

평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 대한 분석

Analysis on Mobility of Planar Mobile Robots

김 희 국, 이 승 은, 이 병 주
(Wheekuk Kim, Seung-Eun Lee, and Byung-Ju Yi)

Abstract : In this paper, mobility of planar mobile robots is discussed. Firstly, simplified joint models for four typical wheels of the mobile robots are described including both rotational and translational friction parameters. Then, based on these joint models and through the inclusion of the additional imaginary joint particularly to the mobile robots which lack geometric generality, mobility analysis of various types of planar mobile robots is performed.

Keywords : mobility, mobile robot, kinematic model

I. 서론

일반적인 메커니즘의 모빌리티에 관한 분석은 많이 이루어져 왔지만 아직까지도 기하학적 결핍을 가지는 대부분의 메커니즘에 대한 모빌리티 분석은 명확히 수행되지 않고 있다[1][3]. 특히, 모바일 로봇의 모빌리티에 대한 분석은 비홀로노믹(Nonholonomic)특성과 그리고 많은 형태의 모바일 로봇이 기하학적 일반성이 결핍된 구조로 가지므로 더더욱 미약한 실정이다[4][8]. Campion 등은[5] 자주 활용되는 고정바퀴(conventional fixed wheel), 오프셋이 없는 조향바퀴(centered orientable wheel), 오프셋이 있는 조향바퀴(off-centered orientable wheel or caster wheel) 그리고 전방향특성 바퀴중의 하나인 Swedish wheel와 같은 네 가지 다른 형태의 조합으로 이루어진 평면형 모바일 로봇의 기동성(maneuverability)과 기구학/동역학 모델에 관하여 조사하였다. 그들은 기동성을 오프셋이 없는 조향바퀴의 수와 관련된 조향성(steerability)과 평면형 운동공간에서 각 바퀴들의 구속공간을 뺀 나머지를 모빌리티로 정의하였으며(이러한 정의는 일반적으로 통용되는 모빌리티의 정의와 다름[9]) 이러한 기동성을 조사함으로써 실용성이 있는 평면형 모바일 로봇의 구조에 관하여 기술하였다. 한편, Yi와 Kim은 세 개 또는 네 개의 caster바퀴로 구성된 평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 관하여 언급하였다[6][7]. 이러한 모든 기존의 연구에서는 모두 바퀴의 미끄럼 마찰로 인한 운동을 고려하지 않았다.

그러나, 바퀴의 마찰력이 정지마찰력을 초과하게 되는 경우 바퀴의 미끄럼이 발생하게 되어 모바일 로봇의 강체운동(rigid body motion)이 모바일 로봇의 모빌리티로 인한 운동과 병행하여 발생하게 된다. 최근에 Kim과 Yi는 평면형 모바일 로봇의 기구학 모델을 구하는 방법으로서 미끄럼 마찰운동을 확장변수로 하는 확장된 좌표계 전환기법을 제시

하였다[10]. 이 기법은 미끄럼 마찰운동이 발생되거나 발생되지 않는 경우에 모두 적용 가능하다. 그러므로, 본 연구에서는 이러한 연구에 이어 다양한 형태의 바퀴를 가지는 평면형 모바일 로봇에 미끄럼 마찰운동이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대한 모빌리티를 조사하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 요약된다. 첫째로, Grubler's 모빌리티 공식과 그 적용범위에 관하여 기술한다. 둘째로, 바퀴의 운동성을 고려하여 기구학 관절모델을 제시한다. 끝으로, 다양한 평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 대한 분석을 수행하고 결론을 맺는다.

II. Grubler의 모빌리티 공식

일반적인 메커니즘의 모빌리티를 구하기 위해 적용되는 잘 알려진 Grubler's 모빌리티 공식은 다음과 같이 표현된다[9].

$$M = d(l-1) - \sum_i c_i \quad (1)$$

여기서 d 는 메커니즘 전체 관절들의 허용 운동 공간 차원, l 은 지면을 포함한 링크의 수, 그리고 c_i 는 관절 i 의 구속조건 수를 나타낸다. (1)을 이용하여 다양한 자유도를 갖는 관절들로 구성되는 메커니즘의 모빌리티를 구할 수 있으나, 편의상 본 논문에서는 메커니즘에 사용된 관절로서 1 자유도 관절인 회전 관절과 미끄럼 관절만을 사용하는 경우에만 한하여 기술한다. 특히, n 자유도관절의 구속조건 수는 일반적으로 $(d-n)$ 로 표현됨을 유의하자.

메커니즘의 모빌리티의 규명에 있어 직렬형 메커니즘의 경우, 각 관절들의 허용 운동 공간사이에 서로간의 구속이 없으므로 (1)에 임의의 d 값(일반적으로 6)을 적용하여 모빌리티를 구할 수 있다. 그러나, 병렬형 메커니즘의 경우, 메커니즘의 각 관절의 공동 허용 운동 공간의 차원에 따라 d 의 값이 결정되어야 한다(평면형 또는 구형 메커니즘의 경우는 3, 그리고 대부분의 공간형 메커니즘의 경우는 6이 사용된다). Hunt는 d 의 값에 따라, 메커니즘을 One-system, Two-system, Three-system, Four-system, Five-system, Six-system으로 분류하였으며 d 의 값은 사용된 모든 관절 축들의

접수일자 : 2001. 6. 26., 수정완료 : 2001. 11. 22.

김희국 : 고려대학교 제어계측공학과(wheekuk@korea.ac.kr)

이승은 : 고려대학교 대학원(greenfog@mail.korea.ac.kr)

이병주 : 한양대학교 전자컴퓨터 공학부(bj@hanyang.ac.kr)

※ 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

허용 운동 공간을 나타내는 독립적인 관절 스크류의 수에 의해 결정될 수 있다[9]. 관절 스크류와 이들의 독립성을 조사하는 방법에 대한 요약은 부록에 기술한다.

한 예로서 평행사변형 구조를 가지고 있는 그림 1과 같은 사절기구를 고려하자. 임의의 원점 O 에 대한 각 관절의 스크류는 각각

$$\mathcal{S}_1 = (0, 0, 1; y_1, -x_1, 0), \quad (2)$$

$$\mathcal{S}_2 = (0, 0, 1; y_2, -x_2, 0), \quad (3)$$

$$\mathcal{S}_3 = (0, 0, 1; y_3, -x_3, 0), \quad (4)$$

$$\mathcal{S}_4 = (0, 0, 1; y_4, -x_4, 0), \quad (5)$$

와 같이 표현되며 (A-6)로부터 관절 스크류 행렬의 랭크는 3임을 알 수 있다. 이는 네 개의 관절 스크류 중 하나는 종속 관절 스크류이며 나머지 세 개는 독립 관절 스크류임을 의미한다. 따라서, 모든 관절 운동 공간은 d 가 3인 평면 공간 상에 있으며 (1)로부터 메커니즘의 모빌리티는 1임을 알 수 있다.

이와 같이 평면형 메커니즘의 경우 관절 수와 상관없이 항상 3개의 독립적인 관절 스크류를 가지고 있는데 모든 회전관절 축은 서로 평행하며 모든 미끄럼 관절 축은 회전관절 축에 수직인 평면상에 놓인 구조를 가진다. 구형 메커니즘의 경우 미끄럼 관절은 없으며 모든 회전관절 축은 하나의 공통교차점을 가지도록 놓인 구조를 가지고 있다.

한편, 그림 2a)의 메커니즘은 실제로 1의 모빌리티를 가지고 있는 시스템이다. 그러나, 메커니즘의 모든 각 관절의 구속조건의 수가 $d-1$ 이라 가정할 때 모빌리티 공식 (1)에 의해 구해지는 모빌리티는 움직이지 못하는 구조를 의미하는 0으로 나타난다. 이러한 메커니즘을 Hunt는 [9]에서 기하학적 일반성이 결핍된 구조를 가지는 메커니즘으로 구분하고 있다. 구체적으로, 이 메커니즘에 관한 기하학적 결핍은 다음과 같이 설명될 수 있다: 지면에 고정된 세 개의 회전관절의 위치가 모두 동일한 직선 상에 있는 구조로 인하여 다른 두 개의 회전관절과는 달리 나머지 한 개의 회전관절에는 관절에 연결된 링크의 수직방향으로만 구속력이 작용한다. 따라서, 이러한 관절에 가해지는 구속조건의 수는

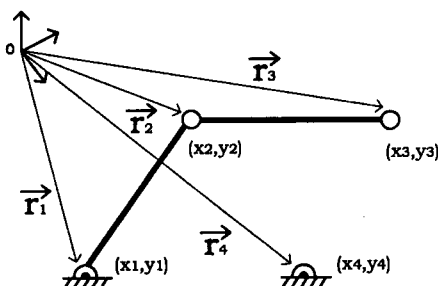


그림 1. 평면형 Four-Bar 메커니즘.

Fig. 1. A planar four-bar mechanism.

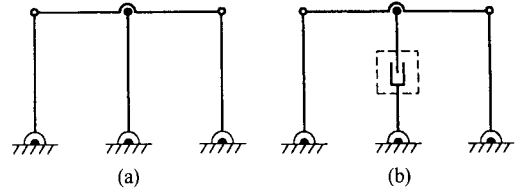


그림 2. 평행사변형 평면형 메커니즘, (a) 가상 미끄럼 관절이 없는 경우, (b) 가상 미끄럼 관절이 추가된 경우.

Fig. 2. A Parallelogrammic planar mechanism a) without an imaginary prismatic joint, b) with an imaginary prismatic joint.

$d-2=1$ 인 것이다. 이와 같이 하나의 상대 자유도(relative mobility)를 가지는 미끄럼 관절이나 회전관절에 가해진 구속조건의 수는 대부분의 경우 $d-1$ 로 표현되지만 경우에 따라 구속조건의 수는 그림 2에서와 같이 $d-1$ 보다 적은 $d-2$ 값을 가지는 경우가 존재한다. 이러한 $d-1$ 보다 적은 수의 구속조건 수를 가지는 관절의 발생은 메커니즘에 설치된 관절의 기하학적 위치에 따라 결정되므로 메커니즘의 기하학 구조로부터 또는 가상관절을 이용하거나 관절 스크류를 이용한 방법으로부터 파악할 수 있다.

그러면, 이러한 기하학적 일반성이 결핍된 메커니즘의 결핍을 보완하는 방법에 관하여 기술한다. 그림 2b)는 그림 2a)와 같이 지면에 고정된 세 개의 회전관절의 위치가 모두 동일한 직선 상에 있는 메커니즘에 하나의 미끄럼 관절이 추가된 메커니즘을 보여주고 있다. 이 메커니즘의 경우 메커니즘이 움직일 때, 추가된 미끄럼 관절의 변위는 항상 변하지 않고 고정되어 있다는 사실을 쉽게 확인할 수 있다. 역으로, 이와 같은 관절의 변위가 항상 0인 미끄럼 관절을 제거한 메커니즘이 바로 그림 2a)에 나타난 구조임을 알 수 있다. 그러므로, 그림 2b)는 그림 2a)의 기하학적 일반성 결핍을 보완하기 위해 가상 미끄럼 관절을 추가한 메커니즘으로서 간주될 수 있다. 따라서, 그림 2a)의 모빌리티는 그림 2b)와 같은 가상 관절이 추가된 메커니즘에 대하여 Grubler 모빌리티 공식을 적용함으로써 구해질 수 있음을 알 수 있다.

III. 바퀴의 관절 모델

그러면, 평면형 로봇에 사용되는 다양한 형태의 바퀴들의 모빌리티에 관하여 조사한다. 표 1은 네 가지 형태의 바퀴에 대한 관절 모델을 보여주고 있다. 고정바퀴의 운동은 바퀴의 접촉점을 지나며 접촉면에 수직인 축에 대한 회전마찰로 인한 회전($\dot{\eta}$), 바퀴의 구동 축에 대한 회전에 의한 진행방향으로의 직진운동($r\dot{\theta}$), 그리고 바퀴의 진행방향으로의 미끄럼 마찰운동(v_{sl} :sliding friction)과 바퀴의 측면방향으로의 미끄럼 마찰운동(v_{sk} :skidding friction)으로 표현함으로써 각각 세 개의 미끄럼 관절과 한 개의 회전관절로 모델할 수 있다. 여기서, 바퀴 회전에 의한 운동은 회전관절(θ)로서 표현되어도 무방하다. 오프셋이 없는 조향바퀴의 경우, 고정바퀴의 관절모델에 조향 축에 대한 회전운동이 추가되어 세 개의 미끄럼 관절과 두 개의 회전관절로 표현될 수 있다. 오프셋이 있는 조향바퀴의 경우 오프셋이 없는 조

표 1. 네 가지 형태 바퀴의 관절모델(미끄럼 마찰운동이 존재하는 경우).

Table 1. Joint model of four types of wheels(with translational friction motion).

바퀴의 종류	모양	관절모델
고정바퀴		
오프셋이 없는 조향바퀴		
조향바퀴		
Swedish 바퀴		

향바퀴와 유사하며 단지 조향 축이 회전 마찰 축으로부터 offset 길이만큼 떨어져 있다. 따라서, 세 개의 미끄럼 관절과 두 개의 회전관절로 표현될 수 있다.

Swedish 바퀴는 바퀴의 구동축의 회전에 의한 직선운동($r\theta$), 롤러와 지면과의 접촉점을 지나며 접촉면에 수직인 축에 대한 회전마찰로 인한 회전(η), 롤러(roller)의 회전축 방향으로의 미끄럼 마찰(v_{sk} :skidding friction)과 롤러의 진행방향으로의 미끄럼 마찰(v_{sl} :sliding friction), 그리고 롤러의 회전축에 대한 회전에 의한 직선운동($\rho\phi$)으로서 한 개의 회전관절과 네 개의 미끄럼 관절로 표현될 수 있다.

한편, 바퀴에 미끄럼 마찰운동이 존재하지 않는 경우에 대한 각 바퀴의 관절모델은 표 1의 각 경우에서 미끄럼 마찰 운동에 해당하는 두 개씩의 미끄럼 관절을 제외하면 된다.

IV. 평면형 모바일 로봇

표 2는 다양한 평면형 모바일 로봇에 대한 관절 모델과 모빌리티에 관한 결과를 보여주고 있다. 먼저, 표 2a), 표 2b), 그리고 표 2c)과 같이 동일한 축에 두 개의 고정 바퀴가 한 축 상에 있는 모바일 로봇을 고려한다. 이러한 구조의 모바일 로봇의 관절모델로부터 이들은 모두 네 개의 관절과 세 개의 링크로 구성됨을 알 수 있다. 특히, sliding 또는 skidding과 같은 마찰로 인한 바퀴의 미끄럼 운동이 없다고 할 때, Grubler's 모빌리티 공식에 적용하면 이들 모바일 로봇의 모빌리티는

$$M = d \times 3 - (d-1) \times 4 = 4 - d \quad (6)$$

와 같이 얻어질 수 있다. 그리고 이러한 형태의 모바일로봇의 경우 바퀴의 부착형태에 따라 관절모델과 모빌리티가

표 2. 평면형 모바일 로봇의 관절모델 및 모빌리티, \times : 미끄럼 마찰운동을 고려하지 않는 경우, \circ : 미끄럼 마찰운동을 고려하는 경우.Table 2. Joint models and mobility of planar mobile robots : \times : without translational friction motion, \circ : with translational friction motion.

평면형 모바일 로봇	관절 모델링	모빌리티			운동모드
		$l-l$	joint	M	
a)		3	4	\times : 4-d	회전 : 1
		7	8	\circ : 8-d	강체운동 : 3 θ : 2
b)		3	4	\times : 4-d	직선운동 : 1
		7	8	\circ : 8-d	강체운동 : 3 θ : 2
c)		4	5	\times : 5-d	직선운동 : 1 회전 : 1
		7	8	\circ : 8-d	강체운동 : 3 θ : 2
d)		6	8	\times : 8-2d	직선운동 : 1 회전 : 1
		10	12	\circ : 12-2d	강체운동 : 3 θ : 3
e)		5	7	\times : 7-2d	회전 : 1
		10	12	\circ : 12-2d	강체운동 : 3 θ : 3
f)		4	6	\times : 6-2d	운동불가
		10	12	\circ : 12-2d	강체운동 : 3 θ : 3
g)		6	8	\times : 8-2d	회전운동 : 1 ϕ : 1
		11	13	\circ : 13-2d	강체운동 : 3 θ : 3 ϕ : 1
h)		13	10	\times : 10-3d	직선운동 : 1
		13	16	\circ : 16-3d	강체운동 : 3 θ : 4
i)		7	10	\times : 10-3d	회전 : 1
		13	16	\circ : 16-3d	강체운동 : 3 θ : 4
j)		8	11	\times : 11-3d	ϕ : 2
		15	18	\circ : 18-3d	강체운동 : 3 θ : 4 ϕ : 2

표 2 (계속)

평면형 모바일 로봇	관절 모델링	모빌리티			운동모드
		l-l	joint	M	
k)		11	16	$\times : 16-5d$	직선운동 : 1
		19	24	$\bigcirc : 24-5d$	강체운동 : 3 $\theta : 6$
l)		10	15	$\times : 15-5d$	운동불가
		19	24	$\bigcirc : 24-5d$	강체운동 : 3 $\theta : 6$
m)		10	15	$\times : 15-5d$	운동불가
		19	24	$\bigcirc : 24-5d$	강체운동 : 3 $\theta : 6$
n)		12	17	$\times : 17-5d$	$\psi : 2$
		21	26	$\bigcirc : 26-5d$	강체운동 : 3 $\theta : 6$ $\psi : 2$

% 위 결과는 모바일 로봇의 관절 운동공간이 항상 $d=3$ 인 평면형 공간에 걸쳐있다는 가정하에 수행되었음.

달라진다. 표 2의 모든 분석에서는 모바일 로봇 관절의 허용 운동공간을 평면형 공간으로 가정하여 수행하였다($d=3$).

먼저, 표 2a)와 같이 두 개의 바퀴가 바퀴 축에 수직이 아닌 임의의 각으로 장착된 모바일 로봇을 고려한다. 이 모바일 로봇의 모빌리티를 구하면 (6)으로부터 1의 모빌리티를 가지는 것을 알 수 있다. 실제로, 이 모바일 로봇은 표 2a)에서와 같이 바퀴의 회전축이 만나는 점에 존재하는 순간회전 중심을 중심으로 회전하는 운동만이 허용된다. 한편, 표 2b)와 같이 두 개의 바퀴가 바퀴 축에 수직이 아닌 다른 동일한 각으로 장착되는 경우 순간회전 중심은 바퀴의 회전축을 따라 무한대인 위치에 존재하므로 바퀴의 진행방향으로의 직선운동만을 하게 된다.

그러나, 표 2c)와 같은 두 개의 바퀴가 축 상에 수직하며 서로 평행하게 고정된 경우는 두 바퀴의 순간회전중심은 바퀴의 중심축 선상의 임의의 위치에 존재할 수 있다. 따라서, 모바일 로봇의 운동은 순간회전중심이 무한대의 위치에 있는 경우에 대한 운동인 바퀴의 진행방향으로의 직선운동과 순간회전중심이 유한위치에 해당하는 위치에 있는 경우에 대한 모바일 로봇 몸체의 회전운동을 가질 수 있다. 그러므로 이 모바일 로봇의 모빌리티는 앞의 두 경우와는 달리 (6)으로부터 바로 얻어진 1이라는 모빌리티는 모바일 로봇의 올바른 모빌리티 값을 나타내지 못한다. 따라서, 표 2c)의 모바일 로봇은 기하학적 일반성이 결핍된 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결핍을 보충하기 위하여 표 2c)의 관

절모델에서와 같이 하나의 가상 미끄럼 관절이 추가되어야 하며 이 경우 (6)으로부터 모빌리티는 2임을 알 수 있다.

그러면 표 2c)의 모바일 로봇을 통해서 기하학적 결핍의 발생여부 및 가상 미끄럼 관절의 위치설정에 관하여 기술한다. 본 분석에서 모바일 로봇의 허용운동공간은 3 자유도 평면공간 ($d=3$)으로 가정하였으므로 각 링크 사이에 하나의 가상관절을 부착한다고 가정한다. 그리고 모바일 로봇이 3 자유도 평면공간 내에서 임의의 운동을 수행할 때 이러한 가상관절의 변위가 발생하는 지를 확인한다. 실제로, 오직 두 바퀴사이의 축 방향으로 가상 미끄럼 관절이 부착되었을 경우에만 이러한 가상 미끄럼 관절의 변위가 발생하지 않는다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나, 표 2a)와 표 2b)의 경우에 가상관절이 추가되었을 때 모든 경우에 그 변위가 변화하는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 이러한 메커니즘은 기하학적 결핍이 없는 메커니즘임이 확인된다.

이와 같이 가상관절을 이용한 메커니즘 또는 모바일 로봇의 기하학적 일반성의 결핍 여부 및 가상관절의 유형은 1) 모바일 로봇이 운동공간 내에서의 임의의 운동을 수행할 때 추가된 가상관절의 변위의 변화여부를 점검하고 2) 고정된 변위를 가지는 가상관절의 존재여부를 파악함으로써 결정된다. 이러한 과정을 통하여 다양한 평면형 모바일 로봇의 가상관절을 포함한 관절모델 그리고 모빌리티에 대한 분석을 수행하였으며 다음은 표 2에 대한 결과들에 대한 요약이다.

표 2d)에서와 같이 바퀴 축에 수직인 $N(\geq 2)$ 개의 바퀴가 장착된 모바일 로봇의 모빌리티 분석에 있어서는 항상 $N-1$ 개의 가상 미끄럼 관절을 포함한 모델이 적용되어야 함을 유의하자. 즉 각 바퀴사이의 구동축방향으로의 변위는 항상 변화하지 않는다는 사실로부터 가상관절의 위치는 파악할 수 있다. 마찬가지로, 표 2e)와 표 2g)의 경우에는 각각 오직 두 바퀴만이 평행을 이루고 있으므로 이들 두 바퀴사이의 축 방향으로 한 개의 가상 미끄럼 관절이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

표 2h)와 표 2i)의 경우를 고려하자. 두 개 각각의 바퀴축에 수직으로 고정된 두 개의 고정바퀴에 대해서는 표 2c)의 경우와 같이 각 축에 하나의 가상 미끄럼 관절이 포함된다. 한편, 이들 두 축 사이에 또 다른 가상 미끄럼 관절이나 가상 회전 관절이 요구되는 지에 관한 여부는 먼저 이들 두 축 사이에 가상관절을 부착하고 앞 뒤 두 바퀴들이 각각 운동을 할 때 부착된 가상관절의 변위가 발생한다는 사실로부터 이 메커니즘은 기하학적 결핍이 없는 메커니즘임을 확인할 수 있다. 표 2j)의 경우는 표 2c)와 같이 한 축에 평행인 두 개가 고정되어 있으므로 이들 바퀴사이의 축 방향으로 하나의 가상 미끄럼 관절이 포함되었다.

표 2k)에서부터 표 2n)에서와 같은 세 개 이상의 축이 연결된 모바일 로봇의 모빌리티는 II절에서 기술한 평행사변형 메커니즘의 경우에서와 같이 기하학적 일반성 결핍을 보완하기 위하여 가상 미끄럼(또는 회전) 관절을 포함한 관절 모델로부터 구해진다. 표 2k)의 경우를 고려하자. 표 2c)와 마찬가지로 세 개의 각 축에 하나씩의 가상 미끄럼 관절이 보완된다. 그리고 표 2h)와 같이 세 개의 축 중에서 임의의

두 개 축(예를 들면, 그림과 같이 두 번째 바퀴축과 세 번째 바퀴축) 사이에는 가상관절이 요구되지 않음을 알 수 있다. 그러나, 표 2h)에서와 같이 두 개축이 연결된 부시스템의 운동은 직선운동만이 가능하다. 실제로, 이 부시스템과 나머지 바퀴축(앞바퀴 축)사이에도 또 하나의 가상 회전 관절의 요구되며 이 가상관절의 존재여부는 앞바퀴 축과 부 시스템 사이에 표 2k)에 보인바와 같이 가상 회전 관절이 부착되었을 때 부착된 관절의 변위가 변하지 않음을 확인함으로써 규명된다.

표 2l)과 표 2m)의 경우, 표 2h)와 같은 구조의 두 뒷축에 해당하는 부시스템에는 두 개의 가상 미끄럼 관절이 포함된다. 반면에 앞 축의 두 바퀴를 포함하는 부시스템은 표 2a) 또는 표 2b)와 같은 구조로서 가상 관절이 필요 없음을 알 수 있다. 그러나, 이 둘 모바일 로봇 앞 뒤의 두 부시스템 사이에 가상관절의 필요여부는 다음과 같이 결정된다. 표 2l)의 경우는 앞 축의 두 바퀴를 포함하는 부 시스템은 두 바퀴의 순간회전중심에 대한 회전운동을 한다. 그리고 뒤 네 바퀴를 포함하는 부시스템의 운동은 직선운동을 한다. 따라서, 이들 두 부 시스템 사이에는 가상회전관절을 부착하는 경우 변위가 발생치 않음을 알 수 있으므로 그림과 같이 가상회전관절이 관절모델에 포함되었다. 마찬가지로, 표 2m)의 경우는 앞 두 바퀴를 포함하는 부시스템의 운동이 바퀴의 진행 방향으로 제한되며 가상 회전관절이 부착되는 경우 변위가 발생되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 표 2l)의 경우와 동일하게 하나의 가상 회전 관절이 관절모델에 포함되었다.

한편, 그 밖의 다른 다양한 형태의 평면형 모바일 로봇의 모빌리티도 동일한 방법으로 구할 수 있으며 미끄럼 마찰이 발생하는 경우와 발생되지 않는 경우에 대한 결과는 표 2에 집약되어 있다. 특히, 미끄럼이 발생되지 않았을 때 기하학적 결핍이 존재하는 모바일 로봇일지라도 미끄럼 마찰운동이 발생하는 경우, 스스로 기하학적 일반성의 결핍이 보완되므로 가상 미끄럼 관절을 포함하지 않아야 된다는 사실을 유의하자. 이러한 사실은 미끄럼 마찰운동이 발생하는 평면형 로봇의 경우, 미끄럼 마찰운동이 없는 경우와 같이 가상관절을 포함했을 경우 가상관절의 변위가 변화된다는 사실로 쉽게 확인할 수 있다.

표 2에서 운동모드는 해당 모바일 로봇의 모빌리티를 표현하기 위해 적절히 설정한 운동모드를 나타내는 것이다. 마찰운동이 발생되지 않는 경우 표 2a)와 표 2e)의 모바일 로봇은 각각 바퀴의 순간회전중심에 대한 회전운동을 가지며 표 2b)는 바퀴의 진행방향으로의 직진운동만을 가진다. 표 2c)와 표 2d)의 모바일 로봇은 바퀴의 진행방향으로의 직진운동과 회전운동을 가진다. 표 2f)는 운동이 불가능한 시스템을 나타낸다. 표 2g)는 세 바퀴의 순간회전중심에 대한 회전운동과 조향바퀴의 조향운동을 가지며 표 2h)는 진행방향으로의 직선운동만을 가진다. 한편, 표 2i)는 네 바퀴의 순간회전중심에 대한 회전운동을 가지며 표 2j)는 두 조향바퀴의 조향운동만을 가진다. 표 2k)는 진행방향으로의 직선운동을 가지며 표 2l)과 표 2m)과 같은 구조의 모바일 로봇은 운동이 허용되지 않는다. 표 2n)의 경우는 두 개의 조향운동

만이 가능하다.

그러나, 마찰운동이 발생하는 경우, 표 2a), 표 2b), 그리고 표 2c)의 운동은 다음과 같은 다섯 개의 운동모드로서 표현될 수 있다: 각 두 바퀴의 회전에 의한 운동(예: 바퀴의 공회전 모드: 바퀴의 회전이 지면과의 미끄럼으로 인하여 모바일 로봇 몸체에 영향을 주지 않고 바퀴만 공전되는 모드)과 바퀴의 회전이 고정된 상태에서 바퀴와 지면과의 미끄럼만으로 인하여 발생하는 모바일 로봇 몸체의 두 직선운동과 회전운동. 표 2에서 θ 모드는 바퀴의 공회전모드를 나타내며 ϕ 모드는 조향운동모드를 의미한다. 그리고 강제운동모드는 모바일 로봇 몸체의 두 직선운동과 회전운동을 나타낸다. 표 2d), 2e), 2f)는 모두 세 개의 강제운동과 세 바퀴의 공회전모드로서 여섯 개의 모빌리티를 가지며 표 2g)는 추가로 조향운동모드를 가진다. 표 2h)와 2i)는 모두 세 개의 강제운동모드와 네 바퀴의 공회전 모드를 가지며 표 2j)는 추가로 두 개의 조향모드를 가진다. 표 2k), 2l) 그리고 2m)은 모두 세 개의 강제운동모드와 여섯 개 바퀴의 공회전 모드를 가지며 표 2n)은 추가로 두 개의 조향모드를 가진다.

V. 결론

본 논문에서는 다양한 모바일 로봇의 모빌리티에 관하여 조사하였다. 먼저 모바일 로봇에서 주로 사용되고 있는 네 가지 형태의 바퀴에 대한 미끄럼 관절운동이 포함된 단순화된 관절 모델을 제시하였으며 이러한 바퀴들의 조합으로 이루어지는 평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 관하여 조사하였다. 이 밖에 다른 모든 형태의 평면형 모바일 로봇에 대한 모빌리티에 대한 분석은 동일한 방법으로 구해질 수 있다.

그리고 본 논문에서 제시된 모빌리티에 대한 결과는 일반 평면형 모바일 로봇의 기구학 모델에 있어 주행 표면에 따른 올바른 관절모델에 대한 정보를 제시할 뿐만 아니라 실제적인 모빌리티에 대한 값을 제시함으로써 보다 명확한 기구학 모델에 도움이 될 것으로 사료된다.

추후 연구과제로서 Mars rover[5]와 같은 거친 표면을 주행할 수 있는 공간형 모바일 로봇의 경우 주행 표면 상태에 따라 모빌리티가 변화되므로 이에 대한 명확한 모빌리티 분석이 요구된다. 또한, 이러한 다양한 형태의 모바일 로봇에 대한 모빌리티에 관한 결과를 활용하여 네 개 또는 그 이상의 고정바퀴가 장착된 큰 대형 트럭이나 Mars rover[8]와 같은 공간형 모바일 로봇의 분석에 있어 미끄럼 마찰운동을 포함한 기구학 모델과 정속도 해에 관한 알고리즘 그리고 미끄럼 마찰운동과 관련있는 노면조건을 고려한 동역학 모델 등에 대한 연구가 있으며 현재 이들에 대한 연구가 진행 중에 있다.

참고문헌

- [1] L. W. Tsai, G. C. Walsh, and R. E. Stamper, "Kinematics of novel three DOF translational platform," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3446-3451, 1996.
- [2] L. W. Tsai and S. Joshi, "Comparison study of architecture of four 3 degree-of-freedom translational parallel manipulators," *IEEE International Conference on Robotics and*

Automation, pp. 1283-1288, 2001.

- [3] F. Pierrot, F. Marquet, O. Company, and T. Gil, "H4 parallel robot: modeling, design and preliminary experiments," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3256-3261, 2001.
- [4] P. F. Muir and C. P. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots," *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 281-340, 1987.
- [5] G. Campion, G. Bastin, and B. D'Andrea-Novet, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," *IEEE Trans. on robotics and automation*, vol. 12, no. 1, pp. 47-62, 1996.
- [6] B. J. Yi, and W. K. Kim, "The kinematics for redundantly actuated omni-directional mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2485-2492, 2000.
- [7] B. J. Yi, W. K. Kim, and S. Park, "Kinematic/dynamic modeling and analysis of a 3 degree-of-freedom omni-directional mobile robot with redundant actuation," *IROS Conference tutorial*, ch.1, pp. 1-25, 1999.
- [8] M. Tarokh, G. McDermott, S. Hayati and J. Hung, "Kinematic modeling of a high mobility mars rover," *IEEE Int'l conf. on Robotics and Automation*, pp. 992-998, 1999.
- [9] K. H. Hunt, "Kinematic Geometry of Mechanisms," *Clarendon press/Oxford*, 1978.
- [10] W. K. Kim, D. H. Kim, and B. J. Yi, "Kinematic modeling of mobile robots by transfer method of augmented generalized coordinates," *Proc. of Int'l conf. Robotics and Automation*, pp. 2413-2418, Seoul, 2001.

부록

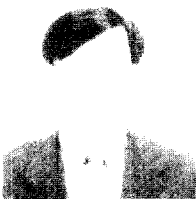
임의의 관절운동으로 인한 물체의 운동은 다음과 같이



김 희 국

1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1985년). 동대학원 박사(1990년). 동대학 기계공학과 Post doc. 1년(1990년). 1991년부터 현재까지 고려대학교 제어계측공학과 교수. 최

근의 관심분야로는 주행로봇/보행로봇의 설계 및 기구학/동역학 분석, 병렬 메카니즘의 설계 및 기구학/동역학 분석, 메카니즘의 모빌리티 분석 등임.



이 병 주

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1986년). 동대학원 박사(1991년). 1992년~1995년 한국기술교육대학교 제어계측공학과 조교수. 1995년~현재 한양대학교 제어계측

공학과 부교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and control, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.

스크류로서 표현될 수 있다:

$$\omega \$ = \omega(\hat{s}; \hat{s}_o) = \omega(\hat{s}; r \times \hat{s} + h \hat{s}) \quad (A-1)$$

여기서 ω 는 관절축 \hat{s} 를 중심으로 각속도를, r 은 임의의 관심점(원점)에서 관절축까지의 위치벡터를, 그리고 $h = (\hat{s} \cdot \hat{s}_o) / (\hat{s} \cdot \hat{s})$ 는 스크류 피치를 나타낸다. 즉, 이러한 스크류로 인한 물체의 운동은 회전축에 대한 회전속도와 관심점에 서 회전축에 수직인 평면상의 병진운동과 회전축에 평행한 피치운동을 유발한다는 정보를 내포하고 있음을 알 수 있다.

특히, 스크류 피치가 0인 관절운동은 순수한 회전관절운동을 나타내며 이에 해당하는 스크류는

$$\omega \$ = \omega(\hat{s}; \hat{s}_o) = \omega(\hat{s}; r \times \hat{s}) \quad (A-2)$$

로 표현된다. 또한, 스크류 피치가 ∞ 인 관절운동은 순수한 미끄럼 관절운동을 나타내며 이에 해당하는 스크류는

$$v \$ = v(0; \hat{s}) \quad (A-3)$$

로 표현된다. $\hat{s} = (0 \ 0 \ 1)^T$ 축에 대한 각속도 ω 를 가지는 회전관절과 (x, y) 평면상의 $\hat{s}_v = (x_v \ y_v \ 0)^T$ 축 방향으로 v 의 속력을 가지는 미끄럼 관절의 물체상의 한 점($r = (x \ y \ 0)^T$)에 대한 스크류는 각각

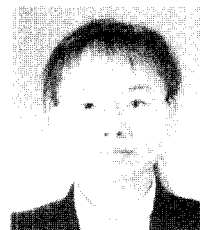
$$\omega \$ = \omega(0 \ 0 \ 1; y - x \ 0), \quad (A-4)$$

$$v \$ = v(0 \ 0 \ 0; x_v \ y_v \ 0) \quad (A-5)$$

와 같이 표현될 수 있다. 이들 스크류는 (x, y) 평면상의 운동을 나타낼을 유의하자.

한편, k 개의 스크류가 있을 때, 이들 사이의 독립성은 다음과 같이 전체 스크류의 rank를 조사함으로써 알 수 있으며 이러한 rank의 값은 모빌리티 공식에 있어 d 의 값에 해당한다:

$$R = \text{rank} \begin{pmatrix} \$1 \\ \$2 \\ \vdots \\ \$k \end{pmatrix}. \quad (A-6)$$



이 승 은

고려대학교 제어계측공학과 졸업(1998년). 동대학원 석사(2001년). 관심분야로는 메카니즘의 모빌리티 분석과 주행 로봇의 기구학 모델링임.