

4족 로봇의 에너지 소모량 분석

엄한성†

(원고접수일 : 2005년 11월 17일, 심사완료일 : 2005년 12월 6일)

Consumption Energy Analysis of Quadruped Walking Robot

Han-Sung Eom†

Abstract : A energy efficiency of quadruped walking robot has been studied mathematical modeling, dynamic analysis or simulation by consumption energy per period. In this paper, We used the quadruped walking robot Titan-VIII in order to carry out this experiment. The total moving length is about 2[m], the stride length is 0.1, 0.2, 0.3, and walking period is changed by 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0(sec) per each stride length. So consumption energy of 15 cases are measured. As a result of this experiment we obtained the best energy efficiency when stride length was 0.3[m], and period was 1.5[sec].

Key words : quadruped walking robot(4족 보행로봇), Titan-VIII(로봇 모델명), stride length(보폭), period(주기), consumption energy(소비 에너지)

1. 서 론

무른 지형, 가파른 경사지 그리고 요철이 심한지형에 대해서 4개의 다리를 가진 동물들은 바퀴나 트랙이 달린 차량보다 훨씬 적은 에너지를 사용하여 움직인다. 또한, 그러한 극한환경에서 동물들의 기동성은 다른 차량에 비해 월등히 우수하다. 이러한 이유들로부터 동물과 같은 다리의 구조를 가진 관절구동 로봇에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 현재까지 개발되어 있는 관절구동 로봇은 대부분 하중운반 능력이 미약하며 보행속도가 느리고 많은 동력이 필요하며 제작비용이 비싼 문제점이 있다. 특히, 로봇은 에너지 공급원을 본체에 부

착하고 다녀야하므로 공장 등에서 일정한 위치에 고정되어 상용 교류전원을 에너지원으로 사용하는 산업용 로봇에서 크게 고려되지 않았던 에너지 효율이 중요한 문제로 부각되었고 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 관절구동 로봇의 에너지 효율에 크게 영향을 미치는 것은 다리의 형상이며 여러 가지 조건이 고려되어야 한다^[1]. 평지 보행 시 다리의 발끝이 본체에 대해서 평행운동을 할 수 있어야 본체의 높이 변화로 인한 위치에너지 손실을 줄일 수 있고, 필요한 액츄에이터(Actuator) 수를 줄임으로서 상당한 에너지 소모를 줄일 수 있으나 액츄에이터의 수를 줄이면 여러 지형조건에 대해서 적응 능력이 떨어지는 단점이 있다. 관절구동

† 책임저자(목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과), E-mail : mrehs@mmu.ac.kr, Tel : 061)240-7162

로봇의 다리에 사용되는 기구는 조인트(Joint)로 연결된 단순한 2개 또는 3개의 링크(Link), 4절(Joint), 6절, 12절의 직선기구가 많이 사용되고 있다. 기구가 결정 되면 에너지 효율은 보행방법 즉, 보폭과 보행속도에 따라 결정된다.

본 논문에서 보행실험에 사용된 관절구동 로봇 TITAN-VIII의 각 다리는 3자유도 총 12자유도를 가지고 있어 평지와 급한 경사면 등에 잘 적응할 수 있고, 하중 운반능력이 비교적 우수한 장점을 가지고 있다. 그동안 보행방법에 대한 연구 결과 정적보행(Static walking)은 안정성 면에서는 우수하나 보행속도가 느리기 때문에 많이 사용하지 않고 보행속도가 빠른 동적보행(Dynamic walking) 방법을 채택하고 있다^[2]. 동적보행 방법에는 Trot, Pace, Bound 보행방법이 제안되었으며, 1996년 TITAN-VIII 개발 이후의 연구 결과에 의하면 안정성과 에너지 효율 면에서 Trot 보행이 가장 적합한 보행방법임이 입증되었다^[2-4]. 따라서 본 논문에서는 Trot 보행에서 ZMP (Zero moment point)를 항상 지지관절 대각선상으로 이동시키는 보행방법을 채택하여 실험하였다.

현재까지 발표된 4족 보행로봇의 에너지 효율에 관한 대부분의 연구는 수학적 모델링, 동역학적 해석 또는 시뮬레이션 결과로 구해진 한주기(Period)당 에너지 소모량을 근거로 효율을 평가하였다^[2-6]. 실험적 결과에 의한 연구는 아직 부족하며 로봇은 단순히 한주기를 보행하는 것이 아니라, 연속적으로 보행하는 것이기 때문에 전체적인 보행거리에 대한 에너지 효율 평가도 필요할 것이다.

본 논문에서는 2[m]의 보행거리에 대해서 여러 가지의 속도와 보폭을 조정하여 보행실험을 수행하고 이때 얻어진 결과 값을 근거로 한주기 에너지 효율과 전체 에너지 효율을 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험에 사용된 4족 보행 로봇의 관절과 링크를 나타낸 것이다. 각 다리는 3자유도로 구성되

어 로봇 전체는 12자유도를 가지고 있으며 Link0은 0.045[m], Link1은 0.155[m], Link2는 0.242[m]이다. 각 관절은 DC 모터(정격전압 30[V], 정격전류 2.6[A], 정격회전수 500[rpm], 정격토크 7.8[kg·cm])에 의해서 구동된다.

Fig. 2 (a)는 위에서 내려다본 모습으로 M1 (Motor 1) 모터에 가한 +, - 위치지령 전압에 따른 Joint0의 회전방향을 나타내고 있으며 (b)는 정면에서 본 모습으로 M2, M3 모터의 회전에 따른 Joint1과 Joint2의 회전방향을 나타내고 있다. 앞다리와 뒷다리 사이의 간격은 0.4[m] 이고, 정면에서 본 폭이 0.6[m], 로봇 전체 무게는 20[kg]이다.

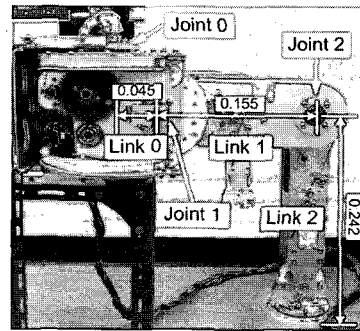


Fig. 1 Photograph of quadruped walking robot joint and link

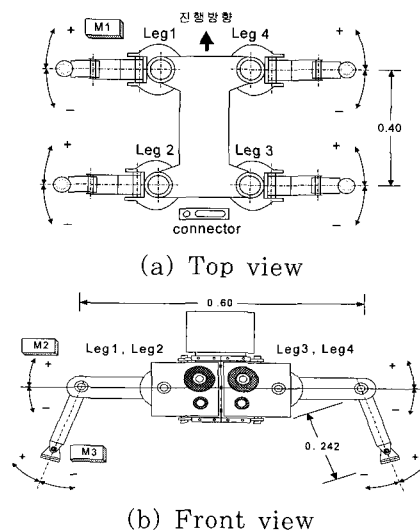


Fig. 2 Rotating direction of the quadruped walking robot joint

2.2 실험 방법 및 조건

4족 보행 로봇의 ZMP를 지지관절 대각선상으로 이동시키면서 이동속도가 일정하게 주기적으로 반복되는 주기 걸음새(Period gait)형태의 Trot 보행방법을 선정하여 보행실험을 수행하고, 에너지 소모량을 측정하여 그 결과를 분석하였다.

각 관절을 구동하는 12개 DC 모터의 전압과 전류를 구해서 에너지 소모량을 구하고 이것을 적분한 값을 10(ms)마다 A/D보드를 통해 컴퓨터로 입력받아서 분석할 데이터를 수집하였다.

Table 1은 실험조건을 나타낸 것으로 디듀티(Duty factor)은 0.5로 일정하게 하고 보폭이 0.1, 0.2, 0.3(m)일 때 주기를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0(sec)로 변경하면서 15가지 조건으로 2(m)를 보행하면서 에너지 소모량을 측정하였다.

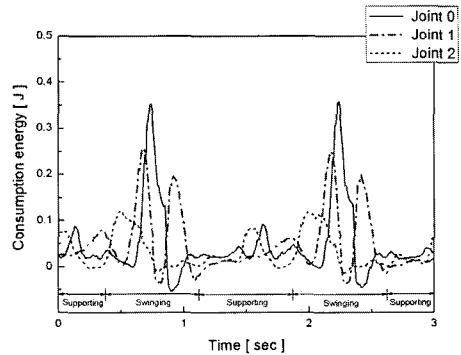
Table 1 Experimental conditions

Walk environment	Plain terrain
Transfer path	Straight
Gate	Trot
Duty factor	0.5
Period [sec]	1.0 ~ 3.0
Stride length [m]	0.1, 0.2, 0.3

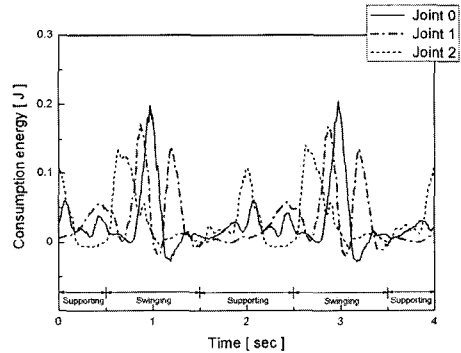
3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 보폭 0.2, 0.3(m)일 때 주기 1.5, 2.0, 3.0(sec)에서 보행 중 Leg1 각 관절의 2주기 동안 에너지 소모량 변화를 나타낸 것이다. 디듀티가 0.5 이므로 한주기 동안 로봇 본체가 전진하는 Swinging 구간과 로봇 본체의 수평을 유지하기 위해서 ZMP를 지지관절 대각선상으로 이동시키는 Supporting 구간이 서로 같다. 보행 중 각 관절은 연동적으로 움직이지만 Joint0는 본체의 전진, Joint1은 다리를 지면에서 들어올리는 동작, Joint2는 ZMP를 이동시키는 동작에 직접적인 연관이 있다. Swinging 구간에서 각 관절의 에너지 소모량 변화가 심하게 나타나는데, 이것은 Swinging 구간에서 각관절의 속도 변화가 크게 일어나고 회전방향이 변경되기 때문이다.

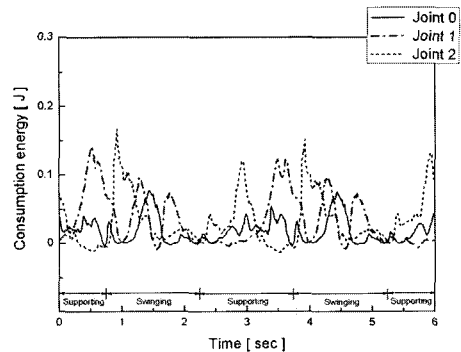
Joint0은 보폭이 0.2[m] 보다 0.3[m]일 때가 에너지 소모량 변화가 많은데, 이것은 본체를 0.1[m] 더 전진하는데 사용된 에너지 때문이다, 같은 보폭에 대해서는 주기가 짧을수록 에너지 소모량 변화가 많은데 이것은 주기가 짧을수록 관절의 회전속도와 회전방향 전환이 빨리 이루어지기 때문이다.



(a) period = 1.5 [sec]



(b) period = 2.0 [sec]

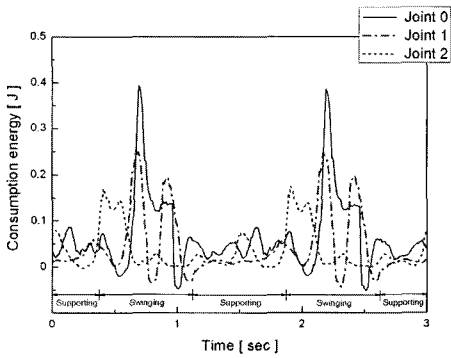


(c) period = 3.0 [sec]

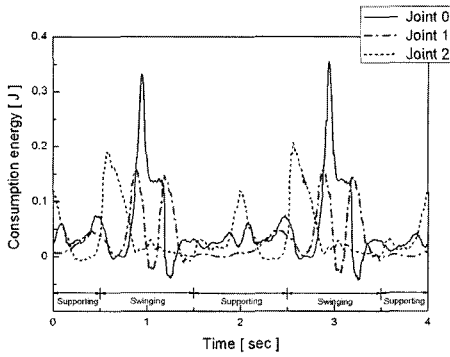
Fig. 3 Consumption energy of each joints of Leg1 (stride length = 0.2 [m])

Joint1은 주기가 같을 때 보폭에 관계없이 Swinging 구간과 Supporting 구간이 같기 때문에 에너지 소모량 변화도 비슷한 것을 알 수 있다. 같은 보폭에서 주기가 짧아질수록 Swinging과 Supporting 동작이 빠르게 전환되어야 하므로 에너지 소모량 변화가 많이 일어나게 된다.

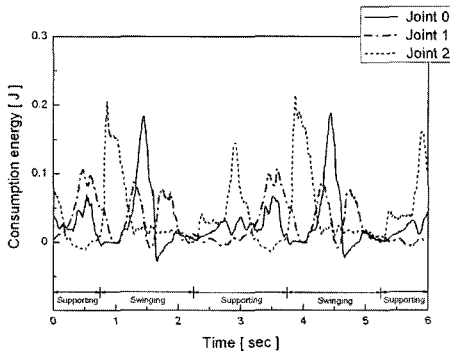
보행 중 로봇 본체를 수평으로 유지하기 위해서 보폭이 클수록, 주기가 길어질수록 ZMP를 많이 이동시켜야 한다. 따라서 주기가 같을 때 보폭이 클수록, 같은 보폭에서 주기가 길수록 Joint2의 에너지 소모량 변화가 많음을 알 수 있다.



(a) period = 1.5 [sec]

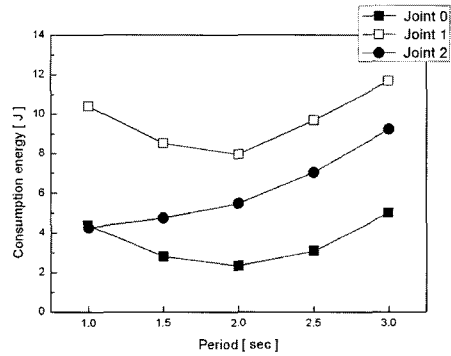


(b) period = 2.0 [sec]

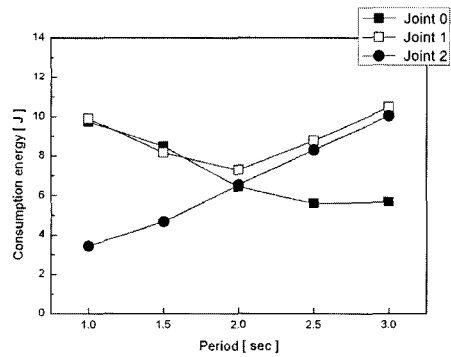


(c) period = 3.0 [sec]

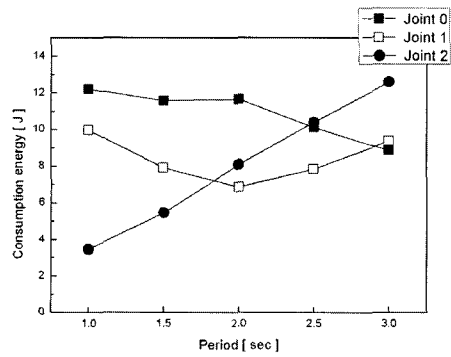
Fig. 4 Consumption energy of each joints of Leg1 (stride length = 0.3 [m])



(a) stride length = 0.1[m]



(b) stride length = 0.2[m]

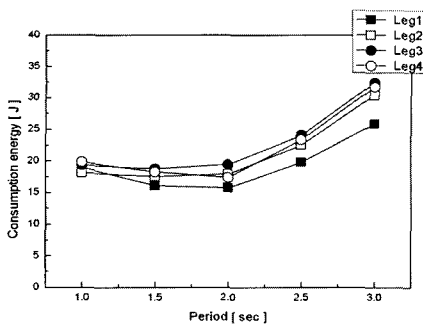


(c) stride length = 0.3[m]

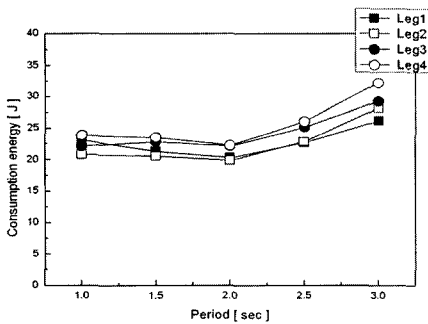
Fig. 5 Consumption energy per period of each joints of Leg1

Fig. 5는 보행 중 한주기 동안 Leg1 각 관절의 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 같은 보폭에서 주기에 길어질수록 ZMP를 많이 이동시켜야 하므로 Joint2의 에너지 소모량은 주기에 비례해서 증가함을 알 수 있다. 그러나 같은 보폭에서 Joint0과 Joint1의 에너지 소모량은 주기에 대해서 비례적 관계에 있지 않음을 알 수 있다.

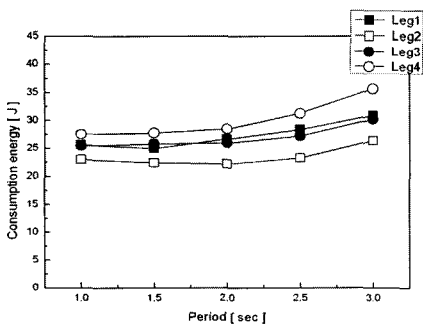
같은 주기에서 보폭이 클수록 Joint0의 소모량이 많은데 이것은 본체를 0.1[m] 더 전진하는데 사용된 에너지 때문이다.



(a) stride length = 0.1[m]



(b) stride length = 0.2[m]



(c) stride length = 0.3[m]

Fig. 6 Consumption energy per period of each legs of quadruped walking robot

Fig. 6은 보행 중 한주기 동안 로봇 각 다리의 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 값은 3개 관절의 소모량을 더한 것이다. 보폭과 주기에 대해서 각 다리의 소모량이 서로 다른데 이것은 관절의 조립도와 전동기 특성차이 그리고 보행 중 발생하는 몸의 불균형 때문인 것으로 생각된다.

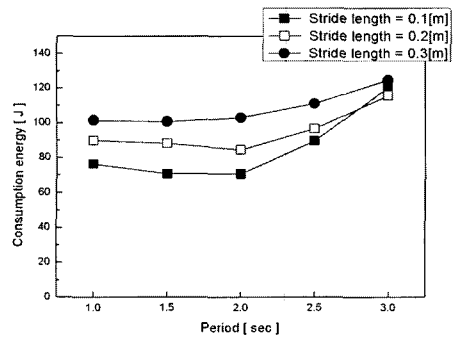


Fig. 7 Consumption energy per period of quadruped walking robot

Fig. 7은 한주기 동안 로봇 전체의 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 값은 4개 다리의 소모량을 더한 것이다. 같은 보폭에서 에너지 소모량은 주기와 비례적 관계에 있지 않고 U자 형태로 증가함을 알 수 있다. 같은 주기는 보폭이 0.3[m]일 때가 소모량이 가장 많았다. 보폭 0.1, 0.3[m]에서는 주기 1.5[sec], 0.2[m]에서는 주기 2.0[sec] 일때가 소모량이 가장 작았다.

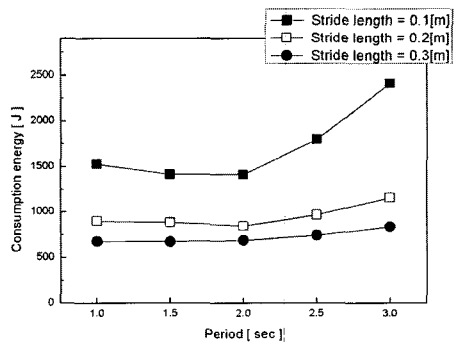


Fig. 8 Total consumption energy of quadruped walking robot

Fig. 8은 로봇이 2[m]를 보행했을 때 전체 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 같은 주기에서 보폭이 작을수록 에너지 소모량은 많음을 알 수 있다. 보폭이 0.3[m]일 때 한주기 소모량은 가장 많았지만 전체적인 에너지 소모량은 가장 적었다. 같은 보폭에서 에너지 소모량은 주기와 비례적 관계에 있지 않았고 주기 1.5, 2.0[sec]에서 전체적으로 소모량이 적음을 알 수 있다. 실험조건 중 보폭 0.3[m], 주기 1.5[sec]에서 소모량이 가장 적었다.

4. 결 론

본 논문에서는 실험 로봇인 TITAN-VIII을 평지에서 보폭이 0.1, 0.2, 0.3[m]일 때 주기를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0[sec]로 변경하여 15가지 조건으로 2[m]를 Trot 보행시키면서 에너지 소모량을 측정하고 실험적 결과를 근거로 에너지 효율을 비교 분석하였다.

같은 주기에 대해서 보폭이 0.3[m] 일 때 한주기 에너지 소모량은 가장 많았지만 2[m]를 보행했을 때 전체 에너지 소모량은 가장 적었고, 같은 보폭에서 주기와 에너지 소모량은 비례적 관계에 있지 않았다.

보행 실험조건 중에서 주기 1.5[sec], 보폭 0.3[m]일 때가 에너지 효율이 가장 좋았다. 실험 결과 TITAN-VIII이 평지를 보행할 때 에너지 효율을 고려한다면 주기를 1.5[sec]와 2.0[sec] 사이의 값으로 선정하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] S.M.Sonf, V.J.Vohnout "Computer Aided Design of a leg for An Energy Efficient Walking Machine", Mech & Machine Thy. Vol. 19, pp. 17~24, 1984.
- [2] Hrioshi Kimura 外三人, "四足動歩ロボットの力學的解析", 日本ロボット工學會誌, Vol. 6, No. 5, pp. 367~379, 1988.
- [3] Kan Yoneda 外三人, "4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御", 日本ロボット工學會誌, Vol. 19, No. 3, pp. 380~386, 2001.
- [4] Shigeo Hirose 外二人, "4足歩行機械のスカイフックススペンション制御", 日本ロボット工學會誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1066~1071, 1994.
- [5] Ryo Kurazume 外二人, "4足歩行機械の3D搖動歩容", 日本ロボット工學會誌, Vol. 19, No. 5, pp. 632~637, 2001.
- [6] Shigeo Hirose, "Vector Analysis Mechanical system", Shokabo Tokyo, 1987.

저 자 소 개



엄한성 (嚴漢成)

1974년 5월생, 1997년 목포해양대학교 기관공학과 졸업(학사), 2003년 목포해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 현 목포해양대학교 대학원 박사과정