

대표 스크류를 이용한 평면형 및 험로 주행 로봇의 모빌리티 분석

Mobility Analysis of Planar Mobile Robots and The Rough-Terrain Mobile Robot via The Representative Screw

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

Abstract : Mobility analysis for various mobile mechanisms including mechanisms with lack of geometric generality is performed. Joint screws are employed to find the size of feasible joint motion space of each of independent loops of mobile mechanisms. Particularly, the concept of "representative screws" is introduced to represent the feasible motion spaces for subsets of joints belonging to either a loop or a sub-system consisting of several closed loops. Firstly, simplified joint model for each of four different typical wheels popularly employed in mobile robots is described. Then, mobility analysis for various types of planar mobile robots and the Mars Rover mobile robot for navigation on the rocky road on Mars are performed. It is confirmed that the obtained results in this study coincide with the previous ones which were obtained by using imaginary joints approach[1].

Keywords : mobility, representative screw, parallel mechanisms, mobile robot, kinematic model, joint screw

I. 서론

일반적으로 메커니즘의 모빌리티를 분석하기 위해서 Grubler의 모빌리티 공식이 주로 사용되고 있다[2,3]. 그러나, 이 공식은 기하학적 일반성이 결여된 과다 구속 구조 메커니즘의 모빌리티를 구하는 데 적합하지 않다. 이러한 과다 구속 메커니즘의 모빌리티를 구하기 위해 다양한 방법들이 제시되고 있으며 대표적인 방법으로는 스크류를 이용한 방법[2]과 Group theory을 이용한 방법[4]이 있다. 그러나, 아직까지도 구름으로 인한 비홀로노믹(non-holonomic) 특성 및 기하학적 일반성이 결여된 구조를 가지는 대부분 주행 로봇의 모빌리티에 관한 분석은 명확하게 수행되지 못하고 있다[5-10].

Campion 등[6]은 네 가지 다른 형태를 가진 바퀴의 조합으로 이루어지는 평면형 주행 로봇의 기동성(manueverability)에 관하여 논하였다. 네 가지 형태의 바퀴는 고정바퀴(conventional fixed wheel), 오프셋 없는 조향바퀴(centered orientable wheel), 오프셋 있는 조향바퀴(off-centered orientable wheel, or called caster wheel), 그리고 Swedish 바퀴 등이다. 이들은 기동성을 모빌리티와 조향성(steerability)의 합으로 정의하였는데 조향성이란 독립적인 조향(independent steering)을 가지는 오프셋 없는 조향바퀴의 수로 정의되며 모빌리티는 일반적으로 사용되는 모빌리티(또는 자유도)[2,3]와는 달리 출력 공간(target space: 특히, 평면에서의 운동 공간은 3 입)에서의 자유운동공간 수로서 정의되었다. 즉, non-holonomic 모바일 로봇에 대해 이들이 정의한 기동성은 일반적인 메커니즘분야에서 정의되는 자유도와 동일한 의미

이다. 실제로, 이들이 정의한 모빌리티는 전체 출력 공간으로부터 구속공간의 수를 제외한 나머지 공간 수로서 쉽게 얻어진다.

최근에 Yi와 Kim[7][8]은 단순화된 관절모델에 근거하여 세 개 또는 네 개의 캐스터 바퀴를 장착한 모바일 로봇의 모빌리티에 관하여 기술하였다. 이러한 연구에 이어, Kim [1] 등은 비홀로노믹 특성으로 인하여 기하학적 일반성이 결여된 구조로 표현되는 다양한 평면형 주행로봇의 모빌리티를 규명함에 있어 기하학적 일반성의 결핍구조에 대한 보완책으로서 가상관절을 추가하는 방법을 활용하였다. 또한, 실제의 경우와 같이 sliding이나 skidding 미끄럼 마찰운동이 발생하는 다양한 평면형 주행로봇의 모빌리티를 분석하였다. 그러나, 이와 같이 가상관절을 추가하는 방법은 직관에 의존하는 방법으로서 지면이 평면이 아닌 험로 주행 로봇의 모빌리티 해석에는 적절치 않다.

따라서, 본 연구에서는 관절 스크류를 이용하는 주행 로봇의 모빌리티 방식을 제시하고자 한다. 먼저, 다양한 바퀴에 대한 관절모델을 제시하고, 기존의 Grubler의 모빌리티 공식에 관절 스크류를 적용하여 다양한 형태의 병렬 메커니즘의 모빌리티를 구하는 방법을 제시한다. 특히, 이 방법에서는 대표 스크류라는 개념이 하나의 페루프 또는 여러 개의 페루프로 구성되는 부시스템에 속하는 관절들의 일부 셀에 대한 가능(feasible)운동공간을 표현하기 위하여 소개된다. 그리고 이러한 방법을 이용하여 다양한 평면형 주행로봇의 모빌리티를 규명한다. 끝으로, 험로 주행로봇인 Mars Rover[9]의 관절모델과 모빌리티 분석을 수행함으로써 대표 스크류를 이용한 제시된 방법의 유효성을 확인하고 결론을 맺는다.

II. 바퀴의 관절 모델

표 1은 평면형 주행 로봇에 자주 활용되는 네 가지 다른

논문접수 : 2002. 2. 18., 채택확정 : 2002. 8. 28.

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

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

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

형태의 바퀴를 보여주고 있다. 고정바퀴는 세 개의 관절을 가지는 것으로 모델될 수 있다: 지면과 바퀴사이의 접촉점을 지나며 접촉면에 수직한 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(η), 바퀴 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(θ), 그리고 바퀴 평면에 평행하며 지면과 바퀴사이의 접촉점을 통과하는 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(θ_c).

Swedish 바퀴는 네 개의 관절을 가지는 것으로 모델될 수 있다: 바퀴 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(θ_w), 지면과 로울러사이의 접촉점을 통과하며 접촉면에 수직한 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(η), 로울러 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(ϕ_r), 그리고 로울러 축에 평행하며 지면과 로울러 사이의 접촉점을 지나는 축에 대한 회전을 나타내는 회전관절(ϕ_{rc}).

이와 유사한 방식으로 나머지 다른 두 바퀴인 오프셋이 없는 조향바퀴, 오프셋이 있는 조향바퀴에 대한 관절모델을 쉽게 구할 수 있으며 표 1은 모든 네 가지 바퀴에 대한 관절과 관절 스크류 축을 보여주고 있다. 특히, 이상의 모델에서 각 바퀴에서 sliding이나 skidding과 같은 바퀴의 진행방향과 측면방향으로의 미끄럼 마찰이 발생할 경우에는 표 2에서와 같이 각 방향으로 한 개씩의 미끄럼 관절이(바퀴의 진행방향으로의 미끄럼 관절 v_{sl} 와 바퀴의 측면방향으로의 미끄럼 관절 v_{sk}) 접촉점을 지나며 접촉면에 평행한 방향으로 추가되면 된다.

표 1. 네 가지 다른 형태의 바퀴 관절 모델.
Table 1. Joint model for four different types of wheels.

Type	Schematics	Joint Screw
Conventional Wheel		
Centered Orientable Wheel		
Off-centered Orientable Wheel		
Swedish Wheel		

III. Grubler의 모빌리티 공식

Grubler의 모빌리티 공식은 다음과 같이 두 가지 형태로 나타내어 진다[3];

$$M = d(l-1) - \sum_{i=1}^n c_i, \tag{1}$$

$$M = \sum_{i=1}^n f_i - \sum_{j=1}^m d_{Lj}, \tag{2}$$

(1)에서 d , l , c_i 와 n 은 각각 메커니즘 전체 관절의 가능운동공간 차원 수, 지면을 포함한 링크의 수, i 번째 관절의 구속조건 수 그리고 관절 수를 나타낸다. (2)에서 f_i , L_j , d_j 와 m 은 각각 i 번째 관절의 상대 모빌리티 수, 부속 루프 j , 부속 루프 j 에 속하는 모든 관절의 가능운동공간 차원 수, 그리고 독립루프의 수를 나타낸다. (1)과 (2)는 각각 직렬 메커니즘과 다수의 부속체인을 가지는 병렬 메커니즘의 모빌리티 분석에 유용하다. 특히, (1)과 (2)에서 d 와 d_{Lj} 는 각각 독립 관절 스크류 수를 조사함으로써 규명될 수 있음을 유의하자 (부록참조).

표 2. 네 가지 다른 형태 바퀴의 관절 모델. (미끄럼마찰 운동이 발생되는 경우)

Table 2. Joint model of four different types of wheels. (with Translational Friction motion)

Type	Schematics	Joint Model
Conventional Wheel		
Centered Orientable Wheel		
Off-Centered Orientable Wheel		
Swedish Wheel		

일반적으로, 관절의 가능운동공간 차원이 d 인 메커니즘에 사용된 k 자유도 관절의 경우에 있어 구속조건 수는 $d-k$ 이지만 기하학적 일반성이 결핍된 구조를 가지는 과다구속 시스템[1]에 있어서는 $d-k-1$ 또는 그보다 적은 수의 구속조건을 가질 수 있다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 일반적으로 과다 구속 메커니즘에 있어 관절의 구속조건 수를 직관적으로 알아내는 것을 쉽지 않다.

그림 1a)의 평형사변형 구조 메커니즘을 고려하자. 이 메커니즘은 모빌리티 1을 가지는 기하학적 일반성이 결핍된 과다 구속 시스템의 한 예이다. 따라서 모빌리티 공식 (1)로 부터는 모빌리티 0인 잘못된 결과를 얻게 된다. 이러한 오류의 이유는 메커니즘의 모든 관절이 두 개의 구속조건을 가지는 것이 일반적이지만 예외로 하나의 관절이

오직 한 개의 구속조건을 지니고 있기 때문이다. 이러한 한 개의 구속조건을 가지는 관절은 지면에 고정된 세 개의 관절 중 하나이며 이들 세 개의 관절 중 하나는 오직, 관절에 연결된 링크 끝단에 수직인 방향으로만 반력을 받는다는 사실을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 링크의 길이 방향으로의 힘 구속을 받지 않으므로 길이방향으로 가상적인 미끄럼 관절을 모델 할 때에, 실질적으로 평행사변형 구조를 지님으로 인하여 이러한 가상 미끄럼 관절은 변위가 발생하지 않음을 살펴볼 수 있다.

그림 1b)는 가운데의 링크에 가상관절이 포함된 관절모델을 보여주고 있으며 이러한 모델에 근거하여 Grubler의 모빌리티 공식 (1)에 적용하게 되면 실질적인 모빌리티를 구할 수 있다. $M = 3(6 - 1) - 2 \times 7 = 1$.

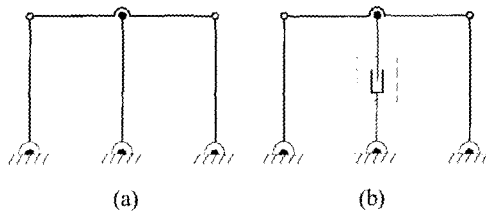


그림 1. 평행사변형 구조의 평면형 메커니즘.
a) 가상관절 없는 구조.
b) 가상관절이 부착된 구조.

Fig. 1. A Parallelogramic planar mechanism.
a) without an imaginary prismatic joint.
b) with an imaginary prismatic joint.

한편, 그림 1a) 메커니즘의 모빌리티는 또한 (2)로부터 구할 수 있다. 그러나, (2)를 적용함에 있어서는 메커니즘을 구성하는 부속루프들 각각에 속한 관절들의 가능운동공간 크기를 구할 때에 세심한 주의가 요구된다. 실제로, 이 메커니즘은 그림 2에서와 같이 각각 A와 B로 표현되는 두 개의 독립 부속 루프를 가지고 있으며 이들 두 독립 부속 루프 각각의 관절들에 대한 가능운동공간의 크기는 각 루프에 속하는 모든 관절들에 대한 독립 관절 스크류의 수를 확인함으로써 규명될 수 있다. 그러나, 루프 A와 루프 B에 공통적으로 속한 일부관절들의 운동은 루프 A 또는 루프 B에서 제한을 받게 될 수 있음을 유의하자.

그러면, 이들 관절들이 루프 A에서는 제한을 받지 않고 루프 B에서 제한을 받는 경우를 고려하자. 즉, 모빌리티 해석을 루프 A에서 출발하는 경우를 고려한다. 그림 3과 같은 임의의 원점에 대한 각 관절 스크류($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$)는

$$\mathcal{S}_i = (0, 0, 1; y_i + y_n, -x_i - x_n, 0) \quad (3)$$

으로 표현된다. 이 식에서는 편의상 첫 번째 관절의 위치를 활용하였으며 이때, 각 관절의 위치 벡터는

$$\begin{aligned} \vec{r}_i &= \vec{r}_1 + \vec{r}_{1i}, \\ \hat{s}_i &= (0 \ 0 \ 1)^T \end{aligned} \quad (4)$$

로 표현된다. 이러한 스크류를 이용하여 루프 A에 속하는 모든 관절들의 가능운동공간의 크기는 3임을 알 수 있으며 루프 A의 모빌리티는 (1)로부터 1임이 확인된다.

그러나, 루프 B의 관절들 중 루프 A와 B 양쪽에 속하는 관절들의 운동은 루프 A의 모빌리티 운동 공간내로 제한 받게 된다. 첫 번째 관절과 두 번째 관절사이의 링크 길이를 l 이라고 할 때, 그림 2와 같은 평행사변형 구조에서는 루프 A에 속하는 링크 a 의 운동 즉, 대표 스크류 \mathcal{S}_a 는

$$\mathcal{S}_a = (0, 0, 0; l \sin \theta, -l \cos \theta, 0) \quad (5)$$

와 같이 얻어지며 이 식으로부터 링크 a 의 운동은 언제나 링크 B에 속하는 링크 b 에 항상 직교하는 방향으로의 선형운동으로 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 한편, \mathcal{S}_a 는 항상 \mathcal{S}_5 와 \mathcal{S}_6 에 종속함이 쉽게 확인된다. 따라서, 루프 B의 모든 관절들의 가능운동공간의 크기는 독립 관절 스크류의 수인 2를 가짐이 확인된다. 이러한 결과를 (2)에 대입하게 되면 그림 2의 전체 메커니즘의 모빌리티는 1로 구해진다: $M = 6 - (3 + 2) = 1$.

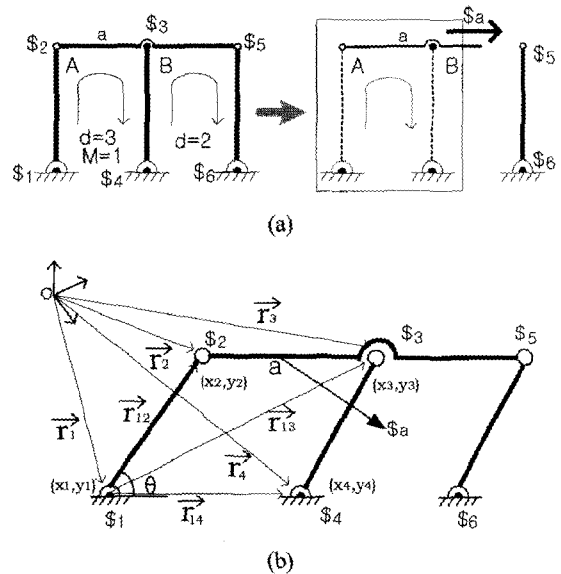


그림 2. 평행사변형 구조의 평면형 메커니즘.
Fig. 2. A Parallelogramic planar mechanism.

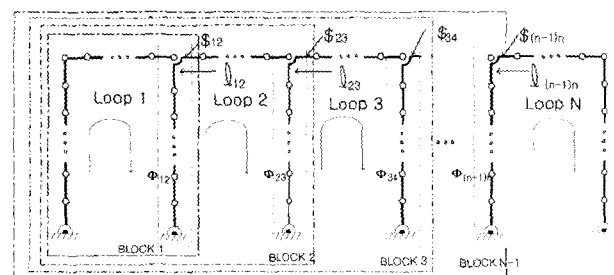


그림 3. 병렬 메커니즘의 개략도.
Fig. 3. Schematic model of a parallel mechanism.

이상과 같이 기하학적 결핍을 가진 대부분 메커니즘의 모빌리티는 부속루프에 의해 구속되는 관절들의 가능운동 공간을 나타낼 수 있는 대표 스크류를 규명함으로써 구해 질 수 있다. 일반적으로, 그림 3과 같은 다수의 부속체인으로 구성된 병렬 메커니즘의 모빌리티를 규명하는 절차는 아래와 같이 요약될 수 있다.

단계 I) 먼저 전체 병렬 메커니즘을 구성하는 각 루프들이 구속되는 순서를 결정한다. 편의상, 그림 3에서는 루프 1에서부터 차례로 루프 n 까지 차례로 구속되었다고 가정한다.

단계 II) 루프 1에 속하는 관절들의 독립 스크류의 수를 구하고 루프 1을 포함하는 블록 1의 모빌리티를 구한다.

단계 III) $k=2$ 로 설정한다. 블록 $k-1$ 과 루프 k 를 연결하는 링크 $l_{(k-1)k}$ 의 가능운동공간을 반영하는 대표 스크류 셀 $\$_{(k-1)k}$ 를 규명한다. 대표 스크류 셀 $\$_{(k-1)k}$ 과 블록 $k-1$ 에 속하지 않는 루프 k 의 관절셀에 대한 스크류 셀로부터 독립 관절 스크류의 수를 구한다. 그리고 블록 $k-1$ 과 루프 k 를 포함하는 블록 k 의 모빌리티를 구한다.

단계 IV) $k=n$ 일 때까지 단계 III를 반복한다.

단계 I)에서 루프 1에서 루프 N 까지 단계적으로 모든 부속 루프가 차례로 구속되었다고 가정하였으나, 메커니즘의 구조에 따라 해석의 편의상 루프가 구속되는 순서는 다양하게 변화될 수 있으며 다양한 갈래의 블록구조로 구속 조건이 부여되었다고 가정할 수 있다. 서로 다른 갈래의 두 블록들이 하나의 루프로 연결될 때 이 루프에 속한 관절들의 가능운동공간을 구하기 위해 루프와 각 블록에 공통적으로 속한 두 관절셀들의 가능운동공간을 나타내는 대표 스크류가 요구된다.

최근에 Kim[1] 등이 가상관절을 활용하여 다양한 평면형 주행 로봇의 모빌리티 분석을 수행하였지만 활용된 방법은 주로 직관에 의존하는 방법으로 복잡한 메커니즘의 경우에는 적용하기가 쉽지 않았다. 따라서, 본 절에서는 하나의 루프 구조를 가지고 있으면서 구름 접촉이 발생하는 기어 시스템과 차동구동 시스템의 관절 모델과 모빌리티 분석에 관하여 기술한다.

그림 4a)와 같은 기어 시스템의 관절모델은 그림 4b)와 같이 모델될 수 있으며 이들의 관절 스크류는 임의의 원점에 대하여 아래와 같이 표현된다:

$$\$_i = (0 \ 0 \ 1; r_{iy} \ -r_{ix} \ 0), \quad i=1,2,3. \quad (6)$$

그러나, 이들 관절 스크류는 모두 평행하며 일직선상에 위치하므로 이들의 독립 관절 스크류수는 $d=2$ 임을 쉽게 알 수 있다: 즉, $r_2 - r_1 = a(r_3 - r_1)$ 여기서 a 는 임의의 상수. 따라서, 각 관절의 구속 조건 수는 $d-1=1$ 이므로 이 시스템의 모빌리티는 $M=2(3-1)-1 \times 3=1$ 로 얻어진다. 그리고 그림 4c)와 같은 시스템의 관절모델은 그림 4d)와 같이 모델 된다. 이 모델에 대한 관절 스크류수는 각각

$$\$_1 = \$_4 = (0 \ 0 \ 0; s_x \ s_y \ 0), \quad (7)$$

$$\$_j = (0 \ 0 \ 1; r_{jy} \ -r_{jx} \ 0), \quad j=2,3. \quad (8)$$

로 표현되며 이로부터 독립관절 스크류, 즉 관절들의 가능운동공간의 크기는 $d=3$ 임을 알 수 있다. 따라서 각 관절들의 구속조건수는 $d-1=2$ 이므로 이 시스템의 모빌리티는 $M=3(4-1)-2 \times 4=1$ 로 얻어진다.

한편, Mars Rover[9]에는 그림 5a)와 같은 차동구동 시스템이 사용되었는데 이에 대한 관절모델은 그림 5b)와 같은 4절기기로 표현된다. 이들 네 개의 회전 관절 축은 하나의 공통점 O 를 가지므로 임의의 원점 O 에 대한 이들 네 개의 관절 축까지의 위치벡터는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$r_i = \overline{OO'} + as_i, (i = b1, b2, \beta_1, \beta_2). \quad (9)$$

따라서, 이들 각각에 대한 스크류는

$$\$_i = (s_i; \overline{OO'} \times s_i) \quad (10)$$

와 같이 표현된다. 한편 네 개의 회전 관절 축은 모두 한 평면상에 위치하므로 두 개의 독립 스크류($d=2$)를 가진다. 따라서, 모빌리티는 $M=2(4-1)-1 \times 4=2$ 로 규명된다.

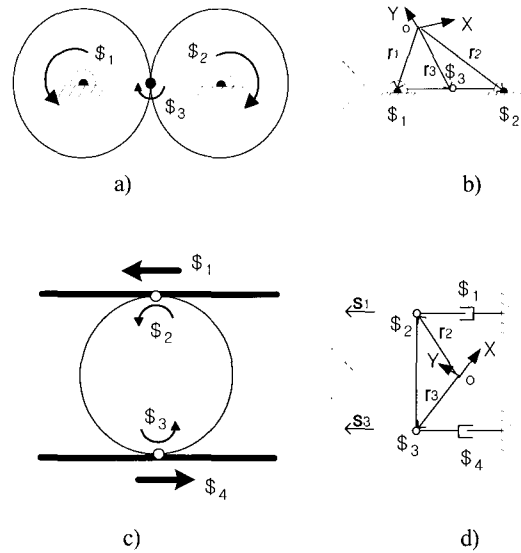


그림 4. 기어 시스템의 관절모델.
Fig. 4. Joint model of gear systems.

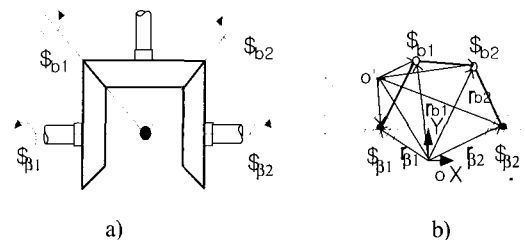


그림 5. 차동구동장치에 대한 관절모델.
Fig. 5. Joint model of differential drive systems.

IV. 평면형 모바일 로봇

먼저, 지면 위에서 굴러가는 바퀴의 운동은 그림 4b)에서 두 개중 하나의 기어 회전이 고정된 경우와 마찬가지로, 지면과의 접촉점을 중심으로 하는 바퀴의 회전운동과 바퀴 축과 바퀴 허브의 상대 회전운동인 두 개의 회전관절로 표현될 수 있음을 유의하자. 그림 6은 두 개의 고정 바퀴를 가지는 평면형 주행로봇으로서 두 바퀴 관절 모델들과 회전축의 중심좌표계에 대한 관절 스크류를 보여주고 있다. 이 주행 로봇은 하나의 루프를 가지고 있으며 이에 대한 독립적인 관절 스크류의 수 d 는 이들 관절 스크류의 랭크를 확인함으로써 3임을 알 수 있다. 따라서 모빌리티는 (2)에서 3임이 확인된다. 이 세 가지 운동 모드는 각각 주행로봇의 진행방향으로의 직진, 수직 축에 대한 회전, 그리고 바퀴에 대한 바퀴 축 자체(물체)의 회전에 나타낼 수

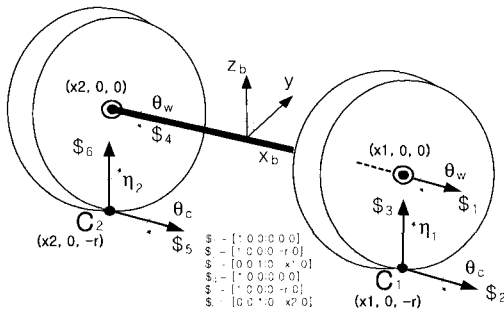


그림 6. 두 고정바퀴를 가지는 주행로봇.
Fig. 6. Mobile robot with two conventional wheels.

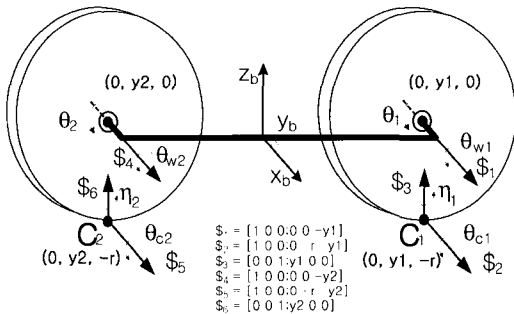


그림 7. 두 개의 고정바퀴가 직렬로 연결된 루프.
Fig. 7. Loop of two conventional wheels in series.

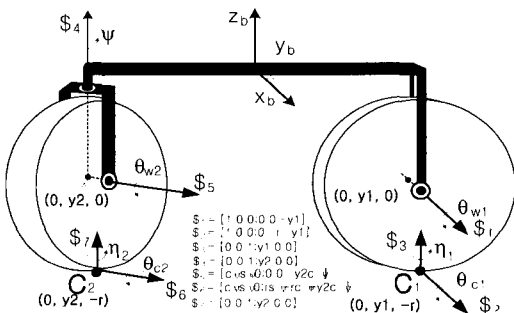


그림 8. 자전거 형태의 바퀴 루프.
Fig. 8. Loop of a bicycle type wheels.

있다. 그림 7은 두 고정 바퀴가 직렬로 연결된 구조를 가지는 모바일 로봇을, 그리고 그림 8은 그림 7에 앞바퀴의 조향이 추가된 자전거와 같은 형태의 주행 로봇을 나타내며 이들 각각에 대한 독립 관절 스크류의 수는 모두 5로 계산된다. 그림 6의 구조는 표 3의 (a), (d), (e)에서의 부속 시스템으로, 그림 7은 각각 표 3의 (h), (k), (l)에서의 부속 시스템으로, 그리고 그림 8의 구조는 (g), (j), (l)에서의 루프 A와 같은 부속 시스템으로 사용되고 있다.

표 3은 미끄럼 마찰 운동이 발생되지 않는 경우에 다양한 형태의 평면형 주행 로봇에 대한 모빌리티와 부속 페루프들 각각의 관절셀에 대한 가능운동공간에 대한 결과를 보여주고 있다. 이들 주행 로봇의 부속 루프 관절셀의 가능운동공간과 주행 로봇의 모빌리티를 어떻게 구하는가에 관한 세부사항을 이들 중 표 3(g)의 세발 자전거 형태의 주행 로봇을 통하여 상세히 기술한다. 이 주행 로봇은 두 개의 독립 루프를 가지고 있다. 앞 부분의 조향 바퀴로부터 뒷 부분의 두 개의 바퀴중 한 바퀴로 연결되는 루프 A에 속하는 모든 관절들에 대한 독립 관절 스크류의 수는 관절

표 3. 미끄럼 마찰 운동이 발생되지 않는 평면형 모바일 로봇의 모빌리티.

Table 3. Mobility of planar mobile robots with no frictional motions such as sliding and skidding.

Planar Mobile Robot	Loop(L)	Mobility (No frictional motion)			motion
		$\sum f_i$	$\sum_j d_j L_j$	M	
a		6	3	3	FTM:1 RM:1 RMA:1
b		6	5	1	FTM:1
c		6	5	1	RM:1
d		9	6	3	FTM:1 RM:1 RMA:1
e		9	8	1	RM:1
f		9	9	0	Structure

※ FTM : Forward Translational Motion of the mobile robot,
 RM : Rotational Motion of the mobile robot,
 RMA : Rotational Motion of the Axle about its axis,
 SR : Steering Rotation of the steering wheel,
 RBM : Rigid Body Motion of the mobile robot,
 FSW : Free Spin of the Wheel due to friction.

Table 3 (continued)

Planar Mobile Robot	Loop (L)	Mobility (No frictional motion)			Motion
		$\sum f_i$	$\sum d, L_i$	M	
g		10	8	2	RM:1 SR:1
h		12	11	1	TRM:1
i		12	11	1	RM:1
j		14	12	2	SR:2
k		18	17	1	TRM:1
l		20	18	2	SR:2

스크류의 랭크를 계산함으로써 구할 수 있다. 얻어진 루프 A 관절셀의 가능운동공간의 크기는 5이며 루프 자체의 모빌리티는 2이다. 이 경우, 이 루프의 운동은 앞 조향바퀴의 조향운동과 조향바퀴의 바퀴 회전축과 루프 A에 속하는 뒷바퀴의 바퀴 회전축이 만나는 위치를 순간중심으로 한 회전운동인 두 개의 운동모드로 표현될 수 있다.

특히, 이미 언급한 바와 같이 루프 A의 모빌리티(운동) 공간중 조향 바퀴의 조향회전에 해당되는 운동은 루프 A와 루프 B를 연결하는 링크의 운동과 무관하므로 대표 스크류셀에서 제외됨을 유의하자. 따라서, 루프 B에서 루프 A와 루프 B 양쪽에 공통적으로 속하는 세 개의 관절들에 의한 가능운동공간은 앞 조향바퀴의 바퀴 회전축과 루프 A에 속하는 뒷바퀴의 바퀴 회전축이 만나는 위치에 있는 순간중심을 중심으로 한 회전운동을 나타내는 하나의 대표 스크류(S_{IC})로서 표현될 수 있다. 두 뒷바퀴를 연결하는 루프 B 관절셀의 가능운동공간은 루프 A와 루프 B에 공통적으로 속한 세 관절의 대표 스크류(S_{IC})와 루프 B에 속한 나머지 관절들의 스크류들 전체에 대한 랭크(즉, 독립 스크류의 수)를 구함으로써 3임이 확인된다. 세 바퀴 자전거 형태의 모빌리티는 (2)로부터 2임이 확인된다: $M=7-(5+3)=2$. 이러한 2 자유도 운동은 앞바퀴의 조향운동과 표 3(g)에 보인 바와 같은 순간중심에 대한 회

전운동이다.

표 4는 앞 부분에 두 개의 조향바퀴와 뒷 부분에 네 개의 고정바퀴가 장착된 주행 로봇의 모빌리티를 구하는 과정을 구체적으로 보여주고 있다. 루프들 각각의 관절셀에 대한 가능운동공간과 모빌리티는 루프의 구속 순서에 따라 다를 수 있다. 그러나, 최종 전체 주행 로봇의 모빌리티는 순서와 무관하게 동일한 결과를 얻게 된다. 먼저 주행 로봇의 그림 4에서와 같이 왼쪽 반쪽 시스템을 고려하자. 그리고 이 시스템의 해석에 있어 먼저 루프 A 다음에 루프 C가 구속되는 경우를 고려하자. 이 경우, 루프 A의 모든 관절은 타 루프로부터 구속받지 않으므로 가능운동공간과 모빌리티는 쉽게 구할 수 있으며 각각 5와 2로 계산된다(그림 8과 동일). 루프 A와 C에 동시에 속하는 세 개의 관절들에 대한 가능운동공간이 대표 스크류(S_A)로 표현된다고 할 때, 이 대표 스크류를 적용하여 루프 C의 관절셀에 대한 가능운동공간은 4임이 구해진다. 따라서, 해당 바퀴의 관절 수의 합(4+3+3)과 루프 각각의 관절셀에 대한 가능운동공간 크기의 합(5+4)를 (2)에 대입함으로써 루프 A와 루프 C를 포함하는 왼쪽 부속 시스템의 모빌리티는

$M_{AC}=(4+3+3)-(5+4)=1$ 임이 확인되며 이 운동은 조향바퀴의 조향운동임을 알 수 있다.

한편, 루프 C 다음에 루프 A가 구속되는 경우를 고려하자. 이 경우, 루프 C는 그림 7에 해당되며 여기에 속하는 관절의 가능운동공간과 루프 C의 모빌리티는 각각 5와 1로 계산된다. 루프 A와 C에 동시에 속하는 세 개의 관절들의 운동은 진행방향으로의 직진운동으로 제한됨을 알 수 있다. 그리고 이러한 운동을 대표 스크류 S_C 로 표현하고 이를 적용하면 루프 A의 관절셀에 대한 가능운동공간은 4로 구해진다. 이상의 과정에서 루프 A와 C 각각의 관절셀에 대한 가능운동공간의 크기 및 모빌리티는 루프 A와 루

표 4. 두 조향바퀴와 네 고정바퀴를 가지는 주행로봇의 모빌리티 분석.

Table 4. Mobility analysis for mobile robots with two steering wheels and four conventional wheels.

Example	Half figure	Order of Loop	d	Mobility M
		A C	No frictional motion	2
			A C E	
		C A	With frictional motion	11
			A C E	
		C A	No frictional motion	2
			C A E	
A C	With frictional motion	11		
	C A E		5 4 3	

프 C의 구축순서에 따라 다르지만 루프 A와 C를 포함하는 반쪽 시스템의 모빌리티는 루프를 구축하는 순서와는 무관하게 동일한 값인 1로 계산됨을 확인할 수 있다.

한편, 전체 주행 로봇의 나머지 다른 반쪽에 해당하는 부분도 동일한 방법으로 분석될 수 있으며 대칭관계로부터 왼쪽 반쪽 시스템과 동일한 모빌리티 1을 가짐을 알 수 있다. 이들 두 반쪽 시스템의 전체 운동은 각각 두 앞 조향 바퀴의 조향운동만을 나타내므로, 루프 E에 속하는 관절들은 움직이지 못하게 제한 받게 된다. 따라서, 루프 E에 속한 관절셀의 가능운동공간의 크기는 0임을 쉽게 알 수 있다.

이상의 결과를 (2)에 대입함으로써 전체 시스템의 모빌리티는 2로 계산된다. 표 3과 표 4에서는 모든 주행 로봇의 루프의 구축 순서는 대부분 알파벳 순서로 지정하였으며 경우에 따라 시스템의 대칭성을 이용하기 위하여 두 갈래의 루프 구축순서를 지정하였다.

한편, sliding이나 skidding 미끄럼 마찰운동이 발생하는 경우에 대한 모빌리티의 분석에는 표 2와 같은 미끄럼 마찰운동에 해당하는 관절의 관절 스크류를 포함하면 된다. 따라서, 주행 로봇에 미끄럼 마찰운동이 발생되면 주행 로봇의 모빌리티는 증가하게 되며 표 5는 다양한 주행 로봇에 대한 각 루프관절셀의 가능운동공간의 크기와 루프의 모빌리티 결과를 보여주고 있다. 표 5 (g)에서 루프 A, (h)

표 5. 미끄럼 마찰운동을 가지는 평면형 주행 로봇의 모빌리티 분석.

Table 5. Mobility analysis of the planar mobile robots with translational friction motions.

Planar Mobile Robot	Loop(L)	Mobility With frictional motion			Motion
		$\sum f_i$	$\sum d_j L_j$	M	
a		10	4	6	RBM:3 FSW:2 RMA:1
b		10	5	5	RBM:3 FSW:2
c		10	5	5	RBM:3 FSW:2
d		15	8	7	RBM:3 FSW:3 RMA:1
e		15	9	6	RBM:3 FSW:3
f		15	9	6	RBM:3 FSW:3

표 5(continued)

Planar Mobile Robot	Loop(L)	Mobility with frictional motion			Motion
		$\sum f_i$	$\sum d_j L_j$	M	
g		16	9	7	SR:1 FSW:3 RBM:3
h		20	13	7	FSW:4 RBM:3
i		20	13	7	FSW:4 RBM:3
j		22	13	9	SR:2 FSW:4 RBM:3
k		30	21	9	FSW:6 RBM:3
l		32	21	11	SR:2 FSW:6 RBM:3

와 (i) 그리고 (j)에서의 루프 A와 B, (k)와 (l)에서의 루프 A, B, C와 루프 D의 대표 스크류는 모두 평면형 운동을 나타내는 세 개의 스크류로서 다음과 같다:

$$\$_\omega = (0 \ 0 \ 1 : x \ y \ 0), \tag{11}$$

$$\$_x = (0 \ 0 \ 0 : 1 \ 0 \ 0), \tag{12}$$

$$\$_y = (0 \ 0 \ 0 : 0 \ 1 \ 0), \tag{13}$$

(11)에서 x 와 y 는 임의의 값을 나타내며 (11), (12), 그리고 (13)은 이들 값에 무관하게 항상 세 개의 독립 스크류를 나타냄을 유의하자. 따라서 표 5 (g)의 루프 B에 대한 독립 관절 스크류의 수는 오른쪽 바퀴의 구동축방향의 관절 스크류를 포함하여 4가 된다. 그리고 표 5 (h), (i), (j)의 루프 C에 대한 독립 관절 스크류의 수는 루프 A와 루프 B에 대한 대표 스크류가 모두 $\$_\omega$, $\$_x$, $\$_y$ 로 표현되므로 3이 된다. 마찬가지로 표 5 (k)와 (l)의 루프 E의 독립관절 스크류 수는 3이 된다. 한편, 표 4에서는 미끄럼 마찰운동이 포함되는 경우에 대한 루프관절셀의 가능운동

공간의 크기 계산 결과를 보여주고 있다.

V. 공간형 모바일 로봇

화성탐사에 활용될 목적으로 제작된 Mars Rover 모바일 로봇은 거친 화성 표면 위를 주행할 수 있도록 설계된 시스템으로서 그림 9와 같은 구조를 가지고 있다.[9] 이 모바일 로봇은 후방에 좌, 우로 각각 두 개씩의 고정바퀴(θ_c , θ_w , η)가 bogie관절(β)과 rocker 관절(ρ)을 통하여 몸체에 장착되었으며 전방에 하나씩의 조향 바퀴(ψ , θ_c , θ_w , η)가 장착되었고 bogie관절에는 2 자유도 차동구동(differential drive) 시스템이 장착된 구조를 가지고 있다. 특히, 차동구동 시스템은 각 바퀴의 주행지면의 변화에 따라 몸체의 자세를 변화시킴을 유의하자.

먼저, 바퀴의 미끄럼 마찰운동이 발생되지 않는다고 가정한다. 주행로봇이 편평한 지면 위를 주행하는 경우 앞바퀴의 조향상태에 따라 다른 모빌리티를 가지게 된다.

앞바퀴가 뒷바퀴와 정렬되어 있는 경우 그림 10에서와 같이 왼쪽 두 뒷바퀴 사이의 루프(A)와 왼쪽 앞바퀴와 중간바퀴사이의 루프(B)에 대한 독립관절 스크류의 수는 각각 5와 4이며 오른쪽 루프(C, D)는 왼쪽과 대칭이므로 동일하다. 그리고 두 뒷바퀴 사이의 루프(E)에 대한 독립관절 스크류의 수는 4가 된다. 그러므로 (2)로부터 모빌리

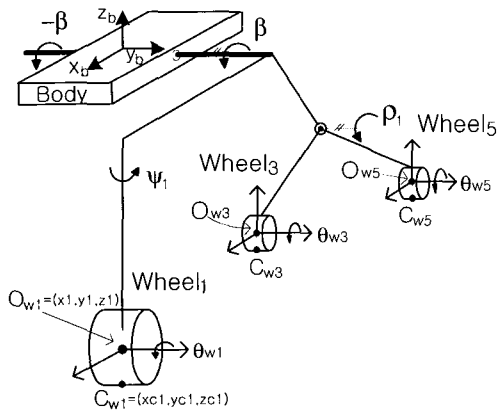


그림 9. Mars Rover 모바일 로봇.
Fig. 9. Mars rover mobile robot.

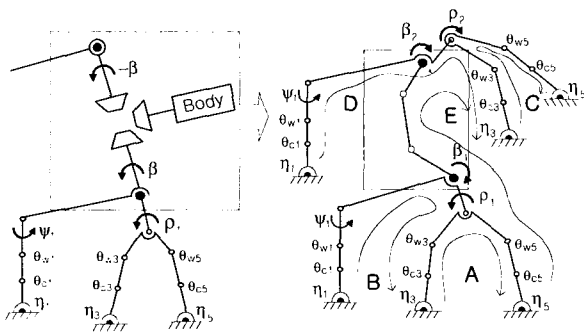


그림 10. Mars rover의 관절모델.
Fig. 10. Joint model of mars rover mobile robot.

티는 $M = 27 - (5 + 4 + 5 + 4 + 4) = 5$ 임이 확인된다. 다섯 가지 운동모드는 진행방향으로의 직진운동, 두 바퀴의 조향운동, 그리고 지면의 변화에 따른 차동구동 장치로 인한 몸체의 2 자유도 회전운동을 나타낸다. 특히, 지면이 편평한 경우는 차동구동장치에 의한 두 개의 운동모드가 발생되지 않으므로 여섯 개의 바퀴를 가진 평면형 주행로봇과 동일한 운동모드를 나타낸다.

앞 바퀴중의 하나라도 뒷바퀴와 정렬이 되지 않은 경우에는 나머지 다른 루프에 대한 독립관절 스크류의 수는 앞의 경우와 동일하며 두 뒷바퀴 사이의 루프 E에 대한 독립관절 스크류의 수는 3이다. 따라서, 주행로봇의 모빌리티는 $M = 27 - (5 + 5 + 5 + 5 + 3) = 4$ 를 갖게 된다. 이 경우 운동모드는 모든 바퀴가 정렬된 앞의 경우와 동일하며 진행방향의 운동만이 제외된다. 표 6은 Mars Rover에 대한 모빌리티 분석에 대한 요약이다.

Mars Rover의 경우 바퀴가 모두 지면과 접촉이 유지되는 곡선경로를 따라 주행하는 경우에는 항상 미끄럼 마찰운동을 수반하게 됨을 유의하자. 주행로봇의 바퀴에 미끄럼 마찰운동이 발생하는 경우에 대한 모빌리티 분석은 평면형 주행 로봇의 경우와 마찬가지로 주행로봇의 관절모델에 각 바퀴의 skidding과 sliding 미끄럼 운동을 나타내는 미끄럼관절을 포함하면 된다.

표 6. Mars Rover 모바일 로봇의 모빌리티.
Table 6. Mobility of mars rover mobile robot.

Spatial Mobile Robot : Mars Rover	$\sum f_i$	d of Loop					Mobility M	Motion
		A	B	C	D	E		
	27	5	4	5	4	4	5	SR(ψ) : 2 FTM : 1 RB : 2
	27	5	5	5	5	3	4	SR(ψ) : 2 RB : 2

* RB : rolling motion of the body

VI. 결론

본 논문에서는 기하학적 일반성이 결여된 병렬 메커니즘의 모빌리티 분석에 적용될 수 있는 대표스크류를 활용한 방법을 제시하였다. 그리고 제시된 방법을 적용하여 다양한 평면형 모바일 로봇의 모빌리티와 거친 표면을 주행할 수 있는 공간형 모바일 로봇으로서 화성탐사용으로 설계된 Mars Rover 모바일 로봇의 모빌리티를 규명함으로써 제시된 방법의 유효성을 확인하였다. 제시된 방법은 구름 접촉운동을 수반하는 기어 또는 주행 로봇과 같은 병렬 메커니즘의 모빌리티 분석에 적용될 수 있을 뿐 만 아니라 기하학적 일반성이 결핍된 다양한 구조의 혼합 및 병렬 메커니즘에도 적용될 수 있다.

참고문헌

[1] 김희국, 이승은, 이병주, "평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 관한 분석," '2001 제어·자동화·시스템학회 논문집, 제 8권 제 3호, pp. 243-248.

[2] L.Woo and F. Freudenstein, "Application of line geometry to theoretical kinematics and the kinematic analysis of mechanical systems," *New York Scientific Center technical report No. 320-2982*, Nov. 1969.

[3] K. H. Hunt, *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Clarendon press/Oxford, 1978.

[4] P. Fanghella, "Kinematics of spatial linkages by group Algebra: A structure-based approach," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 23, pp. 171-183, 1988.

[5] P.F. Muir and C.P. Neuman, "Kinematic modeling of wheeled mobile robots," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, No. 2, 281-340, 1987.

[6] G. Campon, G. Bastin and B.D'Andrea-Novel, "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.

[7] 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.

[8] 이병주, 김희국, 양성일, "여유구동을 지니는 전방향 로봇의 기구학 모델링 및 해석," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 7권 제 9호, pp. 766-773, 2001.

[9] 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.

부록 [2,3]

입의의 관절운동으로 인한 물체의 운동은 다음과 같이 스크류로서 표현될 수 있다:

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

여기서 ω 는 관절 축 \hat{s} 를 중심으로 각속도를, r 은 입의의 관심점(원점)에서 관절 축까지의 위치벡터를, 그리고 $h = (\hat{s} \cdot \hat{s}_o) / (\hat{s} \cdot \hat{s})$ 는 스크류 피치를 나타낸다. 순수한 회전관절운동에 해당하는 스크류는

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

로 표현되며 순수한 미끄럼 관절운동에 해당하는 스크류는

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

로 표현된다. 한편, k 개의 스크류가 있을 때, 이들 사이의 독립성은 아래와 같이 얻어지며 rank의 값은 모빌리티 공식에 있어 d 의 값에 해당한다.

$$R = \text{rank} \left(\begin{matrix} \$ 1 \\ \$ 2 \\ \vdots \\ \$ k \end{matrix} \right). \tag{A-4}$$



김희국

1980년 고려대학교 기계공학과 졸업. 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 석사(1985년). 동대학원 박사(1990년). 동대학 기계공학과 Post doc. 1년(1990년). 1991년부터현재까지 고려대학교 제어계측공학과 교수. 최근의 관심분야 :

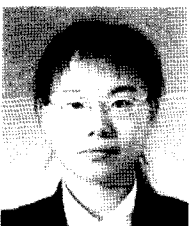
주행로봇/보행로봇의 설계 및 기구학/동역학 분석, 병렬 메카니즘의 설계 및 기구학/동역학 분석, 메카니즘의 모빌리티 분석 등임.



이병주

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

분야: 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.



이승은

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