차륜형 역진자 제어를 위한 평형점 유도

A derivation of the equivalent point for a controller of a wheeled inverted pendulum

*#이세한 [1], 강재관 [1]

*#S.-H. Lee (leesehan@kyungnam.ac.kr)[1], J.-G. Kang[1]

[1] 경남대학교 기계자동화공학부

Key words : Wheeled inverted pendulum, equilibrium point, inclined road

1. 서론

차륜형 역진자의 근원이 되는 역진자 시스템은 1965 년경 Kaptiza[1] 에 의해서 처음 제안되었다. 그 후, 다양한 형태의 역진자들이 소개되어 제어이론 검증에 사용되어 왔다 [2]. 차륜형 역진자도 그 역진자의 한 종류에 해당되며 동일하게 특유의 비선형 특성을 이어 받고 있다.

차륜형 역진자는 개인용 이동수단 [3,4], 이동로봇 플랫폼으로 적용되고 있다. 차륜형 역진자의 주행성능 향상을 위해서는 지형의 경사와 같은 주변환경 변화에 따른 평형점 특성이 적극적으로 해석되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 주행면의 경사에 따라서 차륜형 역진자가 갖는 정적 평형점 유도를 다루고 있다.

2. 차륜형 역진자

차륜형 역진자의 몸체는 선천적으로 불안정한 평형상태에서 동작하며 제어기가 적절히 동작하지 않는다면 작은 외란에 의해서도 넘어지게 된다. 이 때, 제어기는 차륜형 역진자를 몸체가 넘어지려는 방향으로 진행 시켜서 몸체의 반대방향으로 관성력을 발생 시켜서 몸체의 평형을 유지하도록 한다. Fig.1 은 경사면에서 주행하는 차륜형 역진자의 모델을 자유물체도를 통해서 표시하고 있다.

3. 운동방정식 및 평형점

운동방정식 유도에 필요한 자유물체도는 Fig.1 과 같이 차륜과 몸체로 분리되어 작성되며, 그 운동방정식은 다음과 같이 구성된다.

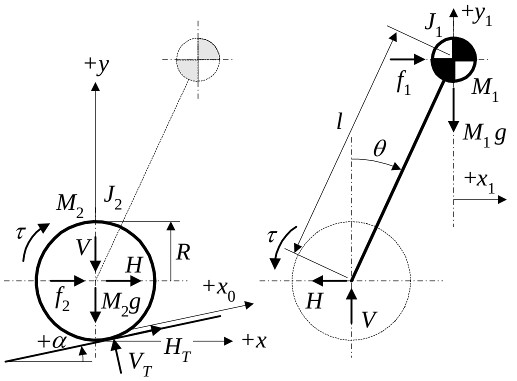

Fig. 1 Free body diagrams of the wheeled inverted pendulum

$$(M_1 + M_2 + \frac{J_2}{R^2})\ddot{x}_0 + M_1 l\cos(\theta+\alpha)\ddot{\theta} - M_1 l\sin(\theta+\alpha)\dot{\theta}^2 + (M_1+M_2)g\sin\alpha = (f_1+f_2)\cos\alpha + \frac{1}{R}\tau \quad (1)$$

$$M_1 l\cos(\theta+\alpha)\ddot{x}_0 + (J_1+M_1 l^2)\ddot{\theta} - M_1 g l\sin\theta = f_1 l\cos\theta - \tau \quad (2)$$

이 때, 바퀴에 작용하는 변수로 외력 f_2, 몸체로부터 작용하는 수평 및 수직반력 H,V, 바퀴중력 $M_2 g$, 경사 지면으로부터 작용하는 수평 및 수직반력 H_T,V_T, 그리고 구동모터의 토크 τ 등이 있다. 몸체에 작용하는 변수로 외력 f_1, 몸체중력 $M_1 g$, 바퀴로부터 작용하는 반력 H,V, 그리고 구동모터의 반력토크 τ 등이 있다.

차륜형 역진자 제어에 필요한 몸체의 평형

상태를 정의한다. 몸체에 작용하는 힘은 바퀴 구동에 의한 관성력, 구동장치의 반력토크, 중력 등을 들 수 있다. 역진자가 정적 평형을 유지하면 몸체에 작용하는 관성력은 사라지고 반력토크와 중력만 존재한다. 이 조건을 식(1)과 (2)에 대입하면 평형상태에 해당하는 정역학 방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\tau = (M_1 + M_2) g R \sin\alpha \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\tau}{M_1 g l}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{(M_1 + M_2)R}{M_1 l}\sin\alpha\right) \quad (4)$$

4. 시뮬레이션

차륜형 역진자가 경사면에 대해서 어떤 평형점을 갖는지 확인하기 위해서 식(1), (2)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig2 와 Fig.3 에 표시되어 있다. 그 결과가 식 (3), (4)와 일치되는 것이 확인되었다. 이 때, 사용된 제어기는 체계적으로 제어이득을 결정할 수 있는 LQR (Linear Quadratic Regulator) 제어기가 사용되었다. 필요한 차륜형 역진자의 동역학적 계수는 표 1 에 나타내었다.

Table 1 Wheeled inverted pendulum parameters

변수	값	내용
M_1	1.0kg	몸체 질량
M_2	0.05kg	바퀴 질량
J_1	$4.0\times10^{-3}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$	몸체 회전관성
J_2	$1.5\times10^{-5}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$	바퀴 회전관성
R	0.025m	바퀴 반지름
l	0.08m	바퀴중심과 몸체 중심까지 거리

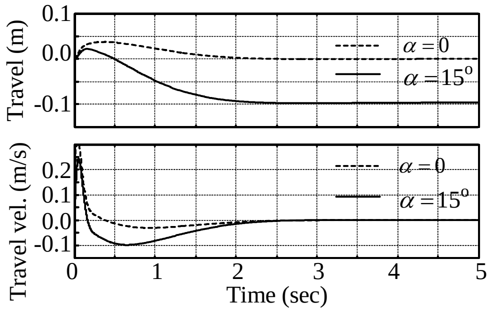

Fig. 2 Time responses of tilting angle and velocity for flat and inclined road.

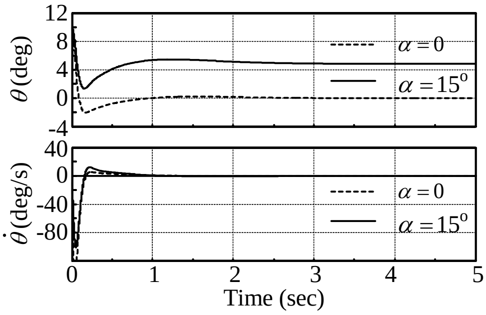

Fig. 3 Time responses of travel displacement and velocity for flat and inclined road.

5. 결론

본 연구에서 다양한 경사면에 대한 차륜형 역진자의 평형점이 유도되었다. 경사면에서 평형을 유지하는 차륜형 역진자의 기울기 각도와 구동토크는 더 이상 0 이 아닌 결과를 얻었다. 차륜형 역진자가 다양한 경사면을 주행할 때, 해당되는 평형점의 변화는 역으로 미지의 주행면의 경사각도를 판단하는 정보로 사용될 수 있다.

후기

이 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 지식경제 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kapitza, P. L., "Dynamical stability of a pendulum when its point of suspension vibrates and pendulum with a vibrating suspension," in Collected Papers of P. L. Kapitza, edited by D. Ter Haar (Pergamon Press, London, 1965), p.714.
2. Furuta, K., Kajiwara, H., Kosuge, K, "Digital control of a double inverted pendulum on an inclinded rail," International Journal of control, Vol. 32, No. 5, pp.907-925, 1980.
3. http://www.segway.com/aboutus/press_releases/pr_120301.html
4. http://www.toyota.co.jp/jp/news/08/Aug/nt08_0805.html