

# 6족 보행 로봇에서의 최적 머니플레이션 Optimal Manipulation for a Hexapod Walking Robot

서현세\*, 성영휘\*\*  
Hyeon-Se Seo\*, Young Whee Sung\*\*

## 요약

보행 로봇의 궁극적인 목적은 원하는 장소로 이동한 후에 적절한 작업을 수행하는 데 있다. 보행 로봇이 임의의 작업을 수행하기 위해서는 보행을 위한 다리뿐만 아니라 별도의 머니플레이터를 갖추고 있어야 하지만 작업의 난이도가 높지 않은 특정 작업을 수행하는 데에는 굳이 머니플레이터를 갖추지 않더라도 보행에 사용하는 다리를 이용하여 작업을 수행할 수도 있다. 다리를 가지고 이동하는 보행 로봇 중에서 6족 보행 로봇은 안정적이고 빠른 보행이 가능한 장점이 있으며 다리의 수가 상대적으로 많으므로 로봇의 보행 및 정지 시 균형 유지를 용이하게 할 수 있고 균형 유지에 사용되지 않는 여분의 다리를 이용하여 특정 작업을 수행할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 6족 보행 로봇이 3차원 공간상에서 주어지는 공의 위치로 이동하여 공을 잡는 작업을 여유자유도 로봇 문제로 재구성하고 이를 해석하여 최적해를 구하는 방법을 제안한다.

## ABSTRACT

The ultimate purpose of a walking robot is to move to a designated spot and to perform a necessary manipulation. To perform various manipulations for a walking robot, it should have some kind of an extra manipulator. However, if the manipulation task for the robot is simple enough, the robot can perform the task by using its legs. Among various kinds of walking robots, a hexapod walking robot has relatively many legs, so it has the advantage of stability and walking speed. So, a hexapod walking robot can perform simple manipulation task by using its one or two legs while maintaining stability by using the rest of legs. In this paper, we deal with a simple manipulation task of holding a ball. We formulate the task as a redundancy resolution problem and propose a method for obtaining an optimal solution.

**Keywords :** Hexapod Walking Robot, Redundancy Resolution, Optimal Solution, Manipulation

## I. 서론

지능형 로봇이 갖추어야 할 필수 기능 중의 하나는 이동성이다. 로봇이 이동하는 방법 중 가장 보편적인 방법은 바퀴를 이용하거나 다리를 이용하는 방법 또는 캐터필러와 같은 장치를 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 방법 중에서 다리를 이용하는 방법은 자연계에서 흔히 볼 수 있는 이동방식으로서 다른 방법에 비해 사람에게 시각적으로 친밀감을 주고 장애물 극복이 용이하다는 장점이 있다. 반면 다리를 이용한 보행은 다른 방식에 비해 로봇의 안정성이 떨어진다는 단점이 있다. 다리를 사용한 보행에서도 2족, 4족, 6족 보행 등 로봇에 부착된 다리에 따라 여러 가지 형태로 나눌 수 있는데[1-3], 6족 보행 로봇은 다른 보행 로

봇에 비해 더욱 뛰어난 안정성을 가질 수 있어 보다 빠른 보행이 가능하다.

한편, 기존의 보행 로봇들은 개미나 거미와 같은 곤충, 뱀과 같은 파충류, 새와 같은 조류, 말이나 사자와 같은 포유류들의 보행을 모방하여 로봇시스템을 제작하여 왔다. 하지만 생물체들은 다리와 팔의 기능이 완전히 분리되어 있지 않으며 필요에 따라서 팔과 다리의 기능을 선택적으로 사용하고 있다. 즉 원숭이는 2족 보행을 하기도 하고, 4족 보행을 하기도 하며 때로는 다리와 팔을 같이 사용하여 작업을 수행하기도 하고, 사자는 다리를 이용해서 먹이를 공격하는 것과 같은 예에서 볼 수 있듯이 자연계의 생물체들은 팔이 보행 기능을 수행할 수도 있고, 다리가 머니플레이션 기능을 수행할 수도 있는 구조로 되어 있다.

본 연구에서는 기존의 전형형적인 로봇 다리 구조와 달리 전후 다리 한 개씩과 한 쌍의 좌측 다리, 한 쌍의 우측 다리를 갖는 형태의 6족 로봇에게 3차원 공간상에 주어진 공을 잡는 작업이 주어졌을 경우에 6족 보행을 통해 공의 근처로 이동하고 하나의 다리를 사용하여 공을 잡는 작업을 여유자유도 로봇 문제로 재구

\* (주)아이쓰리시스템 \*\* 금오공과대학교(교신저자)  
투고 일자 : 2015.8.26 수정완료일자 : 2015.10.29  
계재확정일자 : 2015.11.8.  
※ 이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임

성하고 이를 해석하여 최적해를 구하는 과정을 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존에 개발된 전체 로봇 시스템에 대하여 간략히 설명한다. III장에서 주어진 문제를 여유자유도 로봇 문제로 재구성하는 방법과 기구학적 해석을 통해 주어진 작업을 최적으로 수행할 수 있는 해를 구하는 방법을 제안한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 실제 적용 가능성을 검증하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 개발된 6족 로봇

### 2.1 로봇 기구부

이 장에서는 기 개발된 로봇에 대해 간략히 설명한다[4]. 제작된 6족 로봇은 기존의 전형적인 보행 로봇의 다리 구조와는 달리 그림 1 (a)과 같이 한 개의 앞다리, 한 개의 뒷다리, 한 쌍의 좌측 다리, 한 쌍의 우측 다리로 총 6개의 다리를 가진다. 각 다리는 4 자유도를 가지며 로봇의 목 부위에는 팬, 틸트의 2 자유도를 가지므로 총 26 자유도를 가진다. 이 로봇은 스테레오 카메라를 장착하고 있어서 주어진 공의 3차원 좌표를 구할 수 있다[4]. 그림 1의 (a)에 표시된 숫자는 다리를 구분하여 위하여 일련번호를 붙인 것이고, 그림 1의 (b)는 로봇의 외형을 나타낸다.

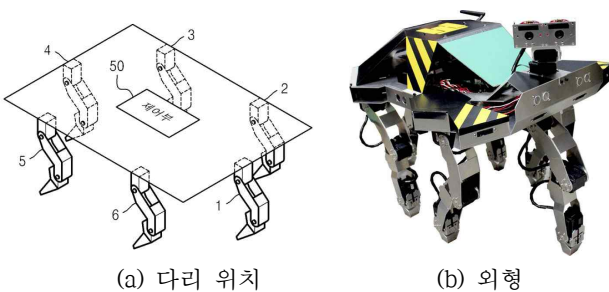


그림 1. 개발된 6족 로봇  
Fig. 1. Implemented hexapod robot

각 다리의 4개 관절 구성은 그림 2와 같이 구성되어 있다. 첫 번째 관절은 회전을 위한 관절이고 나머지 세 개의 관절은 같은 평면에서 운동하는 회전 관절이다. 로봇의 몸체는 앞, 뒤로 56cm, 좌, 우로 44cm의 크기를 가지고 다리의 링크의 길이는 허벅지와 종아리 부분(L2, L3)이 13cm, 발목관절로부터 발바닥까지(L4)는 3cm이다.

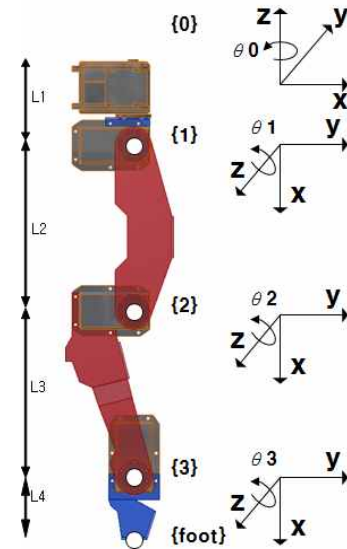


그림 2. 다리의 구조 및 좌표계  
Fig. 2. Configuration of legs and coordinates system

### 2.2 로봇 제어부

로봇의 관절 구동부로는 감속기, 제어기, 구동기 및 네트워크 기능 등을 일체형으로 구성하여 하나의 모듈로 제작된 다이내믹셀인 RX-64를 사용하였다[5]. 6족 로봇의 주 제어기로는 보행패턴을 실시간으로 생성하고 다수의 관절 구동부를 신속하고 정확하게 제어하기 위해서 고속으로 소수점연산이 가능해야 하므로 부동소수점 연산이 가능한 32bit MCU인 TMS320F28335를 사용하였으며 CPU 타이머 인터럽트를 사용하여 8ms의 샘플링 주기를 만들었다. 또한 초음파 센서 적외선 센서 등과 같은 센서들의 데이터 값을 읽고 10ms의 주기로 주제어기로 전송하는 보조 제어기로는 Atmega 128을 사용하였고 비전 센서 데이터 처리 및 스마트폰과의 인터페이스를 위해서 호스트 PC를 사용하였다. 그림 3은 로봇의 제어기 구조를 나타낸다.

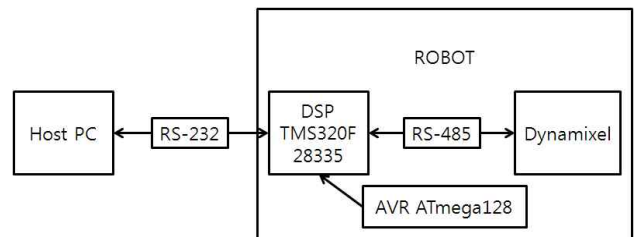


그림 3. 로봇의 제어기 구조  
Fig. 3. Controller architecture for the robot

### 2.3 6족 로봇의 보행

제안된 6족 보행 로봇은 다양한 형태의 보행을 수행할 수 있다. 가장 대표적인 직진 보행의 방법은 2, 4, 6번 세 다리와 1, 3, 5번 세 다리를 교대로 이동하는 방식으로 로봇의 지지다리로 구성되는 지지다각형은 그림 4와 같이 삼각형의

형태를 띤다. 그림 4에서 속이 채워진 원은 바닥면을 지지하고 있는 다리를, 속이 비워진 원은 이동 중인 다리를 나타내며 점선으로 표시된 삼각형은 지지 다리로부터 이루어지는 지지 삼각형을 나타낸다. 그림 5는 실제 로봇의 보행 과정을 나타내고 있다[6].

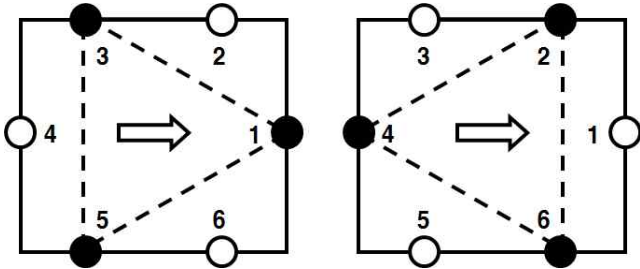


그림 4. 로봇의 직진 보행  
Fig. 4. Forward walking of the robot

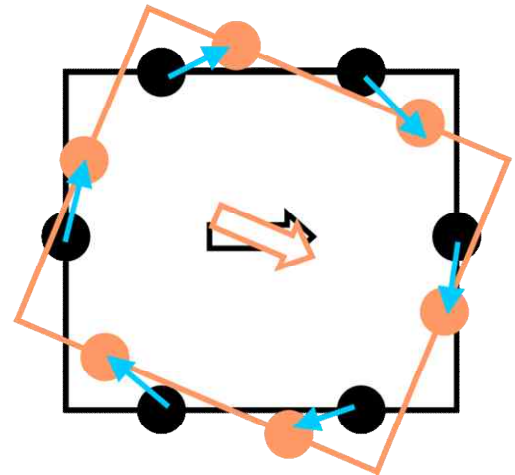


그림 6. 로봇의 회전 보행  
Fig. 6. Turning of the robot

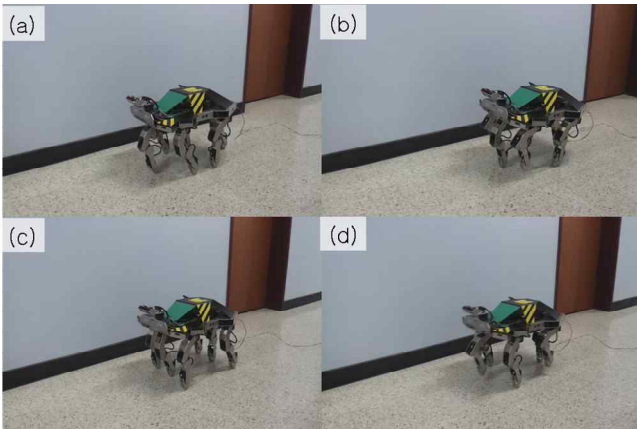


그림 5. 로봇의 직진 보행 과정  
Fig. 5. Sequence for the forward walking of the robot

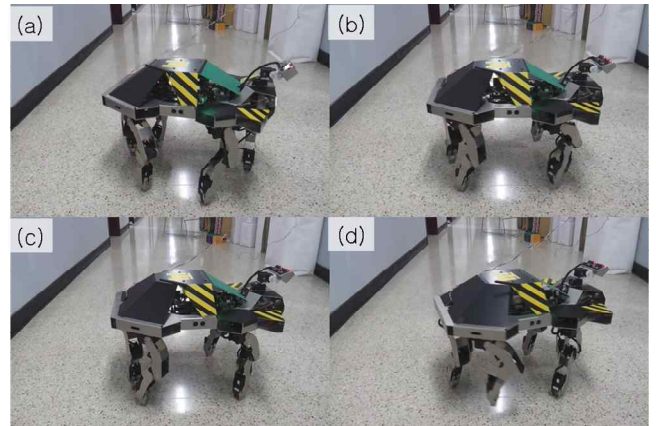


그림 7. 로봇의 회전 보행 과정  
Fig. 7. Sequence for the turning of the robot

제안된 6족 보행 로봇은 원점 대칭 형태의 다리 구조를 가져 좌표계 변환에 의한 로봇의 방향전환도 수월하게 할 수 있다. 그림 6은 제안된 6족 보행 로봇의 회전 보행 방법을 나타낸다. 로봇이 좌회전을 하기 위해서는 지지하고 있는 다리의 좌표계는 우회전, 들어 올리는 다리의 좌표계는 좌회전을 하여야 한다. 이 단계를 번갈아가며 로봇의 방향전환을 할 수 있으며 보폭이 있는 회전 보행과 제자리 회전을 할 수 있다. 그림 7은 6족 보행 로봇이 회전 보행하는 과정을 보이고 있다. (a)에서 로봇의 다리는 모두 땅에 닿아있다. (b)는 전방 좌, 우 다리와 뒷다리를 들어 몸체에 대해 좌회전시키며, 몸체를 지지하고 있는 앞다리와 후방 좌, 우 다리는 몸체에 대해 우회전시키는 과정이다. (c)는 (b)의 동작이 완료되어 모든 다리가 땅에 닿아있는 모습이고, (d)는 앞다리와 후방 좌, 우 다리를 들어 몸체에 대해 좌회전시키며, 몸체를 지지하고 있는 전방 좌, 우 다리와 뒷다리는 몸체에 대해 우회전시키는 과정이다.

### Ⅲ. 6족 로봇의 머니플레이션

#### 3.1 6족 로봇에서의 작업

개발된 6족 로봇은 작업을 하기 위한 위치로 이동한 후에는 로봇의 안정성에 문제를 발생시키지 않으면서 하나의 다리를 사용하여 작업을 수행할 수 있다. 즉 필요에 따라 다리를 보행에도 이용할 수 있고 머니플레이션에도 이용할 수 있다. 여기에서는 로봇이 공중에 매달려 있는 공을 잡는 작업이 주어진 경우를 다룬다.

2장에서 기술한 바와 같이 개발된 6족 보행 로봇은 원하는 보폭으로 전후진 보행을 할 수 있고 제자리 회전을 할 수 있다. 로봇이 공을 잡는 작업의 경우, 우선 로봇은 스테레오 카메라를 사용하여 공의 3차원 위치를 파악하고, 제자리 회전 보행을 통해 그림 8과 같이 로봇의 전방에 공이 위치하도록 한다. 이러한 경우를 모델링하기 위해 6족 보행 로봇이 작업을 수행할 앞다리(1번 다리)의 2번째 관절의 회전축에 그림에서와 같이 월드 좌표계를 설정한다.

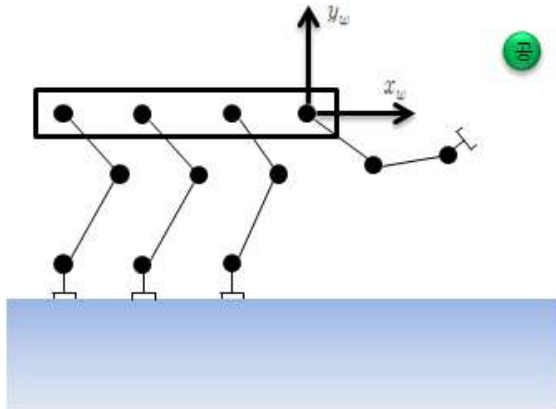


그림 8. 6족 로봇의 공 잡기 작업과 기준 좌표계  
Fig. 8. Ball holding task and the world coordinates

공잡기와 같은 작업이 로봇에게 주어진 경우 로봇이 작업을 수행할 수 있는 다양한 방법이 존재하므로 최적의 작업을 할 수 있는 해를 구하는 것이 필요하다. 특히 보행과 작업이 동시에 이루어지는 경우에는 전체 시스템을 여유자유도 로봇 시스템으로 생각할 수 있으므로 작업을 수행하기 위한 최적의 해를 구하는 것이 필요하다. 공이 6족 로봇의 전방에 위치하게 되면 공을 잡기 위한 로봇의 최적해를 구한 후에 여섯 개의 다리를 이용하여 최적의 위치로 보행하여 이동하고 이동이 완료된 후에 앞다리를 이용하여 최적의 자세로 공을 잡는다. 그림 9는 6족 로봇이 공을 잡기 위해서 보행을 하여 이동한 후 앞다리인 1번 다리를 이용하여 공을 잡는 상태를 도시한 것이다. 작업 대상물인 공이 로봇의 진행 방향에 놓여 있기 때문에 작업을 수행하기 위한 1번 다리의 첫 번째 관절을 제외한 나머지 세 관절의 동작에 의해 이루어지는 평면위에 투영된 공은 원이 된다. 이 원 위의 한 점(공의 가장 아래부분)을 로봇이 잡는 것으로 가정한다.

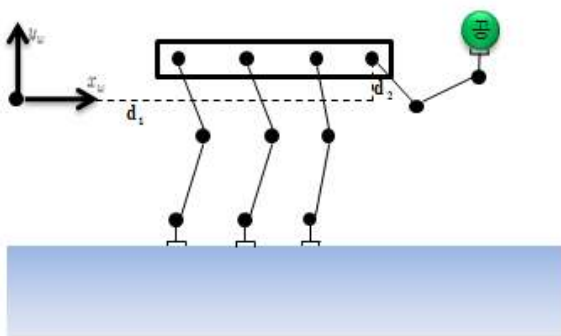


그림 9. 6족 로봇의 이동 및 공 잡기 작업  
Fig. 9. Moving to an optimal position and holding a ball

### 3.2 여유자유도 로봇 시스템으로의 모델링 및 최적해

그림 9에서와 같이 모델링하면 3차원 공간상에서 임의의 위치에 주어진 공 잡기 작업은 2차원 평면상의 문제로 단순

화될 수 있다. 이와 같은 문제에서 로봇이 공을 잡기 위한 최적의 자세를 구하는 것이 문제가 된다. 즉, 로봇이 공을 잡기 위한 최적의 위치로 이동하는 것과 공을 잡기 위한 최적의 다리 자세를 구하는 것이 필요하다.

개발된 6족 로봇은 직진 보행을 통해 수평 방향으로 이동할 수 있으며 로봇 다리들의 관절을 이용하여 몸체 높이를 수직 방향으로 조절할 수 있다. 따라서 이러한 로봇의 이동 및 높낮이 조절 능력을 두 방향의 직동 관절로 모델링할 수 있다. 즉, 그림 9에서 로봇은  $d_1$ ,  $d_2$  만큼 직선 이동할 수 있고 다리부의 세 개의 회전 관절을 사용하여 1번 다리를 회전 이동시킬 수 있다.

즉, 전체 6족 로봇은 두 개의 직동 관절과 세 개의 회전 관절로 이루어지는 로봇 머니플레이터로 모델링할 수 있다. 또한 로봇의 공 잡기 작업은 하나의 평면에서 이루어진다. 따라서 전체 시스템은 평면에서 작업하는 5 자유도 머니플레이터로 모델링이 가능하다. 그림 10에 이와 같이 모델링된 로봇에 설정된 관절 좌표계를 표시하였다. 표현의 편리성을 위해 그림 9에서의 좌표계  $x_w, y_w$ 는 그림 10에서  $z_0, x_0$ 로 표현하였다. 표 1은 5자유도 머니플레이터로 모델링된 로봇의 D-H 파라미터를 나타낸다.[7]

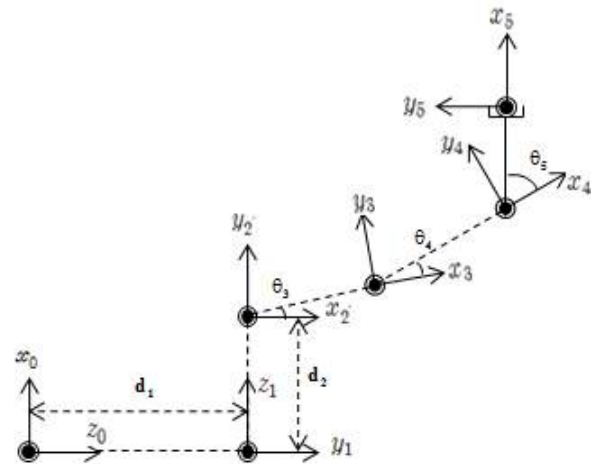


그림 10. 5자유도 평면 머니플레이터로 모델링된 6족 로봇  
Fig. 10. The hexapod robot modeled as a 5 d.o.f. planar manipulator

표 1. 5자유도 머니플레이터의 D-H파라미터  
Table 1. D-H parameters for the 5 d.o.f. planar manipulator

링크	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$90^\circ$	$d_1$	$90^\circ$
2	0	$90^\circ$	$d_2$	$90^\circ$
3	$a_3$	0	0	$\theta_3$
4	$a_4$	0	0	$\theta_4$
5	$a_5$	0	0	$\theta_5$

그림 10과 같이 설정된 좌표계에서 각 좌표계 사이의 변환 행렬과 전체 기구학 식은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_0^1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2^3 = \begin{bmatrix} c_3 - s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_3^4 &= \begin{bmatrix} c_4 - s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_4^5 = \begin{bmatrix} c_5 - s_5 & 0 & a_5 c_5 \\ s_5 & c_5 & 0 & a_5 s_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_0^5 &= A_0^2 \cdot A_2^5 \\
 &= \begin{bmatrix} s_{345} & c_{345} & 0 & d_2 + a_3 s_3 + a_4 s_{34} + a_5 s_{345} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c_{345} - s_{345} & 0 & d_1 + a_3 c_3 + a_4 c_{45} + a_5 c_{345} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서  $c_3 = \cos(\theta_3)$ ,  $s_{345} = \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)$  와 같이 표기하였다.  $x_0 - y_0 - z_0$  좌표계에 대해서 표현된 머니플레이터의 손 끝 즉, 6족 로봇의 1번 다리의 끝의 좌표는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 x &= d_2 + a_3 s_3 + a_4 s_{34} + a_5 s_{345} \\
 y &= 0 \\
 z &= d_1 + a_3 c_3 + a_4 c_{45} + a_5 c_{345} \\
 \phi &= \theta_3 + \theta_4 + \theta_5
 \end{aligned} \quad (2)$$

평면 머니플레이터로 모델링 되었으므로 머니플레이터 끝점의  $y$  좌표는 항상 0이다. 따라서 관절 공간에서의 자코비안(Jacobian)은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & a_3 c_3 + a_4 c_{34} + a_5 c_{345} & a_4 c_{34} + a_5 c_{345} & a_5 c_{345} \\ 1 & 0 & -a_3 s_3 - a_4 s_{45} - a_5 s_{345} & -a_4 s_{45} - a_5 s_{345} & -a_5 s_{345} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

전술한 바와 같이 3차원 공간상에서 로봇의 공잡기 작업은 2차원 평면상에서 목표 위치와 방향이 특정되는 작업으로 생각할 수 있으므로 작업에 필요한 자유도는 3 자유도이다. 전체 로봇 시스템은 5 자유도를 가지고 있으므로 여유자유도가 2인 여유자유도 로봇 시스템으로 생각할 수 있다.

주어진 작업을 수행할 수 있는 여유자유도 머니플레이터의 해는 무한히 많기 때문에 특정 성능지수를 최적화시키는 최적해를 구하는 것이 필요하다. 여유자유도 머니플레이터의 최적해를 구하기 위한 다양한 성능지수들이 개발되어 있는데 그 중 다음과 같이 주어지는 조작성능지수(manipulability measure)가 많이 사용되고 있다.[8]

$$H(\theta) = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (4)$$

이 성능지수는 값이 클수록 로봇 머니플레이터가 임의의

방향으로 이동하기 쉽기 때문에 작업하기 좋은 자세를 갖게 된다. 따라서 6족 로봇이 주어진 공을 잡기 위한 최적의 자세는 이 성능지수를 최대로 하는 값을 선정해 주면 된다. 6족 로봇이 공을 잡는 최적 자세를 구하는 과정을 그림 11에 흐름도로 표현하였다.

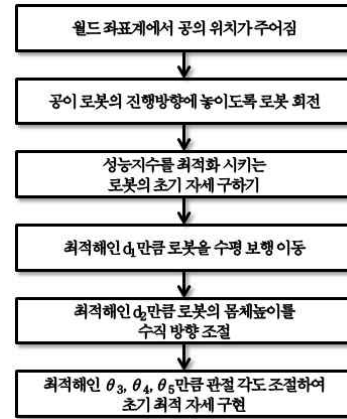


그림 11. 최적해를 구하기 위한 흐름도  
Fig. 11. Flowchart for obtaining optimal solution

#### IV. 시뮬레이션

이 장에서는 3장에서 제안한 여유자유도 문제를 푸는 방법을 이용하여 3차원 공간상의 임의의 위치에 놓인 공을 로봇이 최적의 위치로 이동하여 최적의 자세로 잡는 과정을 시뮬레이션 한다.

3장에서 제안한 바와 같이 6족 로봇의 보행과 작업을 그림 10과 같은 5 자유도 평면 머니플레이터로 모델링하였다. 로봇의 다리부의 각 링크의 길이는 표 1에서와 같으며 실제 길이는  $a_3 = 130(mm)$ ,  $a_4 = 130(mm)$ ,  $a_5 = 30(mm)$ 이다. 직동 관절 변수인  $d_1$ 은 로봇의 수평 방향으로의 이동 거리를 나타내므로 길이의 제한이 없고, 직동 관절 변수인  $d_2$ 는 로봇 몸체의 수직 방향으로의 이동을 나타내므로 로봇의 구조에 따라 결정되는 상한 값과 하한 값을 갖게 된다.

로봇의 키가 가장 큰 경우는 로봇이 모든 관절을 폈을 경우이며 이 때, 로봇의 발바닥에서 그림 8에 설정한 로봇 월드 좌표계까지의 거리는 290mm이다. 그림 12에 나타난 로봇 자세는 로봇이 보행을 수행하기 위한 초기 자세로서 전술한 거리가 230mm일 때이다. 로봇은 이 자세에서 필요한 보행을 수행하여  $d_1$  만큼 평행 이동한 후에  $d_2$ 에 따라 자세의 높낮이를 조절한다. 즉  $d_2$ 가 양의 값이면 자세를 높이고  $d_2$ 가 음의 값이면 자세를 낮추게 된다.

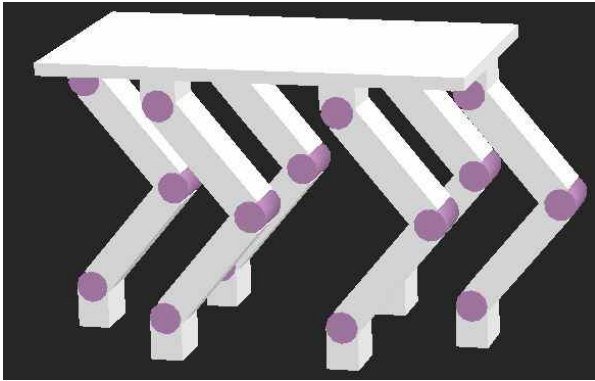


그림 12. 보행을 위한 로봇의 초기 자세

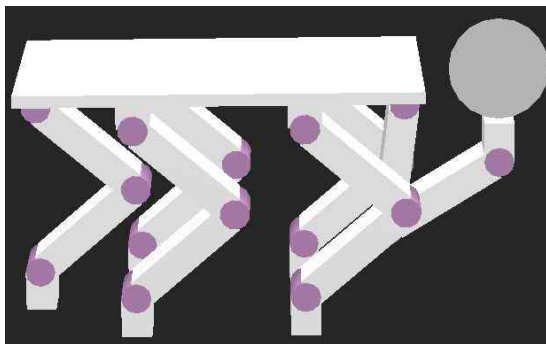
Fig. 12. Initial configuration of the robot for walking

첫 번째 시뮬레이션에서는 공의 위치가  $z=500$ 이고  $x=80$ 로 주어졌다고 가정하자. 로봇의 초기 자세에서 1번 다리의 2번째 관절의 회전축에 지정된 월드 좌표계에서 공의 3차원 위치(position)는  $(80, 0, 500)$ 이다. 또한 로봇의 1번 다리를 이용하여 공을 잡는데 공을 잡는 방향은 지면과 수직인 방향이라고 가정하자. 이 때, 그림 10의 모델에서 평면 머니플레이터의 방향(orientation)은  $90^\circ$ 가 된다.

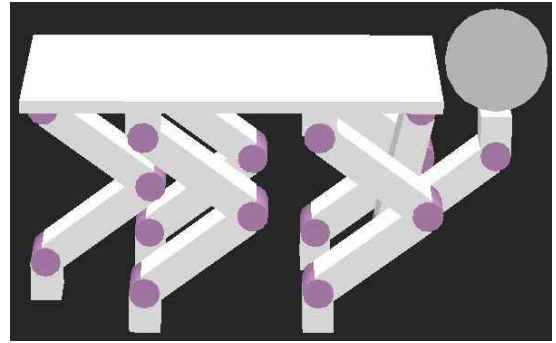
6족 로봇이 주어진 공을 잡는 최적해는 다음과 같이 등식 제한 조건을 만족하면서 조작성능지수(manipulability measure)  $H(\theta)$ 를 최대화하는 여유자유도 문제를 풀어 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max H(\theta) & \quad (5) \\ \text{subject to } x &= d_2 + a_3s_3 + a_4s_{34} + a_5s_{345} \\ z &= d_1 + a_3c_3 + a_4c_{45} + a_5c_{345} \\ \phi &= \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \end{aligned}$$

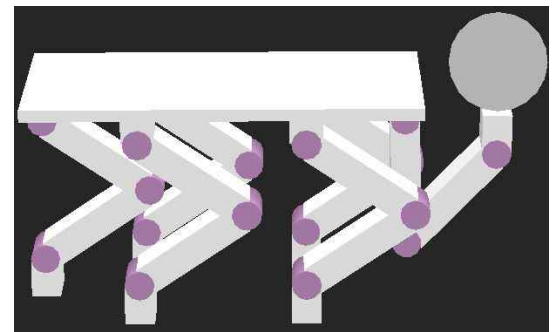
이때의 최적해는  $d_1 \approx 406$ ,  $d_2 \approx -30$ ,  $\theta_3 \approx -97^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 129^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 58^\circ$ 이고 조작성능지수는  $1.65 \times 10^4$ 이다. 즉, 6족 로봇은 전진 보행을 통해 수평 방향으로 406mm 이동하고 자세를  $-30\text{mm}$  낮춘 상태에서 1번 다리의 세 관절을 각각  $-97^\circ$ ,  $129^\circ$ ,  $58^\circ$  회전한 상태의 자세로 공을 잡는다. 이 자세를 그림 13의 (a)에 나타내었다.



(a)



(b)



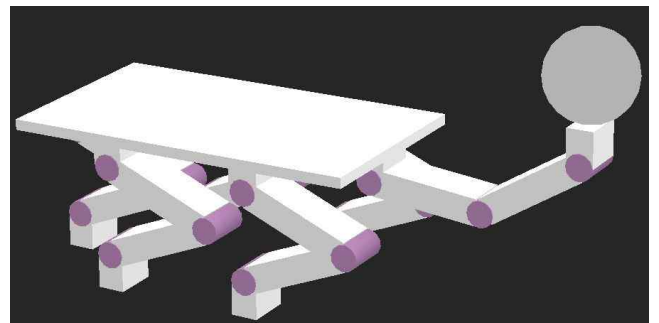
(c)

그림 13.  $x=80$ 일 때의 해

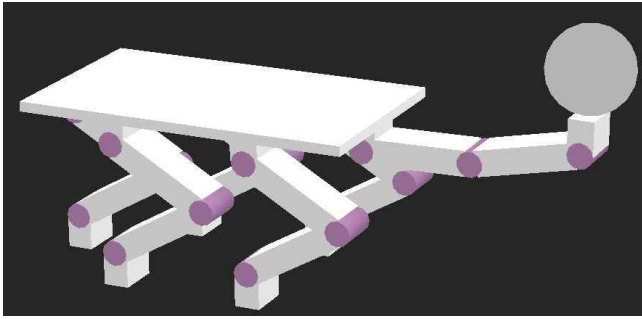
Fig. 13. Solutions for  $x=80$

그림 13의 (b)와 (c)의 로봇 자세는 조작 성능지수가 각각  $1.27 \times 10^4$ ,  $1.57 \times 10^4$ 로 최대치 근방의 값을 갖는 자세로 비교를 위하여 도시하였다. 그림 13의 (b) 자세에서는  $d_1 \approx 427$ ,  $d_2 \approx -43$ ,  $\theta_3 \approx -103^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 141^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 52^\circ$ 이고 그림 13의 (c)의 자세에서는  $d_1 \approx 407$ ,  $d_2 \approx -54$ ,  $\theta_3 \approx -89^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 135^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 43^\circ$ 이다.

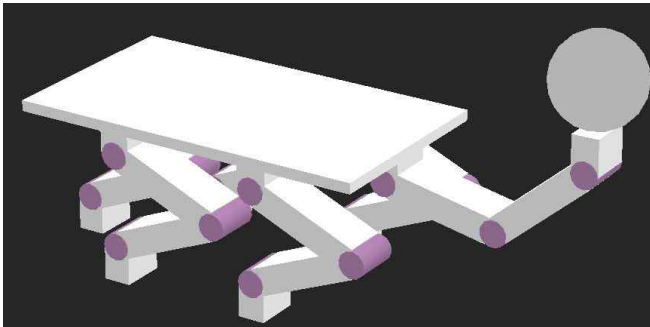
두 번째 시뮬레이션에서는 공의 위치가  $z=500$ 이고  $x=130$ 로 주어졌다고 가정하자. 같은 방법으로 해를 구하면 최적해는 그림 14의 (a)와 같은 자세를 갖는다.



(a)



(b)



(c)

그림 14.  $x = 130$ 일 때의 해  
Fig. 14. Solutions for  $x = 130$

최적해의 값은  $d_1 \approx 260$ ,  $d_2 \approx -96$ ,  $\theta_3 \approx -6^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 38^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 58^\circ$  이고 조작성능지수는  $1.97 \times 10^4$ 이다. 즉, 6족 로봇은 전진 보행을 통해 수평 방향으로 260mm 이동하고 자세를  $-96\text{mm}$  낮춘 상태에서 1번 다리의 세 관절을 각각  $-6^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $58^\circ$  회전한 상태의 자세로 공을 잡는다. 그림 14의 (b)와 (c)의 로봇 자세는 조작 성능지수가 각각  $1.63 \times 10^4$ ,  $1.11 \times 10^4$ 로 최대치 근방의 값을 갖는 자세이다. 그림 14의 (b) 자세에서는  $d_1 \approx 243$ ,  $d_2 \approx -71$ ,  $\theta_3 \approx 1^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 11^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 77^\circ$  이고 그림 14의 (c)의 자세에서는  $d_1 \approx 274$ ,  $d_2 \approx -98$ ,  $\theta_3 \approx -11^\circ$ ,  $\theta_4 \approx 52^\circ$ ,  $\theta_5 \approx 50^\circ$  이다.

## V. 결론

본 논문에서는 보행 로봇이 보행과 작업을 모두 수행할 수 있도록 하는 예로서 6족 로봇에게 3차원 공간상의 임의의 위치에 주어진 공을 잡는 작업이 주어진 경우를 다루었다. 로봇이 스테레오 비전 센서를 통해 공의 3차원 공간상에서의 위치와 방향을 파악한 후, 제자리 회전 보행 기능을 사용하여 공이 로봇의 진행 방향에 놓이도록 할 수 있으므로 일반성을 잃지 않으면서 문제를 2차원 평면상에서의 문제로 단순화시킬 수 있음을 보였다. 또한 보행 로봇의 직진 이동과 로봇의 몸의 높낮이를 변화시킬 수 있는 기능을 2차원 평면상에서의 두 개의 직동 관절로 모델링함으로써 주어진

문제를 2차원 평면상에서 두 개의 직동 관절과 세 개의 회전 관절을 갖는 여유자유도 머니플레이터 문제로 재구성할 수 있음을 보였고 조작성능지수를 최적화하는 해를 구함으로써 로봇이 최적으로 작업을 수행할 수 있는 위치와 로봇 다리의 자세를 구할 수 있다는 것을 제안하였고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," *Pro. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3165-3171,2001.
- [2] D. S. Kim, S. H. Park, K-H Kim, and Y. J. Lee, "Development of a bio-mimetic quadruped walking robot with waist joint," *Int. Conf. Control, Automation and Systems*, pp. 1530-1534, Aug. 2004.
- [3] G. Clark Haynes and Alfred A. Rizzi, "Gaits and gait transitions for legged robots," *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1117 - 1122, 2006
- [4] 서현세, 성영휘, "지능형 6족 보행 로봇의 개발," *신호처리시스템학회논문지*, 제 14권, 제 2호, pp. 124-129, 2013
- [5] 로보티즈社 홈페이지, <http://www.robotis.com>
- [6] 서현세, 성영휘, "빠른 보행이 가능한 6족 로봇," *대한전기학회 논문지*, 제 62권, 제 4호, pp. 536-543, 2013
- [7] Craig. John J, *Introduction to Robotics*, Prentice Hall, 2007.
- [8] Yoshikawa. T., "Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms," *Pro. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1004-1009, 1985.



서 현 세 (Hyeon-Se Seo)

2010년 2월 금오공대 전자공학부(공학사)  
2012년 2월 금오공대 전자공학과(공학석사)  
2012년 3월 ~ (주) 아이쓰리시스템  
※주관심분야 : DSP 응용, 지능로봇,  
임베디드 시스템



성 영 휘 (Young Whee Sung)

正會員

1988년 2월 고려대 전자공학과(공학사)  
1991년 2월 KAIST 전기및전자공학과(공학석사)  
1996년 2월 KAIST 전기및전자공학과(공학박사)

1998년 3월 ~ 현재 금오공과대학교 전자공학부 교수  
※주관심분야 : 지능형 로봇, DSP 응용