
4족 보행로봇의 소비에너지 효율에 관한 시뮬레이션

안병원*·배철오*·엄한성**

A Computer Simulation on the Efficiency of Energy Consumption for Quadruped Walking Robot

Byong-Won Ahn* · Cherl-o Bae* · Han-Sung Eom**

요 약

다리를 가진 로봇은 지형에 대한 높은 적응능력을 가졌다할지라도 바퀴로 구동되는 로봇과 비교했을 때 일반적으로 그 속도가 상당히 느리다. 다리를 가진 로봇으로 빨리 움직이는 속도를 얻기 위해서는 두발로봇의 달리는 것과 4족 로봇의 속도나 뛰는 것과 같이 동적으로 안정한 걸음걸이가 좋은 해결법이다. 그러나 동적으로 안정한 걸음걸이의 에너지 효율은 일반적으로 느린 걸음걸이와 같은 안정한 걸음걸이보다 낮다. 본 논문에서는 4족으로 걷는 로봇의 에너지 효율에 관한 실험적 연구를 보여주고 있다. 걷는 보행 방법에 따른 2가지 패턴에 따른 에너지 효율관계를 TITAN-VIII이라 명명된 4발로 걷는 로봇을 기준으로 시뮬레이션을 통하여 비교분석 하였다.

ABSTRACT

Though a legged robot has a high terrain adaptability as compared with a wheeled robot, its moving speed is considerably low in general. For attaining a high moving speed with a legged robot, a dynamically stable walking is a promising solution. However, the energy efficiency of a dynamically stable walking is generally lower than the efficiency of a stable gait such as a crawl gait. In this paper, energy consumption of two walking patterns for a trot gait is simulated through modeling a quadruped walking robot named TITAN-VIII.

키워드

quadruped walking robot(4족 보행 로봇), TITAN-VIII(로봇 모델명), trot gait(트롯 보행)

I. 서 론

관절 이동형 로봇은, 로봇의 보행에 있어서 기구계나, 제어계 등의 복잡하고 정밀한 기술들이 포함되어 있다. 이들 관절로봇의 공통적인 특징으로는 친화성이 높고, 자유도가 높고, 접지점을 임의로 설정할 수 있

며, 관절을 매니플레이터로도 이용이 가능하다. 이러한 반면에 많은 자유도를 가지고 있으므로 기구가 복잡해지고, 이동속도가 느리며, 접지시에 진동이 발생하기 쉽고 불안하여 이동 중 넘어지지 않도록 특별한 제어가 필요하게 된다. 따라서 이러한 관절형 로봇의 문제점들을 극복하기 위해 많은 연구가 진행되고 있

* 목포해양대학교

** 목포해양대학교 대학원

다. 관절 이동형 로봇의 보행방법에는 항상 동적안정을 유지하는 정보행과 동적안정성을 유지하는 기간을 포함하는 동보행 2가지로 나눌 수 있다. 많은 생물들의 기본인 4관절형은 정적안정을 유지하면서 이동을 유지하고, 보행중에도 기구적으로 쓰러지지 않는 완전 보행을 실현하는 최소한의 관절수로 구성된 보행형태이다. 보행 로봇의 가동율은 동작하는 액추에이터의 개수에 따라 크게 의존하지만, 4관절형은 5개 이상의 관절형에 비해 이동율이 높고, 실용상의 우위성이 높은 보행형태라고 생각되어진다. 이 때문에 4족 보행 로봇에는 crawl 등의 정보행에서부터, trot, pace, bound 등의 동보행까지 여러 보행을 실현하는 로봇이 시험 제작되어 왔다[1-5]. 이동속도의 고속화를 위해서는 동보행의 실현이 반드시 필요하며, 이들 동보행 중 로봇의 쓰러짐을 막을 수 있는 trot 보행에 있어서, 보행중 동체 중심궤도를 진행방향에 대하여 좌우로 요동시켜, ZMP(Zero Moment Point)를 매끄럽게 지지관절 대각선 상으로 이동시키는 좌우요동보행이 제안되었다[1]. 이 ZMP는 보행물체가 수평면상을 이동하고 있고, 그 관절에는 바닥으로부터 힘 F와 모멘트 M의 조합으로 되는 바닥 반작용력이 작용하고 있다라고 한다. 이때 ZMP와는 바닥면위의 어떤 작용점이고, 거기의 바닥 반작용힘중의 모멘트 M의 수평면내 합성이 0으로 되는 점이다. 이 지점에서는 모멘트가 존재하지 않으므로 로봇이 이 지점을 따라 보행을 하게 되면 안정된 보행을 유지할 수 있게 된다.

한편, 이동을 위한 에너지 효율의 향상은 단순히 가동시간을 연장시키는데 머무르지 않고, 배터리의 소형화에 의한 가반중량의 증대로 말미암아 로봇 자체의 기동외에 원하고자 하는 작업의 기기들을 탑재하여 더 많은 작업을 집중적으로 할 수 있도록 한다. 이러한 에너지 효율측면에서 보면 좌우요동보행의 경우 로봇 동체는 좌우방향의 가속도를 주기적으로 반복하기 때문에, 특별한 제어를 행하지 않는 경우에 비해 에너지 소비가 크리라고 생각되어진다. 여기서, 동체를 좌우방향뿐만 아니라 상하방향으로도 요동시켜 보다 효율적으로 ZMP를 지지관절 대칭선상을 이동시키는 3D 요동보행이 R. Kurazume등에 의해서 제안되었다[6].

본 연구에서는 제안된 3D 요동보행과 좌우요동보행의 에너지효율관계를 실험 보행 로봇인 TITAN-VII

를 기준으로 한 시뮬레이션 실험을 통해서 비교 검토하였다.

II. 4족 보행로봇의 좌우요동보행과 3D 요동보행의 이동효율

보행로봇의 소비에너지는, 동체와 관절의 중량, 자유도 배치, 동체와 관절의 궤도, 혹은 각 액추에이터에서 발생하는 마이너스 힘등, 많은 요인으로 결정되는 양이다. 여기서는 임의의 동체 궤도를 실현하기 위해 동체에 가해져야만 하는 동적인 외력의 총합, 즉 궤도전체의 가속도 제곱의 합을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \int_0^T (\ddot{x}_g^2 + \ddot{y}_g^2 + \ddot{z}_g^2) dt \quad (1)$$

여기서, T; 주기, x_g, y_g, z_g ; 로봇 본체의 중심을 기준으로 하는 임의의 좌표

이를 최소로 하는 궤도에 대해서 고려하도록 한다. 단, 간략하게 하기 위해 정상보행($a_g^z = 0$)에 대해서 살펴본다.

우선 좌우요동에 관해서, 식 (1)에 $a_g^x = \frac{L}{T}$ 를 대입하면, 궤도전체의 가속도 제곱의 합 ρ 는

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1+e^{\frac{T}{A}}) - e^{\frac{T}{A}})\cot^2\theta}{A(1+e^{\frac{T}{A}})^2 T^2} \quad (2)$$

여기서, L; 한 주기당 이동거리, A; 로봇 본체의 높이를 중력가속도로 나눈 값

다음으로 좌우, 전후방향으로 요동하는 3D 요동보행에 대해서 알아보면, 설계 가능한 파라미터는 a_g^x 이므로, 궤도전체의 가속도 제곱의 합을 최소로 하는 a_g^x 는,

$$\frac{\partial \rho}{\partial a_g^x} = 0 \quad (3)$$

를 푸는 것에 의해, 아래와 같이 해석적으로 구해진다.

$$a_1^* = \frac{(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 L T}{(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 \cot^2 \theta} \quad (4)$$

로 평가하도록 한다. 또 이때의 가속도 제곱의 합의 최소치 ρ 는

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) \cot^2 \theta}{A((1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 \cot^2 \theta)} \quad (5)$$

이다. 이것과 식 (2)를 비교하면, $T=0$, $\theta = \frac{\pi}{2}$ 혹은 $A = \frac{H}{g} = 0$, ∞ 이외에는 3D 요동보행의 가속도 제곱의 합은 좌우요동보행보다도 작게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 보행에 필요한 소비에너지를 작게 할 수 있다는 가능성을 나타내고 있고, 결국 3D 요동보행의 에너지효율이 좌우요동보행보다 높아지리라 예상할 수 있다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션

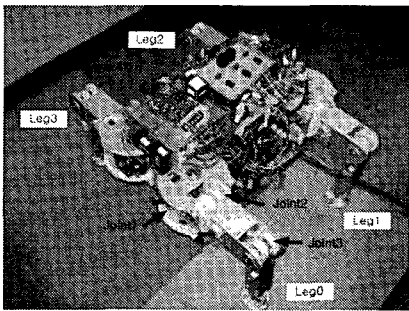


그림 1. 4족 보행로봇
Fig. 1 Quadruped walking vehicle TITAN-VIII

그림 1은 좌우요동보행과 3D 요동보행의 에너지효율을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교하기 위한 실제의 4족 보행로봇 TITAN-VIII을 나타내고 있으며, 이 로봇을 모델로 한 컴퓨터 시뮬레이션을 그림 2에 나

타내고 있다. 로봇의 다리는 Leg0에서 Leg3까지 4개를 가지고 있으며 각 다리에는 Joint0, Joint1, Joint3의 3개의 관절로 이루어져 있어 모두 12개의 자유도를 가지고 있다. Joint0, Joint1, Joint3에 의해서 구동되는 링크(Link)의 길이는 각각 4.5[cm], 15.5[cm], 24.3[cm]이고 Leg0와 Leg1의 간격은 40[cm], 정면에서 본 폭이 60[cm]이다. 이동시에는 Leg0과 Leg2가 지지를 하고 있으면 Leg3과 Leg1이 움직여 화살표방향으로 이동을 하는 trot 보행을 하게 된다.

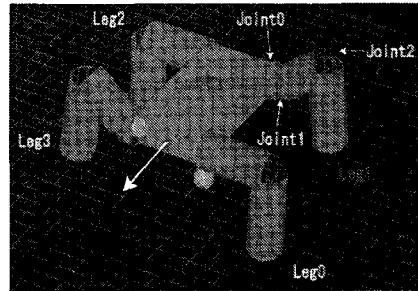


그림 2. 컴퓨터 시뮬레이션 모델
Fig. 2 A computer simulation model

시뮬레이션에서는 우선 계산 토크법을 이용하여 각 관절에서 발생하는 토크 τ 를 계산한다. 구해진 토크 τ 에 관절의 회전속도 ω 를 곱하는 것에 의해 $\tau \times \omega = P$ 로 부터 소비에너지가 구해지고 이것을 시간적분하는 것으로 소비에너지를 구할 수 있다. 이때, 로봇의 뒷발과 바닥면사이의 미끄러짐은 없는 것으로 하고, 항상 2개의 다리만 바닥면에 지지하는 것으로 한다. 또 부의 에너지는 회생하는 것 없이 모두 없애지는 것으로 하여 0으로 한다.

보행 1주기당 이동거리 $L=0.2$ [sec]로 하고, 보행주기 T 가 1.5, 2.0, 3.0[sec]인 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 행하여 좌우 방향으로만 요동하는 좌우요동보행과 좌우, 전후방향으로 요동시키는 3D 요동보행의 에너지효율관계에 대해서 알아보았다.

IV. 시뮬레이션 실험결과

컴퓨터 시뮬레이션에 의해 계산된 Leg1의 각 조인트 Joint0, Joint1, Joint2의 소비에너지를 그림3~그림

8에 나타내고 있다. 이들 그림으로부터 알 수 있듯이 모든 보행주기에서, 다리를 이동하는 도중에는 별 차이가 없으나, 지지과정에 있어서 3D 요동보행이 좌우 요동보행에 비해 에너지 소모가 적음을 알 수 있다. 본체를 지지하여 좌우로의 요동을 만들기 위해 사용되는 Joint1 및 Joint2의 소비에너지가 낮게 억제됨을 확인할 수 있다. 이는 3D 요동보행의 효과에 의해 중심을 보다 매끄럽게 이동시킬 수 있었기 때문이라고 생각되어 진다.

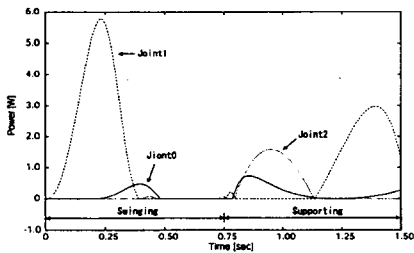


그림 3. $T = 1.5[\text{sec}]$ 에서 좌우요동보행의 에너지 소모량
Fig. 3 Power consumption of the conventional sway compensation trajectory at $T=1.5[\text{sec}]$

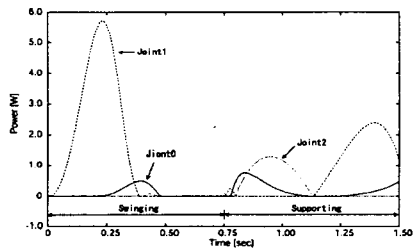


그림 4. $T = 1.5[\text{sec}]$ 에서 3D요동보행의 에너지 소모량
Fig. 4 Power consumption of the 3D sway compensation trajectory at $T=1.5[\text{sec}]$

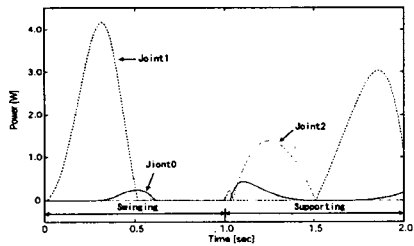


그림 5. $T = 2.0[\text{sec}]$ 에서 좌우요동보행의 에너지 소모량
Fig. 5 Power consumption of the conventional sway compensation trajectory at $T=2.0[\text{sec}]$

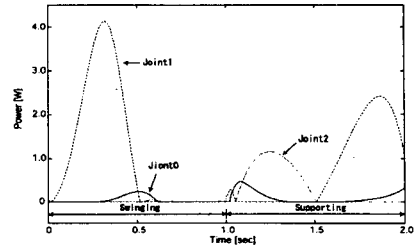


그림 6. $T = 2.0[\text{sec}]$ 에서 3D요동보행의 에너지 소모량
Fig. 6 Power consumption of the 3D sway compensation trajectory at $T=2.0[\text{sec}]$

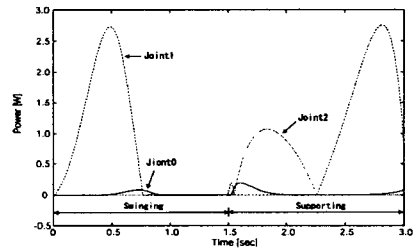


그림 7. $T = 3.0[\text{sec}]$ 에서 좌우요동보행의 에너지 소모량
Fig. 7 Power consumption of the conventional sway compensation trajectory at $T=3.0[\text{sec}]$

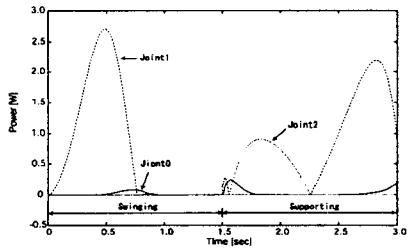


그림 8. $T = 3.0[\text{sec}]$ 에서 3D요동보행의 에너지 소모량
Fig. 8 Power consumption of the 3D sway compensation trajectory at $T=3.0[\text{sec}]$

표 1. 에너지 비교

Table. 1 Consumption Energy of simulation

구 분	좌우요동보행			3D 요동보행			
	주기T[sec]	1.5	2.0	3.0	1.5	2.0	3.0
Joint 0[J]		0.221	0.138	0.068	0.224	0.145	0.077
Joint 1[J]		1.769	2.029	2.347	1.623	1.835	2.089
Joint 2[J]		0.353	0.427	0.512	0.289	0.352	0.425
Total [J]		2.343	2.594	2.927	2.136	2.332	2.591

로봇의 각 이동 주기당 소비에너지를 시간 적분하여 얻어진 결과를 Table 1에 표시한다.

표 1에서 알 수 있듯이 3D 요동보행에서는 좌우뿐만 아니라 전후로도 요동을 하기 때문에 Joint0의 소비에너지는 좌우요동만 하는 경우에 비해 커지지만, 이에 반해 Joint1, Joint2에서 소비되는 에너지가 억제되므로 전체적인 소비에너지는 낮게 됨을 알 수 있다.

V. 결론

실제의 4족 보행 로봇인 TITAN-VIII를 모델로 하여 좌우요동보행과 3D 요동보행의 에너지효율에 관한 컴퓨터 시뮬레이션을 한 결과 다음의 사실을 확인할 수 있었다.

1. 좌우요동보행과 3D 요동보행의 이동주기에 관계없이 3D 요동보행쪽이 에너지 소모가 적음을 알 수 있었다.
2. 3D 요동보행의 경우 좌우뿐만 아니라 전후쪽으로도 요동을 하는 관계로 이를 담당하는 Joint0 관절에서의 경우는 에너지 소모가 좌우요동보행에 비해 커짐을 알 수 있다.
3. 시뮬레이션을 통해 좌우요동보행보다도 좌우뿐만 아니라 전후로도 요동하는 것을 포함한 3D 요동보행쪽이 전체적으로 에너지 효율이 높임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] K. Yoneda, H. Iiyama and S. Hirose, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path" *Autonomous Robots*, pp. 125-136, 1992.

[2] S. Hirose, K. Yoneda, R. Furuya, and T. Tagagi. "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle", In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '89*, pp. 199-204, 1989.

[3] K. Yoneda, H. Iiyama and S Hirose. "Intermittent

trot gait of a quadruped walking machine dynamic stability control of an omnidirectional walk", In *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3002-3007, 1996.

[4] A. Sano and J. Furusho. "Dynamically stable quadruped locomotion(a pace gait in the colt-3)", In *Proc. of the Int. Symp. on Industrial Robots*, pp.253-260, 1989.

[5] M. H. Raibert. "Legged Robots That Balance", MIT press, 1997.

[6] R. Kurazume, K. Yoneda, and S. Hirose, "Feed-forward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle", *Autonomous Robots*, pp.157-172, 2002.

저자약력

안병원(Byong-Won Ahn)



1986년 한국해양대학교 기관공학과 학사
 1991년 한국해양대학교 기관공학과 석사
 1996년 한국해양대학교 기관공학과 박사
 1996년 3월~현재 : 목포해양대학교 기관시스템공학부 전임강사, 조교수, 부교수
 2002년 1월~2003년 1월 : 일본 큐슈대학 Post Doc.
 ※ 관심분야 : 로봇제어, FA 및 용접주변자동화

배철오(Cherl-O Bae)



1993년 한국해양대학교 기관공학과 학사
 1997년 한국해양대학교 기관공학과 석사
 2001년 한국해양대학교 기관공학과 박사
 2002년 3월~현재 : 목포해양대학교 기관시스템공학부 전임강사, 조교수
 ※ 관심분야 : FA 및 용접자동화, 영상처리, 로봇제어

엄한성(Han-sung Eom)



1997년 목포해양대학교 기관공학과
학사

2003년 목포해양대학교 기관공학과
석사

2003년 3월 ~현재 : 목포해양대 학
교 기관시스템공학과 박사
과정

※ 관심분야 : 로봇제어, 시스템 프로그래밍