

직렬 탄성 구동기를 이용한 이륜 모바일 로봇의 구현

Design of a Two-Wheeled Mobile Robot Using Series Elastic Actuators

김혁주¹, 이영삼^{1*}
(Hyeokju Kim¹ and Young Sam Lee^{1*})

¹Department of Electrical Computer Engineering, Inha University

Abstract: In this paper, we propose a method to implement a new type of two-wheeled mobile robot equipped with active suspension control using series elastic actuators to maintain vehicle body stability while moving in an uneven environment. First, the design structure of the robot incorporating a series of elastic actuators was described. Then, a model in which the acceleration of the robot body is the control input of the system was derived to ensure robust balance control of the robot. For active suspension control, we derived a mathematical model of a series elastic actuator based on Newton's law. The proposed robot uses the pitch angle obtained from the IMU sensor to achieve balance control and uses a Linear Quadratic Regulator (LQR) controller to obtain the input acceleration required for stabilization. In the active suspension control, a series of elastic actuators is applied to the legs of the robot to measure the external force transmitted from the road surface to the wheel while moving, and the impedance controller is applied accordingly. The output value from the impedance controller serves as a reference for the ball screw up and down movement speed to control the speed of the DC motor. Finally, from experimentation, it was found that the mobile robot using the proposed method maintains good balance for both the pitch angle and roll angle on an uneven surface.

Keywords: series elastic actuator, balancing robot, active suspension control, linear quadratic regulator

I. 서론

최근 도심 교통난 해소, 친환경, 레저에 대한 사회적 관심이 증대됨에 따라 이동이나 레저 목적의 퍼스널 모빌리티 대중화가 빠르게 진행되고 있다. 이러한 변화는 향후 1인 가구의 증가 및 전기자동차와 결합한 형태로 장거리 이동수단은 전기자동차, 복잡한 도심 이동수단은 퍼스널 모빌리티로 수요가 계속 증가할 것으로 예측된다. 퍼스널 모빌리티를 분류하는 기준은 명확하지는 않지만 다양한 형태의 제품이 출시되고 있으며, 일반적으로 전기자전거, 전기 이륜차뿐만 아니라 One-wheel, Two-wheel, 전동킥보드, 세그웨이류 등이 범주에 포함된다[1]. 이러한 퍼스널 모빌리티는 공학적인 관점에서 살펴보면 모바일 로봇에 해당한다. 그중 2개의 바퀴를 가진 형태를 이륜 모바일 로봇이라고 하며 보조 바퀴 없이 스스로 무게중심을 유지하며 원하는 목표로 주행할 수 있도록 한다.

이륜 모바일 로봇의 종류에는 대중적으로 잘 알려진 세그웨이(Segway)사의 Ninebot과 최근 출시한 Loomo와 같은 퍼스널 모빌리티가 있다[2,3]. Ninebot은 2001년에 도입된 첫 번째 self-balancing, 전기 구동방식의 교통수단 장치이다. 세그웨이의 경우 구동부가 양옆의 두 바퀴로만 구성되며 탑승자의 무게중심을 바꾸는 방식으로 움직이기 때문에 특별한 기술 없이 누구나 사용할 수 있는 혁신적인 제품으로 주목받았다[4]. 그러한 이유는, 기존의 4륜 차량보다 2륜 플랫폼은 운

전에 대한 제약 조건이 적어 좁은 공간에서 쉽고 효율적으로 이동이 가능하기 때문이다. 그러나 기존에 연구된 이륜 모바일 로봇은 그 구조와 현가장치의 부재로 인해 운용하는 장소에 따라 비포장도로 혹은 바위와 자갈이 많은 오프로드(off-road) 상황에서 탑승자의 승차감과 차량 운행의 안정성을 크게 무너뜨리고, 그로 인해 모바일 로봇의 제어 안정성 또한 보장할 수 없게 되는 문제점이 존재한다[5].

이를 해결하기 위해 다양한 환경에서 이륜 모바일 플랫폼의 안정성 확보를 위해서 많은 연구가 진행되었는데, 그중에서도 특히, 2010 미국 방위 고등 연구 계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 프로젝트에서 소개된 IHMC(Institute for Human and Machine Cognition) Robotics Lab의 Tbot은 이라크와 아프가니스탄의 미군 병사를 대체할 수 있는 이륜 모바일 플랫폼으로 계단과 자갈길 같은 노면 상황에서의 안정적 주행 연구 결과를 보여주었다[6]. 또한, 취리히 연방 공과 대학교에서는 모바일 로봇에 무릎 관절을 결합함으로써 실내 환경을 위해 작게 설계된 점핑 로봇 Ascento를 개발하여 장애물과 둔덕 등을 극복하는 결과를 보여주었다[7].

본 논문에서는 불규칙한 노면에서 탑승자와 로봇의 안정성 문제, 그리고 주행 중 노면에서 발생할 수 있는 충격의 종류 중 impulse에 가까운 충격 상황의 제어에서 구동기의 파손을 막기 위해서 하드웨어 구성에 직렬 탄성 구동기(SEA,

* Corresponding Author

Manuscript received May 19, 2020; revised June 8, 2020; accepted June 29, 2020.

김혁주: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 대학원생(power940509@gmail.com, ORCID[®] 0000-0001-7343-6639),

이영삼: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 교수(lys@inha.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-0665-1464)

Series Elastic Actuator)를 장착한 이륜 모바일 로봇의 구현 방법을 제안한다[8]. 전통적으로 사용된 견고한 구동기와는 달리, 탄성 요소가 기존 구동기와 직렬로 결합하여 있는 형태인 직렬 탄성 구동기는 모터와 부하 사이에 스프링이 직렬로 배치되어 있어 외부 충격에서 구동기를 보호할 수 있고, 구동기의 출력 또한 부하에 직접적인 타격을 주지 않는다는 장점이 있다. 그리고 스프링의 압축 길이를 계산하여 로봇 다리에 가해지는 외력을 추정할 수 있다는 장점이 있고, 스프링의 압축 길이를 사용하여 외력이 작용하는 반대 방향으로 적절한 출력을 생성할 수 있다. 따라서 모바일 로봇의 현가 제어에 있어 다양한 제어 기법을 적용할 수 있다[9]. 이 밖에도 직렬 탄성 구동기는 재활 및 착용형 로봇 연구 분야에서도 적극적으로 채용하기 시작하여, 다양한 연구 결과물들을 보였으며, 성능보다는 안정성에 초점을 두는 친 인간적 구동 기술로서 연구되고 있다[10-14,20-21].

본 논문에서는 현가장치의 부재로 인해 오프로드 상황에서 모바일 로봇의 제어 안정성을 보장할 수 없는 문제점을 해결하기 위해 직렬 탄성 구동기와 Hogan이 제안한 impedance controller를 이용하여 외력을 받는 로봇 다리의 힘을 상쇄할 수 있는 형태의 능동형 현가장치 제어 구조를 제안한다 [15]. 그리고 로봇의 균형 제어기에는 가속도를 입력으로 갖는 모델 기반의 LQR 제어기를 이용하여 가장 기본적인 주행에 대한 제어를 진행한다. 제안하는 구동기와 제어기의 구현으로 가속도를 입력으로 갖는 이륜 모바일 로봇이 장애물 혹은 오프로드 상황에서 안정적인 주행성능을 보이며, 탑승자 혹은 차체의 안정성을 개선할 수 있을 것으로 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 절에서는 이륜 모바일 로봇 시스템의 하드웨어 설계 및 구현 방법을 기술하고, III 절에서는 오일러-라그랑주(Euler-Lagrange) 및 뉴턴(Newton) 역학을 이용한 이륜 모바일 로봇의 운동학적 특성을 기술한다. IV절에서는 이륜 모바일 로봇에 적용되는 LQR과 Impedance Force Control 제어기 설계에 대해 다룬다. V절에서는 제안된 방법을 실제 시스템에 적용하여 안정화 제어와 현가 제어 실험을 수행하고 제어 성능을 살펴본다. 마지막으로 VI절에서 결론을 맺는다.

II. 하드웨어 설계

직렬 탄성 구동기가 포함된 이동 모바일 로봇의 모습은 그림 1과 같다. 상부에는 로봇의 제어를 위한 마이크로 컨트롤러와 모터 드라이버 그리고 주변 회로들로 이루어져 있다. 그리고 이륜 모바일 로봇에 사용되는 구동기는 크게 로봇의 균형 및 주행을 담당하는 바퀴 구동부와 로봇의 다리에 장착되는 직렬 탄성 구동기로 나누어져 있는데, 실제 구동원이 되는 DC 모터와 구동축은 풀리와 벨트를 통해 체결한다.

1. 바퀴 구동부

바퀴에는 Maxon motor 사의 43:1 기어드 DC 모터를 사용하고, 바퀴의 축과 DC 모터의 축은 그림 2와 같이 풀리와 벨트를 이용하여 체결한다. 벨트의 인장강도가 약할 경우 발생하는 백래쉬(backlash)는 균형 제어 성능에 악영향을 끼치기 때문에 유동적으로 기어의 위치를 조절하도록 설계하여야 한다.

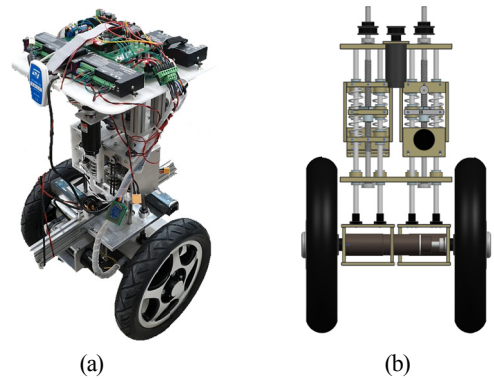


그림 1. (a) 이륜 모바일 로봇의 실제 사진, (b) 이륜 모바일 로봇의 정면 이미지.

Fig. 1. (a) Picture of two-wheeled mobile robot, (b) Frontal image of two-wheeled mobile robot.

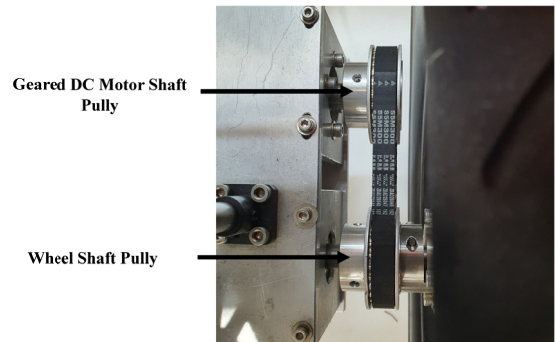


그림 2. 바퀴 축과 모터 축이 체결된 사진.

Fig. 2. Picture of the wheel shaft and the motor shaft.

2. 직렬 탄성 구동기(Series Elastic Actuator)

1995년 G. A. Pratt과 M. M. Williamson에 의해 처음 제안된 직렬 탄성 구동기의 블록 다이어그램은 모터와 기어 그리고 스프링과 부하로 이루어져 있다[8]. 그림 3의 블록 다이어그램을 바탕으로 설계한 로봇의 다리는 그림 4와 같으며 각각 실제 구동부에 해당하는 Motor & Screw 부, 다리에 가해지는 외력을 추정하고 외부의 충격을 완화해주는 Spring 부, 노면을 주행하는 Load 부로 나누어 진다.

직렬 탄성 구동기의 상하 운동을 위해서 2 mm의 리드를 가지는 볼-스크류와 Maxon motor 사의 DC 모터를 사용하고, 스크류의 축과 DC 모터의 축은 풀리와 벨트를 이용하여 체결한다.

Motor & screw 부와 Load 부 사이의 스프링은 $k = 10,585.28$ [N/m]의 탄성 계수를 가지며, 최대 인가 외력을 고려하여 길이를 압축한 후 체결하여 별도의 장치 없이 안정적으로 고정되도록 한다. 총 4개의 스프링이 직렬로 연결되고, 스프링

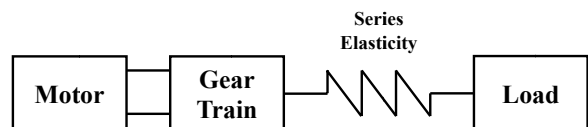


그림 3. 직렬 탄성 구동기의 블록 다이어그램.

Fig. 3. Block diagram of series-elastic actuator.

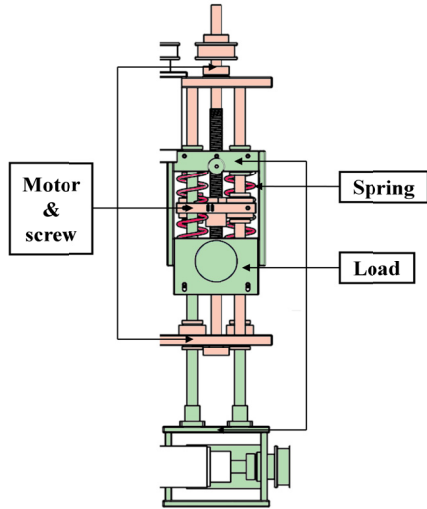


그림 4. 이륜 모바일 로봇의 다리 구동기 구성.
Fig. 4. Construction of the leg actuator for a two-wheeled mobile robot.

을 이용한 외력 측정을 위해서 Motor & screw 부와 Load 부 사이에 엔코더(Encoder)를 설치한다. 사용하는 DC 모터의 최대 토크는 0.187Nm이고, 볼-스크류 사이의 기어비는 10:9를 사용하며 볼-스크류가 스프링에 인가할 수 있는 최대 힘은 식 (1)과 같다.

$$F = \frac{\tau * N_p * 2\pi}{l} = \frac{0.187 * 0.9 * 2\pi}{0.002} = 528.73N \quad (1)$$

식 (1)에서 계산된 힘을 통해 압축되는 스프링의 길이를 구하면 식 (2)와 같다.

$$4k = 42,341.12[N/m]$$

$$x = \frac{F}{k} \quad (2)$$

$$x = 12.487[mm]$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 엔코더를 이용하여 최대 -12.478 ~ 12.478 [mm] 범위의 미세 변위를 측정해야 한다. 따라서 Autonics 社의 5000 pulse 분해능을 가지는 엔코더를 채택하여 스프링의 미세 변위를 측정한다. 최종적인 힘 측정의 분해능은 $\frac{2*\pi}{5000*4}[rad/mm] * 4.46[mm/rad] * 42.341[N/mm] = 0.059327[N/pulse]$ 으로 얻어진다.

III. 모델링

제안하는 이륜 모바일 로봇은 크게 균형 제어를 위한 동역학 모델과 능동 현가 제어를 위한 로봇 다리 기준의 동역학 모델로 모델링 한다.

1. 균형 제어를 위한 동역학 모델

균형 제어를 위해서는 오일러-라그랑주 역학을 이용하여 이륜 모바일 로봇 시스템의 수학적 모델을 기술한다. 수학적 모델은 아래의 가정을 기반으로 기술한다.

- (1) 이륜 모바일 로봇의 질량은 무게중심(COG: Center Of Gravity)에 집중되어 있다.

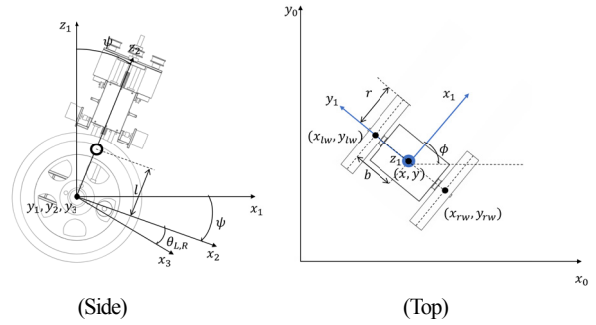


그림 5. 이륜 모바일 로봇의 균형 주행을 위한 좌표계.
Fig. 5. The coordinate system for balancing control of two-wheeled mobile robot.

표 1. 이륜 모바일 로봇에 사용되는 변수와 의미.

Table 1. Meanings of the parameter used in two-wheeled mobile robot.

ϕ	로봇의 heading angle
ψ	Pitch angle
$\theta_{L,R}$	바퀴의 회전각
l	로봇의 무게중심과 바퀴중심을 연결하는 축과의 거리
r	바퀴의 반경
b	바퀴간 거리의 절반
(x, y)	두 바퀴를 연결하는 축의 중심좌표
(x_{lw}, y_{lw})	왼쪽 바퀴가 지면과 닿는 점의 좌표
(x_{rw}, y_{rw})	오른쪽 바퀴가 지면과 닿는 점의 좌표
x_c, y_c, z_c	로봇의 무게중심의 좌표

(2) 로봇에 바퀴 축에 작용하는 마찰력은 무시한다.

그림 5의 Frame $o_1x_1y_1z_1$ 는 두 바퀴의 중심을 연결하는 축의 중간에 원점을 갖는 frame으로 z_0 축을 기준으로 ϕ 만큼 회전한 좌표계이다. 본 논문에서는 robot heading frame이라 한다. Frame $o_2x_2y_2z_2$ 는 로봇에 부착된 robot body frame이고 frame $o_3x_3y_3z_3$ 에 부착된 wheel frame이다. 기하학적 parameter들의 의미는 표 1과 같다. 표에서 사용된 좌표는 모두 inertial reference frame 기준의 좌표이다[16].

오일러-라그랑주 역학은 식 (3)과 같이 표현된다[17]. 라그랑지안(Lagrangian) L 은 식 (4)과 같다. 여기서 K 는 이륜 모바일 로봇 시스템의 운동에너지, P 는 위치에너지를 나타낸다. 또한 q 는 일반화 좌표(x, y, z)를 뜻하며, τ 는 보존력이 아닌 일반화된 힘을 뜻한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$L = K - P \quad (4)$$

식(5)는 이륜 모바일 로봇의 운동에너지에 대한 식이며, 각각 로봇의 몸체(body)와 바퀴(wheels)의 병진운동에너지와 회전운동에너지의 합으로 구해진다. 식(6)는 로봇의 위치에너지를 나타낸 식이다. 로봇의 바퀴는 항상 지면에 닿아 있기 때문에 위치에너지(P)는 몸체에 의한 위치에너지로 표현된다.

$$\begin{aligned}
K &= K_{body} + K_{wheel}, \\
K_{body} &= K_{body,trans} + K_{body,rot}, \\
K_{wheels} &= K_{wheels,trans} + K_{wheels,rot}, \\
K_{body} &= \frac{1}{2}m_c(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2) \\
&\quad + \frac{1}{2}I_y\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}I_x\sin^2\psi\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}I_z\cos^2\psi\dot{\phi}^2, \\
K_{wheel} &= \frac{1}{2}m_w(\dot{x}_{rw}^2 + \dot{y}_{rw}^2) + \frac{1}{2}m_w(\dot{x}_{rw}^2 + \dot{y}_{rw}^2) \\
&\quad + I_m\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}I_w(\dot{\theta}_R + \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}I_w(\dot{\theta}_L + \dot{\psi})^2,
\end{aligned} \tag{5}$$

$$P = m_c g(r + l \cos \psi), \tag{6}$$

식 (3)-(6)에서 nonholonomic 제약조건을 소거한 이륜 모바일 로봇의 동적 모델을 선형화 하면 최종적으로 다음과 같은 선형화된 모델 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta}_R \\ \ddot{\theta}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_c g l \psi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\tau_R + \tau_L) \\ \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기서 $m = m_c + 2m_w$, $I_\psi = m_c l^2 + I_y + 2I_w$ 라고 하면 $D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{22}, D_{23}, D_{33}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
D_{11} &= mr^2 + 2rm_c l + I_\psi, \\
D_{12} &= \frac{mr^2}{2} + \frac{rm_c l}{2} + I_w, \\
D_{13} &= \frac{mr^2}{2} + \frac{rm_c l}{2} + I_w, \\
D_{22} &= \frac{r^2(mb^2 + I_z + 2I_m + 2m_w b^2)}{4b^2} + I_w, \\
D_{23} &= \frac{r^2(mb^2 - I_z - 2I_m - 2m_w b^2)}{4b^2}, \\
D_{33} &= \frac{r^2(mb^2 + I_z + 2I_m + 2m_w b^2)}{4b^2} + I_w,
\end{aligned} \tag{8}$$

여기서 g 는 중력가속도 상수, m_c 는 로봇 몸체의 질량, m_w 는 바퀴 1개의 질량, I_x, I_y, I_z 는 로봇 몸체의 body frame 기준의 x 축, y 축, z 축을 기준으로 계산한 회전 관성모멘트, I_m, I_w 는 바퀴의 wheel frame 기준의 y 축과 z 축을 기준으로 계산한 회전 관성모멘트이다.

식 (7)-(8)을 이용해 만들어진 최종 상태 방정식은 식(9)에 나타난다. 상태 변수에 해당하는 $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 는 각각 pitch 축 각도, 각속도, 직선 방향 속도, 가속도 이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -(\beta_2 \alpha_1 - \beta_1 \alpha_2) & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ 1 \end{bmatrix} u \tag{9}$$

$$x_1 = \psi,$$

$$x_2 = \dot{\psi},$$

$$x_3 = \dot{s} = v,$$

$$x_4 = \dot{v} = u,$$

$$\alpha_1 = \frac{m_c g l (mr^2 + 2I_w)}{\gamma},$$

$$\alpha_2 = -\frac{(m_c r l)^2 g}{\gamma},$$

$$\beta_1 = \frac{2mr^2 + 4I_w + rm_c l}{\gamma},$$

$$\beta_2 = -\frac{r(2rm_c l + I_\psi - 2I_w)}{\gamma},$$

$$\beta_3 = \frac{rb}{r^2(I_z + 2I_m + 2m_w b^2) + 2I_w b^2},$$

$$\gamma = r^2(m_c^2 l^2 - I_\psi m - 2I_\psi I_w + 2I_w m).$$

2. 능동 현가제어를 위한 로봇 다리 동역학 모델

직렬 탄성 구동기가 포함된 로봇 다리의 블록도는 그림 6과 같다.

직렬 탄성 구동기는 기본적으로 2-질량 시스템이며 동역학 모델은 모터, 스프링, 하중 시스템과 같은 3가지 동역학의 조합으로 해석할 수 있다. 직렬 탄성 구동기의 전달함수 블록도는 그림 7에 나타나 있고, 이를 식으로 나타내면 식 (10)-(12) 과 같다[18].

$$\begin{aligned}
m_M &= m_m + m_s \\
m_M \ddot{x}_M + b_M \dot{x}_M &= f_M - f_L
\end{aligned} \tag{10}$$

$$K_S(x_M - x_L) = f_L \tag{11}$$

$$m_L \ddot{x}_L + b_s \dot{x}_L = f_L + f_{ext} \tag{12}$$

m_m 은 DC 모터가 포함된 로봇 상체 부분의 질량을 나타내며, m_s 는 볼-스크류의 너트가 가지는 질량이다. 따라서 이 둘을 모두 포함한 m_M 을 1개의 질량체로 두고 분석한다. b_M 과 b_L 은 각각 모터가 포함된 로봇의 상체, 스프링이 포함된 load 부의 감쇠 계수를 의미한다. f_M 은 DC 모터를 통해 가해지는 힘, f_L 은 스프링의 변위를 통해 측정되는 load에 가해지는

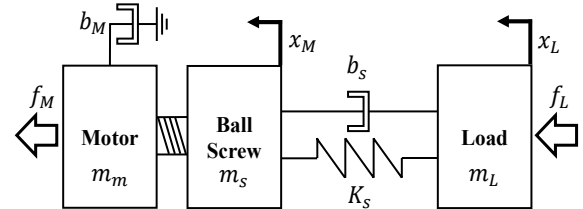


그림 6. 직렬 탄성 구동기가 포함된 로봇 다리의 블록도.
Fig. 6. Block diagram of robot's leg with series elastic actuator.

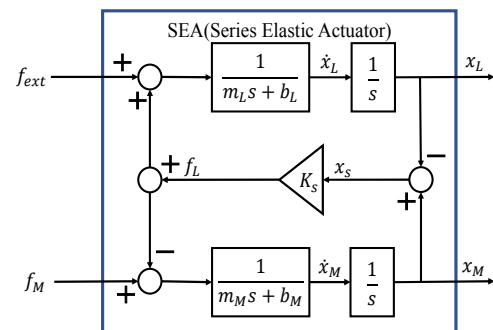


그림 7. 직렬 탄성 구동기의 전달함수 블록도.

Fig. 7. Block diagram of the transfer function of the series elastic actuator.

표 2. 이륜 모바일 로봇에 사용되는 변수와 의미.

Table 2. Meanings of the parameters used in two-wheeled mobile robot.

m_M, m_L	SEA 상부의 질량, 하부의 질량
b_M, b_L	모터의 damping 계수, load의 damping 계수
f_{ref}, f_L	Reference 힘, SEA를 통해 측정되는 힘
f_M, f_{ext}	볼-스크류를 통해 가해지는 힘, 바퀴에 전해지는 외력
x_M, x_L, x_S	SEA 상부의 변위, load의 변위, 스프링의 변위
$\dot{x}_M, \dot{x}_L, \dot{x}_S$	SEA 상부의 속도, load의 속도, 스프링의 속도
K_S	스프링의 탄성 계수
v_{ref}, v_M	DC 모터의 reference 속도, 측정된 볼-스크류의 속도
τ_M	DC 모터의 토크 출력
m_l, b_l, k_l	Impedance model의 계수

그림 10는 능동 현가 제어기에 대한 제어 구성 블록도이고, 오른쪽 박스는 그림 7에 해당하는 직렬 탄성 구동기의 시스템 모델, 왼쪽 박스는 속도 입력을 위한 폐루프(closed-loop) 속도 제어기이다. 사용되는 변수는 표 2에 나타나 있다. 그리고 impedance controller의 전달함수 $G(s)$ 는 식 (19)와 같다.

$$G(s) = \frac{v_{ref}(s)}{f_{err}(s)} = \frac{1}{m_l s^2 + b_l s + k_l} \quad (19)$$

힘 제어를 위해서는 직렬 탄성 구동기를 통해 측정된 힘, f_L 과 reference 힘, f_{ref} 의 오차를 impedance controller 블록의 입력으로 사용하고 속도 reference를 출력으로 받아 속도 제어기에 사용한다. Impedance 모델의 계수는 $m_l = 0, b_l = 4, k_l = 4$ 로 설정하고, 이를 통해 능동 현가 제어를 구현한다. DC 모터의 속도 제어기에는 PI 제어기를 사용하여 간단한 형태의 제어로 범용성을 넓힌다.

V. 실험 및 결과

IV절에서 설계한 제어기를 바탕으로 균형 제어기와 능동 현가 제어기의 실험을 진행하고 그 결과를 확인한다.

1. 균형 제어기 실험

가속도를 입력으로 갖는 모델 기반의 LQR 제어기를 사용하여 로봇의 균형 제어를 진행한다. 그림 11에서 보이는 로봇 측면의 바퀴 축을 기준으로 측정된 각도를 pitch축으로 정의하고, 모바일 로봇의 reference 각도는 0°로 설정하며 균형

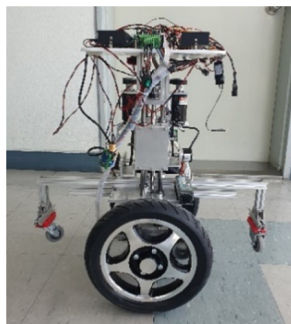


그림 11. 이륜 모바일 로봇의 균형 제어 모습(측면).
Fig. 11. Balancing control of a two-wheeled mobile robot (side view).

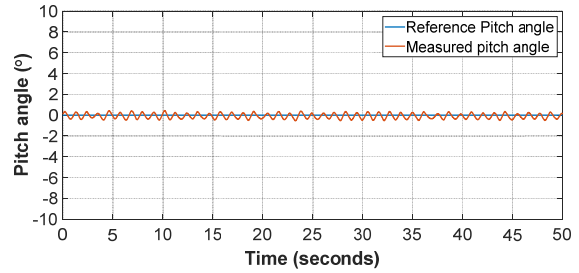


그림 12. 이륜 모바일 로봇의 균형 제어 그래프.
Fig. 12. Balancing control graph of a two-wheeled mobile robot.

제어 실험 결과는 그림 12와 같다.

그림 11의 결과를 살펴보면 reference 각도를 기준으로 0.5° 내의 limit cycle을 가지고 있으며 일정 시간이 지나도 안정적인 제어 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

2. 능동 현가 제어기 실험

능동 현가 제어기 실험에서는 앞서 진행한 균형 제어와 동시에 impedance controller를 통해 만들어지는 출력 경로에 따라 볼-스크류의 속도를 제어하는 능동 현가 제어를 진행한다. 실험은 그림 13과 같이 로봇은 정면 방향으로 주행하며 오른쪽 쪽 다리에 3cm 높이의 둔덕이 존재하는 노면 환경으로 구성되었다.

주행 시작 후 5초가 되는 시점에 둔덕을 지나가기 시작하며, 실험의 정확성을 높이기 위해 총 5번의 동일한 실험을 진행하였다.

먼저 능동 현가 제어가 포함되지 않고 균형 제어만 진행한 경우를 살펴보면, 그림 14(a)에서 5초가 되는 시점부터 측정되는 힘이 감소하기 시작하며 7.5초가 되었을 때 힘의 크기가 일정 해진다. 따라서 로봇은 7.5초에 경사로의 끝부분에 도착했음을 알 수 있다. 이때 측정되는 오른쪽 다리에서 받는 힘의 크기, F_R 은 약 -12N이다. 식 (14)에서 설명한 내용을 토대로 힘을 통해 추정되는 이륜 모바일 로봇의 roll 방향 각도는 $\theta = -\frac{b}{lmg} * F_R = 4.3^\circ$ 이고, 사용되는 파라미터는 $m = 18[kg], g = 9.8[m/s^2], l = 0.31[m], b = 0.34[m]$ 이다. 따라서, 그림 14(b)에 미루어 봤을 때 정확한 실험환경이 구성되었음을 알 수 있다.

능동 현가 제어를 적용한 경우, 로봇이 경사로의 끝에 도착하고 2.5초 이내에 볼-스크류의 속도제어를 진행하여 roll 각도가 평행에 도달하는 것을 확인할 수 있다[그림 14(b)]. 그림 15(a)-(c)는 5회의 실험에 대한 평균 측정값을 나타낸 그

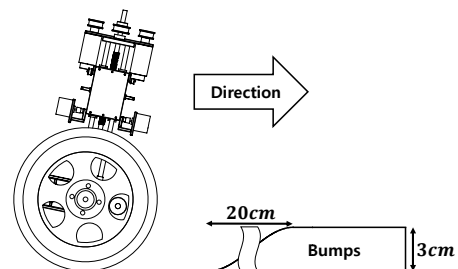


그림 13. 능동 현가 제어 실험환경 구성.
Fig. 13. Experimental setup for active suspension control.

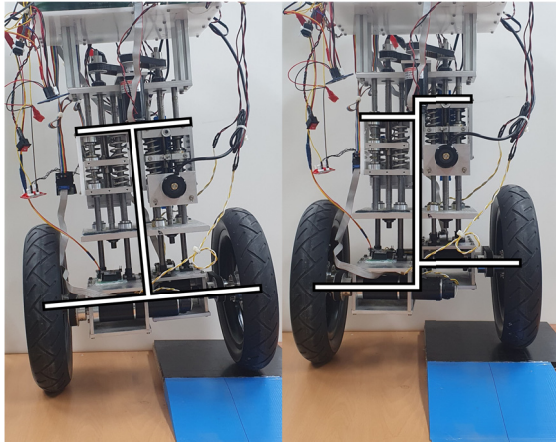


그림 14. 능동 현가 제어가 진행된 이륜 모바일 로봇(좌측: 비제어 시스템, 우측: 제어 시스템).

Fig. 14. Two-wheel mobile robot with active suspension control (Left: Not controlled system, Right: Controlled system).

래프이다. 힘은 스프링을 통해 측정되었으며, Roll 각도와 Pitch 각도는 IMU 센서를 통해 측정되었다.

그림 15 (d)는 능동 현가 제어와 동시에 진행되는 균형제어의 성능을 위한 pitch 방향의 각도 그래프이다. 둔턱을 만나지 않은 0~5초 구간에서는 정면 방향의 주행을 위해 로봇이

진행 방향으로 기울어 있는 모습을 볼 수 있다. 5초 이후 경사로의 끝에 도달한 로봇은 0°에 가까운 limit cycle을 보이며 안정적인 제어 성능을 보인다.

VI. 결론

본 논문은 노면이 고르지 않은 환경에서 이륜 모바일 로봇이 차체의 안정성과 균형을 유지하면서 주행할 수 있도록 직렬 탄성 구동기를 이용한 새로운 형태의 모바일 로봇과 능동 현가 제어를 구현하는 방법을 제안하였다. 먼저 로봇의 균형 제어에는 오일러-라그랑주 모델 방정식 기반의 수학적 모델 유도 방식을 이용한 모델 기반 LQR 제어를 사용하여 로봇의 pitch 각도가 reference 각도인 0°를 유지하도록 제어하였다. 제안된 수학적 모델은 구동기의 전기적인 모델 방정식이 포함되지 않기 때문에 구동기 파라미터 불확실성에 강인한 제어를 설계하는데 용이하다. 또한 속도 제어기만 구성할 수 있으면 전체 제어를 구성할 수 있으므로, 주행로봇의 구동기 선정 혹은 교체에 있어 선택의 다양성을 가질 수 있다.

로봇 다리의 능동 현가 제어에는 직렬 탄성 구동기를 통해 얻는 외력을 이용하여 Newton's law 기반의 impedance control 제어를 구현하였다. 기존의 일반적인 힘 제어는 사용하는 구동기 특히 DC 모터의 경우 시스템에 토크 입력을 전달하여 제어하는 형태이지만, 제안된 시스템은 직렬 탄성 구동기

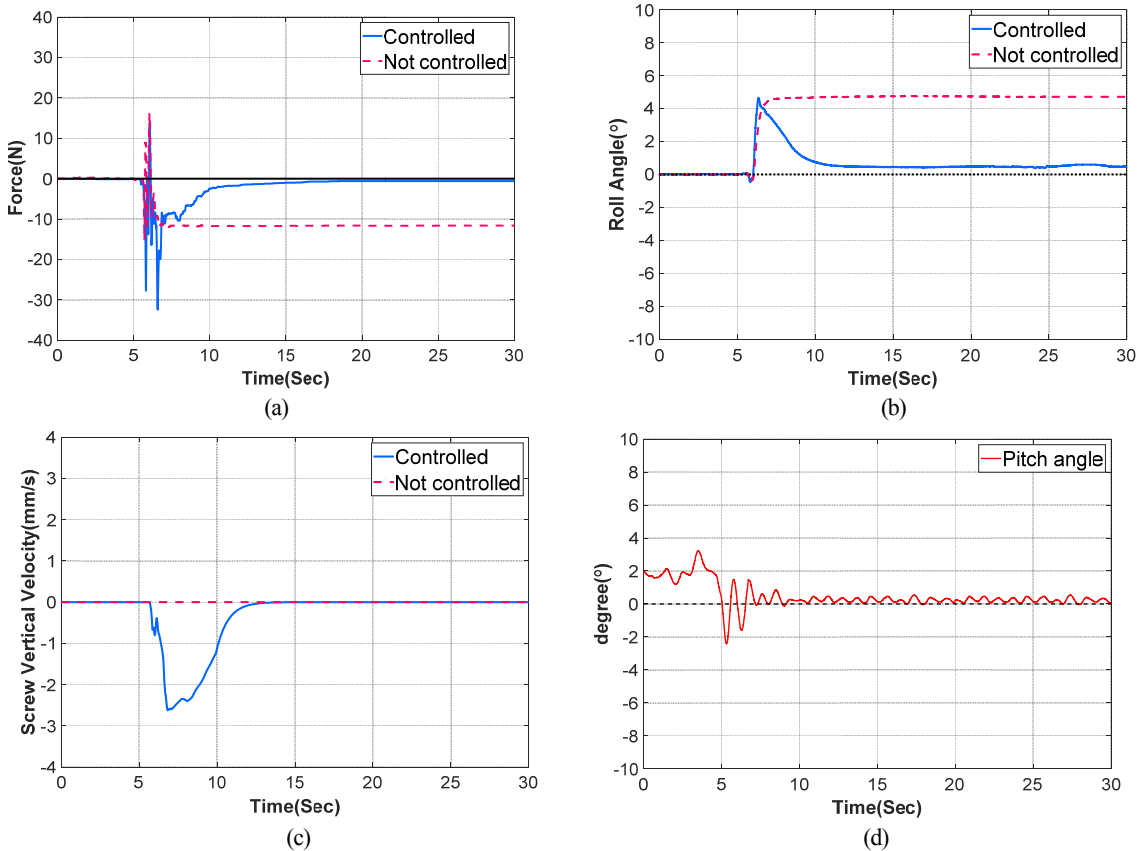


그림 15. 이륜 모바일 로봇의 능동 현가 제어 그래프((a) 힘 측정, (b) Roll 방향 각도 측정, (c) 볼-스크류 입력 속도 측정, (d) Pitch 방향 각도 측정).

Fig. 15. Active suspension control graph of a two-wheeled mobile robot ((a) Force measurement, (b) Roll angle measurement, (c) Ball-screw input speed measurement, (d) Pitch angle measurement).

에 의해 측정되는 힘을 설치된 DC 모터의 속도 제어기의 출력을 시스템의 입력으로 취급하는 방식으로 제어를 진행함으로써 제어의 안정성을 확보한다. 이를 통해 제안하는 이륜 모바일 로봇이 원하는 목적에 따라 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 또한 기존에 연구된 이륜 모바일 로봇들은 그 구조와 현가장치의 부재로 인해 오프로드 주행에서 주행 품질의 저하와 불안정성의 문제를 유발하게 되는 것과는 달리, 오프로드 주행에서도 안정성을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 노면의 성질에 따른 impedance 모델에 대한 능동적 설정이 가능하기 때문에 향후 실제 노면 주행 제어 문제에 확장성을 가진다.

REFERENCES

- [1] S. H. Oh and S. H. Lee, "The industrial revitalization of personal mobility," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 37, no. 1, pp. 50-56, 2015.
- [2] "Segway Ninebot," <http://www.segway-ninebot.kr/>.
- [3] "Loomo Personal Robot," <https://www.segway.com/loomo/>.
- [4] Sawatzky, Bonita, et al., "The segway personal transporter as an alternative mobility device for people with disabilities: a pilot study." *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 88, no.11, pp. 1423-1428, 2007.
- [5] K. Hirata and T. Murakami, "A realization of step passage motion in two-wheel wheelchair systems utilizing variable repulsive compliance control," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1-6, 2013.
- [6] "IHMC T-bot," <https://www.ihmc.us/>.
- [7] "ETHZ Ascento," <https://www.ascento.ethz.ch/>.
- [8] Pratt, Gill A. and Matthew M. Williamson, "Series elastic actuators," *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, vol. 1, pp. 399-406, 1995.
- [9] H. N. Yun, et al., "High speed segway control with series elastic actuator for driving stability improvement," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 11, pp. 5449-5459, 2019.
- [10] K. M. Kim and Y. S. Lee, "Implementation of mass-independent impedance control for RFSEA using a linkage arm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 104823-104832, 2019.
- [11] Pratt, Jerry E. and Benjamin T. Krupp, "Series elastic actuators for legged robots," *Unmanned Ground Vehicle Technology VI, International Society for Optics and Photonics*, vol. 5422, pp. 135-144, 2004.
- [12] E. Campbell, Z. C. Kong, W. Hered, A. J. Lynch, M. K. O'Malley, and J. McLurkin, "Design of a low-cost series elastic actuator for multi-robot manipulation," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5395-5400, 2011.
- [13] S. Y. Lee, B. S. Kim, J. B. Song, and S. W. Chae, "Force control of robot fingers using series elastic actuators," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 10, pp. 964-969, 2012.
- [14] C. Lee and S. H. Oh, "Trends in series elastic actuator research," *Robot and human (In Korean)*, vol. 16, no. 4, pp. 10-17, 2019.
- [15] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation," *Robot proc. Amer. Control Conf.*, pp. 304-313, 1984.
- [16] J. Y. Choi and Y. S. Lee, "The controller implementation of a balancing robot using a system model with acceleration as the input," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 24, no. 1, pp. 16-25, 2018.
- [17] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, New York, Wiley, 2006.
- [18] S. H. Oh and K. C. Kong, "High-precision robust force control of a series elastic actuator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 71-80, 2016.
- [19] D. W. Robinson, "Design and analysis of series elasticity in closed-loop actuator force control," PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [20] J. C. Park, H. K. Kim, and H. J. Choi, "Development of a mobile application for monitoring wearable robots," *Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 207-208, 2019.
- [21] Dae-Geon Lee, Gab-Soon Kim, "Development of thigh-link integrated hip-joint torque sensor for walking aid robot," *Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 549-554, 2020.



김혁주

2019년 인하대학교 전기공학과 졸업.
2019년~현재 인하대학교 전기컴퓨터공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 로봇 공학, 최적제어, 비선형 시스템 제어.

이영삼

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제 15권 제 4호 참조.