

## 이족보행로봇의 비충격 걸음새를 위한 제어에 관한 연구

### A Study on the Control for Impactless Gait of Biped Robot

°박인규\*, 김진걸\*\*

\*인하대학교 자동화공학과 대학원(Tel:+82-32-860-7384; Fax:+82-32-863-4386; E-mail:g9541974@inhavision.inha.ac.kr)

\*\*인하대학교 자동화공학과(Tel:+82-32-860-7384; Fax:+82-32-863-4386; E-mail:john@automation.auto.inha.ac.kr)

**Abstracts** This paper presents a three dimensional modeling and a trajectory generation for minimized impact walking of the biped robot. Inverse dynamic analysis and forward dynamic analysis are performed considering impact force between the foot and ground for determining the actuator capacity and for simulating the proposed biped walking robot. Double support phase walking is considered for close to human's with adding the kinematic constraints on the one of the single support phase.

**Keywords** Biped Robot, Three Dimensional Modeling, Dynamic Walking, Double Support Phase, Center of Mass

#### 1. 서론

많은 이족보행로봇의 연구는 인간과 유사한 보행을 구현하기 위하여 노력을 기울여 왔다. 특히, 보행 중 로봇계의 질량중심(Center of mass(COM))의 위치가 로봇계의 지지영역내에 존재하는 정적 안정 보행(statically stable locomotion)인 경우와 짧은 시간동안이나마 그 지지영역을 벗어나 있도록 하는 동적 안정 보행(dynamically stable locomotion)의 두 가지의 보행 안정도 해석적 측면에서 보행계획을 설계하고 안정도를 판별하는 방향으로 연구를 진행하고 있다. 전자의 경우는 후자의 경우에 비해 보행로봇계의 질량관성등 동적 효과를 최소화 하기 위하여 비교적 느리게 보행하여 보행 중 정적인 평형상태를 유지하도록 하였으며 주로 사족보행로봇등 다족로봇의 걸음새의 구현에 이용되고있으며, 후자의 경우는 질량중심이 지지영역을 벗어나게 됨으로써 로봇계의 안정성을 유지하기 위하여 상당히 민첩하게 움직여야 하며 이로 인하여 외력, 즉 지면과의 반발력, 마찰, 지면에 다리부의 착지시 충격 등 동적인 요소들의 고려가 요구된다. 주로 이족보행로봇의 경우에 이 동적안정을 고려하여 안정된 보행이 되도록 설계한다[1-4][8].

특히 동적 안정 보행을 위하여 이족보행로봇의 보행은 두 발바닥의 지면과의 접촉상태에 따라, 몸체와 한 발의 진행을 행하는 한 발지지 단계(single support phase)와 두 발바닥이 지면과 접촉한 두 발지지 단계(double support phase)로 나눈다. 인류와 보다 유사한 보행을 위하여 두 발지지 단계의 해석은 필수적이다. 그러나, 두 발지지 단계는 보행로봇계가 폐형(closed form)을 이루게 되어 해석방정식에 새로운 구속조건의 추가로 인하여 복잡하게 되며, 두 발지지단계의 시작부분에서 지면과 로봇계의 발바닥의 충돌이 발생되므로 이의 고려가 필요하다. 이를 해석하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다[2][3]. 그러나 이들은 대부분 이차원 모델된 간단한 해석이거나, 충돌시의 속도의 영향을 최소화 가 되도록 발의 지면접촉시 속도를 영(zero)로 설계 하여 해석을 간략화 하였다.

본 논문에서는 제안된 15자유도의 이족보행로봇의 걸음새를 제어하기 위하여 보행로봇의 COM의 궤적을 충동력이 가장 적게 발생하도록 반복 모의 실험을 통하여 얻었다. 이때 동역학 방정식의 유도과정은 참고문헌[5]의 가상일의 원리(principle of virtual work)를 이용하여 절대 좌표방식(absolute coordinate method)으로 구성하였다. 미분-대수방정식(differential-algebraic equation)은 참고문헌[6]을 참조하여 일반화 좌표 분해법(generalized coordinate partitioning method)을 이용하여 풀이하였다. 충격의 고려는 참고문헌[7] 과 [8]를 참조하여 Hauge에 의해 제시한 방법을 사용하였다.

#### 2. 보행로봇의 기구학 해석

본 논문의 이족보행로봇계를 해석하는 기본적인 가정은

1. 지지다리부의 발은 지면과 힌지(hinge)되어 있다.
2. 몸체는 직진 보행을 한다.
3. 지면착지시 충격은 발바닥의 한 점에 집중되고 이때 미끄러짐 현상은 일어나지 않는다.

등과 같다.

보행로봇의 좌표계설정은 기준좌표계(global coordinate frame)  $x_0 - y_0 - z_0$  에 관한 각 링크들의 위치와 방향을 물체-고정좌표계(body-fixed coordinate frame)  $x_i - y_i - z_i$  를 각 링크의 도심에 위치시킴으로 얻어질 수 있다. 아래 그림 1 은 보행로봇의 기준좌표계에 관한 물체-고정좌표계(body-fixed frame)와 보행의 초기 자세를 일반화 좌표 벡터는  $q_i = [r_i^T, P_i^T]^T$  나타낸다. 여기서  $i$  는 링크의 수를 나타내고,  $r = [x, y, z]^T$ 와  $P = [e_0, e_1, e_2, e_3]^T$ 를 나타낸다

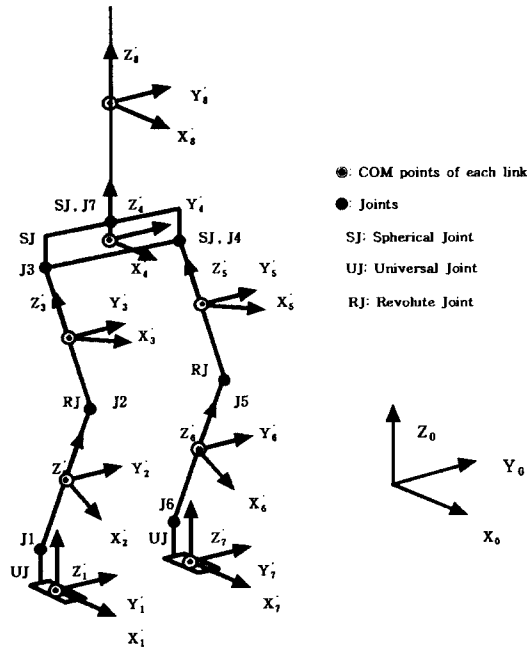


그림 1 모의실험을 위한 이족보행로봇의 모델  
Fig. 1 Model of biped robot for the simulation

### 2.1 이족보행로봇의 3차원 모델

이족보행로봇은 몸통(hip), 다리(limbs), 균형추(trunk)등으로 구성이 하고, 필요에 따라 방향전환을 위하여 관절 3(J3)과 관절 4(J4)를 구면 관절(spherical joint)로, 불규칙한 지면에서의 발의 대응을 위하여 관절 1(J1)과 관절 6(J6)을 유니버설 관절(universal joint)로, trunk의 회전에 의한 관성력의 영향등을 고려하기 쉽도록 하기 위하여 관절 7(J7)를 구면 관절(spherical joint)로 설계하였다. 그리고 다리의 각 관절(J2, J5)은 상대회전이 가능하도록 회전관절(revolute joint)로 설계를 하였다.

### 2.2 보행로봇의 기구학 해석

보행로봇의 초기자세는 기준좌표계(global coordinate frame)에 대한 표현으로 링크 2와 링크 6은 25°, 링크 3과 링크 5는 22.5°가 되도록 하고 링크 1은 바닥에 고정되고 관절 1(J1)은 지면과 힌지(hinge)가 된것처럼 가정을 하고 해석을 한다.

표 1은 기구학 해석을 위한 3차원 모델링의 한 발 지지단계(single support phase)의 구속조건식의 수와 관절들의 설정을 나타내었다. 이때의 계의 자유도(degree of freedom(DOF))는 일반화 좌표(generalized coordinate)의 수(nc)가 만큼 주어지나, 구속조건(constraints)의 추가로 계의 자유도의 수(nh)가 15로 줄어들을 나타낸다. 표 2는 두 발 지지단계(double support phase)일때의 기구학 모델을 나타낸다. 여기서 한 발 지지단계의 자유도수에 6개의 구속조건(ground constraints)가 더 추가되어 계의 자유도 수가 9자유도로 바뀔을 알 수 있다.

기계 시스템에서 생기는 구속조건의 구속식은 관절에서 생기는 기구학적 구속조건식(kinematic constraint equations)  $\Phi^K(q)$ 와 공간상의 회전을 표현하기 위한 오일러 매개변수 표준화 구속조건식(euler parameter normalization constraint equations)  $\Phi^P(q)$ 가 있으며, 운동을 표시하기 위한 구동구속 조건식(driving constraint equations)  $\Phi^D(q, t)$ 가 있다. 계 전체 구속조건식은

표 1 한 발 지지단계의 기구학 모델

TABLE 1 Kinematic Model in case of single support phase

Numbers of Bodies	8	nc = 56
Constraints	Universal Joint(J1, J6) Revolute Joint(J2, J5) Spherical Joint(J3, J4, J7) Ground Constraint(link1) Euler Parameter Normalization	8 10 9 6 8 nh = 41
DOF	nc - nh = 15	

표 1 두 발 지지단계의 기구학 모델

TABLE 1 Kinematic Model in case of double support phase

Numbers of Bodies	8	nc = 56
Constraints	Universal Joint(J1, J6) Revolute Joint(J2, J5) Spherical Joint(J3, J4, J7) Ground Const.(link1, link7) Euler Parameter Normalization	8 10 9 12 8 nh = 47
DOF	nc - nh = 9	

$$\Phi(q, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(q) \\ \Phi^D(q, t) \\ \Phi^P(q) \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

로 표시되며, 이때 식(1)의 각 구속조건식  $\Phi^K(q)$ ,  $\Phi^D(q, t)$ ,  $\Phi^P(q)$ 는 서로 독립적이다.

#### 2.2.1 위치해석(position analysis)

구속조건식(1)의 일반화 좌표에 대한 도함수  $\Phi_q$ 와 초기조건  $q^{(0)}$ 를 이용하여 비선형 구속조건식(1)을 만족하는 해를 뉴턴-랩슨 방법(Newton-Raphson method)을 이용하여 반복적으로 해를 구한다.

#### 2.2.2 속도해석(velocity analysis)

식(1)을 시간에 대하여 미분한 속도 방정식(velocity equations)은 아래와 같이 주어진다.

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \equiv \nu \quad (2)$$

여기서,  $\Phi_t$ 는 구속조건의 시간에 대한 미분을 나타낸다.

#### 2.2.3 가속도 해석(acceleration analysis)

식(2)를 시간에 대하여 다시 한번 미분을 하면 가속도 방정식(acceleration equations)은

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_{qq})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt} = \gamma \quad (3)$$

으로 구할수 있다.

## 3. 보행로봇의 역동역학 해석

### 3.1 역동역학 해석(inverse dynamics analysis)

로봇 설계시 모터의 선정과 동역학 해석시의 입력을 구하기 위하여 행한다.

역동역학 해석에서는 운동을 나타내기 위하여 계의 자유도만큼 구동구속 조건식이 주어지므로, 식(1)의 자코비안 행렬  $\Phi_q$ 는 정방행렬(square matrix and nonsingular)이 된다.

구속조건을 가지는 경우의 뉴턴-오일러 방정식은 라그랑지승수(Lagrange multiplier)를 도입하여 표현하면 아래와 같다.

$$M\ddot{q} + \phi_q^T \lambda = Q^A \quad (4)$$

$$\phi_q \ddot{q} = \gamma \quad (5)$$

여기서  $Q^A$ 는 일반화된 외력(generalized applied forces)이다. 윗식(4)를 식(5)을 이용하여 로보트에 작용하는 구속력과 구속토크를 라그랑지승수를 이용하여 쉽게 표현할 수 있다. 즉

$$\lambda = \phi_q^{-1T} [Q^A - M\ddot{q}] \quad (6)$$

과 같이 주어진 구동구속조건에 의해 기구학적으로 구할 수 있다.

### 3.2 보행로봇의 궤적 생성

보행로봇의 동적인 걸음새를 표현하기 위하여 유각과 힘의 궤적을 5차 스플라인 곡선을 사용하여 그림 2와 그림 3에 위치, 속도를 나타내었다.

로봇의 보행(walking)은 보행로봇의 왼발을 0.5 sec로 하는 주기를 갖도록하여 지면에 닿게하고 0.7sec동안 두 발 지지상태가 되게 한 후, 1.5sec 동안 다음 일보를 전진하도록 설계를 하였다. 즉 처음 일보는 1.2sec, 그 후의 일보는 1.5sec가 거리도록 설계하였다. 그림 3에서 보인 것처럼 유각(swing leg)의 속도가 지면에 닿는 부분에서 영(zero)이 되지않음을 알 수 있다. 이 속도에 의하여 지면과 유각의 발바닥이 접촉하는 순간에 충격력(impact force)이 발생한다. 그리고 그림 4는 충격력이 가장 적게 걸리도록 반복 모의 실험을 거쳐 생성한 이족 보행로봇의 질량중심의 궤적을 나타내었으며, 세 보(three steps)전진을 나타내었다.

## 4. 보행로봇의 동역학 해석

외부로부터 가해지는 힘을 계의 입력으로 하여 계의 운동을 해석하는 것을 동역학 해석(dynamics analysis)이라 한다.

### 4.1 동역학 해석

동역학 해석을 위하여, 전체구속조건식(1)에서 기구학적 운동을 표시하는 구동구속 조건식  $\phi^D(q,t)$ 의 일부 또는 전부를 제거하여 구속조건식의 수가 일반화 좌표의 수보다 적게하여 전체시스템의 자유도가 양의 값을 갖게 한다. 이때의 구속조건식은 아

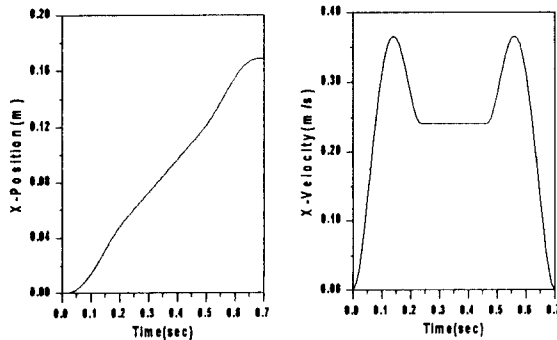


그림 2 일보 진행동안 몸통의 궤적  
Fig. 2 Trajectory of Hip during a step

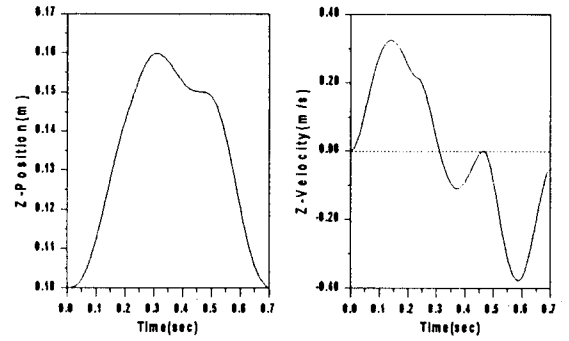


그림 3 일보 진행동안 유각의 궤적  
Fig. 3 Trajectory of Swing leg during a step

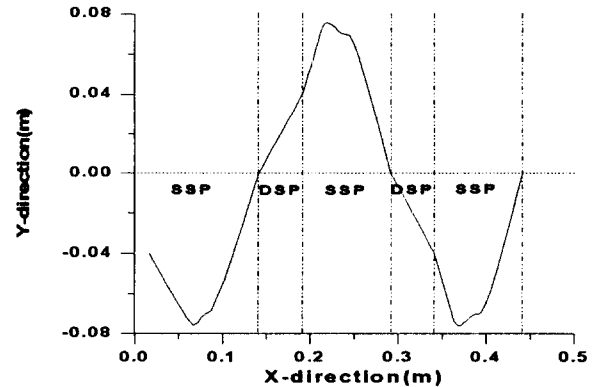


그림 4 계의 COM궤적  
Fig. 4 Trajectory of COM of the system

래의 식(7)과 같이 나타낸다.

$$\phi(q,t) = \begin{bmatrix} \phi^K(q) \\ \phi^P(q) \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

로 표시되며, 식(8)의 속도 및 가속도 관계를 이용하면 구속식을 갖는 시스템의 운동방정식은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M & \phi_q^T \\ \phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q^A \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

위의 식(8)를 풀어서 가속도를 구하고, 이를 적분하고 속도와 위치를 구한다.

### 4.2 지면과의 충돌 해석

참고문헌 [7]와 [8]에서 Haug에 의해 제안된 방법을 이용하여 충돌을 해석을 한다.

일반적으로 물체들 사이의 충돌효과를 계산시 충돌이 발생하는 동안의 나머지 힘들은 무시할 할만큼 작다고 가정하여 무시를 할수있고, 충돌 시간이 매우 작으므로 계의 위치는 변하지 않으며, 완전소성충돌(perfectly plastic impact( $e=0$ ))로 가정하여 충돌방정식을 표현하면 아래와 같이 표현할수있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 이족보행로봇의 모델을 제시하고 이것의 3차원 모델링을 하였으며, 절대좌표방식에 의하여 운동방정식을 구성하였고, 역동역학 해석을 거쳐 구동력의 계산과 동역학 해석을 통하여 운동방정식의 정확성을 확인하였다.

역동역학 해석과 동역학 해석과정에서 한 발지단계와 두 발지단계에 대한 해석을 구속조건을 변화시키면서 수행하였다. 두 발지단계에서 로봇계가 폐형을 가짐을 알 수있었고 이것으로 인하여 구속조건이 추가가 생겼으며, 자유도의 수가 15자유도에서 9자유도로 바뀌었다.

충돌의 발생은 두 발지단계의 시작부분에서 일어났으며, 접촉구속조건을 추가하여 속도 불연속을 해석하였다.

충돌력이 보다 작은 값을 가지도록 반복 모의 실험을 통하여 로봇계의 질량중심의 궤적을 구하였다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T & \Phi_q^{aT} \\ \Phi_q & 0 & 0 \\ \Phi_q^a & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{q} \\ \lambda_P \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \nu(t_i^-) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $\Phi^a(q, t) = 0$ 는 접촉 구속조건식(contact constraint equation) 이고,  $\Phi_q^a$ 는 이것의 일반화 좌표에 대한 자코비안이다.

윗식(9)을 이용하여 충돌 후의 새로운 속도값은 아래와 같다.

$$\dot{q}(t_i^+) = \dot{q}(t_i^-) + \Delta \dot{q} \quad (10)$$

윗식(10)에서 구한 새로운  $\dot{q}$ 를 적분을 통하여 새로운 위치값을 얻어 충돌 후의 거동을 해석하는 초기조건으로 사용한다.

### 4.3 동역학 해석(simulation) 결과

제안된 이족보행로봇의 운동방정식을 검증하기 위하여, 그리고 원하는 운동을 이족보행로봇에 지시하기 위하여 동역학 해석을 수행한다.

역동역학 해석에서 식(6)을 이용하여 구동 구속조건을 만족하는 입력토크는 그림 5에 나타내었으며, 이를 이용하여 모의 실험한 결과는 그림 6과 같다.

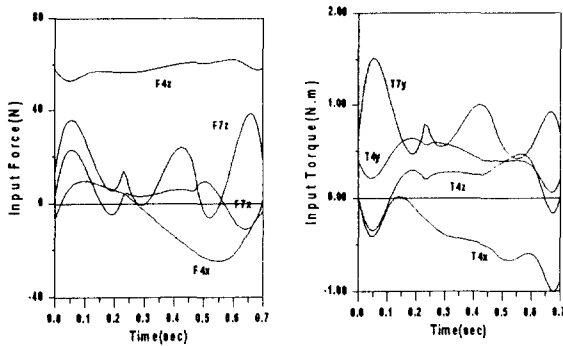


그림 5. 보행의 수행을 위한 구동 토크와 힘  
Fig 5. Driving torques and forces for walking wrt given trajectory

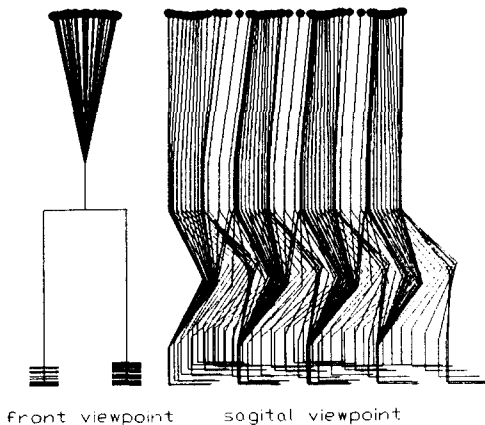


그림 6. 동역학 해석의 결과  
Fig 6. The result of forward dynamics

## 참고문헌

- [1] M. Guihard, P. Gorce, J. G. Fontaine, N. K. M'Sirdia, "A solution to control the dynamic behaviour of a pneumatic quadruped robot", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1000-1005, 1995.
- [2] W. Blajer and W. Schiehlen, "Walking Without Impact as a Motion/Force Control Problem", *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 114, pp. 660-665, Dec., 1992.
- [3] J. Furusho and A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped", *Int. J. of Robotics Research*, vol. 9, pp. 83-98, no. 2, April, 1990.
- [4] Ching-Long S, "The Dynamics and Control of a Biped Walking Robot With Seven Degree of Freedom", *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 118, pp. 683-690, Dec, 1996.
- [5] E. J. Haug, *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System*, vol. I: Basic Methods, Allyn and Bacon,
- [6] R. A. Wehage, E. J. Haug, "Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis for Constrained Dynamic Systems", *J. of Mechanical Design*, vol. 104, pp. 247-246, Jan. 1982.
- [7] J. G. de Jalon, E. Bayo, *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time Challenge*, Springer-Verlag, 1994.
- [8] 서영진, 윤용산, "사각 보행로봇의 동적 걸음새 설계와 시뮬레이션을 위한 알고리즘의 개발", *대한기계학회논문집*, 제 19 권, 제 11 호, pp. 2721-2735, 1995.