지 제한 조건으로 인하여 한계가 있음을 지적하고 반사적 방향 제어 방법을 제시하였다. 반사적 방향 제어 방법은 보행 로봇이 불안정해질 때 수행하는 것으로, 외력의 작용점을 알면 이 효과를 상쇄시키는 지점을 구하여 그 방향으로 이동할 수 있지만, 실제로는 많은 센서가 요구되기 때문에 실제적인 방법으로 제시하였다. 그런데, 이러한 반사적 방향 제어의 경우는 외란이 작용하는 임의의 시점에 행해져야 하므로 주기 내의 임의의 순간에 방향 전환이 가능한 걸음새가 필요하다. 본 논문에서는 이동 가능성을 이용한 비주기 걸음새인 Lee의 비주기 걸음새를 이용하여 이를 임의의 순간에도 방향전환이 가능하도록 수정하였다. 이를 위하여 임의의 착지점을 가진 자세에서 기준 자세로 이동이 가능하도록 최적의 걸음새 안정도를 가지는 보폭을 결정하는 알고리즘적인 방법을 제시하였다. 또한 Pseudo-inverse를 이용한 지면 반발력 계산으로 이상의 제안된 보행 제어 방법과 외란 대처 적응 걸음새를 검증하였다.

그러나, 본 논문에서 사용한 반사적 방향 제어 방법

은 매우 큰 외력이 작용할 경우는 사각 보행 로봇이 교착상태(deadlock)에 빠질 위험이 있다. 따라서, 추후로 외력의 작용점을 파악하는 방법, 외력을 줄이는 방향으로 이동하는 방법과 교착상태의 가능성을 줄이는 방법의 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] Y.J. Lee and Z. Bien, A Hierarchical Strategy for Planning Crab Gaits of a Quadruped Walking Robot, *Robotica*, Vol. 12, pp. 23-31, 1994
- [2] B. Min, Z. Bien, and S. Hwang, Basic Characteristics and Stability Properties of Quadruped Crab Gaits, *Robotica*, Vol. 11, pp. 233-243, 1993
- [3] S. Hirose, A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle, *Int. J. Robotics Res.* Vol. 3, No. 2, pp. 113-133, 1984
- [4] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi, Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain, *IEEE Trans. SMC*, Vol. SMC-9, No. 4, pp.176-182, 1979
- [5] P. K. Pal and K. Jayarajan, A Free Gait for Generalized Motion, *IEEE Trans. Robotics Automat.*, Vol. 6, No. 5, pp. 597- 600, 1990
- [6] V. Kumar and K. J. Waldron, Adaptive Gait Control for a Walking Robot, *J. of Robotic Systems*, 6(2), pp. 49-76, 1989
- [7] B. Choi and S. M. Song, Fully Automated Obstacle-Crossing Gaits for Walking Machines, *IEEE SMC*, Vol. 18, No. 6, pp. 952-964, 1988
- [8] F. Ozguner, S. J. Tsai, and R. B. McGhee, An Approach to the Use of Terrain-Preview Information in Rough-Terrain Locomotion by a Hexapod Walking Machine, *Int. J. Robotics Res.* Vol. 3, No. 2, pp. 134-146, 1984
- [9] C. A. Klein and R. L. Briggs, Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles, *IEEE Trans. SMC*, Vol. SMC-10, No. 7, pp. 393-400, 1980
- [10] C. A. Klein, et al., Use of Force and

Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over Irregular Terrain, Int. J. of Robotic Res. Vol. 2, No. 2, pp. 3-17, 1983

[11] M. A. Peshkin and A. C. Sanderson, Minimization of Energy in Quasistatic Manipulation, IEEE Int. Conf. R&A, Vol. 1, pp. 421-426, 1988

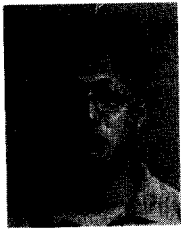
[12] V. Kumar and K. J. Waldron, Force Distribution in Walking Vehicles, Trans. of ASME, J. Mechanical Design, Vol. 112, pp. 90-99, 1990

[13] H. C. Wong and D. E. Orin, Reflex Control of the Prototype Leg during Contact and Slippage, IEEE Int. Conf. R&A, Vol. 2, pp. 808-813, 1988

[14] Y. F. Zheng, Acceleration Compensation for Biped Robots to Reject External Disturbances, IEEE Trans. SMC, Vol. 19, No. 1, pp. 74-82, 1989

[15] A. Takanishi, et al., A Control Method For Dynamic Biped Walking under Unknown External Force, Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 795-801, 1990

저 자 소 개



姜 東 棼(正會員)

1969년 1월 16일생. 1994년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(학사). 1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1996년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정.

주관심 분야는 보행로봇 제어, 이동로봇 제어 및 퍼지제어 등임



李 然 定(正會員)

1961년 9월 10일생. 1984년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업(학사). 1986년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 2월 동대학원 졸업(박사), 1986년 3월 ~ 1989년 8월 한국기계연구원 자동제어실 연구원. 1994년 3월 ~ 1995년 2월 한국과학기술원 정보전자연구소 연수연구원. 1995년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 전임강사. 주관심분야는 퍼지제어, 학습제어 및 보행로봇 제어 등임

어실 연구원. 1994년 3월 ~ 1995년 2월 한국과학기술원 정보전자연구소 연수연구원. 1995년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 전임강사. 주관심분야는 퍼지제어, 학습제어 및 보행로봇 제어 등임

李 承 夏(正會員) 第 33卷 B編 第 3號 參照



洪 藝 善(正會員)

1955년 4월 2일생. 1978년 2월 한국항공대학교 항공기계과 졸업(학사). 1980년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1986년 12월 독일 Aachen공대 기계공학부 졸업(박사). 1982년 3월 ~ 1987년 2월 Aachen공대 유공압제어 연구소 연구원. 1987년 2월 ~ 1993년 2월 한국과학기술연구원 기전연구부 선임연구원. 1993년 3월 ~ 현재 한국과학기술연구원 기전연구부 책임연구원. 주관심분야는 유공압제어를 응용한 보행 로봇 및 로봇트 손 개발

Aachen공대 유공압제어 연구소 연구원. 1987년 2월 ~ 1993년 2월 한국과학기술연구원 기전연구부 선임연구원. 1993년 3월 ~ 현재 한국과학기술연구원 기전연구부 책임연구원. 주관심분야는 유공압제어를 응용한 보행 로봇 및 로봇트 손 개발

下 増 男(正會員) 第 30卷 B編 第 10號 參照