

사족보행로봇의 안정적 보행궤적 생성을 위한 기구학적 여유자유도의 적용

Kinematic Redundancy Resolution For The Stable Walking Trajectory Generation of A Quadruped Robot

*김태주, 권오홍, 소병목, 박상덕

*#Taeju Kim(re94@kitech.re.kr), Ohung Kwon, Byungrok So, Sangdoek Park
한국생산기술연구원 지능형로봇연구부

Key words : Redundancy, Quadruped Robot, Walking Trajectory

1. Introduction

최근 들어 사족보행로봇이 가지고 있는 다양한 지형에 대한 뛰어난 접근성 및 극복성이 재조명되면서 사족보행에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 사족보행로봇은 안정적 보행과 동적보행을 동시에 만족시킬 수 있는 구조적 특징을 지니고 있어 야지나 험지와 같은 보행환경에서 빠른 보행에 적합하다. 그러나 사족보행로봇이 이러한 비평탄 보행환경을 극복하기 위해서는 각 다리모듈이 여유자유도의 구조를 가져야 한다. 여유자유도를 갖는 시스템의 경우 자가운동으로 인해 수많은 해가 존재하게 된다. 따라서 적절한 구속조건을 줌으로써 최적의 해를 찾는 것이 필요하다.²⁻³

본 논문에서는 닫힌 형태의 체인구조 기구학 해석과 여유자유도를 이용하여 ZMP를 최대화하는 구속조건을 부여함으로써 안정적 보행이 가능한 알고리즘을 구현하였고 모의실험을 통하여 입증하였다.¹

2. 기구학

그림 1.(a)에서 보는 바와 같이 이 논문에서 사용된 사족보행로봇은 바디와 직렬체인 형태의 구조를 가진 4개의 다리모듈로 구성되어 있으며 총 16 자유도를 가지고 있다. 그림 1.(b)에서 보는 바와 같이 각각의 다리모듈은 총 4 자유도를 가지고 있으며, 3개의 Pitch 관절과 1개의 Roll 관절로 이루어져 있다. 또한 각 다리모듈은 1개의

기구학적 여유자유도를 가지고 있으므로 제안된 사족보행로봇은 총 4개의 기구학적 여유자유도를 가지고 있다.

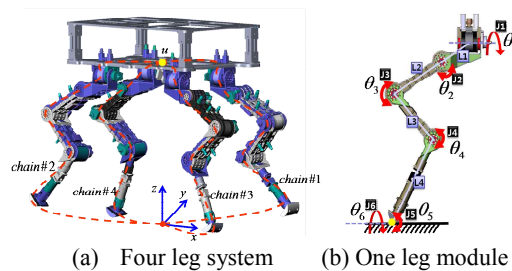


Fig. 1 Quadruped robot

각 체인에 대하여 바디와 관절의 속도관계식을 구하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^u \\ \mathbf{G}_2^u \\ \mathbf{G}_3^u \\ \mathbf{G}_4^u \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^u \\ \mathbf{G}_2^u \\ \mathbf{G}_3^u \\ \mathbf{G}_4^u \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [x \quad y \quad z \quad \dots]^T, \\ \boldsymbol{\theta} &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T \end{aligned} \quad (2)$$

이며 i 는 각 체인을 나타낸다.

식(1)로부터 각 체인의 능동관절과 수동관절의 관계를 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\theta}_a = [\mathbf{G}_a^p]^T \boldsymbol{\theta}_s \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_a &= [\theta_{a1} \quad \theta_{a2} \quad \theta_{a3} \quad \theta_{a4}]^T, \\ \boldsymbol{\theta}_s &= [\theta_{s1} \quad \theta_{s2} \quad \theta_{s3} \quad \theta_{s4}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

이며 (i, j) 는 $(Chain\#1, Chain\#2)$ 또는

(Chain#3, Chain#4)이다.

식(1)과 식(3)으로부터 각 체인의 관절은 다음 식(5)와 같이 능동관절로 표현될 수 있다.

$$\dot{\theta}_n = [G_a^n] \dot{\theta}_n, \dot{\theta}_m = [G_a^m] \dot{\theta}_m \quad (5)$$

여기서 (n,m)는 (Chain#1, Chain#2) 또는 (Chain#3, Chain#4)이다.

식(5)를 식(1)에 대입하여 능동관절속도와 바디속도와의 관계를 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{u} = [G_a^n] \dot{\theta}_n + [G_a^m] \dot{\theta}_m = [G_a^i] \dot{\theta}_i \quad (6)$$

3. 보행궤적 생성 알고리즘 및 시뮬레이션 결과

영공간을 활용하여 구속조건을 만족시키는 해를 구하기 위하여 바디속도벡터를 다음 식(7)과 같이 재정의했다.

$$\dot{u}' = [\dot{z} \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T \quad (7)$$

식(7)에 영공간의 해를 추가하면 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}_i = [G_a^i]^+ \dot{u}' + (I - ([G_a^i]^+ [G_a^i])) \dot{\theta}_i \quad (8)$$

사족보행로봇의 안정된 보행궤적을 생성하기 위한 구속조건으로 ZMP를 최대화하는 기법을 사용하였으며 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{C}_x = B \dot{\theta}_1, \dot{C}_y = C \dot{\theta}_2 \quad (9)$$

여기서

$$\begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + (x_{zmp} - x_{msp}) \\ y + (y_{zmp} - y_{msp}) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{msp} \\ y_{msp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{cm} \cos \theta_{p,k-1} \\ z_{cm} \cos \theta_{p,k-1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

이며 (x_{zmp}, y_{zmp}) 는 ZMP의 위치, (x_{msp}, y_{msp}) 는 정적상태에서의 최대안정점, z_{cm} 은 무게중심의 z축 위치를 나타낸다.

식(8)을 식(9)에 대입하면 다음과 같이 안정적 보행궤적을 만족하는 새로운 해를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= [G_a^i]^+ \dot{u}' + J_1 J_2^+ (\dot{C}_x - B [G_a^i]^+ \dot{u}') + \\ & J_4 (\dot{C}_y - C [G_a^i]^+ \dot{u}') - J_3 J_2^+ (\dot{C}_x - B [G_a^i]^+ \dot{u}') \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$J_1 = (I - ([G_a^i]^+ [G_a^i])), J_2 = B J_1, J_3 = C J_1, \quad (12)$$

$$J_4 = J_1 (I - J_2^+ J_2) (J_3 (I - J_2^+ J_2))^+$$

그림 2는 사족보행로봇이 경사면을 보행할 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 요구하는 보행속도를 만족하며 바디의 Roll, Pitch, Yaw 각도가 일정한 범위 내에서 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 경사면을 보행하기 때문에 Pitch 각이 일정한 오프셋을 가지는 것을 확인할 수 있어 결과적으로 경사면에서 안정된 보행이 수행되고 있음을 알 수 있다.

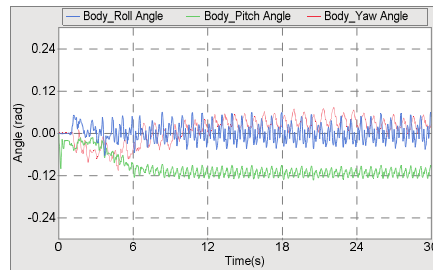


Fig. 2 Roll, Pitch, Yaw angle of Quadruped robot

4. 결론

본 연구에서는 제안된 사족보행로봇의 여유자유도를 이용하여 보행 시 안정하게 걸을 수 있는 보행궤적 생성 알고리즘을 개발하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 적용하였을 경우, 넘어지지 않고 안정된 보행이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. 유동수, 소병록, 이병주, 김희국, "지면에 고정되어 있지 않은 여유자유도 매니플레이터의 운동계획 알고리즘," *Journal of Control, Automation, and System Engineering*, Vol. 10, No. 10., October, 2004
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. Yoshihiko Nakamura, *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.