

비평탄면에서의 4족 로봇의 갤로핑 알고리즘[§]

신창록* · 김장섭* · 박종현*†

* 한양대학교 기계공학부

Control Algorithm for Stable Galloping of Quadruped Robots on Irregular Surfaces

Chang-Rok Shin*, Jang Seob Kim* and Jong Hyeon Park*†

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received January 9, 2009 ; Revised January 6, 2010 ; Accepted April 12, 2010)

Key Words : Force Control(힘 제어), Galloping(갤러핑), Ground Reaction Force(지면 반발력), Linear and Angular Momenta(선형 및 각운동량), Quadruped Robot(4족 로봇).

초록: 본 논문에서는 4족 보행로봇의 비평탄면 갤로핑 알고리즘을 제안하였다. 몸체의 균형은 지면접촉순간의 지면반발력에 의해 결정되므로 안정된 보행을 위해 발과 지면과의 접촉력을 제어하였다. 각 발의 지면접촉힘을 제어하기 위해 우선 요구되는 지면접촉힘을 결정하고 지면접촉구간에서 실제 접촉힘과 비교하고 그 차이에 따라 발의 궤적을 수정하게 된다. 요구되는 지면접촉력은 원하고자 하는 각운동량 및 선형운동량의 변화에 따라 결정되며, 각 발에 요구되는 접촉힘으로 퍼지모작에 의해 분배된다. 리커다인을 이용한 동역학 모델 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안된 방법이 비평탄면에서의 안정적인 보행에 적합함을 검증하였다.

Abstract: This paper proposes a control algorithm for quadruped robots moving on irregularly sloped uneven surfaces. Since the body balance of a quadruped robot is controlled by the forces acting on its feet during touchdown, the ground reaction force (GRF) is controlled for stable running. The desired GRF for each foot is generated on the basis of the desired galloping pattern; this GRF is then compared with the actual contact force. The difference between the two forces is used to modify the foot trajectory. The desired force is realized by considering a combination of the rate change of the angular and linear momenta at flight. Then, the amplitude of the GRF to be applied at each foot in order to achieve the desired linear and angular momenta is determined by fuzzy logic. Dynamic simulations of galloping motion were performed using RecurDyn; these simulations show that the proposed control method can be used to achieve stable galloping for a quadruped robot on irregularly sloped uneven surfaces.

- 기호설명 -

CoG : 로봇의 무게 중심(Center of Gravity)
SLIP : Spring Loaded Inverted Pendulum
IPSM : Inverted Pendulum Spring Mass

1. 서론

군사적 목적으로 사용되는 로봇은 극한 환경에서의 안정성과 빠른 이동성을 이용한 임무가 대두되고 있고 이에 따른 다양한 종류의 로봇이 개발되고 있다. 그 중 관절을 이용한 이동로봇은 바퀴를 이용한 로봇의 구속에서 벗어나 산악지형에 대

한 적응력이 뛰어나며 특히 4족 보행 로봇(quadruped robot)은 관절형 로봇의 특징인 보행 안정성과 이동성을 겸비한 로봇이다.

4족 보행 로봇의 연구는 미지의 환경에 대한 평탄한 지형에서의 보행과 같은 기초적인 연구방향이 제시되고 있고 일반적인 보행과 장애물 회피 목표 지점까지의 경로 계획 혹은 센서의 기능적 다양성을 이용한 보행제어에 관하여 연구가 진행되어 왔다. 기존의 로봇은 그 작업공간의 한계를 평탄한 지형에 한하여 galloping 보행 방법을 연구하였다. 하지만 복잡한 환경과 빠른 이동성을 요하는 운반, 탐사 그리고 구조 등의 임무를 수행하기 위해 미지환경의 비평탄 면에서의 galloping 이동 방법에 대한 연구는 많지 않다.

Raibert 가 제시한 스프링에 압축된 SLIP 법칙은 이러한 이론을 정리한 것이다.^(1,2) 또한 Raibert 는 이

§ 이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회(2008. 11. 5.-7., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, jongpark@hanyang.ac.kr

러한 이론을 기초로 4 족 로봇이 2.9m/s 의 빠른 속도로 이동하는 것을 보였다. 당시 로봇은 공압과 내연기관을 이용하는 병진 운동을 하는 다리가 사용되었으며, Marhetka 역시 병진운동 하는 다리를 사용하였다. 여기에서는 전동 모터가 사용되었고, 7 m/s 의 빠른 속력을 자랑하였다.⁽³⁾ 그러나 이러한 병진운동의 기구학은 충격에 취약하다. 이것에 비해 다자유도를 갖는 관절 구조는 이러한 충격량을 감쇠시킬 수 있으며, 더욱 유연한 운동이 가능하지만 제작의 어려움이 있다. 이에 대하여 J. Gordon Nichol 은 다자유도를 가지는 4 족 로봇의 galloping 을 위한 기구학적 연구를 수행하였으며, 여기에 SLIP 법칙을 적용하여 에너지를 이용하는 연구를 수행 하였다.⁽⁴⁾ 동물은 본능적으로 뛰어난 적응력과 에너지 저장능력을 지니고 있다. 이는 IPSM 모델로 galloping 알고리즘의 모델을 설명하기에 우수하다. L. R. Palmer III 는 trot 걸음걸이의 몸 자세 제어를 제안 하였고 fuzzy 알고리즘을 사용하여 다리가 움직이는 각도와 몸체의 기울기 변화를 측정하여 제어하였다.⁽⁵⁾ 하지만 이러한 움직임에 기반을 두면 angular momentum 이 유지되어 보행 안정성의 보장은 없다. 그래서 momentum 에 기초한 fuzzy 제어 알고리즘을 사용하여 비평탄면에서의 galloping 알고리즘을 만들었고, 이를 설명하기 위해 개발된 동역학 시뮬레이터를 이용하여 그 안정성과 성능을 검증하고자 한다.⁽¹⁰⁾

본 논문은 간략하게 다음과 같이 구성된다. 2 장에서는 4 족 로봇의 모델과 보행 패턴에 대하여 언급하고 구조와 기구학적 요소에 대하여 설명하였으며, 3 장에서는 desired force generation 에 대해 간략히 기술하며, 4 장에서는 Fuzzy logic 을 이용한 제어알고리즘 전반 사항을 설명하고, 5 장에서는 시뮬레이션을 하여 그 결과를 기술하였으며, 결론이 이어진다.

2. 로봇 모델 및 보행 패턴

2.1 동적 모델의 구성

Fig. 1 과 Fig. 2 는 각각 시뮬레이션을 위해 개발된 로봇의 3D 모델과 구조를 설명하고 있다. 각각의 다리는 2 개의 active pitch joint, 1 개의 roll joint 와 1 개의 비틀림 스프링으로 구성된 passive joint 를 가지고 있다. 로봇의 발에는 지면으로부터 오는 contact force 를 측정 할 수 있는 force sensor 가 장착 되어 있고, CoG 에는 로봇의 진행 속도와 각속도를 측정할 수 있는 gyro sensor 가 장착되어 있으며, 로봇의 전체적인 길이와 질량 그리고 스프링 특성을 Table 1 에서 확인할 수 있다. 하드웨어 적으로 중요한 passive joint 는 gallop 보행에 있어 지면에서 오는 에너지를 비축하는 역할과 충격력을 줄여주며 SLIP 의 스프링과 동일한 역할을 수행 하게 된다.^(8,9)

프링 특성을 Table 1 에서 확인할 수 있다. 하드웨어 적으로 중요한 passive joint 는 gallop 보행에 있어 지면에서 오는 에너지를 비축하는 역할과 충격력을 줄여주며 SLIP 의 스프링과 동일한 역할을 수행 하게 된다.^(8,9)

Table 1 Specifications of the Quadruped Robot

A. Link length and mass			
Component	Value	Component	Value
FL1, FR1	120 mm	RL1, RR1	150 mm
FL2, FR2	180 mm	RL2, RR2	150 mm
FL3, FR3	100 mm	RL3, RR3	100 mm
Height Min.	150 mm	Height Max.	400 mm
Total Length	640 mm	Total weight	20 Kg

B. Passive leg's specifications			
Spring coefficient	100 N/m	Damping coefficient	15 N-s/m

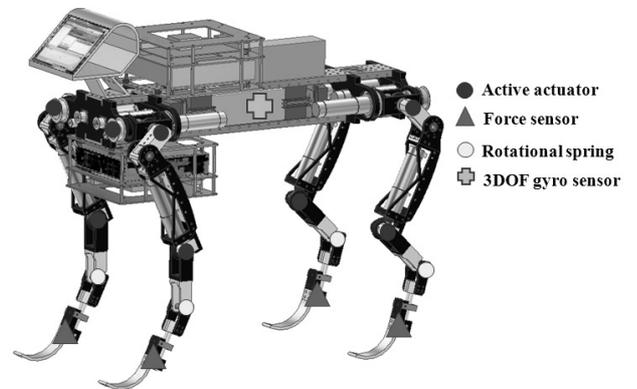


Fig. 1 3D Dynamic model

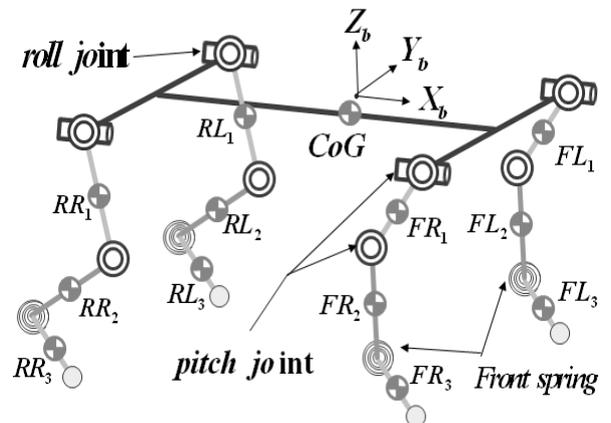


Fig. 2 Structure of the robot

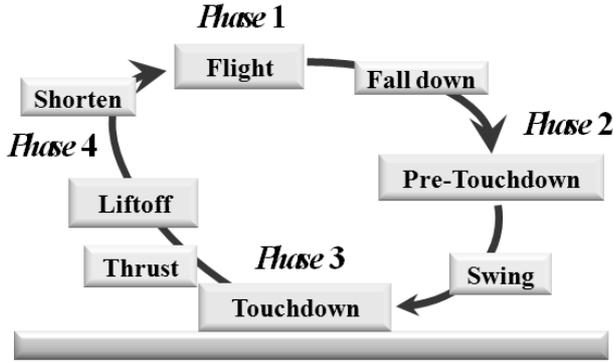


Fig. 3 Phase flow chart of a running cycle

2.1 보행 패턴

동물의 gallop pattern 에서 flight phase 와 stance phase 로 구분될 수 있으며 stance phase 에서 운동 형태가 결정되며 지면과 flight phase 사이에서 지면과 접촉하게 되는 touchdown 의 속도 및 위치는 전체 운동에 영향을 주는 가장 중요한 부분이다. Fig. 3 에서는 gallop pattern 을 flight (phase1), pre-touchdown (phase2), touchdown (phase3), liftoff (phase4)의 단계로 나뉘고 그에 따른 로봇의 움직임은 fall down, swing, thrust, shorten 으로 나뉜다. phase1 에서의 로봇은 이동은 있으나 움직임 없이 하강하고 phase2 에서 desired CoG 의 속도와 위치를 알아내고 이정보를 이용하여 phase3 에서 swing 궤적을 생성 로봇이 일정한 속도를 유지 하며 phase4 에서 로봇은 다음 동작을 준비하게 된다.

3. Desired force generation

본 논문에서는 4족 로봇의 안정적인 galloping 을 위한 모션 생성을 위해 운동량의 변화량을 바탕으로 착지 할 때 발끝에 감지되는 값을 이용하여 힘을 제어한다. 식 (1)과 같이 힘의 desired trajectory 를 sin function 으로 만들고 그 크기를 운동량의 변화량으로 정의 한다.

$$\vec{F}_i^d(t) = \alpha_i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_f}t\right) \quad (1)$$

운동량의 변화량과 힘과의 관계는 식 (2)와 같고,

$$\Delta m\vec{v} = \int_{t_0}^{t_f} \vec{F}(t)dt \quad (2)$$

운동량 변화량과 desired force 궤적의 관계 또한 식 (3)과 같다.

$$\Delta m\vec{v} = \int_{t_0}^{t_f} \alpha_i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_f}t\right)dt, \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (3)$$

α 의 값은 식 (4)와 같다.

$$\alpha_i = \frac{\pi}{2t_f} \cdot \Delta(m_i\vec{v}_i) \quad (4)$$

따라서 desired force 의 magnitude 는 식 (5)와 같다.

$$\vec{F}_i^d(t) = \sin\left(\frac{\pi}{t_f}t\right) \cdot \frac{\pi}{2t_f} \cdot \Delta(m_i\vec{v}_i) \quad (5)$$

$\Delta m_i\vec{v}_i$ 는 desired force 의 크기에 도달 할 수 있는 운동량을 나타낸다.

4. 제어 알고리즘

gallop 알고리즘은 로봇이 빠른 속도로 이동하면서 다양한 외란에 봉착하게 되고 이를 해결하기 위해서는 짧은 시간 안에 많은 계산량과 높은 제어 성능 그리고 정밀도를 요구하게 된다. 여기에서 이 문제를 로봇의 동적 특성으로부터 desired force 수정을 통해 해결하고자 한다. 식 (6)과 식 (7)은 앞발과 뒷발의 수정된 desired force 를 나타낸다. M 은 로봇의 전체 질량이고 δ 는 앞발과 뒷발의 contact force 의 차이를 나타낸다.

$$F_{Front}^d(t) = \sin\left(\frac{\pi}{t_f}t\right) \cdot \pi \left(\frac{m_{Front}\Delta\vec{v}}{2t_f}\right), \quad (6)$$

$$m_{front} = \frac{M}{2} + \delta$$

$$F_{Rear}^d(t) = \sin\left(\frac{\pi}{t_f}t\right) \cdot \pi \left(\frac{m_{Rear}\Delta\vec{v}}{2t_f}\right), \quad (7)$$

$$m_{Rear} = \frac{M}{2} - \delta$$

Fuzzy logic 제어기의 구성은 제어 변수를 Fuzzy logic 에서 이용할 수 있도록 귀속 함수(membership function)를 이용하여 퍼지집합으로 표현하는 퍼지화(fuzzification), 입력과 출력에 대한 관계를 Fuzzy logic 제어 알고리즘으로 정의하는 퍼지 규칙(fuzzy rule base), 퍼지화 되어진 입력과 출력, 그리고 퍼지 규칙을 이용하여 제어량을 계산하는 추론 방식(inference engine), 계산되어진 퍼지 결과값을 실제 시스템에 적용하기 위하여 실제 물리량으로 바꾸어 주는 비퍼지화(defuzzification)의 네 단계로

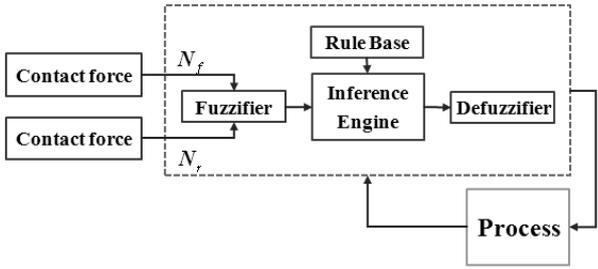


Fig. 4 Structure of the fuzzy control system.

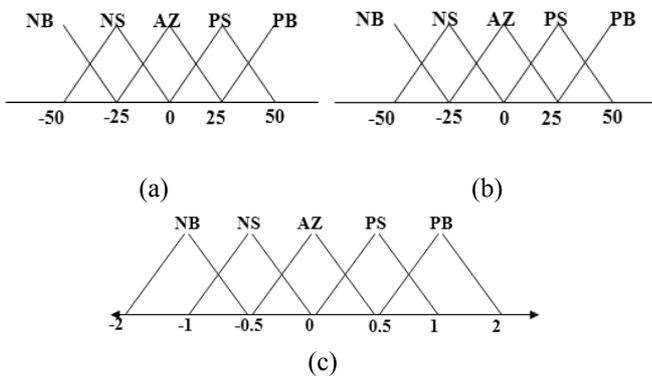


Fig. 5 Membership function

구성된다. Fig. 4 는 퍼지 제어기의 구조를 나타낸다.

본 논문에서는 4 개의 발에 대한 Fuzzy logic 제어기를 각각 설계하였고, 각 발에 대한 contact force 를 제어입력으로 하고 앞발과 뒷발의 차이를 제어 출력으로 설정 하였다.

4.1 퍼지화(Fuzzification)

퍼지 제어기의 입력은 각 발에 장착된 force sensor 에서 측정된 contact force 를 제어변수로 나타낸다. contact force 의 퍼지화를 위해 다음과 같은 5 개의 퍼지 집합을 정의한다. NB, NS, AZ, PS 그리고 PB 는 각각 Negative Big, Negative Small, Almost Zero, Positive Small 그리고 Positive Big 을 나타낸다. 이렇게 정의된 퍼지 집합을 이용하여 Fig. 5(a) 그리고 Fig. 5(b)와 같은 삼각형 형태의 귀속 함수를 정의하였다.

퍼지 제어기의 출력에 의해 desired force 는 측정된 contact force 에 대한 차이를 통해 수정된다. 입력 변수와 동일하게 제어변수를 퍼지화 하기 위하여 Fig. 5(c)와 같은 5 개의 퍼지 집합을 정의하였다.

4.2 퍼지규칙(Fuzzy Rule Base)

본 논문에서 사용된 퍼지 규칙은 로봇에서 측정되는 각종 sensor 값에 의해 기존의 desired force

Table 2 Fuzzy rule

	PB	PS	AZ	NS	NB
PB	AZ	NS	NB	NB	NB
PS	PS	AZ	NS	NB	PB
AZ	PB	PS	AZ	NS	NB
NS	PB	PB	PS	AZ	NS
NB	PB	PB	PB	PS	AZ

를 수정하여 pitching moment 를 일정하게 유지 하여 불규칙한 지형을 이동하고자 한다. 이는 좌우의 왼발과 오른 발의 contact force 가 지배하는 rolling moment 에도 동일하게 적용된다. 제어 변수들로부터 제어 입력을 결정하는 퍼지 규칙은 다음과 같다.

4.3 추론방식(Fuzzy Inference Engine)

Fuzzy inference 는 IF-THEN 문으로 이루어진 퍼지 규칙으로부터 결론을 유추하는 과정이다. 즉, 퍼지 규칙에서 사용된 AND, OR 그리고 NOT 등의 논리적 연어에 의한 연산을 정의하여 어떤 물리적 수치에 대하여 퍼지화된 제어 변수와 퍼지 규칙에 의해 결정되는 출력의 귀속 함수에 대한 귀속도를 결정한다. 본 논문에서는 이러한 추론 방식 중에서 가장 많이 사용되는 Mamdani 추론 방식을 이용한다.

4.4 비퍼지화(Defuzzification)

퍼지 규칙과 추론 방식에 의해 결정된 값은 입력에 대한 출력의 귀속도이다. 이 값들은 실제의 시스템에 적용하기 위해서는 비퍼지화를 통해 일반적인 물리량으로 변환시켜야 한다. 본 논문에서는 면적 중심법(Centroid of Area Method)을 이용한 비퍼지화를 수행하였다.

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \tag{8}$$

n = 출력에 대한 귀속 함수들

$\mu_A(x_i)$ = 결과 퍼지 집합의 귀속도

x_i = 귀속 함수의 출력값

$y(x)$ = 비퍼지화에 의한 물리량

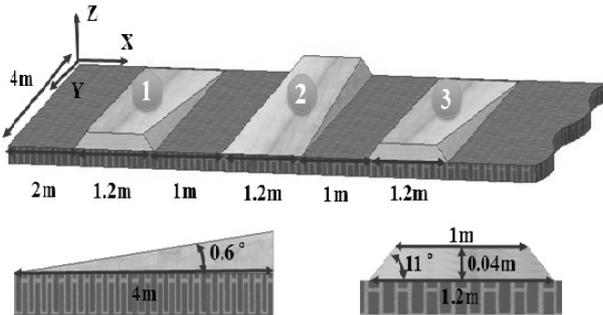


Fig. 6 Shapes of Uneven Surface

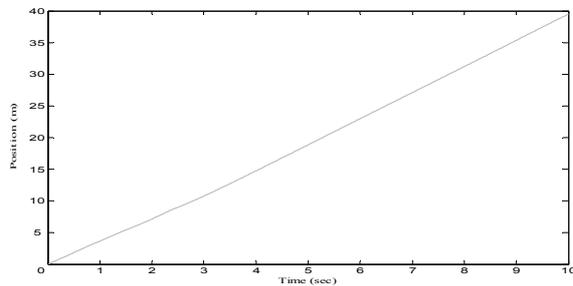


Fig. 7 Position of the base X-CoG

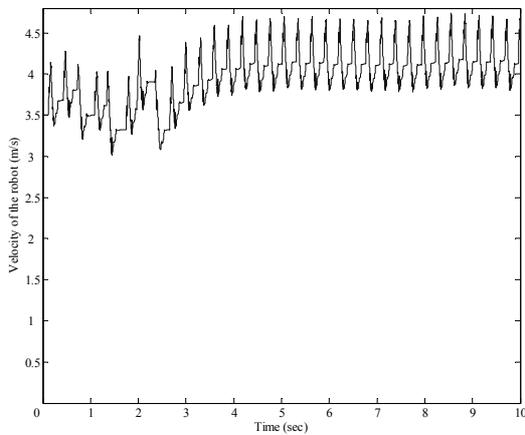


Fig. 8 Velocity of the robot

5. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에 사용된 시뮬레이터는 상용 다물체 동역학 프로그램인 RecurDyn[®]을 사용하였다. 여기에서 사용된 접촉 모델은 다음 식을 사용하여 수직 반력을 계산한다.

$$F_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3}, \quad (9)$$

$$k = 1 \times 10^6, \quad c = 1 \times 10^3, \quad m_1 = 1.3, \quad m_2 = 1, \quad m_3 = 2.$$

k = Spring Coefficient
 c = Damping Coefficient
 δ = Penetration
 m_1 = Stiffness Exponent
 m_2 = Damping Exponent
 m_3 = Indentation Exponent

이러한 마찰계수 함수와 식 (9)에서 계산한 수직 반력을 사용하여 다음과 같이 마찰력을 계산한다.

$$F_f = \mu(v) |F_n| \quad (10)$$

여기서 F_n 은 식 (9)에서 계산한 수직 반력이며 F_f 는 마찰력이다.

시뮬레이션은 gallop 보행 방법을 통하여 빠른 속도를 가지고 비평탄면을 이동하며 각각의 제어 방법에 의해 좌우 방향과 전후 방향의 제어가 원활하게 이루어지는지에 중점을 둔다.

5.1 시뮬레이션에 사용된 비평탄면

지형탐사, 운반 및 구조 등의 임무가 주어진 경우 4족 보행로봇은 안정성을 확보하며 빠른 이동성을 가져야 한다. 이러한 임무의 지형은 대부분 높은 턱을 가지거나 비탈진 경사 혹은 언덕 지형의 비평탄면을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 임무를 수행할 수 있는 galloping 알고리즘을 실험하기 위해서 진행 방향(X 축)에 대해 경사진 면과 언덕 그리고 각기 다른 방향의 좌우경사(Y 축)를 가진 복합적인 비평탄면을 설계하였고 이 지형에서 약 4 m/s의 속도로 이동하고자 한다. Fig. 6는 설계된 불규칙 지형을 나타낸다.

5.2 시뮬레이션 결과

보행 실험은 10 초간 진행되며 Fig. 6과 같은 장애물 3개를 통과하여 평탄 지형으로 이동하게 된다. 이때 로봇의 초기 속도와 높이는 3.5 m/s, 0.25m이다. Fig. 7은 10 초간 로봇이 이동한 거리를 나타내며 39.5 m을 이동하였다. Fig. 8은 보행 시간에 대한 이동 속도를 나타낸다. 장애물 구간에서 속도가 줄어들고 이때의 속도는 최저속도 3.0 m/s를 기록하며, 평탄지형을 이동할 때는 최고속도 4.7 m/s이고, 평균속도 3.9 m/s로 이동한다. Fig. 9는 로봇의 CoG 위치를 시간에 대하여 나타내고 0.9초, 1.5초, 2.2초에 장애물을 이동하여 각각 최고점에 이르며 평탄지형에 접어들어

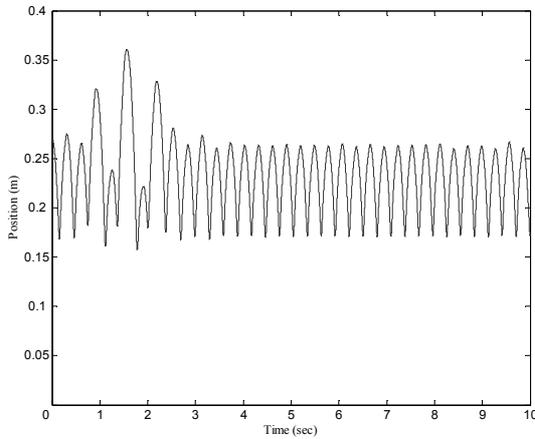


Fig. 9 Position of the base Z-CoG

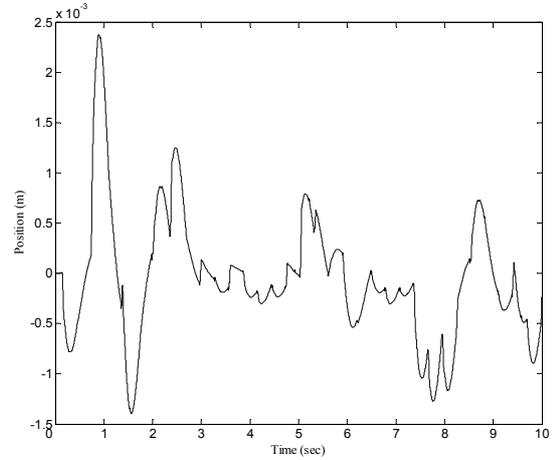
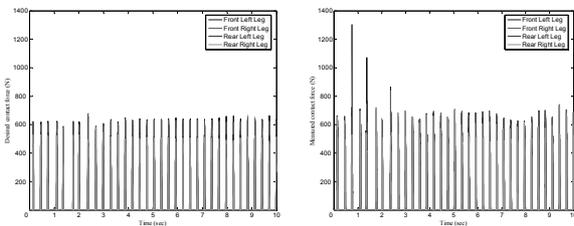


Fig. 12 Position of the Y-CoG



(a) Desired contact force (b) Measured contact force

Fig. 10 Contact force

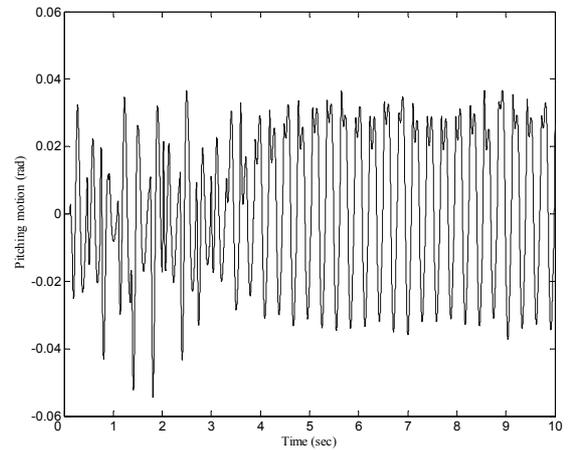


Fig. 13 Pitching motion of the base CoG

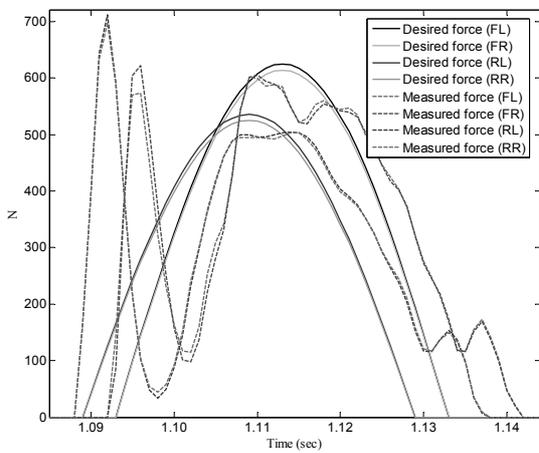


Fig. 11 Comparison between real and desired force

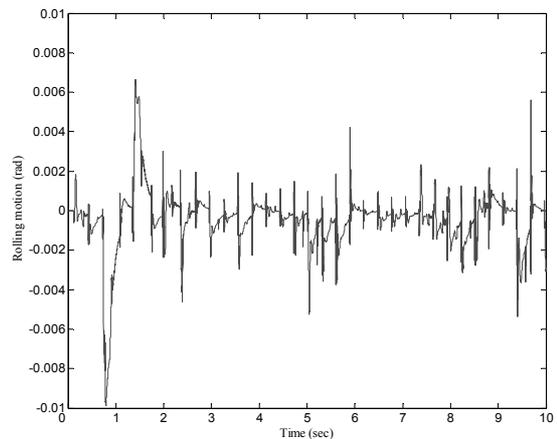


Fig. 14 Rolling motion of the base CoG

무게중심의 높이를 일정하게 유지하며 galloping 을 하고 있다. Fig. 10 의 (a)는 desired contact force 이고 (b)는 지면으로부터 측정된 contact force 로 장애물 을 이동 할 때 순간적으로 높은 값을 나타내지만 장애물 구간을 통과 후 안정을 찾는다. 이는 Fig. 11 에서 실선의 desired contact force 와 점선의 real force 의 비교를 통해 Fuzzy-Logic 알고리즘을 이용하여 desired force 를 수정하고 원하는 값을 추정하고 있음을 보여준다. Fig. 12 은 진행 방향에 대한 CoG 의 좌우방향에 대한 이탈 범위를 보여주며

최대 2.5 mm 의 범위 내에서 좌우방향의 균형을 유지하며 이동하고 있다. Fig. 13 은 CoG 의 pitching motion 의 회전 정도를 나타내며 초기의 장애물 구간에서 회전 크기가 커짐을 확인할 수 있으나

제어에 의해 평탄 지형 내에서부터 일정한 pitching motion 을 보여준다. Fig. 14 는 rolling motion 을 나타내며 pitching motion 과 함께 작은 범위에서 제어 가능함을 보여준다.

6. 결 론

본 논문은 비평탄면에 대한 galloping 알고리즘을 설계된 지형 환경에서 Fuzzy Logic 을 이용하여 제어하였다. 비평탄 면에서는 많은 외란이 발생하게 되고 이러한 외란 중에 지면으로부터 오는 contact force 의 앞발과 뒷발의 차이를 이용하여 desired contact force 를 running cycle 의 phase3 이후 수정하여 pitching momentum 의 발생을 줄여 안정적인 galloping 을 하게 된다. 또한, 좌우 방향의 왼발과 오른발에서 발생하는 rolling momentum 역시 동일한 알고리즘을 적용하여 제어 하였고, 목표한 장애물을 통과 후 안정적인 보행을 통해 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2008 년도 한국과학재단의 특정기초 연구 지원으로 수행되었으며, 본 논문에 도움을 주신 분께 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Hodgins, J. K. and Raibert, M. H., 1991, "Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3.
- (2) Raibert, M. H., 1986, *Legged Robots That Balance*, MIT press, Cambridge.
- (3) Marhefka, D. W., 2000, "Fuzzy Control and Dynamic Simulation of Quadruped Galloping Machine," Ph.D. thesis, The Ohio State University.
- (4) Nichol, J. G., 2005, "Design for Energy Loss and Energy Control In A Galloping Artificial Quadruped," Ph.D. thesis, The Stanford University.
- (5) Palmer, L. R. III, 2007, "Intelligent Control and Force Redistribution for a High-Speed Quadruped Trot," ph.D. thesis, The Ohio State University.
- (6) Kawamura, A., Sugio, K., Suzuki, K. and Zhu, C., 2004, "Simulation Study on One Leg Jumping for Biped Running", *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 71- 74.
- (7) Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasager, M., 2006, "Robot Modeling and Control," John Wiley & Sons, Inc.
- (8) Alexander, R. M., 1990, "Three Uses for Spring in Legged Locomotion," *The international journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 53~61.
- (9) Seipel, J. E. and Holmes, P., 2005, "Running in Three Dimensions: Analysis of a Point-mass Sprung-leg Model," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 8, pp. 657~674.
- (10) Shin, C. -R., Chae, K. G. and Park, J. H., 2008, "Development of Quadruped Robot and Dynamic Walking," *proceedings of the KSME 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 220~225.

(1) Hodgins, J. K. and Raibert, M. H., 1991, "Adjusting