

2족 보행 로봇의 역기구학에 관한 연구

A Study on the Inverse Kinematics for a Biped Robot

성 영 휘*

(Young Whee Sung)

Abstract : A biped walking robot which is developed as a platform for researching walking algorithm is briefly introduced. The developed walking robot has 6 degrees of freedom per one leg. The origins of the last three axis do not intersect at a point, so the kinematic analysis is cumbersome with the conventional method. In the former version of the robot, Jacobian-based inverse kinematics method is used. However, the Jacobian-based inverse kinematics method has drawbacks for the application in which knee is fully extended such as stair-case walking. The reason for that is the Jacobian becomes ill-conditioned near the singular points and the method is not able to give adequate solutions. So, a method for giving a closed-form inverse kinematics solution is proposed. The proposed method is based on careful consideration of the kinematic structure of the biped walking robot.

Keywords : inverse kinematics, closed-form solution, biped walking robot, staircase walking

I. 서론

최근까지도 로봇은 주로 특정한 응용을 위해 고정된 형태로 작업하는 것이 주류를 이루었으나, 로봇에 대한 연구와 기술이 발전하면서 로봇의 응용 범위를 더욱 넓히기 위해서 연구자들은 로봇에 이동성을 부여하는 문제에 관심을 갖게 되었다. 로봇에 이동성을 부여하기 위해서 다리를 사용하거나, 바퀴를 사용하거나, 또는 무한 궤도를 사용하는 등 여러 가지 방법에 관한 연구가 진행되어 오고 있다. 다리를 사용한 보행 로봇의 경우에는 6족, 4족, 2족 등 몇 가지 형태로 연구가 진행되어왔고, 근래에는 2족 보행 로봇에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[1]-[6]. 2족 보행 로봇의 장점으로는 로봇이 인간과 같은 형태를 갖는다는 점에 기인하는 것으로, 주거 환경과 같이 사람을 위해 이미 완성되어 있는 환경에서 로봇을 적용하기가 쉽고, 인간과 정서적인 유대감을 쉽게 가질 수 있다는 점 등을 들 수 있다. 한편 인간형 2족 보행 로봇 연구의 한 갈래로 로봇의 몸체를 소형으로 만들어서 하드웨어를 개발하는데 필요한 시간을 줄이고, 소형의 로봇을 보행 알고리즘과 같은 상위의 소프트웨어를 개발하기 위한 플랫폼으로 사용하거나, 엔터테인먼트 산업과 관련하여 오락, 취미용으로 개발 하고자 하는 시도들이 있다[7]-[10].

본 논문에서는 보행 로봇의 연구 개발을 위한 플랫폼으로 개발된 소형 2족 보행 로봇에 대한 간략한 소개와 이 로봇의 역기구학 문제에 대해 닫힌 형태의 해(closed-form solution)를 구하는 방법을 제안한다. 개발된 로봇은 한 다리에 6자유도를 가지고 있으며, 발목쪽의 마지막 3 자유도는 축이 일치하지 않는 구조를 가지고 있다. 역기구학 문제를 푸는 방법은 자코비안을 이용하여 속도 레벨에서 해를 구한 후 이를 적분하여 각위치를 구하는 방법[11], 반복적

인 방법으로 수치해를 구하는 방법, 닫힌 형태로 해를 구하는 방법 등이 있을 수 있다[12]. 이중 반복적인 방법으로 수치해를 구하는 방법은 계산 시간이 많이 걸린다는 단점이 있으며, 자코비안을 사용하는 방법은 계단 보행과 같은 2족 보행 로봇의 특별한 응용에는 적용하기가 어렵다[13]. 그 이유는 계단을 오르내리기 위해서는, 보행 중 필연적으로 로봇의 다리가 곧게 펴지는 형태가 되는데, 이 때 다리가 기구학적 특이점(kinematic singularity point)에 빠져 해를 구하지 못하는 결과를 낳거나, 특이점에 빠지지 않더라도 특이점 근처에서 필연적으로 오차가 많이 포함되기 때문이다[12]. 따라서 일반적인 평지 보행뿐만 아니라 계단 보행과 같은 응용을 위해서는 보행 로봇의 역기구학 해를 닫힌 형태로 구하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 개발된 로봇의 다리부의 기구학적 특징을 이용하여 간편하게 역기구학 해를 닫힌 형태로 구하는 방법을 제안한다.

II. 소형 2족 보행 로봇 시스템

1. 전체 시스템

개발된 소형 2족 보행 로봇 시스템은 로봇 기구부와 로봇 몸체에 탑재되는 제어기, 그리고 원격지 PC에서 로봇을 구동하거나, 로봇으로부터 영상 정보 또는 로봇의 상태에 대한 정보 등과 같은 필요한 정보를 받는 사용자 인터페이스 프로그램으로 구성되어 있다. 전체 시스템은 그림 1과 같다. 로봇 몸체에 탑재되는 제어기는 원격지의 PC와 정보 교환을 수행하거나, 로봇의 목표 관절값을 보조 제어기로 넘겨주는 주제어기(DSP)와 주제어기로부터 받은 데이터를 사용하여 모터를 구동하는 보조제어기(FPGA)로 구성되어 있다.

2. 로봇 기구부

개발된 로봇은 전체 키가 37.5cm, 몸무게가 1300g이며, 다리당 6 개의 자유도, 팔당 3 자유도, 그리고 목에 2 자유도를 가져서 총 20 자유도를 갖는 소형의 2족 보행 로봇이다. 한편 머리 부분에는 칼라 카메라를 장착하고 있으며 목

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 31., 채택확정 : 2003. 9. 2.

성영휘 : 금오공과대학교 전자공학부

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01352-0) 지원으로 수행되었음.

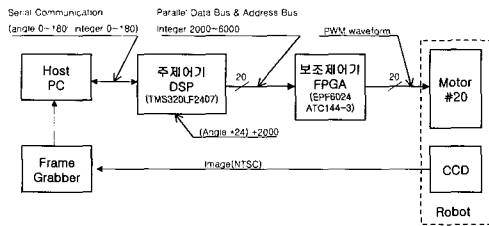


그림 1. 전체 시스템 구조.

Fig. 1. The overall system structure.

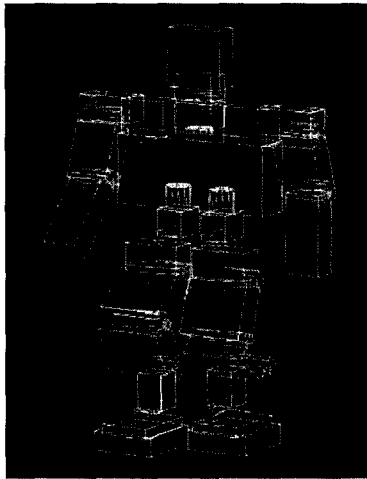


그림 2. 로봇의 관절 기구 구성.

Fig. 2. The kinematic joint configuration of the robot.

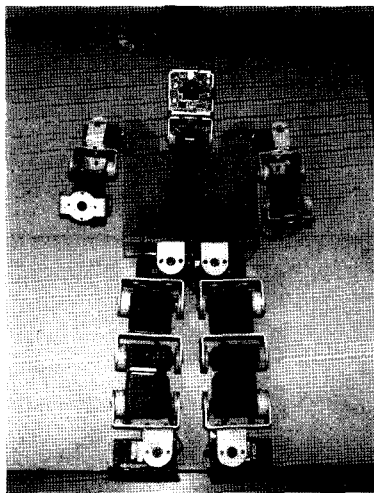


그림 3. 2족 보행 로봇의 외관.

Fig. 3. Appearance of the biped walking robot.

은 pan과 tilt가 가능한 구조로 구성되어 있다. 다리의 6 자유도는 위에서부터 yaw-roll-pitch-pitch-pitch-roll의 구조로 되어 있으므로 직진 보행 뿐 만 아니라 회전 보행도 가능한 구조로 설계되었다. 그림 2는 로봇의 관절 구성을 나타내고 있으며, 그림 3은 로봇의 전체 외관을, 그림 4는 로봇의 제원을 나타내 보이고 있다.

3. 로봇 좌표계 및 기구학

이 로봇에서는 몸체 중심부를 기준으로 삼아 오른발

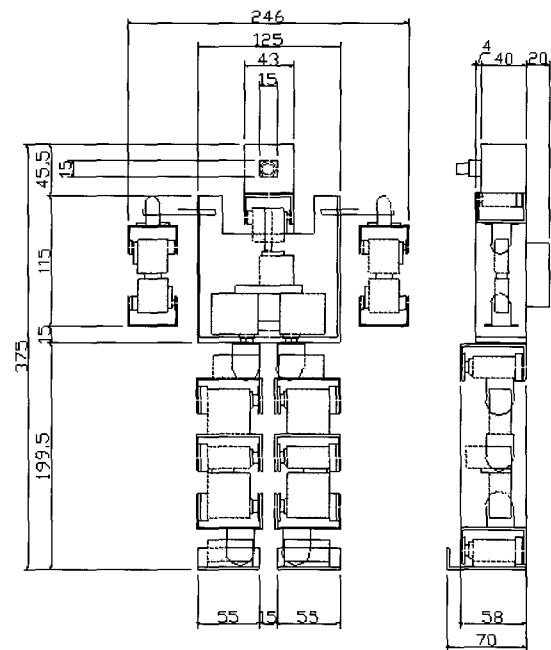


그림 4. 2족 보행 로봇의 제원.

Fig. 4. Specification of the biped walking robot.

체인, 왼발 체인, 오른팔 체인, 왼팔 체인, 목 체인의 5개의 기구학적 체인으로 구성되어 있고, 각각의 체인은 하나의 머니플레이터와 같은 방식으로 해석할 수 있다. 팔과 목 체인은 비교적 간단하므로 여기에서는 오른다리와 왼다리 체인에 대해서만 역기구학 해를 구하는 과정을 설명한다.

로봇의 기구학 식을 표현하기 위해서 일반적으로 D-H 파라미터를 많이 사용하나, 본 연구에서는 몸체 중심 좌표계 $0x_0y_0z_0$ 를 기준으로 모든 좌표계를 한 번에 표현하기 위하여 그림 5에 나타난 바와 같이 관절 좌표계와 관절 변수를 정의하였다. 그림에서 $0x_wy_wz_w$ 는 기준 좌표계(World coordinates)를, $0x_0y_0z_0$ 는 로봇의 몸체 중심 좌표계를 나타내고, T_B 는 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계의 변환행렬을 나타낸다. 또한 T_{R_i} , T_{L_i} , ($i=0,1,2,3,4,5,6$)는 각각 기준 좌표계에 대한 오른쪽, 왼쪽 다리의 관절에 설정된 좌표계들의 변환 행렬들이다. 마지막의 좌표계 $0x_7y_7z_7$ 는 오른쪽과 왼쪽의 발바닥 앞 끝에 설정된 발끝 좌표계이다. 각 다리 부분의 관절 좌표계에 대한 변환 행렬은 다음식과 같다. 여기에서 $S_i = \sin(\theta_i)$, $C_i = \cos(\theta_i)$ 이고 R_i^j , L_i^j 는 각각 오른다리와 왼다리의 i 번째 좌표계와 j 번째 좌표계 사이의 변환행렬을 나타낸다.

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -L_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad L_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & +L_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & S_1 & C_1 & D1 \cdot C_1 \\ 0 & -C_1 & S_1 & D1 \cdot S_1 \\ 1 & 0 & 0 & -L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad L_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & S_1 & C_1 & D1 \cdot C_1 \\ 0 & -C_1 & S_1 & D1 \cdot S_1 \\ 1 & 0 & 0 & -L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 R_2^3 &= \begin{bmatrix} 0 & C_2 & -S_2 & -L_2 \cdot C_2 \\ 0 & S_2 & C_2 & -L_2 \cdot S_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & L_2^3 &= \begin{bmatrix} 0 & C_2 & -S_2 & -L_2 \cdot C_2 \\ 0 & S_2 & C_2 & -L_2 \cdot S_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_3^4 &= \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_3 \cdot S_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & -L_3 \cdot C_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & L_3^4 &= \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_3 \cdot S_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & -L_3 \cdot C_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_4^5 &= \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & L_4 \cdot S_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & -L_4 \cdot C_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & L_4^5 &= \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & L_4 \cdot S_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & -L_4 \cdot C_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_5^6 &= \begin{bmatrix} -S_5 & 0 & C_5 & L_5 \cdot S_5 \\ C_5 & 0 & S_5 & -L_5 \cdot C_5 \\ 0 & 1 & 0 & +D_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & L_5^6 &= \begin{bmatrix} -S_5 & 0 & C_5 & L_5 \cdot S_5 \\ C_5 & 0 & S_5 & -L_5 \cdot C_5 \\ 0 & 1 & 0 & -D_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_6^7 &= \begin{bmatrix} 0 & S_6 & C_6 & -L_6 \cdot C_6 \\ 0 & -C_6 & S_6 & -L_6 \cdot S_6 \\ 1 & 0 & 0 & \text{Foot} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & L_6^7 &= \begin{bmatrix} 0 & S_6 & C_6 & -L_6 \cdot C_6 \\ 0 & -C_6 & S_6 & -L_6 \cdot S_6 \\ 1 & 0 & 0 & \text{Foot} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

표 1. 기구학 매개변수들의 값. (단위: mm)
Table 1. The values of kinematic parameters.

변수	L0	L1	D1	L2	L3	L4	L5	D5	L6	Foot
값	19.0	26.0	13.0	28.0	49.8	43.0	39.9	6.0	16.0	5.0

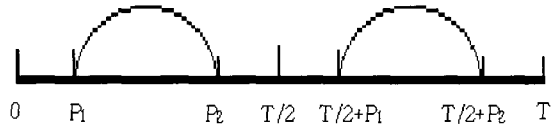


그림 6. 게이트 다이어그램.
Fig. 6. Gait diagram.

III. 2족 보행 로봇의 역기구학 해

1. 2족 보행 로봇의 경로 계획

로봇의 보행 패턴을 생성하기 위한 경로 계획 부분에서는 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계 그리고 발끝 좌표계의 변환 행렬이 매 샘플링 순간마다 결정된다. 그림 6은 설정된 보행 주기에서의 발끝의 움직임을 생성하는 한 예를 보이고 있다. 처음 반 주기 내에 왼쪽다리를 스윙하고 다음 반주기내에 오른다리를 스윙하는 형태의 보행이다. 한편 몸체의 진행과 균형 유지 운동은 (1)에 나타낸 바와 같이 행

$$\begin{cases}
 0 \leq t < P_1 & \begin{cases} -y \text{ 방향으로 몸체 균형 유지 운동} \\ P_1 \leq t < P_2 & \text{왼쪽 다리 스윙} \\ P_2 \leq t < T/2 & +y \text{ 방향으로 몸체 복귀} \end{cases} \\
 T/2 \leq t < T & \begin{cases} T/2 \leq t < T/2+P_1 & +y \text{ 방향으로 몸체 균형 유지} \\ T/2+P_1 \leq t < T/2+P_2 & \text{오른쪽 다리 스윙} \\ T/2+P_2 \leq t < T & -y \text{ 방향으로 몸체 복귀} \end{cases}
 \end{cases} \quad (1)$$

하고, 이 때의 변환 행렬은 (2)와 같이 구할 수 있다[10, 12]. 여기서 +y, -y 방향은 몸체 중심 좌표계 $0x_0y_0z_0$ 를 기준으로 한 것이다.

$$T_B(k+1) = T_B(k) + dT_B \quad (2)$$

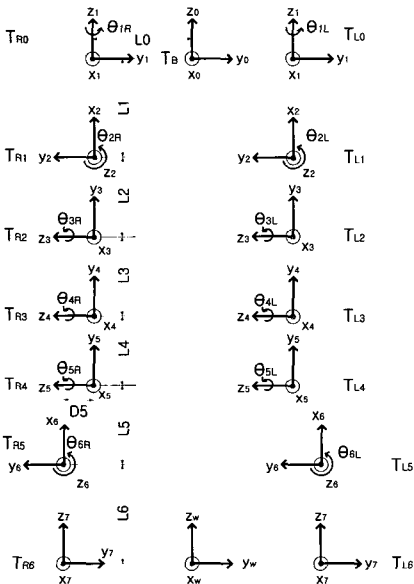
$$dT_B = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} T_B(k)$$

여기에서

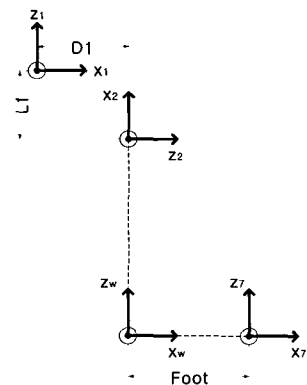
$$\begin{aligned}
 \delta_x &= w_x \Delta T, \quad \delta_y = w_y \Delta T, \quad \delta_z = w_z \Delta T \\
 d_x &= v_x \Delta T, \quad d_y = v_y \Delta T, \quad d_z = v_z \Delta T
 \end{aligned}$$

이고, w, v 는 각각 기준 좌표계에 대한 몸체중심 좌표계의 각속도, 선속도이고 ΔT 는 샘플링 시간 간격이다.

직진 보행, 계단 보행 등과 같이 특정한 보행 패턴에 대



(a) 정면에서 보았을 때



(b) 우측면에서 보았을 때

그림 5. 2족 보행 로봇의 좌표계.
Fig. 5. Coordinates system for the biped robot.

한 경로 계획의 결과로 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계 및 발끝 좌표계의 변환행렬이 결정되면, 역기구학을 풀어 로봇의 각 관절 값들을 구해야 한다.

2. 닫힌 형태의 역기구학 해

매 주기마다 생성된 보행 운동에 따라 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계의 변환 행렬과 기준 좌표계에 대한 발끝 좌표계의 변환행렬이 정해져 있는 상태에서, 각 다리의 관절 값들을 구해내는 과정으로서 다음과 같이 θ_1, θ_2 와 $\theta_6, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 의 순서로 구한다.

다리부의 첫 번째 관절은 다리부에서 유일한 요(yaw)각이다. 따라서 오른발과 왼발 모두의 경우에 θ_1 은 그림 7과 같이, 로봇의 몸체 중심에 설정한 몸체 중심 좌표계의 x, y 축에 의해서 결정되는 $x_B - y_B$ 평면으로 투영된 발의 방향에 의해서 결정된다. 기준 좌표계에 대한 발끝 좌표계와 몸체 중심 좌표계의 변환 행렬이 구해져 있으므로 x_7 의 $x_B - y_B$ 평면으로의 투영은 결정되어 있다. 즉, 발끝 좌표계를 몸체 중심 좌표계에 대하여 나타낸 4X4 차원의 변환 행렬을 T_a 라하면, T_a 의 제 1열 벡터는 x_7 을 몸체 중심 좌표계에 대하여 표현한 것이다. 따라서 T_a 의 1행 1열이 x_7 의 x_B 방향 성분을, T_a 의 2행 1열이 x_7 의 y_B 방향 성분을 나타내므로 θ_1 은 다음식과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}(T_a(2, 1) / T_a(1, 1)) \tag{3}$$

단, 여기에서 $T_a(i, j)$ 는 변환행렬 T_a 의 i 행 j 열을 나타낸다.

다음으로 θ_2 와 θ_6 는 다리부의 롤 관절로서 $x_2 - y_2$ 평면으로 투영된 다리의 자세에 의해 결정된다. 그림 8과 그림 9는 각각 왼다리와 오른다리의 경우에 θ_2 와 θ_6 를 구하기 위한 다리부의 기하학적 관계를 나타내고 있다.

우선, 왼다리와 오른 다리 두 경우 모두에서 θ_1 이 결정되어 있으므로 몸체 중심 좌표계에 대한 $0x_2y_2z_2$ 좌표계의 변환 행렬이 결정된다. 또한 주어진 순간에 발끝 좌표계가 결정되어 있으므로 최종 관절인 발목 관절에 부착되어

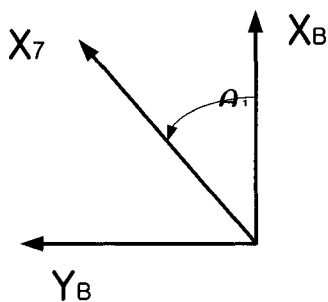


그림 7. $x_B - y_B$ 평면으로 투영된 발의 방향.
Fig. 7. Orientation of the foot projected to the $x_B - y_B$ plane.

있는 $0x_6y_6z_6$ 좌표계의 원점의 위치가 유일하게 결정된다. 한편, 2족 보행 로봇이 보행을 위해 몸체의 무게 중심을 이동할 때에는 (1)에서와 같이 몸체를 +y 방향 또는 -y 방향으로 이동하게 되는데, 이 때 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계의 회전 성분이 있을 수도 있고, 회전 성분은 없이 수평 이동 성분만 있을 수도 있다. 전자는 (2)에서 각속도 성분이 있는 경우이고 후자는 각속도 성분이 없이 선속도 성분만이 있는 경우이다. 현 시스템은 롤에 2 자유도를 가지고 있어서 몸체의 회전이 없이 평행이동만으로도 몸체의 무게 중심을 옮길 수 있지만 보다 일반적인 경우를 다루기 위하여 몸체의 회전 성분과 수평이동 성분이 함께 존재하는 경우에 대하여 역기구학 해를 구하도록 한다.

그림 8은 왼쪽 다리의 경우를 나타내고 있다. 그림에서 β 는 전술한 바와 같이 기준 좌표계에 대한 몸체 중심 좌표계의 회전 성분이 있을 경우를 고려한 것이고, 경로 계획에 따라 항상 결정되어 있는 값이다.

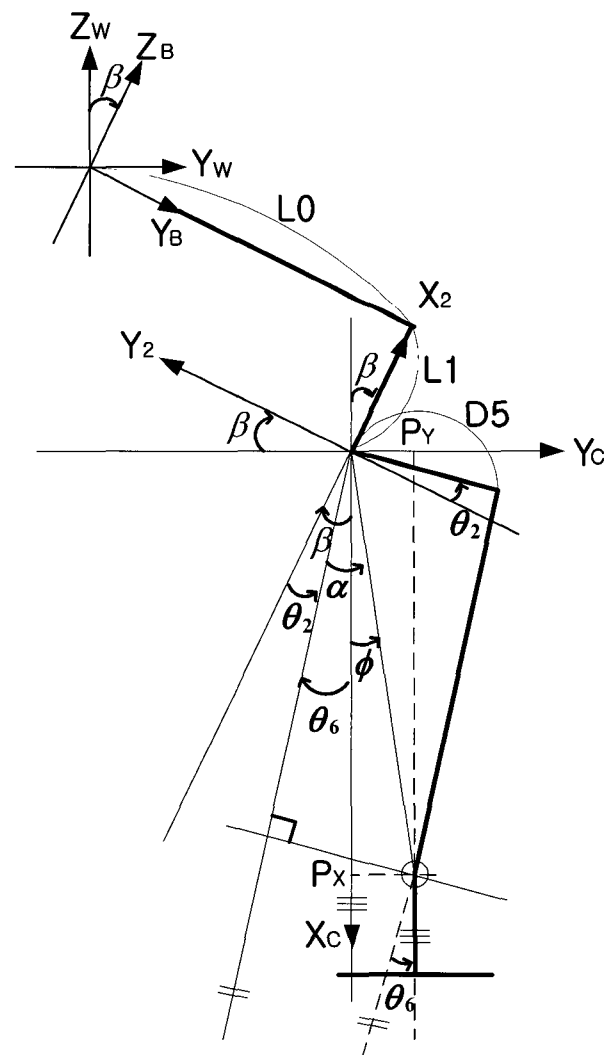


그림 8. $x_2 - y_2$ 평면으로 투영된 왼발목의 위치: 왼다리.
Fig. 8. Position of the ankle projected to the $x_2 - y_2$ plane : Left leg.

그림 8에서의 같이 새로운 좌표계 $0x_c y_c z_c$ 를 정의한다. 즉 $0x_c y_c z_c$ 좌표계는 $0x_2 y_2 z_2$ 좌표계를 z_2 축에 대해 $-\beta$ 만큼 회전 이동한 후, x 축과 y 축의 방향을 반대로 정한 경우이다. $0x_2 y_2 z_2$ 좌표계와 $0x_c y_c z_c$ 좌표계사이의 관계는 쉽게 구할 수 있다. $0x_6 y_6 z_6$ 좌표계의 원점의 위치를 이 새로운 좌표계의 x 축과 y 축으로 투영한 값을 각각 P_x, P_y 라고 하면 그림에서의 기하학적인 관계로부터 θ_{2L}, θ_{6L} 은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{D_5}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2 - D_5^2)}}\right) \\ \theta_{6L} &= \alpha - \phi \\ \theta_{2L} &= \beta - \theta_6 \end{aligned} \quad (4)$$

오른 다리의 경우에도 왼다리의 경우와 유사하게 구할 수 있다. 기하학적인 관계는 그림 9와 같고 θ_{2R}, θ_{6R} 은 (5)와 같이 구할 수 있다.

마지막으로 피치각인 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 는 $x_3 - y_3$ 평면에 투영된 다리의 자세로부터 구한다. 왼다리의 경우에 $\theta_1, \theta_2, \theta_6$ 가 결정되었을 때의 좌표계 사이의 관계는 그림 10과 같다. $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구하기 위하여 새로운 좌표계를 정의한 후, 이를 이용하여 평면 3축 머니플레이터와 유사한 방법으로 해를 구하는 방법을 제안한다. 그림 11과 같이 원점은 $0x_5 y_5 z_5$ 와 같고, x 축 방향이 발끝 좌표계의 x_7 과 같도록 새로운 좌표계 $0x_E y_E z_E$ 를 정의하고, $0x_E y_E z_E$ 와 방향은 모두 같고 원점만 평행 이동된 중간 좌표계인 $0x_6 y_6 z_6$ 를 정의한다. 즉 좌표계 $0x_E y_E z_E$ 는 항상, 원점은 좌표계 $0x_5 y_5 z_5$ 의 원점과 일치하고, x_E 가 발끝 좌표계의 x_7 과 일치하게 된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{D_5}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2 - D_5^2)}}\right) \\ \theta_{6R} &= -(\alpha + \phi) \\ \theta_{2R} &= \alpha + \phi + \beta = \beta - \theta_6 \end{aligned} \quad (5)$$

한편 θ_1, θ_2 가 결정되어 있으므로 기준 좌표계에 대한 $0x_3 y_3 z_3$ 좌표계의 변환행렬이 결정되어 있고, θ_6 가 결정되어 있으므로 발끝 좌표계에 대한 $0x_E y_E z_E$ 의 변환행렬 ETL은 (6)과 같이 결정된다. 따라서 $0x_3 y_3 z_3$ 좌표계에 대한 $0x_E y_E z_E$ 좌표계의 변환 행렬도 주어진 것이 된다.

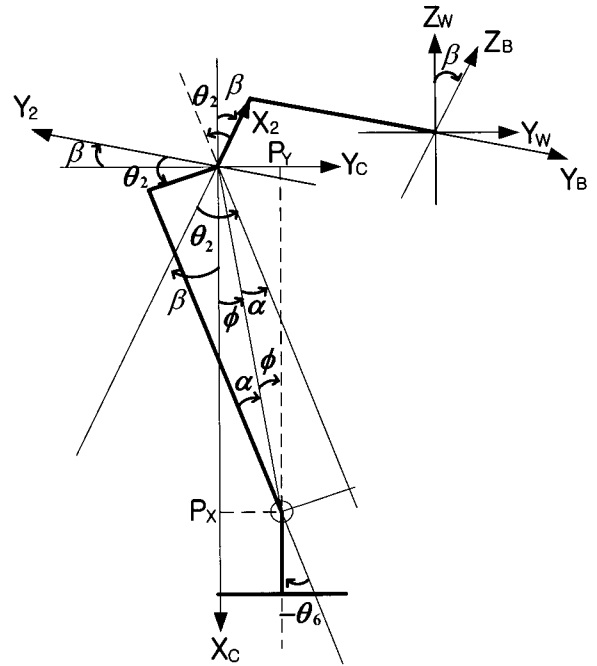


그림 9. $x_2 - y_2$ 평면으로 투영된 오른발목의 위치 : 오른다리.
Fig. 9. Position of the ankle projected to the $x_2 - y_2$ plane : Right leg.

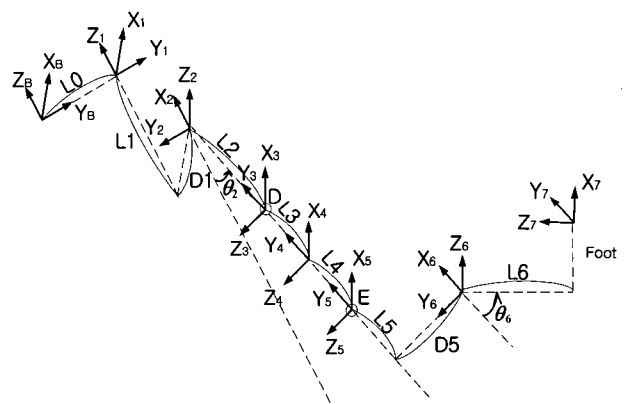


그림 10. $\theta_1, \theta_2, \theta_6$ 가 결정되었을 때의 좌표계 : 왼다리.
Fig. 10. Coordinates frames when $\theta_1, \theta_2, \theta_6$ are determined : left leg.

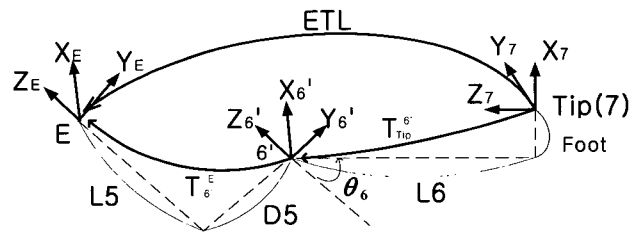


그림 11. 새로운 좌표계 $0x_E y_E z_E$: 왼다리.
Fig. 11. A new coordinates frame $0x_E y_E z_E$: left leg.

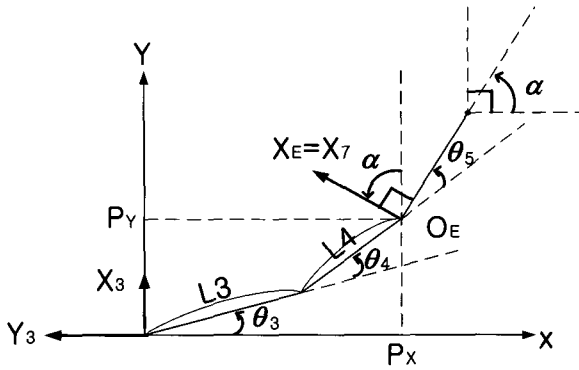


그림 12. $x_3 - y_3$ 평면으로 투영된 왼다리의 자세.
Fig. 12. Configuration of the left leg projected to the $x_3 - y_3$ plane.

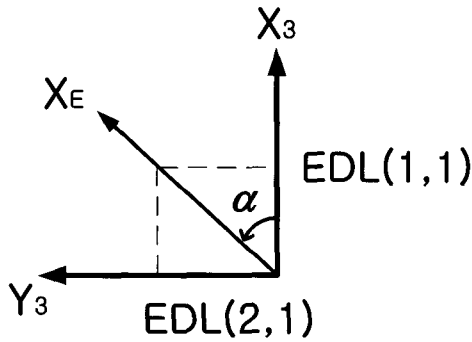


그림 13. $x_3 - y_3$ 평면으로 투영된 발끝의 방향.
Fig. 13. Orientation of the tip of the left toe projected to the $x_3 - y_3$ plane.

그림 12는 $x_3 - y_3$ 평면으로 투영된 왼다리의 자세를 나타내고 있다. O_E 는 $0x_E y_E z_E$ 좌표계의 원점이 $x_3 - y_3$ 평면으로 투영된 점을 나타내고 있다. 또한 $x_E = x_7$ 은 발끝 좌표계의 x 축 방향을 $x_3 - y_3$ 평면으로 투영시킨 벡터이다. 이 때 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구하는 방법은 다음과 같다. 우선 그림 13에서와 같이 x_E 와 $x_3 - y_3$ 평면에서의 방향 관계로부터 (7)과 같이 α 를 구한다. 여기에서 EDL은 $0x_E y_E z_E$ 좌표계를 $0x_3 y_3 z_3$ 좌표계에 대하여 표시한 변환행렬이고, EDL(2,1)과 EDL(1,1)은 각각 이 변환행렬의 2행 1열, 1행 1열의 원소이다. $\alpha = 0$ 인 경우는 발끝의 방향인 x_E 가 지면과 평행하게 앞을 향하고 있는 경우이다.

$$\begin{aligned}
 ETL &= T_{Tip(7)}^E = T_{Tip(7)}^6 \cdot T_6^E \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -FOOT \\ 0 & C_6 & S_6 & 0 \\ 0 & -S_6 & C_6 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -D_5 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -FOOT \\ 0 & C_6 & S_6 & -D_5 \cdot C_6 + L_5 \cdot S_6 \\ 0 & -S_6 & C_6 & D_5 \cdot S_6 + L_5 \cdot C_6 + L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \tan^{-1}(EDL(2,1)/EDL(1,1)) \\
 &= \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \quad (7)
 \end{aligned}$$

이제 O_E 를 $0x_3 y_3 z_3$ 좌표계에 대하여 표현하였을 때의 x_3 방향 성분을 x , y_3 방향 성분을 y 라고 하면 $\theta_{3L}, \theta_{4L}, \theta_{5L}$ 는 다음 (8)에 의하여 결정된다.

$$P_x = -y$$

$$P_y = x$$

$$\cos \theta_{4L} = \frac{P_x^2 + P_y^2 - L_3^2 - L_4^2}{2L_3 \cdot L_4} \equiv D \quad (8)$$

$$\theta_{4L} = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D}$$

$$\theta_{3L} = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x} - \tan^{-1} \frac{L_4 \cdot \sin \theta_{4L}}{L_3 + L_4 \cdot \cos \theta_{4L}}$$

$$\theta_{5L} = \alpha - \theta_{3L} - \theta_{4L}$$

(8)에서 θ_{4L} 은 두 가지 값이 나올 수 있는데, 보행 로봇이 보행 시 사람과 같은 형태의 다리 자세를 갖도록 하기 위해서는 음의 값이 나오도록 선정해 준다. 한편, 오른다리에 대해서도 유사한 방법으로 $\theta_{3R}, \theta_{4R}, \theta_{5R}$ 를 구할 수 있다.

그림 14에 로봇의 자세의 한 예를 나타내었다. 이는 로봇의 직진 보행의 한 순간에 대한 경우이다. 로봇이 몸체 균형 유지를 위하여 기준 좌표계에 대하여 몸체 좌표계가 3° 기울어져 있으며, 이 때 $\beta = +3^\circ$ 이다. 위의 역기구학을 구하는 과정을 거쳐 구한 해는 오른쪽 다리의 경우 $\theta_{1R} = 0.0^\circ, \theta_{2R} = -8.11^\circ, \theta_{3R} = 45.45^\circ, \theta_{4R} = -48.52^\circ, \theta_{5R} = 3.06^\circ, \theta_{6R} = 11.11^\circ$ 이고 왼쪽 다리 관절의 경우 $\theta_{1L} = 0.0^\circ, \theta_{2L} = -8.40^\circ, \theta_{3L} = 30.19^\circ, \theta_{4L} = -77.90^\circ, \theta_{5L} = 47.71^\circ$ 그리고, $\theta_{6L} = 11.40^\circ$ 이었다.

IV. 결론

본 논문에서는 보행 로봇의 연구 개발을 위한 플랫폼으로 제작된 소형 2족 보행 로봇에 대해 간략히 소개하였다. 이 로봇의 역기구학을 구하는 문제에 있어서, 자코비안에 기초하여 속도 레벨에서 해를 구하는 방법은 보행 로봇의 무릎이 곧게 펴지게 되는 계단 보행과 같은 응용에서 해를 구하지 못하거나 오차를 많이 포함하는 단점을 갖고 있기 때문에, 역기구학 문제에 대해 닫힌 형태의 해를 구하는 방법을 제안하였다. 개발된 로봇의 기구학적인 특성과 기하학적인 고찰로부터 간단한 방법으로 닫힌 형태의 해를 구하는 방법을 제안하였다. 향후에는 제안한 방법을 이용하여 보행 로봇의 역기구학 해를 실시간으로 구하는 방법과 이의 계단 보행에의 적용에 대하여 연구가 진행될 예정이다.

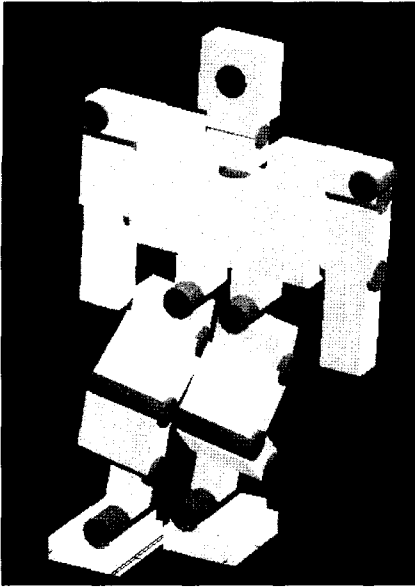


그림 14. 역기구학 해를 구하기 위한 자세 예.

Fig. 14. Example configuration of the robot for solving inverse kinematics.

참고문헌

- [1] T. Morita, et al, "Design and control of mobile manipulation system for human symbiotic humanoid:Hadaly-2," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1315-1320, 1998.
- [2] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3165-3171, 2001.
- [3] 김충태, 김진걸, "유전 알고리즘을 이용한 이족 보행로봇의 균형 궤적 생성에 관한 연구," 제어,자동화,시스템 공학회논문지, vol. 5, no. 8, pp. 969-976, 1999.
- [4] 이수영, 홍예선, "4족 보행 로봇의 걸음새 안정화를 위한 몸체 임피던스 제어," 전기학회 논문지, 49D권, 5호, pp. 257-263, 2000.
- [5] 이종원, "휴먼로봇 시스템 개발 사례," *Proc. of KIEE*. vol. 47, no. 10, pp. 18-22, 1998.
- [6] K. Hirai, et al, "The development of honda humanoid robot," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1321-1326, 1998.
- [7] A. Takanishi, "Humanoid robots and animal robots-towards entertainment robot market in 21st century-," *Proc. of the 32nd ISR*, pp. 2-7, 2001.
- [8] F. Kanehiro, et al, "Development of a two-armed bipedal robot that can walk and carry objects," *Proc. of IROS'96*, pp. 23-28, 1996.
- [9] F. Kanehiro, et al, "Developmental software environment that is applicable to small-size humanoids and life-size humanoids," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4084-4089, 2001.
- [10] 성영휘, 이수영, "소형 휴머노이드 로봇 시스템 개발," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 7 권 제 5 호, pp. 420-426, 5, 2001.
- [11] G. Tevatia, S. Schaal, "Inverse kinematics for humanoid robots," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 294-299, 2000.
- [12] R. Paul, Robot manipulators, MIT Press, 1981.
- [13] Y. W. Sung, S-Y Yi, "A miniature humanoid robot that can walk up and down stairs," *Proc. of the 32nd ISR*, pp. 1463-1468, 2001.



성 영 휘

1962년 5월 20일생. 1988년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1991년 KAIST 전기및전자공학과 석사, 동대학 박사 (1996). 1998년~현재 국립금오공과대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 인간형 로봇, 지능형 로봇, 여유자유

도 머니플레이터.