

의사-임피던스 모델을 이용한 비평탄면에서의 2족보행로봇의 보행

신현식* · 박종현*† · 권오흥**

* 한양대학교 기계공학과, ** 한국생산기술연구원

Locomotion of Biped Robots on Irregular Surface Based on Pseudo-Impedance Model

Hyeonsik Shin*, Jonghyeon Park*† and Ohung Kwon**

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., ** KITECH

(Received February 3, 2009 ; Revised March 5, 2010 ; Accepted April 10, 2010)

Key Words : Biped Robot(2족보행로봇), Pseudo-Impedance Model(의사-임피던스 모델), Uneven Surface(비평탄면), Locomotion(보행)

초록: 본 논문은 의사-임피던스 모델을 이용하여 2족보행로봇이 비평탄면에서 보행하는 제어기법을 제안한다. 의사-임피던스 모델은 인간이 보행 시, 발바닥이 지면과 순응하는 동작을 모사하였다. 지면과 접촉하면서 인간의 발바닥은 2가지 보행상태를 갖게 된다. 첫 번째 상태에서는 지면과 순응하기 위해 노력이나 의도적인 토크를 가하는 것이 아니라 수동적인 모션으로 순응하게 된다. 두 번째 상태에서는 지면과 접촉한 후, 적절한 토크를 유지하여 인간의 몸이 보행을 지속할 수 있게끔 유도하며 이를 하중이동단계라고 한다. 이러한 과정이 안정적으로 로봇의 보행을 유지할 수 있음을 12자유도의 2족보행로봇과 6축의 힘을 가지는 환경모델을 반영한 시뮬레이션을 통해 보여준다. 이러한 시뮬레이션결과가 제안된 의사-임피던스 모델이 효과적임을 보여준다.

Abstract: This paper proposes a control method based on a pseudo-impedance model to control the motion of biped robots walking on an uneven surface. The pseudo-impedance model simulates the action of the ankle of a foot landing on the ground when a human walks. When the foot is in contact with the ground, the human ankle goes through two different phases. In the first phase, the human exerts little or no effort and applies no torque on the ankle so that the orientation of the foot is effortlessly and passively adjusted with respect to the ground. In the second phase of landing, the ankle generates a significant amount of torque in order to rotate and move the main part of the human body forward and to support the weight of the human; this phase is called the weight acceptance phase. Computer simulations of a 12-DOF biped robot with a 6-DOF environment model were performed to determine the effectiveness of the proposed pseudo-impedance control. The simulation results show that stable locomotion can be achieved on an irregular surface by using the proposed model.

1. 서론

2족보행로봇에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으며 인간의 삶과 밀접해 지고 있다. 현재 2족보행로봇은 견고 물건을 나르거나 장애물을 회피하여 임무를 수행할 수 있도록 연구되고 있다. 하지만 앞서의 연구들은 로봇의 작업공간이 실내와 같은 바닥이 평탄한 곳으로 제한되어 있다.

반면 인간이 생활하고 있는 공간의 바닥은 여러

가지의 재질과 형상으로 되어 있고 기울어져 있다. 이러한 지형에 대해 2족보행로봇의 작업공간 확보를 위해서는 지면에 안정되게 접촉하면서 보행해야 할 필요가 있다. 또한 2족보행로봇이 서비스 로봇으로서 인간을 진정으로 돕기 위해서는 미리 알려지지 않은 지형에서도 로봇이 스스로 판단하여 자신을 안정하게 제어하는 방법이 필요하다.

이러한 비평탄면에서의 2족보행로봇의 보행을 위해 아래와 같은 다양한 방법이 제시되었다. 2족보행로봇의 몸체의 움직임과 하체의 움직임을 통해 비평탄면과 발바닥의 접촉점을 통해 형성된 “Virtual

† Corresponding Author, jongpark@hanyang.ac.kr

Surface” 상의 ZMP 보상이 제안되었다.⁽¹⁾ Yamaguchi와 Takanishi는 지형의 정보를 알아내고, 2족보행로봇의 발바닥에 발생하는 충격을 흡수하며 알려지지 않은 지형 정보를 알아내기 위해 multi sensor 기구를 적용하였다.^(2,3) Kajita와 Tani는 로봇의 발바닥에 초음파센서를 부착하여 지형정보를 획득하여 울퉁불퉁한 지형에서 보행을 구현하였다.⁽⁴⁾ 이러한 연구에서 지형정보의 복잡성에 상관없이 지형정보를 알아내는 것과 획득된 지형정보를 통해 2족보행로봇의 발바닥이 지면에 적응하여 안정된 착지를 하는 것이 중요함을 알 수 있다.

거친 지면에서 2족보행로봇의 이동성과 안정성을 위해, ZMP의 개념이 3차원으로 확장되었으며⁽⁵⁾ 또한 알려지지 않은 환경에서의 2족보행로봇의 안정된 보행구현을 위해 힘제어를 이용하거나 센서정보로부터의 반사작용을 이용한 알고리즘들이 제안되었다.⁽⁶⁻⁸⁾ Kim은 발바닥에 지형정보를 알아낼 수 있는 여러 개의 단일 힘센서를 부착하고 이를 이용하여 발바닥과 지면의 접촉지점을 알아낸 후 접촉점의 기하학적 형상정보를 이용해 지면에 적응시키기 위한 발바닥의 회전움직임 생성방법이 제안되었다.⁽⁹⁾

이렇게 제안된 방법들은 센서로부터 지면의 요철이나 기울어짐을 알아내야 할 필요가 있다. 또한 발바닥의 유연성을 이용한다 하더라도 2족보행로봇이 보행할 수 있는 지면의 불규칙함에는 제약이 따르게 된다. 2족보행로봇의 발바닥이 유연성을 가짐으로써 장점이 있다 하더라도 해석상의 어려움과 해석시의 모델과 실제현상이 차이가 많이 발생하는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 강체의 발바닥을 가진 로봇이 힘센서를 통해 지면의 요철이나 기울어짐을 모르더라도 불규칙하게 돌출된 비평탄면에 대해 발바닥의 적응움직임을 생성하는 의사-임피던스 모델을 제안한다. 인간의 비평탄면에서의 보행특성을 모방하여 각 걸음걸이 상태에 따라 지면과 발바닥의 안정적인 접촉을 위해 제안된 의사-임피던스 모델의 특성을 변화시켜 안정적인 보행이 가능하도록 하였다. 이 방식의 유용성은 2족보행로봇의 시뮬레이션을 통해 입증되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 방법을 적용하기 위한 지형과 6자유도의 환경모델과 본 논문에서 이용한 2족보행로봇의 모델에 대해 설명하였다. 3장에서는 보행을 위해 생성된 궤적과 의사-임피던스 모델의 걸음걸이 상태에 따른 제어전략에 대하여 설명하였으며 4장에서는

시뮬레이션 및 결과에 대해 논하였다. 5장에서는 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 방법의 유효성에 대해 논하였다.

2. 환경 및 로봇모델

2.1 시뮬레이션에 이용된 비평탄면의 형상

2족보행로봇이 보행하는 환경은 여러 가지가 있을 수 있다. 크게 지면의 형상이 변형되는 것과 변형되지 않는 것으로 구분할 수 있다. 변형되지 않는 지형 중에는 요철이 있는 것과 요철이 없는 것으로 구분이 가능하다. 변형이 되는 지형으로는 진흙바닥과 같은 것을 예로 들 수 있다. 또한 2족보행로봇의 보행공간이 전체적으로 기울어짐이 있는 지형과 기울어짐이 없는 지형으로도 구분이 가능하다. 본 논문에서 다루고자 하는 비평탄면의 지형은 변형이 되지 않고 기울어짐이 없는 지형이며 4×3의 격자로 형상화 하였다. 이러한 지형으로부터 2족로봇이 필요한 힘-모멘트 정보를 생성하기 위해 발바닥에 4×3 격자 패드를 부착하였다. 이러한 패드는 지면으로부터 접촉 시, 3축 힘을 생성하여 발바닥 전체에 힘-모멘트를 생성시킨다. 즉, 12개의 각 요소를 요철의 높이와 위치를 나타내는 4행 3열의 지형격자로 형성하여 발바닥과 지면 양측에 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 지형행렬의 요소들은 5단계의 높이를 가지고 최고 1cm의 요철면으로 설정하였다. 보행은 총 10번의 로봇이 총 10번 걸음을 하는 중, Fig. 1과 같이 설정된 4번의 비평탄면의 보행으로 이루어진다.

2.2 6자유도 환경모델

2족보행로봇의 보행 시 발바닥과 지면은 항상 충돌하게 되며 이러한 충돌은 지면환경을 모델링하여 구현하였다. 지면의 충돌 모델은 식 (1)의 환경모델을 이용하였다. 식 (1)에서 k 와 c 는 각각 스프링계수와 댐핑계수를 나타내며 실험적인 방법으로 결정하였다. δ 와 $\dot{\delta}$ 은 지면의 수직변형량과 시간에 따른 수직변형량의 변화율이다. 지수 m_1 과 m_2 는 발바닥이 지면과 충돌 시 비선형 특성을 발생시키며 m_3 는 만입 댐핑특성을 결정한다. ($i=1,2,\dots,12$)

$$f_{z,i} = k\delta_z^{m_1} + c \left| \frac{\dot{\delta}_z}{\delta_z} \right|^{m_2} \delta_z^{m_3} \quad (1)$$

수평방향의 힘에 대해서는 아래 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현된다.

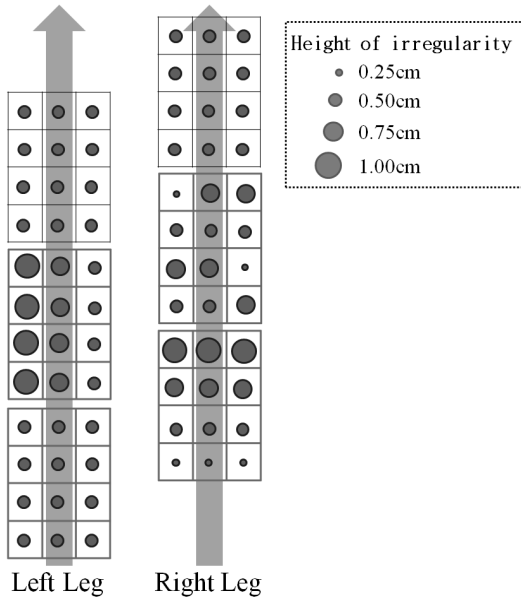


Fig. 1 Shapes of Uneven Surface

$$f_{x,i} = -c_h \dot{x} \tag{2}$$

$$f_{y,i} = -c_h \dot{y}, \tag{3}$$

여기서 x 와 y 는 발바닥이 지면에 접촉한 후, 그 지점으로부터 이동하는 거리이다. 식 (1) - (3)을 이용하여 구한 3자유도의 힘과 발바닥에서의 센서의 위치를 이용하여 아래와 같이 모멘트를 구한다.

$$\vec{\tau} = \sum_{i=1}^{12} \vec{r}_i \times \vec{f}_i, \tag{4}$$

여기서 $\vec{f}_i = [f_{x,i} \ f_{y,i} \ f_{z,i}]^T$.

2.3 2족보행로봇 모델

본 논문에서 이용한 2족보행로봇의 자유도는 하체 12자유도이며 각 다리마다 6자유도의 액추에이터를 포함하고 있다. 시뮬레이션은 MATLAB의 SimMechanics를 이용하였다. Fig. 2는 2족보행로봇 모델을 나타낸 것이다.

3. 의사-임피던스 제어를 이용한 발바닥의 움직임 조절

3.1 몸체와 다리의 궤적생성

2족보행로봇의 궤적을 생성하기 위해 지지상태의 발과 몸체의 궤적을 GCIPM(Gravity Compensated Inverted Pendulum Model)을 이용하여 구하였다.⁽¹⁵⁾

Table 1 Biped robot model parameters

	몸통	허벅지	정강이	발바닥	전체
무게(kg)	4	1.5	1.2	0.8	11
길이(cm)	12	15	15	18	50

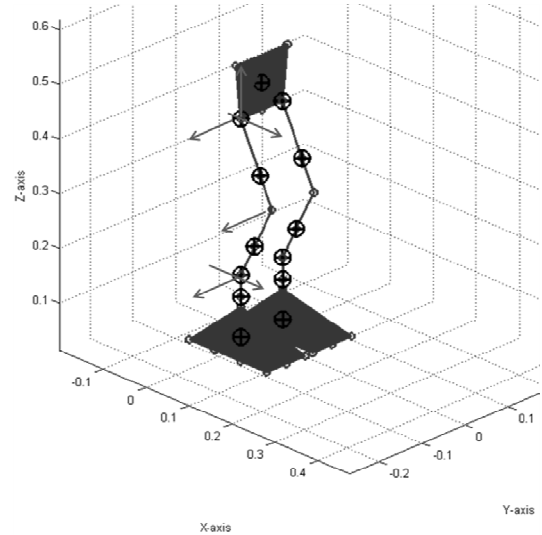


Fig. 2 Biped robot model

발바닥의 스윙상태에서의 궤적은 지면과의 접촉상태에서의 위치와 속도, 가속도의 연속조건을 만족할 수 있도록 다음과 같이 속도에 대해 다항식의 형태로 구하였다. 이렇게 구해진 속도에 대해 자코비안 행렬을 이용하여 각 관절의 궤적을 구하였다. 구한 발의 스윙궤적을 나타내면

$$\dot{x} = 30 \frac{S}{T_s^5} t^2 (t - T_s)^2, \tag{5}$$

$$\dot{y} = 0, \tag{6}$$

$$\dot{z} = -6 \frac{f_{\max}}{(T_s/2)^6} t^2 (t - T_s)^2 (t - 0.5T_s), \tag{7}$$

여기서 T_s 는 단일지지(Single Support Phase) 단계에서의 전체시간을 의미하며, f_{\max} 는 스윙하는 다리의 발바닥이 지면으로부터 떨어지는 최고점의 높이를, S 는 스윙하는 다리의 보폭을 의미한다.

3.2 걸음걸이 상태 및 제어전략

인간의 보행은 발꿈치가 닿는 단계, 하중을 지지하는 스탠스 단계, 공중에서 발이 이동하는 스윙단계로 구분이 가능하다. 반면 2족보행로봇의 경우 강체로 만들어진 평평한 발바닥을 가지고 있으며 이로 인해 유연하며 자연스러운 발꿈치

접촉은 구현하기가 어렵다. 이로 인해 많은 2족보행로봇의 경우 발바닥의 궤적은 지면과 평행을 이루도록 구현된다. 이러한 발바닥의 특성을 가지는 2족보행로봇은 지면과 접촉할 때 안정된 접촉을 위해 3점 이상의 접촉점을 가지도록 발바닥을 지면과 평행하게 궤적을 완성하게 된다. 따라서 2족보행로봇의 걸음걸이의 진행은 크게 스탠스단계와 스윙단계로 구분할 수 있다.

또한 2족보행로봇은 보행 시 발바닥과 지면이 접촉하는 순간 발생하는 충격을 흡수하거나 완화할 수 있는 운동을 주어야 하며 이러한 운동을 통해 발생한 궤적의 변화는 다음 스탠스 상태와 스윙상태에서는 원래의 궤적으로 회복 할 수 있어야 한다. 이를 위해 Chung과 Park은 걸음걸이의 상태를 하중이 이동하는 하중이동단계(Weight Acceptance Phase)와 스탠스단계의 발이 스윙단계로 바뀌면서 시작되는 단일지지단계(Single Support Phase)로 구분하였다. 이러한 단계구분에 제어전략을 추가하여 평탄면 보행에 대해 2족 보행로봇이 안정되게 보행함을 보였다.

하지만 비평탄면 보행을 위해서는 발바닥이 지면에 대해 순응하는 과정이 필요하며 이를 착지단계(Landing Phase)라 하여 하중이동상태를 또 다시 랜딩상태와 하중이동상태로 구분하였다. 본 논문에서도 랜딩단계와 하중이동단계, 단일지지단계에 임피던스 계수를 각 걸음걸이 단계마다 조절하여 모델의 특성을 변화시켰다. 이를 통해 발바닥이 지면의 형상에 맞게 적응움직임을 갖도록 하였다. 착지단계에서 하중이동단계로의 전환은 각 발바닥의 접촉점이 설정된 안정영역으로 위치할 때 이루어 지도록 하였다.

3.3 의사-임피던스 모델

스탠스상태의 다리에 대해서는 계산-토크 제어를 스윙상태의 다리에 대해서는 임피던스 제어를 사용하였다.^(15,16) 이는 인간이 보행 시 근육이 경직되고 이완하는 것을 모방하였으며 이를 2족보행로봇에 적용하여 6축의 제어목표 힘을 설정하고 안정된 보행을 구현하였다. 또한 임피던스 제어가 계산-토크 제어만을 이용했을 때보다 로봇의 물성치의 불확실성과 지면의 높이 차이에 대해 더 강인함을 보였다.

인간의 비평탄면에서의 보행은 스윙단계의 발이 하중이동단계로 바뀌기 이전 지면의 형상에 맞추어 적응하는 단계가 있다. 이 순간에 인간의 발목은 단지 지면에서 들어오는 힘/모멘트의 특성

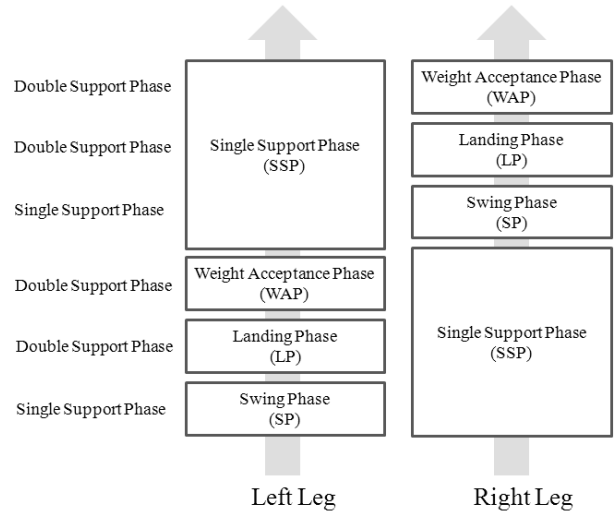


Fig. 3 Locomotion phase

특성에 맞추어 발바닥의 자세를 바꾼다. 발바닥의 자세를 수정하여 지면과 접촉한 후 하중이동단계로 넘어가며 스탠스 단계였던 발이 스윙단계로 바뀌면서 또 다른 스탠스 단계로 전환하게 된다. 본 논문에서 제안한 비평탄면에서의 제어 알고리즘은 이러한 인간의 보행특성을 나타내도록 구현하였다. 본 논문에서 제안한 하나의 다리에 대한 의사-임피던스 모델은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_r & \\ & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_{cr} \\ \ddot{q}_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_r & \\ & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{cr} \\ \dot{q}_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_r & \\ & K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{cr} \\ q_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{s,r} \\ \tau_{s,p} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

여기서 I_r 와 I_p 는 발목에 대해 발바닥의 롤축과 피치축에 대한 관성 모멘트를 의미하며, C_r 과 C_p 는 제안된 의사-임피던스 모델의 댐핑계수를 롤축과 피치축에 대해 정의한 것이다. 또한 $\tau_{s,r}$ 과 $\tau_{s,p}$ 는 각각 발목에 부착된 힘센서로부터 측정된 롤축과 피치축의 모멘트를 의미하며 q_{cr} 과 q_{cp} 는 이들 모델로부터 계산된 보상각을 의미한다. 계산된 보상각은 아래 식 (9), (10)과 같이 발목각에 더해지게 된다.

$$\dot{q}'_{ar} = q_{ar} + \dot{q}_{cr}, \quad (9)$$

$$\dot{q}'_{ap} = q_{ap} + \dot{q}_{cp}, \quad (10)$$

여기서 q_{ar} 과 q_{ap} 는 궤적 생성으로부터 유도된

발목의 롤축 궤적이며 q'_{ar} 과 q'_{ap} 는 보상되어 실제발목이 가지는 궤적이 된다. 보행하는 중에 발바닥에서 발생하는 수직력을 제어하기 위한 의사-임피던스 모델은 수식 (11)로 표현되며

$$M_z \ddot{z} + C_z \dot{z} + K_z z = F_z - F_z^d, \quad (11)$$

여기서 M_z 와 C_z , K_z , z 는 수직력을 보상하기 위한 질량, 댐핑계수, 스프링계수, 보상높이를 의미하며 F_z 와 F_z^d 는 각각 센서로부터 측정된 수직력과 2족보행로봇의 보행상태에 따른 사용자가 원하는 수직력을 의미한다.

이렇게 제안된 의사-임피던스 모델이 2족보행로봇의 보행안정성을 높이기 위해서는 2족보행로봇이 보행 시 임피던스 특성을 걸음걸이 상태에 따라 변화시켜 주어야 한다. 이는 지면과의 작용과 궤적의 추종성능을 보장하기 위한 것이다. Fig. 3에서 하나의 다리는 스윙단계, 착지단계, 하중이동단계, 스탠스 단계의 변화를 거친다. 이 때 각각의 걸음걸이 상태에 따른 임피던스 조절은 다음과 같다.

우선 착지단계에 있는 발바닥은 지면의 형상에 적응하는 움직임 가져야 하며 이를 위해 식 (7)의 롤축과 피치축에 해당하는 K_r 과 K_p 를 0으로 설정하였다. 랜딩상태에서는 외부에서 들어오는 모멘트에 의해 움직임이 일어나도록 하였다. q_{cr} 과 q_{cp} 에서 첨자c는 보상각을 r과 p는 각각 롤축과 피치축을 의미한다.

랜딩상태의 종료는 발바닥의 적응움직임이 완료된 후 발바닥의 접촉점이 안정된 영역으로 이동했을 때 이루어지며 다음 상태인 하중이동상태로 접어들게 된다. 이 상태와 스탠스 상태에서는 적응움직임이 완료된 상태를 유지하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_{cr} \\ \ddot{q}_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{q}_{cr} \\ \dot{q}_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

스윙단계에 있는 발은 q_{cr} 과 q_{cp} 을 복구시키게 되며 이를 위해 K_r 과 K_p 를 각각 800 N·m 과 500 N·m 으로 설정하며 이 때의 의사-임피던스 모델의 거동이 임계감쇠특성을 보이도록 조절하였다.

또한 지면과의 수직력을 제어하기 위한 의사-임피던스 모델의 파라미터 변화는 다음과 같다. 착지단계에서는 추종할 수직력을 20 N, 하중이동 단계에서는 40 N으로 설정하였다. 스탠스 단계와 스윙단계에서는 궤적추종성능을 높이기 위해 각각

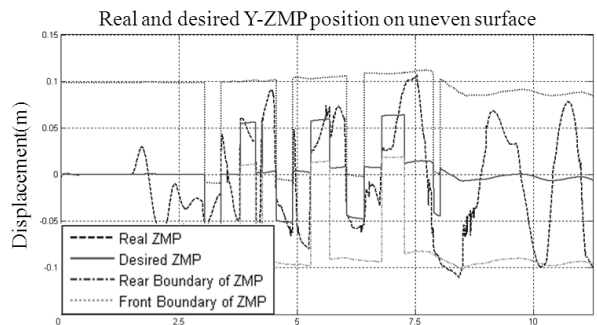
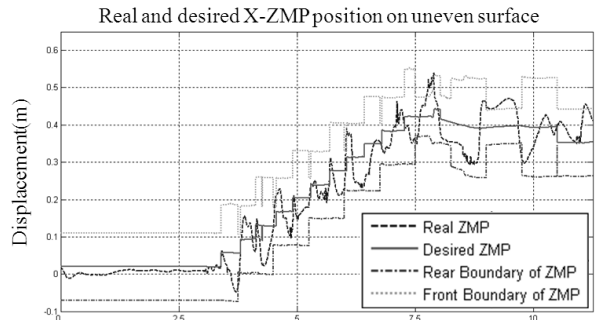


Fig. 4 Trajectory of ZMP during a walk on an irregularly protruded uneven surface without the proposed ankle control

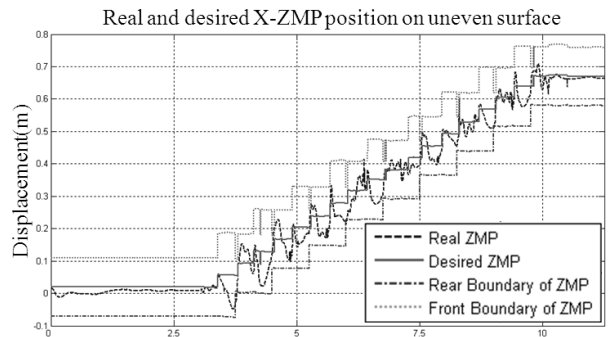


Fig. 5 Trajectory of ZMP during a walk on an irregularly protruded uneven surface with the proposed ankle control based on the proposed pseudo-impedance model

로봇의 전체 하중과 0 N으로 설정하였다.

4. 시뮬레이션

제안된 의사-임피던스를 이용한 발바닥의 움직임 조절 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 2.1에서 언급한 지형 행렬을 이용하였으며 전체 무게는 16 kg 이고 2족보행로봇의 신장은 56 cm 이다. 전체 보행주기는 0.75 sec이며 보폭은 8 cm이다.

전체의 과정은 초기 로봇이 정지한 상태에서 몸체

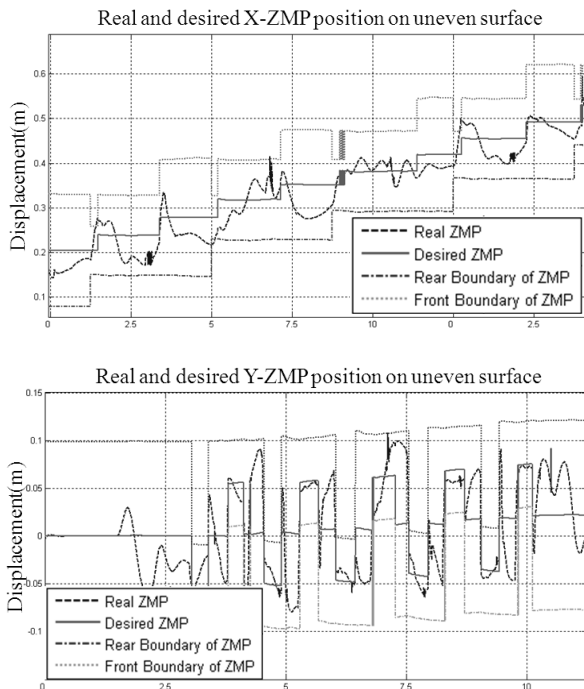


Fig. 6 Trajectory of ZMP in the forward and lateral directions during a walk on an irregularly protruded uneven surface with the proposed ankle control based on the proposed pseudo-impedance model

를 오른쪽으로 기울인 후 왼쪽발의 반걸음 으로부터 시작된다. 이후 2번의 걸음 후에 4번의 비평탄면을 보행하게 된다. 비평탄면에서의 보행 이후 2번의 걸음과 1번의 반걸음을 걷고 로봇이 보행을 마치도록 이루어져 있다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 의사-임피던스 모델을 적용하지 않았을 경우 보행 시 ZMP가 안정영역 밖으로 벗어났다. 또한 보행의 걸음걸이 상태의 전환이 원활하게 이루어지지 않아 앞으로 걷지 않고 제자리에서 불안정하게 머물러 있었다.

그러나, 제안된 방법을 적용한 결과는 Fig. 5와 같이 성공적으로 10번의 보행이 이루어졌다. Fig. 6은 요철이 있는 비평탄면에서 각 걸음걸이의 상태에 따른 ZMP의 정보를 확대 표시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비평탄면에 대해서도 ZMP가 안정영역에 존재함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 요철이 있는 비평탄면에서의 발바닥의 적응 움직임을 위한 의사-임피던스 모델이 제안되었다. 제안된 의사-임피던스 모델의 유효성을

검증하기 위해 2족보행로봇의 보행 거동에서 순응 접촉모델과 운동마찰을 고려한 6자유도의 환경모델에서 시뮬레이션 되었으며, 하나의 발바닥에 접촉될 수 있는 4×3의 요철 요소의 높이가 각각의 0~1 cm사이 5단계로 모델링된 지형에 대해서 제안된 의사-임피던스 모델을 적용했을 때와 적용하지 않았을 경우를 비교하였다. 제안된 의사-임피던스 모델을 적용하여 로봇이 안정된 보행을 수행하였다. 또한 설정된 요철이 있는 지형에 대해서 별도의 on-line 균형제어가 없어도 안정된 보행을 유지함을 보였다. 이에 더불어, on-line 자세제어 혹은 균형제어를 통해 좀 더 일반적인 비평탄면에 대해서도 제안된 방법을 확대 적용할 연구가 추천된다.

후 기

본 논문은 인간기능생활지원지능로봇사업단의 창의과제 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Takanishi, A., Lim, H., Tsuda, M. and Kato, I., 1990, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface," *Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 323~330.
- (2) Yamaguchi, J. and Takanishi, A., 1996, "Multisensor Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Dynamic Biped Walking Adapting to Unknown Uneven Surface," *Proc. of IEEE/SICE/RSJ Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 233~240.
- (3) Yamaguchi, J., Kinoshita, N., Takanishi, A. and Kato, I., 1996, "Development of a Dynamic Biped Walking System for Humanoid -Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Humans' Living Floor," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 232~239.
- (4) Kajita, S. and Tani, K., 1996, "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on Realtime Sensing of the Ground Profile," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 570~577.
- (5) Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D. and Stokic, D., 1990, *Biped locomotion - Dynamics, Stability, Control and Application*, Springer-Verlag.
- (6) Park, J. H. and Chung, H. A., 1999, "Impedance Control and Modulation for Stable Footing in Locomotion of Biped Robot," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1786~1791.

- (7) Fujimoto, Y., Obata, S. and Kawamura, A., 1998, "Robust Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2030~2035.
- (8) Wang, G., Huang, Q., Geng, J., Deng, H. and Li, K., 2003, "Cooperation of Dynamic Patterns and Sensory Reflex for Humanoid Walking," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2472~2477.
- (9) Kim, E. S. and Park, J. H., 2005, "Foot Adjusting Motion on Irregularly Protruded Uneven Surface for Biped Robots," *Proc. of KSME 2005 Fall Annual Meeting*, 2657-2652.
- (10) Park, J. H. and Kim, E. S., 2009, "Foot and Body Control of Biped Robots to Walk on Irregularly Protruded Uneven Surface," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 39, No. 1, pp. 289~297.
- (11) Park, J. H. and Kim, K. D., 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3528~3533.
- (12) Chung, H. A. and Park, J. H., 2000, "Control of Biped Robots Based on Impedance Control and Computed-Torque Control," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1513~1519.
- (13) Park, J. H., 2001, "Impedance Control of Biped Locomotion," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 870~882.