

기구학적 여유도와 ZMP 구속 조건을 이용한 매니플레이터의 동작 계획

Motion Planning of Manipulators Using Kinematic Redundancy and ZMP Constraint Condition

최재연¹, 윤현수¹, 이병주²

Choi Jae Yeon¹, Hyun-Soo Yoon¹, Yi Byung-Ju²

Abstract This work deals with development of effective redundancy resolution algorithms for the motion control of manipulator. Differently from the typical kinematically redundant robots that are attached to the fixed ground, the ZMP condition should be taken into account in the manipulator motion in order to guarantee the system stability. In this paper, a new motion planning algorithm for redundant manipulator not fixed to the ground is introduced. A sequential redundancy resolution algorithm is proposed, which ensures the ZMP (Zero Moment Point) stability, the planned operational motion, and additional sub-criteria such as joint limit index. A geometric constraint equation derived by reshaping the existing ZMP equation enables one to employ the sequential redundancy algorithm. The feasibility of the proposed algorithm is verified by simulating a redundant manipulator model.

Keywords: Kinematic Redundancy, ZMP Constraint Equation, Redundancy Resolution Algorithm

1. 서론

여유 매니플레이터 시스템은 요구되는 자유도보다 더 많은 자유도를 가지며 기구학적 여유도를 이용한 자가동작을 통해 다양한 동작들을 만들어내는 장점을 갖고 있다. 로봇의 응용분야가 넓어짐에 따라 로봇은 작업 기능뿐만 아니라 바닥에 고정되어있지 않고 이동 가능한 능력까지 갖추고 있다. 그 예로 이동 로봇 상부에 매니플레이터를 장착한 이동형 로봇 시스템과 이동을 위한 두 다리와 매니플레이션을 위한 두 팔의 구조를 갖는 인간형 로봇 시스템을 들 수 있다. 이와 같은 시스템은 흔히 요구되는 자유도보다 많은 관절 자유도를 갖고 있으며 바닥에 고정되지 않은 기구학적 여유 매니플레이터로 모델화 할 수 있다. 따라서, 기구학적 여유도를 이용한 다양한

여유 구동 알고리즘의 개발을 통해 여유 매니플레이터의 보다 효율적인 운용이 가능해진다.

동작 제어에 관련하여 수 많은 연구들이 이루어졌고 그 예로 동역학적 동작 제어^[1-14]와 전신 동역학/공조를 들 수 있다.^[15-19] 본 논문에서는 바닥에 고정되어있지 않은 기구학적 여유 로봇의 제어를 위해 유용한 도구로서 기존 ZMP 방정식을 재 조합한 ZMP 구속 방정식을 제안한다. 또한, 원하는 작업 동작, ZMP 유지와 관절 제한 회피와 같은 다양한 작업을 수행하기 위해 작업 우선 순위 개념의 기구학적 구동 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 여유 자유도를 갖는 시스템의 동적 전신 공조를 가능케 한다. 예를 들어, 여유 매니플레이터의 말단 링크를 앞으로 뺄으면 여유 매니플레이터의 무게 중심이 앞으로 이동하게 되고 ZMP 또한 변한다. 이때, 제안된 기구학적 구동 알고리즘은 ZMP 안정도를 높이기 위해 각 관절의 움직임을 자동으로 계산한다.

ZMP의 개념은 1970년 Vukobratovic^[1]에 의해 제안되었고 이는 동적인 움직임 상태에서 고정되지 않은 로봇의 안정 척도로 사용되고 있다. 이에 많은 연구자들은

Received : Jun. 08. 2011; Reviewed : Jul. 25. 2011; Accepted : Sep. 08. 2011

※ 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터 (GRRC) 사업 [GRRC한양2010 A02, 유비쿼터스 네트워크를 이용한 액티브 디스플레이], 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업과 지식경제부의 로봇산업 원천기술개발 사업으로 수행되었음.

¹ 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정

² 한양대학교 전자시스템공학과 교수

ZMP 궤적을 보상하는 방법을 찾아왔다. Li 등^[1]은 몸통을 갖는 이족보행로봇의 ZMP 보상 알고리즘을 위한 학습 제어방법을 제안하였다, Dasgupta 등^[6]은 인간의 모션 캡처 자료와 ZMP를 기반으로 걷는 동작을 만들어 냈고 Sugihara와 Nakamura^[14]는 도립진자 방법을 활용하였다. Park 등^[5]은 미끄러운 표면에서 ZMP 보상을 위해 온라인으로 반사 제어를 이용했고, Park 등^[7]은 퍼지 논리를 활용해 ZMP 궤적 디자인을 위한 오프라인 방법을 제안하였다. Kurazume^[8]는 손쉽게 이족보행로봇의 안정된 ZMP 궤적을 디자인하기 위해 흔들림 보상 궤적을 제안하였고 Chevallereau 등^[12]은 이족보행로봇 RABBIT을 위해 가상 구속 개념을 활용하였으며 Kim 등^[3]은 영운동을 이용해 이동형 매니플레이터를 위한 실시간 ZMP 보상 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 로봇의 구조적인 여유 자유도를 활용한 여유 매니플레이터의 새로운 동작 계획 알고리즘을 제안한다. 또한, 남은 여유도를 최대한 활용하기 위해 관절 제한과 같은 이차적인 sub-criterion을 포함한다. 제안된 알고리즘의 타당성은 기구학적 여유 매니플레이터 모델의 시뮬레이션을 통해 증명한다.

2. ZMP 구속 방정식을 이용한 여유 구동 알고리즘의 절차

고정되지 않은 로봇의 일반적인 제어 계획으로서 중요한 화두는 안정된 움직임을 위해 ZMP 조건을 유지하면서 원하는 궤적을 결정하는 것이다.

2.1 ZMP 구속 방정식

보편적인 방법으로써 ZMP 조건을 만족하기 위해 인간의 모션 캡처 자료가 활용되고 일반적인 해석적 접근으로서는 도립진자 방법이 활용되어 왔다^[14]. 그러나 선행 연구들은 ZMP 보상과 기구학적 여유도의 관계를 다루지 않았고 추가 여유도를 활용한 다양한 동작 계획 또한 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 ZMP 구속 방정식의 개념을 이용한 새로운 동작 계획 알고리즘을 제안하고 제안된 알고리즘은 원하는 동작과 ZMP 안정도를 만족할 뿐만 아니라 기구학적 효율을 개선하기 위해 매니플레이터 구조의 기구학적 여유도를 활용한다.

그림 1은 기부의 링크가 바닥에 고정되어 있지 않은 기구학적 여유 로봇을 나타낸다. 직관적으로 매니플레이터의 상부가 바닥관절의 중심에 대해 앞뒤로 움직이면

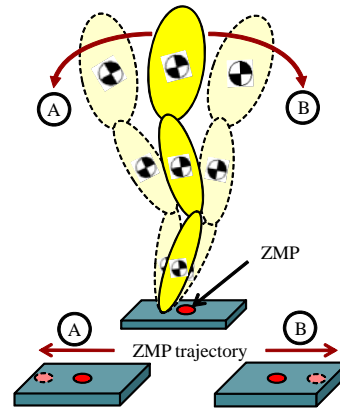


그림 1. ZMP 구속 방정식의 개념도

로봇은 쉽게 넘어지게 되는데 이때 ZMP의 움직임은 가장 안정된 지점으로부터 불안정한 지점으로 이동한다. 이는 즉, ZMP가 몸체의 움직임과 밀접한 연관이 있음을 나타내고 반대로, ZMP의 위치가 변하면 로봇의 몸체 또한 유연하게 변할 수 있음을 시사한다.

ZMP 구속 방정식은 연관된 각 가속도 성분을 ZMP 방정식에 대입하여 아래 식과 같이 유도되고 각 $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i, \tau_i, m_i, g$ 는 i 번째 링크의 가속도, 관성모멘트, 질량, 중력 가속도를 나타낸다 ^[1].

$$\begin{aligned} & \sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) x_{ZMP} \\ & = \sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_i (\tau_i)_y, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) y_{ZMP} \\ & = \sum_i m_i (\ddot{z}_i - g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_i (\tau_i)_x. \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 재배열하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_i m_i \ddot{z}_i (x_i - x_{ZMP}) - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_i (\tau_i)_y = C_x, \quad (3)$$

$$\sum_i m_i \ddot{z}_i (y_i - y_{ZMP}) - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_i (\tau_i)_x = C_y, \quad (4)$$

여기서

$$C_x = \sum_i m_i g (x_i - x_{ZMP}), \quad (5)$$

$$C_y = \sum_i m_i g (y_i - y_{ZMP}). \quad (6)$$

i 번째 링크 중심에서 i 번째 링크의 관성 모멘트를 나타내면 아래 식과 같고

$$\tau_i = [I_i] \dot{\omega}_i + \omega_i \times [I_i] \omega_i, \quad (7)$$

또한, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_i = [I^{ik}] \dot{\omega}_i + \omega_i^T [P^{ik}] \omega_i, \quad (8)$$

여기서 각 항의 밑줄 표기한 성분은 벡터표기이고 ω_i 는 i 번째 링크의 각속도를 나타내며 $\omega_i = [G_i^{ik}] \dot{\theta}_i$ 로 표현된다. 그리고 $[I^{ik}]$ 는 i 번째 링크의 3x3 관성 행렬, $[P^{ik}]$ 는 3차원 관성 행렬을 나타낸다. $[I^{ik}]$ 와 세 겹으로 구성된 $[P^{ik}]$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$[I^{ik}] = \begin{bmatrix} I^{ix} & I^{iy} & I^{iz} \end{bmatrix}_{3 \times 3}^T,$$

그리고

$$[P^{ik}]_{1;::} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ I^{iz} \\ -I^{iy} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, [P^{ik}]_{2;::} = \begin{bmatrix} -I^{iz} \\ \underline{0} \\ I^{ix} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, [P^{ik}]_{3;::} = \begin{bmatrix} I^{iy} \\ -I^{ix} \\ \underline{0} \end{bmatrix}_{3 \times 3}.$$

비슷하게, 작업공간에서의 가속도 (그림 1 모델의 말단 위치)는 다음과 같이 쓰여진다.

$$\ddot{u} = [G] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H] \dot{\theta}, \quad (9)$$

여기서 $[G]$ 는 1 차 기구학적 영향 계수 행렬이고 $[H]$ 는 2 차 기구학적 영향 계수 행렬이다.

또한, i 번째 링크에서 무게 중심의 가속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\ddot{u}_i = [G_i] \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i^T [H_i] \dot{\theta}_i. \quad (10)$$

다시, 식 (10)은 아래와 같이 3 가지 성분으로 나뉜다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= [G_i]_{1;} \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i^T [H_i]_{1;} \dot{\theta}_i, \\ \ddot{y}_i &= [G_i]_{2;} \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i^T [H_i]_{2;} \dot{\theta}_i, \\ \ddot{z}_i &= [G_i]_{3;} \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i^T [H_i]_{3;} \dot{\theta}_i. \end{aligned}$$

여기서, $[G_i]_j$ 는 $[G_i]$ 의 j번째 행을 나타내고 $[H_i]_j$ 는 $[H_i]$ 의 j번째 평면을 나타낸다^[20].

세 가지 가속도 성분과 관성 모멘트를 식 (3)과 식 (4)에 대입하여 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\underline{C} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix} = [G_m] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H_m] \dot{\theta}. \quad (11)$$

여기서, N 개의 관절이 있다고 가정하면, 식 (11)의 $[G_m]$ 과 $[H_m]$ 은 다음과 같다.

$$[G_m] = \sum_i \begin{bmatrix} m_i (x_i - x_{ZMP}) [G_i]_{3;}, -m_i z_i [G_i]_{1;}, -\{ [I_i^{jk}] [G_i^{jk}] \}_{2;} \\ m_i (y_i - y_{ZMP}) [G_i]_{3;}, -m_i z_i [G_i]_{2;}, +\{ [I_i^{jk}] [G_i^{jk}] \}_{1;} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2 \times N},$$

$$[H_m]_{1;::} = \sum_i \begin{bmatrix} m_i (x_i - x_{ZMP}) [H_i]_{3;::}, -m_i z_i [H_i]_{1;::} \\ -\{ [I_i^{jk}] \circ [H_i^{jk}] + [G_i^{jk}]^T [P_i^{jk}] [G_i^{jk}] \}_{2;} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2 \times N},$$

$$[H_m]_{2;::} = \sum_i \begin{bmatrix} m_i (y_i - y_{ZMP}) [H_i]_{3;::}, -m_i z_i [H_i]_{2;::} \\ +\{ [I_i^{jk}] \circ [H_i^{jk}] + [G_i^{jk}]^T [P_i^{jk}] [G_i^{jk}] \}_{1;} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2 \times N}.$$

역동역학 방정식과 유사한 식 (11)은 ZMP 구속 방정식이라 칭한다. 식 (11)에서 \underline{C} , $[G_m]$, $[H_m]$ 은 로봇의 자세에 의해 이미 알고 있는 값이므로 ZMP 구속 방정식은 $\ddot{\theta}$ 를 구하는 식으로 풀 수 있다.

2.2 동작 계획

일반적으로 로봇이 움직이면 지지 구역 내의 ZMP도 변하게 된다.

시스템이 충분히 기구학적 여유도를 가질 때 ZMP 구속 방정식 (11)의 일반 해는 의사 역행렬을 구함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\ddot{\theta} = [G_m]^+ (\underline{C} - \dot{\theta}^T [H_m] \dot{\theta}) + (I - [G_m]^+ [G_m]) \varepsilon, \quad (12)$$

여기서 ‘+’는 의사 역행렬의 연산자이며 ε 는 임의의

벡터를 나타낸다. 관절 각들은 각 가속도 벡터를 시간에 대해 두 차례 적분하여 구한다.

주어진 작업공간 궤적 $\underline{u}(t)$ (그림 2의 \underline{u}_{swing} 궤적)를 위해 식 (12)를 식 (9)에 대입하여 $\underline{\varepsilon}$ 에 대해 해를 구하면 다음 식과 같다.

$$\underline{\varepsilon} = [G(I - [G_m]^+ [G_m])]^+ \{ \ddot{\underline{u}} - G[G_m]^+ (\underline{C} - \dot{\underline{\theta}}^T [H_m] \dot{\underline{\theta}}) - \dot{\underline{\theta}}^T [H] \dot{\underline{\theta}} \}. \quad (13)$$

식 (13)의 해는 순차적으로 원하는 ZMP 궤적과 원하는 작업 궤적을 만족한다.

3. 관절 운동 범위 제한을 위한 기구학적 여유 구동 알고리즘

여유 매니플레이터는 원하는 동작을 수행함에 있어서 요구되는 관절보다 더 많은 관절을 갖는다. 따라서 여유 자유도는 기구학적, 동역학적 성능을 향상시키는데 활용할 수 있다. 이 장에서는 로봇의 각 관절이 과도하게 움직이는 현상을 제한하여 안정적인 동작을 수행하도록 하기 위해 여유 자유도를 활용하며 이를 위한 해결책으로서 관절 제한 지표를 활용한다.

i 번째 관절의 운동 범위가 e_i 로 제한되면 관절 제한 지표는 다음과 같다.

$$p_i = \sum_i \frac{(\theta_i - \theta_{i0})^2}{e_i^2}, \quad (14)$$

여기서,

e_i : i 번째 관절의 범위,

θ_i : i 번째 관절 각,

θ_{i0} : i 번째 관절 각의 평균 값.

관절 제한 지표는 각 관절이 제한된 관절 값을 넘지 않도록 하기 위해 최소화되어야 한다. 시간에 대해 미분하여 속도 관계식을 행렬로 표현하면 아래와 같다.

$$\dot{p}_i = B_1(\dot{\theta})\dot{\theta}. \quad (15)$$

식 (15)를 시간에 대해 한번 더 미분하면 다음과 같다.

$$\ddot{p}_i = B_1\ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [H_1]\dot{\theta}. \quad (16)$$

관절 제한 지표를 최소화 하기 위해 \dot{p}_i 은 양수 값이어야 한다 ($\dot{p}_i = \delta_i$, $\delta_i > 0$).

충분한 기구학적 여유도는 몇 가지 sub-criterion의 순차적 수행을 가능케 한다. 식 (13)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\underline{\varepsilon} = K_1^+ K_2 + (I - K_1^+ K_1) \underline{\varepsilon}_1, \quad (17)$$

여기서

$$K_1 = [G(I - [G_m]^+ [G_m])], \\ K_2 = \ddot{\underline{u}} - G[G_m]^+ (\underline{C} - \dot{\underline{\theta}}^T [H_m] \dot{\underline{\theta}}) - \dot{\underline{\theta}}^T [H] \dot{\underline{\theta}}.$$

식 (17)을 식 (12)에 대입하면 아래와 같다.

$$\ddot{\underline{\theta}} = [G_m]^+ (\underline{C} - \dot{\underline{\theta}}^T [H_m] \dot{\underline{\theta}}) \\ + (I - [G_m]^+ [G_m]) K_1^+ K_2 \\ + (I - [G_m]^+ [G_m]) (I - K_1^+ K_1) \underline{\varepsilon}_1. \quad (18)$$

순차적으로 다시 식 (18)을 식 (16)에 대입하면 아래 식이 얻어진다.

$$\delta_i = K_3 + K_4 \underline{\varepsilon}_1, \quad (19)$$

여기서

$$K_3 = B_1 [G_m]^+ (\underline{C} - \dot{\underline{\theta}}^T [H_m] \dot{\underline{\theta}}) \\ + B_1 (I - [G_m]^+ [G_m]) K_1^+ K_2 + \dot{\underline{\theta}}^T [H_1] \dot{\underline{\theta}}, \\ K_4 = B_1 (I - [G_m]^+ [G_m]) (I - K_1^+ K_1).$$

다시, $\underline{\varepsilon}_1$ 에 대해 풀면 다음 식을 얻는다.

$$\underline{\varepsilon}_1 = K_4^+ (\delta_i - K_3). \quad (20)$$

얻고자 하는 최종 해는 식 (20)을 식 (18)에 대입하여 구하게 되고, 구해진 해는 ZMP 궤적을 보장하고 주어진 작업 동작을 만족하며 최대한 관절 제한을 넘지 않는 동작을 수행한다.

4. 시뮬레이션

제안된 동작 계획 알고리즘과 추가적인 criterion의 검증을 위해 바닥이 고정되지 않은 평면형 4 자유도 로봇 모델을 이용하고 평면형 4 자유도 여유 매니플레이터 모델은 그림 2와 같다. 바닥에 근접한 3 개의 링크는 자세를 유지하고 말단의 링크는 4 번째 관절에 대해 회전하도록 모델화 된다. 시뮬레이션은 말단 링크가 2초동안 일정한 속도로 원궤적 1회전 동작시 적용된 동작계획 알고리즘에 따라 서로 다른 결과를 보이도록하고 로봇 모델의 초기위치 또한 u_{swing} 이 큰 z값을 갖는 높은 자세 ($\theta=[70^\circ, 50^\circ, -40^\circ, -150^\circ]$)와 작은 값을 갖는 낮은 자세 ($\theta=[50^\circ, 100^\circ, -80^\circ, -150^\circ]$)의 두 경우로 나누어 수행하였다. 또한, 평면형 4 자유도 로봇 모델에서 ZMP는 식 (1)만 고려되며 식 (10) 또한 x와 z 성분만을 갖는다 ($u = u_{swing}$). 그리고 시뮬레이션 모델에 적용된 동역학 파라미터는 표 1과 같다.

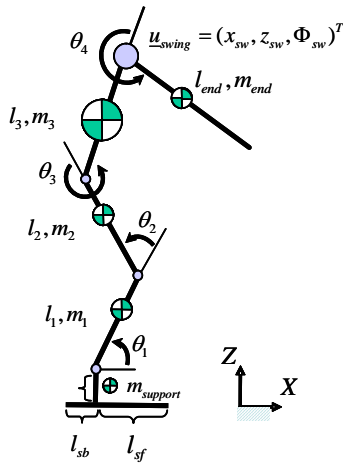


그림 2. 바닥에 고정되지 않은 4 자유도 여유 매니플레이터

표 1. 시뮬레이션에 적용된 동역학 파라미터

링크	길이 [mm]	질량 [g]	회전축에 대한 관성 모멘트 [g·mm ²]
11	100	542.41	2255384.96
12	100	282.71	1219852.97
13	100	480.73	3343127.0
14	100	96.35	394985.27

4.1 여유 매니플레이터의 동작 계획 알고리즘

그림 3은 하위 부분이 상부에서 회전하는 링크의 동작에 의해 받는 영향을 보여주고 있다. 즉, 회전하는 상부

링크의 동작으로 인해 하부 3자유도 매니플레이터 모델은 ZMP 안정도를 잃고 쓰러지게 된다. 이는 상부 링크의 동역학이 ZMP 구속 방정식에 포함되지 않았기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 4 가지의 독립적인 알고리즘을 활용한다. 먼저, ZMP 조건이 안정 범위 내에서 변하지 않고 일정하게 유지되어야 한다 (3 차원 모델의 경우 두 가지의 ZMP 조건 존재). 두 번째로, u_{swing} 의 x와 z의 위치 (혹은 x와 z 둘 중 하나의 위치)가 제어되고 마지막으로 Manipulability (매니플러빌리티)나 관절 제한과 같은 부차적인 criteria가 적용될 수 있다. 평면형 모델에서 3자유도를 갖는 매니플레이터는 하나의 여유 자유도를 갖고있으므로 ZMP 안정도외의 부차적인 criteria 적용을위해 말단부 u_{swing} 의 x나 z 위치를 동작계획에 포함하지않는 방법을 적용하였다. 표 2는 적용된 4 가지의 criteria 조합을 나타낸다.

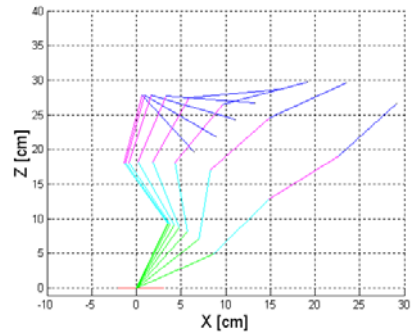


그림 3. 알고리즘을 적용하지 않은 동작

표 2. 4 가지의 Criteria 조합

순번	제어 변수
경우 1	ZMP 안정성
경우 2	ZMP 안정성, u_{swing} 의 x와 z 위치
경우 3	ZMP 안정성, u_{swing} 의 x 위치, 관절 제한 criterion
경우 4	ZMP 안정성, u_{swing} 의 z 위치, 관절 제한 criterion

4.1.1 ZMP 안정도

이 경우는 식 (12)의 첫 번째 항만을 적용하였고 u_{swing} 의 x와 z 위치는 고려하지 않았다. 그림 4와 같이 회전하는 상부 링크로 인해 ZMP 안정도를 유지하기 위해 하부의 링크들이 흔들리는 모습을 보인다. 각 관절들의 변화는 적으나 u_{swing} 의 x 위치 변동이 많이 이루어져 상부 링크의 회전 속도가 빨라지면 흔들리는 하부의 링크로 인

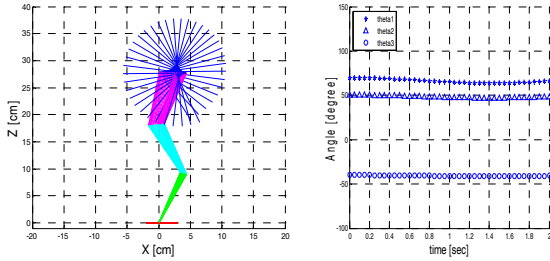
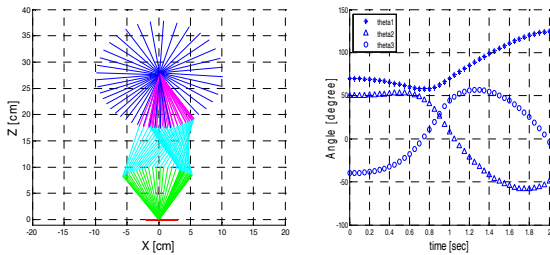


그림 4. 경우 1: ZMP

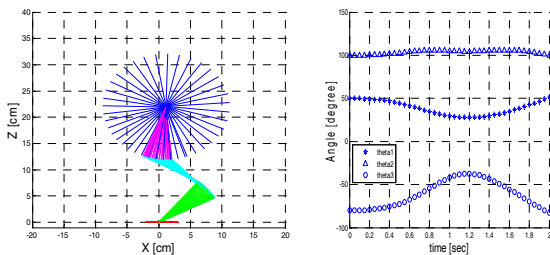
해 동작 효율이 나빠지게 된다.

4.1.2 ZMP 안정도 + u_{swing} 의 x와 z 위치

이 경우는 식 (12)와 식 (13)이 적용되었고 식 (13)에서 u 는 u_{swing} 의 x와 z 위치를 나타낸다. 그림 5 (a)와 같이 u 를 고정시키고 높은 위치에서 회전 동작이 이루어질 경우 하부의 관절들이 원하는 관절 제한을 벗어나 크게 요동치는 현상을 보이고 경우 1의 결과와 같이 회전 속도가 증가할수록 동작 효율은 매우 나빠지게 된다. 그러나 낮은 위치에서는 그림 5 (b)와 같이 관절각의 변화량이 줄어들어 비교적 안정적인 동작을 보인다.



(a) 높은 위치 회전



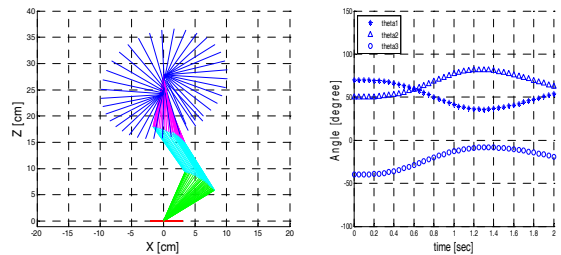
(b) 낮은 위치 회전

그림 5. 경우 2: ZMP, x와 z 위치

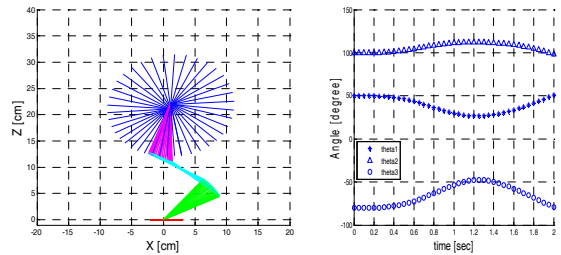
4.1.3 ZMP 안정도 + u_{swing} 의 x 위치 + 관절 제한

이 경우는 식 (12), 식 (13)과 식 (20)이 적용되었다. 식 (13)에서 u 는 u_{swing} 의 x 위치를 나타내며 u_{swing} 의 z 위치

를 고려하지 않은 대신 식 (20)의 관절 제한 criterion이 적용되어 각 관절이 제한된 값을 벗어나지 않도록 한다. 그림 6과 같이 높은 위치에서 회전이 이루어져도 동작 계획에 포함하지 않은 u 의 z 위치변동이 생기면서 관절 제한을 벗어나지 않고 비교적 안정된 자세를 취하는 모습을 보인다. 반면 낮은 위치에서 회전할 경우 u 의 z 위치변동이 미비하며 매우 안정적으로 균형을 유지하는 모습을 보여 상체 회전에 대해 최적의 초기 위치가 존재함을 시사한다.



(a) 높은 위치 회전



(b) 낮은 위치 회전

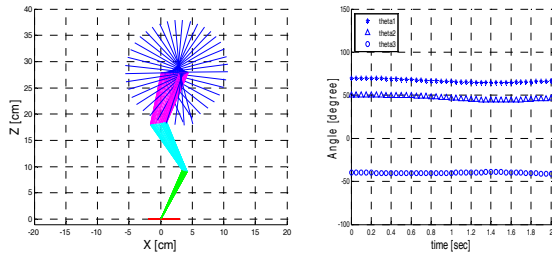
그림 6. 경우 3: ZMP, x 위치와 관절 제한 criterion

4.1.4 ZMP 안정도 + u_{swing} 의 z 위치 + 관절 제한

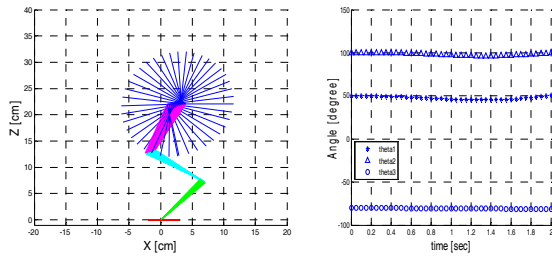
마지막으로 경우 3에서 x 대신 z의 위치를 동작 계획에 포함하였다. 그림 7과 같이 높은 위치와 낮은 위치에서 모두 회전 동작이 이루어져도 안정된 자세를 유지하지만 동작 계획에 포함되지 않은 u 의 x 위치 변동이 있으며 이는 경우 1의 결과와 매우 흡사한 결과를 보인다. 즉, x방향의 ZMP만이 고려되는 평면형 시스템에서는 동작계획에 있어서 u 의 x 위치는 ZMP 안정도를 유지하는데 지배적인 제어 변수임을 확인할 수 있다.

4.2 시뮬레이션 고찰

시뮬레이션 결과 경우 3의 결과가 가장 안정적인 조합의 동작 계획임을 볼 수 있다. 이는 ZMP가 x 성분만을



(a) 높은 위치 회전

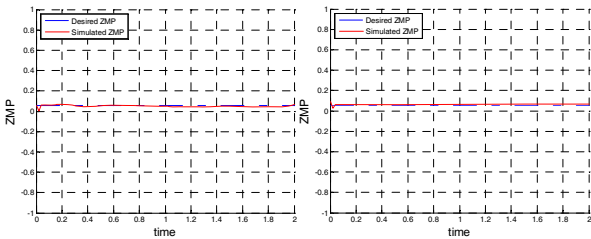


(b) 낮은 위치 회전

그림 7. 경우 4: ZMP, z 위치와 관절 제한 criterion

가지므로 z 의 z위치보다 x 위치를 동작 계획에 포함할 때 안정적인 동작이 가능함을 나타낸다.

그림 8은 그림 6(a)와 그림 6(b)의 계획된 ZMP 궤적과 시뮬레이션 된 ZMP 궤적을 나타내며 시뮬레이션 된 ZMP가 계획된 ZMP를 매우 정확하게 추종하는 것을 보여 준다.



(a) 그림 6(a)의 경우 ZMP (b) 그림 6(b)의 경우 ZMP

그림 8. ZMP 궤적 비교

5. 결론

로봇의 구조적인 여유 자유도를 활용한 여유 매니플레이터는 다양한 여유 구동 알고리즘을 활용해 목적에 맞는 다양한 동작계획이 가능한 장점을 갖는다.

본 논문에서는 바닥에 고정되지 않은 여유 매니플레이터의 새로운 동작 계획 알고리즘을 제안하고 ZMP 안정도, 계획된 작업 동작과 관절 제한 지표와 같은 추가적인

sub-criterion을 만족하는 순차적 여유 구동 알고리즘을 제안하였다. 제안된 순차적 여유 구동 알고리즘은 기존의 ZMP 방정식을 재조합하여 기하학적 구속 방정식을 유도해 바닥에 고정되지 않은 로봇의 안정성을 확보하였으며 확보된 안정성을 바탕으로 작업공간내 동작을 수행하고 동작에 필요한 관절들은 제한 지표를 넘지 않도록 설계하였다. 그리고 제안된 알고리즘의 타당성은 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, A.A. Frank, and D. Jricic, "On the stability of biped locomotion," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME17-1, pp. 25-36, 1970.
- [2] Q. Huang, S. Sugano, and I. Kato, "Stability control for a mobile manipulator using a potential method," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 832-838, 1993.
- [3] J. Kim, W. Chung, Y. Youm, and B. Lee, "Real-time ZMP compensation method using null motion for mobile manipulators," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1967-1972, 2002.
- [4] Q. Li, A. Takanishi and I. Kato, "Learning control for a biped robot with a trunk," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1771-1777, 1993.
- [5] J. Park and O. Kwon, "Reflex control of biped robot locomotion on a slippery surface," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4134-4139, 2001.
- [6] A. Dasgupta and Y. Nakamura, "Walking feasible walking motion of humanoid robotics from human motion capture data," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1044-1049, 1999.
- [7] J. H. Park and Y. K. Rhee, "ZMP trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 90-95, 1998.
- [8] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda,

- “The sway compensation trajectory for a biped robot,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 925-931, 2003.
- [9] F. Amironche, C. Tung, G. Andersson, and R. Natarajan, “Redundancy modeling of optimum lifting conditions,” Advances in Bioengineering ASME, BED-Vol. 20, pp. 509-512, 1991.
- [10] D. Yoo, B. So, J. Choi, and B. -J. Yi, “Study on redundancy resolution algorithm of humanoid,” Proc. of Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, pp. 2759-2764, 2003.
- [11] D. Chaffin and G. Andersson, “Occupational biomechanics,” pp. 62-69, 1984.
- [12] C. Chevallereau, G. Abba, Y. Aoustin, F. Plestan, E.R. Westervelt, C. Canudas-de-Wit, J.W. Grizzle, “RABBIT: A testbed for advanced control theory,” IEEE Control Systems Magazine, Vol. 23, No. 5, pp. 57-79, October, 2003.
- [13] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi and K.Tanie, “Planning walking patterns for a biped robot,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17, No3, pp. 280-289, 2001.
- [14] T. Sugihara and Y. Nakamura, “Contact phase invariant control for humanoid robot based on variable impedant inverted pendulum model,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, pp. 51-56, 2003.
- [15] L. Sentis and O. Khatib, “Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives,” International Journal of Humanoid Robotics, vol. 2, no.4, pp. 505-518, Dec., 2005.
- [16] A. Goswami and V. Kallem, “Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3785-3790. 2004.
- [17] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, “ZMP Analysis for arm/leg coordination,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 75-81. 2003.
- [18] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, “Resolved momentum control : Humanoid motion planning based on the linear and angular momentum,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1644-1650. 2003.
- [19] T. Sugihara and Y. Nakamura, “Whole-body cooperative balancing of humanoid robot using COG jacobians,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2575-2580, 2002.
- [20] Freeman, R.A. and Tesar, D., “Dynamic modeling of serial and parallel mechanisms/robotic systems, Part I-Methodology, Part II-Applications.” Proc. of 20th ASME Mechanisms Conf., Orlando, FL, 1988.
- [21] Khatib, O., “A unified approach to motion and force control of robot manipulators: The operational space approach,” IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 3, no. 1, pp. 43-53, Feb., 1987.



최재연

2001 한양대학교 제어계측공학과(공학사)
 2003 한양대학교 전자전기 제어계측공학과(공학석사)
 2003~현재 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 박사과정

관심분야: Redundant Robot, Impact Dynamics, Mechanism Design.



윤 현 수

2007 한양대학교 전자전기공학
학과(공학사)
2009 한양대학교 전자전기제
어계측공학과(공학석사)
2009~현재 한양대학교 전자
전기제어계측공학과 박
사과정

관심분야: Medical Robots, Mechanism Design.



이 병 주

1984 한양대학교 기계공학과
(공학사)
1986 The University of Texas at
Austin Mechanical Engi-
neering (공학석사)
1991 The University of Texas at
Austin Mechanical Engineering (공학박사)

1991 The University of Texas at Austin, Post Doctor
1991~1995 한국기술교육대학교 제어기계과 교수
1995~현재 한양대학교 전자시스템공학과 교수
관심분야: Parallel Manipulators, Mobile Robot,
Mechanism Design, Surgical Robots.