

사족보행 로봇의 개발을 위한 생체모방적 접근

Biologically Inspired Approach for the Development of Quadruped Walking Robot

강 태 훈, 송 현 섭, 최 혁 렬*

(Tae Hun Kang, Hyun Sup Song, and Hyouk Ryeol Choi)

Abstract : In this paper, we present a comprehensive study for the development of quadruped walking robot. To understand the walking posture of a tetrapod animal, we begin with a careful observation on the skeletal system of tetrapod animals. From taking a side view of their skeletal system, it is noted that their fore limbs and hind limbs perform characteristic roles during walking. Moreover, the widths of footprints and energy efficiency in walking have a close relationship through taking a front view of their walking posture. According to these observations, we present a control method where the kinematical solutions are not necessary because we develop a new rhythmic gait pattern for the quadruped walking robot. Though the proposed control method and rhythmic pattern are simple, they can provide the suitable motion planning for the robot since the resultant movement is based on the animal's movements. The validity of the proposed idea is demonstrated through dynamic simulations.

Keywords : quadruped walking robot, biomimetics, rhythmic pattern, dynamic simulation

I. 서론

환경(uneven terrain)에서 로봇의 이동능력(mobility)과 기동능력(manueverability)을 향상시키기 위하여 거론될 수 있는 많은 방법들 중에 대표적인 것은 생체모방학(biomimetics)이라 일컬어지는 학문이다. 특히, 살아있는 생명체를 모방하는 것은 로봇의 기구학적 설계뿐만 아니라 제어기 설계를 위한 많은 모델과 개념들을 제공하기 때문에 로봇 연구자들에게 각광 받고 있는 학문 분야이다. 아울러, 이러한 학문분야는 로봇 기술혁신을 위한 중요한 분야로 주목 받고 있다. 이러한 흐름을 반영하듯이, 최근에 많은 로봇 연구자들이 동물의 골격 구조뿐만 아니라, 그들의 제어 시스템까지 모방하려는 노력을 기울이고 있다[1-6]. 따라서, 대부분의 사족보행 로봇은, 사족보행 동물(tetrapod)의 골격구조에 대한 연구를 바탕으로 기구학적으로 동물의 그것과 비슷한 구조를 갖도록 설계되어왔다. 즉, 사족보행 로봇은 2개의 링크와 3 자유도를 갖는 다리 구조로 대부분 이루어져 있다. 그리고, 제어 알고리즘 및 제어 시스템의 경우, 동물의 CNS(Central Nervous System)를 모방한 제어 시스템 설계와 주기적인 파형을 생성하는 CPG(Central Pattern Generator)등을 이용한 다양한 제어 전략을 제시하고 있다[3,7,8].

비록, 사족보행 로봇이 뛰어난 기동성과 우수한 환경 적응 능력을 가지고 있기 때문에 다양한 용도에 사용될 수 있을 것으로 예상되지만, '어떠한 제어를 사용할 것인가?' '보행을 위한 안정된 자세는 어떤 것인가?' '보행로봇의 다리를 어떻게 설계할 것인가?' 등과 같은 질문들은 아직까지도 로봇 연구자들에게 있어 해결해야만 하는 문제점으로 지적되고 있다.

앞에서 언급한 문제점들을 해결하기 위하여 최근까지 몇몇 연구자들은 생체모방학에 근거한 사족보행 로봇의 다리 구조와 보행 자세 결정에 관하여 설명하였으며 그들이 결정한 보행동물의 기구학적 구조와 보행자세를 로봇에 적용하려 노력하였지만, 이러한 노력에도 불구하고 지금까지 소개되어온 보행 로봇들은 다양한 환경에서의 충분한 환경적응 능력을 가지고 있지 못한 것으로 알려져 있다.

일반적으로, 동물의 보행이나, 새의 날갯짓, 그리고 물고기의 유영 등은 대표적인 CPG의 결과물로 잘 알려져 왔고, 많은 연구자들이 이러한 주기적인 운동을 수학적으로 정리하기 위하여 신경뉴런(sensory neuron)과 운동뉴런(motor neuron) 등에 대하여 깊이 있게 연구하여 왔다[9,10]. McCulloch와 Pitts의 뉴런모델, Leaky Integrator 뉴런모델, Matsuoka의 뉴런모델 등은 대표적인 뉴런모델들이다. 아울러, 로봇 연구자들은 사족보행 로봇의 적절한 보행 제어를 위하여, 뉴런모델을 보행로봇에 적용하였고, 다양한 형태의 제어 전략을 제시하였다[3,7,8]. 그러나, 이러한 뉴런 형태의 제어기들이 동물의 움직임에 부분적으로 설명할 수 있다 하더라도 로봇 시스템에 사용 되는 뉴런모델은 실제동물의 거동을 모방하기에는 매우 부족한 것이 사실이다. 예를 들어, 로봇 연구자들은 뱀과 같은 동물의 움직임을 단순히 적은 수의 뉴런으로 그것의 운동을 모사하는 경우가 일반적이다[11]. 그러나, 가장 단순한 곤충인 거머리(leech)조차도 21개 이상의 분절된 신경절(segmental ganglia)을 갖고 있으며, 각각의 신경절에는 175쌍의 뉴런 묶음을 갖고 있다[12]. 즉, 보행동물뿐만 아니라 모든 동물의 운동은 단순히 몇몇의 뉴런모델로 설명될 수 없다. 따라서, 지금까지 소개된 몇몇 사족보행 로봇들[3,7,8]에서 사용되고 있는 생체모방형 제어기는 로봇의 이동능력과 환경적응력을 향상시키는데 무리가 있다.

본 논문에서는, 생체모방학에 근거한 사족보행 로봇의 설계 및 개발에 관하여 논의한다. 사족보행 동물의 기구학적 구조를 면밀히 관찰함으로써 앞발(fore limb)과 뒷발(hind limb)이 보행 중에 갖는 독특한 기능에 대하여 이해할 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 12. 15., 채택확정 : 2006. 2. 25.

강태훈, 송현섭, 최혁렬 : 성균관대학교 기계공학부

(ka1943@me.skku.ac.kr/hyunsup401@me.skku.ac.kr/hrchoi@me.skku.ac.kr)

* 이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-202-D00031).

특히, 보행 중 나타나는 사족보행 동물의 특이한 보행 자세를 분석함으로써 에너지 효율과 보행자세에 대한 상관관계를 얻을 수 있게 된다. 결론적으로, 앞에서 언급한 동물의 기구학적 구조에 대한 이해와 보행 에너지 효율에 대한 분석을 통하여, 본 논문에서는 간단하면서도 효과적인 보행이 가능한 제어 전략을 소개한다.

II. 사족동물의 보행에 관한 분석

동물 분류는 여러 가지 방법으로 가능하지만, 한가지 방법은 그들의 골격구조의 이해로부터 동물이 어느 종(class)로 분류되는지 대략적으로 구분 지을 수 있다. 특히, 수적으로 지구상에서 우위를 차지하고 있는 사족 포유류의 경우, 우리는 다양한 포유류들이 매우 흡사한 골격구조를 갖는다는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 그림 1에서 보이는 것처럼, 사족 포유 동물의 다리 구조는 적행류(plantigrade), 지행류(digitigrade) 그리고 유재류(unguligrade)로 크게 3가지 형태로 분류된다 [13]. 여기서, 지행류 포유 동물의 다리는 다양한 환경에서의 뛰어난 적응력뿐만 아니라, 다양한 보행이 가능한 구조로 되어 있다. 본 논문에서는 사족보행 로봇의 보행 자세를 효과적으로 개발하기 위하여 개나 고양이와 같은 지행류 포유 동물에 대하여 논문의 초점을 맞추도록 한다.

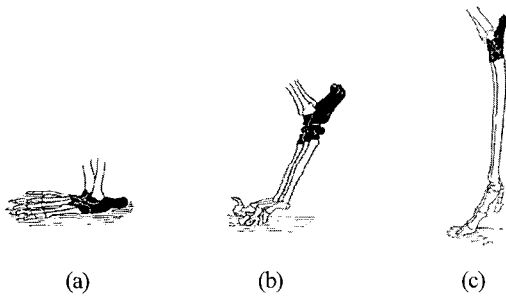


그림 1. (a)척행류(사람, 곰, 쥐) (b)지행류(고양이, 개, 사자) (c) 유재류(말, 사슴).

Fig. 1. (a)Plantigrade(human, bear, rat), (b)digitigrade(cat, dog, lion), (c) unguligrade(horse, deer).

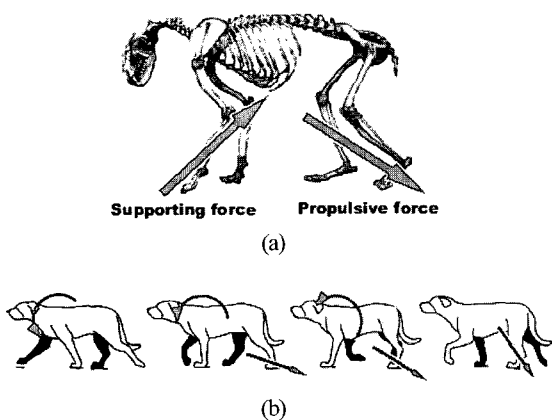


그림 2. (a)측면에서 본 애완용 개, (b)보행중 앞과 뒤 다리는 서로 다른 역할을 한다.

Fig. 2. (a)Side view of a domestic dog, (b)fore and hind limbs play their roles, respectively.

1. 보행 중 앞/뒷다리의 역할

일반적인 이족 또는 사족보행에 대한 수학적 모델로 역진자 모델이 사용된다. 이 역진자 모델은 중력에 의한 위치에너지와 운동에너지의 주기적인 교환 과정을 잘 설명한다고 알려져 있다[14]. 즉, 무게중심은 보행시 그 속도가 느려지고 보다 높은 위치로 이동함으로써 위치에너지를 갖게 되고, 남은 보행 주기 동안 무게 중심의 위치가 낮아짐으로써, 위치에너지가 운동에너지로 변환되는 순환과정이 동물의 보행 중 나타나게 되는 것이다[15,16]. 이러한 에너지가 주기적으로 변화 하는 동안, 앞다리와 뒷다리는 몸을 지탱하는 역할과 몸을 앞으로 나아가게 하는 추진력을 발생시키는 각각의 역할을 하게 된다. 그림 2(a)와 같이 우리가 지행류 포유 동물의 측면 모습을 관찰했을 때, 그들 대부분은 질량 중심이 몸의 앞부분에 위치하는 유사한 구조를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이 특징은 거의 모든 지행류 포유 동물에서 나타나는 독특한 특성이다. 그림 2(b)에서 보이는 것처럼, 지행류 포유 동물의 뒷다리는 몸무게의 단지 4/10만큼만 지지하기 때문에 앞다리 보다 자유롭게 움직일 수 있고, 대부분의 추진력은 뒷다리에서 발생하게 된다[17,18]. 이와는 반대로, 앞다리는 대부분의 질량을 지지하는 역할과 몸체가 앞으로 도약하는 것을 돕게 된다.

우리는 앞과 뒷다리가 각각 지지하는 힘(supporting force)과 추진하는 힘(propulsive force)을 생성해 내는 이러한 특징들을 명확하게 증명하기 위하여 *Manipulating-force ellipsoid* 이론을 사용하였다[19].

예를 들어, 지행류 포유 동물의 앞다리 또는 뒷다리는 그림 3에서 보이는 것과 같이 각각 2자유도 시스템으로 모델링 될 수 있다. 순기구학과 자코비안(jacobian) J 는 일반적인 방법으로부터 쉽게 얻을 수 있으며, 각각의 링크 길이가 $L_1 = L_2 = L$ 인 경우 *Manipulability Ellipsoid*의 두 주축(principle axis)은 JJ^T 의 SVD(Singular Value Decomposition)를 이용하여

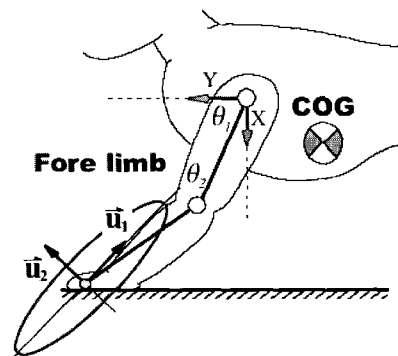


그림 3. 앞다리의 기구학적 구조: 다리의 길이는 $L_1 = L_2 = L$ 로 지정되었다. 왜냐하면 그들의 넓적다리과 경골은 서로 비슷한 길이를 가지고 있기 때문이고, 이러한 가정은 수학적으로 설명될 수 있다.

Fig. 3. Kinematic structure of a fore limb: the length of leg can be assigned to $L_1 = L_2 = L$ because their thigh and tibia have similar length for each part. Also, it can be explained by manipulability.

쉽게 얻을 수 있다. 이러한 결과들로부터, 고유값 λ_i 와 단위 고유벡터 u_i 에 관한 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\lambda_i = \frac{L^2}{2} \left[3 + 2c_2 \pm \sqrt{5 + 12c_2 + 8c_2^2} \right] \quad (1)$$

$$u_i = \begin{bmatrix} \left\{ (s_1 + s_{12})(c_1 + c_{12}) + s_{12}c_{12} \right\} / k_i \\ \left\{ (s_1 + s_{12})^2 + s_{12}^2 - \frac{\lambda_i}{L^2} \right\} / k_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$c_1 \triangleq \cos \theta_1, s_1 \triangleq \sin \theta_1, c_{12} \triangleq \cos(\theta_1 + \theta_2), s_{12} \triangleq \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$k_i = \left[\left\{ (s_1 + s_{12})(c_1 + c_{12}) + s_{12}c_{12} \right\}^2 + \left\{ (s_1 + s_{12})^2 + s_{12}^2 - \frac{\lambda_i}{L^2} \right\}^2 \right]^{1/2}$$

(1)과 (2)로부터, *Manipulability Ellipsoid*의 두 주축들은 $u_i / \sqrt{\lambda_i}$ 와 같이 결정된다. 따라서, 그림 3에서 표현한 것처럼, 지행류 포유동물의 앞다리가 몸통 쪽으로 휘어져 있는 이유는, 보행 중 몸통이 앞으로 넘어지는 것을 지지하기 위함이다. 즉, *Manipulability Ellipsoid*의 u_1 방향으로 가장 큰 힘을 생성 할 수 있는데, 지행류 포유동물들은 이러한 힘의 방향을 자신의 무게 중심으로 향하게 하는 것이다. 따라서, 지행류 포유동물의 앞과 뒷다리의 형태가 서로 마주보면서 안쪽으로 휘어져 있는 이유가 *Manipulability Ellipsoid*를 해석함으로써 명확히 설명될 수 있다[16]. 사족 보행로봇을 개발에 있어서 이러한 앞다리와 뒷다리가 갖는 각각의 역할에 대한 고려는 중요한 설계 요소로 활용되어야만 한다.

2. 보행 중 다리의 자세

상식적으로, 보행 시 지지하는 발사이의 폭이 넓은 경우가 폭이 좁은 것 보다 안정적으로 보행 할 수 있을 것이라 생각 된다. 그러나, 이러한 가정은 정적인 보행(static walking)을 할 경우에 적용 가능하며 동적인 보행(dynamic walking)의 경우에는 적용이 불가능 하다. 이것은 이족 또는 사족보행 동물들의 보행을 자세히 관찰함으로써 쉽게 이해할 수 있다 [20,21]. 예를 들어, '우리가 눈 위에 찍힌 보행 동물의 발자국을 유심히 관찰 한다면, 그림 4(a)-(c) 와 같이 그들 자신의 몸 크기에 비해 발자국의 폭이 상대적으로 매우 좁음을 알 수 있을 것이다. 또한, 동물이 보행 할 때 좌우방향으로의 몸의 움직임이 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 독특한 현상은 지금까지 보고되었던 사족보행 로봇의 연구 결과와는 매우 상이한 것이다[2,3]. 즉, 동물들이 보행 중 에너지 소비를 최소화하고 최소의 힘 또는 토크로 자신의 몸을 제어하기 위하여 이러한 독특한 보행 자세를 유지하는 것이다.

위와 같은 관찰로부터, 우리는 동물이 보행 중에 매우 작은 다리 폭을 갖는 반면, 매우 작은 몸의 흔들림만으로도 안정적인 보행이 가능한 이유를 이해하여야만 할 것이다.

본 논문에서는 보행 동물의 독특한 보행자세를 이해하기 위하여 다음과 같이 역진자 모델을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

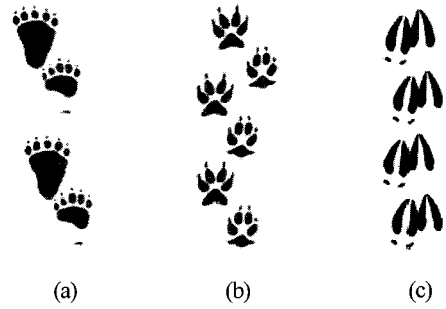


그림 4. (a)척행류 포유동물의 발자국(곰), (b)지행류 포유동물의 발자국(개, 늑대), (c)유재류 포유동물의 발자국(말, 사슴).

Fig. 4. (a)Plantigrade mammal's footmark(bear), (b)digitigrade mammal's footmark(dog, wolf), (c)unguligrade mammal's footmark(horse, deer).

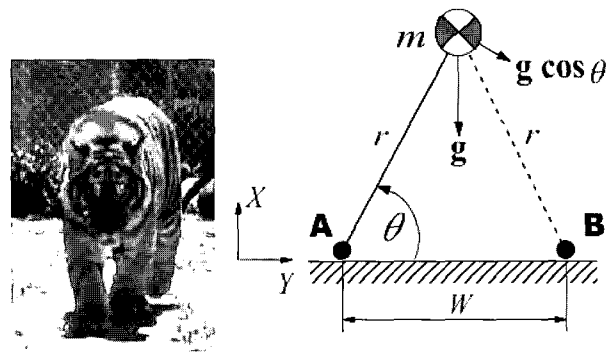


그림 5. 보행 중 지면과 닿는 발(A, B)사이의 폭과 지면 반력과의 관계를 이해하기 위한 역진자의 개략도.

Fig. 5. Schematic of an inverted pendulum for understanding the relationship between a width of supporting feet(point A and B) and a ground contact force.

그림 5와 같이, 지행류 포유동물은 좁은 발자국을 가지고 있다. 이러한 특징을 다음과 같이 간단한 시뮬레이션으로 증명 될 수 있다. 우리는 이러한 특징을 이해하기 위하여 하나의 점 질량(point mass)에 질량이 없는 두 개의 가상 링크(massless two link)를 가지고 있는 모델을 고려하였다. 그림 5에서 질량 m은 지면과의 접촉점 A 또는 B가 지면에 닿는 순간 길이 r 을 갖는 링크로 연결된다.

여기에서, 각 질량 m의 각 가속도 α (angular acceleration)는 다음과 같이 표현되며,

$$\alpha = -\frac{g}{r} \cos \theta \quad (3)$$

질량 m의 가속도(linear acceleration)는 기초적인 동역학 이론에 의하여 (4)와 (5)와 같이 계산된다.

$$a_x = -r(\omega^2 \cos \theta + \alpha \sin \theta) \quad (4)$$

$$a_y = r(\alpha \cos \theta - \omega^2 \sin \theta) \quad (5)$$

여기서, ω 는 접촉점 A에서의 질량 m 에 대한 각속도 이

다. 그리고 g 는 중력 가속도 이고, θ 는 수평에서부터 접촉 점 A와 연결된 링크까지의 사잇각을 측정 한 것이고, r 은 링크의 길이이다.

(3)을 (4)와 (5)에 대입하고, 접촉점 A에서 지면 반발력 (ground reaction force) F_x 와 F_y 를 (6)과 (7)로 표현 할 수 있다.

$$F_x = -rm(\alpha \sin \theta + \omega^2 \cos \theta) \quad (6)$$

$$F_y = rm(\alpha \cos \theta - \omega^2 \sin \theta) \quad (7)$$

지면 반발력과 지면과 닿는 발 폭 사이의 관계를 설명하기 위하여 θ 와 ω 의 수치 해석적 적분 시 각각의 초기값을 다음과 같이 결정하였다.

$$m=20kg, r=1m, W=0.05m, \text{ and } \theta = \cos^{-1}\left(\frac{W}{2r}\right)$$

그림 6는 지면과 닿는 발폭과 보행 중 사족 동물이 넘어지는 시간과의 관계를 나타낸다. 지면 반발력의 관점에서 살펴 보면, 발폭이 좁은 경우(width 0.40m)가 발폭이 넓은 경우에 비하여 작은 지면 반발력이 가해지는 것을 알 수 있다. 아울러, 동일한 지면 반발력이 작용 할 경우, 발폭이 좁을수록 몸통이 한쪽 방향으로 넘어지는 것을 쉽게 또는 작은 힘으로 막을 수 있다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 지행류 포유동물은 보행 중에 그들 자신의 몸을 최대한 작은 에너지를 가지고 제어하려고 발폭을 좁게 사용한다는 것을 의미한다. 다리 폭이 좁음에도 불구하고, 그림 6에서 나타낸 것과 같이, 다리를 움직이기에 충분한 시간을 갖고 있기 때문에 안정되게 보행 할 수 있는 것이다.

3. 보행 방식 구현

지금까지 소개된 사족보행 로봇의 보행 방식을 개발하기 위하여 고려될 수 있는 방법들 중 대표적인 방법은 생체모방학에 근거를 둔 것들이다. 첫 번째 방법은 CPG와 같이 뉴런들의 신호 체계 및 데이터 전송방식을 모방하는 것이고, 다른 하나는 동물의 보행 자체를 흉내 내는 것이다. 특히 CPG는 기구학적 또는 동역학적 풀이와 같은 어떤 수학적 계산이 필요로 하지 않기 때문에 많은 로봇 연구자들의 관심의 대상으로 여겨져 왔다. 또한, CPG는 몇몇의 뉴런들로 구성되어

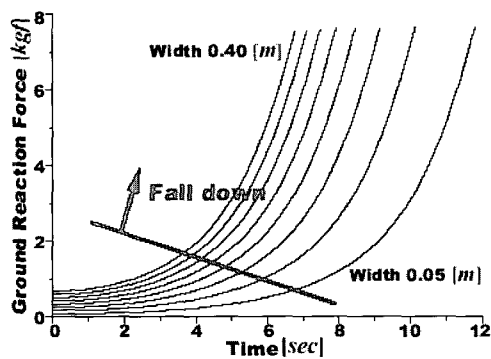


그림 6. 지면과 닿는 발폭과 지면 반발력 사이의 관계.
Fig. 6. Relationship between width of supporting feet and ground contact force.

있고 이러한 구조는 실제 동물의 거동을 잘 설명하는 것처럼 보여진다.

비록, CPG를 이용한 방법이 보행 로봇에게 적절한 제어 전략을 제공할 수 있을지 모르지만, 그것의 개발에 있어서는 이전의 동역학적/기구학적 해석을 수행하는 만큼의 시간과 노력을 기우려야 한다. 만약, 이와 같은 방법을 사용하여 보행 로봇의 제어 시스템을 구성하기를 원한다면, 뉴런모델에서 사용되는 수 많은 변수 결정은 엄청난 시행착오를 통해서만 얻을 수 있다는 것을 알아야만 하며, 시스템의 변수들의 일반화 또한 거의 불가능하다는 것을 고려하여야 할 것이다. 아울러, 보다 높은 수준의 제어 알고리즘을 구성하기 위해서는 뉴런의 화학적 상관 관계에 얽힌 많은 문제들을 해결해야만 할 것이다. 즉, 앞서 언급한 것처럼 보행동물의 보행 및 거동을 몇몇의 뉴런으로 표현한다는 것 자체가 어려운 것이기 때문이다.

생체모방학에 근거하여 로봇의 보행 방식을 개발하기 위하여, 직관적인 관찰은 그 무엇보다도 중요하다. 특히 동물의 보행 패턴(pattern)과 다리의 움직임과 같은 동물의 움직임을 특징적으로 관찰 할 수 있다면, 로봇 개발을 위한 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 다시 말해서, 우리가 뉴런간의 의사소통에 대한 이해를 시도하지 않고 동물의 운동 형상을 결정할 수 있다면, 우리는 쉽게 사족보행 로봇의 효과적인 보행 방식을 결정 할 수 있다.

다음 장에서는 이러한 우리들의 접근 방식을 설명하기 위한 내용이 서술된다. 이것은 우리들의 직관적인 관찰과 수집된 정보들로부터 그 결과를 도출할 것이다.

III. 보행 패턴 제어기

1. 사족 동물의 보행 패턴

그림 7(a)에서와 같이 지행류 포유동물이 평평한 환경을 일정한 속도로 걸을 때, 이들의 다리 움직임은 일정한 간격을 두고 반복적인 스윙 상태(SW, Swing Mode)와 지지 상태(SP, Supporting Mode)를 유지하게 된다. 또한, 각각의 다리 관절각은 일정한 위상을 유지하며 일정한 패턴을 형성하게 된다[22,27]. 이로부터 우리가 다리 사이의 패턴과 각각의 관절 각 사이의 관계를 이해할 수 있다면, CPG와 같은 반복적인 패턴을 발생시키는 파형 발생기(oscillator)를 쉽게 정의할 수 있다.

그러나, 이러한 임의 형태의 패턴을 수학적으로 기술하기란 결코 쉬운 일이 아니다. 본 논문에서는 실제 동물의 거동을 정확히 모사하기 위하여 Bezier curve를 사용하였고[28], 파형 발생기(K_{ij} , i 번째 다리, j 번째 관절)를 구성하였다. 이러한 작업은 CPG와 같은 파형 발생기를 사용하기 위하여 소비되는 시간과는 비교 할 수 없을 만큼 빠르고 다양한 형태의 보행 패턴을 생성 할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어, 그림 7(b)은 본 논문에서 제안된 파형발생기로 생성된 뒷다리 관절각 사이의 관계를 보이고 있고, 또한 이 파형발생기는 실제 동물의 거동을 정확히 모사할 수 있다는 것을 보이고 있다. 여기서, Bezier curve를 생성하기 위하여 각각의 관절에 사용된 제어점(control point)는 5개에 불과하며, 이러한 파형을 결정하기 위한 소요 시간은 수분에 불과하다. 이것은

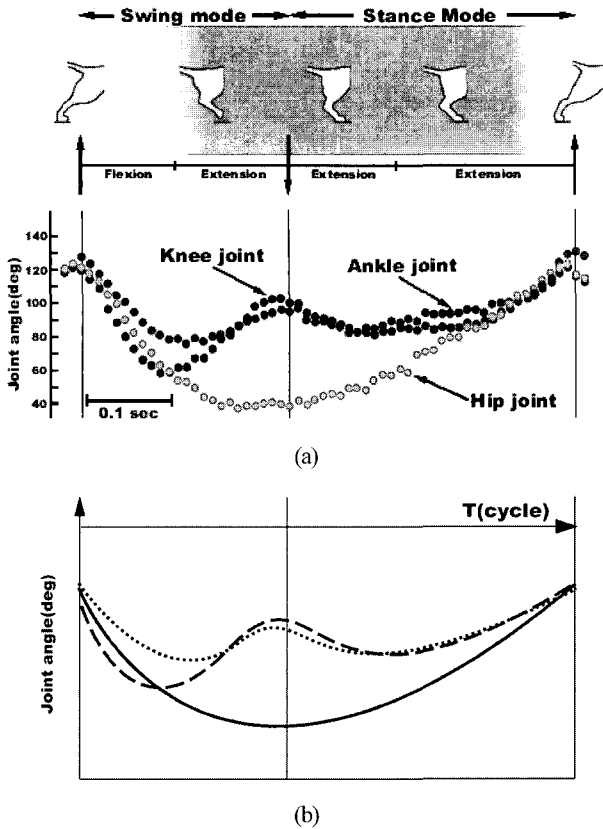


그림 7. (a) 보행 중 고양이 다리 관절 사이의 관계, (b) 제안된 파형 발생기로 구현된 관절각 패턴.
 Fig. 7. (a) Relationship between the joint angles of each leg, (b) the result of the proposed pattern generator.

지금까지 소개된 그 어떠한 파형 발생기 보다 간단하며, 쉽게 사용이 가능할 뿐만 아니라, 그 활용 가능성 또한 매우 높다고 판단된다.

아울러, 우리는 보다 일반화된 보행패턴을 결정짓기 위하여, 보행에서 한 주기 동안 SW와 SP가 차지하는 비율을 정량화 할 필요가 있다. 지금까지의 연구에서는 이러한 비율은 보행속도에 의하여 결정된다고 알려져 있다[20,27]. 그러나, 표 1에서 보이는 것처럼, 다양한 보행 속도에도 불구하고 보행 속도에 따른 비율변화는 극히 작다는 것을 알 수 있다. 여기에서, 보행 중 한 주기 동안 SW와 SP의 비율은 보행 속도 보다는 보행 형태에 따라 크게 구분 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 보다 자연스러운 보행 보행패턴을 결정짓기 위한 중요한 설계요소로 활용 가능한 결과이며, 사족보행 로봇의 보행패턴을 일반화 할 수 있는 기준이 될 것이다.

아울러, 로봇의 자연스러운 보행을 구현하기 위하여, 단순히 파형 발생기만으로는 어려움이 많다. 따라서, 동물의 보행에 가장 큰 영향을 미치는 감각 수용기(receptor)의 역할을 함께 사용하여야 한다[23]. 즉, 포유류의 경우, 감각 수용기는 외부 수용기(exteroceptor)와 자기 수용기(proprioceptor)로 구분된다. 전자는 주로 기계적 하중(mechanical load)을 측정하는데 사용되는 반면, 후자는 그들은 몸의 위치와 움직임을 인식할 수 있고, 근육과 힘줄 그리고 다른 기관의 신경끝부분에 위치한다. 본 논문에서는 앞으로 제안될 보행 패턴 제어기의

표 1. 보행 중 한 주기 동안의 SW와 ST의 비율.

Table 1. The ratio of SW and ST while one cycle.

	WALK			TROT			RUNNING		
	cycle	ST	SW	cycle	ST	SW	cycle	ST	SW
Fore Limb	767.6	0.66	0.34	479.6	0.45	0.55	336.0	0.32	0.68
	918.4	0.66	0.34	504.0	0.47	0.53	355.2	0.25	0.75
	888.8	0.64	0.36	244.8	0.46	0.54	86.7	0.24	0.76
	754.8	0.69	0.31	477.3	0.49	0.51	344.1	0.26	0.74
	792.0	0.79	0.21	380.8	0.32	0.68	351.0	0.28	0.72
	836.0	0.63	0.37	470.4	0.55	0.45	358.4	0.25	0.75
Hind Limb	767.6	0.68	0.32	370.6	0.32	0.68	336.4	0.32	0.68
	787.8	0.64	0.36	490.5	0.44	0.56	384.0	0.23	0.77
	734.4	0.64	0.36	448.8	0.41	0.59	355.2	0.25	0.75
	816.0	0.63	0.37	488.4	0.45	0.55	332.8	0.23	0.77
	780.0	0.67	0.33	369.6	0.30	0.70	357.5	0.28	0.72
	754.8	0.65	0.35	455.1	0.46	0.54	426.6	0.19	0.81
	765.9	0.61	0.39	369.6	0.33	0.67	246.4	0.36	0.64
Fore mb(%)		68	32		44	56		27	73
Hind mb(%)		64	36		40	60		16	74

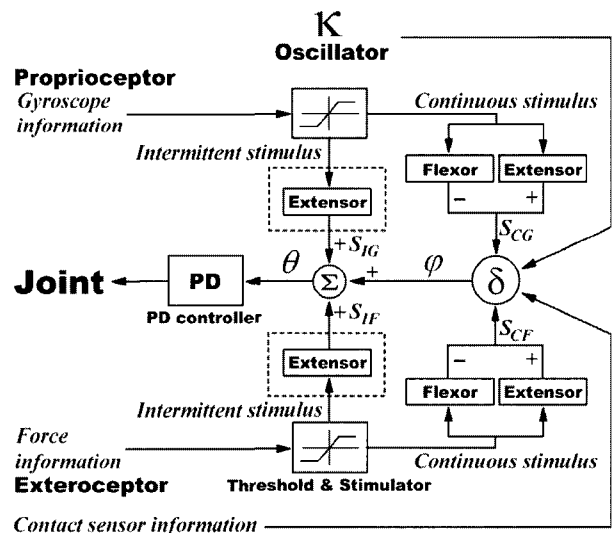


그림 8. 파형 발생기, 자극기, 문턱값 검출기, PD 제어기로 구성된 제안된 제어기.

Fig. 8. The proposed controller consists of four parts including an oscillator, stimulatory part, threshold detector, and PD controller.

설계에 있어서, 앞서서 언급된 동물의 보행패턴, 보행자세, 아울러, 제안된 파형 발생기 및 감각 수용기를 복합적으로 사용하여, 사족보행 로봇에 적합한 제어기를 제안한다.

2. 보행 패턴 제어기

본 논문에서 제안되는 보행패턴 제어기는 그림 8에서 보이는 것처럼 문턱값 검출기(threshold value detector)에 따라 Exceeding Loop과 Non-exceeding Loop의 제어구조를 갖는다. Exceeding Loop이 활성화 되는 경우는, 외부에서 입력되는 두 가지 감각 수용기들(자이로스코프, 경사계, 힘 센서, 토크 센

서)이 문턱값 검출기에 정의되어 있는 한계치를 넘게 되면 문턱값 검출기는 extensor를 자극하는 Stimulator를 활성화시켜 **Exceeding Loop**를 형성한다. 또한, 이때 발생하는 자극 신호는 매우 빠르며 강한 자극 신호(intermittent stimulus)를 가지며 외란에 대하여 로봇의 즉각적인 반응을 유도하게 된다. 이것은 동물들이 무의식 중에 외란에 반응하는 원리를 모사한 것이다. 그러나 문턱값 검출기의 한계치를 넘지 못하는 경우는 extensor가 활성화 되지 못하기 때문에 **Non-exceeding Loop**의 제어구조를 갖게 된다. 이 경우 수용기 신호는 flexor와 extensor를 자극하고 그 신호들(S_{CG} , S_{CF})은 (8)에서 보이는 것처럼, 자극 신호를 집결시키는 δ (phase shifter)에 전달된다. 최종적으로 로봇 관절의 제어는 PD 제어가 담당하게 된다.

$$\delta_{ij} = \varepsilon_{ij}(S_{CG} + S_{CF}) \quad (8)$$

보행 중 SW 경우,

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{contact with ground} \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

보행 중 SP 경우,

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{contact with ground} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

IV. 동적 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 모델

본 논문에서 분석되고 제안된 것들에 대한 타당성을 검증하기 위하여 사족보행 로봇에 대한 동적 시뮬레이션(dynamic simulation)을 수행하였다. 사용된 시뮬레이터는 ODE(Open Dynamic Engine)를 기반으로 하며, 이것은 다양한 강체 거동에 대한 시뮬레이션을 구현 할 수 있도록 구성되어 있다[24].

사족 보행 로봇의 모델은 그림 9와 같다. 다리 구조는 지행류 포유동물의 그것을 모방하였으며, 다리의 길이는 앞에서 언급한 *Manipulability* 이론으로부터 결정되었다. 특히, 앞다리는 어깨관절(A), 무릎관절(B) 그리고 쇄골관절(G)을 포함한 3자유도를 가지고 있다. 쇄골관절에 있는 조인트는 보행 중 발 사이의 폭을 조정하기 위한 것이다. 또한 지행류 동물의 무게 중심이 앞쪽에 위치한다 것을 보이기 위하여, 그림 9와 같이 1kg의 질량(F)을 덧붙였다.

시뮬레이션이 수행된 환경은 그림 10과 같이 아무런 장애물이 없는 평지환경, 오르막과 내리막이 있는 장애물 환경, 3cm의 장애물이 50cm 간격으로 놓여있는 환경, 그리고, 울퉁불퉁한 지면을 갖는 복잡한 지형 등 4가지가 사용되었다.

2. 보행 효율

제안된 로봇의 보행 자세와 제어기의 성능을 비교하기 위하여, 보행 효율(locomotion energetic)을 측정하는 방법 중 비저항(specific resistance)를 이용하였다[25,26].

일반적으로, 비저항(ε)은 (9)와 같이 정의 된다.

$$\varepsilon = \frac{E}{mgl} \quad (9)$$

Parts	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Mass (g)
(A) Scapula	60	15	14	14
(B) Knee	32	15	32	32
(C) Hip	40	15	51	51
(D) Thigh	130	30	10	123
(E) Tibia	130	30	10	123
(F) Front Mass				1,000
(G) Clavicle	32	15	32	32

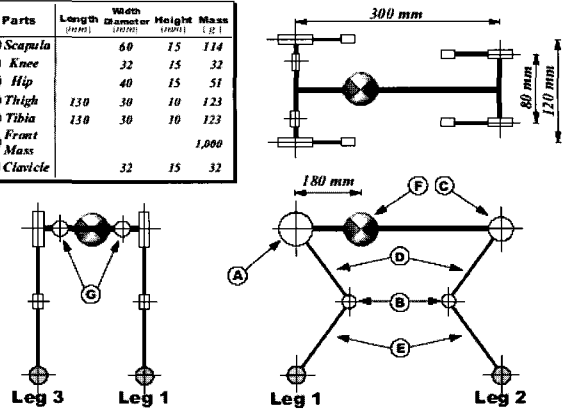


그림 9. 시뮬레이션에 사용된 보행 로봇의 기구학적 구조
Fig. 9. Kinematic structure for quadruped walking robot.

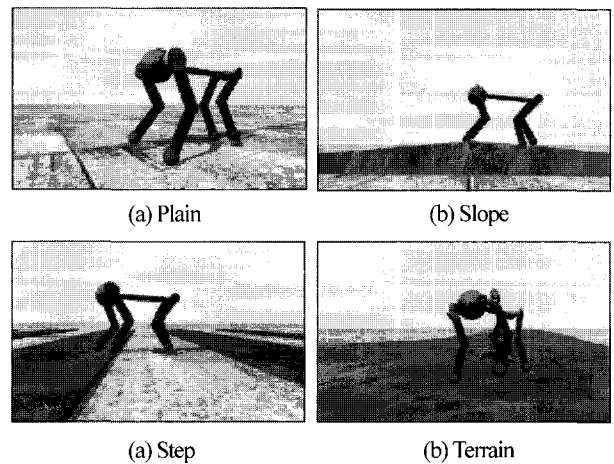


그림 10. (a) 평지 환경, (b) 10°의 경사각을 갖는 오르막과 내리막 평지, (c) 50cm 마다 장애물(50cm×3cm×500cm)이 있는 환경 (d) 울퉁불퉁한 지면을 갖는 환경.

Fig. 10. (a) Plain environment, (b) inclined and declined planes with a slope angle of 10°, (c) there are obstacles (50cm×3cm×500cm) at 50cm intervals, (d) rough terrain environment.

여기서 E 는 거리 L 을 이동하는 동안 소모되는 기계적 에너지 소비이며, m 은 로봇의 전체 질량 그리고 g 는 중력 가속도이다. 이것은 (10)에서와 같이 시간에 대한 관절에서의 토크와 각속도의 관계로부터 얻을 수 있다.

$$E = \int |\tau_{ij} \omega_{ij}| dt \quad (10)$$

여기서 τ_{ij} 와 ω_{ij} 는 i 다리의 j 관절의 토크와 각속도이다.

그림 11은 다양한 환경에서 비저항의 변화를 보여준다. 이로부터, **Exceeding Loop**의 효율이 **Non-exceeding Loop**의 것보다 높다는 것을 알 수 있으며, 한가지 특이한 점은 보행 초기에 에너지 효율이 매우 좋지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나, 시간이 경과할수록 로봇은 스스로가 환경에 적응하며, 에너지 효율은 일정 범위에서 유지된다. 이것은 로봇의 제어기가 동역학적으로 안정화된 상태를 유지한다는 것을 의미

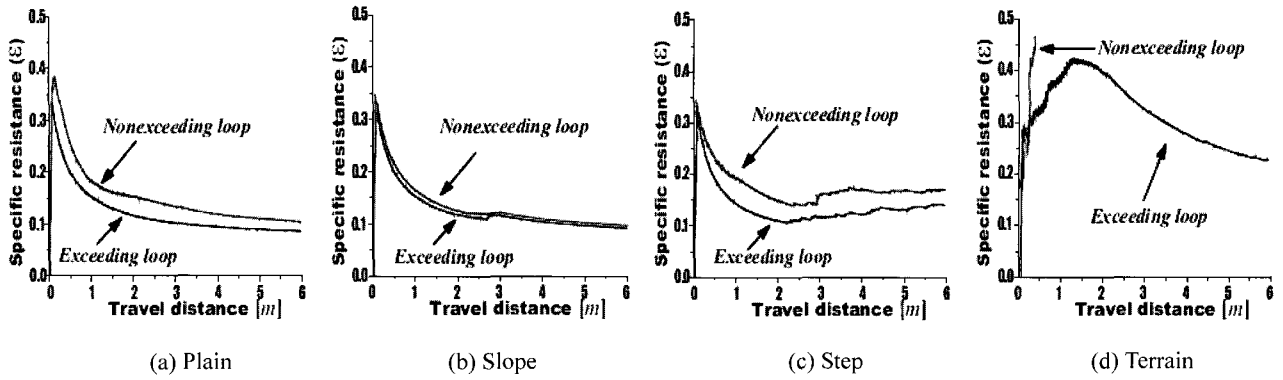


그림 11. 이동거리에 따른 비저항.

Fig. 11. Specific resistance versus a travel distance.

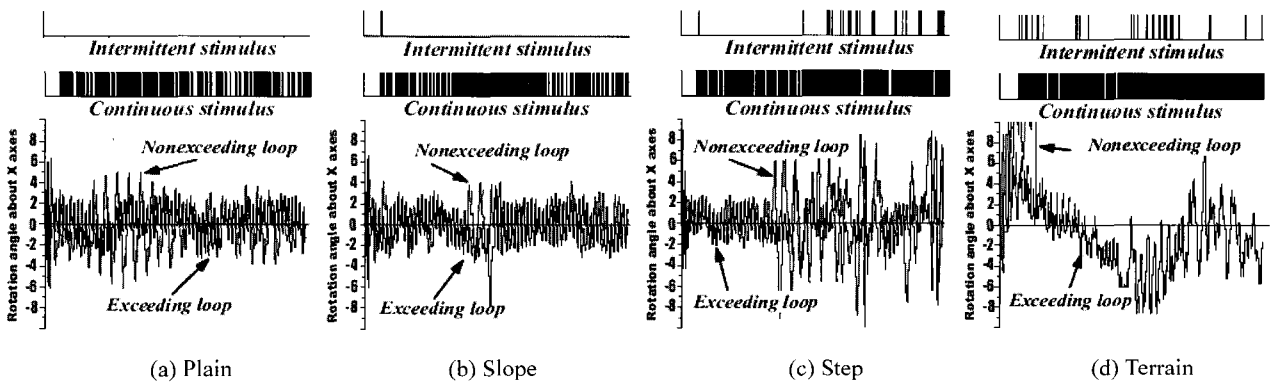


그림 12. 이동거리에 따른 x 축의 회전각.

Fig. 12. Rotation angle about x axis versus a travel distance.

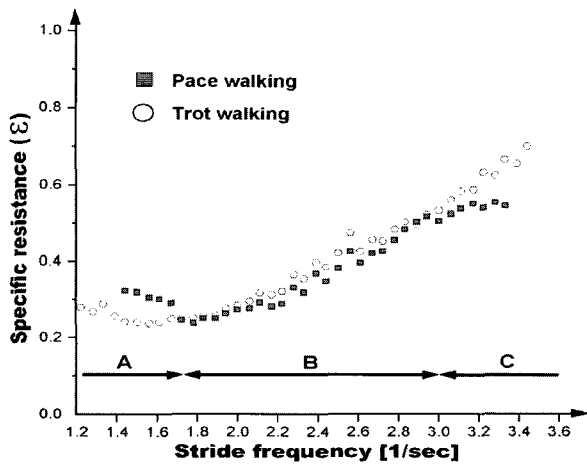


그림 13. 보폭 주기(stride frequency)와 비저항과의 관계.

Fig. 13. Relation between stride frequency and specific resistance.

하게 된다.

또한, 우리는 다양한 보행 중 보폭 주기와 비저항에 대한 관계를 그림 13과 같이 얻었다. 즉, 동물이 보행 형태를 다양하게 바꿔가며 보행을 하는 이유는 그들 스스로 보다 높은 에너지 효율의 보행을 유지하기 위하여 여러 가지 형태의 보행을 한다는 것을 알 수 있다.

V. 결론 및 토론

본 논문에서, 사족보행 로봇 개발을 위한 다양한 관찰에 대한 분석이 소개되었다. 지행류 포유동물의 보행을 이해하기 위하여, 우리는 그들의 보행 자세와 골격 체계를 분석하였고, 동물의 보행패턴으로부터 이끌어낸 주기적인 패턴을 기초로 하는 파형 발생기를 제안하였다. 이것은 간단한 수학적 계산만으로도 적절한 보행제어기를 설계할 수 있는 파형 발생기로서 역할을 충분히 하였다. 제안된 다양한 분석 및 제어기에 대한 효용성을 보이기 위하여 몇몇 환경에 대한 동적 시뮬레이션 또한 수행되었다. 이로부터, 우리는 사족보행 동물이 보행 중 보행 형태(trot, pace, walk, running)을 변화시키는지에 대하여도 이해 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. Berns, W. Ilg, M. Deck, J. Albiez, and R. Dillmann, "Mechanical construction and computer architecture of the four-legged walking machine BISAM," *IEEE/ASM Transactions on Mechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 32-38, 1999.
- [2] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1057-1062, 1999.
- [3] H. Kimura and Y. Fukuoka, "Biologically inspired adaptive dynamic walking in outdoor environment using a self-contained quadruped Robot : Tekken2," *Proceeding of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.

- 986-991, 2004.
- [4] T. J. Allen, R. D. Quinn, R. J. Bachmann, and R. E. Ritzmann, "Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1370-1375, 2003.
- [5] J. E. Clark, J. G. Cham, S. A. Bailey, E. M. Froehlich, P. K. Nahata, R. J. Full, and M. R. Cutkosky, "Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3643-3649, 2001.
- [6] S. H. Hyon and T. Mita, "Development of a biologically inspired hopping robot-kenken," *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3984-3991, 2002.
- [7] G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biological Cybernetics*, vol. 65, pp. 147-159, 1991.
- [8] G. Endo, J. Morimoto, J. Nakanishi, and G. Cheng, "An empirical exploration of a neural oscillator for biped locomotion control," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3036-3042, 2004.
- [9] K. Matsuoka, "Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators," *Biological Cybernetics*, vol. 56, pp. 346-353, 1987.
- [10] M. A. Arbib, "The handbook of brain theory and neural networks," *A Bradford Book*, The MIT press, 1995.
- [11] K. Inoue, S. Ma, and G. Jin, "Neural oscillator network-based controller for meandering locomotion of snake-like robots," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 5064-5069, 2004.
- [12] G. S. Stent, W. B. Kristan, Jr., W. Otto Friesen, C. A. Ort, M. Poon, R. L. Calabrese, "Neuronal generation of the leech swimming movement," *Science*, vol. 200, no. 23, pp. 1348-1357, 1978.
- [13] D. Linzey, *Vertebrate Biology*, McGraw-Hill Press, New York, 2001.
- [14] G. A. Cavagna, H. Thys, and A. Zamboni, "The sources of external work in level walking and running," *The Journal of Physiology*, vol. 262, issue 3, pp. 639-657, 1976.
- [15] T. M. Griffin, R. P. Main, and C. T. Farley, "Biomechanics of quadrupedal walking : how do four-legged animals achieve inverted pendulum-like movements?," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 207, pp. 354-3558, 2004.
- [16] M. H. Dickinson, C. T. Farley, Roboert J. Full, M. A. R. Koehl, Rodger Kram, Steven Lehman "How animals move : an integrative view," *Science*, *Aprill 7*, 288(5463) pp. 100-106, 2000.
- [17] A. B. Howell, "Speed and animals," *Chicago : University of Chicago Press*, 1994.
- [18] W. E. Roy, "Examination of the canine locomotor system," *Veterinary Clinics of North America*, vol. 1, no. 53, 1971.
- [19] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisems," *International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
- [20] L. Robinson, "The animal motion show," Rhino House, <http://www.rhinohouse.com>, vol. 2, 2003.
- [21] E. Muybridge, *Animals in Motion*, Dover Publicaation, New York, 1957.
- [22] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science 4th Edition*, McGraw-Hill, Health Professions Division, 2000.
- [23] J. Duysens, F. Clarac, and H. Cruse, "Load-regulating mechanisms in giat and posture : comparative aspects," *the american physiological society*, vol. 80, no. 1, pp. 83-133, 2000.
- [24] R. Smith, Open Dynamics Engine, <http://www.ode.org>
- [25] G. Gabrielli and T. H. von Karma, "What price speed?," *Mechanical Engineering*, vol. 72, no. 19, pp. 75-781, 1950.
- [26] R. B. McGhee, E. Nakano, N. Koyachi, and H. Adachi, "An approach to computer coordination of motion for energy-efficient walking machines," *Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory*, no. 43, 1986.
- [27] G. E. Goslow, H. J. Seeherman, and C. R. Taylor, "Electrical activity and relative length changes of dog limb muscles as a function of speed and gait," *J. Exp. Bilo.*, no. 94, pp. 15-42, 1980.
- [28] M. E. Mortenson, *Geometric Modeling, 2nd Edition*, Wiley Computer Publishing Press, 1997.



강 태 훈

2000년 성균관대학교 기계설계학과(공학사). 2002년 성균관 대학교 대학원 기계설계학과(공학석사). 2002년~현재 성균관 대학교 대학원 기계설계학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Biomimetics, Quadruped Walking Robot.



송 현 섭

2005년 경원 대학교 기계설계학과(공학사). 2005년~현재 성균관 대학교 기계설계학과 석사과정 재학. 관심분야는 Quadruped Walking Robot, Dynamic Simulation.



최 혁 렬

1984년 서울대학교 기계과(공학사). 1986년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1994년 포항대학교 기계공학과(공학박사). 1986년~1989년 LG Electronics 근무. 1993년~1995년 일본 교토대학 객원연구원. 1999년~2000년 일본 AIST 객원연구원. 1995년~현재 성균관대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 Field Robotics, Robot Hand, Dextrous Mechanism, Milli-Micro Robot, Artificial Muscles Actuator.