

# 주행로봇 제어를 위한 험지의 최대마찰계수 추정

## Estimation of the Maximum Friction Coefficient of the Rough Terrain to Control the Mobile Robots

강현석\*, 곽윤근, 최현도, 정해관, 김수현

(Hyun-Suk Kang, Yoon Keun Kwak, Hyun-Do Choi, Hae-Kwan Jeong, and Soo-Hyun Kim)

**Abstract :** When mobile robots perform the mission in the rough terrain, the traversability depended on the terrain characteristic is useful information. In the traversabilities, wheel-terrain maximum friction coefficient can indicate the index to control wheel-terrain traction force or whether mobile robots to go or not. This paper proposes estimating wheel-terrain maximum friction coefficient. The existing method to estimate the maximum friction coefficient is limited in flat terrain or relatively easy driving knowing wheel absolute velocity. But this algorithm is applicable in rough terrain where a lot of slip occurred not knowing wheel absolute velocity. This algorithm applies the tire-friction model to each wheel to express the behavior of wheel friction and classifies slip-friction characteristic into 3 major cases. In each case, the specific algorithm to estimate the maximum friction coefficient is applied. To test the proposed algorithm's feasibility, test bed(ROBHAZ-6WHEEL) simulations are performed. And then the experiment to estimate the maximum friction coefficient of the test bed is performed. To compare the estimated value with the real, we measure the real maximum friction coefficient. As a result of the experiment, the proposed algorithm has high accuracy in estimating the maximum friction coefficient.

**Keywords :** mobile robot, traversability, friction coefficient estimation, maximum friction coefficient, rough terrain

### I. 서론

#### 1. 연구 배경

주행로봇은 군사용 정찰, 행성 탐사, 건물 조사와 방법, 놀이 등 다양한 목표로 개발되어 왔다. 그 중에서도 인간을 대신하여 험지나 위험 지역에서 탐사, 전투, 지뢰제거와 같은 임무에 적합한 주행로봇들의 개발은 지속적으로 이루어지고 있다. NASA에서 행성 탐사를 목표로 개발된 'Sojourner', 'Spirit', 'Opportunity' 군사용으로 이라크전쟁에 사용된 'Packbot' 등을 예로 들 수 있다.

이러한 주행로봇은 앞에서 언급한 재난 지역 및 전장에서 임무를 수행 하려면 주행성(mobility)이 뛰어나야 한다. 바퀴와 지면 사이의 미끄러짐에 의한 주행성 감소는 바퀴 및 트랙으로부터 지면으로의 소산되는 에너지의 증가를 가져와서 로봇의 주행시간을 단축시킨다. 또한 극단적인 경우 로봇이 주행성을 잃고 특정 지형에 갇히는 상황이 발생하게 된다. 따라서 주행로봇에 관한 연구에서 로봇의 주행성향상은 중요한 주제가 되어 왔다[1].

로봇의 주행성을 향상시키기 위해서 주행 메커니즘 및 알고리즘에 관한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 로봇의 주행성은 주행환경인 지면에 의해서 크게 영향을 받는다. 예를 들면 아스팔트 위에서 주행하는 로봇은 모래 위에서 주행하는 것 보다 높은 주행성을 가진다. 따라서 주행성을 논하기 위해서 지면의 물리적 특성을 정량적으로 추정하는 것이 선행되어야 한다.

이러한 지면의 특성 정보는 크게 두 가지 방향으로 응용될 수 있다. 첫째 안정적이고 에너지 효율이 높은 주행을 하기 위한 견인력 제어에 사용될 수 있다. 특정위치의 지면은 지면에서 지지할 수 있는 최대한의 견인력을 가지고 있다. 따라서 지면의 특성 정보는 그 지면에서 지지할 수 있는 최대 견인력을 간접적으로 나타내기 때문에 주행로봇의 바퀴나 트랙에 바퀴와 지면이 최소로 미끄러지는 토크를 가함으로 견인력 제어를 가능하게 한다[2,3].

둘째 야외 환경에서의 주행성 지도(mobility map)작성에 적용할 수 있다. 자율 주행 로봇의 주요 임무중의 하나는 로봇이 주행을 하면서 로봇 환경의 장애물을 인식하고, 자신의 위치를 파악하는 것이다. 이것은 자율 주행 로봇의 경로 계획을 하기 위한 것으로 SLAM(Simultaneous Localization And Map building)을 이용해서 구현 가능하다[4]. 이 연구는 주로 실내환경에서 주행하는 로봇을 대상으로 이루어졌으며 최근 연구 동향은 야외환경에서도 SLAM기법을 적용하는 것이다. 야외 환경은 실내 환경과 달리 지형적인 장애물뿐만 아니라 지면의 특성에 따라서 로봇의 주행성이 달라지기 때문에 SLAM에 의한 지형적인 장애물파악뿐만 아니라 지면 특성정보까지 더해진 주행성 지도작성이 필요하다. 이 주행성 지도를 이용해서 다음과 같은 시나리오를 생각할 수 있다. 먼저 상대적으로 주행성능이 높은 정찰 로봇이 정찰을 통해서 지형의 주행성 정보를 얻었다고 하자. 그리고 실제 임무를 수행하는 다른 로봇은 주행성 정보를 통해서 목적지까지 최적의 경로를 얻을 수 있으며 이를 통하여 에너지 효율이 높은 주행을 할 수 있다.

#### 2. 기존 연구

기존의 지면특성을 추정하는 연구는 여러 가지가 이루어졌다. 예를 들면 지면의 영상정보를 바탕으로 주요한 특성(지면의 거칠기, 경사도, 불연속 지점, 경도)을 파악해서 퍼지

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 12. 26., 채택확정 : 2008. 5. 30.

강현석, 최현도, 정해관 : 한국과학기술원 기계항공 시스템 학부 기계공학전공(kangpoh@kaist.ac.kr/chlgusch80@kaist.ac.kr/hothip@kaist.ac.kr)

곽윤근, 김수현 : 한국과학기술원 기계항공 시스템 학부 기계공학 전공 교수(ykkwak@kaist.ac.kr/soohyun@kaist.ac.kr)

로직(fuzzy logic) 알고리즘을 이용해서 지형정보 인덱스(traversability index)를 추정한 연구[5]가 있다. 그러나 이 방법은 카메라에 의한 지면의 영상정보로만 사용하기 때문에 조도의 영향을 많이 받는 단점이 있다. 또한 지형정보 인덱스가 4단계로만 이루어져 있기 때문에 높은 분해능(resolution)을 가지지 않는 단점이 있다.

또한 로봇의 진동정보를 학습시켜서 몇몇 주요 지면(‘자갈’, ‘모래’, ‘흙’)을 분류하는(classification) 연구[6]가 있다. 이 방법은 물리적으로 의미 있는 지면 특성 정보를 얻기 힘든 단점이 있으며 로봇의 진동정보를 사전에 학습시켜야 하며, 학습하지 않는 지면에서의 지면 분류는 정확도가 낮을 수 있다.

그리고 지면의 최대 전단응력을 추정하는 방법[7]이 있다. 이것을 구현하기 위해서 바퀴가 지면에 접촉된 영역을 측정해야 한다. 따라서 바퀴 옆면에 별도의 카메라를 장치해서 바퀴의 지면잠식 정도를 측정할 필요가 있다. 따라서 실제 이 방법을 로봇에 적용시키기에는 어려움이 많다.

마지막으로 자동차의 전인력 제어와 관련된 최대 마찰계수 추정연구[8]를 예를 들 수 있다. 이 연구는 사용되는 센서와 방법에 따라서 여러 가지 방법으로 나누어 질 수 있다. 그 중에서 최근에 많은 연구가 이루어지고 있는 미끄럼(slip)을 기반으로 한 최대 마찰계수 추정이 대표적이다[9,10]. 특히 이 방법은 바퀴에 작용하는 토크나 각속도 정보와 같이 비교적 저가의 센서를 이용해서 구현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 적용범위가 자동차나 간단한 주행알고리즘을 가진 주행 로봇에 한정되어 있으며 평지 주행만을 고려하였다. 따라서 험지를 주행하는 주행로봇에의 적용에 문제가 있다.

기존의 지면 특성연구를 분석해 보면 지면특성을 평가하는 평가지수는 물리적으로 의미 있는 값인 지면의 최대 마찰계수나 최대 전단응력을 사용하는 것이 실용적으로 로봇에 응용할 수 있다. 그러나 사용되는 센서와 주행환경 등을 고려하여 지면특성 추정 방법을 선택하는 것이 중요하다.

3. 연구목표

본 연구의 대략적인 목표는 험지를 주행하는 로봇에게 적용 가능한 지형특성 추정 알고리즘을 제안하는 것이다. 특히 관심 있는 로봇 시스템은 높은 주행성을 기반으로 험지에서 임무를 수행하는데 적합한 로봇 플랫폼인 바퀴로 주행하는 가변자세 로봇이다.

기존 연구에서도 확인할 수 있듯이 상대적으로 저가의 센서를 사용하여 물리적으로 의미 있는 값인 최대 마찰계수를 추정하는 것이 경제성과 실제 응용의 관점에서 가장 효율적인 방법이다. 그러나 이러한 연구는 자동차나 단순한 형태의 주행로봇이 평지에서 항상 일정한 수직항력을 받는다는 가정하에 이루어져 왔다. 그러나 접촉각 및 수직항력이 실시간으로 변하는 험지 환경에서는 기존 연구방법을 그대로 적용하기 힘들다. 험지에서 최대마찰계수 추정 시 추가적으로 고려해야 할 사항은 지면에서 작용하는 수직항력 및 마찰력을 실시간으로 구해야 한다는 점이다. 그리고 험지 주행 시 각 바퀴의 미끄럼 및 마찰계수특성이 달라지는 것 또한 고려해야 한다.

따라서 본 연구의 구체적인 목표는 험지를 주행하는 로봇에 적용할 수 있는 최대 마찰계수 추정이다. 그리고 적용대

상은 바퀴로 구동하는 가변자세 로봇이다.

본 논문의 구성은 II장에서 최대 마찰계수 추정 알고리즘을 제시하고, III장에서는 II장에서 제안한 알고리즘을 테스트베드에 적용시키는 방법을 설명한다. IV장에서는 실제 실험을 통하여 최대 마찰계수의 추정치를 구하고 실제 측정된 최대 마찰계수와 정량적 비교분석을 수행한다. 마지막으로 V장에서 결론을 도출한다.

II. 최대 마찰계수 추정

1. 최대 마찰계수 추정 시 가정사항

주행로봇의 지면과 바퀴 사이의 마찰계수 관계는 기존에 널리 사용되고 있는 자동차 타이어의 마찰계수 모델(그림 1)[11,12]을 따른다고 가정한다. 주행로봇의 바퀴는 자동차의 타이어와 동일하지 않다. 타이어의 내부는 공기로 채워져 있지만 주행로봇의 바퀴는 특정한 재질로 바퀴를 둘러싸여 있다. 그러나 일반적으로 주행로봇은 지면과의 마찰력을 높이기 위해서 고무재질의 바퀴를 사용한다. 타이어 역시 고무재질을 사용하기 때문에 주행로봇의 바퀴는 타이어의 성질과 비슷한 점이 많다. 예를 들면 타이어와 주행로봇의 바퀴 모두 고무재질에 의한 탄성 변형에 의해서 가속 초기에 미끄럼이 발생한다. 그리고 바퀴와 지면 사이의 미끄럼이 일정 값 이상이 되면 바퀴에서는 최대 마찰력을 가진다. 따라서 주행로봇의 바퀴는 공기압력이 일정한 타이어라고 가정할 수 있다. 즉 주행로봇의 바퀴와 지면과의 특성을 오랫동안 연구가 이루어진 자동차의 타이어와 지면과의 마찰계수특성(그림 1)으로 가정하는 것은 합리적이다.

이때 그림 1의 횡축은 바퀴와 지면 사이의 미끄럼(slip)이며 (1)로써 정의 된다. (V는 바퀴 중심의 속도이며, r은 바퀴의 반지름이며, w는 바퀴의 회전 각속도이다.)

$$s = (1 - \frac{V}{rw}) \tag{1}$$

그림 1은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 미끄럼이 증가하면 할수록 마찰계수가 증가하는 영역(그림 1의 OB: 안정영역)과 미끄럼이 증가할 마찰계수가 증가하지 않는 영역(그림 1의 B이후: 불안정영역)으로 나눌 수 있다. 그리고 안정영역에서 미끄럼과 마찰계수가 바퀴의 탄성 변형에 의해서 미끄럼과 마찰계수가 선형적인 관계를 가지는 구간(그림 1의

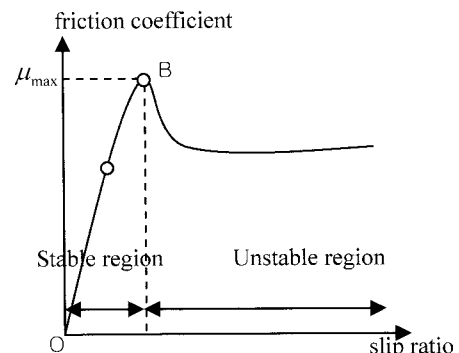


그림 1. 지면과 바퀴 사이의 미끄럼, 마찰계수 관계도[11].  
Fig. 1. Relation between wheel slip-friction coefficient.

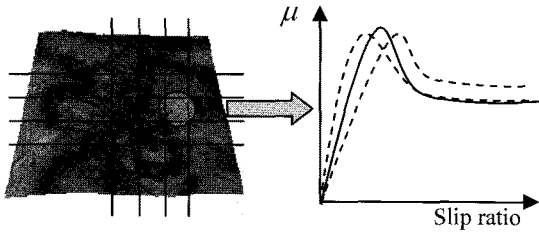


그림 2. 지형의 특성 단순화(좌: 지형분할, 우: 지형특성 대표화).

Fig. 2. Terrain characteristic simplification (left: terrain partition, right: terrain characteristic representation).

OA)과 비선형 관계를 가지는 구간(그림 1의 AB)으로 나눌 수 있다[11,12].

그림 2의 좌측은 임의의 지형에서 최대 마찰계수를 색깔로 표현한 그림이다. 높은 분해능의 관점으로 살펴 보면 지형의 특성은 좁은 영역 내에서도 달라질 수 있다. (그림 2의 우측의 점선으로 표시한 곡선) 그러나 지형의 정보가 연속적으로 변한다고 가정하고 추정하고자 하는 영역이 좁은 경우 그림 2의 우측 그림과 같이 어떤 특정한 곡선으로 그 영역의 미끄럼과 마찰계수의 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서 지형의 최대 마찰계수를 구한다는 것은 특정 지역의 좁은 영역을 대표 할 수 있는 미끄럼과 마찰계수 관계 특성 곡선에서 최대 마찰계수를 구하는 것이다. 임의의 지형에서 영역을 어느 단위로 나누는 것은 또한 중요한 논의사항이 될 수 있지만 본 연구에서는 다루지 않는다.

2. 최대 마찰계수 추정

그림 1과 같은 곡선은 바퀴의 미끄럼을 달리 해서 얻은 바퀴의 수직항력과 마찰력 정보를 이용해서 얻을 수 있다. 따라서 그 곡선의 최대점이 최대 마찰 계수가 되는 것이다. 그러나 기존의 최대 마찰계수추정에 관한 연구는 주로 자동차 및 단순한 형태의 주행로봇에 적용했다. 자동차에 적용되는 대략적인 방법은 먼저 자동차를 가속 또는 감속 주행시켜서 바퀴의 미끄럼과 마찰력을 실시간으로 구하는 실험을 수행한다. (평면주행이므로 수직항력은 일정하다고 본다.) 그리고 실험으로부터 얻은 데이터를 이용하여 그림 1과 같은 곡선을 얻게 된다. 그러나 실제 실험에 사용되는 자동차의 속도는 일반적으로 크기 때문에 중, 저속으로 주행하는 로봇에 적용하기는 힘들다. 따라서 기존의 중, 저속으로 주행하는 단순한 형태의 주행로봇에 적용하는 최대 마찰계수추정 연구는 미끄럼이 작은 구간(최대 마찰계수 이전의 영역의 미끄럼)에서 얻은 데이터를 바탕으로 선형 보간을 한다. 일반적으로 미끄럼이 작은 구간은 마찰계수와 미끄럼 사이의 선형의 관계[11]가 있기 때문에 보간한 직선의 기울기를 이용해서 최대 마찰계수를 추정한다.

기존의 연구를 험지 주행하는 로봇을 대상으로 하는 본 연구에 적용하면 몇 가지 추가적으로 고려해야 할 사항이 있다. 첫째 본 연구에 적용하는 주행로봇은 가변자세 로봇이다. 따라서 로봇의 자세가 변화하는 구조적인 특성을 최대한 고려해야 한다. 로봇의 자세가 고정되어 있으면 지면과 바퀴들 간의 미끄럼이 차이가 없지만 로봇의 자세가 변하면 로봇의 바퀴들 간의 속도는 기구학적인 관계를 만족시킨다. 즉 바퀴

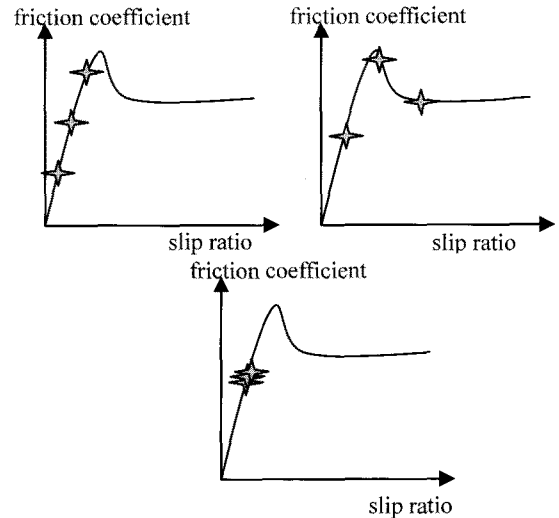


그림 3. 세 바퀴의 미끄럼과 마찰계수 관계.  
Fig. 3. 3-wheels' slip- friction coefficient relationship.

들 간의 속도 및 미끄럼이 달라진다. 따라서 로봇에게 가속이나 감속주행을 시켜 미끄럼을 변화 시킬 필요가 없어진다. 로봇 바퀴의 상대적인 속도를 구하기 위해서 어떤 특정 바퀴 (피벗 바퀴)속도를 바퀴의 각속도 정보를 통해서 추정한다. 그리고 나머지 바퀴의 속도를 바퀴의 기구학적 관계를 통해서 구한다면(식 (2)) 피벗 바퀴에 대한 상대적인 속도차이를 구할 수 있게 된다.

$$v_j = v_p + w_j \times r_j \tag{2}$$

여기서  $v_p$  는 피벗바퀴의 중심속도를 나타내고  $v_j$  는 피벗 바퀴 이외의 바퀴의 중심속도를 뜻한다.  $w_j, r_j$  는 피벗바퀴와 구하고자 하는 바퀴를 연결하는 링크의 각속도와 상대편위를 뜻한다.

둘째 험지 주행을 하는 경우는 바퀴의 미끄럼이 실시간으로 변한다. 예를 들면 모든 바퀴의 미끄럼이 안전영역(그림 1의 OB영역)에 존재할 수도 있으며, 다른 경우로는 특정 바퀴가 불안정영역(그림 1의 B이후 영역)에 존재할 수 있다. 따라서 미끄럼이 큰 경우와 작은 경우를 나눌 수 있는 방법이 필요하고 각각의 경우에는 최대 마찰계수를 추정하는 방법이 달라야 한다.

그림 3은 6개의 좌우 대칭인 바퀴형태로 이루어진 주행로봇이 2차원 험지를 주행할 때 전, 중, 후방 세 부분의 바퀴의 미끄럼과 마찰계수를 각각 좌표로 간주하여 나타낸 그림이다. 그림에서도 확인 할 수 있듯이 미끄럼과 마찰계수가 크게 3가지 경우로 나눌 수 있다. 세 점이 모두 안정영역에 있고 바퀴의 미끄럼의 차이가 상대적으로 클 경우를 case 1이라고 정한다. 우상단과 같이 어떤 특정한 바퀴가 불안정 영역에 있을 경우를 case 2라고 정하며, 모든 바퀴의 미끄럼의 차이가 상대적으로 작은 경우를 case 3이라고 정한다. 미끄럼의 위치에 따라서 case 1~3이외에 다른 경우를 생각할 수 있다. 예를 들면 미끄럼의 위치가 불안정한 위치에 모두 존재하고 미끄럼의 상대적인 크기가 달라질 수 있다. 그러나 물리적으로 여러 바퀴로 이루어진 주행로봇은 일반적인 주행을 한다

고 가정 했을 때 최소한 한 개 바퀴의 마찰계수는 안정한 영역에 있다. 따라서 나머지 바퀴가 모두 안정한 영역에 있는지 혹은 몇몇 바퀴가 불안정한 영역에 존재한다. (III장 4절) 즉 case 1~3은 주행로봇이 주행하는 동안 바퀴의 미끄럼과 마찰계수 거동을 적절히 분류한 것으로 판단된다.

그리고 앞에서 언급한 세 가지 경우를 분별하는 알고리즘이 필요하다. 그림 3을 기준으로 설명하면, case 3은 바퀴의 미끄럼의 차이가 일정 값 이하가 될 경우일 때로 판단 할 수 있다. 또한 case 1과 case 2의 분별은 세 점을 선형으로 보간해서 얻은 직선과 세 점의 거리를 통해서 가능하다. Case 1의 경우 상대적으로 그 크기가 작을 것이며, case 2의 경우는 작을 것이다.

또한 앞에서 언급한 세가지 경우에 동일한 방법으로 최대 마찰계수추정 알고리즘을 적용 할 수 없다. 따라서 각각의 경우는 서로 다른 기준을 적용하여 최대 마찰계수를 추정해야 한다. Case 1의 경우에는 선형관계를 이용하여 직선으로 보간한 후 그 직선의 기울기를 이용해서 최대 마찰계수를 추정할 수 있다. (일반적으로 그림 3의 OA영역은 미끄럼이 생기는 메커니즘이 타이어의 탄성 변형에 의한 미끄럼이 생기는 것으로 미끄럼과 마찰계수가 이론적으로 선형적인 관계를 가진다[11]. 그리고 상대적으로 최대 마찰계수가 클 경우 선형직선의 기울기가 커진다.)

Case 2의 경우에는 미끄럼과 마찰계수 데이터를 바탕으로 2차 곡선으로 보간한 후 그 직선의 최고 점을 최대 마찰계수로 추정 가능하다. Julien의 연구에 따르면 그림 3의 AB영역의 특성곡선이 (3)을 따른다[13]. 그림 3의 AB영역은 미끄럼과 마찰계수관계는 비선형 관계를 가짐을 알 수 있는데 미끄럼의 변화량이 크지 않는다고 가정하면 2차항을 가지는 분자가 마찰력에 큰 영향을 미친다. 즉 최대 마찰계수가 작용하는 미끄럼 근방의 특성 곡선은 정확하게 2차로 모델링 할 수 없지만 분자의 2차 성분이 주도적인 역할을 하기 때문에 2차 곡선으로 보간 하는 것은 큰 논리적 비약이 아니다. 또한 (3)은 가정을 통하여 얻은 모델이므로 모든 경우에 적용되는 모델이 아니다. 그리고 미끄럼과 마찰계수곡선이 대략적인 종 형태를 따르기 때문에 2차 곡선을 이용한 최대 마찰계수추정은 합리적으로 판단된다.

$$F = \mu_{\max} N - \frac{K'(\mu_{\max} N - K''s)^2}{s} \quad (3)$$

$F$  는 바퀴에 작용하는 마찰력,  $\mu_{\max}$  는 최대마찰계수,  $N$  은 수직항력,  $s$  는 (1)에서 정의된 미끄럼(slip),  $K', K''$  는 상수(기호, 표기는 본 연구에서 새로 정의하였음)

Case 3의 경우에는 미끄럼의 차이가 매우 작은 경우이기 선형으로 보간을 하면 마찰계수의 오차에 의해서 기울기차이가 커질 수 있다. 따라서 이 경우에는 최대 마찰계수 추정을 보류한다. Case 3의 경우는 바퀴들의 상대적인 미끄럼이 매우 작은 평지 주행과 같은 상황에서 많이 이루어진다. 본 연구가 험지 주행에 적용한다는 가정하에 case 3의 경우는 험지에서 빈번하게 일어나지 않는다고 판단된다.

셋째 험지 주행은 평지주행과 달리 바퀴와 지면 사이의 접촉각은 시간에 따라서 변한다. 그리고 접촉각의 변화는 바퀴

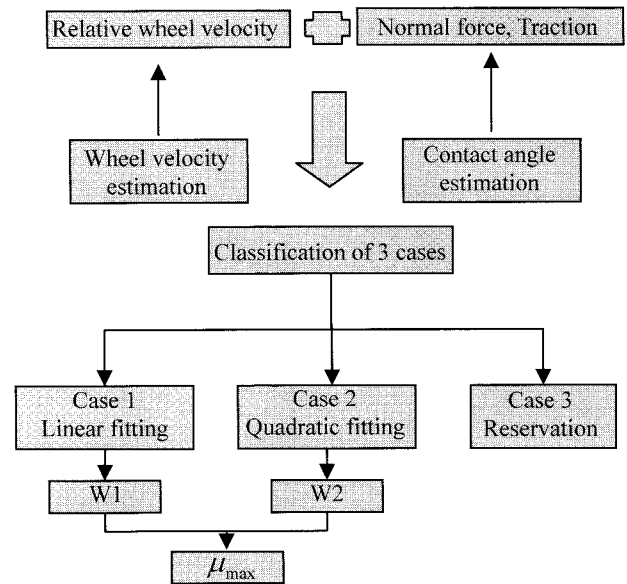


그림 4. 최대 마찰계수 추정 알고리즘 흐름도.  
Fig. 4. Flow chart of the maximum friction coefficient estimation.

와 지면 사이의 수직항력 및 마찰계수의 변화를 가져온다. 따라서 로봇의 주행과 동시에 바퀴의 접촉각을 실시간으로 추정하는 알고리즘이 추가되어야 한다. 바퀴의 접촉각은 로봇바퀴 속도와 링크의 각도 및 각속도와 같은 기구학적 관계를 통해서 구할 수 있다. 따라서 실시간으로 구한 접촉각 정보를 기반으로 한 로봇의 준 정역학 해석을 수행해서 바퀴에 작용하는 견인력 및 수직항력을 구할 수 있고, 그 비는 마찰계수가 되는 것이다.

앞에서 언급한 세가지 고려 사항을 추가시키는 최대 마찰계수 추정 알고리즘을 흐름도로 살펴보면 그림 4와 같다. Case 1과 case 2는 서로 다른 알고리즘을 적용하기 때문에 추정치에 서로 다른 가중치를 부과하여 실제 최대 마찰계수와 근접한 값을 가지게 한다. 이때 case 1, 2에 각각 적용되는 가중치는  $W1, W2$ 이다. 이 가중치는 임의의 지형에서 실험적으로 구한 최대마찰계수와 case 1, 2의 조건하에 얻어진 최대마찰계수 추정치를 비교하여 구할 수 있다.

### III. 로봇에 대한 알고리즘 적용

#### 1. 테스트 베드: ROBHAZ-6WHEEL(Robot for Hazardous Environment)

본 절에서는 본 연구에 사용할 시험 주행 로봇 ROBHAZ-6WHEEL(Robot for Hazardous Environment)에 대해서 설명하겠다. 대략적인 설계 개념은 크게 2가지로 나눌 수 있다. “적응성(adaptability)”을 주행로봇의 개발을 위한 첫 번째 설계 개념으로 고려하였다. 차륜 주행로봇에서 “적응성”을 기반으로 로봇의 자세가 지형에 따라서 변하게 되고, 험지에서 높은 주행성을 가지게 한다. 서론에서 언급한 본 연구에서 관심 있는 가변 자세 로봇의 전형적인 특성을 가진다. ROBHAZ-6WHEEL은 “적응성”을 기반으로 기존의 차륜 주행로봇의 몸체와 각각의 바퀴 사이를 연결할 수 있는 ‘4절 링크기구(4-bar linkage mechanism)’를 사용 하였다[14].

둘째 “수동성(Passivity)”을 주행로봇의 개발을 위한 디자인

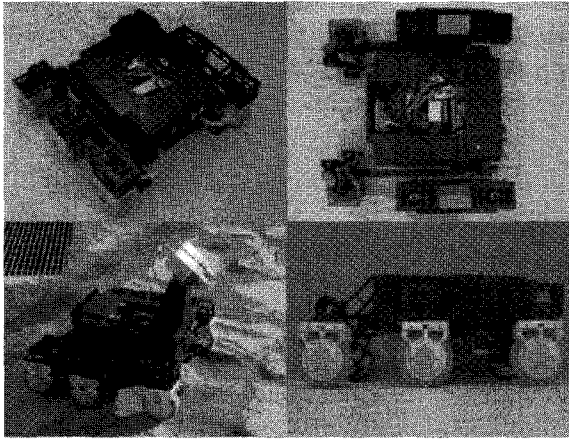


그림 5. ROBHAZ-6WHEEL의 외형.  
Fig. 5. The outward appearance of ROBHAZ-6WHEEL.

개념으로 고려하였다. “적응성”을 위한 ‘4절 링크기구’를 구동시키기 위한 구동기 및 센서의 추가는 부가적인 에너지를 필요로 하고, 주행로봇의 에너지 효율을 저하시킨다. 따라서 ‘핀-슬롯 조인트(pin-slot joint)’로 ‘4절 링크기구’를 설계하였다 [14].

두 가지 설계 개념을 이용해서 설계된 ROBHAZ-6WHEEL의 외형은 그림 5와 같다. 이때 로봇의 바퀴는 50 Watt Maxon EC flat motor와 500 pulse USDigital optical encoders, 80:1 HarmonicDrive를 이용하여 바퀴 안쪽에 설계 및 조립되었다.

2. 최대마찰계수 추정: ROBHAZ-6WHEEL 적용

ROBHAZ-6WHEEL은 6개의 바퀴가 독립적으로 구동되는 주행 로봇으로 평면 운동을 한다고 가정하면 전, 중, 후방의 바퀴로 나누어 질 수 있다. 그리고 각각의 바퀴에 마찰계수가 있다면 그림 6과 같이 미끄럼을 x좌표 마찰계수를 y좌표로 가정하여 총 3점이 나타난다. Case 1의 경우는 미끄럼이 가장 작은 점과 미끄럼이 가장 큰 점을 이은 직선을 구하고 그 직선의 기울기를 최대 마찰계수 추정치로 사용한다(식 (4)). Case 2의 경우는 앞에서 구한 세 점을 2차 보간한 곡선을 구하고 곡선의 최대점을 추정치로 사용한다(식 (5), (6)).

$$\text{Case 1's identifier: } \frac{\mu(s_{\max}) - \mu(s_{\min})}{s_{\max} - s_{\min}} \quad (4)$$

$$\text{Case 2's fitted curve: } as^2 + bs + c = \mu^2 \quad (5)$$

이때  $\mu^2$  는 2차로 보간한 곡선을 뜻함.

$$\text{Case 2's identifier: } \mu^2 \left( \frac{-b}{2a} \right) = \frac{4ac - b^2}{4a} \quad (6)$$

그리고 case 1, 2, 3의 분류를 설명하려면 먼저 case 3의 분류는 세 점의 미끄럼의 최소치와 최대치의 차이를 이용해서 분류할 수 있다. 미끄럼의 최소치와 최대치의 차이가 일정한 값 이하면 case 3로 분류할 수 있으며 나머지 경우에는 case 1이나 case 2로 분류될 수 있다. Case 1과 case 2의 분류는 case 1에서 얻은 직선에서 미끄럼이 중간인 값을 대입해서 얻은 값과 미끄럼이 중간인 경우에서의 마찰계수와와의 차이 (coefficient error)를 제공하여 얻은 값(판단 지수라고 명명)을

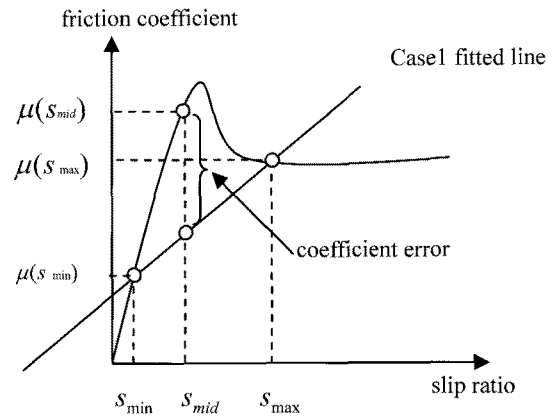


그림 6. Case 분류.  
Fig. 6. Classification of the cases.

기준으로 정할 수 있다. 그림 6과 같이 판단지수가 일정한 값 이상이면 case 2로 분류할 수 있으며, 반대로 세 점이 보간한 직선 근방에 있으면 case 1으로 분류한다.

$$\text{판단 지수 : } \left\{ \mu(s_{\text{mid}}) - \mu^1(s_{\text{mid}}) \right\}^2 \quad (7)$$

이때  $\mu^1$  는 최소 미끄럼과 최대 미끄럼이 일어나는 점을 이은 직선을 뜻한다.

3. 접촉각 추정

바퀴와 지면 사이의 접촉각은 그림 7(ROBHAZ-6WHEEL의 2차원 모델)에서  $\gamma_i$  ( $i=1, 2, 3$ )로서 나타내어 진다(첨자  $i$ 는 바퀴의 순서를 나타냄). 접촉각의 물리적인 의미는 바퀴에서 받고 있는 견인력과 수직항력의 방향을 결정하며, 바퀴의 중심 속도의 방향을 결정한다. 따라서 바퀴에 작용하는 마찰계수를 구하거나 바퀴의 상대적인 속도를 결정하기 위해서 바퀴와 지면 사이의 접촉각 추정은 선행되어야 한다.

이러한 접촉각을 추정하기 위해서 Karl의 방법[15]을 이용한다.

그림 8은 Karl의 방법에 의해서 두 바퀴의 접촉각을 구하는 개념도이다. 위의 그림에서 두 바퀴의 중심 속도의 기구학적 관계식(두 바퀴의 중심을 연결하는 선의 평행한 방향과 수직 방향의 관계식)을 이용해서 (8), (9)를 유도할 수 있다.

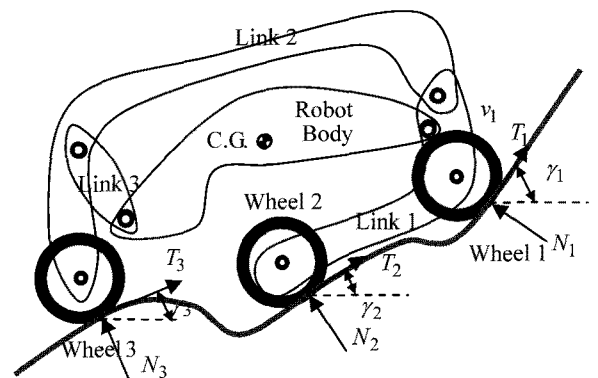


그림 7. ROBHAZ-6WHEEL과 접촉각.  
Fig. 7. ROBHAZ-6WHEEL and contact angles.

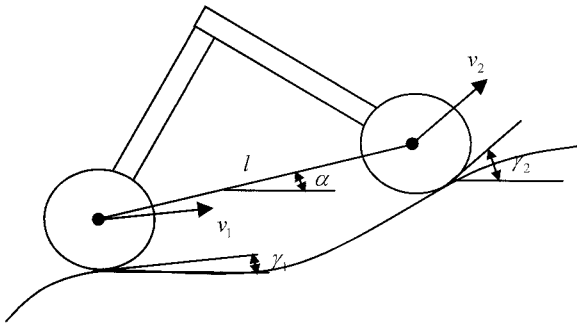


그림 8. 기존의 접촉각 추정[15].

Fig. 8. Existing method to estimate the wheel-terrain contact angle.

그리고 ROBHAZ-6WHEEL에 접촉각을 추정하는 알고리즘을 적용하기 위해서 (8), (9)을 앞 바퀴, 중간 바퀴에 적용하고,  $\alpha$ 는 그림 7의 Link 1으로 간주한다. 또한 마지막 바퀴의 접촉각은 앞 바퀴와 뒷바퀴의 중심속도의 관계식을 통해서 구할 수 있다.

$$\gamma_1 = \alpha - \cos^{-1}(h) \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1}(h/b) + \alpha \quad (9)$$

이때  $h \equiv \frac{1}{2a} \sqrt{2a^2 + 2b^2 + 2a^2b^2 - a^4 - b^4 - 1}$   $a \equiv l\dot{\alpha}/v_1$   $b \equiv v_2/v_1$ 이다.  $v_1, v_2$ 는 앞 바퀴와 중간바퀴의 속도의 크기이다.

(8), (9)에서도 알 수 있듯이 바퀴와 지면 사이의 접촉각은 바퀴 사이를 연결하는 링크의 기구학적 정보(식 (8), (9)에서는  $\alpha, \dot{\alpha}$ ) 및 바퀴의 중심속도의 표현된다. 즉 링크의 기구학적 정보는 센서를 통해서 측정 가능하다고 할 때 바퀴의 접촉각은 바퀴의 선속도의 크기를 얼마나 정확하게 구하는가라는 문제로 귀결된다. IV장에서 피봇바퀴 개념을 이용해서 바퀴의 중심속도를 추정하는 방법에 대해서 언급하겠다.

#### 4. 피봇바퀴 개념을 이용한 바퀴의 중심속도 추정

바퀴의 속도추정은 III장에서 설명한 접촉각을 추정하기 위해서 필요하며 바퀴 들간의 속도차이를 기반으로 한 미끄럼을 추정하기 위해서 반드시 필요한 정보이다. 본 절에서는 피봇바퀴 개념을 이용한 바퀴의 중심속도를 추정하는 방법을 설명한다.

피봇바퀴 개념을 설명하기 앞서 피봇바퀴 개념의 배경이 되는 물리적인 현상을 소개한다. 여러 개의 바퀴를 구동시켜서 주행하는 주행로봇 및 ROBHAZ-6WHEEL이 정상적인 주행을 한다고 가정했을 때 어떤 시각에서도 최소한 하나의 바퀴의 미끄럼 량은 미소하다. 즉 이러한 미끄러지지 않는 바퀴 때문에 다른 바퀴들의 미끄럼 량이 상대적으로 크다고 해도 험지에서 주행을 가능하게 한다.

이때 최소로 미끄러지는 바퀴의 마찰계수는 그림 1에서 안정한 영역에 존재하며 최소로 미끄러지는 바퀴의 중심속도 크기는 (10)으로 근사화 시킬 수 있다. (10)은 피봇바퀴의 접촉각의 함수로 표현되는데 최초 접촉각은 알고 있다고 가정하고, 이후 접촉각은 한 샘플 이전의 접촉각을 사용한다. 한 샘플 이전의 접촉각은 (11)을 이용해서 바퀴의 속도를 알 수 있기 때문에 추정 가능하다. 샘플 주기가 매우 짧다고 가정했을 때 한 샘플 이전의 접촉각은 물리적으로 근사화 가능

하다고 판단된다.

$$\mathbf{v}_p \cong r\mathbf{w}_p \mathbf{e}(\gamma_p) \quad (10)$$

(첨자 p는 피봇바퀴를 뜻하며  $\mathbf{e}$ 는 속도 방향을 나타내는 함수이다.)

$$\mathbf{v}_q = \mathbf{v}_p + \mathbf{w}_q \times \mathbf{r}_q \quad (\text{첨자 } q: \text{ 피봇바퀴가 아닌 바퀴}) \quad (11)$$

여기서  $\mathbf{w}_q, \mathbf{r}_q$ 는 피봇 바퀴와 그 외 바퀴와 연결된 링크의 각속도와 상대변위를 나타낸다.

기존의 바퀴의 중심속도를 추정하는 방법인 Karl의 방법 [15]은 (12)와 같이 바퀴의 중심속도를 바퀴의 각속도와 반지름 및 화이트 노이즈를 이용해서 표현하고 확장형 칼만필터(Extended Kalman Filter:EKF)를 이용한다.

$$\mathbf{v}_i = r\mathbf{w}_i + \mathbf{n} \quad (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

EKF를 사용한 Karl의 방법에 비해서 본 연구에서 제시하는 피봇바퀴 개념을 이용하여 속도를 추정하는 방법은 크게 2가지의 장점이 있다. 첫째 바퀴 3개의 속도는 기구학적인 적합성을 만족한다. 로봇 바퀴와 지면과의 접촉각을 추정할 때 바퀴 3개의 기구학적인 적합성이 만족할 때 높은 정확도를 가지는 접촉각 추정이 가능해진다. 둘째, 바퀴의 속도를 구하는 계산량이 줄어든다. EKF를 사용하면 매시간의 속도를 계산하는 데 있어 EKF 알고리즘을 수행하는 계산이 필요한 반면에 제시된 방법을 사용하면 바퀴의 속도를 기구학적인 방법으로 구하는 계산만이 필요로 하게 된다. 상대적으로 기구학적인 방법으로 속도를 구하는 계산량은 EKF 알고리즘을 수행하는 계산량보다 작기 때문에 계산량의 측면에서 본다면 유리하다.

피봇바퀴는 앞바퀴, 중간바퀴, 뒷바퀴중의 하나인데 피봇바퀴를 선정하는 것 또한 중요한 문제가 되겠다. 이때 피봇바퀴를 선정하는 여러 가지 기준이 있을 수 있다. 본 연구에서는 바퀴에 작용하는 수직항력이 가장 큰 바퀴를 피봇바퀴라고 정하겠다. 물리적으로 지면에서 견딜 수 있는 최대마찰력은 지면에서 작용하는 수직항력과 마찰계수의 곱으로 표현 할 수 있는데 수직항력이 가장 큰 바퀴가 높은 최대마찰력을 지면과 바퀴 사이에서 낼 수 있기 때문이다. 그리고 수직항력을 구하기 위해서는 5장에서 ROBHAZ-6WHEEL의 준정역학 모델을 세우는 과정 및 힘의 평형 방정식을 푸는 과정을 설명한다.

#### 5. ROBHAZ-6WHEEL의 준 정역학 모델

최대 마찰계수 추정 알고리즘을 구현하기 위해서는 바퀴와 지면 사이의 마찰계수를 실시간으로 추정해야 한다. 즉 바퀴와 지면 사이에 작용하는 견인력과 수직항력을 추정해야 한다. 따라서 본 절에서는 2차원 준 정역학 모델을 제시하여 견인력과 수직항력을 추정하는 식의 유도과정에 대해서 논의한다.

로봇의 자유도를 살펴보면 한 개의 링크가 지면에 고정된 경우를 고려할 경우 4절 링크의 자유도는 1이며, ROBHAZ-6WHEEL은 지면에 고정된 링크를 가지고 있지 않으므로 2 자유도를 가지고 있다. 즉 2개의 링크의 각도를 알고 있다면 로봇의 자세를 구할 수 있다.

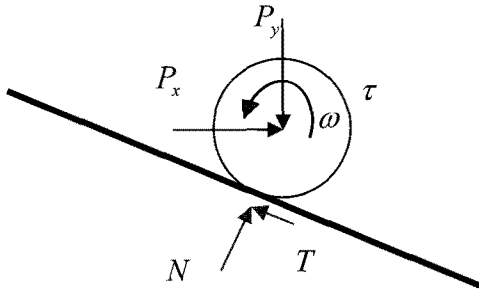


그림 9. 바퀴 모듈의 자유 물체도.  
Fig. 9. Free body diagram of the wheel module.

그림 7에서와 같이 ROBHAZ-6WHEEL은 로봇 몸체를 포함하여 4개의 링크 그리고 세 개의 바퀴로 이루어져있다. 이때 준 정역학을 통하여 구하려고 하는 미지수의 개수와 필요한 방정식 개수는 다음과 같다. 각각의 바퀴당 지면에서의 수직항력과 견인력과 3개의 링크와 로봇 몸체를 연결하는 네 개의 조인트(P,Q,R,S)에 작용하는 힘의 개수를 합하여 총 미지수의 개수는  $14(4 \times 2 + 3 \times 2)$ 이다. 그리고 이 미지수를 풀기 위해서 필요한 식은 로봇의 몸체와 세 개의 링크에서 각각 3개의 방정식이 나오기 때문에 방정식의 개수는  $12(4 \times 3)$ 이다. 정적 평형 방정식 유도를 위해 로봇의 관성력을 무시하였으며, 로봇의 링크의 질량은 로봇 몸체나 바퀴에 비해서 작기 때문에 로봇의 중력은 로봇 몸체와 바퀴에 의한 영향만 고려한다. 수립된 정적 평형 방정식은 부정적 문제(underdetermined problem)이며, 무한개의 해를 가지게 된다.

이때 바퀴에 작용하는 견인력은 바퀴에 작용하는 토크(모터 전류)와 직접적인 연관이 있으며 그림 9와 같이 바퀴의 자유 물체도를 그리고 바퀴의 운동방정식(식 (13))을 세운다.

$$J\dot{\omega} = \tau - rT - B\omega, T < \mu_s N \tag{13}$$

여기서  $J$ 는 질량 관성 모멘트,  $T$ 는 견인력,  $B$ 는 바퀴 모듈(wheel module)의 내부적인 감쇠 계수(damping coefficient),  $r$ 은 바퀴의 반지름,  $\mu_s$ 는 정지 최대 마찰력이다. 이때 바퀴의 속도를 정속도로 주행한다고 했을 때 (13)의 좌변은 0이 되며 실험적으로  $B$ 를 구하면 (14)와 같이 견인력을 모터의 전류의 함수로 표현 할 수 있다.

$$T = \frac{1}{r}(\tau - B\omega) \tag{14}$$

즉 로봇의 전체 미지수 개수는 14개에서 바퀴에 작용하는 견인력(식 (14))개를 뺀 11개가 되었고, 정적 평형 방정식 (12)를 이용하여 최소자승해(least square solution)를 구할 수 있다.

**IV. 최대마찰계수 추정 실험**

본 장에서는 II장에서 설명한 최대 마찰계수 추정 알고리즘을 ROBHAZ-6WHEEL에 적용시켜 최대 마찰계수를 추정하는 실험을 한다. 제시된 알고리즘을 구현하기 위해서 바퀴에서 작용하는 마찰계수와 바퀴의 미끄럼을 실시간으로 구해야 한다. 따라서 본 장의 앞부분은 이러한 값을 추정하는 방법에 대해서 기술한다. 본 장의 뒷부분은 최대마찰계수 추

정 결과에 대해서 언급하며 추정된 최대 마찰계수의 타당성을 증명하기 위해서 실제 바퀴와 지면 사이의 최대 마찰계수를 측정하고 추정치와 비교한다.

**1. 실험 장치 구성**

그림 10의 좌측은 실험장치 구성을 나타낸 그림이다. 로봇의 전원은 외부에서 연결되며, 6개의 바퀴는 각각의 독립적인 모터 서보 드라이브로 제어된다. 각각의 모터 서보 드라이브는 각각의 바퀴가 일정한 각속도로 움직이도록 하고, 바퀴에 작용하는 견인력(모터 전류)을 측정한다. 또한 컴퓨터와 서보 드라이브 간의 통신은 CAN(Controllable Area Network)을 통해서 이루어진다.

로봇의 자세는 2개의 링크의 각도에 의해서 결정되며, 바퀴와 지면 사이의 접촉각을 추정하기 위해서 2개의 링크각속도를 측정해야 한다. 즉 링크의 기구학적 정보를 측정하기 위해서 링크 1, 2에 IMU(Inertia Measurement Unit) 센서를 장착한다.

실험 과정은 그림 10과 같은 경사면(경사각도: 18.6도)에 로봇을 주행 시킨다. 경사면을 오르는 동안에는 모든 바퀴의 접촉각의 변화가 없다. 그러나 평지에서 경사면으로 바뀌는 상황이나 경사면에서 평지로 주행하는 과정에서 바퀴의 접촉각이 변하면서 case 1, case 2와 같은 조건이 발생한다. 이때 경사면은 나무표면이다. 로봇의 모터는 등속도(500rpm)로 회전하게 명령을 준다. 로봇의 모터와 바퀴는 하모닉기어(1:80)으로 연결되어 있기 때문에 로봇은 모터 끝 단의 속도의 1/80로 회전하게 된다. 이렇게 로봇을 주행을 시키면서 로봇의 모터 서보 드라이브를 이용해서 모터에 들어가는 전류와 IMU 센서로부터 Euler 각도와 각속도를 측정한다.

**2. 실험결과**

**2.1 견인력 측정결과**

바퀴에 작용하는 견인력은 (14)로부터 얻을 수 있다. 이때

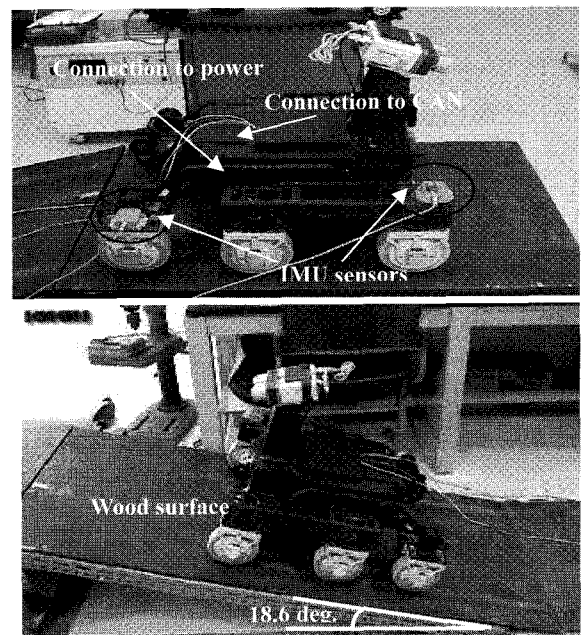


그림 10. 실험장치 구성 및 로봇 주행 지형.  
Fig. 10. Experiment configuration and terrain.

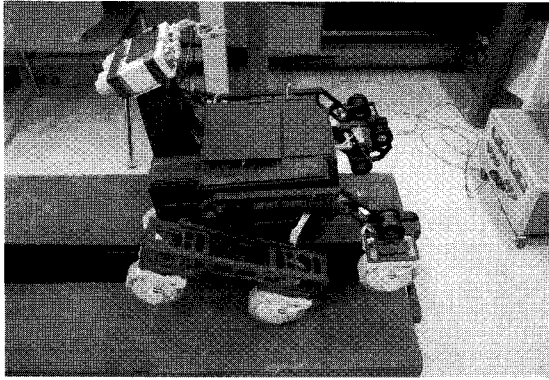


그림 11. 바퀴모듈의 내부 감쇠 측정.  
 Fig. 11. Measurement of inner damping of the wheel module.

표 1. 측정된 내부 감쇠.

Table 1. Experimental results of inner damping of the wheel module.

	바퀴 1	바퀴 2	바퀴 3
내부감쇠[mA]	282.12	300.04	588.69

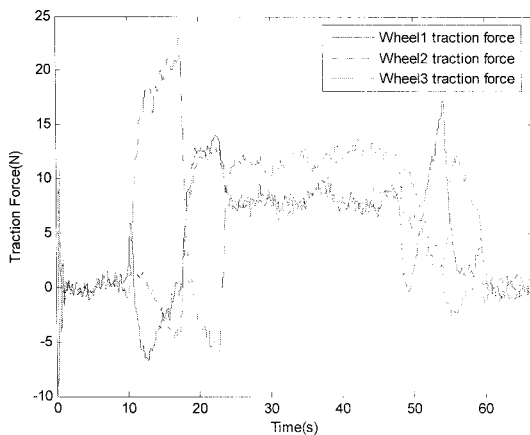


그림 12. 바퀴에 작용하는 견인력.  
 Fig. 12. Traction forces acting on the robot's wheel.

바퀴 모듈의 내부적인 감쇠항 ( $B_w$ ) 을 알아야 하는데 그 값을 찾아 내기 위해서 그림 11과 같이 바퀴를 지면에서 펜 후 모터를 등속회전 시키고 모터의 전류를 측정한다. 즉 감쇠항에 의해서 모터에 입력되는 전류는 표 1과 같다.

바퀴1(앞바퀴), 바퀴2(중간바퀴), 바퀴3(뒷바퀴)에 작용하는 견인력은 좌우 바퀴에서 측정되는 값의 평균값을 사용하며 표 1에서 측정된 각각의 바퀴에서의 내부감쇠를 고려해서 견인력을 그래프로 그리면 그림 12와 같다. 직관적으로도 알 수 있듯이 로봇이 경사면을 올라갈 때 뒷바퀴의 견인력이 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

2.2 링크의 각도 및 각속도 측정결과

측정된 링크의 각속도는 그림 13과 같다. 본 실험에 사용된 지형은 단순한 경사면이기 때문에 두 링크의 각도는 이상적으로 사다리꼴 형태를 가져야 한다. 그리고 각속도 역시 각도가 변하는 지형에서 일정한 값을 가져야 한다. 그러나 센서의 오차로 인해서 이상적인 값과 동일한 결과가 나오지 않았다. 특히 측정된 각도는 IMU 센서의 Euler 각도인데 로

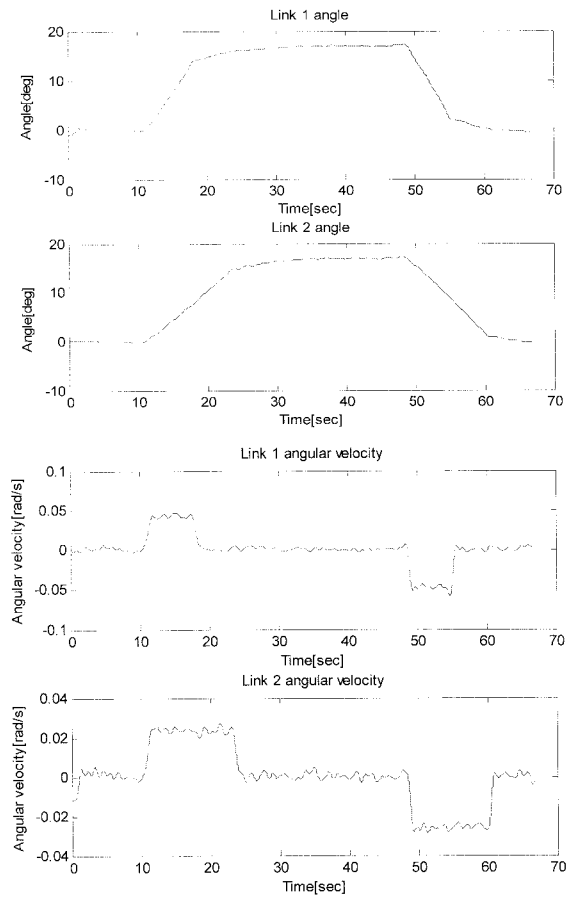


그림 13. 두 링크의 회전 각도 및 각속도.  
 Fig. 13. Angular velocity and rotation angle of 2 links.

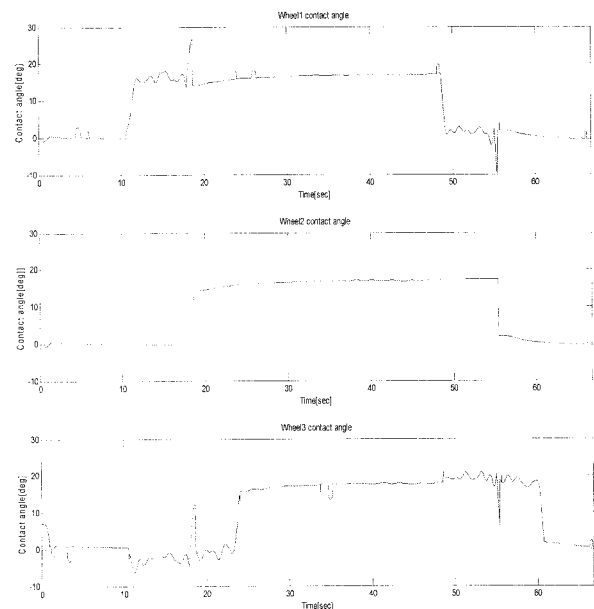


그림 14. 바퀴와 지면 사이의 접촉각(실험 지면: 나무).  
 Fig. 14. Wheel-terrain contact angle(experiment condition: wood).

봇이 주행함에 따라서 관성좌표계와 센서에 고정된 좌표계의 불일치가 오차요인으로 작용한 것으로 판단된다. 그러나 대략적으로 이상적인 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.



2.3 접촉각 추정결과

바퀴에 작용하는 힘 및 바퀴 중심의 속도를 결정하기 위한 접촉각 추정결과는 그림 14와 같다. 실험 지형은 단순한 경사면이기 때문에 바퀴1, 바퀴2, 바퀴3의 접촉각은 순차적으로 실험 경사면의 각도인 18.6도를 가져야 한다. 그러나 접촉각이 변하는 시간에서 추정 오차가 남을 알 수 있으며 경사면을 주행하는 과정에서의 접촉각 추정결과는 16.2도가 나왔으며, 실험 경사면의 각도인 18.6도가 나오지 않는다. 이렇게 추정 오차가 발생하는 것은 링크의 각도 및 각속도의 측정 오차에서 야기된 것으로 판단된다. 이러한 접촉각 추정 오차는 바퀴에 작용하는 힘을 추정하는데 오차요인으로 작용하여 바퀴에 작용하는 마찰계수 추정에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그러나 접촉각 추정결과가 대략적으로 이상적인 결과와 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다.

2.4 바퀴에 작용하는 수직항력 및 마찰계수

앞에서 구한 바퀴와 지면 사이의 접촉각과 로봇의 자세 및 링크의 각속도 정보를 이용하여 힘의 평형 방정식을 풀면 구하고자 하는 바퀴의 수직항력을 구할 수 있다. 그리고 바퀴의 견인력을 추정한 수직항력으로 나누면 실시간으로 바퀴와 지면 사이의 마찰계수를 구할 수 있다. 그 결과는 그림 15와 같다. 마찰계수는 일반적으로 1이하의 값을 가진다. 그러나 그림 15의 우측 그래프에서 확인할 수 있듯이 1이상의 값을 가지는 결과를 가진다. 이러한 마찰계수의 오차요인은 앞에서 설명한 센서의 측정 오차 및 접촉각 추정 오차로 인한 것으로 판단되며, III장 5절에서 설명한 준 정역학 모델의

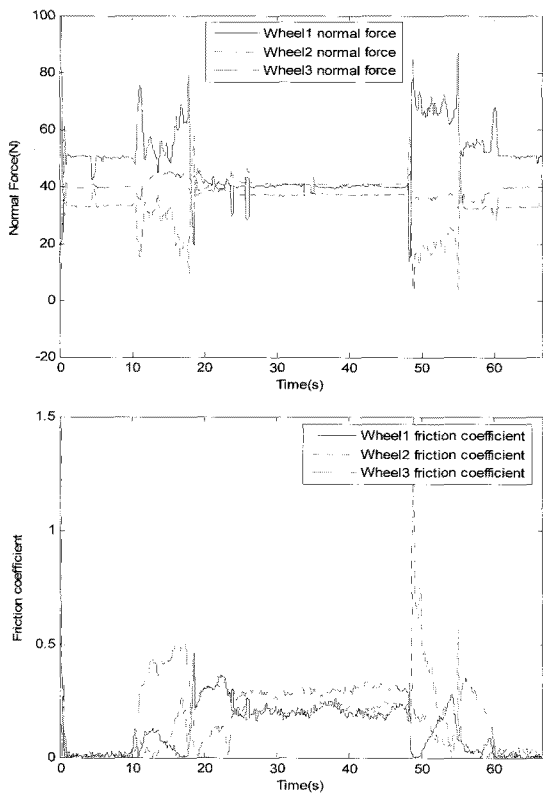


그림 15. 바퀴에 작용하는 수직항력(상), 마찰계수(하).  
Fig. 15. Normal forces acting on the robot's wheel (upper), friction coefficient(lower).

오차(준 정역학 모델을 세우는 과정에서 로봇의 관성력을 무시하고 링크 무게를 제외하였기 때문에, 준 정역학 모델은 로봇과 정확하게 일치하지 않는다.)로 인해서 수직항력의 추정오차를 야기시켰기 때문이다.

2.5 바퀴의 중심속도 추정

III장 4절에서 설명한 피봇바퀴 개념을 이용하여 바퀴의 중심속도를 추정한 결과 그림 16과 같다. 평지를 주행하는 구간(0초에서 10초 사이) 및 경사면(25초에서 50초 사이)을 주행하는 구간에서는 로봇의 링크의 각속도가 0이기 때문에 로봇의 자세가 변하지 않고 모든 바퀴의 속도가 동일하게 나타남을 알 수 있다. 반면 로봇이 접촉각이 변하는 지점에서는 바퀴의 상대적인 속도차이가 나고 바퀴의 미끄럼이 생기게 된다.

2.6 최대마찰계수 추정결과

바퀴의 마찰계수와 바퀴의 상대적인 속도를 추정한 결과를 바탕으로 최대 마찰계수 추정 알고리즘을 적용해서 얻은 최대 마찰계수 추정치는 그림 17과 같다. 그림 16에서와 같이 바퀴들의 속도차이가 크지 않는 구간에서는 case 3라고 판별하여 최대마찰계수추정을 보류하였다. 그리고 로봇이 경사면을 오르기 시작하는 구간(10초에서 20초)에서는 case 1으로 판별하였다. 또한 로봇이 경사면이 오르기를 완료하는 구간(50초에서 60초)에서는 case 2로 판별하였다.

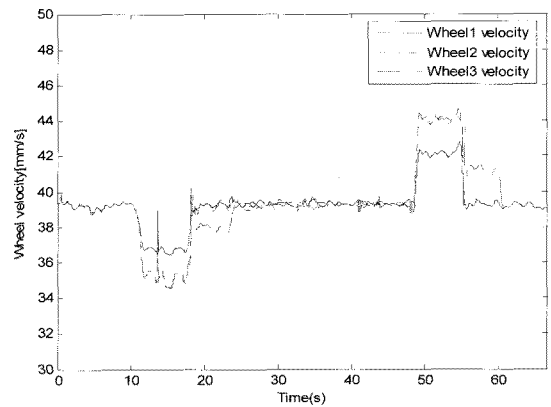


그림 16. 바퀴 중심 속도 추정.  
Fig. 16. Absolute velocity estimation at the wheels' center.

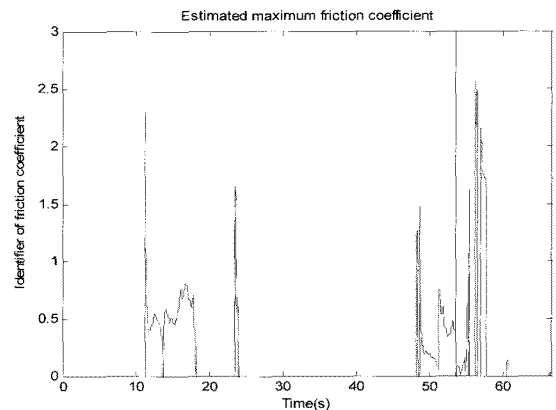


그림 17. 최대마찰계수 추정결과.  
Fig. 17. Maximum friction coefficient estimation results.

추정치를 대략적으로 살펴보면 물리적으로 의미 없는 값 (물리적으로 최대 마찰계수는 0.2에서 1사이의 값을 가진다.) 도 많이 추정된다. 그러나 물리적으로 의미 있는 값으로 추정되는 구간에서는 어떤 특정한 값 근방의 값을 가짐을 알 수 있다. 이렇게 물리적으로 의미 없는 값이 추정되는 원인은 앞에서 설명한 센서측정 오차나, 로봇의 준 정역학 모델 오차에 의한 것으로 판단된다.

3. 최대마찰계수 측정 및 추정치와의 정량적 분석

그림 17에서 얻은 최대마찰계수 추정치의 정확성을 검증하기 위해서 최대마찰계수를 직접 측정하고 추정치와 정량적으로 분석할 필요가 있다.

로봇의 바퀴와 지면 사이의 최대마찰계수는 그림 18의 우측그림과 같이 로봇이 경사면에서 미끄러지기 시작할 때의 경사각도를 이용해서 최대 마찰계수를 구할 수 있다(그림 18의 좌측그림). 따라서 경사각도를 측정하기 위해서 l, h(그림 18의 우측그림)를 측정하고 로봇의 바퀴와 지면 사이의 최대 마찰계수를 측정할 수 있다. 그리고 측정된 최대 마찰계수와 그림 17의 추정된 최대마찰계수 결과는 표 2와 같다.

표 2의 추정치는 최대마찰계수 추정치 중에서 물리적으로 의미 있는 값인 0.2에서 1사이의 값을 case 1, 2별로 평균값과 전체 추정치의 평균값을 나타낸다. 전 구간에서의 추정치 평

균과 측정치는 약 5%의 오차를 가짐을 알 수 있다. 특히 추정치 중에서 case 2의 추정치가 case 1의 추정치에 비해서 큰 오차를 가지는데 이것은 바퀴의 미끄럼과 마찰계수 특성이 case 2에서 근사한 2차 곡선을 정확하게 따르지 않기 때문에 생기는 오차라고 판단된다.

마찰계수측정 실험 조건에 대해서 매우 민감하게 반응하는 값으로 일반적으로 소수점 첫째 자리까지는 믿을 수 있는 값이고, 소수점 둘째 자리 이후에는 정확도가 떨어진다. 따라서 측정값과 추정치의 전체 평균값의 소수점 첫째 자리가 일치하기 때문에 추정치의 정확도가 높다고 판단된다.

V. 결론

주행로봇은 인간을 대신하여 험지나 위험 지역에서 탐사, 전투, 지뢰 제거와 같은 임무를 수행한다. 이러한 임무를 효율적으로 수행하기 위해서 주행로봇의 주행성 확보는 매우 중요하다. 또한 주행성 확보를 위해서는 주행성을 측정 할 수 있는 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 특히 주행성은 로봇이 주행하는 지면의 특성에 큰 영향을 받으며 주행로봇에 관련된 연구에서 지면특성 추정은 매우 중요한 연구 분야중의 하나이다.

본 연구에서는 주행로봇이 주행하는 동안 지면특성을 반영하는 최대마찰계수를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 최대 마찰계수는 지면특성을 물리적으로 잘 반영하며 높은 분해능을 가진다. 그러나 기존의 연구에서는 자동차나 간단한 형태를 가지는 로봇에만 적용했기 때문에 험지를 주행하는 로봇에 적용하기 힘들다. 본 연구에서는 최대마찰계수를 추정하는 범위를 험지로 확대 적용한다.

제한된 알고리즘이 험지를 주행하는 로봇에 적용되기 위해서 로봇자세 및 접촉각을 측정 및 추정하여 힘의 평형 방정식을 풀어서 마찰계수를 실시간으로 구하였다. 그리고 바퀴와 지면 사이의 미끄럼을 로봇 바퀴의 중심속도 차이를 이용하여 구하였으며, 바퀴의 중심속도는 피봇 바퀴개념을 이용해서 추정한다. 본 연구에서 제안하는 최대마찰계수 추정 알고리즘은 바퀴에 작용하는 견인력 및 수직항력, 바퀴의 미끄럼 속도, 바퀴와 지면 사이의 접촉각을 추정하는 모듈을 포함한다. 이러한 모듈을 통해서 험지를 주행하는 로봇이 높은 수준의 임무를 수행하는데 필요한 정보를 추정한다.

제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 경사면을 주행하는 로봇의 최대마찰 계수를 추정하였으며 추정치의 정확도 검증을 위해서 최대마찰계수를 측정 및 정량적 분석을 수행하였다. 그 결과 제안된 알고리즘은 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다.

본 연구는 제시된 알고리즘을 통해서 로봇이 주행하는 환경의 지면특성을 파악하려고 한다. 그러나 지형특성은 단순히 최대마찰계수로만 결정되는 것이 아니라 여러 가지 요인에 영향을 받는다. 따라서 단순한 최대마찰계수 정보만으로 지형특성 정보로 사용하는 것은 운용범위에 제한을 받는다.

본 연구의 향후 과제는 실제 야외 환경에서의 적용이다. 본 연구에서는 실내의 경사면 지형에서 실험을 수행하고 알고리즘을 검증하였다. 일반적으로 주행로봇이 주행하는 야외 환경은 임의의 불연속적인 경사면을 가지는 지형이다. 따라서 실험을 수행한 불연속적인 경사면 지형의 연속이라고 볼

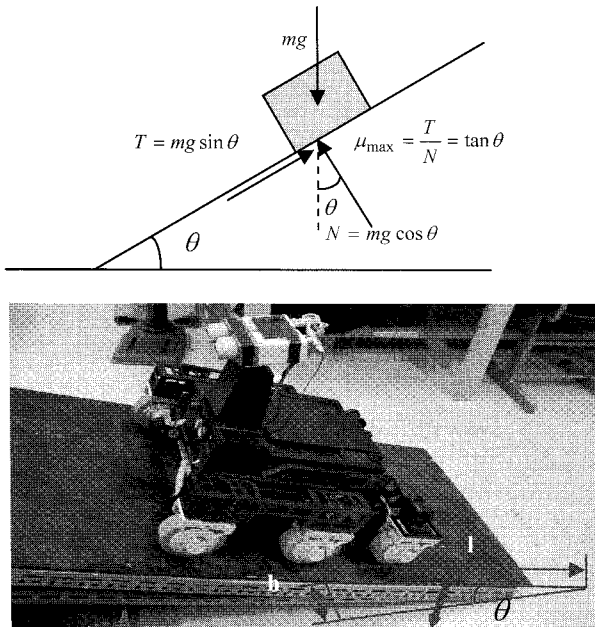


그림 18. 최대마찰계수 측정실험 개념도(좌), 실험 장치(우).  
Fig. 18. Maximum friction coefficient experiment concept diagram (upper), experiment configuration (under).

표 2. 최대마찰계수 측정 결과 및 추정치 평균값.  
Table 2. Measured and estimated maximum friction coefficient.

	측정치			
	h[cm]	l[cm]	$\theta$ [deg]	$\mu_{max}$
결과값	65.4	135.5	28.9	0.55
	추정치			
	Case 1	Case 2	전체	
	0.53	0.47	0.52	

수 있다. 그러나 실제 야외 환경은 실험 환경과는 다르게 양 바퀴가 서로 다른 경사면을 가지는 경우가 있을 수 있으며 극단적으로는 바퀴가 지면에 접촉하지 않는 상황이 발생한다. 따라서 이 모든 경우를 고려한 야외 환경에서의 실험 및 검증이 필요로 하다.

**참고문헌**

[1] H. D. Choi, C. K. Woo, S. H. Kim, Y. K. Kwak, S. J. Yoon, "Independent traction control for uneven terrain using stick-slip phenomenon: application to a stair climbing robot," *Autonomous robots*, vol. 23 no. 1, pp. 3-18, 2007.

[2] Y. Hori, Y. Toyoda, and Y. Tsuruoka, "Traction control of electric vehicle based on the estimation of road surface condition," *Proceedings of the Power Conversion Conference-Nagaoka*, vol. 1, pp. 1-8, 1997.

[3] P. Lamon, A. Krebs, M. Lauria, and S. Shooter, R. Siegwart, "Wheel torque control for a rough terrain rover," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2004 no. 5, 2004, pp. 4682-4687.

[4] S. J. Yoon, 2005, "스테레오 카메라를 이용한 주행 로봇의 야외 환경 탐사," 박사학위논문, KAIST.

[5] A. Howard and H. Seraji, "Vision-based terrain characterization and traversability assessment," *Journal of robotic systems*, vol. 18, no. 10, pp. 577-587, 2001.

[6] Christopher A. Brooks and Karl Iagnemma, "Vibration-based terrain classification for planetary exploration rovers," *IEEE*

*transactions on robotics*, vol. 21, no. 6, pp. 1185-1191, 2005.

[7] Iagnemma, K. Kang, S. Shibly, H. and Dubowsky, S., "Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers," *IEEE transactions on robotics*, vol. 20, no. 5, pp. 921-927, 2004.

[8] F. Gustafsson, "Slip-based tire-road friction estimation," *Automatica : the journal of IFAC, the International Federation of Automatic Control*, vol. 33, no. 6, pp. 1087-1099, 1997.

[9] W. Hwang, and B. Song, 2000, "Road condition monitoring system using tire-road friction estimation," *Proceedings of AVEC 2000, Ann Arbor, Michigan*, pp. 437-442, August 22-24.

[10] K. Yi, K. Hedrick, and S.-C. Lee, "Estimation of tire-road friction using observer based identifiers," *Veh. Syst. Dyn.*, 31, 233-261, 1999.

[11] Wong J, *Theory of Ground Vehicle*, John Wiley and Sons, 1976.

[12] Wong J, *Terramechanics and Off-road Vehicle*, Elsevier, 1989.

[13] R. Hadekel, "The mechanical characteristics of pneumatic tyres," *S&T Memo no. 10/52*, Ministry of Supply, London, England, 1952.

[14] C.-H. Woo, C.-H. Cho, S.-C. Kang, K.-C. Shin, M.-S. Kim, S. H. Kim, Y. K. Kwak, "A new wheeled mobile robot capable of climbing the stairs using a passive linkage mechanism," *In Proc. of the 2002 ASME-ESDA, 2002*

[15] K. Iagnemma and S. Dubowsky, "Traction control of wheeled robotic vehicles in rough terrain with application to planetary rovers" *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 10/11, pp. 1029-1040, 2004.



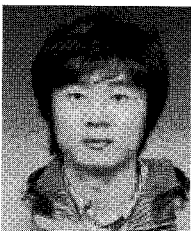
**강 현 석**

2006년 부산대학교 기계공학부(공학사). 2006년~2008년 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공(공학석사). 현재 포스코 기술연구소 STS 연구그룹 근무. 관심분야는 주행로봇, 압연제어.



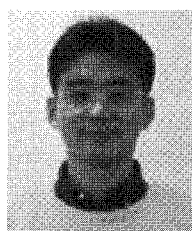
**곽 윤 군**

1971년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1974년 University of Colorado, Boulder, USA 공학설계 및 경제평가학과 졸업(공학석사). 1978년 University of Texas, Austin, USA 기계공학과 졸업(공학박사). 2005년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 감성로봇, 주행로봇.



**최 현 도**

2002년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2004년 KAIST 기계공학과 대학원 졸업(공학석사). 2004년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 기구설계, 주행로봇, traction 제어.



**정 혜 관**

2003년 한국과학기술원 기계공학과 졸업. 2005년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 2005년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 주행로봇의 자율주행 및 제어.



**김 수 현**

1978년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1980년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사). 1991년 Imperial College of Science and Technology, University of London 졸업(공학박사). 1991년~현재 KAIST 기계공학과 교수 재직중. 관심분야는 국방 무인

화 기술.