

# 고속 주행용 실외 경비로봇을 위한 구동 메커니즘

## A Driving Mechanism of Outdoor Security Robots for High Speed Applications

정 해 관<sup>1</sup>, 고 두 열<sup>2</sup>, 우 춘 규<sup>3</sup>, 곽 윤 근<sup>4</sup>

Hae Kwan Jeong<sup>1</sup>, Doo Yeol Koh<sup>2</sup>, Chun Kyu Woo<sup>3</sup>, Yoon Keun Kwak<sup>4</sup>

**Abstract** In this paper, a new driving mechanism of security robots which should overcome obstacles with stability even though moving in high speed is introduced. The driving mechanism has spring-based suspension and two wheels positively necessary to overcome obstacles. From the driving mechanism, it is mainly discussed how we can decrease overshoot and impulse occurred when the robot is in the process of overcoming obstacles. Finally, design parameters of the driving mechanism which guarantees stable motion while overcoming obstacles is deduced based on simulation results. Experiments are also followed to demonstrate how well the manufactured system works in its early stage of the practical use.

**Keywords:** Driving Mechanism, Security Robot

### 1. 서 론

경비로봇(Security Robot)은 주행로봇(Mobile Robot)의 일종으로, 대상 구역에 대하여 감시/정찰, 경계, 위협 요소 탐지 등의 업무를 수행하는 시스템을 가리킨다. 이러한 경비로봇은 주로 민수 분야의 요구를 충족시켜주는 개념으로 연구·개발되므로 국방로봇(Military Robot)과는 대비되는 주제이다.

경비로봇의 주된 활용 범위는 보호 대상을 약탈이나 파괴, 치사 등으로부터 엄호하여 유지하는 용도로 규정지을 수 있다. 현재 사회 안전을 위해 가장 많이 도입되어 있는 CCTV는 대표적인 보안 시스템으로 대중화되어 유사시 유용하게 쓰이고 있지만 이동성(Mobility)의 결여로 인해 대상 구역의 특정 부분에 사각 지대를 형성하므로 의외로 손쉽게 무력화될 수 있다는 단점이 있다. 또한 사건 발생 당시 아무런 외부적 조치를 취하지 않으므로 언제나 사후 처리에만 도움을 줄 수 있을 뿐이다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 경비로봇이 고안되었다. 경비로봇은 주행

로봇의 이동성을 기반으로 대상 구역을 이동하면서 업무를 수행하므로 다른 보안 시스템과의 동조를 통해 사각 지대를 제거할 수 있으며 이상유무에 따라 적극적인 대응을 수행할 수도 있다.

경비로봇 관련 연구·개발은 1990년대부터 기업을 중심으로 활발하게 진행되어왔다. 그러나 대부분 건물 내부에서 운용되는 실내 경비로봇에만 초점을 두었기 때문에 실외 경비로봇 관련 연구는 희소한 편이다. 실외 경비로봇이라 함은 운용 환경이 실내가 아닌 실외라는 단순한 차이를 떠나 보다 넓은 환경에 대하여 보다 빠르게 업무를 수행해야 한다는 내용까지 함축한다. 표 1은 실외 경비로봇에 대한 대표적인 연구·개발 사례를 보여준다. 우선 국내 연구 사례로는 KIST에서 개발한 Securo가 대표적이다<sup>[1]</sup>. Securo는 120kg의 질량과 5.4km/h의 평균 속도를 지니며 GPS 기반으로 주어진 폐곡선 경로를 자율주행하면서 경계 임무를 수행한다. 최대 주행 거리는 15km이며 약 5시간까지 연속 운행이 가능하다. 국외 연구 사례는 지역적으로 크게 일본, 미국, 유럽 등으로 구분될 수 있는데 가장 완성도가 높은 것으로는 일본 SECOM社의 Robot X가 있다<sup>[2]</sup>. Robot X는 자동차와 유사한 외형을 지닌 고속 주행용 경비로봇으로, 실내·외를 막론하고 빠르게 이동하며 각종 경비 업무를 수행함은 물론 침입자 등의 위협 요소 탐지 시 연기를 분사하여 위협을 행사하는 능력도 갖고 있다. 한편 미

Received: April. 2. 2009, Reviewed: May. 18, Accepted: May. 20. 2009

※ 이 논문은 2009년도 2단계 두뇌한국(BK)21사업에 의하여 지원되었음.

<sup>1</sup> 한국과학기술원 기계기술연구소 박사 후 연구원

<sup>2</sup> 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공 박사과정

<sup>3</sup> (주)다사로봇 지능로봇사업부 책임연구원

<sup>4</sup> 한국과학기술원 기계항공시스템학부 교수

표 1. 실외 경비로봇 관련 선행 연구·개발 사례

이름	국가/기관	크기 (cm)	무게 (kgf)	속도 (km/h)
Securo	한국/ KIST	104(L) x 79(W) x 82(H)	120	5.4
Robot X	일본/ SECOM	106(L) x 80(W) x 98(H)	120	10
MDARS-E	미국/ SSC Pacific	213(L) x 130(W) x 97(H)	680	15
OFRO	독일/ Robowatch	112(L) x 70(W) x 140(H)	65	7.2
GroundBot	스웨덴/ Rotundus	60(R) x 80(W)	25	10

국에서 개발된 MDARS-E는 미 육군과 해군이 공동으로 투자하여 개발한 로봇으로, 기능 위주의 중형급 플랫폼을 자랑하며 군 주요 시설을 자가 통제할 수 있는 경비로봇이다. 이 외에도 유럽에서는 OFRO<sup>[3]</sup>, GroundBot<sup>[4]</sup> 등의 경비로봇을 개발하였는데 OFRO의 경우는 45°의 경사각을 가진 지형까지 등반 가능하다는 특징을 갖고 있으며 2006 FIFA 독일 월드컵 대회 때 치안 목적으로 활용된 바 있다. 반면 GroundBot은 구(Sphere) 형상을 지닌 경비로봇으로, 경량의 플랫폼에 비해 신속함이 돋보이는 장점이 있지만 아직 제품으로서의 실용화가 미비한 실정이다.

위에서 언급한 실외 경비로봇은 모두 운용 환경에 적합한 시스템으로 구성되어 실용성을 검증받고 제품화되었다. 그러나 로봇의 주행 지형이 잘 포장된 도로로만 한정되어 있고 험지 주행으로는 경사 지형을 고려한 것이 전부이다. 이는 일반적인 실외 환경을 생각해봤을 때 매우 제약적인 상황에서의 운용이라 할 수 있다. 따라서 플랫폼의 형상이나 무게를 떠나서 보다 일반적으로 운용될 수 있는 실외 경비로봇 시스템을 제안한 필요가 있다. 즉, 로봇의 경로 상에 존재할 수 있는 주행 저해 요소까지 고려한 시스템 구현이 요구된다.

이에 본 연구에서는 최대 10km/h의 속도로 주행하면서 20cm 정도의 둔턱까지 극복 가능한 실외 경비로봇 개발에 대하여 논하고자 한다. 이는 실외 경비로봇이 기본적으로 수행해야 하는 ‘고속 주행’과 ‘장애물 극복’을 동시에 만족시키면서 시스템의 내구성과 기능성까지 유지시킬 수 있는 구동 메커니즘 설계 문제로 귀결된다. 따라서 본 연구에서는 운용 시나리오에 맞는 경비로봇의 구동 메커니즘을 제안하고 이를 구성하는 설계변수 도출을 목표로 한다.

## 2. 구동 메커니즘

고속 주행과 장애물 극복을 모두 고려하여 실외 경비로봇의 구동 메커니즘을 설계한 연구는 전무하나 경비로봇으로의 활용을 배제하면 주행로봇 관련 구동 메커니즘 설계 연구는 매우 다양하게 찾을 수 있다. 그 중 본 연구와



그림 1. Benchmarking Model: Seekur

밀접한 연관이 있는 개발 사례로는 MobileRobot社의 Seekur가 있다<sup>[5]</sup>. Seekur는 실외 환경에서 운용되는 안내로봇(Guidance Robot)으로, 그림 1과 같은 외형을 가지며 전방향 조향(Omnidirectional Steering)이 가능한 바퀴 구동 메커니즘을 기본으로 한다. 한편 Seekur의 구동 메커니즘은 수직 방향으로의 현가장치(Suspension)를 포함하고 있어서 야지 주행 시에도 플랫폼에 큰 무리를 주지 않는다. 그러나 여타의 경우와 마찬가지로 장애물 극복에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 둔턱 등을 만났을 때 주행이 불가능하거나 시스템에 손상을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Seekur의 구동 메커니즘을 표준으로 삼아 고속 주행과 장애물 극복이 동시 구현 가능한 구동 메커니즘을 개발한다.

### 2.1 개념 고안

일반적으로 실외 경비로봇의 주행 지형은 탁월한 견인력을 요구할 정도로 험난하지 않으므로 고속 주행에 적합한 바퀴 구동 메커니즘을 채택하는 것이 바람직하다. 그리고 이후에는 고속 주행 시 둔턱과 같은 장애물을 넘어갈 때 반력(Reaction Force)에 의한 충격과 플랫폼의 수직 변위 진동을 최소화하는 구조가 추가로 고려되어야 한다.

서론에서 언급했듯이 본 연구에서 목표로 하는 장애물은 20cm의 높이의 둔턱이다. 이는 보수적 관점에서 볼 때 바퀴의 지름이 40cm 이상이어야 한다는 것을 시사한다. 그러나 바퀴형 주행로봇은 도립진자(Inverted Pendulum)형이 아니고서는 3륜 이상이어야 하기 때문에 40cm 이상 지름의 바퀴는 그 질량과 부피로 인해 하드웨어 설계에 큰 부담을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 시스템 구조에 부담을 주지 않는 바퀴 크기와 함께 장애물 극복이 가능하고 충격 흡수가 용이한 그림 2의 구동 메커니즘을 고안하였다. 이 메커니즘은 2륜 협동 구조로, 평상시나 낮은 장애물 극복 시엔 하단 바퀴가 임무를 담당하고, 임계 높이 이상의 장애물을 만났을 시엔 상단 바퀴가 장애물과 접촉함

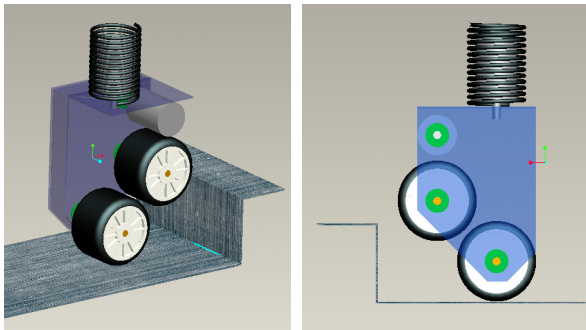


그림 2. 실외 경비로봇 구동 메커니즘

으로써 등반을 돕는 체계이다. 한편 상단 바퀴는 지지축이 비스듬하게 기울어져 있어서 장애물과의 접촉 시 수평 방향으로 전달되는 반력에 대응할 수 있는 탈착식 보조 바퀴이다. 따라서 충격 흡수가 가능한 현가장치를 추가 고려하여 동역학 모델을 완성하면 구동 메커니즘의 구조 설계가 완료된다.

### 2.2 동역학 모델

그림 3은 앞서 언급한 사항을 고려하여 완성된 동역학 모델을 보여준다. 여기서는 고안된 구동 메커니즘과 함께 로봇 시스템을 이루기 위해 플랫폼을 직육면체 모양의 4륜 구동 차량으로 가정했다. 외형 크기와 무게는 구동 메커니즘을 포함하여 각각 50cm(L) x 20cm(W) x 70cm(H)와 200kg으로 고려하였으며 구동 메커니즘 자체의 부피를 최소화하기 위해 바퀴의 위치를 너비 방향으로 이탈(Offset)시켜 배치하였다. 이는 바퀴 중심간 거리 감소를 통해 부피를 줄이면서도 장애물 극복 및 충격 흡수에 대한 시스템 성능은 유지하기 위한 방법이다.

한편 구동 메커니즘의 기하학적 요소는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 이는 플랫폼의 외형에 따라 결정되는 값들로써 설계변수 도출에 영향을 미칠 수 있지만 특수 형태가 아니고서는 4륜 구동 차량의 일반적인 동특성을 위배하지 않으므로 상식적인 값을 가정하여 입력할 수 있다.

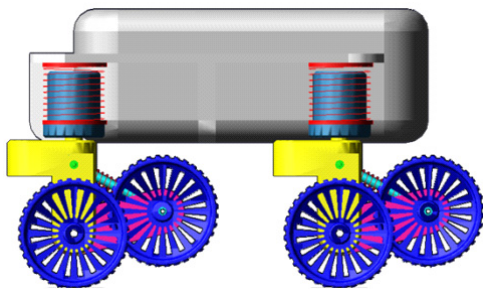


그림 3. 실외 경비로봇 동역학 모델

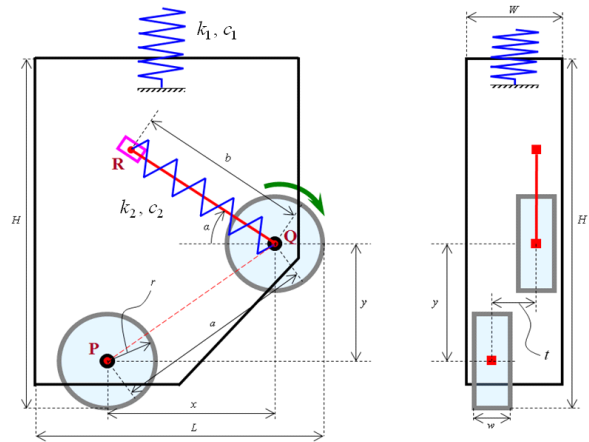


그림 4. 구동 메커니즘의 설계변수 및 기하학적 요소

그림 5는 그림 4를 바탕으로 둔턱 접촉 시의 역학적 관계를 도식화한 결과이다. 이를 바탕으로 다음의 관계식을 도출할 수 있다.

$$\sum F_x = f_l + f_u \cos \theta - F \sin \theta \quad (1)$$

$$\sum F_y = N + f_u \sin \theta + F \cos \theta - W \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sum M_z = & (N - W)D \\ & + f_u \cos \theta \{y + r(1 - \cos \theta)\} \\ & + f_u \sin \theta (D + x + r \sin \theta) \\ & + F \cos \theta (D + x + r \sin \theta) \\ & + F \sin \theta \{y + r(1 - \cos \theta)\} \end{aligned} \quad (3)$$

이 때  $O$ 는 모멘트 방정식의 기준이 되는 순간중심

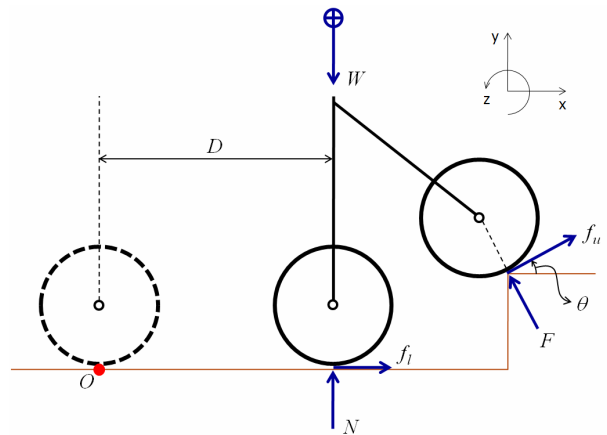


그림 5. 구동 메커니즘의 역학적 관계

(Instantaneous Center)을 나타내고  $W$  는 구동 메커니즘의 자중,  $D$  는 구동 메커니즘 모듈의 앞뒤간 거리를 뜻하며  $N, F, f_l, f_u$  는 각각 수직항력, 외력, 마찰력을 의미한다. 또한 위 식은 시스템의 성분이 대칭적으로 분포한 상태에서 구동 메커니즘에 모든 질량이 집중(Lumped)되어 있음을 가정한다. 한편 위에서 미지수로 기술된 변수와 가속도 등이 관측 가능하다면  $N > 0$  및  $\sum M_z > 0$  의 조건에 의해 보다 합리적으로 기하학적 요소를 결정할 수 있다.

### 3. 설계변수 도출

본 연구의 목표는 고속 주행용 실외 경비로봇을 위한 구동 메커니즘을 제안하고 해당 설계변수를 도출하는 것이다. 이는 일반적이면서도 합리적인 동역학 모델을 상정한 뒤 다수의 모의실험으로부터 타당한 설계변수를 귀납적으로 추론하는 과정을 의미한다. 한편 모의실험 결과를 분석하기 위해서는 성능지수(Performance Index)의 정의가 선행되어야 하므로 본 연구에서는 둔턱 등반 시 발생하는 Overshoot을 성능지수로 정의하고 이를 최소화하는 설계변수를 도출하도록 한다.

#### 3.1 설계변수 정의

일반적으로 설계변수라 함은 시스템에 삽입되는 기계요소의 정량적 특성을 의미하므로 본 연구에서는 앞서 정의된 동역학 모델에 의거하여 구동 메커니즘 전체의 수직 방향 원충을 담당하는 스프링(Spring), 댐퍼(Damper)와 상단 바퀴의 지지축 방향 원충을 담당하는 스프링, 댐퍼의 계수를 정의할 수 있다. 각각은  $k_1, c_1, k_2, c_2$  로 표기한다.

#### 3.2 모의실험

본 연구에서는 설계변수 도출을 위해 동역학 설계/분석 소프트웨어 ADAMS를 이용하여 모의실험을 수행하였다. 본래 설계변수는 이론적 모델에 근거하여 도출하는 것이 정석이지만 동역학 모델이 4개의 미지수를 갖고 있기 때문에 1개의 운동 방정식으로부터 유일한 해를 찾을 수 없으므로 귀납적 추론이 필요하다. 이에 우선적으로 각 설계변수에 대한 정성적인 예측이 필요한데 스프링의 경우는 충격을 흡수하는 강성이 플랫폼의 중량을 지지하는 강성보다 커야 하므로  $k_1 \leq k_2$  가 만족되어야 하고, 댐퍼의 경우는 충격 흡수 시 Overshoot을 최소화해야 하기 때문에  $c_1 \geq c_2$  가 성립해야 한다. 또한 시스템 질량으로부터 수직 방향의 고유진동수(Natural Frequency)를 예상해볼 때 각

메커니즘 모듈에 배당되는 스프링 상수가 20N/mm를 넘지 않아야 한다. 이는 응답 속도가 다소 느리더라도 충분한 충격 흡수와 함께 안정적인 둔턱 극복을 실현하기 위함이다.

위에서 언급한 사항을 기반으로 둔턱 등반 시 발생하는 Overshoot을 최소화하는  $k_i, c_i (i=1,2)$  를 구한 결과는 표 2와 같고, 이 때 관찰할 수 있는 등반 성능은 그림 6과 같다. 이는 로봇이 10km/h의 속도로 20cm 높이의 둔턱을 극복할 때 그림 7과 같이 다양한 설계변수 조합에 대해 하단 앞바퀴 질량중심(CM; Center of Mass)의 Overshoot이 최소가 되는 경우를 채택한 결과이다. 한편 그림 8은 둔턱 등반에 따른 충격 발생 시 로봇 몸체로 전달되는 충격력을 비교한 결과이고, 이로부터 최적의 설계변수 조합에 대해 최소의 충격력이 발생함을 알 수 있다. 또한 그림 9는 둔턱 등반 과정에서 각 바퀴에 소요되는 토크의 변화를 나타내며 이를 기반으로 시스템 제작에 필요한 구동기(Actuator) 사양을 결정할 수 있다.

표 2. 최적의 설계변수

Variable	Value
$k_1$	20 N/mm
$c_1$	2 N-sec/mm
$k_2$	20 N/mm
$c_2$	1 N-sec/mm

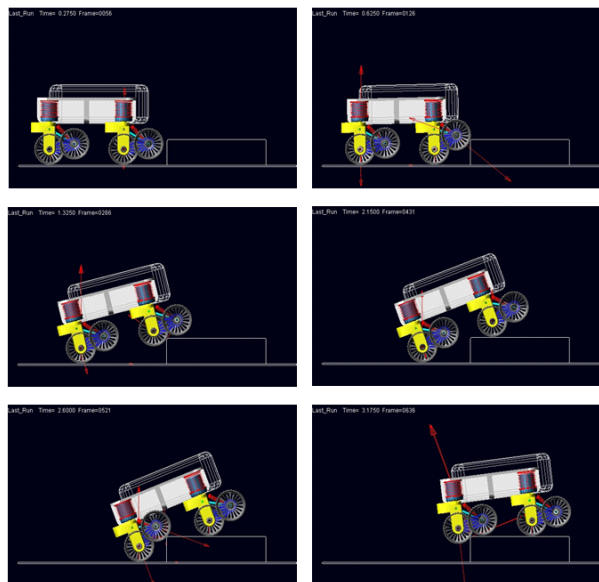


그림 6. 최적의 설계변수에 따른 모의실험 결과

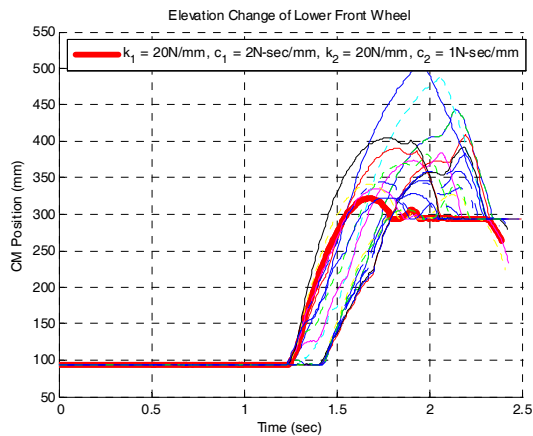


그림 7. 다양한 설계변수 조합에 따른 Overshoot

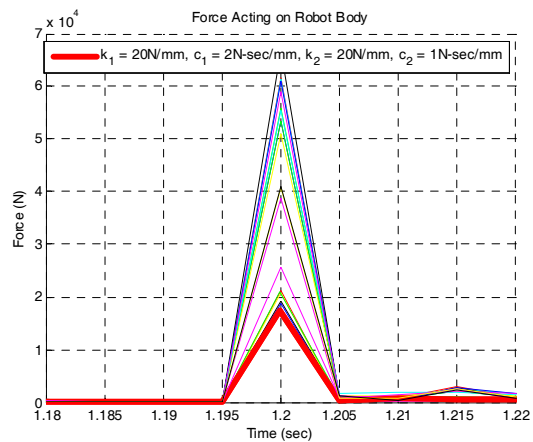


그림 8. 다양한 설계변수 조합에 따른 충격력

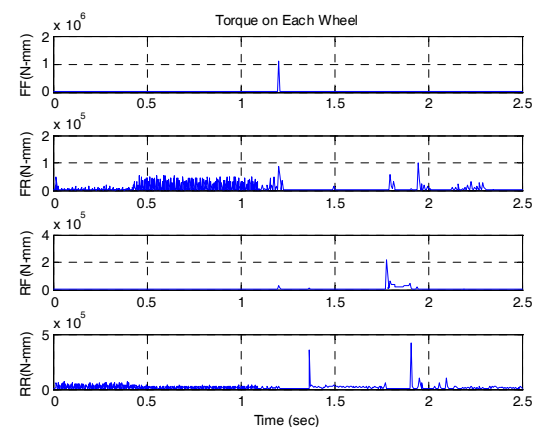


그림 9. 둔턱 등반 시 각 바퀴에서 소요되는 토크

#### 4. 실험 결과

모의실험을 통해 설계변수를 도출한 이후에는 실용성 검토를 위해 동역학 모델과 유사한 시제품(Prototype)을 제

작하여 실험을 수행하였다. 실험 환경은 모의실험 환경과 마찬가지로 20cm 높이의 둔턱으로 설정하였다. 그 결과, 능동적인 제어 없이도 그림 10과 같이 메커니즘 자체의 구조적 특성을 이용해 장애물을 극복하는 것을 관찰할 수 있었고 이 과정에서 Overshoot이 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 이어지는 연구에서는 제작된 시스템을 이용해 다양한 실외 환경에서의 주행 성능을 검증하는 작업이 진행될 예정이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 실외 경비로봇의 고속 주행과 더불어 장애물 극복까지 가능케 하는 구동 메커니즘 설계 및 설계변수 도출에 대해 논하였다. 설계된 구동 메커니즘은 10km/h의 속도로 20cm 높이의 둔턱을 등반할 때 충격을 흡수하면서도 Overshoot을 최소화하는 성능을 발현한다. 환경 요소를 반영한 모의실험과 실험 결과는 본 연구의 목표가 실현 가능함을 보여주었으며 이는 앞으로 개발될 경비로봇의 주행성 향상에 기여할 것으로 사려된다. 향후에는 도출된 설계변수를 기반으로 시스템을 이론적으로 분석한 뒤 보다 다양한 환경에서의 운용을 위한 방법론 모색과 실험적 검증이 뒤따라야 할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] <http://imm.kist.kr>
- [2] <http://www.secom.co.jp/isl/e2>
- [3] <http://www.robowatch.de>
- [4] <http://www.rotundus.se>
- [5] <http://www.mobilerobots.com>
- [6] M. M. Dalvand and M. M. Moghadam, "Design and Modeling of a Stair Climber Smart Mobile Robot", Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics, pp. 1062-1067, 2003
- [7] J. Lee, H. Shim, S. Oh and J. Hong, "Operating a Six-legged Outdoor Patrol Robot", Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems 2007, pp. 1034-1039, 2007
- [8] 고두열, 정해관, 박윤근, "고속 주행하는 무인차량의 둔턱 극복을 위한 구동 메커니즘", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 580-585, 2007



**정 해 관**

- 2003 한국과학기술원 기계공학  
학과(공학사)
- 2005 한국과학기술원 기계공  
학과(공학석사)
- 2009 한국과학기술원 기계항  
공시스템학부(공학박사)

2009~현재 한국과학기술원 기계기술연구소박사 후  
연구원

관심분야: 주행로봇 메커니즘 설계 및 자율주행



**우 춘 규**

- 1995 부산대학교 기계공학부  
(공학사)
- 1997 한국과학기술원 기계공  
학과(공학석사)
- 2007 한국과학기술원 기계항공  
시스템학부(공학박사)

2007~현재 (주)다사로봇 지능로봇사업부 책임연구원

관심분야: 주행로봇 메커니즘 설계 / 해석 및 시스템  
통합



**고 두 열**

- 2006 아주대학교 기계공학과  
(공학사)
- 2006~현재 한국과학기술원  
기계항공시스템학부 기  
계공학전공 박사과정

관심분야: 주행로봇의 스테레오 비전 기반 주변 환  
경 인식



**곽 윤 군**

- 1974 서울대학교 기계공학과  
(공학사)
- 1978 The Univ. of Colorado at  
Boulder(공학석사)
- 1981 The Univ. of Texas at  
Austin(공학박사)

1985~현재 한국과학기술원 기계항공시스템학부  
교수

관심분야: 주행로봇, 감성로봇