

다족 보행로봇의 동적 조작성 해석

Force Manipulability Analysis of Multi-Legged Walking Robot

이 지 흥*, 조 북 기
(Jihong Lee and Bokgee Cho)

Abstract : This paper presents a force manipulability analysis of multi-legged walking robots, which calculates force or acceleration workspace attainable from joint torque limits of each leg. Based on the observation that the kinematic structure of the multi-legged walking robots is basically the same as that of multiple cooperating robots, we derive the proposed method of analyzing the force manipulability of walking robot. The force acting on the object in multiple cooperating robot systems is taken as reaction force from ground to each robot foot in multi-legged walking robots, which is converted to the force of the body of walking robot by the nature of the reaction force. Note that each joint torque in multiple cooperating robot systems is transformed to the workspace of force or acceleration of the object manipulated by the robots in task space through the Jacobian matrix and grasp matrix. Assuming the torque limits are given in infinite norm-sense, the resultant dynamic manipulability is derived as a polytope. The validity of proposed method is verified by several examples, and the proposed method is believed to be useful for the optimal posture planning and gait planning of walking robots.

Keywords : force manipulability analysis, multi-legged walking robot, reaction force, hard-foot

I. 서론

로봇의 출현 이후, 동물과 같은 유연한 움직임을 갖는 이동로봇에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 이동로봇은 인간이 접근하기 어려운 험한 지역을 탐험하거나 유해한 환경에서 인간을 대신하여 작업을 수행하고 있으며, 그 활용 범위가 점차 확대되고 있다. 이동로봇에는 바퀴를 이용하는 것[1], 다리를 이용한 것[2,3]이 있으며, 일부는 뱀이나 애벌레처럼 몸체의 움직임을 이용하여 이동하는 것도 있다[4]. 바퀴를 이용한 이동로봇이 주로 평탄한 지형을 대상으로 활용되고 있으나, 다리를 이용한 보행로봇은 유연한 움직임으로 평탄한 지형뿐만 아니라 험하고 복잡한 지형에도 활용될 수 있을 것이다.

보행로봇에 대한 연구는 동적 걸음새(dynamic gait), 운동 제어(movement control), 걸음새 생성(gait generation), 안정성 해석(stability analysis), 걸음새 제어성(gait controllability) 등 다양한 분야에서 이루어지고 있으나[5,6], 보행 로봇이 취하고 있는 특정 자세의 운동성 해석에 관한 연구는 아직 많지 않다[8] 기존 보행로봇의 운동성을 해석한 기존 연구로는 보행 로봇이 갖고 있는 각 다리 관절의 출력 가능한 가속도 범위 내에서 로봇의 몸체가 운동할 수 있는 속도 영역을 해석한 속도 조작성(Velocity manipulability)결과가 있다[8]. 하지만, 각 다리관절의 출력 가능한 토크 범위 내에서 로봇의 몸체가 운동할 수 있는 가속도 영역을 해석한 동적 조작성(Dynamic manipulability)에 관한 결과는 거의 없다.

조작성(manipulability)은 로봇의 몸체를 설계하거나 로봇

의 형태를 결정하려고 할 때 기구학적 또는 동력학적 척도가 필요하게 되는데 이러한 평가 기준으로 자주 사용된다. 조작성을 구현하는 방법에는 관절의 각속도나 관절 토크의 제약 조건을 2 노름으로 기술하는 조작성 타원과 무한대 노름으로 기술하는 조작성 다각형이 있다. 조작성 타원이 각 관절의 제약 조건을 작업 공간으로 정확하게 변환시키지 못하므로 여기서는 조작성 다각형에 대해서 다룰 것이다[9-12].

본 논문에서는 보행로봇의 동적 조작성을 해석하는 방법을 제안한다. 이는 다족 보행로봇의 속도작업공간 해석에 관한 연구를 확장한 것으로, 로봇의 몸체좌표계에 의해 표현되는 각 발끝의 속도를 발끝이 놓이는 지면에 대한 몸체의 상대 속도로 변환하는 방법을 사용하고 있다[8]. 동적 조작성을 해석하는 방법에서는 로봇의 몸체좌표계에 의해 표현되는 각 발끝의 가속도를 발끝이 놓이는 지면에 대한 몸체의 가속도로 변환한다. 다중 협동로봇의 경우와 동일하게 다족 보행로봇의 경우에 각 다리의 관절 토크의 한계 범위가 주어진 경우, 각 다리의 자코비안과 지면과의 접촉관계에서 해석에 필요한 부등식을 얻을 수 있다[13]. 얻어진 부등식 관계는 슬랙 변수(slack variable)[14]를 도입함으로써 일반적인 선형 방정식의 형태로 변환된다. 변환된 선형방정식의 변수는 조작성 다각형의 꼭지점과 슬랙 변수로 이루어지게 되며, 이들중 동적 조작성 다각형의 꼭지점을 골라냄으로써 로봇 몸체의 동적 조작성 다각형을 얻을 수 있다. 효율적인 개념 전달을 위해 선운동(회전운동 제외)에 대해서만 해석하기로 한다. 하지만, 동일한 방법을 확장하여 모든 운동 선분에 대한 해석도 할 수 있다.

본 논문의 II장에서는 논문에서 제안하는 해석방법을 소개한다. III장에서는 제안된 해석방법을 일반적인 관절 형태를 갖는 4족 보행로봇의 다양한 자세에 적용하여 해석함으로써 그 타당성과 유용성을 보일 것이다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 서술한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 10. 2., 채택확정 : 2003. 2. 28.

이지흥, 조북기 : 충남대학교 메카트로닉스공학과

(jihong@cnu.ac.kr, puseri@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 한국과학재단 지역대학우수과학자지원사업(과제 : R05-2003-000-10215-0)의 지원하에 이루어졌음.

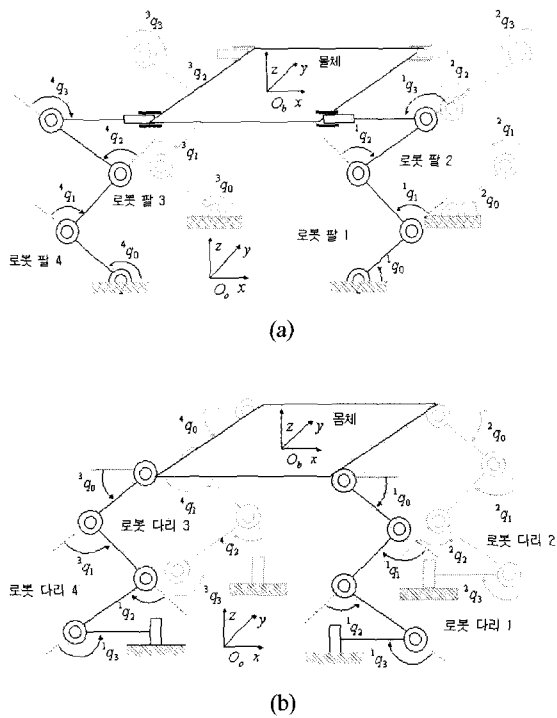


그림 1. 다중 협동로봇과 다족 보행로봇.
Fig. 1. Multi-cooperating robot system and multi-legged walking robot.

II. 다족 보행로봇의 동적 조작도

다중 협동 로봇의 다중 보행 로봇의 구조적 유사성에서 다중 협동 로봇의 동적 조작도 해석 방법을 다족 보행로봇의 동적 조작도 해석에도 사용할 수 있다. 전체 조건으로는 모든 다리가 지면과 접촉하고 있으며, 각 다리는 미끄러짐이 없이 지면을 지지하고 있다고 가정한다. 또한, 각 다리는 지면에 회전 성분의 힘을 제외한 선방향의 힘만 전달할 수 있는 hard contact[13]의 접촉 조건을 갖으며, 로봇은 초기에 정지하고 있다고 가정한다.

다중 협동로봇의 동적 조작성을 해석하는 방법이 다족 보행로봇의 동적 조작도를 해석하는 방법으로 확장될 수 있다는 것은 위의 그림(a), (b)에서 보는 것과 같이 여러 개의 로봇팔이 하나의 물체를 잡고 있는 형태가 여러 개의 다리를 갖는 로봇이 지면에서 서 있는 형태와 유사하다는 점에서 착안할 수 있다. 다중 협동로봇과 다족 보행로봇 사이의 차이는 다중 협동로봇의 각 로봇팔이 물체에 가하는 힘이 물체를 이동시키는 데 필요한 힘이라면, 다족 보행로봇에 적용하는 경우에는 각 다리가 지면에 가하는 힘이 반력으로 로봇 몸체에 전달되어 물체가 이동하는 힘이 된다는 것이다.

그림 1의 (b)에서 보는 것과 같은 다족 보행로봇에서 각 다리가 힘을 가해 물체를 이동시키는 경우, 물체가 받는 선 가속도 $\ddot{\phi} \in R^3$ 는 아래와 같이 x, y, z 의 3 성분의 가속도로 표현한다.

$$\ddot{\phi} = [\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T \tag{1}$$

물체의 동력학식은 물체의 가속도 $\ddot{\phi}$ 를 사용하여, 아래와

같이 표현한다.

$$Q = M_o \ddot{\phi} + Q_o \tag{2}$$

위의 수식에서, $Q \in R^3$ 는 물체가 갖고 있는 힘의 총량을 나타낸다. M_o 는 물체의 관성항을 나타내고, Q_o 는 물체의 중력 및 회전 속도에 관련된 항으로, M_o 와 Q_o 는 아래와 같이 표현한다.

$$M_o = \begin{bmatrix} m_o & 0 & 0 \\ 0 & m_o & 0 \\ 0 & 0 & m_o \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Q_o = [0 \ 0 \ -m_o g]^T \tag{4}$$

위의 수식에서, m_o 는 물체의 질량을 나타낸다. g 는 중력 가속도를 나타낸다. 수식전개의 편리를 위해 중력에 의한 성분을 무시하면, 수식 (2)는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$Q = M_o \ddot{\phi} \tag{5}$$

다음으로 로봇의 몸체를 지지하고 있는 N 개의 다리 중 L_i 개의 관절로 이루어진 i 번째 다리의 동력학 식은 아래와 같이 표현한다.

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + V_i \dot{q}_i + C_i + J_i^T F_i, \tag{6}$$

$i = 1, 2 \dots N$

위의 수식에서, $\tau_i \in R^{L_i}$ 는 각 다리의 관절 토크이다. M_i 는 각 다리의 관성항을 나타내며, V_i 는 각 다리의 전향력과 원심력을, C_i 는 각 다리의 중력항을 나타낸다. J_i 는 각 다리의 자코비안을 나타내며, F_i 는 외부에서 다리에 전달되는 힘을 나타낸다.

로봇이 정지하고 있다는 가정과 수식전개의 편리를 위해 중력에 의한 성분을 무시하면, 수식(6)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + J_i^T F_i \tag{7}$$

위의 식을 여러 다리의 경우에도 적용하기 위해서, 각 다리의 관련 항을 하나의 행렬 형태로 만들어 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = M \ddot{q} + J^T F \tag{8}$$

위의 수식에서, $\tau \in R^W (W = \sum_{i=1}^N L_i)$ 는 각 다리의 토크항을 모은 것으로 아래와 같이 표현한다.

$$\tau = [\tau_1^T \ \tau_2^T \ \dots \ \tau_N^T]^T \tag{9}$$

$M \in R^{W \times W}$ 은 각 다리의 관성항을 모은 것으로 아래와 같이 표현한다. O 는 영행렬을 나타낸다.

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & O & \cdots & O \\ O & M_2 & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & O & M_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\ddot{q} \in R^w$ 는 각 다리의 관절 가속도항을 모은 것으로 아래와 같이 표현한다.

$$\ddot{q} = [\ddot{q}_1^T \ \ddot{q}_2^T \ \cdots \ \ddot{q}_N^T]^T \quad (11)$$

$J \in R^{w \times w}$ 는 각 다리의 자코비안항을 모은 것으로 아래와 같이 표현한다.

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & O & \cdots & O \\ O & J_2 & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & O & J_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

$F \in R^{3N}$ 는 각 다리의 끝에 작용하는 외부 힘의 항을 모은 것으로 아래와 같이 표현한다.

$$F = [F_1^T \ F_2^T \ \cdots \ F_N^T]^T \quad (13)$$

각 다리와 몸체에 대한 동력학 식을 구했으므로, 이들 사이의 관계를 연결하는 수식이 필요하다. 로봇의 각 다리가 로봇의 몸체에 전달하는 반력은 로봇의 몸체에서 각 다리의 위치 관계에서 얻을 수 있다. 이러한 관계는 Grasp 행렬이라 불리는 형태로 정리할 수 있다[9]. 한 물체에 여러 힘이 작용하는 경우, 물체 중심에 작용하는 힘의 합(F_o)은 아래와 같이 표현한다.

$$F_o = \sum_{i=1}^N F_i \quad (14)$$

따라서, 로봇의 몸체와 각 다리 사이의 힘의 관계는 아래와 같은 행렬로 표현된다.

$$F_o = [I_{3 \times 3} \ \cdots \ I_{3 \times 3}] F \quad (15)$$

위의 식에서 $I_{3 \times 3} \in R^{3 \times 3}$ 는 단위행렬을 나타낸다.

몸체와 각 다리의 관계 수식을 얻었으므로, 수식 (5), (7), (14), (15)의 관계로부터 로봇의 몸체와 각 다리의 관계는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau &= M\ddot{q} + J^T F \\ &= MJ^{-1}\ddot{\phi} + J^T M_o \ddot{\phi} \\ &= [MJ^{-1}B + J^T M_o] \ddot{\phi} \end{aligned} \quad (16)$$

위의 수식에서 $[MJ^{-1} + J^T M_o]$ 를 H 라 하면, 아래의 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = H\ddot{\phi} \quad (17)$$

위의 수식은 각 다리의 관절 토크와 로봇 몸체의 가속도와의 관계를 나타내는 방정식이 되었다. 관절 개수가 L_i 인 다리의 토크(${}^k\tau_i$)가 아래와 같이 제한된 범위 내에서 움직일

수 있다면,

$$\begin{aligned} {}^k\tau_{i \min} \leq {}^k\tau_i \leq {}^k\tau_{i \max} \\ k = 1, 2, \cdots L_i \end{aligned} \quad (18)$$

로봇의 몸체 또한 수식 (14), (15)의 관계에 따라 제한된 범위의 가속도를 갖을 것이다. 만약 부등식 (18)의 각 다리 관절의 토크의 범위가 비대칭적으로 주어지는 경우에 표기상 불편하므로, 각 다리의 관절 토크를 아래와 같은 방법으로 정규화 한다.

$$x = D\tau + x_o \quad (19)$$

위의 수식에서, x 는 정규화 된 τ 를 나타내며, D 와 x_o 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x_o &\equiv -\frac{{}^1\tau_{1, \max} + {}^1\tau_{1, \min}}{{}^1\tau_{1, \max} - {}^1\tau_{1, \min}} \cdots -\frac{{}^k\tau_{i, \max} + {}^k\tau_{i, \min}}{{}^k\tau_{i, \max} - {}^k\tau_{i, \min}} \\ D &\equiv \text{diag} \frac{2}{{}^1\tau_{1, \max} - {}^1\tau_{1, \min}} \cdots \frac{2}{{}^k\tau_{i, \max} - {}^k\tau_{i, \min}} \end{aligned}$$

부등식 (18)는 수식 (19)의 관계에 의해서, 다음과 같은 부등식으로 표현된다.

$$-1 \leq {}^k x_i \leq +1 \quad (20)$$

각 다리의 관절 토크와 로봇 몸체의 가속도와의 관계를 나타내는 방정식 (17)을 (20)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -1 &\leq DH\ddot{\phi} + x_o \leq +1 \\ \vdots & \\ -1 &\leq \vdots + 1 \end{aligned} \quad (21)$$

부등식은 수치 해석적으로 해를 구할 수 없기 때문에, 슬랙 변수를 사용하여 부등식을 방정식의 형태로 변형한다. 위의 부등식 (21)은 -1 보다 큰 영역과 $+1$ 보다 작은 영역의 두개의 부등식으로 구성되며 각각에 슬랙 변수를 적용하여 정리하면, 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} DH\ddot{\phi} + \rho + x_o &= +1 \\ &\vdots \\ &+1 \\ -DH\ddot{\phi} + \delta - x_o &= +1 \\ &\vdots \\ &+1 \end{aligned} \quad (22)$$

$({}^k\rho_i \geq 0, {}^k\delta_i \geq 0)$

위의 식에서 $\rho \in R^w$ 와 $\delta \in R^w$ 는 슬랙 변수를 나타낸다. (22)를 아래와 같이 정리할 수 있으며

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} DH & I_{w \times w} & O_{w \times w} \\ -DH & O_{w \times w} & I_{w \times w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \rho \\ \delta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{w \times 1} - x_o \\ I_{w \times 1} + x_o \end{bmatrix}, \quad (23) \\ \begin{bmatrix} DH \\ -DH \end{bmatrix} I_{2w \times 2w} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \rho \\ \delta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{w \times 1} - x_o \\ I_{w \times 1} + x_o \end{bmatrix} \end{aligned}$$

간략히 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Az = b \tag{24}$$

A, z, b 는 각각 다음과 같다.

$$A = \begin{matrix} DH \\ -DH \end{matrix} I_{2W \times 2W}$$

$$z = \begin{matrix} \ddot{\phi} \\ \rho \\ \delta \end{matrix}$$

$$b = \begin{matrix} I_{W \times 1} - x_o \\ I_{W \times 1} + x_o \end{matrix}$$

이제 A 의 1열부터 3번째 열까지($\begin{matrix} DH \\ -DH \end{matrix}$)와 $I_{2W \times 2W}$ 의 $2W$ 열에서 선택한 임의의 $2W-3$ 열을 $2W \times 2W$ 정방행렬 A_j 를 고려한다. 그러면 (24)의 축소된 차원의 방정식을 다음과 같이 얻는다.

$$A_j \hat{z} = b, j = 1, \dots \left(\frac{2W}{3} \right) \tag{25}$$

여기서,

$$\hat{z} \equiv [\ddot{\phi}^T \ \rho^T \ \delta^T]^T \tag{26}$$

이다. 모든 $\left(\frac{2W}{3} \right)$ ($2W$ 로부터의 3조합)에 대해서 각기 다른 A_j 들이 존재하게 되고, 비특이 행렬 A_j 에 대해서 (25)의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{z}^* = \begin{matrix} \ddot{\phi}_j^* \\ \rho_j^* \\ \delta_j^* \end{matrix} = A_j^{-1}b, \tag{27}$$

이들 \hat{z}^* ([5] basic solution에 대응)중, 슬랙 변수 내에 음이 아닌 요소를 가지는 것들은 조작성 다각형의 꼭지점의 좌표를 포함하고 있으며 이는 [16]의 feasible basic solution에 대응된다. 해 \hat{z}^* 의 가속도 성분은 조작도 다각형의 꼭지점을 형성하게 된다. 이때, 모든 해가 다각형을 형성하는데 기여하지 않으며, 조작도 P_a 로부터 불필요한 요소($conv(P_a)$ 의 경계가 아닌 내부점)를 제외시키는 기법은 [17]에 나타나 있다.

III. 적용 예

다음의 예에 나오는 로봇의 모든 다리는 단위 관절 토크 $-1 \leq \tau_i \leq 1$ 를 갖는다고 가정한다.

1. 적용 예 1 (대칭된 자세에서의 조작도 다각형)

예 1은 직관적으로 로봇의 이동을 예측할 수 있는 대칭적인 자세에 제안한 방법을 적용하여 얻은 조작도 다각형을 분석함으로써 타당성을 검증할 것이다.

그림 2에 주어진 보행로봇에서 모든 링크를 단위 길이로 선정하고 로봇 몸체좌표계의 원점의 가속도를 고려한다. 그림 2의 로봇의 각 다리 관절각은 표 1과 같다. II절에서 언

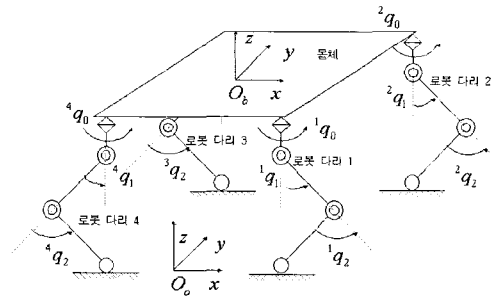


그림 2. 좌우 이동이 전후 이동보다 용이한 자세.
Fig. 2. A pose that is easily moving to right- and-left than forward-and-backward.

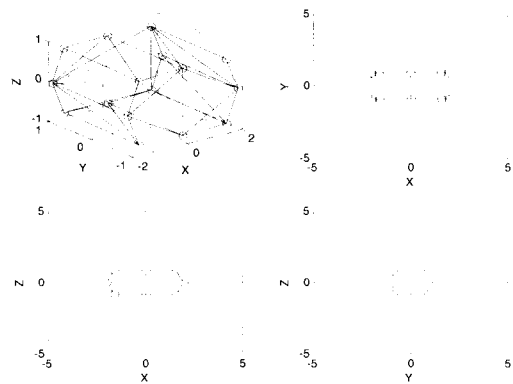


그림 3. 그림 2 자세에서의 조작도 다각형.
Fig. 3. Manipulability polytopes for Fig. 2.

급한 기법을 적용하면 (21)식의 DH 는 $R^{12 \times 3}$ 이 되며, 구해진 조작도 다각형 P_a 의 꼭지점은 다음과 같다.

표 1. 그림 2의 각 다리 관절의 관절각.

Table 1. Joint angles of each leg-joint for Fig. 2.

다리\관절	${}^i q_0$	${}^i q_1$	${}^i q_2$
1	0	$\pi/4$	$-3\pi/4$
2	0	$\pi/4$	$-3\pi/4$
3	0	$-\pi/4$	$3\pi/4$
4	0	$-\pi/4$	$3\pi/4$

$$P_a \begin{Bmatrix} 1.5974 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.8932 & -0.8932 & -0.8932 & 0.8932 \\ -0.8051 & -0.8461 & -0.8461 & -0.8461 \\ -1.5974 & -1.5974 & 0.0000 & 2.0000 \\ 0.8932 & -0.8932 & -0.8932 & -0.8932 \\ -0.8051 & -0.8051 & 0.8461 & 0.0000 \\ 1.5974 & 0.0000 & -1.5974 & -1.5974 \\ 0.8932 & 0.8932 & -0.8932 & -0.8932 \\ -0.8051 & -0.8461 & 0.8051 & 0.8051 \\ -2.0000 & 1.5974 & 0.0000 & -1.5974 \\ -0.8932 & -0.8932 & 0.8932 & 0.8932 \\ 0.0000 & 0.8051 & 0.8461 & 0.8051 \\ -2.0000 & -2.0000 & -2.0000 & 1.5974 \\ 0.8932 & -0.8932 & 0.8932 & 0.8932 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.8051 \\ -1.5974 & 2.0000 \\ 0.8932 & 0.8932 \\ 0.8051 & 0.0000 \end{Bmatrix}$$

이를 그림으로 나타내면 그림 3과 같이 나타난다.

표 2. 그림 4의 각 다리 관절의 관절각.

Table 2. Joint angles of each leg-joint for Fig. 4.

다리 ⁱ	관절	${}^i q_0$	${}^i q_1$	${}^i q_2$
1		$-\pi/2$	$\pi/4$	$-3\pi/4$
2		$\pi/2$	$\pi/4$	$-3\pi/4$
3		$\pi/2$	$-\pi/4$	$3\pi/4$
4		$-\pi/2$	$-\pi/4$	$3\pi/4$

결과로부터 몸체의 최대 가속도는 Y축 방향으로 ± 0.8932 로 얻어지고, X축 방향으로는 ± 2.0000 로 나타난다. 그림 2의 주어진 관절각도의 기구학적 다리형상을 고려하면, 로봇은 Y축보다 X축 방향으로 더 가속할 수 있다는 것을 직관적으로 알 수 있으며 시뮬레이션 결과와 일치한다.

같은 방법을 표 2와 같은 관절각을 갖는 자세에 적용하면, 구해진 조작도 다각형 P_a 의 꼭지점은 다음과 같다.

$$P_a = \begin{Bmatrix} -0.8932 & -0.8932 & -0.8932 & 0.0000 \\ 0.0000 & -1.5974 & -0.0253 & 1.5974 \\ -0.8461 & -0.8051 & -1.0118 & -0.8051 \\ 0.8932 & -0.8932 & -0.8932 & 0.8932 \\ -0.0253 & 1.5974 & 2.0000 & -1.5974 \\ -1.0118 & -0.8051 & 0.0000 & -0.8051 \\ -0.8932 & -0.8932 & -0.8932 & 0.8932 \\ -2.0000 & -1.5974 & 1.5974 & 1.5974 \\ 0.0000 & 0.8051 & 0.8051 & 0.8051 \\ 0.8932 & -0.8932 & 0.8932 & 0.8932 \\ -0.0000 & 2.0000 & -1.5974 & 2.0000 \\ 0.8461 & 0.0000 & 0.8051 & 0.0000 \\ 0.8932 & 0.8932 & 0.8932 & 0.8932 \\ 0.0000 & 1.5974 & 1.5974 & 2.0000 \\ 0.8438 & -0.8051 & -0.8051 & 0.0000 \\ -0.8932 & 0.8932 & 0.8932 & -0.8932 \\ 1.5974 & -0.0253 & -2.0000 & 0.0000 \\ -0.8051 & -1.0118 & 0.0000 & 0.8437 \\ 0.8932 & -0.8932 & 0.8932 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.5974 \\ -0.8461 & 0.8461 & 0.8051 \end{Bmatrix}$$

결과로부터 몸체의 최대 가속도는 Y축 방향으로 ± 2.0000 로 얻어지고, X축 방향으로는 ± 0.8932 로 나타난다. 그림 4의 주어진 관절각도의 기구학적 다리형상을 고려하면, 로봇은 X축보다 Y축 방향으로 더 가속할 수 있다는 것을 직관적으로 알 수 있으며 그림 2의 결과와 비교하면 예상한 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

2. 적용 예 2 (도약이 용이한 자세)

그림 6의 로봇은 표 3의 다리 관절각의 자세를 갖고 있다. 각 다리의 기구학적인 형상을 고려하면, 로봇은 좌우로 가속하기에 용이하지 못하다는 것을 알 수 있다. II장의 기법을 그림 6의 자세를 취하고 있는 로봇에 적용하면 Y축 방향으로 ± 0.8002 의 가속도 범위를 얻을 수 있고 X축 방향으로 ± 1.1316 의 가속도를 얻을 수 있다.

그림 5는 그림 4의 조작도 다각형을 그림으로 나타낸 것이다.

이는 앞의 예 1의 결과와는 상대적으로 적은 가속도 범위를 나타내고 있다. 그림 6에 대한 조작도 다각형은 그림 7과 같이 나타난다.

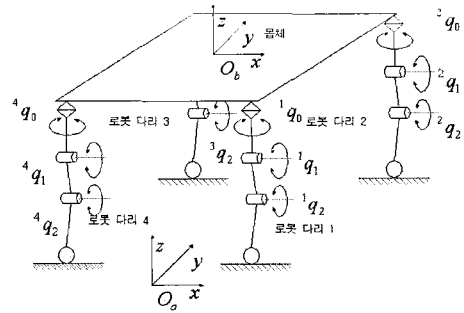


그림 4. 전후 이동이 좌우 이동보다 용이한 자세.

Fig. 4. A pose that is easily moving to forward-and-backward than right-and-left.

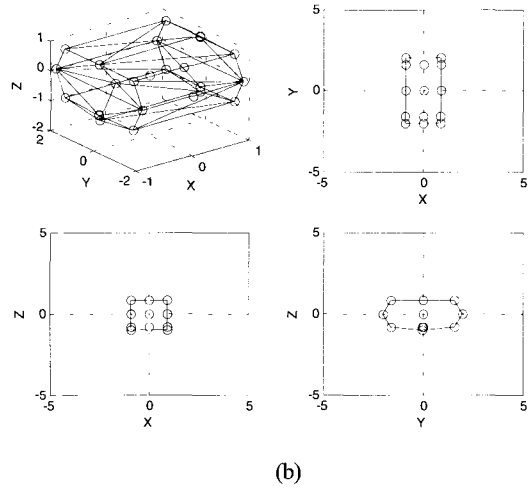


그림 5. 그림 4 자세에서의 조작도 다각형.

Fig. 5. Manipulability polytopes for Fig. 4.

표 3. 그림 6의 각 다리 관절의 관절각.

Table 3. Joint angles of each leg-joint for Fig. 6.

다리 ⁱ	관절	${}^i q_0$	${}^i q_1$	${}^i q_2$
1		$-\pi/4$	$-\pi/6$	$3\pi/4$
2		0	$-\pi/6$	$3\pi/4$
3		$-\pi$	$\pi/6$	$-3\pi/4$
4		$-3\pi/4$	$\pi/6$	$3\pi/4$

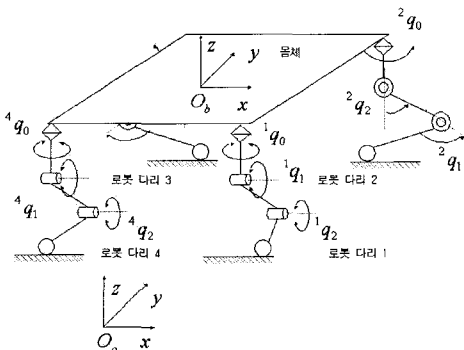


그림 6. 안정적으로 앉아 있는 자세.

Fig. 6. A pose sited down stably.

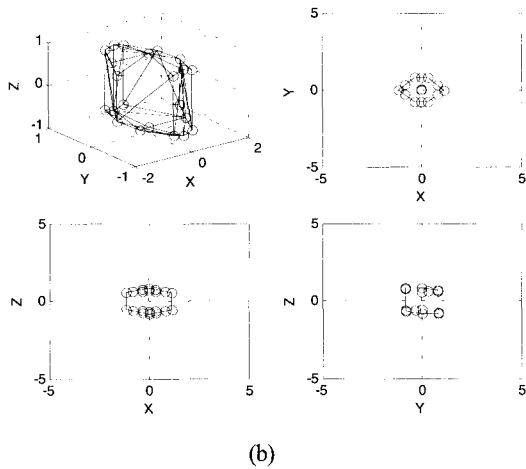


그림 7. 그림 6 자세에서의 조작도 다각형.
Fig. 7. Manipulability polytopes for Fig. 6.

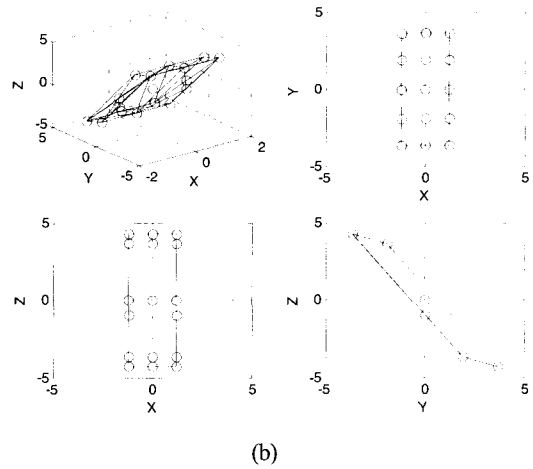


그림 9. 그림 8 자세에서의 조작도 다각형.
Fig. 9. Manipulability polytopes for Fig. 8.

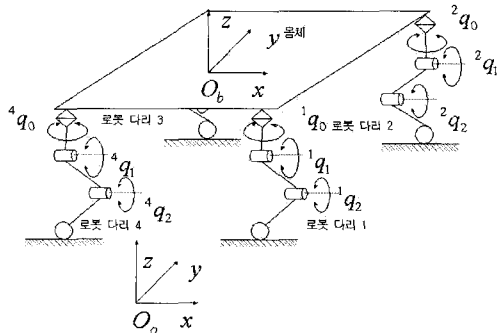


그림 8. 도약이 용이한 자세.
Fig. 8. A pose that is easily jumping up.

3. 적용 예 3 (도약과 전후방향 이동이 용이한 자세)

그림 8은 Z축 방향으로 가속하기 용이한 자세를 나타낸 것으로, 표 4와 같은 관절각을 갖는 자세를 취하고 있다. 로봇은 앞에서 예로 든 자세보다 Z축 방향의 가속도 성분을 크게 얻을 수 있을 것이다.

표 4. 그림 8의 각 다리 관절의 관절각.
Table 4. Joint angles of each leg-joint for Fig. 8.

다리\관절	${}^i q_0$	${}^i q_1$	${}^i q_2$
1	$-\pi/2$	$\pi/6$	$-\pi/4$
2	$\pi/2$	$-\pi/6$	$\pi/4$
3	$\pi/2$	$-\pi/6$	$\pi/4$
4	$-\pi/2$	$\pi/6$	$-\pi/4$

II장의 기법을 적용하여 얻은 각 축방향의 가속도 성분은 X축 방향으로 ± 1.2167 , Y축 방향으로 ± 3.6518 , Z축 방향으로 ± 4.2662 를 얻을 수 있다.

이는 앞의 예 1의 Z축 방향이 ± 0.8461 이고, 예 2의 Z축 방향이 ± 0.8572 인 것을 비교하면 상당히 큰 값을 나타내는 것을 통해 도약하기 용이함을 알 수 있다.

VI. 결론

각 다리관절의 구동장치에 주어진 구동 토크의 한계 범위 내에서, 보행로봇의 몸체가 출력할 수 있는 가속도의 범위를 구해내는 보행로봇의 동적 조작성 해석에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 통하여 다중 협동로봇의 동적 조작성 해석방법으로부터 다족 보행로봇의 동적 조작성 해석 기법을 유도 해 낼 수 있었고, 이때, 가속도작업공간에서 다각형으로 표현되는 조작성은 시스템에 의해 얻어지는 몸체 속도의 영역에 대한 정보를 포함하게 된다.

문제의 단순화를 위해, 로봇 발끝의 접촉조건을 힘만이 지면으로 전달되는 hard-foot 모델로 제한하고, 선가속도 성분만을 고려하여 이론을 전개하였다. 제한된 방법으로 가속도 성분의 성향을 알 수 있는 보행 로봇의 여러 자세에 적용하여 그 결과가 타당함을 보였고, 다른 여러 자세에도 적용할 수 있을 것이다.

향후, 다양한 발끝의 접촉조건과 보행로봇의 하중을 고려한 동적 조작성에 관한 연구로 확장될 예정이며 조작성 다각형의 체적이나 교점 등의 정보로부터 global 조작성이나 specialize 조작성 등에 관한 정보를 얻는 연구와 보행로봇의 최적경로계획이나 걸음새계획 및 이동성 평가 등에 관한 연구로 확장될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] R. L. Williams,II, B. E. Carter, P. Gallina, G. Rosati, "Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 18, no. 3, pp. 285-293, June 2002.

[2] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 17, no. 3, pp. 280-289, June 2001.

[3] S. Hirose and K. Kato, "Study on quadruped walking robot in tokyo institute of technology-past, present and future," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*,

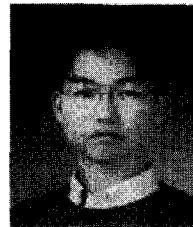
- pp. 414-419, 2000.
- [4] M. Yim, D. G. Duff, K. D. Roufas, "Walk on the wild side," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 49-53, December 2002.
- [5] B. Goodwine and J. Burdick, "Gait controllability for legged robots," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 484-489, 1998.
- [6] V. Hugel and P. Blazevic, "Towards efficient implementation of quadruped gaits with duty factor of 0.75," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 2360-2365, 1999.
- [7] F. B. Oueddou, O. Bruneau, J. C. Guinot, "Dynamic analysis tool for legged robots," *Multibody System Dynamics 2*, pp.369-391, 1998.
- [8] 이지홍, 전봉환, "다족 보행로봇의 속도작업공간 해석," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, vol. 8, no. 6, pp. 477-483, June, 2002.
- [9] J. Lee, "A study on the manipulability measures for robot manipulators," *IEEE/RSJ IROS'97.*, pp.1458-1465, 1997.
- [10] G. M. Ziegler, *Lectures on Polytopes*, Springer-Verlag, 1995.
- [11] D. R. Chand and S. S. Kapur, "An algorithm for convex polytopes," *Journal of Association for Computing Machinery*, vol. 17, no. 1, pp. 78-86, 1970.
- [12] F. T. Cheng, et. al., "Resolving manipulator redundancy under inequality constraints," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 10, no. 1, Fed., 1994.
- [13] A. Bicchi, C. Melchiorri, and D. Balluchi, "On the mobility and manipulability of general multiple limb robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 2, pp. 215-228, 1995.
- [14] J. S. Arora, "Introduction to optimum design," *McGraw-Hill*, 1989.
- [15] B. Bayle, J. Y. Fourquet, and M. Renaud, "Manipulability analysis for mobile manipulators," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1251-1256, 2001.
- [16] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *JRobot*, vol. 4, no.2, pp. 3-9, 1985.
- [17] J. Lee, "Velocity workspace analysis for multiple arm robots systems," *Robotica*, vol. 19, pp. 581-591, 2001.



이 지 홍

1960년 4월 12일생, 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사. 2001년 ~ 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.

관심분야는 로봇틱스, 인공지능.



조 복 기

1977년 1월 24일생, 2002년 충남대 메카트로닉스 공학과 졸업. 동대학원 석사과정. 관심분야는 로봇틱스, 신경망.