

롤러형 바퀴를 갖는 이동로봇 개발

Development of Roller Wheel Mobile Robot

김 순 철¹, 이 수 영[†], 최 재 석²

Soon-Cheol Kim¹, Soo-Yeong Yi[†], Jae-Suk Choi²

Abstract In this paper, a new mobile robot, so called a rollerbot, is presented, which has single body and rugby-ball shaped roller wheel. A rollerbot has single point contact on ground and low energy consumption in motion because of the reduced friction. By changing center of mass using a balancing weight, a rollerbot is able to get steering force. The vertical position of mass center of the rollerbot in this paper is designed to lie inside radius of the roller wheel, so that to have stable equilibrium position. Thus, the posture and the steering control of the rollerbot can be easily done by changing the center of mass. Kinematics of the rollerbot is derived by transformation of differential motion in this paper.

Keywords: Rollerbot, Stable Equilibrium, Kinematics, Center-of-mass

1. 서 론

이동로봇의 조향성을 위해서는 일반적으로 차동바퀴형 이동로봇과 같이 좌우에 설치된 각각의 바퀴의 속도차이를 이용하거나, 또는 별도의 조향성을 갖는 바퀴를 채택한다^[1]. 또한 잘 알려진 전 방향(omnidirectional) 로봇과 같이 120도 위상 차를 가지고 배치된 세 전방향성 바퀴의 속도 제어에 의해 임의의 방향으로 조향 및 이동이 가능한 경우도 있으며^[2], 외발 자전거 형태의 외바퀴 로봇과 같이 구동성과 조향성을 동시에 갖는 바퀴를 이용하여 몸체를 직접 조향하는 경우도 있다^[4]. 공(ball)과 같은 구형의 바퀴를 갖는 볼봇의 경우는 구형 바퀴의 외부에 구동부를 갖는 방식과 내부에 구동부를 갖는 두 가지 방식이 있는데, 전 방향 바퀴를 갖는 이동로봇 형태의 구동 플랫폼을 구형 바퀴의 외측 상부, 혹은 내부에 설치하고, 구동 플랫폼의 바퀴와 구형 바퀴의 접촉 마찰에 의해 조향 및 구동력을

얻는다^[5-7]. 특히 [8]에서 제안한 볼봇은 내부에 설치된 무게 추의 무게중심을 이동시켜 조향력을 얻는다.

한편 [9]에서는 [Fig 1]에 보이는 바와 같이 이동로봇에서 일반적으로 사용되는 타이어 바퀴 대신 럭비공과 같은 형태의 롤러를 사용하여 구동하는 외바퀴 로봇을 개발하였다. 롤러형 외바퀴 로봇은 무게 추 역할을 하는 상부의 자세제어를 통해 균형유지와 함께 조향력을 얻게 된다. 그러나 그림 1에서 보는 바와 같이 상부 무게 추의 무게 중심이 하부 롤러형 바퀴의 곡률 반경에서 벗어나 있기 때문

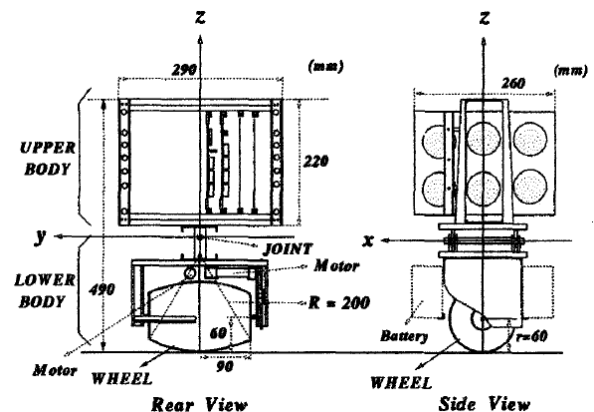


Fig. 1. The unicycle robot using roller wheel^[9]

Received : Jul. 30. 2014; Reviewed : Sep 2. 2014; Accepted : Oct. 7. 2014

※ 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다 (2014-0338)

[†] Corresponding author: Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology (suylee@seoultech.ac.kr)

¹ Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology (soonchulss@naver.com)

² Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology (jschoi0102@naver.com)

에 불안정한 평형점을 가지며, 따라서 균형유지를 위한 상부의 자세제어와 조향제어가 매우 어렵다. 그림 2는 롤러 바퀴의 반경과 전체 무게중심의 위치에 따른 자세 안정성을 보여준다.

본 논문에서는 롤러형 바퀴의 곡률 반경과 상부 몸체의 무게중심 재설계를 통해 그림 2 (b)와 같이 기본적으로 안정한 좌우 평형 점을 갖는 새로운 롤러형 바퀴 이동로봇, 즉 롤러봇을 개발한다. 본 논문의 롤러봇은 기본적으로 안정한 자세를 가지므로 균형 추의 자세제어와 함께 조향제어가 매우 쉽다는 특징이 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: 2장에서 롤러봇 기구학 해석을 통해 조향력을 설명하고, 3장에서 이를 구현하기 위한 구조설계에 관해 서술한다. 그리고 4장에서 실험결과를 설명한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

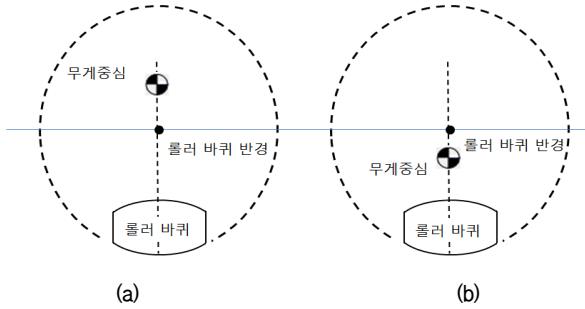


Fig. 2. Radius of roller wheel and mass center of rollerbot: (a) Unstable equilibrium, (b) Stable equilibrium

2. 롤러봇의 기구학

롤러봇의 운동제어를 위해서는 구동모터의 운동(입력)과 롤러봇의 운동(출력) 관계에 관한 기구학 해석이 필요하다. 본 절에서는 미소운동(differential motion) 변환방법을 이용하여 관절공간에서 롤러 구동모터의 운동과 직교좌표공간에서 롤러봇의 직진 및 조향운동 사이의 관계를 기술하고자 한다⁵⁾.

그림 3과 같이 B , B' , C 점에 좌표계를 설정했다고 하자. 럭비공 형태 바퀴의 장 반지름은 r 이고, 바퀴 외곡면을 구성하는 곡률 반지름은 R 이다. 바퀴와 연결된 모터에 의해 바퀴는 ω 의 각속도로 회전한다.

주어진 좌표 계 C 에서 한 점의 회전운동 및 병진운동을 포함하는 미소운동은 다음과 같이 표현된다.

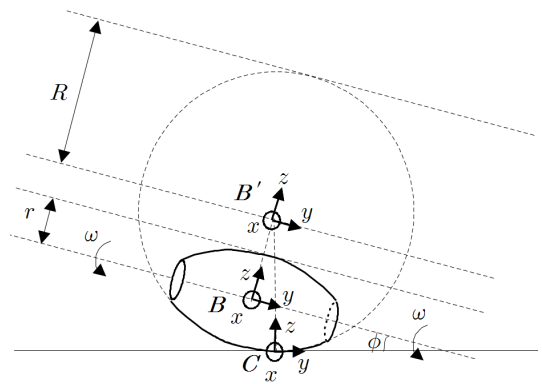


Fig. 3. Rollerbot coordinate system assignment

$$\Delta^C = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z^C & \delta_y^C & d_x^C \\ \delta_z^C & 0 & -\delta_x^C & d_y^C \\ -\delta_y^C & \delta_x^C & 0 & d_z^C \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 미소운동 벡터 $\delta^C = [\delta_x^C \ \delta_y^C \ \delta_z^C]^T$ 와 $d^C = [d_x^C \ d_y^C \ d_z^C]^T$ 는 $\delta t \rightarrow 0$ 일 때 좌표 계 C 의 각 축을 기준으로 한 회전속도 및 병진속도를 의미한다.

몸체 무게중심의 이동에 의해 바퀴가 ϕ 만큼 기울어진 상태에서 B 좌표 계에서 C 좌표 계로의 좌표변환 T_B^C 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_B^C &= T_B^{B'} \cdot T_{B'}^C \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi & Rs\phi \\ 0 & s\phi & c\phi & R(1-c\phi)-r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= [\bar{n} \ \bar{o} \ \bar{a} \ \bar{p}] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\bar{n}, \bar{o}, \bar{a}, \bar{p}$ 는 각각 T_B^C 를 이루는 열 벡터이다. 좌표 계 C 에서의 미소운동 Δ^C 와 좌표 계 B 에서의 미소운동 Δ^B 사이의 관계는 다음과 같은 좌표 변환 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta^C = T_B^C{}^{-1} \cdot \Delta^B \cdot T_B^C \quad (3)$$

앞서 구한 식 (2)를 식(3)에 대입하고 수식을 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\delta_x^C = \delta_x^B \quad (4-1)$$

$$\delta_y^C = c\phi\delta_y^B + s\phi\delta_z^B \quad (4-2)$$

$$\delta_z^C = -s\phi\delta_y^B + c\phi\delta_z^B \quad (4-3)$$

$$d_x^C = \delta_y^B p_z - \delta_z^B p_y + d_x^B \quad (4-4)$$

$$d_y^C = c\phi(\delta_z^B p_x - \delta_x^B p_z + d_y^B) + s\phi(\delta_x^B p_y - \delta_y^B p_x + d_z^B) \quad (4-5)$$

$$d_z^C = -s\phi(\delta_z^B p_x - \delta_x^B p_z + d_y^B) + c\phi(\delta_x^B p_y - \delta_y^B p_x + d_z^B) \quad (4-6)$$

여기서 p_x, p_y, p_z 는 열 벡터 \bar{p} 의 x, y, z 성분을 의미하며 식 (2)로부터 $p_x = 0, p_y = R s \phi, p_z = R(1 - c\phi) - r$ 이다. B 좌표계에서 모터에 의해 생성할 수 있는 미소운동은 회전운동성분은 $\delta_y^B (\neq 0)$ 뿐이고, 나머지 모든 미소운동 성분($\delta_x^B, \delta_z^B, d_x^B, d_y^B, d_z^B$)은 0 이다. 따라서 $\Delta t \rightarrow 0$ 일 때 식 (4)로부터 다음의 기구학식을 얻을 수 있다.

$$\omega_y^C = c\phi\omega_y^B = c\phi\omega \quad (5-1)$$

$$\omega_z^C = -s\phi\omega_y^B = -s\phi\omega \quad (5-2)$$

$$v_x^C = -\{r - R(1 - c\phi)\}\omega_y^B = -\{r - R(1 - c\phi)\}\omega \quad (5-3)$$

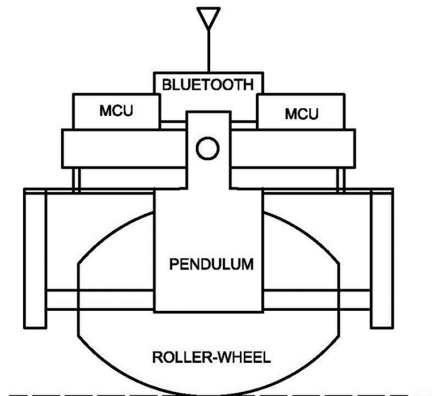
식 (5-2)에서 ω_z^C 는 z 축 중심의 회전 성분, 즉 조향성분을 의미한다. 그림 3에서 롤러 바퀴의 기울임 각, ϕ 가 0이 아닌 값을 가질 때, 롤러의 회전 각속도 ω 에 따른 조향성분을 갖게 되며, 따라서 롤러봇은 곡선운동을 하게 된다. 기울임 각 ϕ 가 0일 때는 조향성분이 0이므로 직진운동을 하게 된다. 또한 식 (5-3)에서 롤러 바퀴의 회전속도 ω 에 따라 진행방향 속도 v_x^C 가 결정됨을 알 수 있다.

3. 롤러봇 구조 설계

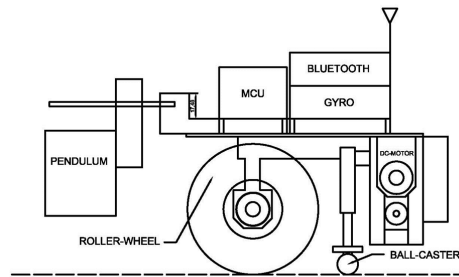
전술한 바와 같이 본 논문에서 개발하는 롤러봇은 롤러

바퀴의 반경 내에 로봇의 전체 무게중심점이 놓이게 설계함으로써 기본적으로 좌우 방향으로 안정한 평형점을 가지며, 따라서 무게 추 이동에 의한 자세제어 및 조향제어를 쉽게 할 수 있도록 하였다. 또한, 전후 방향으로의 안정성을 위해서 별도의 볼캐스터를 장착하였다. 본 롤러봇의 전체적인 구조를 그림 4에 나타내었다.

무게중심 이동을 위한 무게 추로서 일반적으로 이동로봇 무게의 큰 부분을 차지하는 배터리를 진자(pendulum) 형태로 롤러봇의 전면에 설치하였다. 무게 추를 한 쪽 방향으로 기울이면 로봇의 무게중심점이 이동하게 되며, 롤러바퀴 형태에 따라 로봇이 기울어지게 된다. 이에 따라 롤러봇이 2장에서 기술한 바와 같이 조향력을 얻게 된다. 이때, 롤러 바퀴의 기울임각은 무게추를 기울인 각도와 비례한다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 4. Structure of rollerbot

3.1 저 중심 설계

롤러봇의 무게중심 구조는 그림 5와 같다.

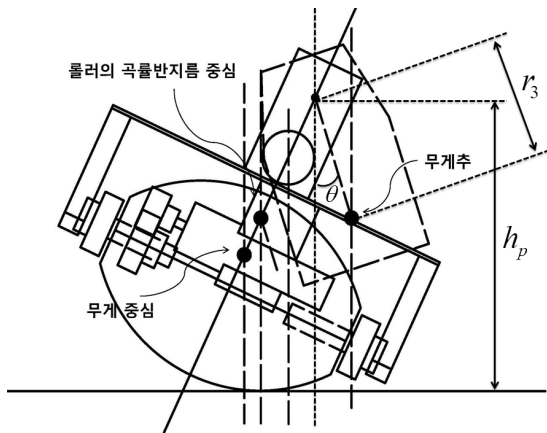


Fig. 5. Center of mass of Rollerbot

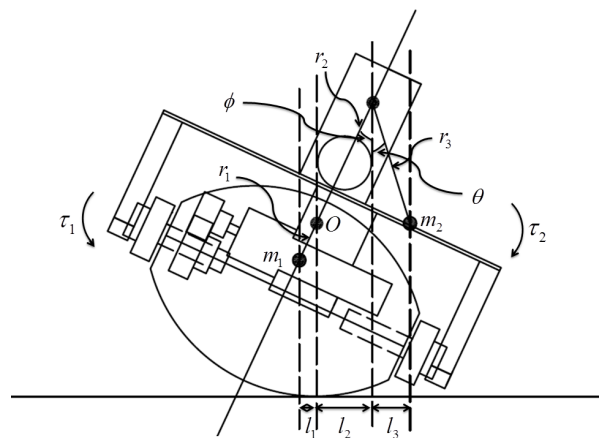


Fig. 6. Equilibrium of center-of-mass

롤러봇이 큰 조향성분을 얻기 위해서는 식 (5-2)에서 볼 수 있는 바와 같이 롤러의 기울임 각, ϕ 가 클수록 유리하다. 무게 추의 이동량에 따른 롤러의 기울임 각을 크게 하기 위해서는 롤러의 곡률 반지름을 가능한 작게 설계해야 한다. 한편, 롤러봇이 안정한 무게중심 구조를 가지려면 롤러봇의 무게중심점이 항상 롤러 바퀴의 곡률 반경 이내에 놓여야 한다. 큰 조향력을 위해 롤러의 곡률 반지름을 작게 하면 롤러봇의 전체 무게중심점이 롤러바퀴 곡률 반지름을 벗어나게 되어 불안정한 평형점을 갖는 역진자형 구조가 될 가능성이 있다. 그러므로 롤러봇 설계시에 조향 성능과 무게중심에 따른 안정성 문제를 고려하여 적절한 곡률반지름을 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 롤러의 재질에 따른 무게를 고려하여 롤러의 곡률반지름을 78.98mm, 롤러의 폭을 115mm로 하여 기울임 각을 46°까지 조절할 수 있도록 설계 하였다.

무게추 회전각에 따른 롤러봇의 전체 무게중심의 수직 위치는 다음 표 1의 무게, 수직위치와 식 (6)~(11)을 통해 계산할 수 있다. 그림 5와 그림 6에서 무게추의 무게중심

이 수직축과 이루는 각을 θ 로 나타내었다. 무게추가 회전하지 않았을 경우에는 물론 $\theta=0$ 이다.

롤러봇은 무게추를 기울임에 따라 무게추의 질량중심과 로봇 본체의 질량중심이 평형을 이루도록 기울어진다. 이때, 롤러봇 본체의 질량중심과 무게추의 질량중심은 수직 위치가 바뀌게 되어 안정성에 대해서 판별해 보아야 한다. 그림 6은 롤러봇이 일정 기울임 각 만큼 기울어 졌을 때의 무게중심 구조를 나타낸다. 그림 6에서 점 O 는 롤러의 곡률중심을 나타낸다. 롤러의 곡면을 따라 로봇이 기울어 지므로 점 O 는 항상 일정한 높이에 위치해 있다. 점 O 를 기준으로 하여 로봇 본체의 등가질량 m_1 과 무게추의 등가질량 m_2 에 의해서 발생하는 토크를 각각 τ_1, τ_2 라고 할 때 그 값은 식 (6)과 같이 나타난다. g 는 중력가속도이다. 또한 r_1 은 점 O 와 등가질량 m_1 사이의 거리이며, r_2 는 점 O 와 무게추의 회전축 사이의 거리이고, r_3 는 무게추의 회전축과 무게추의 등가질량 m_2 사이의 거리이다.

Table 1. 전체 부품 목록 및 등가무게중심 위치

번호	품명	무게 (g)	수직위치 (mm)
1	롤러	605	44.42
2	프레임	436.3	73.41
3	모터	74	41.42
4	배터리	180.0000	64.35
5	무게추	602.35	$h_p - r_3 \cdot \cos\theta$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= g \cdot m_1 \cdot l_1 \\ \tau_2 &= g \cdot m_2 \cdot (l_2 + l_3) \end{aligned} \tag{6}$$

롤러봇이 기울어진 상태에서 $\tau_1 = \tau_2$ 를 만족하면 로봇은 더 이상 기울어 지지 않고 정상상태를 유지하게 된다. 다음 식 (7)에서 l_1 은 점 O 에서 m_1 에 의해서 발생하는 토크의 토크암 길이를 의미하며, $l_2 + l_3$ 는 점 O 에서 m_2 에 의해서 발생하는 토크의 토크암 길이를 의미한다.

$$\begin{aligned} \tau_1 = \tau_2 &\equiv g \cdot m_1 \cdot l_1 = g \cdot m_2 \cdot (l_2 + l_3) \\ &\equiv g \cdot m_1 \cdot r_1 \cdot \sin \phi = g \cdot m_2 \cdot (r_2 \cdot \sin \phi + r_3 \cdot \sin \theta) \quad (7) \\ &\equiv \sin \theta = \frac{m_1 \cdot r_1 - m_2 \cdot r_2}{m_2 \cdot r_3} \cdot \sin \phi \end{aligned}$$

위 식에서 m_1, m_2, r_1, r_2, r_3 은 모두 설계사양에서 주어지므로 기울임각 ϕ 를 알면 무게추와 무게추의 회전축 지면이 이루는 사잇각 θ 를 계산할 수 있으며, 무게추의 수직위치 또한 계산할 수 있다. 로봇 본체의 등가질량점 m_1 의 높이를 h_1 , 무게추의 등가질량점 m_2 의 높이를 h_2 , 무게추 회전축 p 의 높이를 h_p 라고 할 때, 각각의 값들 식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 이때, R 은 롤러의 곡률반지름이며 곡률중심의 높이가 된다.

$$\begin{aligned} h_1 &= R - r_1 \cdot \cos \phi \\ h_2 &= h_p - r_3 \cdot \cos \theta \\ h_p &= R + r_2 \cdot \cos \phi \end{aligned} \quad (8)$$

로봇이 기울어지지 않은 상태, 즉 기울임 각 $\phi = 0^\circ$ 인 상태와 로봇이 최대로 기울어진 상태가 모두 안정한 무게 중심점을 가진다면 로봇은 모든 기울임각에서 안정한 무게 중심점을 가질 것이다. 본 논문에서 설계, 제작한 로봇의 설계 변수는 표 2와 같다. 단, 로봇 본체의 등가질량점과 롤러의 곡률중심 사이의 거리 r_1 은 식 (9)와 같이 계산하였다. 식 (9)에서의 i 는 표 1에서의 1~4번 항목에 해당한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= R - \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, n = 4 \\ &= 78.98 - \frac{(605 \times 44.42) + \dots + (180 \times 64.35)}{605 + \dots + 180} \quad (9) \\ &= 22.19(mm) \end{aligned}$$

기울임 각 $\phi = 0$ 일 때, 전체 무게중심의 높이 h 는 식 (10)과 같고 기울임 각이 최대값인 $\phi = 46^\circ$ 일 때, 전체 무게중심 높이 h 는 식 (11)과 같다. 모두 곡률반지름보다 아래에 위치하므로 롤러본은 항상 안정한 무게중심 구조를 갖는다.

Table 2. 롤러본의 설계 변수 및 크기

번호	변수명	값
1	r_1	22.19mm
2	r_2	42.3mm
3	r_3	39.02mm
4	R	78.98mm
5	m_1	1295.3g
6	m_2	602.35g

$$\begin{aligned} h_1|_{\theta=0^\circ} &= R - r_1 \cdot \cos \phi|_{\theta=0^\circ} = 56.79mm \\ h_2|_{\theta=0^\circ} &= h_p - r_3 \cdot \cos 0^\circ = 82.26mm \\ h_p|_{\theta=0^\circ} &= R + r_2 \cdot \cos \phi|_{\theta=0^\circ} = 121.28mm \quad (10) \\ \rightarrow h|_{\theta=0^\circ} &= \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2} = 64.87mm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1|_{\theta=46^\circ} &= R - r_1 \cdot \cos \phi|_{\theta=46^\circ} = 56.9mm \\ h_2|_{\theta=46^\circ} &= h_p - r_3 \cdot \cos 46^\circ = 93.95mm \\ h_p|_{\theta=46^\circ} &= R + r_2 \cdot \cos \phi|_{\theta=46^\circ} = 121.06mm \quad (11) \\ \rightarrow h|_{\theta=46^\circ} &= \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2} \Big|_{\theta=46^\circ} = 68.66mm \end{aligned}$$

3.2 보조 캐스터 설치

본 롤러본은 무게 추 이동에 의해 무게중심의 위치를 좌우로 변동시켜 롤러를 기울임으로써 조향에 필요한 속도성분을 얻는다. 전후 방향의 안정성을 위해서는 별도의 후방 보조 캐스터가 필요하다. 롤러 바퀴의 기울임 각이 변동하는 경우에도 캐스터가 항상 지면에 정상적으로 접촉해 있기 위해서는 캐스터의 수직축의 높이가 롤러 바퀴 외곡면의 곡률반지름과 같아야 한다.

그림 7은 롤러 바퀴의 기울임 각에 따른 롤러 곡률반지름 중심의 이동 자취를 나타낸 것이다. 롤러본 조향을 위해 롤러 바퀴를 기울이는 경우, 지면과의 접촉 점은 C 에서 C' 으로 이동하게 되며, 롤러의 곡률 중심점도 O 에서 O' 으로 이동하게 된다. 이때 후면의 보조 캐스터가 항상 지면 접촉상태를 유지하기 위해서는 보조 캐스터의 수직축의 높이가 롤러의 곡률 중심점 O 와 일치해야 하며, 또한 O 점에 회전축을 설치해야 한다. 보조캐스터는 O 점을

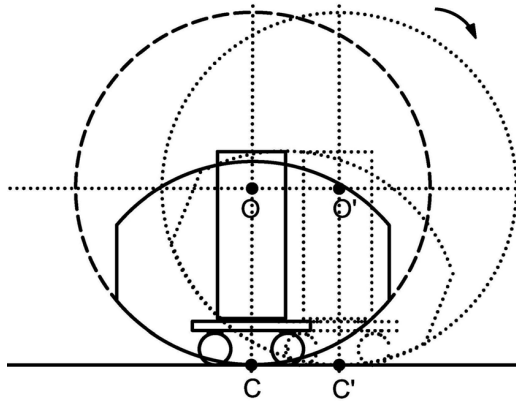


Fig. 7. Center position according to slant angle of roller wheel

중심으로 회전 가능한 형태이므로 로봇이 반대방향으로 기울더라도 항상 지면과 접촉상태를 유지할 수 있다.

3.3 방향각에 대한 보조 캐스터의 영향

본 롤러봇은 롤러바퀴와 보조 캐스터 사이의 거리에 따라 롤러봇의 회전 반경이 달라질 수 있다. 롤러바퀴와 캐스터 바퀴 사이의 축간 거리에 따른 회전반경의 크기 변화는 이미 알려진 이륜 자전거의 기구학으로 부터 이해될 수 있다. 식 (12)은 그림 8의 이륜자전거에 대한 기구학 식을 나타낸다^[10].

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \sin \alpha \quad (12)$$

이 식에서 θ 는 자전거의 방향, α 는 앞 바퀴의 조향각도, v 는 자전거 중심점의 속도, 그리고 L 은 앞 바퀴와

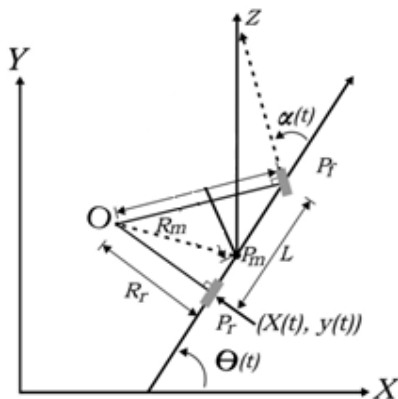
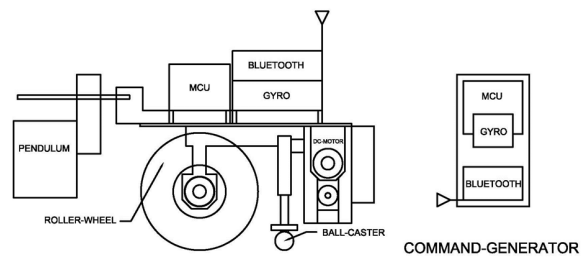


Fig. 8. Position and direction of bicycle^[10]

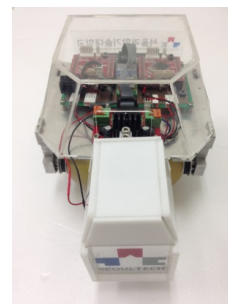
뒷바퀴의 축간 거리를 나타내는데, 동일한 조향각에 대해 자전거의 방향각은 두 바퀴의 축간 거리와 관계가 있음을 의미한다. 이를 본 논문의 롤러봇에 적용해 보면 롤러의 구동속도가 일정하고 조향각 즉, 롤러 바퀴의 기울임 각이 일정할 때 롤러봇의 주행 회전반경은 롤러와 보조캐스터의 축간 거리에 반비례 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 반영하여 롤러봇의 조향 성능을 높이기 위해서 그림 4 (b)와 같이 롤러 바퀴와 보조 캐스터 바퀴 사이의 거리를 최대한 짧게 되도록 구조를 설계하였다.

4. 롤러봇 개발 및 실험

본 논문에서 개발한 롤러봇을 그림 9에 보인다. 롤러봇은 롤러 구동에 필요한 모터와 무게 중심 이동에 필요한 진자형태의 무게 추 제어용 모터를 가지며, 각각의 모터제어기와 함께 원격 이동 명령을 받을 수 있는 무선채널 및 마이크로프로세서 보드를 가지고 있다. 무선 명령 생성기를 통해 롤러봇에 이동명령과 로봇의 조향 명령을 내릴 수 있다. 명령생성기는 2축 자이로 센서를 내장하고 있으며, 명령생성기를 기울임에 따라 그 기울기에 비례하는 전후방 속도 명령과 좌우 기울기 명령을 로봇으로 전송한다.



(a) System structure of sollarbot and command generator

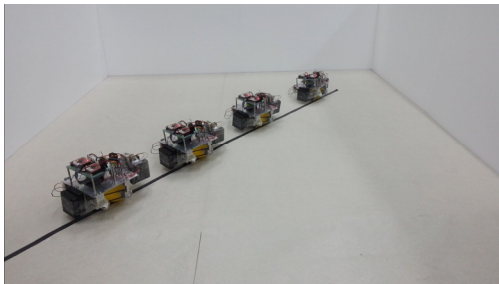


(b) Appearance of rollerbot

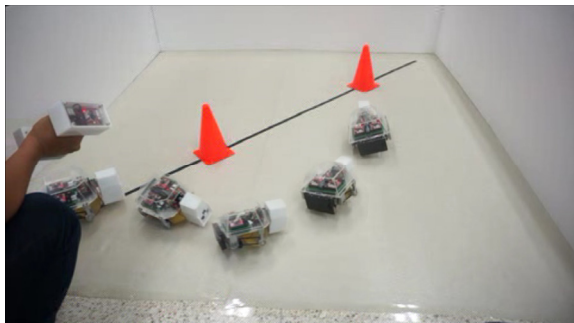
Fig. 9. Rollerbot

무게추 회전에 따른 롤러봇의 조향성을 실험을 통해 확인하였다. 실험에서는 무게추가 회전하는 과정에서 발생할 수 있는 관성의 영향을 최소화 하기 위해 무게추의 회전 속도를 낮게 하였다.

그림 10은 본 논문에서 개발한 롤러봇의 주행제어 실험 결과를 보인 것으로 일정한 시간 간격으로 찍은 사진들 한 장에 덧붙인 것이다. 명령 생성기에 의한 명령에 따라 직선 및 S자 형태의 궤적을 주행한다. 이는 무게 추 회전에 따른 무게중심 이동에 의해 조향 제어가 가능함을 보여준다. 본 롤러봇은 전후 방향의 안정성을 위해 볼 캐스터를 롤러 뒤편에 장착하였기 때문에 볼 캐스터에서 발생하는 마찰력으로 인해 주행에 다소 영향을 받는 것이 관측되었다. 또한, 바닥과 점접촉을 하기 때문에 지면이 평평하지 않거나 이물질이 있는 경우, 그리고 바닥면의 마찰이 작은 물질로 되어 있을 때는 주행성능이 떨어지는 것을 관측 할 수 있었다. 바닥면의 재질과 지형에 강인성을 가질 수 있도록 하는 구조 보완이 필요하다.



(a) Straight line



(b) Curved line

Fig. 10. Experimental result of rollerbot navigation

5. 결 론

본 논문에서는 럭비공 형태의 롤러 바퀴를 사용하고 무게 추에 의한 무게중심 이동을 통해 조향력을 얻는 이동 로봇을 개발하였다. 기존의 롤러 바퀴 이동로봇과는 달리 로봇의 전체 무게중심이 롤러의 곡률반경 내에 놓이도록 구조를 설계함으로써 안정한 평형 점을 갖게 하였다. 따라서 무게 추에 의한 조향 및 자세 제어가 용이하다는 특징이 있다. 미소운동 변환법에 의한 기구학 해석을 통해 롤러의 기울임 각에 따른 조향성을 설명하였고, 실험을 통해 무게중심 이동에 따른 조향성을 확인하였다. 그러나 지면과 점 접촉을 이루는 기구적인 특성을 갖기 때문에 바닥면과의 마찰에 대한 영향이 크고 이물질이 많거나 평평하지 않은 바닥에 대해서는 주행성능이 떨어진다. 향후, 주위 환경에 대한 강인성을 갖는 구조로 개선할 필요가 있다.

References

- [1] B. Choi and S. Kim, "Design of Simple-structured Fuzzy Logic System based Driving Controller for Mobile Robot," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [2] J. Kim, "Steering System Development of Mobile Robot using Permanent Magnet Wheels," Master's Thesis, Yeungnam University, Korea, 2006.
- [3] Y. P. Leow, K. H. Low, and W. K. Loh, "Kinematic modeling and analysis of mobile robots with Omnidirectional wheels," *Proc. of International Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV' 02)*, pp.820-825, 2002.
- [4] D. W. Vos and A. H. von Flotow, "Dynamics and Nonlinear Adaptive Control of an Autonomous Unicycle: Theory and Experiment," *Proc. of the 29th IEEE Conf. on Decision and Control*, 1990.
- [5] J. Park, S. Kim, and S. Yi, "Kinematic Modeling for a Type of Mobile Robot using Differential Motion Transformation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 12, pp. 1145-1151, 2013.
- [6] T. B. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive," *Proc. IEEE Int'l. Conf. on Robotics and*

- Automation, Orlando, FL, May 15-19, 2006
- [7] M. Kumagai and T. Ochiai, "Development of a robot balancing on a ball," Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea, pp. 433-438, Oct. 2008.
 - [8] J. Kim, H. Kwon, and J. Lee, "A rolling robot: design and implementation, " Proc. of the 7th Asian Control Conference, Hong Kong, China, Aug. pp. 27-29, 2009
 - [9] R. Nakajima, T. Tsubouchi, S. Yuta and E. Koyanagi, "A Development of a New Mechanism of an Autonomous Unicycle," IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 906-912, Sep. 1997.
 - [10] W. Ham, "Kinematics and Inverse Kinematics in Unmanned Bicycle System," Journal of Korea Robotics Society, vol. 1, no. 1, pp.73-80, 2006.



이 수 영

1988 연세대학교 전자공학과 (공학과)
 1990 KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
 1994 KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)

1995~1999 KIST 시스템연구부 선임연구원
 1997~1998 Univ. of Southern California 박사후과정
 1999~2007 전북대학교 전자정보공학부 부교수
 2005~2006 Univ. of Ullinois at Urbana-Champaign 방문교수
 2007~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
 관심분야 : 이동로봇, 로봇비전



김 순 철

2014 서울과학기술대 전기정보 공학과 (공학사)
 2014~현재 서울과학기술대학 교 전기정보공학과 석사 과정

관심분야 : 이동로봇, 로봇비전



최 재 석

2014 서울과학기술대학교 전기 정보공학과 학사과정
 관심분야 : 수술로봇, 의료기기