

유압식 4족 보행로봇을 위한 에너지 최소화 보행 알고리즘 Energy Minimization Walking Algorithm For Hydraulic Quadruped Walking Robot

*#김태주, 권오홍, 소병록, 박상덕

*#Tae-Ju Kim(re94@kitech.re.kr), Ohung Kwon, Byung Rok So, Sangdeok Park
한국생산기술연구원

Key words : Quadruped Walking Robot, Hydraulic, Energy Minimization Walking Algorithm, Redundancy

1. 서론

자연계에 존재하는 동물 중 거의 대부분은 생존을 위해 발을 가진 형태로 진화되어 왔으며, 이동성 및 자연환경에 적응하는 측면에서 살펴보면 필연적인 결과였다. 이에 따라 최근 다양한 형태의 족형 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 족형 로봇은 바퀴형 로봇에 비해 시스템 자체의 불안정성을 내포하고 있으며 에너지 효율이 떨어진다는 단점을 가지고 있지만 바퀴형 로봇에 비해 지형에 대한 접근성 및 적응성이 뛰어나 극복할 수 있는 지형이 더 많다는 장점을 가지고 있다. 특히 족형 로봇 중 4족 보행로봇은 구조적인 특징에 의해 안정성측면에서 2족 보행로봇보다 뛰어나며, 이동성측면에서 6족 보행로봇에 비해 이점을 가지고 있으므로 험지나 경사면 등 비평탄 지형에서 빠른 보행을 위해 적합한 구조이다.¹⁻³

일반적으로 유압 구동방식은 낮은 에너지 변환 효율을 가지고 있으나 5kg ~ 100Kg의 영역에서는 모터 등 다른 구동방식에 비하여 높은 power/weight ratio를 가지고 있으며, 이는 수송을 주목적으로 하는 4족 보행로봇의 구동방식에 알맞은 방식이다.⁷

여유구동은 비여유구동에 비해 말단장치에서 큰 힘과 가속도를 낼 수 있으며 작업공간내에 존재하는 특이점을 줄일 수 있다. 또한 구동기의 포화상태를 피할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁴⁻⁶ 4족 보행로봇의 경우 여유구동을 적용하여 비평탄 지형적응을 위한 보행계획을 생성할 수 있으며, 운용환경을 고려하였을 경우 반드시 필요하다. 그러나 유압 구동 방식의 낮은 에너지 효율로 인해 공급해야 하는 에너지가 증가할 여지가 있으므로 에너지를 고려한 보행계획 생성이 요구된다.

본 논문에서는 여유구동을 이용하여 유량을 최소로 사용하는 보행계획을 생성함으로써 에너지를 최소화하는 알고리즘을 구현하였고 모의실험을 통하여 입증하였다.

2. 기구학

Fig. 1에서 보는 바와 같이 유압식 4족 보행로봇을 구성하는 다리모듈은 총 5자유도를 가지고 있으며, 4개의 능동관절과 1개의 수동관절로 구성되어 있다. 능동관절은 회전관절로 이루어져 있으며 수동관절은 선형관절로 이루어져 있다. 각 유압 액추에이터는 210bar의 압력조건에서 400Nm의 토크를 발생시키도록 설계되었으며, 작동각 범위는 ±60°이다. 표 1은 제시된 다리모듈의 기구학적 파라미터를 나타내고 있다.

제안된 다리모듈에 대한 정방향 기구학의 해를 구하면 식(1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 C_a C_1 + l_2 C_{a2} C_1 + l_3 C_{a23} C_1 + l_4 C_{a234} C_1 \\ l_1 S_a S_1 + l_2 S_{a2} S_1 + l_3 S_{a23} S_1 + l_4 S_{a234} S_1 \\ -(l_1 S_a + l_2 S_{a2} + l_3 S_{a23} + l_4 S_{a234}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 a 는 관절 1과 관절 2 간의 각도이다. 위의 식으로부터 속도관계식은 다음과 같이 식(2)로 구

할 수 있다.

$$\dot{u} = [G_\phi^u] \dot{\phi} \quad (2)$$

여기서

$$[G_\phi^u] = [g_1 \quad g_2 \quad g_3] \quad (3)$$

$$\dot{\phi} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4]^T \quad (4)$$

이다.

따라서 능동관절과 말단장치의 관계는 식(5)와 같이의 사역행렬을 통해 나타낼 수 있다.

$$\dot{\phi} = [G_u^\phi]^+ \dot{u} \quad (5)$$



Fig. 1 A leg module for hydraulic quadruped walking robot

Table 1 Specifications of leg module

	L1	L2	L3	L3	J1	J2	J3	J4
Length (mm)	120	300	300	441	.	.	.	.
Weight (g)	820	1200	876	1691	1500	1500	1500	1500
Home Position (degree)	.	.	.	.	0	30	60	90

3. 에너지 최소화 보행 알고리즘

유압시스템에서 파워는 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 유량과 유압에 대해 비례관계를 가지고 있으므로 유량과 유압을 최소화함으로써 파워를 최소화시킬 수 있다.

$$W = \frac{P \cdot Q \cdot 100}{450 \cdot \eta} \quad (6)$$

여기서 W 는 유압 공급 장치의 파워, P 는 압력, Q 는 유량 그리고 η 는 유압 공급 장치의 효율이다.

한 주기 동안의 보행에 사용되는 유량은 식(7)과 같이 표현할 수 있으며 사용되는 유량을 최소화 하기 위해서는 식(7)이 최소화되어야 한다.

$$Q = C \sum_{i=1}^4 \sum_{t=t_0}^t |\theta_i - \theta_{i-1}| \quad (7)$$

여기서 Q 는 유량, C 는 변환 상수, θ_i 는 i 번째 관절의 각도이다.

보행은 Fig. 2 와 같이 발을 딛고 몸통을 이동시키는 지지상태와 Fig. 3 과 같이 발을 다음 내디딜 곳으로 이동하는 스윙상태로 구분할 수 있다. 제안된 다리모듈은 1DOF의 여유자유도를 가지고 있으므로 영공간에 해를 추가함으로써 주어진 궤적을 만족하며 최소유량을 소모하는 해를 구할 수 있다.

식(5)에 영공간의 해를 추가하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\phi} = \left([G_u^\phi] \right)^+ \dot{u} + \left(I - \left([G_u^\phi] \right)^+ \left([G_u^\phi] \right) \right) \varepsilon \quad (8)$$

식(7)을 미분하면,

$$\dot{Q} = B \dot{\phi} \quad (9)$$

이고 $\dot{Q} < 0$ 일 때 최소값을 갖는다.

식(9)를 식(8)에 대입하여 다음과 같이 식(10)을 얻을 수 있다.

$$\dot{Q} = B \left([G_u^\phi] \right)^+ \dot{u} + B \left(I - \left([G_u^\phi] \right)^+ \left([G_u^\phi] \right) \right) \varepsilon \quad (10)$$

식(10)을 ε 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = \left(B \left(I - \left([G_u^\phi] \right)^+ \left([G_u^\phi] \right) \right) \right)^+ \left(\dot{Q} - B \left([G_u^\phi] \right)^+ \dot{u} \right) \quad (11)$$

식(11)을 식(8)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} = & \left([G_u^\phi] \right)^+ \dot{u} + \left(I - \left([G_u^\phi] \right)^+ \left([G_u^\phi] \right) \right) \\ & \left(B \left(I - \left([G_u^\phi] \right)^+ \left([G_u^\phi] \right) \right) \right)^+ \left(\dot{Q} - B \left([G_u^\phi] \right)^+ \dot{u} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 위의 식(12)와 같이 주어진 궤적을 따라 움직이는 구속조건을 가지고 유량을 최소로 소모하는 해를 구할 수 있다.

다음 시뮬레이션은 스윙상태 시 에너지 최소화 보행 알고리즘을 적용하였을 경우와 그렇지 않았을 경우에 대한 소비된 유량의 결과를 보여준다. 유량은 관절각 변화량과 비례하므로 한 주기 동안의 각 관절각 변화량의 총합을 그래프로 나타내었다. Fig. 4는 에너지 최소화 알고리즘을 적용하지 않고 발끝의 각도를 고정하였을 경우를 나타낸 것이며, Fig. 5는 에너지 최소화 알고리즘을 사용한 경우를 나타낸 것이다. 발끝이 동일한 궤적을 추종하도록 하였을 경우, Fig.5에서 나타난 바와 같이 제안된 알고리즘은 약 11%의 유량이 감소하는 효과를 볼 수 있다.

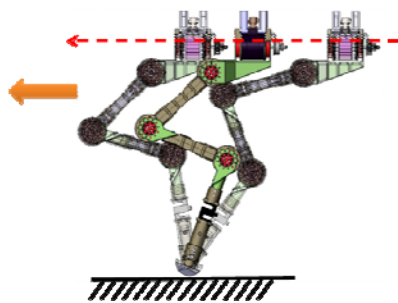


Fig. 2 Supporting phase

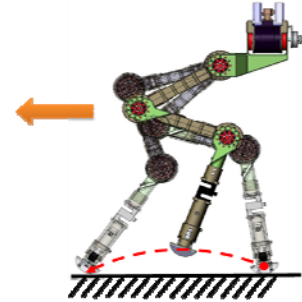


Fig. 3 Swing phase

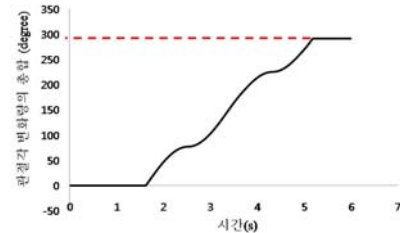


Fig. 4 Fixed angle (ϕ)

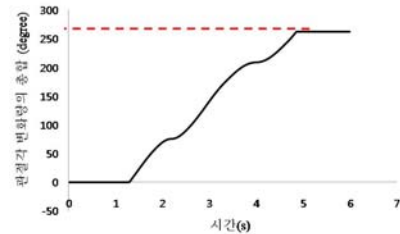


Fig. 5 Proposed algorithm

4. 결론

본 연구에서는 제안된 다리모듈의 여유자유도를 이용하여 보행 시 필요유량을 최소화시키는 에너지 최소화 보행 알고리즘을 개발하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 적용하였을 경우 보행에 필요한 유량이 감소함을 확인할 수 있었다. 필요유량의 감소는 유압공급장치의 파워를 줄이는 효과를 가져온다. 따라서 본 연구에서 제안된 알고리즘을 사용하여 요구되는 에너지를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. R. Playter, M. Buehler, and M. Raiber, "BigDog," *Proc. Of SPIE*, Vol. 6230, 2006.
2. Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. H. Cohen, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No.3-4, pp. 187-202, 2003.
3. S. Peng, "A Biologically Inspired Four Legged Walking Robot," Doctoral thesis, Murdoch University, 2006.
4. Sang Heon Lee, et al. "Control of Active Stiffness and Impact Disturbance by Redundancy Actuated Mechanism," *Ph.D. Dissertation*, Department of Mechanical Engineering, Kaist, 2000
5. Yoshihiko Nakamura, *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
6. John M. Hollerbach and KI C. SUH, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," *Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 308-316, August 1987.
7. Japan Robot Association, "Fig. Power/weight Ratio"