

질량-스프링모델 응용 보행로봇 달리기를 위한 다리 스윙 제어기

A Leg-Swing Controller for Compliant Legged Robot Running Based on Mass-Spring Model

*김영식, 신동환, 권오석, #안진웅

Youngshik Kim, Dong-Hwan Shin, Oh-Seok Kwon, and Jinung An

{youngshik, sdh77, mesign, robot} @dgist.ac.kr

대구경북과학기술원 공공원천기술연구센터

Key words : compliance, legged robot, mass-spring model, running, swing controller

1. 서론

수십 년 동안 많은 연구자들은 로봇에게 이동성(mobility)를 제공하기 위하여 다리(legs)와 바퀴(wheels)들을 사용해왔다 [1-3]. 하지만 바퀴를 사용하여 주행하는 로봇들의 이동성은 지면의 조건이나 환경에 상당한 제약을 받는다. 일반적으로 바퀴로 주행하는 로봇의 이동성은 마찰력이 높은 표면에서 좋다. 반면 다리로 주행하는 로봇은 험지와 같은 비정형 환경에서 좋은 운동성을 보여준다. 이러한 이유로 많은 보행로봇들이 (legged robots) 연구, 개발되었다.

바퀴주행 이동로봇을 묘사하기 위하여 unicycle 타입 모델[2]이 주요하게 사용된다. 반면 다리주행 이동로봇에는 다음과 같은 여러 타입의 모델들이 존재한다; minimal model of walking, synthetic wheel, and mass-spring model of running [3]. Passive compliant 관절들은 교란(disturbances)을 제거하고, 에너지 효율을 높이고, 기동성을 향상시키기 위해 자주 사용된다. 전통적으로 이러한 compliant 관절은 선형, 비틀림 스프링 시스템을 사용하여 모델링 된다 [4].

더욱이, 단순한 질량-스프링 (mass-spring) 모델, Spring Loaded Inverted Pendulum (SLIP, [4])은 짐승이나 사람의 달리는 운동을 효과적으로 표현한다. 이 질량-스프링 모델, Fig. 1 에서 다리(길이=L)는 질량을 무시할 수 있는 선형 스프링 (스프링상수=k, 변형 전 길이=L₀)으로 취급된다. 로봇몸통은 다리에 의해

지지되는 질점 (point mass, m)으로 간주된다. 그래서, 스프링이 이상적이고 공기저항이 없다고 가정하면 이 시스템의 운동에너지와 위치에너지는 보존 되어 이상적으로는 이동 시 에너지 소모가 없다.

보행로봇의 달리기는 Fig. 1 에서 보듯이 swing 와 stance phases 로 나뉜다. Stance phase 동안에는 로봇의 다리 끝이 지면에 닿아 자체의 운동력 (dynamics)에 의해 지면을 떠날 때까지 움직인다. 반면, Swing phase 동안 로봇의 다리는 지면과 접촉하지 않고 공중에서 자유롭게 중력의 영향을 받아 움직인다. 따라서 이 swing phase 동안 로봇이 지면에 접촉하기 전까지 원하는 지면과의 접촉 각도(angle of attack, [4]), θ^* (Fig. 1)를 유지하도록 로봇다리를 강제적으로 회전시켜주어야 한다. 그러기 위해서 우리는 이 논문에서 asymptotically stability 를 제공하는 간단하지만 효과적인 제어기를 제안한다. 그리고 제안된 제어기를 시뮬레이션을 통해서 확인하고 논의한다.

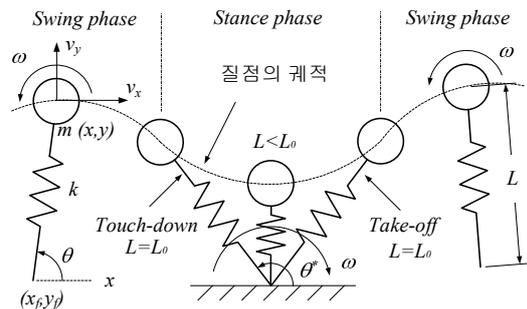


Fig. 1. Mass-spring running for a legged robot.

2. 모델링과 제어

서론에서 언급되었듯이 이 논문에서는 보행로봇을 위한 간단한 질량-스프링 달리기 모델 (Fig. 1)이 사용된다. Swing 과 stance phases 각각에 대하여 질점과 다리 끝단의 직교좌표계, (x, y) 와 (x_f, y_f) 를 사용하여 시스템을 표현하면 다음과 같다,

$$\text{Swing phase: } \ddot{x} = 0, \ddot{y} = -mg \quad (1)$$

$$\text{Stance phase: } \ddot{x} = k(L_0 - L)\cos(\theta) \\ \ddot{y} = k(L_0 - L)\sin(\theta) - mg \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{L}(\dot{y}\cos(\theta) - \dot{x}\sin(\theta))$$

여기서 g 는 중력가속도이다. 그리고 다리 길이, L 과 지면에 대한 다리의 상대각도, θ 는 다음과 같다,

$$L = \sqrt{(x_f - x)^2 + (y_f - y)^2}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y - y_f}{x - x_f}\right) \quad (3)$$

Swing phase 동안의 회전은 다음의 제어를 사용하여 asymptotically 안정적 달리기를 제공할 수 있는 θ^* 으로 수렴시킨다,

$$\dot{\theta}_i = -K_\theta \tanh(\theta - \theta^*) \quad (4)$$

여기서 K_θ 는 제어 gain 이다. 참고로 tanh 함수는 제어기 값의 boundedness 를 위해 사용하였다. 더 나가, 시스템의 전체 에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{m}{2}(x^2 + y^2) + mgy + \frac{k}{2}(L_0 - L)^2 \quad (5)$$

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용된 패러미터는 다음과 같다; $m=80$ kg, $L_0=1$ m, $\theta^*=112^\circ$, $k=20000$ N/m, $K_\theta=100$.

Fig. 2 는 로봇 질점의 궤적과 다리 모션을 보여준다. 보다시피 제안된 swing 제어기는 효과적으로 로봇 다리를 지면에 접촉하기 전에 angle of attack 으로 수렴시킨다. Fig. 3 는 다리-지면 상대각도, 다리 압축, 회전속도, 시스템 에너지를 각각 보여준다. 이 결과는 제안된

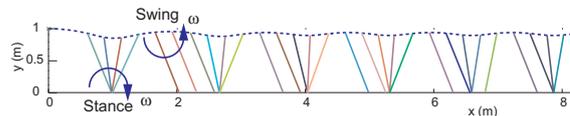


Fig. 2. Running trajectory path of mass and leg motion.

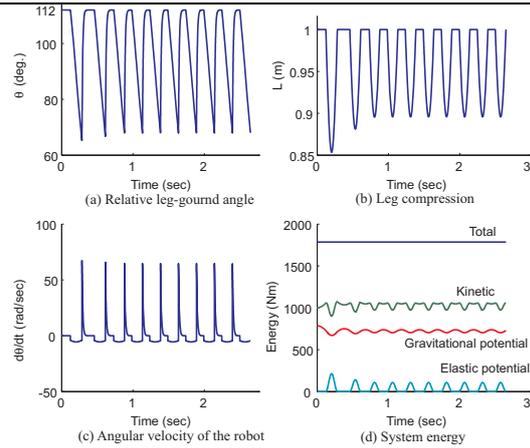


Fig. 3. Simulated mass-spring running for a legged robot.

제어기가 로봇다리를 효과적으로 제어하여 안정적인 달리기를 하도록 한다는 것을 보여준다. 또한 시스템 에너지는 보존된다.

4. 결론

이 연구는 보행로봇의 질량-스프링 달리기 모델을 이용하여 계산이 간단하고 적용하기 쉬운 leg-swing 제어기를 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 우리는 이 제어기가 로봇 다리를 swing phase 동안 효과적으로 원하는 다리-지면 각도로 수렴시킨다는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 일반사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Steeves, C., M.G. Buehler, and S.G. Penzes. "Dynamic behaviors for a hybrid leg-wheel mobile platform," *Unmanned Ground Vehicle Technology IV*, 2-3 April 2002. USA, p. 75-86, 2002.
2. Kim, Y. and M.A. Minor, "Coordinated kinematic control of compliantly coupled multirobot systems in an array format," *IEEE Transactions on Robotics*, **26**: p. 173-180, 2010.
3. Alexander, R.M., *Principles of Animal Locomotion*, Princeton University Press, 2006.
4. Rummel, J. and A. Seyfarth, "Stable Running with Segmented Legs," *The International Journal of Robotics Research*, **27**(8): p. 919-934, 2008.