

〈논 문〉

일반적 3R 링크를 갖는 6각 보행로봇 다리의 보행체적에 대한 해석

한규범* · 양창일* · 백윤수**

(1996년 2월 8일 접수)

Analysis on the Walking Volumes of a Hexapod System with General 3R Link Legs

K. B. Han, C. I. Yang, and Y. S. Baek

Key Words : Closed Form of Inverse Kinematic Solution (역기구학 폐형해), Edge Detection (경계추적), Hexapod(6각 보행로봇), Walking Volume(보행체적)

Abstract

In order to move the body of a walking robot translationally, rotationally, and step over the obstacles, the walking robot must have at least 3 degrees of freedom for each leg. Therefore each leg of the general walking robots can be composed of 3-link system with 3 revolute joints. In this paper, the closed form of inverse kinematic solutions is shown for this general 3R linkage. Moreover, in order to have efficient walking volume in rough terrain, the workspace of each leg is obtained considering the twist angles and the offsets in D-H parameters. When we design a walking robot, the information of the walking volume is needed for planning desired trajectories of the feet effectively. Appropriate knowledge of the walking volume can also be used to maximize linear or angular velocity or minimize power or stress. However, since it is impossible to obtain the information of walking volume in 3-D space directly from the kinematic equations, the walking volume can be searched through the edge detection algorithm using the triangle tracer with closed form inverse kinematic solutions. In this study, we present the closed form inverse kinematic solutions for 3R linkage model, and the walking volume of 6 legged walking robot which is modeled after the darkling beetle, *Eleodes obscura sulcipennis*, through the method of edge detection for an arbitrary 2 dimensional shape using small triangle tracer.

1. 서 론

일반적 형상을 갖는 3개의 회전조인트와 3개의 링크로 이루어진 모델의 한 예로 보행로봇의 다리 기구를 들 수 있다. 보행로봇의 몸체가 지면에 대하여

병진운동과 방향을 전환하는 회전운동, 그리고 장애물을 넘어갈 수 있기 위해서는 한 개의 다리에 대하여 3개의 자유도가 필요하다. 즉 발끝이 몸체에 대하여 상대적으로 3차원 운동을 할 수 있는 것이 요구된다.^(1,6) 따라서 일반적인 보행로봇의 각각의 다리는 보통 3개의 링크와 3개의 회전조인트로 이루어져 있는 경우가 많다.

특히 험난한 지형상의 장애물을 피하기 위해서는

*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

**회원, 연세대학교 기계설계학과

보행체적을 효과적으로 확장시킬 수 있어야 하므로 비틀림각이나 움푹을 고려한 일반적인 형상을 가진 회전조인트로 구성되는 것이 중요하다. 그러므로 일반적인 형상을 가진 회전조인트로 구성된 3관절 기구에 대한 역기구학적 해를 얻어내는 것이 필요하다. 그러나 고속 주행 및 실시간 제어를 위해서는 수치해석적인 방법보다는 폐형해의 형태로 구하는 것이 바람직하다.

보행로봇의 설계과정에서 다리기구의 바람직한 폐적을 계획하고 빠른 이동속도를 얻으며 효율적인 필요 동력을 구하기 위해서는 보행체적에 대한 정보를 얻는 것이 중요하다. 일반적으로 다관절 링크 시스템의 기구학적 방정식은 조인트의 변수들이 복잡하게 연성되어 있는 비선형식이므로 기구학적 방정식으로부터 직접적으로 보행체적의 경계에 대한 정보를 얻는 것은 쉽지 않다. 그러나 주어진 위치에 대한 각 조인트의 역기구학적 해를 폐형해의 형태로 구할 수 있다면 이를 이용하여 보행체적 내에 주어진 위치가 존재하는지 판정함으로써 보행체적의 경계를 추출할 수 있다.

본 연구에서는 일반적인 형상을 가진 세계의 회전조인트로 이루어진 3관절 링크 시스템에 대한 역기구학적 해를 폐형해의 형태로 구하고 이를 이용하여 경계추적 알고리즘에 의해 보행체적의 경계를 추적한 후 이를 6각 감층에 적용하여 각각의 다리에 대한 보행 체적의 기하학적 해석을 제시한다.

2. 일반적인 3R 링크 시스템의 역기구학 해석

로봇 매니플레이터의 링크에 대한 기하학적 형상을 표현하는 방법으로는 여러 가지⁽³⁾가 있으나 여기에서는 Denavit-Hartenberg⁽⁴⁾의 표시법을 이용

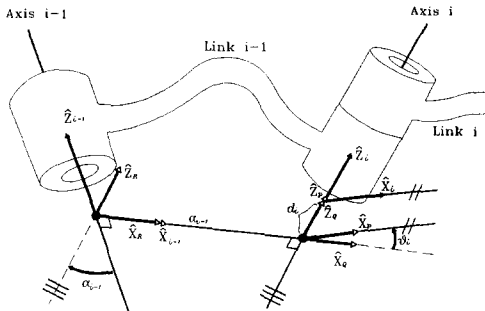


Fig. 1 Link parameters

한다.

D-H의 표시법에 의하면 Fig.1의 $i-1$ 번째의 링크는 링크의 길이 a_{i-1} 과 비틀림각 α_{i-1} 로 기술이 되며, i 번째 링크와 $i-1$ 번째의 링크 사이의 변위는 선형변위 d_i 와 각 변위 θ_i 로 설명될 수 있다.

이러한 D-H 표시법으로 나타내어진 2개의 조인트간의 동차변환행렬은 다음과 같다.⁽²⁾

$${}^{i-1}T_i = R_x(a_{i-1}) D_x(a_{i-1}) R_z(\theta_i) D_z(d_i) \quad (1)$$

즉,

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ S\theta_i C\alpha_{i-1} & C\theta_i C\alpha_{i-1} - S\alpha_{i-1} - S\alpha_{i-1}d_i & & \\ S\theta_i S\alpha_{i-1} & C\theta_i S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$C\theta_i = \cos \theta_i, \quad S\theta_i = \sin \theta_i \\ C\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}, \quad S\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$$

이다.

식 (1)에서 R_x , R_z 는 각각 x 축과 z 축에 대한 회전변환행렬을 나타내고 D_x , D_z 는 각각 x 축과 z 축에 대한 선형변환행렬을 나타낸다.

Fig.2에서와 같이 3관절 매니플레이터에 대하여 3번째 링크의 끝점을 기초 좌표계(base frame)와 3번째 좌표계에 의하여 표현하면 식 (3)을 얻는다.

$${}^0P = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3P \quad (3)$$

위 식에서 0P 와 3P 는 기초 좌표계와 3번째 좌표계에서 표현한 3번째 링크의 끝점을 나타내고 0T_1 , 1T_2 , 2T_3 는 각 좌표계간의 동차변환행렬을 나타낸다.

식 (3)은 비선형적이고 각 조인트의 변수들이 복

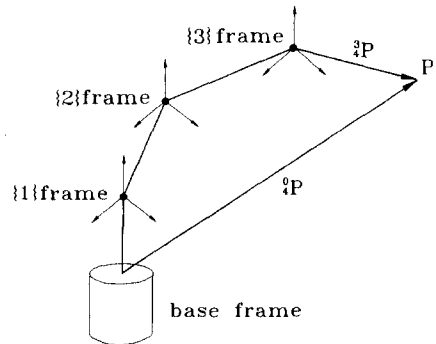


Fig. 2 Graphical expression of eqn (3)

잡하게 연성되어 있다. 회전조인트의 경우에는 각 변위 θ 가 변수가 되므로 식 (3)을 좀 더 간략화시키기 위하여 0T_1 에서의 파라미터 중 주어진 파라미터 d_1, a_0, a_0 와 변수 θ_1 을 분리시킨다. 따라서 식(3)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^4P = {}^cT_c(d_1, a_0, a_0) {}^cT_1(\theta_1) {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3P \quad (4)$$

여기서, c 는 기초 좌표계와 첫번째 좌표계 사이의 가상 좌표계로서 θ_1 만을 변수로 취한다.

식 (4)에서 0T_c 의 역행렬을 양변에 전치시키면 다음 식을 얻게 된다.

$${}^4P = {}^cT_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3P \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)로부터 x, y, z 성분에 대하여 다음의 세 식을 얻을 수 있다.

$${}^cP_{4x} = f_1(a_1, a_2, a_1, a_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3, d_2, d_3, {}^3P_{4x}, {}^3P_{4y}, {}^3P_{4z}) \quad (6)$$

$${}^cP_{4y} = f_2(a_1, a_2, a_1, a_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3, d_2, d_3, {}^3P_{4x}, {}^3P_{4y}, {}^3P_{4z}) \quad (7)$$

$${}^cP_{4z} = f_3(a_2, a_1, a_2, \theta_2, \theta_3, d_2, d_3, {}^3P_{4x}, {}^3P_{4y}, {}^3P_{4z}) \quad (8)$$

윗 식들의 우변에서 d_1, a_0, a_0 는 나타나지 않는다.

3개의 회전조인트로 이루어진 RRR 모델에 대해서는 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 가 변수로 되므로 식 (6)~(8)로부터 다음의 세 식을 얻을 수 있다.

$$E C\theta_1 + F S\theta_1 = {}^cP_{4x} \quad (9)$$

$$E S\theta_1 - F C\theta_1 = {}^cP_{4y} \quad (10)$$

$$Q_{11} S\theta_3 + Q_{12} C\theta_3 = R_1 \quad (11)$$

윗 식에서 계수 $E, F, Q_{11}, Q_{12}, R_1$ 은 다음과 같다.

$$E = a_1 + C\theta_2(a_2 + {}^3P_{4x}C\theta_3 - 3P_{4y}S\theta_3) + S\theta_2S\alpha_2(d_3 + {}^3P_{4z}) - S\theta_2C\alpha_2({}^3P_{4x}S\theta_3 + {}^3P_{4y}C\theta_3) \quad (12)$$

$$F = S\alpha_1d_2 + S\alpha_1C\alpha_2(d_3 + {}^3P_{4z}) + {}^3P_{4y}C\alpha_1S\theta_2S\theta_3 + S\alpha_1S\alpha_2({}^3P_{4x}S\theta_3 + {}^3P_{4y}C\theta_3) - C\alpha_1({}^3P_{4y}C\theta_2C\theta_3C\alpha_2 + S\theta_2(a_2 + {}^3P_{4x}C\theta_3)) + C\alpha_1C\theta_2((d_3 + {}^3P_{4z})S\alpha_2 - {}^3P_{4x}C\alpha_2S\theta_3) \quad (13)$$

$$Q_{11} = k_1C\theta_2 - k_2S\theta_2 + k_3 \quad (14)$$

$$Q_{12} = k_4S\theta_2 + k_5C\theta_2 + k_6 \quad (15)$$

$$R_1 = k_7C\theta_2 - k_8S\theta_2 + k_9 \quad (16)$$

윗 식에서 계수 k 들은 부록에 나타내었다.

θ_1 을 소거시키기 위하여 식 (9)~(11)의 세 식을 모두 제곱하여 더하면 다음 식을 얻는다.

$$Q_{21}S\theta_3 + Q_{22}C\theta_3 = R_2 \quad (17)$$

윗 식에서 계수 Q_{21}, Q_{22}, R_2 는 다음과 같이 정리된다.

$$Q_{21} = m_1 - m_2S\theta_2 - m_3C\theta_2 \quad (18)$$

$$Q_{22} = m_4 - m_5S\theta_2 + m_6C\theta_2 \quad (19)$$

$$R_2 = m_7 - m_8C\theta_2 - m_9S\theta_2 \quad (20)$$

윗 식에서 계수 m 들은 부록에 나타내었다.

식 (11)과 식 (17)을 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S\theta_3 \\ C\theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Cramer의 법칙에 의하여 식 (21)의 해는 다음과 같다.

$$S\theta_3 = \frac{F_1}{Det} \quad (22)$$

$$C\theta_3 = \frac{F_2}{Det}$$

윗 식에서 F_1, F_2, Det 는 다음과 같다.

$$F_1 = Q_{22}R_1 - Q_{12}R_2 \quad (23)$$

$$F_2 = Q_{11}R_2 - Q_{21}R_1 \quad (24)$$

$$Det = Q_{11}Q_{22} - Q_{21}Q_{12} \quad (25)$$

식 (23)~(25)에 식 (14)~(16), (18)~(20)을 적용하면 다음과 같다.

$$F_1 = Q_{22}R_1 - Q_{12}R_2 = (m_4 - m_5S\theta_2 + m_6C\theta_2)(k_7C\theta_2 - k_8S\theta_2 + k_9) - (k_4S\theta_2 + k_5C\theta_2 + k_6)(m_7 - m_8C\theta_2 - m_9S\theta_2) = n_{21}C\theta_2^2 + n_{22}S\theta_2^2 + n_{23}C\theta_2 + n_{24}S\theta_2 + n_{25}C\theta_2S\theta_2 + n_{26} \quad (26)$$

$$F_2 = Q_{11}R_2 - Q_{21}R_1 = (k_1C\theta_2 - k_2S\theta_2 + k_3)(m_7 - m_8C\theta_2 - m_9S\theta_2) - (m_1 - m_2S\theta_2 - m_3C\theta_2)(k_7C\theta_2 - k_8S\theta_2 + k_9)$$

$$= n_{31}C\theta_2^2 + n_{32}S\theta_2^2 + n_{33}C\theta_2 + n_{34}S\theta_2 + n_{35}C\theta_2S\theta_2 + n_{36} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Det &= Q_{11}Q_{22} - Q_{12}Q_{21} \\ &= (k_1C\theta_2 - k_2S\theta_2 + k_3)(m_4 - m_5S\theta_2 + m_6C\theta_2) \\ &\quad - (k_4S\theta_2 + k_5C\theta_2 + k_6)(m_1 - m_2S\theta_2 - m_3C\theta_2) \\ &= n_{11}C\theta_2^2 + n_{12}S\theta_2^2 + n_{13}C\theta_2 + n_{14}S\theta_2 \\ &\quad + n_{15}C\theta_2S\theta_2 + n_{16} \end{aligned} \quad (28)$$

윗 식에서 계수 n 들은 부록에 나타내었다.

a, d, α, θ 값들을 대입하면 식 (26)~(28)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} F_1 &= n_{13}C\theta_2 + n_{14}S\theta_2 + G_1 \\ F_2 &= n_{23}C\theta_2 + n_{24}S\theta_2 + G_2 \\ Det &= n_{33}C\theta_2 + n_{34}S\theta_2 + G_3 \end{aligned} \quad (29)$$

여기서,

$$\begin{aligned} G_1 &= n_{16} + n_{11} \\ G_2 &= n_{26} + n_{21} \\ G_3 &= n_{36} + n_{31} \end{aligned} \quad (30)$$

이다. 식 (22)로부터

$$F_1^2 + F_2^2 - Det^2 = 0 \quad (31)$$

이다. 따라서 식 (29), (30)의 값들을 대입하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$z_1C\theta_2^2 + z_2S\theta_2^2 + z_3C\theta_2S\theta_2 + z_4C\theta_2 + z_5S\theta_2 + z_6 = 0 \quad (32)$$

식 (32)에서 $C\theta_2 = x, S\theta_2 = (1-x^2)^{1/2}$ 로 치환하면 다음 식을 얻는다.

$$z_7x^4 + z_8x^3 + z_9x^2 + z_{10}x + z_{11} = 0 \quad (33)$$

윗 식에서 계수 z 들은 부록에 나타내었다.

식 (33)에 의하여 θ_2 가 결정되면 식 (16), (10)에 의하여 차례로 θ_3, θ_1 이 결정된다. 식 (33)에서 관찰할 수 있듯이 얻을 수 있는 해의 최대 set은 모두 4 set이지만 실제로 조인트의 기계적 제한 등에 의하여 가능한 해의 개수는 4 set보다 줄어들 수 있으며 기계적 제한을 만족시키는 해의 개수가 2 set 이상인 경우에 대해서는 전 단계에서의 근과의 차이가 적은 것을 선택한다.

3. 경계추적방법을 이용한 보행체적 검출

보행로봇에 있어서 보행 체적에 대한 해석은 보

행 평면상의 장애물을 피해 갈 수 있는 바람직한 다리 기구의 제적을 계획하고, 보행로봇의 속도를 최대로 하며 필요한 동력 또는 응력을 최소로 하는 데에 있어서 필수적인 요소이다. 따라서 보행 체적에 대한 해석이 매우 중요하지만 여러 개의 링크로 이루어진 시스템에서 기구학적 방정식은 각 조인트에 관련된 변수가 복잡하게 연성 되어 있고, 조인트좌표계와 보행체적의 경계 사이의 관계가 아닌 직교좌표계와 조인트좌표계의 관계를 나타내므로 보행체적의 경계에 대한 정보를 함수의 형태로 나타내는 것이 어렵다. 이는 3차원 공간 내에서 보행체적이 임의의 형상을 갖는다는 것을 의미한다. 이에 대한 해결책으로 전체 영역에 대하여 조사를 할 수도 있지만 이러한 방법은 비효율적이므로 전체 탐색대상영역을 조사하지 않고, 보행 체적의 경계에 관한 정보를 추출하기 위하여 3차원 공간상의 보행체적을 임의의 축에 따라 얇게 분할하면 2차원 평면상의 임의의 형상을 얻게 된다. 임의의 2차원 형상으로부터 경계에 관한 정보를 함수 관계를 이용하여 보행 체적을 찾아낼 수 있다.^(5,10,11) 따라서 역기구학 해를 폐형해의 형태로 나타낼 수 있다면 주어진 공간 좌표상의 임의의 위치에 대하여 다리 기구의 접근이 가능한 위치인가에 대하여 참, 거짓의 정보를 얻어낼 수 있으므로 보행체적에 대한 추출이 가능하다.

역기구학 해의 결과가 실수의 형태로 주어지는 경우, 즉 임의로 주어진 위치에 대해 각 조인트의 기구학적 제한 식을 만족시키는 해가 존재하는 경우라면 주어진 위치는 시스템의 보행체적 내부의 점이라고 생각할 수 있으며 임의의 boolean 변수를 참값으로 지정할 수 있다. 반면 해의 결과가 허수로 주어지는 경우 또는 역기구학으로부터 얻어진 실수해가 각 조인트의 기구학적 제한 식을 만족시키지 못하는 경우에 대하여는 주어진 위치가 보행체적 외부의 점으로 간주할 수 있으며, 이때 boolean 변수 값은 거짓으로 지정될 수 있다.

이를 경계추적방법에 적용하여 다리 기구의 보행체적을 검출할 수 있다. 경계 추적 방법으로는 격자를 이용한 추적법,^(7,8) 삼각형 추적자를 이용한 방법⁽¹¹⁾ 등이 있으나 본 연구에서는 각각의 다리가 일반적 형상을 가진 3개의 회전조인트로 이루어진 6개의 다리를 갖는 보행 시스템의 보행체적을 탐색 영역으로 선정하여 삼각형 추적자를 이용한 경계추적방법을 이용하여 보행체적을 추출한다.

4. 6각 갑충에의 적용 예

Fichter 등⁽⁹⁾은 6각 갑충(beetle; 학명 *Eleodes obscura sulcipennis*)에 대하여 미세현미경을 이용하여 앞다리, 중간다리, 뒷다리에 대한 기구학적 D-H 계수를 측정하였으며 그 결과는 Tables 1, 2, 3과 같다.

위 Table들의 데이터로부터 6각 갑충의 다리 중 우측앞다리, 좌측 중간다리, 우측 뒷다리를 각각 3개의 회전조인트로 이루어진 3관절 링크기구로 모델링한다. 이로부터 각각의 역기구학적 패형해를

Table 1 D-H parameters of right front leg for a beetle

i	α_{i-1} (deg)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	θ_{min} (deg)	θ_{max} (deg)
1	141°	3.38	-2.81	-114.2°	-4.2°
2	100.4°	0.24	16.24	-20.2°	89.9°
3	-27.9°	3.02	0	-29.6°	110.4°
4	0°	6.93	-13.19		

Table 2 D-H parameters of left middle leg for a beetle

i	α_{i-1} (deg)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	θ_{min} (deg)	θ_{max} (deg)
1	147.6°	0.21	-3.47	-161.8°	-46.8°
2	-100.7°	1.34	37.35	-85.2°	24.8°
3	11.3°	4.58	0	-113.4°	26.6°
4	0°	7.48	-35.29		

Table 3 D-H parameters of right hind leg for a beetle

i	α_{i-1} (deg)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	θ_{min} (deg)	θ_{max} (deg)
1	136.4°	3.38	-2.81	-108.2°	-43.2°
2	98.6°	0.24	16.24	-110.5°	24.5°
3	-12.6°	3.02	0	26.2°	166.2°
4	0°	6.93	-13.19		

얻은 후 삼각형 추적자를 이용한 경계추출방법⁽¹¹⁾에 의하여 각 평면에서의 보행면적의 경계를 추출한 후 이를 조합하여 전체의 작업공간을 얻을 수 있다. 즉, Fig. 3에서 보는 바와 같이 갑충 몸체에서 설정된 좌표계의 B_z 값에 대하여 추적된 각 다리 끝단의 보행면적을 X, Y 평면에 대하여 표시하면 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6의 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 갑충 몸체에서 설정된 좌표계의 B_z 에 대하여 B_z 값이 -15 mm에서 5 mm로 변함에 따라 추적된 우측 앞다리의 보행체적의 경계를 도시한 것이다. Fig. 4에서 관찰할 수 있듯이 $B_z = -3$ mm 일 때 두 개의 보행면적을 얻을 수 있으며 유효한 보행 체적은 이 두 체적 사이에서 얻어진다. 또한 $B_z = 4$ mm인 경우 보행체적은 독립된 2개의 보행 체적으로 분할됨을 관찰할 수 있다.

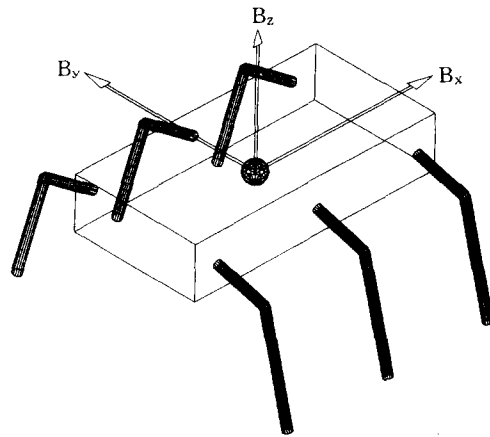


Fig. 3 Body coordinates of walking system

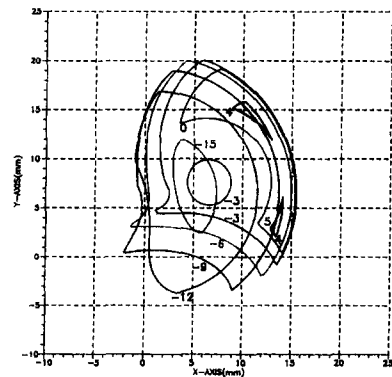


Fig. 4 Workspace contours of front leg on several cutting planes from $B_z = -15$ mm to $B_z = 5$ mm relative to body coordinate system.

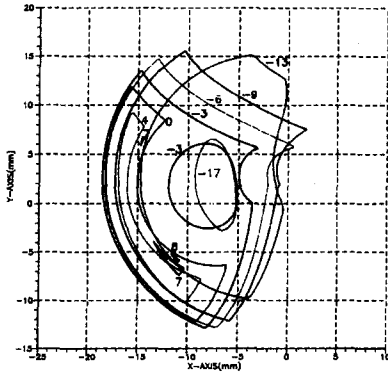


Fig. 5 Workspace contours of middle leg on several cutting planes from $B_z = -17\text{mm}$ to $B_z = 8\text{ mm}$ relative to body coordinate system

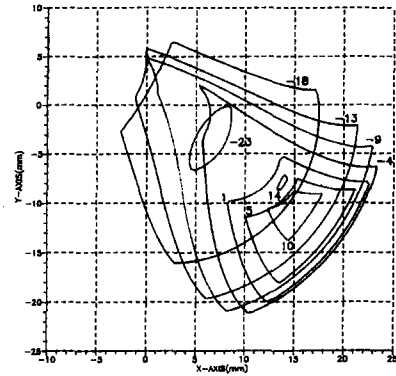


Fig. 6 Workspace contours of hind leg on several cutting planes from $B_z = -23\text{mm}$ to $B_z = 14\text{mm}$ relative to body coordinate system

Fig. 5는 갑충 몸체에서 설정된 좌표계의 B_z 에 대하여 B_z 값이 -17 mm 에서 8 mm 로 변함에 따라 추적된 좌측 중간다리의 보행체적의 경계를 도시한 것이다. Fig. 5에서 관찰할 수 있듯이 $B_z = -3\text{ mm}$ 일 때 두 개의 보행면적을 얻을 수 있으며 유효한 보행체적은 이 두 체적 사이에서 얻어진다. 또한 $B_z = 7\text{ mm}$ 인 경우 보행체적은 독립된 2개의 보행체적으로 분할됨을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 갑충 몸체에서 설정된 좌표계의 B_z 에 대

하여 B_z 값이 -23 mm 에서 14 mm 로 변함에 따라 추적된 보행 체적의 경계를 도시한 것이다.

Figs. 7, 8, 9는 각각 앞다리, 중간다리, 뒷다리에 대하여 B_z 의 변화에 따른 보행면적을 나타낸 것이다. 그리고 각 면적의 합은 해당 다리의 보행체적을 의미하게 된다.

Figs. 7, 8에서 관찰할 수 있듯이 앞다리와 중간다리의 경우 B_z 가 약 -9 mm 인 경우에서 최대의 보행면적을 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다. 이는

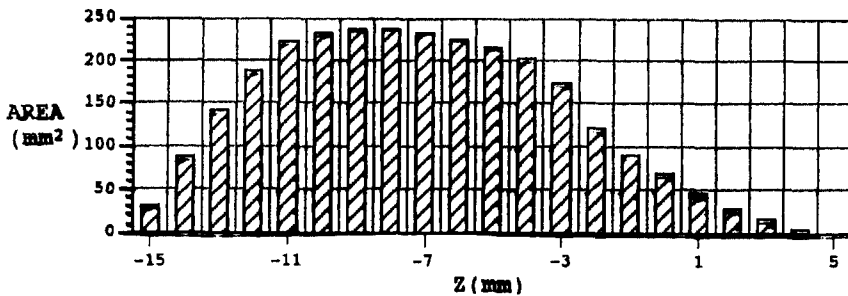


Fig. 7 Area of each B_z plane of workspace for front leg

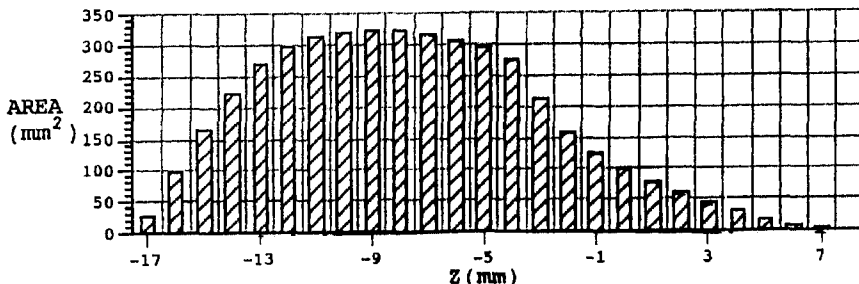


Fig. 8 Area of each B_z plane of workspace for middle leg

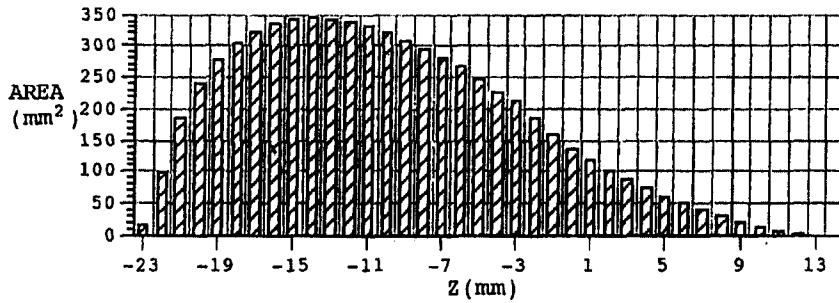


Fig. 9 Area of each B_z plane of workspace for hind leg

각 다리가 이 때에 최대의 허용도달영역을 가질 수 있음을 의미한다. 그러나 Fig. 9에서 보듯이 뒷다리의 경우에는 B_z 가 약 -14 mm인 경우에 최대의 보행면적을 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

본 연구로부터 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

(1) 임의의 비틀림각과 움셋거리를 가진 일반적인 형상을 갖는 3개의 회전 조인트로 구성된 3 관절 링크 시스템의 예로 6각 감층의 다리 모델을 선정하여 이에 대한 역기구학적 해를 폐형해의 형태로 구하였다.

(2) 삼각형 추적자를 이용한 경계추적방법에 의하여 6각 감층의 앞다리, 중간다리, 뒷다리에 대한 보행체적을 추적하고, 감층 몸체의 무게중심으로부터 각 평면에 대한 보행체적의 경계를 도시하였다.

(3) 감층에 대하여 앞다리, 중간 다리, 뒷다리에 대한 B_z 가 각각 -9 mm, -9 mm, -14 mm일 때 다리 끝단의 도달영역이 최대가 됨을 관찰하였다. 이는 실제 감층의 운동에서 관찰된 지면으로부터 몸체 중심까지의 거리와 거의 일치하는 결과^(12,13)이며, 이는 보행로봇의 보행속도, 운동의 효율성 등과 관련하여 이와 유사한 6각 보행로봇의 설계시 중요한 설계요건이 될 수 있다.

참고문헌

(1) Todd, D. J., 1985, *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*, Chapman and Hall.
 (2) Craig, J. J., 1986, *Introduction to Robotics*,

Addison wesley.

- (3) Duffy, J., 1980, *Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators*, Edward Arnold.
 (4) Denavit, J., and Hartenberg, R. S., 1955, "A kinematic Notation for Lower-pair Mechanisms Based on Matrices," *J. of Applied Mechanics*, Vol 77, pp. 215~221.
 (5) 홍정민, 1992, "임의의 2차원 형상의 경계 검출에 관한 연구," 석사학위논문, 연세대학교.
 (6) 홍형주, 1991, "사각 보행 로봇의 기계 설계에 관한 연구," 박사학위 논문, 한국 과학 기술 원.
 (7) Zuech, N. and Miller, R. K., 1987, *Machine Vision*, Prentice Hall.
 (8) Klafter, R. D. and Chmielecki, T. A., 1989, "Robot Engineering," Prentice Hall.
 (9) Fichter, E. F., Albright, S. L. and Fichter, B. L. 1988, "Determining Kinematic Parameters of Arthropod Legs," *Proc. 20th Biennial ASME Mechanisms Conference*, Orlando, FL, DE-Vol. 15-3, pp. 247~251.
 (10) 홍정민, 백운수, 김호룡, 1994, "임의의 2차원 형상의 경계검출법에 대한 비교 연구," 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제26집, 제1권, pp. 97~106.
 (11) Baek, Y. S., Hong, J. M., Kim, H. R., Park, J. O. and Fichter, E. F., 1994, "A New Algorithm for Edge Detection for an Arbitrary Two Dimensional Shape," 1994 *Int. Symposium on Industrial Robots*, pp. 541~547.
 (12) Moyer, V., Fichter, E. F. and Fichter, B. L., 1988, "Analyzing Dynamics of Arthropod walking," *Proceedings of the Annual International*

Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol 2, pp. 710~711.

- (13) Fichter. E. F. and Fichter. B. L., 1988, "A Survey of Legs of Insects and Spiders from a Kinematic Perspective," *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol 2, pp. 984~986.

부 록

각 식의 계수

$$k_1 = {}^3P_{4x} C a_2 S a_1$$

$$k_2 = {}^3P_{4y} S a_1$$

$$k_3 = {}^3P_{4x} C a_1 S a_2$$

$$k_4 = {}^3P_{4x} S a_1$$

$$k_5 = {}^3P_{4y} C a_2 S a_1$$

$$k_6 = {}^3P_{4y} C a_1 S a_2$$

$$k_7 = (d_3 + {}^3P_{4z}) S a_1 S a_2$$

$$k_8 = a_2 S a_1$$

$$k_9 = {}^cP_{4z} - d_2 C a_1 - (d_3 + {}^3P_{4z}) C a_1 C a_2$$

$$m_1 = 2({}^3P_{4x} d_2 S a_2 - {}^3P_{4y} a_2)$$

$$m_2 = 2 a_1 {}^3P_{4x} C a_2$$

$$m_3 = 2 a_1 {}^3P_{4y}$$

$$m_4 = 2(a_2 {}^3P_{4x} + d_2 {}^3P_{4y} S a_2)$$

$$m_5 = 2 a_1 {}^3P_{4y} C a_2$$

$$m_6 = 2 a_1 {}^3P_{4x}$$

$$m_7 = {}^cP_{4x}^2 + {}^cP_{4y}^2 + {}^cP_{4z}^2 - {}^3P_{4x}^2 - {}^3P_{4y}^2 - {}^3P_{4z}^2 - a_1^2$$

$$- a_2^2 - d_2^2 - d_3^2 - 2 d_2 d_3 C a_2 - 2 d_2 {}^3P_{4z} C a_2$$

$$- 2 d_3 {}^3P_{4z}$$

$$m_8 = 2 a_1 a_2$$

$$m_9 = 2 a_1 S a_2 (d_3 + {}^3P_{4z})$$

$$n_{11} = k_1 m_6 + k_5 m_2$$

$$n_{12} = k_2 m_5 + k_4 m_2$$

$$n_{13} = k_1 m_4 + k_3 m_6 - k_5 m_1 + k_6 m_3$$

$$n_{14} = k_6 m_2 - k_2 m_4 - k_3 m_5 - k_4 m_1$$

$$n_{15} = k_4 m_3 + k_5 m_2 - k_1 m_5 - k_2 m_6$$

$$n_{16} = k_3 m_4 - k_6 m_1$$

$$n_{21} = k_7 m_6 + k_5 m_8$$

$$n_{22} = k_8 m_5 + k_4 m_9$$

$$n_{23} = k_7 m_4 + k_9 m_6 + k_6 m_8 - k_5 m_7$$

$$n_{24} = k_6 m_9 - k_4 m_7 - k_8 m_4 - k_9 m_5$$

$$n_{25} = k_5 m_9 + k_4 m_8 - k_8 m_6 - k_7 m_5$$

$$n_{26} = k_9 m_4 - k_6 m_7$$

$$n_{31} = k_7 m_3 - k_1 m_8$$

$$n_{32} = k_2 m_9 - k_8 m_2$$

$$n_{33} = k_1 m_7 - k_3 m_8 - k_7 m_1 + k_9 m_3$$

$$n_{34} = k_8 m_1 - k_2 m_7 - k_3 m_9 + k_9 m_2$$

$$n_{35} = k_2 m_8 - k_1 m_9 + k_7 m_2 - k_8 m_3$$

$$n_{36} = k_3 m_7 - k_9 m_1$$

$$z_1 = n_{23}^2 + n_{33}^2 - n_{13}^2$$

$$z_2 = n_{24}^2 + n_{34}^2 - n_{14}^2$$

$$z_3 = 2(n_{23} n_{24} + n_{33} n_{34} - n_{13} n_{14})$$

$$z_4 = 2(n_{23} G_2 + n_{33} G_3 - n_{13} G_1)$$

$$z_5 = 2(n_{24} G_2 + n_{34} G_3 - n_{14} G_1)$$

$$z_6 = G_2^2 + G_3^2 - G_1^2$$

$$z_7 = z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 - 2 z_1 z_2$$

$$z_8 = 2(z_1 z_4 + z_3 z_5 - z_2 z_4)$$

$$z_9 = z_4^2 + z_5^2 - z_3^2 - 2 z_1^2 + 2 z_1 z_2 - 2 z_2 z_6 + 2 z_1 z_6$$

$$z_{10} = 2(z_2 z_4 + z_4 z_6 - z_3 z_5)$$

$$z_{11} = z_2^2 + z_6^2 + 2 z_2 z_6 - z_5^2$$