

# 유전 알고리즘을 이용한 이족 보행 로봇의 계단 오르기 최적 보행 궤적 생성

論 文

58-2-25

## Optimal Trajectory Generation for Walking Up a Staircase of a Biped Robot Using Genetic Algorithm

金 銀 宿\* · 金 萬 錫\* · 金 鍾 旭<sup>†</sup>  
(Eunsu Kim · Manseak Kim · Jong-Wook Kim)

**Abstract** - In this paper, a humanoid robot is simulated and implemented to walk up a staircase using the blending polynomial and genetic algorithm. Using recently developed kinematics for a biped robot, four schemes for walking up a staircase are newly proposed and simulated separately. For the two schemes of landing a swaying leg on the upper stair, the joint trajectories of seven motors are particularly optimized to generate an energy-minimal motion with the guarantee of walking stability. The proposed scheme of walking upstairs is validated by an experiment with a small humanoid robot.

**Key Words** : Optimization method, Heuristic algorithm, Humanoid, Biped robot, Walking staircase

### 1. 서 론

인간은 다양한 환경에서 근육이 소모하는 에너지를 최소화하는 보행궤적을 생성하며 안정하게 걷는다. 휴머노이드 연구자들은 이러한 인간의 보행과 비슷한 이족 보행 메카니즘에 관해 연구해 오고 있다. 아울러 휴머노이드가 인간에게 지능적인 서비스를 수행하기 위해서는 보행뿐만 아니라, 계단 오르기/내리기, 물건 옮기기 등의 연구도 추가적으로 필요하다.

이족 로봇의 보행에서 계단을 오르고 내리는 것에 대한 기준 관절궤적을 생성하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 일이다. 계단 오르기의 경우 궤적 생성 시 계단 위에 착지하는 발의 위치가 정확해야 하며, 발끝이 계단에 부딪히지 않아야 하고, 또한 안정도를 위해 영모멘트점(zero moment point, ZMP)이 지면에 접촉되어 있는 발의 convex hull 내에 존재해야 한다[1]. 또한 로봇의 이동성을 향상시키기 위해 배터리를 장착하는 경우, 모터에서 발생하는 토크의 합이 최소가 되어야 에너지 소비를 줄여 장시간 로봇을 운용할 수 있다[2].

이 모든 조건에 부합하는 궤적을 생성하는데 있어서 수학적 방법으로는 한계가 있으므로, 본 논문에서는 연산적 최적화 기법을 사용하여 궤적을 생성한다. 현재까지 이족로봇의 보행궤적 생성에 사용된 연산적 최적화 기법으로는 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)[3]과 dynamic encoding algorithm for searches(DEAS)[4] 등이 있다. 유전 알고리즘은 전역 최적화 성능이 강하며, DEAS는 지역 최적화 성능

이 강하므로 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용해서 전역 최적화를 수행한다.

궤적 생성 시 연산적 최적화 기법의 성능 못지않게 중요한 것이 이족 로봇의 정확한 기구학(kinematics)과 동역학(dynamics) 계산이다. 대부분의 이족보행 관련 논문에서는 2차원 모델에 대해 기구학과 동역학을 계산하고, 이를 이용해 최적의 궤적을 생성하여 simulation을 수행 한다. 그러나 이렇게 최적화된 궤적을 실제 로봇에 적용할 경우, 보행이 불안정해지는 문제가 발생한다. 그러므로 3차원 공간상에서 이족로봇의 기구학과 동역학을 직접적으로 계산할 필요가 있다. 저자의 선행 연구에서는 3차원 모델에 대해 두 2차원 평면에서의 회전 순서를 인위적으로 정해주고, 이에 대해 2차원 평면으로 투영(projection)함으로써 3차원 모델링을 시행하고, 이를 이족 보행의 관절 궤적 생성에 적용함으로써 이족 보행이 가능함을 simulation으로 보였다[5]. 그러나 이는 임의의 관절 움직임에 대해서는 기구학적 오차를 발생시키므로, 이족 보행 시 측면에서 본 평면(sagittal plane, 시상면)과 정면에서 본 평면(coronal plane, 관상면), 그리고 머리 위에서 본 평면(transverse plane, 횡평면) 내에서의 움직임을 투영 및 회전 기법을 이용하여 모델링하고, 이를 결합시키는 방법으로 3차원 상에서 모델링한 기법을 제안했다[6].

본 논문에서는 인간의 계단 오르기 동작을 모사하여, 안정적이면서도 전력 소모를 최소화 시키며 휴머노이드 로봇이 계단을 오를 수 있게 하는 관절궤적 생성 방법을 제안한다. 이를 위해 기존의 전체 보행 패턴 분석이 아닌 한 번의 계단 오르기 동작을 4단계로 세분화하여 다양한 높이와 폭의 계단에 대해서도 적응적으로 관절 궤적을 생성할 수 있고, 들어 올리는 다리의 관절은 유전 알고리즘을 이용하여 최소한의 에너지를 소모하도록 그 궤적을 최적화한다. 또한 제안된 방법으로 simulation에 의해 생성된 최적 관절궤적을 소형 휴머노이드 키트에 적용하여 계단 오르기 실험을 행함으로써 그 타당성을 검증한다.

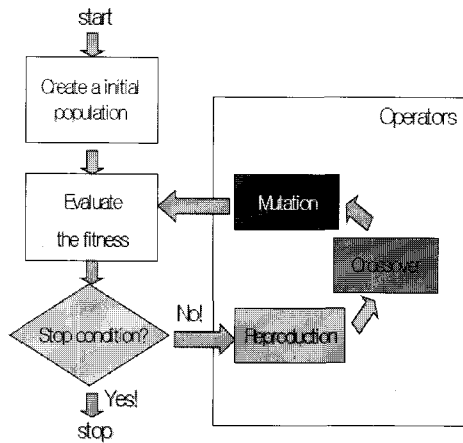
<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 東亞大學 電子工學科 專任講師 · 工博

E-mail : kjwook@dau.ac.kr

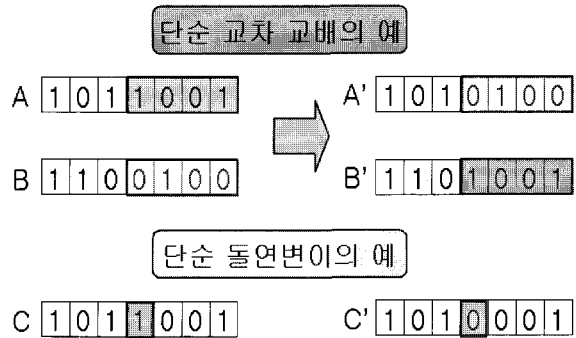
\* 準會員 : 東亞大學 電子工學科 碩士課程

接受日字 : 2008年 12月 11日

最終完了 : 2009年 1月 19日



(a) 유전자 알고리즘의 흐름도



(b) 교배와 돌연변이의 예

그림 1 유전 알고리즘의 구조

Fig. 1 Structure of genetic algorithm

2. 이족보행의 계단 보행 모델

2.1 적응 유전 알고리즘

GA는 강인하고, 전역적인 해를 구할 수 있기 때문에 많은 최적화 문제에 사용된다. GA는 그림 1(a)와 같이 세대를 진행시키며 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 연산을 반복적으로 수행한다. 이러한 유전 과정을 통하여 생성된 자손은 우월성에 비례하여 다음 세대에서 선택되어 재생산 되고, 정지조건이 만족되기 전까지 계속 반복된다. 이러한 연산은 문제에 맞는 목적 함수가 정의되고 문제의 탐색 공간과 유전자 간의 대응이 정의되기만 하면 다른 사전적인 정보 없이도 일반적인 문제에 대응이 가능하다[7].

일반적으로 GA의 적용 대상은 얻고자 하는 최적해에 대해 최적의 해로 생존할 수 있는 가능성을 가진 변수들의 이진 문자열(binary string)로 이루어진 집합이 되며 이를 개체군(population)이라고 한다. 유전자 연산자인 교배와 돌연변이는 그림 1(b)와 같은 방법으로 수행된다. 교배와 돌연변이가 이들 문자열에 대해 시행되면 개체군의 재생산은 이 연산자의 연산결과에 의한다. 개체군 내 각각의 개체인 염색체(chromosome)는 적합도(fitness) 함수에 의해 그 적합도를 부여 받게 되고, 높은 적합도를 가진 염색체일수록 다음 세대에서도 계속 생존할 가능성을 가지게 된다. 최적화 문제에 GA를 적용할 경우, 최적해에 근접할수록 더 높은 적합도를 가질 수 있도록 적합도 함수를 설정하면 세대수를 반복함에 따라 최적해에 가까운 염색체들이 생존하게 되며, 최종적으로 근사적 최적해에 수렴하게 된다.

본 논문에서는 GA의 전역탐색 능력을 유지하면서 수렴성을 향상시키기 위해 교배와 돌연변이 확률이 해집단의 수렴도에 따라 변화하는 적응 유전 알고리즘(Adaptive GA, AGA)을 사용하였다[8]. 기존 GA에서 교배 확률( $p_c$ )이 높으면 전역탐색의 수렴속도를 지연시키며 우수한 염색체의 오랜 존속이 힘든 반면, 해집단의 다양성을 유지할 수 있다. 그리고 돌연변이 확률( $p_m$ )이 높으면 일반적인 무작위 탐색

알고리즘과 유사해지는 반면, 최적해에 대한 조기 수렴을 방지하는 역할을 한다. 이처럼 GA 연산자를 위한 교배 및 돌연변이 확률의 설정은 GA의 수렴 특성을 좌우하는 가장 중요한 요소로 작용한다.

AGA는 현 개체군의 적합도 수렴 정도에 따라 교배와 돌연변이 확률을 적응적으로 변화시키는 특성을 가지고 있으며 이를 위해 개체군의 수렴 상태를 측정하는 파라미터로서 개체군의 최대 적합도(maximum fitness,  $f_{max}$ )와 평균 적합도(average fitness,  $\bar{f}$ ) 간의 차이를 사용한다. 일반적으로 최대-평균 적합도 차이는 GA의 수렴에 따라 그림 2처럼 점점 더 작아지는 경향이 있다.

따라서 각 연산자들의 수행 확률에 최대-평균 적합도 차이 정보를 기반으로 하는 적응도를 부여할 수 있으며, 적합도에 따른 진화수준을 다양하게 변화시킬 수 있다. 즉, 교배 및 돌연변이 확률은 최대-평균 적합도 차이에 비례하게 되는데, 그 때의  $p_m$ 과  $p_c$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 p_c &= k_1 (f_{max} - f') / (f_{max} - \bar{f}), & f' &\geq \bar{f} \\
 p_c &= k_3, & f' &< \bar{f} \\
 p_m &= k_2 (f_{max} - f) / (f_{max} - \bar{f}), & f &\geq \bar{f} \\
 p_m &= k_4, & f &< \bar{f}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기에서  $f$ 는 해당 염색체의 적합도를 의미하며  $f'$ 은 교배될 두 개체의 적합도 중 큰 값을 의미하고,  $k_1, k_2, k_3, k_4$ 는 적응성을 결정하는 계수 값들이다.

식 (1)에 의하면 높은 적합도를 가진 해는 낮은  $p_m$ 과  $p_c$  값이 부여되어 세대가 지나도 보존될 확률이 높고, 어느정도 수렴되어 평균 적합도가 최대 적합도와 유사해지면  $p_m$ 과  $p_c$ 는 높은 값이 되어 다양성을 강화하려 함을 알 수 있다. 그러므로 AGA의 이러한 메카니즘은 일반적인 GA의 수렴 과정에서 발생하는 조기 수렴 문제와 수렴 속도 문제를 개

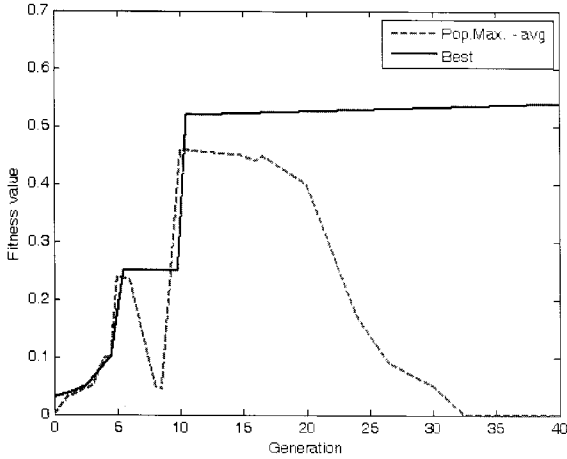


그림 2 최대-평균 적합도 차이  
Fig. 2 Variation of maximum fitness and average fitness

선할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 위에서 제시한 AGA의 강인한 전역 탐색 능력을 로봇의 최소한의 에너지 소비를 위한 궤적 파라미터 탐색에 사용한다.

2.2 휴머노이드 모델

인체의 일반적인 움직임은 보는 각도에 따라 인체를 세 가지 평면으로 분할하여 표현할 수 있다. 대부분의 이족 보행 논문에서는 3차원 상에서의 움직임을 표현하는 데 있어서, 로봇의 전·후진 움직임을 표현하는 시상면과 좌우 움직임을 표현하는 관상면 상에서 분리된 방법으로 보행궤적을 생성했다. 이 경우 각 관절의 3차원 좌표를 매 시간별로 정확히 계산할 수 없으므로 기구학과 동역학, ZMP 계산 시 오차가 발생할 수밖에 없다.

본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 투영 기법을 도입하여 직진 보행 시 각 관절의 3차원 순시 좌표를 결합된 형태로 표현하는 방법을 사용했다[6]. 그림 3은 로봇 하지를 시상면과 관상면에서 모델링한 것을 링크와 관절 각도로써 각각 표현한 것이다. 시상면 각도인  $\theta_i, i=1, \dots, 6$ 는 로봇의 측면에서 본 하지 관절의 각도를 나타내며, 이 중  $\theta_1, \theta_2$ 는 지지하는 다리의 발목과 무릎관절 각도이며,  $\theta_3$ 는 상체와 지지하는 다리의 대퇴부가 이루는 각도를 의미한다. 그리고  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 움직이는 다리의 각 관절 각도를 의미한다. 본 논문에서는 이족 보행 시 시상면 각도의 궤적을 최적화하는 것이 아니라, 각 관절에 장착된 모터의 회전 각도들을 최적화한다. 이는 보행 시 하지 관절의 실제 회전 각도를 알기 때문에 최적화 시 관절별 최대, 최소 탐색 영역을 적절히 설정할 수 있고, 계산된 최적 궤적을 중앙 제어부에서 바로 각 관절 모터로 전송함으로써 하드웨어 구현 시 편리하기 때문이다. 관절 모터 각도는 그림 3(a)에서  $\theta_i^j, i=an, kn, th, j=l, r$ 로 표현되어 있으며, 각 첨자는 발목(an), 무릎(kn), 대퇴부(th) 관절 모터를 나타내고  $l, r$ 은 왼쪽 다리와 오른쪽 다리를 의미한다. 특히 관절 모터 각도는 지지하는 다리와는 상관없이 관절 별로 고유하게 할당되어 있기 때문에, 관절별 제어를 설계할 때 용이하게 사용될 수 있다. 관절

모터와 시상면 각도 간에는 일대일 관계를 가지며 선행 연구 [4]에 관계식이 표현되어 있다.

관상면 상의 각도인  $\phi$ 는 로봇의 정면에서 본 관절의 각도로 로봇의 상체를 정면에서 안정적으로 좌우로 움직일 때 사용된다. 그리고 그림 3(b)의  $\psi_i, i=l, r$ 는 대퇴부 모터를 횡평면 상에서 대퇴부 관절 축을 기준으로 회전시켜 로봇의 전진 방향을 변하게 할 때 사용되는 각도를 의미한다. 이로써 그림 3은 로봇이 임의의 방향으로 전·후진을 하거나, 횡보를 하거나, 방향을 틀 수 있기 위한 모든 관절 각도를 포함하고 있음을 알 수 있다.

먼저 이족 로봇의 기구학을 계산하기 위해 링크를 두 평면으로 투영시키도록 한다. 그림 3(b)에서  $x$ 축을 중심으로  $\phi^\circ$  만큼 회전하면 그림 3(a)의 평면(시상면)에서 보았을 때 해당 링크의 길이가  $\cos \phi$ 배로 변화 되는 것을 알 수 있다. 상체와 발목의 각도를 양쪽 평면에서 모두  $90^\circ$ 로 유지하기 위해, 양쪽 다리의 발목관절과 대퇴부 관절의 관상면 회전 각도를 모두  $\phi^\circ$ 로 동일시하면 다음과 같이 투영된 링크 길이 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1^s &= l_1 \cos \phi(t), \quad l_2^s = l_2 \cos \phi(t), \quad l_3^s = l_3, \\ l_4^s &= l_4 \cos \phi(t), \quad l_5^s = l_5 \cos \phi(t), \quad l_6^s = l_6. \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $l_1, \dots, l_6$ 는 로봇의 실제 링크 길이를 의미한다.

식 (2)는 시상면에서 보았을 때 투영된 링크의 길이를 나타내며, 각 관절 좌표의  $x$ 좌표와  $z$ 좌표 계산 시 사용된다. 식 (2)를 사용하여 관상면에서 보았을 때 사상된 링크의 길이를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} l_1^c &= l_1 S_1, \quad l_2^c = l_2 S_{12}, \quad l_3^c = l_3 S_{123}, \\ l_4^c &= l_4 S_{1234}, \quad l_5^c = l_5 S_{12345}, \quad l_6^c = l_6 S_{123456}. \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서,  $S_{12 \dots j}$ 는  $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_j)$ 를 의미한다.

각 관절의 3차원 좌표는 상기 링크 관계식과 그림 3의 기하학적 형상관계를 이용하여 용이하게 계산할 수 있으며, 모든 하지 관절에 대해 계산된 3차원 좌표를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + l_1^s C_1, \quad y_1 = y_0 - l_1^s S_\phi, \quad z_1 = z_0 + l_1^s S_1, \\ x_2 &= x_1 + l_2^s C_{12}, \quad y_2 = y_1 - l_2^s S_\phi, \quad z_2 = z_1 + l_2^s S_{12}, \\ x_3 &= x_2, \quad y_3 = y_2 - l_7, \quad z_3 = z_2, \\ x_4 &= x_3 + l_4^s C_{1234}, \quad y_4 = y_3 - l_4^s S_\phi, \quad z_4 = z_3 + l_4^s S_{1234}, \\ x_5 &= x_1 + l_5^s C_{12345}, \quad y_5 = y_4 - l_5^s S_\phi, \quad z_5 = z_4 + l_5^s S_{12345}, \\ x_6 &= x_5 + l_6^s C_{123456}, \quad y_6 = y_5, \quad z_6 = z_5 + l_6^s S_{123456} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,  $C_{12 \dots j}$ 와  $S_\phi$ 는 각각  $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_j)$ ,  $\sin(\phi)$ 를 나타낸다. 또한 지지하는 다리가 오른쪽 다리라면 식 (4)에서  $y_3$  좌표의 수식만  $y_3 = y_2 + l_7$ 으로 바뀌고 나머지는 동일하다. 이는 식 (4)가 휴머노이드에 특화되었지만 충분히 일반화된 기구학 수식임을 나타낸다.

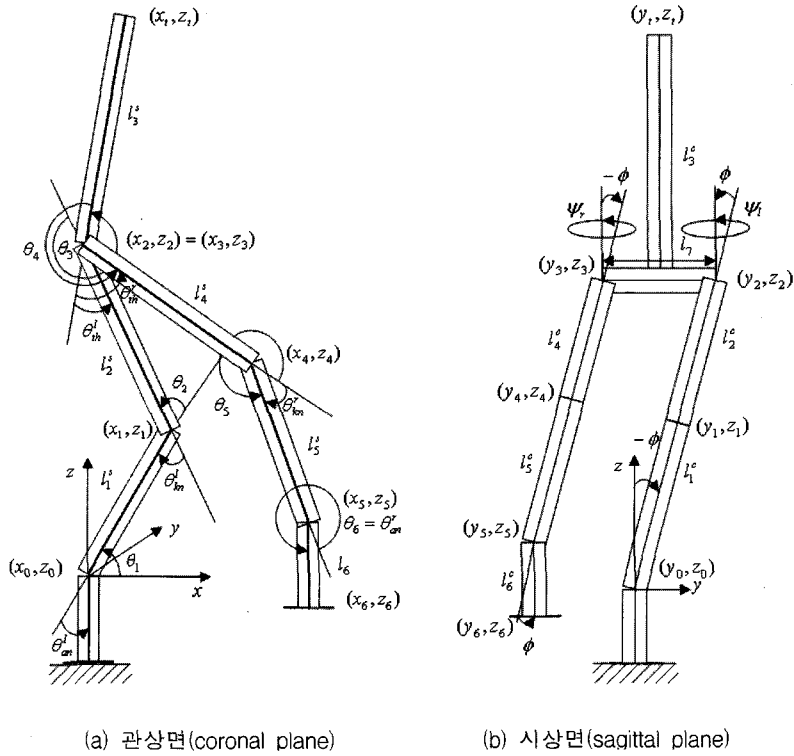


그림 3 이족 로봇의 평면별 2차원 모델  
Fig. 3 Models of a biped robot in two-dimensional planes

그 다음 단계로서 지지하는 다리의 골반 관절 축을 기준으로 횡평면에서  $\psi$  만큼 회전했을 때의 좌표관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그림 4는 지지하는 다리의 골반 관절 좌표인  $(x_2, y_2)$ 를 축으로 삼아 왼쪽으로 전진 방향을 바꿀 때,  $k$ 번째 관절인  $(x_k, y_k)$ 가 횡평면 상에서  $\psi$  만큼 회전하여  $(x_k^t, y_k^t)$  위치로 변환되는 것을 나타낸다. 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_k^t \\ y_k^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k - x_2 \\ y_k - y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하여 지지 축에서 회전 시 각 관절의  $x, y$ 좌표의 회전 좌표를 계산할 수 있으며, 왼쪽 다리의 골반 관절을 축으로  $\psi_l$ 만큼 회전시킨 후의 전체 3차원 관절 좌표를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1^t &= x_1, & y_1^t &= y_1, & x_2^t &= x_2, & y_2^t &= y_2, \\ x_3^t &= x_2^t + l_7 S_{\psi_l}, & y_3^t &= y_2^t - l_7 C_{\psi_l}, \\ x_4^t &= x_3^t + C_{\psi_l} l_4^s C_{1234} + S_{\psi_l} l_4^s S_{\phi}, \\ y_4^t &= y_3^t + S_{\psi_l} l_4^s C_{1234} - C_{\psi_l} l_4^s S_{\phi}, \\ x_5^t &= x_4^t + C_{\psi_l} l_5^s C_{12345} + S_{\psi_l} l_5^s S_{\phi}, \\ y_5^t &= y_4^t + S_{\psi_l} l_5^s C_{12345} - C_{\psi_l} l_5^s S_{\phi}, \\ x_6^t &= x_5^t + C_{\psi_l} l_6^s C_{123456}, & y_6^t &= y_5^t + S_{\psi_l} l_6^s C_{123456}, \\ z_i^t &= z_i, & i &= 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6)$$

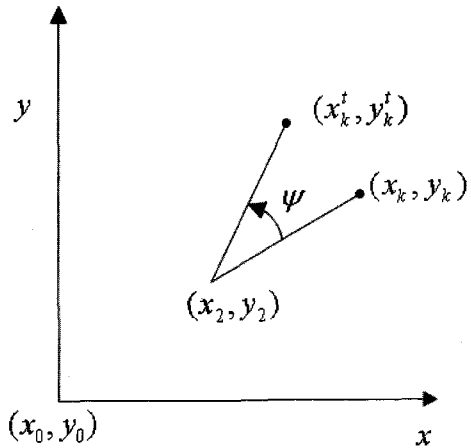
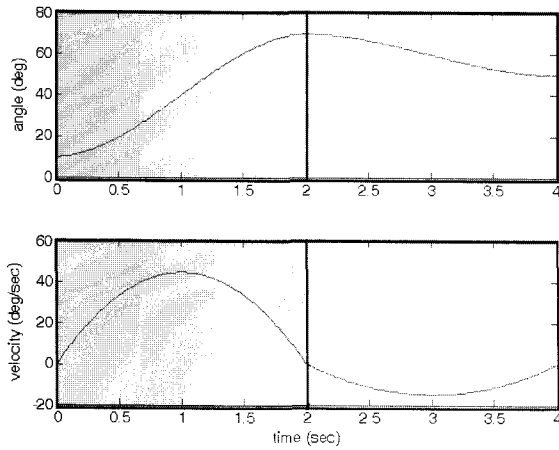


그림 4 횡평면에서의 회전 예  
Fig. 4 Example of a rotation in the transverse plane

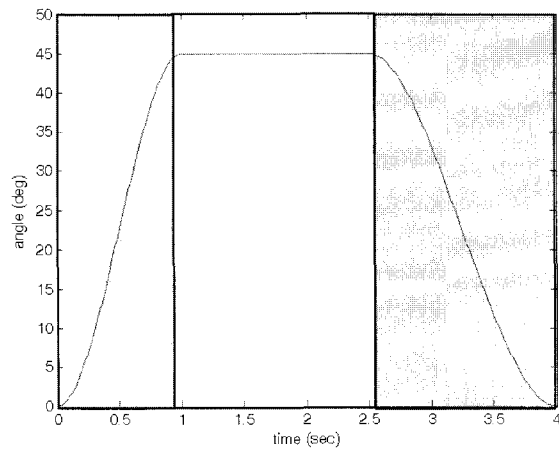
본 논문에서는 계단을 직진해서 올라가는 경우를 고려하므로,  $\psi_l = 0$ 으로 두면 식 (6)은 식 (4)와 동일하다.

로봇의 동역학을 계산하기 위해 각 관절 모터에서 발생시키는 토크는 다음과 같이 Euler-Lagrange 수식을 사용해서 표현할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^6 d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 c_{ijk} \dot{q}_i \dot{q}_j + g_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, \dots, 6. \quad (7)$$



(a) 2개의 부분 궤적을 가지는 궤적



(b) 3개의 부분 궤적을 가지는 궤적

그림 5 혼합 다항식의 예

Fig. 5 Example of blending polynomials

여기에서  $q_i$ 는 일반화된 관절 좌표,  $g_k$ 는 중력 벡터,  $d_{ij}$ 는 관성 행렬  $D(q)$ 의 원소,  $\tau_k$ 는  $k$ 번째 관절 모터에서 발생시키는 토크, 그리고  $c_{ijk}$ 는 Christoffel 기호로서 다음과 같이 정의된다[9].

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (8)$$

2.3 최적화된 관절궤적 생성

본 논문에서는 관절모터의 궤적을 AGA를 이용하여 생성하고, 혼합 다항식으로써 근사화 한다[5]. 혼합 다항식은 전체 궤적의 경유점 사이를 부분 궤적으로 분할하고, 각 부분 궤적에 대해 주어진 각도와 각속도 값을 이용해서 3차 다항식(cubic polynomial)의 계수를 구하여 얻어지는 다항식이다 [9]. 즉, 어떤 부분 궤적의 초기 시간  $t_0$ 와  $t_f$ 에 대해 다음식 (9)와 같이 각도와 각속도 조건이 주어졌다고 가정하자. 이 때 이 조건을 만족시키는 3차 다항식을 구하면 식 (10)과 같다.

$$q(t_0) = q_0, q(t_f) = q_1, \dot{q}(t_0) = v_0, \dot{q}(t_f) = v_1 \quad (9)$$

$$q(t) = a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + a_3(t-t_0)^3 \quad (10)$$

$$a_0 = q_0, a_1 = v_0,$$

$$a_2 = \frac{3(q_1 - q_0) - (2v_0 + v_1)(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^2},$$

$$a_3 = \frac{3(q_0 - q_1) - (v_0 + v_1)(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^3}$$

그림 5는 혼합 다항식으로 구현한 궤적의 예를 나타낸 것으로, 그림 5(a)는 2개의 부분 궤적을 가지는 혼합 다항식이고, 그림 5(b)는 3개의 부분 궤적을 가지는 경우이다.

본 논문에서는 시상면 관절 모터 각도인  $\theta_i^h$  ( $i=an, kn, th$ ,  $j=l, r$ )에 대해서는 두 개의 부분 궤적을 이용해서 하나의 모터 회전 궤적을 근사화한다. 이 경우  $t_0 \sim t_m$  구간과  $t_m \sim t_f$  구간에서 부분궤적을 만든 후, 이어 붙여서 하나의 궤적을 만드는 경우 결정해야 할 계수는 다음과 같이 총 9개가 된다.

$$p_2 = [t_0 \ t_m \ t_f \ q_0 \ q_m \ q_f \ v_0 \ v_m \ v_f] \quad (11)$$

식 (11)에서 중복탐색을 피하기 위해 시간 계수는  $t_m = \frac{t_0 + t_f}{2}$ 로 설정하였고, 각 관절의 초기 속도와 최종 속도는 보행의 시작과 끝을 부드럽게 하기 위해  $v_0 = v_f = 0$ 으로 설정했다. 또한 계단 오르기 시에는 다리를 바꾸어가며 보행하므로 보행의 시작과 끝부분에서 ZMP의 불안정성을 보인다. 이 문제점을 해결하기 위해 보행의 시작과 종료시의 관절각도  $q_0$ 와  $q_f$ 는 적절한 각도 값을 할당해 주었다. 그러므로 식 (11)에서 최종 미지수로 남은 값은  $q_m$ 과  $v_m$ 이 되며 이의 최적 값을 AGA로 탐색한다.

관상면 관절각  $\phi$ 는 시상면 관절과는 달리 보행 안정성을 위해  $0^\circ$ 에서 시작하여(직립 상태,  $q_0 = 0$ ), ZMP 안정도를 만족시키는 일정한 각도를 장시간 유지한 후, 다시  $0^\circ$ 로 복귀해야 한다( $q_f = 0$ ). 이 경우 최소 세 개의 부분 궤적이 필요하며, 전체 궤적을 구성하는 계수는 다음과 같이 총 12개가 된다.

$$p_3 = [t_0 \ t_{m1}^\phi \ t_{m2}^\phi \ t_f \ q_0 \ q_{m1} \ q_{m2} \ q_f \ v_0 \ v_{m1} \ v_{m2} \ v_f] \quad (12)$$

식 (12)에서 ZMP 안정도에 중요한 역할을 하는 것은 두 중간 시간  $t_{m1}^\phi, t_{m2}^\phi$ 와 중간 각도  $q_{m1} = q_{m2} = \phi_{ZMP}$ 이며, 각 경계점에서 부드러운 각도 변화를 위해

$v_0 = v_{m1} = v_{m2} = v_f = 0$ 이라는 조건을 주면 결국 3개의 미지수  $t_{m1}^{\phi}, t_{m2}^{\phi}, \phi_{ZMP}$ 가 남고 이를 AGA로 최적화한다.

결과적으로 안정되면서도 최소한의 토크로 휴머노이드가 발걸음을 옮기기 위해 최적화해야 할 전체 파라미터를 나타내면 다음과 같다.

$$X = [\theta_{an}^l(t_m), \theta_{an}^i(t_m), \theta_{kn}^l(t_m), \theta_{kn}^i(t_m), \theta_{th}^r(t_m), \theta_{th}^i(t_m), \theta_{kn}^r(t_m), \theta_{kn}^i(t_m), \theta_{an}^r(t_m), \theta_{an}^i(t_m), t_{m1}^{\phi}, t_{m2}^{\phi}, \phi_{ZMP}] \quad (13)$$

상기 파라미터 중  $\theta_{th}^l$  과  $\theta_{th}^i$  이 없는 이유는, 상체를 직각으로 유지하는 조건  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2}$  에 의해  $\theta_{th}^l$  이 자동적으로 계산되기 때문이다.

계단 오르기 시 최적의 관절 패턴을 생성하기 위해서는 각 관절의 소비 에너지와 ZMP 안정도, 보행 시 자세 조건, 착지하는 발 중심점의 위치 등이 동시에 고려되어야 하므로 비용함수의 미분 식을 계산할 필요가 없는 연산적 최적화 기법이 사용되어야 한다. 본 논문에서는 AGA를 이용하여 아래의 비용함수를 최소화시키는 관절 제적 파라미터를 탐색한다.

$$\begin{aligned} J(X) &= \gamma_c T_s \sum_{m=1}^N \tau(m)^T \tau(m) + P(X), \\ \tau(m) &= [\tau_1(m) \tau_2(m) \dots \tau_6(m)]^T, \\ P(X) &= \gamma_1 \left| \frac{x_6(T) - (x_0 + S)}{S} \right| + \gamma_2 \left| \frac{z_6(T)}{h_f} \right| + \\ &\quad \gamma_3(\text{violation of swaying leg's minimum height}) + \\ &\quad \gamma_4(\text{violation of joint limit angles}) + \\ &\quad \gamma_5(\text{violation of ZMP stability}). \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서 T와 N은 시뮬레이션 시 보행 주기와 샘플 데이터 개수를 의미하며(샘플링 타임  $T_s = T/N$ ), S와  $h_f$ 는 보폭과 계단 높이를 의미한다. 그리고  $\gamma_c$ 와  $\gamma_i, i=1, \dots, 5$ 는 최소화해야 할 토크의 가중치와 벌칙함수  $P(X)$ 의 각 항에 대한 가중치를 각각 의미한다. 벌칙함수의 각 항은 반드시 만족시켜야 하는 조건들이므로  $\gamma_i, i=1, \dots, 5$ 는  $\gamma_c$ 에 비해 상대적으로 수십 또는 수백 배 큰 값을 설정해야 한다.

### 2.3 계단 보행 정의

본 논문에서는 기존의 방법인 보행 패턴 추출 방식이 아닌 보행의 패턴을 분석하여 임의적으로 계단 오르기 동작을 4개의 단계로 나누어 정의한다. 인간의 계단 오르기 동작을 분석하면, 첫 번째 단계로서 움직이는 발이 계단에 발을 올릴 때 까지 반대쪽 다리는 무게중심을 유지한다. 그리고 무게 중심을 계단에 올린 발로 이동시킨 다음, 계단 아래에 있던 다리를 위쪽으로 끌어 올린다. 그리고 마지막 마무리로서 윗 계단에서 최초 직립 상태를 유지한다. 이와 같은 인간의 계단 오르기 동작 패턴을 분석하여 1단의 계단 오르기

주기를 4개의 단계로 나눌 수 있다.

앞에서 분석한 인간의 계단 오르기 패턴을 이족 로봇에 적용하면, 첫 번째 단계로서 로봇의 발끝이 계단에 부딪히지 않게 하기 위해 제자리에서 한쪽 다리를 계단 높이 이상으로 들어 올린다. 다리를 일정 높이 까지 들어 올리는 최종 좌표는 역기구학(inverse kinematics)을 이용하여 구할 수 있다.

먼저 몸이 좌측으로 기운 상태에서 오른 발이 지면에 있을 때 오른발의 중심점의 좌표는 식 (4)를 이용하여 아래 식 (15)와 같이 구할 수 있다. 이 좌표에 대해 z축으로 계단 높이인  $h_f$  만큼 수직으로 들어 올렸을 때의 좌표는 식 (16)과 같다. 그리고 들어 올린 발이 지면과 수직이 되기 위해서는 식 (17)의 조건을 만족시켜야 한다.

$$(x_6, y_6, z_6) = (x_0, y_0 - l_7, 0) \quad (15)$$

$$(x_6', y_6', z_6') = (x_0, y_0 - l_7, h_f) \quad (16)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 = -\frac{\pi}{2} \quad (17)$$

현재 직립 상태이고 지지하는 왼쪽 다리의 시상면 각도는 전혀 움직이지 않았으므로  $\theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = \theta_3 = 0$ 이 되고, 이를 이용해서 식 (15)~(17)을 풀면 다음 식(18)과 같은 관계가 성립한다. 식 (18)을 모터 각도로 변형 시켜서 식 (16)의 조건을 만족 시키는 각도 조건을 구하면 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} x_6' &= x_0 + l_4^s \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_4\right) + l_5^s \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_4 + \theta_5\right) \\ &\quad + l_6^s \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) = x_0 \\ y_6' &= y_0 - l_1 S_o - l_2 S_o - l_7 - l_4^c S_\phi - l_5^c S_\phi = y_0 - l_7 \\ z_6' &= z_3 + l_4^s \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_4\right) + l_5^s \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_4 + \theta_5\right) \\ &\quad + l_6^s \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = h_f \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} l_4^s \cos\left(\theta_{th}^r - \frac{\pi}{2}\right) + l_5^s \cos\left(\theta_{th}^r - \theta_{kn}^r - \frac{\pi}{2}\right) &= 0 \\ S_\phi \left\{ l_1 \left( 1 + \sin\left(\theta_{th}^r - \theta_{kn}^r - \frac{\pi}{2}\right) \right) + l_2 \left( 1 + \sin\left(\theta_{th}^r - \frac{\pi}{2}\right) \right) \right\} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$l_1^s + l_2^s + l_4^s \sin\left(\theta_{th}^r - \frac{\pi}{2}\right) + l_5^s \sin\left(\theta_{th}^r - \theta_{kn}^r - \frac{\pi}{2}\right) - h_f = 0$$

위의 식을 만족하는 각도를 첫 번째 단계 최종 관절 각도로 둔다. 하지만 위의 식은 비선형 연립 방정식이므로 AGA를 이용해서 근사해를 구할 수 있다. 첫 번째 단계는 목표 높이까지 다리를 들어 올리는 것이므로, 들어 올리는 다리의 에너지 최소화는 고려하지 않는다. 즉, 실제로 움직이는 모터의 초기 각도부터 계산된 최종 각도 값까지 등속으로 회전하게 한다.

두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 계단 높이 이상 들어 올린 다리를 계단위에 올려놓는 단계이다. 지지하는 발바닥 안에 ZMP를 유지하고 위쪽 계단으로 다리를 내뻐는다. 이

때 다리를 뺀 보폭은 로봇의 발길이 보다 큰 보폭으로 움직이고, 계단과 발은 90도를 유지하도록 한다. 최소의 에너지를 이용해서 다리를 뺀기 위해 혼합 다항식을 사용해서 각 관절 모터의 궤적을 근사화하고, AGA로 비용함수 식 (14)를 최소화 한다.

세 번째 단계는 계단에 올려놓은 다리가 지지하는 다리가 될 수 있도록 무게 중심을 위쪽 계단의 발로 이동시키는 단계이다. 이 때 안정적인 자세를 만들기 위해, 계단 위에 있는 발바닥 안으로 ZMP를 이동하고 계단 아래에 있는 발은 뒤꿈치를 들어 올림으로써 지면과 닿는 면적을 최소화한다. 최종 관절 각도는 첫 번째 단계와 유사한 방법으로 역기구학을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 기구학에 있어서 첫 번째 단계에서는 원점  $(x_0, y_0, z_0)$ 이 아래 계단에 위치했지만, 세 번째 단계에서는 원점이 위쪽 계단에 올려놓은 다리의 발목에 위치하는 것이 차이점이라고 할 수 있다. 계단 아래에 있는 다리의 대퇴부 모터의 각도는 위쪽 계단에 올려놓은 다리의 관절 각도를 기준으로, 계단 높이  $h_f$ 와 계단 아래에 있는 다리의 길이  $l_5$ 를 이용해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_4 = \left( \cos^{-1} \left( \frac{h_f^2 - 2l_5^2}{-2l_5^2} \right) - \pi \right) \quad (20)$$

여기에서 계산된 관절 각도는 DH 각도이므로  $\theta_{km}^r = \theta_4 - \pi$ 의 관계를 이용해서 모터 실제 각도 값으로 변환할 수 있다. 계단 아래에 있는 오른쪽 다리는 무릎을 일직선으로 뺀 자세를 취하기 때문에,  $\theta_{kr}^r = -\theta_3 = 0$ 이 된다. 그 이유는 최대한 계단 아래의 다리가 무게중심에서 벗어날 수 있도록 하기 위해서이다.

마지막으로 계단 아래에 있는 다리의 발목 모터의 최종 각도는 앞에서 구한 대퇴부 모터의 각도를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_6 = \left( \cos^{-1} \frac{\sqrt{l_{ftor}^2 + l_6^2}}{\sqrt{l_{ftor}^2 + l_6^2} - l_{cor}} \right) - \theta_4 \quad (21)$$

여기에서  $l_{cor}$ 는 관상면에서 본 계단 아래의 다리 길이이며,  $l_{ftor}$ 는 발목부터 발바닥까지의 링크 길이를 나타낸다. 위 식에서도 DH 각도로 계산하였기 때문에 실제 모터 각도로 변환하기 위해서는  $\theta_{an}^r = \theta_6$  라는 기하학적 관계를 이용하면 된다. 식 (20)과 (21)의 계산 결과인  $\theta_{km}^r, \theta_{th}^r, \theta_{an}^r$ 을 최종 각도로 두고 첫 번째 단계와 마찬가지로 등속으로 관절 모터를 회전시킨다.

마지막 단계는 계단위에 있는 발로 지지하면서 아래 쪽에 있는 발을 계단 위로 들어 올려 직립상태가 되게 하는 과정이다. 계단 아래에 있는 다리를 들어 올릴 때 계단에 부딪히지 않도록 해야 하며, ZMP는 계단위에 있는 다리에 유지하도록 해야 한다. 이러한 요구 사항들은 비용함수 식 (14)의 벌칙함수에 포함되며 비용함수 최소화시 고려하여 계산하게 된다.

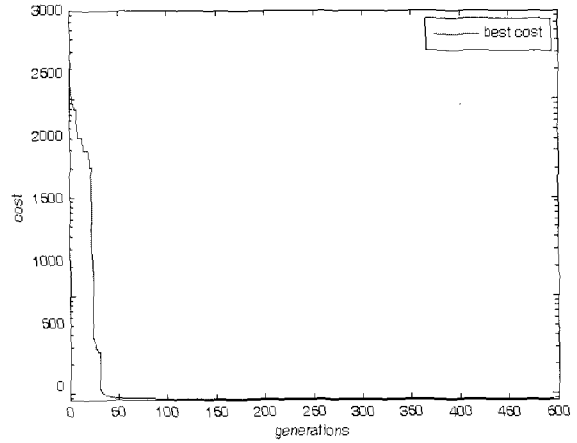


그림 6 AGA를 이용한 최적화 시 비용함수 감소 양상  
Fig. 6 Aspect of cost decrease in optimization with AGA

첫 번째와 세 번째 단계를 제외한 나머지 단계는 3차원 공간에서 기구학과 동역학을 계산하여 최종위치를 생성한 후 그 궤적을 혼합 다항식의 계수로 하여 최적궤적을 AGA를 이용하여 생성한다.

본 논문에서 제시한 계단 보행의 방법은 복잡한 계산식을 필요로 하지 않고, 단계별로 적용이 가능하므로 상기 내용에서 제시한 간편한 동역학과 기구학 계산법만 사용해서 빠른 궤적 생성을 가능케 한다.

### 3. 실험 결과

본 논문에서는 로봇의 1단 계단 오르기를 4단계로 세분화하고, 발을 들어서 윗 계단으로 올릴 때의 관절 궤적을 혼합 다항식과 AGA를 이용하여 생성했다. 생성된 궤적은 실제 관절 모터 각도의 궤적이며, 이를 DH 각도로 변환하여 기구학과 동역학을 계산했다. 그리고 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해, simulation으로 계산된 최적 궤적을 휴머노이드 키트에 적용하였다.

AGA 파라미터인 교배 확률과 돌연변이 확률, 개체군 수 등의 설정 값은 표 1과 같고, 그림 6은 AGA를 이용하여 이족 로봇의 모터 궤적을 생성할 때 2.3절에서 제시한 비용함수 값이 감소하는 양상을 보여준다.

표 1 AGA 파라미터 설정 내용  
Table 1 Specification of AGA parameters

파라미터	설정 값
Crossover ratio	$k_1 = 0.85, k_3 = 1.0$
Mutation ratio	$k_2 = 0.5, k_4 = 0.05$
Population size	50
Maximum generation	500
각 변수당 chromosome 길이	10비트

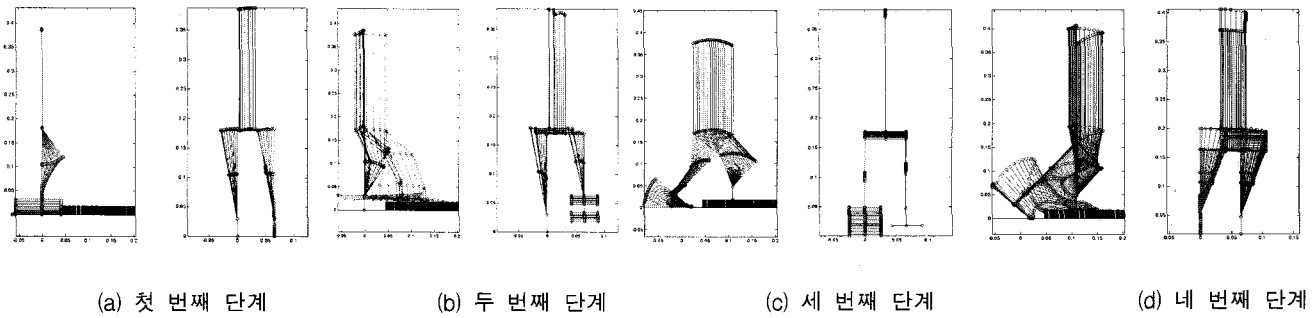


그림 7 계단 오르기의 단계 별 simulation 결과  
 Fig 7 Simulation results of walking up a stair case

그림 7은 휴머노이드 모델을 이용해서 계단 오르기를 제시한 방법과 같이 4개의 단계로 나누어 simulation 한 결과를 보인다. 휴머노이드 모델에 대한 수치들은 표 2에 나타나 있으며 계단 보행 조건은 다음과 같다.

- 계단 보행 보폭 : 0.11 m
- 계단 보행 주기 : 13.5 초
  - 첫 번째 단계 : 1.5 초
  - 두 번째 단계 : 1.5 초
  - 세 번째 단계 : 5.0 초
  - 네 번째 단계 : 5.5 초
- 계단 높이 : 0.18 m

표 2 휴머노이드 모델을 구성하는 링크의 길이 값  
 Table 2 Specification on link lengths comprising a humanoid model

	$l_1, l_5$	$l_2, l_4$	$l_3$	$l_6$
길이(cm)	7.65	7.65	20.6	2.95
무게(g)	79.1	29.3	1246.4	153.8

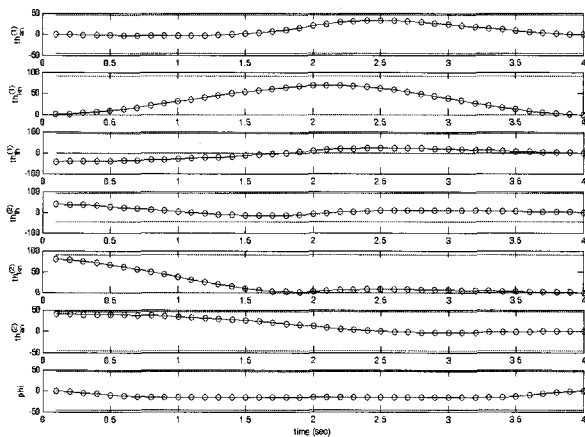


그림 8 관절 모터 별 궤적  
 Fig 8 Optimally generated trajectories of each joint motor

그림 8은 두 번째 단계에서 들어 올린 왼쪽 다리를 부드럽게 내려놓는 동안 각 관절 모터가 회전한 궤적을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 모터가 관절별 최대/최소 각도 범위를 초과하지 않고, 부드럽게 회전하는 것을 알 수 있다. 그림 9는 컴퓨터에서 simulation을 통해 얻은 각 단계별 관절 모터 최적 궤적을 상용 휴머노이드 키트에 적용한 실험 결과를 보인다. 이 그림은 미리 계산된 각도 데이터를 각 관절 모터에 지령 값으로 주고 총 13.5초 동안 4단계의 동작을 하는 로봇을 10장의 스냅 샷으로 구성한 것이다. 각각의 사진을 보게 되면 그림 7에서 시뮬레이션 한 것과 동일하게 부드럽게 계단을 오르는 것을 볼 수 있다. 또한 개루프 제어를 수행하여 피드백 값이 없이 수행하였지만, 성공적으로 계단 오르기를 수행함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저자에 의해 최근에 새롭게 제안된 기구학을 이용하여 기존 연구 방법처럼 보행 전체를 패턴화한 방법이 휴머노이드의 계단 오르기의 보행 방법을 4단계로 나누어 간편하고 정확하게 계산할 수 있는 방법을 제안했다. 제안된 방법은 총 10개의 하체모터에 대한 최적 궤적들을 유전 알고리즘을 이용해 생성했고, 생성된 궤적들이 계단 오르기 시 필요한 구속 조건들을 모두 만족시키도록 계산되었다. 그리고 제안된 계단 오르기 궤적 생성의 적용 가능성을 검증하기 위해 최적 관절 궤적 데이터를 통한 시뮬레이션과 해당 데이터를 휴머노이드 키트에 적용해 보았으며, 성공적으로 계단 오르기를 수행할 수 있었다. 또한 상용 휴머노이드 키트에의 적용은 다른 휴머노이드 로봇에도 적용 가능하다는 것을 보여주었다. 향후 연구는 이족보행과 계단 오르기를 이용하여 할 수 있는 다양한 동작, 예를 들어 계단 내려가기, 뛰기, 물건 들고 이동하기, 방향 전환 등의 동작을 제안된 방법과 같이 안정적으로 정확하게 구현하는 것을 목표로 한다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.



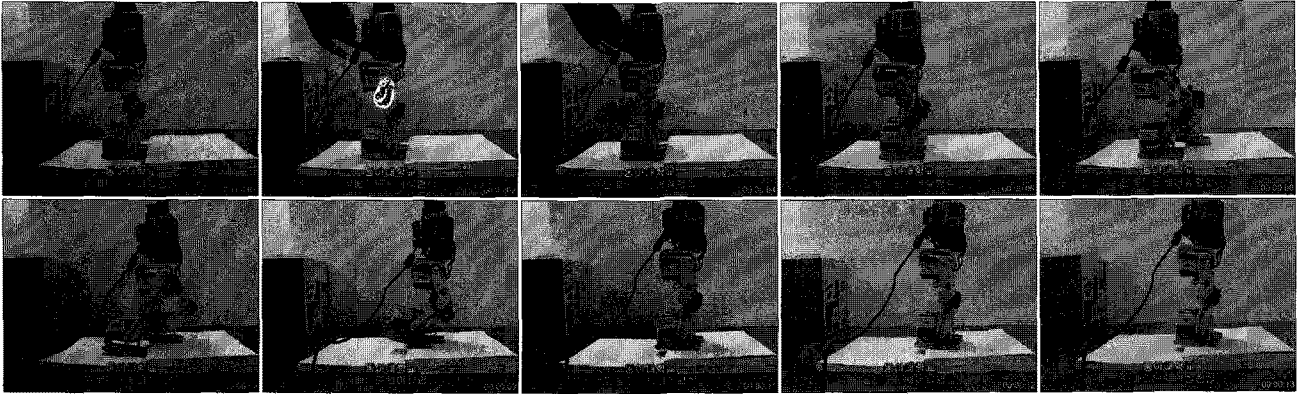


그림 9 휴머노이드 키트의 계단 오르기 실험  
 Fig. 9 Experiment of walking up a stair case with a humanoid kit

참 고 문 헌

- [1] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 3, June 2001.
- [2] 최무성, 권오홍, 강민성, 박종현, "유전자 알고리즘을 이용한 이족 보행로봇의 최적 설계 및 최적 보행 궤적 생성", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제10권, 제9호, pp. 833-839, 2004.
- [3] K. S. Jeon, O. Kwon, and J. H. Park, "Optimal trajectory generation for a biped robot walking a staircase based on genetic algorithm," *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2837-2842, 2004.
- [4] T. Kim and J. -W. Kim, "Planning walking patterns of a biped robot with uDEAS optimization," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 2693-2698, Seoul, Korea, Oct. 2007.
- [5] 김태규, 김종욱, "유전 알고리즘을 이용한 이족보행 로봇의 궤적 생성", 제어·로봇·시스템공학회 대전·충청지부 학술대회, pp. 187-191, Dec. 2007.
- [6] T. Kim, E. Kim, and J. -W. Kim, "Development of a humanoid walking command system using a wireless haptic controller," *International Conference on Control, Automation and System*, pp. 1178-1183, Seoul, Korea, Oct. 2008.
- [7] 윤영수, "An experimental comparison of adaptive genetic algorithms," 한국지능정보시스템학회 논문지, 제13권, 제3호, pp. 62-82, 2007.
- [8] M. Srinivas, and L. M. Patnaik, "Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 4, pp. 659-667, April, 1994.
- [9] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley and Sons, Inc. 2006.

저 자 소 개



**김 은 수 (金銀宿)**  
 1983년 1월 26일생. 2008년 동아대 전자공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정  
 Tel : 051-200-5579  
 E-mail : tacctics@hotmail.com



**김 만 석 (金萬錫)**  
 1983년 1월 23일생. 2001년~현재 동아대 전자공학과 학사과정 재학중.  
 Tel : 051-200-5579  
 E-mail : luhyoun@nate.com



**김 중 옥 (金鍾旭)**  
 1970년 10월 24일생. 1998년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 2004년~2006년 포스코 기술연구소 전기강관 연구그룹 연구원, 2006년~현재 동아대 학교 전자공학과 조교수  
 Tel : 051-200-7714  
 Fax : 051-200-7712  
 E-mail : kjwook@dau.ac.kr