

An Optimal Initial Configuration of a Humanoid Robot

成永輝[†] · 趙東權^{*}

(Young Whee Sung · Dong Kwon Cho)

Abstract - This paper describes a redundancy resolution based method for determining an optimal initial configuration of a humanoid robot for holding an object. There are three important aspects for a humanoid robot to be able to hold an object. Those three aspects are the reachability that guarantees the robot to reach the object, the stability that guarantees the robot to remain stable while moving or holding the object, and the manipulability that makes the robot manipulate the object dexterously. In this paper, a humanoid robot with 20 degrees of freedom is considered. The humanoid robot is kinematically redundant and has infinite number of solutions for the initial configuration problem. The complex three-dimensional redundancy resolution problem is divided into two simple two-dimensional redundancy resolution problems by incorporating the symmetry of the problem, robot's moving capability, and the geometrical characteristics of the given robot. An optimal solution with respect to the reachability, the stability, and the manipulability is obtained by solving these two redundancy resolution problems.

Key Words : Humanoid robot, Redundancy resolution, Manipulability, Stability

1. 서 론

공장 자동화를 기반으로 발전하던 로봇 분야는 기술적인 면과 응용 면에 있어서 포화상태가 되었고, 이와 같은 한계를 극복하고자 하는 연구자들의 노력과 사회 경제적인 요구에 의하여 근래의 로봇들은 공장과 같은 정형화된 환경이 아닌 새로운 영역에서의 적용이 시도되고 있다. 이와 같은 시도의 한 줄기로 인간형 로봇에 대한 연구가 근래에 국내외에서 활발히 수행되고 있다. 인간형 로봇의 궁극적인 목적은 인간과 유사한, 그리고 특정 영역에서는 인간의 능력보다 훨씬 뛰어난 로봇을 개발하고자 하는 것이다. 이를 달성하기 위하여 로봇은 지능과 물리적인 능력을 필수적으로 갖추어야 할 것이다. 인간형 로봇의 물리적인 능력으로서 가장 중요하며, 또한 인간형 로봇의 가장 큰 특징 중의 하나는 안정된 2족보행 능력이다. 2족 보행에 관한 연구는 이미 오래전부터 진행되어 왔으며[1], 1990년대 후반 일본의 혼다사 연구진이 상당히 안정된 로봇 보행에 성공한 이후에 국내외에서 여러 성공적인 보행 로봇이 보고되었다[2-6]. 2족 보행은 그 자체만으로도 매우 의미가 있으며 가치 있는 연구 주제이지만, 인간형 로봇에서 2족 보행의 의미는 로봇이 주어진 작업을 성공적으로 수행하기 위하여 필요한 이동 수단을 제공한다는 것이 더욱 크다고 하겠다.

현재까지 몇몇 연구자들에 의해서 인간형 로봇의 이동성(mobility)과 머니플레이션(manipulation)에 관한 연구가 진행되어 왔다[7-11]. Yosida 등은 인간형 로봇의 안정성(stability)과 조작성(manipulability)에 관한 연구를 수행하였는데, 그들의방법에서는 로봇의 안정성, 로봇 팔의 조작성, 로봇의 특이자세(singular-state)를 피하기 위하여 각각의 성능 지수를 구성하여 산술적으로 더한 것을 성능 지수로 하여, 로봇의 다리의 보폭, 보행 상태 등에 따른 성능 지수의 변화를 해석하였다[10].

인간형 로봇이 주어진 작업을 수행하기 위하여는 다리와 팔의 협응 능력이 중요한 요소이다. 즉, 인간형 로봇에서 다리와 팔을 이용하여 주어진 작업을 수행하기 위하여 작업 대상 물체에 적절히 도달할 수 있도록 하는 도달성(reachability)과 필요한 지점으로 이동하거나 또는 작업 대상 물체를 다룰 때 넘어지지 않도록 하는 안정성(stability), 작업 대상 물체를 보다 편하고, 적절하게 조작할 수 있도록 하는 조작성(manipulability) 문제가 중요하다.

한편 인간형 로봇은 기구학적으로 여유자유도를 가지고 있다. 로봇에게 주어진 작업을 수행하기 위하여 필요한 자유도보다 더 많은 자유도를 가지고 있는 로봇을 여유 자유도 로봇이라고 한다[12]. 본 논문에서는 로봇이 임의의 위치에 주어진 물체를 팔로 잡는 응용 예를 다룬다. 로봇에게 주어지는 다양한 작업을 수행하기 위해서는 우선 작업 대상 물체를 잡는 것이 필요하며, 본 논문에서는 여유자유도 해석에 근거하여 로봇의 도달성, 안정성, 조작성을 만족하면서 작업 대상 물체를 잡기 위한 인간형 로봇의 최적의 초기 자세를 구한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 金烏工科大学校 電子工學部 副教授 · 工博
E-mail : ywsung@kvmoh.ac.kr

^{*} 正會員 : KT 未來技術研究所 首席研究員 · 工博
接受日字 : 2006年 7月 19日
最終完了 : 2006年 11月 7日

2. 응용 작업 및 해석

2.1 로봇 및 응용 작업

작업에 사용할 로봇은 소형 인간형 로봇으로, 신장이 45cm, 중량이 3,500g 이며, 한 쪽 다리에 6 자유도와 한 팔에 4 자유도, 그리고 목에 2 자유도를 가져서 총 22 자유도를 가지고 있다. 그림 1은 로봇의 관절 구성 및 외관을 나타낸다[13].

로봇에게 그림 2에서와 같이한 장소에서 작업 대상 물체를 집어 다른 장소로 옮겨 놓는 이적재 작업이 주어졌다고 가정하자. 이적재 작업을 위해서 필요한 과정은 우선 로봇이 팔과 다리를 적절히 사용하여 작업 대상 물체를 잡고, 들어올려, 다른 장소로 이동한 후, 내려 놓는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 과정 중 첫 번째 과정인 작업 대상 물체를 잡는 과정에 대하여 여유 자유도 해석을 통하여 기구학적 최적 초기 자세를 구하는 것을 목표로 한다. 이 과정에서는 사용자가 작업 대상물의 위치(position) 좌표와 로봇 팔이 접근해야 할 방향(orientation)을 지정해 주면, 기구학적으로 여유 자유도를 가진 인간형 로봇은 팔과 다리의 자유도를 적절히 이용하여 물체를 잡을 수 있어야 한다.

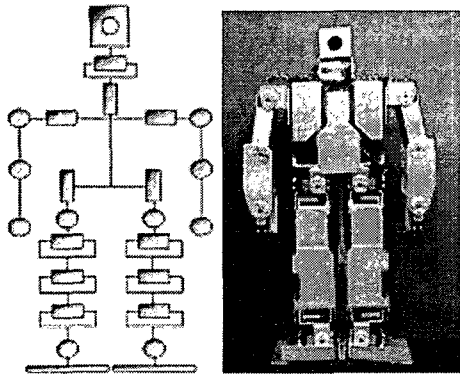


그림 1 로봇의 관절 구성 및 외관
Fig. 1 The joint configuration and appearance of the robot

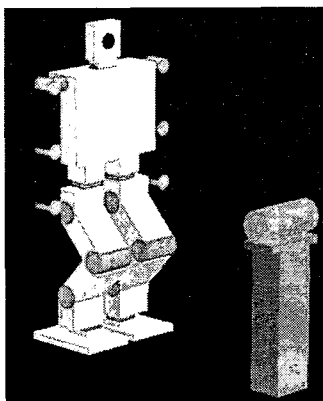


그림 2 로봇이 물체를 잡는 응용 작업
Fig. 2 Application of holding an object

3차원 공간상에서 작업 대상물을 임의의 위치와 방향에서 잡기 위해서는 6 자유도가 필요하고, 대부분의 인간형 로봇은 팔과 다리의 자유도가 6 이상이고, 또한 베이스가 고정되어 있는 머니플레이터와는 달리 이동이 가능하므로 기구학적으로 여유자유도로 생각할 수 있다. 따라서 위에서 고려한 임의의 위치에 놓여진 물체를 잡기 위한 인간형 로봇의 역기구학 해는 무한히 많은 해를 갖게 되며, 주어진 문제는 무한히 많은 해 중에서 적절한 기준에 부합되도록 하나의 해를 구하는 여유 자유도 문제가 된다. 본 논문에서 고려하는 로봇의 경우에는 한 쪽 다리가 6 자유도, 한 쪽 팔이 4 자유도, 목에 2 자유도를 가지므로, 팔과 다리부는 전체 20 자유도를 갖는다. 이를 20 자유도를 갖는 여유 자유도 로봇으로 해석하는 것은 매우 어렵고 비 효율적인 일이다. 본 논문에서는 로봇의 기하학적인 구조를 고려하여 자유도를 분할하는 방법을 사용하여 해석한다. 또한 로봇에게 주어지는 작업은 이적재 작업과 같이 양 팔과 양 다리가 좌, 우 대칭인 해를 갖는 경우만을 고려한다.

2.2 조작성 평면에서의 해석

그림 1에 나타난 바와 같이 로봇의 팔은 한 쪽이 4 자유도를 가지고 있으며, 작업 대상 물체를 잡기 위해서 양 팔의 첫 번째 관절값이 결정되면, 왼팔과 오른팔 그리고 로봇 손끝이 작업 대상물과 접촉하는 점을 포함하는 하나의 평면이 결정되는 구조를 가지고 있다. 로봇의 양 팔의 나머지 6개의 팔 관절들은 모두 이 평면상에서의 운동을 생성하게 된다. 이와 같이 생기는 평면을 조작성 평면이라 부르기로 한다. 그림 3의 사각형은 조작성 평면의 한 예를 보이고 있다.

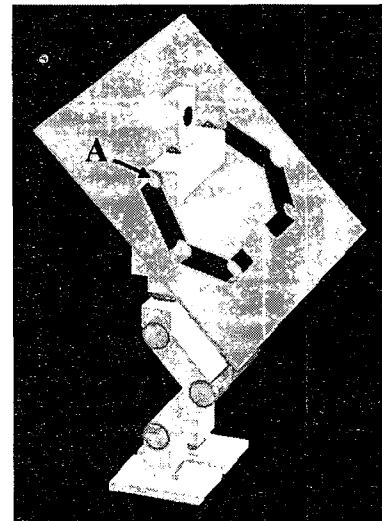


그림 3 조작성 평면의 예
Fig. 3 An example of the manipulability plane

조작성 평면상에서의 로봇의 양 팔의 움직임은 대칭이 되므로 이후에는 오른팔만을 고려하도록 한다. 조작성 평면에서의 로봇 오른팔의 모델을 그림 4에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 로봇 오른팔은 조작성 평면상에서만 운동하며, 3개의 회전 관절을 가지고 있다. 그림에서

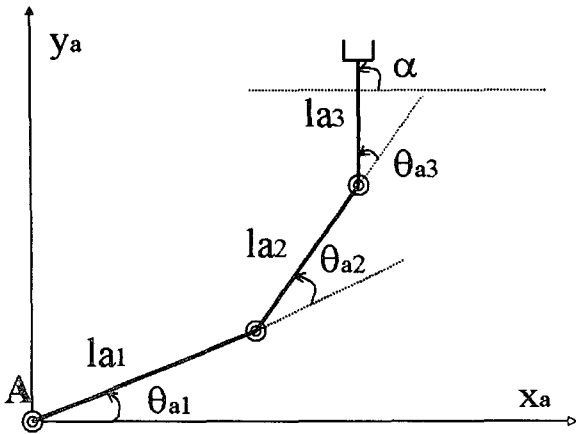


그림 4 조작성 평면에서의 로봇 오른 팔
Fig. 4 The right arm of the robot in the manipulability plane

x_a, y_a 는 해석의 편의를 위해 로봇의 오른팔의 어깨관절에 설정한 좌표계이고, 그림 3과 4에서 점 A는 같은 점을 나타낸다.

조작성 평면에서 로봇의 오른팔이 물체를 잡는 경우를 고려해 보자. 사용자가 월드 좌표계에 대한 로봇 손 끝의 방향을 지정해 주게 되므로, 이 방향을 조작성 평면으로 투영할 수 있으며, 이 투영된 벡터가 그림 4에서의 머니플레이터의 방향으로 주어진다. 또한 사용자가 로봇 손 끝의 위치를 지정해 주었으므로 조작성 평면으로 투영된 로봇 손 끝의 위치를 구할 수 있다. 여기에서 로봇은 물체를 잡기 위해서 팔 뿐 아니라 다리도 사용할 수 있으므로 다리부의 움직임에 따라서 그림 3에서의 로봇 팔의 원점이 달라지는 효과가 생기게 된다. 이와 같은 상황은 그림 4의 평면 머니플레이터에서 손끝의 방향과 x 좌표가 주어지고, y 좌표는 미정인 상태로 생각할 수 있다. 즉, 조작성 평면에서의 오른팔은 3개의 자유도를 가지며 작업에 필요한 자유도가 2인 여유 자유도 머니플레이터와 같게된다. 이 경우에 기구학 식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x_a &= l_{a1}c_1 + l_{a2}c_{12} + l_{a3}c_{123} \\ y_a &= l_{a1}s_1 + l_{a2}s_{12} + l_{a3}s_{123} \\ \alpha &= \theta_{a1} + \theta_{a2} + \theta_{a3} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, l_{ai} 는 i 번째 링크의 길이를 나타내고 $c_1 = \cos(\theta_{a1}), c_{12} = \cos(\theta_{a1} + \theta_{a2})$ 등을 나타낸다.

여유자유도가 1이므로, 오른팔은 주어진 방향과 x 좌표를 달성하는 무한히 많은 해를 가지게 되며, 이와 같은 무한해 중에서 하나의 해를 결정하기 위해서는 적절한 성능지수를 선택한 후, 이 성능지수를 최적화 하는 해를 구해주는 방법을 택할 수 있다. 로봇의 팔을 이용하여 물체를 잡는 경우에는 물체를 잡은 이후의 로봇 팔의 운동의 용이성을 위하여 조작성능지수(manipulability measure)[12]를 사용하는 것이 좋다. 로봇 팔의 x, y 방향의 운동을 용이하도록 하기 위해서는 다음 식 (2)와 같은 자코비안을 사용한 조작성능지수를 사용한다. 조작성능지수는 $H(\theta) = \det(JJ^T)$ 로 주어지며, 조작성 평면에서의 여유자유도 문제의 해는 식(3)과

같이 2개의 등식제한 조건을 가지며, 조작성능지수를 최대화 하는 문제가 된다.

$$J = \begin{bmatrix} -l_{a1}s_1 - l_{a2}s_{12} - l_{a3}s_{123} & -l_{a2}s_{12} - l_{a3}s_{123} & -l_{a3}s_{123} \\ l_{a1}c_1 + l_{a2}c_{12} + l_{a3}c_{123} & l_{a2}c_{12} + l_{a3}c_{123} & l_{a3}c_{123} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \max & H(\theta) \\ \text{s.t.} & x_a = l_{a1}c_1 + l_{a2}c_{12} + l_{a3}c_{123} \\ & \alpha = \theta_{a1} + \theta_{a2} + \theta_{a3} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 안정성 평면에서의 해석

로봇이 작업 대상 물체를 잡는 경우에 로봇의 두 다리는 바닥에 닿은 상태이고, 로봇의 팔과 다리는 좌우 대칭의 해를 갖게 되므로 로봇의 좌,우 방향(frontal)에서의 무게 중심은 항상 로봇 몸의 가운데에 위치하게 되며 따라서 좌,우 방향에서의 안정성은 항상 보장된다. 하지만 로봇의 전,후 방향(sagittal)에서는 로봇 다리 관절들과 팔 관절들의 변화에 따라 안정할 수도 있고, 그렇지 못할 수도 있다. 본 절에서는 이를 해석하기 위하여 그림 5의 사각형에 나타낸 바와 같은 안정성 평면을 고려한다.

그림 5에서 내부의 열은 사각형으로 표시된 바와 같은 안정성 평면에서의 로봇 팔과 다리부를 그림 6과 같이 모델링한다. 그림 5에서의 점 A는 발목 관절을, 점 B는 팔의 첫 번째 관절인 어깨 관절을 나타내고 그림 6의 점 A, B와 각각 같은 점을 나타낸다. 그림 6의 머니플레이터는 4자유도의 회전 관절을 가진 평면 머니플레이터와 같다. 그림에서 l_1 는 발목과 무릎 사이인 첫번째 링크의 길이를, l_2 는 무릎에서부터 엉덩이 관절까지인 두 번째 링크의 길이를, l_3 는 엉덩이 관절에서 어깨 관절까지인 세 번째 링크의 길이를 나타낸다. d_4 는 조작성 평면에서 팔의 자세가 구해진 후, 이를 안정성 평면으로 투영하였을 때의 로봇 팔의 길이를 나타내며 네 번째 링크의 길이가 된다. d_4 는 로봇 팔의 자세에 따라 길이가 변하지만, 조작성 평면에서 로봇 팔의 해가 구해진 후에는 상수가 된다. m_i, l_{mi} 은 각각 i 번째 링크의 무게와 무게 중심까지의 길이를 나타낸다.

한편, 인간형 로봇은 작업 대상 물체를 잡기 위하여 다리를 이용한 보행 이동을 할 수 있으므로, 물체를 잡기 위해서 최적인 위치를 선정하여 이동할 수 있다. 따라서 물체를 잡는 시점에서의 로봇의 발바닥이 놓이는 위치는 임의의 위치로 바뀔 수 있다. 즉, 그림 6에서의 머니플레이터에서 생각하면 작업 대상 물체는 고정되어 있고, 로봇의 원점이 x 방향으로 이동할 수 있는 것과 같게 된다. 이러한 상황을 고려하기 위해서는 그림 6의 4축 평면 머니플레이터에서 로봇의 원점은 고정되어 있고, 로봇 손 끝의 방향과 y 좌표는 정해져 있고 x 좌표는 미정인 여유자유도 머니플레이터로 생각할 수 있다. 즉 로봇 머니플레이터는 4 자유도를 가지며, 작업에 필요한 자유도는 2로서 여유자유도가 2인 4축 평면 여유자유도 머니플레이터로 해석할 수 있게 된다.

이 머니플레이터의 로봇 기구학 식은 식 (4)와 같이 주어진다

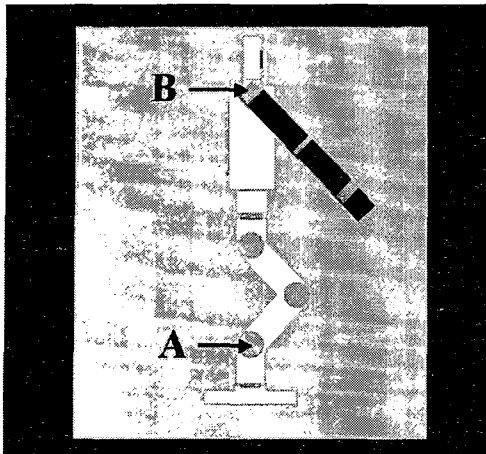


그림 5 안정성 평면과 로봇
Fig. 5 The stability plane and the robot

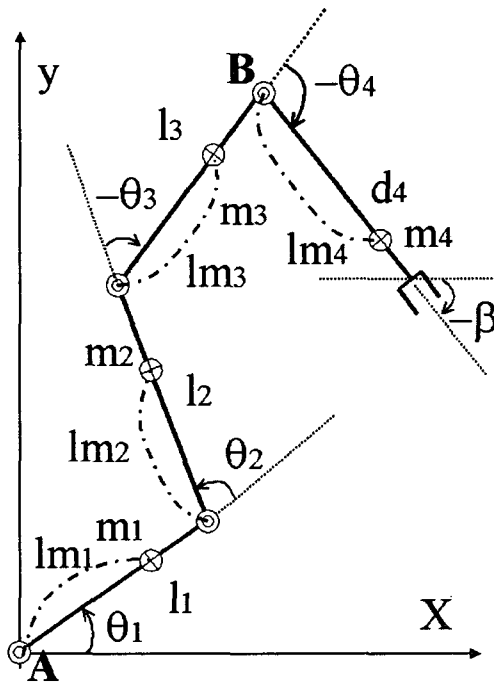


그림 6 안정성 평면에서의 로봇의 모델링.
Fig. 6 Modeling of the robot in the stability plane

$$\begin{aligned} x &= l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} + d_4c_{1234} \\ y &= l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123} + d_4s_{1234} \\ \beta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $c_1 = \cos(\theta_1)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 등을 나타낸다. 여유자유도가 2이기 때문에 두 가지의 성능지수를 최적화하는 것이 가능하다. 인간형 로봇은 2족 보행을 하므로 어느 경우에도 넘어지지 않도록 하는 안정성이 매우 중요하다. 따라서 안정성을 보장하는 성능지수를 도입하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 안정성을 보장하기 위하여 로봇의 무게 중심을 성능지수로 도입한다. 안정성 평면에서의 x 축 방향의 무게 중심은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} x_{cog} &= \Sigma m_i x_i / \Sigma m_i \\ &= A c_1 + B c_{12} + C c_{123} + D c_{1234} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 x_i 는 x 축의 원점에서 i 번째 링크의 무게 중심인 m_i 까지의 거리를 x 으로 투영한 길이이고, A, B, C, D 는 계수로서 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x_1 &= l_{m1}c_1 \\ x_2 &= l_1c_1 + l_{m2}c_{12} \\ x_3 &= l_1c_1 + l_2c_{12} + l_{m3}c_{123} \\ x_4 &= l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} + l_{m4}c_{1234} \\ A &= (m_1l_{m1} + m_2l_1 + m_3l_{12} + m_4l_3) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \\ B &= (m_2l_{m2} + m_3l_2 + m_4l_3) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \\ C &= (m_3l_{m3} + m_4l_3) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \\ D &= (m_4l_{m4}) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \end{aligned} \quad (6)$$

안정성을 보장하기 위해서는 식(6)으로 주어지는 성능지수가 로봇의 발바닥이 차지하는 x 축 방향에서의 영역 내에 있거나 하면 된다. 하지만 보다 안정성을 높이기 위해서는 식 (6)으로 주어지는 x 축 방향의 무게 중심이 발바닥의 가운데 지점인 $x=0$ 의 위치에 놓이는 것이 바람직하다. 한편, 여유자유도가 2 이므로 추가적으로 다른 성능지수를 더 도입할 수 있다. 로봇의 팔과 다리의 관절값에 따라 로봇의 자세가 결정되며, 안정성 외에도 로봇이 작업 대상 물체를 잡은 이후에 보다 유연하게 운동할 수 있도록 하기 위해서 조작성능지수를 도입한다. 이 때의 조작 성능 지수는 로봇의 자세 변환을 용이하게 할 수 있도록 해 주는 지표로 해석할 수 있다. 따라서 안정성 평면에서의 해석은 다음과 같이 3개의 등식 제한 조건을 가지며, 조작 성능지수를 최적화하는 문제가 된다.

$$\begin{aligned} \max H(\theta) &= \det(JJ^T) \\ \text{s.t. } y &= l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123} + d_4s_{1234} \\ 0 &= A c_1 + B c_{12} + C c_{123} + D c_{1234} \\ \beta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 도달성을 위한 자세 변경

로봇의 현재 자세와 위치가 주어지고, 작업 대상물을 잡기 위한 로봇 손끝의 위치와 방향이 사용자에게 의해 주어진 상태에서 앞에서 기술한 바와 같이 조작성 평면에서의 해석과 안정성 평면에서의 해석을 수행하면 작업 대상물을 잡기 위한 로봇의 최적 초기 자세와 최적 초기 위치가 결정된다.

한편 그림 7은 로봇에 구현되어 있는 여러 가지 기본 보행 패턴들을 도시하고 있다. 그림에서 빗금친 사각형은 보행 전의 로봇의 발바닥의 위치들이고 보통 사각형은 보행 후에 이동된 로봇 발바닥의 위치들이다[14]. 그림에서 (a)는 직진 보행, (b)는 오른발 반보 전진 (c)는 왼발 반보 전진 (d)는 좌/우 보행 (e)는 제자리 좌/우 회전 보행 (f)는 좌/우 회전 보행 (g)는 좌/우 대각선 보행을 나타낸다. 로봇의 위치는 로봇의 두 발바닥의 위치로 결정되므로, 로봇의 두 발바닥의 현재 위치와 작업 대상물을 잡기 위한 최적 초기 위

치가 결정되면 로봇은 그림 7에 나타내어져 있는 기본 보행 패턴들을 적절히 조합하여 보행을 수행하여 최적 초기 위치로 이동한다. 로봇이 최적 초기 위치로 이동한 후에는 로봇의 전체 관절들을 이용하여 결정된 최적 초기 자세로 자세를 변경하게 되며, 이와 같이 하여 작업 대상 물체를 잡을 수 있는 최적의 상태가 된다.

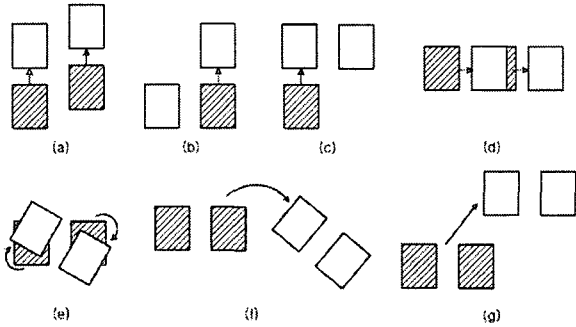


그림 7 로봇의 여러 가지 보행 패턴.
Fig. 7 Various walking patterns of the robot

3. 모의 실험

이 장에서는 2장에서 해석 방법에 따라 모의 실험을 수행한다. 모의 실험에 사용할 로봇은 그림 1의 로봇 모델을 사용한다. 조작성 평면에서의 각 링크의 길이는 $l_{a1} = 0.08m, l_{a2} = 0.07m, l_{a3} = 0.04m$ 이고, 안정성 평면에서의 각 링크의 길이는 $l_1 = l_2 = 0.074m, l_3 = 0.1243m$ 이고 d_4 의 길이는 조작성 평면에서의 해가 구해진 후에 결정된다. 각 링크의 무게는 $m_1 = m_2 = 0.5kg, m_3 = 1.5kg, m_4 = 1.0kg$ 이며, 각 링크의 무게 중심은 모두 각 링크의 중간지점에 위치한다고 가정한다. 작업장에서의 월드좌표계는 로봇의 양 발목의 중간지점에 위치하며, 로봇의 앞쪽방향이 x 축, 로봇의 왼쪽 방향이 y 축, 로봇의 위쪽 방향이 z 축을 갖도록 설정한다. 작업 대상물은 그림 2에서와 같이 로봇의 월드좌표계에서 $(0.3m, 0.0m, 0.14m)$ 에 위치하고 있으며 반경 $0.02m$, 길이 $0.89m$ 의 원기둥 형태의 물체이고, 작업 대상물을 잡을 로봇 손끝의 방향은 $(0,1,0)$ 로, 로봇 팔의 방향은 $(1,0,-1)$ 으로 주어졌다고 가정한다.

우선 식(3)의 여유자유도 문제를 풀어 조작성 평면에서의 로봇 팔의 해를 구한다. 이 경우에 $\alpha = 180^\circ$ 로 주어진다. 또한 로봇의 오른팔 끝단이 작업 대상 물체와 접촉해야 하는 점은 그림 4의 좌표계에서 $x = -0.05m$ 로 주어진다. 식(3)의 등식제한조건을 만족하는 해들의 일부를 그림 8에 나타내었다. 이 중에서 조작성능지수가 최대가 되는 그림 8의 (d)를 조작성 평면에서의 해로 선택한다. 이 때의 관절 해는 $\theta_{a1} \approx 65.2^\circ, \theta_{a2} \approx 62.9^\circ, \theta_3 \approx 51.8^\circ$ 이다.

다음에는 안정성 평면에서의 해를 구한다. 앞에서 조작성 평면에서의 해를 구한 결과를 이용하면, 안정성 평면에서의 링크 4의 길이는 $d_4 = 0.137m$ 가 된다. 또한 로봇 팔의 방향이 $(1,0,-1)$ 로 주어졌으므로, $\beta = -45^\circ$ 가 된다. 따라서 주어진 파라미터들을 사용하여 식(8)의 여유자유도 문제의

해를 구한다. 그림 9에 등식 제한 조건들을 만족하는 해들을 도출하였다. 이 해들은 모두 등식 제한 조건으로 주어지는 안정성을 만족하는 해이다. 이 중에서 조작성능지수를 최대화 하는 (f)를 해로 선정한다. 두 평면에서의 해를 구한 최종 결과를 그림 10에 나타내었다.

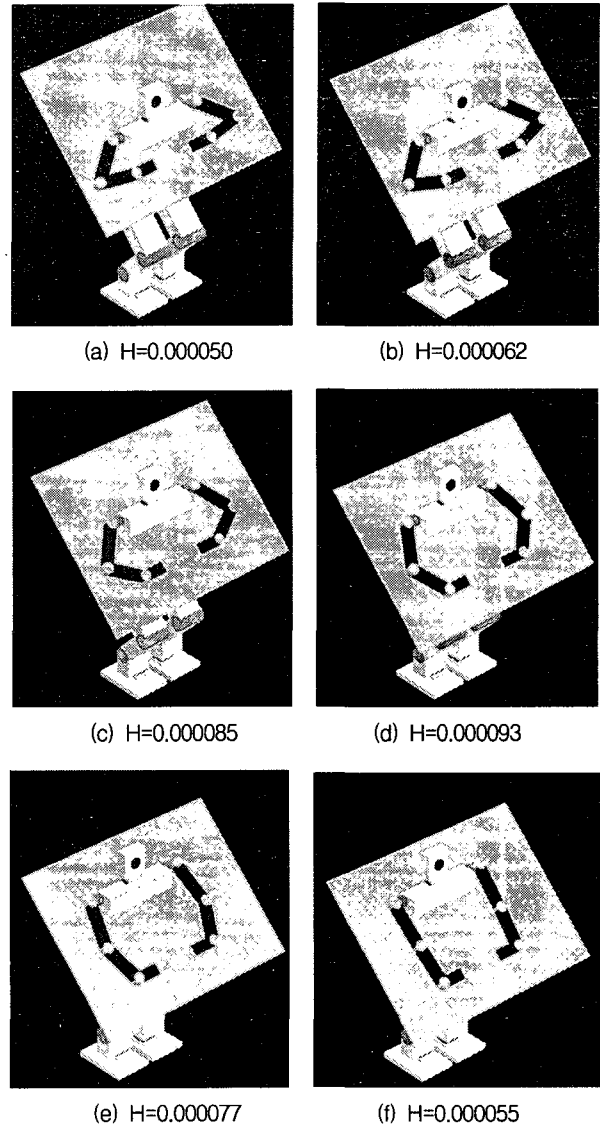
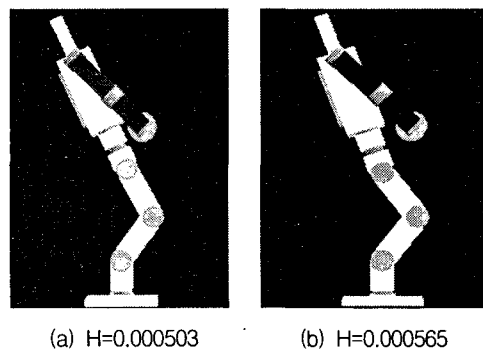


그림 8 조작성평면에서의 해.
Fig. 8 Robot arm solutions in the manipulability plane.



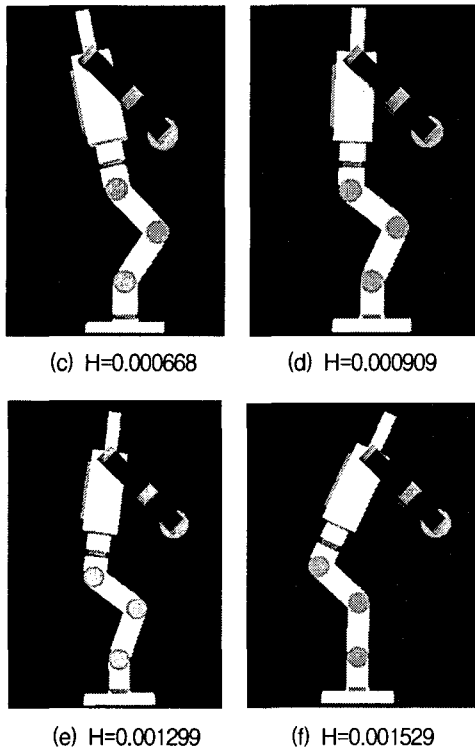


그림 9 안정성 평면에서의 해.
Fig. 9 Solutions in the stability plane.

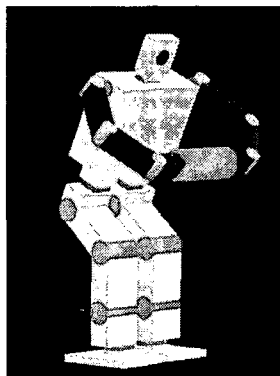


그림 10 물체를 잡기 위한 최적 초기 자세.
Fig. 10 An optimal initial configuration for holding an object.

4. 결 론

본 논문에서는 인간형 로봇이 보행 및 팔과 다리의 협응을 통하여 작업 대상물을 잡는 응용문제를 다루었다. 총 22 자유도를 가진 인간형 로봇이 3차원 공간상에서 주어진 물체를 잡기 위한 최적 초기해를 구하는 문제는 여유자유도 문제임을 보였고, 작업 수행 시 필요한 대칭성과 로봇의 기하학적 구조의 분석을 통하여 3차원 공간상에서의 복잡한 여유자유도 해석 문제를 2개의 2차원 평면상에서의 간단한 여유자유도 문제로 전환하였다. 이를 위하여 조작성 평면과 안정성 평면을 도입하여, 조작성 평면에서는 물체를 잡은 이후에 팔의 운동을 용이하게 할 수 있도록 조작 성능지수를,

안정성 평면에서는 로봇의 안정성과 조작성을 동시에 최적화 하는 성능지수를 도입하여 여유자유도 문제를 풀음으로써, 인간형 로봇이 작업 대상 물체를 잡기 위한 최적의 초기 자세를 구할 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 위한 금오공과대학교의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Q. Li, A. Takanishi, and I. Kato, "Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on ZMP stability criterion," Proc. of 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 597-603, 1992.
- [2] Fumio Kanehiro, et al, "Development of a two-armed bipedal robot that can walk and carry objects," Proc. of 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 23-28, 1996.
- [3] Kazuo Hirai, et, "The development of Honda humanoid robot," Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.
- [4] 노경곤, 공정식, 김진걸, "이족보행로봇의 궤적 추종 오차 감소를 위한결음새 분석," 제어.자동화.시스템공학 논문지, 제8권, 제 10호, pp. 890-897, 2002.
- [5] Jong Hyeon Park, Hyun Chul Cho, "An on-line trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability," Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 3353-3358, 2000.
- [6] Jung-Hoon Kim and Jun-Ho Oh, "Walking control of the humanoid platform KHR-1 based on torque feedback control," Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 623-628, 2004.
- [7] K. Harada et al, "Realtime planning of humanoid robot's gait for force controlled manipulation," Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 616-622, 2004.
- [8] T. Asfour, R. Dillman, "Human-like motion of a humanoid robot arm based on a closed-form solution of the inverse kinematics problemr", Proc. of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1407-1412, October, 2003.
- [9] Y. Hwang, A. Konno, and M. Uchiyama, "Whole body cooperative tasks and static stability evaluatins for a humanoid robot", Proc. of 2003IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1901-1906, October, 2003.
- [10] H. Yoshida, K. Inoue, T. Arai, and Y. Mae, "Mobile manipulation of humanoid robots-analysis of

- manipulability and stability in mobile manipulation," Proc. of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1924-1929, 2000
- [11] 원경태, 이지홍, "로봇 조작도에 기반한 역도 들기 자세 해석," 제어 .자동화 시스템 공학 논문지, 제5권, 제4호, pp. 446-453, 1999.
- [12] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," Int. Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
- [13] Seon-Ho Lim, Jeong-San Cho, Young Whee Sung, Soo-Yeong Yi, "A miniature humanoid robot that can play soccer," Proc. of ICCAS2003, pp. 628-632, 2003.
- [14] 임선호, 조정산, 성영휘, 이수영, 안희욱, "소형 2족 보행 로봇의 지능형 동작의 구현," 제어 .자동화 시스템 공학 논문지, 제10권, 제 9호, pp. 825-832, 2004.

저 자 소 개



성 영 휘 (成 永 輝)

1962년 5월 20일생. 1988년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1991년 KAIST 전기및 전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기 및전자공학과 졸업(공학). 1995년 9월~1996년 8월 영국 Oxford university 박사 후 연구원. 1996년~1998년 LG산전 선임 연구원. 1998~현재 금오공과대학교 전자공학부 부교수
 주관심분야 : Humanoid robot, Redundant manipulator.



조 동 권 (趙 東 權)

1962년 7월 16일생. 1986년 인하대학교 전자공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기전자공학과 졸업. 1994년 8월 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학). 1994년 3월~1995년 2월고려대학교 전산학과 시간강사. 1998년 8월~1999년 7월 일본 NTT 객원연구원. 1994년 11월 ~현재 KT 미래기술연구소 수석연구원.
 주관심분야 : 네트워크기반 로봇제어, 인터넷 환경에서 무선응용