

4족 보행 로봇의 에너지효율에 관한 연구

안병원^{*} · 배철오^{*} · 박영산^{*} · 박중순^{*} · 이성근^{**}

^{*}목포해양대학교 · ^{**}한국해양대학교

A Study on Energy Efficiency of Quadruped Walking Robot

Byong-Won Ahn^{*} · Cherl-O Bae^{*} · Young-San Park^{*} · Joong-Soon Park^{*} · Sung-Geun Lee^{**}

^{*}Mokpo Maritime University · ^{**}Korea Maritime University

E-mail : ds4cbt@mail.mmu.ac.kr

요 약

다리를 가진 로봇은 지형에 대한 높은 적응능력을 가졌다할지라도 바퀴의 차량과 비교했을 때 일반적으로 그 속도가 상당히 낮다. 다리를 가진 로봇으로 빨리 움직이는 속도를 얻기 위해서는 두발 로봇의 달림과 4족 로봇의 속보나 뛰는 것과 같이 동적으로 안정한 걸음걸이가 좋은 해결법이다. 그러나 동적으로 안정한 걸음걸이의 에너지 효율은 일반적으로 느린 걸음걸이와 같은 안정한 걸음걸이보다 낮다. 본 논문에서는 네발로 걷는 로봇의 에너지 효율에 관한 실험적 연구를 보여준다. 빠른 걸음걸이의 2가지 패턴의 에너지 소모에 대한 TITAN-VIII을 이용한 실험을 통해 연구하였다.

ABSTRACT

Though a legged robot has high terrain adaptability as compared with a wheeled vehicle, its moving speed is considerably low in general. For attaining a high moving speed with a legged robot, a dynamically stable walking, such as running for a biped robot and a trot gait or a bound gait for a quadruped robot, is a promising solution. However, 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, we present an experimental study on the energy efficiency of a quadruped walking vehicle. Energy consumption of two walking patterns for a trot gait is investigated through experiments using a TITAN-VIII.

키워드

quadruped walking robot, energy efficiency, TITAN-VIII

1. 서 론

관절이동 로봇은 차 바퀴와 같이 회전하여 동작하는 로봇에 비해 인간과 비슷한 형상을 하고 있어 친화성이 높고, 접지점을 임의로 설정할 수 있으며, 접지위치와 본체와의 상대위치를 자유로이 설정할 수 있으며, 관절 자체를 매니퓰레이터로 이용이 가능한 장점을 가지고 있다. 반면에 많은 자유도를 가지고 있으므로 기구가 복잡해지고, 이동속도가 느리며, 로봇 본체가 이동 중 쓰러지지 않도록 특별한 제어가 필요하게 된다. 그래서 많은 연구가 이러한 문제점들을 극복하기 위해 진행되고 있다. 관절 이동형 로봇의 보행에는 크게 항상 정적안정을 유지하는 정보행과 동적안정성을 유지하는 기간을 포함하는 정보행으로 나눌

수 있다. 관절이동 로봇의 이동 속도의 고속화를 위해서는 동보행의 실현이 반드시 필요하고, 기본적인 동보행으로는 trot, pace, bound보행이 있다. 이 중에서 로봇이 쓰러지지 않는 완전보행에 있어서, 보행중에 동체 중심 궤도를 진행방향에 대해 좌우로 요동시켜, ZMP(Zero Moment Point)를 매끄럽게 지지관절 대각선상을 이동시키는 좌우 요동보행이 제안되었다. 한편 로봇이 이동을 하기 때문에 에너지 효율의 향상은 이동로봇의 설계, 제어에 있어서 가장 중요한 검토항목의 하나이다. 특히 배터리 등의 에너지원을 탑재한 이동로봇의 경우, 그것은 단순히 구동시간의 연장뿐만 아니라, 배터리를 소형화함으로써 가반중량의 증대와

목적에 맞는 기기들을 좀더 이동로봇 자체에 구현할 수 있다. 좌우요동보행을 에너지효율의 관점에서 보면, 로봇 동체는 좌우방향의 가속도를 주기적으로 반복하기 때문에, 특별한 제어를 하지 않는 경우에 비해 에너지 소비가 클 것으로 생각된다. 그래서, 동체를 좌우뿐만 아니라 상하방향, 전후방향으로 요동시켜 보다 효율이 좋게 ZMP를 지지관절 대각선상을 이동시키는 3D 요동보행이 제안되었다.

본 연구에서는 제안된 3D 요동보행의 에너지효율이 좌우요동보행을 하는 관절이동 로봇에 비해 높다는 것을 4개의 다리를 가지고 보행하는 실험 로봇(TITAN-VIII)를 통해 확인해 보았다.

II. 4족 보행로봇의 좌우요동보행과 3D 요동보행

2.1 좌우요동보행

로봇의 질점을 고려하여, 그 위치를 (x_g, y_g, z_g) 로 한다. 바닥면이 수평이라고 가정하고, 바닥면으로부터의 높이 Z_g 가 일정하다고 하면, 바닥면 위에서의 ZMP의 위치 $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 은

$$\begin{pmatrix} x_{zmp} \\ y_{zmp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

로 된다. 단 $A = \frac{z_g}{g}$ 이다. 또, 지지관절 대각선을

$$\cos \theta x + \sin \theta y = d \quad (2)$$

로 하면, 그 위에 ZMP가 존재하기 위해서는

$$\cos \theta (x_g - A\ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (3)$$

을 만족해야만 한다.

여기서 진행방향을 x 축으로 하고, 진행방향으로의 중심 이동가속도는 일정하다고 가정한다. 즉,

$$x_g = x_0 + vt + \frac{1}{2} at^2 \quad (4)$$

로 하여, 이것을 식 (3)에 대입하면

$$\cos \theta \left(x_0 - A + vt + \frac{1}{2} at^2 \right) + \sin \theta (y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (5)$$

로 되고, 이 비제차미분방정식의 해 y_g 는

$$y_g - A\ddot{y}_g = 0 \quad (6)$$

의 해, 즉,

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} \quad (7)$$

로, 식 (5)를 만족하는 특수해의 합으로 된다. 여기서 특수해의 일반형을 시간 t 의 다항식으로 하고, 해의 궤도가 아래의 식으로 주어진다 가정한다.

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (8)$$

궤도의 연속성

$$\left(\dot{y}_{g,t=0} = \dot{y}_{g,t=\frac{T}{2}}, y_{g,t=0} = -y_{g,t=\frac{T}{2}} \right) \text{를 경계}$$

조건으로 하고, 식 (5)에 대입하여 정리하면,

$$C_1^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{T \frac{a}{2} + (1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (9)$$

$$C_2^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{T \frac{a}{2} + (1 - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (10)$$

$$a_2^y = -a \cot \theta \quad (11)$$

$$a_1^y = -v \cot \theta \quad (12)$$

$$a_0^y = -x_0 \cot \theta + d \csc \theta \quad (13)$$

$$x_0 = \frac{d}{\cos \theta} - \frac{T}{4} a + \frac{1}{4} \left(\frac{\sqrt{A} T (e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2)}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} - \frac{T^2}{4} \right) a \quad (14)$$

가 얻어진다. 여기서, T 는 보행주기를 나타낸다. 이것은 동체를 좌우방향으로 요동시켜, ZMP를 항상 지지관절 대각선상에 유지하는 중심궤도이고, 이 궤도를 실현하는 보행을 좌우요동보행이라 부른다.

2.2 전후방향으로의 확장

위에 기술한 좌우요동보행을 전후방향으로의 요동도 포함하는 형태로 확장한다. 즉, 식 (3)을 두 가지 x, y 방향의 비제차방정식으로 분해하여 풀면,

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x \quad (15)$$

궤도의 연속성을 경계조건으로 하여, 식 (5)에 대입해 정리하면, a_2^x, a_1^x 을 파라미터로 하는 아래 식들이 얻어진다.

$$C_1^x = -\frac{(T^2 + 4\sqrt{A}T)a_2^x + 2Ta_1^x - 2L}{8(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)} \quad (16)$$

$$C_2^x = -\frac{(T^2 - 4\sqrt{A}T)a_2^x + 2Ta_1^x - 2L}{8(e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)} \quad (17)$$

$$C_1^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{Ta_2^y + (1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})a_1^y}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (18)$$

$$C_2^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{Ta_2^y + (1 - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})a_1^y}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (19)$$

$$a_2^y = -a_2^x \cot \theta \quad (20)$$

$$a_1^y = -a_1^x \cot \theta \quad (21)$$

$$a_0^y = -a_0^x \cot \theta + d \cot \theta \quad (22)$$

$$a_0^x = \frac{d}{\cos \theta} - \frac{T}{4} a_1^x + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{A} T (e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2)}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} - \frac{T^2}{4} \right) a_2^x \quad (23)$$

2.3 상하방향으로의 확장

위에서 기술한 식들을 상하방향으로의 요동도 포함하는 형으로 확장한다. 상하방향으로의 일반해가 다음 식으로 얻어진다고 가정한다.

$$z_g = C_1^z e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^z e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + Ag \tag{24}$$

윗식에서 A는 임의의 정수이다. 궤도위치의 연속성을 경계조건으로 하여 정리하면, A를 파라미터로 하는 아래의 식이 얻어진다.

$$C_1^z = -\frac{Ag-H}{1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}}} \tag{25}$$

$$C_2^z = -\frac{(Ag-H)e^{-\frac{T}{\sqrt{A}}}}{1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}}} \tag{26}$$

여기서, H는 t=0, T/2에서의 높이이다. 단, 식 (24)에서 얻어진 해의 궤도는 t=0 및 t=T/2에서 아래와 같은 가속불연속을 발생한다.

$$\dot{z} = \pm \frac{T(Ag-H)}{\sqrt{A}} \frac{1-e^{-\frac{T}{\sqrt{A}}}}{1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}}} \tag{27}$$

이들 좌우요동보행을 전후, 상하방향으로 확장한 보행을 3D 요동보행이라 부른다.

2.4 이동효율의 평가기준

보행로봇의 소비에너지는, 동체와 관절의 중량, 자유도배치, 동체와 관절의 궤도, 혹은 각 액츄에이터에서 발생하는 마이너스 힘등, 많은 요인으로 결정되는 양이지만, 여기서는 임의의 동체 궤도를 실현하기 위해 동체에 가해져야만 하는 동적인 외력의 총합, 즉 궤도전체의 가속도 제공의 합

$$\rho = \int_0^T (\ddot{x}_g^2 + \ddot{y}_g^2 + \ddot{z}_g^2) dt \tag{28}$$

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

우선 좌우요동에 관해서, 식 (28)에 a_g^x = L/T 를 대입하면, 궤도전체의 가속도 제공의 합 ρ는

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})-e^{-\frac{T}{\sqrt{A}}})\cot^2\theta}{A(1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 T^2} \tag{29}$$

로 된다.

다음으로 좌우, 전후방향으로 요동하는 3D 요동보행에 대해서 알아보면, 설계 가능한 파라미터는 a_g^x이므로, 궤도전체의 가속도 제공의 합을 최소로 하는 a_g^x는,

$$\frac{\partial \rho}{\partial a_g^x} = 0 \tag{30}$$

를 푸는 것에 의해, 아래와 같이 해석적으로 구해진다.

$$a_g^x = \frac{(1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 LT}{(1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 \cot^2\theta} \tag{31}$$

으로 평가하도록 한다. 또 이때의 가속도 제공의 합의 최소치 ρ는

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})-e^{-\frac{T}{\sqrt{A}}})\cot^2\theta}{A(1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1+e^{\frac{T}{\sqrt{A}}})^2 \cot^2\theta} \tag{32}$$

이다. 이것과 식 (29)를 비교하면, T=0, θ=π/2 혹은 A=H/g=0, ∞ 이외에는 3D 요동보행의 가속도 제공의 합은 좌우요동보행보다도 작게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 보행에 필요한 소비에너지를 작게 할 수 있다는 가능성을 나타내고 있다.

III. 보행 실험장치

II절에서 기술한 좌우요동보행 및 3D 요동보행의 소비에너지를 측정 비교하기 위해 그림 1에 나타낸 4족 보행로봇인 TITAN-VIII를 이용한 보행실험을 행하였다. TITAN-VIII는 4족 보행로봇으로 각각의 다리는 3자유도, 합계 12자유도를 가지고 있다. Feed Forward 제어를 행하고, 사전에 좌우요동보행, 3D 요동보행을 할 수 있는 각 관절의 각도를 계산하고, 10[msec]마다 계산된 값을 명령값으로 주고 있다

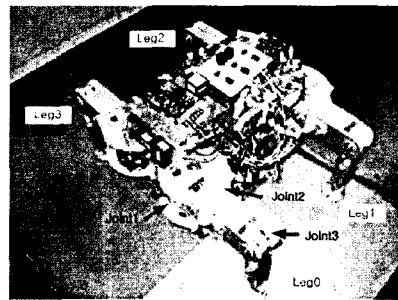


그림 1. 4족 보행 로봇 TITAN-VIII

그림 2에 소비전력을 측정하는 회로를 나타내고 있다. 소비 에너지는 우선 소비전력을 측정하고, 그것을 시간 적분하는 것에 의해서 얻어진다. 모터 드라이버로부터 모터로 공급되는 전압과 전류값을 얻고, 이들을 소비전력 측정회로에 입력하며, A/D 보드를 통해 계산을 하게 된다. 이 때의 샘플링 타임은 10[msec]이다.

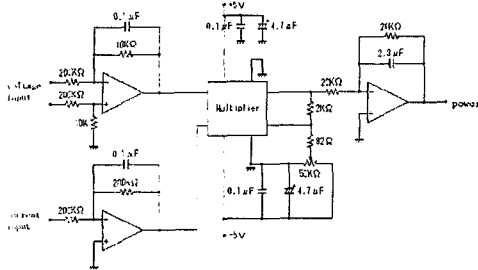


그림 2. 소비전력 측정회로

IV. 실험결과 및 고찰

보행 1주기당 이동거리 $L=0.2[m]$ 로 하고, 보행 주기 T 가 1.5[sec]인 경우 측정을 행하였다. 소비 에너지는 정상보행 10주기의 평균을 하여 얻었다.

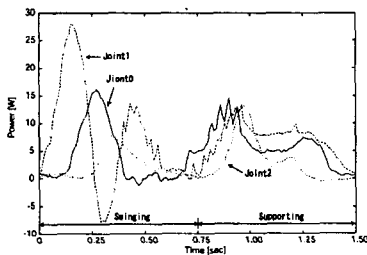


그림 3 좌우요동보행

Leg 1의 소비전력의 측정결과를 그림 3, 4의 그래프에 나타낸다. 그림 3은 좌우요동보행의 경우이고, 그림 4는 3D 요동보행의 경우를 나타내고 있다.

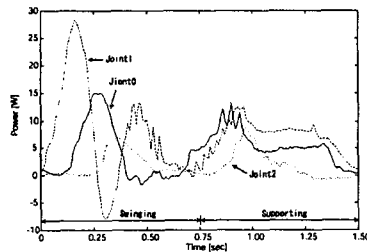


그림 4 3D 요동보행

이들 그래프를 살펴보면 Joint 0과 Joint 1 관절 부분에 있어서의 소비전력부분은 좌우요동보행이나 3D 요동보행에 있어서 거의 차이가 나지 않지만, Joint 2에 있어서는 관절로봇이 발을 들어 동작하는 swing 부분과 다리가 지면에 닿아 지지하는 supporting 부분 모두에서 소비전력이 3D 요동보행쪽이 낮게 되는 것을 알 수 있다. Joint 2는

그림 1에서 보는 바와 같이 좌우로의 요동을 주로 하는 관절이고, 3D 요동으로 인해 동체의 운동이 매끄럽게 되기 때문에 소비에너지가 억제되는 것으로 생각된다.

표 1에는 각각의 자유관절 3부분에서 측정된 소비전력을 시간 적분하여 얻어진 소비 에너지를 나타내고 있다.

표 1 소비에너지

	좌우요동보행	3D 요동보행
주기 T[sec]	1.5	1.5
Joint 0 [J]	7.823	7.143
Joint 1 [J]	12.832	12.009
Joint 2 [J]	3.665	3.066
Total [J]	24.321	22.218

표에서 보는 바와 같이 좌우요동보행에 비해 3D 요동보행의 경우가 수치적으로 약 2[J] 정도의 에너지 절감효과가 있는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

V. 결 론

실제의 4족 보행 로봇 TITAN-VIII을 이용하여 좌우요동보행과 3D 요동보행의 에너지효율에 관한 실험을 한 결과 다음과 같은 사실을 알게 되었다.

1. 이론적으로 3D 요동보행의 경우가 좌우요동보행에 비해 에너지의 효율이 좋다는 것을 실제의 4족 보행 로봇을 통해서 확인할 수 있었다.
2. TITAN-VIII 로봇의 경우 3개의 관절 중 Joint 2의 관절 소비에너지가 2[J] 절감되는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원 프로그램에 의하여 연구되었음.
이 연구의 수행에 도움을 주신 九州大學의 Prof. T.Hasegawa, Dr. R.Kurazume님께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Ryo Kurazume, Kan Yoneda and Shigeo Hirose "3D Sway Comoesation Trajectory for Quadruped Walking Robot" Journal of the Robotics Society of Japan Vol.19 No.5, pp 632-637, 2001