

4족 보행 로봇의 동적 조작도 해석

이지홍*, 전봉환**, 조복기***
충남대학교 공과대학 메카트로닉스학과

Analysis of dynamic manipulability for four-legged walking robot

Jihong Lee*, Bong-Hwan Jeon**, Bokgee Cho***
Mechatronics Engineering Department
Chungnam National University

E-mail : jihong@cnu.ac.kr *, bhjeon@kriso.re.kr **, puseri@cnu.ac.kr***

Abstract

This paper deals with a manipulability analysis of multi-legged walking robots in acceleration domain, that is the dynamic manipulability analysis of walking robot. Noting that the kinematic structure of the walking robot is basically the same with that of the multiple serial robot system holding one object, the analysis method for cooperating robot is converted to that of walking robot. With the proposed method, the bound of achievable acceleration of the moving body is easily derived from the given bounds on the capabilities of joint torques. Several walking robot examples are analyzed with proposed method under the assumption of hard contact, and presented in the paper to validate the method.

까지 확장되면서, 다족 보행 로봇에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 특히, 운동제어(movement control), 걸음새 생성(gate generation), 안정성 해석(stability analysis), 기동성 해석(mobility analysis) 그리고 걸음새 제어성(gate controllability) 등에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 다족 보행 로봇의 기구학적, 동력학적 조작도(manipulability)에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다. 조작도의 기하학적인 형상은 타원(ellipsoid) 또는 다각형(polytope)의 형태로 표현되어지며, 로봇이 출력할 수 있는 속도, 가속도의 한계를 나타낸다.

I. 서론

산악 지형과 같이 지표면의 굴곡이 심한 곳에서는 바퀴를 이용한 모빌로봇에 비해 다족 보행 로봇의 이동 성능이 우수한 성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 인간의 탐구 영역이 인간이 접근하기 어려운 극한 지역으로

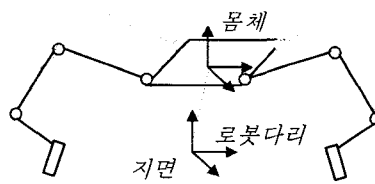
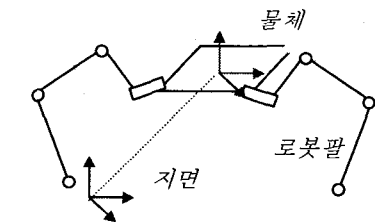


그림 1 4족 보행 로봇의 개념 : (a) 4대의 협동로봇; (b) 4대의 보행로봇

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

(b) 4족 보행 로봇

본 논문에서는 4족 보행 로봇의 주어진 구동장치의 한계를 고려한, 4족 보행 로봇의 동역학 조작도를 해석하는 방법을 제안한다. 그림 1과 같이 다중협동 로봇이 하나의 물체를 잡고 있는 경우와 4족 보행 로봇이 기구학적으로 동일한 구조를 갖고 있다는 것에서 출발한다. 그림 1과 같이 4개의 다리를 가진 로봇을 가정하고 각 다리의 발끝과 지면사이는 모멘트는 전달하지 못하고, 힘만 전달하는 hard contact model로 가정한다. 또한, 지면에 로봇의 질량과 같은 가상의 물체가 있는 것으로 가정하여, 각 다리가 가상의 물체를 이동시키는 것으로 한다. 로봇의 몸체가 이동하기 위해서는 지면의 가상 물체에 힘을 가해야 하며, 로봇의 몸체는 그 반력으로 이동하게 된다. 이것은 다중협동로봇의 동적 조작도를 해석하는 방법을 동일하게 4족 보행 로봇의 동적 조작도를 해석하는 방법에도 적용할 수 있다는 개념이다. 먼저, 다중협동 로봇의 동적 조작도를 구하는 방법을 소개하고, 이 방법을 4족 보행 로봇에 적용하는 방법을 소개하도록 한다. 또한, 분석 방법의 타당성을 검증하기 위해서, 직관적으로 해를 추측할 수 있는 예를 통해 해석 방법의 타당성을 검증한다.

II. 4족 보행 로봇의 모델링

기본적인 가정으로 그림 1의 (b)와 같은 4개의 다리를 가진 로봇이 움직이기 위해서 지면에 가하는 힘은 직선 성분의 힘만 전달되고, 모멘트는 전달되지 못하는 hard contact으로 한정한다. 또한, 로봇의 몸은 항상 지면에 수평 상태를 유지하고 있으며, 지면에는 몸체와 같은 질량의 가상의 물체가 존재하는 것으로 한다. 수식 전개 편의상 몸체의 하중은 무시한다. 이러한 가정하에 로봇과 가상의 물체 사이에 작용하는 힘 관계를 기술하면 아래와 같다.

$$H[(G^T + JM^{-1}J^TG^#I_o)\ddot{\phi} - JM^{-1}\tau] = 0 \quad (1)$$

여기서, H 는 접촉 조건을 고려하는 selection 행렬, G 는 물체와 접촉점과의 관계를 나타내는 grasp 행렬, J 는 로봇의 Jacobian 행렬, M 은 로봇의 관성항, I_o 는 몸체의 관성항, $\dot{\phi}$ 는 물체의 가속도 벡터, τ 는 로봇의 관절 토크를 나타낸다. 이 식은 다중협동 로봇의 동적 조작도를 해석하는 식과 동일하다. 4개 로봇에 한정지어 위의 식을 전개하면, 4족 보행 로봇의 동적 조작도

를 해석하는 식이 된다.

먼저, 몸체가 사각형이라는 가정하에, 로봇 몸체의 동역학식을 기술하면, 아래와 같다.

$$I_o\ddot{\phi} + G_o + V_o = Q_o \quad (2)$$

여기서, G_o 는 중력항, V_o 는 원심력을 나타낸다. 로봇의 관성항과 중력항, 원심력항을 합하여 Q_o 가 된다. 물체의 관성항 I_o 는 선가속 성분과 회전가속 성분에 대하여 표현해야 하므로 (3)과 같이 구성한다.

$$I_o = \begin{bmatrix} m_o I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & I \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$I = \begin{bmatrix} \frac{1}{12}md^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12}md^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}md^2 \end{bmatrix}$$

여기서, m_o 는 물체의 질량, I 는 물체의 관성 모멘트를 나타낸다.

$$G_o = -m_o g \begin{bmatrix} O_{2 \times 1} \\ 1 \\ O_{3 \times 1} \end{bmatrix}, V_o = \begin{bmatrix} O_{3 \times 1} \\ \omega \times (I\omega) \end{bmatrix} \quad (4)$$

몸체의 중력항과 원심력은 (4)와 같이 표현하며, 물체가 정지상태에 있다고 가정하면, 중력항은 상수가 되고 원심력항은 0이 된다. 수식을 간략화하기 위해서 중력항을 0으로 처리 한다.

$$I_o\ddot{\phi} = Q_o \quad (5)$$

이러한 가정으로 몸체의 동역학식 (2)는 위와 같이 간략화 할 수 있다.

각 다리의 동역학식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + V_i(q_i, \dot{q}_i) = \tau_i - J_i^T(q_i)F_i \quad (6)$$

하나의 다리에 관한 동역학식을 4개 다리로 확장하면, 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_{4 \times m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & o & o \\ o & \ddots & o \\ o & o & M_{4 \times m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}_{4 \times m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_1^T & o & o \\ o & \ddots & o \\ o & o & J_{4 \times m}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_{4 \times m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{4 \times m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ \vdots \\ G_{4 \times m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

각 다리는 m 의 관절로 이루어져 있다고 가정한다. 로봇 몸체가 정지하고 있는 것 처럼, 각 다리도 정지상태에 있다고 가정하여, 중력항과 원심력항을 소거하여, 아래와 같은 수식을 얻는다.

$$\tau = M\ddot{q} + J^T F \quad (8)$$

위에서 구한 몸체와 다리 사이의 관계는 로봇이 지

면에 힘을 가하면서 물체를 이동시키는 데 필요한 힘이 된다. 모든 다리가 지면과 접촉하고 있고, 접촉점에서의 상대 가속도가 0 이라고하면, 항상 로봇 다리는 지면에 붙어 있어야 하는 구속 조건이 된다. 이러한 구속조건은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$G^T \ddot{\phi} = \ddot{x} \quad (9)$$

위의 식의 관계를 이용하여, (5)와 (8)식을 같다고 설정하기 위해서, 관절 각 가속도 성분을 각 다리 끝의 가속도 성분으로 바꾸어야 한다. 각 다리 끝의 가속도 성분으로 변경하면 아래와 같은 식이 된다.

$$JM^{-1}\tau = J\ddot{q} + JM^{-1}J^T F \quad (10)$$

$$JM^{-1}\tau = \ddot{x} + JM^{-1}J^T F$$

(5)식과 (10)식이 (9)의 관계를 사용하여, 하나의 식으로 표현하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$G^T \ddot{\phi} = JM^{-1}\tau - JM^{-1}J^T F \quad (11)$$

위의 식에, 지면과의 접촉 조건을 고려하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$H(G^T \ddot{\phi} + JM^{-1}J^T G^* I_0 \ddot{\phi} - JM^{-1}\tau) = 0 \quad (12)$$

$$H[G^T + JM^{-1}J^T G^* I_0, -JM^{-1}] \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \tau \end{bmatrix} = 0$$

여기서, F 는 로봇의 몸체가 움직이면서 생기는 힘으로, 각 다리에 영향을 준다.

이제, 로봇이 구속 조건 내에서 움직일 수 있는 범위를 찾아야 한다. 구속조건은 접촉점에서의 상대 가속도가 0 이라는 조건이므로, 이러한 관계는 아래와 같은 식 (13)과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \tau \end{bmatrix} = Q^* \ddot{0} + N(Q)x \quad (13)$$

Q 는 식(12)의 식을 간략히 하기 위해서, 각 가속도와 관절 토크 성분을 제외한 부분을 나타낸다. Q 의 영공간은 위에서 가정한 조건을 만족하면서, 로봇이 움직일 수 있는 범위를 나타낸다. 이러한 공간에는 다리의 각 관절이 몸체에 영향을 주지 않으면서 움직일 수 있는 redundancy, 몸체가 다리에 영향을 주지 않고 움직일 수 있는 indeterminacy, 그리고 다리가 움직이면 몸체가 따라서 움직이는 connectivity가 있다. 만약, 시스템에 connectivity만 존재하는 경우로 한정하여 생각하면 Q 의 영공간은 아래와 같은 관계를 갖게 된다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} x \quad (14)$$

$$\ddot{\phi} = C_1 x, \quad \tau = C_2 x$$

위의 식에서 관절 토크 τ 의 범위를 $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ 와 같이 정하여 주면, 로봇이 움직일 수 있는 범위를 구할 수 있을 것이다.

III. 적용 예

앞에서 기술한 방법을 간단한 4족 로봇에 적용하여, 직관적인 판단과 비교해 보도록 하겠다.

3.1 다리 관절이 1개인 4족 로봇

아래 그림과 같이 각 다리관절에 1개의 관절을 갖는 로봇의 경우, 다리 관절이 움직일 수 있는 범위가 지극히 제한적이므로 앞으로 밖에 이동을 못 한다. 이러한 직관을 그림 3의 우상의 그림과 비교하면 맞는 것을 알 수 있다.

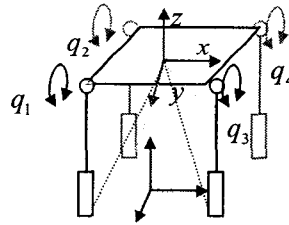


그림 2 다리 관절이 1개인 4족 로봇

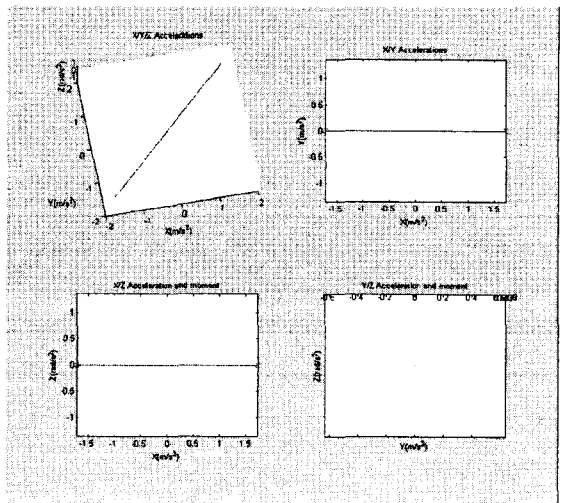


그림 3 4족 로봇의 움직임: (좌상) x/y/z에서 본 로봇 몸체의 가속도; (우상) x/y 평면에서의 몸체 가속도;

(좌하) x/z 평면에서 물체의 가속도; (우하) y/z 평면에서의 물체의 가속도

3.2 다리 관절이 2개인 4족 로봇

아래 그림과 같이 각 다리관절에 2 개의 관절을 갖는 로봇의 경우, 관절이 1 개인 로봇에 비해 더큰 가속도와 자유도를 갖게 된다. 하지만 이번의 경우에도 다리 관절이 x축을 기준으로 회전만 할 수 있으므로, 앞으로만 전진할 수 있다. 그림 5 와 그림 4 를 비교하면 로봇의 관절이 하나 늘어난 경우 더큰 가속도를 낼 수 있는 것을 볼 수 있다. 또한 자유도가 늘어난 것도 확인할 수 있다.

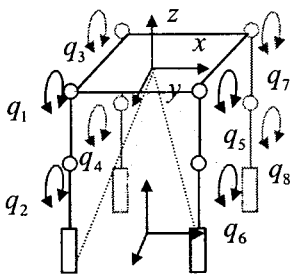


그림 4 다리 관절이 2 개인 4족 로봇

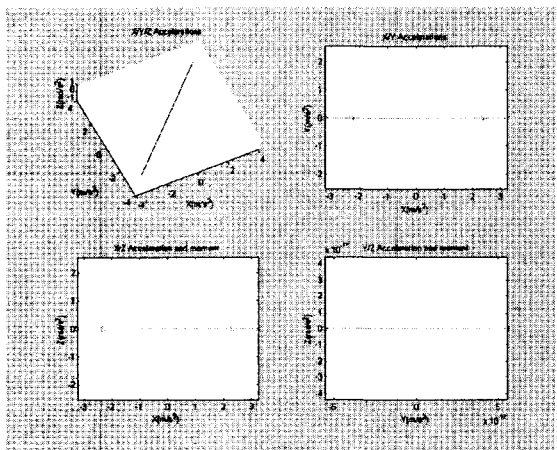


그림 5 4족 로봇의 움직임: (좌상) x/y/z 에서 본 로봇 물체의 가속도; (우상) x/y 평면에서의 물체 가속도; (좌하) x/z 평면에서 물체의 가속도; (우하) y/z 평면에서의 물체의 가속도

동장치에 주어진 구동능력의 한계를 이용하여 도달할 수 있는 가속도의 범위를 구해내는 보행로봇의 동적 조작성을 해석하였다. 예로 아주 제한적인 자유도를 갖는 로봇에 적용하여, 직관과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 향후의 연구는 여자유도가 풍부한 로봇의 경우로 확장하여 적용함으로써 제안한 방법에 대한 타당성을 확고히 하고, hard contact 외의 접촉 조건을 적용하는 연구로 확장할 것이다.

참고문헌

- [1] Antonio Bicchi, Claudio Melchiorri, and Daniele Balluchi, "On the Mobility and Manipulability of General Multiple Limb Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 11, no. 2, 1995, pp. 215-228
- [2] Pasquale Chiacchio, Stefano Chiverini, Lorenzo Sciacvico, and Bruno Siciliano, "Global Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm Systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 5, 1991, pp. 678-685
- [3] Domenico Prattichizzo and Antonio Bicchi, "Dynamic Analysis of Mobility and Graspability of General Manipulation Systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 2, 1998, pp. 241-258
- [4] Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," The International Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, Also appearing Robotics Research, The Second International Symposium. 1985.
- [5] T. Yoshikawa, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," Robotics Research, eds. M.Brady and R. Paul, MIT Press, Cambridge, MA, 1984, pp. 735-747.
- [6] Jihong Lee, "Velocity Workspace Analysis for Multiple Arm Robot Systems. " Robotica vol. 19, no. 5, vol. 5, 2001, pp. 581-591.
- [7] 이지홍, 전봉환, "다족 보행로봇의 속도작업공간 해석," 제어·자동화·시스템공학회, vol. 8, no. 6, 2002, pp. 477-483.

V. 결론

본 논문에서는, 4족 보행 로봇이 각 다리관절의 구