

지면에 고정되어 있지 않은 여유자유도 매니퓰레이터의 운동계획 알고리즘

Motion Planning Algorithms for Kinematically Redundant Manipulator Not Fixed to the Ground

유동수, 소병록, 이병주*, 김희국
(Dongsu Yoo, Byung Rok So, Byung-Ju Yi, and Wheekuk Kim)

Abstract : This paper deals with motion planning algorithm for kinematically redundant manipulators that are not fixed to the ground. Differently from usual redundant manipulators fixed to the ground, the stability issue should be taken into account to prevent the robot from falling down. The typical ZMP equation, which is employed in human walking, will be employed to evaluate the stability. This work proposes a feed forward ZMP planning algorithm. The algorithm embeds the 'ZMP equations' indirectly into the kinematics of the kinematic model of a manipulator via a ZMP stability index. The kinematic self motion of the redundant manipulator drives the system in such a way to keep or plan the ZMP at the desired position of the footprint. A sequential redundancy resolution algorithm exploiting the remaining kinematic redundancy is also proposed to enhance the performances of joint limit index and manipulability. In addition, the case exerted by external forces is taken into account. Through simulation for a 5 DOF redundant robot model, feasibility of the proposed algorithms is verified. Lastly, usual applications of the proposed kinematic model are discussed.

Keywords : kinematically redundant manipulator, ZMP, motion planning

I. 서론

작업 공간에서의 자유도보다 많은 관절을 지닌 여유 자유도 매니퓰레이터에 대한 연구는 그동안 활발하게 진행되어 왔다. 이러한 여유 자유도 매니퓰레이터 시스템들은 일반적으로 4 또는 6자유도를 지니는 산업용 로봇과 비교해 많은 수의 관절을 가지고 있음으로 인하여 여유 자유도를 활용한 자가 운동으로 다양한 동작을 구현할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 이에 대한 다양한 연구 사례들이 발표되었다.

최근에는 로봇의 활용분야가 다양해짐에 따라서 단순한 매니퓰레이션 기능에 더하여 이동 기능에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 이동 기능을 지닌 로봇의 특성은 로봇이 지면에 고정되어 있지 않고 이동성을 가진다는 점이다. 대표적인 사례로는 모바일 로봇시스템, 휴머노이드 시스템 등을 나열 할 수 있다. 이러한 시스템들은 매니퓰레이션 기능과 이동 기능의 적절한 조합으로 시스템의 성능을 극대화 할 수 있으며, 특별히 기구학적으로는 여유자유도 매니퓰레이터로 모델 가능하다.

모바일 로봇시스템은 이동 기능을 담당하는 모바일 로봇과 매니퓰레이션 기능을 담당하는 매니퓰레이터로 구성되는 여유 자유도 시스템이며, 매니퓰레이터의 운동에서 유발되는 큰 관성력이 모바일 로봇이 넘어지거나 기울지 않도록 하는 연구가 필요하다. 한 예로서, Kim 등은[1] 3자유도 모바일 로봇 시스템에 대하여 동역학적 널모션(Null motion)을 이용한 실시간 ZMP 보상 방법을 소개하였다.

휴머노이드 시스템은 이동을 담당하는 두 다리와 매니퓰레이션을 담당하는 상체 및 두 팔로 구성되어 있다. 이러한 휴머노이드 시스템은 모바일 로봇과 마찬 가지로 주어진 동작을 하기에 필요한 자유도 이상의 관절을 지니는 여유 자유도 시스템임을 관찰할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 시스템들의 기본 모델로 간주 되는 지면에 고정되어 있지 않은 여유 자유도 매니퓰레이터의 운동 계획 알고리즘에 대한 연구를 수행하고자 한다. 그럼 1은 본 연구에서 예제로 하는 평면형 여유 자유도 매니퓰레이터를 나타낸다. 로봇의 베이스는 지면에 고정되어 있지 않고 지면과 면 접촉을 하는 사각형으로 모델링 하였다. 모바일 로봇 시스템에서는 사각형이 모바일 플랫폼에 해당되고, 휴머노이드 시스템에서는 사각형이 발바닥에 해당 된다. 그럼 1의 예로는 모바일 플랫폼 위에 탑재된 매니퓰레이터가 동작하는 경우, 휴머노이드의 두 발이 지면에 접한 경우에 몸체가 상하로 동작하는 경우, 지면에 놓인 무게를 드는 경우 또는 상체에서 외력을 받는 경우 등에 해당한다. 또한 두 발이 지면에 접지 상태에서 도약(jumping) 하기 전 단계 또는 공중에서 지면에 착지할 때 착지(landing) 후 단계 등에 해당된다. 보다 발전된 경우는 두 발을 활용한 보행을 예로 들 수 있다.

지면에 고정되지 않은 로봇시스템의 동작에 있어서 우선적으로 전제되어야 하는 것은 넘어지지 않게 하는 안정성으로, 이러한 안정성을 판단하는 기준으로 1970년 Vukobratovic [2]이 소개한 ZMP(Zero Moment Point)를 활용할 수 있다. ZMP란 중력 가속도와 관성에 의해 발생되는 힘의 모멘트 합의 수평 성분이 영인 지점을 의미하며, 이 개념은 이족 보행의 안정화 표준이 되어 왔다. 그 후 많은 연구자들은 ZMP 궤적 보상 방법을 찾기 위해 노력해 왔다. Li, Takanishi와 Kato[3]는

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 5. 31., 채택화정 : 2004. 8. 31.

유동수, 소병록, 이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부
(fireball130@hotmail.com/newmal@ihanyang.ac.kr/bj@hanyang.ac.kr)
김희국 : 고려대학교 제어계측공학과(wheekuk@korea.ac.kr)

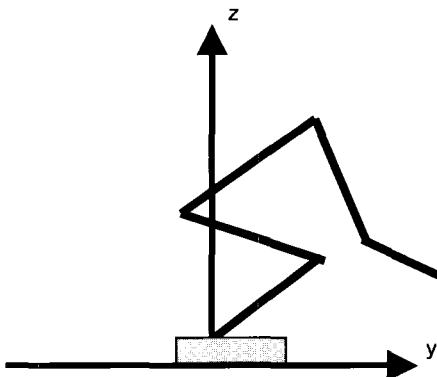


그림 1. 지면에 고정되지 않은 여유자유도 매니퓰레이터 모델.
Fig. 1. Redundant manipulator not fixed to the ground.

몸통을 가지는 이족보행 로봇을 위한 ZMP 보상 알고리즘으로 학습제어 방법을 제안하였으며, Dasgupta와 Nakamura [4]는 인간의 모션 캡처 데이터를 이용해 적절한 보행 동작을 만들어 냈고, Park과 Kwon[5]은 미끄러운 표면에서 온라인 ZMP 보상을 위해 반사(reflex) 제어 방법을 사용하였다. 또한, Park과 Rhee[6]는 ZMP 궤적 생성을 위하여 퍼지 제어를 이용한 오프라인 방법을 제안하였다. Kurazume, Hasegawa와 Yoneda[7]는 안정된 ZMP 궤적을 쉽게 생성하기 위해 상체를 흔드는 보상 방법을 제안하였으며, Inoue, Yoshida, Arai와 Mae[8]는 상체의 조작성과 ZMP 안정성을 고려한 실시간 임피던스 제어 방법을 소개하였지만 여유 자유도 개념을 적용하지 않았다.

기존의 모바일 로봇 시스템과 두 다리 보행에 대한 연구에서는 ZMP 보상과 여유 자유도에 대한 직접적인 연계를 다루지 않고 있음을 살펴 볼 수 있다. 본 논문에서는 기구학적 여유 자유도를 활용하는 feed forward ZMP 계획(planning)을 소개하고자 한다. 즉, 원하는 모션과 ZMP 안정도를 동시에 만족할 수 있도록 ZMP 조건을 ZMP 안정성 지수를 매개로 하여 로봇 시스템의 기구학적 관계에 직접적으로 삽입할 수 있는 알고리즘을 제시함으로써, 매니퓰레이터의 자가 운동(self motion)을 이용하여 ZMP를 발바닥의 일정한 또는 일련의 계획한 부분에 위치하게 하여, 로봇이 넘어지지 않고 원하는 동작을 할 수 있는 기구학적 알고리즘을 제안한다. 또한 ZMP 안정성을 만족시킨 이후, 여분의 기구학적 여유 자유도를 이용하여 조작성(manipulability)을 최대화하고 관절 제한(joint limit) 위반을 최소화 하는 통합적인 여유 자유도 알고리즘을 제안하고, 외부 힘의 가해진 경우에도 동일한 알고리즘을 이용하여 ZMP 안정성을 만족시킴을 제시한다. 그리고, 제안된 알고리즘의 효용성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

II. ZMP의 정의

ZMP(zero moment point)는 중력 가속도와 관성에 의해 발생되는 힘의 모멘트 합의 수평 성분이 영인 지점을 의미한다. 로봇이 넘어 지지 않기 위해서는 ZMP가 로봇의 지지점과 바닥의 경계를 이어 만들어진 지지 영역 안에 존재해야 한다.

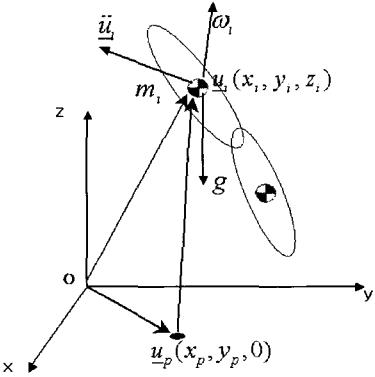


그림 2. ZMP의 개념.
Fig. 2. Calculation of ZMP.

그림 2에서, \ddot{u}_i , ω_i 와 I_i 는 각각 i 번째 링크의 가속도 벡터, 각각 속도 벡터, 그리고 관성 행렬을 나타낸다. x-y 평면 상의 점 u_p 가 모멘트의 합이 영인 점이라 할 때, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_i (u_i - u_p) \times m_i(u_i - g) + \sum_i (I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i) = 0 \quad (1)$$

여기서

$$u_p = (x_{ZMP}, y_{ZMP})^T$$

(1)로부터, ZMP 의 x와 y 위치는 (2)와 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_i m_i\ddot{x}_iz_i - \sum_i (\tau_y)_i}{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (2)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_i m_i\ddot{y}_iz_i + \sum_i (\tau_x)_i}{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (3)$$

여기서, $(\tau_x)_i$ 와 $(\tau_y)_i$ 는 각각 i 번째 링크의 중심에 가해지는 x와 y 방향으로의 관성모멘트에 해당된다.

III. ZMP 안정도를 고려한 여유자유도 분배 알고리즘

1. ZMP 안정도 지수

Huang, Sugano와 Kato[9]는 ZMP 안정도 지수를 제안하였고, Kim, Chung과 Youm [1]은 1 자유도 모바일 로봇에 2 자유도 평면형 로봇이 탑재된 시스템의 ZMP 안정도를 조사하기 위해 다음과 같은 안정도 지수를 사용하였다.

$$\Phi(\theta) = \left(1 - \left(\frac{x_{ZMP} - x_{MSP}}{x_{BSR}}\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{y_{ZMP} - y_{MSP}}{y_{BSR}}\right)^2\right) \quad (4)$$

그림 3에서 안정 범위가 직사각형 형태일 때, 가장 안정된 점은 안정 범위의 중앙이 되며, 여기서 x_{BSR} 와 y_{BSR} 는 각각

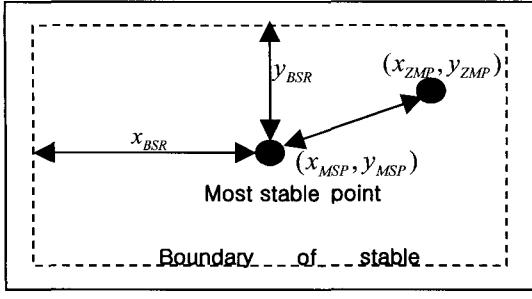


그림 3. 안정 범위.

Fig. 3. Diagram of stable region.

안정 범위 내의 가장 안정된 점으로부터 x와 y 방향의 거리를 나타낸다.

그러나, 안정도 지수는 방향에 따라 서로 독립적이고 다른 관절들에 의하여 영향을 받을 수 있으므로 다음과 같은 식으로 분리하여 사용하는 것이 효과적이다.

$$\Phi_x = 1 - \left(\frac{x_{ZMP} - x_{MSP}}{x_{BSR}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\Phi_y = 1 - \left(\frac{y_{ZMP} - y_{MSP}}{y_{BSR}} \right)^2 \quad (6)$$

여기서, 분리된 안정도 지수는 각각 x와 y 방향으로 표시되므로, 두 개의 조건은 독립적으로 동시에 만족하게 된다. ZMP 안정도 지수의 음의 값은 ZMP가 안정 범위를 벗어남을 의미하며, 이 경우 ZMP는 ZMP가 가장 안정적인 점 (x_{BSR}, y_{BSR}) 으로부터의 먼 거리에 존재하여, 이 결과로 로봇은 넘어지게 된다. 반면에 ZMP가 안정 범위 내에 존재하면, 안정도 지수가 0과 1사이에 존재한다. 특히, 안정도 지수가 1이 되면 ZMP가 가장 안정적인 점에 존재하며, 이 경우 로봇 시스템이 가장 안정하다고 정의할 수 있다.

2. ZMP 안정화 알고리즘

최상의 안정도를 보장하기 위해서는 (5)와 (6)에서 주어진 안정도 지수가 1이 되어야 하며, 다음과 같은 두 개의 식으로 재정리 할 수 있다.

$$x_{ZMP} - x_{MSP} = 0, \quad (7)$$

$$y_{ZMP} - y_{MSP} = 0 \quad (8)$$

(2)와 (3)을 (7)과 (8)에 각각 대체하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_i (\tau_y)_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} - x_{MSP} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_i (\tau_x)_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} - y_{MSP} = 0. \quad (10)$$

그리고, (9)와 (10)을 재정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_i m_i \ddot{z}_i x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_i m_i \ddot{z}_i x_{MSP} - \sum_i (\tau_y)_i = C_x \quad (11)$$

$$\sum_i m_i \ddot{z}_i y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_i m_i \ddot{z}_i y_{MSP} + \sum_i (\tau_x)_i = C_y, \quad (12)$$

여기서,

$$C_x = - \sum_i m_i x_i g \quad (13)$$

$$C_y = - \sum_i m_i y_i g \quad (14)$$

i 번째 링크의 중심에 가해지는 관성모멘트는 다음 식으로 표시되며,

$$\underline{\tau}_i = [I_i] \ddot{\theta} + \dot{\theta} \times [I_i] \dot{\theta} \quad (15)$$

이 식 또한 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{\tau}_i = [I^{jk}] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [P^{jk}] \dot{\theta} \quad (16)$$

여기서, $\theta \in \mathbb{R}^n$, $[I^{jk}] \in \mathbb{R}^{2 \times n}$, $[P^{jk}] \in \mathbb{R}^{2 \times n \times n}$ 그리고

$$\underline{\tau}_i = \begin{pmatrix} (\tau_x)_i \\ (\tau_y)_i \end{pmatrix}$$

유사하게, 작업공간의 가속도는 다음 식으로 나타낼 수 있는데

$$\ddot{u} = [J] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H] \dot{\theta} \quad (17)$$

여기서, $u \in \mathbb{R}^m$, $[J] \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 그리고 $[H] \in \mathbb{R}^{m \times n \times n}$.

(17)의 가속도 식은 다음과 같은 세 개의 요소로 구성되어 진다.

$$\ddot{x} = [J]_{1;:} \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H]_{1;:} \dot{\theta}$$

$$\ddot{y} = [J]_{2;:} \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H]_{2;:} \dot{\theta}$$

$$\ddot{z} = [J]_{3;:} \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H]_{3;:} \dot{\theta}$$

여기서 $[J]_{i,:} \in \mathbb{R}^n$ 와 $[H]_{i,:} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 각각 $[J]$ 와 $[H]$ 의 i 번째 행과 i 번째 평면을 나타낸다.

세 개의 가속도 관계식과 (16)을 (11)과 (12)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\underline{C} = [J_m] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H_m] \dot{\theta} \quad (18)$$

여기서, $[J_m] \in \mathbb{R}^{2 \times n}$ 그리고 $[H_m] \in \mathbb{R}^{2 \times n \times n}$

$$\underline{C} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix}$$

$$[J_m] = \begin{bmatrix} \sum_i (m_i x_i [J_i]_{3;} - m_i z_i [J_i]_{1;}) - m_i x_{MSP} [J_i]_{3;}) + [I^{jk}]_{1;:} \\ \sum_i (m_i y_i [J_i]_{3;} - m_i z_i [J_i]_{2;}) - m_i y_{MSP} [J_i]_{3;}) + [I^{jk}]_{2;:} \end{bmatrix}$$

$$[H_m]_{1;:} = [m_i x_i [H_i]_{3;:} - m_i z_i [H_i]_{1;:} - m_i x_{MSP} [J_i]_{3;:} - [P^{jk}]_{1;:}]$$

$$[H_m]_{2;:} = [m_i y_i [H_i]_{3;:} - m_i z_i [H_i]_{2;:} - m_i y_{MSP} [J_i]_{3;:} - [P^{jk}]_{2;:}]$$

2.1 보강 자코비안 방법(Augmented Jacobian Method)

(17)과 (18)을 다음과 같은 행렬식으로 결합시킬 수 있으며

$$\begin{bmatrix} \ddot{\underline{u}} \\ \underline{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ J_m \end{bmatrix} \dot{\underline{\theta}} + \dot{\underline{\theta}}^T \begin{bmatrix} H \\ H_m \end{bmatrix} \dot{\underline{\theta}} \quad (19)$$

(19)의 해는 원하는 작업 궤적과 최상의 ZMP 안정도를 동시에 보장하게 되며, 시스템이 기구학적 여유자유도를 가지고 있을 때에는, (19)의 해는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\underline{\theta}} = \begin{bmatrix} J \\ J_m \end{bmatrix}^+ \left(\begin{bmatrix} \ddot{\underline{u}} \\ \underline{C} \end{bmatrix} - \dot{\underline{\theta}}^T \begin{bmatrix} H \\ H_m \end{bmatrix} \dot{\underline{\theta}} \right) + \left([I] - \begin{bmatrix} J \\ J_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} J \\ J_m \end{bmatrix} \right) \underline{\varepsilon}_1 \quad (20)$$

여기서, 기호 '+'는 가상역행 연산(pseudo-inverse)이며, $\underline{\varepsilon}_1$ 는 임의의 벡터이고, 관절 각들은 (20)의 결과로 주어진 각 가속도를 두 번 수치 적분하여 얻어낸다.

2.2 영공간 방법(Null-space method)

ZMP 안정화 상태를 보장하는 다른 방식으로 다음과 같이 (17)의 일반적인 해를 이용한다.

$$\ddot{\underline{\theta}} = J^+ (\ddot{\underline{u}} - \dot{\underline{\theta}}^T [H] \dot{\underline{\theta}}) + ([I] - J^+ J) \underline{\varepsilon}_1. \quad (21)$$

(21)을 (18)에 대입하고 $\underline{\varepsilon}_1$ 에 대해 정리하면 다음 식이 얻어지고

$$\underline{\varepsilon}_1 = [J_m (I - J^+ J)]^+ (-J_m J^+ (\ddot{\underline{u}} - \dot{\underline{\theta}}^T [H] \dot{\underline{\theta}}) - C - \dot{\underline{\theta}}^T [H_m] \dot{\underline{\theta}}) \quad (22)$$

(22)를 (21)에 대입하여 각가속도를 얻어낸다.

IV. 기구학적 여유자유도 분배 알고리즘

여유 자유도 매니퓰레이터는 원하는 동작에 필요한 자유도 보다 많은 관절을 가지고 있으므로, 이러한 여유 자유도를 기구학적, 동역학적 성능 향상을 위하여 활용할 수 있다. 본 논문에서는 여러 가지 활용 가능한 부척도(sub-criteria) 중에서 조작성과 관절제한 기법을 적용한다.

1. 관절 제한 지수(Joint limit Index)

i 번째 관절각의 운동 범위를 e_i 라 할 때, 관절 제한 지수는 다음과 같이 나타내어지며,

$$p_1 = \sum_i \frac{(\theta_i - \theta_{i_0})^2}{e_i^2} \quad (23)$$

여기서, e_i , θ_i , θ_{i_0} 는 각각 i 번째 관절각의 운동 범위, i 번째 관절각, i 번째 관절각의 평균값을 나타낸다.

이 때, 관절 제한 지수는 각각의 관절이 관절 제한에 이르지 않도록 하기 위해서는 최소화되어야 하며, 관절 제한 지수를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\dot{p}_1 = B(\underline{\theta}) \dot{\underline{\theta}} \quad (24)$$

(24)를 시간에 대해 다시 한번 미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{p}_1 = B_1 \ddot{\underline{\theta}} + \dot{\underline{\theta}}^T H_1 \dot{\underline{\theta}} = \delta_1 \quad (25)$$

관절 제한 지수를 최소화 하기 위해서 \ddot{p}_1 는 양의 값을 가져야 하며 (i.e., $\delta_1 > 0$), 또한, (20)을 (25)에 대입하고 $\underline{\varepsilon}_1$ 에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_1 = K_1^+ (\delta_1 - [B][G]^+ (\ddot{\underline{u}} - \underline{T}) - \dot{\underline{\theta}}^T [H_1] \dot{\underline{\theta}}) + (I - K_1^+ K_1) \underline{\varepsilon}_2 \quad (26)$$

여기서

$$G = \begin{bmatrix} J \\ J_m \end{bmatrix}, \quad \underline{T} = \dot{\underline{\theta}}^T \begin{bmatrix} H \\ H_m \end{bmatrix} \dot{\underline{\theta}}, \quad K = B_1(I - G^+ G)$$

따라서, (26)을 (20)에 대입하여 얻은 최종식은 주어진 작업 공간의 동작을 보장하고 ZMP 안정도에 만족하며 관절 제한을 피하는 해가 된다.

2. 조작성 지수(Manipulability Index)

조작성은 다음과 같은 식으로 정의되며,

$$p_2 = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (27)$$

이는 모션의 등방성과 특이성의 척도로 사용되어 왔으며, 조작성 지수는 특이 자세 근처에서는 영(zero)에 가까워 지므로 그 값은 최대화되어야 한다.

(27)을 시간에 대해 미분하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있고,

$$\dot{p}_2 = B_2(\underline{\theta}) \dot{\underline{\theta}} \quad (28)$$

시간에 대해 다시 한번 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{p}_2 = B_2 \ddot{\underline{\theta}} + \dot{\underline{\theta}}^T H_2 \dot{\underline{\theta}} + D = \delta_2 \quad (29)$$

$$\text{여기서, } D = -\frac{1}{4} p_2^{-\frac{3}{2}} (B_2 \dot{\underline{\theta}})^2$$

조작성 지수를 최대화하기 위해서, 식에 의해 \ddot{p}_2 는 음수의 값이 되어야 하며 (i.e., $\delta_2 < 0$), 또한, (29)는 다음과 같이 나타내어,

$$\delta_2 = K_3 + K_2 \underline{\varepsilon}_1 \quad (30)$$

(30)을 $\underline{\varepsilon}_1$ 에 대해 다음과 같이 정리하면,

$$\underline{\varepsilon}_1 = K_2^+ (-\delta_2 - K_3) + (I - K_2^+ K_2) \underline{\varepsilon}_2 \quad (31)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_2 &= B_2(I - G^+ G) \\ K_3 &= \delta_2 - B_2 G^+ (\ddot{\underline{u}} - \underline{T}) - \dot{\underline{\theta}}^T H_2 \dot{\underline{\theta}} - D \end{aligned}$$

따라서, (31)을 (20)에 대입한 최종식은 주어진 작업 공간의 모션을 보장하고, ZMP 안정도를 만족하며, 또한 조작성을 가능한 한 최대화 시키는 해가 된다.

3. 부척도(Sub-Criteria)의 순차적 적용

충분한 기구학적 여유 자유도는 여러 가지 부척도의 순차적인 적용을 가능케 한다. 여기서, 이용 가능한 기구학적 여유 자유도를 사용하는 방법으로써, 관절각 제한과 조작성 척

도를 순차적으로 적용하는 사례를 살펴 본다. (26)에 의해 주어진 관절 제한 척도의 최종식을 (31)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며,

$$\underline{\delta}_2 = K_5 + K_4 \underline{\varepsilon}_2 \quad (32)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_4 &= B_2(I - K_1^+ K_1) \\ K_5 &= B_2 G^+(\underline{\ddot{u}} - \underline{T}) + BK_1^+(\underline{\delta}_2 - B_1 G^+(\underline{\ddot{u}} - \underline{T}) - \underline{\dot{\theta}}^T B_1 \underline{\dot{\theta}}) \\ &\quad + \underline{\dot{\theta}}^T H_2 \underline{\dot{\theta}} + D, \end{aligned}$$

$\underline{\varepsilon}_2$ 에 대하여 (32)을 정리하여, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\underline{\varepsilon}_2 = K_4^*(-\underline{\delta}_2 - K_5) \quad (33)$$

그리고, (33)을 (26)에 대입하면, 다음과 같은 순차적인 여유자유도 분배 알고리즘의 최종식을 얻을 수 있다.

$$\underline{\ddot{\theta}} = G^+(\underline{\ddot{u}} - \underline{T}) + K_1^+(\underline{\delta}_1 - B_1 G^+(\underline{\ddot{u}} - \underline{T}) - \underline{\dot{\theta}}^T H_1 \underline{\dot{\theta}}) + K_4^+(\underline{\delta}_2 - K_5) \quad (34)$$

이것은 순차적으로 작업공간의 모션과 ZMP 안정도를 보장하며, 관절 제한 척도를 최소화하고 조작성을 최대화 하는 최종 해가 된다.

V. 시뮬레이션

그림 1은 다섯 개의 관절과 여섯 개의 링크로 구성된 5 자유도 평면형 모델을 나타낸다. 모바일 로봇 시스템에서는 정지된 상태의 모바일 플랫폼과 그 위에 탑재한 매니퓰레이터를 나타내고, 휴머노이드에서는 두 발이 지면에 고정된 상태에서 전체 몸체의 상하 운동, 점프나 착지와 같은 동작에 있어서의 전후 동작의 예로 볼 수 있다. 바닥의 링크는 발을 표시하며, 상체 끝 단의 말단장치가 단지 x와 y 방향의 궤적을 제어한다면, 활용할 수 있는 세 개의 자유도가 남게 된다. 시뮬레이션에서는 ZMP 안정화 지수, 관절제한 지수 그리고 조작성 지수의 세 개의 여유 자유도 분배 알고리즘을 적용한다. 이 모델의 기구학적, 동역학적 파라미터들은 표 1에 주어졌다.

1. 시뮬레이션 조건

발의 지지 범위는 발의 중심으로부터 y축의 양의 방향으로 0.2m, 음의 방향으로 0.1m로 주었으며, 모델의 말단 위치는 표 1($\dot{z}(t) = 0.4 \sin(t)$)과 같이 수직 방향(z 방향)으로는 2π 시간 동안 사인 파형의 속도 궤적을 주었고, y방향으로는 일정한 위치를 유지하였다.

2. ZMP 알고리즘을 적용

그림 4에서 보는 것과 같이 ZMP 알고리즘에 의해 생성된 ZMP 안정도 지수는 최대 안정도(ZMP 안정도 지수=1)를 나타내는 구역에 지속적으로 존재하는 반면에, ZMP 알고리즘을 적용하지 않은 경우는 지수 값이 계속적으로 변하며 최대 안정지역에서 멀어지는 현상을 보여주고 있다.

3. ZMP 보상과 관절 제한 알고리즘 적용

ZMP 알고리즘과 관절 제한 알고리즘을 혼합한 경우와 단지

표 1. 링크 파라미터와 시뮬레이션 조건.

Table 1. Link parameters and simulation condition.

링크	1	2	3	4	5
초기 각도	45°	160°	240°	200°	50°
길이 (m)	0.44	0.44	0.52	0.26	0.18
질량 (kg)	6.02	14	35	3.92	2.38
속도 조건					$v(t) = 0.4 \sin(t) m/s$
y_{MSP}					(0,0)
y_{BSR}					±0.1m

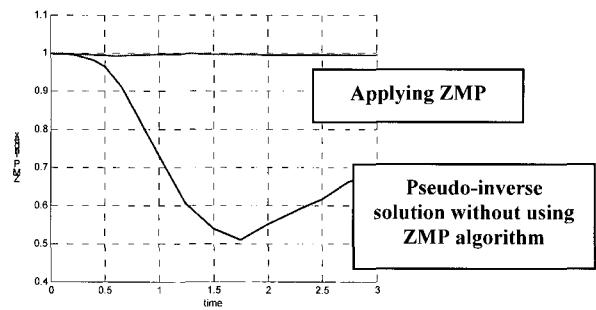
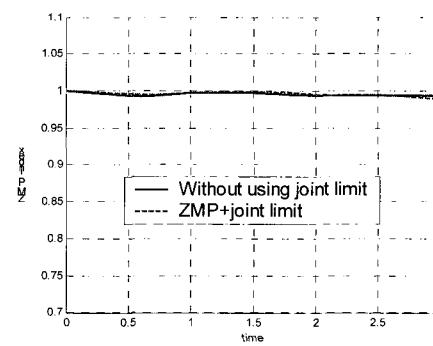
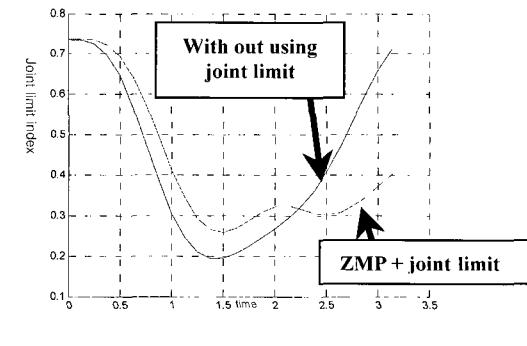


그림 4. ZMP 알고리즘에 따른 ZMP 지수 궤적.

Fig. 4. ZMP indices trajectory with and without ZMP algorithm.



(a)



(b)

그림 5. (a) ZMP 지수의 궤적. (b) 관절 제한 지수의 궤적.

Fig. 5. (a) Trajectories of ZMP indices. (b) Trajectories of Joint Limit Indices.

ZMP 알고리즘을 적용한 경우를 비교해 보면, 그림 5a 와 같이 두 지수의 궤적은 많은 차이가 없다. 그러나, 두 방법의 현저한 차이는 관절 제한 지수에서 살펴 볼 수 있다. 그림 5b에서 보면 0초~ 2.4초 범위 에서는 관절 제한 알고리즘의 효과를 볼 수 없으나, 2.4초 이후에는 관절 제한 알고리즘의 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 복합적인 알고리즘을 적용한 시뮬레이션

그림 6은 같은 시간 동안 세 가지의 여유 자유도 분배 알고리즘을 적용한 경우로, 그림 6a는 단지 ZMP 보상 알고리즘을 적용한 경우와 ZMP 지수, 관절 제한 지수, 그리고 조작성 지수의 세 개의 여유 자유도 분배 알고리즘을 동시에 적용했을 경우에 대한 비교를 보여 주고 있다.

1.5초와 2.0초 사이의 튕는 부분 값을 제외하고, ZMP 지수의 두 궤적은 거의 일치한다. 그림 5b와 비교하여, 그림 6b에서의 관절 제한 지수를 보면, ZMP 보상 알고리즘을 적용한 경우와 비교할 때, 관절 최소화 알고리즘을 적용했을 때의 경우가 성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 이것은 단지 ZMP 보상 알고리즘을 적용한 경우와 비교해 보면, 관절 제한과 조작성 알고리즘을 적용한 경우의 성능이 보다 향상 되었음을 보여준다. 그러므로, ZMP 보상 알고리즘, 관절 제한 최소화, 그리고 조작성 최대화 알고리즘은 여유 자유도 분배 알고리즘에 효과적으로 결합될 수 있다.

마지막으로, 그림 7은 논의된 여유 자유도 분배 알고리즘들에 대한 로봇 모델의 연속 동작을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 여유 자유도 분배 알고리즘에 의한 동작들은(그림. 7b, 7c, 7d) ZMP 알고리즘을 사용하지 않은 경우와 비교해서 더 안정된 자세를 지님을 쉽게 관찰 할 수 있다.

VI. 외부 힘을 고려한 ZMP 알고리즘

1. 시뮬레이션 조건 및 결과

그림 8은 그림 3과 유사한 5 자유도 평면형 매니퓰레이터 모델을 보여주고 있다. 이 때, 시뮬레이션 조건은 말단 장치는 수평방향으로만 운동하고, 스프링에 의해 말단에 가해지는 탄성력을 말단에 가해지는 외부힘으로 간주한다. 표 2는 이 모델의 링크 변수들을 나타낸다.

외부 힘을 고려하여 변경된 ZMP 식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_i (\tau_y)_i + f_x}{m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (35)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_i (\tau_x)_i + f_y}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (36)$$

그림 9는 스프링의 변형에 의한 탄성력을 보여주고 있으며, 말단이 스프링을 밀 때, 스프링의 반발력은 말단의 움직임과 반대 방향으로 발생하고, 스프링의 탄성력은 매니퓰레이터에 가해지는 외부 힘으로 간주 할 수 있다. 그리고, 탄성력 f_x 와 f_y 를 ZMP식에 포함시키면, (35)와 (36)으로 표현되고, 스프링의 탄성력에 의해 발생하는 모멘트는 변위의 함수로 나타낼 수 있으며, 중력에 의한 힘과 마찬가지로 (18)의 C 벡터에 포함되어 진다.

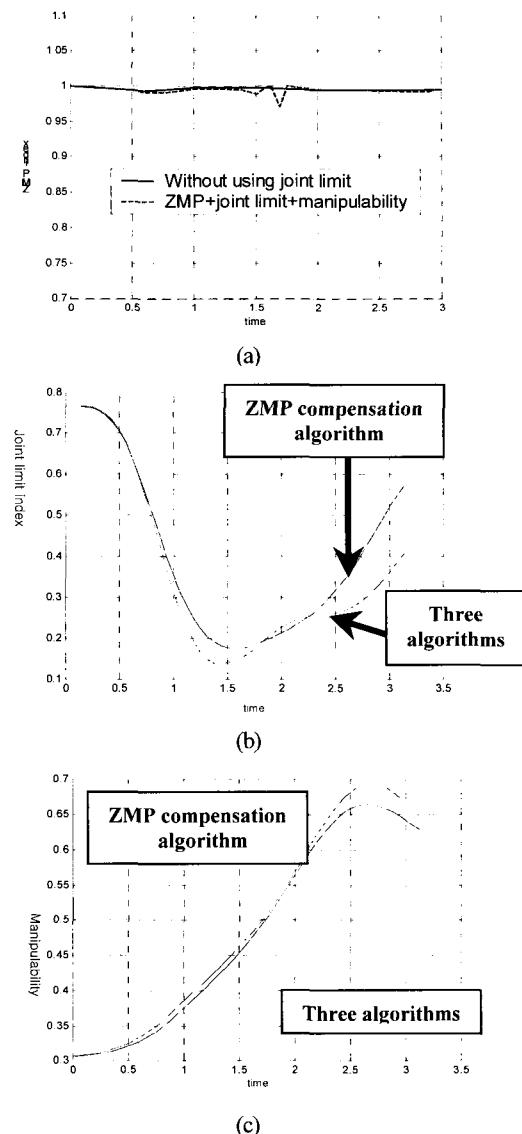


그림 6. (a) ZMP 보상 및 전체 알고리즘을 적용한 ZMP 지수의 궤적. (b) ZMP 보상 및 전체 알고리즘을 적용한 관절각 지수의 궤적. (c) ZMP 보상 및 전체 알고리즘을 적용한 조작성 지수의 궤적.

Fig. 6. (a) ZMP indices trajectories for ZMP compensation algorithm and the whole algorithms. (b) Joint limit indices for ZMP compensation algorithm and the whole algorithms. (c) Manipulability for ZMP compensation algorithm and the whole algorithms.

그림 10은 외부 힘을 고려하지 않은 ZMP 알고리즘에 적용 결과이다. 이 때, 운동 궤적은 y 방향이며, 첫번째 링크는 시계 방향으로 회전하고 ZMP 지수 궤적은 안정한 범위를 벗어 남을 그림 10b에서 볼 수 있다.

150N/m의 상수를 갖는 스프링에 의해 외부 힘이 매니퓰레이터에 가해진다고 가정하면, 그림 11c는 외부 힘의 궤적을 나타내고 있으며, 그림 11b에서는 외부 힘이 매니퓰레이터에 가해지지만 ZMP 지수는 1을 유지하는 현상을 보여준다. 이

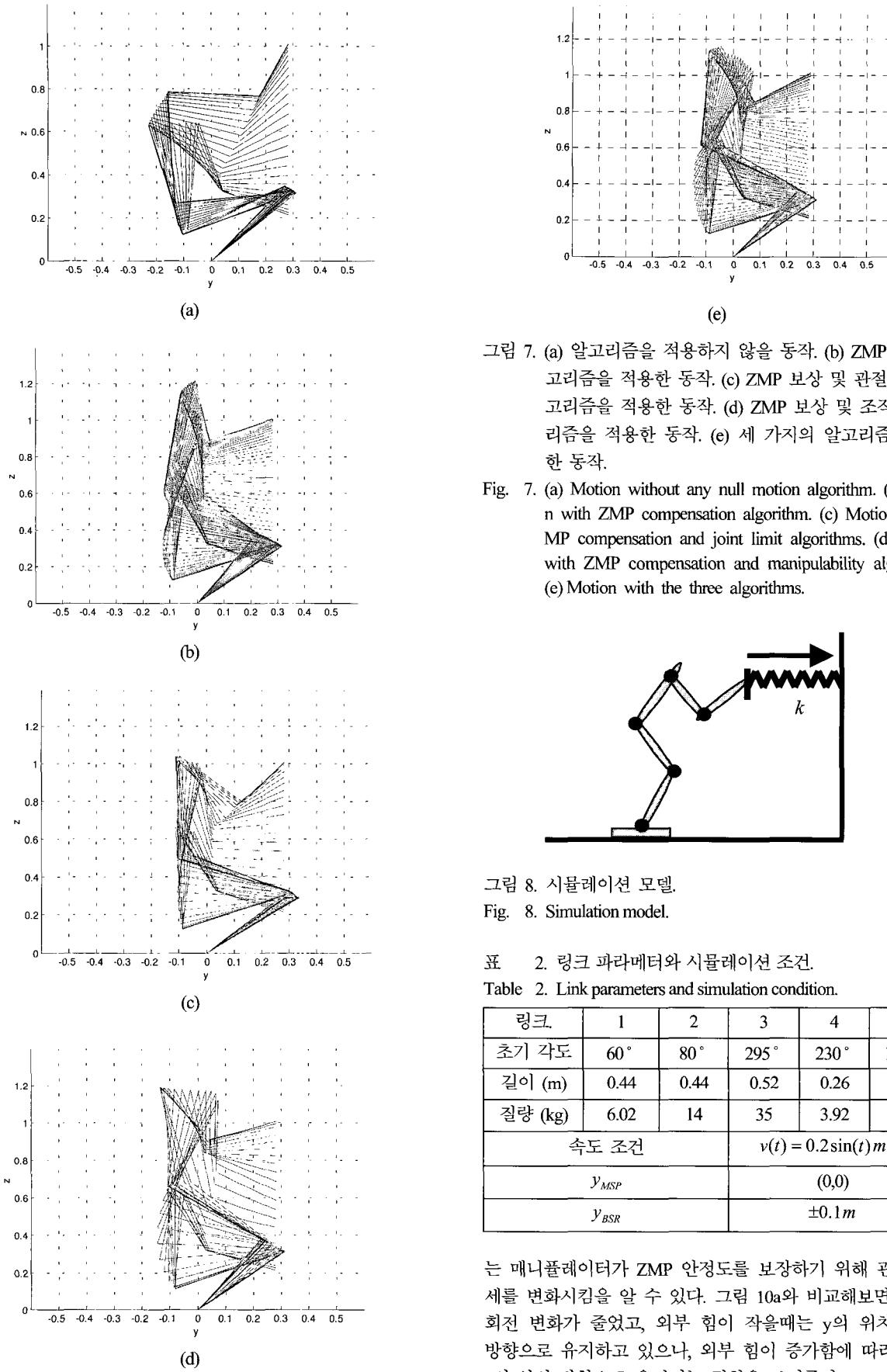


그림 7. (a) 알고리즘을 적용하지 않을 동작. (b) ZMP 보상 알고리즘을 적용한 동작. (c) ZMP 보상 및 관절 제한 알고리즘을 적용한 동작. (d) ZMP 보상 및 조작성 알고리즘을 적용한 동작. (e) 세 가지의 알고리즘을 적용한 동작.

Fig. 7. (a) Motion without any null motion algorithm. (b) Motion with ZMP compensation algorithm. (c) Motion with ZMP compensation and joint limit algorithms. (d) Motion with ZMP compensation and manipulability algorithms. (e) Motion with the three algorithms.

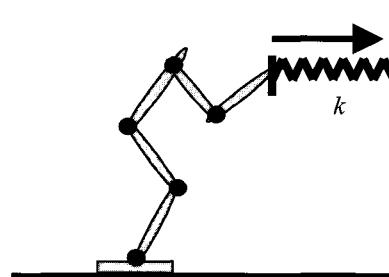


그림 8. 시뮬레이션 모델.

Fig. 8. Simulation model.

표 2. 링크 파라미터와 시뮬레이션 조건.

Table 2. Link parameters and simulation condition.

링크	1	2	3	4	5
초기 각도	60°	80°	295°	230°	100°
길이 (m)	0.44	0.44	0.52	0.26	0.18
질량 (kg)	6.02	14	35	3.92	2.38
속도 조건					$v(t) = 0.2\sin(t) \text{ m/s}$
y_{MSP}					(0,0)
y_{BSR}					$\pm 0.1 \text{ m}$

는 매니퓰레이터가 ZMP 안정도를 보장하기 위해 관절의 자세를 변화시킬 수 있다. 그림 10a와 비교해보면, 링크의 회전 변화가 줄었고, 외부 힘이 작을 때는 y의 위치는 음의 방향으로 유지하고 있으나, 외부 힘이 증가함에 따라 링크가 y의 양의 방향으로 움직이는 경향을 보여준다.

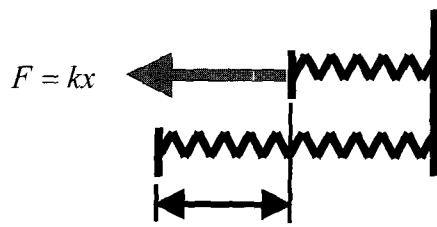
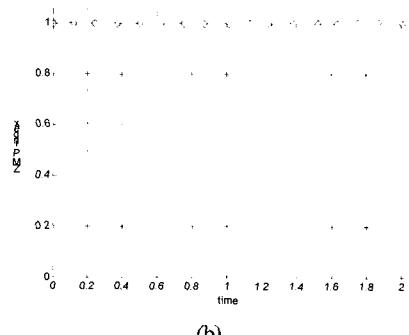
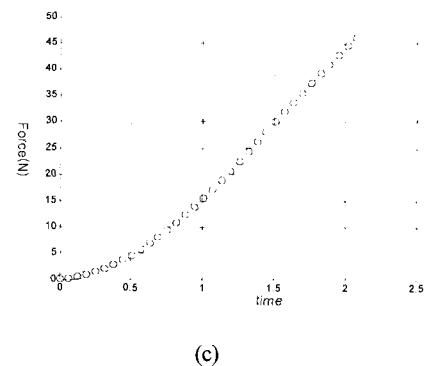


그림 9. 스프링의 변형에 의한 탄성력.

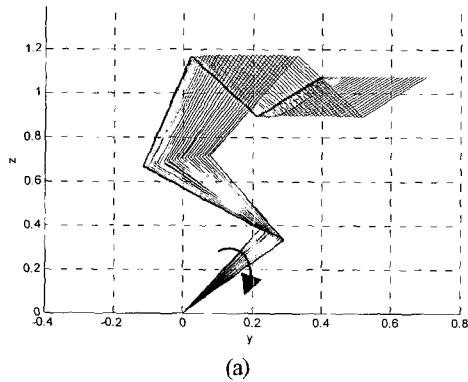
Fig. 9. Elastic force occurred by deformation of spring.



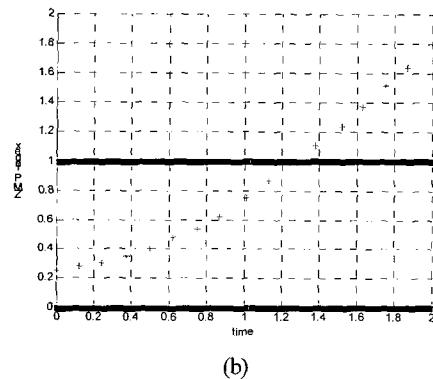
(b)



(c)



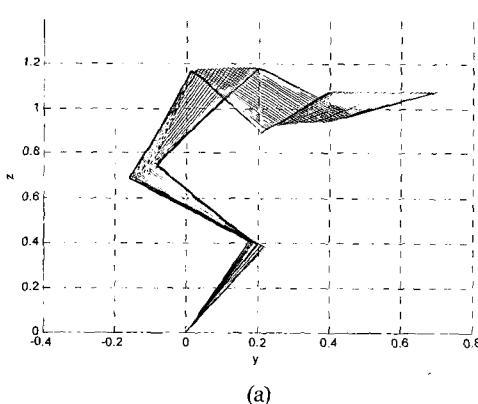
(a)



(b)

그림 10. (a) 외부힘이 가해하고 ZMP알고리즘을 적용하지 않을 경우. (b) ZMP 지수 궤적.

Fig. 10. (a) Without ZMP algorithm and external force. (b) ZMP index trajectory.



(a)

그림 11. (a) 스프링 상수($k=150 \text{ N/m}$). (b) ZMP 지수 궤적. ($k=150 \text{ N/m}$ 일 때 외부 힘 궤적).Fig. 11. (a) The configuration of manipulator ZMP algorithm and spring constant $k=150$. (b) ZMP index trajectory. (c) External force when $k=150 \text{ N/m}$.

VII. 결론

이동과 매니퓰레이션 기능을 동시에 지니는 로봇 시스템은 대부분 기구학적으로 여유 자유도 시스템으로 모델 가능하다. 그 예로서는 모바일 플랫폼과 그 위에 탑재한 매니퓰레이터로 구성된 모바일 로봇 시스템 그리고 두 다리와 두 팔로 구성된 휴머노이드 시스템을 들 수 있다. 이러한 시스템이 지니고 있는 여유 자유도의 효과적인 활용은 시스템의 성능을 극대화하는데 중요한 역할을 담당한다. 본 논문에서는 이러한 시스템들의 기본 모델로서 지면에 고정되지 않은 여유 자유도 매니퓰레이터에 대한 운동계획 알고리즘을 제시하였다.

본 논문의 주된 기여점은 원하는 모션과 ZMP 안정도를 동시에 만족할 수 있도록 ZMP 조건을 ZMP 안정성 지수를 매개로 하여 여유 자유도 매니퓰레이터의 기구학적 관계에 직접적으로 삽입할 수 있는 알고리즘을 제시함으로써, 매니퓰레이터의 자가 운동(self motion)을 이용하여 ZMP를 개회로 방식으로(feedforward fashion) 지면과 접촉하는 바닥의 일정한(계획한) 부분에 위치하게 하여 로봇이 넘어지지 않고 원하는 동작을 원활하게 수행할 수 있는 기구학적 알고리즘을 제안한 것이다. 또한, 추가적인 기구학적 여유 자유도를 이용하는 방법으로 관절 제한 위반을 최소화하고 조작성을 최대화하는 방법을 제안하였고, 추가적으로 외부 힘의 효과를 고려하는 ZMP 운용 알고리즘도 제시하였다.

본 논문에서 살펴본 시뮬레이션 모델은 휴머노이드 로봇의 두 발이 지면에 접지한 경우에 몸체의 다양한 상하 운동, 어려운 동작으로 분류되는 점프와 착지 동작에서의 전후 동작[10], 그리고 정지 상태에서의 모바일 로봇 위의 매니퓰레이터의 동작으로 응용 가능하다. 또한 이족 보행의 경우에도 동일한 ZMP 운영 알고리즘의 적용이 가능한데, 이 경우에는 지면에 접지한 발을 기준을 하는 허리 부분의 웨이브 그리고 허리 부분을 기준으로 하는 이동하는 발 끝의 웨이브를 계획하는 과정에서 각각 정의해야 하는 운동 자유도와 ZMP 및 일련의 부속 알고리즘의 구현을 위하여 활용할 수 있는 여유 자유도를 구분하는 작업을 통해서 본 논문에서 제안한 방법론이 동일하게 적용될 수 있다. 추후 과제로는 두 발 보행으로의 연장과 제안된 여유 자유도 알고리즘들을 실제 개발한 휴머노이드 시스템에 적용하는 실험적 연구를 수행하려 한다.

참고문헌

- [1] J. Kim, W. Chung, Y. Youm, and B. Lee, "Real-time ZMP compensation method using null motion for mobile manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1967-1972, 2002.
- [2] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Jricic, "On the stability of biped locomotion," *IEEE Trans. On Biomedical Engineering*, BME17-1, pp. 25-36, 1970.
- [3] Q. Li, A. Takanishi and I. Kato, "Learning control for a biped robot with a trunk," *Proc., IEEE/RSJ Int. Conf. On Mobile manipulation of humanoids : Realtime control based on manipulability and stability*", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2217-2222, 2000.
- [4] A. Dasgupta and Y. Nakamura, "Walking feasible walking motion of humanoid robotics from human motion capture data," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1044-1049, 1999.
- [5] J. Park and O. Kwon, "Reflex control of biped robot locomotion on a slippery surface," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4134-4139, 2001.
- [6] J. H. Park and Y.K. Rhee, "ZMP trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 90-95, 1998.
- [7] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, "The sway compensation trajectory for a biped robot," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 925-931, 2003.
- [8] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai, and Y. Mae, "Mobile manipulation of humanoids : Realtime control based on manipulability and stability", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2217-2222, 2000.
- [9] Q. Huang, S. Sugano, and I. Kato, "Stability control for a mobile manipulator using a potential method," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, pp. 832-838, 1993.
- [10] B. R. So and B.-J. Yi, "Landing motion analysis of human body motion considering impact and ZMP condition," *To be presented at 2004 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.



유 동 수

2002년 한양대학교 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(2004). 관심분야는 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, Humanoid system modeling and analysis.



소 병 록

1997년 한양대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동대학원 (공학석사). 2000년 현재 동대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 Humanoid system modeling/control, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, 병렬형 로봇시스템, Impact modeling /analysis.



이 병 주

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1986). 동대학원 박사(1991년). 1992~1995년 한국 기술교육대학교 제어 공학과 조교수. 1995년~현재 한양대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and controls, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.



김 회 국

1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1985년). 동대학원 박사(1990년). 동대학 기계공학과 Post doc. (1990년). 1991년~현재 고려대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 주행로봇/보행로봇의 설계 및 기구학/동역학 분석, 병렬 메커니즘의 설계 및 기구학/동역학 분석, 메커니즘의 모빌리티 분석.