



이론 독립진자 이동로봇을 위한 강인제어기 설계

Robust Control Design for a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot

유동상[†]
Dong Sang Yoo[†]

한경대학교 전기전자제어공학과
Department of Electrical, Electronics, and Control Engineering, Hankyong University

요약

세계적으로 수많은 로봇연구실에서 이론 독립진자 이동로봇에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 이론 독립진자 이동로봇이 평탄한 경사면에서 안정적으로 주행할 수 있도록 하는 강인 제어기를 개발하는 것으로 고려한다. 경사면에서 이론 독립진자 이동로봇의 균형을 위해 3 자유도의 운동방정식에서 선회운동을 제한한 2 자유도 동력학식을 사용하며, 가변구조시스템 이론을 근간으로 하는 슬라이딩 모드 제어기를 제안하고 LQR 이론을 이용하여 슬라이딩 운동이 일어나는 슬라이딩 평면을 설계한다. 시뮬레이션을 위해 Mathworks사의 Simulink를 활용하여 이론 독립진자 이동로봇의 2 자유도 모델을 실현하고, 슬라이딩 모드 제어기 또한 Simulink를 이용하여 구현한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 제어기가 경사면을 주행하는 이론 독립진자 이동로봇을 효과적인 제어한다는 것을 보인다.

키워드 : 독립진자, 이론 이동로봇, 슬라이딩 모드 제어, LQR 이론, Simulink 모델

Abstract

The research on two-wheeled inverted pendulum (TWIP) mobile robots has been ongoing in a number of robotic laboratories around the world. In this paper, we consider a robust controller design for the TWIP mobile robot driving on uniform slopes. We use a 2 degree-of-freedom (DOF) model which is obtained by restricting the spinning motion in a 3 DOF motion dynamic equation. In order to design the robust controller guaranteeing stability of the TWIP mobile robot driving on inclined surface, we propose a sliding mode control based on the theory of variable structure systems and design a sliding surface using the theory of the linear quadratic regulation (LQR). For simulation, the dynamic model of the TWIP mobile robot is constructed using Mathworks' Simulink and the sliding mode control is also implemented using Simulink. From simulation results, we show that the proposed controller effectively controls the TWIP mobile robot driving on slopes.

Key Words : Inverted Pendulum, Two-Wheeled Mobile Robot, Sliding Mode Control, LQR theory, Simulink Model.

Received: Jan. 7, 2016
Revised : Jan. 16, 2016
Accepted: Jan. 28, 2016
[†]Corresponding author
dsyoo@hknu.ac.kr

1. 서론

이론 독립진자 이동로봇은 주행뿐만 아니라 자세까지 제어해야 하는 매력적인 연구테마로 세계적으로 수많은 로봇연구실에서 이론 독립진자 이동로봇에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 2001년 미국의 발명가 Dean Kamen이 자전거를 대신할 차세대 운송 수단으로 세그웨이(Segway)를 상용화함으로써 이론 독립진자 이동로봇에 대한 연구가 가속화되었다. 세그웨이는 지금까지의 모바일 이동수단의 상식을 벗어난 차세대 이동수단으로써 두 개의 바퀴만으로도 스스로 균형을 잡으면서 넘어지지 않고 안정적인 주행이 가능하였다[1]. 이후 Grasser 등은 JOE라 불리는 이론 이동로봇을 개발하고 두 개의 분리된 상태제어기를 제안하여 안정적인 주행에 성공하였다[2].

Pathak 등은 구동축 모터 토크에 대한 동적 모델을 유도한 후 이를 바탕으로 2-준위 속도 제어기와 2-준위 위치 제어기를 제안하였다[3]. Kim 등은 Kane의 동력학식을 이용하여 이론 독립진자 이동로봇의 동력학을 유도하고, 선형화된 모델을 구하였으며 이를 바탕으로 LQR 기법을 이용한 상태제어기를 제안하였다[4]. Jeong과 Takahasi는 인간보조 로봇

본 연구는 2013년도 한경대학교 교비 파견 연구비의 지원에 의한 것임.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인 I-PENTAR를 설계하고, 제어이득을 LQR 기법으로 계산한 상태제환 제어를 제안하였다[5]. Huang 등은 강한 속도 제어 문제를 다루기 위해 매개변수 불확실성과 외란 등을 처리할 수 있는 이중의 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다[6]. 한편으로는 이륜 로봇에 대한 새로운 플랫폼[7]과 이동로봇을 위한 입체영상 기반의 퍼지 추적제어도 연구되고 있다[8].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 이륜 도립진자 이동로봇의 동력학식에 대해 기술하고, 제3절에서는 최적 제어 이론을 기반으로 슬라이딩 평면을 설계과정과 이 슬라이딩 평면을 이용하여 슬라이딩 모드 제어를 제안한다. 다음으로 Simulink를 이용한 이륜 도립진자 이동로봇의 모델을 구현하고 제안된 제어를 이용하여 자세각 제어와 직선 운동에 대한 시뮬레이션 결과를 기술한다.

2. 이륜 도립진자 이동로봇의 동력학

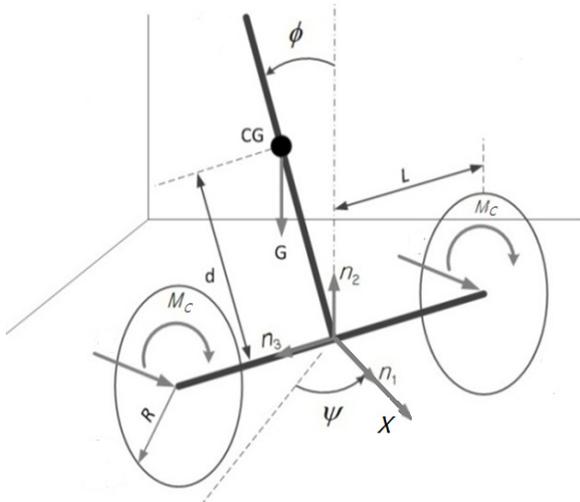


그림 1. 이륜 로봇을 위한 좌표계

Fig. 1. Coordinate system for two-wheeled robot

표 1. 기계적 매개변수

Table 1. Mechanical parameters

Param.	Description
d	distance from C to C.G.
m_s	mass of the body
I_2	n_2 -directional rotational inertia of the body
I_3	n_3 -directional rotational inertia of the body
L	half-distance between wheels
R	radius of the wheel
m_c	mass of the wheel
g	gravitational acceleration

이륜 도립진자 이동로봇 (이하 이륜 로봇)의 물리적 특성을 해석하고 제어시스템을 개발하기 위해서는 이륜 로봇의 정확한 동적 모델을 구하여야 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 좌표계를 설정하고 표 1에서 정의한 기계적 매개변수를 사용하면 다음과 같은 직선 운동, 선회운동 및 자세균형의 세 가지 운동을 포함한 3 자유도의 운동방정식이 유도된다[4].

$$\begin{aligned}
 (3m_c + m_s)\ddot{x} - m_s d \cos\phi \ddot{\phi} \\
 + m_s d \sin\phi (\dot{\phi}^2 + \dot{\psi}^2) = -\frac{\alpha + \beta}{R} \\
 \{(3L^2 + 1/2R^2)m_c + m_s d^2 \sin^2\phi + I_2\} \ddot{\psi} \\
 + m_s d^2 \sin\phi \cos\phi \dot{\phi} \dot{\psi} = \frac{L}{R}(\alpha - \beta) \\
 m_s d \cos\phi \ddot{x} - (m_s d^2 + I_3)\ddot{\phi} + m_s d^2 \sin\phi \cos\phi \dot{\phi} \dot{\psi} \\
 + m_s g d \sin\phi = \alpha + \beta
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 α 와 β 는 각각 우측 바퀴와 좌측 바퀴에서 발생하는 토크이다.

논문에서는 선회운동을 제한하고 직선운동과 자세균형을 다루기로 한다. 이에 따라 3 자유도의 운동 방정식 (1)에서 두 번째 운동방정식을 제거하고 나머지 두 방정식으로부터 선회운동에 의한 전향력에 관련된 항을 제거하면 2 자유도의 운동방정식으로 정리할 수 있으며, 만약 직선운동 방향으로 경사면이 존재한다면 경사면에서 이륜 로봇을 안전하게 구동하기 위한 추가적인 토크가 요구되므로 최종적으로 식 (2)와 같은 운동방정식을 얻을 수 있다[4]. 또한 우측 및 좌측 바퀴에서 발생하는 토크는 그 크기가 같아야 하므로 하나의 변수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (3m_c + m_s)\ddot{x} - m_s d \cos(\phi - \zeta) \ddot{\phi} \\
 + m_s d \sin(\phi - \zeta) \dot{\phi}^2 + (m_c + m_s)g \sin\zeta = -\frac{\tau}{R} \\
 m_s d \cos(\phi - \zeta) \ddot{x} - (m_s d^2 + I_3)\ddot{\phi} \\
 + m_s d^2 \sin\phi \cos\phi \dot{\phi}^2 + m_s g d \sin(\phi - \zeta) = \tau
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $\tau = \alpha + \beta = 2\alpha = 2\beta$ 이며, ζ 는 경사면의 각도를 나타낸다.

이륜 로봇을 위한 제어기 설계를 위해 자세각 ϕ 에 대한 비선형 운동 방정식을 균형점에 대해 선형화할 필요가 있다. 이륜 로봇에 장착되어 있는 도립진자의 경사면 각도에 따른 자세각 균형점은 식 (2)에서 속도 및 가속도를 0으로 설정한 후 두 식을 연립하여 ϕ 에 대하여 정리하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(-\frac{R(m_c + m_s)}{m_s d} \sin\zeta\right) + \zeta \tag{3}$$

이륜 로봇의 도립진자 운동이 자세각 균형점에서 크게 벗어나지 않는다고 가정하여 선형화 모델을 구하면 다음과 같은 선형 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{m_s^2 d^2 g}{\Delta} \phi - \frac{(m_s d^2 + I_3)/R + m_s d}{\Delta} \tau \\ &\quad - \frac{(m_s d^2 + I_3)(m_c + m_s)}{\Delta} \sin \zeta \\ \ddot{\phi} &= \frac{m_s d g (3m_c + m_s)}{\Delta} \phi - \frac{m_s d / R + 3m_c m_s}{\Delta} \tau \\ &\quad - \frac{(m_c + m_s) m_s g d}{\Delta} \sin \zeta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\Delta = 3m_c(m_s d^2 + I_3) + m_s I_3$ 이다.

식 (4)를 상태방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{D} \quad (5)$$

여기서

$$\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \phi, \dot{\phi}]^T, \quad u = \tau$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_s^2 d^2 g}{\Delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m_s d g (3m_c + m_s)}{\Delta} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{(m_s d^2 + I_3)/R + m_s d}{\Delta} \\ 0 \\ -\frac{m_s d / R + 3m_c m_s}{\Delta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{(m_s d^2 + I_3)(m_c + m_s)}{\Delta} \sin \zeta \\ 0 \\ -\frac{(m_c + m_s) m_s g d}{\Delta} \sin \zeta \end{bmatrix}$$

선형화된 상태방정식 행렬 쌍 (A, B)는 제어가능하므로 이 른 로봇을 위한 다양한 제어를 설계할 수 있다.

3. 슬라이딩 모드 제어기 설계

일반적으로 슬라이딩 모드 제어기 설계는 두 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 슬라이딩 모드가 일어나는 슬라이딩 평면을 설계하는 것이며, 이 슬라이딩 평면이 선택된 후에는 시스템의 궤적을 슬라이딩 평면으로 이끌고 슬라이딩 평면과 접촉한 후에는 계속에서 이 평면에 머물도록 하는 강인 제어를 설계하는 것이다[9]-[12].

먼저 슬라이딩 모드가 일어나는 스위칭 함수 $\sigma(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\{\sigma \in R \mid \sigma(t) = \mathbf{S}\mathbf{x}(t)\} \quad (6)$$

여기서 슬라이딩 행렬 $\mathbf{S} \in R^{1 \times 4}$ 는 $\mathbf{S}\mathbf{B} \in R$ 가 0이 아닌 상수가 되도록 선정한다.

축차된 슬라이딩 모드 동력학을 얻기 위해 다음과 같은 직교 변환 행렬 $T \in R^{4 \times 4}$ 를 도입한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= [z_1, z_2]^T = \mathbf{T}\mathbf{x}, \\ \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{T}^T &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $z_1 \in R^{3 \times 1}$ 은 벡터이고, $z_2 \in R$ 은 스칼라이며, $B_2 \in R$ 은 스칼라이다.

식 (5)에서 경사각에 의한 항을 제거한 공칭 선형 방정식은 변환행렬 T에 의해 다음과 같은 정규화 형태 (regular form)로 변환된다[9].

$$\dot{z}_1(t) = A_{11}z_1(t) + A_{12}z_2(t) \quad (7a)$$

$$\dot{z}_2(t) = A_{21}z_1(t) + A_{22}z_2(t) + B_2u(t) \quad (7b)$$

또한 스위칭 함수도 변환된 새로운 상태벡터에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma(t) = \mathbf{S}\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{T}^T\mathbf{z} = S_1z_1(t) + S_2z_2(t) \quad (8)$$

만약 슬라이딩 운동이 시작되면 스위칭 함수는 0이 되므로 슬라이딩 모드는 다음과 같이 식에 의해 조정된다.

$$\dot{z}_1(t) = (A_{11} - A_{12}M)z_1(t) \quad (9)$$

여기서 $M = S_1/S_2$ 이며, 슬라이딩 행렬 S의 적절한 선정에 의해 S_2 는 0이 아닌 상수가 된다. 본 논문에서는 설계를 단순화하기 위해 S_2 를 1로 설정한다. 식 (9)에서 적절한 M의 설계에 의해 슬라이딩 평면에서의 슬라이딩 운동은 점근적 안정하게 되므로 새로운 상태벡터 $\mathbf{z}(t)$ 는 0으로 수렴한다. 행렬 M의 설계에는 극점 배치점이나 LQR 설계법 등이 있으며 본 논문에서는 Utkin과 Young [10]이 제시한 LQR 설계법을 이용한다.

먼저 다음의 성능지수 함수를 최소화 문제를 고려한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_s}^{\infty} \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) dt \quad (10)$$

여기서 가중치 행렬 Q는 대칭인 양의 정의 행렬이고, t_s 는 슬라이딩 운동이 시작되는 시점이다. 앞에서 정의한 직교 변환 행렬 T와 변환된 상태벡터 \mathbf{z} 를 이용하여 성능지수 함수를 재정리하면

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_s}^{\infty} z_1^T(t) \hat{Q} z_1(t) + v^T(t) Q_{22} v(t) dt \quad (11)$$

이 된다. 여기서 입력 $v(t) \in R$ 는

$$v(t) = z_2(t) + Q_{21}^{-1} Q_{21} \quad (12)$$

이고, $\mathbf{T}\mathbf{Q}\mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$, $\hat{Q} = Q_{11} - Q_{12}Q_{21}/Q_{22}$ 이다. 따라서 식 (7a)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\dot{z}_1(t) = \hat{A}z_1(t) + A_{12}v(t) \quad (13)$$

여기서 $\hat{A} = A_{11} - A_{12}Q_{21}/Q_{22}$ 이다. 따라서 식 (13)을 제약조건으로 가지는 식 (11)를 최소화하는 최적의 입력 $v(t)$ 는 다음과 결정된다.

$$v(t) = -A_{12}^T Pz_1(t)/Q_{22} \quad (14)$$

여기서 양의 행렬 P 는 다음의 리카티 방정식의 유일해이다.

$$P\hat{A} + \hat{A}P - PA_{12}A_{12}^T P/Q_{22} + \hat{Q} = 0 \quad (15)$$

식 (9), (12)와 (14)로부터 행렬 M 은 다음과 같이 결정된다.

$$M = (A_{12}^T P + Q_{21})/Q_{22} \quad (16)$$

한편 행렬 M 으로부터 변환 전의 운동방정식에서의 슬라이딩 행렬 S 은 다음과 같이 결정된다.

$$S = [M \ 1] T \quad (17)$$

로 결정된다.

다음은 상태 궤적을 슬라이딩 평면으로 이끄는 슬라이딩 제어기를 설계한다.

$$u(t) = -(SB)^{-1}SAx(t) - \rho \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} \quad (18)$$

여기서 ρ 는 다음의 조건을 만족하도록 결정한다.

$$\rho(SB) > 0 \text{ and } |\rho| > \frac{|SD|}{|SB|} \quad (19)$$

정리 : 식 (5)로 표현되는 이륜 로봇의 동력학을 고려해 보자. 스위칭 함수를 식 (17)와 같이 설계하고, 제어기를 식 (18)와 같이 설계했을 때 $\sigma(t) = 0$ 은 안정하다.

증명 : 스위칭 함수의 안정성을 검증하기 위해 다음과 같은 리아프노프 (Lyapunov) 함수를 고려한다.

$$V(s) = \frac{1}{2}\sigma^T\sigma \quad (20)$$

식 (20)을 시간에 대해 미분하고, 식 (18)과 (19)를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T S(Ax + Bu + D) \\ &= -\sigma^T SB\rho \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|} + \sigma^T SD \\ &< -|\sigma|SB|\rho| + |\sigma|SD < 0. \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 $\sigma(t) = 0$ 은 안정하다. ■

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 이륜 로봇에 대한 슬라이딩 모드 제어기의 효율성을 검토하기 위해 먼저 이륜 로봇에 대한 2 자유도 모델을 Mathworks사의 Simulink를 이용하여 그림 2와 같이 구현하였다.

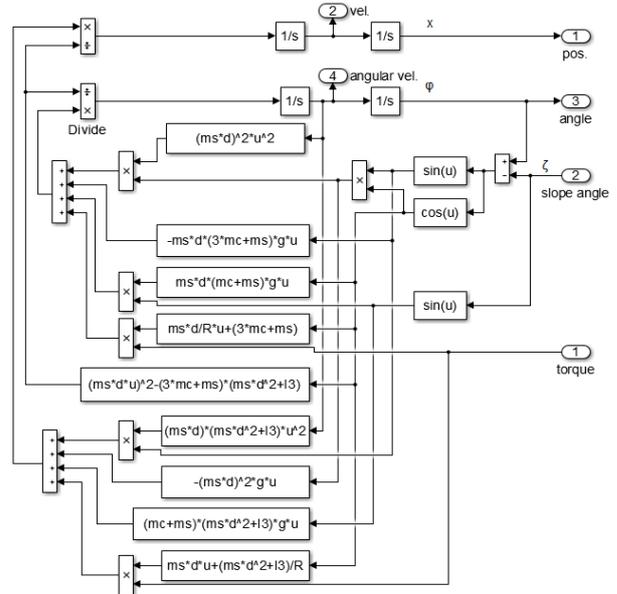


그림 2. Simulink를 이용한 이륜 로봇 모델
Fig. 2. Two-wheeled robot model using Simulink

표 2. 시뮬레이션을 위한 매개변수 값
Table 2. Parameter values for simulation

Param.	Value[unit]	Param.	Value[unit]
d	0.045[m]	L	0.175[m]
m_s	5.16[kg]	R	0.065[m]
I_2	0.052675[kg]	m_c	0.3[kg]
I_3	0.003483[kg]	g	9.81[m/l]

표 2에서 제시한 이륜 로봇의 매개변수값을 식 (5)에 대입하여 상태방정식의 행렬을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 17.34 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 452.42 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -14.64 \\ 0 \\ -269.29 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ -24.46\sin\zeta \\ 0 \\ -407.63\sin\zeta \end{bmatrix}$$

다음으로는 본문에서 기술한 LQR 방법을 이용하여 슬라이딩 평면을 설계하였다. 식 (10)에서 정의된 가중치 행렬 Q 는 이륜 로봇에 설치된 도립진자의 빠른 안정도를 위하여 가중치를 다른 요소보다 크게 설정하였다.

$$Q = \text{diag}[20 \ 1 \ 100 \ 1]$$

따라서 식 (16)과 (17)에 따라 슬라이딩 평면 구성을 위한 슬라이딩 행렬 S 는 다음과 같다.

$$S = [-4.47 \quad -4.11 \quad 12.92 \quad 1.23]$$

제안된 슬라이딩 모드 제어기는 불연속적이므로 실제 구현을 위해서는 부드러운 연속함수로 구현할 필요가 있다. 따라서 식 (18)의 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 수정하였다.

$$u(t) = -(SB)^{-1}SAx(t) - \rho \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \delta}$$

여기서 $\delta = 0.01$ 로 선정하였다. 한편 ρ 는 식 (19)의 조건을 만족하도록 설정하여야 한다. $(SB) = -269.69$ 로 음수이므로 ρ 도 음수로 선정하여야 하며, 경사각이 최대일 때 $(SD) = -34.75$ 이므로 $|\rho|$ 는 0.13보다 커야한다. 따라서 선형화 과정에서의 오차를 고려하여 $\rho = -0.5$ 로 선정하였다.

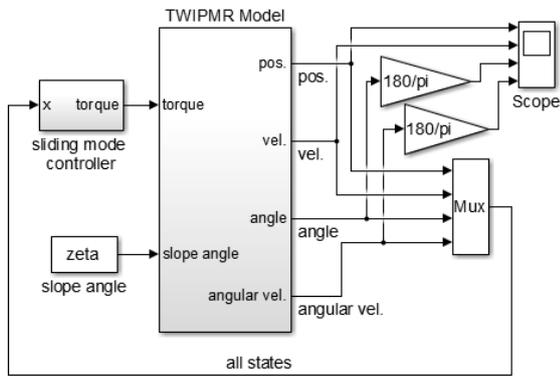


그림 3. Simulink 기반의 전체시스템
Fig. 3. Overall system using Simulink

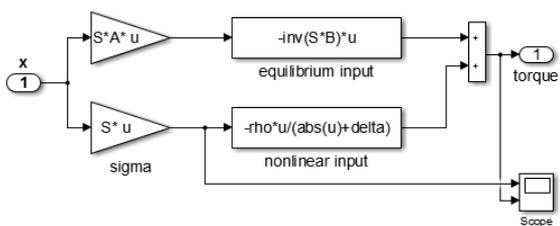
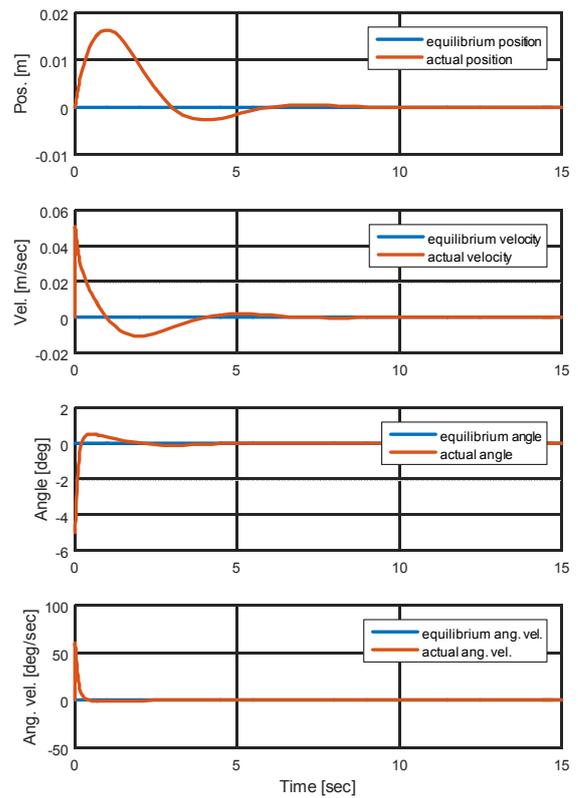


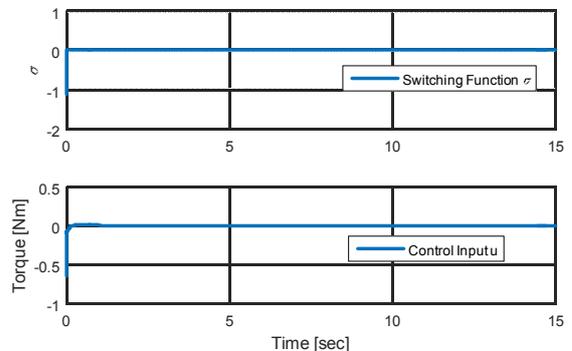
그림 4. Simulink 기반의 슬라이딩 모드 제어기
Fig. 4. Sliding mode controller using Simulink

슬라이딩 모드 제어기를 포함한 전체시스템은 그림 3과 4와 같이 Simulink를 이용하여 구현하였다.

첫 번째 실험에서는 제자리에서 이륜 로봇에 장착된 도립진자의 균형을 유지하는 자세각 제어 (upright balancing)에 대해 시뮬레이션이 수행되었다. 자세각 제어는 이륜 로봇에서 가장 기본적으로 요구되는 사항으로 식 (3)에 의해 경사가 없는 평지에서 도립진자의 균형점은 $\phi = 0^\circ$ 임을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. 자세각 제어 시뮬레이션 결과 (a) 상태 궤적 (b) 스위칭 함수 및 제어입력

Fig. 5. Simulation results for upright balancing (a) state trajectories (b) switching function and control input

그림 5은 도립진자의 초기치를 -5° 로 주어졌을 때의 자세각 제어에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이륜 로봇은 현재 위치를 유지하면서 빠르게 도립진자가 균형점을 찾아가는 것을 볼 수 있다.

다음으로 경사각이 존재하는 환경에서 이륜 로봇이 일정한 거리를 직선 주행하면서도 도립진자의 균형을 유지하는 실험에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 경사면의 각도는 5° 로 주어지고, 이륜 로봇의 현재 위치는 $-3m$ 로 설정하고 $3m$ 를

주행하여 원점으로 돌아가도록 하는 조건으로 설정하였다. 주어진 조건에 따라 도립진자의 균형점을 식 (3)을 이용하여 계산하면 균형을 이루는 자세각은 -2.66° 이며, 이에 따른 이론 로봇의 이동 거리에 대한 정상상태값은 슬라이딩 모드 조건인

$$\sigma(t) = S\mathbf{x}(t) = 0$$

에 의해 $-0.13m$ 임을 알 수 있다.

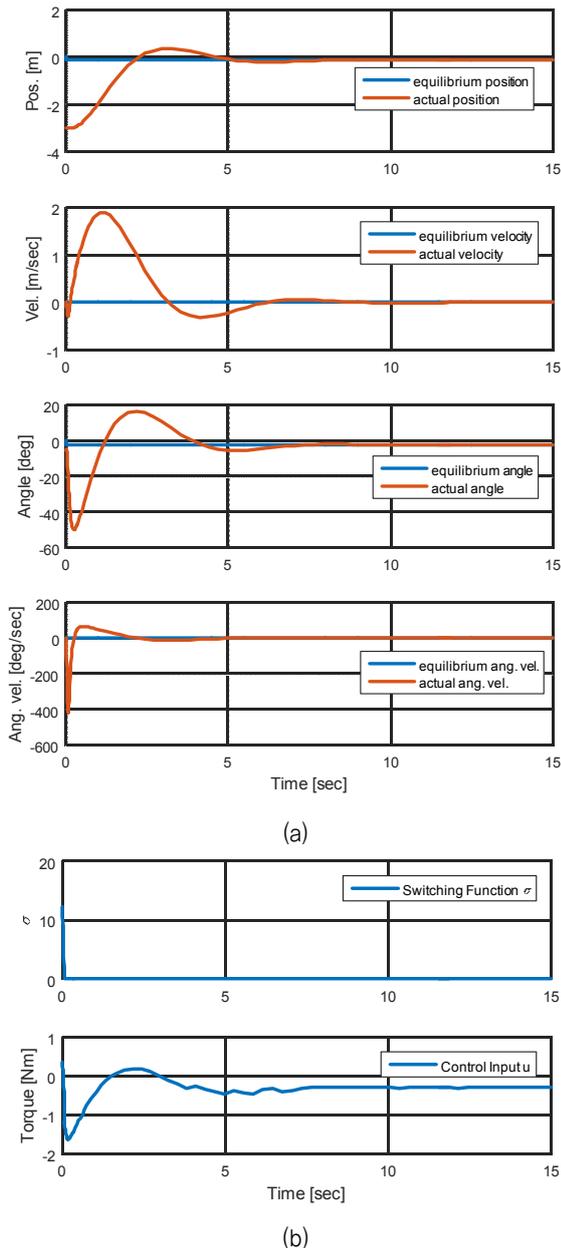


그림 6. 경사면에서의 직선 운동 시뮬레이션 결과 (a) 상태 궤적 (b) 스위칭 함수 및 제어입력

Fig. 6. Simulation results for rectilinear motion on inclined surface (a) state trajectories (b) switching function and control input

그림 6은 직선 주행에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이동거리 및 자세각 최종결과가 앞에서 제시한 균형점으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

두 시뮬레이션 결과로부터 제안된 강인제어기가 이론 로봇을 효과적으로 제어하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 이론 도립진자 이동로봇의 동력학을 기술하고 Simulink를 이용하여 모델을 구현하였다. 또한 LQR 기법을 이용하여 슬라이딩 평면을 설계하는 과정을 기술하고 슬라이딩 평면을 이용하여 이론 로봇이 경사면 주행을 가능하도록 하는 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 리아프노프 안정성 이론을 이용하여 제안된 제어기에 의한 이론 로봇의 상태는 슬라이딩 평면으로 도달 가능하다는 것을 증명하였다. 시뮬레이션을 통하여 이론 로봇의 자세각 제어 및 직선 운동에서 제안된 슬라이딩 모드 제어를 통하여 효과적으로 제어됨을 보였다.

References

- [1] H.G. Nguyen, J. Morrell, K.D. Mullens, *et al.* "Segway robotic mobility platform", *Proc. SPIE 5609, Mobile Robots XVII*, 207, December 29, 2004.
- [2] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, and A.C. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, 2002.
- [3] K. Pathak, J. Franch, and S.K. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 505-513, 2005
- [4] Y. H. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 25-46, 2005.
- [5] S. Jeong and T. Takahasi, "Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control," *Intelligent Service Robotics*, vol 1, no. 4, pp. 313-320, 2008
- [6] J. Huang, Z.-H. Guan, T. Matsuno, T. Fukuda, and K. Sekiyama, "Sliding-mode velocity control of mobile-wheeled inverted-pendulum systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 750-758, 2010

[7] S.-H. Lee and S.-Y. Rhee, "Development of a moving platform for a upright running mobile robot based on an inverted pendulum mechanism," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 570-576, 2012

[8] H.-H. Min, D.S. Yoo, and Y.-T. Kim, "Fuzzy tracking control based on stereo images for tracking of moving robot," *Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no.2, pp. 198-204, 2012

[9] C. Edwards and S. K. Spurgeon, *Sliding mode control Theory and Applications*, Taylor & Francis, 1998.

[10] V.I. Utkin and K.-K.D. Young, "Methods for constructing discontinuity planes in multidimensional variable structure systems," *Automation and Remote Control*, vol. 39, pp.1466-1470, 1978

[11] D.S. Yoo, "Design of integral sliding mode control for underactuated mechanical systems," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no.3, pp. 208-213, 2013

[12] J.-H. Choi, J.-S. Kim, S. Kim, D.S. Yoo, and K.-H. Kim, "High gain observer-based robust tracking control of LIM for high performance automatic picking

system," *Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 25, no.1, pp. 7-14, 2015

저 자 소 개



유동상(Dong Sang Yoo)

1985년 : 서울대학교 공과대학 전기공학과 공학사

1987년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

1992년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사

1992~2000년 : LG생산기술원 책임연구원

2000년~현재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 교수

관심분야 : Robust Control, Robotics, Automation

Phone : 031-670-5322

E-mail : dsyoo@hknu.ac.kr