

# 선형 작업 영역 확장 구조를 가진 두 바퀴 구동 모바일 로봇에 대한 연구

## Study of a Two-wheel Mobile Robot with Linear Workspace Extension Structures

배 영 겐, 정 슬\*  
(Yeong-Geol Bae<sup>1</sup> and Seul Jung<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Mechatronics Engineering Department, Chungnam National University

**Abstract:** This paper presents a two-wheel balancing mobile robot with linear workspace extension structures. The two-wheel mobile robot has two linear motions at the waist and shoulder to have extended workspace. The linear motion of the waist and shoulder provides some structural advantages. A dynamic equation of the simplified robot system is derived. Simulation studies of the position control of the robot system are performed based on the dynamic equations. The dynamic relationship between a two-wheel mobile system and linear extension mechanism is observed by simulation studies.

**Keywords:** workspace extension structures, balancing mobile robot, dynamic relationship

### I. 서론

최근에 가정에서 가사를 도와주는 서비스 로봇에 대한 관심이 높아졌지만 현재 가정용 서비스 로봇은 청소로봇과 같이 제한된 기능과 움직임이 단순한 로봇들이 대부분이다 [1-3]. 이러한 로봇들은 매니플레이션 기능을 갖추고 있지 않아 할 수 있는 역할이 한정되어 사용자의 기대를 충족시키지 못하고 있다.

매니플레이션 기능을 갖춘 서비스 로봇에 대한 관심이 높아지면서 이동로봇에 매니플레이션 기능이 추가된 모바일 매니플레이터 형태의 서비스 로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4-7]. 특히 모바일 매니플레이터 형태의 대표적인 서비스 로봇으로 가정에서 가사를 도와주는 서비스 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-11].

가사지원 서비스 로봇의 경우는 상대적으로 복잡하고 좁은 실내 환경에서 운용되므로 개발함에 있어 가장 먼저 고려해야 할 점이 있다면 작업 영역과 로봇의 크기, 그리고 안정성이라는 좁은 공간에서의 효율적인 이동성이다.

협소한 공간에서의 이동성 향상을 위해 옴니휠이나 두 바퀴 구조가 사용되고 있다. 제자리 회전이 가능하여 좁은 공간에서의 효율적인 움직임을 보이는 두 바퀴 구동형 이동로봇에 대한 시스템들이 관심을 받고 있다[12,13].

대부분의 가정용 서비스 로봇은 식탁이나 싱크대 등과 같이 일정한 높이에서의 작업을 고려하고 있다. 하지만 수납장과 같은 높은 위치에 대한 작업이 필요할 수도 있으며, 바닥에서의 작업이 필요한 경우도 있다. 특히 한국은 전통적인 바닥 문화를 갖고 있어 바닥 공간에서의 서비스 작업이 더욱 필요하다. 작업 영역을 넓히는 방법으로 간단하게 팔 길이를 길게 하거나 허리를 굽히는 방법을 생각할 수 있으나 팔 길이가 길어지는 것은 고성능 모터를 필요로 하거나 불필요한 모듈이 추가되는 단점을 갖고 있으며 허리를 굽히는 방법은 무게중심 변화로 인해 시스템 안정성에 영향을 주며 매니플레이터의 끝단의 위치 및 자세가 변경되므로 제어를 위해서 추가적인 보정이 필요하다.

본 논문에서는 두 바퀴 구동 방식의 밸런싱 이동 로봇과 로봇의 안정성에 대한 영향 및 로봇의 크기 변화를 최소화 하는 작업 영역 확장 구조를 제안하고 이에 대한 동적 특

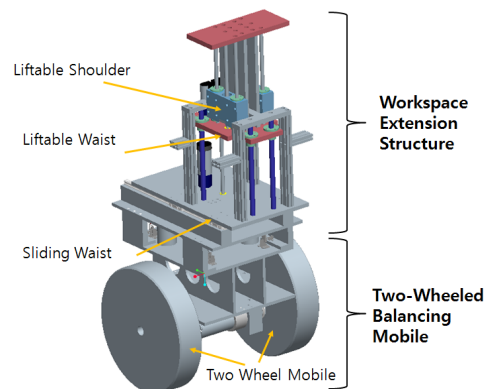


그림 1. 밸런싱 모바일 로봇.  
Fig. 1. Balancing mobile robot.

\* Corresponding Author

Manuscript received November 15, 2014 / revised January 15, 2015 / accepted February 25, 2015

배영겐, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(dinoyg@empal.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 상기 논문은 2014 ICROS 대전총청지부 학술대회에서 초안이 발표되었음[14].

※ 본 논문은 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업 (NIPA-2012-H1502-12-1002) 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

성을 분석하였다.

그림 1에 보여진 것처럼 상하 작업 영역의 확장을 위해 어깨와 허리에 리프팅 구조를 추가하였으며, 로봇 상체부에 슬라이딩 구조를 적용하여 앞뒤의 작업 영역을 확장하였다. 확장된 밸런싱 모바일 로봇의 동역학식을 유도하여 각 구조의 위치 제어 및 자세 제어에 대한 시뮬레이션을 수행하고 각 구조의 상호간에 미치는 동적인 영향을 분석하였다.

**II. 작업 영역 확장 메커니즘**

일반적으로 로봇의 상하 작업 영역을 높이는 방법으로 굽힘 구조가 있으나 무게 중심의 변화에 영향을 받는 두 바퀴 구조의 이동 로봇과의 조합은 시스템의 제어 성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 굽힘 구조가 아닌 선형 이동 구조를 적용하여 로봇의 작업 영역을 바닥에까지 넓힐 수 있는 구조를 제안하였다. 상하 확장 구조는 무게중심의 변화 없이 매니퓰레이터의 상하 작업 영역을 넓힐 수 있으며 전후 슬라이딩 구조는 로봇의 앞, 뒤로의 작업 영역을 넓혀 줌과 동시에 시스템의 무게중심점 보상을 위해 사용된다.

**1. 상하 작업 영역 확장 구조**

가사지원 서비스 로봇은 기본적인 테이블 높이뿐만 아니라 바닥에까지 그 작업 영역이 미치는 것이 필요하다. 그림 2는 어깨부분에 높이 조절 기능을 추가하여 높은 곳에서 낮은 곳까지 작업이 가능한 설계를 보여준다. 두 어깨는 독립적으로 구동이 가능하며 이동 범위는 170mm이다. 두 번째 구조는 그림 3의 허리를 조절하는 것으로 로봇의 상체 전부를 상하로 이동하도록 하는 구조를 적용하였다. 평소에는 제일 작은 낮은 자세를 유지하여 시스템이 차지하는 공간을 최소화하며, 필요에 따라 높이 조절 기능을 이용하여

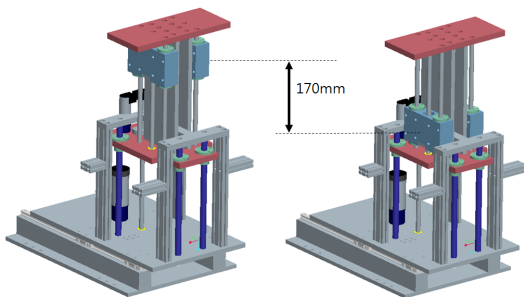


그림 2. 어깨 높이 조절 구조.  
Fig. 2. Shoulder extension structure.

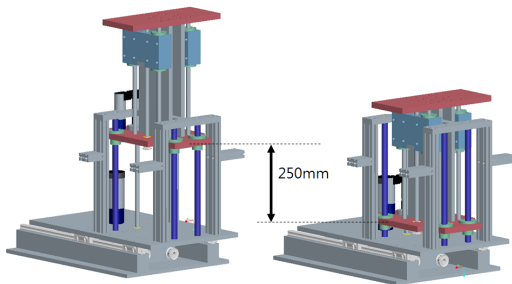


그림 3. 허리 높이 조절 구조.  
Fig. 3. Waist extension structure.

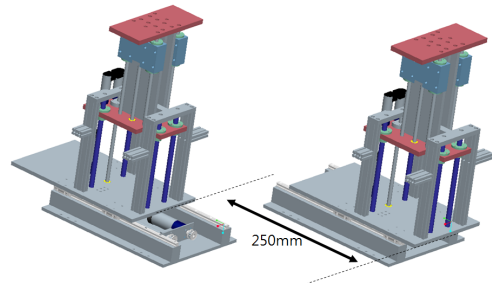


그림 4. 허리 슬라이딩 구조.  
Fig. 4. Waist sliding structure.

높은 곳의 작업도 가능하게 한다. 허리 높이 조절부의 이동 가능 범위는 250mm이다.

**2. 전후 작업 영역 확장 구조**

로봇의 앞뒤 방향의 작업 영역을 확장하고 바닥 작업을 원활하게하기 위하여 그림 4와 같이 로봇의 상체를 앞뒤로 슬라이딩할 수 있는 구조를 적용하였다. 로봇의 상체를 최대한 앞으로 이동하여 더 넓은 바닥 작업공간을 확보할 수 있으며, 밸런싱 자세 제어에서 무게 중심점의 이동이 필요한 경우 보정제어가 가능하다. 슬라이딩 구조의 이동거리는 최대 250mm 이다.

**III. 로봇 동역학 모델링**

그림 5는 밸런싱 모바일 로봇의 좌표를 나타내고 표 1은 각 변수의 정의를 보여준다. 상하로 길이 변형이 가능한 허

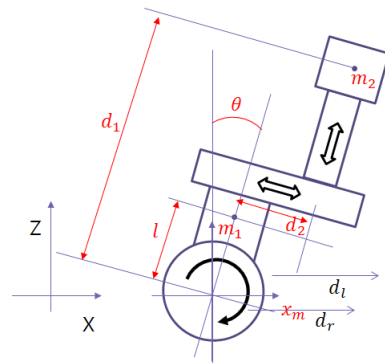


그림 5. 확장 구조를 포함한 밸런싱 이동로봇의 동역학 모델.  
Fig. 5. Dynamic model of a balancing mobile robot with extension structures.

표 1. 로봇의 변수.

Table 1. Model parameters of the robot.

Symbol	Unit	Description
$x_m, y_m$	[m]	이동로봇의 위치
$d_r$	[m]	오른쪽 바퀴의 이동거리
$d_l$	[m]	왼쪽 바퀴의 이동거리
$\theta$	[rad]	카트의 기울어진 각도
$m_i, m_w$	[Kg]	카트 및 바퀴의 무게
$l$	[m]	바퀴축과 무게중심까지 거리
$r_w$	[m]	바퀴의 반지름
$I_i$	[Kgm <sup>2</sup> ]	이동로봇의 관성모멘트
$\tau_r, \tau_l$	[Nm]	각 바퀴의 토크

리와 어깨의 구조를 길이가 변화되는 하나의 구조로 가정하고 이동로봇의 회전에 대한 움직임을 구속하여 직선 운동만을 하는 상태로 가정하였다. 로봇의 움직임을 XZ 평면 상으로 제한한 것으로 Y축으로의 이동이 없으며 Heading angle은 항상 0°인 상태로 가정하였다.

그림 5에 나타난 밸런싱 이동로봇의 기구학은 다음과 같다.

$$P_{m1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(d_r + d_l)}{2} + l \sin \theta \\ 0 \\ l \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_{m2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \sin \theta + d_2 \cos \theta + \frac{d_r + d_l}{2} \\ 0 \\ d_1 \cos \theta - d_2 \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

각 링크의 선속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{(\dot{d}_r + \dot{d}_l)}{2} + \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_1 &= 0 \\ \dot{z}_1 &= -\dot{\theta} \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= (\dot{d}_1 - d_2 \dot{\theta}) \sin \theta + (\dot{d}_2 + d_1 \dot{\theta}) \cos \theta + \frac{\dot{d}_r + \dot{d}_l}{2} \\ \dot{y}_2 &= 0 \\ \dot{z}_2 &= \dot{d}_1 \cos \theta - d_1 \dot{\theta} \sin \theta - \dot{d}_2 \sin \theta - d_2 \dot{\theta} \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

위의 기구학 식을 기반으로 운동에너지와 위치에너지를 이용하는 라그랑지안 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$T_m = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}^2 \quad (5)$$

$$T_w = \frac{1}{2} m_w \dot{d}_r^2 + \frac{1}{2} m_w \dot{d}_l^2 \quad (6)$$

$$U = m_1 g l \cos \theta + m_2 g (d_1 \cos \theta - d_2 \sin \theta) \quad (7)$$

$$L = T_m + T_w - U \quad (8)$$

위의 라그랑지안 함수를 편미분 및 미분하면 다음과 같이 정리된다.

$$M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = E \tau \quad (9)$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(m_1 + m_2 + 4m_w) & \frac{1}{4}(m_1 + m_2) & M_{13} & \frac{1}{2} m_2 \sin \theta & \frac{1}{2} m_2 \cos \theta \\ \frac{1}{4}(m_1 + m_2) & \frac{1}{4}(m_1 + m_2 + 4m_w) & M_{23} & \frac{1}{2} m_2 \sin \theta & \frac{1}{2} m_2 \cos \theta \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & -m_2 d_2 & m_2 d_1 \\ \frac{1}{2} m_2 \sin \theta & \frac{1}{2} m_2 \sin \theta & -m_2 d_2 & m_2 & 0 \\ \frac{1}{2} m_2 \cos \theta & \frac{1}{2} m_2 \cos \theta & m_2 d_1 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_{13} = M_{23} = \left( \frac{1}{2} m_1 l \cos \theta - \frac{1}{2} m_2 d_2 \sin \theta + \frac{1}{2} m_2 d_1 \cos \theta \right)$$

$$M_{31} = \left( \frac{1}{2} m_1 l \cos \theta - \frac{1}{2} m_2 d_2 \sin \theta + \frac{1}{2} m_2 d_1 \cos \theta \right)$$

$$M_{32} = \left( \frac{1}{2} m_1 l \cos \theta - \frac{1}{2} m_2 d_2 \sin \theta + \frac{1}{2} m_2 d_1 \cos \theta \right)$$

$$M_{33} = (m_1 l^2 + m_2 d_2^2 + m_2 d_1^2 + (I_1 + I_2))$$

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ 2m_2 d_1 \dot{d}_1 \dot{\theta} + 2m_2 d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta} \\ -2m_2 \dot{\theta} \dot{d}_2 - m_2 d_1 \dot{\theta}^2 \\ 2m_2 \dot{d}_1 \dot{\theta} - m_2 d_2 \dot{\theta}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H_1 = H_2 = -\frac{1}{2} m_1 l \dot{\theta}^2 \sin \theta + m_2 \dot{d}_1 \dot{\theta} \cos \theta - m_2 \dot{d}_2 \dot{\theta} \sin \theta - \frac{1}{2} m_2 d_2 \dot{\theta}^2 \cos \theta - \frac{1}{2} m_2 d_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_1 g l \sin \theta \\ m_2 g \cos \theta \\ -m_2 g \sin \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_w} & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기에서,  $q = [d_r, d_l, \theta, d_1, d_2]^T$  이며  $M(q) \in R^{5 \times 5}$  은 관성행렬,  $H(q, \dot{q}) \in R^{5 \times 1}$  은 코리올리스 및 원심력 행렬,  $G(q) \in R^{5 \times 1}$  은 중력행렬,  $E(q) \in R^{5 \times 4}$  은 제어 입력 변환 행렬,  $\tau \in R^{4 \times 1}$  은 제어 토크이다. 각 성분들은 다음과 같이 정의된다.

#### IV. 시뮬레이션

위에서 구해진 동역학식을 기반으로 2자유도 작업영역 확장 구조를 포함한 모바일 시스템의 자세 제어 및 위치 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6은 시뮬레이션을 위한 제어기의 구성도이다. 밸런싱 각도 제어기, 모바일의 위치 제어기, 슬라이딩 위치 제

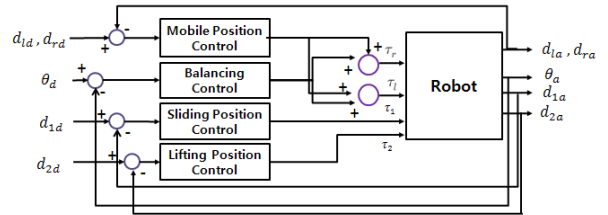


그림 6. 시뮬레이션을 위한 제어기 구성.

Fig. 6. Control block for simulation.

표 2. 시뮬레이션을 위한 변수.

Table 2. Simulation parameters.

$d_{rd}$	Desired right wheel position
$d_{ld}$	Desired left wheel position
$\theta_d$	Desired balancing angle
$d_{1d}$	Desired sliding position
$d_{2d}$	Desired lifting position
$d_{ra}$	Actual right wheel position
$d_{la}$	Actual left wheel position
$\theta_a$	Actual balancing angle
$d_{1a}$	Actual sliding position
$d_{2a}$	Actual lifting position
$\tau_r$	Right wheel control torque
$\tau_l$	Left wheel control torque
$\tau_1$	Sliding control torque
$\tau_2$	Lifting control torque

여기, 리프팅 위치 제어기로 구성되며 밸런싱 자세 제어에는 PD제어기, 이동로봇의 위치 제어, 슬라이딩 구조와 리프팅 구조의 위치 제어에는 PID제어기를 사용하였다.

그림 6의 시물레이션에서 사용된 PID 및 PD 제어기의 제어입력은 다음과 같이 정의하였다.

$$u = k_p e + k_d \dot{e} + k_i \int e dt \quad (14)$$

$k_p, k_d, k_i \in R^{1 \times 5}$  는 PID 제어기 게인이다.

표 2는 시물레이션을 수행하기 위하여 정의된 제어기를 구성하는 변수를 정리한 것이다.

1. 밸런싱 제어 시물레이션

그림 7은 로봇이 서비스 작업을 시작할 때 로봇의 기본 자세가 완벽히 균형 잡히지 않은 상태에서 안정적으로 초기화를 할 수 있는가에 대한 시물레이션 결과이다.

초기 조건으로 로봇의 자세가 5° 기울어진 상태를 설정한 후 로봇의 자세 제어 시물레이션을 수행하였다. 그림 7(b)와 같이 순간적으로 로봇의 위치 변화가 발생하며 그때의 모멘트로 인해 그림 7(a)와 같이 로봇의 자세가 제어되는 것을 확인할 수 있다.

2. 로봇의 경로 제어 시물레이션

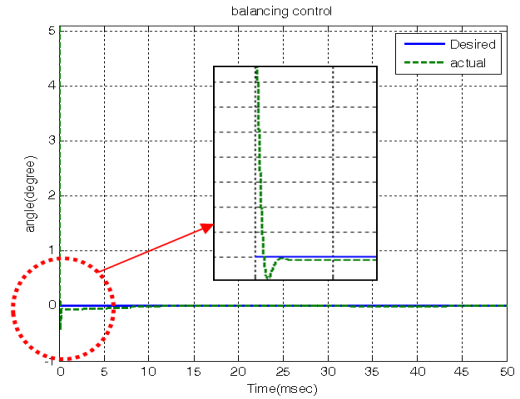
로봇이 안정적인 초기화를 하는 과정에서 모바일의 위치 변화가 발생하는 경우 자세의 균형을 유지함과 동시에 경로를 추종할 수 있는가에 대한 시물레이션을 수행하였다. 그림 8은 초기에 로봇의 자세가 5° 기울어진 상태로 시작하여 5초 후에 추가로 모바일의 경로를 설정한 경우의 시물레이션 결과이다. 초기의 움직임은 그림 7의 시물레이션 결과와 동일하나 경로가 생성될 때 그림 8(a)와 같이 밸런싱 각도에 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 그림 8(b)에서 볼 수 있듯이 위치 제어의 응답이 잠시 느려지는 것을 확인할 수 있다. 이후 밸런싱 제어가 안정되면서 다시 위치가 원하는 경로로 수렴함을 확인하였다.

3. 로봇 상체의 리프팅 제어 시물레이션

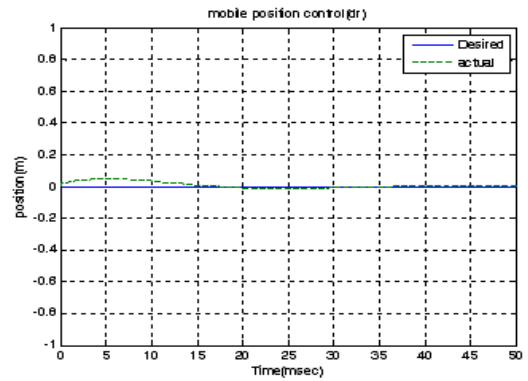
그림 9는 로봇의 자세가 5° 기울어진 초기 조건, 5초 후 로봇 경로 발생 조건과 더불어 리프팅 구조의 위치에 변화가 있을 때의 제어 시물레이션 결과이다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이 안정된 상태에서의 제어 오차의 범위를 유지하면서 위치의 변화를 추종하는 모습을 확인할 수 있으며 Z 축으로의 이동이라는 특성으로 인해 다른 구조에 미치는 영향이 특별히 나타나지 않았음을 확인하였다.

4. 로봇 상체의 슬라이딩 제어 시물레이션

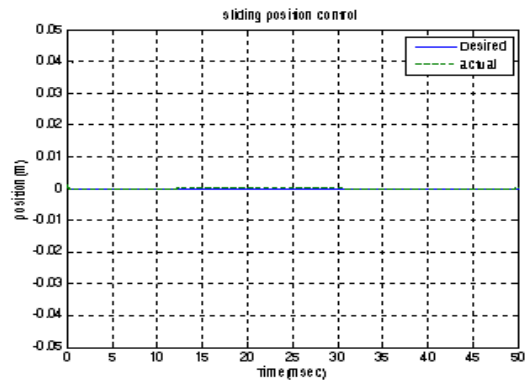
그림 10은 로봇의 자세가 5° 기울어진 초기 조건, 5초 후 로봇 경로 발생, 10초 후 리프팅 구조의 위치 변화, 그리고 20초 후 슬라이딩 구조에도 위치 변화가 발생하는 경우의 제어 시물레이션 결과이다. 로봇 시스템의 모든 구조가 구동되는 상황에서의 시물레이션 결과이므로 시스템의 동적 특성을 가장 확실하게 확인할 수 있는 시물레이션이다. 그림 10(a)를 살펴보면 정확한 위치까지 도달하였으나 정상상태 오차가 발생하고 있으며 그림 10(b),(c)에서 슬라이딩 구조의 오차로 인해 발생한 무게중심의 변화가 밸런싱 모바일의 자세 제어와 위치 제어에도 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 슬라이딩 구조의 움직임은 시



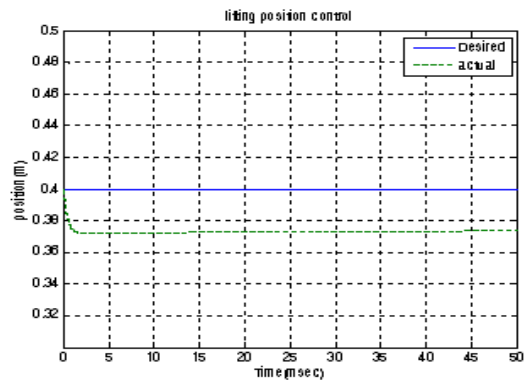
(a) Balancing angle.



(b) Mobile position.



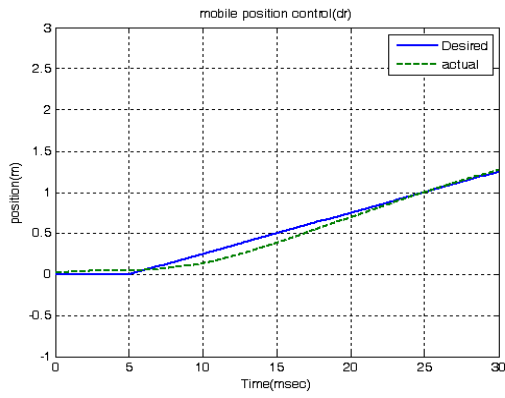
(c) Sliding position.



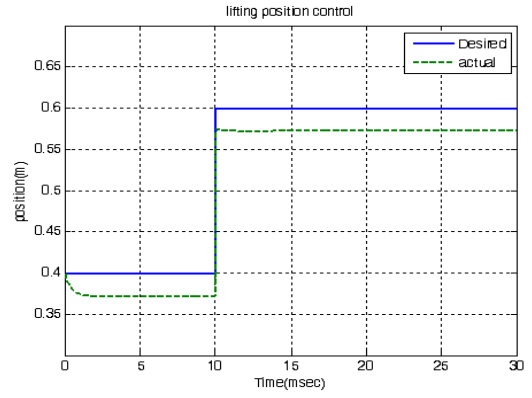
(d) Lifting position.

그림 7. 밸런싱 제어 시물레이션 결과.

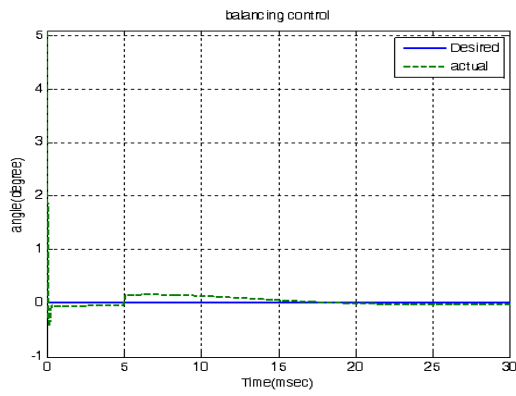
Fig. 7. Result of balancing control simulation.



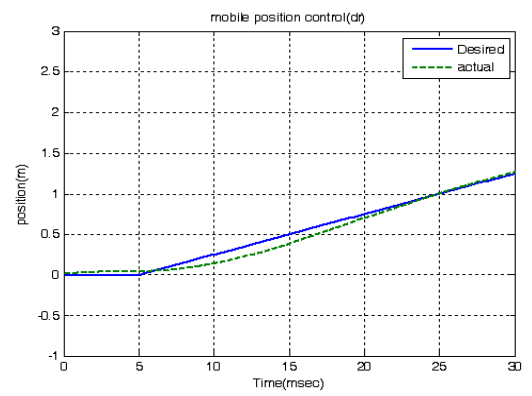
(a) Mobile position.



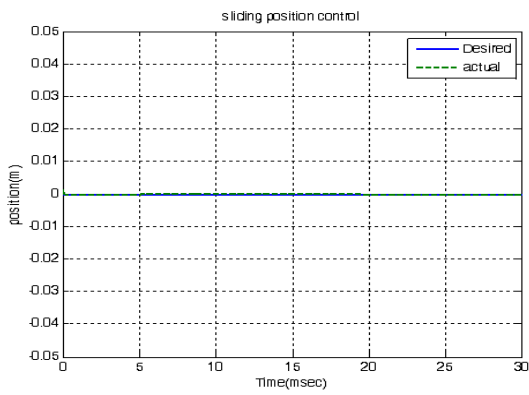
(a) Lifting position.



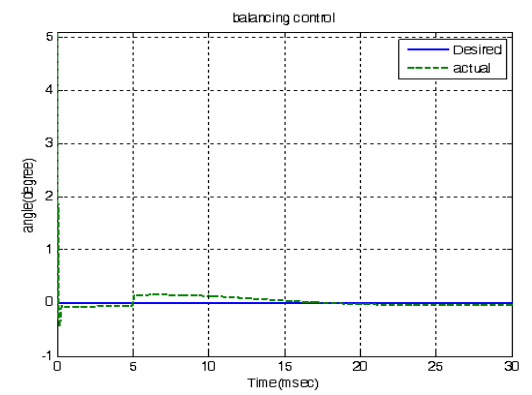
(b) Balancing angle.



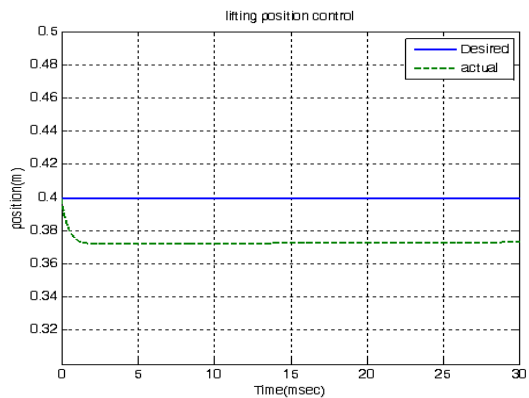
(b) Mobile position.



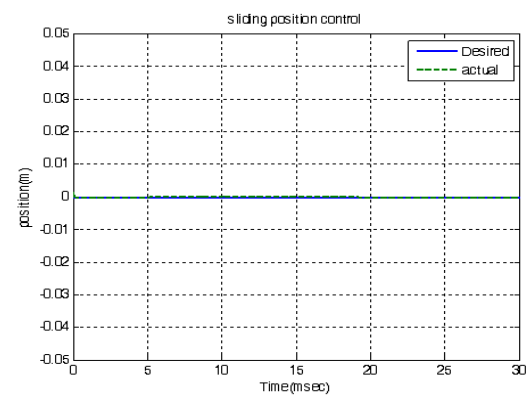
(c) Sliding position.



(c) Balancing angle.



(d) Lifting position.



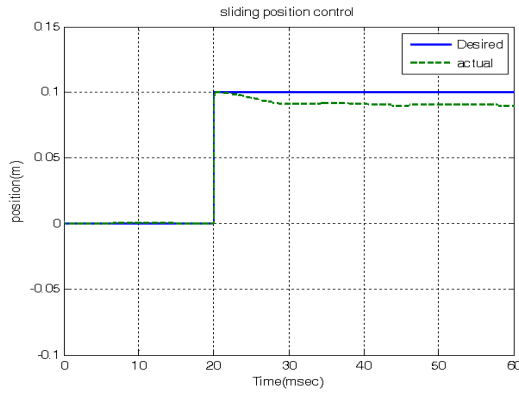
(d) Sliding position.

그림 8. 밸런싱 모바일의 위치 제어 시뮬레이션 결과.

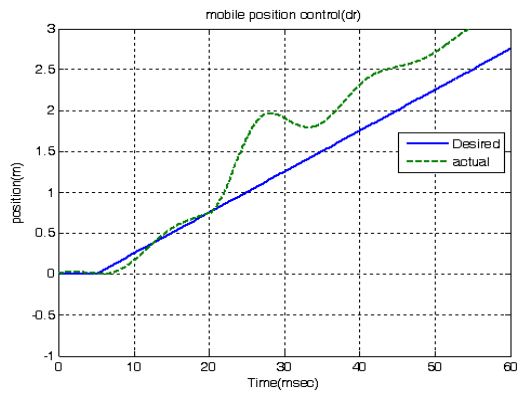
Fig. 8. Simulation result for position control of balancing mobile.

그림 9. 리프팅 구조 위치 제어 시뮬레이션 결과.

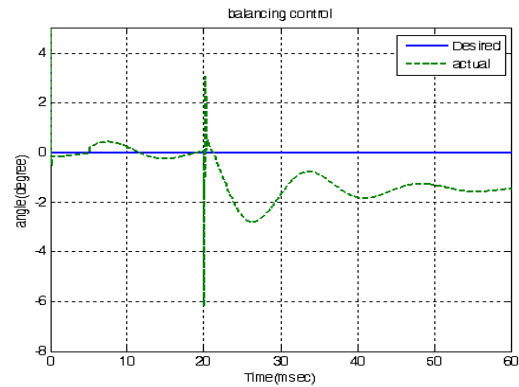
Fig. 9. Simulation result for position control of lifting structure.



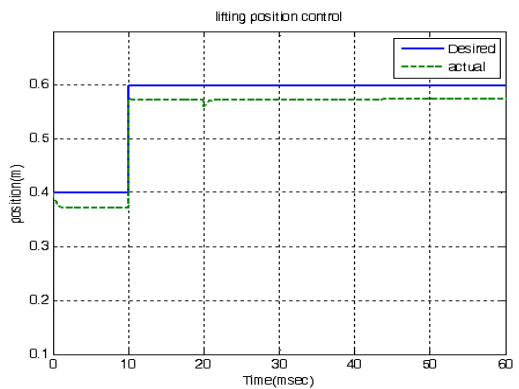
(a) Sliding position.



(b) Mobile position.



(c) Balancing angle.



(d) Lifting position.

그림 10. 슬라이딩 제어 추가에 따른 시스템의 변화.

Fig. 10. Simulation result for position control of sliding structure.

스텝의 무게 중심에 직접적인 영향을 미치는 구조로서 다른 시스템 변수의 제어에도 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 작업 영역을 극대화하기 위하여 새로운 개념의 밸런싱 모바일 구조를 제안하였다. 이동성이 좋은 두 바퀴 구동 방식의 밸런싱 이동 로봇을 적용하였으며 서비스 로봇의 작업 영역 확장을 위해 어깨와 허리에 리프팅 구조를 추가하여 상하 작업 영역을 확장하고 로봇의 상체부에 슬라이딩 구조를 적용하여 앞뒤의 작업 영역을 확장하였다. 회전에 대한 구속 조건을 부가하여 작업 영역 확장 구조가 결합된 밸런싱 모바일 시스템의 동역학 식을 유도하였다. 또한 이를 이용하여 다양한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 각 구조간의 동적 특성이 연관되어 있음을 확인하였다.

## REFERENCES

- [1] Roomba, "http://www.irobot.com"
- [2] Tango, "http://www.samsung.com/sec/consumer"
- [3] Roboking, "http://www.ge.co.kr/brand/cyking/index.jsp"
- [4] J. K. Ahn and S. Jung, "Implementation and control of an extendable and separable mobile robot manipulator for indoor service," *Journal of IEEK*, vol. 48, SC, no. 1, pp. 38-46, 2011.
- [5] Y. G. Bae and S. Jung, "Design, implementation, and control of two arms of a service robot for floor tasks," *Journal of IEEK*, vol. 50, no. 3, pp. 203-211, 2013.
- [6] Y. G. Bae and S. Jung, "A compensation method of an accelerometer for an acceleration-based disturbance observer control of a robot manipulator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 5, pp. 462-467, 2013.
- [7] Y. Chen, L. Liu, M. Zhang, and H. Rong, "Study on coordinated control and hardware system of a mobile manipulator," *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 9037-9041, 2006.
- [8] T. Asfour, K. Regenstein, P. Azad, J. Schroder, A. Bierbaum, N. Vahrenkamp, and R. Dillmann, "ARMAR-III: an integrated humanoid platform for sensory-motor control," *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 169-175, 2006.
- [9] H. Iwata and S. Sugano, "Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 580-586, 2009.
- [10] Y. S. Cha, K. G. Kim, J. Y. Lee, J. J. Lee, M. J. Choi, M. H. Jeong, C. H. Kim, B. J. You, and S. R. Oh, "MAHRU-M: A mobile humanoid robot platform based on a dual-network control system and coordinated task execution," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 6, pp. 354-366, 2011.

- [11] M. S. Choi, E. C. Shin, K. W. Yang, and H. S. Kim, "Development of SEROPI as a wheel-based humanoid robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 3, no. 1, pp. 73-80, 2008.
- [12] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colmbi, and A. C. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, 2002.
- [13] "Segway," <http://www.segway.com>
- [14] Y. G. Bae and S. Jung, "Study on a balancing mobile robot system with 2 DOF extendable links," *Proc. of ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) 2014 Daejeon-Chungchung Branch Conference (in Korean)*, 2014.



#### 배 영 결

2004년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 동 대학원 석사졸업. 2015년 2월 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사졸업. 현재 원자력 연구원 박사후 연구원. 관심분야는 매니플레이터, 힘 제어 응용, 서비스 로봇.



#### 정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능 로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 로봇교육.