

# GA를 이용한 휴머노이드 로봇의 넘어짐 자세 생성

## Generation of Falling Motion for Humanoid Robot Using GA

안광철<sup>1</sup>, 조영완<sup>2</sup>, 서기성<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 서울시 성북구 서경대학교 전자공학과  
E-mail: {dockan, ksseo}@skuniv.ac.kr

<sup>2</sup> 서울시 성북구 서경대학교 컴퓨터공학과  
E-mail: ywcho@skuniv.ac.kr

### 요 약

본 논문은 휴머노이드 로봇의 넘어짐 자세 시 충격량 최소화를 위한 GA 기반의 자세 자동 생성 방법을 제안한다. 관절 공간에서 관절각의 최적 조합으로 충격량을 최소화 할 수 있는 자세의 자동 생성 기법을 구현하였다. 제안된 기법의 검증은 위하여 Sony QRIO 로봇에 대해서 ODE 기반 물리적 특성의 시뮬레이션이 가능한 Webots를 이용하여 실험을 수행하였다.

**Key Words** : Falling Motion Generation, Humanoid Robot, Genetic Algorithm, Sony QRIO

## 1. 서 론

다리로 걷는 보행로봇은 바퀴 로봇보다 장애 지형이나 평평하지 않은 지형에서도 이동이 가능하고, 특히 휴머노이드 로봇의 경우, 인간과 가장 근접한 외형과 동작 모양새를 갖추고 있어 여러 분야에서 널리 사용 될 전망이다.

휴머노이드 로봇에 대한 연구는 주로 보행에 초점이 맞추어져 있고[1-4], 일부 전신 동작에 대한 제어도 시도되고 있다[5].

다른 한편으로, 휴머노이드 로봇은 지면을 지지하고 있는 면적이 좁고 무게중심 또한 높게 위치하여 전복 상황 시 충격으로 로봇이 손상을 입을 확률이 높다.

따라서 안정적인 보행도 중요하지만 전복 될 경우에 손상 및 충격을 최소화하기 위한 넘어짐 자세의 제어가 요구된다[6,7]. 휴머노이드 로봇의 넘어짐 자세 생성은 로봇에 가해지는 충격량을 최소화 할 수 있도록 시간의 변화에 따른 관절 움직임의 최적 조합을 설계해야 하는 어려운 문제이다.

지금까지 넘어짐 자세 연구는 사람의 동작을 모방하여 반복적인 시뮬레이션을 통해 수작업으로 구해지는 방식[6] 또는 움직임을 수학적으로 해석한 제어방법[7] 등이 있다.

기존 연구의 문제점은 반복적인 시뮬레이션을 통해 얻어진 경우[6], 로봇의 형태나 모델이 바뀔시, 새로 시간이 많이 소요되는 반복적인 작업을 다시 하여야 하며, 구한 결과가 최적의

자세인지를 판별하기가 어렵다. 수학적 제어에 의한 접근법[7] 또한 넘어지는 동작의 주요 관절들의 관계를 정의하고, 각 관절의 모멘트를 분석하여 관절각의 변화 속도에 제동을 가하는 방법을 사용함으로써, 전체 관절 움직임 조합에 의해 생성될수 있는 충격량 최소화 자세와는 거리가 있다.

본 연구에서는 GA(Genetic Algorithm)[8]를 이용하여 전방 넘어짐 자세에 대한 자동 생성 기법을 제안한다. 다양한 모델에 대해서 적용이 가능하며, GA의 성능에 따라 최적에 가까운 값을 탐색할 수 있는 장점이 존재한다. 즉, 관절공간에서의 관절각의 조합을 GA로 탐색하여 충격량을 최소화하는 넘어짐 자세 생성 방법을 구현한다. 제안된 기법의 검증은 위하여 Sony QRIO 로봇에 대해서 ODE 기반의 물리적 특성을 포함하고 정교한 시뮬레이션이 가능한 Webots[9]을 이용하여 실험을 수행하였다.

## 2. 휴머노이드 로봇의 넘어짐 자세

### 2.1 휴머노이드 로봇 모델

넘어짐 자세 생성을 위한 휴머노이드 로봇 모델은 Sony QRIO(Quest for Curiosity)를 사용하였다(그림1). QRIO는 크기가 260(W)x190(D)x580(H)mm, 중량은 약 6.5kg로서 전부 38개의 관절로 구성된다. 보행 속도는 비평지 면에서 최고 약 0.36 km/h, 수평, 평지면에서

최고 약 1.2 km/h로 보행할 수 있다[6].

표 1에 관절의 종류와 움직임 범위 값이 나와 있다.

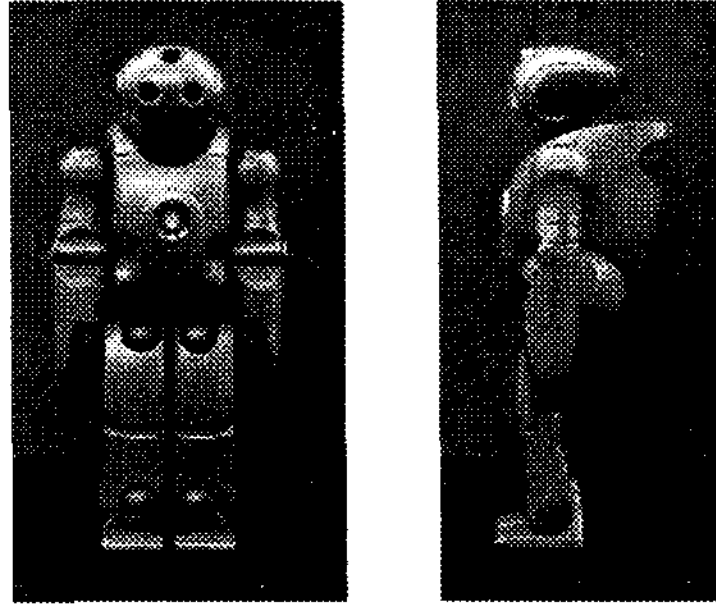


그림 1. Sony QRIO 로봇 모델

표 1. QRIO 관절각의 한계 값

Part	Joint Name	Motion	Joint Limits [rad]	
			Min.	Max.
Torso (2 DOFs)	back 1	Torso pitch	-1.0	+2.0
	back 2	Torso roll	-0.5	+0.5
Left Leg (6 DOFs)	left hip 1	Left hip yaw	-1.4	+1.7
	left hip 2	Left hip pitch	-0.9	+1.6
	left hip 3	Left hip roll	-0.5	+1.0
	left knee	Left knee pitch	-0.2	+2.5
	left ankle 1	Left ankle pitch	-0.7	+0.7
	left ankle 2	Left ankle roll	-0.7	+0.7
Right Leg (6 DOFs)	right hip 1	Right hip yaw	-1.4	+1.7
	right hip 2	Right hip pitch	-0.9	+1.6
	right hip 3	Right hip roll	-0.5	+1.0
	right knee	Right knee pitch	-0.2	+2.5
	right ankle 1	Right ankle pitch	-0.7	+0.7
	right ankle 2	Right ankle roll	-0.7	+0.7
Left Arm (3 DOFs)	left shoulder 1	Left shoulder pitch	-3.14	+3.14
	left shoulder 2	Left shoulder roll	0.0	+3.14
	left elbow	Left elbow pitch	0.0	+2.8
Right Arm (3 DOFs)	right shoulder 1	Right shoulder pitch	-3.14	+3.14
	right shoulder 2	Right shoulder roll	0.0	+3.14
	right elbow	Right elbow pitch	0.0	+2.8
Head (2 DOFs)	neck	Neck yaw	-2.0	+2.0
	neck tilt	Neck pitch	-0.3	+1.1

## 2.2 넘어짐 자세의 관절 좌표계 표현

휴머노이드 로봇의 넘어짐 자세는 초기의 서 있는 자세에서 최종 넘어져 있는 자세까지 시간에 따른 각 관절각의 조합으로 구성된 집합들로 나타내어질 수 있다. 각 관절값들은 상한과 하한의 한계 범위내에서 임의의 실수값을 가지며, 하나의 임의 시점에서 구성될 수 있는 관절각들의 조합은 큰 공간이 된다.

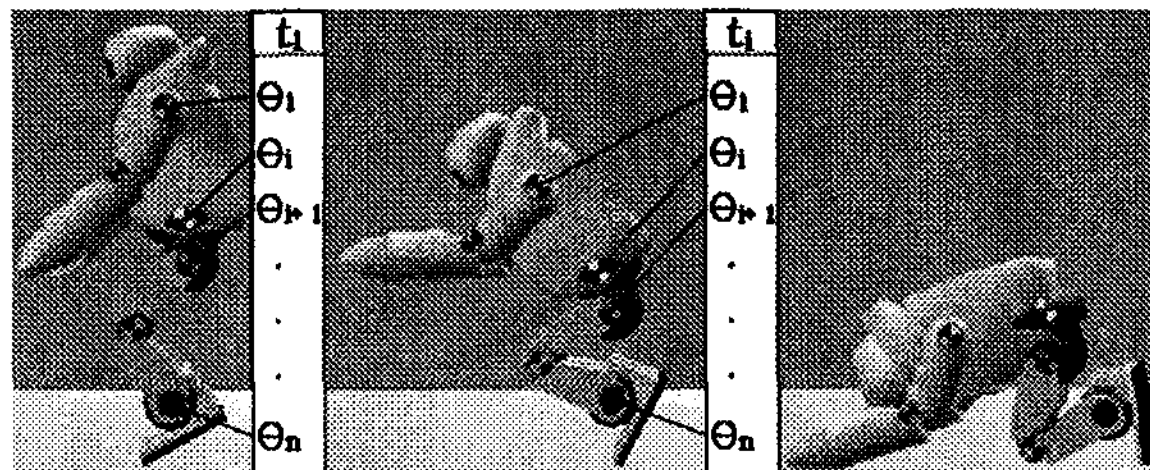


그림 2. 자세 생성을 위한 관절각 조합

더욱이 전체 넘어짐 자세는 한 시점에서의

관절값 집합이 여러 구간점에서( $t_1, t_2, \dots, t_n$ ) 전체 집합으로 확장되어야 하므로, 전체 해 공간은 매우 방대해진다(그림 2).

## 3. GA 기반 넘어짐 자세 자동 생성

GA를 이용하여 관절 좌표계 상에서의 관절 각 값을 시점에 따라 변화시켜 안정적인 넘어짐 자세를 생성하는 방법으로 지면과 접촉되는 부위에 압력 센서를 부착시켜 그 값이 최소가 되는 동작을 얻음으로써 충격량을 최소로 하는 동작을 생성할 수 있다. 이러한 방법은 로봇의 모델 및 환경이 변하여도 최소한의 수정만으로 적용이 가능하며 최적의 동작을 근사할 수 있기 때문에 큰 장점을 갖는다.

### 3.1 GA 염색체(chromosome) 구성

휴머노이드 로봇이 전방으로 넘어지는 경우를 가정하고, 전방향의 주요 관절 동작인 피치(pitch) 동작만을 고려하였다. 좌우 대칭을 가정하고 총 6개 관절을 염색체로 구성하였다.

로봇의 초기 자세는 모든 관절각 값이 '0'이며, 이는 염색체에 포함되지 않는다. 반복적 실험을 통하여 동작의 마무리 시점은 약 640ms로 고정시켰으며, 각 시점은 해당 관절의 염색체 크기로 균등 분할한다.

그림 3은 각 관절의 염색체 크기가 3개씩 조합되어 총 18개의 스트링으로 표현된 염색체를 보이고 있다.

시점 \ joint	t1	t2	t3
shoulder	01	...	
elbow			
back1			
hip2			
knee			
ankle1		...	18

그림 3. 염색체 표현

### 3.2 적합도 함수

넘어짐 자세 생성을 위한 적합도 함수의 구성은 ZMP(Zero Moment Point)와 CoM(Center of Mass)의 거리 차와 손, 팔꿈치, 무릎 압력 센서 값을 누적 시킨 경우와 ZMP가 아닌 CoM의 원점으로부터 변화된 CoM의 거리 차와 압력센서 값을 지면과 닿는 순간부터 일정 스텝 동안 누적 시킨 경우로 구성하였다.

표 2는 적합도 함수로 사용되어진 수식을 보이고 있다.

경우 1의 적합도 함수는 ZMP가 고정된 위치가 아니므로 지면에서 CoM과의 거리가 불규칙적으로 변화하며 압력센서 값 또한 모든 구간을 누적시키지만, 경우 2의 적합도 함수는 CoM의 원점을 기준점으로 하여 거리를 계산하고 압력센서가 켜진 순간부터 일정 구간 동안의 센서 값을 누적시켰다.

표 2. 적합도 함수 구성

명칭	적합도 함수
경우1	$\sum_{i=1}^n \{1/(\sqrt{(Zx_i - Cx_i)^2 + (Zz_i - Cz_i)^2}) + (1/Hsen_i + 1/Bsen_i + 1/Ksen_i)\}$
경우2	$\sum_{i=1}^n \{-\sqrt{(Ocx_i - Cx_i)^2 + (Ocz_i - Cz_i)^2}) + (1/Hsen_i + 1/Bsen_i + 1/Ksen_i)\} + 5$

Zx : ZMP의 X축 좌표  
 Zz : ZMP의 Z축 좌표  
 Ocx : CoM의 X축 원점  
 Ocz : CoM의 Z축 원점  
 Cx : CoM X축 좌표  
 Cz : CoM Z축 좌표  
 Hsen, Esen, Ksen: 손, 팔꿈치, 무릎의 압력 센서값('0'일 경우, ∞로 가정)

3.3 관절 움직임의 보간

휴머노이드 로봇의 유연한 넘어짐 동작을 위하여 관절각의 변화에 가감속 구간을 생성하여 더욱 부드러운 움직임으로 동작하도록 3차식 보간법을 사용하였다[4].

식 (1)에서의 q와 q̇은 각각 시간 t에 따른 관절각과 각속도 값을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 q_{t+1} &= a_1 t_e^3 + b_1 t_e^2 + c_1 t_e + d_1 \\
 \dot{q}_{t+1} &= 3a_1 t_e^2 + 2b_1 t_e + c_1 \\
 q_t &= a_1 t_s^3 + b_1 t_s^2 + c_1 t_s + d_1 = d_1 \\
 \dot{q}_t &= 3a_1 t_s^2 + 2b_1 t_s + c_1 = c_1
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$H_t x_t = \begin{bmatrix} t_e^3 & t_e^2 & t_e & 1 \\ 3t_e^2 & 2t_e & 1 & 0 \\ t_s^3 & t_s^2 & t_s & 1 \\ 3t_s^2 & 2t_s & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_e^3 & t_e^2 & t_e & 1 \\ 3t_e^2 & 2t_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{t+1} \\ \dot{q}_{t+1} \\ q_t \\ \dot{q}_t \end{bmatrix} = y_t \tag{2}$$

$$x_t = (H_t)^{-1} y_t \tag{3}$$

식 (1)을 식 (2)와 같이 행렬식으로 표현하여, 식 (3)으로 3차식의 계수 X<sub>i</sub>를 구한 후, q=F(t)를 이용하여 각 시점 t의 관절각을 계산하여 보간한다.

4. 실험 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 환경은 Core 2 Duo 2.13 GHz PC에서 Cyberbotics 사의 Webots를 사용하였다. Webots는 모바일 로봇에 대한 모델링, 프로그래밍, 그리고 시뮬레이션 기능을 제공하는 모바일 로봇 시뮬레이션 s/w이다. 각종 센서와 액츄에이터에 대한 라이브러리 제공, 정확한 physics 시뮬레이션을 위한 ODE(Open Dynamics Engine) 라이브러리 제공, 그리고 실제 모바일 로봇에 컨트롤러를 전송할 수 있는 기능을 가지고 있다.

4.2 GA 염색체 크기에 따른 영향력 분석

GA를 이용한 전방 넘어짐 자세의 생성에 있어 염색체의 크기 결정은 중요한 문제이다. 각 개의 염색체는 각 시점에 따른 관절 공간에서의 관절각을 나타내므로 관절들 사이의 관절 값이 자세를 생성함에 있어 큰 영향력을 갖는다.

염색체 크기 결정을 위하여 각 관절의 스트리밍을 1부터 4까지 변화시켜 실험 하였으며, 비교를 위하여 관절의 종료 지점은 염색체 크기3의 값으로 고정시켰다.

그림 4는 각 염색체 크기에 따른 허리와 무릎 관절의 움직임 변화를 보이고 있다. 2개 이하의 염색체 크기는 움직임을 생성하는데 제한적 요소가 되며, 4개 이상은 비슷한 동작을 생성하는 반면 해의 탐색 영역이 넓어져 연산량을 증가시키는 결과를 보여 각 관절의 염색체 크기가 3일 경우, 가장 효율적인 결과를 보였다.

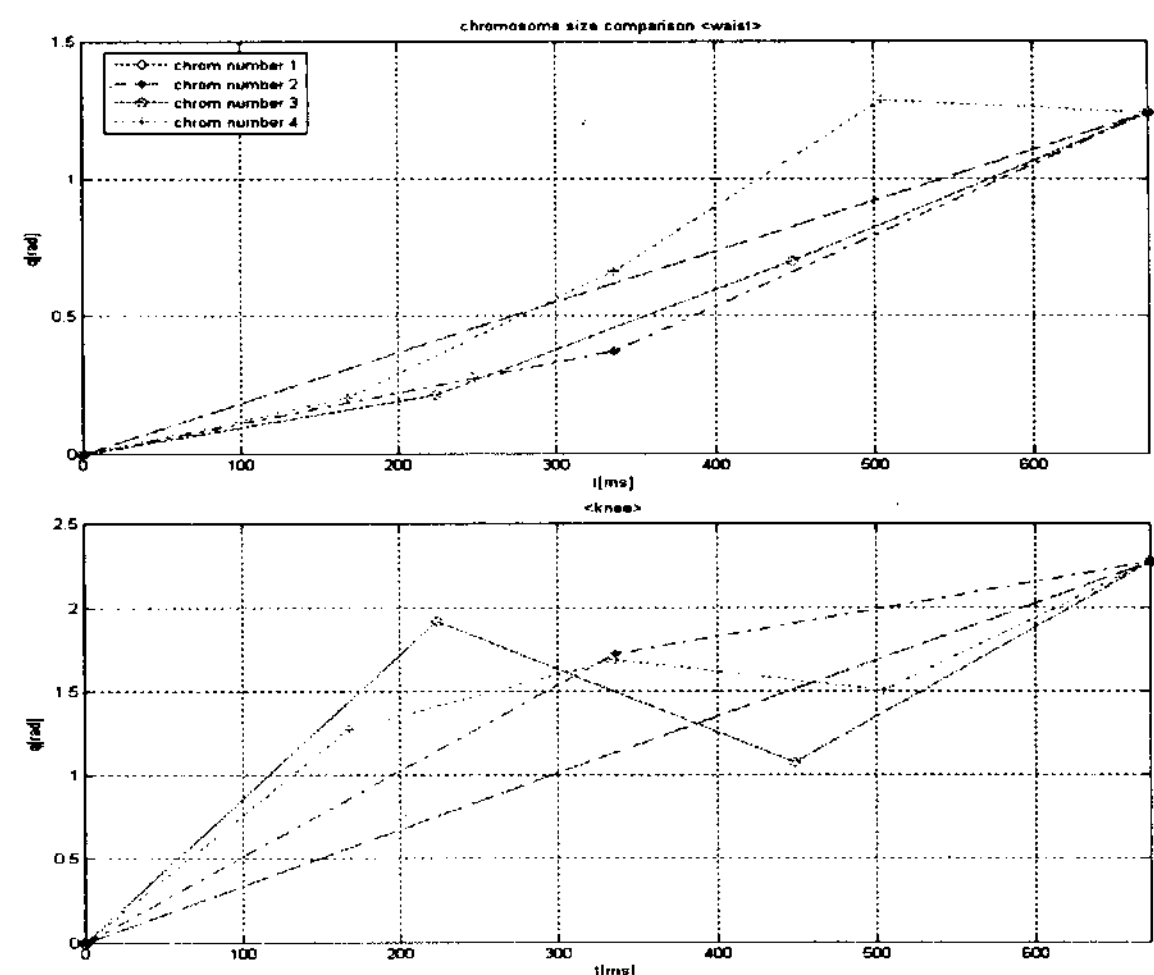


그림 4. 염색체 크기에 따른 관절각의 변화

4.3 보간에 따른 움직임 변화

3차식을 사용하여 각 지점의 각도와 각속도 값(초기 '0'으로 설정)을 대입하여 염색체 사이



의 중간 값을 보간하였다(step1). 그 후, 각 염색체 값의 각속도 값을 '0'으로 설정하였던 부분의 제거를 위하여 2번째와 3번째 염색체 주변 일정 구간을 다시 보간하였다(step2).

시간에 따른 관절각 값의 선형 보간의 경우에는 각속도 값이 계단함수 형태로 변화하여 각속도 또한 '0'으로 변화가 없었으나 각속도의 변화를 유연한 곡선모양으로 변형시켜 관절각의 변화에 가감속 구간을 형성하였다.

그림 5는 무릎 관절각 보간에 의한 각도, 각속도, 각가속도의 변화를 보이고 있다.

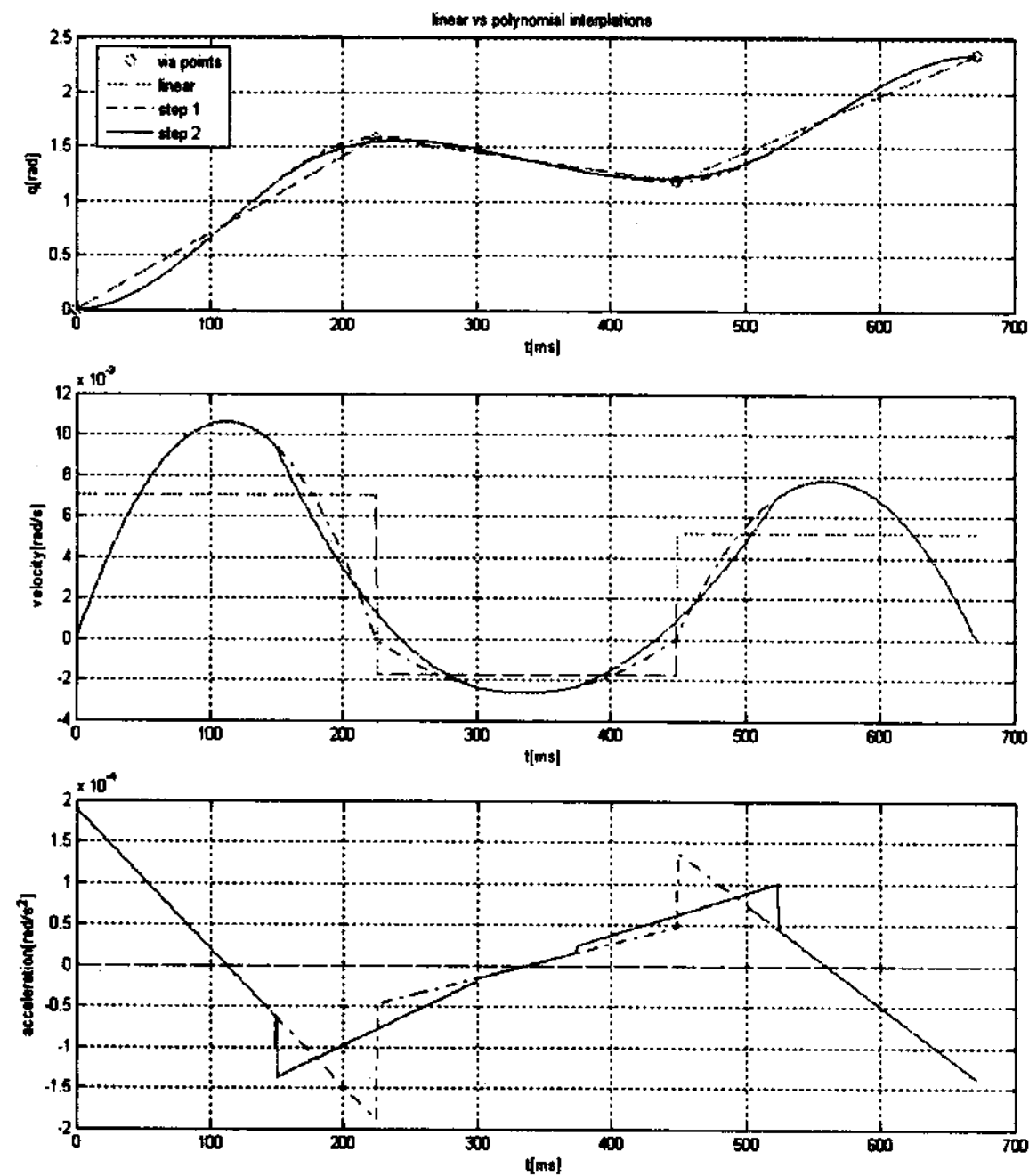


그림 5. 3차식 보간에 따른 각도, 각속도, 각가속도

4.4 실험 결과

유전 알고리즘으로는 SGA(Simple Genetic Algorithm)를 사용하였으며 개체 수는 50, 세대 수는 수행 시간을 고려하여 50세대로 설정하였고 교배확률 80%, 돌연변이확률 10%를 사용하여 수행하였다.

로봇에 가해지는 외력은 12[N]의 힘을 로봇 후면에 가하였고 경우 1과 경우 2의 적합도 함수와 염색체 크기 변화에 따라 성능 비교를 위하여 5회 반복 실험하였다.

시뮬레이션 평균 수행시간은 염색체 크기가 2일 경우에는 약 3시간 40분, 염색체 크기가 3일 경우에는 약 5시간 10분, 그리고 염색체 크기가 4일 경우에는 약 7시간 20분이 소요되었다.

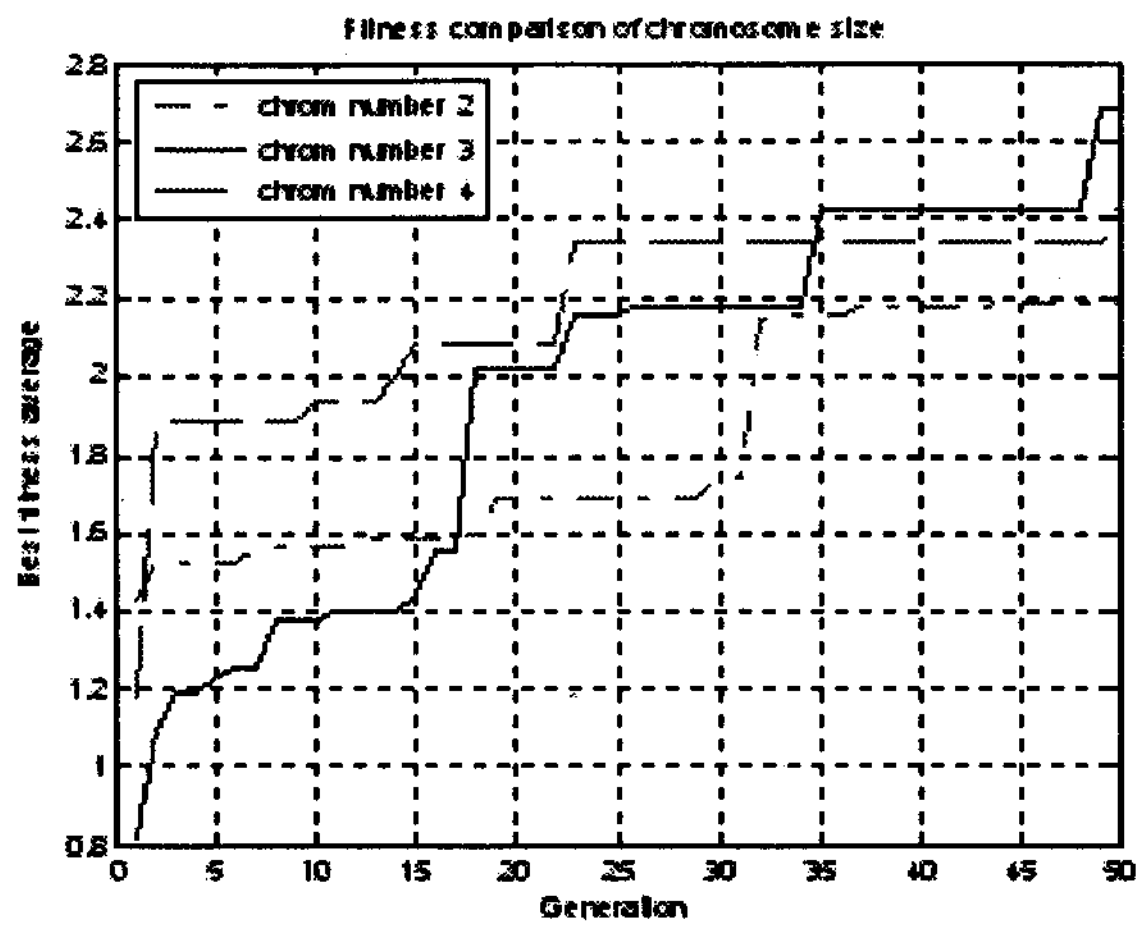


그림 6. 경우 1의 적합도 함수를 사용한 평균 성능

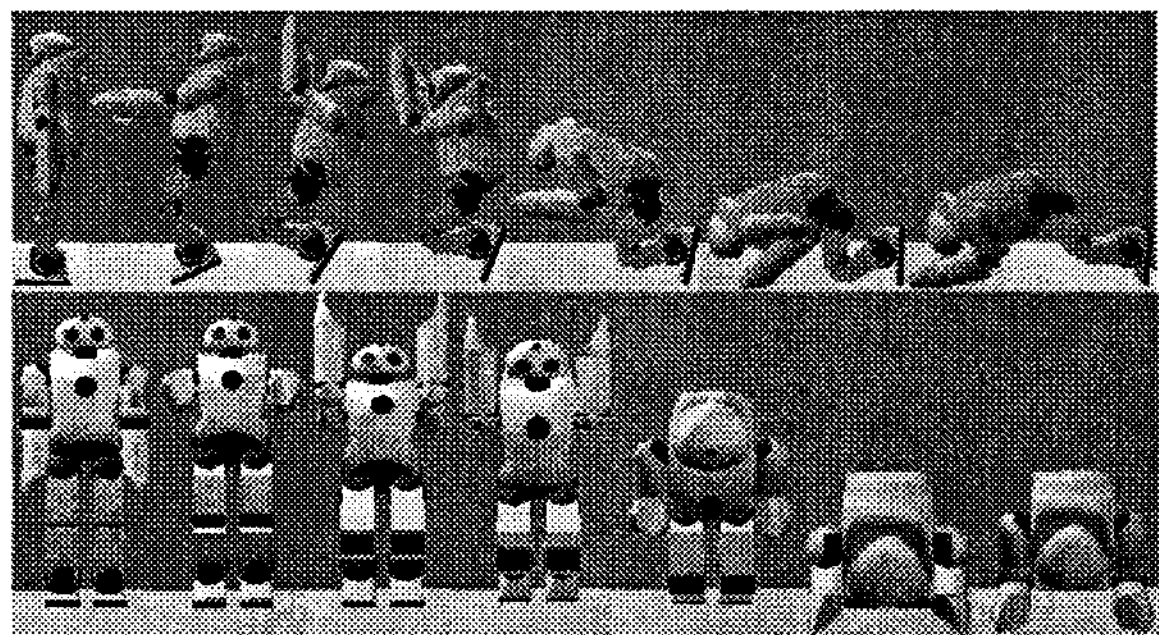


그림 7. 경우 1의 적합도 함수에 의한 넘어짐 동작

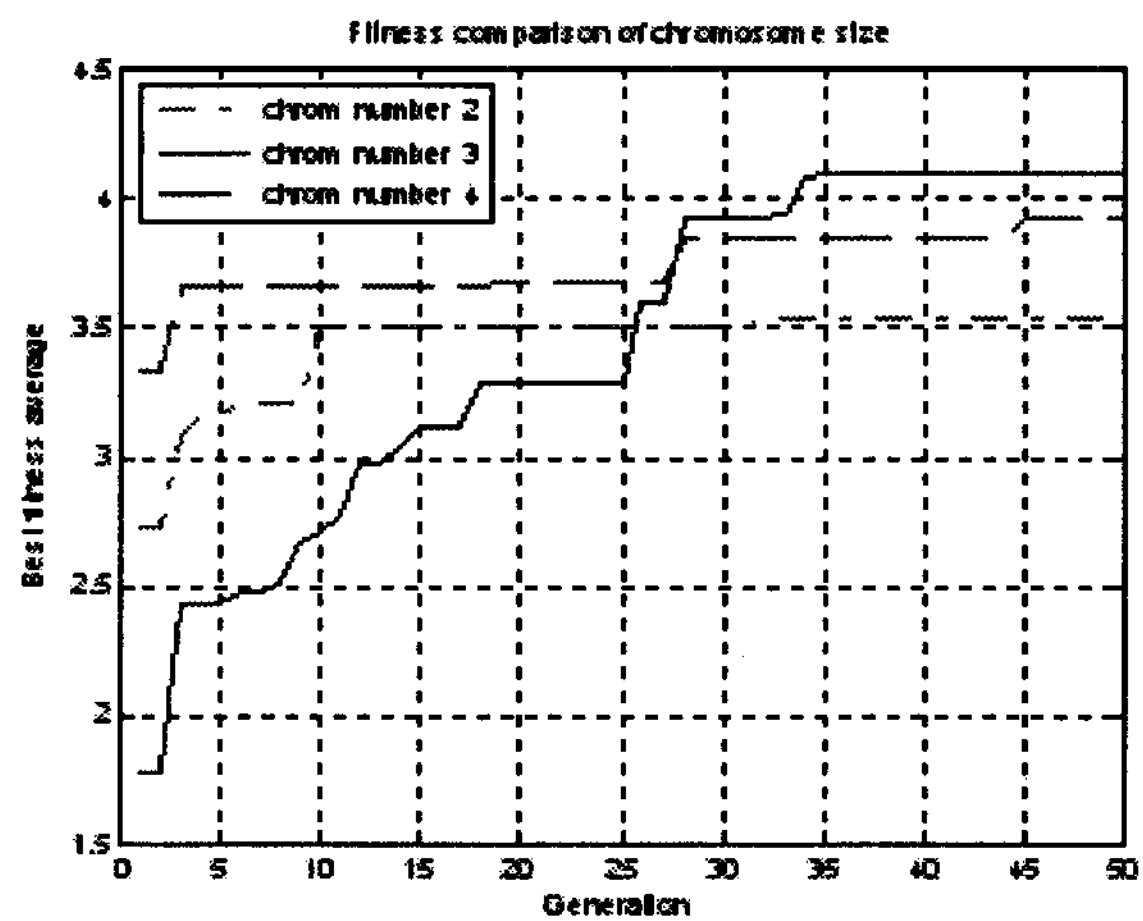


그림 8. 경우 2의 적합도 함수를 사용한 평균 성능

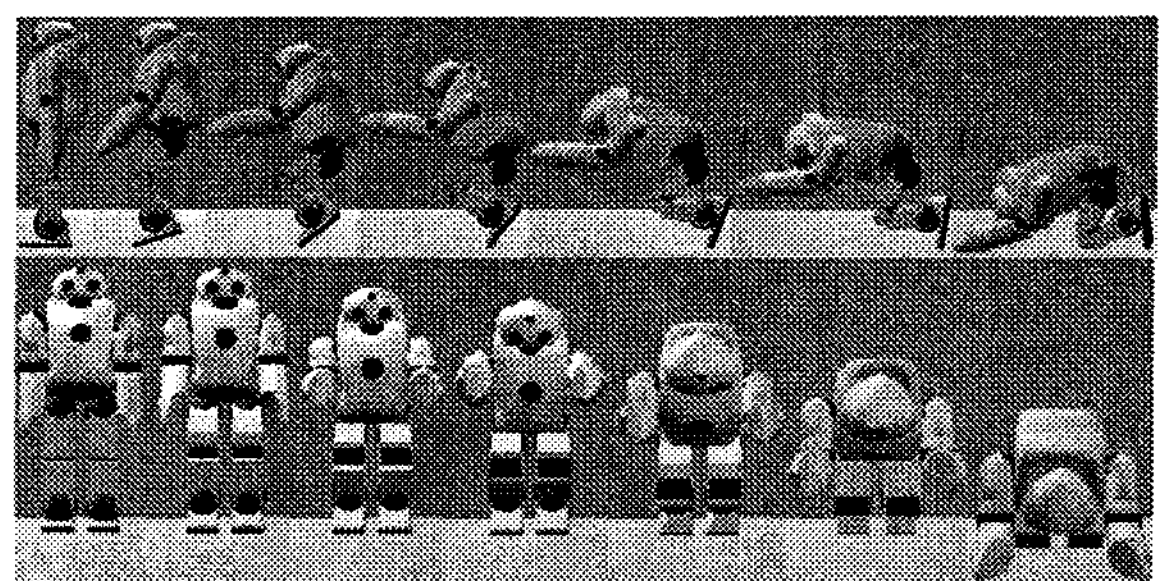


그림 9. 경우 2의 적합도 함수에 의한 넘어짐 동작

그림 6과 8은 각각 경우 1과 경우 2의 적합도 함수에 따른 염색체 크기별 성능의 평균값을 나타낸다.

그림 7과 9는 각각의 적합도 함수 정의에 의해서 수행된 실험에서 최고의 적합도를 가진 QRIO 로봇의 넘어짐 자세의 시간별 움직임 보여주고 있다.

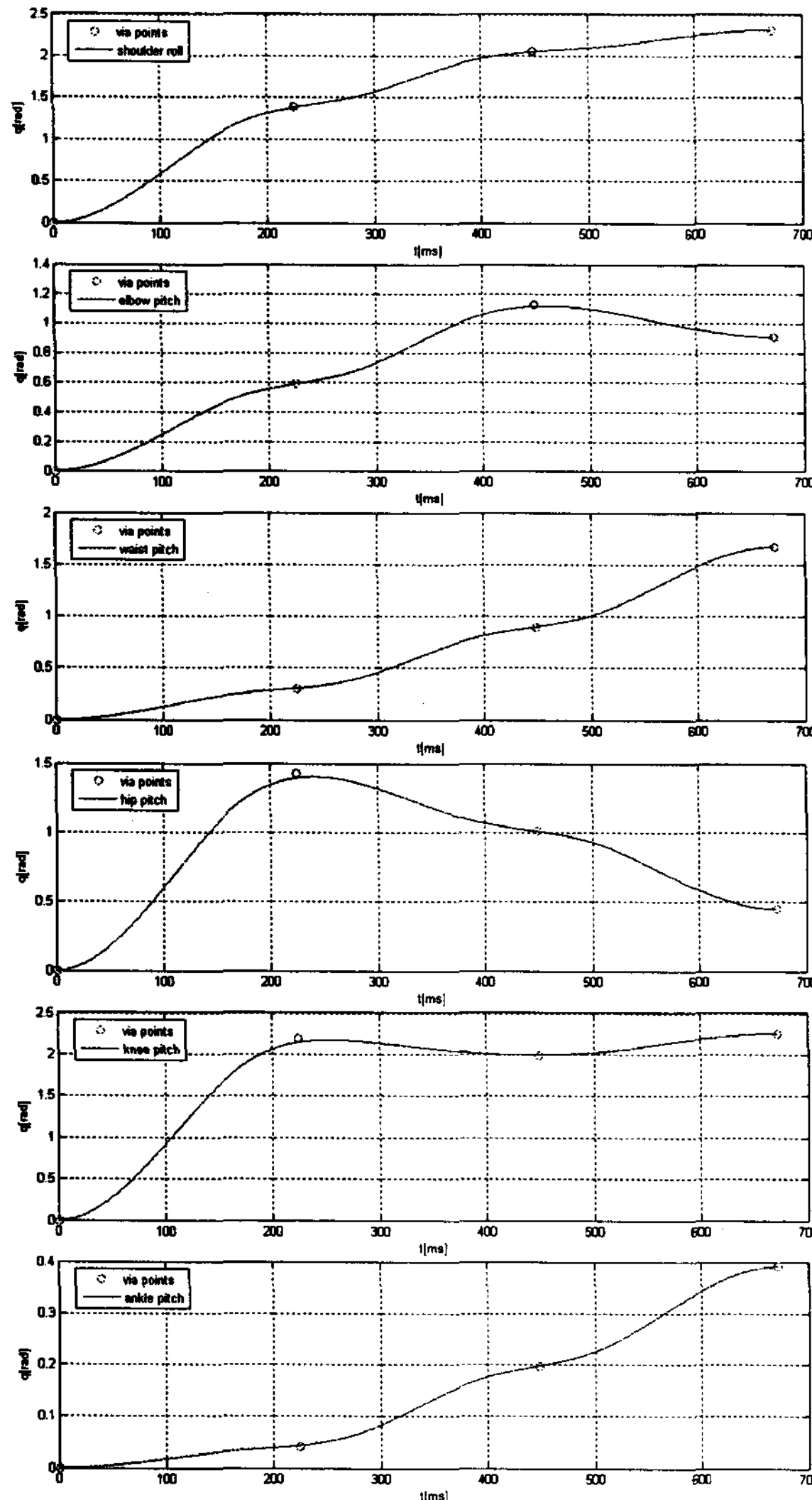


그림 10. 적합도 함수 2를 사용한 최적해 조합

그림 10은 경우 2의 적합도 함수를 사용하고 염색체 크기 3을 사용한 어깨, 팔꿈치, 허리, 엉덩이, 무릎, 발목의 관절각의 변화를 나타내고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 휴머노이드 로봇에 대해 GA를 이용하여 로봇이 무방비 전복 시 충격량을 최소화하기 위한 자세를 생성하여 로봇을 보호하는 움직임을 구현하였다. 제안된 기법의 검

증을 위하여 Sony QRIO 로봇에 대해서 ODE 기반의 물리적 특성을 갖춘 시뮬레이션이 가능한 Webots를 이용하여 실험을 수행하였고, 충격량을 만족할만한 수준으로 최소화할수 있는 넘어짐 자세를 생성하였다.

향후 연구로, GA 알고리즘의 개선과 후면 및 측면 방향으로의 넘어짐등 다양한 조건에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글 : 이 논문은 2006년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-311-D00146)

### 참 고 문 헌

- [1] 최무성, 권오홍, 강민성, 박종현, “유전자 알고리즘을 이용한 이족 보행 로봇의 최적 설계 및 최적 보행궤적 생성,” *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 9, 2004.
- [2] 김용태, 노수희, 이희진, “이족보행로봇의 비평탄지형 보행 및 자세 안정화 알고리즘,” *퍼지 및 지능시스템학회 논문지*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-64, 2005.
- [3] 박상수, 김병수, 오재준, 최윤희, “이족 로봇의 저전력 보행 궤적 생성 및 구현,” *퍼지 및 지능시스템학회 논문지*, Vol. 16, No. 4, pp. 443-448, 2006.
- [4] Yariv Bachar, “Developing Controllers for Biped Humanoid Locomotion,” in his Master thesis, 2004.
- [5] 최국진, “유전알고리즘을 이용한 휴머노이드 로봇의 전신협조 동작의 최적화에 관한 연구,” *공학석사학위논문*, 2004.
- [6] Tatsuzo Ishida, Yoshihoro Kuroki, Taro Takahashi, “Analysis of Motions of a Small Biped Entertainment Robot, *Intelligent Robots and Systems*,” pp. 142-147, September 28-October 2, 2004, Sendai, Japan.
- [7] Kiyoshi Fujiwara, Fumio Kanehiro, Shuuji Kajita and Hirohisa Hirukawa, “Safe Knee Landing of a Human-size Humanoid Robot while Falling Forward,” *Intelligent Robots and Systems*, pp. 503-508, September 28-October 2, 2004, Sendai, Japan.
- [8] J. H. Holland, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [9] Cyberbotics, *Webots Reference Manual release 5.1.9*, 2006.