

경사면을 주행하는 차륜형 역진자를 위한 속도 추정기 기반 제어기 설계

A Controller Based on Velocity Estimator for a Wheeled Inverted Pendulum Running on the Inclined Road

이세한* · 이상용**

Se-Han Lee* and Sang-Yong Rhee**

* 경남대학교 기계자동화공학부

** 경남대학교 컴퓨터공학부

요 약

본 논문에서는 차륜형 역진자에 적용되는 속도 추정기 기반 제어기 설계와 다양한 수치 시뮬레이션이 수행되었다. 차륜형 역진자는 불안정한 평형점과 안정한 평형점을 동시에 갖는다. 불안정한 평형점에 대하여 평형을 유지하기 위하여 차륜형 역진자는 지속적으로 제어되어야 한다. 제어기의 입력으로 차륜형 역진자 몸체의 각도, 각속도, 변위 속도 등이 필요하다. 필요한 속도는 모터에 부착된 엔코더 신호를 차분하여 얻어지며, 엔코더의 해상도에 민감하게 의존한다. 저해상도 엔코더와 속도 추정기에 기반하여 개선된 속도 검출법이 제안되고 경사면에서 유효함을 보이기 위해서 다양한 수치 시뮬레이션이 수행되었다.

키워드 : 차륜형 역진자, 속도 추정기, 경사면

Abstract

In this research a controller based on velocity estimator for a Wheeled Inverted Pendulum (WIP) is designed and various numerical simulation studies are carried out. The WIP has stable and unstable equivalent points. To Keep the unstable equilibrium point, a controller should control carefully the wheels persistently. There are angle, angular velocity, displacement, and velocity of the WIP for controller inputs. The velocity is obtained by differentiating the encoder signals from the motor and is subject to the resolution of the encoder. An improved velocity detection method is proposed based on low resolution encoder and velocity estimator. Various numerical simulations are carried out for showing the validation of the velocity estimator in case of the inclined road condition.

Key Words : Wheeled inverted pendulum, Velocity estimator, Inclined road

1. 서 론

본 연구는 진행 방향에 대하여 횡방향으로 회전축을 갖는 2개의 차륜으로 구동 되는 차륜형(Wheeled) 역진자(Inverted Pendulum)의 제어 문제를 다루고 있다. 차륜형 역진자 문제는 구동차륜에 대하여 적절한 제어를 수행하여 몸체의 자세를 근본적으로 불안한 상위 수직방향 평형점으로 안정화 시키면서 소정의 위치로 그 몸체를 이동 시키는 것이다.

학술연구에 주로 사용되는 전형적인 역진자 시스템은 1965년경에 Kapitza[1]에 의해 처음으로 제작되었다. 역진자는 다양한 형태로 존재하지만 진자는 불안정한 수직방향 평형상태에서 벗어날수록 비선형성이 급속히 증가되는 공통적인 특성을 갖는다. 이러한 비선형성 특징 때문에 제어

기 성능의 유효성을 입증하는 다양한 연구[2,3]의 제어대상으로 널리 사용되어 왔다.

역진자의 대표적인 응용 분야로써 중력의 반대 방향으로 진행되는 로켓의 자세 안정화 제어를 들 수 있으며, 민수용으로는 2001년에 상업용으로 개발되어 판매되고 있는 개인용 이동 수단인 SEGWAY[4]를 들 수 있다. 최근에는 역진자 관련제품인 Toyota Wingleet[5]과 Honda UX-3[6] 등의 발표도 보고되고 있다. 민수용으로 개발된 개인용 이동수단인 SEGWAY는 전형적인 차륜형 역진자 시스템의 형태를 갖고 있는데, 차륜형 역진자 시스템이 개인용 이동수단의 플랫폼으로 채용된 이유도 그 시스템이 점유하는 공간이 협소하고 유사 전방향 진행이 가능한 점을 들 수 있다. 차륜형 역진자를 개인용 이동수단뿐만 아니라 이동로봇의 플랫폼으로 사용하려는 다양한 연구들이 진행되고 있다.[7,8,9]

차륜형 역진자 시스템이 전방향 진행이 가능한 이동로봇의 플랫폼으로 사용되기 위해서는 평지뿐만 아니라 경사진 지형에 대해서도 안정된 주행 성능을 가질 필요가 있다.

본 연구에서는 경사면을 고려한 차륜형 역진자의 동역학 방정식을 Newton-Euler법으로 유도하고 경사진 주행면에

접수일자 : 2011년 2월 15일

완료일자 : 2011년 6월 5일

** 교신저자

본 연구는 2010년 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어 졌음.

따른 역진자 시스템 제어에 필요한 속도 추정기의 필요성을 논의한다. 주행면의 경사에 따라서 변하는 평형점의 변화 및 제어입력의 변화에 적극적으로 대처할 수 있는 외란을 고려한 속도 추정기를 설계한다. 본 연구에서는 제한된 제어기의 유효성을 수치 시뮬레이션을 통하여 제시하도록 한다. 본 연구는 2장에 차륜형 역진자 시스템의 모델링과 차륜 구동을 통한 평형 유지 원리를 소개하고 3장에 경사면을 고려한 차륜형 역진자 시스템의 동역학 방정식을 유도하고 경사면과 평지면 사이의 평형점 차이점을 언급한다. 4장에서는 경사면 보상이 가능한 속도 추정기가 외란검출 기반으로 설계되며, 5장에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 그 속도 추정기의 유효성을 보인다. 마지막으로 6장에서 본 연구의 결론이 제시된다.

2. 차륜형 역진자 시스템

그림1은 본 연구의 제어대상인 차륜형 역진자 시스템의 개략적인 외형을 나타내고 있다. 중력에 대하여 역방향으로 배치된 몸체(Chassis)가 진자 역할을 하며, 몸체 좌우의 차륜은 몸체가 평형을 유지하면서 주어진 위치로 이동할 수 있도록 제어된다.

차륜형 역진자의 몸체는 특성상 불안정한 평형상태에 있으며 제어기가 적절히 동작하지 않는다면 작은 외란에 의해서도 넘어지게 된다. 이 때, 제어기는 차륜형 역진자를 몸체가 넘어지려는 방향으로 차륜을 구동하여 몸체가 넘어지려는 반대 방향으로 관성력을 발생시켜서 몸체의 평형을 유지하도록 한다. 차륜형 역진자의 동적 모델링을 위해서 그림 2에 그 모델이 표시되어 있다.

몸체의 동역학적 파라미터인 집중질량과 회전관성은 M_b 와 J_b 로 각각 표시되며, 그 질량중심은 구동차륜의 회전축에서 거리 l 만큼 떨어져 있다. 그림 2에서 차륜형역진자 몸체 기울기 각도는 12시 방향을 원점으로, 시계방향 회전을 $+\theta$ 로 정의된다. 주의할 점은 본 연구에서는 방정식을 전개할 때, 방향에 민감한 벡터를 사용하지 않고 평면에 편리한 스칼라를 사용하고 필요한 방향은 임의로 정의하도록 한다.

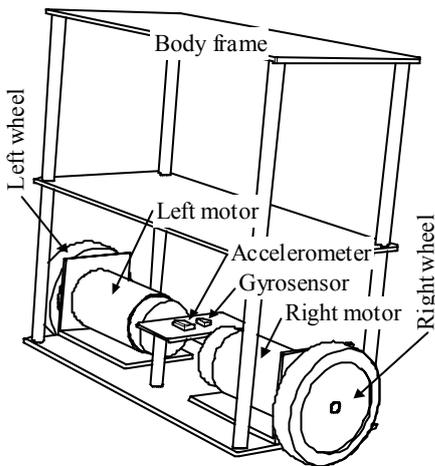


그림 1. 차륜형 역진자
Fig. 1. A Wheeled Inverted Pendulum

차륜형 역진자가 평형을 유지하는 원리는 손바닥 위에

올려 놓은 막대기의 평형을 유지하는 것과 유사하다. 실험자는 경험상 막대기가 넘어지려는 방향으로 손바닥을 신속하게 움직여서 막대기의 평형을 유지할 수 있다. 동일하게 차륜형 역진자는 몸체의 질량중심이 넘어지려는 방향으로 적절히 몸체를 진행시켜서 몸체의 평형을 유지하도록 한다. 예를 들면, 몸체가 넘어지려는 각도가 $\theta > 0$ 이라면 차륜은 시계방향으로 회전하여 차륜의 중심은 $+x$ 방향으로 이동될 필요가 있으며, 반대로 그 각도가 $\theta < 0$ 라면 차륜은 반대로 회전될 필요가 있다. 뿐만 아니라 적극적인 몸체 안정화를 위해서 정밀한 몸체의 속도 \dot{x} 까지 고려되어야 한다.

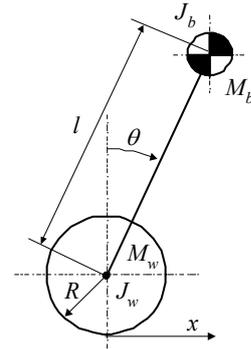


그림 2. 시스템 모델링
Fig. 2. System modeling.

3. 동역학 방정식

동역학 방정식을 유도하기 위해서 필요한 차륜형 역진자의 자유물체도는 차륜(wheel)과 몸체(chassis) 부분으로 분리되어 작성될 수 있으며, 차륜과 몸체를 연결하는 변수들은 반력으로 처리된다. 방정식 유도에 사용된 변수 종류는 Grasser[10]를 참고하여 선정되었으며, 방정식 유도는 이 [11]의 결과에 기반하고 있다. 방정식 유도에 사용된 자유물체도는 그림 3에 표시되어 있다.

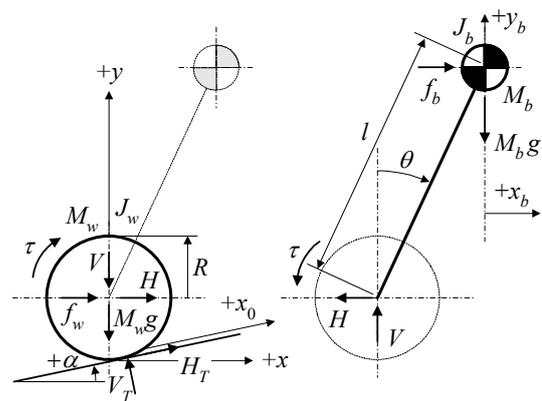


그림 3. 차륜형 역진자의 자유물체도
Fig. 3. Free body diagram of the Wheeled Inverted Pendulum

차륜에 작용하는 변수들로 외력은 f_w , 몸체로부터 작용하는 수평 및 수직반력은 각각 H , V , 차륜에 작용하는 중

력은 $M_w g$, 경사면으로부터 작용하는 수평 및 수직반력은 H_T, V_T , 그리고 모터의 구동토크는 τ 로 표시된다. 한 편, 물체에 작용하는 변수들로 물체에 작용하는 중력은 $M_b g$, 차륜으로부터 작용하는 반력은 H, V , 그리고 모터의 반력토크는 τ 로 표시된다.

3.1 바퀴 동역학

차륜형 역진자는 구동모터를 사이에 두고차륜과 몸체로 분리되어 고찰될 수 있다. 구동모터를 기준으로 상호 작용하는 반력들은 설정되고 다음 Newton-Euler방정식은 각각에 대하여 그 반력들을 기반으로 구성될 필요가 있다.

경사각 α 인 지면과 평행한 x_0 방향에 대한 차륜의 힘-모멘트 방정식은 다음과 같다.

$$M_w \ddot{x}_0 = (H + f_w) \cos \alpha - (V + M_w g) \sin \alpha + H_T \quad (1)$$

$$J_w \ddot{\phi} = -RH_T + \tau \quad (2)$$

이 때, 모멘트 방정식 (2)는 차륜의 회전중심에 대하여 기술되었다. 만일, 차륜이 지면에 대하여 미끄러짐 없이 회전하여 진행 한다면 차륜의 각속도 $\dot{\phi}$ 와 진행속도 \dot{x}_0 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$R\dot{\phi} = \dot{x}_0 \rightarrow \ddot{\phi} = \ddot{x}_0 / R \quad (3)$$

식 (3)을 (2)에 대입하면 지면 수평반력 H_T 는 구동토크 τ 와 몸체의 진행속도 \ddot{x}_0 로 다음과 같이 정리된다.

$$H_T = \frac{1}{R} \tau - \frac{J_w}{R^2} \ddot{x}_0 \quad (4)$$

얻어진 지면의 수평반력 H_T 를 (1)에 대입하여 경사면 진행속도 \ddot{x}_0 는 구동토크 τ 로 다음과 같이 표현된다.

$$(M_w + J_w / R^2) \ddot{x}_0 = (H + f_w) \cos \alpha - (V + M_w g) \sin \alpha + \frac{1}{R} \tau \quad (5)$$

3.2 몸체 동역학

몸체의 질량중심 수평가속도 \ddot{x}_b 에 대한 몸체의 힘 방 방정식은 다음과 같이 구성된다

$$M_b \ddot{x}_b = f_b - H \quad (6)$$

한 편, 몸체의 질량중심 수평가속도 \ddot{x}_b 와 차륜 회전중심의 수평가속도 \ddot{x} 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\ddot{x}_b = \ddot{x} + l\ddot{\theta} \cos \theta - l\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (7)$$

수평가속도 \ddot{x} 와 경사면에 대한 진행속도 \ddot{x}_0 사이에는 $\ddot{x} = \ddot{x}_0 \cos \alpha$ 관계가 있으므로 이 관계와 (6)을 이용하면 수평반력은 다음과 같이 구해진다.

$$H = f_b - M_b \ddot{x}_0 \cos \alpha - M_b l \ddot{\theta} \cos \theta + M_b l \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (8)$$

몸체의 질량중심 수직가속도 \ddot{y}_b 에 대한 힘 방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$M_b \ddot{y}_b = V - M_b g \quad (9)$$

몸체의 수직가속도와 경사면 진행가속도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\ddot{y}_b = \ddot{x}_0 \sin \alpha - l(\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \cos \theta) \quad (10)$$

식(10)을 (9)에 대입하여 수직반력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$V = M_b \ddot{x}_0 \sin \alpha - M_b l \ddot{\theta} \sin \theta - M_b l \dot{\theta}^2 \cos \theta + M_b g \quad (11)$$

구해진 수평 및 수직반력을 식(5)에 대입하면 최종적으로 경사면 진행가속도 \ddot{x}_0 와 구동토크 τ 에 관한 방정식은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$(M_b + M_w + J_w / R^2) \ddot{x}_0 + M_b l \cos(\theta + \alpha) \ddot{\theta} - M_b l \sin(\theta + \alpha) \dot{\theta}^2 + (M_b + M_w) g \sin \alpha = (f_b + f_w) \cos \alpha + \frac{1}{R} \tau \quad (12)$$

한 편, 몸체의 질량중심에 대한 모멘트 방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$J_b \ddot{\theta} = Vl \sin \theta + Hl \cos \theta - \tau \quad (13)$$

앞에서 얻어진 수평, 수직반력을 (13)에 대입하면 (13)은 다음과 같이 정리된다.

$$M_b l \cos(\theta + \alpha) \ddot{x}_0 + (J_b + M_b l^2) \ddot{\theta} - M_b g l \sin \theta = f_b l \cos \theta - \tau \quad (14)$$

식(12)와 (14)는 일반 수레형 역진자의 경우와는 다르게 구동토크가 차륜 동역학과 몸체 동역학 모두에 포함되는 있는 특징이 있다.

3.3 차륜형 역진자 시스템의 평형점

역진자의 제어 목적은 몸체가 평형을 유지 하면서 주어진 위치로 이동하는 것이다. 물체에 작용하는 힘은 차륜 구동에 의한 관성력, 구동장치의 반력토크와 물체에 작용하는 중력을 들 수 있다. 역진자가 정적인 평형을 유지하게 되면 물체에 작용하는 관성력은 사라질 것이며($\ddot{x}_0 = 0$), 오직 반력토크와 중력만이 물체에 작용하게 되고 몸체의 각속도와 각가속도는 0이 될 것이다 ($\dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$). 이 조건을 식(12)와 (14)에 적용하면 평형 상태에 대한 정역학 방정식은 다음과 같다.

$$(M_b + M_w) g \sin \alpha = (f_b + f_w) \cos \alpha + \frac{1}{R} \tau \quad (15)$$

$$-M_b g l \sin \theta = f_b l \cos \theta - \tau \quad (16)$$

역진자의 평형 상태는 다음과 같이 해석될 수 있다. 만일 외란이 없다면($f_b = f_w = 0$) 식(15)에 의하여 경사면의 기울기($\alpha \neq 0$)를 극복하기 위한 구동토크 τ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\tau = (M_b + M_w) g R \sin \alpha \quad (17)$$

즉, 경사면 기울기가 존재할 때에는 평형을 유지하기 위해서 0이 아닌 구동토크가 필요하게 되며, 경사면 기울기는 차륜형 역진자를 교란시키는 외란의 일종으로 간주될 수 있다.

4. 차륜형 역진자 구성

선천적으로 불안정한 평형점을 갖는 차륜형 역진자 시스템을 평형 상태로 유지하면서 구동하기 위해서는 적극적인 제어 동작이 요구된다. 제어를 구성하기 위해서는 구체적인 제어 목표가 필요하게 된다. 평형 유지를 위한 목표는 앞에서 제시한 $\dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$ 조건을 이용하여 제시될 수 있다. 실제, 물리적으로 $\dot{\theta} = 0 \rightarrow \ddot{\theta} = 0$ 이므로 $\ddot{\theta} = 0$ 을 목표값으로 설정한다.

4.1 시스템 선형화 및 가제어성

차륜형 역진자 시스템 시뮬레이션에 필요한 변수값을 다음의 Table 1[11]에 나타내었다.

표 1. 차륜형 역진자 파라미터
Table 1. Wheeled Inverted Pendulum parameters

변수	값	내용
M_w	0.052kg	바퀴 질량
M_b	1.0kg	몸체 질량
J_w	$1.8 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	바퀴 회전관성
J_b	$4.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	몸체 회전관성
R	0.026m	바퀴 반지름
l	0.085m	바퀴중심과 몸체중심까지 거리

식(12)와 (14)는 몸체의 기울기 각도 경사면 각도에 대한 비선형 성분을 갖고 있다. 실제로 몸체의 기울기 θ 는 근소한 범위를 가지므로 $\theta \ll 1$ 로 가정하면 $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$ 로 근사화 시킬 수 있으며, 몸체가 평형점 부근에서 평형을 유지하고 있을 때, 몸체는 매우 느리게 요동(회전)하므로 $\dot{\theta}^2 \approx 0$ 로 근사화 시킬 수 있다. 이 때, 경사면 각도 α 에 의해 발생하는 영향은 외란으로 간주된다. 이런 근사화 과정을 통하여 식(12)와 (14)는 상태변수 $X = \{ x_0 \dot{x}_0 \theta \dot{\theta} \}^T$ 로 정의했을 때 대표적인 $\alpha = 0$ 에서 다음의 선형 상태방정식으로 근사화 된다.

$$\dot{X} = AX + Bu \tag{18}$$

이[11]의 결과를 이용하여 구성된 본 연구의 차륜형 역진자의 가제어성 행렬은 완전계수를 가지므로 역진자는 제어 가능하다.

주어진 제어대상의 상태변수를 0으로 수렴시키는 제어기는 레귤레이터라고 하며, 레귤레이터의 대표적인 형태로 다음과 같은 상태피드백 제어를 들 수 있다.

$$X = [0.447 \ 0.393 \ 1.32 \ 0.106][x_0 \ \dot{x}_0 \ \theta \ \dot{\theta}]^T \tag{19}$$

상태피드백 제어를 구성하기 위해서 차륜형 역진자의 상태변수를 파악할 필요가 있는데, 몸체의 각도, 각속도는 자이로와 가속도 센서를 통해서 직접 혹은 신호처리 과정을 통해서 얻어지며, 변위와 속도 역시 모터에 부착된 엔코더를 통해서 직접 혹은 신호처리 과정을 통해서 얻어진다.

4.2 엔코더를 이용한 속도검출 특성

차륜형 역진자 속도는 차륜에 연결된 구동모터의 회전각

속도에 비례하므로 그 모터에 부착된 엔코더를 이용하여 속도는 구해질 수 있다. 엔코더를 이용하여 각속도를 구하는 방법으로 일정한 시간 동안에 입력된 엔코더 펄스를 계수하는 M법과 펄스의 간격을 측정하는 T법이 있는데, 본 연구에서는 M법을 고려하도록 한다.

모터가 저속으로 회전하고 있을 때, 출력되는 엔코더 펄스의 빈도가 낮아서 주어진 검출주기 동안에 펄스가 엔코더로부터 출력되지 않는 경우가 발생한다. 실제로 모터가 저속으로 회전함에도 불구하고 속도는 0으로 검출되는 단점이 있다. 그림4에 의하면 샘플링 주기 ΔT 가 증가함에 따라서 검출가능 단위속도 Δv 가 감소하여 검출정밀도가 향상되는 반면에 0 속도 구간이 약 0.1초 동안으로 지속되는 문제가 발생한다. 뿐만 아니라 ΔT 증가는 제어성능 감소를 초래하게 된다.

속도검출 문제를 회피한 연구로 Kumagai[12]는 스텝모터를 이용하여 회전속도를 개루프 제어하고 그 속도를 상태피드백 제어기에 이용하고 있다. 스텝모터의 개루프 제어는 뜻하지 않은 외란이 발생될 때, 그 속도제어 결과가 보장되지 못하는 단점이 있으므로 제어성능에 문제가 발생할 우려가 있다.

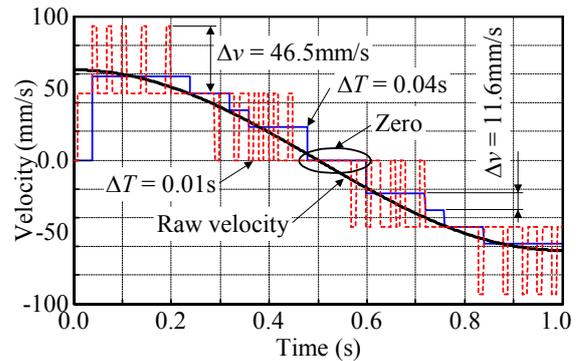


그림 4. 샘플링 주기 ΔT 에 대한 엔코더 기반 검출속도의 분포.

Fig. 4. Detected velocity profiles based on the encoder according to sampling period ΔT .

4.3 단순 속도 추정기

속도검출 성능을 개선하기 위해서 모터에 입력되는 신호와 모터에서 출력되는 엔코더 신호를 이용한 Hori[13]가 제안한 속도 추정기가 구성될 수 있다. 속도 추정기 구성을 위해서는 차륜형 역진자의 속도모델이 필요한데, 이 속도모델 구축에 필요한 동역학 방정식은 상태변수 벡터 $X = [x_0 \ \theta]^T$ 로 설정하면 다음과 같이 정리된다.

$$M\ddot{X} + h(X, \dot{X}) = \tau \tag{20}$$

이 때, 식 (20)의 벡터에서 1번째 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$M_{11}\ddot{X} + M_{12}\ddot{\theta} + h_1(X, \dot{X}) = \tau_1 \tag{21}$$

차륜형 역진자는 급격한 과도상태를 제외하고 근사평형을 유지하는 영역에 대해서 $\dot{\theta} \ll 1$, $\ddot{\theta} \ll 1$ 로 가정할 수 있으며, 그 결과로 식(21)에서 구체적으로 각속도 $\dot{\theta}$ 항에 대하여 $M_b l \cos(\theta + \alpha) \ddot{\theta} \ll 1$ 로, 각속도 $\dot{\theta}^2$ 항에 대하여

$-M_b l \sin(\theta + \alpha) \theta^2 \ll 1$ 로 가정될 수 있다. 이 결과를 이용하면 식(12)는 근사평형을 유지하고 있을 때, 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$(M_b + M_w + J_w/R^2)\ddot{x}_0 \cong \frac{1}{R}\tau \quad (22)$$

즉, 차륜형 역진자의 진행속도 $v_0 = \dot{x}_0$ 는 다음과 같이 구동토크의 적분관계로 주어진다.

$$(M_b + M_w + J_w/R^2)\dot{v}_0 \cong \frac{1}{R}\tau \quad (23)$$

엔코더 신호를 차분하여 얻어지는 속도를 이용하지 않고 필요한 속도 v_0 를 이 관계식을 이용하여 다음과 같이 근사적으로 계산하도록 한다.

$$v_0(k+1) = v_0(k) + \frac{\tau}{(M_b + M_w + J_w/R^2)R} \Delta T \quad (24)$$

$$x_0(k+1) = x_0(k) + v_0(k) \Delta T \quad (25)$$

이 때, ΔT 는 계산주기를 나타낸다.

식 (24)의 특성상 구동토크 τ 에 직류성분이 존재하면 속도가 발산할 우려가 있으므로 v_0 를 수치 적분한 x_0 를 실제 엔코더에서 출력된 실제 \bar{x}_0 와 비교하고 v_0 를 보정하여 다음과 같이 보정된 \bar{v}_0 를 구하도록 한다.

$$\bar{v}_0(k) = v_0(k) + k_1[x_0(k) - \bar{x}_0(k)] \quad (26)$$

4.4 외란을 고려한 속도 추정기

차륜형 역진자가 경사면을 주행할 때, 구동토크는 더 이상 0 이 아닐 뿐만 아니라 뿐만 아니라 앞에서 가정한 $\dot{\theta} \ll 1$, $\ddot{\theta} \ll 1$ 로 인한 오차가 외란으로 작용할 수 있으므로 식 (26)과 같은 단순 속도 추정기의 추정성능이 떨어질 우려가 있다. 그러므로 외란 추정기를 추가하고 (24)는 그 외란 T_L 을 고려하여 다음과 같이 수정될 필요가 있다.

$$v_0(k+1) = v_0(k) + \frac{\Delta T}{M_{11}R}[\tau(k) - T_L(k)] \quad (27)$$

그 외란 T_L 의 영향으로도 $\Delta x_0(k) = x_0(k) - \bar{x}_0(k)$ 가 발생하므로 T_L 은 역시 $\Delta x_0(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 보정될 필요가 있다.

$$T_L(k+1) = T_L(k) + k_2[x_0(k) - \bar{x}_0(k)] \quad (28)$$

속도 추정기에 필요한 k_1 과 k_2 는 앞에서 근사화를 위해서 $\dot{\theta} \ll 1$, $\ddot{\theta} \ll 1$ 을 가정하였기 때문에 해석적으로 결정되기 곤란하며 시행착오법을 통해서 적절히 선택될 수 있다. 구체적으로 엔코더를 이용한 속도검출은 엔코더의 정밀도와 감속기의 감속비 정보가 필요하므로 Table2에 해당정보가 표시되어 있다.

표 2. 모터 엔코더 정밀도와 기어 감속비
Table 2. Motor encoder and reduction gear ratio

변수	값	내용
N	1:27	기어 감속비
E	13 pulse/rev.	엔코더 정밀도

표 2의 기어 감속비 N 과 엔코더 정밀도 E 그리고 표 1의 차륜 반지름 R 을 이용하여 x_0 의 최소 검출단위 ΔE 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta E = \frac{2\pi R}{NE} = \frac{2\pi \times 0.026}{27 \times 13} = 4.7 \times 10^{-4} (m) \quad (29)$$

엔코더를 이용한 속도 v_E 는 M법을 이용하여 다음과 같이 단순 차분법으로 계산된다.

$$v_E(k) = \frac{x_E(k) - x_E(k-1)}{\Delta T} \quad (30)$$

속도 v_E 는 또한 다음과 같은 최소단위를 갖는다.

$$\Delta v_E = \frac{\Delta E}{\Delta T} \quad (31)$$

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서 제안된 속도 추정기 기반 제어기의 유효성을 확인하기 위해서 다양한 조건에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

엔코더를 이용하여 속도를 계산할 때, 계산 정밀도를 향상시키기 위해서 M법 특징에 의거하여 식(31)에서 제어주기 ΔT 를 증가시키는 것을 들 수 있다. 제어주기를 증가시키는 것은 제어시스템의 감쇠계수 감소를 초래하여 출력의 오버슈트(overshoot) 증가[14] 등을 유발하게 된다. 제어기의 계산 비용 조건, M법에 의한 ΔT 의 증가 등이 불가피한 경우 ΔT 의 증가에 대한 제어성능은 중요한 변수가 되게 된다.

5.1 제어주기와 제어성능

다음의 그림 5는 $\Delta T = 10ms$ 경우에 대하여 추정속도의 속도와 단순 차분법 속도를 이용한 제어 결과를 나타내고 있다. 제어성능을 확인하기 위하여 제어개시 3초 경과 후 경사면을 변화시키는 외란을 인가하고 있다.

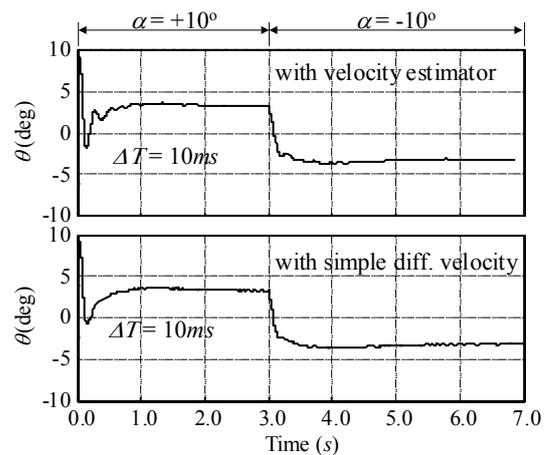


그림 5. 샘플링 주기 10ms 에 대한 추정기 속도와 단순 차분법 속도의 틸팅각도 θ 의 시간응답.

Fig. 5. Time response of the tilting angle θ for both velocity estimator and simple diff. velocity case at sampling period of 10ms.

그림5에 의하면 속도 추정기와 단순 차분법에 의한 속도 경우 모두 틸팅각도는 안정된 제어성을 나타내고 있다.

계속해서 ΔT 에 대한 속도 추정기의 유효성을 확인하기 위해서 $\Delta T=40ms$ 로 증가시킨 후, 속도 추정기와 단순 차분법 속도 경우에 대하여 동일한 제어기 이득을 적용하여 수치 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

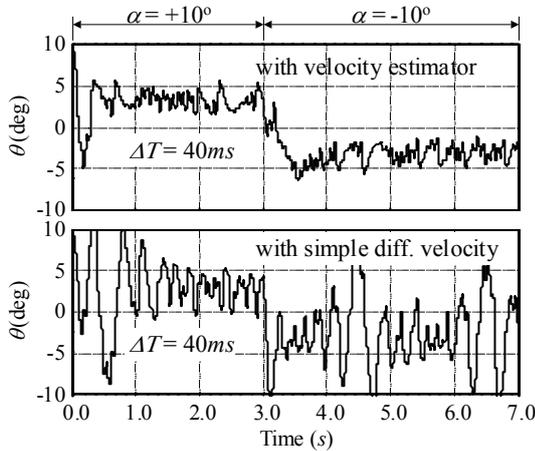


그림 6. 샘플링 주기 40ms 에 대한 추정기 속도와 단순 차분법 속도의 틸팅각도 θ 의 시간응답.

Fig. 6. Time response of the tilting angle θ for both velocity estimator and simple diff. velocity case at sampling period of 40ms.

그림 6에 의하면 제어주기가 4배로 증가한 상태에서 속도 추정기를 적용한 경우는 정상상태의 틸팅각도 오차가 다소 발생하고 있지만 틸팅각도는 여전히 안정되게 제어되고 있음을 알 수 있다. 반면에 단순 차분법 속도를 적용한 경우는 매우 큰 정상상태 각도오차가 발생되고 있으며, 매우 불안정한 제어성을 나타내고 있다.

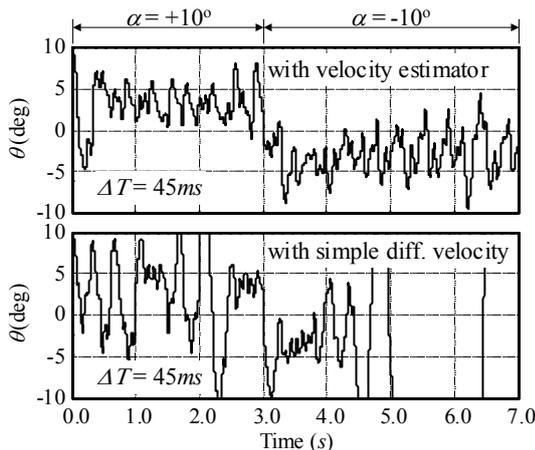


그림 7. 샘플링 주기 45ms 에 대한 추정기 속도와 단순 차분법 속도의 틸팅각도 θ 의 시간응답.

Fig. 7. Time response of the tilting angle θ for both velocity estimator and simple diff. velocity case at sampling period of 45ms.

극단적인 ΔT 증가에 대한 속도 추정기의 유효성을 확인

하기 위해서 $\Delta T=45ms$ 로 증가시킨 후, 속도 추정기와 단순 차분법 속도 경우에 대하여 동일한 제어기 이득을 적용하여 수치 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에 의하면 제어주기가 4.5배로 증가한 상태에서 속도 추정기를 적용한 경우는 정상상태 각도오차가 다소 증가하고 있지만 여전히 안정되게 제어되고 있음을 알 수 있다. 반면에 단순 차분법 속도를 적용한 경우는 틸팅각도는 매우 불안정한 상태에서 발산하고 있으며, 이 결과는 $\Delta T=45ms$ 에서 제어기 구성이 불가능함을 나타내고 있다.

5.2 추정기와 단순 차분법의 속도오차

앞에서 제시된 제어성능 차이를 규명하기 하기 위해서 속도 추정기와 단순 차분법에 의해서 구해진 속도의 오차를 분석해 보도록 한다. 다음의 그림 8은 제어주기에 따른 속도오차를 제어방법에 대하여 나타내고 있으며, 각 속도오차 E_{est} , E_{enc} 는 다음과 같이 정의되었다.

$$E_{est} = \frac{\sqrt{\sum (v_{est} - v)^2}}{N_{sample}}, E_{enc} = \frac{\sqrt{\sum (v_{enc} - v)^2}}{N_{sample}} \quad (32)$$

이 때, N_{sample} 는 샘플링 회수, v_{est} 는 추정기 속도, v_{enc} 는 단순 차분법 속도, v 는 실제 속도를 나타낸다.

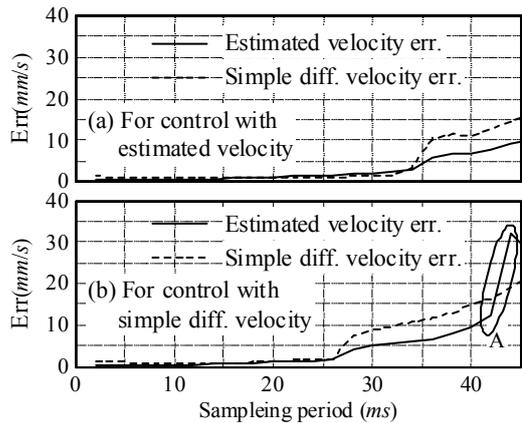


그림 8. 제어방법에 따른 추정기 속도와 단순 차분법 속도 오차의 분포.

Fig. 8. Estimated velocity and simple diff. velocity error profile for the both control schemes.

그림 8에 의하면 샘플링 주기가 짧은 영역에서는 추정기 속도와 단순 차분법 속도의 오차는 거의 유사한 반면에 샘플링 주기가 증가함에 따라서 단순 차분법 속도의 오차가 증가함을 알 수 있다. 이것은 단순 차분법 속도는 해당 주기 동안의 평균속도이므로 비교순간의 실제속도와의 차이가 증가되는 것으로 추정된다. 이러한 속도오차는 제어성능에 악영향을 미치게 된다.

그림 8의 하단(b) 경우, 타원으로 표시된 A영역에서 추정기 속도오차가 급증하는 현상이 발생하고 있다. 이것은 단순 차분법 속도를 이용하여 제어할 때, A영역 부근에서 그림 7의 하단과 같이 제어결과가 비정상적으로 발산하여 추정기 성능이 훼손되었기 때문으로 추정된다.

6. 결 론

본 연구에서는 경사면을 주행하는 차륜형 역진자의 제어기에 적용될 수 있는 속도 추정기를 구성하고 그 유효성을 다양한 시뮬레이션을 통해서 제시하였다.

속도 추정기는 단순 추정기와 외란을 고려한 추정기 2종류로 구성될 수 있는데, 차륜형 역진자가 경사면을 주행할 경우 경사면이 외란으로 작용할 우려가 있으므로 외란을 고려한 속도 추정기를 적용하였다.

엔코더 신호를 차분하여 얻어진 속도는 고주파 성분이 많고 정밀도가 낮은 반면에 속도 추정기에 기반한 속도는 고주파 발생이 억제되고 정밀도가 개선되는 효과가 있으므로, 속도 추정기에 기반한 차륜형 역진자의 제어응답 출력은 엔코더만을 이용한 제어기 경우보다 진동 발생폭이 억제되어 구동모터의 소음발생 개선이 기대된다.

속도 추정기를 이용할 경우 제어주기가 어느 정도 증가하더라도 제어성능이 유지되므로 저렴한 제어기를 이용하여 제어 시스템을 구성할 수 있는 여건이 발생하여 전체적인 비용감소가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] P. L. Kapitza, in *Collected Papers of P. L. Kapitza*, edited by D. Ter Haar (Pergamon, London, 1965), p.174.
- [2] 정승현, 최정내, 오성권, "회전형 역진자 시스템에 대한 계층적 공정경쟁 기반 유진자 알고리즘을 이용한 최적 Fuzzy 제어기 설계," *한국지능시스템학회 논문지*, 제18권, 2호, pp. 236-242, 2008.
- [3] 신호선, 추준옥, 이승하, 이연정, "3차원 도립진자 시스템의 구현 및 퍼지 제어," *퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, 제13권, 2호, pp. 137-147, 2003.
- [4] http://www.segway.com/aboutus/press_releases/pr_120301.html.
- [5] http://www.toyota.co.jp/jp/news/08/Aug/nt08_0805.html.
- [6] <http://world.honda.com/news/2009/c090924New-Personal-Mobility-Device/>
- [7] J. Searock, B. Browning, M. Veloso, "Turning Segways into Soccer Robots," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, pp.1029-1034, 2004.
- [8] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Dftler, I. Spain, N. Radford, "Mobile Manipulation using NASA's Rbonaut," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, US, pp.2104-2109, 2004.
- [9] 김현욱, 정슬, "무게 변화에 따른 차륜형 밸런싱 로봇이 제어기 설계 및 실험연구," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 4호, pp.469-475.

- [10] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, A. C. Rufer, "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, Feb. pp.107-114, 2002.
- [11] 이세한, 이상용, "경사면을 주행하는 차륜형 역진자를 위한 선형행렬부등식 기반 혼합 H_2/H_∞ 상태피드백 제어기 설계," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 5호, pp.617-623.
- [12] K. Masaaki, "Development of a Ball Drive Unit using Partially Sliding Rollers," *Proceedings of IROS 2010*, Taipei, Taiwan, pp.3353-3357.
- [13] Y. Hori, K. Ohnishi, *Applied Control Engineering*, 1998, Japanese.
- [14] G. F. Franklin, J. D. Powell, M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, 1998.

저 자 소 개



이세한(Se-Han Lee)

1989년 : 고려대 기계공학과 졸업

1991년 : 고려대 대학원 기계공학 (공학석사)

2002년 : 고려대 대학원 기계공학 (공학박사)

2004년 ~ 현재 : 경남대학교 기계자동차공학부

관심분야 : 강인제어, 자동화 로봇, 메카트로닉스

Phone : 055-249-2149

Fax : 0505-999-2160

E-mail : leesehan@kyungnam.ac.kr



이상용(Sang-Yong Rhee)

1982년 : 고려대 산업공학과 졸업

1984년 : 고려대 대학원 산업공학 (공학석사)

1992년 : 포항공대 대학원 산업공학 (공학박사)

1992년 ~ 현재 : 경남대학교 컴퓨터공학부 교수

관심분야 : 컴퓨터 비전, 뉴로-퍼지, 지능로봇, 생체인식

Phone : 055-249-2706

E-mail : syrhee@kyungnam.ac.kr