

# 다족 보행 로봇 시스템의 이동성 및 민첩성

## Mobility and Agility of Multi-legged Walking Robot System

심 형 원, 이 지 흥\*

(Hyungwon Shim and Jihong Lee)

**Abstract :** This paper presents a method for the acceleration analysis of multi-legged walking robots in consideration of the frictional ground contact. This method is based on both unified dynamic equation for finding the acceleration of a robot's body and constraint equation for satisfying no-slip condition. After the dynamic equation representing relationship between actuator torques and body acceleration, is derived from the force and acceleration relationship between foot and body's gravity center, the constraint equation is formulated to reconfigure the maximum torque boundaries satisfying no-slip condition from given original actuator torque boundaries. From application of the reconfigured torques to the dynamic equation, interested acceleration boundaries are obtained. The approach based on above two equations, is adapted to the changes of degree-of-freedom of legs as well as friction of ground. And, the method provides the maximum translational and rotational acceleration boundaries of body's center that are achievable in every direction without occurring slipping at the contact points or saturating all actuators. Given the torque limits in infinite norm-sense, the resultant accelerations are derived as a polytope. From the proposed method, we obtained achievable acceleration boundaries of 4-legged and 6-legged walking robot system successfully.

**Keywords :** acceleration analysis, multi-legged robots, frictional ground contact, unified dynamic equation, acceleration boundary

### 1. 서론

최근 야지에서 감시 정찰 및 주행이 가능한 로봇에 대한 많은 연구들이 진행됨에 따라 동물과 같은 유연한 움직임을 통하여 이동 및 장애물 극복이 용이한 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 이동 로봇은 인간이 접근하기 어려운 험한 지역을 탐험하거나 유해한 환경에서 인간을 대신하여 작업을 수행할 수 있다는 점에서 그 활용 범위가 점차 확대되고 있다. 이 이동 로봇 중 험지에서 견고 뛰며, 장애물 등을 효과적으로 극복할 수 있는 다리를 이용한 보행 로봇은 그 효용 가치가 더욱 광범위하여 많은 분야에서 필요성이 대두되고 있다.

다리를 이용한 보행 로봇 시스템은 여러 대의 로봇으로 구성되어 있는 다중 로봇 시스템의 하나로 여러 개의 다리의 협조 작업을 통하여 이동하는 시스템이다. 이 로봇은 여러 개의 다리를 제어하는 방법에 따라 자세 변형 및 이동 능력이 결정되는 특성을 갖고 있기 때문에 걸음새 생성 및 제어와 안정성 유지, 그리고 동적 운동 제어에 초점을 맞추어 많은 연구들이 진행되었다[1-7]. 이러한 연구들이 결실을 맺어 현재 많은 로봇들이 개발되었으나, 그 용도가 좀더 산과 들과 같은 험지에서의 작업 수행을 목표로 점차 확대되어 지형을 고려한 경로 계획과 같은 연구들이 필요하게 되었다. 이에 따라 보다 효과적인 경로 계획을 위한 지형 인식 및 주변 지형을 고려한 로봇의 운동 능력 해석 등에 관한 연구들이 잇따라 진행되고 있다[8]. 주변 지형을 고려한 로봇의 운동 능력 해석 중 주어진 지형 환경에서 로봇이 얼마나 잘 이동하고 자세를 바꿀 수 있는냐는 경로 계획에 있어서 최적의 경로를 찾아내는데 매우 유용한 요소로 작용한다.

따라서, 본 논문에서는 그림 1과 같은 다족 보행 로봇의 경로 계획에 관한 연구의 일환으로 주어진 지형 환경에 따른 로봇의 기구학적, 동역학적 특성을 고려한 로봇의 이동성 및 민첩성을 해석할 수 있는 수학적 방법을 제안한다. 이 연구에 있어서 로봇의 이동성이라 로봇의 기구학적, 동역학적 요소를 모두 고려하였을 때, 로봇의 몸체 중심에서 발생하는 선형 가속도를 말하며, 민첩성이란 이 때 몸체 중심에서 발생하는 회전 가속도를 말한다. 즉 본 연구는 로봇의 기구학적 요소인 로봇의 자세와, 동역학적 요소인 다리 관절 구동기가 낼 수 있는 토크 및 지면의 마찰을 고려하였을 때 로봇의 몸체 중심에서 발생하는 가속도 영역을 해석할 수 있는 방법에 관한 것이다. 이 방법은 다중 협동 로봇의 가속도 해석[9-12]을 응용한 연구로 크게 다리 관절 토크와 몸체 가속도 사이의 상관 관계를 유도한 다족 보행 로봇의 동역학식과 지면 마찰을 고려하여 다리 관절의 토크를 제한한 구속식을 이용한다. 이 두 식 중 로봇의 동역학식은 다리 끝에서 내는 힘과 가속도가 몸체에 반력으로 작용하였을 때 이 힘 및 가속도와 몸체 중심에서 발생될 수 있는 가속도와와의 관계식을

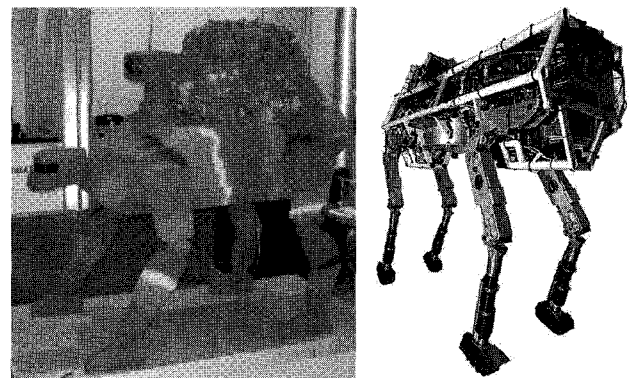


그림 1. 4족 보행 로봇의 예.  
Fig. 1. Example of 4-legged walking robot.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 12. 3., 채택확정 : 2008. 7. 26.

심형원, 이지흥 : 충남대학교(s\_shw@cnu.ac.kr/jihong@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행하는 국방무인화특화연구센터 사업의 일환으로 연구되었음.

유도하여 다리의 동역학식을 적용한 수식이다. 구속식은 지면 마찰 조건으로부터 다리 끝에서 내는 힘을 제약하는 힘 구속식을 다리 관절 토크와 힘의 상관 관계를 이용하여 토크를 제약하는 부등식으로 표현한 것이다. 본 논문은 이 부등식을 이용하여 주어진 토크를 제약하고, 이 제약된 토크를 로봇 동역학식에 대입하여 몸체 중심의 가속도를 구하는 수학적 체계를 제시한다.

본 논문의 II 장에서는 다리와 몸체의 기본 동역학식들과 다리와 몸체 사이의 힘과 가속도 관계를 이용하여 토크와 몸체 가속도로 표현되는 다족 보행 로봇 시스템의 동역학식의 유도 과정을 제시하고, III 장에서는 지면 마찰을 고려하여 로봇의 다리 관절 토크를 제약하는 구속식의 유도 과정을 제시한다. 그리고, IV 장에서는 로봇의 이동성 및 민첩성을 해석하기 위한 수학적 체계를 제시하고, V 장에서는 본 논문의 타당성을 입증하기 위해 본 논문에서 제안한 수학적 체계를 근사화된 4족 및 6족 보행 로봇에 적용하여 시뮬레이션한 결과를 보여준다.

**II. 다족 보행 로봇의 동역학**

먼저, 본 장에서는 주어진 다리 관절의 구동기 토크로부터 그림 2와 같은 다족 보행 로봇의 이동성과 민첩성을 나타내는 몸체 가속도를 구할 수 있는 동역학식의 유도 방법을 제시하기로 한다.

**1. 다족 보행 로봇의 몸체와 다리의 동역학**

다족 보행 로봇 시스템은 여러 개의 다리와 이 다리로 지지되는 하나의 몸체로 크게 분류될 수 있으며, 몸체의 동역학식은 다음과 같이 정의할 수 있다[8].

$$Q = I_b \ddot{u}_b + Q_b \tag{1}$$

위 식에서  $Q$ 는 몸체 중심에 가해지는 힘과 모멘트를 나타내며,  $Q_b$ 는 몸체의 중력 및 회전 속도에 관련된 항이다.  $I_b$ 는 물체의 관성항을 나타내고,  $\ddot{u}_b$ 은 몸체 중심의 가속도를 나타내는 항이다.

이 몸체를 지지하는  $m$  대의 다리 중  $i$  번째 다리의 동역

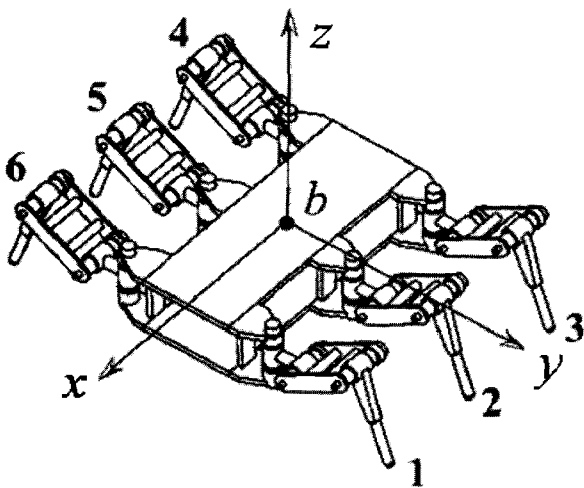


그림 2. 다족 보행 로봇 시스템의 예[8].

Fig. 2. Example of multi-legged robot system.

학식은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + J_i^T F_i + h_{c_i} \tag{2}$$

위 식에서  $\tau_i \in R^k$ 는  $i$  번째 다리 관절에 가해지는 토크이고,  $M_i \in R^{k \times k}$ 는 다리의 관성항이며,  $\ddot{q}_i \in R^k$ 는 각 관절 각가속도이다.  $J_i \in R^{6 \times k}$ 는 자코비안 행렬을,  $F_i \in R^6$ 는 다리 끝이 지면에 가하는 힘을,  $h_{c_i} \in R^k$ 는 원심력과 전향력 및 중력과 관련된 항을 나타낸다. 여기서  $k$ 는 한 개의 다리에 포함된 관절의 개수이다.

식 (2)를 사용하여  $m$ 개의 다리에 대해 한번에 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_1^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & J_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{c_1} \\ \vdots \\ h_{c_m} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \tau = M\ddot{q} + J^T F + h_c \tag{3}$$

**2. 다리와 몸체 사이의 힘과 가속도의 관계**

다족 보행 로봇의 경우 다리 끝이 지면의 접촉점에 가하는 힘과 가속도가 몸체와 다리의 연결 부분에 반력으로 작용하여 몸체 중심에 가속도를 발생시킨다. 이 점을 착안하면 다리 끝에서 내는 힘(또는 가속도)과 몸체 중심의 가속도와 상관 관계[8,9]를 구할 수 있다.

우선 다리 끝에서 내는 힘이 몸체 중심의 가속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 다리와 몸체의 힘 관계식을 구하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$-(WS^T)(SF) + G \equiv -W_s F_s + G = Q \tag{4}$$

여기서  $G$ 는 몸체에 가해지는 중력 가속도이며,  $S$ 는 다리 끝이 지면의 접촉점에 가할 수 있는 힘과 모멘트의 성분만을 추출해주는 선택 행렬이다. 이 행렬은 다리 끝에서 지면에 가할 수 있는 힘과 모멘트 성분만이 로봇의 몸체에 반력으로 작용한다는 점을 착안하여 추가한 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$S = \text{diag}[S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_m] \in R^{m \times 6m} \tag{5}$$

$n$ 은 다리 끝이 지면에 가할 수 있는 힘과 모멘트의 성분의 개수이다. 예를 들어 다리 끝과 지면이 점 접촉하는 경우는 다리 끝이 지면에 모멘트를 가할 수 없기 때문에  $i$  번째 선택 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$S_i = [I_3 \ 0_3] \in R^{3 \times 6} \tag{6}$$

식 (4)의  $W$ 는 다리 끝에서 내는 힘과 몸체 중심에서 받는 힘 사이의 상관 관계를 나타내주는 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$W = [W_1 \ \cdots \ W_m] \tag{7}$$

$$W_i = \begin{bmatrix} I_3 & 0_3 \\ P_i & I_3 \end{bmatrix}, P_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기서  $p_i$ 는 몸체 중심에서  $i$ 번째 다리와 몸체의 연결점까지를 나타내는 벡터이다.

다리 끝에서 내는 힘과 몸체 중심의 가속도 사이의 상관 관계는 식 (4)와 (1)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_s = W_s^{\#}(-I_b \ddot{u}_b - Q_b + G) + N(W_s)\varepsilon \quad (9)$$

단, 여기서  $W_s^{\#}$ 는  $W_s$ 의 pseudoinverse이고, 식 (9)의 일반적인 역변환으로 추가된  $N(W_s)\varepsilon$ 은 항은 내부 힘에 관계된 항으로 본 연구에서는 다루지 않았다.

다음으로 다리 끝에서 내는 가속도가 몸체 중심의 가속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 다리와 몸체의 가속도 관계식을 구하면 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{u}_e^l = -W_s^T \ddot{u}_b \left( \ddot{u}_e^l = [(\ddot{u}_{e1}^l)^T \dots (\ddot{u}_{em}^l)^T]^T \right) \quad (10)$$

위 식에서  $\ddot{u}_e^l$ 은 다리 끝에서 발생하는 가속도 중 몸체에 영향을 미치는 가속도 성분만을 나타낸 항이다. 이 다리 끝의 가속도는 다리의 자코비안 행렬( $J$ )에 의한 속도 관계식  $\dot{u}_e^l = SJ\dot{q} \equiv J_s \dot{q}$ 으로부터 다리의 관절 각가속도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\ddot{u}_e^l = J_s \ddot{q} + \dot{J}_s \dot{q} \quad (11)$$

본 논문에서는 기존 논문[8,9]과 달리 자코비안의 속도항( $\dot{J}_s \dot{q}$ )을 생략하지 않고 그대로 적용하였다.

식 (10)과 (11)로부터 다리의 관절 각가속도와 몸체 중심의 가속도는 다음과 같은 상관 관계를 갖는다.

$$J_s \ddot{q} + \dot{J}_s \dot{q} = -W_s^T \ddot{u}_b \quad (12)$$

### 3. 다족 보행 로봇의 동역학식

다족 보행 로봇의 몸체 중심 가속도는 다리 관절의 구동기에 주어진 토크에 의해 발생된다. 이점을 착안하여 본 논문에서는 다리 관절 토크와 몸체 중심의 가속도와 상관 관계를 나타내는 동역학식을 II장 1, 2절에서 유도한 동역학식으로부터 구하였다.

우선 식 (3)은 다리 끝에서 실제로 발생하는 힘과 모멘트만을 고려하여 다음과 같이 바꿔 표현할 수 있다.

$$M\ddot{q} + J_s^T F_s + h_c = \tau \quad (13)$$

위 식의 다리 관절 각가속도( $\ddot{q}$ )와 힘에 관한 항( $F_s$ )을 II장 2절에서 유도한 식 (9)와 (12)에 의해 몸체 가속도로 대체하게 되면 식 (13)은 다리 관절 토크와 몸체 가속도의 상관 관계를 나타내는 동역학식으로 표현될 수 있다. 그러나, 식 (12)를 식 (13)에 대입하기 위해서는 자코비안의 역변환이 필요하게 되는데 이 자코비안은 역변환이 항상 가능한 것은 아니다. 이점을 고려하여 식 (13)의 양변에  $J_s M^{-1}$ ( $M$ 은 항상 역변환 가능)을 곱하여 자코비안의 역변환이 필요없는 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$J_s \ddot{q} + J_s M^{-1} J_s^T F_s + J_s M^{-1} h_c = J_s M^{-1} \tau \quad (14)$$

위 식에 식 (9)와 (12)를 대입하면 다음과 같은 동역학식을

얻을 수 있다.

$$-W^T \ddot{u}_b + J_s M^{-1} J_s^T W^{\#} (-I_b \ddot{u}_b - Q_b + G) + J_s M^{-1} J_s^T N(W)\varepsilon - \dot{J}_s \dot{q} + J_s M^{-1} h_c = J_s M^{-1} \tau \quad (15)$$

식 (15)를 다리 관절 토크와 몸체 가속도에 대한 선형 방정식의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$A\ddot{u} = B\tau + V \quad (16)$$

여기서,

$$A = [-W^T - J_s M^{-1} J_s^T W^{\#} I_b \quad J_s M^{-1} J_s^T N(W)],$$

$$\ddot{u} = [\ddot{u}_b^T \quad \varepsilon^T]^T, \quad B = J_s M^{-1},$$

$$V = J_s M^{-1} (J_s^T W^{\#} (Q_b - G) - h_c) + \dot{J}_s \dot{q}.$$

$A$ 의  $[-W^T - J_s M^{-1} J_s^T W^{\#} I_b]$ 는  $R^{m \times n}$ 의 차원을 갖으며,  $[J_s M^{-1} J_s^T N(W)]$ 는  $R^{m \times (m-1)n}$ 의 차원을 갖기 때문에 항상 역변환이 가능하다. 그리고,  $V$ 는 로봇의 몸체와 다리 관절 각의 초기 속도가 주어지면 모든 요소가 상수로 표현되기 때문에 고정된 값을 갖는 벡터로 취급될 수 있다. 따라서 식 (16)은 다리 관절의 토크가 주어지면 항상 몸체 가속도를 구할 수 있는 선형 방정식의 형태를 갖는다.

식 (16)으로부터 로봇 몸체의 가속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{u}_b = S_b A^{-1} B\tau + S_b A^{-1} V \quad (17)$$

여기서,  $S_b$ 는 로봇 몸체의 가속도에 관계된 항만을 추출해주는 선택 행렬이다.

### III. 마찰을 고려한 구속식

본 장에서는 다족 보행 로봇이 지면에서 미끄러지지 않고 이동하기 위해 필요한 구속식을 구하는 방법을 제시한다. 이 구속식은 마찰을 고려하여 다리 끝이 미끄러지지 않기 위해 다리 관절에 가할 수 있는 토크의 범위를 제약하는 식이다.

#### 1. 지면 마찰 근사화

다족 보행 로봇이 다리 끝과 지면의 접촉점에서 미끄러짐 없이 이동하기 위해서는 다리 끝에서 내는 접촉면의 수평 방향의 힘이 마찰력보다 크지 않아야 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다[8-10].

$$\sqrt{f_{ix}^2 + f_{iy}^2} \leq -\mu_i f_{iz} \quad (18)$$

위 식에서  $-f_{iz}$ 는  $f_i$ 의 접촉면에 수직 방향 성분이고,  $f_{ix}$ ,  $f_{iy}$ 는  $f_i$ 의 접촉면에 수평 방향 성분이며,  $\mu_i$ 는 지면과  $i$ 번째 다리 끝 사이의 최대 정지 마찰 계수이다. 식 (18)을 기하학적으로 표현하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있는데, 이것을 일반적으로 마찰 원뿔(friction cone)이라 한다.

그림 3에서  $\theta_{\mu}$ 는  $z$ 축과 마찰 원뿔의 빗변이 이루는 각도로 마찰각이라 정의되며, 마찰 계수의 크기를 결정짓는다. 마찰 원뿔을  $z$ 축에 수직인 방향으로 자르게 되면  $xy$ 평면에서 힘을 제약할 수 있는 그림 4와 같은 마찰원을 얻을 수 있다. 하지만 이 마찰원의 내부는 원의 부등식으로 표현되기 때문에 본 문제에 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서

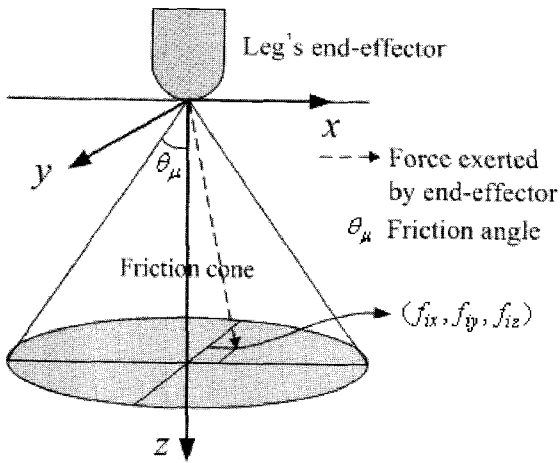


그림 3. 다리 끝의 힘과 마찰 원뿔의 관계.  
Fig. 3. Geometrical representation of static frictional constraints.

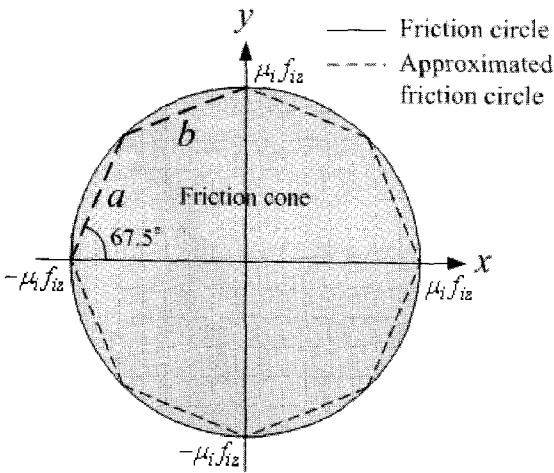


그림 4. 마찰 원뿔의 근사화.  
Fig. 4. Approximation of friction cone.

서는 이 마찰원을 팔각형으로 선형화하여 각 변에 대해 식 (19)과 같은 힘을 제약할 수 있는 부등식을 구하였다. 이 마찰원을 더 많은 변을 갖는 다각형으로 근사화하면 참값에 가까워지겠지만, 계산 시간 등을 고려하여 팔각형으로 근사화하였다[9].

$$\begin{aligned} a : -f_{ix} + (\sqrt{2}-1)f_{iy} - \mu_i f_{iz} &\leq 0 \\ b : -(\sqrt{2}-1)f_{ix} + f_{iy} - \mu_i f_{iz} &\leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)와 같이 모든 변에 대해 힘을 구속하는 부등식을 구하여 행렬의 형태로 나타내면 다음과 같다[9,10].

$$C_i = \begin{bmatrix} -1 & (\sqrt{2}-1) & -\mu_i \\ -(\sqrt{2}-1) & 1 & -\mu_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & -(\sqrt{2}-1) & -\mu_i \end{bmatrix} \in R^{8 \times 3} \quad (20)$$

식 (20)을 이용하여 다리 끝이 지면의 접촉점에 가하는 힘을 제약하는 구속식을 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$CRF \leq 0 \quad (21)$$

$$C = \text{diag}[C_1 \ C_2 \ \dots \ C_m] \in R^{8m \times 3m}$$

위 식에서  $R$ 은 몸체 중심 좌표계를 기반으로 설정된 다리 끝에서 내는 힘을 지면의 마찰 원뿔을 고려하여 설정된 좌표계로 회전시켜주는 회전 행렬이다.

2. 다리 관절 토크 구속식

로봇 몸체 중심 가속도를 구하는 과정은 그림 5와 같이 주어진 다리 관절 토크의 영역으로부터 토크의 경계값을 이용하여 토크 영역의 최외각점들을 찾아 우선, 식 (12)와 (14)를 이용하여 힘( $F_s$ )에 대해 식을 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_s = (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} W^T \ddot{u}_b + (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} J_s M^{-1} \tau + (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} (J_s \dot{q} - J_s M^{-1} h_c) \quad (22)$$

식 (22)에 식 (17)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 다리 끝에서 내는 힘과 다리 관절 토크의 관계식을 얻을 수 있다.

$$F_s = (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} (W^T S_b A^{-1} B + J_s M^{-1}) \tau + (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} (W^T S_b A^{-1} V + J_s \dot{q} - J_s M^{-1} h_c) \quad (23)$$

최종적으로 마찰이 고려된 다리 관절 토크의 구속식은 식 (23)을 식 (21)에 대입함으로써 다음과 같은 부등식으로 표현된다.

$$\alpha \tau \leq \beta \quad (24)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= CR (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} (W^T S_b A^{-1} B + J_s M^{-1}), \\ \beta &= -CR (J_s M^{-1} J_s^T)^{-1} (W^T S_b A^{-1} V + J_s \dot{q} - J_s M^{-1} h_c). \end{aligned}$$

위 식들에서 보는 바와 같이 본 논문에서는 기존 논문들 [8,9,10]과는 달리 보다 정확성이 높은 결과를 도출하기 위해 근사화 과정이 최소화되도록 속도에 관한 항들과 널항 ( $N(W_s)\epsilon$ )을 생략하지 않았다.

IV. 이동성 및 민첩성 해석을 위한 수학적 체계

본 장에서는 II 장과 III 장에서 구한 다족 보행 로봇의 동역학식과 구속식을 이용하여 로봇의 이동성 및 민첩성을 나타내는 몸체 중심 가속도를 구하는 수학적 체계를 제시한다.

로봇 몸체 중심 가속도를 구하는 과정은 그림 5와 같이 주어진 다리 관절 토크의 영역으로부터 토크의 경계값을 이용하여 토크 영역의 최외각점들을 찾아 토크 구속식에 대입하는 것으로부터 시작된다[9]. 토크 영역의 최외각점들은 경계값의 조합으로 이루어지며, 각 점들은 다음의 예와 같이 구할 수 있다.

$$-1 \leq \tau_1 \leq 1, -1 \leq \tau_2 \leq 1 \quad (25)$$

각 토크 영역이 식 (25)와 같이 주어지면, 전체 토크 영역의 최외각점은 다음과 같이 구해진다.

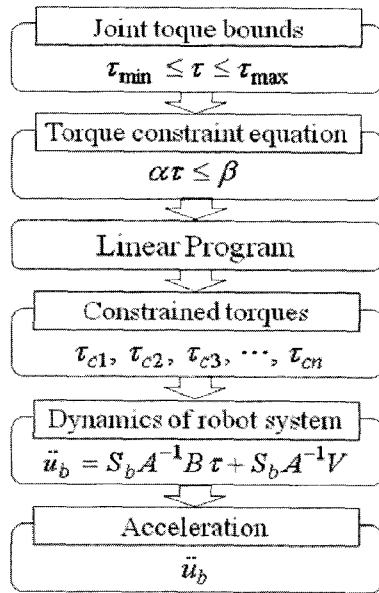


그림 5. 다족 보행 로봇의 이동성 및 민첩성 해석 과정.  
Fig. 5. Numerical processing for mobility and agility analysis of multi-legged robot.

$$\tau_{vertex} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

이렇게 토크 영역의 최외각점이 정해지면, 이 점들과 토크 구속식을 상용화된 선형화 프로그램에 대입하여 다리 끝이 지면의 접촉점에서 미끄러지지 않기 위해 제약된 토크의 최외각점을 다시 구한다. 이렇게 구해진 토크의 최외각점들을 식 (17)에 각각 대입하여 몸체 중심 가속도를 구한다. 이렇게 구해진 가속도들의 최외각점들을 이으면 최대 가속도 영역을 다각형의 형태로 구해낼 수 있다. 이 가속도 영역 중 선형 가속도가 다족 보행 로봇의 이동성이 되며, 회전 가속도가 로봇의 민첩성이 된다.

**V. 시뮬레이션**

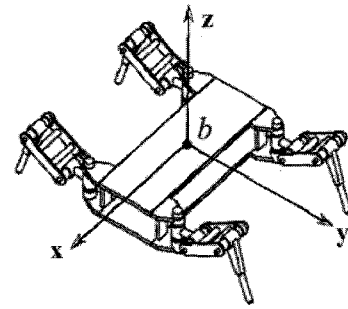
본 장에서는 II, III, IV 장을 통해 유도한 다족 보행 로봇의 이동성 및 민첩성 해석을 위한 수학적 체계를 이용하여 근사화된 4족 및 6족 보행 로봇의 이동성과 민첩성을 알아보고 유도된 수학적 체계에 대한 타당성을 제시한다. 각 예제에 대한 시뮬레이션은 예측이 어려운 몸체와 다리 관절의 초기 속도를 0으로 하여 수행되었으며, 각 예제는 시뮬레이션의 편의를 위해 근사화된 모델을 사용하였다.

**1. 4족 보행 로봇 시스템**

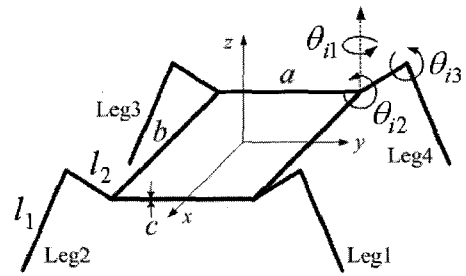
그림 6(a)는 그림 2의 로봇에서 중간에 위치한 다리를 제거하여 만든 4족 보행 로봇으로 각 다리마다 3개의 관절을 가지고 있다. 이 로봇의 이동성 및 민첩성을 알아보기 위해 로봇의 몸체와 다리를 간략하게 근사화하여 그림 6(b)와 같이 모델링하였다.

그림 6(b)와 같이 모델링된 로봇에 대해 표 1과 같이 로봇의 변수들을 설정하고, 본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 시뮬레이션하였다.

표 1과 같이 다리 관절 토크와 마찰각이 주어지고, 다리의 자세가 전후좌우 대칭인 경우, 마찰을 고려하여 다리 끝이



(a) 4족 보행 로봇의 예.



(b) (a)의 근사적 모델.

그림 6. 4족 보행 로봇의 근사적 모델.

Fig. 6. Simplified model of 4-legged robot.

표 1. 그림 6(b)의 변수 정의.

Table 1. Definition of parameters in Fig. 6(b).

분류	크기
다리 길이(m)와 질량(kg)	$l_1 = 0.5, l_2 = 0.3, m_1 = m_2 = 0.5$
몸체 크기(m)와 질량(kg)	$a = 0.5, b = 1, c = 0.1, m_b = 2$
관절의 초기각도(°)	$\theta_{11} = 0, \theta_{12} = 10, \theta_{13} = -95$ $\theta_{21} = 180, \theta_{22} = 10, \theta_{23} = -95$ $\theta_{31} = 180, \theta_{32} = 10, \theta_{33} = -95$ $\theta_{41} = 0, \theta_{42} = 10, \theta_{43} = -95$
관절 토크(Nm)	$-5 \leq \tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3} \leq 5 \quad (i = 1, \dots, 4)$
마찰각(°)	$\theta_\mu = 30$

지면과의 접촉점에서 미끄러짐이 발생하지 않도록 하는 제약된 각 다리의 관절 토크는 식 (24)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_c^1 = \begin{bmatrix} -3.0875 \\ -5.0000 \\ -3.7462 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -3.3224 \\ -5.0000 \\ -3.2996 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.7985 \\ 3.5197 \\ 5.0000 \end{bmatrix},$$

$$\tau_c^2 = \begin{bmatrix} -5.0000 \\ -5.0000 \\ -0.1787 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -5.0000 \\ -5.0000 \\ -2.2787 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.7985 \\ 2.3947 \\ -1.4358 \end{bmatrix},$$

$$\tau_c^3 = \begin{bmatrix} -3.0875 \\ -5.0000 \\ -3.7462 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -3.2301 \\ -5.0000 \\ -4.2385 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.7985 \\ 3.5197 \\ 5.0000 \end{bmatrix},$$

$$\tau_c^4 = \begin{bmatrix} -5.0000 \\ -5.0000 \\ -0.1787 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -5.0000 \\ -5.0000 \\ 5.0000 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.7985 \\ 2.3947 \\ -1.4358 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

식 (27)의 결과를 식 (17)에 대입하여 로봇 몸체의 가속도를 구하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\ddot{i}_b = \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0000 & -0.0639 \\ -0.0000 & -6.4141 \\ 7.1146 & 9.0586 \\ 0.0000 & 27.7305 \\ 0.0000 & 11.3652 \\ 38.4032 & 45.7359 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -6.0692 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ -37.5530 \end{bmatrix} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

식 (28)과 같이 계산된 가속도로부터 4족 보행 로봇의 이동성과 민첩성을 나타내는 가속도 영역을 다각형의 형태로 나타내면 그림 7, 8과 같이 표현할 수 있다.

로봇의 이동성을 나타내는 몸체 중심의 선형 가속도 영역은 그림 7의 (a)와 같이 다면체의 형상으로 표현되며, 이 영역 중 로봇의 x(전후)-y(좌우) 축 방향에 대한 수평 이동성은 그림 7(b)와 같은 가속도 다각형의 형태로, 각 수평축에 대한 수직이동성은 그림 7(c), (d)와 같은 가속도 다각형의 형태로 표현된다. 이 결과의 타당성은 다음의 내용으로부터 검증될 수 있다.

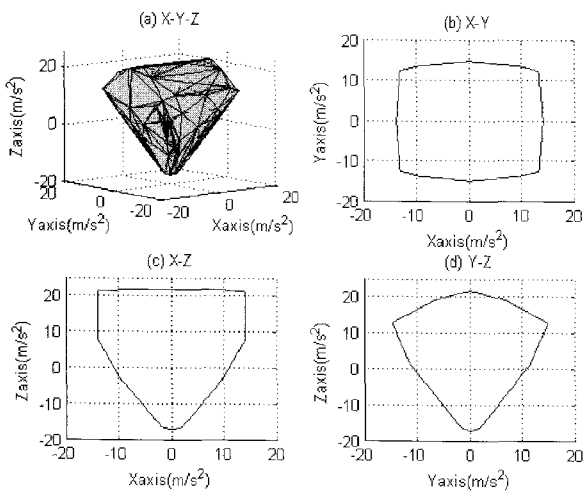


그림 7. 그림 6(b)의 이동성.  
Fig. 7. Mobility of Fig. 6(b).

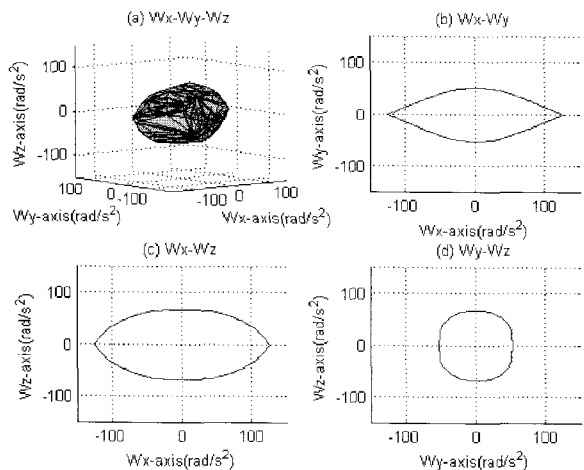


그림 8. 그림 6(b)의 민첩성.  
Fig. 8. Agility of Fig. 6(b).

로봇 몸체의 가속도가 x, y의 각 축에 대해 대칭의 형태로 나타날 것이라는 예측은 그림 6(b)와 표 1로부터 주어진 전 후좌우 대칭 구조를 갖는 로봇의 자세를 통해 쉽게 할 수 있다. 또한, 다리 끝에서 내는 힘과 가속도가 z축의 음의 방향으로 커질 때, 즉 이 힘과 가속도의 반력에 의해 몸체의 z축 가속도가 양의 방향으로 커질 때, 로봇은 지면에서 덜 미끄러지며, 이 때 x, y축 방향으로 더 큰 가속도를 낼 수 있다는 사실을 예측할 수 있다. 이 두 가지 물리적 직관 중 그림 7(b), (c), (d)는 첫 번째 직관과 일치하는 결과를 제시하고 있으며, 이 중 (c), (d)는 두 번째 직관과 일치하는 결과를 포함하고 있다. 따라서, 위 사실로부터 그림 7의 결과는 본 논문에서 제안된 방법의 타당성을 제시하는 결과라 할 수 있다.

그림 8은 로봇의 민첩성을 나타내는 몸체 중심의 회전 가속도 영역을 다면체와 다각형의 형태로 표현한 것이다. 그림 6(b)와 표 1에서 제시된 다리의 자세를 보면, 각 다리의 두 관절이 몸체 중심 좌표계의 x축과 평행한 축을 회전축으로 하고 있음을 알 수 있다. 이 사실로부터 로봇 몸체의 x축에 대한 회전 가속도가 다른 축의 회전 가속도보다 크게 나타날 것이라는 예측이 가능하다. 그림 8(b), (c)는 이 물리적 직관과 일치하는 결과를 보여주고 있으며, 또한 제안된 방법의 타당성을 일부 제시하고 있다.

다음 그림 9는 표 1에서 제시한 변수 중 지면 마찰과 관계된 마찰각을 30°에서 20°로 줄였을 때의 로봇의 이동성 및 민첩성의 변화를 알아본 시뮬레이션 결과이다. 이 결과는 지면의 마찰력이 감소하면 로봇의 이동성 및 민첩성도 감소할 것이라는 물리적 직관과 일치하는 결과를 보여주며, 제안된

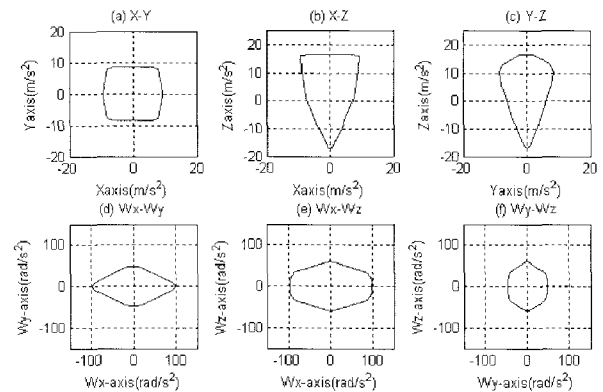


그림 9. 마찰력 감소에 따른 그림 6(b)의 이동성 및 민첩성.  
Fig. 9. Mobility and Agility of Fig. 6(b) with reduced friction.

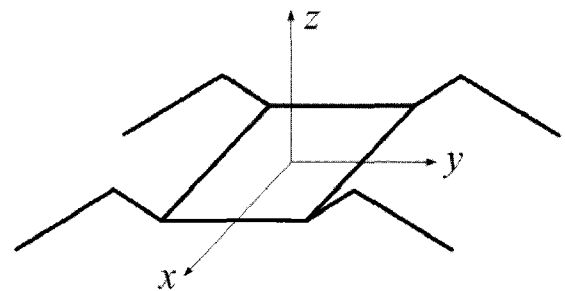


그림 10. 자세가 변형된 그림 6(a)의 근사화 모델.  
Fig. 10. Simplified model of Fig. 6(a) with changed configuration.

표 2. 그림 10의 변수 정의.

Table 2. Definition of parameters in Fig. 10.

분류	크기
관절의 초기각도(°)	$\theta_{11} = 0, \theta_{12} = 10, \theta_{13} = -40$ $\theta_{21} = 180, \theta_{22} = 10, \theta_{23} = -40$ $\theta_{31} = 180, \theta_{32} = 10, \theta_{33} = -40$ $\theta_{41} = 0, \theta_{42} = 10, \theta_{43} = -40$

방법이 로봇을 제약하는 가장 큰 요소인 지면 마찰의 영향을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

그림 10은 로봇의 이동성 및 민첩성에 대해 일부 예측이 가능한 자세를 그림 6(b)를 이용하여 표현한 것이다. 이 자세는 로봇의 몸체가 지면과 근접하도록 다리를 좌우로 벌린 자세로 표 1에서 제시된 자세와 달리 다리 끝이 지면과 수직인 방향(-z 축)에 대해 접촉점에 가할 수 있는 힘과 가속도가 작을 것이라는 예측을 가능하게 해준다. 이 물리적 직관으로

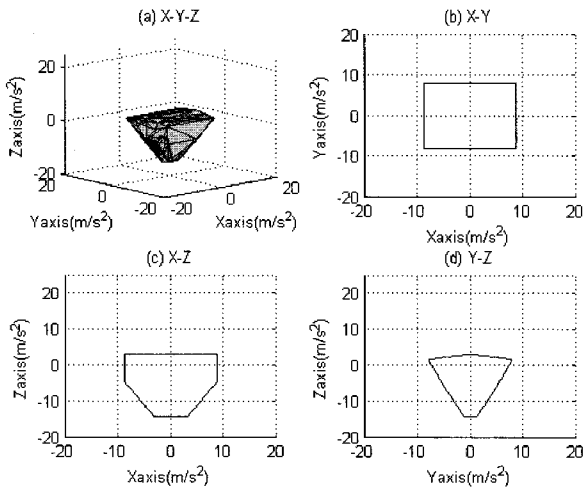


그림 11. 그림 10의 이동성.  
Fig. 11. Mobility of Fig. 10.

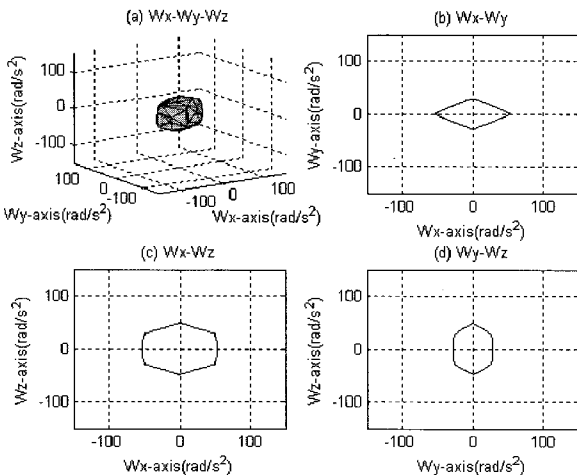


그림 12. 그림 10의 민첩성.  
Fig. 12. Agility of Fig. 10.

부터 이 로봇은 +z 축 방향의 이동성이 그림 7의 결과보다 감소하고, 수평 방향에 대한 이동성 또한 감소할 것이라는 사실을 예측할 수 있다. 그림 11과 12는 그림 10과 표 2에서 제시한 로봇의 자세를 이용하여 시뮬레이션한 결과로 로봇의 이동성과 민첩성을 보여주고 있으며, 앞에서 언급한 물리적 직관과 일치하는 결과를 보여준다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안된 방법의 타당성이 다시 입증될 수 있는 결과라 할 수 있다.

2. 6족 보행 로봇 시스템

그림 13은 그림 2의 6족 보행 로봇을 근사화하여 나타낸 그림이다. 이 근사화된 로봇은 그림 6(b)와 표 1에서 제시한 로봇의 몸체 중간 양 옆에 다리를 하나씩 추가한 형태를 가지고 있으며, 추가한 좌우 다리의 자세는 표 3과 같이 표 1에서 제시한 좌우 다리의 자세와 동일한 자세를 취하고 있다.

그림 13과 표 3에 의해 정의된 6족 보행 로봇에 대하여 본 논문에서 제안된 방법을 이용해 시뮬레이션하면, 그림 14, 15와 같은 이동성과 민첩성을 나타내는 가속도 영역을 구할 수 있다.

그림 6(b)의 로봇에 두 개의 다리가 추가된 점을 고려할 때 그림 13의 6족 보행 로봇의 이동성과 민첩성은 그림 7과 8에서 제시된 결과보다 더 큰 가속도 영역으로 표현될 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 그림 14와 15는 이런 물리적 직관과 일치하는 결과로 제안된 해석 방법이 4족 이상의 다족 보행 로봇의 이동성 및 민첩성 해석에도 적용될 수 있

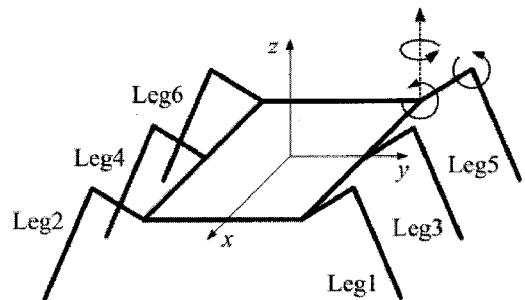


그림 13. 그림 2의 근사적 모델.  
Fig. 13. Simplified model of 6-legged robot.

표 3. 그림 13의 변수 정의.

Table 3. Definition of parameters in Fig. 13.

분류	크기
관절의 초기각도(°)	$\theta_{11} = 0, \theta_{12} = 10, \theta_{13} = -95$ $\theta_{21} = 180, \theta_{22} = 10, \theta_{23} = -95$ $\theta_{31} = 0, \theta_{32} = 10, \theta_{33} = -95$ $\theta_{41} = 180, \theta_{42} = 10, \theta_{43} = -95$ $\theta_{51} = 0, \theta_{52} = 10, \theta_{53} = -95$ $\theta_{61} = 180, \theta_{62} = 10, \theta_{63} = -95$
관절 토크(Nm)	$-5 \leq \tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3} \leq 5 \quad (i = 1, \dots, 6)$
마찰각(°)	$\theta_{\mu} = 30$

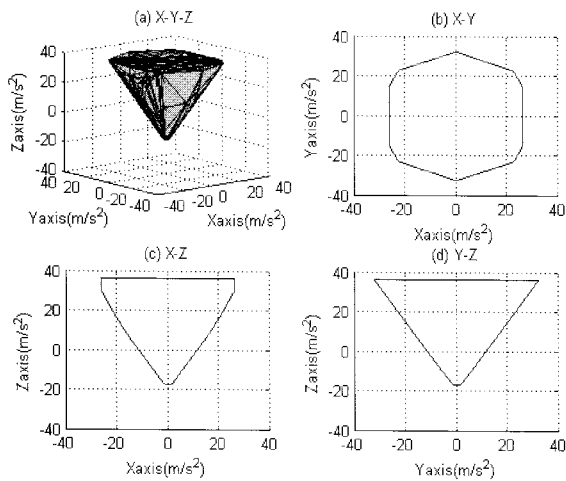


그림 14. 그림 13의 이동성.  
Fig. 14. Mobility of Fig. 13.

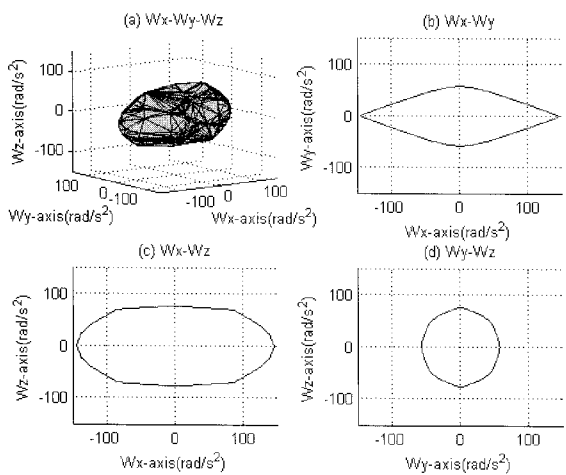


그림 15. 그림 13의 민첩성.  
Fig. 15. Agility of Fig. 13.

음을 보여준다.

이상의 4족과 6족 보행 로봇의 시뮬레이션 결과들로부터 본 논문에서 제안한 다족 보행 로봇의 이동성 및 민첩성을 해석하기 위한 수학적 방법이 타당성과 신뢰성을 가짐을 알 수 있다.

### VI. 결론

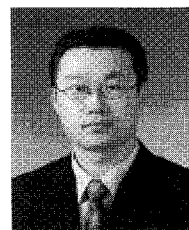
본 논문에서는 다족 보행 로봇 시스템에서 다리의 각 관절에 걸리는 구동 토크가 제약되어 있을 때, 지면의 마찰을 고려하여 다리 끝이 지면의 접촉점에서 미끄러지지 않고 로봇이 얼마나 잘 민첩하게 이동할 수 있는지를 해석하기 위한 수학적 체계를 제안하였다. 또한, 이 수학적 체계를 이용하여 근사화된 4족 및 6족 보행 로봇의 이동성 및 민첩성을 해석하기 위해 가속도 다각형의 형태로 표현되는 선형 및 회전 가속도 영역을 구하였다. 이렇게 구해진 로봇의 이동성 및 민첩성을 나타내는 가속도 영역에 대해 물리적 직관을 이용하여 그 타당성을 제시하였으며, 이를 통하여 제안된 수학적 방법의 신뢰성을 증명하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 주어진 지형 정보로부터 다족

보행 로봇의 가동성(이동성 및 민첩성) 지도를 생성하고, 이 지도를 이용하여 보행 로봇의 경로를 계획하는 연구로 확장 이 가능하다고 판단된다.

### 참고문헌

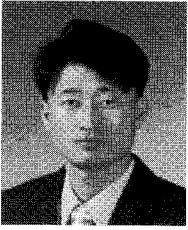
- [1] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi and K. Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 17, no. 3, pp. 280-289, June 2001.
- [2] S. Hirose and K. Kato, "Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-Past, Present and Future," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 414-419, 2000.
- [3] B. Goodwine and J. Burdick, "Gait controllability for legged robots," *Proc. of the Conf. on Robotics & Automation*, pp. 484-489, 1998.
- [4] 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.
- [5] F. B. Ouezdou, O. Bruneau and J. C. Guinot, "Dynamic Analysis Tool for Legged Robots," *Multibody System Dynamics* 2, pp.369-391, 1998.
- [6] 이지홍, 진봉환, "다족 보행로봇의 속도작업공간 해석," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 8 권, 제 6 호, pp. 477-483, June 2002.
- [7] 이지홍, 조복기, "다족 보행로봇의 동적 조작성 해석," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 10 권, 제 4 호, pp. 350-356, 2004.
- [8] A. P. Bowling, "Dynamic Performance, Mobility and Agility of Multilegged Robots," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, pp. 765-777, December 2006.
- [9] 변재민, 이지홍, "접촉 마찰을 고려한 다중 로봇 시스템의 조작도 해석," 대한전자공학회 논문지, 제 43 권, 제 5 호, pp. 10-18, 2006.
- [10] T. Yoshikawa, "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators," in *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, Missouri*, pp. 1033-1038, 1985.
- [11] A. Bowling and O. Khatib, "The Dynamic Capability Equations : A New Tool for Analyzing Manipulator Dynamic Performance," *IEEE Trans. Rob. Autom.*, vol. 21, no. 1, pp. 115-123, 2005.
- [12] 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.



### 심 형 원

1978년 1월 25일 출생. 2003년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 동대학원 석사(2005). 2005년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어, 컴퓨터 네트워크, DSP를 이용한 실시간 제어 시스템.



**이지홍**

1960년 4월 21일 출생. 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사(1985). 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사(1991). 1983년~1988년 현대중공업 로봇사업부 연구원. 1991년 한국과학기술원 연수연구원. 1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템.