

## 유연한 보행 형태를 갖는 이족보행로봇의 걸음새 구현

노경곤\*, 공정식\*, 김진걸\*, 김기식\*\*

### Gait Implementation of a Biped Robot with Smooth Walking Pattern

Kyung-Gon Noh\*, Jung-Shik Kong\*, Jin-Geol Kim\*, Kisik Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents the new gait implementation of a biped robot with smooth walking using 3-dimensional continuous trunk motion and kick action of ankle joints. Trajectory generation of a trunk is performed not on a unit gait but on a whole walking interval. In applying kick action such as heel-touch or toe-off, varying coordinate system was employed for the simplification of the kinematic analysis. Desired ZMP (zero moment point) is also changed to implement the efficient kick action. As a result, balancing motion of the proposed gait was much more decreased than that of conventional one. Moreover, robot's walking behavior is very smooth, natural and similar to the pace of a human. The walking experiment system is composed of eight AC servo motors and a DSP controller. The walking simulation and the experimental results are shown using the proposed new walking algorithm.

**Key Words** : trunk motion(몸체 운동), kick action(킥 액션), ZMP(균형점), DSP controller(디에스피 제어기)

#### 1. 서론

최근, 로봇에 이동성을 부가하여 작업 반경을 스스로 확장 시킬 수 있는 이동 로봇에 관한 연구가 활발해지고 있다. 이는 로봇의 응용 분야를 산업용 로봇의 한계처럼 작업 공간을 더 이상 공장 과도 같은 곳에 국한시키지 않고 좀 더 다양한 일을 인간이 수행하기 힘든 극한 자연환경 뿐만 아니라 인간의 생활 환경과 유사한 곳에서 수행하기 위해서 이다.

이동형 로봇은 바퀴 구동형 로봇과 다리를 갖는 로봇으로 구별되고, 다리를 가진 로봇은 다리의 개수에 따라 도약형의 외발로봇, 인간과 유사한 이족보행로봇, 동물과 같은 구조의 사족보행로봇내지 육족보행로봇으로 다시 구별된다. 이 중에

서 이족보행로봇은 평탄한 지형뿐만 아니라 계단과 경사면 등에 대한 지형 적응 능력이 좋고 무엇보다도 인간과 유사한 외형으로 사람으로부터 거부감이 적기 때문에 30 여년 전부터 전세계적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 이족보행로봇은 보행을 위해 요구되어지는 자유도를 포함하여 고자유도 시스템으로 구성되어 있고 종속적 링크 구조로 인하여 시스템 해석과 안정도 제어가 어렵고 보행 중 균형 운동(balancing motion)을 정의하기 위한 수학적 모델이 없다는 난점이 한계성으로 지적되어 왔다. 이를 해결하기 위해 동적 보행 제어와 같은 자세 제어 기법, 힘 또는 토크 센서를 이용한 걸음새 제어, 선형화를 통한 상태공간 상에서의 제어, 보행 관절 외에 추가적인 관절을 추가하여 보행 중 균형점을 지지 다리의 발바닥 내

접수 2001년 10월 22일  
\* 인하대학교 자동화공학과  
\*\* 인하대학교 물리학과

부 영역에 머물도록 유도하여 걸음 안정도를 높이는 방법 등이 연구되어 왔다<sup>1-7)</sup>.

본 논문에서 고려한 이족보행로봇은 균형 관절(balancing joint)을 몸체부에 추가하여 목표 균형점과 다리부 궤적이 주어지면 균형 관절의 모멘트 보상 운동을 통해 보행 중 안정성을 확보한다<sup>8-9)</sup>. 이때 다리부 궤적 생성에 대해 미리 데이터 베이스화 한 기본 걸음새를 조합하여 걸음을 수행하는 기존의 방식<sup>10)</sup>은 보행 궤적 생성이 용이하고 간단하다는 장점이 있지만 보행이 수행될 지형 정보가 들어있지 않고, 목표 지점이 있는 지속 보행 시 기본 걸음새만을 이용하는 경우 목표지점까지 이르는데 어려움이 있다. 또한, 인간은 보행 시 발목부의 움직임을 통해 발 뒤꿈치를 먼저 지면에서 들거나 착지하는 방법을 통해 생기는 허리부의 충격을 완화시키는 특징을 반영하지 못했다.

본 논문에서는 단지 보행의 완료만을 목표로 하지 않고 인간과 유사한 보행을 수행할 수 있도록 발목관절에 킥 액션(kick action)을 구현하고, 지속 보행을 고려한 몸체부의 궤적 생성 걸음새를 제안하였으며, 본 연구실에서 자체 제작한 이족보행로봇을 가지고 실험을 통해 제안된 걸음새를 구현하고 새로운 걸음새에 대한 타당성을 검증하였다.

## 2. 이족 보행 로봇 시스템

본 논문에서 사용된 이족보행로봇은 기구학 및 운동 특성의 용이한 해석을 위해 시스템 좌표계를 지지각(support leg), 유각(swing leg), 균형 관절의 세 부분으로 나누고 각각에 대해 기준 좌표계를 두었다. Fig. 1은 이족보행로봇의 좌표계와 질량모형을 표현한 것이다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 전체 기준 좌표계는 균형 관절 기준 좌표계를 지면에 투영시킨 양 발 바닥 사이로 설정하여 로봇의 모든 움직임을 표시하도록 하였다. 다리부는 몸체 지지와 추진을 위한 지지각과 다음 보행 구현을 위해 이동하는 유각으로 나누어서 각각을 보폭의 조절 및 발부분의 높이 조절을 위해 필요한 최소 자유도인 3 자유도를 갖는 회전 관절로 구성하였다. 지지각은 발바닥 부분을 기준 좌표계로 설정하여 본 시스템의 전체 좌표계와 같은 평면상에 있게 하고, 유각의 기준 좌표계와 균형 관절의 기준 좌표계는 지

각의 말단 좌표계와 일치시켜 기구학적 연쇄가 일어나게 하였다.

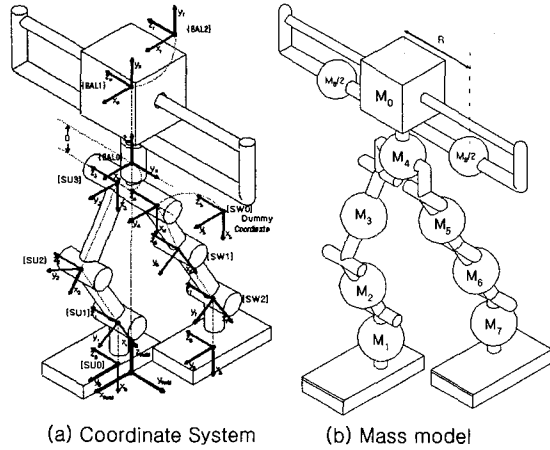


Fig. 1 Coordinate system and mass model of biped

지면에 고정되어 있지 않아서 생기는 이족보행로봇의 불안정성을 해소하기 위해 각 링크의 모멘트의 합이 '0'이 되는 ZMP 라 불리는 균형점을 유도하고, 이를 통해 안정성을 확보하였다. 균형점 공식(1)과 같이 표현된다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 (M_i(\ddot{z}_i + G_z)x_i - M_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i)}{\sum_{i=0}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 (M_i(\ddot{z}_i + G_z)y_i - M_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i)}{\sum_{i=0}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)}$$

여기서  $M_i$ 는  $i$  번째 질점의 질량을 나타내고,  $G_x, G_y, G_z$ 는 중력 가속도 벡터를 의미하며,  $x_{zmp}, y_{zmp}$ 는 균형점 좌표를 나타내며,  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 각 질점에서의 선가속도 성분을 나타낸다. 식 (1)로 부터 균형관절의 균형방정식 (2)를 유도하였다. 여기서  $M_0$ 는 균형추(balance weight)의 질량,  $x_0, y_0, z_0$ 는 기준 좌표계에 대한 균형추의 질량 중심 위치,  $x_{zmpD}, y_{zmpD}$ 는 기준 좌표계에 대한 목표 균형점의 위치, 그리고  $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0$ 는 기준 좌표계에 대한 균형추의 질량 중심 가속도를 나타낸다. 이차 미분방정식으로 표현되는 균형 방

정식을 이용하여 균형 관절의 움직임을 결정하고 균형점 검증 방정식으로 보행 안정도 여부를 판별한다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} x_0 &= -\frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{zmpD}}{z_0} - G_x + \alpha / M_0 z_0 \\ \ddot{y}_0 - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} y_0 &= -\frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{zmpD}}{z_0} - G_y + \beta / M_0 z_0 \\ \alpha &= \sum_{i=1}^8 (M_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i - M_i(\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{zmpD})) \\ \beta &= \sum_{i=1}^8 (M_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i - M_i(\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{zmpD})) \end{aligned} \quad (2)$$

### 3. 보행 알고리즘

#### 3.1 기존의 보행 알고리즘

이족보행로봇은 지지각과 유각의 궤적 계획 및 목표 균형점의 궤적을 입력하여 시스템 동역학을 수행하고 균형방정식을 통해 균형 관절의 움직임을 찾아내어 이를 움직임으로써 전체적으로 보행 안정성을 확보한다. 몸체부는 지지각의 좌표계에 의해 표현되므로 지지각의 궤적 계획은 몸체부의 움직임을 나타내고, 유각의 궤적 계획은 다음 보행을 위해 앞으로 전진함을 의미한다. 보행 과정은 보행을 위해 유각이 지면과 이탈하여 있는 한다리 지지상태와 몸체 추진 및 다음 보행을 위한 균형관절의 이동이 일어나는 두다리 지지상태로 나뉘게 된다. 보행하는 동안 이 두 가지 상태가 계속 바뀌고 균형 관절도 상 변환과 함께 좌우로 계속 움직인다. 몸체와 다리부의 궤적 계획의 경우 각 다리의 위치에 따른 미리 만들어진 단위 걸음새들을 조합하여 전 구간에 대한 보행 궤적을 만든다. 이 경우 궤적에 대한 데이터베이스화가 용이하고 단위 걸음새의 추가와 삭제가 용이하여 궤적 생성이 간편해지는 장점이 있다. 그러나, 위의 방법을 이용할 경우 지속 보행이 아닌 한 걸음만을 위한 걸음새들을 만들어 반복해 사용하기 때문에 각 걸음새별로 궤적 정보 및 동 특성 정보가 단절되며, 지형 정보에 대한 고려 및 목표 지점까지의 거리가 단위 걸음새의 보폭의 배수가 아닌 경우 단위 걸음새를 수정해야 하는 등 전 보행 구

간을 고려한 궤적 생성이 어려운 문제점이 있다.

또한, 이족보행로봇에 적용된 기존의 걸음새는 한다리 지지상태에서 다리부만 전진한 후 두다리 지지상태에서 몸체와 균형추를 이동시켜 상변환을 하거나<sup>[10]</sup> 한다리 지지상태에서 몸체와 다리부를 함께 전진한 후 두다리 지지상태에서 균형추만을 움직이도록 구현하였다<sup>[11]</sup>. 이 두 가지 걸음새는 모두 보행 중 몸체 정지 시간이 있게 되어 로봇의 보행이 불연속적으로 이루어져 몸체의 지속적인 추진을 구현할 수 없으며 균형 관절의 움직임 양도 많다. 따라서 전 구간 보행에서 시간에 따라 적절한 궤적으로 보행을 수행하도록 할 수 없으며 이로 인해 구동기의 성능을 효율적으로 이용할 수 없다.

#### 3.2 지속 보행 알고리즘

본 논문에서는 기존의 보행 알고리즘의 문제점들을 보완하기 위해서 단위 걸음새의 조합 이전에 먼저 전체 보행 구간이 고려된 궤적을 생성하여 보행 중 몸체가 지속적인 움직임을 갖도록 하는 지속 보행 알고리즘을 제안하였다.

궤적 계획은 시간에 대한 경로 구간을 5 차 다항식을 이용하여 표현하였다. 이족보행로봇이 보행을 지지각과 유각이 지나가야 할 말단의 위치를 경유점이라고 하는데, 지지각의 경우 몸체가 보행 전 구간에 대해서 등속도로 움직이게 하기 위해서 경유점의 속도를 평균 속도로 하고 가속도를 '0'으로 하였다. 유각의 경우 경유점에서의 속도, 가속도 모두 '0'으로 하여 궤적 계획을 수행하였다. Fig. 2는 전 구간 지속 보행 시의 전진 방향에 대한 지지각과 유각 각 말단의 위치, 속도 및 가속도 그래프이다. 지지각의 경우는 절대좌표계이고, 유각의 경우는 지역좌표계이다.

Fig. 2에서 지지각의 말단 좌표는 보행 중에는 등속도를 유지하는 것을 알 수 있고, 유각의 경우 불연속적 궤적이 반복해서 나타나는데 이는 유각의 궤적 계획 시 전체 기준 좌표계가 아닌 다리부 부착 좌표계를 이용하였기 때문이다. 기존의 단위 걸음새의 경우 단위 걸음새의 시작과 끝에서 몸체의 속도, 가속도 값이 모두 '0'이지만 지속 보행 궤적을 사용할 경우 단위 걸음새가 끝나는 때 3초 위치에서도 몸체의 속도 및 가속도 값이 '0'이 아니기 때문에 보행이 멈추지 않고 지속 운동 효과를 갖는다.

지속보행 걸음새를 이용할 경우 두다리 지지 상태에서 몸체의 움직임이 가능하여 불필요한 몸체 정지 시간을 없애고 다음 보행을 위해 균형관절이 움직여야 할 양을 몸체가 나누어 움직이므로 전체적으로 균형 관절의 움직임이 감소하는 효과를 얻는다.

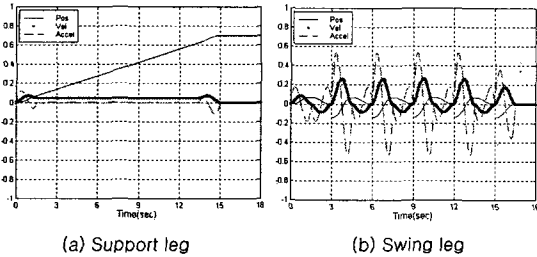


Fig. 2 Trajectory of a whole walking interval

기존의 걸음새는 2 초 보행 후 몸체가 정지한 뒤 상변환을 위해 1 초 동안 균형추만을 움직이는 형태를 가졌다. 그리고 기존 걸음새를 이용하여 지속 보행을 할 경우 단지 기존 걸음새의 형태를 반복하는 것으로 2 초 보행 후 1 초 정지하고, 다시 2 초 보행 후 1 초 정지를 반복했으며 이는 지속적인 몸체 추진을 구현할 수 없는 형태였다. 그러나, 새로운 걸음새에서는 1.5 초 동안 다리부와 몸체 추진을 함께 한 후 나머지 1.5 초 동안 지속적인 몸체 추진과 함께 균형추가 이동하게 하여 몸체 정지 시간을 없앴다. 이로부터 지속 보행의 경우 단위 걸음새에 대한 반복이 아닌 전 구간 보행에 대한 궤적 계획을 한 번에 할 수 있게 하여 각각의 위치에서 효율적인 궤적으로 보행이 수행된다. Fig. 3은 기존의 걸음새와 새로운 걸음새를 비교한 흐름도표이고, Fig. 4는 기존의 걸음새와 새로운 걸음새의 3 초 보행 중의 다리와 몸체의 위치 및 균형추의 위치를 위에서 바라본 모습으로 도식화한 것이다.

### 3.3 킥 액션 보행 알고리즘

킥 액션은 보행 시작 시 발생하는 발뒤꿈치의 지면 이탈 동작과 한 보행이 끝나는 시점에서의 발 앞부분의 지면 착지 동작 시에 발생하게 되므로 보행 중의 각각 발뒤꿈치와 발 앞부분의 위치를 기구학적으로 표현할 수 있어야 한다. 따라서 유각과 지면과의 위치에 따라 말단 좌표계를 변환

하여 궤적 계획과 기구학 해석을 달리 수행해야 한다. Fig. 5는 킥 액션을 이용한 보행 중 유각의 좌표계를 표시한 것이다.

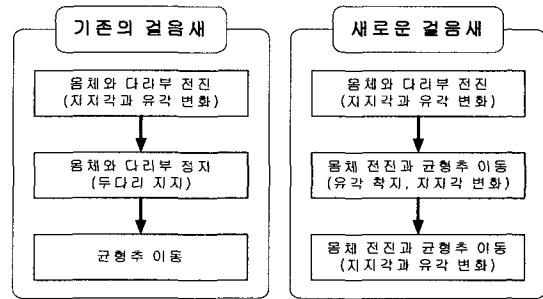


Fig. 3 Comparison flowchart

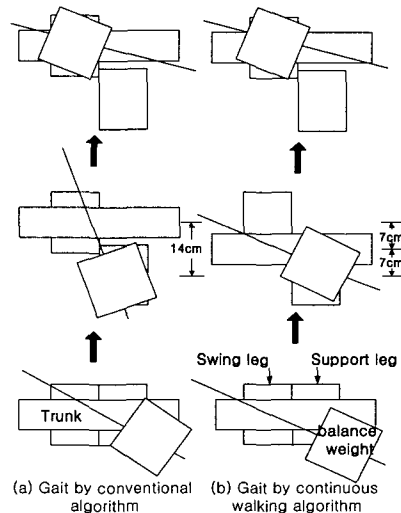


Fig. 4 Gait Comparison

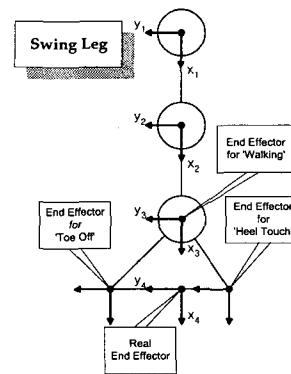


Fig. 5 Varying coordinate system of a swing leg

킥 액션을 이용한 보행의 궤적 계획은 보행 시작 시 발 뒤꿈치를 드는 과정, 중간 보행 과정, 보행 후 발 뒤꿈치를 지면에 붙이고 앞부분을 내리는 과정의 세 단계로 나눌 수 있다<sup>[12]</sup>. 본 논문에서 사용하는 새로운 걸음새의 보행 패턴은 킥 액션을 이용한 보행에 몸체 추진과 몸통의 높이 방향 움직임을 추가로 적용한 것이다. 보행 시작 전 두 다리 지지 상태에서 킥 액션이 일어나는 동안 몸체 추진이 일어나며 몸체가 위쪽으로 움직인다. 이후에 부드럽게 한다리 지지상태로 넘어가며 보행이 이루어진다. 보행 후 다시 두 다리 지지상태로 넘어가는 과정에서 킥 액션이 일어나며 몸체가 원래 높이 위치로 돌아오게 되고 다음 보행을 준비하게 된다. Fig. 6 은 이러한 과정을 도식화한 것이다.

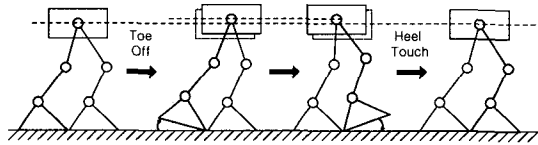


Fig. 6 Gait by kick action algorithm

위의 과정에서 킥 액션 수행 시 유각의 발 끝 부분이 지면에 닿아 있게 되어 기존의 알고리즘에 비해 안정영역이 보다 넓어지게 된다. 이로부터 보다 넓은 안정영역을 확보할 수 있고 균형관절의 위치 설정이 보다 유연해질 수 있다. Fig. 7 은 새로운 걸음새의 보행 패턴을 스틱 다이어그램으로 나타낸 것이다. 몸체의 높이 방향 운동과 함께 킥 액션이 구현된 것을 알 수 있다.

#### 4. 균형운동 모의실험

##### 4.1 균형 관절 해석

몸체의 지속 추진 보행과 높이 방향 몸통 운동 및 발목부의 킥 액션을 함께 하는 인간과 유사한 보행에 대해 모의실험 하였다. 새로운 걸음새는 단위 보행 시작 시 균형추가 원점에서 시작하여 킥 액션이 일어나는 동안 보행에 필요한 초기 위치로 옮겨지고, 보행 중 균형을 이루기 위해 균형관절의 동작 가능 범위 안을 움직이다가 단위 보행 종료 시 다시 원점으로 옮겨지도록 하는 보행 궤적 계획이다. 킥 액션이 일어나는 동안 몸체

이동이 일어나며 균형추가 움직이므로 균형추의 움직임을 최소화할 수 있고, 균형추의 움직임이 원점에서 출발하여 원점에서 끝나므로 다음 보행을 위한 상 변환 과정이 필요 없다.

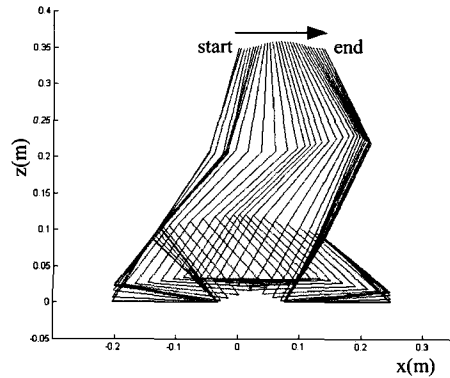


Fig. 7 Stick diagram of kick action algorithm

Fig. 8 은 기존 걸음새와 새로운 걸음새의 균형추의 움직임을 로봇의 위쪽에서 투영한 모습이다. 기존 걸음새에 비해 새로운 걸음새는 균형추의 움직임이 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다.

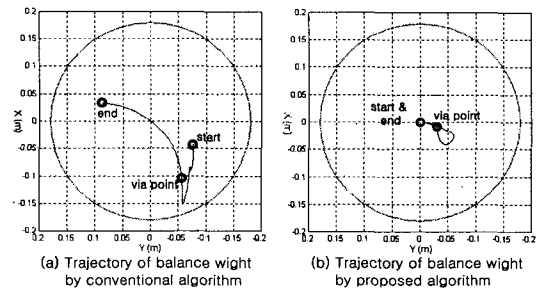


Fig. 8 Comparison of balance weight trajectory

##### 4.2 균형점 추종

목표 균형점과 다리부의 궤적 입력 후 균형관절의 움직임이 결정되면 보행이 이루어진다. 실제 균형점은 수치해석 오차 및 시스템 모델링 오차, 유한차분법을 이용한 이차미분방정식 형태의 균형 방정식을 풀 때 발생하는 미세한 오차 등으로 인해 목표 균형점을 완벽하게 추종하지는 못하지만 안정지지 영역 내에 있으므로 안전한 보행에는 전혀 지장이 없다. Fig. 9 는 보행 시의 균형

점 추종 궤적을 나타낸 것이다.

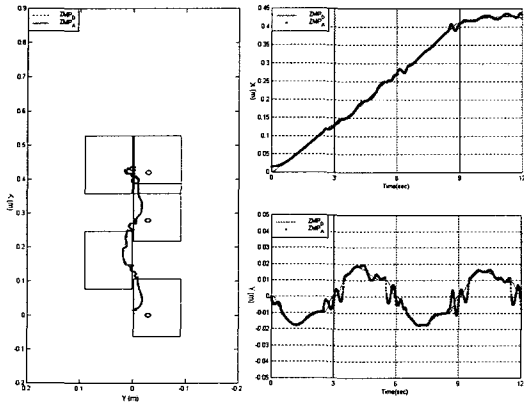


Fig. 9 ZMP trajectory by proposed algorithm

Fig. 9의 왼쪽 그림은 균형점 추종 궤적을 x-y 좌표계상에서 바라본 모습이고, 오른쪽은 시간에 따른 실제  $x_{zmp}$  와  $y_{zmp}$ 의 추종궤적을 각각 나타내고 있다.  $ZMP_D$ 는 목표 균형점을,  $ZMP_A$ 는 실제 균형점을 의미한다. 발바닥 내의 조그만 원은 지지각 기준 좌표계의 원점을 나타낸다. Fig. 9의 왼쪽 그림으로부터 한다리 지지 상태에서는 사각형 내부에 균형점이 존재하기 때문에 안정한 보행이라 할 수 있으며 균형점의 움직임이 보다 부드러워져서 지속보행에 적합하게 됨을 알 수 있다.

## 5. 보행 실험 및 결과

### 5.1 실험 시스템 구성

본 논문에 사용된 자체 제작된 이족보행로봇의 본체는 경량화를 고려하여 듀랄루민을 사용하였다. 감속기로는 발목 관절에 1/100, 기타 관절에 1/60의 감속 비율로 사용하였고, 무릎 관절에는 400W, 나머지 관절에는 200W의 구동기를 사용하여 총 47kg의 자중을 갖는다. 로봇 제어에 이용한 제어기로는 TI사에서 개발한 TMS320C31 마이크로프로세서가 내장되어 있고 8축 제어가 동시에 가능한 삼성전사에서 개발한 MMC(Multi-Motion Controller)를 사용하였다. Fig. 10은 이족보행로봇의 측면 외관을 보여주고 있다.

본 이족 보행로봇 시스템은 먼저 모의 실험기를 통해 주어진 궤적에 대해서 균형추가 균형점을

추종하는지의 여부를 판별하고 다음에 3차원 가상 보행을 구현하는 3D 그래픽 모의실험기를 이용하여 시각적인 확인을 거친 후 실제 실험에 들어간다. 구동기로 AC 서보 모터 8개가 장착되었고, IBM-PC의 ISA 버스 슬롯에 설치한 다축 제어기인 MMC를 통하여 PC에서 10ms마다 이족 보행로봇 구동에 필요한 펄스를 입력하면 다축 제어기는 1ms마다 각 서보 드라이브를 통하여 엔코더로부터 신호를 받아 서보 모터를 제어한다. Fig. 11은 실험 시스템의 구성도이다.

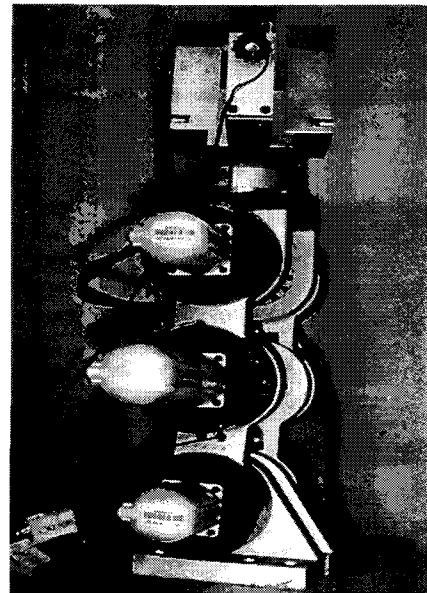


Fig.10 Photo of a biped robot

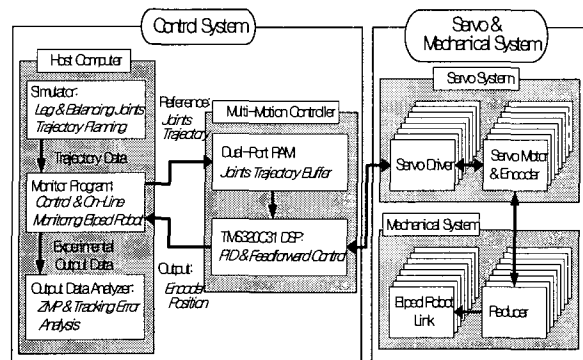


Fig. 11 Block diagram of a biped control system

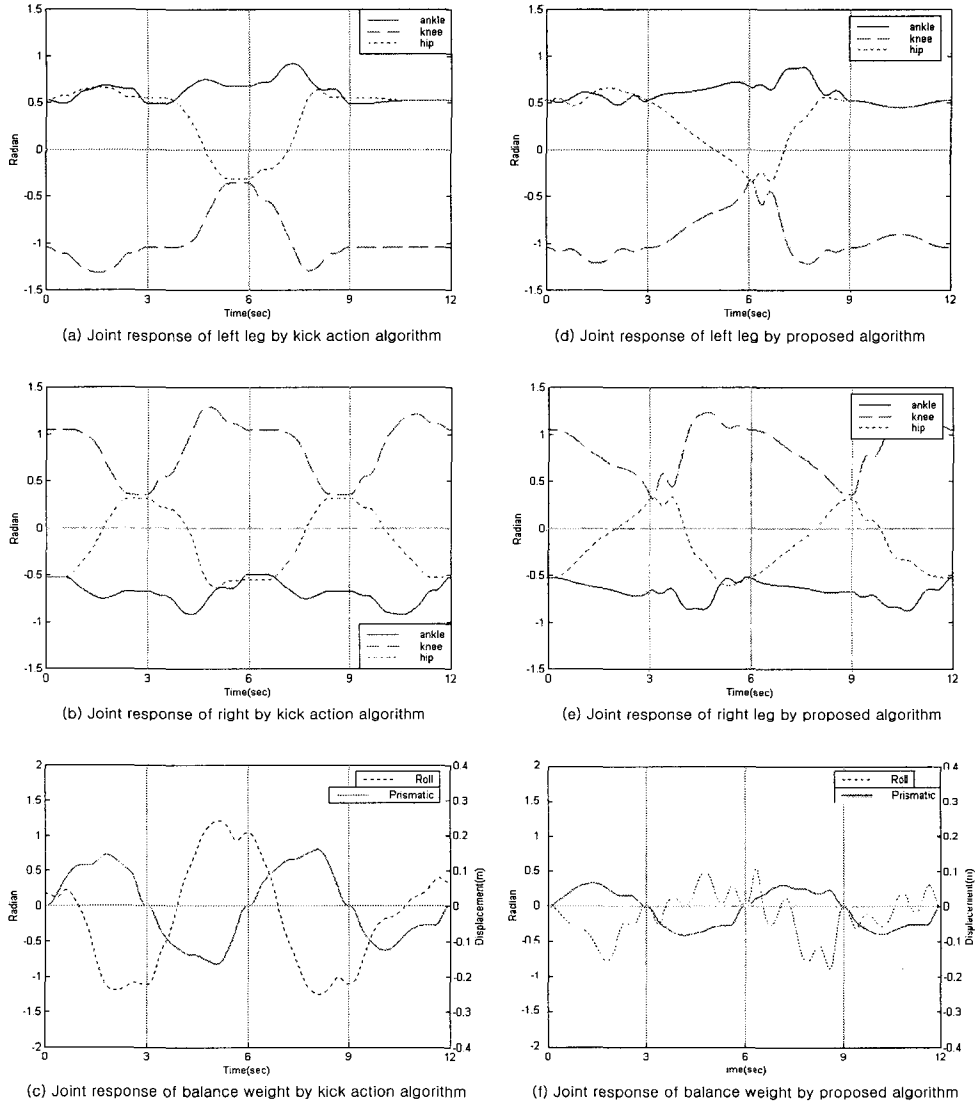


Fig. 12 Joints responses during 4 steps

### 5.2 실험결과

이족보행 실험은 제안된 보행으로 단위 걸음 당 3 초, 한 보폭 당 14 cm 로 4 걸음을 수행하였다. Fig. 12 는 구동기에 구현된 관절들의 실험 결과를 나타낸 것이다. 각 그래프는 차례대로 왼다리, 오른다리, 균형관절의 실험 결과값을 시간에 관하여 나타내고 있다. Fig. 12 의 (a), (b)와 (c)는 제안된 보행 알고리즘 중 킥 액션만 구현했을 시의 실험결과이고 (d), (e)와 (f)는 제안된 보행

알고리즘에 따른 킥 액션과 지속보행을 구현한 실험결과 값들을 시간에 대해 나타낸 것으로 킥 액션 보행만 수행한 보행과는 달리 주기적인 형태가 많이 줄어들었는데 이는 몸체의 높이 방향 운동과 지속 추진 운동이 킥 액션과 결합되어 보다 복잡한 관절 운동을 일으키게 되어 주기적인 성질이 감소되었기 때문이다. 지속보행과 킥 액션 시의 균형 관절 운동의 결합에 의하여 제안된 보행 알고리즘의 실험결과를 보면 기존 보행에 비해 직진

균형 관절의 움직임이 줄어드는 효과가 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론 및 고찰

본 논문에서는 기존방법에 비하여, 순항을 위한 지속보행 알고리즘을 보완하여 보다 인간과 유사한 보행 형태를 갖도록 하는 새로운 걸음새를 제안하였다. 몸체의 전 구간 지속 추진 및 몸체의 3 차원 운동 알고리즘과 킥 액션 구현 알고리즘 각각에 대해서 모의실험과 실제 보행 실험을 통해 균형 운동 및 균형점 추종을 통해 보행 안정성을 확인하였고 이를 통합한 걸음새를 구현하였다. 이를 위해 유각의 기구학 구조를 변경하여 유각의 보행 상태에 따른 가변 좌표계를 도입하여 킥 액션 구현을 용이하게 하였고, 킥 액션에 따른 균형 추의 운동과 균형점의 궤적도 재정의하여 상변환 시간 자체를 없애면서 지속 보행이 가능하도록 하였다. 따라서 기존 걸음새 구현 시 몸체 정지로 인해 나타났던 비연속적 걸음 형태가 몸체의 연속적인 움직임과 균형 관절의 주기적인 운동으로 보다 부드러워지고 자연스러운 보행을 수행할 수 있었다. 또한, 균형 관절의 회전으로 인해 발생하는 스핀 모멘트 값도 줄어들어 보행 방향에 대한 직진성을 확보할 수 있었다.

현재의 실험은 장애물이 없는 평탄한 평면 지형에서 구현되었는데 향후에는 계단 및 경사면 등에서도 유연한 보행이 가능할 수 있도록 다양한 적응성을 갖는 보행알고리즘이 개발되어야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2001 학년도 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음(2001-21998)

## 참고문헌

1. A.Takanishi, M.Ishida, Y.Yamazaki, I.Kato, "The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10RD," J. of the Robotics Society of Japan, Vol. 3, No. 4, pp. 325-336, 1985.
2. Furusho et al., "Sensor-Based Control of a Nine-link Biped," Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 2, pp. 83-98, 1990.
3. C.Leslie Golliday, Hooshang Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 6, pp. 963-972, 1977.
4. C.L.Shih et al., "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase," IEEE Robotics and Automation, pp. 1646-1652, 1990.
5. M.Vukobratovic and Stepanenko, "Mathematical Models of General Anthropomorphic Systems," Mathematical Bioscience 17, pp. 191-242, 1973.
6. Kenneth J.Waldron, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force," Advanced Robotics, pp. 299-310, 1989.
7. Atsuo Takanishi, "Robot Biped Walking Stabilized with Trunk Motion," Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics, Springer-Verlag, pp. 271-291, 1989.
8. J.Yamaguchi, A.Takanishi, I.Kato, "Development of a Biped Walking Robot Compensation for Three-Axis Moment by Trunk Motion," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp. 561-566, 1993.
9. Q.Li, A.Takanishi, I.Kato, "Learning Control for a Biped Walking Robot with a Trunk," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp. 1771-1777, 1993.
10. S.H. Lim and J.G. Kim, "Control of a Biped Walking Robot using Zero Moment Point Formulation," Trans. KIEE. Vol. 48A, No. 8, pp. 1022-1030, 1999.
11. J.T. Kim and J. G. Kim, "A Study on the Generation of Balancing Trajectory for Biped Robot using Genetic Algorithm," J. of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 5, No. 8, pp. 969-976, 1999.
12. M.Yamada, J.Furusho, "Dynamic Control of Walking Robot with Kick-action," 85'ICAR, pp. 405-412, 1985.