

스틱 모델 관점에서의 외바퀴 로봇 밸런싱 제어

이상덕, 정 슬

지능시스템 및 감성공학 실험실, 메카트로닉스공학과, 충남대학교

Balancing Control of a Single-wheel Mobile Robot from a Stick-Model Point of View

Sang-Deok Lee and Seul Jung

Intelligent Control & Emotional Engineering(ISEE) Laboratory, Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 스틱 모델을 사용하여 외바퀴 로봇의 수직 방향에서 생기는 파라메트릭 진동을 시뮬레이션 분석하고, 분석된 결과를 바탕으로 제어 법칙을 유도한 다음, 실험을 통해 성능을 검증한다. 실험에 활용된 외바퀴 로봇은 수평 방향에 대해서는 비례미분제어기를 사용하고, 수직 방향에 대해서는 진동제어기를 활용한다.

1. 서 론

최근에 한 바퀴로 구동하는 이도로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 한 바퀴 구동 이동 로봇은 탑승자를 태우고 근거리를 이동하는 운송 수단으로 사용되고 있다. 더욱 도전적인 것인 스스로 균형을 유지하는 것이다.

자이로스코프 효과를 사용하여 외바퀴의 밸런싱을 유지하는 로봇은 카네기 멜론 대학교 충남대학교에서 개발되어 왔다 [1,2]. 로봇에 내장되어 있는 제어모멘트자이로를 이용하여 외바퀴가 밸런싱을 유지하는 원리가 사용되었다.

외바퀴 로봇의 밸런싱 제어는 자이로효과를 어느 방향으로 사용하는냐에 따라 두 개의 개념으로 나뉠 수가 있다. 그림 1에 보여진 두 개념은 전력효율과 안정성 측면에서 각각의 장단점을 나타내고 있다. 그림 1(b)의 구조는 전력효율이 좋은 운용형태에 있어서 로봇의 수직 방향에 대한 안정성이 취약한 것으로 나타났다.

본 논문에서는, 그림 1(b)의 구조에서 그 안정성을 향상시키는 제어 방법을 제안하고 실험을 통해 성능을 검증하고자 한다. 안정성 향상을 위해서 먼저 스틱 모델을 사용하여 로봇의 동역학 식을 유도한다. 유도한 동역학 식으로부터, 파라메트릭 진동 방정식을 구하고 파라미터의 변화에 따른 로봇의 안정성을 시뮬레이션을 통해 분석한다 [3]. 시뮬레이션 분석을 통해 얻은 제어 법칙을 실제 로봇 시스템에 탑재하여 밸런싱 제어 성능을 검증 한다.



(a) Horizontal configuration (b) Vertical configuration

〈그림 1〉 외바퀴 로봇의 구동 구조

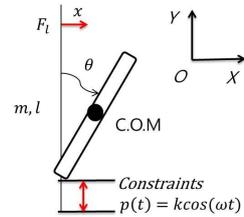
2. 본 론

2.1 외바퀴 로봇시스템의 I 스틱 모델

로봇은 김벌시스템과 바다시스템으로 구성되어 있고, 김벌시스템에 있는 플라이휠 모멘텀의 시간에 따른 위치 변화를 이용하여 생성된 자이로 힘을 밸런싱의 수단으로 사용하고 있다. 생성된 자이로 힘은 수평 방향과 수직 방향의 성분을 함께 갖고 있는 벡터인데, 로봇이 지면과의 포인트 접촉을 하는 특징에 의해서 제어가 원활하지 못할 경우 수직 방향 진동을 일으켜서 안정성이 저하되는 문제를 갖게 된다. 이러한 안정성의 문제는 그림 1의 좌측 보다 우측 개념에서 더욱 중요하게 된다.

안정성을 확보하기 위해, 밸런싱 측면에서 시스템의 스틱 모델을 이용하고자 한다. 로봇의 진행방향에서 볼 때, 로봇은 스틱 모습으로 보이게 되므로 스틱을 그 모델로 활용할 수가 있게 된다. 또한, 모델의 수직 방향에 작용하는 자이로 힘은 스틱의 수직 모션을 일으키게 되는데 이러한 제한 조건이 모델에 반영이 되어야 하므로, 모델의 형태는 그림 2와

같이 된다.



〈그림 2〉 스틱 모델

스틱 모델의 동역학식은 다음과 같다. 모델의 일반화된 좌표는 (x, θ) 이다.

KINEMATICS:

$$v_G^2 = \dot{x}^2 + \dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{4}l^2\dot{\theta}^2 \quad (1)$$

KINETIC ENERGY:

$$T = \frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\dot{\theta}^2 = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{4}l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}(\frac{ml^2}{12})\dot{\theta}^2 \quad (2)$$

POTENTIAL ENERGY:

$$V = -mg\frac{l}{2}\cos\theta - m\ddot{p}\frac{l}{2}\cos\theta \quad (3)$$

LAGRANGIAN:

$$L = T - V \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\dot{\theta}^2 = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{4}l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}(\frac{ml^2}{12})\dot{\theta}^2 + mg\frac{l}{2}\cos\theta + m\ddot{p}\frac{l}{2}\cos\theta \quad (5)$$

LAGRANGE EQUATION 1:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x}\right) = m\ddot{x} + \frac{1}{2}ml\cos\theta\ddot{\theta} - \frac{1}{2}ml\dot{\theta}^2\sin\theta \quad (6)$$

LAGRANGE EQUATION 2:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right) = \frac{1}{3}ml^2\ddot{\theta} + \frac{1}{2}ml\cos\theta\ddot{x} - mg\frac{1}{2}\sin\theta - m\ddot{p}\frac{1}{2}\sin\theta \quad (7)$$

GOVERNING EQUATION:

외력이 발생하지 않을 때,

$$\ddot{\theta} + \left(-\frac{6g}{l} + \frac{6}{l}k\omega^2\cos\omega t\right)\sin\theta = 0 \quad (8)$$

식 (8)을 파라미터화 하면 다음과 같다.

$$\text{Parameterize : } \tau = \omega t, \omega^2 = \frac{6g}{l} \quad (9)$$

$$\omega^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (-\omega_0^2 + \frac{6}{l} k \cos\tau) \sin\theta = 0$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + (-\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + \frac{6}{l} k \cos\tau) \sin\theta = 0$$

$$\ddot{\theta} + (\alpha + \beta \cos\tau) \sin\theta = 0 \quad (\alpha = -\frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \beta = \frac{6}{l} k)$$

그러므로 위와 같이 파라메트릭 진동에 관한 Mathieu's Equation을 얻게 된다.

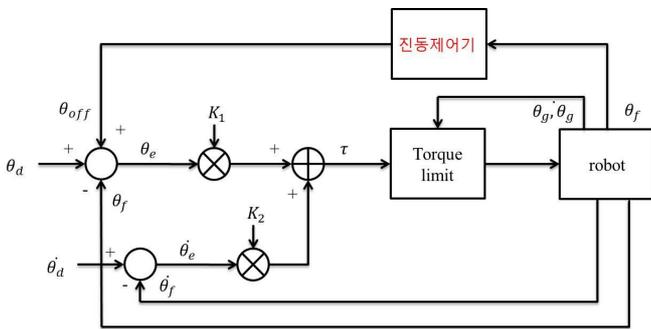
2.2 제어기 설계

수평방향에 대해서는 다음과 같이 비례미분제어기를 사용한다.

$$F_l = K_p \theta + K_d \dot{\theta} \quad (10)$$

수직방향에 대한 제어법칙의 형태는 다음과 같다.

$$F_v = -\beta \sin\theta \quad (11)$$

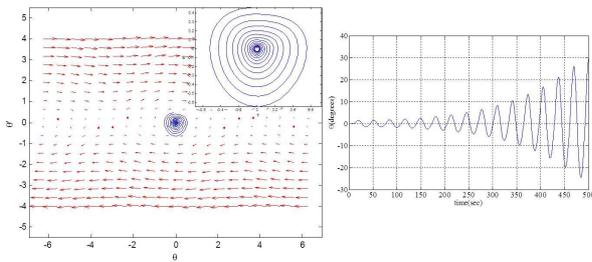


<그림 3> 제안하는 제어기

2.3 시뮬레이션

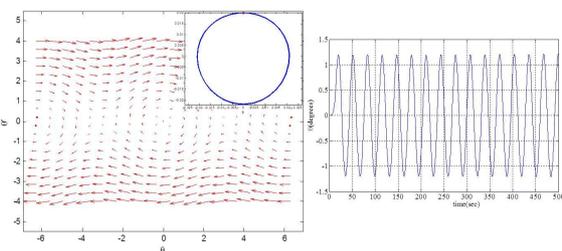
3가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 시뮬레이션 결과를 나타내는데 그림 4 (a), (b)는 진동제어를 적용하지 않은 경우이고 그림 4(c)는 적용한 경우이다. 그림 4에서 보듯이 적용하지 않은 경우에는 발산하고 적용한 경우는 안정한 것을 알 수 있다.

(a) 시뮬레이션 1: (k=50mm : 진동제어 없음)



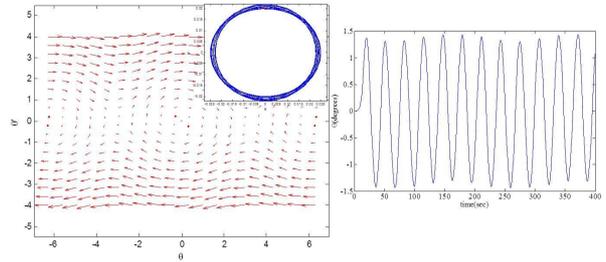
(a) 진동제어를 적용하지 않은 경우

(b) 시뮬레이션 2: (k=10mm : 진동제어 없음)



(b) 진동제어를 적용하지 않은 경우

(c) 시뮬레이션 3 (k=50mm: 진동제어 적용)



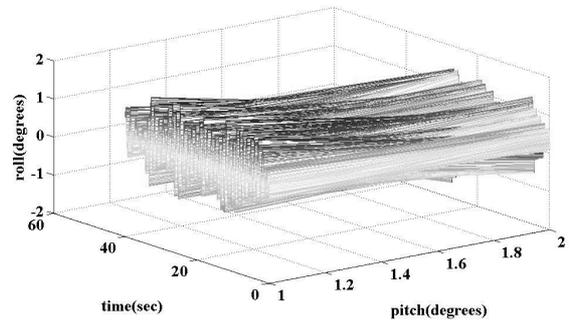
(c) 진동제어를 적용한 경우

<그림 4> 안정성

그림 4 (a)의 결과는 파라메트릭 진동이 발생하는 경우를 나타내고 있고, 그림 4 (b)는 파라메트릭 진동이 발생하지 않는 경우를 나타내고 있다. 다음으로, 그림 4 (c)에서는 시뮬레이션 1의 상태에 진동제어를 포함했을 때의 결과를 보여주는 것으로 안정화 하는 것을 볼 수 있다.

2.4 실험 및 검증

제안하는 제어기의 성능은 실제 밸런싱 제어실험을 통해 그림 5와 같이 검증 되었다. 로봇의 수평 방향에 대한 밸런싱 제어 성능은 그림 5에서 roll 각도로 표현되고 있고, 로봇의 수직 방향에 대한 진동제어 성능은 pitch 방향으로 표현되고 있다. roll 방향은 2도 범위 내에서 제어가 됨을 확인할 수 있었고, pitch 방향은 1도 범위에서 제어됨을 확인하였다.



<그림 5> 제어 성능 검증

3. 결론

본 논문에서는 스틱 모델을 활용하여 외바퀴 로봇의 파라메트릭 진동의 문제를 접근하였다. 문제의 해결 방안으로 시뮬레이션을 통해서 파라메트릭 진동이 발생하는 조건을 찾고 이를 억제하는 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 실험을 통해 진동제어기의 성능을 검증하였다. 외바퀴 로봇이 안정을 유지하면서 일정한 진동이 좌우로 유지될 때 밸런싱 제어가 가능함을 확인하였고, 이를 위해서는 수직 방향의 진동 문제가 반드시 고려되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

[감사의 글]

본 논문은 2013년 한국연구재단 일반연구지원(NRF-2010-0024904)과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A21A11049503)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참고 문헌]

- [1] Xu, Yangsheng, H. Ben Brown, and Kwok Wai Au. "Dynamic mobility with single-wheel configuration." The international journal of Robotics Research 18.7 (1999): 728-738.
- [2] Park, J. H., and S. Jung. "Development and control of a single-wheel robot: Practical Mechatronics approach." Mechatronics 23.6 (2013): 594-606.
- [3] Moreno-Ahedo, Luis, Joaquin Collado, and Carlos Vazquez. "Parametric Resonance Cancellation Via Reshaping Stability Regions: Numerical and Experimental Results." Control Systems Technology, IEEE Transactions on 22.2 (2014): 753-760.