

# 4 족보행 로봇의 갈로핑 궤적의 최적화

채기주\* · 박종현†

Trajectory optimization for galloping quadruped robots.

Key Gew Chae and Jong Hyeon Park

**Key Words :** Quadruped robots(4 족 로봇), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), running robot(뛰는 로봇), Force control(힘 제어), Galloping(갈로핑), Trajectory generation(궤적 생성)

## Abstract

This paper proposes an optimal galloping trajectory which costs low energy and guarantees the stability of the quadruped robot. In the realization of the fast galloping, the trajectory design is important. As a galloping trajectory, we propose an elliptic leg trajectory, which provides simplified locomotion to complex galloping motions of animals. However, the elliptic trajectory, as an imitation of animal galloping motion, does not guarantee stability and minimal energy consumption. We propose optimization based on the energy and stability using a genetic algorithm, which provides the robust and global solution to a multi-body, highly nonlinear dynamic system. To evaluate and verify the effectiveness of the proposed trajectory, computer simulations were carried out.

## 1. 서 론

지금까지 다리를 가지는 로봇에 대한 여러 연구들이 진행 되었으며, 이들 중 특히 4 족 로봇은 뛰어난 환경 적응력과 이동성으로 인하여 꾸준한 연구가 이루어지고 있는 분야이다. 4 족 로봇의 장점은 비 평탄 면에서도 무리 없이 이동 가능하며, 녹지를 이동할 때에도 산림의 큰 회 손 없이 빠른 이동이 가능하다는 장점이 있으며, 이러한 갈로핑에 관한 많은 연구들이 수행되어져 왔다.

갈로핑 운동은 비행과 추진 구간의 단순한 반복으로 서 가정할 때 튀기는 공으로 모델을 단순화시킬 수 있다. 만약 외부의 저항이 없다면 그 공은 멈춤 없이 연속적인 운동이 가능할 것이다. Raibert 가 제시한 스프링에 압축된 역진자 (Spring - Loaded Inverted Pendulum) 법칙(이하 SLIP) 은 이러한 이론을 정리한 것이다[1]. 또한 Raibert 는 이러한 이론을 기초로 4 족 로봇이 2.9m/s 의 빠른 속도로 이동하는 것을 보였다. 당시 로봇은 공기

압과 수압을 이용하는 병진 운동을 하는 다리가 사용되었으며, Marhetka[2]. 역시 병진운동 하는 다리를 사용하였으며, 여기에는 전동 모터가 사용되었고, 무려 7m/s 의 빠른 속력을 자랑하였다.

그러나 이러한 병진운동의 기구 학은 충격에 취약하다, 이것에 비해 다자유도를 갖는 관절 구조는 이러한 충격 량을 감쇠시킬 수 있으며, 더욱 유연한 운동이 가능하나 제작의 어려움이 있다. 이에 대하여 J. Gordon Nichol 은 다자유도를 가지는 4 족 로봇의 갈로핑을 위한 기구학적 연구를 수행하였으며, 여기에 SLIP 법칙을 적용하여 에너지를 이용하는 연구를 수행 하였다[3].

동물은 본능적으로 놀라운 적응력과, 에너지 저장능력을 지니고 있다. 그러므로 동물과 유사한 로봇은 이상적인 모델이 될 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 모델을 지향하고 있다. 앞서 동물의 갈로핑의 모방으로서 갈로핑 궤적을 타원형으로 단순화 하여 적용한 바가 있으며[6], 본 연구는 이 타원형 궤적에 최적화 알고리즘을 적용하였으며, 지면 접촉 시 힘 제어를 통하여 유연한 갈로핑 궤적을 생성하였다.

타원형 궤적은 3 차 다항식에 의해 계산되었으며, Capi et 등은 이러한 다항식의 변수를 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화 시키는 연구를 수행 하였다[12].

† 책임저자, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jongpark@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0435 FAX : (02) 2298-4634

\* 한양대학교 기계공학과

많은 최적화 알고리즘 중에 유전자 알고리즘은 비선형 시스템에 강인성을 보이며, 전역 해를 쉽게 찾을 수 있다는 강점을 가지고 있다[9-11].

본 논문의 구성으로는, 2 장에서 로봇의 구조에 대한 설명과 궤로핑 궤적의 생성 방법에 대하여 언급하고, 제어기의 구조와 힘 제어방법에 대한 설명이 있으며, 다음 3 장에서는 에너지와 안정성의 최적화 방법으로서 유전자 알고리즘의 적용이 언급되며, 결론이 이어진다.

## 2. 타원형 궤적 형성

### 2.1 로봇의 구조

본 4 족 로봇의 동적 해석은 상용프로그램인 RecurDyn 을 사용하여 시뮬레이션 되었으며, 로봇의 크기는 흔히 볼 수 있는 개(dog)의 크기를 갖는다. 각 다리는 두 개의 구동기를 갖는 관절과 한 개의 스프링으로 이루어진 수동 관절로 이루어져 있다. 특히 수동 관절은 스프링의 인장 후 복원력을 이용하는 SLIP 를 적용한 것이며, Fig. 1 은 로봇의 2차원 모델을 보여주고 있으며, Table. 1 은 각 링크의 길이와 스프링상수, 댐핑상수, 무게 등을 나타내고 있다.

**TABLE 1**  
A. Specifications of the quadruped robot.

	Front		Rear	
	Length	Weight	Length	Weight
Link1	0.13m	0.47kg	0.15m	0.57kg
Link2	0.18m	0.48kg	0.15m	0.18kg
Link3	0.1m	0.18kg	0.1m	0.18kg
Base link	0.6m	17.7kg	Total Mass	20kg

B. Passive leg's Specifications.

Front spring coefficient	80Nm	Rear spring coefficient	80Nm
Front damping coefficient	1Nms	Rear damping coefficient	1Nms

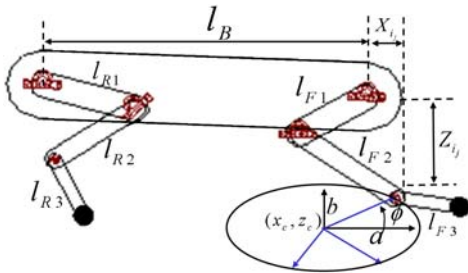


Fig. 1 Frame assignments for the 2D quadruped robot

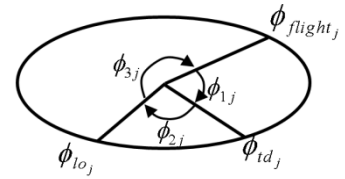


Fig. 2 Elliptic Trajectory

**TABLE 2**  
Symbolic Notation

$P_{ij}$	Elliptic trajectory position.(m)
$\theta_{ij}$	Joint angle.(rad)
$\dot{\theta}_{ij}$	Joint angular velocity.(rad/sec)
$\tau_{ij}$	Input Joint torque.(Nm)
$\phi_{flight_j}$	Elliptic trajectory angle of flight section.
$\phi_{td_j}$	Elliptic trajectory angle of touch-down section.
$\phi_{lo_j}$	Elliptic trajectory angle of lift-off section.
$i = 1$	Flight phase.
$i = 2$	Touch-down phase.
$i = 3$	Lift off phase.
$j = 1$	Front leg.
$j = 2$	Rear leg.

### 2.2 타원형 궤적의 형성

궤로핑 궤적은 기본적으로 3 개의 축약된 구간으로 정의되며 각 구간의 궤적은 3 차 다항식을 이용하여 구하며, 각 구간은 연속 조건으로 구속되어 있으며, 이로서 타원형 궤적을 형성한다. 3 차 다항식의 변수는 초기, 종단의 위치, 속도, 시간으로 구성되며, 우선 각 구간이 계산되는 시간은 로봇의 몸체를 하나의 덩어리로 가정하고, 이 몸체가 떨어지는 시간 동안 한 구간이 형성된다는 가정으로 시작한다.

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

$$t_{free\ fall} = \sqrt{\frac{2y}{g}} \quad y = \text{flight body height}$$

우선 첫 번째 구간인  $\phi_j$  은 발이 지면에 닿는 시점이며, 이때 로봇무계중심의 속도는  $\dot{z}_{COG} < 0$  이다. 타원 궤적의 각도는 3 차 다항식에 의해 구해지며 4 개의 미지수는 다음의 구속조건에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} \phi_{init_i} = \phi_{fly} \\ \phi_{final_i} = \phi_{td} \end{cases} \begin{cases} \dot{\phi}_{init_i} = 0 \\ \dot{\phi}_{final_i} = \frac{v_{body}}{b} \end{cases} \quad t_{final_i} = t_{free\ fall} \quad (2)$$

이 구간의 각  $\phi, \dot{\phi}$  은 다음다항식을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned}\phi_{1j}(t) &= a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\ \dot{\phi}_{1j}(t) &= 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} t_{initial}^3 & t_{initial}^2 & t_{initial} & 1 \\ 3t_{initial}^2 & 2t_{initial} & 1 & 0 \\ t_{final}^3 & t_{final}^2 & t_{final} & 1 \\ 3t_{final}^2 & 2t_{final} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1j}(t_{initial}) \\ \dot{\phi}_{1j}(t_{initial}) \\ \phi_{1j}(t_{final}) \\ \dot{\phi}_{1j}(t_{final}) \end{bmatrix}\quad (4)$$

두 번째 구간인  $\phi_{2j}$  은 발이 지면에 계속 접촉하고 있는 구간이며, 이 동안 추력이 발생하며, 로봇 무게중심의 속도는  $\dot{z}_{COG} < 0 \rightarrow \dot{z}_{COG} > 0$  로 바뀌게 된다. 또한 이번 구간의  $\phi, \dot{\phi}$  은 1 차 다항식으로 구하게 되며, 두 개의 변수는 첫 번째 구간과 같은 것이며 다항식과의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_{2j}(t) &= {}^1\dot{\phi}_{final} \cdot t_2 + {}^1\phi_{final} \\ \dot{\phi}_{2j}(t) &= {}^1\dot{\phi}_{final} \quad t_2 = t_{final}\end{aligned}\quad (5)$$

마지막으로 세 번째 구간인  $\phi_{3j}$  은 발이 지면에서 떨어지는 시점이며, 이때 로봇무게중심의 속도는  $\dot{z}_{COG} > 0$  이다. 타원의 각도는 역시 3 차 다항식에 의해 계산되며, 4 개의 변수는 다음 4 개의 구속조건에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} \phi_{init_3} = \phi_{final_2} \\ \dot{\phi}_{init_3} = \dot{\phi}_{final_2} \\ \phi_{final_3} = \phi_{initial_1} \\ \dot{\phi}_{final_3} = \frac{v_{body}}{b} \end{cases} \quad t_{final_3} = t_{free\ fall}\quad (6)$$

이 구간의 각  $\phi, \dot{\phi}$  는 식 (4)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned}\phi_{3j}(t) &= a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\ \dot{\phi}_{3j}(t) &= 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1\end{aligned}\quad (7)$$

이제 각 구간별 타원의 궤적이 구해졌으며, 이 타원 각 정보로부터 로봇다리의 위치는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned}X_{ij} &= a_j \cdot \cos \phi_{ij} + x_{center\ j} \\ Z_{ij} &= b_j \cdot \sin \phi_{ij} + z_{center\ j}\end{aligned}\quad (8)$$

### 2.3 제어기의 구성

Fig. 3 에 나타난 바와 같이 제어기는 6 개의 파트로 구성되어 있으며 구간인식, 힘 제어기, 타원 궤적 생성기, 역기구학, PID 제어기와 플랜트로 이루어져 있다. 플랜트의 입력으로는 각 관절의 토크가 들어가며, 출력으로는 관절의 위치, 속도, 가속도, 몸체의 위치 속도 가속도, 각도정보, 접촉반력 등이 제공된다.

구간 인식에서는 각 구간을 발의 접촉 상태와 몸체의 위치, 속도정보에 따라 각 구간이 정의되

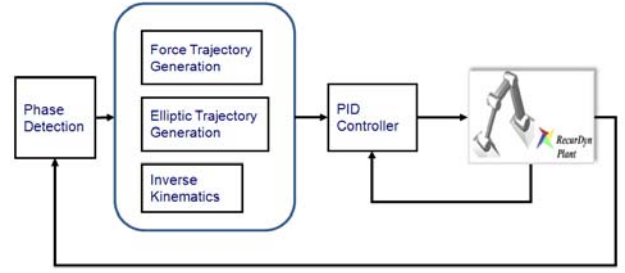


Fig. 3 Outline of the control system.

며, 힘 제어기에서는 로봇에 필요한 힘 입력을 결정하며, 타원 궤적 생성기에서는 각 구간별 타원궤적이 힘 제어기에 의해 유연한 타원 궤적이 생성되며, 이를 역기구학으로 각 관절의 각도로 변환하여 PID 제어기로 입력 토크를 생성해 낸다. 여기서 입력토크는 크게 나는 두 구간, 다시 말해 비행구간과 추진구간의 토크를 적절히 조절하여 사용하였다

### 2.4 충격력 제어

로봇의 움직임은 SLIP 이론에 따라 지면과 각 다리의 충돌에 의해 결정된다. 로봇의 높이와 몸체의 균형을 유지하는 반력을 적절히 유지함에 있어 충격력 제어는 제어기의 구성 요소 중 안정성을 결정하는 중요한 역할을 한다. 이는 로봇의 안정적 거동을 위해 로봇에 요구되는 힘을 미리 생성하여 필요한 힘을 조절하게 되는 것이다. 요구되어지는 힘은 다음의 방법으로 구한다.

우선, 운동량 방정식으로부터

$$\Delta mv = \int_0^{t_e} F dt, \text{ where } t_e \text{ is final time.}\quad (9)$$

여기서,

$$F(t) = k \sin\left(\frac{\pi}{t_e} t\right), \quad 0 \leq t \leq t_e\quad (10)$$

이며, (9)와 (10) 으로부터,

$$\Delta mv = Mv_{lo} - Mv_{td} = \int_0^{t_e} F dt = k \left[ -\frac{\pi}{t_e} \cos\left(\frac{\pi}{t_e} t_e\right) + \frac{\pi}{t_e} \right]\quad (11)$$

여기서  $v_{lo} = \sqrt{2gh_{CGtop}}$  : COG velocity at liftoff

$v_{td}$  : COG velocity at touchdown

지면으로부터 몸체의 높이는 일정하다 가정하면

$$k = \frac{Mv_{lo} - Mv_{td}}{\left[ -\frac{\pi}{t_e} \cos\left(\frac{\pi}{t_e} t_e\right) + \frac{\pi}{t_e} \right]}\quad (12)$$

이때 몸체의 상하 각 균형을 유지하기 위해 로봇은 앞, 뒷발의 힘을 적절히 할당한다. 힘 분배는 다음의 식에 의해 힘의 궤적이 정의된다.

$$F_j(t) = k \sin\left(\frac{\pi}{t_e} t\right) \eta_j (1 - \sin(\theta_b))\quad (13)$$

where  $\eta_{front} = 1.04$ ,  $\eta_{rear} = 2.73$ .

힘 제어기의 구조는 플랜트에서 접촉 반력이 필터를 통해 위에서 구한 힘 궤적과 비교된 값에 게인 값이 부가되어 필터를 통해 타원 궤적을 형성하게 된다. 여기서 요구되는 힘을 미리 생성하는 과정인 포스 트래킹 시 실제 접촉 반력에서의 노이즈가 트래킹에 어려움을 주므로 이를 로우패스 필터를 사용하여 노이즈가 제거된 데이터로서 요구되는 힘을 예측하는데 유리하게 하였다. 사용된 필터 식은 다음과 같다.

$$Y(t+1) = e^{-\alpha T} Y(t) + U(t+1)(1 - e^{-\alpha T}) \quad (14)$$

### 3. 궤로핑 궤적의 최적화

#### 3.1 유전자 알고리즘

본 4족 로봇은 높은 비선형성을 가지며, 불안정한 동적 시스템으로서, 에너지와 안정성을 동시에 최적화 시키는 방법으로서 유전자 알고리즘을 선택하였다. 유전자 알고리즘은 비선형 시스템에 대해 강인한 전역 해를 제공하며, 실수코딩 유전자 알고리즘의 경우 사용하기가 쉽고, 비선형 시스템의 적용이 용이하다.

Fig. 4는 본 4족 로봇 시스템을 유전자 알고리즘에 적용시킨 대략적인 흐름도이다. 프로그래밍의 시작은 초기집단형성으로서 무작위로 선발되어진 집단 안의 염색체 들이 궤적을 생성하여 궤로핑 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과값인 토크와 반력 값을 목적함수로 받아 이것이 구속조건을 만족하는지 판단하여 초기 집단의 1 세대를 생성해 내며, 차기 세대부터 생성된 세대와 교배가 이루어지며, 변종을 생산해 내기도 한다. 이것은 최대 세대 수 만큼 진화 하게 되며, 변경된 집단의 평가의 반복을 통해 우성은 살아남으며 열성집단은 도태되어 우성집단만이 살아 남게 된다. 만약 로봇이 넘어지거나 불안정한 거동을 했을 때 목적함수의 값에 가중함수를 곱하여 열성유전자로 취급하게 되며, 결국 다음 세대에서 우성집단으로

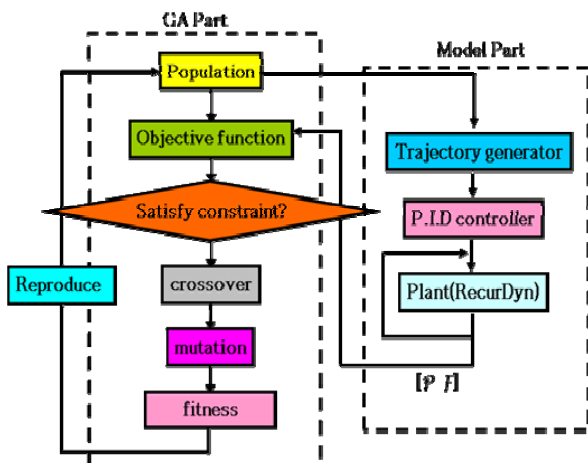


Fig. 4 Flow chart of a running cycle

부터 배제 되어진다. 이로써 안정성이 보장된다.

#### 3.2 실수 코딩

실수표현은 개념적으로 문제공간에 가까우며, 동적 연산자들을 쉽게 그리고 효율적으로 구현할 수 있도록 해준다. 실수 표현을 사용할 경우에 정밀도는 계산환경에 따라 다르겠지만, 일반적으로 이진 표현 보다 훨씬 우수하다. 물론 더 많은 비트를 사용함으로써 이진표현의 정확도가 더욱 개선될 수 있지만 이 경우는 계산속도가 느릴 수밖에 없다. 또한 실수 표현은 상당히 넓은 영역을 표현할 수 있다. 반면 이진표현은 일단 비트길이가 정해지면 영역의 확장은 정밀도의 희생 아래서만 가능해진다.

#### 3.3 목적함수와 최적화 변수

에너지 최소화를 위한 목적함수는 다음과 같다

$$J = \int_{t_0}^t (P^T Q P + F^T R F) dt \quad \begin{matrix} P = \tau \dot{\theta} \\ Q = I \end{matrix} \quad \begin{matrix} F = \text{normalforce} \\ R = I \end{matrix} \quad (15)$$

여기서  $P$ 는 각 관절에 걸리는 파워이며  $F$ 는 발의 접촉 반력을 의미 한다. 2.2에서 언급한 바와 같이,  $\phi_j$  구간이 추력에 관여하는 다음구간인  $\phi_{j+1}$  구간을 결정지으므로 이는 모든 관절토크를 지배하는 변수로서 몸체의 운동량과 발의 접촉 반력까지 관할 하는 구간으로서 이 구간의 궤적을 최적화 시키는 것이 전체 시스템의 안정성과 에너지 최소화를 가능케 하는 것이다. 즉 이 구간의 3 차 다항식의 초기와 종단 값들이 변수로 사용되었으며, 이 변수들이 집단을 형성하게 된다. 또한 구속조건으로서 타원궤적의 주기운동은 시계방향으로 이루어 지므로 비행시점보다 착지시점의 관절 각도가 높아야 한다.  $\phi_{2j} < \phi_{1j}$

#### 3.4 연산자

실수 코딩 연산자로서 산술적 교배와 경계 변종이 사용되었다. 비교적 적은 수의 집단으로 집단의 다양성을 구현하고자 산술 교배를 사용하였으며, 이들 중 전역 해를 도출해 내고자 경계 변종을 선택하였다.

#### 3.5 환경모델

로봇의 환경모델로서 4 개의 고정 파라미터가 사용되었다. 몸체의 초기 높이는 0.31m, 초기 속도는 2.5m/s 이며, 타원궤적의 길이와 중심위치는 Table 3. 에 나타나있다.

**TABLE 3**  
Fixed parameters

	$C_x$	$C_z$	Major axis length	Minor axis length
Front	-0.05	-0.16	0.1	0.03
Rear	-0.02	-0.145	0.1	0.03

### 3.6 유전자 알고리즘의 변수

유전자 알고리즘 에서 빠른 수렴과 정확한 해를 구하기 위하여 실수코딩 연산이 이루어졌으며, 산술 교배와 경계 변종 법이 사용되었다. Table 4. 는 유전자 알고리즘의 파라미터 들을 나타내고 있다. 최대 집단의 수는 200, 각 집단의 수는 60, 염색체 길이는 4, 교배 율은 90%, 변종의 확률은 20%로 구성하였다.

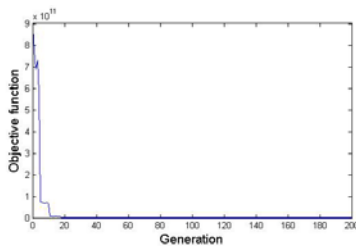
**TABLE 4**  
GA parameters

Max. generation	200
Population	60
Chromosome length	4
Crossover ratio	0.9
Mutation ratio	0.02

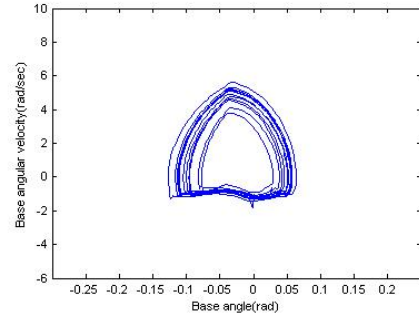
## 4. 시뮬레이션 결과

본 연구에 사용된 동적 모델링 도구인 상용 소프트웨어 RecurDyn 은 다양한 각 관절의 정보, 몸체의 정보, 구동기, 센서 등을 제공하며, 좌표와 링크길이, 무게, 기하학적 구속조건과 같은 동적 파라미터 등의 물리적 모델을 반영한 동역학적 모델을 제공한다. 복잡한 수식과 동역학의 개발을 따로 하지 않아도 되는 점이 강점이며, 이는 복잡한 링크구조의 로봇 개발에 적합하다.

시뮬레이션은 3 초간 평지에서 이루어졌으며, 이 동안 13 주기의 꺾로핑 운동이 실시되었으며, 총 이동거리는 약 7.5m 이다.



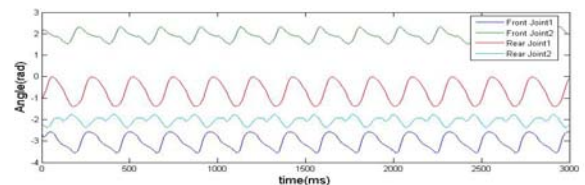
**Fig. 5** Objective function.



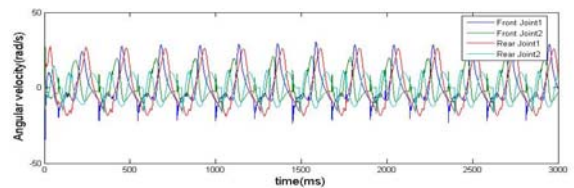
**Fig. 6** Phase plot.

Fig. 5 은 세대가 진화해 감에 따라 목적함수가 어떻게 수렴하는지를 보여주고 있으며, 불과 21 세대에서 목적함수는 최소값으로 수렴함을 볼 수 있다.

4 족 로봇과 같이 다자유도를 가지는 비선형 시스템의 경우 로봇의 안정성을 해석하기가 쉽지 않다. 그래서 거시적인 로봇의 움직임을 관찰 하여 로봇의 안정성을 판단 하기도 한다. 본 4 족 로봇의 안정성은 꺾로핑 운동시의 몸체의 기울기 속도와 각도 성분을 같이 도식화 하여 Fig.6 에서와 같이 유한한 주기를 가질 때 로봇은 안정하다 정의 하였다. 유전자 알고리즘에 의한 최적화된 궤적을 이용한 시뮬레이션 결과로서 Fig. 7, 8 은 각각 로봇 관절의 각도, 각속도 등을 나타내고 있다.

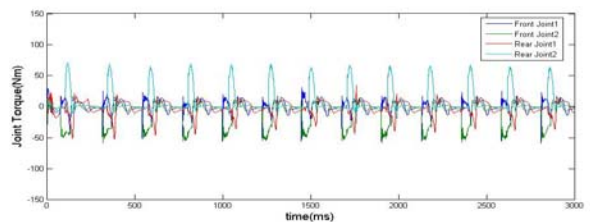


**Fig. 7** Joint angle.



**Fig. 8** Joint angular velocity.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 목적함수가 최소값을 갖는 관절 토크와 접촉 반력을 도식화 한 것이며, Fig.11 은 로봇의 연속동작을 도식화 한 것이다.



**Fig. 9** Joint torque with GA

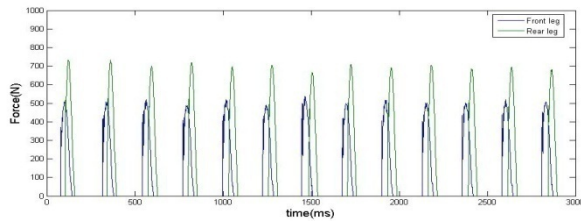


Fig. 10 Contact force with GA

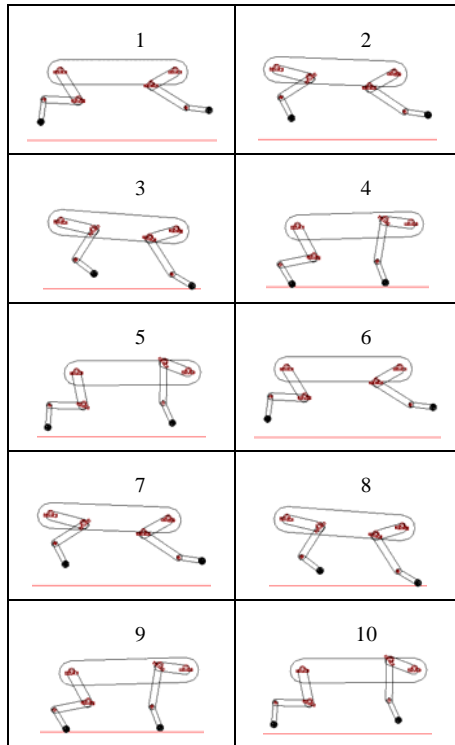


Fig. 11 Consecutive scenes of a galloping on the flat surface

## 5. 결론

본 연구에서 실시된 시뮬레이션은 4 개의 구동기와 2 개의 수동 관절을 가지는 평면상에서의 4족 로봇으로 수행되었으며, 제시된 타원 궤적은 동물의 운동을 모방한 것으로 안정적인 궤로평을 생성하고 있다. 궤로평 궤적을 생성함에 있어 궤적을 3 개의 구간으로 나누고 각 구간은 3 차 다항식을 계산하여 구하였으며, 이는 유전자 알고리즘을 이용하여 에너지와 안정성이 최적화된 궤적을 생성 하였다. 궤로평의 높이와 몸체의 자세 등은 착지 시점각도의 적절한 선택과 충격력 제어를 통하여 안정화 하였다. 앞으로, 본 연구에서 제시된 최적화된 궤로평 궤적은 실제 로봇에 적용하는 실험이 진행 될 것이다.

## 6. 후 기

본 연구는 한국 과학재단의 특성기초 연구(R01-2006-000-11041-0)지원사업으로 수행되었으며 이에 관계자들에게 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] M. H. Raibert, "Legged robots that balance", MIT press, Cambridge, 1986.
- [2] D. W. Marhefka, fuzzy Control and Dynamic Simulation of. Quadruped Galloping Machine, ph.D. thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 2000.
- [3] J. Gordon Nichol "Design For Energy Loss And Energy Control In A Galloping Artificial Quadruped "(Stanford Thesis)
- [4] H. Zou, and J. P. Schmiedeler, "Dynamic modeling of quadrupedal running gaits using a simple template with asymmetrical body mass distribution" The 2004 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and information in Engineering, 2004.
- [5] S. H. Hyon and T. Emura, "Running control of a planar biped robot ased on energy-preserving strategy", Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robots and Automation, 2004.
- [6] Kyeong Yong Kim, Ohung Kwon, Je Sung Yeon, and Jong Hyeon Park, "Elliptic Trajectory Generation for Galloping Quadruped Robots " IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 17-20, 2006, kunming, china
- [7] H. M. Herr and T. A. McMahon, "A galloping Horse Model", The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 1, January 2001, pp. 26-37.
- [8] D. P. krasny and D. E. Orin, "Evolution of dynamic maneuvers in a 3D galloping quadruped robot", Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robots and Automation, 2004.
- [9] M. Gen and R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Optimization", Wiley, 2000.
- [10] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Genetic Algorithms: A Survey", Computer, vol. 27, no. 6, pp. 17-26, 1994.
- [11] G. G. Jin, "Genetic Algorithms and Their Applications", Kyo Woo Sa, 2002.
- [12] G. Capi, S. Kaneko, K. Mitobe, L. Barolli, and Y. Nasu, " Optimal Trajectory Generation for a Prismatic Joint Biped Robot using Genetic Algorithms", Robotics and Autonomous Systems, vol. 38, no. 2, pp. 119-128, 2002