

이족 보행로봇의 동적 보행 제어에 관한 연구

A Study on Dynamic Walking Control of Biped Robot

심병균^{1*}, 정양근², 심현석³, 이우송⁴

Byoung-Kyun Shim, Yang-Keun Jeong, Hyun-Seok Shim, Woo-Song Lee

〈Abstract〉

In this paper, stable and robust dynamic walking for a biped motion is proposed. To success this objective, the following structures are processed. In this paper, the proposed control method is one that adjusts actual zero moment position to move to the closest possible point in the stable area instead of following desired zero moment position. This minimizes energy consumption with the smallest joint movements. The proposed control method makes mechanical energy that drives lower limb of the bipedal robot efficient. In this paper, walking experiment is carried out with the three control structures mentioned above. The trajectory generated by off-line is illustrated by performing to walking on flat ground. experiment with an obstacle whose height is lower than that of trajectory is executed to validate dynamic motion.

Keywords : Biped Robot, Dynamic Walking Control, ZMP

^{1*}정회원, 교신저자, 경남대학교 첨단공학과,
E-mail : shimbk@kyungnam.ac.kr
²정회원, 신라정보기술(주) 대표이사
³정회원, (주)동산테크 대표이사
⁴정회원, 성산압테코 연구소장, 工博

^{1*}Dept. of Advanced Engineering, Kyungnam University
²CEO, SHILLA Information Technology Co., Ltd.
³CEO, DongSan Tech Co., Ltd.
⁴Director, R&D Center, SungSanamdeco Co. Ltd., Ph. D.

1. 서론

산업기술의 첨단화와 사람의 가치관에 관심이 높아짐에 따라 극한 환경에서 사람이 수행할 작업을 대신 할 수 있는 보행로봇에 대한 요구가 증가하게 되었다. 이러한 작업을 대신 수행할 수 있는 로봇에 대한 많은 연구가 수행되었고, 그 연구 대상은 자율적이고, 이동성이 보장된 보행 로봇에 대한 연구로 활발히 진행되어왔다. 많은 연구들이 보행 제어에 대하여 수행되어왔고, 많은 기법들이 보행 제어를 위해 제안되었다. 이전까지 소개된 보행 동작 제어 방법들에 대하여, 구분하고 그러한 분류를 Fig. 1과 같이 제시되고 있다.[]

먼저 이족 보행 문제는 기준 움직임 패턴 설계와 보상 제어기로 나뉜다. J.J.Lee는 하반신을 끌며 걷는 단순 이족 구조의 첫 번째 모델을 통하여 단순화된 방법으로 표현하였다. 이후에 그들은 이 모델을 좀더 진화된 로봇으로 개선하였다. 이들 저자는 시스템에 영향을 주는 전체 외력과 시스템의 움직임에 의해 생성된 관성 모멘트 사이의 균형에 의해서, 환경 모델 없이 기준을 설계 하는 것이 가능하다고 언급하였다. 그래서 그들은 시스템 거동의 전체 지표를 제안하였다. 또한, 오프라인 모션제어 방법, 실시간 추종제어 방법, 수동적 제어 방법, 신경망 제어방법으로 나눌 수 있다.

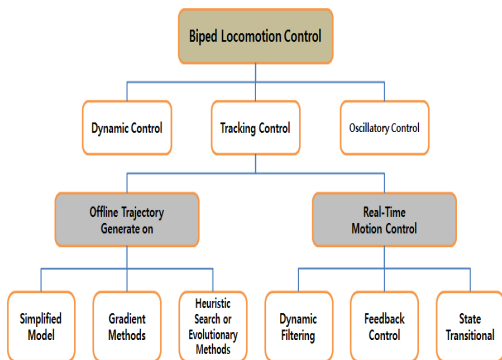


Fig. 1 The concept of bipedal locomotion control

본 연구의 목적은 이족 보행로봇의 실시간 센서 입력을 기반으로 하는 에너지 효율적 동적 보행을 구현하는 것이다. 따라서 이족 보행로봇은 외력의 존재에도 불구하고 보행하는 동안 균형을 유지하여야 한다.

본 연구에서는 에너지 효율적인 동적 균형제어를 구현하기 위해, 다음과 같은 3가지 구조로 진행하였다. 첫째로, 이족 보행로봇의 이동성을 확보하기 위한 신뢰성 있는 가변 보행 패턴에 대한 연구를 수행하였다. 둘째로, 안정적 보행을 위하여 외란에 대하여 강인한 보행 성능을 위한 자세제어를 연구하였다. 마지막으로, 동적 환경에서 안정적 보행 위한 에너지 효율적인 균형제어 방법을 제안하여, 실제 로봇 보행에 적용 하였다.

2. 본론

2.1 Zero Moment Position

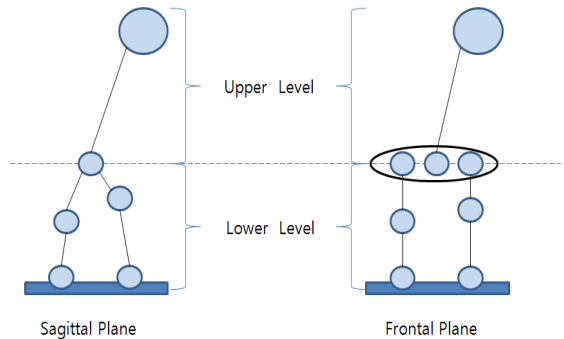


Fig. 2 Kinematic model of biped robot

Fig. 2에서와 같이 발이 지면과 접촉해 있는 이족 보행로봇의 기구학적 모델에서 보면 지지하는 발이 정지한 상태로 유지하고, 다른 발이 시스템을 움직이기 위해 앞으로 스윙하기 위해서, 본질적 조건은 지면 반발력이 지지하는 발에만 작용한다고 언급되었다.[] 그들의 본래 제안은 다음에

두 가지 사실에 따른다. 첫번째로, 움직임 궤적을 설계하는데 있어서, 환경적 요인을 무시하고 앞서 언급한 조건을 만족해야 한다. 전체 외력(external force)은 시스템의 구동기에 의해 생성된 내력(internal force)과 동적으로 평형 상태가 된다. 두 번째로, 움직임 설계는 모멘트 보상에 의해 구현된다. 왜냐하면 ZMP 주위에 모멘트의 수평적 성분은 0(Zero) 이기 때문이다. 실제로, 이 예비적인 모형에서, 하체의 움직임 궤적을 함수를 분석했다 그러므로, 지지하는 발의 주위에 모멘트를 보상하는 상체의 움직임은 반복적인 분석 해를 이용하여 계산된다. 후에, Vukobratovic은 동일한 모델에 대하여 피드백 제어를 제안하였다. 앞서 언급한대로, 운동 계획에서의 환경적 요소의 생략은 문제를 단순화할 수 있다. 그러나, 작은 모델 편차에서 발생하는 외란에 대하여 시스템을 덜 강인(robust)하게 만들 수 있다. 그러므로, 모멘트 에러는 온라인 피드백을 사용하여 제거 되어야만 한다. 그래서 그들은 가속도 편차에 대해 모멘트를 측정하는 센서 매트릭스를 사용한 실시간 움직임 보정을 제안하였다.

Vukobratovic에 의한 초기 연구는 이족 움직임 제어에서 효과적인 평가 기준이 될 수 있음을 보였다.[] 왜냐하면, 움직임 계획단계와 온라인 센서 피드백을 분리하는 동안 효과적인 제어의 확장을 가능하게 했기 때문이다. 그러나, 6개 요소로 이루어져 있는 총 외력에서 단지 2개 요소만 포함하기 때문에 ZMP가 그 자체로 충분한 상태를 결코 대표하지 않는다는 것을 관찰하는 것이 중요하다. ZMP 개념을 설명하기 위하여는, Vukobratovic는 움직임을 지지하는 단계 동안의 전체적인 발이 지상을 접촉하고 있는 단계를 분석했다. 간단하게, 그들은 시스템의 나머지에서 지지하는 발목을 분리하고 힘 \vec{F}^A 에 의하여 그것의 영향을 및 순간 \vec{M}^A 및 점 G 발의 중심을 대신한다. 지면 반발력은

점 P 에 작용한다. 그러므로 균형 있게 전체적인 시스템을 유지한다. 그 외에 총 지면 반발력은 반응력 $\vec{R} = (R_x, R_y, R_z)$ 및 모멘트 $\vec{M} = (M_x^A, M_y^A, M_z^A)$ 으로 나타낸다. 반응하는 발과 휴식을 취하는 발이 전술한 바와 같이, 수평한 반응력 (R_x, R_y) 는 힘의 성분 \vec{F}^A 수평한 균형을 잡는 마찰력을 뜻한다.

Fig. 3은 보행로봇의 발에 작용하는 힘과 모멘트를 해석하는 개념을 나타낸다.[]

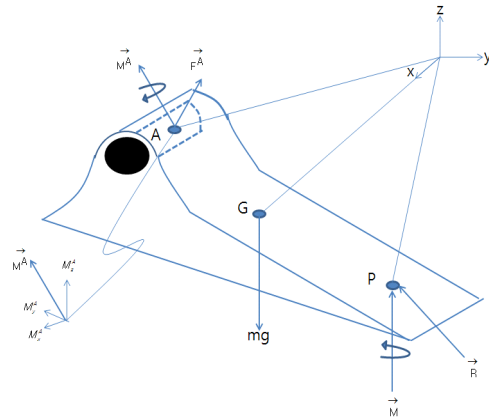


Fig. 3 The analysis of forces and moments on the foot of biped robot[]

다른 측면에서, 수직 작용하는 모멘트 M_z 는 \vec{M}^A 의 수직적 성분과 \vec{F}^A 에 의해 발생한 모멘트를 균형 유지하는 마찰 반발력의 모멘트를 의미한다. 그래서, 미끄러짐이 없다고 가정할 때, 정적 마찰은 (R_x, R_y) 와 (M_z) 를 보상한다. 다른 측면에서, R_z 은 수직 힘을 균형 유지하는 지면 반발 요소이다. 발의 활동에 의해 유도되는 지면 반발력이 위쪽으로 향하게 되기 때문에, 모든 활동적인 모멘트의 수평적 요소는 발을 지지하는 지역, 일컬어 지지 다각형의 볼록한 선체 안쪽에서만 \vec{R} 의 위치를 이동하여 보상될 수 있다. 그러므로, \vec{M}^A 의 수평적 요소는 어떤 하중이 초과되든지 균형을 잡기 위하

여 반발력을 적절하게 이동할 것이다. 만일 외부 모멘트를 보상하기 위해, 지지 다각형이 위치 \vec{R} 을 포함하기에 너무 작은 경우에, \vec{R} 은 발 가장자리에 작용 할 것이고, 보상되지 않은 나머지 부분은 발의 가장자리가 뒤집힘으로써 시스템이 쓰러지게 될 것이다.

따라서, 이족 운동 시스템이 점 P에서 동적으로 균형 유지를 하기 위한 충분한 조건은 다음을 만족해야 한다.

$$M_x = M_y = 0 \quad (1)$$

2.2 동적 보행

이족 보행을 위한 이족 보행 로봇의 주요한 목적은 넘어짐을 피하는 것이다. 즉, 균형을 유지하는 것이다. 그래서 동적 균형 유지는 주요한 제어 목적이 되었다. 이러한 동적으로 안정한 보행을 위해서는 안정한 보행 궤적이 필수적이다. 이족 보행 로봇의 초기 보행패턴 생성 방법은 오프라인으로 생성하는 방법이었다. 즉, 목표 COM 또는 제로모멘트포지션 궤적함수를 설정하여, 이를 추종하게 하는 보행 궤적을 생성하는 것이었다. 그러나, 인간 생활 환경과 같은 동적인 환경에서는 정해진 환경이 존재하지 않는다. 따라서 외부 환경에 능동적으로 대처하고 안정적으로 보행할 수 있는 실시간으로 생성되는 보행 패턴 방법이 요구되었다.

또한 실시간으로 생성되거나, 갱신 되는 보행 패턴을 이용하여 완전하게 보행을 할 수는 없다. 이족 다리로 구성된 이족 보행 로봇은 많은 관절로 이루어진 다물체 시스템이기 때문에, 모든 관절의 조합이 원활하지 않으면 안정을 보행할 수 없다. 이러한 실시간 보행궤적 하에서 예측하지 못한 외란에 대응하기 위해 다음과 같이 효과적인 균형 제어 방법이 요구된다. 첫 번째로 온라

인 패턴 생성 방법이다. 이족 보행로봇이 지면에서 보행을 하기 위해서는, 보행이 패턴이 형성되어야 한다. 보행 패턴 생성에는 오프라인 보행 패턴 생성 방법과 온라인 보행 패턴생성으로 분류할 수 있다. 오프라인 패턴 생성방법은 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다.[] 많은 연구자들은 오프라인 패턴을 생성을 연구해 왔다, 그러나, 인간과 공존하기 위해서는, 보행 패턴이 인간 생활환경에 따라 실시간으로 생성 되어야 한다. 최근 온라인 패턴 생성 방법에 따른 온라인 제어 구현에 대하여 많은 연구자들에 의해 보고되고 있다. Setiawan 은 진보된 형태로 생성된 움직임 패턴을 연결하는 것에 의하여 앞으로 뒤로 보행의 온라인 제어를 구현하였다. Nishiwaki 는 실시간 보행 패턴 생성 방법을 제안하였다. 그것은 이족 보행 로봇이 동적으로 안정된 조합이고 미리 설계된 움직임 궤적에 의한 지정된 발자국 위치를 실시간으로 추종하도록 하였다. Yokoi 는 3차원 선형 역진자 기반 방법을 적용하여 온라인 보행 패턴생성을 구현하였다. 미리 보기 제어 방법 기반의 온라인 패턴 생성은 개발되었다. FFT 기반 온라인 보행 패턴 생성은 제안되었다. 싸이클로이드 함수와 다항식 함수를 사용하여 생성하는 온라인 보행 패턴은 연구 되었다. 그러나, 이들 패턴 생성 방법으로 보행 타입의 많은 종류를 생성하기에는 어렵다. 모든 보행 타입에서, 패턴 생성은 적용 가능해야 한다. 그래서 서로 다른 형태의보행에 따른 기본 인자(보폭, 스텝 높이, 스텝 방향 등.)기본 인자들을 변화하면서 보행 패턴을 생성하는 방법이 도출되어야 한다.

두 번째로는 균형제어 방법이다. 이족 보행 로봇이 주어진 상황에 적합한 보행 패턴을 가지고 보행을 할 때, 갑작스런 외부 환경 변화와 같은 외란이 발생한다면 대응하기 어려워진다. 이족 보행로봇은 인간과 유사한 구조의 두 다리를 가지고

보행하는 로봇이므로, 인간생활 환경에 적응할 수 있는 안정한 보행 패턴뿐만 아니라, 변화된 외란에 대해 대응 할 수 있는 적응력을 가져야 한다. 실시간 보행 패턴을 생성한 후, 외부 환경 변화에 능동적으로 대응 하여 동적으로 안정한 보행을 하기 위해서는, 이족 보행 로봇 전체 구조에서 균형 제어에 대한 역할이 매우 중요하다. 인간이 균형을 유지하는 것과 유사하게, 균형 제어기의 제어 목표는 다음 두 가지 그룹으로 나누어 진다. 미리 계획된 행동(동작) 동안에서의 균형 제어, 환경으로부터 예측하지 못한 외란에 대응하기 위해, 반응하는 움직임 패턴을 위한 균형 제어이다. 지난 연구는 주요 제어 목표를 첫 번째 경우에 대하여 언급해왔다. 예를 들면, 정적인 보행 동안 균형 제어, 물건을 들어 올릴 때, 어떤 대상을 밀 때, 또는 대상을 때릴 때와 같은 상황에서의 연구가 진행되었다. 두 번째 경우에 제어 전략은 다음과 같은 상황에 대한 연구였다. 안정하지 못한 지면에서의 균형 유지, 경사면에 변화에서 자세를 똑바로 유지하는 것, 울퉁불퉁한 거친 지면 위에서의 보행, 로봇 앞에 갑작스럽게 장애물이 나타날 때 균형을 유지하는 것, 그리고 로봇이 예측하지 못한 외란을 겪은 후 균형을 복원 하는 일등에 관한 연구였다. 이러한 작업에서 로봇이 예측하지 못한 외란에 노출된다는 가정 하에 우리는 반작용 패턴 생성과 제어에 초점을 맞춘다. 이러한 영역에서의 연구는 인간의 균형 제어의 연구로부터 실험적 데이터를 기반으로 진행되어 왔다, 연구자들은 인간에 균형 복구 전략에 많은 노력을 해왔다. 일반적 지면에서 서 있는 동안, 자세 제어는 “Ankle 전략”이라 일컫는 반작용 패턴을 통하여 반드시 보상한다. 그것은 주로 발목 관절에서 움직임에 의해서 평행상태를 복원한다. 다른 측면에서 발 길이와 관련한 지지하는 면이 짧아지는 것과 함께 “Hip 전략”이라 일컫는 다른 반작용 패턴이 관

찰되었다. 이러한 패턴은 지지면에 대하여 수평면 전단력을 양산한다. 그러나, 힙에서의 뚜렷한 움직임과 함께 이러한 두 가지 전략 외에, “Stepping” 또는 “Stumbling” 전략과 같은 세 번째 균형제어 전략이 정의된다. 이 전략은 힙 전략이 과도하게 되는 동안 어떤 경계 값(위치 또는 속도)에 도달할 때 적용된다. 더욱더, 인간 자세 제어는 복잡한 모터 동작의 분석에 의존한다는 가설이 존재한다. 간단한 반응 패턴의 제한된 수량의 조합에 의해 유지될 수 있다. 즉, 다리 근육 수축들에 의한 63개 가능한 조합들로부터, 단지 6개만이 실제 사용된다. : 4가지 Stemming - 앞으로 뒤로, 위로 아래로의 힘은 힙과 발목관절을 조정으로 이루어 질 수 있다.에서 언급했듯이, 발목 전략은 무릎 토크를 포함하고, 힙 전략은 발목 토크와 무릎 토크에 힙 토크를 추가하는 것이다. 무릎 움직임의 역할은 조사 되어왔고, 또는 다른 곳에서, 그리고 몇몇 저자는 “조합 전략”의 이름으로 사용하였다. 이족 보행 로봇 분야에서 균형 제어 제안은 발목과 힙 전략을 이용하는 가능한 방법에 대하여 만들어져 왔다.

2.3 안정한 보행 패턴

로봇의 두 발바닥이 바닥에 닿아있는 상태에서 의 시간이 길 경우, 그 무게 중심이동 시간에 그 만큼의 여유가 생기므로 안정된 이동을 할 수가 있지만, 속도가 느려지게 된다는 단점이 있고, 반대로 두 발바닥이 닿아있는 시간이 짧을 경우 로봇의 중심 이동이 단시간에 이루어져 하므로 보행이 불안정해 질 수 있다. 그러므로 안정되고 빠른 보행을 위해서는 이 두 가지 상태에서의 시간 배분이 매우중요하다고 할 수 있다. 보행 패턴을 생성할 때에는 문제의 단순화를 위해 허리가 항상 지면에 수직이며, 발바닥은 항상 지면에 평행하도

록 유지한다. 보행 패턴은 발을 들어 올릴 높이, 한걸음으로 이동할 거리, 발의 이동속도 등을 결정하여 그를 바탕으로 생성된 발의궤적과 허리의 궤적을 구하고, 허리와 발의 궤적을 이용하여 그 사이의 관절인 무릎의 궤적을 간단한 기구학을 통하여, 구함으로써 보행패턴을 완성한다. 본 연구에서는 안정된 허리궤적 생성을 위해 제로모멘트포지션을 사용하였다. 먼저 발의 궤적을 구하고, 간단히 구할 수 있는 기본 허리궤적을 구한 후 제로모멘트포지션의 계산을 통해 기본 허리 궤적을 수정해 감으로써 안정된 보행을 할 수 있는 최적궤적을 하였다.

2.4 로봇 발 궤적 생성

본 논문에서는 보행의 과정을 출발패턴, 연속걸기 패턴, 정지 패턴의 세가지 경우로 나누어서 패턴을 생성하였다. 출발패턴과 정지패턴은 각각 로봇이 걷기동작을 하기 전에 반보를 앞으로 내딛는 과정과 연속 걸기가 끝난 후 뒷발을 이동시켜 제자리에 서는 과정에서의 패턴을 말하는데, 보폭이 연속 걸기패턴에서의 보폭의 반이다. 기본적으로 연속걸기와 보폭만이 다를 뿐, 궤적을 생성하는 과정은 같으므로 연속걸기의 궤적 생성만을 기술한다.

우선 측면에서의 발의 궤적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_f = [x_f(t), z_f(t)]^T \quad (2)$$

$x_a(t), z_a(t)$ 는 시간 t에서의 측면의 발목 좌표를 나타낸다. 한발을 내딛는 데에 필요한 시간을 T_c , 한걸음 보폭을 D_s , 두발이 지면에 닿아있는 시간을 T_d 라고하고, 발이 최고 높이에 이르렀을 때의 높이와 이동거리를 각각 H_{a0}, L_{a0}

라고 할 때, 시간 t 에 대한 발의 궤적은 다음과 같다.

$$x_f(t) = \begin{cases} kD_s & t = kT_c + T_d/2 \\ kD_s + L_{a0} & t = kT_c + T_c/2 \\ (k+1)D_s & t = (k+1)/T_c - T_d/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$x_f(t) = kD_s \quad kT_c - T_d/2 < t < kT_c + T_d/2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_f(t) = 0 \quad t = kT_c - T_d/2, t = kT_c + T_d/2 \quad (5)$$

$$z_f(t) = \begin{cases} 0 & t = kT_c + T_d/2 \\ H_{a0} & t = kT_c + T_c/2 \\ 0 & t = (k+1)/T_c - T_d/2 \end{cases} \quad (6)$$

$$z_f(t) = kD_s \quad kT_c - T_d/2 < t < kT_c + T_d/2 \quad (7)$$

$$\dot{z}_f(t) = 0 \quad t = kT_c - T_d/2, t = kT_c + T_d/2 \quad (8)$$

전체 보행 궤적은 위 수식에서 표현한 각 시점에서의 위치에 대한 3차원 스플라인 보간법을 통하여 생성한다. 정면에서의 발의 궤적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_f = [y_f(t), z_f(t)]^T \quad (9)$$

$$y_f = 0 \quad t = all \quad interval \quad (10)$$

측면에서의 경우와 마찬가지로 $y_a(t), z_a(t)$ 는 각각 시간 t 에서의 정면의 발목 좌표를 나타낸다. 정면에서는 y 방향으로의 이동이 없고, z축 방향으로의 이동만이 존재하므로 정면의 발목 궤적은 측면의 z축 방향 이동만을 고려한 것과 같다. 위의 식에 의해 보행 패턴을 생성할 때 가장 중요한 변수는 보행 도중 발을 들어올리는 H_{a0}

와 한걸음의 길이 D_s 이다. 발을 들어 올리는 높이가 낮을수록 로봇이 안정하게 걷지만, 주변 환경의 적응력이 떨어진다. 예를 들어, 걷는 도중 바닥에 높이가 10mm 의 요철이 있다면, 발을 올리는 높이가 10mm 이상인 로봇은 계속적으로 보행할 수 있지만, 그보다 낮은 높이로 걷는 로봇은 더 이상 보행을 계속할 수 없을 것이다. 또한 한 걸음에 갈수 있는 길이가 작으면 로봇은 비교적 안정하게 걸을 수 있겠지만, 걷는 속도가 느려진다. 보행패턴을 생성 할 시 이 두 변수의 적절한 조정이 반드시 필요하다.

2.5 웨이스트 궤적 생성

한쪽 발을 들고, 앞으로 이동시키기 위해서는 로봇의 몸체를 지탱하고 있는 다른 한쪽 발에 무게중심이 존재하도록 해야 하므로 한쪽 발을 들어 올림과 동시에 몸을 들어올린 발의 반대방향으로 기울여 준다. 또한 이동한 발을 내려놓음과 동시에 지탱하고 있는 발에서 무게중심을 재빨리 이동시킨 발로 이동하여야 다음 걸음으로의 진행이 가능하다. 제로모멘트포지션을 이용하여 안정된 허리 궤적을 생성해 내기 위한 기본 허리 궤적을 생성했다. 허리 궤적 역시 발의 궤적을 생성하는 것과 동일하게 생성할 수 있다. 이 때, 측면의 움직임뿐 아니라 정면에서의 허리 움직임의 속도와 움직임의 정도, 타이밍 등이 매우 중요한데 이것은 허리 위 부분의 무게에 따라 달라질 수 있다. 허리의 궤적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_h = [x_h(t), z_h(t)]^T \quad (11)$$

$$z_h(t) = constant \quad (12)$$

$$x_h(t) = \begin{cases} kD_s & t = kT_c - T_d/2 \\ (k+1)D_s & t = kT_c + T_d/2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\dot{x}_h(kT_c) = 0, \dot{x}_h(kT_c + T_d) = 0 \quad (14)$$

$$Y_h = [y_h(t), z_h(t)]^T \quad (15)$$

$$y_h(t) = \begin{cases} (-1)^{l_{ata}/2} t = kT_c \pm T_d/2 \\ 0 & t = kT_c \end{cases} \quad (16)$$

3. 실험 및 결과 고찰

제안한 제어기의 성능을 증명하기 위하여, 보행 실험을 수행하였다. 미리 계획된 기본 궤적은 Fig 4와 같다. 그림에서, 보폭은 12cm이고, 보행 주기는 1.8 sec 이다. 힙의 높이는 일정하게 유지 하였으며, 발바닥은 지면과 평행하게 설정하였다. 보행 환경은 일반적인 평평한 지면과 바닥에 약 7mm 두께의 요철을 배치하여, 불규칙한 지면에서의 보행 시험을 수행하였다.

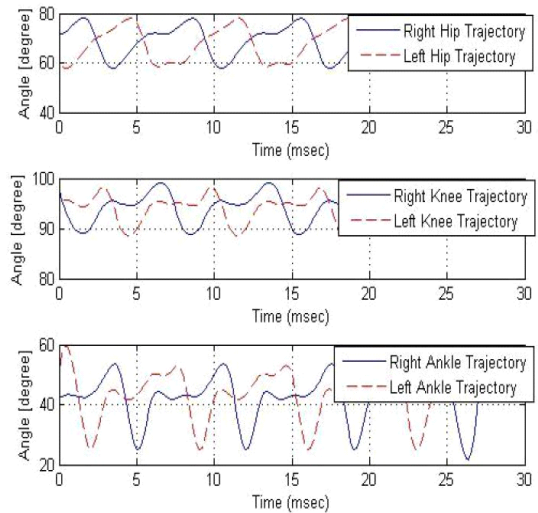


Fig. 4 Basic trajectory by each joints

Fig 5는 평지 보행을 수행한 경우, 본 논문에서 안정도 기준으로 삼고 있는 ZMP 분포도를 나타낸다. 평평한 지면이므로, 각 균형제어기와 관련한

관절에서의 변화 추이가 거의 없음을 알 수 있다. 설정한 안정도 영역 안에 측정된 ZMP가 존재함을 알 수 있다.

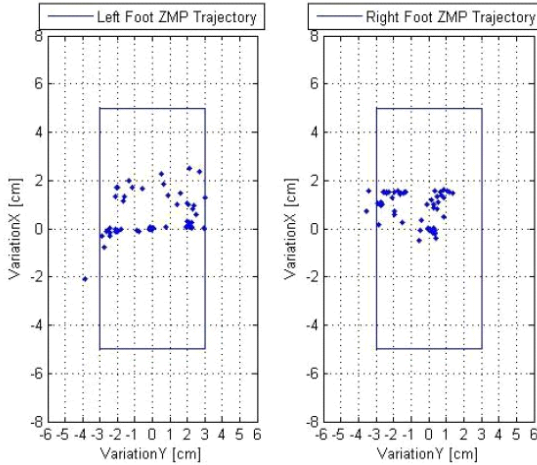


Fig. 5 Measured ZMP distribution for walking on regular surface

Fig 6~9는 불규칙한 지면에서의 보행 실험 결과이다 측정된 ZMP가 제안한 제어기의 의하여, 안정영역에 존재 함을 알 수 있다. 결과 데이터는 제안한 3가지 제어기가 작용한 시점과 보정된 양을 확인하기 위한 그래프이다.

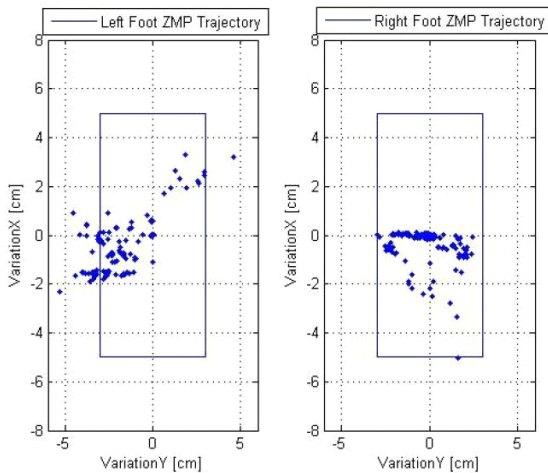


Fig. 6 Measured ZMP for walking upstairs

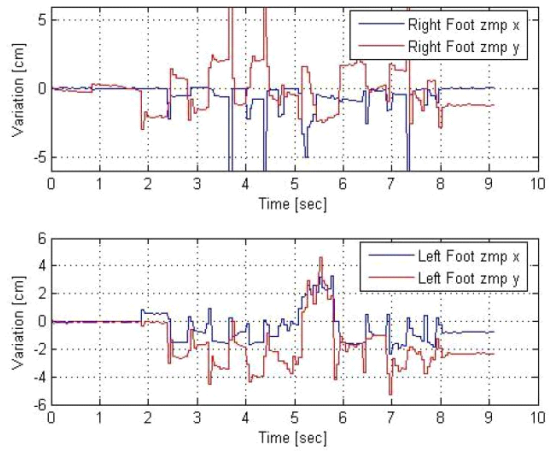


Fig. 7 Tilting variation by each joint for walking upstairs

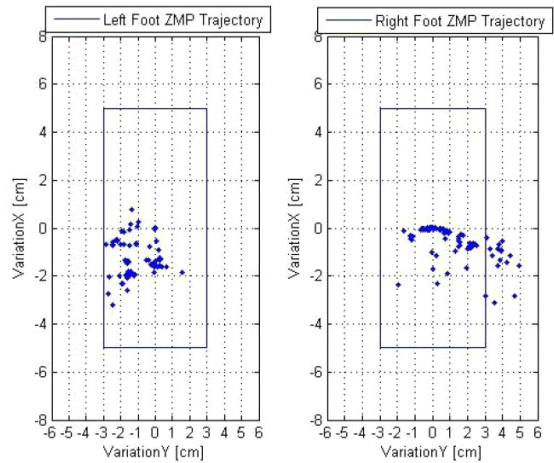


Fig. 8 Measured ZMP for walking downstairs

4. 결론

본 연구에서 실제 환경에서 적용 가능한 3가지 로봇제어기를 이족 보행로봇에 적용하여 동적 보행제어에 관한 연구를 수행하였다

- 1) 이족 보행로봇에 용이하게 적용 가능한 가변 보행 패턴을 생성하였다. 보행 관련 인자, 보폭 및 스윙 발의 높이를 고려하여, 구현하였고, 정적 시뮬레이션을 통하여, 다관절 링크의 기구학적 검증을 수행하였다.

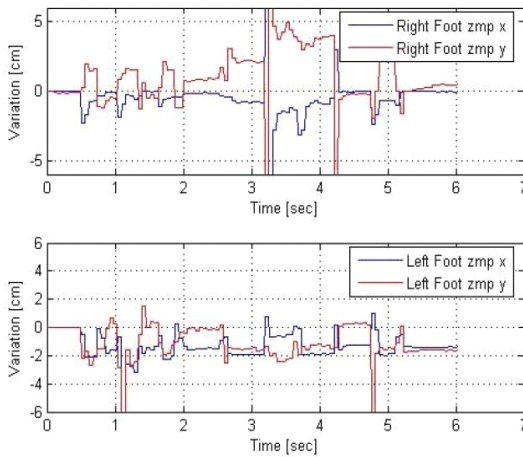


Fig. 9 Tilting variation by each joint for walking downstairs

- 2) 불규칙한 지면에 의해 보행중 발생하는 불균형성을 제어하고자, 로봇 발에 장착한 로드셀 정보만을 이용하여 몸체 자세제어, 실시간 ZMP 제어의 효율적인 방법을 제안하였다.
- 3) 몸체자세제어는 착지과정에서 발생할 수 있는 상반신 모멘트에 의한 무게 중심 쏠림 현상을 상반신과 결합되어 있는 힙 조인트의 각도를 제어함으로써 균형제어를 구현하였다. 안정 영역 추종을 위한 에너지 효율적인 보행 패턴을 추출하기 위해, 새로운 방법을 제안하였다. 제안 방법을 통하여, 안정 영역 도달에 소요되는 동력을 개선할 수 있었다.
- 4) 제안한 제어 방법을 적용하여, 일반 평면에서와 10mm 요철이 있는 지면 환경을 구성하여 보행 실험을 구현하였다. 실험적으로 측정된 ZMP 데이터를 근거로 하여, 동적 환경에서 안정한 보행을 하는 것을 확인하였다.
- 5) 실시간 ZMP 제어는 지면에 조건에 따라 발

생하는 목표 ZMP 와 측정된 ZMP사이의 오차를 감소하는 역할을 한다. 이를 구현하기 위해, 다리 관절 중 2자유도인 발목 관절 각도를 ZMP의 에러를 감쇠시킬 수 있는 평면 좌표축 방향으로 선형 제어를 실시하여, 안정도를 확보 할 수 있었다 제안한 제어 방법을 적용하여, 일반 평면에서와 10mm 요철이 있는 지면 환경을 구성하여 보행 실험을 구현하였다.

전체 보행과정에서, 균일한 평면 지면에서의 보행성능은 보행 보폭은 12cm이고, 0.24km/h 의 속도로 안정한 보행을 하였다. 보행 성능을 향상시키기 위해서는, 기구적으로 좀더 강인 구조가 되어야 하며, 모터 성능이 향상되어야 한다. 또한, 다양한 환경에서 보행성능을 확보하기 위한 유연하고 강인한 동적 보행 궤적 연구가 필요하다. 본 논문에서 구성한 환경 조건 외에 다양한 환경 모델에서 능동적이고 유연한 보행 패턴을 위한 보행 인자의 발견과 그에 영향 분석 또한 수반 되어야 한다. 마지막으로 동적 환경에 빠르게 반응할 수 있는 신뢰성 다양한 제어기 연구도 계속 되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., and Takenaka, T., "The development of Honda humanoid robot", the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp 1321-1326, 1998.
- 2) Takanobu, H., Imai, H., Yokota, K., Suzuki, K. and Miura, H., "A Robot that Grows Like Human", International Conference on Advanced and Intelligent Mechatronics, pp 554-559, 2009.
- 3) Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. and Tanie, K., "Planning walking patterns for a biped robot", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17(3), pp 280-289, 2001.
- 4) Yamaguchi, J., Soga, E., Inoue, S., and Takanishi, A., "Development of a bipedal humanoid robot-control method of whole body cooperative dynamic biped walking",
- 5) Vukobratovic, M., and Stepanenko, J., "On the stability of anthropomorphic systems- Mathematical Biosciences", Vol. 15(1-2), pp 1-37, 1972.
- 6) Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., and Hirukawa, H., "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point", the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp 1620 - 1626, 2003