

# 4 족 보행로봇의 보행방법에 대한 에너지효율

신창록\* · 김장섭\* · 박종현† · 유흥희\*\*

## The Energy Efficiency of Walking Method for Quadruped Walking Robot

Chang-Rok Shin, Jang Seob Kim, Jong Hyeon Park and Hong Hee Yoo

**Key Words :** Quadruped Robot(4 족 로봇), Energy Efficiency(에너지효율), Walking Robot(보행로봇), Stability(안정성), Walking(상보), Trot Gait(트롯걸음새), Bound(바운드걸음새)

### Abstract

In this paper, the dependency of energy efficiency on the walking/running pattern and the walking/running period is analyzed through simulations of walk, trot and gallop. A quadruped animal has its own original features in the walking pattern and the walking period for adaptation to the environment. The robot model used in the simulations has three active joints and one passive spring-loaded joint at each leg, which is based on the actual quadruped robot, HUNTER (Hanyang UNiversity TETrapod Robot), developed in the lab. Also included is the dependency of energy efficiency on the walking period in trot.

### 1. 서 론

최근 관절형 로봇의 발전은 가속화 되고 다양한 방식의 기능과 이동 능력을 가진 로봇이 개발 되고 있다. 특히 지형탐사, 운반, 경계 및 감시등에 바퀴 혹은 무한궤도 등을 부착한 구동형 로봇을 이용되고 있지만, 다양한 지형과 환경 적응력에 한계가 있다. 이러한 이유로 다리를 가진 2 족 보행 로봇(biped robot), 4 족 보행 로봇(quadruped robot) 및 다족형 보행 로봇(multiped robot)등의 관절형 로봇이 가지는 장점인 등반 능력, 장애물 회피 및 험지 이동 능력이 인정되어 많은 기관에서 연구를 수행중이다.[1] 그 중에서 4 족형 견마로봇은 다양한 지형에서의 적응력이 뛰어나기에 민.관.군에서의 적극 개발 중이다. 외국의 대표적인 개발 사례로는 Boston Dynamics사에서 개발한 Big Dog 시리즈 이다. [2][3] 이 로봇은 자체 중량에 버금가는 적재량을 가지며

빙판, 눈길, 자갈밭 등 험지 이동 능력까지 갖추어져있다. 최근에는 내연기관을 분리한 상태에서 일부 께로핑까지 성공한 바 있으며, 본 연구에서는 이러한 모델을 향후 연구로 지향하고 있다. 앞서 동물의 께로핑 모방으로서 께로핑 께적을 타원으로 단순화 하여 적용한바 있다. [8] 이 와 달리 보행 시에 안정성을 확보한 걸음새를 이용하여 소비되는 에너지를 최소화하기 위해서 지형과 보행 목적에 따른 보행 방법과 보행 주기를 선정하기 위한 연구가 진행 되고 있다. Ahn 은 보행 로봇의 걸음새와 디딤을 해석을 통한 물결 걸음새를 이용한 4 족 보행 로봇이 개발된 바있다.[9] 보행의 안정성을 보상하기 위해 몸체에 균형진자를 적용한 4 족 보행 로봇이 제안되기도 하였다.[10] Kimura 는 안정도, 최대속도, 에너지소비량의 관점에서 4 족 보행로봇의 세 가지 보행방법인 트롯(trot), 페이스(pace) 그리고 바운드(bound)를 해석하여 안정성을 보장하는 최대 속도에서 trot 이 가장 효과적인 걸음걸이라고 주장한 바 있다.[4]

본 논문에서는 앞에서 언급한 내용을 실험하기 위하여 생체학적 접근을 통한 4 족 보행 로봇을 설계 하였다.[14] 또한, 설계된 로봇을 이용하여 동역학 시뮬레이션을 실시하고 이를 바탕으로 안정적인 보행에 의한 소비에너지

---

\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 정회원, 한양대학교 기계공학부  
† 책임저자, 정회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : jongpark@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2297-3786 FAX : (02)2297-378

---

효과를 극대화 할 수 있는 보행 방법과 보행 주기를 알기 위하여 동적 보행이 용이하게 개발된 4 족 보행로봇 HUNTER (Hanyang UNiversity TETrapod Robot)을 바탕으로 접근 하였다.

본 논문은 간략하게 다음과 같이 구성된다. 2 장에서는 4 족보행동물의 로봇 모델링에 대하여 언급하고, 로봇 파라미터와 구조에 대한 설명이 있으며, 3 장에서는 로봇의 걸음새에 관하여 설명하기 위한 주기, 디딤울, 안정여유를 설명하며 다음 4 장에서는 시뮬레이션에 사용될 세 가지 보행 방법에 대하여 설명하며, 5 장에서는 그에 따른 시뮬레이션 결과를 기술하였으며, 결론이 이어진다.

## 2. 로봇 모델링

본 논문에서 사용되는 모델은 실제 개발 된 4 족 로봇 HUNTER 의 구조와 동일하며, 로봇의 크기는 흔히 볼 수 있는 개(dog)의 크기를 갖는다. Fig. 1 은 실제 개발되어진 로봇이며 이와 동일한 구조를 가지는 시뮬레이션 모델을 Fig. 2 에 나타내며, 개발 되어진 시뮬레이션 모델의 구조는 각각의 다리는 2 개의 active pitch joint, 1 개의 roll joint 와 1 개의 passive joint 를 가지고 있다. 발에는 1 개의 force sensor 가 장착되어 있으며, 로봇의 무게중심에는 3 자유도 gyro sensor 가 장착되어있다. passive joint 의 역할은 꺾로핑에 있어서 Spring Loaded Inverted Pendulum(SLIP)의 스프링과 동일한 역할을 수행하게 되고, 로봇의 각 링크의 길이는 세부적으로 다르지만 전구와 후구의 전체 길이는 동일하며 Table 1 의 A 와 같다. Table 1 의 B 는 스프링상수 와 댐핑상수를 나타낸다.[6][7]

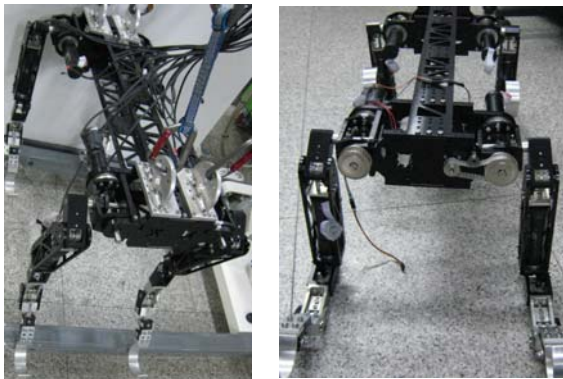


Fig. 1 HUNTER

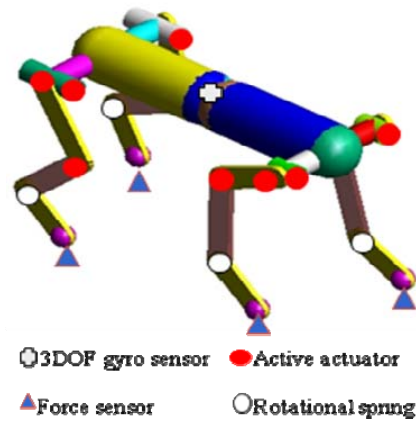


Fig. 2 Simulation model of a quadruped robot

Table 1

### A. Link length and mass

Component	Value	Component	Value
Front Link1	120 mm	Rear Link1	150 mm
Front Link2	180 mm	Rear Link2	150 mm
Front Link3	100 mm	Rear Link3	100 mm
Height Min.	150 mm	Height Max.	400 mm
Total Length	640 mm	Total weight	17 Kg

### B. Passive leg's specifications.

Front spring coefficient	100 N/m	Rear spring coefficient	100 N/m
Front damping coefficient	15 Ns/m	Rear damping coefficient	15 Ns/m

## 3. 로봇의 걸음새

걸음새(gait)는 보행 안정성을 유지한 채 개가 걷고 뛰는 행동 등의 주기적인 운동을 걸음걸이 또는 보양이라 하고 말과 개의 걸음걸이에서 보행 방법을 구분하면 상보(walk), 트롯(trot), 페이스(pace), 앰블(amble), 바운드(bound), 갤럽(gallop)등으로 나뉘어져 있다. 이는 말의 연구가 원용되어 개에게도 적용되어 왔으므로 말의 보행을 개의 보행과 견주어 알아둘 필요가 있다. 그러나 개, 말 또는 치타 등의 종류에 따라서 신체상 구조가 다른 점이 있으므로 그대로 적용 할 수는 없다. 본 논문에서는 걸음새를 표현하는 주기(period), 디딤

율(duty factor), 안정여유(stability margin) 등의 용어에 대하여 기술 하였다. [11][12][13]

### 3.1 주기(period)

보행주기(walking period,  $T$ ) 는 로봇의 보행에 있어서 모든 발이 한 번씩 동작을 하여 하나의 행정을 완료하는 시점까지의 시간을 말한다. 또한 로봇의 다리가 지면에 지지하고 있는 동안을 지지기간(support period,  $T_s$ )이라 하고 지면에 닿지 않고 이동하는 기간을 이동기간(transfer period,  $T_t$ )이라고 한다. 따라서 전체 보행주기  $T$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$T = T_s + T_t \quad (1)$$

### 3.2 디딤율(duty factor)

디딤율(duty factory,  $\beta$ )은 로봇이 보행 시 주기적으로 이동할 때 로봇의 다리가 한 주기 동안 지면을 지지하는 시간을 주기로 나눈 값으로 그 크기는  $0 < \beta < 1$  이며 로봇 고유의 보행 방법에 따라 디딤율의 크기가 달라진다.

$$\beta = \frac{T_s}{T} \quad (2)$$

### 3.3 안정여유(stability margin)

안정여유(stability margin:  $S_m$ )는 로봇이 이동할 때 몸의 무게중심(CoG : Center of Gravity)을 이동시켜 보행 안정성을 확보하는 최소한의 기준이 되는 판별 방법으로, Fig. 3 는 로봇의 CoG 를 지면에 수직하게 투영하여 이점을 기준으로 지지발의 세 지점을 연결한 지지다각형의 경계선과 최소거리로 정의하며 삼각형 내에 들어오게 되면 안정한 것으로 판별하고 이때 투영 점과 삼각형의 한 변과의 수직거리를 통하여 안정여유라 하고 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_m = \min\{d_1, d_2, d_3\} \quad (3)$$

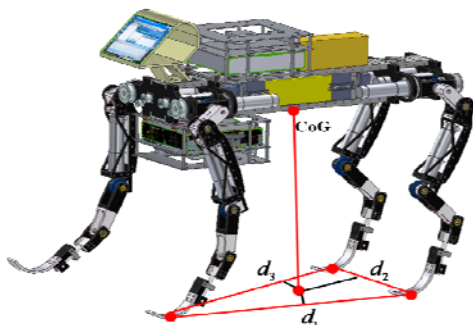


Fig. 3 Stability margin

Fig. 4 는 로봇이 안정여유 범위 내에서 CoG 의 이동을 보여준다.

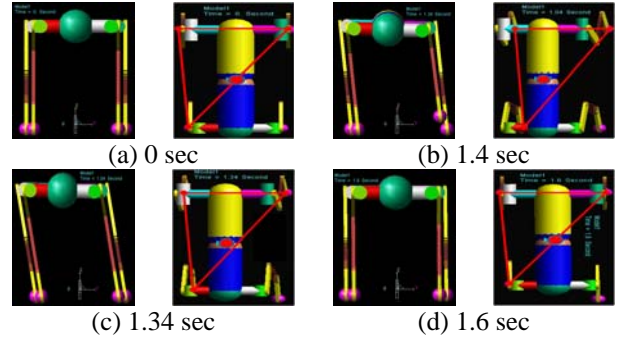


Fig. 4 Stability margin of walking

## 4. 보행 패턴

관절로 구성된 보행 로봇의 이동방법은 크게 정적 보행과 동적 보행(dynamic walking) 두 가지로 나누어 볼 수 있다.[5] 그 중에서 4 족 동물들의 보행은 후자에 해당한다. 본 장에서는 시뮬레이션에 사용되는 각각의 보행 패턴을 설명하였다. FL, RL, FR, RR 은 각각 앞쪽 왼발, 뒤쪽 왼발, 앞쪽 오른발, 뒤쪽 오른발을 나타내며 빈칸은 이동하는 발을 나타낸다.

### 4.1 Walking pattern

상보(walking)는 피로를 가장 적게 하는 걸음걸이이고 세 개의 발이 지면에 닿아 있는 순간이 있게 된다. 즉, 뒷다리 한쪽을 먼저 앞쪽으로 내디딤으로써 앞으로 나가게 되고, 이 경우 몸의 앞부분이 전진해 나가는 동안 뒷다리가 착지하기 전까지 전구를 앞으로 추진하는 동안에 어깨뼈를 포함한 전지가 몸무게를 지탱해준다. 그때, 앞다리는 뒷다리에서 미는 힘으로 앞다리를 뺏으면서 앞발을 땅에 착지시킨다.[14] Fig. 5 와 같은 전지와 후지의 발 디딤이 서로 교차되면서 개는 앞으로 전진하는데 이를 상보라 한다. 상보의 보행주기  $T$ 는 2.5 sec 이며 디딤율  $\beta$ 는 0.8 의 범위로 설정 되었다.

FL				
RL				
RR				
FR				

Fig. 5 Foot fall of the walking

### 4.2 Trot pattern

트롯(trot)은 Fig. 6 와 같이 대각선상의 발이 하나의 조로 이루어 발을 내딛으며 보행을 한다. 4

족 보행 동물에 있어서 가장 일반적이며 많이 볼 수 있는 보행 방법으로 로봇에 적용하기 또한 용이하다. trot 의 전체 보행주기  $T$  는 0.5 sec 이며 디딤을  $\beta$  는 0.5 의 범위로 설정 되었다.

FL				
RL				
RR				
FR				

Fig. 6 Foot fall of the trot

#### 4.3 Bound pattern

바운드(bound)는 앞발과 뒷발로 나뉘어 서로 점프를 하는 보행으로 뛰어가기에 가까운 보행이다. 중간에 나는(flight) 구간이 존재하며 주로 갈lop (gallop)이전의 보행 단계로 이루어진다. 보행 패턴은 Fig. 7 에서 볼 수 있고 Bound 의 전체 주기  $T$  는 0.3 sec 이며 디딤을  $\beta$  는 0.13 의 범위로 설정 되었다.

FL			
RL			
RR			
FR			

Fig. 7 Foot fall of the bound

### 5. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에 사용된 동역학 시뮬레이션은 상용 소프트웨어인 Recurdyn 을 사용하였다. 설정된 파라미터를 통해서 동역학 시뮬레이션을 실시하였고, 계산 토크법을 이용하여 각 관절에서 발생하는 토크와 각속도를 구하였으며 구해진 power 의 양의 값을 실제 소비된 에너지로 규정하여 소비에너지에 대한 효율을 결정하였다.

시뮬레이션은 세 가지 보행 패턴에 대한 에너지 효율을 비교하고 효율이 가장 좋은 한 가지 보행에 대하여 각기 다른 세 가지 보행 주기에 대한 시뮬레이션을 하여 에너지 효율을 비교 하였다. 각각의 보행은 안정성유를 가지며 고유의 보행 패턴에 의해 이동한다.

#### 5.1 보행 패턴에 따른 에너지효율

보행 패턴에 따른 에너지 효율은 walking, trot, bound 의 세 가지 보행방법에 따라 로봇이 4.5 m

의 동일한 구간을 이동하여 소비에너지를 구해 각각을 비교하였다. Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10 은 각각의 보행 방법에 따라 소비에너지를 시간에 대하여 나타내었다. Fig. 8 은 power 값이 크게 나타나는 구간이 로봇의 다리가 이동 후 지지 하는 구간 이고 최대 power 는 7.6 W 이다. Fig. 9 는 1 초간 초기 위치를 선정하고 보행이 완료 되는 2.21 sec 동안 2 주기 이상 실행되었고 순간 최대 power 는 8.0 W 이다. Fig. 10 은 시뮬레이션이 시작과 동시에 로봇이 이동하며 두발의 디딤울이 작고 앞발과 뒷발이 거의 동시에 지면에 지지하기 때문에 공중에 떠 있는 구간이 많다. 이때의 순간 최대 power 는 42.8 W 이다. Table. 2 는 이동 거리에 대한 power 값을 합한 값으로 소비에너지를 알 수 있으며 각각 4.5 m 를 10 sec, 2.21 sec 및 1.24 sec 동안 이동하였고, trot 보행 방법이 동일한 이동거리에 비하여 소비된 에너지가 가장 작으며 초당 소모된 에너지 또한 walking 과 유사하여 전체적으로 trot 보행이 에너지 측면에서 우수함을 알 수 있다. Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13 은 보행방법에 따른 contact force 를 나타내며 각각 순간 최대 122 N, 289 N 및 675 N 을 나타내며 walking 이 가장 작은 contact force 값을 가진다. Fig. 12 는 trot 보행 방법이며 1 sec 까지 각각의 다리에서 50 N 이 출력된다. 이는 로봇의 무게 20 kg 을 4 발이 분배하여 지지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 13 은 gallop 보행 방법의 contact force 이며 디딤울이 0.13 으로 지지구간 보다 공중에 떠 있는 구간이 많고 지지구간에서 contact force 가 입력 되고 에너지 소비가 시작되기 때문에 Fig. 10 과 유사한 그래프 변화를 보인다.

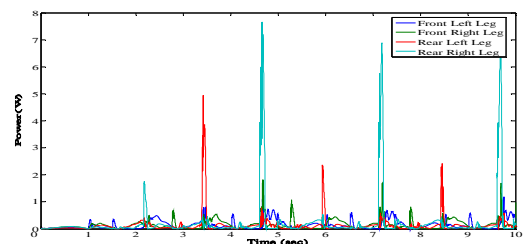


Fig. 8 Power of walking pattern

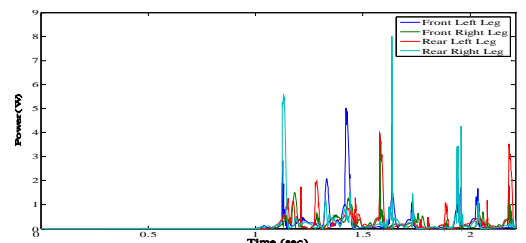


Fig. 9 Power of trot pattern

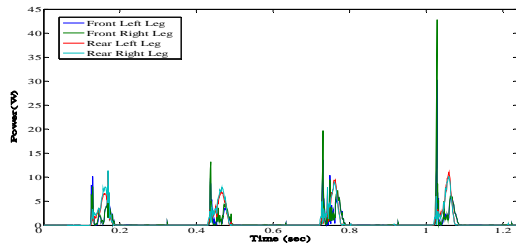


Fig. 10 Power of bound pattern

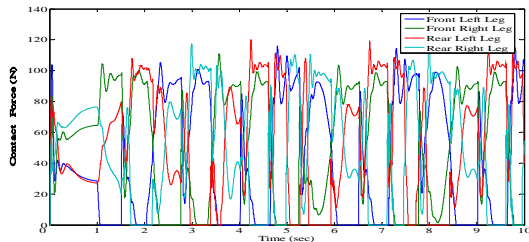


Fig. 11 Contact force of walking pattern

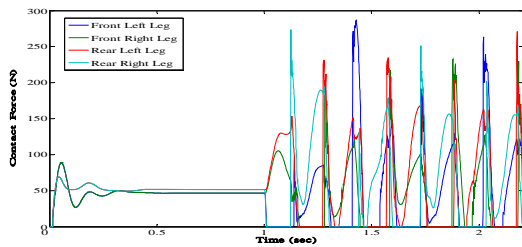


Fig. 12 Contact force of trot pattern

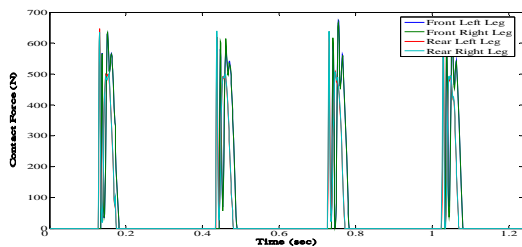


Fig. 13 Contact force of bound pattern

Table 2 The Energy Efficiency of Walking Method for Quadruped Robot

보행방법	walking	trot	bound
power[W]	5877	1364	3294
Time[sec]	10	2.211	1.241

### 5.2 보행 주기에 따른 에너지 효율

보행 주기에 따른 에너지 효율은 세 가지 보행 방법 중 가장 효율이 좋은 trot 보행에 대하여 보행 주기 T를 0.7 sec, 0.6 sec 및 0.5 sec 로 두고 시뮬레이션을 하여 소비에너지를 구해 각각을 비교하였다. 시뮬레이션은 각각 1 sec 간 정지 상태에서

초기 모션을 취한 후 뒤쪽 왼발과 앞쪽 오른발이 먼저 앞으로 이동하면서 각자의 속도와 주기를 가지고 이동을 하게 되며 4.5 m 을 이동 하게 되면 시뮬레이션을 종료 하게 된다. Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16 은 각각의 보행주기에 따른 power 를 나타내며 보행 속도가 느릴수록 보행 주기가 클수록 동일한 위치까지 이동하는 데 소모되는 에너지는 현격하게 적음을 알 수 있고, 이를 Table 3 을 통해서 소모된 전체 power 의 합 과 시뮬레이션 시간을 표시하였다. Fig. 14 는 순간 최대 power 가 5.8 W 이며 Fig. 15 의 순간 최대 power 는 11 W 이고 Fig. 16 의 순간 최대 power 는 42 W 이며 보행 주기가 0.7 sec 인 경우에 소모된 전체 power 량이 가장 작다.

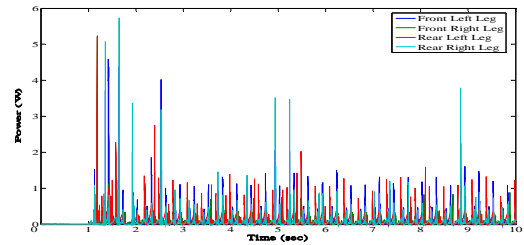


Fig. 14 Power of period T=0.7 sec

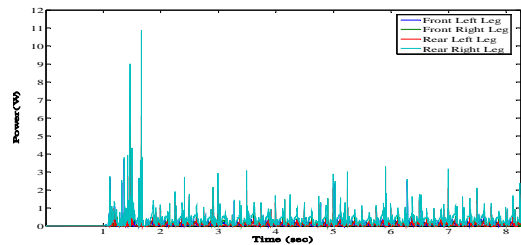


Fig. 15 Power of period T=0.6 sec

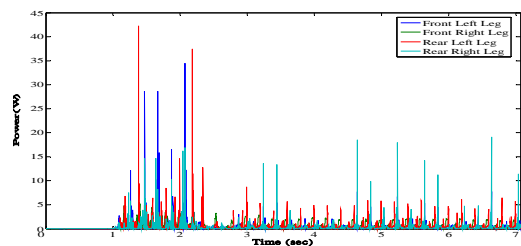


Fig. 16 Power of period T=0.5 sec

Table 3 The energy efficiency of trot period for quadruped robot

보행주기 [sec]	T=0.7	T=0.6	T=0.5
power[W]	3552	4201	10228
Time[sec]	10	8.25	7.07

## 6. 결 론

## 참고문헌

실제의 4 족 보행 로봇인 HUNTER 를 모델로 하여 보행방법에 따른 에너지 효율과 보행 주기에 따른 에너지 효율에 관해 시뮬레이션을 하여 보행 목적과 의도에 합당한 보행을 다음과 같이 알 수 있다.

1. **Walking** 은 다른 보행에 비하여 장거리를 이동하기에는 에너지 소비가 크다. 하지만 시간당 소모되는 칼로리와 지면으로부터 들어오는 **contact force** 가 가장 작아 피로가 적은 보행 이며 가까운 거리를 이동하기에 좋은 방법이다. 또한 짧은 거리를 안정적으로 이동하기에 유리하다.
2. **Bound** 은 시간당 에너지 소모와 지면으로부터 전해지는 **contact force** 의 양이 가장 많은 보행으로 순간 적으로 빠른 이동을 요할 때 필요한 보행방법이며 안정성이 보장되는 범위에서 불규칙한 지형을 빠르게 이동하기에 유리하다.
3. **Trot** 은 시간당 소비되는 에너지가 **walking** 과 유사하며 보행방법에 따른 에너지 효율 또한 가장 좋은 보행 방법으로 일반적인 이동을 하기에 가장 적합한 보행 방법이다. 또한 다른 보행과는 달리 보행 패턴의 안정성에 의해 적당히 불규칙한 지형을 **walking** 보다 빠른 속도로 이동하기에 유리하다.
4. 보행주기는 이동 속도와 유사하게 작용하며 보행주기가 작을수록 이동하는 속도는 늘어나며 보행 주기 0.7 sec 일 경우 이동하는 시간대비 소모되는 에너지는 가장 작음을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2008 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업과 한국생산기술연구원의 다족형 견마로봇 플랫폼 기술 개발 연구(10028526-2007-12)지원으로 수행되었으며 본 논문에 도움을 주신 분께 깊은 감사를 표합니다.

- (1) H. Cruse, 1980, "A Quantitative Model of Walking Incorporating Central and Peripheral Influences: The Control of the Individual Leg," *Biological Cybernetics*, Vol. 37, pp. 131~136.
- (2) <http://www.bostondynamics.com/>
- (3) M. H. Raibert, 1986, "Legged Robots That Balance," *MIT press, Cambridge*.
- (4) H. Kimura, I. Shimoyama and H. Miura, 1990, "Dynamics in the Dynamics Walk of a Quadruped Robot," *Advanced Robotics*, Vol. 4, No. 3, pp. 283~301.
- (5) M. H. Raibert, H. B. Brown, M. Chepponis, 1984, "Experiments in Balance with 3D One-Legged Hopping Machine," *Robotics Research*, MIT Press, Vol. 3, No. 2, pp. 75~92.
- (6) R. M. Alexander, April 1990, "Three Uses for Spring in Legged Locomotion," *The international journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 53~61.
- (7) J. E. Seipel and P. Holmes, 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.
- (8) K. Y. Kim, O. H. Kwon, J. S. Yeon and J. H. Park, 2006, "Elliptic Trajectory Generation for Galloping Quadruped Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 103~108.
- (9) Y. M. Ahn, G. H. Choi, T. H. Kim, 2001, "Development of Quadruped Walking Robot with Insectile leg," *proceedings of the KSME 2001 Autumn Annual Meeting*, pp. 301~306.
- (10) G. -H. Choi and Y. -T. Kim, 2002, "Development of a Quadruped Robot with Weight Balancing Oscillator," *proceedings of the KSME 2002 Autumn Annual Meeting*, pp. 894~899.
- (11) J. Estremera and P. Gonzalez de santos, 2000, "Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain," *The international journal of Robotics Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 115-130.
- (12) D. H. Lee and Y. B. Kim, 2005, "Walking Stability Analysis of Quadruped Robot," *proceedings of the KSME 2005 Autumn Annual Meeting*, pp. 1218~1222.
- (13) S. Hirose, H. Tsukagoshi and K. Yoneda, 2001, "Normalized Energy Stability Margin and its Contour of Walking Vehicles on Rough Terrain," In *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 181~186.
- (14) C. -R. Shin, K. G. Chae and J. H. Park, 2008, "Development of Quadruped Robot and Dynamic Walking," *proceedings of the KSME 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 220~225.