

유전알고리즘을 이용한 18자유도 인간형 로봇의 자세 최적화

Optimization of Whole Body Cooperative Posture for an 18-DOF Humanoid Robot Using a Genetic Algorithm

최 국 진*, 홍 대 선
(Kook-Jin Choi and Dae Sun Hong)

Abstract : When a humanoid robot pushes an object with its force, it is essential to adequately control its posture so as to maximize the surplus torque for all joints. For such purpose, this study proposes a method to find an optimal posture of a humanoid robot using a genetic algorithm in such a way that the surplus torque for all joints is maximized. In this study, pushing motion of an 18-DOF humanoid robot is considered. When the robot takes a cooperative motion to push an object, the palms and soles are assumed to be fixed at the object and ground respectively, and are subjected to sense the reaction force from the object and the ground. Then, the torques for all joints are calculated and reflected to fitness function of the genetic algorithm. To verify the effectiveness of the proposed method, a number of simulations with different fitness functions are carried out. The simulation result shows that the proposed method can be adopted to find optimized posture in cooperative motion of a humanoid robot.

Keywords : humanoid robot, genetic algorithm, optimization, cooperative motion

I. 서론

현재 세계적으로 산업용 로봇 산업 시장은 포화 상태이다. 이를 극복하고 로봇 산업의 활성화를 위하여 각 나라마다 로봇의 서비스 분야의 확대 적용을 위해 노력하고 있다. 그 중 인간형(휴머노이드) 로봇 분야는 일반인들의 로봇에 대한 기대치를 완전하게 만족시킬 수 있는 미래의 고부가가치 종목이다. 따라서 현재 세계적으로 수많은 휴머노이드 로봇 관련 연구가 이루어지고 있는데, 우리나라에서도 최근 KAIST에서 HUBO를 개발하여 일본의 ASIMO와 견줄만한 자율보행 능력을 구현하였다[1]. 이 외에도 국내에서는 많은 휴머노이드 로봇 관련 연구가 있었으나 대부분 자율보행에 관한 것들이며[2-6], 실제 인간 크기의 실물제작을 통한 연구보다는 RC서보 모터를 이용한 소형 로봇이나[6,7], 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 연구[2,5], 또는 하반신만을 고려한 것[3,4]들이 대부분이다. 또한 보행 이외에 관절 토크나 자세 최적화에 관련된 연구로는 비선형 방정식을 이용한 작용력 증대를 위한 자세 최적화[8,9], 유한차분법을 이용한 관절 토크 변화를 최적화[5], 그리고 유전알고리즘을 이용한 균형제적 최적화[3,4] 등이 있으나 로봇의 실제 동작에 적용하여 자세 최적화를 연구한 것은 많지 않은 실정이다. 향후 휴머노이드 로봇에게 인간과 같은 다양한 동작을 구현시키기 위해서는 인간과 같은 학습능력과 본능적인 최적화 자세 구현능력이 필요하다.

본 논문에서는 이를 위해 유전알고리즘을 이용하여 외부

의 힘에 대한 휴머노이드 로봇의 전신협조 동작을 최적화한다. 사람은 외부의 힘에 대하여 신체의 각 부위가 무의식적으로 움직임으로써 각 관절에 토크가 최적으로 분배되는 자세를 취하게 된다. 예를 들어 어떤 목적 하에서 고정된 자세를 유지하고자 할 때는 신체 각 관절에 토크가 고르게 분배될 수 있는 자세를 취하게 되고, 물체를 밀기 위한 준비 자세에서 손바닥에 느껴지는 힘이 크면, 자연스럽게 팔을 특이점 근처의 자세로 유지함으로써 팔 관절에 발생하는 토크를 최소화 하게 된다. 이러한 이론적 배경을 휴머노이드 로봇에 적용하고자 한다. 로봇의 관절 토크를 제어하여 각 관절에 효과적으로 분배를 하면 로봇의 작업영역 확대나 작용력 증대 등의 효과를 기대할 수 있다. 이것은 로봇이 보행의 단계를 넘어서서 여러 가지 동작을 행할 때 매우 중요한 고려사항이 된다. 본 논문에서는 전신 18자유도의 휴머노이드 로봇을 모델링하고, 로봇이 물체를 밀기 위한 자세의 토크 계산을 수행한다. 이 토크 값을 유전알고리즘의 목적함수 계산을 위한 변수로 사용하고, 로봇 무게 중심의 위치와 자세는 유전알고리즘의 설계변수로 설정하여 최적화 자세를 찾아내게 된다. 마지막으로, 유전알고리즘을 통하여 찾아낸 최적화 자세를 목표자세로 하여 초기 자세로부터 목표자세까지 궤도계획을 수행하는데, 속도 프로파일을 이용한 직교공간법을 사용함으로써 로봇이 동작시에 받게 되는 충격량을 최소화 하게 된다.

II. 휴머노이드 로봇의 모델링 및 기구학적 해석

1. 자유도 배치와 좌표계 설정

최적화 대상으로 모델링한 로봇은 전체 높이가 1.1m이며 다리에 각각 6자유도, 팔에 각각 3자유도를 가진 전신 18자유도의 휴머노이드 로봇이다. 자유도 배치는 그림 1과 같고 자유도 배치에 대한 좌표계 설정은 그림 2와 같다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 12. 5., 채택확정 : 2008. 6. 6.

최국진, 홍대선 : 창원대학교 메카트로닉스공학부

(choi@changwon.ac.kr/dshong@changwon.ac.kr)

※ 본 연구는 2007년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음. 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았다.

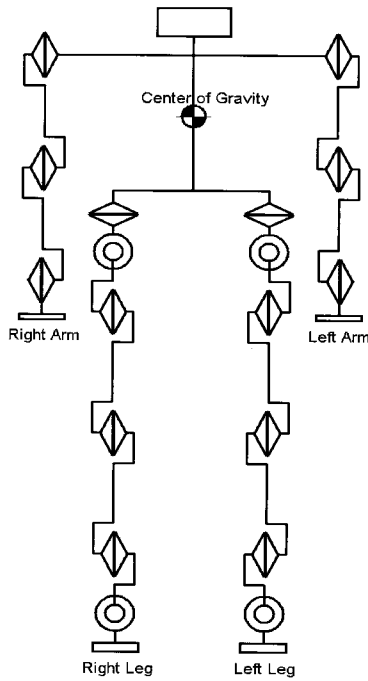


그림 1. 로봇의 자유도 배치.
Fig. 1. Degree of freedom of the robot.

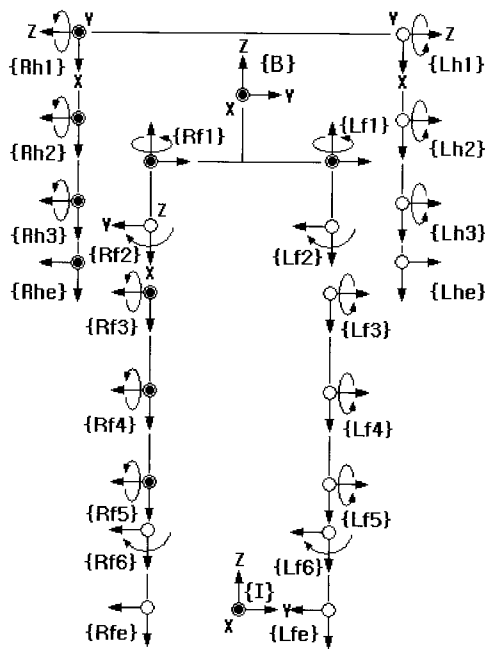


그림 2. 로봇의 좌표계 설정.
Fig. 2. Coordinate of the robot.

일반적으로 산업용 로봇의 좌표계 설정은 D-H 파라미터 규약을 많이 따르고 있다. 그러나 휴머노이드 로봇은 인간의 관절 구조를 모방하는 것에 주안점을 두어야 하고 무리하게 D-H 파라미터 규약을 따를 경우 관절과 관절의 사이에 가상의 좌표계를 설정해야 하는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 지면에 설정된 가상의 기준원점 좌표계를 기준으로 전체적인 관절 좌표계를 직관적으로 파악하기 쉽게

표 1. 관절번호.

Table 1. Joint number.

Coordinate	Joint No	Coordinate	Joint No	Coordinate	Joint No
{Rf1}	Joint1(θ_{11})	{Lf1}	Joint7(θ_{21})	{Rh1}	Joint13(θ_{31})
{Rf2}	Joint2(θ_{12})	{Lf2}	Joint8(θ_{22})	{Rh2}	Joint14(θ_{32})
{Rf3}	Joint3(θ_{13})	{Lf3}	Joint9(θ_{23})	{Rh3}	Joint15(θ_{33})
{Rf4}	Joint4(θ_{14})	{Lf4}	Joint10(θ_{24})	{Lh4}	Joint16(θ_{34})
{Rf5}	Joint5(θ_{15})	{Lf5}	Joint11(θ_{25})	{Lh5}	Joint17(θ_{35})
{Rf6}	Joint6(θ_{16})	{Lf6}	Joint12(θ_{26})	{Lh6}	Joint18(θ_{36})

설정한다. 중요 좌표계에 대한 설명은 다음과 같다.

- {1} : 바닥에 위치한 가상의 기준원점좌표계
- {B} : 로봇의 무게중심좌표계
- {Rfi} : 오른쪽 다리의 i번째 관절 좌표계
- {Lfi} : 왼쪽 다리의 i번째 관절 좌표계
- {Rhi} : 오른쪽 팔의 i번째 관절 좌표계
- {Lhi} : 왼쪽 팔의 i번째 관절 좌표계
- {Rfe} : 오른쪽 발바닥 좌표계
- {Lfe} : 왼쪽 발바닥 좌표계
- {Rhe} : 오른쪽 손바닥 좌표계
- {Lhe} : 왼쪽 손바닥 좌표계

표 1은 각 자유도에 부여된 관절번호이다.

2. 순기구학 해석

설정된 좌표계에 따른 순기구학 해석은 기준원점좌표계 {1}에서 로봇 무게중심좌표계 {B}까지의 계산과, 무게중심에서 각 손바닥과 발바닥과 좌표계까지의 계산으로 나누어 계산한다. 그 이유는 나중에 토크 계산을 위한 자코비안 해석이 이루어져야 하는데 그에 따른 계산상의 편의를 위해서이다.

본 논문에서는 X-Y-Z Euler Angle을 이용한 회전행렬과 위치벡터가 함께 포함된 4x4 동차변환행렬을 연산자로 하여 순기구학을 계산한다. 먼저, 팔과 다리의 시작 부분이 되는 각 {1}좌표계 원점을 기준으로 하여 손바닥과 발바닥까지의 순기구학을 풀고자 하는데, D-H 파라미터를 사용하지 않고 일반동차변환 방법을 사용하면 1번 관절의 회전에 따라 {1}좌표계도 함께 회전하게 되므로 새로운 기준좌표계를 설정하여 고정시킬 필요가 있다. 따라서 1번 관절의 초기자세와 동일한 {0}좌표계를 만들어 고정시키고 이를 새로운 기준으로 설정하여 계산한다. 다음은 무게중심좌표계 {B}에서 {1}좌표계까지를 계산하고 다시 기준원점좌표계 {1}에서 무게중심좌표계 {B}까지를 계산하여, 최종적으로 구하고자 하는 순기구학 값은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^e T_{Rleg} &= {}^I_B T \cdot {}^B_0 T \cdot {}^0_e T_{Rleg} \\
 {}^e T_{Lleg} &= {}^I_B T \cdot {}^B_0 T \cdot {}^0_e T_{Lleg} \\
 {}^e T_{Rarm} &= {}^I_B T \cdot {}^B_0 T \cdot {}^0_e T_{Rarm} \\
 {}^e T_{Larm} &= {}^I_B T \cdot {}^B_0 T \cdot {}^0_e T_{Larm}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3. 역기구학 해석

손바닥과 발바닥을 고정시킨 채 로봇의 무게중심의 위치와 자세를 임의로 변경하면 그에 따른 각 관절각을 알아내기 위한 역기구학 해석이 필요하다. 일반적으로 역기구학 해석을 위해서는 비선형 연립 방정식을 풀어야 하는데 이러한 비선형 연립방정식의 해를 구하는 일반적인 방법은 없으며 다음과 같은 2가지 형태의 해를 구하는 것을 고려할 수 있다. 하나는 해석적인 방법(closed-form solution)이며 다른 하나는 수치 해석적(numerical solution)인 방법이다. 이 중에서 해석적인 방법은 다시 대수적인 방법(analytical approach)과 기하학적(geometric approach)방법으로 나뉘어진다. 본 논문에서는 기하학적인 방법을 이용하여 역기구학을 해석한다. 먼저 해석 모델의 단순화를 위해 로봇 무게중심의 움직임을 기준원점좌표계의 X, Z방향의 위치변화와 Y방향의 회전변화로 제한한다. 이렇게 되면 팔과 다리 관절의 움직임이 모두 3관절 평면 매니퓰레이터 형태로 단순화 되게 된다. 따라서 그림 3에서 설정한 오른쪽 팔의 좌표계를 기준으로 역기구학을 해석하고 이를 다른 팔과 다리에 적용한다.

오른쪽 팔의 역기구학을 풀기 위하여 기준위치를 첫 번째 관절로 이동시켜 그림 3과 같은 평면 기하학적 형태로 표현하였다. 그리고 (2)를 이용하여 역기구학 해를 구한다.

$$\begin{aligned}
 x &= {}^0P - {}^0R \cdot {}^3P_{ORG} \text{ 에서 Px 성분} \\
 y &= {}^0P - {}^0R \cdot {}^3P_{ORG} \text{ 에서 Py 성분} \\
 \theta_2 &= \text{atan2}(\sin\theta_2, \cos\theta_2) \\
 \beta &= \text{atan}(y, x) \\
 \psi &= \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \\
 \theta_1 &= \beta - \psi \\
 \phi &= \sin^{-1}({}^0R(2,1)) \\
 \theta_3 &= \phi - \theta_1 - \theta_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

왼쪽 팔의 역기구학은 오른쪽 팔의 역기구학 해석에서 단지 회전 관절의 부호가 반대라는 것만 고려하면 되고, 다리의 역기구학의 해석은 오른쪽 다리의 3, 4, 5번 관절과 왼쪽 다리의 9, 10, 11번 관절만을 고려하면 되며 이때의 역기구학 해석은 오른쪽 팔과 같은 방법으로 해석이 가능하다. 다만 오른쪽 팔의 역기구학 해석에서 θ_2 에 해당하는 관절의 회전범위가 양의 범위인지 음의 범위인지만을 고려할 필요가 있다.

4. 자코비안 해석과 토크 계산

로봇 매니퓰레이터의 순기구학 방정식은 기준좌표계 공간에서 말단장치의 위치 및 방향과 그에 따른 각 관절의 움직임과의 함수이다. 이 때 로봇 매니퓰레이터의 각 관절의 움직임 속도와 말단장치의 속도 관계는 순기구학 방정식에서 유도된 함수의 자코비안(Jacobian)에 의해 결정된다. 결국 자코비안(Jacobian)은 로봇의 관절속도($\dot{\theta}_i$)를 말단장치의 직각좌표계 속도(${}^0_n\dot{d}$)로 변환시키는 역할을 한다. 이를 수식적으로 표현하면,

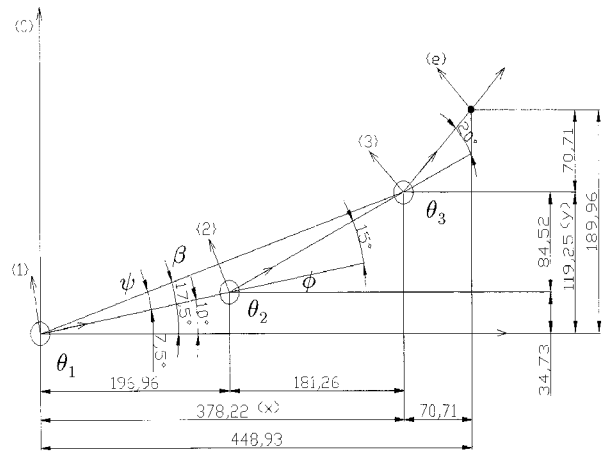


그림 3. 오른쪽 팔의 기하학적 표현.
Fig. 3. Geometrical description of the right arm.

$$\dot{X} = J \dot{\theta} \tag{3}$$

과 같다. 자코비안 행렬은 선속도 부분 3행과 각속도 부분 3행으로 이루어진 $6 \times n$ (n은 관절수) 행렬로 나타내어진다. 순기구학에서 계산된 값을 이용하여 자코비안 행렬을 구하면 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^0J_{Leg} &= \begin{bmatrix} {}^0J_{v_{Leg}} \\ {}^0J_{\omega_{Leg}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} {}^0Rk \times ({}^0P - {}^1P) & \dots & {}^0Rk \times ({}^0P - {}^6P) \\ {}^0Rk & \dots & {}^0Rk \end{bmatrix} \\
 {}^3J_{Arm} &= \begin{bmatrix} {}^3J_{v_{Arm}} \\ {}^3J_{\omega_{Arm}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} {}^3Rk \times ({}^3P - {}^1P) & \dots & {}^3Rk \times ({}^3P - {}^3P) \\ {}^3Rk & \dots & {}^3Rk \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4}$$

이렇게 구한 자코비안 행렬을 이용하여 토크를 구하게 된다. 직각좌표 안에서 행하여진 일은 관절공간에서의 일과 일치시킬 수 있으며 다차원의 경우에 일은 힘 벡터 또는 토크와 변위 벡터의 내적이다. 이를 적용하면 (5)가 되며 여기에 팔 다리 각각의 자코비안 행렬과 조건에서 주어질 손바닥과 발바닥의 힘을 대입하여 각 관절의 토크를 계산한다.

$$\begin{aligned}
 F \cdot \delta\chi &= \tau \cdot \delta\theta \\
 \delta\chi &= J \cdot \delta\theta \\
 F^T \cdot J \cdot \delta\theta &= \tau^T \cdot \delta\theta \\
 F^T \cdot J &= \tau^T \\
 \tau &= J^T \cdot F
 \end{aligned} \tag{5}$$

로봇의 초기자세는 그림 4와 같이 왼발을 한 발 내 디딘 상태로 양 손바닥으로 물체를 밀기 위한 준비 자세로 설정한다. 이 때, 발바닥과 손바닥에 고정된 일정 크기의 힘이

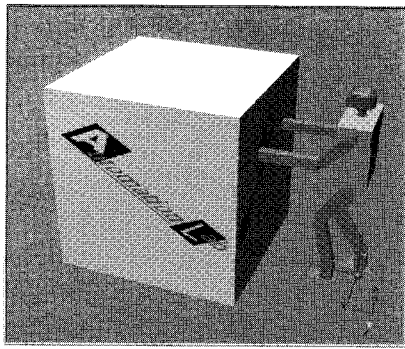


그림 4. 초기자세.
Fig. 4. Initial posture.

표 2. 초기자세의 파라미터.

Table 2. Parameters of the initial posture.

$\theta_{ij, leg}$ [°]	θ_{11}, θ_{21}	0.0000	0.0000	$\theta_{ij, arm}$ [°]	θ_{51}, θ_{41}	45.0000	-45.0000
	θ_{12}, θ_{22}	0.0000	0.0000		θ_{32}, θ_{42}	45.0000	-45.0000
	θ_{13}, θ_{23}	14.6965	-33.6212		θ_{33}, θ_{43}	0.0000	0.0000
	θ_{14}, θ_{24}	-48.3177	48.3177				
	θ_{15}, θ_{25}	33.6212	-14.6965				
	θ_{16}, θ_{26}	0.0000	0.0000				
θ_B [°]	α_B		0.0000	P_B [m]	P_{Bx}		0.0750
	β_B		0.0000		P_{By}		0.0000
	γ_B		0.0000		P_{Bz}		0.7500
$\theta_{e1,2}$ [°]	α_{e1}, α_{e2}	180.0000	180.0000	$P_{e1,2}$ [m]	P_{ey1}, P_{ey2}	0.0000	0.1500
	β_{e1}, β_{e2}	0	-90.0000		P_{ez1}, P_{ez2}	-0.0800	0.0800
	γ_{e1}, γ_{e2}	-90.0000	0.0000				
$\theta_{e3,4}$ [°]	α_{e3}, α_{e4}	90.0000	90.0000	$P_{e3,4}$ [m]	P_{ex3}, P_{ex4}	0.5164	0.5164
	β_{e3}, β_{e4}	0.0000	0.0000		P_{ey3}, P_{ey4}	-0.2000	0.2000
	γ_{e3}, γ_{e4}	0.0000	0.0000		P_{ez3}, P_{ez4}	0.7086	0.7086
$f_{f1,2}$ [N]	f_{f1}, f_{f2}	80	80	$f_{h3,4}$ [N]	f_{hx3}, f_{hx4}	-80	-80
	f_{f1}, f_{f2}	0	0		f_{hy3}, f_{hy4}	0	0
	f_{f1}, f_{f2}	180	180		f_{hz3}, f_{hz4}	0	0
$\tau_{ij, leg}$ [Nm]	τ_{11}, τ_{21}	0.0000	0.0000	$\tau_{ij, arm}$ [Nm]	τ_{31}, τ_{41}	-11.3140	11.3140
	τ_{12}, τ_{22}	0.0000	0.0000		τ_{32}, τ_{42}	0.0000	0.0000
	τ_{13}, τ_{23}	30.5000	-57.5000		τ_{33}, τ_{43}	0.0000	0.0000
	τ_{14}, τ_{24}	-0.2621	-15.9292				
	τ_{15}, τ_{25}	8.0000	-8.0000				
	τ_{16}, τ_{26}	0.0000	0.0000				

발생한다고 가정하고 그 힘에 대한 각 관절의 토크를 계산한다. 표 2의 $f_{f1,2}$ 는 발바닥에 작용하는 힘이고 $f_{h3,4}$ 는 손바닥에 작용하는 힘이다. 발바닥에 작용하는 힘의 Z방향 크기는 로봇의 무게에 해당하는 것이 되며 발바닥에 작용하는 X방향의 힘과 손바닥에 작용하는 X방향의 힘은, 그 크기는 같고 부호는 서로 반대로 하여 로봇이 지면에 대하여 미끄러지지 않는 조건을 설정한다. 힘은 그 크기와 모멘트 성분으로 이루어지지만 본 논문에서는 힘의 모멘트 성분은 고려하지 않았다. 표 2는 그 힘에 대한 초기자세의 관절각도 및 무게중심의 위치 및 회전, 그리고 발생 토크 등을 나타낸 것이다.

그림 4와 같은 초기자세에서는 왼쪽 다리의 무릎에 해당하는 9번 관절에 가장 큰 토크가 발생하고, 팔에서는 어깨에 해당하는 13번과 16번 관절에 큰 토크가 발생하게 된다.

III. 최적화 방법

본 논문에서의 최적화 방법은 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 첫째는 유전알고리즘을 이용하여 목적함수에 맞는 최적의 자세를 찾아내는 부분이고 둘째는 그 자세를 목표 자세로 한 궤도계획 부분이다.

1. 유전알고리즘을 이용한 최적화

유전알고리즘은 자연 생태계에서의 변이와 적자생존에 의한 진화의 과정을 모방한 탐색 알고리즘으로서, 해 공간이 방대하여 일반적인 방법으로는 해를 찾기가 불가능한 최적화 문제에서 주어진 시간 안에 최적에 가까운 해를 찾기 위한 방법 중 하나이다. 또한 목적함수의 연속성이나 미분가능성과는 관계없이 단지 그 값만을 필요로 하기 때문에 매우 복잡한 모델의 최적화에도 유용하다. 본 논문에서는 룰렛휠 선택과 단순교배, 그리고 단순돌연변이로 구성된 단순유전알고리즘(SGA)을 이용하였으며 여기에 엘리트 전략(elitist strategy)을 병행 사용하였다. 엘리트 전략은 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하기 위한 방법이다. 만약 이전 세대의 최적개체를 저장하고 있다가 진화가 수행된 현 세대에서 소멸된 것이 확인되면 저장된 최적개체를 현 세대에서 가장 약한 개체 또는 임의로 선택된 개체와 교환하게 하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있고 일반적으로 다른 선택연산자와 병행하여 사용한다. 표 3은 적용된 유전알고리즘의 파라미터들이다.

최대 세대수(maximum generation) 지정은 유전알고리즘의 종료조건 결정 방법의 하나로서, 유전알고리즘이 수행되어 가면서 더 이상의 개선이 일어날 가능성이 매우 적다고 판단될 때를 유전알고리즘의 종료조건으로 정하는 것이다. 본 논문에서는 여러 입력에 따른 수렴 경향을 파악하여 300세대로 정한다. 집단크기(population size)는 너무 작으면 지역해로 빠르게 수렴하는 문제가 발생할 수 있고 반대로 너무 크면 성능의 향상 정도에 비해 연산시간이 기하급수적으로 늘어난다. 일반적으로 30-200 사이에서 집단의 크기가 유지되며 본 논문에서는 100을 설정한다. 교배확률(Pc)과 돌연변이확률(Pm)도 일반적으로 알려진 최선의 범위(Pc: 80-95%, Pm: 0.01-1%)안에서 결정한다.

표 3. 유전알고리즘의 파라미터.

Table 3. Parameters of the genetic algorithm.

Parameters	Value
Maximum Generation	300
Population Size	100
Number of Variable	3
Probability of Crossover, Pc	0.8
Probability of Mutation, Pm	0.01
Range of Px (COG of robot)	$0 \leq Px \leq 0.15$ (m)
Range of Pz (COG of robot)	$0.6 \leq Pz \leq 0.8$ (m)
Range of Ry (COG of robot)	$-15 \leq Ry \leq 15$ (°)

그림 5는 유전알고리즘을 이용한 최적화의 전체 흐름도이다. 먼저 유전알고리즘의 실행에 필요한 파라미터들을 초기화하고 로봇의 무게중심의 위치(P_x, P_z)와 회전(R_y)값을 이진수 형태로 표현하여 초기집단을 발생시킨 후, 이를 실수 값으로 변환한다. 이 실수 값들이 표 3의 로봇 무게중심의 위치와 회전 범위 안의 값이 되는 것이다. 다음은 무게중심의 위치와 회전 값에 대한 각 관절들의 역기구학 해를 구한다. 그리고 역기구학에서 구한 관절변수를 순기구학에

입력시켜 순기구학 및 자코비안을 해석하여 토크를 계산하게 된다. 이 토크 값으로 목적함수가 계산되고 목적함수에 별점함수가 추가로 계산되어 최종적으로 선택연산자를 위한 적합도함수가 계산된다. 별점함수로는 발생 토크가 최대 허용 토크를 벗어나는 경우와 역기구학의 해가 존재하지 않는 경우를 구속조건으로 하여 부과한다. 적합도함수가 계산되면 이 값에 따른 선택과 교배, 돌연변이가 차례로 수행되며 최대 세대수동안 반복하게 된다. 그러면 최종적으로 무게중심의 위치와 회전값을 출력하게 된다. 그리고 목적함수 계산을 위하여 토크 비율이 사용되었는데 토크 비율을 계산하기 위해서는 각 관절의 최대 허용 토크 값을 설정할 필요가 있다. 그 값들은 표 4와 같다.

2. 궤도계획

유전알고리즘을 통해 찾아낸 자세를 목표 자세로 하여 움직이고자 할 때는 각 관절의 속도와 가속도 그리고 위치 등이 고려되어야만 한다. 만약 이를 무시하게 되면 구동부의 허용 속도를 초과하거나, 과도한 속도에 의한 충격량의 증가로 예기치 않은 현상이 발생할 수 있다. 따라서 로봇이 초기 자세에서 목표 자세로 이동할 때, 출발점에서는 서서히 가속이 되고 목표점에 이르러서는 서서히 감속이 될 수 있게 함으로써 충격량의 발생을 최소화 하고, 더불어 부드러운 로봇의 움직임을 구현할 수 있다. 또한 초기 자세에서 목표 자세로 가기 위한 경로도 최단거리 직선으로 할 것이 아니라면 특정한 경유점을 거치게 할 것인지도 지정할 필요가 있는데 이와 같은 것들이 궤도계획을 통하여 가능하게 된다.

궤도계획은 크게 관절공간법과 직교공간법으로 나뉜다. 관절공간법(joint space schemes)은 로봇에 일어나는 운동을 그 관절값으로 표현하는 것이다. 초기 자세의 관절값과 목표 자세의 관절값을 가지고 로봇을 제어하는 것으로서 관절값의 중간 위치에서는 어떤 예상외의 문제가 발생할 가능성이 존재한다. 관절공간법에는 속도를 지정하는 3차 다항식 방법과 속도와 가속도를 동시에 지정하는 5차 다항식 방법이 있다.

3차 다항식 궤도계획 방법은 로봇의 초기 위치와 방위가 알려져 있고 목표 위치의 위치와 방위도 알려져 있을 때 운동 부분의 시작과 끝의 속도를 0으로(또는 다른 지정값) 설정하여 다항식의 계수를 구하는 방법이다. 5차 다항식 궤도계획 방법은 3차 다항식 궤도계획에서 정의된 운동의 초기 및 최종 위치와 속도에 초기 및 최종 위치의 가속도를 정의하는 것이다. 이때는 경계조건이 총 6개가 되며 궤도계획을 위해서는 5차 다항식이 사용된다.

직교공간법(cartesian space schemes)은 초기자세와 목표 자세의 경로를 정하고 그 경로를 직교 좌표계에 의해 지정하고 그 경로의 중간점마다 역기구학 방정식을 해석하여 관절변수를 계산하여 로봇을 제어하는 방법이다. 로봇의 목표 자세가 그림 6과 같다고 한다면, 초기 자세의 좌표(X_b, Z_b, R_{y_b})와 목표 자세의 좌표(X_t, Z_t, R_{y_t})가 정해진다. 이 좌표를 직선으로 잇는 경로를 설정하였을 때 경로상의 임의의 z를 x에 관한 함수로 나타낼 수 있다.

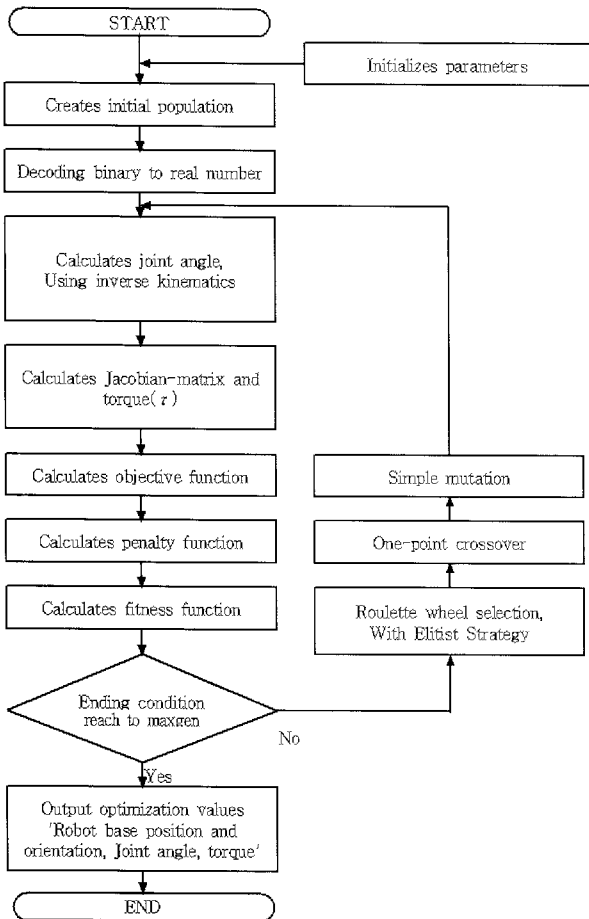


그림 5. 유전알고리즘을 이용한 최적화 흐름도.
Fig. 5. Flowchart of optimization using a GA.

표 4. 관절의 최대 허용 토크.
Table 4. Max. torque of the joints.

Joint No	Max. torque [Nm]	Joint No	Max. torque [Nm]	Joint No	Max. torque [Nm]
Joint1(θ_{11})	57.8	Joint7(θ_{21})	57.8	Joint13(θ_{31})	57.8
Joint2(θ_{12})	189.8	Joint8(θ_{22})	189.8	Joint14(θ_{32})	57.8
Joint3(θ_{13})	189.8	Joint9(θ_{23})	189.8	Joint15(θ_{33})	57.8
Joint4(θ_{14})	227.8	Joint10(θ_{24})	227.8	Joint16(θ_{41})	57.8
Joint5(θ_{15})	189.8	Joint11(θ_{25})	189.8	Joint17(θ_{42})	57.8
Joint6(θ_{16})	189.8	Joint12(θ_{26})	189.8	Joint18(θ_{43})	57.8

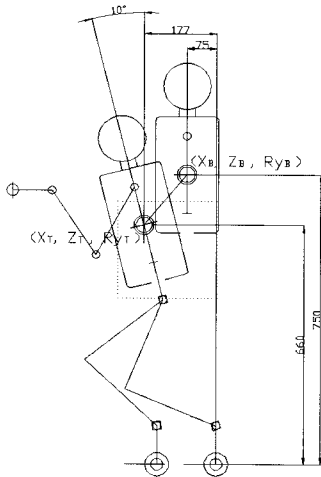


그림 6. 직교공간법.
Fig. 6. Cartesian space schemes.

$$\frac{z - Z_T}{x - X_T} = \frac{Z_T - Z_B}{X_T - X_B} \quad (6)$$

$$z = \left(\frac{Z_T - Z_B}{X_T - X_B} \right) \cdot (x - X_T) + Z_T$$

이 직선 경로를 원하는 스텝으로 나누게 되면,

$$x = X_B + \frac{X_T - X_B}{Total Step} \cdot Current Step \quad (7)$$

$$Ry = Ry + \frac{Ry_T - Ry_B}{Total Step} \cdot Current Step$$

에 의해 x와 Ry를 구하고 (6)에 의해 z를 구하면 된다. 그리고 이렇게 구한 x, z, Ry를 가지고 역기구학을 이용하여 각 관절각을 구하게 된다. 이 방법은 가장 기본적인 직교공간법이며 이렇게 구한 궤도계획은 속도가 등속인 형태가 된다.

본 논문에 적용된 로봇의 경우 무게중심의 움직임을 기준으로 하여 오른쪽 다리 관절들을 5차 다항식에 의해 제어하게 되면, 나머지 왼쪽 다리와 두 팔은 별도의 5차 다항식에 의해 속도 및 가속도를 제어할 수 있는 것이 아니라 오른쪽 다리 관절의 움직임에 의해 발생하는 무게중심의 위치변화에 대한 역기구학 해를 만족하는 값으로 구속된다. 따라서 본 논문에서는 관절공간법보다는 직교공간법을 이용하여 궤도계획을 수행하고 기본적인 직교공간법에 속도 프로파일을 적용하여 가감속 구간이 존재하는 궤도계획을 수행한다.

그림 6에서 먼저 직선 경로를 경유하기 위한 시간을 정하고 그에 따른 속도 프로파일을 구상한다. 그리고 초기 자세의 좌표(X_B, Z_B, Ry_B)와 목표 자세의 좌표(X_T, Z_T, Ry_T)에서 경로의 직선 길이를 dist라고 하면,

$$dist = \sqrt{(X_T - X_B)^2 + (Z_T - Z_B)^2} \quad (8)$$

이 된다. 이 거리를 원하는 시간(4초)에 가고자 설정하고 그림 7(a)와 같은 속도 프로파일을 구상하면 그림 7(b)와 같이 원하는 시간 스텝에서의 거리를 구할 수 있다. 같은 방

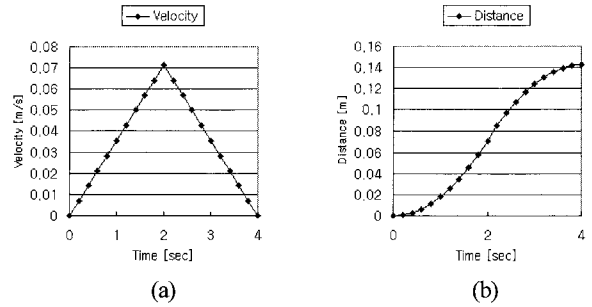


그림 7. 속도 및 거리 프로파일.
Fig. 7. Profile of the velocity and distance.

법으로 각도의 변화도 구할 수 있다. 만약 단순한 직선경로가 아닌 특정 위치를 지나는 곡선인 경우에는 시작점에서 목표점까지의 펼친 길이를 (9)를 이용하여 구한다.

$$\int ds = \int \sqrt{dx^2 + dy^2} = \int \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \cdot dx \quad (9)$$

IV. 시뮬레이션 및 결과

1. 유전알고리즘 최적화 결과

3장에서 기술한 최적화 방법을 검증하기 위하여 먼저 표 5의 목적함수들을 사용하여 각각 시뮬레이션을 수행하고 각각의 최적화 결과가 목적함수에 부합되는지를 확인하였다. 각각의 목적함수에서 구하고자 하는 바는 다음과 같다.

Case 1은 로봇의 전체적인 작용력 증대를 위하여 전체

표 5. 최적화를 위한 목적함수.

Table 5. Objective function for optimization.

No	Name	Objective function	Purpose
1	Case 1	$F(x) = \sum_{i=1}^n \left(1 - \left \frac{\tau_i}{\tau_{max_i}} \right ^2 \right)$	Maximize rate of remain torque
2	Case 2	$F(x) = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - x) / n \right\}}$	Minimize standard deviation of rate of torque
3	Case 3	$F(x) = \wedge (\tau_{max_i} - \tau_i)$	Maximize minimum remain torque

표 6. Case 1에 대한 결과.

Table 6. Table of result for Case 1.

Item	Initial posture (A)	Result posture (B)	Difference (A) and (B)	Rate of change [%]
Sum of torque [Nm]	142.8187	114.4241	-28.3946	-19.88
Sum of torque ratio [%]	101.05	75.22	-25.83	-25.56
Minimum remain torque [Nm]	46.49	53.22	6.73	14.49
Sum of deviation	0.1459	0.0457	-0.1002	-68.65

여유 토크 비율을 최대화 하는 목적이며, Case 2는 관절 전체에 토크가 고르게 분배되기 위하여 발생 토크 비율의 표준편차를 최소화하기 위한 목적이다. 마지막으로 Case 3은 상대적으로 용량이 작은 구동부가 장착된 팔의 토크를 최소화하기 위한 것이며 이를 통한 작용력 증대가 그 목적이 된다. 이것은 마치 사람이 무거운 물체를 밀고자 할 때 팔을 수직으로 곧게 펴는 것과 같이, 상대적으로 약한 관절 부위의 발생 토크를 줄이기 위한 목적이 된다.

각각의 Case 1, Case 2, Case 3에 대한 결과 자세와 토크 변화를 각각 그림 8, 9, 10에 표현하였고 그 변화 수치도 요약하여 각각 표 6, 7, 8에 나타내어 비교하였다.

Case 1의 목적함수를 적용하여 최적화 한 결과 전체 발생 토크 비율의 합이 101.05에서 75.22로 25.56%가 감소하였다. 이것은 감소한 만큼의 작용력 증대가 가능해진다는 것을 의미한다. 그리고 그림 7(a)에서 보면 로봇의 자세가 Ry 방향으로 -8° 기울어진 것을 볼 수 있는데 이처럼 일반적으로 인간이 취하는 자세와 다르게 나온 이유는 인간의 척추에 해당하는 관절이 로봇에게는 적용이 되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그림 8(b)를 보게 되면 왼쪽과 오른쪽 고관절 부분의 토크 비율이 매우 크게 줄어든 반면 오른쪽 무릎의 토크 비율이 큰 폭으로 늘어나면서 전체적으로 토크 비율의 차이가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 초기화 자세보다는 전체적으로 토크 분포가 고르게 분포되어진 것이라 할 수 있다.

Case 2의 목적함수를 적용하여 최적화 한 결과 전체 발생 토크 비율의 합이 101.05에서 78.76으로 22.06%가 감소

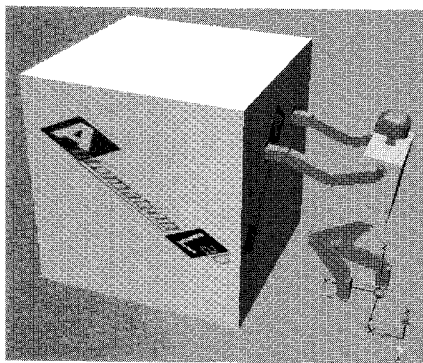
표 7. Case 2에 대한 결과.

Table 7. Table of result for Case 2.

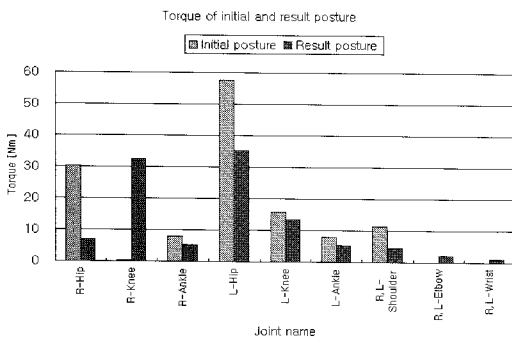
Item	Initial posture (A)	Result posture (B)	Difference (A) and (B)	Rate of change [%]
Sum of torque [Nm]	142.8187	115.1658	-27.6529	-19.36
Sum of torque ratio [%]	101.05	78.76	-22.29	-22.06
Minimum remain torque [Nm]	46.49	53.39	6.90	14.84
Sum of deviation	0.1459	0.0441	-0.1018	-69.75

하였다. 이것은 Case 1의 25.56%보다 그 감소량이 작다. 그러나 Case 2 목적함수의 의도인 토크 비율의 표준편차는 Case 1의 0.0457보다 작은 0.0441을 나타내고 있다. 전체적으로 토크 비율의 차이가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이렇게 Case 1과 Case 2의 결과 값이 매우 유사한 이유는 두 경우 모두 토크 비율 값을 가지고 목적함수를 계산했기 때문인 것으로 판단된다. 그림 9(a)에서 보듯 로봇의 자세도 Case 1에서 처럼 Ry 방향으로 -8° 기울어졌으며 그림 9(b)처럼 왼쪽과 오른쪽 고관절 부분의 토크 비율이 매우 크게 줄었고 오른쪽 무릎의 토크 비율이 많이 높아지면서 Case 1과 유사한 토크 비율의 변화를 볼 수 있다.

Case 3의 목적함수를 적용하여 최적화 한 결과 전체 발생 토크 비율의 합이 101.05에서 71.10으로 29.95%가 감소



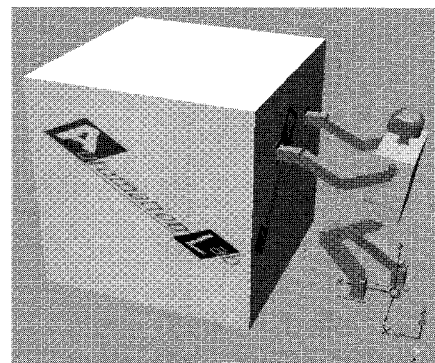
(a) Posture



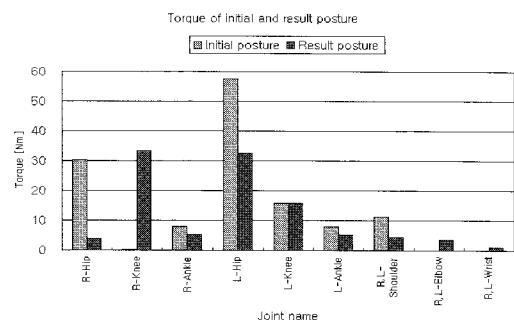
(b) Torque

그림 8. Case 1에 대한 자세 및 토크.

Fig. 8. Posture and torque for Case 1.



(a) Posture



(b) Torque

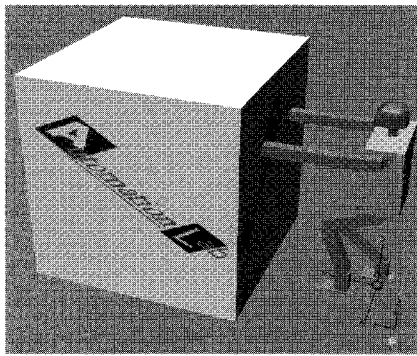
그림 9. Case 2에 대한 자세 및 토크.

Fig. 9. Posture and torque for Case 2.

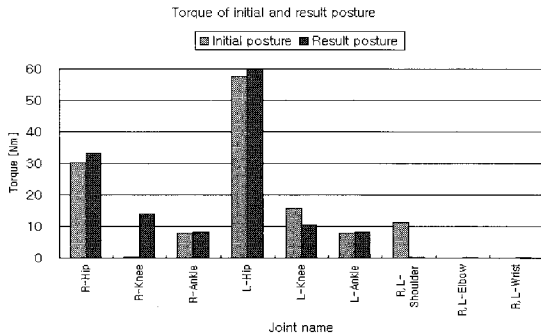
표 8. Case 3에 대한 결과.

Table 8. Table of result for Case 3.

Item	Initial posture (A)	Result posture (B)	Difference (A) and (B)	Rate of change [%]
Sum of torque [Nm]	142.8187	135.5673	-7.2514	-5.08
Sum of torque ratio [%]	101.05	71.10	-29.95	-29.64
Minimum remain torque [Nm]	46.49	57.47	10.98	23.62
Sum of deviation	0.1459	0.0111	-0.0349	-23.90



(a) Posture



(b) Torque

그림 10. Case 3에 대한 자세 및 토크.

Fig. 10. Posture and torque for Case 3.

하였다. 그러나 더 중요한 것은 팔을 특이점 근처의 자세로 가져감으로써 Case 3 목적함수의 의도인 팔의 토크 최소화를 가져왔다는 것이다. 이것은 사람이 물체를 밀면서 손바닥에 느껴지는 힘이 커질 때 팔 관절의 토크 최소화를 위하여 무의식적으로 취하는 동작과 일치하게 된다. 그림 10(b)에서 보듯 팔 관절의 최대 허용 토크가 57.8[Nm]인데 최적화 자세에서의 팔 관절의 남아 있는 여유 토크가 57.47로 발생 토크가 0.33에 불과하다. 이렇게 팔 관절의 토크 비율이 현저하게 줄어든 반면 Case 1과 Case 2에서 큰 변화를 보였던 왼쪽과 오른쪽 고관절 및 오른쪽 무릎의 토크 비율 변화는 매우 작은 결과를 확인할 수 있다.

2. 궤도계획 결과

유전알고리즘을 통하여 찾아낸 세 가지 자세 중에서 Case

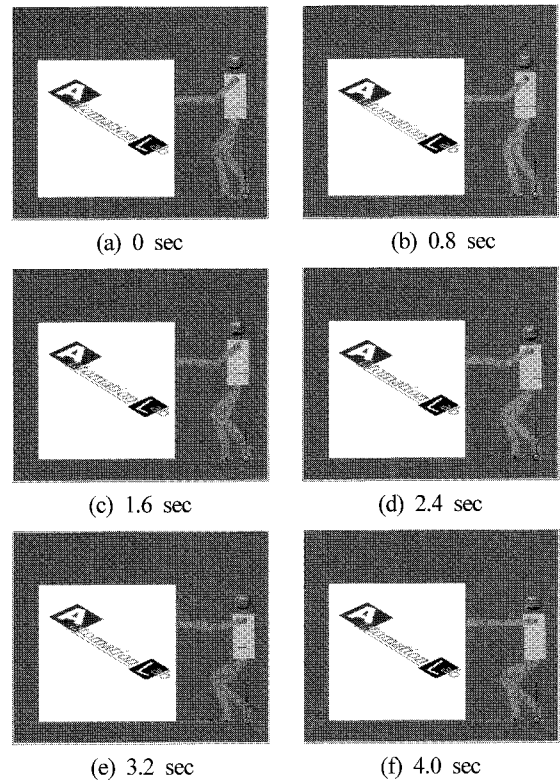


그림 11. Case 3의 궤도계획 결과.

Fig. 11. Result of trajectory planning for Case 3.

3의 최적화 자세를 대상으로 궤도계획을 수행하였다. 궤도 계획 방법은 3장에서 기술한 직교공간법을 사용하였고 여기에 가감속 궤도계획 데이터를 이용하여 속도 및 거리 프로파일을 만들어 적용하였다.

그림 11은 궤도계획에 따른 로봇의 움직임을 나타낸 것이다. 초기자세부터 4 step(0.8 sec)마다의 동작을 추출하여 표현하였다. 계획한 대로 초기자세의 속도 0을 시작으로 점차로 가속되다가 정점을 지나며 다시 감속을 시작해 최종 목표자세에서는 다시 속도가 0이 되는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용하여 휴머노이드 로봇의 전신협조 동작을 최적화 하였다. 최적화를 위해 전신 18자유도의 로봇을 모델링하고 순기구학을 해석하였으며, 이 로봇을 물체를 밀기 위한 준비 동작에 적용시켰다. 그리고 역기구학과 자코비안을 해석, 토크를 계산하였고 이러한 작업을 모듈화 시켜 유전알고리즘과 접목시켰다. 로봇 무게 중심의 위치와 회전값을 유전알고리즘의 설계변수로 하였고 그 값의 변화에 따른 각 관절 토크 값을 목적함수 계산에 사용하였다. 목적함수로는 의도하고자 하는 목적에 따라 세 가지를 사용하였으며, 그 결과 각 관절에 유전알고리즘의 목적함수에 부합하는 토크 분배가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 다리에 비해 상대적으로 용량이 작은 팔의 토크를 최소화하기 위한 목적함수 적용 시에는 인간처럼 팔의 자세를 특이점 근처로 가져감으로써 작용력의 증대가 가능해지는 결과를 나타내었다. 이것은 향후 로봇이

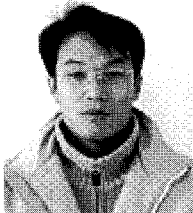
보행등의 기본적인 움직임에서 벗어나 실질적인 작업을 행하고자 할 때 인간처럼 자연스러운 신체 각 부의 전신협조 동작을 로봇에게도 구현할 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

그러나 본 논문에서의 유전알고리즘을 이용한 최적화 방법은 유전알고리즘의 특성상 계산 시간이 길기 때문에 로봇에게 실시간으로 적용하기에는 문제가 있다. 따라서 향후 신경회로망과 접목하여 오프라인에서의 유전알고리즘의 결과를 신경회로망에 학습시킨 후, 신경회로망을 통한 실시간 제어가 가능하게 하기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

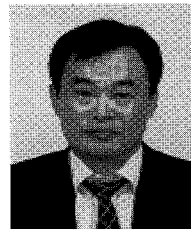
- [1] 김정엽, 박일우, 오준호, "휴머노이드 로봇 KHR-2의 개발," *ICASE MAGAZINE*, vol. 10, no. 4, pp. 13-18, July 2004.
- [2] 최형식, 전창훈, 오주환, "Automatic motion generator and simulator for biped walking robots," *韓國精密工學會 秋季學術大會論文集* pp. 948-953, 2004.
- [3] 공정식, 한경수, 김진걸, "A study on genetic algorithm-based biped robot system," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* vol. 20, no. 8, pp. 135-143, August 2003.
- [4] 김종태, 김진걸, "A study on the generation of balance trajectory for biped robot using genetic algorithm," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 5, no. 8, pp. 969-976, November 1999.
- [5] 김창부, 조현석, "A study on the trajectory optimization planning of biped walking machine," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* vol. 15, no. 3, pp. 157-167, March 1998.
- [6] 박성훈, 이수영, 정길도, 성영희, "Swing motion of miniaturized humanoid robot," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 267-272, March 2004.
- [7] 성영희, "소형 인간형 로봇의 개발," *ICASE MAGAZINE*, vol. 10, no. 5, pp. 22-27, September 2004.
- [8] H. Yoshida, K. Inoue, T. Arai, and T. Mae, "Mobile manipulation of humanoid robots optimal posture for generating large force based on statics," *International Conference on Robotics & Automation Washington, DC*, pp. 2271-2276, May 2002.
- [9] Y. Yokokohji, S. Nomoto, and T. Yoshikawa, "Static evaluation of humanoid robot postures constrained to the surrounding environment through their limbs," *International Conference on Robotics & Automation Washington, DC*, pp. 1856-1863, May 2002.

최 국 진



2005년 국립창원대학교 기계설계공학과 석사. 2005년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 자동화시스템 설계, 휴머노이드 로봇, 인공지능 및 최적설계.

홍 대 선



1982년 서울대학교 기계공학과 학사. 1986년 KAIST 생산공학과 석사. 1995년 KAIST 기계공학과 박사. 1982년~1997년 삼성항공산업(주) 수석연구원. 1997년~현재 국립창원대학교 교수. 관심분야는 조립라인 자동화, 인공지능, 원격모니터링 및 최적설계.

원격모니터링 및 최적설계.