

등반능력향상을 위한 이륜 역진자 로봇의 최적 ARS 제어

Optimal ARS Control of an Inverted Pendulum Robot for Climbing Ability Improvement

권 영 국¹, 이 장 명[†]

Young-Kuk Kwon¹, Jang-Myung Lee[†]

Abstract This paper proposes an optimal ARS control of a two-wheel mobile inverted pendulum robot. Conventional researches are highly concentrated on the robust control of a mobile inverted pendulum on the flat ground, *i.e.*, mostly focus on the compensation of gyroscope signals. This newly proposed algorithm deals with a climbing control of a slanted surface based on the dynamic modeling using the conventional structure. During the climbing control of the robot, unexpected disturbance forces are essentially caused by the irregular contact force which comes from the irregular contact angle between the wheel and the terrain. The disturbances have effects on the optimal posture of the mobile robot to compensate the slanted angle. Therefore the dynamics equations through physical interpretation are derived for the selection of optimum climbing posture through ARS. Also using the ultrasonic sensor the slope information is obtained to compensate for the force of gravity. The control inputs are dynamically adjusted to climb up the slanted surface effectively. The proposed algorithm is demonstrated through the real experiments.

Keywords: Two - Wheel Inverted Pendulum Robot, Optimal Posture Control, Climbing Capability, SEGWAY, ARS (Attitude Reference System)

1. 서론

대기오염 및 화석연료고갈, 유가급등의 심각성이 대두되는 가운데 무공해 이동수단인 세그웨이^[1-3]가 개발되었다. 세그웨이는 최신기술들이 집약된 스쿠터 형식의 운송수단으로서 2001년 Dean Kamen에 의해 개발된 이후로 차세대 이동수단으로 큰 반향을 일으켰다.

이러한 세그웨이는 역진자 로봇의 일환으로 동적 안정화 기술이라는 무게균형의 원리가 적용되었다^[4-6]. 동적 안정화 기술은 사람이 균형을 잡는 원리와 비슷하다. 사람이 균형을 잃고 앞으로 몸을 쓰러뜨리면 자연스레 발을 내딛어 균형을 유지하라는 것과 같은 이치다. 때문에 각 부

분의 전정기관과 뇌, 근육 등 사람이 균형을 유지하는 신체기관들과 유사한 기능을 가진다. 예를 들면 자이로 센서와 가속도 센서는 사람의 전정기관에, 제어보드는 뇌, 동작모터와 기어박스는 다리근육에 각각 해당한다.

센서가 중력변화를 감지해 마이크로프로세서에 정보를 보내면 1초에 수백 번에 달하는 조정작업을 통해 균형과 이동을 조절한다. 모바일 로봇의 무게중심이 앞이나 뒤로 기울일 경우 중심을 잡기 위해 바퀴를 앞뒤로 회전시키는 원리가 응용 된다. 자세결정 및 진행방향 계산은 자이로 센서로부터 출력되는 각속도를 적분함으로써 이루어진다. 하지만 자이로 센서의 출력 값은 바이어스 오차를 포함하고 있기 때문에 이를 그대로 이용할 경우 큰 자세오차가 발생하게 된다^[7]. 따라서 이를 보상하기 위해 가속도계를 이용하게 되고 진행방향에 대한 오차를 보상하기 위해서 지자기 센서가 이용된다. 기존의 연구는 주로 이러한 자이로 센서에서 발생하는 바이어스 오차와 외란 등을 보상하

Received : Sep. 28. 2010; Reviewed : Mar. 07. 2011; Accepted : Mar. 11. 2011

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (NIPA-2010-C1090-1021-0010).

† 교신저자: 부산대학교 전자전기공학과 교수

¹ 부산대학교 전자전기공학과 석사과정

여 안정된 동작수행에 관한 연구⁸⁾, 또는 이상적인 환경에서의 자세제어에만 국한되어 있으며 이에 비해 기울기가 있는 환경에서의 주행을 위한 자세제어에 관한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 바퀴구동형 이륜 역진자 로봇 메커니즘을 고려하여 이륜 역진자 로봇의 평지 주행뿐만 아니라 지면이 기울어진 환경에서 주행 실험을 수행한 연구 결과를 제시함으로써, 기존의 선행 연구와 차별성을 부각 시키고자 한다. 이러한 이륜 역진자 로봇이 경사진 지면을 등반할 시 ARS (Attitude Reference System)을 통한 최적의 자세제어⁹⁾를 목표로 한다. 여기서 최적의 자세제어라 함은 등반 시 고려 되어야 할 사항인 모바일 로봇의 안정성을 말한다.

2. 로봇 메커니즘 모델링

2.1 동역학 방정식의 유도

시스템을 적절하게 이해하고, 제어하기 위하여 동역학적 모델을 구성할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 이륜 역진자 로봇을 도식화한 그림이다. 여기서 각각의 파라미터들은 아래의 그림과 같이 W 는 몸체의 넓이, H - 높이, D - 로봇의 몸체의 폭, R_w - 좌측, 우측 바퀴의 반경 그리고 θ 는 좌측, 우측 바퀴의 회전 각도를 나타낸다.

동역학 방정식을 유도하기 위하여, 그림 1의 이륜 역진자 로봇을 아래의 그림 2와 같은 Free Body Diagram 형태로 바꾸어 볼 수 있다. 본 논문에서 제안된 시스템은 바퀴 축과 그에 대한 수직 축을 기반으로 하는 모델로서 1차원 평면에서 움직임은 몸체의 기울기와 선 운동에 의해 결정된다. 여기서, Z_1 와 Z_2 는 각각 바퀴와 몸체의 중심으로부터

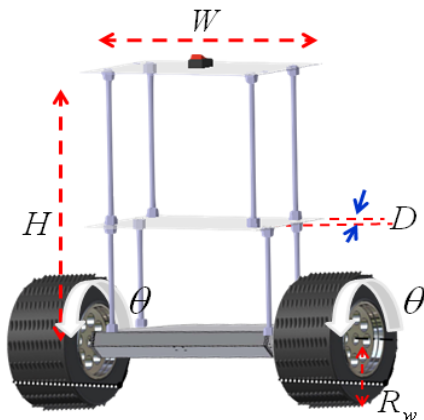


그림 1. 이륜 역진자 로봇의 모델링

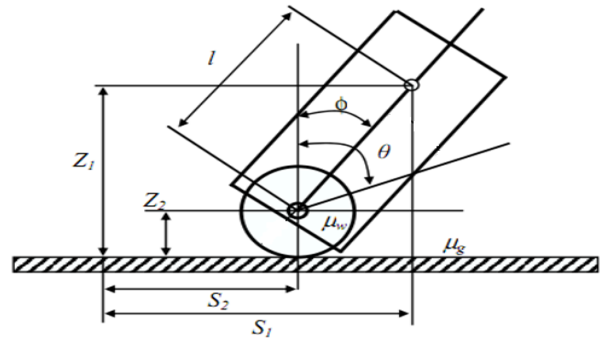


그림 2. 로봇의 Free Body Diagram

터 높이를 말하며, S_1 과 S_2 는 바퀴와 몸체의 이동거리를, l 은 바퀴와 몸체의 중심간의 거리를 나타내었다. 또한 중심각에서 기울어진 각도를 θ 라 하고, 바퀴가 회전한 각도를 ϕ 라 표기하였다.

또한, 동역학 해석에 필요한 시스템 파라미터들을 표 1에 나타내었다.

이 동역학 모델의 라그랑지(Lagrange)운동 방정식은 아래의 식 (1,2)과 같이 나타낸다¹⁰⁾. 이륜 역진자 로봇의 동역학은 바퀴의 회전에 의한 몸체 각 ϕ 와 바퀴의 회전 각 θ 에 대하여 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial \phi} \right) + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{\phi}} \right) = Q_{\phi} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}'} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}'} \right) = Q_{\theta} \quad (2)$$

표 1. 이륜 역진자 로봇의 파라미터

θ	Rotation angle of wheel w.r.t. the vertical line
ϕ	A tilted angle of body w.r.t. the vertical line
g	Gravity acceleration
η	Reduction ratio of gear
I_M	Rotational inertia of the motor axis
I_B	Rotation inertia of the body
I_W	Rotation inertia of the wheel
μ_s	Friction coefficient of bearing at the wheel
μ_g	Friction coefficient of wheel at the ground
M_B	Mass of the body
M_W	Mass of the wheel

여기서, T 는 Kinetic energy, U 는 Potential energy, D 는 Dissipation energy function, Q_ϕ 는 External force to ϕ 그리고 Q_θ 는 External force to θ 를 나타낸다.

또한 방정식을 유도를 위해, T , U , D , Q_ϕ , Q_θ 를 구하면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2}M_w(\dot{S}_2^2 + \dot{Z}_2^2) + \frac{1}{2}M_B(\dot{S}_1^2 + \dot{Z}_1^2) + \frac{1}{2}I_w\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_B(\dot{\theta} - \dot{\phi})^2 + \frac{1}{2}I_M\eta^2\dot{\phi}^2 \quad (3)$$

$$U = M_w g R_w + M_B g l \cos(\theta - \phi) \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2}(\mu_w \dot{\phi}^2 + \mu_g \dot{\theta}^2) \quad (5)$$

$$Q_\phi = \eta \tau_1 u_1 \quad (6)$$

$$Q_\theta = 0 \quad (7)$$

위 식의 선형화를 위해, 위 식 (3)에서 (7)을 식(1),(2)에 대입하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(M_B l^2 + I_B + I_M \eta^2)\ddot{\phi} + (M_B R_w l - I_M \eta^2)\ddot{\theta} + \mu_w \dot{\phi} - \mu_w \dot{\theta} - M_B g l \phi = \eta \tau_1 u_1 \quad (8)$$

$$(M_B R_w l + M_B l^2 + I_B)\ddot{\phi} + [(M_B - M_w)R_w^2 + M_B R_w l + I_w]\ddot{\theta} + \mu_g \dot{\theta} - M_B g l \phi = 0 \quad (9)$$

선형화된 모델의 상태 방정식은 식 (8),(9)로부터 식 (10)과 같이 임의의 변수 E,F,G, 그리고 H에 대해서 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$E = \begin{bmatrix} (M_B l^2 + I_B + I_M \eta^2)(M_B R_w l - I_M \eta^2) \\ (M_B l + M_B l^2 + I_B)(M_B R_w^2 - M_w R_w^2 + M_B R_w I_w) \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \mu_w - \mu_w \\ 0 \quad \mu_g \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} -M_B g l & 0 \\ -M_B g l & 0 \end{bmatrix}, \text{ and } H = \begin{bmatrix} \eta \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

그리고, 로봇의 좌표 계와 가해지는 힘의 방향을 그림 3에 나타내었다. 여기서, $R_{1,2}$ 는 좌측, 우측 바퀴를 말하며, 두 바퀴 사이의 중심점 단위벡터 n_1, n_2, n_3 를 각각 정의하였다. 그리고 $K_{1,2}$ 는 바퀴에 가해지는 힘, $M_{1,2}$ 는 모터에 의해 발생된 토크, G 는 물체에 가해지는 중력, L 은 바퀴 사이의 거리의 반지름 그리고 R_w 은 바퀴의 반지름을 나타낸다. 또한, 표 2에 제어에 필요한 시스템 파라미터를 아래와 같이 나타내었다.

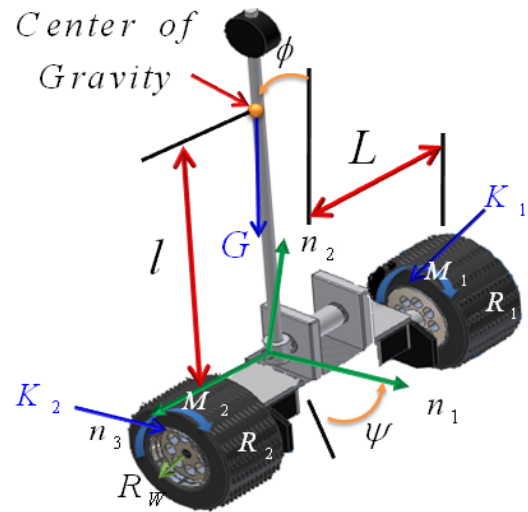


그림 3. 로봇의 좌표 계와 가해지는 힘의 방향

표 2. System parameters

M_B	11.01 kg
M_w	0.61 kg
L	0.21 m
R_w	0.09 m
I_B	0.224 kgm ²
I_w	6.1 x 10 ⁻⁴ kgm ²
g	9.8 cm/s ²
τ_T	[0.0235NM/A]
I_M	[3.2 x 10 ⁻⁶ kgm ²]
η	$\eta = 44.6$

3. LQR 제어기설계

기구부 설계 시 동역학 식으로부터 구해진 각각의 파라미터 값으로, MATLAB/Simulink를 통해 선형제어기를 구현해 봄으로써 제어기의 타당성을 확인하였다. 선형화된 식 (10)에서 $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ 에 대해서 정리하면,

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = E^{-1} \cdot -F \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + E^{-1} \cdot -G \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} + E^{-1} \cdot H \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

임의의 변수 $O, P, Q, R, S, T, U, V, W$ 에 대해 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{W} \begin{bmatrix} OP \\ QR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \frac{1}{W} \begin{bmatrix} SO \\ TO \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} + \frac{1}{W} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-O\theta' + P\phi' + Q\phi + Ru}{W} \quad (13)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{S\theta - T\phi' + U\phi - Vu}{W} \quad (14)$$

여기서

$$\begin{aligned} O &= M_B R_w l \mu_w + M_B l^2 \mu_w + \mu_w I_B \\ &\quad + M_B l^2 \mu_g + \mu_g I_B + \mu_g I_M \eta^2 \\ P &= M_B R_w l \mu_w + M_B l^2 \mu_w + \mu_w I_B \\ Q &= M_B g l I_M \eta^2 \\ R &= M_B R_w l + M_B l^2 + I_B \\ S &= M_B R_w l \mu_g - \mu_g I_M \eta^2 \\ &\quad + (M_B + M_w) R_w^2 \mu_w + M_B R_w l \mu_w + \mu_w I_w \\ T &= (M_B + M_w) R_w^2 \mu_s + M_B R_w l \mu_w + \mu_w I_w \\ U &= M_B g l I_M \eta^2 + M_B^2 g R_w^2 l \\ &\quad + M_B M_w g R_w^2 l + M_B g l I_w \\ V &= (M_B + M_w) R_w^2 + M_B R_w l + I_w \\ W &= M_B + M_w R_w^2 l^2 + (M_B + M_w) R_w^2 I_B \\ &\quad + M_B l^2 I_w + I_B I_w \\ &\quad + I_M \eta^2 \left(\begin{matrix} (M_B + M_w) R_w^2 + 2M_B R_w l \\ + M_B l^2 + I_B + I_w \end{matrix} \right) \end{aligned}$$

또한, 위 식들을 상태 방정식으로 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (15)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (16)$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \phi \\ \phi' \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \theta' \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{O}{W} & \frac{Q}{W} & \frac{P}{W} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{S}{W} & \frac{T}{W} & \frac{U}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \phi \\ \phi' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \\ -V \end{bmatrix} u \quad (17)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \phi \\ \phi' \end{bmatrix} \quad (18)$$

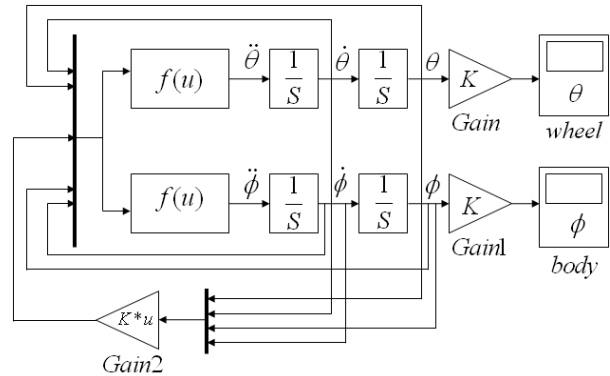


그림 4. LQR 제어기의 설계

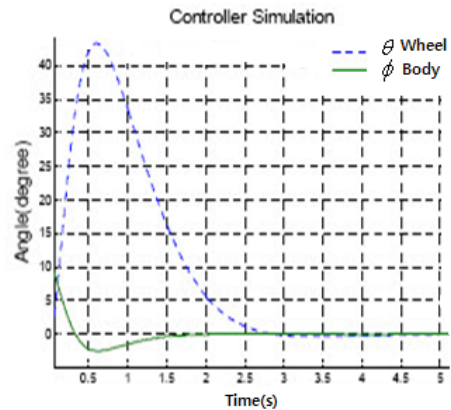


그림 5. 기울기 변화에 대한 시뮬레이션 결과

그리고 이륜 역진자 로봇의 제어를 위해 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 시스템에 적합한 선형 제어기인 LQR제어기^[11]를 MATLAB을 통하여 설계 하였으며, 그림 4에 나타내었다.

그림 5는 선형화된 Model과 LQR controller 설계에 따른 Test 결과로서, 초기에 몸체를 10°를 기울였다 놓았을 때 ϕ, θ 를 Simulink로 나타낸 결과로 0.5초내에 반응하여 자세를 유지함을 보였다

4. 경사면 등반

이륜 역진자 로봇이 경사지형을 등반 시 바퀴의 접점에서 역학적 힘이 발생하게 된다. 이 힘은 바퀴의 접합 점에서의 변화 또는 접합 면에 의해 발생하게 된다. 결국 이러한 힘의 변화는 이륜 역진자 로봇의 동작에 영향을 미치게 된다. 또한 경사진 면으로 올라갈 때의 운동은 평면의 진자 운동에서 지면이 기울어진 각 만큼 가해지는 중력방향의 힘을 더해 주어야 한다.

4.1 등반 시 필요조건

동역학적 시스템을 이끌어내기 전에 몇 가지 가정이 성립되어야 한다^[12].

- (1) 로봇은 지면이 고른 경사면에서의 x축과 y축에 대한 움직임만을 고려되어야 한다.
- (2) 시스템을 간략화 하기 위해서, 바퀴와 지면 사이의 마찰에 의한 손실은 없다고 가정한다.
- (3) 바퀴는 지면과 단 하나의 마찰부위를 가지고 있다.
- (4) 바퀴가 달린 몸체와 지표면은 단단한 물체라고 가정한다.

지금까지 이륜 역진자 로봇은 일반적으로 평평한 평지에서 실험이 주를 이루고 있지만, 본 논문에서는 경사가 존재하는 표면에서 이륜 역진자 로봇의 자세제어를 위해

다음의 그림 6과 같은 두 가지 상황을 고려하였다. 첫 번째 그림은 경사면의 길이방향으로 안정된 자세의 관점에서 경사각 허용한도를 그리고 두 번째 그림은 경사면의 수평방향에 대한 로봇의 자세제어를 나타내고 있다.

또한, 각각 경사면의 각도변화에 따른 모터에 얼마만큼의 추가적인 힘이 필요한지도 고려하였다.

기하학적 관계를 바탕으로 최대 허용 경사각도 ζ 는 아래의 식 (19)와 같이 결정 된다.

$$\zeta \leq \tan^{-1} \frac{L}{l + R_w} \tag{19}$$

예를 들어, 이륜 역진자 로봇의 파라미터 값 중 $l = 0.365$, $R_w = 0.09$, $L = 0.21$ 라면, 식 (19)에 따라 지면에서 로봇이 넘어지지 않게 하기 위해서는 최대 경사 각도를 24°가 초과하면 안됨을 알 수 있다. 또한, 평평한 평지와 경사가 있는 표면을 비교하기 위해서는 각각의 상황에 따라 2자유도 모델이 고려 되어야 한다. 평지의 2자유도 모델의 운동방정식은 단순화 3자유도 모델에 의해 결정되어지며 다음의 식 (20),(21)과 같다.

$$(3m_c + m_s)\ddot{x} - m_s l \cos \phi \ddot{\phi} + m_s l \sin \phi \ddot{\phi} = - \frac{\alpha_3 + \beta_3}{R_w} \tag{20}$$

$$-m_s l \cos \phi \ddot{x} + (m_s l^2 + I^3)\ddot{\phi} - m_s g l \sin \phi = -\alpha_3 - \beta_3 \tag{21}$$

코리올리 힘(The Coriolis force)과 회전동작과 관련된 것 들은 제외 후 경사면에서의 2자유도 모델은 다음의 식 (22),(23)과 같이 힘이 선형적으로 증가함을 보여준다.

$$(3m_c + m_s)\ddot{x} - m_s l \cos(\phi - \xi)\ddot{\phi} + m_s l \sin(\phi - \xi)\ddot{\phi} + (m_c + m_s)g \sin \xi = - \frac{\alpha_3 + \beta_3}{R_w} \tag{22}$$

$$-m_s l \cos(\phi - \xi)\ddot{x} + (m_s l^2 + I^3)\ddot{\phi} - m_s g l \sin(\phi - \xi) = -\alpha_3 - \beta_3 \tag{23}$$

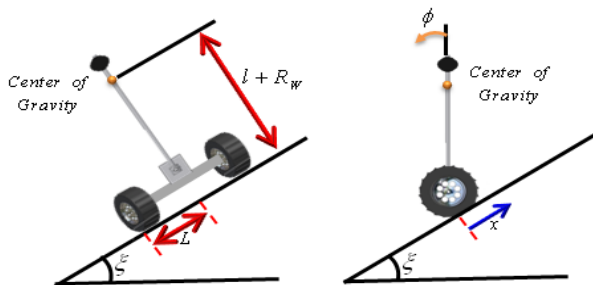


그림 6. 경사면 위의 이륜 역진자 로봇

다음 위의 두 운동 방정식을 비교 시 위치 x 를 제어하기 위해서 로봇이 $(m_c+m_s)g\sin\xi$ 만큼의 더 많은 힘이 증가 되어야 함을 보여주고 있으며 사인곡선의 관계는 ϕ 의 함수로 부터 $\phi - \xi$ 로 변경 되어짐을 알 수 있다. 이륜 역진자 로봇이 경사진 표면에서 자세를 유지하기 위해 요구되는 힘에 대해서도 시뮬레이션을 해보았으며, 그에 따른 결과는 그림 7에 나타내었다. 자세제어를 위해 모터에 요구되는 힘은 각도가 5°이내는 변화를 보이지 않았으나 경사면의 각도가 5°를 넘어서는 요구되는 힘이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

또한, 이륜 역진자 로봇이 평지에서 경사지형으로 등반 시 로봇의 바퀴와 경사지면의 접촉 면에서 발생 할 수 있는 외란에 대해서도 실험이 진행되었다. 아래의 결과는 로봇이 경사면을 인식하고 주행하였을 때와 그렇지 않은 경우에 대한 결과로서, 로봇이 경사를 인식하고 경사면을 주행했을 경우 이륜 역진자 로봇의 최대각도는 $\pm 15^\circ$ 정도 양호하였지만, 그렇지 않은 경우에는 $\pm 30^\circ$ 이상으로 로봇이 넘어지는 것을 확인할 수 있었다.

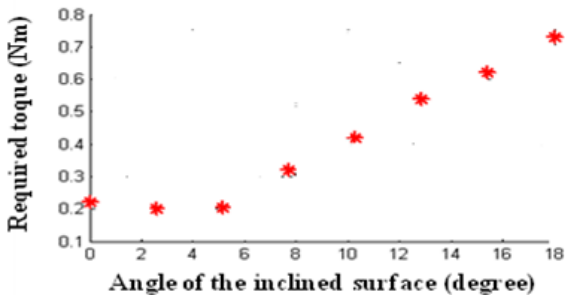


그림 7. 각도 변화에 따른 모터 출력

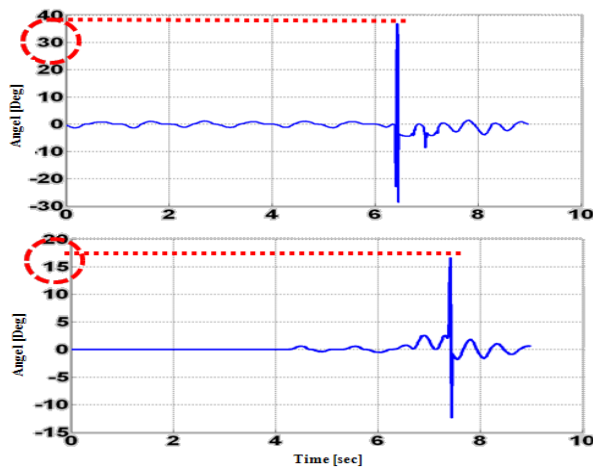


그림 8. 지면과 바퀴의 접촉 면에 대한 로봇의 영향

5. Attitude Reference System

이륜 역진자 로봇이 경사진 면으로 올라가는 경우 지면이 기울어진 각 만큼 가해지는 중력방향의 힘을 더해줘야 하며, 로봇이 수평방향으로 받는 힘이 평형일 때, 운동 방정식은 다음과 같다.

$$F = M_w \ddot{s} + M_w g \sin \alpha + f_c \cos \alpha - N \quad (24)$$

따라서, 지면의 기울어진 각 α 를 고려하여 역진자 로봇의 균형을 유지시키기 위한 운동방정식은 식(25)과 같다.

$$F = (M_w + M_B) \ddot{s} + M_B l \ddot{\phi} \cos \phi - M_B l \phi^2 \sin \alpha + M_w g \sin \alpha + f_c \cos \alpha \dot{s} \quad (25)$$

위 식은 비선형 운동 방정식이므로 동작 점 부근에서 선형화가 가능하다. 따라서 ϕ 를 아주 작은 값으로 가정하면,

$$\phi = 0 \quad (26)$$

$$\sin \phi = \phi \quad (27)$$

$$\cos \phi = 1 \quad (28)$$

식 (26),(27),(28)를 식(25) 대입하면, 식(29)을 얻을 수 있고,

$$F - M_w g \sin \alpha = (M_w + M_B) \ddot{s} + M_B l \ddot{\phi} + f_c \dot{s} \quad (29)$$

이를 통해 선형화 이전의 운동방정식과 비교하면 지면의 기울기 변화에 의해 가해지는 힘, 즉, $M_w g \sin \alpha$ 만큼 보상이 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

따라서, 어떠한 기울기 α 에서 $M_w g \sin \alpha$ 만큼 보상될 때 그 경사면에서 정지할 수 있는 조건을 만족할 수 있으며, 진행하고자 하는 방향으로 $M_w g \sin \alpha + \beta$ 를 더해줌으로써 β 의 기울기로 주행이 가능하다. 또한 β 의 속도 값은 ARS각도 변화에 따라 변경이 가능함을 알 수 있다.

6. 실험 및 검토

본 논문에서 제안하는 이륜 역진자 로봇 시스템의 구성

을 그림 9에서와 같이 나타내었다. 모바일 로봇은 두 개의 바퀴와 모터드라이버 그리고 MCU (Micro Controller Unit, DSP-28335), 자이로 및 가속도, 초음파 센서로 구성된다.

이론 역진자 로봇의 주행을 위한 실험은, 평지에서 외란을 가했을 경우와 기울기가 있는 환경에서 각각 5도씩 변경하면서 로봇의 최대허용 각도인 24도 이내인 20도까지 5m거리를 주행하는 실험으로 나뉘어서 진행하였다. 또한, 수평 계를 사용하여 지면이 경사져 있다는 것을 그림 10에서와 같이 나타내었다. 기존 4륜 역진자 로봇의 경우 로봇몸체에 기울기센서를 부착하여 현재의 기울기 정보를 추정 할 수지만 이론 역진자 로봇의 경우 기울어진 경사면에서도 바퀴를 중심으로 몸체가 수직으로 서기 때문에 현재의 기울기 정보를 알 수 없는 단점이 있어, 이론 역진자 로봇이 기울어진 경사면을 등반하는 데에 있어 큰 어려움이 있어왔다.

이러한 이론 역진자 로봇의 경우 현재의 기울기 정보를

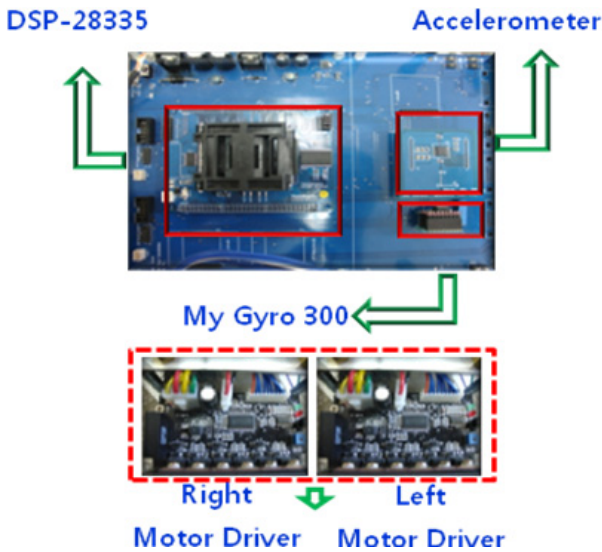


그림 9. 이론 역진자 로봇 시스템의 구성도



그림 10. 경사 지면의 등반주행을 위한 실험환경

알 수 없는 단점을 보완하고자 이론 역진자 로봇의 앞 부분에 초음파 센서를 부착하여 초음파 수신 시 현재의 지면과 로봇간의 거리로 각도정보를 추정할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 경사면에서도 이론 역진자 로봇의 주행이 가능하도록 하였다. 아래의 표 3은 초음파센서를 통한 거리에 대한 지면의 기울기를 변환한 값이다^[3].

평지에서 외란을 가해주었을 때 결과가 그림 12에 나타나 있으며, 그림 10과 같은 환경에서의 주행 실험 결과가 그림 13에서 그림 16에 나타내었다. 실험은 각 경사면에서

표 3. 초음파 센서와 경사면과의 거리를 각도로 변환

Angle (Degree)	Distance (Centimeter)	Time (us)
0 °	200cm 이상	Distance: 200cm Time: 11624us
5 °	10 cm	Distance: 009cm Time: 00560us
10 °	20 cm	Distance: 019cm Time: 01160us
15 °	30 cm	Distance: 029cm Time: 01732us
20 °	40 cm	Distance: 040cm Time: 02372us

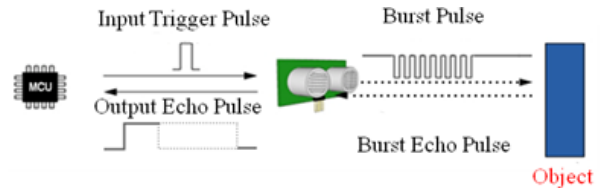


그림 11. 초음파센서를 이용한 거리측정 원리

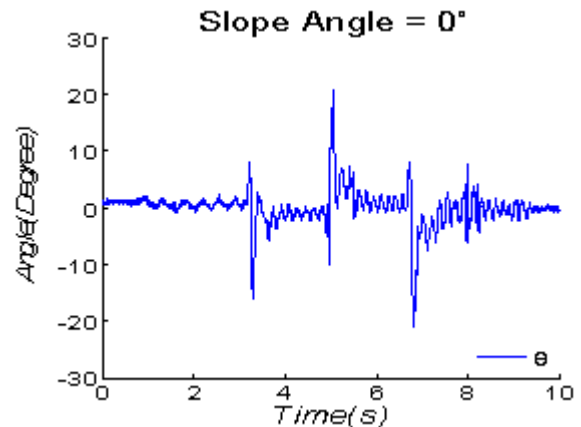


그림 12. 평지에서의 외란에 대한 영향

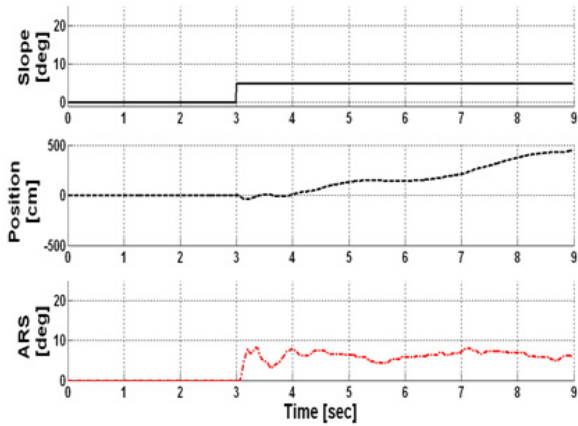


그림 13. 5도의 기울기에서의 주행

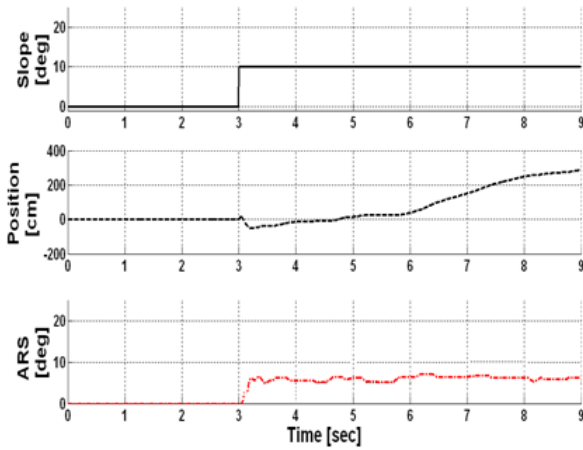


그림 14. 10도의 기울기에서의 주행

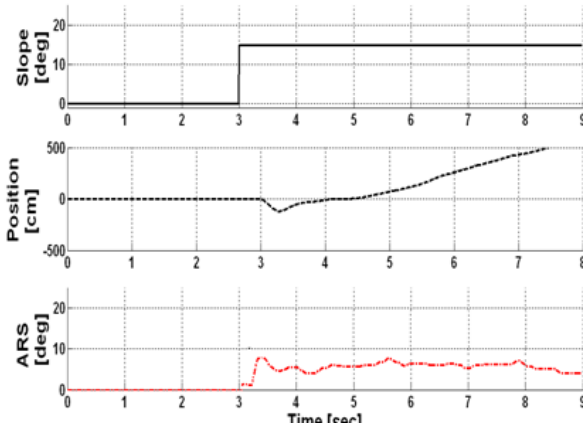


그림 15. 15도의 기울기에서의 주행

서 초음파 센서로부터 측정된 기울기에서 로봇에 임의로 5°의 가중치를 더해 이륜 역진자 로봇이 주행 될 수

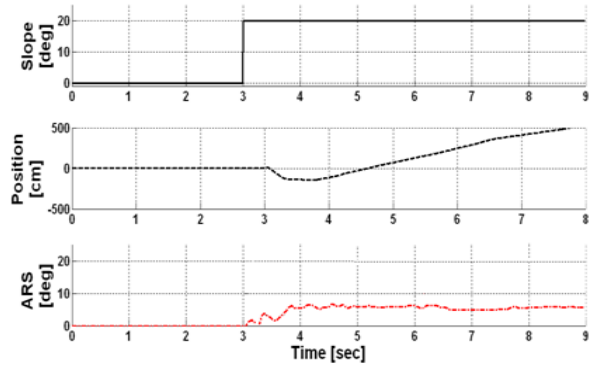


그림 16. 20도의 기울기에서의 주행

있게 하였으며, 등반이 완료된 시점에 다시 현재의 기울기에 수렴되게 하여 이륜 역진자 로봇을 경사면에 정지 시킬 수 있다. 아래에 보여지는 결과는 경사면에서 로봇이 5m을 10초간 주행하면서 나타나는 결과 값으로 위에서 순서대로 현재경사면의 각도, 주행거리 그리고 ARS를 통한 로봇의 각도 값을 나타내었다. 추가적으로 경사면의 기울기 변화에 대한 로봇의 이동속도를 그림 17에 나타내었다.

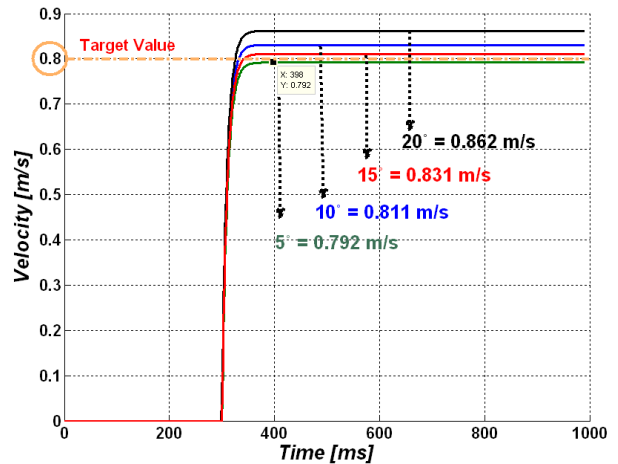


그림 17. 경사각 변화에 따른 로봇의 주행속도

표 4. 경사각 변화에 따른 속도변화

Slope Angle [Degree]	Target Angle [Degree]	Measured Average Velocity[m/s]
5°	5°	0.792 [m/s]
10°		0.811 [m/s]
15°		0.831 [m/s]
20°		0.862 [m/s]

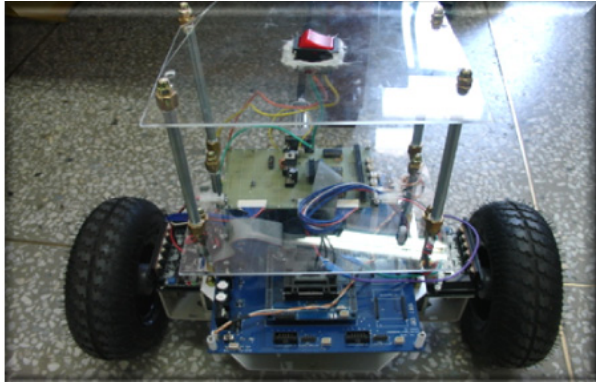


그림 18. 실제 이륜 역진자 로봇의 사진

7. 결론

본 논문은 기울기가 있는 환경에서 기울기센서 및 가속도센서 즉 ARS (Attitude Reference System)를 이용한 이륜 역진자 로봇의 등반을 목표로 하였다. 등반 시, 최적자세제어를 위한 이륜 역진자 로봇의 주행 알고리즘을 연구하였고 이륜 역진자 시스템의 특성을 고려하여 물리적 해석을 통해 동역학 방정식을 유도하고 경사면에서 이륜 역진자의 주행을 위해 초음파센서를 이용하여 지면의 기울기 정보를 획득하였다. 이 획득된 기울기 정보를 통해 역진자의 동작 점을 가변 함과 동시에 기울어짐에 따라 받는 중력의 힘을 보상하기 위하여 제어 입력에 가중치를 줌으로써 지면의 기울어짐에도 경사면의 각도에 따라 일정한 속도를 유지하면서 효과적으로 제어가 가능함을 위의 결과값들을 통하여 확인하였다. 이륜 역진자 로봇은 지면의 평탄도에 민감하기 때문에 지면이 고르지 못한 환경에서 자세제어를 하기 위해선 지면의 평탄도 측정이 실시간으로 요구된다. 이를 보상하기 위한 알고리즘과 강인한 제어 방법^[14-16]에 대한 연구를 향후 수행 할 계획이다.

참고문헌

- [1] H. Azizan, M. Jafarinasab, "Fuzzy control based on LMI approach and fuzzy interpretation of the rider input for two wheeled balancing human transporter," IEEE Proceedings of the 2010 8th International Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 192 - 197.
- [2] K. M. Goher, M. O. Tokhi, "A new configuration of two wheeled vehicles: Towards a more workspace and motion flexibility," IEEE Proceedings of the 4th International Systems Conference, 2010, pp. 524-528.
- [3] W. Zhong, H. Rock, "Energy and Passivity Based Control of the Double Inverted Pendulum on a Cart," IEEE Proceedings of the 2001 International Conference on Control Applications, pp. 896 - 901.
- [4] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi and A. C. Ruffer, "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114, 2002.
- [5] D. Voth, "Segway to the Future autonomous mobile robot," IEEE Intelligent Systems, Vol. 20, No.3, pp. 5-8, 2005.
- [6] 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.
- [7] S. S. Kim, S. Jung, "Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 297-303, 2008.
- [8] H. J. Lee, S. Jung, "Gyro sensor drift compensation by Kalman filter to control a mobile inverted pendulum robot system," IEEE ICIT, pp. 1026-1031, 2009.
- [9] O. C. Heo, K.H. Park, "Estimating Accelerated Body's Attitude Using an Inertial Sensor," ICCAS-SICE, pp. 5474-5478, 2009.
- [10] Y. S. Ha, "Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 65-80, 1996.
- [11] X. Xin, W. Zhou, "The The Simulation of Double Inverted Pendulum Control Based on Particle Swarm Optimization LQR Algorithm," ICSESS, pp. 253-256, 2010.
- [12] Z. Kausar, K. Stol and N. Patel, "Performance Enhancement of a Statically Unstable Two Wheeled Mobile Robot Traversing on an Uneven Surface," IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics, 2010, pp. 156-162.
- [13] H. N. Kim, H. J. Ha, "A study on the obstacle avoidance using ultrasonic sensors for a mobile

- robot,” KIIS Proceedings of Spring Conference, Vol. 20, No. 1, pp. 526-534, 2010.
- [14] Z. Li, Y. Yang, “Robust adaptive motion/force control for wheeled inverted pendulums,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 46, No. 5, pp. 1346-1353, 2010.
- [15] K. Pathak, J. Franch and S. K. Agrawal, “Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization,” IEEE Transaction on Robotics, Vol. 21, No. 3, pp. 505-513, 2005.
- [16] X. Ruan, J. Chen, “ H_{∞} Robust Control of Self-Balancing Two-Wheeled Robot,” WCICA, pp. 6524-6527, 2010.



이 장 명

1980 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982 서울대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 1990 미국 남가주대학교(USC) (공학박사)

1992~현재 부산대학교 전자 전기 통신 공학부 교수
 관심분야: 지능로봇 시스템 제어, 마이크로 프로세서 응용, 특수환경 Localization 및 Navigation



권 영 국

2006 한국교육개발원 전자공학(공학사)
 2009~현재 부산대학교 전자 전기공학과 석사과정 재학중

관심분야: Mobile inverted pendulum, Humanoid robot, HRI, Motor control.