

Control of a Biped Walking Robot using ZMP Formulation

林先浩* · 金振傑**

(Sun-Ho Lim · Jin-Geol Kim)

Abstract - This paper is concerned with the balancing motion formulation and the control of ZMP (zero moment point) for a biped walking robot with balancing joints. The balancing equation of a biped robot can be modeled as the second order non-homogeneous differential equation, which makes it possible to plan the desired trajectories for various gaits or motions. Also, the balancing motion can be defined easily by solving the differential equation without pre-processing or heuristic procedures. The actual experiments are performed on biped walking robot system IWR-III, developed in our Automatic Control Lab. The system has the structure of three pitches in each leg, and one roll and one prismatic type in balancing joints. The walking simulations and the experimental results on IWR-III are shown using the proposed formula and control algorithm.

Key Words : biped walking robot, zero moment point, balancing joints

1. 서 론

지난 30년간 이족보행로봇에 대한 많은 연구가 수행되었으나 이족보행로봇의 많은 자유도와 종속적 링크구조로 인하여 안정도 제어와 해석에 있어서의 정의와 예측이 어렵고 보행 중 균형운동(balancing motion)을 정의하기 위한 수학적 모델이 없다는 단점이 한계성으로 지적되어 왔다. 기존의 연구에 사용된 모의실험 모델이나 구현된 이족보행로봇은 그 외형에 따라 두 가지로 나눌 수 있는데 대체로 하체의 다리부로부터 구성되어 있거나, 근래에 들어서 시스템의 안정도 보상을 위하여 상부에 균형관절을 갖는 형태이다[1-9]. 궁극적으로 이족보행로봇이 다양한 환경하에서 보행하기 위해서는 반드시 걸음주거나 보폭, 방향전환 등과 같은 걸음새를 변경할 수 있어야 한다. 그러나 하체의 다리부로부터 구성된 이족보행로봇은 그렇지 않은 이족보행로봇에 비하여 걸음새 변경 능력이 미미하거나 훨씬 복잡한 알고리즘을 필요로 하며, 보행전 균형점 궤적이나 균형운동을 검증 또는 결정하기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점들은, 다리를 몸체나 발의 궤적 추종과 균형운동 조건 충족을 위한 운동으로 동시에 사용하는 데에서 기인하며, 운동방정식에서 서로 간섭된 고차의 비선형을 형성하게 되는데 이러한 비선형 항은 근대 제어이론의 적용이나 전체 시스템의 안정도 검증에 난점으로 작용한다.

또한, 발견적인(heuristic) 방법을 사용하지 않고 임의의 유각(swing leg)의 운동에 대한 지지각(supporting leg)의 균형운동 및 몸체추진의 혼합된 운동을 시스템이 결정하도록 알고리즘화하기가 대단히 어려운 단점이 있어, 이족 보행을 구현한 기존의 연구들은 시행착오적 방법이나 발견적 방법을 통한 정교한 궤적 계획을 이용하였다[10-11]. 1990년대 후반의 근래 연구들은 전형적으로 역동역학 연산에 의한 토크제어를 기본으로 하거나[12] 신경회로망 알고리즘을 이용하여 걸음새를 구현하였다[13]. 이외에도 외란 관측기, 2자유도 제어기, H_{∞} 제어기 등을 이용하여 강인한 제어를 구현하거나[14-16] 모의실험을 수행하여 기존의 연구가 갖고 있는 제약을 극복하고자 하였다. 그러나, 수학적 모델의 부재로 인하여 다양한 걸음새를 구현하기에는 매우 제한적이었다. 이러한 기존 연구들의 한계점을 극복하고, 보다 다양한 걸음새를 안정되게 구현하고 적절한 제어방법의 모색을 위해서는 이족보행로봇의 안정도가 포함된 수학적 모델이 요구된다.

이족보행로봇의 해석 및 구현을 위한 수학적 모델은 실질적인 응용을 고려하여 모델을 간략화할 수 있도록 시스템의 선형화가 용이하여야 하며 다양한 걸음새에 대응할 수 있는 유연성을 갖도록 이족보행로봇을 설계하여야 한다. 본 논문에서는 시스템의 안정도를 검증 및 보장하고 에너지 방정식이나 상태공간 방정식의 형태로 변환할 수 있는 선형 2계 비제차 미분방정식 형태의 이족보행로봇의 수학적 모델을 제시하였다. 이 모델은 질량, 거리, 가속도와 같은 이족보행로봇의 동적, 물적 특성 등으로부터 유도된 것으로 균형점의 검증, 다양한 걸음새나 운동에 대한 균형 추 운동의 정의, 에너지 최적화, 그리고 이족보행로봇의 안정도 제어 모델로

* 準 會 員 : 仁 荷 大 自 動 化 工 學 科 · 工 博

** 正 會 員 : 仁 荷 大 自 動 化 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999年 2月 11日

最 終 完 了 : 1999年 7月 13日

사용될 수 있으며 각각의 목적에 부합하는 형태로 변형될 수 있다. 따라서 이족보행로봇의 정형화된 수학적 모델의 부재로 인하여 기존의 연구가 극복하지 못한 다양한 걸음새의 구현, 지속보행 수행 알고리즘의 정형화 등을 실험을 통하여 검증하고 유도된 수학적 모델의 변형을 통하여 에너지 최적화나 제어 모델로 전용될 수 있다는 가능성과 그것의 기본적 수식 형태를 제시하였다. 즉, 유도된 수학적 모델을 이용하여 기존의 이족보행로봇의 단점으로 지적되어온 다양한 걸음새 구현의 난점을 정형화된 알고리즘을 이용하여 손쉽게 구현할 수 있으면서 이러한 알고리즘에 의하여 구현된 이족 보행의 안정도를 본 제어연구실에서 개발한 이족보행로봇 IWR-III를 가지고 실제 실험을 통하여 검증하였으며, 이를 바탕으로 지속적인 보행을 하도록 구현하였다.

2. 이족보행로봇의 수학적 모델

기준 좌표계에 대하여 각각의 벡터를 그림 1과 같이 정의하면 D'Alembert 원리에 의하여 임의의 점 P의 운동은 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

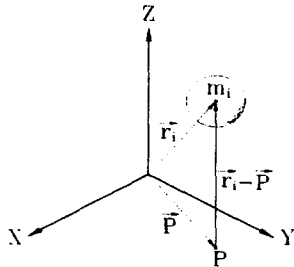


그림 1 기준 좌표계에 대한 벡터량 표시
Fig. 1 Vector representation w.r.t reference coordinate system

$$\sum_{i=0}^n m_i (\vec{r}_i - \vec{P}) \times (\vec{r}_i + \vec{G}) + \vec{M}_T = 0 \quad (1)$$

여기서, m_i 는 물체 i 의 질량, \vec{r}_i 는 물체 i 의 질량 중심의 위치벡터, \vec{P} 는 X-Y평면 위의 임의의 점 P의 위치벡터, \vec{G} 는 중력가속도, 그리고 \vec{M}_T 는 점 P에서의 전체 모멘트를 나타낸다. 그림 2에 표현된 IWR-III의 질량 모델을 식(1)에 적용하고 평면 위로 투영된 점 P를 균형점으로 정의하면 다음의 식(2), (3), (4)로 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)(x_i - x_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)z_i = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)(y_i - y_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)z_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)(y_i - y_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)(x_i - x_{zmp}) + m_0 R^2 \ddot{\theta}_z = M_T \quad (4)$$

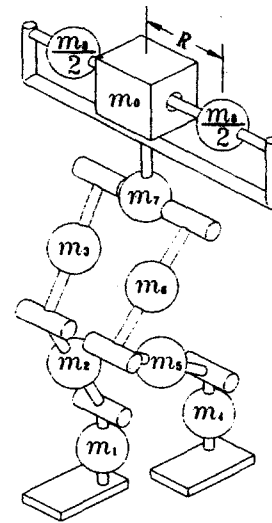


그림 2 IWR-III의 질량 모델
Fig. 2 Mass model of IWR-III

여기서, m_i 는 i 번째 링크의 질량, x_i, y_i, z_i 는 기준 좌표계에 대한 i 번째 링크 질량 중심의 위치, $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 기준 좌표계에 대한 i 번째 링크 질량 중심의 가속도, x_{zmp}, y_{zmp} 는 기준 좌표계에 대한 균형점의 위치, g_x, g_y, g_z 는 기준 좌표계에 대한 중력가속도, 그리고 $\ddot{\theta}_z$ 는 지지평면과 평행한 균형관절들의 각가속도이다.

식(2)와 (3)은 이족보행로봇의 안정도에 있어서 절대적인 균형점의 지지평면 위의 2차원 성분을 포함하고 있으므로 이족 보행시의 안정도 해석 및 균형 추의 운동을 정의하는데 사용할 수 있으며, 2차원 평면상의 운동은 두 개의 기본인자에 대한 성분 외에 회전에 관한 성분도 가질 수 있다. 이족 보행에 있어서 지지평면 상에 나타나는 이와 같은 회전 운동성분은 발바닥과 지지평면 사이의 스핀 모멘트로 나타나며 식(4)는 이를 표현한 것이다. 이 스핀 모멘트의 양이 발바닥과 지지면 사이의 마찰보다 클 경우 보행 방향을 간섭하게 되며, 이의 보상을 위해서는 지지평면과 평행하게 보상 회전 운동을 할 수 있는 자유도를 필요로 한다. 그러나 본 논문에서는 이족 보행에 필수적인 자유도만을 고려하였으므로 스핀 모멘트의 보상을 위한 균형관절의 자유도는 배제하였으며 정상적인 보행 수행에 영향을 미칠 수 있는 지에 대한 평가조건으로 식(4)를 사용하였다. 식(2)와 (3)은 균형점 검증방정식인 식(5)로 표현된다[10].

$$\begin{aligned} x_{zmp} &= \left(\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)x_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)z_i \right) / \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) \\ y_{zmp} &= \left(\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)y_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)z_i \right) / \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) \end{aligned} \quad (5)$$

또한, 식(2)와 (3)에서 균형질량(balancing mass) m_0 를 포함하고 있는 항을 분리하고 보행 궤적 계획 이후 미지수

로 남아있는 항과 결정된 값을 각각 정리하면 2계 비제차 미분방정식의 현대인 균형방정식 식(6)의 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 - \frac{(\ddot{z}_0 + g_z)}{z_0} x_0 &= - \frac{(\ddot{z}_0 + g_z)x_{zmpD}}{z_0} - g_x \\ &+ \left(\frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{x}_i + g_x)z_i - \sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + g_z)(x_i - x_{zmpD})}{m_0 z_0} \right) \\ \ddot{y}_0 - \frac{(\ddot{z}_0 + g_z)}{z_0} y_0 &= - \frac{(\ddot{z}_0 + g_z)y_{zmpD}}{z_0} - g_y \\ &+ \left(\frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{y}_i + g_y)z_i - \sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + g_z)(y_i - y_{zmpD})}{m_0 z_0} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, m_0 는 균형질량, x_0, y_0, z_0 는 기준 좌표계에 대한 균형질량의 질량중심 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 균형질량의 질량중심 가속도를 나타낸다.

식(6)의 해는 다리부가 입을 갖고 움직일 때 균형질량 질량 중심의 궤적을 나타낸다. 즉, 다리부가 입의 궤적을 따라 움직일 경우에 필요한 균형관절의 보상 운동을 정의할 수 있는 이족보행로봇의 수학적 모델이다. 식(6)의 우변은 입력된 다리부의 궤적과 운동특성에 의하여 기 결정된 값들로 이루어져 있으나 좌변의 두 번째 항들은 균형관절의 형태에 따라 기 결정 상수와 미지수의 곱의 형태 또는 두 미지수의 곱의 형태로 간주될 수 있으며, 이는 식(6)이 선형 또는 비선형 수식으로 정의되는 기준으로 작용한다. 그런데, IWR-III는 원통형 균형관절을 갖고 있어서 이 경우 균형관절 자체가 z방향운동을 유발할 수 없도록 구성되었으므로 균형운동 시에 발생하는 z방향운동은 다리부의 운동에 의한 성분뿐이다. 따라서, 유각과 지지각의 궤적이 계획된 이후에는 z_0 와 \ddot{z}_0 는 기 결정된 값이며, 식(6)의 좌변 두 번째 항들은 기 결정 값과 미지수 x_0 또는 y_0 의 곱 형태로 간주할 수 있다. 또한, 지지각의 궤적 계획시 지지각 양단의 z방향 운동변화가 없도록 즉, 몸체가 지지평면과 평행한 평면 위를 움직이도록 할 경우 식(6)의 좌변 두 번째 항들은 상수와 미지수의 곱 형태로 고려할 수 있다. 즉, 식(6)을 간략화하면 $\beta(t) + a\beta(t) = b(t)$ 형태로서 진자의 수학적 모델과 유사하다. 그러나, 진자의 경우는 좌변의 a가 1이고 우변이 영(零)인 2계 제차 선형 미분방정식의 형태임에 비하여, 유도된 수학적 모델은 a가 걸음새에 따라 변화 가능한 입의 상수이며 우변은 이족보행로봇의 상태에 따라 입의 상수 혹은 함수 형태를 갖는 차이가 있다. 여기서, a는 전술한 바와 같이 균형 추의 기준 좌표계에 대한 z방향 운동이 없는 경우는 $a = -g_z/z_0$ 인 상수이다. 그러나 기준 좌표계에 대한 z방향 운동이 등속도 운동이거나 등가속도 운동인 경우는 a의 분자는 상수이지만 분모인 z_0 는 운동궤적에 따라 변화한다. 여기서 a를 $a = -(\ddot{z}_0 + g_z)/z_0$ 인 상수로 취급하기 위하여 하나의 가정을 도입한다. 즉, 지지각의 기준 좌표계에 대한 z방향 운동이 가속도 변화량을 갖더라도 기준 좌표계에 대한 균형추의 z방향 위치궤적계획이 2차 함수로 근사가 가능할 정도로 충분히 부드럽고 급격한 변화가 없다고 가정하면, 충분히 짧은 시간에 대하여 상수로 가정할 수 있다. 한편, b(t)의 경우는 보행시 각 링크들이 등속 운동을 하거나

가속도가 중력가속도에 비하여 무시할 수 있는 정도의 양인 경우라 하더라도 다리부가 입의 궤적을 추종하며 다 자유투도가 연계되어 움직이므로 b(t)를 상수로 간주하기 어렵다. 따라서 보편 타당한 보행을 수행하기 위해서는 수치해석 기법이 필수적이며 이를 이용하여 제안된 수학적 모델의 해를 직접적으로 얻을 수 있다. 본 논문에서는 제안된 수학적 모델을 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 해를 구하도록 하였다. 이와 같이 수치해석 기법을 이용하여 해를 구할 경우 반복적인 방법을 사용하지 않고도 비교적 정확한 해를 얻을 수 있으며 간략화한 식의 좌변 a에 대해서도 어느 정도 유연성을 가질 수 있는 장점이 있다. 그러나 a가 변화할 경우 이중(異種) 함수의 접목시 연속성에 대한 보장의 미비로 미분 불연속한 해를 얻을 수 있으므로 이의 보완이나 a의 변화량을 제한하는 알고리즘을 필요로 한다. 또한, 유한차분법을 이용하여 해를 구하기 위해서는 경계치를 필요로 하며 주어진 경계치에 따라 해의 특성이 매우 민감하므로 최적의 경계치에 대한 해석이 필수적이다.

3. 궤적 계획

IWR-III의 경우는 이족 보행을 구현하기 위하여 유각과 지지각의 궤적을 필요로 하며 균형관절의 궤적은 유각과 지지각의 운동 특성, 그리고 목표 균형점을 구속 조건으로 하여 전술한 수학적 모델을 이용하여 자동적으로 결정되도록 구현되었다. 이 경우 균형점의 구속 조건은 입의 위치에 고정된 한 점이나 시간에 따라 변화하는 궤적형태를 이용하여 표현할 수 있다. 실제 주기적으로 보행형태가 반복되는 평지 직선보행과 같은 경우는 지지각이 바뀌는 상(phase) 변환 시간을 줄일 수 있어 궤적형태의 균형점 형태가 보행 시간을 단축시키는 장점이 있다.

궤적 계획은 주어진 경유점에 대하여 역기구학을 수행하여 도출한 관절변수 값을 이용하여 관절공간에서 궤적을 계획하는 방법과 주어진 경유점을 이용하여 직교공간에서 궤적 계획을 수행한 후 각각의 궤적에 대하여 역기구학을 수행하는 방법의 두 가지로 대별된다. 전자의 경우는 역기구학과 궤적계획 함수의 사용빈도가 상대적으로 낮아 비교적 열악한 연산 자원하에서도 수행할 수 있는 장점이 있으나 경유점과 경유점 사이에서의 직교공간 궤적에 대한 예측이 어려워 장애물의 회피 등과 같은 경우에 취약한 단점이 있다. 특히 이족보행로봇의 경우는 지면이라는 상존하는 장애물이 있어 주의를 요한다. 후자의 경우는 역기구학적 연산량이 많고 궤적 계획 함수의 차수가 낮을 경우 관절공간에서 미분불연속의 함수로 표현될 수 있으며 특이해와 작업 영역에 대한 예측이 필요한 단점이 있다. 그러나 로봇의 모델이 고정된 경우에는 해석적인 방법으로 역기구학을 수행할 수 있어 연산량을 상당히 줄일 수 있으며, 고차함수를 이용하여 궤적계획을 수행하고, 기구적으로 공동(cavity)이 없는 작업영역을 구현하고, 상존하는 특이해를 회피할 수 있는 알고리즘을 첨가하여 단점을 극복할 수 있다. 이 경우는 장애물 회피 등에 필요한 궤적을 상호 작용적으로 생성할 수 있는 장점을 살릴 수 있다. 본 논문에서의 모든 궤적 계획은 5차 다항식을 이용하여 직교공간을 배경으로 이루어지도록 설계되었다. 궤적계획에 있어서 시작점과 목표점이 주어

지면 초기 속도, 가속도, 그리고 목표점에서의 속도, 가속도 등의 6개의 구속조건을 가지므로 6개의 미지수가 있는 5차 다항식 형태를 갖는다. 이 때, 가속도 함수가 3차 함수로 표현되기 때문에 충격량(jerk)을 갖지 않는다. 이족보행로봇의 경우 전술한 바와 같이 수학적으로 댐핑 효과를 갖는 항이 없고, 지지면과 마찰력 이외의 고정력을 갖지 못하므로 운동의 충격량을 최소화하는 것이 다른 어떤 로봇 시스템의 경우보다 중요하다.

3.1 유각의 궤적 계획

이족보행로봇 IWR-III의 다리는 이족 보행에 필요한 최소한의 자유도인 3자유도를 갖고 있다. 3개의 관절은 모두 피치관절로 이루어져 있으므로 유각의 경우에는 평면 3절 링크로 간주하여 비교적 간단히 기구학적 해석을 할 수 있으나 보행 지면에 대한 고려가 필요하다. 유각의 입장에서 보행지면은 충돌이 상존하는 거대한 장애물이며, 이는 위치 궤적 뿐만 아니라 발목의 방향 궤적에서도 동일하다. 이족 보행의 경우 유각은 지면과의 충돌을 피하기 위하여 통상 3개 내지 4개의 경유점을 가지며 이들 경유점을 연결한 특성 다각형(characteristic polygon)의 형상에 따라 지면과의 충돌 가능 확률에 차이가 있다.

실제 경로 추종 궤적은 경유점에서의 속도, 가속도 성분이 영(零)일 경우인 특성 다각형 경로를 기준으로 속도 또는 가속도의 성분이 양수일 경우에는 특성 다각형의 외부로, 속도 또는 가속도의 성분이 음수일 경우에는 특성다각형의 내부로 이탈한다. 이 점에 착안하여 궤적 계획기는 경유점으로 이루어진 특성 다각형을 항상 볼록(convex)한 형상으로 가정하고, 중간 경유점에서의 속도 성분은 이전 경유점과 연결한 직선의 궤적계획 기준 좌표계 평면에 대한 기울기로, 가속도는 영으로 설정하도록 하였다. 이 경우 실제 추종 궤적은 항상 특성 다각형의 외부에 존재하므로 지면이나 장애물과의 충돌을 방지할 수 있다.

3.2 지지각의 궤적 계획

지지각의 궤적 계획에 있어서 고려해야 할 것은 보행이 한 걸음새에 끝나지 않고 지속보행을 행할 경우에 대한 것이다. 이족보행로봇의 경우 한 보폭으로 이동이 완료되는 경우는 대단히 드물며 대부분의 경우가 동일한 걸음새가 반복되는 주기적 보행이거나 걸음새가 변화하더라도 복수개의 보폭을 갖는 경우가 대부분이다. 이러한 경우에는 궤적 계획시 중간 경유점에 대하여 고려하였던 것과 동일한 문제가 발생할 수 있다. 즉, 지지각 경로의 n 번째 보폭의 마지막 경유점과 $n+1$ 번째 보폭의 첫번째 경유점에서 속도 및 가속도가 영이 아닌 경우 미분 연속성에 대한 문제가 제기된다. 수학적으로 궤적 계획 함수가 동일하더라도 n 번째 보폭에 대한 궤적 계획 함수와 $n+1$ 번째 궤적 계획 함수가 접합되므로 그림 3에 표현된 바와 같이 함수의 종류에 따라 미분불연속점이 생길 가능성이 높다. 따라서 이중 함수의 접목점에서 상존하는 미분불연속성을 고려하여야 한다.

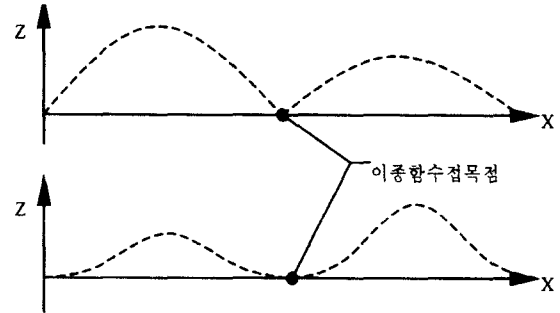


그림 3 함수별 이중 함수 접목의 예
Fig. 3 Example of different functions connection

그림 3을 살펴보면 수평축에 평행한 미분 기울기를 시작과 끝에 갖는 함수의 경우는 접목점에서도 미분 연속임을 알 수 있다. 여기서 주의해야 할 것은 수평축에 평행한 미분 기울기가 속도나 가속도가 영임을 의미하지는 않는다. 왜냐하면, 고려하고 있는 이중 함수는 시간에 대한 함수이기는 하지만 3차원 공간상을 지나는 3차원 궤적함수에 대한 것이므로 수평축도 시간차원이 아닌 위치차원 값을 갖고 있기 때문이다. 실제로 고려한 보행 기준 좌표계의 수평축은 진행방향의 위치를 표현하고 있다. 따라서 그림 3으로부터 지속보행을 위한 이중 함수의 접목시 미분 연속성을 보장하기 위해서는 보행의 진행방향과 수직인 높이방향 위치의 성분변화가 단위 궤적의 양단에서 없어야 함을 알 수 있다. 이는 수학적으로 미분 연속이므로 물리적으로 충격량이 없어 안정적이다.

본 논문에서는 지지평면과 평행한 직선을 몸체 추진 궤적으로 계획하도록 하였다. 이렇게 할 경우 지속보행에 대하여 몸체추진의 미분 불연속성을 제거할 수 있어 보행속도 상승을 도모할 수 있으며 수학적 모델의 선형성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

3.3 균형점의 궤적 계획

이족보행로봇의 수학적 모델을 사용하기 위한 입력 중의 하나인 목표 균형점의 위치는 지지면적 상의 임의의 한 점으로 주어지거나 시간에 따른 궤적으로 주어질 수 있다. 균형점이 한 점에 고정되어 있을 경우에는 궤적계획에 필요한 연산량을 줄일 수 있는 장점이 있으며 특히, 기준 좌표계의 원점으로 고정될 경우에는 수학적 모델 형태가 단순화된다. 그러나 지속보행의 경우에는 균형점이 한 보폭에 대하여 고정되어 있을 경우 그림 4의 (a)와 같이 상 변환시 균형점을 상대적으로 먼 거리를 이동시켜야 하므로 더 많은 시간을 필요로 한다. 그림 4의 (b)의 경우 한 보폭의 이동 중에 균형점을 다음 보폭을 위한 위치로 옮겨 놓을 경우에는 상 변환에 필요한 소요시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 균형점을 한 보폭 동안에 고정시키지 않고 다음 보폭을 위하여 상 변환이 용이한 부분까지 균형점이 이동하도록 균형점을 궤적 계획하였으며, 궤적 계획 함수는 역시 5차 다항식을 이용하였다.

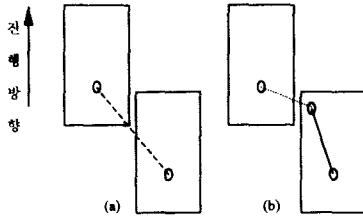


그림 4 균형점 궤적계획의 예
Fig. 4 Example of ZMP trajectory planning

4. 지속보행을 위한 균형 운동

이족보행로봇이 지속보행을 수행하기 위하여 두 부분에 대하여 미분 연속성에 대한 점을 고려해야 한다. 첫번째는 몸체 추진 궤적에 대한 것이다. 그러나 이 경우는 상 변환에 소요되는 시간동안 몸체 추진을 정지시키거나 미분 연속성을 보장하는 궤적을 수행할 수 있으므로 상대적으로 여유가 있다. 두 번째는 균형운동의 각 보폭별 연속성에 관한 것이다. 이 경우는 첫번째 경우와는 달리 한 보폭 주기동안 보행을 안정화시키기 위한 균형운동과 상 변환 시의 균형운동, 그리고 다음 보폭을 위한 안정화 운동이 연속적으로 일어나야 하므로 균형추의 운동이 순간 정지할 수 있는 여유가 없으며 균형추 운동의 미분 연속성이 확보되지 않을 경우 충격량 등이 작용하여 보행의 안정도에 치명적이다.

그림 5는 한 보폭에 대한 보행 해석을 기준으로 위치차원의 연속성만을 고려하여, 한 보폭이 이동하는 시간은 2초, 상 변환 시간은 1초로 보행의 한 주기는 3초인 때에 6보폭의 보행을 수행할 경우에 대한 두 개의 균형관절 운동을 모의 실험한 수정전의 균형관절의 가속도를 표현한 것이다.

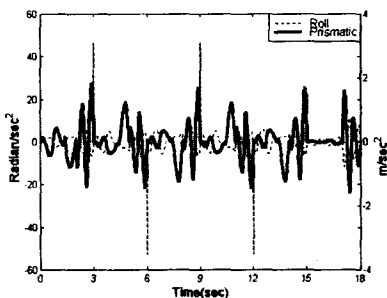


그림 5 위치 연속성을 고려한 균형관절 가속도
Fig. 5 Balancing joint accelerations for position continuity

이 경우 균형운동에 대하여 n번째 보행의 끝 위치를 n+1번째 보행의 시작위치로 하여 위치의 연속성을 확보한 것으로 보행의 한 주기인 매 3초마다 임펄스 형태의 가속도가 나타남을 알 수 있다. 이러한 형태의 가속도는 실제로 구현이 불가능한 수치이며 보행 주기마다 큰 충격량을 갖게 됨을 의미한다.

본 논문에서는 미분 연속성 확보를 위하여 균형운동 수정 알고리즘을 고려하였다. 그림 6은 상 변화시의 균형운동의 미분 불연속성을 제거하기 위하여 균형관절 값을 수정(fitting)시킨 것이다.

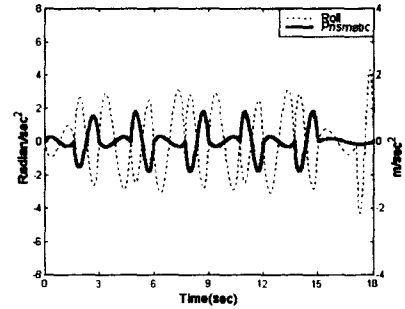
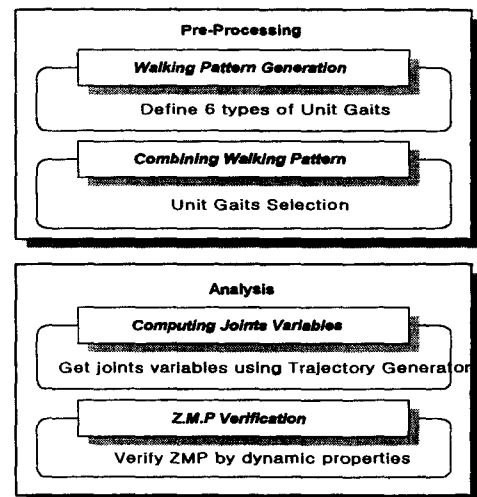


그림 6 구간 경계치를 고려, 수정한 균형관절 가속도
Fig. 6 Modified balancing joint accelerations with partial fitting

수정에 사용한 함수는 IWR-III의 궤적계획에 사용한 것과 동일한 5차 다항식을 사용하여 가속도가 2차 이상의 함수로 표현되도록 하였으며, 보간에 필요한 경유점으로는 지속보행의 시작과 끝에서 균형관절의 위치, 각 구간별 최고(저)치, 그리고 매 주기마다의 경계치를 구하여 대입하였다. 경유점에서의 속도는 영 또는 구간별 평균속도를 적용할 수 있도록 알고리즘화하였으며 여기서는 영을 사용하였고, 가속도는 모든 경유점에 대해 영을 대입한 경우에 대한 모의 실험한 것이다. 그 결과를 고찰하면 그림 6에서 볼 수 있듯이 가속도의 급격한 변화나 임펄스없이 완만하게 구현할 수 있다.

5. IWR-III의 지속보행 알고리즘

IWR-III는 단위 걸음새를 미리 생성한 후 이것들의 조합을 이용하여 지속보행을 수행하도록 이족보행 알고리즘을 구현하였다. 이를 위해서는 두 가지의 이족 보행 알고리즘을 필요로 한다. 하나는 지속보행의 기본이 되는 한 보폭의 걸음새에 대한 단위 걸음새 구현 알고리즘이고 다른 하나는 지속보행의 수행을 위한 단위 걸음새의 조합 알고리즘이다. IWR-III는 초기자세에서 보행을 시작하는 2개의 단위 걸음새와 보행 중의 2가지 단위 걸음새, 그리고 보행 종료 시의 2가지 걸음새 등 6개의 단위 걸음새를 갖고 있으며 이들의 조합으로 지속보행을 수행하도록 하였다. 그림 7은 IWR-III의 지속보행 알고리즘을 각 부분별로 간략히 표현한 것이다.



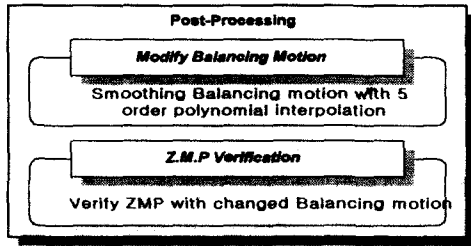


그림 7 IWR-III의 지속보행 알고리즘
Fig. 7 Steady walking algorithm for IWR-III

IWR-III는 전술한 바와 같이 단위 걸음새의 조합으로 지속보행을 수행한다. 이를 위하여 이미 생성된 단위 걸음새를 수정하거나 새로운 걸음새를 생성하여 조합하고 각 조합 과정에서 발생하는 이중 함수의 미분 연속성을 보장하기 위한 알고리즘이 필요하다. IWR-III의 지속보행 알고리즘은 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전처리 과정(pre-processing)으로 필요한 단위 걸음새를 생성하거나 수정하여 지속보행에 필요한 전체 구간에서의 보행 형태를 계획하는 부분으로 단위 걸음새 구현 알고리즘의 계획 계획 부분이 여기에 포함된다. 두 번째는 보행 해석 부분으로 생성된 걸음새를 이용하여 각 관절의 관절변수 값과 각 링크의 동특성을 연산하며 이를 이용하여 단위 걸음새별로 균형운동을 도출하고 균형점을 검증한다. 세 번째는 후처리 과정(post-processing)이라 할 수 있으며 생성된 단위 걸음새의 균형운동을 이용하여 전체 보행 구간에서의 균형운동을 생성한다. 이 과정에서 5차 다항식을 이용한 균형운동의 수정 작업이 이루어지며 전체 보행구간에 대한 균형운동의 주기적 해를 도출한다. 또한 도출한 수정된 균형운동에 대하여 보행 전체 구간에서의 균형점을 검증한다.

6. 실험기기의 구성

제안된 이족보행로봇의 수학모델에 대한 실험적 검증을 위하여 이족보행로봇 IWR-III시스템을 구성하였다. IWR-III는 본 자동제어 연구실에서 제작된 것으로 그림 8은 IWR-III의 보행 실험을 위한 제어 시스템을 나타낸 것이다.

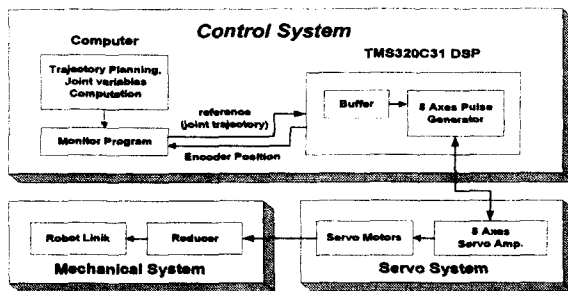


그림 8 IWR-III 시스템
Fig. 8 IWR-III system

시스템은 8자유도의 AC 서보들과 40개의 외부접점을 제어할 수 있도록 구성되었으며 제어부분은 PC의 ISA 버스 슬롯에 장착할 수 있는 다축 제어기와 각 축의 구동을 위한 AC 서보앰프로 이루어져 있고, 로봇 본체는 경량화를 위하

여 듀랄루민을 사용하였다. 그림 9는 IWR-III의 외관을 보여주고 있다.

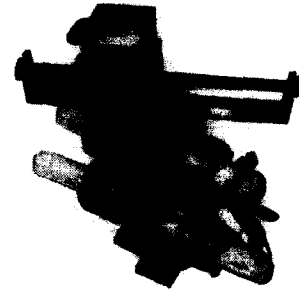


그림 9 이족보행로봇 IWR-III
Fig. 9 Biped walking robot IWR-III

IWR-III는 전술한 바와 같이 각 다리의 3자유도, 균형관절의 2자유도인 8개의 자유도로 구성되었으며, 구동기는 전축 AC서보를 장착하였다. 감속비는 다양한 걸음새의 구현에 있어서 필수적인 균형점 제어의 영역을 발바닥 전체의 영역으로 사용할 수 있도록 하고 보행속도의 상승을 위하여 타관절에 비하여 요구되는 구동속도는 낮으나 상대적으로 많은 양의 토크를 요구하는 발목관절에 1/100, 기타관절은 1/60의 감속비를 설정하고 상대적으로 큰 보폭의 경우를 위하여 무릎관절에는 400W, 다른 관절에는 200W의 구동기를 장착하였으며, 높이 68.42cm, 최대 폭 59.9cm, 최대 너비 17cm 그리고 자중은 약47kg으로 설계되었다. 다리부의 각 링크의 길이는 0.15m이며 균형반경은 최대 0.512m이다.

7. 모의실험 및 보행 실험 결과

IWR-III의 지속보행 실험은 한 보폭 수행시간이 2초, 상변환 시간 1초로 단위 걸음새 구현시간이 3초인 경우에 대하여 6보폭을 수행하도록 실험하였다.

7.1 지속보행 모의실험

몸체추진계획은 높이 방향 운동 성분이 없도록 직선 형태로 계획하여 수학모델의 선형성과 이중함수 점목에서의 미분 불연속성을 배제할 수 있도록 하였다. 다음의 그림 10은 실험에 사용된 왼다리와 오른다리의 각 관절계획을 표현한 것으로 단위 걸음새 3초마다 관절변수 값이 주기적으로 대칭되어 있다.

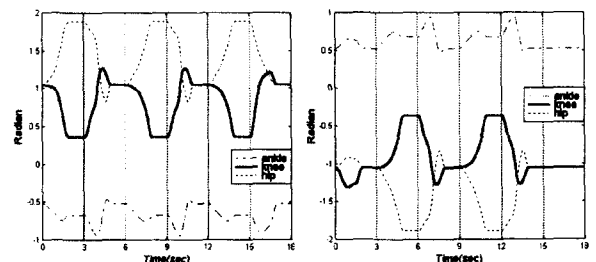


그림 10 각 다리관절 계획 모의실험
Fig. 10 Trajectory simulation of each leg joint

그림 11은 그림 10과 같이 주어진 유각과 지지각의 운동에 대하여 도출한 균형운동을 매 주기의 경계치, 최고치, 최저치를 이용하여 수정한 궤적을 표현한 것으로 균형회전관절과 균형직진관절이 모두 주기적으로 운동함을 알 수 있다.

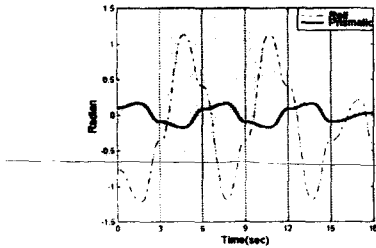


그림 11 균형관절의 궤적 모의실험
Fig. 11 Trajectory simulation of balancing joint

그림 12는 식(4)를 이용하여 지속보행을 수행하는 동안 각각의 지지각에 발생하는 스피ن 모멘트를 구한 것이다. 가는 선은 균형운동을 수정하기 전의 스피ن 모멘트를 표현한 것이고 굵은 선은 균형운동을 수정한 뒤의 스피ن 모멘트를 표현한 것이다. 균형운동 수정 전의 경우, 매 3초 구간을 전후로 스피ن 모멘트가 커지는데 이는 상변환을 위한 균형관절의 움직임에 기인하며 실제 보행 실험시 지면과 발바닥과의 마찰을 크게 하지 않았을 경우 보행중 몸체의 회전으로 인한 보행 방향의 변경이 일어나기도 했다. 보행 속도가 빨라질 경우 이 현상은 더 심화되는데 실제 보행 실험 이전에 스피ن 모멘트를 미리 계산함으로써 이의 예측이 어느 정도 가능하다. 그림 12에서 두 경우 모두 상대적으로 다리의 운동이 적은 보행의 시작과 끝에서 작은 양의 스피ن 모멘트를 갖게 되며 균형을 수정한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 상대적으로 작은 양의 스피ن 모멘트를 갖고 있어 보행이 안정적임을 알 수 있다.

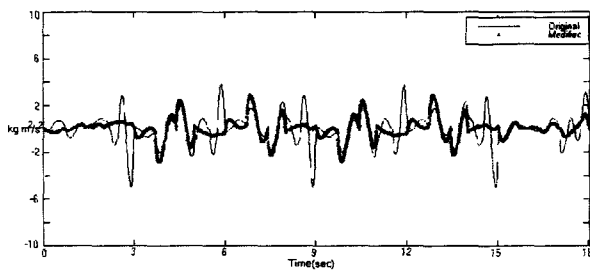


그림 12 지지각 발바닥에 작용하는 스피ن 모멘트
Fig. 12 Spin moment on supporting foot

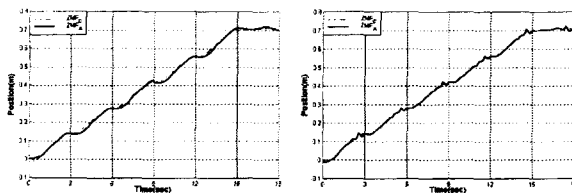


그림 13 진행방향의 균형점 추종
Fig. 13 ZMP tracking in sagittal direction

그림 13은 지속보행 중 균형점의 X방향(진행방향) 추종을 표현한 것이다. 좌측의 그림이 균형운동을 수정한 이후의 균형점 추종이고 우측그림이 수정 전의 균형점 추종이며, 가는 선은 목표 균형점의 위치이고 굵은 선은 보행을 위한 이족보행로봇의 운동특성으로부터 구한 실제 균형점의 궤적이다. 수정 후의 균형점 추종이 더 적절함을 알 수 있다.

주목할 것은 우측 그림에서, 매 보폭 주기(매3초) 이전에 일정한 시간대 만큼 균형점 추종이 진동한다는 것이다. 즉, 목표 균형점의 궤적을 따라 추종을 하다가 진동하고 다시 추종하다 진동하는 현상이 반복되고 있다. 이처럼 균형점 추종궤적이 진동하는 시간대는 바로 상 변환을 하는 시기이다. IWR-III의 수학적 모델에는 댐핑항이 존재하지 않으며 간략화된 식의 우변의 $b(t)$ 가 상수일 경우는 수학적 모델의 해는 지속적으로 진동하며 한계 안정적이다. 이를 지속보행 실험과 연관시켜보면 IWR-III는 이족보행을 수행하는 중 상 변환을 수행하는 경우는 두다리 지지단계에서 다리부는 운동하지 않고 균형관절만을 이용하여 상 변환을 수행한다. 그런데 IWR-III의 수학적 모델의 $b(t)$ 는 다리부의 운동특성을 표현하는 항이므로 다리부의 운동특성이 변하지 않을 경우 상수이다. 즉, IWR-III가 상 변환을 수행하는 동안은 $b(t)$ 가 상수이므로 IWR-III는 한계 안정적이며 균형점이 진동한다. 좌측 그림의 경우는 균형운동의 수정 알고리즘의 영향으로 상 변환 시 균형점의 진동이 여과된 것으로 분석된다. 그림 14는 Y방향(진행방향에 수직인 방향)의 균형점 추종을 표현한 것이다.

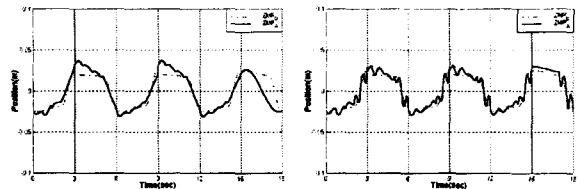


그림 14 진행방향에 수직인 방향의 균형점 추종
Fig. 14 ZMP tracking in lateral direction

좌측의 그림이 균형운동을 수정한 이후의 균형점 추종이고 우측의 그림이 균형운동을 수정하기 전의 균형점 추종이며, 가는 선은 목표 균형점, 굵은 선은 실제 균형점을 나타내고 있다. 역시 균형운동을 수정한 후의 균형점 추종이 더 적절해 보인다. 여기서 진행방향과 진행방향에 수직인 방향의 다리의 운동특성을 살펴보면 지속보행의 경우 다리부의 각 관절은 진행방향에 대하여 모든 동작을 수행하며 진행방향에 수직인 방향의 동작은 전무하다. 실제적으로 균형관절을 제외하고는 진행방향에 수직인 방향의 운동을 구현할 자유도가 IWR-III에는 존재하지 않는다. 왜냐하면, 다리부의 모든 관절은 피치관절로 진행방향으로만 움직일 수 있기 때문이다. 따라서 진행방향과는 달리 다리부의 운동특성이 균형점의 추종에 영향을 주지 못한다. 즉, 진행방향에 수직인 방향은 다리부의 운동특성이 없으므로 수학적 모델의 우변은 상수이고 이는 지속적으로 진동하는 한계안정을 의미한다. 따라서 그림 14의 우측그림에 표현된 바와 같이 진행방향에 수직인 방향의 균형점은 지속적으로 진동하면서 주어 진 궤적을 추종한다. 그런데 진행방향에서와 마찬가지로 5차 다항식을 이용하여 균형운동을 수정하며 고주파 성분이

여과되어 대부분의 진동 특성이 사라지고 좌측의 그림처럼 표현된다. 따라서, 다리부의 운동 특성변화가 상대적으로 작은 진행방향에 수직인 Y방향이 진행 방향인 X방향보다 더 많이 진동하며 이러한 진동은 균형운동의 수정으로 여과할 수 있다.

그림 15는 지속보행 전구간에서의 균형점을 지지평면에 대하여 표현한 것으로 좌측의 그림이 수정된 균형운동을 이용한 경우의 균형점을 표현한 것이고 우측의 그림이 수정되지 않은 균형운동을 이용하였을 경우의 균형점을 표현한 것이다. 두 그림의 나열된 직사각형은 지지평면과 접촉하는 발바닥의 면적이며 내부의 원은 지지각 기준 좌표계의 원점을 의미한다. 점선은 목표 균형점의 궤적이고 실선은 균형운동에 의하여 구현된 균형점이다. 두 그림을 비교해 보면, 수정전의 균형운동을 이용한 경우가 목표 균형점 궤적 대하여 매끄러운 추종을 하고 있음을 알 수 있다.

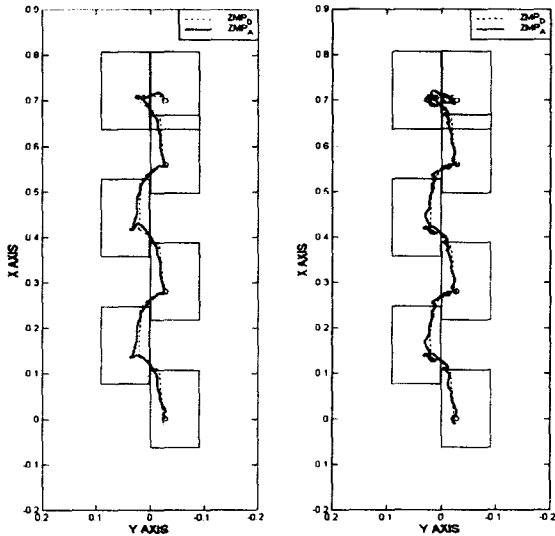


그림 15 지지평면에서의 균형점 추종
Fig. 15 ZMP tracking on supporting plane

7.2 지속보행 실험

다음의 그림 16에서 그림 19까지는 지속적으로 여섯 보행을 수행하는 동안에 각 구동기에서의 명령 값과 실제 출력 값 그리고 추종오차를 그래프로 표현한 것이다. 최대 추종 오차는 구동기 기준으로는 대략 6° 미만으로서 높은 감속비 (1/60 - 1/100)를 고려하면 이는 극히 작은 양임을 알 수 있다.

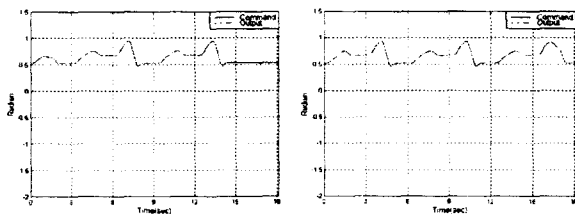


그림 16 발목관절(좌/우)의 궤적 추종
Fig. 16 Tracking of left and right ankle joints

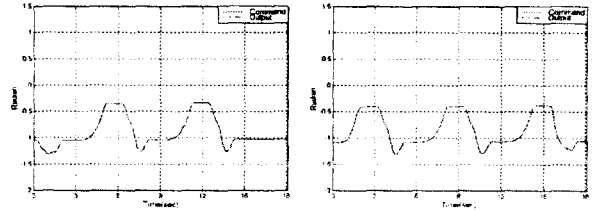


그림 17 무릎관절(좌/우)의 궤적 추종
Fig. 17 Tracking of left and right knee joints

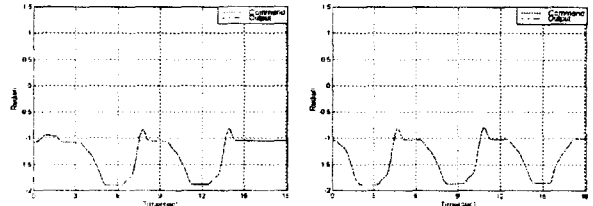


그림 18 대퇴관절(좌/우)의 궤적 추종
Fig. 18 Tracking of left and right hip joints

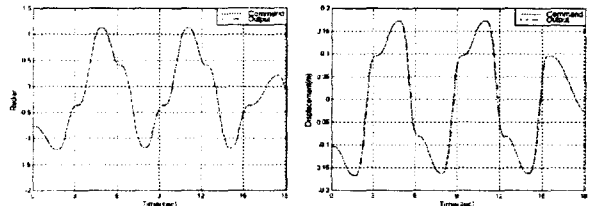


그림 19 균형회전 및 직진 관절의 궤적 추종
Fig. 19 Tracking of balancing roll and prismatic joints

8. 결론 및 고찰

본 논문에서는 순항을 위한 지속보행 알고리즘을 제시하고 다 자유도 운동체의 상호 운동을 고려하여 안정적인 보행을 해석하고 수행할 수 있는 일반화가 가능한 이족보행로봇의 수학적 모델을 유도하고 실제 실험을 통하여 이를 검증하였다.

IWR-III의 지속보행에 있어서 보행 소요시간은 보폭의 이동시간과 상 변환 시간으로 나눌 수 있는데 상 변환 시간은 안전을 고려하여 기구적으로 구현 가능한 최대 속도의 90%를 상한선으로 설정하여 구동된다. 따라서 보행속도의 상승을 위해서는 보폭의 이동시간을 줄일 수 있어야 한다. IWR-III의 경우는 구동기의 관성에 의한 가감속 반응 시간을 고려하면 상 변환 시간을 포함하여 단위 걸음새 구현에 적어도 약 1.2초 정도가 필요하다. 그러나 이족보행의 경우는 단순히 구동기의 가감속 능력만을 고려하여 보행속도를 설정할 수 없다. 왜냐하면 각 구동기의 관성 이외에 각 링크들의 관성과 각 관절들의 상호작용에 의한 효과 그리고 보행지면의 조건 등이 변수로 작용하기 때문이다. 특히 IWR-III 이족보행로봇은 지지 발바닥과 지지평면 사이의 스피ن 모멘트를 보상할 수 없으므로 보행속도 상승에 따른 스피ن 모멘트의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 실제 보행 실험에서 해석적 방법에 의한 단위 걸음새 구현은 2.4초 정도가 안정적으로 지속보행을 수행하는 분기점이었다. 단위 걸

음세의 소요시간이 2초인 경우에는 보행 외적 요소, 즉, 지지평면의 편평도, 지지평면과 발바닥사이의 마찰력 등에 매우 민감하여 보행자체의 요소보다 보행에 더 많은 영향을 주었다. 균형운동의 수정의 경우는 본 논문에서 제시한 수학적 모델이 갖고 있는 특성상의 진동을 없애기 위하여 단순히 5차 다항식에 의한 곡선의 수정 과정을 알고리즘화하였다. 그러나 보행에 따라 수치해석 오차나 알고리즘자체의 오류에서 기인하는 균형점의 불연속 문제를 해결해야 할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

[1] Kenneth J.Waldron (Editor), "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force," *Advanced Robotics*, pp.299-310, 1989.

[2] Takanishi,A., Egusa,Y., Tochizawa,M., Takeya,M. and Kato.I, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion," *RoManSy 7: Proc. Seventh CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, A.Morecki, G. Bianchi and K.Jaworek, Eds.Hermes, Paris, pp. 68-79, 1990.

[3] Sun-Ho Lim and Jin-Geol Kim, "Development of Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot," (In Korean) *KACC*, pp. 113-118, 1993.

[4] J. Yamaguchi et al., "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-axis Moment by Trunk Motion," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 561-566, 1993.

[5] J. Yamaguchi et al., "Development of a Biped Walking Robot Adapting to a Horizontally Uneven Surface," *Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS94)*, pp. 1156-1163, 1994.

[6] Sun-Ho Lim and Jin-Geol Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance," (In Korean) *Korea Robotics and Automation Workshop Conference*, pp. 21-25, 1992.

[7] Kawamura S. et al, "Realization of Biped Locomotion by Motion Pattern Learning," (In Japanese) *Journal of Robot Society of Japan* vol.3, No.3, pp. 177-180, 1985.

[8] Arimoto S., Kawamura S., Miyazaki F., "Can Mechanical Robots Learn by Themselves?," *Robotics Research (2nd. International Symposium)* pp. 127-134 MIT Press, 1985.

[9] Ching-Long Shih, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degrees of Freedom," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3008-3013, 1996.

[10] A.Takanishi, M.Ishida, Y.Yamazaki, I.Kato, "The Realization of Dynamic Walking by The Biped

Walking Robot WL-10RD," *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.3 No.4, pp. 325-336,1985.

[11] C.L.Shih, Y.Z.Li, S.Churng, T.T.Lee, W.A.Gruven, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase," *IEEE*, pp. 1646-1650. 1990.

[12] S. Kajita and K. Tari, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking," *IEEE Control System Magazine*, Vol. 16, No. 1, pp. 13-19, 1996.

[13] Toshio Fukuda, Youichiron Komata, Takemasa Arakawa, "Recurrent Neural Network with Self-adaptive Gaits for Biped Locomotion Robot," *IEEE*, pp.1710-1714, 1997.

[14] K. Ohnishi, M. Shibata & T. Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.1, No.1, pp. 56-67, 1996.

[15] M. Tomizuka, "Model Based Prediction, Preview and Robust Controls in Motion Control System," *Proc. of IEEE/IES AMC96*, Vol.1, pp.1-6, 1996.

[16] K. Ohishi and M. Ohishi, "Robust and Easy Realization of Hybrid Control Based on H^∞ Velocity Controller," *Proc. of 26th International Symposium on Industrial Robots*, Vol.1, pp.197-202, 1995.

저 자 소 개

임 선 호 (林 先 浩)

1970년 4월 2일 생. 1992년 인하대학교 자동화공학과 졸업. 1999년 동 대학원 자동화공학과 졸업(공박)



김 진 걸 (金 振 傑)

1955년 7월 4일 생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Univ. of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학 졸업(공박). 1988년~ 인하대학교 기계항공자동화 공학부 교수
Tel : 032-860-7384
E-mail : John@inha.ac.kr