



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

직진 주행 성능 향상을 위한 다중 이동  
로봇의 새로운 바퀴 배치

A New Wheel Arrangement of  
Three Wheeled Omni-directional Robot for Linear Motion Speed  
Improvement

2013년 2월

서울대학교 대학원  
기계항공공학부  
신상재

# 초록

신상재  
기계전공  
기계항공공학부  
서울대학교

다중 이동 로봇은 2 차원 구동 평면에서 3 자유도를 가지며 어느 방향으로나 회전 및 이동이 자유로운 로봇이다. 본 논문에서는 다중 이동 로봇의 직진 주행 성능을 향상시키기 위해 새로운 바퀴 배치를 가지는 다중 이동 로봇을 제안한다. 새롭게 제안된 다중 이동 로봇은 바퀴의 회전방향이 로봇의 질량중심에서 원주방향을 향하는 바퀴 배치를 가지는 기존의 다중 이동 로봇과 달리 바퀴의 회전방향이 로봇의 질량중심을 향하는 바퀴 배치를 가지고 있다. 새롭게 제안된 다중 이동 로봇은 이러한 바퀴 배치로 인하여 직진 주행 시에 로봇의 회전 모멘트가 생성되지 않아 제어가 간단하다. 또한, 3 개의 바퀴를 모두 구동시킬 수 있는 장점으로 인해 직진 주행 성능이 뛰어날 뿐만 아니라 기존의 다중 이동 로봇과는 달리 부가적으로 생성되는 저항이 없어 추가적으로 장착해야 할 부품 수도 줄일 수 있다.

제안된 다중 이동 로봇과 기존의 다중 이동 로봇의 직진 주행 성능을 비교하기 위해서 마찰실험을 통하여 다중 이동 로봇이 주행 시에 필연적으로 발생하는 마찰과 미끄러짐을 고려한 동적 모델링을 이끌어 내었다. 이끌어낸 로봇의 동적 모델링을 이용해 두 다중 이동 로봇의

직진 주행을 시뮬레이션을 하였으며 그 결과 새롭게 제안된 다중 이동 로봇의 직진 주행 성능이 1.5 배 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 이를 검증하기 위해 실제 제작된 다중 이동 로봇과 초고속 카메라를 이용해 실제 다중 이동 로봇의 주행과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그 결과, 마찰실험을 이용하여 이끌어낸 로봇의 동적 모델링이 실제의 다중 이동 로봇의 주행과 일치하는 것을 확인할 수 있었으며 새롭게 제안된 다중 이동 로봇이 기존의 다중 이동 로봇보다 직진 주행 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 다중 이동 로봇, 바퀴 배치, 동적 모델, 마찰실험

학번 : 2011-20719

# 목차

국문 초록 .....	i
목차.....	iii
그림 목차 .....	v
표 목차.....	vii
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 로봇의 구동력과 미끄러짐 .....	3
1.3 연구 목적 .....	5
제 2 장 바퀴의 동적 모델링 .....	10
2.1 바퀴의 구동력과 미끄러짐 .....	10
2.2 바퀴의 구동방정식 .....	11
2.3 마찰실험 장치 구성 .....	13
2.4 마찰실험 결과 .....	16
제 3 장 로봇의 동적 모델링 .....	17
3.1 기존의 다중 이동 로봇의 동적 모델링 .....	17
3.2 새로운 다중 이동 로봇의 동적 모델링 .....	19
3.3 로봇의 동적 모델링의 시뮬레이션 및 결과 ..	20

<b>제 4 장 검증</b> .....	<b>24</b>
4.1 검증을 위한 실험 장치 구성 .....	<b>24</b>
4.2 검증 실험 결과 .....	<b>25</b>
<b>제 5 장 결론</b> .....	<b>29</b>
<b>참고 문헌</b> .....	<b>31</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>34</b>

## 그림 목차

<b>Fig.1.1</b>	<b>Various type of general omni-directional robot[ref. 8, 9] : (a) three wheeled omni-directional robot, (b) four wheeled omni-directional robot.....</b>	<b>2</b>
<b>Fig.1.2</b>	<b>Disadvantage in the existing omni-directional robot : (a) Generated rotational moment, (b) Two motor involved in linear travel, (c) Resistance in linear travel and omni-directional wheel.....</b>	<b>5</b>
<b>Fig.1.3</b>	<b>Rotational direction of wheel of existing and proposed omni-directional robot : (a) existing wheel arrangement of omni-directional robot, (b) proposed wheel arrangement of omni-directional robot .....</b>	<b>6</b>
<b>Fig.1.4</b>	<b>Omni-directional robot proposed in this study ...</b>	<b>9</b>
<b>Fig.2.1</b>	<b>Schematic of individual wheel.....</b>	<b>10</b>
<b>Fig.2.2</b>	<b>Experimental setup for relationship between relative velocity and friction coefficient .....</b>	<b>13</b>

<b>Fig.2.3</b>	<b>Rig for angle between rotational direction of wheel and heading direction of wheel.....</b>	<b>15</b>
<b>Fig.2.4</b>	<b>Experimental result of friction test.....</b>	<b>16</b>
<b>Fig.3.1</b>	<b>Schematic of existing omni-directional robot ..</b>	<b>18</b>
<b>Fig.3.2</b>	<b>Schematic of proposed omni-directional robot .</b>	<b>19</b>
<b>Fig.3.3</b>	<b>Block diagram of simulation analysis .....</b>	<b>20</b>
<b>Fig.3.4</b>	<b>Analysis by proposed dynamic model: (a) Acceleration, (b) Velocity .....</b>	<b>23</b>
<b>Fig.4.1</b>	<b>Experimental setup for verification.....</b>	<b>24</b>
<b>Fig.4.2</b>	<b>Picture of real robot movement .....</b>	<b>25</b>
<b>Fig.4.3</b>	<b>Comparison of simulation and experiment of the existing robot : (a) Position, (b) Velocity.....</b>	<b>27</b>
<b>Fig.4.4</b>	<b>Comparison of simulation and experiment of the proposed robot : (a) Position, (b) Velocity.....</b>	<b>28</b>



## 표 목차

Table.1.1	Comparison expected effect of the existing and the proposed omni-directional robot.....	8
Table.1.2	Specification of omni-directional robot proposed in this study .....	9

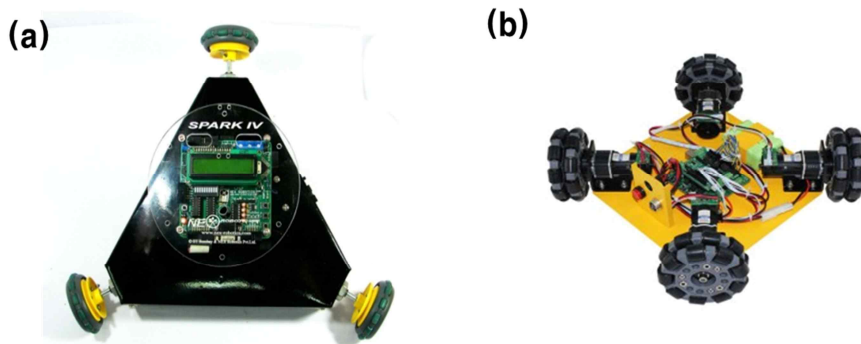
# 제 1 장 서론

## 1.1 연구 배경

모바일 로봇(mobile robot)은 뛰어난 구동성과 기동성을 바탕으로 사람이 작업하기 힘든 환경인 방사능 오염지역, 폭발위험 지역, 사람이 작업하기 힘든 협소한 공간 등에서 임무를 수행 가능하며 최근 두각을 나타내고 있는 로봇 서비스 분야에서도 활용이 가능하다. 따라서 로봇산업의 발전과 더불어 모바일 로봇에서도 많은 연구가 진행되고 있다[1,2,3].

모바일 로봇은 구속조건에 따라 홀로노믹 구속조건(holonomic constraint)과 비 홀로노믹 구속조건(non-holonomic constraint)을 가지는 로봇으로 분류가 가능하다[2,3]. 홀로노믹 구속조건이란 로봇의 자유도와 로봇이 구동되는 평면의 자유도가 일치하는 것을 의미한다. 전통적인 방식인 비 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇은 구동 가능한 2 개의 바퀴가 평행하게 설계되어 있다. 따라서 제자리에서 회전운동 및 바퀴의 회전방향이 아닌 다른 방향으로의 직진 주행이 어렵다. 그렇기 때문에 협소한 공간에서의 로봇의 구동성이나 기동성에서 제한이 있어 왔다[3]. 이와 반대로 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇들은 제자리에서 회전 및 바퀴의 회전방향이 아닌 다른 방향으로의 직진 주행이 가능하다. 홀로노믹 구속조건을 가지는 대표적인 로봇으로는 다중 이동 로봇(omni-directional robot)이 있다[3,4].

다중 이동 로봇은 Fig.1 과 같이 일반적으로 3 개 이상의 구동 가능한 바퀴를 가지고 있으며, 바퀴의 회전방향이 로봇의 질량중심의 원주방향으로 향하도록 바퀴가 배치되어 있다. 이러한 기구학적 특징 때문에 다중 이동 로봇은 2 차원 평면계에서 3 자유도를 가지게 되며, 홀로노믹 구속조건을 가지는 로봇으로 분류된다. 하지만 로봇의 이동방향과 바퀴의 회전방향이 일치하지 않아 필연적으로 미끄러짐(slip)이 발생하게 되며 로봇의 구동력에 영향을 미친다. 또한 바퀴의 회전방향이 원주방향으로 배치되어 있기 때문에 로봇의 회전 모멘트가 발생하게 된다. 이러한 단점으로 인해 많은 연구자들은 다중 이동 로봇의 주행을 제어하기 위한 제어 알고리즘을 연구해 왔다[5,6,7].



**Fig.1.1 Various type of general omni-directional robot [ref. 8, 9] : (a) three wheeled omni-directional robot, (b) four wheeled omni-directional robot**

## 1.2 로봇의 구동력과 미끄러짐

주행 시의 다중 이동 로봇은 바퀴의 회전방향과 로봇의 이동방향이 일치하지 않기 때문에 미끄러짐이 발생하여 구동력을 저하시킨다[10]. 또한, 로봇의 회전하는 바퀴의 표면 선속도와 로봇의 이동속도가 일치하지 않을 경우에도 미끄러짐을 발생시킨다. 이는 로봇의 구동력에 영향을 주어 로봇의 제어 및 기동성에 영향을 미친다. 일반적인 바퀴의 구동력은 식 (1.1)과 같이 표현되며, 이는 마찰계수와 연관이 있기 때문에 마찰계수의 변화에 대한 이해가 필요하다.

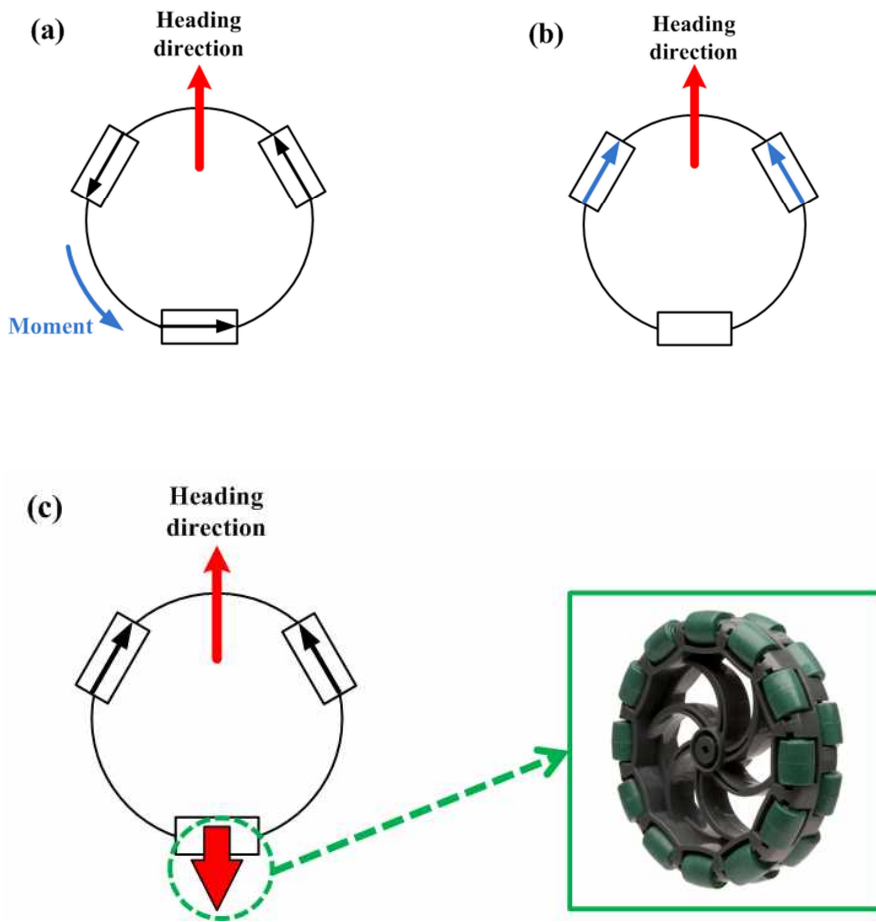
$$\mu = \frac{F}{F_N} = \frac{\text{Friction force}}{\text{Normal force}} \quad (1.1)$$

기존 연구에 의하면 상대속도 변화에 의한 슬립의 비에 따라 마찰계수가 변한다고 알려져 있다. 이 연구결과에 따르면 마찰계수는 미끄럼속도(sliding velocity)에 따라 점점 증가하다가 일정 임계점을 통과함에 따라 감소한다고 발표하였다[11]. 그리고 마찰계수는 바퀴에 가해지는 압력에 따라서도 변화한다고 보고되었다. 탄성체로 이루어진 바퀴는 압력에 증가함에 따라 지면과의 실 접촉 면적이 증가하는 반면, 그에 따른 거칠기는 감소하기 때문이다. 이에 따른 마찰계수는 작은 압력에서 감소하다가 어느 일정 임계점을 지나면 다시 증가한다[11,12]. 또한 바퀴의 회전방향과 로봇의 이동방향이 일치하지 않은 경우에도 마찰계수가 변하며, 일정한 속도에서 바퀴의 회전방향과 로봇의 이동방향의 사이각이 증가함에 따라 마찰계수는 감소한다고 보고된 바 있다[12]. 마찰 시 생기는 온도의 변화 역시 마찰계수의 변화를 가져오나 다중 이동 로봇의 주행 시 온도 변화는 미미하므로 본 논문에서는 온도에 따른 마찰계수의 변화를 무시하였다.

위와 같이 구동력에 영향을 미치는 마찰 계수는 다양한 환경요인에 의해 변화된다. 따라서 로봇의 구동력과 주행특성을 이해하기 위해서는 로봇의 구조적 특징에 의하여 생기는 미끄러짐과 여러 가지 환경조건에 의하여 변하는 마찰계수를 고려해야 한다.

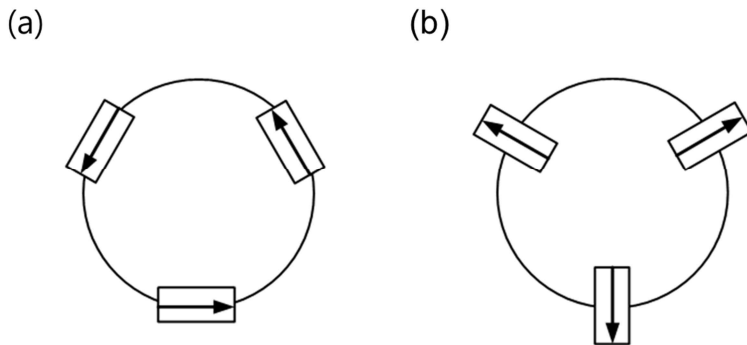
### 1.3 연구 목적

다중 이동 로봇은 2 차원 구동평면에서 3 자유도를 가지는 홀로노믹 구속조건을 가지기 위해 바퀴의 배치방향을 로봇의 질량중심에서 원주방향을 향하는 방식을 택하고 있다.



**Fig.1.2 Disadvantage in the existing omni-directional robot : (a) Generated rotational moment, (b) Two motor involved in linear travel, (c) Resistance in linear travel and omni-directional wheel**

이러한 바퀴의 회전방향과 로봇의 이동방향이 일치하지 않는 구조 때문에 로봇의 주행 시 필연적으로 미끄러짐이 존재한다. 이는 구동력과 주행 성능에 영향을 미치므로 미끄러짐을 고려한 로봇의 동적 모델링을 필요로 한다. 또한 이러한 다중 이동 로봇의 바퀴 배치는 Fig.1.2.(a)처럼 주행 시에 로봇의 회전모멘트를 생성시키고, 로봇의 제어를 어렵게 만들었다. 그래서 Fig.1.2.(b)와 같이 로봇의 회전모멘트를 제거하기 위해 두 개의 바퀴만을 사용하여 주행할 경우, 다중 이동 로봇의 직진 주행 성능이 저하된다. 추가로 Fig.1.2.(c)처럼 구동하지 않는 다른 하나의 바퀴는 로봇의 직진 주행에 저항으로써 작용하게 되기 때문에 직진 주행 시의 생기는 저항을 줄이기 위하여 다중 이동 바퀴(omni-directional wheel)를 필요로 했다.



**Fig.1.3 Rotational direction of wheel of existing and proposed omni-directional robot : (a) Existing wheel arrangement of omni-directional robot, (b) Proposed wheel arrangement of omni-directional robot**

따라서 본 연구는 기존의 이러한 단점들을 극복하기 위한 새로운 바퀴 배치를 가지는 다중 이동 로봇을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 새로운 다중 이동 로봇은 Fig.1.3.(b)와 같이 바퀴의 배치방향이 로봇의 질량중심을 향하고 있기 때문에 로봇의 회전 모멘트가 생기지 않는다. 이로 인해 로봇이 직진 주행할 시에 기존의 다중 이동 로봇과 같이 로봇의 회전 모멘트를 제거하기 위한 제어가 필요 없다. 뿐만 아니라 직진 주행 시에 3 개의 바퀴를 모두 구동할 수 있기 때문에 높은 직진 주행 성능을 지닌다. 또한 본 논문에서 제안하는 다중 이동 로봇은 저항으로 작용하는 바퀴가 없음으로 다중 이동 바퀴를 대체하여 일반적으로 널리 쓰이는 바퀴를 사용할 수 있으며 로봇의 생산성 향상과 추가적인 유지보수 비용도 절감할 수 있다. Table.1.1 은 직진 주행 시에 제안한 다중 이동 로봇을 사용함으로써 예상되는 기대효과이다.

본 논문에서는 새로운 바퀴 배치를 가지는 다중 이동 로봇과 미끄러짐을 반영한 로봇의 동적 모델링을 제안하며 마찰실험을 통해 얻은 마찰계수를 바탕으로 로봇의 동적 모델링을 시뮬레이션 하였다. 그리고 시뮬레이션한 결과를 이용해 기존의 다중 이동 로봇과 새롭게 제안한 다중 이동 로봇의 속도를 비교하였다. 또한 Fig.1.4 와 같이 실제 제작한 다중 이동 로봇과 초고속카메라를 이용하여 실제 로봇의 속도를 측정하고 시뮬레이션 결과를 검증하였다. Table.1.2 는 실제 제작한 로봇의 사양이다.



	<b>Existing</b>	<b>Proposed</b>	<b>Expected effect</b>
<b>Wheel direction</b>	<b>Circumferential</b>	<b>Radial</b>	<b>Easy to control</b>
<b>Possibility of Rotational moment</b>	<b>High</b>	<b>Low</b>	<b>Computationally inexpensive</b>
<b>No. of wheels involved in linear motion</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>High straight moving speed</b>
<b>Time to target point</b>	<b>Long</b>	<b>Short</b>	<b>High efficiency</b>

**Table.1.1 Comparison expected effect of the existing and the proposed omni-directional robot**



**Fig.1.4 Omni-directional robot proposed in this study**

<b>Property</b>	<b>Specification</b>
<b>Size</b>	<b>170 x 170 x 45 [mm]</b>
<b>mass</b>	<b>500 [g]</b>
<b>Wheel diameter</b>	<b>45 [mm]</b>
<b>Wheel material</b>	<b>Abrasion-resistant urethane</b>

**Table.1.2 Specification of omni-directional robot proposed in this study**

## 제 2 장 바퀴의 동적 모델링

### 2.1 바퀴의 구동력과 미끄러짐

로봇의 구동력은 3 개의 바퀴와 지면 사이에서 일어나는 마찰로 인해 생성되는 구동력의 총 합이므로 로봇의 구동력을 알기 위해서는 각각의 바퀴에서의 구동력을 계산할 필요가 있다.

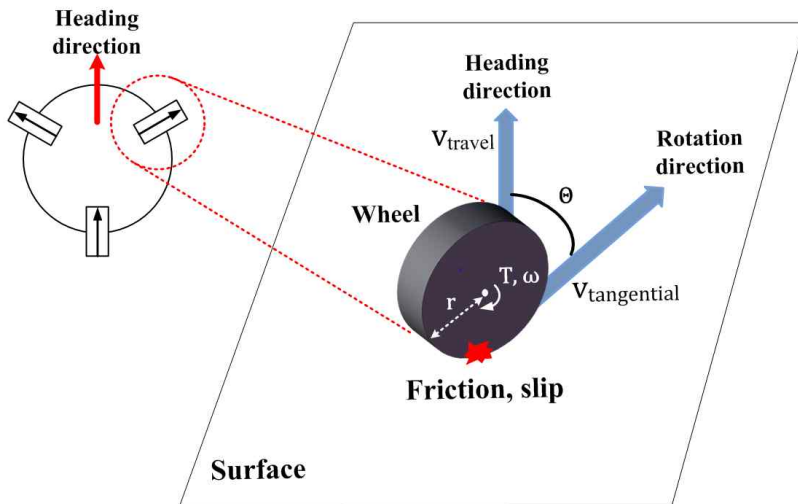


Fig.2.1 Schematic of individual wheel

다중 이동 로봇은 Fig.2.1 와 같이 바퀴의 회전방향과 로봇의 이동방향의 불일치로 미끄러짐이 일어나며 로봇의 이동속도와 바퀴 표면의 회전 선속도의 차이로 인해서도 미끄러짐이 발생한다. 상대속도의 비로 정의되는 미끄러짐은 마찰계수에 영향을 주며, 마찰계수는 식(1)에 의해 다시 로봇의 구동력에 영향을 미친다. 따라서 로봇의 동적 모델링을 이끌어 내기 위해서는 각 바퀴에서 일어나는 마찰과 미끄러짐을 충분히 고려해야 한다.

## 2.2 바퀴의 구동방정식

다중 이동 로봇은 그 구조적 특징 때문에 미끄러짐이 발생하며 로봇의 이동하는 방향에 대한 바퀴 표면의 회전 선속도( $v_{\text{tangential}}$ )와 로봇의 이동속도( $v_{\text{travel}}$ )가 반드시 일치할 수 없다. 따라서 Fig.2.1 과 같이 로봇이 이동할 때 식 (2)와 같은 바퀴 표면의 회전 선속도와 로봇의 이동속도의 간의 상대속도가 발생한다.

$$v_{\text{relative}} = v_{\text{tangential}} - v_{\text{travel}} \quad (2)$$

이 때 바퀴의 상대속도에 따라 바퀴와 지면 사이의 마찰계수가 변하므로 마찰계수는 로봇의 이동속도와 바퀴 표면의 회전 선속도에 대한 상대속도의 함수로 표현할 수 있다. 또한 바퀴의 회전 선속도는 바퀴의 반지름 ( $r$ ) 과 바퀴의 회전 각속도 ( $\omega$ ) 의 곱이며 모터의 각속도는 모터의 사양에 의해 토크(T)의 함수로 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{relative}^{-1}(\mu) = r \cdot \omega(T) - v_{travel} \quad (3)$$

이 때, 마찰계수는

$$\mu = \frac{F}{F_N} = \frac{a}{g} \quad (4)$$

이고 모터의 토크는

$$T = Fr \quad (5)$$

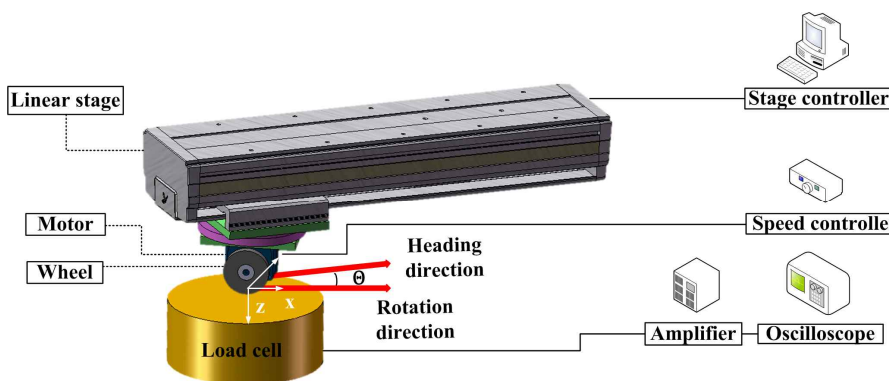
이며 여기서  $F$  는 바퀴의 구동력이다. 식 (4)와 식 (5)를 식 (3)에 대입하면

$$v_{travel} = mr^2 \cdot \omega(a) - v_{relative}^{-1} \left( \frac{a}{g} \right) \quad (6)$$

식 (6)와 같이 바퀴의 속도는 바퀴의 가속도에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 하지만 식 (6)를 계산하기 위해서는 상대속도와 마찰계수의 관계를 이끌어 내야 한다. 따라서 마찰실험을 통하여 그 관계를 알아보았다.

## 2.3 마찰실험 장치 구성

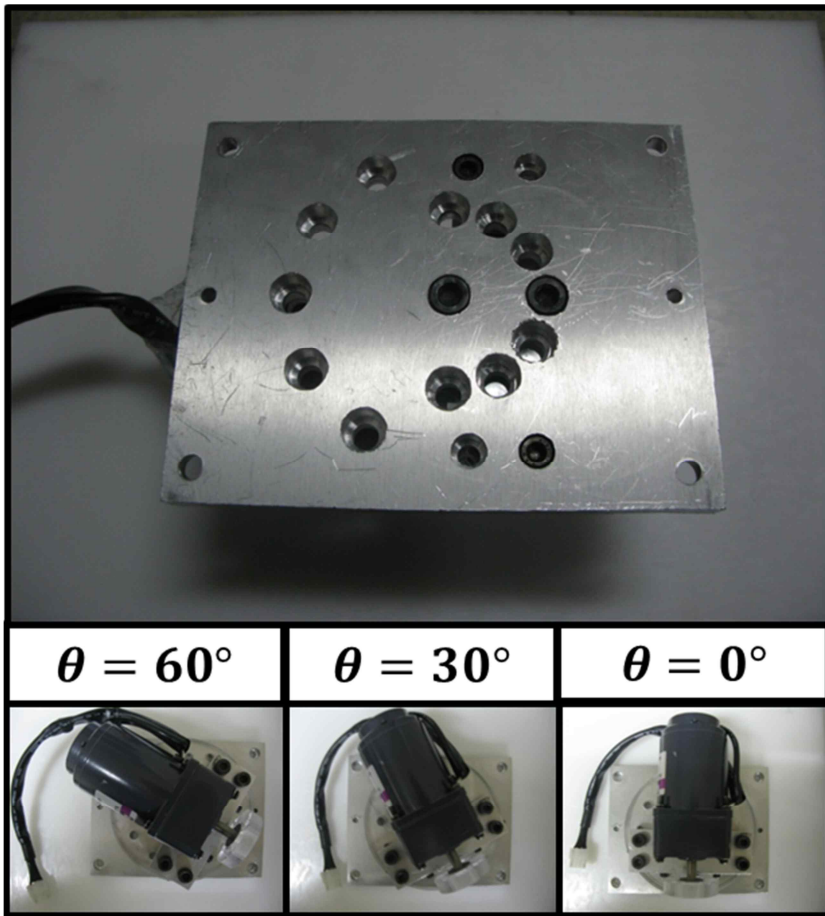
Fig.2.2 은 상대속도와 마찰계수의 관계를 알아보기 위한 실험 장치의 개략도이다. 리니어 스테이지(linear stage)에 모터를 장착하고 스테이지 컨트롤러(stage controller)를 통해 바퀴의 이동을 구현하였다. 모터에는 우레탄 재질의 바퀴를 장착하고 모터 스피드 컨트롤러(speed controller)를 이용하여 모터의 회전속도(RPM)를 제어하였으며, 리니어 스테이지와 모터의 결합부에 모터의 회전방향을 조절할 수 있는 리그(rig)를 장착하여 모터의 회전방향을 조절할 수 있게 하였다. 바퀴와 접촉된 삼축 로드셀(three axis-load cell)을 이용하여 모터를 회전시키면서 바퀴를 이송시켜 이송방향으로의 마찰력을 측정하였다. 로드셀의 표면에는 벽지재와 바닥재로 많이 사용되어 일반적인 실내 바닥면이라고 할 수 있는 폴리염화비닐(PVC : Polyvinyl chloride)을 사용하였다.



**Fig.2.2 Experimental setup for relationship between relative velocity and friction coefficient**

지면과 바퀴 사이의 마찰계수를 얻기 위해 3 가지 입력요소(input factor)를 사용하였다. 첫 번째로 스테이지 컨트롤러와 스피드 컨트롤러를 사용하여 바퀴의 이송속도와 바퀴의 회전속도를 각각 제어하여 상대속도에 따른 마찰력을 구하였다. 두 번째로 일정한 상대속도를 유지하면서 Fig.2.3 과 같은 리그를 사용하여 바퀴의 진행방향과 바퀴의 회전방향의 사이각을 조절하였다. 조절한 사이각은  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$  이며, 이 때 모터의 회전방향이 틀어짐으로써 진행방향으로 속도성분이 감소되는 것을 고려하여 각 사이각의 크기에 따라 일정한 같은 상대속도를 유지하도록 하였다. 세 번째로 바퀴가 지면에 가하는 하중에 따라 마찰계수가 변하므로 3 축 로드셀을 이용하여 바퀴가 지면에 가하는 하중이 일정하도록 제어하였다.

본 실험에서 구동력은 Fig.2.2 의 x 방향에 해당하며 수직항력은 z 방향에 해당한다. 따라서 식 (1)을 이용하여 상대속도와 사이각에 따른 마찰력을 분석함으로써 마찰계수를 구할 수 있었다.



**Fig.2.3 Rig for angle between rotational direction of wheel and heading direction of wheel**



## 2.4 마찰실험 결과

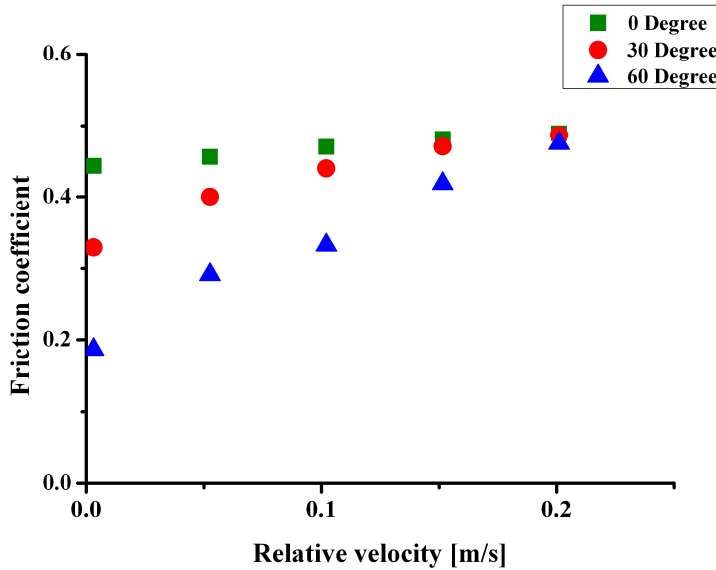


Fig.2.4 Experimental result of friction test

Fig.2.4 는 상대속도에 따른 마찰계수를 알아보기 위한 실험 결과이다. 실험 결과에서 보는 바와 마찬가지로 상대속도가 증가함에 따라 마찰계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 바퀴의 회전방향과 바퀴의 주행방향의 차이에 따라 마찰계수의 차이가 있었다. 상대속도가 낮은 구간에서 바퀴의 회전방향과 바퀴의 이동방향 사이의 사이각  $\theta$  가 클수록 마찰계수가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

## 제 3 장 로봇의 동적 모델링

### 3.1 기존의 다중 이동 로봇의 동적 모델링

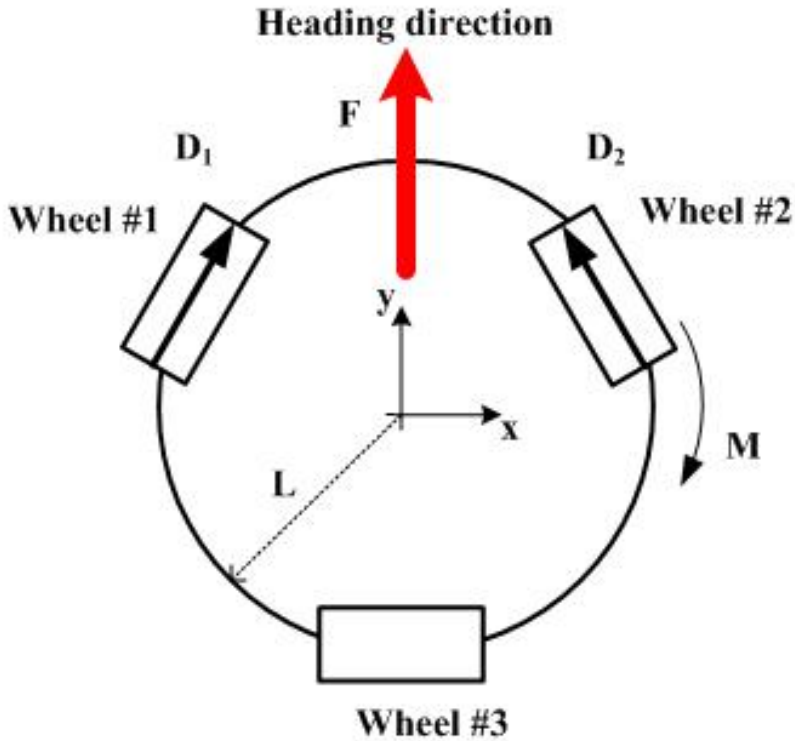
섹션 2 의 마찰실험 결과를 토대로 구성한 각 바퀴의 동적 모델링을 구성하였다. 이 때 로봇의 동적 모델링은 각 바퀴의 구동력을 통합하여 구하였다. 기존의 다중 이동 로봇은 Fig.3.1 과 같이 직진 주행을 하기 위하여 식 (7)과 식 (8)을 만족해야 한다.

$$F_x = -D_1 \cos \frac{\pi}{3} + D_2 \cos \frac{\pi}{3} = 0 \quad (7)$$

$$M = (D_1 + D_2 + D_3)L = 0 \quad (8)$$

이 때, 식 (8)에서 보이는 것과 마찬가지로 기존의 다중 이동 로봇에서는 바퀴의 배치방향이 로봇의 질량중심에서 원주방향을 향하고 있기 때문에 로봇의 회전 모멘트가 생성되어 제어에 어려움이 있는 것을 알 수 있다. 따라서 다중 이동 로봇의 회전 모멘트 제거와 간편한 제어를 위해서 바퀴 #1 과 바퀴 #2 만 구동시키는 것이 적절하다. 식 (7)과 식 (8)을 연립하면

$$\therefore |D_1| = |D_2|, |D_3| = 0 \quad (9)$$



**Fig.3.1 Schematic of existing omni-directional robot**

식 (9)와 같은 직진 주행 시의 구동 조건을 구할 수 있다. 식 (9)에서 보는 바와 같이 모터의 구동을 제어함으로써 로봇의 회전모멘트를 제거하여 로봇의 직진 주행을 구현할 수 있지만 모터의 출력을 모두 사용하지 못한다는 점에서 직진 주행 성능의 저하를 가져온다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 새로운 다중 이동 로봇의 동적 모델링

본 논문에서 제안된 새로운 다중 이동 로봇의 바퀴 배치는 기존의 다중 이동 로봇의 바퀴 배치와는 다르게 바퀴의 배치방향이 로봇의 질량중심을 향하고 있다. 따라서 새롭게 제안된 다중 이동 로봇에서는 로봇의 회전 모멘트가 생성되지 않는 것을 알 수 있다.

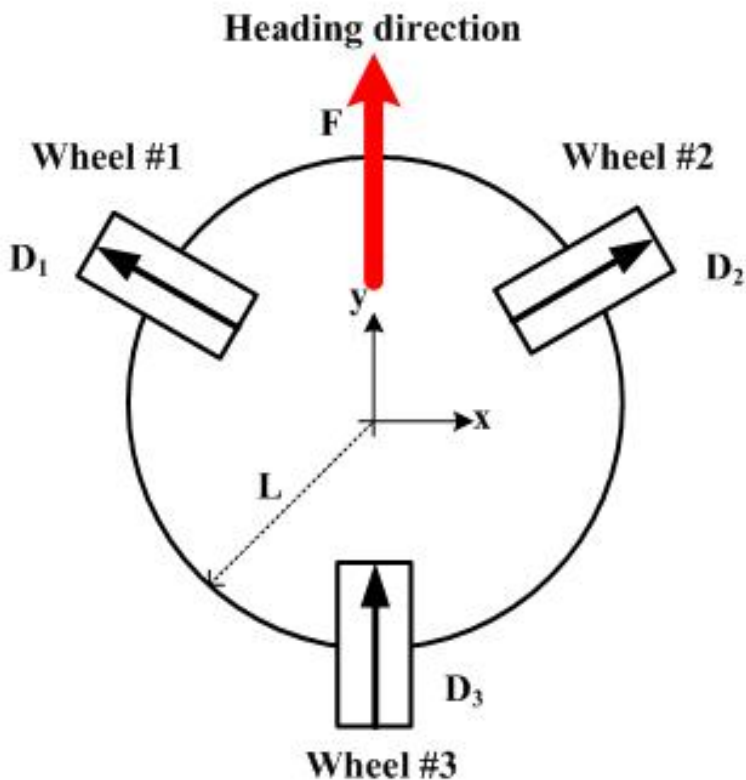


Fig.3.2 Schematic of proposed omni-directional robot

새롭게 제안된 다중 이동 로봇이 Fig.3.2 와 같이 직진 주행을 하기 위해서는 식 (10)과 식 (11)을 만족시켜야 한다.

$$F_x = D_1 \cos \frac{\pi}{6} - D_2 \cos \frac{\pi}{6} = 0 \quad (10)$$

$$M = 0 \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)을 연립하면 식 (12)와 같은 구동력 조건을 구할 수 있다.

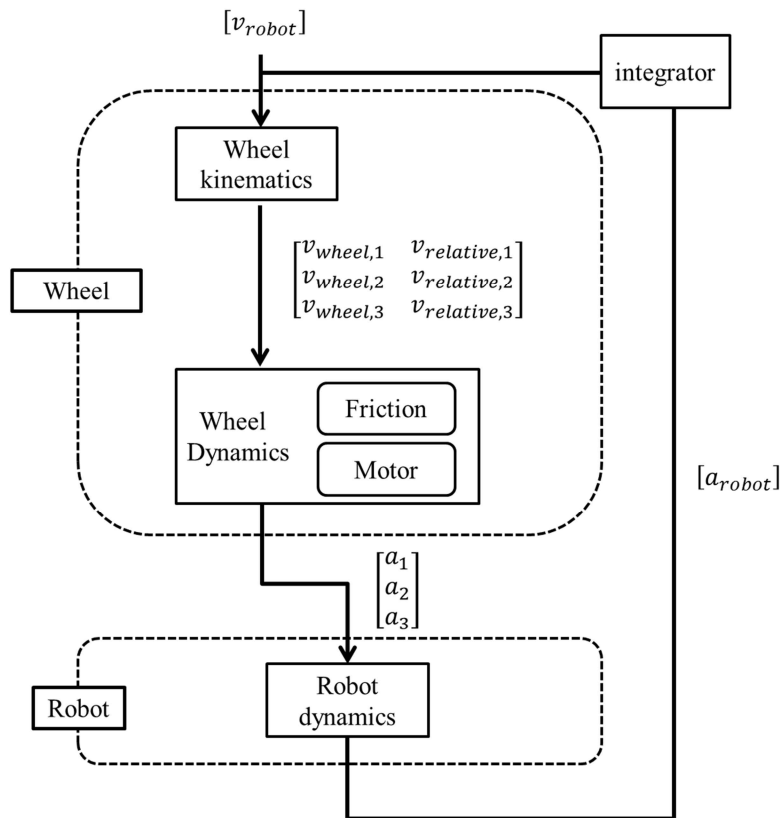
$$\therefore |D_1| = |D_2|, |D_3| \quad (12)$$

이 때 식 (12)와 식(9)를 비교해 보면 다중 이동 로봇의 직진 주행 시 구동력 조건이 줄어드는 것을 알 수 있다.

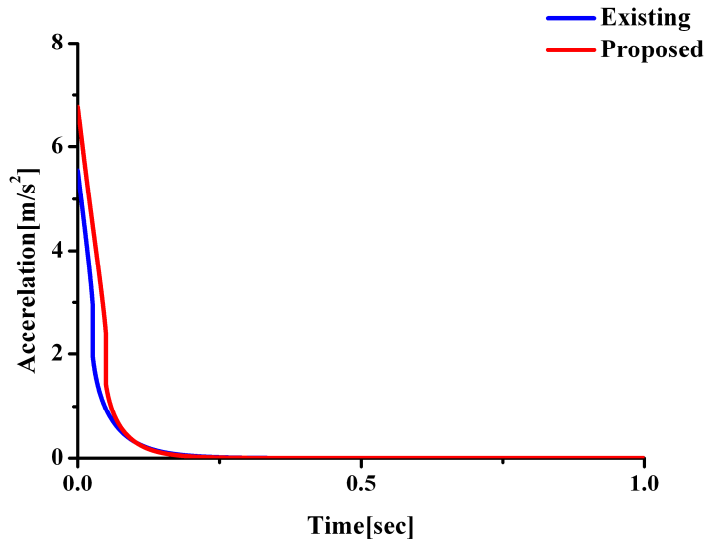
### 3.3 로봇의 동적 모델링의 시뮬레이션 및 결과

앞서 설명한 바퀴의 동적 모델링과 로봇의 동적 모델링을 바탕으로 기존의 다중 이동 로봇과 본 논문에서 제안된 다중 이동 로봇에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. Fig.3.3 은 진행된 시뮬레이션의 알고리즘을 나타내며 시뮬레이션에는 MATLAB 의 SIMULINK 를 사용하였다. 시뮬레이션의 경계조건으로는 로봇이 출발 시에는 속도가 0 이기 때문에 각 모터의 초기 속도로 0 을 대입하였다. 각 바퀴에서는 식 (6)에 의해 각 바퀴의 가속도가

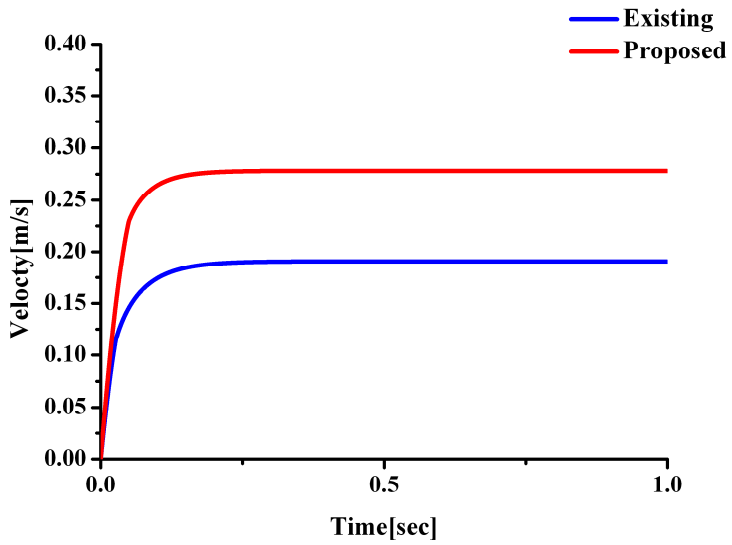
산출되어 나오며, 이를 시간에 따라 반복 계산하여 로봇이 등속도 운동을 할 때까지 시뮬레이션을 진행하였다. Fig.3.4.(a)는 마찰과 슬립이 고려된 로봇의 동적 모델링을 바탕으로 해석된 기존의 다중 이동 로봇과 본 논문에서 새롭게 제안된 다중 이동 로봇의 가속도이다. Fig.3.4.(a)에서 보이는 바와 마찬가지로 기존의 다중 이동 로봇보다 새롭게 제안된 다중 이동 로봇의 가속도가 높게 해석되었다. 이는 다중 이동 로봇의 초기 가동 시에 로봇의 정지 마찰력을 이겨내고 더 높은 구동력을 가질 뿐만 아니라 초기 구동 시에 로봇이 속도 증가율을 가질 수 있는 것을 의미한다. Fig.3.4.(b)는 제안된 동적 모델링을 통해 분석된 기존의 다중 이동 로봇과 새롭게 제안된 다중 이동 로봇의 속도이다. Fig.3.4.(b)에서 보듯이 다중 이동 로봇이 등속도 운동에 도달 시 본 논문에서 제안한 다중 이동 로봇이 약 1.5 배 빠른 속도를 가진 것으로 분석되었다.



**Fig.3.3 Block diagram of simulation analysis**



(a)



(b)

**Fig.3.4 Analysis by proposed dynamic model: (a) Acceleration, (b) Velocity**



## 제 4 장 검증

### 4.1 검증을 위한 실험 장치 구성

기존의 다중 이동 로봇의 동적 모델링과 본 논문에서 제안한 다중 이동 로봇의 동적 모델링을 검증하기 위해 Fig.4.1 과 같은 실험장치를 구성하였다. 기존의 다중 이동 로봇과 제안된 다중 이동 로봇을 실제 제작하였으며 로봇이 구동되는 바닥재로는 2.3 절에서 수행한 마찰실험과 마찬가지로인 폴리염화비닐을 사용했다. 로봇이 주행 시의 시간 당 움직인 거리를 알기 위하여 초고속 카메라를 사용하여 로봇이 주행하는 장면을 촬영하였으며 로봇이 구동되는 뒷면에 1 mm 간격으로 눈금을 부착하였다.

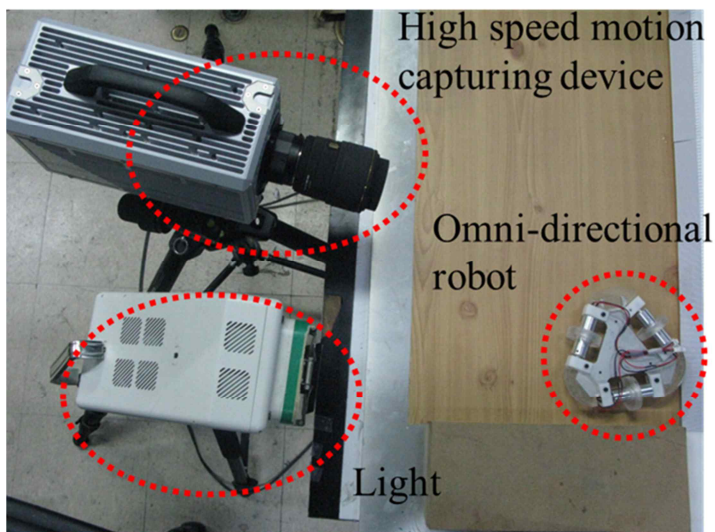


Fig.4.1 Experimental setup for verification

## 4.2 검증 실험 결과

Fig.4.2 와 같이 로봇이 주행하는 장면을 초당 1000 프레임씩 촬영하였으며 로봇이 주행한 거리와 속도를 알기 위하여 50 프레임, 즉 0.05 초 마다 로봇이 주행한 거리를 분석하였다.

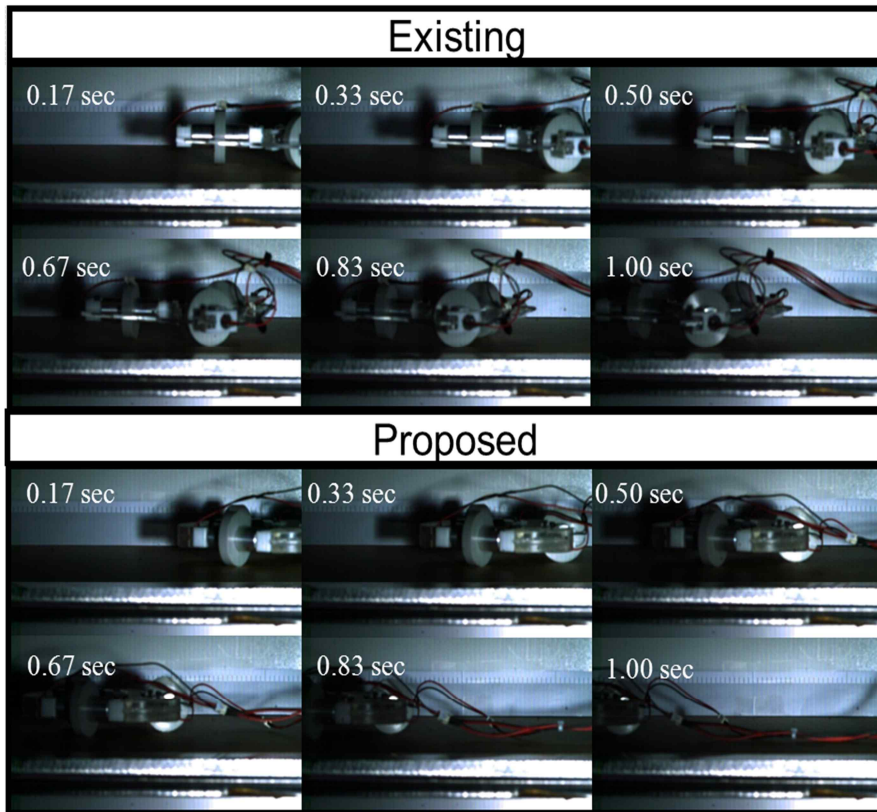
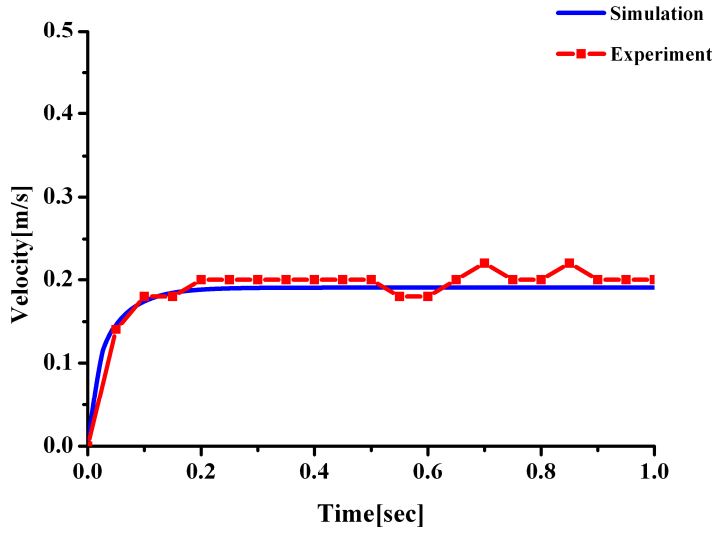


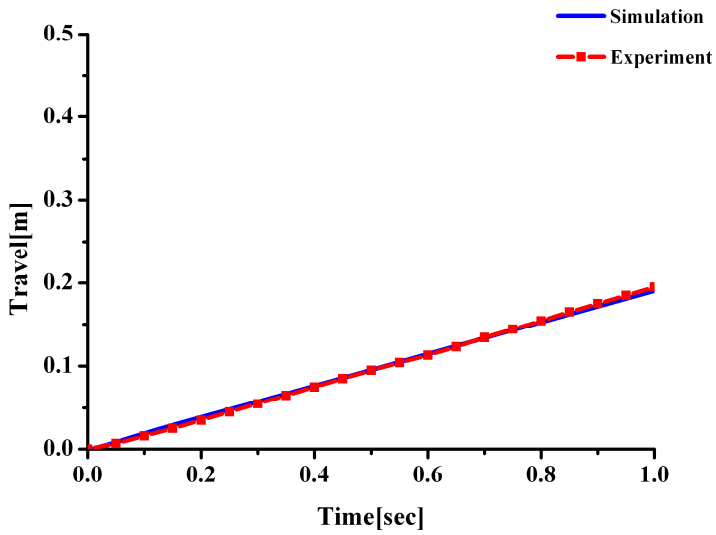
Fig.4.2 Picture of real robot movement

Fig.4.3 와 Fig.4.4 는 기존의 다중 이동 로봇과 본 논문에서 제안된 다중 이동 로봇의 시뮬레이션 해석결과와 검증결과를 비교한 그래프이다. 기존의 다중 이동 로봇의 직진 주행 속도는

0.194 m/s 이며 평균 속도편차는 0.011 m/s 이다. 새롭게 제안한 다중 이동 로봇의 직진 주행 속도는 0.285 m/s 이며 평균 속도편차는 0.007 m/s 이다. Fig.4.3 과 Fig4.4 에서 보다시피 해석결과와 검증결과가 일치하는 것을 알 수 있으며, 이것은 마찰과 슬립을 고려한 로봇의 동적 모델링이 실제 로봇의 구동에 부합된다는 것을 확인할 수 있다.

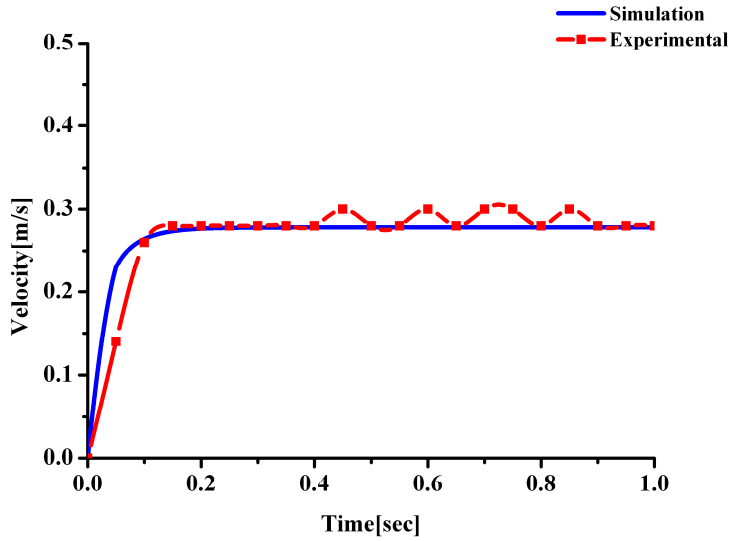


(a)

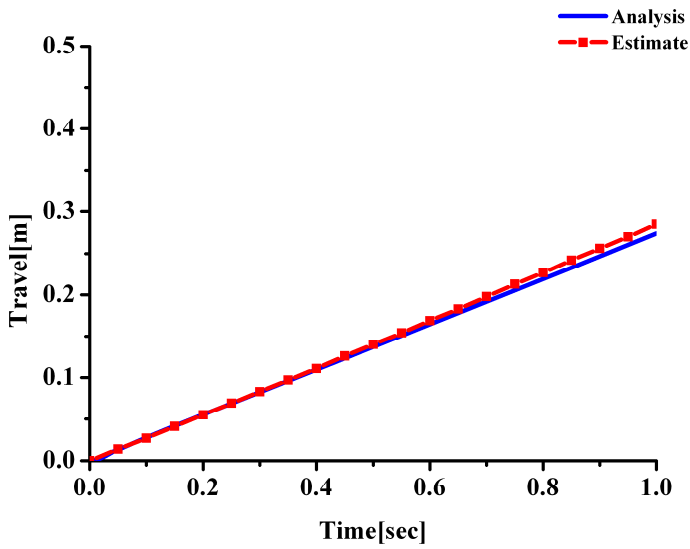


(b)

**Fig.4.3 Comparison of simulation and experiment of the existing robot : (a) Position, (b) Velocity**



(a)



(b)

**Fig.4.4 Comparison of simulation and experiment of the proposed robot : (a) Position, (b) Velocity**

## 제 5 장 결론

기존의 다중 이동 로봇은 바퀴의 배치방향이 로봇의 질량중심에서 원주방향을 향하고 있었기 때문에 로봇의 회전 모멘트가 생성되어 제어에 어려운 점이 있었다. 따라서 간편한 제어와 동시에 로봇의 회전 모멘트를 제거하기 위해 직진 주행 시에 2 개의 바퀴만을 구동시키는 것이 적절하였다. 하지만 이는 모터의 출력을 모두 사용하지 못하기 때문에 로봇의 주행 성능 저하를 가져왔다. 또한 구동되지 않는 바퀴는 로봇의 주행에 저항으로서 작용하기 때문에 이 또한 로봇의 주행 성능의 저하를 가져왔다. 구동되지 않는 바퀴에서 발생하는 저항을 줄이기 위해서는 다중 이동 바퀴를 사용해야 했으며, 다중 이동 로봇의 생산성 하락과 높은 유지보수 비용을 가져올 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 로봇의 회전 모멘트를 제거하고 다중 이동 로봇의 직진 주행성을 향상시킬 수 있도록 바퀴의 배치방향이 로봇의 질량중심을 향하는 새로운 다중 이동 로봇을 제안하였다. 이러한 바퀴 배치로 인해 기존의 다중 이동 로봇에서와 달리 직진 주행 시 3 개의 바퀴를 모두 구동시켜 로봇의 직진 주행 효율을 상승시킬 수 있었으며 이러한 점을 바탕으로 원하는 목적지점까지 더 빨리 도착할 수 있었다. 추가로 다중 이동 바퀴를 사용하지 않음으로써 높은 생산성을 가질 수 있었다.

또한 본 논문에서는 마찰실험을 바탕으로 로봇의 동적 모델링을 세웠으며 MATLAB SIMULINK 를 이용하여 기존의 다중 이동

로봇과 새롭게 제안한 다중 이동 로봇을 시뮬레이션 하였다. 이를 검증하기 위하여 초고속 카메라를 이용하여 실제 제작한 로봇의 속도를 측정하였다. 검증 결과 본 논문에서 제안한 동적 모델링이 실제 로봇의 구동과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Watanabe, Keigo., Shoraishi, Yamato., Spyros G. Tzafestas, Tang, Jun., Fukuda, Toshio., “Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 22, pp. 315 – 330, 1998.
  
- [2] Yi, Byung-Ju., Kim, Whee Kuk., “The Kinematics for Redundantly Actuated Omnidirectional Mobile Robots,” Journal of Robotic Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 255 - 267, 2002.
  
- [3] Jae-Bok, Song., Kyung-Seok, Byun., “Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels”, Journal of Robotic Systems Vol. 21, No. 4, pp. 193 – 208, 2004
  
- [4] Yi, Byung-Ju, Kim, Whee Kuk, “Minimum-Time Trajectory for Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots Following a Bounded-Curvature Path With a



Referenced Heading Profile,” IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27, No. 4, pp. 800 - 808, 2011.

- [5] Liu, Yong., Zhu, J. Jim., Williams II, Robert L., Wu, Jianhua., “Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization,” Robotics and Autonomous Systems, Vol. 56, pp. 461 – 479, 2008.
- [6] Kalmár-Nagy, Tamás., Raffaello, D’Andrea., Ganguly, Pritam., “Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional vehicle”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 46, pp. 47 – 64, 2004.
- [7] Galicki, Mirosaw., “Collision-free control of an omnidirectional vehicle”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 57, pp. 889 – 900, 2009.
- [8] Spark IV , Nex Robotics,  
Online[Available]:<http://www.nex-robotics.com/intelligent-robotics-workshop/spark-iv.html>
- [9] 4WD Omni Wheel Arduino Compatible Mobile Robotics Car C008 , NEXUS AUTOMATION LIMITED,  
Online[Available]:

<http://www.microrobo.com/4wd-omni-wheel-arduino-compatible-mobile-robotics-car-C008.html>

- [10] Harned, J., Johnston, L., Scharpf, G., “Measurement of Tire Brake Force Characteristics as Related to Wheel Slip (Antilock) Control System Design”, SAE Paper 690214, pp. 909 – 925. 1969.
- [11] B.N.J. Persson, “Theory of rubber friction and contact mechanics”, Journal of chemical physics, Vol. 115. No. 8, 2001.
- [12] G. Carbone, B. Lorenz, B.N.J. Persson, A. Wohlers, “Contact mechanics and rubber friction for randomly rough surfaces with anisotropic statistical properties”, Eur. Phys. J. E 29, pp. 275 – 284, 2009.

# Abstract

Omni-directional robot is a typical holonomic constraint robot that has three degrees of freedom movement in 2D plane. In this study, a new wheel arrangement of three wheeled omni-directional robot was proposed to improve linear motion speed. The proposed robot has wheels in radial directions, whereas the existing robot has wheels in a circumferential direction. When the robots move in a straight line, the proposed robot can have all three wheels involved. But the existing robot can have only two wheels involved. As a result, the proposed robot has higher linear motion speed than that of the existing robot. To compare linear speed in each robot, dynamic modeling, simulation and verification was sequentially performed. By friction experiment, dynamic modeling of each wheel which considers friction and slip could be carried out. Applying this result to the robot dynamic model, linear motion speed of each robot was simulated. Also linear motion speed of each robot was measured by high speed motion captured device. The measured result was matched with the simulation result, and

the linear speed of the proposed robot was 1.5 times faster than that of the existing robot.