

원점 복귀 가능한 차륜형 역진자 제어를 위한 확장 상태피드백 제어기 설계

Design of an Augmented State Feedback Controller for a Wheeled Inverted Pendulum Returning to the Origin

이 세 한¹

Lee Se-Han¹

Abstract An augmented state feedback controller for a Wheeled Inverted Pendulum (WIP) is proposed in this research. The augmented state feedback controller is able to keep the WIP returning to the origin. Generally, the WIP has both stable and unstable equilibrium points. To keep the WIP over the unstable equilibrium point, the WIP consistently is being controlled. A simple state feedback controller is letting the WIP out of the origin when the center of gravity of the WIP locates out of the schematic center line. In some case of applications, it may not be desirable that the WIP is drifting out of the initial location. The proposed augmented state feedback controller is able to keep the WIP at the initial location whether its center of gravity lies out of the center line or not. Numerical simulations are carried out to show the validation of the augmented sated feedback controller.

Keywords: Wheeled Inverted Pendulum, Center of gravity, Augmented state feedback control

1. 서론

제안된 제어이론의 유효성을 검증하기 위해서 주로 사용되는 역진자 시스템의 기원은 1965년경 Kapitza^[1]에 의해서 찾을 수 있다. 그 후, 다양한 형태를 갖는 역진자들이 소개되어 제어이론 검증에 사용되었다. 본 연구에서 사용된 차륜형 역진자는 그 다양한 역진자 중의 한 종류이며 역진자 시스템의 특유의 비선형 특성을 그대로 계승하고 있다.

차륜형 역진자의 제어목표는 몸체가 넘어지지 않도록 횡 방향으로 부착된 2개의 차륜을 제어하여 원하는 위치로 몸체를 주행시키는 것이다. 역진자 이론은 다양한 분야에 응용되어 왔다. 그 관련된 이론들은 중력의 반대방향으로 비행하는 항공용 로켓추진 몸체의 자세 안정화 제어에 응용되고 있으며, 민간 분야에서는 2001년 상업용으로 개발된 개인용 이동수단인 SEGWAY^[2], 2008년

사용자가 쉽게 조향할 수 있는 Toyota Winglet^[3], 그리고 최근에 Honda 의 1인용 UX-3^[4] 및 2인승 운송수단으로 등장한 PUMA^[5] 등에 응용되고 있다.

차륜형 역진자는 몸체의 직립제어를 필요로 하는 반면에 몸체의 점유면적을 최소화 시킬 수 있는 이점이 있어서 협소한 장소에서 쉽게 주행할 수 있다. 이러한 특징을 이용하기 위해서 차륜형 역진자를 다양한 분야의 이동체 플랫폼으로 사용하려는 연구^[6,7]들이 활발히 진행되고 있다.

역진자의 주행조건 변동에 관한 연구로 주행면의 경사 각도를 검출하는 연구^[8], 무게중심의 위치변동을 보상하는 연구^[9] 등을 들 수 있으며, 수레형 역진자의 경우 경사진 주행면을 고려한 연구^[10]가 있다. 차륜형 역진자 관련 연구들은 몸체의 자세를 안정화 시키려는 제어기법에 주로 초점을 맞추고 있다. 이것은 역진자 시스템의 자세유지가 선천적으로 불안하기 때문이다. 본 연구에서는 차륜형 역진자가 이동플랫폼으로 응용될 때, 필수적으로 요구되는 주행성능의 개선을 다루고 있다.

차륜형 역진자가 구현될 때, 그 무게중심은 현실적으로 정확하게 파악될 수 없으며, 그 위치가 파악되더라도

Received : Jul. 14. 2011; Reviewed : Oct. 04. 2011; Accepted : Nov. 09. 2011
 ※ 본 연구는 2010년 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어 졌음.
 1 경남대학교 기계자동화공학부

운용 도중에 배터리 설치 및 응용분야에서 요구하는 장비들이 장착되는 과정에서 그 무게중심은 변동되게 된다. 이렇게 무게중심이 변동될 때, 차륜형 역진자가 초기화되어 직립상태를 유지하는 과정에서 무게중심 변동에 의하여 몸체의 초기 변위가 원점에서 이탈되게 된다. 이것은 장비의 초기화 과정에서 예상하지 못한 문제점을 초래할 수 있다.

본 연구에서는 차륜형 역진자의 동역학적 거동을 파악하기 위해서 Lagrange 기법으로 운동방정식을 유도하며 무게중심 변동이 초기 변위의 원점 이탈에 미치는 관계를 해석하고 그 이탈을 보정하는 기법을 제시한다. 2장에는 차륜형 역진자의 구조, 운동방정식 및 평형점 유도, 3장에는 초기 변위의 원점 이탈을 억제할 수 있는 확장 상태피드백 제어기 설계, 4장에는 그 제어기의 유효성을 보이기 위한 수치 시뮬레이션 및 고찰, 마지막으로 5장에는 결론이 제시된다.

2. 차륜형 역진자 시스템

본 연구의 대상이 되는 차륜형 역진자의 개략적인 모습이 그림 1에 표시되어 있다. 일반적인 수레형 역진자와 달리 차륜형 역진자는 2개의 차륜이 몸체에 횡 방향으로 연결되어 있고 차륜을 제외한 몸체가 역진자 역할을 하는 특징을 갖고 있다.

차륜형 역진자는 종래의 일반적인 역진자 고유의 특성을 그대로 계승하고 있으므로 차륜형 역진자의 몸체는 불안정한 상태에 있게 된다. 차륜형 역진자는 평형제어가 적절히 실행되지 않으면 작은 외란에도 넘어지게 된다. 역진자 몸체의 평형유지를 위해서 제어기는 몸체가 넘어지

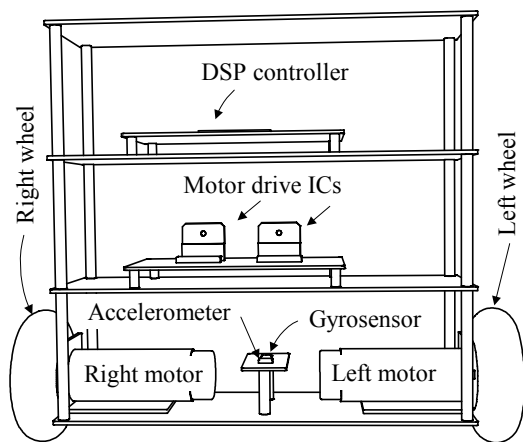


그림 1. 차륜형 역진자의 외관

려는 방향에 대하여 반대방향으로 관성력을 발생시킬 필요가 있다. 그 관성력을 발생시키기 위해서 제어기는 몸체가 넘어지려는 방향으로 몸체를 진행시킬 필요가 있다.

차륜형 역진자의 동역학적 모델링을 위해서 그림2에 개략적인 모델을 표시하였다. 역진자 몸체의 주요 동역학적 변수로 몸체의 집중질량 M_2 와 회전관성 J_2 를 들 수 있으며, 그 질량중심은 구동차륜의 회전중심으로부터 l 만큼 떨어져 있다. 한 편, 차륜에 대한 주요 동역학적 변수로 차륜의 집중질량 M_1 과 회전관성 J_1 을 들 수 있다. 이 때, 현실적인 차륜형 역진자의 측면 형태는 대칭이 아니므로 차체의 무게중심은 중심에 존재하지 않고 그림 2와 같이 미지의 무게중심 변동각 β 가 존재하게 된다.

차륜형 역진자가 평형을 유지하는 원리는 일상적인 주변에서 흔히 볼 수 있는 막대기를 손위에 올려놓고 평형을 유지하는 행동과 매우 유사하다.

차륜형 역진자 제어기를 설계하기 위해서 먼저, 차륜형 역진자의 운동방정식이 유도될 필요가 있다.

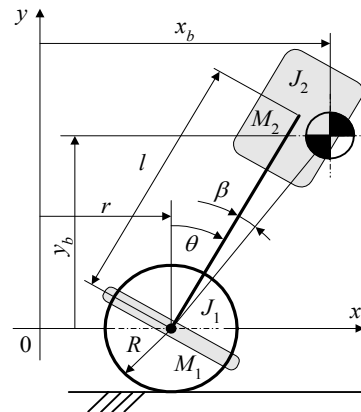


그림 2. 차륜형 역진자의 시스템 모델링

2.1 차륜형 역진자의 운동방정식

운동방정식을 유도하는데 Newton-Euler 와 Lagrange 기법이 주로 사용되는데, 본 연구의 주제는 차륜형 역진자의 평형제어기관련 연구이므로 번거로운 구속력 계산이 필요 없는 Lagrange 기법이 운동방정식 유도^[12]에 사용되었다.

차륜의 운동에너지 T_1 , 위치에너지 U_1 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_1 = \frac{1}{2} M_1 \dot{r}^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\phi}^2 = \frac{1}{2} \left(M_1 + \frac{J_1}{R^2} \right) \dot{r}^2 \quad (1)$$

$$U_1 = 0 \quad (2)$$

이 때, \dot{r} 와 $\dot{\theta}$ 는 각각 차륜 회전중심의 선속도와 각속도를 나타내고 차륜과 지면 사이에 미끄럼이 없다고 가정하면 다음과 같은 선속도와 각속도 관계가 있다.

$$\dot{\theta} = \dot{r} / R \quad (3)$$

계속해서 물체의 운동에너지 T_2 와 위치에너지 U_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{1}{2}M_2v_2^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}^2 = \frac{1}{2}M_2(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}^2 \\ &= \frac{1}{2}M_2\dot{r}^2 + M_2l\dot{r}\dot{\theta}\cos(\theta + \beta) + \frac{1}{2}(J_2 + M_2l^2)\dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$U_2 = M_2gl\cos(\theta + \beta) \quad (5)$$

이 때, v_2 는 물체 무게중심의 속도이고 물체 무게중심의 변위는 무게중심 변동각 β 를 고려하여 각각 다음과 같이 주어지고 g 는 중력가속도를 나타낸다.

$$x_b = r + l\sin(\theta + \beta) \quad (6)$$

$$y_b = l\cos(\theta + \beta) \quad (7)$$

각 부분에 해당하는 T_1 , T_2 , U_1 , U_2 을 이용하여 차륜형 역진자 시스템의 전체 라그랑지안 L 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} L &= T_1 + T_2 - U_1 - U_2 \\ &= \frac{1}{2}(M_1 + M_2 + J_1 / R^2)\dot{r}^2 + M_2l\dot{r}\dot{\theta}\cos(\theta + \beta) \\ &\quad + \frac{1}{2}(J_2 + M_2l^2)\dot{\theta}^2 - M_2gl\cos(\theta + \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

구해진 전체 라그랑지안 L 과 일반화 변수로 r 과 θ 를 그리고 일반화 힘으로 τ/R 와 $-\tau$ 를 선정하면 운동방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{r}}\right) - \frac{\partial L}{\partial r} &= (M_1 + M_2 + J_1 / R^2)\ddot{r} \\ + M_2l\cos(\theta + \beta)\ddot{\theta} - M_2l\dot{\theta}^2\sin(\theta + \beta) &= \frac{\tau}{R} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= M_2l\cos(\theta + \beta)\dot{r} \\ + (J_2 + M_2l^2)\ddot{\theta} - M_2gl\sin(\theta + \beta) &= -\tau \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 차륜형 역진자의 평형점

차륜형 역진자의 평형제어의 목적은 차체가 넘어지지 않도록 평형점에 대하여 차체를 안정되게 직립시키는 것이다. 이 목적을 달성하기 위해서는 동역학적인 평형상태의 정의가 필요하며 그에 해당되는 평형점이 파악되어야 한다.

차륜형 역진자가 구동될 때, 물체에 작용하는 힘들로 차륜구동에 의한 관성력, 일반적인 수레형 역진자와는 달리 구동장치의 반력토크, 물체에 작용하는 중력, 그리고 기타 외란 등을 들 수 있다. 문제를 간단히 하기 위해서 기타 외란은 고려되지 않는다.

차륜형 역진자의 물체가 넘어지지 않고 직립상태를 유지한다면 차륜에 의한 관성력은 제거되고 오직 구동장치의 구동토크와 중력만이 물체에 작동될 것이다. 평형상태에서는 물체가 주행하지도 넘어지지도 않으므로 $\dot{r} = \dot{\theta} = 0$ 상태가 될 것이다. 이 평형상태 조건을 앞에서 유도한 운동방정식 (9), (10)에 대입하면 다음과 같은 정역학 방정식이 얻어진다.

$$0 = \frac{\tau}{R} \quad (11)$$

$$M_2gl\sin(\theta + \beta) = -\tau \quad (12)$$

위 식을 고찰하면 정상상태의 평형상태 조건은 다음과 같이 얻어진다.

$$\tau_{ss} = 0 \quad (13)$$

$$\theta_{ss} = \sin^{-1}\left(\frac{\tau_{ss}}{M_2gl}\right) - \beta = -\beta \quad (14)$$

3. 확장 상태피드백 제어기

차륜형 역진자의 평형제어를 위해서 일반적인 상태피드백 제어기가 사용될 수 있다. 차륜형 역진자를 실제로 구현할 때, 구동장치의 상태와 물체 각도를 검출하기 위해서 광학식 엔코더와 자이로 센서가 사용되는데, 그 광

학식 엔코더와 자이로 센서를 이용해서 차륜형 역진자의 모든 상태변수 $r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}$ 가 쉽게 구해진다. 이러한 특징을 고려하면 상태피드백 제어기의 선택은 매우 자연스럽다.

필요한 상태피드백 제어기의 제어행렬을 구하는 강력한 방법으로 최적제어 기법인 LQ (Linear Quadratic) 레귤레이터가 있다. 이 LQ 레귤레이터는 선형시스템을 필요로 하므로 주어진 차륜형 역진자의 운동방정식 (9), (10) 은 평형점 부근에서 다음과 같이 선형화 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \tau \quad (15)$$

이 때, 차륜형 역진자가 평형점 부근에서 동작하고 있을 때, $\dot{\theta}^2 \approx 0$, $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$ $\cos\theta \approx 1$ 인 사실이 적극적으로 적용되었다. 실제로 $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ 범위에서 \sin 함수는 $\pm 5\%$ 오차를 갖고 있으며, $-18^\circ < \theta < 18^\circ$ 범위에서 \cos 함수는 $\pm 5\%$ 오차를 갖고 있다. 진자는 평형점으로 몸체의 기울기 각도는 $\theta_{ss} \neq 0$ 를 갖는 반면에 몸체의 기울기 각속도는 무게중심 변동과 관계없이 $\dot{\theta}_{ss} = 0$ 이므로 차륜형 역진자의 동작점으로 평형점을 선택하면 $\dot{\theta}^2 \approx 0$ 가정은 타당하다.

식 (15)와 같이 구성된 상태방정식은 가제어성을 갖고 있으므로 임의의 페루프 극점을 갖는 LQ 레귤레이터는 구성될 수 있다¹³⁾.

3.1 전 상태 상태피드백 제어기

차륜형 역진자에 무게중심 변동이 존재하더라도 일반적인 상태피드백 제어기는 차륜형 역진자를 안정화시킬 수 있으며, 몸체의 기울기 각도 θ 를 미지의 무게중심 변동 β 로 수렴시키고 있다⁹⁾. 그렇지만 그 상태피드백 제어기의 정상상태 조건인 (13)을 만족시키므로 정상상태의 주행변위 $r_{ss} \neq 0$ 는 원점에서 벗어나 버린다.

$$\tau = k_1 r_{ss} + k_2 \theta_{ss} + k_3 \dot{r}_{ss} + k_4 \dot{\theta}_{ss} = 0 \quad (16)$$

$$r_{ss} = -\frac{k_2}{k_1} \theta_{ss} \neq 0 \quad (17)$$

이 때, 앞에서 주어진 평형점에서 주행변위 r 에 관한

물리적인 제한조건은 없음에 유의한다.

3.2 확장 상태피드백 제어기

차륜형 역진자의 무게중심 변동은 사용되는 응용분야 혹은 동작조건에 따라서 항상 변하게 되지만 일반 상태피드백 제어기는 차륜형 역진자를 안정화시킬 수 있다. 그렇지만 응용분야에 따라서 무게중심 변동 존재의 여부에 상관없이 항상 차륜형 역진자의 주행변위는 초기위치로 수렴될 필요가 있을 수 있다. 즉, $r_{ss} \rightarrow 0$ 가 될 필요가 있다.

정상상태의 주행변위를 원점이 0으로 수렴시키기 위해서 산업적으로 널리 사용되고 효용성이 입증된 PID (Proportional Integral Derivative) 제어기가 사용될 수 있다. 한 편, PID 제어이득은 주로 시행오차 과정을 통하여 선정되는데, 이러한 기법은 페루프 시스템의 체계적인 안정성확보에 어려움이 있다.

PD (Proportional Derivative) 제어와 등가이면서 안정성을 체계적으로 고려할 수 있는 상태피드백 제어에 I (Integral) 제어를 추가하여 PID 와 등가인 상태피드백 제어기가 구성될 필요가 있다. 역진자의 주행변위를 0으로 수렴시키기 위해서 다음과 같이 I 제어용 새로운 상태변수가 도입될 필요가 있다.

$$r_I = \int_0^t r ds \quad (18)$$

새롭게 도입된 상태변수를 적용하여 다음과 같은 확장된 상태변수 벡터 X 가 제어기 설계에 사용되게 된다.

$$X = [r_I \mid r \quad \theta \quad \dot{r} \quad \dot{\theta}]^T \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_I \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_I \\ r \\ \theta \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \tau \quad (20)$$

새롭게 구성된 확장 상태방정식 (20) 은 역시 가제어성을 갖고 있으므로 임의의 페루프 극점을 갖는 LQ 레귤레이터는 구성될 수 있다.

4. 수치 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제시된 차륜형 역진자의 무게중심 변동이 초기 변위의 원점 이탈 현상과 그 이탈을 보정할 수 있는 제어기의 유효성을 보이기 위해서 다양한 조건에 대해서 수치 시뮬레이션이 수행되었다. 제어기 이득행렬을 구하는 과정에서 선형화된 (15), (20) 이 사용되었으며, 페루프 시스템의 수치 시뮬레이션에는 비선형 방정식인 (9), (10)이 적용되었다.

4.1 일반 LQ 레귤레이터

차륜형 역진자를 제어하기 위해서 해당 운동방정식의 상태변수 전부를 이용하는 상태피드백 제어기가 사용될 수 있다. 상태피드백 제어기는 페루프 시스템의 극점을 임의로 배치할 수 있는 강력한 기법이다. 수치 시뮬레이션에 사용된 차륜형 역진자 파라미터^[11]를 표 1에 나타내었다.

표 1에 주어진 수치를 (9) 와 (10) 에 대입하면 (15) 의 미지수는 $a_{11} = a_{21} = 0$, $a_{12} = -2.03$, $a_{22} = 63.1$, $b_1 = 13.4$, 그리고 $b_2 = 129.5$ 로 주어진다. 식 (15) 에 주어진 상태방정식의 행렬 A 와 B 는 가제어성을 갖고 있으므로 적절한 가중치 행렬을 이용하여 다음과 같이 상태피드백 제어기용 이득행렬이 구성되었다. 본 연구의 주제는 차륜형 역진자의 초기 변위의 원점 이탈 및 보정에 관한 것으로 제어 이득행렬의 산출과정은 [12]를 참고하였다.

$$K = [1.225 \quad 2.381 \quad 1.197 \quad 0.3452] \quad (21)$$

차륜형 역진자의 무게중심이 이상적인 위치에서 5°만큼 벗어난 경우를 가정하여 수치 시뮬레이션을 진행하고 그 결과를 주행변위, 몸체의 기울기 각도, 그리고 제어입력을 그림 3에 나타내었다. 앞의 (17)에서 예상한 바와

표 1. 차륜형 역진자 파라미터

변수	값	내용
M_1	0.2kg	차륜 질량
M_2	2.55kg	차체 질량
J_1	$1.54 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$	차륜 회전관성
J_2	$1.39 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$	차체 회전관성
R	0.038m	차륜 반지름
l	0.036m	차륜 중심과 차체중심까지 거리

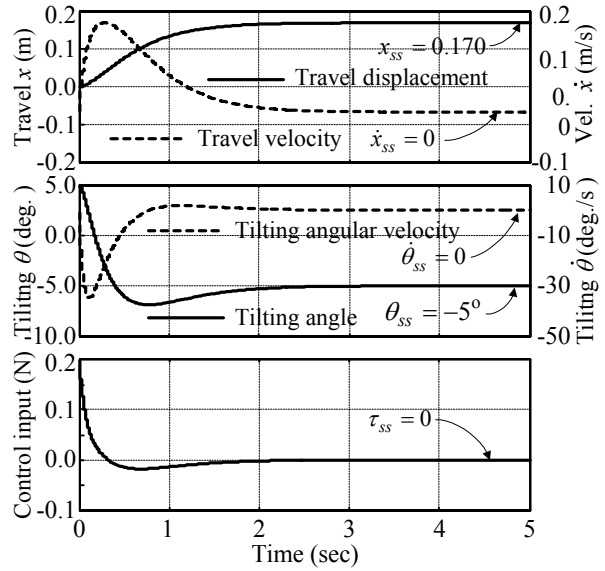


그림 3. 일반 상태피드백 제어기가 적용되었을 때, 무게중심 변동이 존재하는 차륜형 역진자의 상태변수 $r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}, \tau$ 의 시간응답

같이 무게중심이 변동하는 경우 초기 변위가 원점에서 이탈하고 있으며, 그 이탈된 거리의 값은 (17)에서 계산된 결과와 일치함을 알 수 있다. 그리고 무게중심 변동 분량과 원점 이탈 분량 사이에 이득행렬의 성분 k_1 과 k_2 가 관련되어 있음을 알 수 있고, 이득행렬의 성분 k_1 과 k_2 가 존재한다면 이탈 현상이 필수적으로 발생함을 알 수 있다.

4.2 확장 LQ 레귤레이터

무게중심 변동이 존재하는 차륜형 역진자에서 발생할 수 있는 초기 변위의 원점 이탈을 보정하기 위하여 다음과 같이 확장된 상태피드백 제어 이득행렬을 구성하였다.

$$K_{aug} = [2.121 \quad | \quad 3.011 \quad 2.852 \quad 1.783 \quad 0.416] \quad (22)$$

차륜형 역진자가 이동체 플랫폼으로 사용될 때에는 해당 응용장치가 동작 중에도 무게중심이 변동될 수 있으므로 가변 되는 무게중심 변동을 적용하여 확장 상태피드백 제어기의 성능이 수치 시뮬레이션 되었다. 무게중심 변동 분량은 시뮬레이션 초기 $\beta = 5^\circ$ 에서 개시 5초 이후에 $\beta = -5^\circ$ 로 변하는 것을 설정되었다.

그림 4는 무게중심 변동이 존재함에도 불구하고 초기 변위의 원점 이탈 현상이 보정되는 결과를 보이고 있으며, 뿐만 아니라 무게중심 변동이 가변 되는 경우에도 원

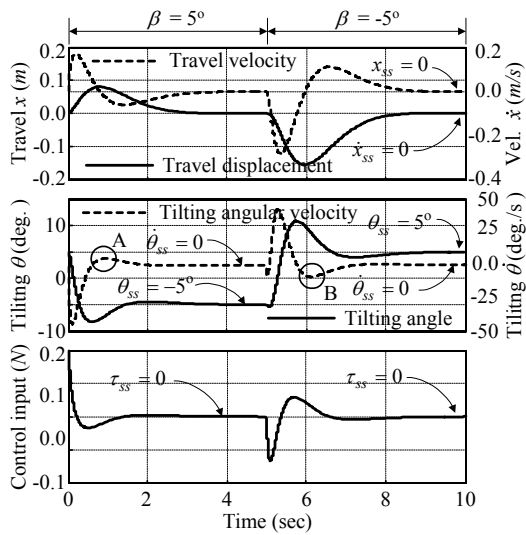


그림 4. 확장 상태피드백 제어가 적용되었을 때 무게중심 변동이 존재하는 차륜형 역진자의 상태변수 $r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}, \tau$ 의 시간응답

점 이탈 현상은 보정되고 있다. 원점 이탈 현상을 보정하기 위해서 확장 상태피드백 제어가 사용된다라도 평형 상태의 조건인 (13), (14)는 여전히 만족됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 무게중심이 변동하는 차륜형 역진자의 운동방정식이 Lagrange 기법을 이용하여 유도되었다. 일반적인 상태피드백 제어가 적용되는 경우, 무게중심이 변동하는 차륜형 역진자의 자세는 안정화 되는 반면에 초기 변위의 원점 이탈 현상이 발생되고, 수치 시뮬레이션을 통하여 그 원점 이탈 현상이 확인되었다. 본 연구에서는 무게중심 변동이 초래하는 초기 변위의 원점 이탈 현상이 해석되었고 그 이탈 현상을 보정할 수 있는 확장 상태피드백 제어가 제안되었으며 수치 시뮬레이션을 통하여 그 유효성이 제시되었다.

참고문헌

[1] P. L. Kapitza, in *Collected Paper of P. L. Kapitza*, edited by D. Ter Haar (Pergamon, London, 1965) pp.174.
 [2] www.segway.com/aboutus/press_releases/pr_120301.html
 [3] www.toyota.co.jp/jp/news/08/Aug/nt08_805.html

[4] world.honda.com/news/2009/c090924New_personal-Mobility-Device/
 [5] segway.com/puma
 [6] J. Searock, B. Browning, M. Veloso, "Turning Segways into Soccer Robots," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1029-1034, 2004.
 [7] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Dftler, I. Spain, N. Radford, "Mobile Manipulation using NASA's Robonaut," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.2104-2109, 2004.
 [8] S. Matsumoto, S. Kajita, L. Tani, "Estimation and Control of the Attitude of a Dynamic Mobile Robot Using Internal Sensors," *Journal of Robotic Society of Japan (in Japanese)*, vol. 8, no. 5, pp.37-46, 1990.
 [9] 이세한, "무게중심이 변동되는 차륜형 역진자의 평형점 상태에 관한 연구," *제어로봇시스템학회(투고)*
 [10] K. Furuta, H. Kajiwara, K. Kosuge, "Digital control of a double inverted pendulum on an inclined rail," *International Journal of Control*, vol. 32, no. 5, pp.907-924, 1980.
 [11] 이세한, 강제관, "경사면을 주행하는 차륜형 역진자의 평형점 상태에 관한 연구," *한국정밀공학회(채택)*
 [12] M. W. Spong, M. Vidyasagar, *ROBOT DYNAMICS AND CONTROL*, Wiley & Sons, Inc., 1989.
 [13] 이세한, 이상용, "경사면을 주행하는 차륜형 역진자를 위한 선형행렬부동식 기반 혼합 H_2/H_∞ 상태피드백 제어가 설계," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 제5호, pp617-623, 2010.



이 세 한

1989 고려대학교 기계공학과 (공학사)
 1991 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
 2002 고려대학교 기계공학과 (공학박사)

2004~현재 경남대학교 기계자동차공학부 교수
 관심분야: 자동화 로봇, 강인제어