

반응표면법을 이용한 고속 주행용 실외 경비로봇의 현가장치 근사 최적화

Approximate Optimization of Suspension Mechanism for Outdoor Security Robot using Response Surface Methodology

고 두 열¹, 정 해 관², 우 춘 규³, 김 수 현⁴

Doo Yeol Koh¹, Hae Kwan Jeong², Chun Kyu Woo³, Soo Hyun Kim⁴

Abstract Security robot has gradually developed and deployed in order to protect civilian's lives as well as fortune and subjugate the shortcomings of CCTV which lacks of mobility. We have developed a security robot for outdoor environment and the main purpose of the driving mechanism is to overcome the bumps or projections with high speed. The robot platform consists of 4 omnidirectional wheel-based driving mechanisms and suspension for each driving mechanism. In this paper, principal suspension parameters of outdoor security robot for overcoming obstacles with stability are studied and approximately optimized using Response Surface Methodology (RSM) since it is difficult to find the exact relationship between suspension parameters and the shock, which is significantly associated with stability of the robot, at the robot platform. Simulation using ADAMS is conducted for assessing the feasibility of optimized design parameters.

Keywords : Security Robot, Driving Mechanism, Optimization, Response Surface Methodology

1. 서론

미국 9·11 테러 이후 중동 등에서 국가 기간시설의 보안을 위해 관련 수요가 증가하고 있다. 전통적인 무인 보안 시스템인 방법센서와 감시카메라와 같은 경우 한 곳에 고정돼 있어 감시가 어려운 사각지역이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기동성을 갖는 로봇을 방범활동에 투입함으로써 감시 활동을 좀 더 효과적으로 수행할 수 있다. 이에 따라 실내외 환경에서 감시 및 정찰, 위험물 탐지, 위험 현장 파악 등의 용도로 이용이 가능한 경비로봇(Security Robot)에 대한 수요가 꾸준히 증가하

고 있다. 경비로봇은 주행 로봇의 이동성을 기반으로 대상 구역을 이동하면서 업무를 수행하므로 다른 보안 시스템과의 동조를 통해 사각지역을 제거할 수 있으며, 고정형 보안 시스템과는 달리 상황에 따라 적극적인 대응을 수행할 수도 있다.

대표적인 경비로봇의 연구·개발 사례를 정리하면 표 1과 같다. 우선 국내의 대표적인 경비로봇으로는 KIST에서 2007년에 개발한 Securo를 들 수 있다.^[1] Securo는 120kg의 질량과 5.4km/h의 평균 속도를 지니며, GPS를 포함한 각종 센서 정보들을 이용하여 연석의 위치를 추정함으로써 로봇의 위치를 파악할 수 있다. 여러 국의 연구 사례 중 가장 대표적으로 일본 SECOM社에서 개발된 Robot X를 들 수 있다.^[2] Robot X는 고속 주행이 가능한 차량 형태의 구조로 각종 경비 업무뿐 아니라 유사시 연기를 분사하여 적극적인 대응도 가능하도록 개발되었다. 한편 미국에서는 미 육군과 해군이 군 주요 시설에 이용

Received: Feb. 27, 2010; Reviewed: Mar. 30, 2010; Accepted: May. 11, 2010

※ 본 연구는 산업자원부 성장동력기술개발 사업의 지원으로 수행되었음.

¹ KAIST 기계항공시스템학부 기계공학전공 박사과정

² 연구개발인력교육원 기획연수1팀 부연구위원

³ ㈜다사로봇 지능로봇사업부 책임연구원

⁴ KAIST 기계항공시스템학부 교수

표 1. 경비로봇의 선행 연구·개발 사례

Name	Country/Institution	Size (cm)	Weight (kgf)	Speed (km/h)
Securo	Korea/KIST	104(L)x79(W)x82(H)	120	5.4
Robot X	Japan/SECOM	106(L)x80(W)x98(H)	120	10
MDARS-E	USA/SSC Pacific	213(L)x130(W)x97(H)	680	7.2
OFRO	Germany/Robowatch	112(L)x70(W)x140(H)	65	7.2
GroundBot	Sweden/Rotundus	60(R)x80(W)	25	10

할 목적으로 MDARS-E를 개발하였다.^[3] 이 외에도 유럽에서 개발된 OFRO는 실제 2006년 독일 월드컵 당시 치안의 목적으로 이용된 사례가 있다.

앞서 언급한 경비로봇들은 대부분 실내 환경이나 잘 포장된 실외 도로환경 혹은 경사로에서 사용이 적합하도록 개발되었다. 따라서 이러한 로봇들은 평탄한 지형에서는 그 능력을 발휘하기 적합하나 장애물이 복잡하게 존재하는 일반적인 실외 환경에서는 업무의 효율의 떨어진다. 이에 본 연구 그룹에서는 실외 환경에서 고속 주행 시 장애물 극복이 가능한 경비로봇의 주행 메커니즘을 제안하였다.

본 연구에서는 제안된 실외 경비로봇 주행 메커니즘이 고속으로 둔턱을 극복 시 안정적인 주행이 가능하도록 하는 현가장치 설계 변수 최적화에 대하여 논의한다. 현가 장치는 운전자의 안정감과, 차량의 운전성에 큰 영향을 미치는 장치로 관련된 많은 연구가 수행되어왔다. Lu는 수동 현가장치(Passive suspension) 모델을 비선형 계획법(Nonlinear programming)을 이용하여 차량의 수직 가속도를 최소화하는 최적설계 변수를 도출하였으며, Baumal은 최적화를 위하여 유전 알고리즘(Genetic algorism)을 적용하였다.^[7-8] Chi는 2자유도 모델을 적용하여 여러 최적화 알고리즘에 대한 비교 연구를 수행하였다.^[9] 대부분의 기존 연구들은 차량의 현가장치에 대한 근사 모델을 이용하여 목적함수를 정의하고 이를 최적화 기법을 적용하는 방식으로 진행되었다. 그러나 본 연구에서 고안한 새로운 형태의 현가장치는 지면의 입력에 대한 로봇의 수학적 모델을 구하기 어려우므로 목적함수를 실험적으로 구하여 최적화하는 근사 최적화 기법을 이용하였다.

2장에서는 개발된 주행 메커니즘의 개념 및 구체적인 형상에 대하여 언급하였고, 3장에서는 안정적인 둔턱 극복을 위한 현가장치의 설계 변수들을 반응표면법(Response Surface Methodology: RSM)을 이용하여 최적화하는 과정에 대하여 설명하였다. 4장에서는 3장에서 도출된 최적 설계 변수들을 이용하여 모의실험을 수행한 결과를 나타내었고, 결론 및 향후 연구로 본 논문을 완성하였다.

2. 주행 메커니즘

2.1 개념 고안

경비로봇은 사용의 목적상 고속 주행 능력이 필요할 뿐만 아니라 경찰 임무 능력을 저하시킬 수 있는 보도블록과 같은 돌출 장애물들을 안정적으로 극복할 필요가 있다. 따라서 경비로봇의 주행 메커니즘은 ‘고속 주행’과 ‘장애물 극복’을 동시에 만족하도록 개발되어야 한다.

일반적으로 알려진 단일 이동(Locomotion) 메커니즘으로는 크게 바퀴, 트랙, 다리의 세가지 형태로 구분된다. 이 중 다리 메커니즘은 주행 속도가 다른 메커니즘들에 비하여 느리므로 경비로봇으로는 적합하지 않다. 또한 경비로봇의 주요 운용환경은 실외환경이지만 주행 시에 고도의 견인력을 필요로 하는 환경은 아니므로 소음이 적고 상대적으로 이동속도가 빠른 바퀴형태의 메커니즘이 가장 적합하다 할 수 있다.

일반적인 바퀴 메커니즘을 이용한 차량의 장애물 극복 능력을 간단하게 정역학적으로 해석하기 위해서 차량이 둔턱과 접촉 시의 역학적 관계를 그림 1과 같은 자유물체도(Free-Body-Diagram)로 나타낼 수 있다. 여기서 차량의 질량 m 은 무게중심점에 집중(Lumped)되어 있다고 가정하였다. 뒷바퀴 중심으로부터 무게 중심까지의 거리를 x_{cm} , 앞 바퀴 중심까지의 거리를 x_f , 바퀴의 반지름은 R , 둔턱의 높이는 h 로 나타내었다. 차량과 지면과의 반력과 마찰력은 뒷바퀴 하단과 앞 바퀴와 둔턱 사이에서 발생하며 이를 각각 f_r , N_r , f_w , N_w 로 표기하였다. 이때 차량의 둔턱 극복 여부는 뒷바퀴와 지면 사이의 접촉지점에서 발생하는 모멘트 M_0 의 부호로 판단할 수 있다. 만약 M_0 가 양의 방향으로 발생할 경우 차량은 둔턱 극복이 가능하고 음의 방향일 경우에는 미끄러져 둔턱을 극복하

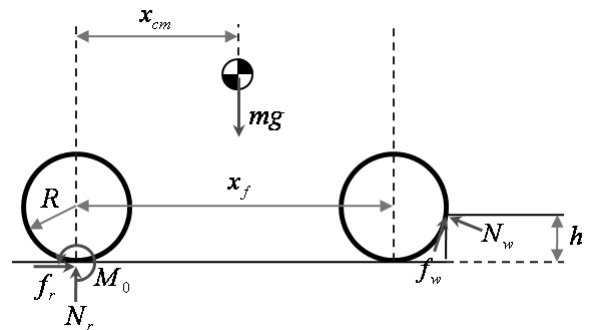


그림 1. 4 바퀴 차량의 둔턱 접촉 시 자유물체도

지 못하는 것을 의미한다. 그림 1의 자유물체도로부터 다음의 관계식을 이끌어낼 수 있다.

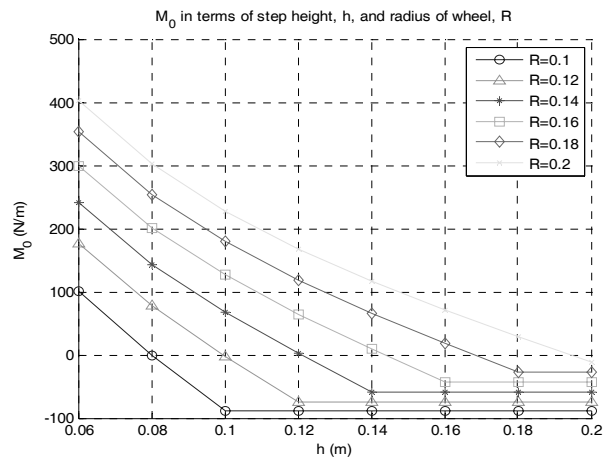
$$\begin{aligned} \sum F_x &= \mu N_r + \left\{ \frac{\mu(R-h) - \sqrt{2hR-h^2}}{R} \right\} N_w \\ \sum F_y &= N_r + \left\{ \frac{\mu\sqrt{2hR-h^2} + (R-h)}{R} \right\} N_w - mg \quad (1) \\ \sum M_o &= -x_{cm}mg + \left\{ (x_f + \sqrt{2hR-h^2})f_w + hN_w \right\} \frac{\sqrt{2hR-h^2}}{R} \\ &\quad + \left\{ x_f N_w + \sqrt{2hR-h^2} - hf_w \right\} \frac{(R-h)}{R} \end{aligned}$$

Where,

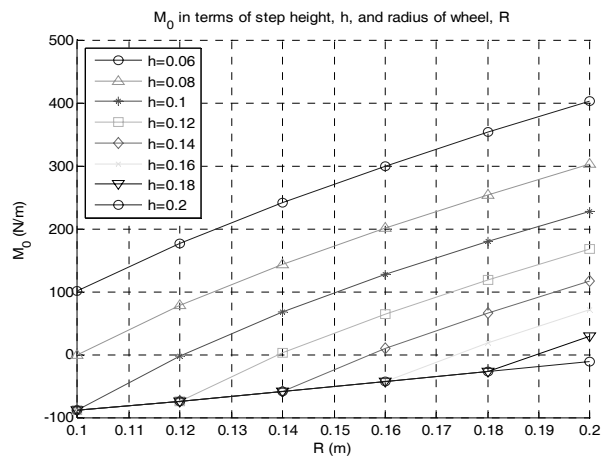
if, $h \geq R$, then, $h = R$

식 (1)에서 가장 아래의 조건 수식은 둔턱의 높이가 바퀴 반지름 이상일 경우 작용하는 반력과 마찰력의 최대 높이는 바퀴의 반지름 위치에서 발생하는 것을 의미한다. 식 (1)의 세 번째 모멘트 식으로부터 차량 바퀴의 반지름 R, 둔턱 높이 h와 M_o 사이의 관계를 나타내면 그림 2와 같다. 이때 차량의 질량과 두 바퀴 사이의 거리인 m과 x_f 은 대략적인 목표치인 100kg과 1m로 각각 설정하였으며, 로봇의 앞뒤 대칭 구조를 가정하여 무게중심의 위치 x_{cm} 은 0.5m로 설정하였다. 지면과의 마찰계수는 일반적으로 먼지, 습도, 재질의 산화 정도, 표면마감, 속도, 진동, 오염도 등에 영향을 받지만 보편적인 고무와 마른 콘크리트 사이의 마찰계수를 1로 보았을 때 야외 환경을 고려하여 0.7로 설정하였다. 그림 2(a)는 둔턱 높이, h에 대한 M_o 를 바퀴 반지름, R 별로 나타낸 그림이고, 그림 2(b)는 바퀴 반지름, R에 대한 M_o 를 둔턱 높이, h 별로 나타낸 그림이다. 그림 2(a)로부터 둔턱 높이 0.2m를 극복하기 위하여 바퀴 반지름은 약 0.2m 이상이 되어야 하고, 그림 2(b)로부터 둔턱의 높이가 일정할 경우 바퀴의 반지름이 클수록 등반에 유리함을 알 수 있다.

이러한 정역학적 해석 결과로부터 약 20cm 정도의 보도블록을 등반하기 위해서는 지름이 약 40cm 정도가 되는 바퀴를 이용해야 한다는 것을 유추해 낼 수 있다. 그러나 이러한 40cm 이상 지름의 바퀴는 큰 크기와 질량으로 인하여 하드웨어 설계적 관점에서 큰 부담이 될 뿐 아니라 고사양의 구동기 성능을 요구한다. 이에 본 연구에서는 시스템 구조에 부담을 주지 않는 바퀴 크기와 함께 장애물 극복과 충격 흡수가 용이한 그림 3의 주행 메커니



(a) M_o in terms of obstacle's height, h



(b) M_o in terms of wheel's radius, R

그림 2. 바퀴 반지름과 둔턱 높이에 따른 장애물 극복 능력

증을 고안하였다.

이 메커니즘은 두 개의 바퀴가 연동하여 구동되며, 높은 장애물을 만났을 때 장애물 극복에 용이하도록 앞 바퀴가 뒷바퀴의 앞쪽 상단으로 배치되어 있는 구조이다. 전체적인 충격 흡수 구조는 앞 바퀴와 주행 메커니즘 사

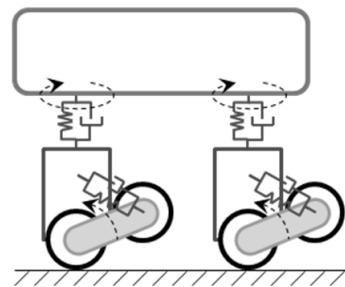


그림 3. 경비로봇의 주행 메커니즘 개념도

이에 1차 충격을 흡수 할 수 있는 현가장치와 주행 메커니즘과 로봇 몸체 사이에서 2차 충격을 흡수할 수 있는 이중 현가장치 구조로 되어있다. 한편 경비로봇은 고속 이동 시 필요에 따라 빠른 방향 전환이 가능해야 하므로 주행 메커니즘과 로봇 몸체 사이에 회전 조인트를 추가함으로써 전방향성(Omnidirectional) 조향이 가능하도록 제안하였다.

2.2 상세 설계

앞서 제안한 메커니즘 개념에 대하여 그림 4와 같이 상세 설계를 수행하였다. 각 주행 메커니즘에는 바퀴 구동 및 전방향성 조향을 위한 2개의 모터가 장착되어 있으며, 두 바퀴 벨트를 이용하여 동기화되어 구동된다. 한편 둔턱과 상단 바퀴가 충돌 시 두 바퀴 사이의 간섭을 방지하고, 전체 주행 메커니즘의 크기를 줄이기 위하여 상단의 바퀴는 하단 바퀴에 비하여 축 방향으로 바퀴 너비만큼 이탈(Offset)되도록 설계하였다. 모든 바퀴의 직경은 25cm이며, 로봇의 외형 크기는 111cm(L) x 96cm(W) x 73cm(H)이다. 여기서 로봇은 전방향성 주행을 고려하여 모든 주행 메커니즘들을 동일하게 설계하였다.

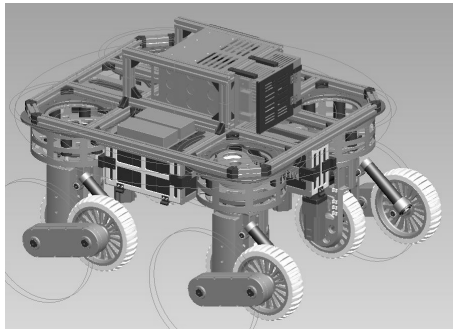


그림 4. 실의 경비로봇의 상세 설계도

3. 설계변수 최적화

앞서 고안된 주행 메커니즘은 고속으로 둔턱 장애물에 접근 시 앞 바퀴와 둔턱 모서리 사이에서 발생하는 충격을 흡수하기 위하여 주행 메커니즘과 앞 바퀴 사이에 현가장치를 고려하였다. 본 연구에서는 로봇에 전달되는 충격을 최소화하도록 설계된 현가장치의 스프링 및 댐퍼 상수를 최적화하고자 한다.

3.1 반응표면법

일반적인 공학 문제에서 야기되는 최적화 문제는 최적

화하고자 하는 값과 이와 관계된 요소들(Elements) 사이의 관계가 명시된(Explicit) 목적함수(Object function)를 주어진 제한조건(Constraints)을 만족하며 최대 혹은 최소화하도록 하는 요소들의 값을 구하는 것을 목적으로 한다. 하지만 앞서 제안된 현가장치 메커니즘의 경우 로봇과 지면이 고속으로 충돌 시 지면에서 발생하는 반력의 크기, 방향, 위치가 순간적으로 변하여 현가장치의 설계 변수와 로봇이 받는 충격사이의 목적함수를 수학적으로 구하기 어렵기 때문에 최적화 알고리즘들을 적용하기에 제한을 갖는다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 정확한 목적함수를 구하기보다 근사 함수를 구하여 최적화에 활용하는 반응표면법에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

반응표면법은 설계자가 최적화하고자 하는 어떤 반응(Response)이 여러 변수들에 의하여 영향을 받는 문제를 통계적으로 모델링 하는 기술이다. 즉, 여러 개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 복합적으로 작용하여 어떤 반응치 y 에 영향을 주고 있을 때, 반응치 y 가 이루는 반응표면을 통계적 모형으로 만들어 반응 값과 설계변수 간의 방정식을 만드는 것이다.

반응치 y 를 설계 변수 x 들에 대한 다항식으로 가정하면 식 (1)과 같이 반응 표면 모델을 나타낼 수 있다. 여기서 X 는 반응에 영향을 주는 변수들의 행렬이고, β 와 ϵ , 그리고 Y 는 각각 변수들의 가중치 계수 벡터, 실제 함수와 근사 모델 사이의 오차 벡터, 반응치 결과 벡터를 나타낸다.

$$Y = X\beta + \epsilon \tag{1}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1x_{11} x_{12} \dots x_{1k} \\ 1x_{21} x_{22} \dots x_{2k} \\ \vdots \\ 1x_{n1} x_{n2} \dots x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

위의 근사 모델 식에서 실제 함수와 가장 근사한 함수를 구하기 위하여 오차 벡터 ϵ 을 식 (2)와 같이 최소자승 함수(Least squares function)를 이용하여 최소화한다.

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon^T \epsilon = (Y - X\beta)^T (Y - X\beta) \tag{2}$$

식 (2)를 β 에 대하여 미분하면 식 (3)을 얻을 수 있고 이를 정리하여 식(4)로 나타내면 β 의 추정치인 $\hat{\beta}$ 을 구할 수 있다.

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_b = -2X^T Y + 2X^T X b = 0 \quad (3)$$

$$b = \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

위의 식 (4)를 이용하면 실험 계획법으로부터 주어진 실험 점에서의 변수 값과 이 실험 점들에서 구한 반응치가 주어졌을 때 추정된 계수 벡터 $\hat{\beta}$ 을 계산하여 근사 모델을 구할 수 있다.

반응표면 모델링(Response surface modeling)을 이용한 근사 최적화에 대한 단계는 크게 세 부분으로 나뉘어진다. 첫째로 실험계획법(Experimental design or design of experiment: DOE)을 이용하여 각 변수들의 반응을 살필 실험 점의 위치를 선정하고, 두 번째로 실험 점에서의 측정된 반응 값들을 이용하여 근사 모델을 생성한다. 마지막은 구해진 근사 모델을 최적화 알고리즘을 이용하여 근사 최적 해를 구하는 단계이다. 이러한 과정을 좀 더 구체적으로 나타내면 그림 5의 흐름도와 같다.

3.2 최적 설계변수 도출

제안된 주행 메커니즘은 이중 현가장치 구조로 각 현가장치마다 스프링 및 댐퍼 상수를 설계 변수로 보았을 때 총 4개의 설계 변수를 최적화해야 함을 알 수 있다. 하지만 설계변수가 많을수록 실험 점의 개수가 증가하여 실험비용이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 둔턱에서 발생하는 충격 흡수에 상대적으로 기여가 큰 앞 바퀴

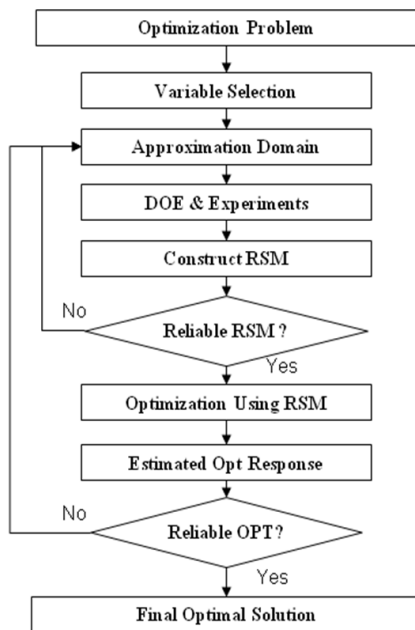


그림 5. 반응표면법을 이용한 근사 최적화 흐름도

와 주행 메커니즘 사이에 위치한 현가장치만을 고려하여 반응표면법을 수행하였다.

실험계획법은 근사 함수를 생성하기 위하여 필요한 실험 점들을 배치하는 방법으로 최소 실험 점으로 실험비용을 최소화하면서 정확한 근사 함수를 구하기 위하여 사용된다. 일반적으로 많은 실험 점의 개수는 근사 함수의 정확도를 증가시키나 실험에 드는 비용을 증가시켜 많은 시간과 노력이 요구되므로 최소의 실험 점으로 근사 함수를 구하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 중심 합성 계획법(Central composite design)을 이용하였다. 중심 합성 계획법은 설계변수가 n개일 때 $2^n + 2n + 1$ 개의 실험 점이 필요하므로 현가장치의 설계변수를 2개로 간주할 때 총 9번의 실험을 수행해야 한다.

반응표면법을 이용하여 구한 근사 모델은 전역 함수(Global function)가 아닌 실험 점들의 영역에서 근사화하는 지역 함수(Local function)이기 때문에 초기 실험 점들의 영역을 설정해 주는 것이 최적화 결과에 주요한 영향을 미친다. 일반적으로 초기 점의 위치는 임의로 선정하거나 경험 혹은 실험 등의 시행오차를 통하여 결정지어진다. 본 연구에서는 반응을 살필 초기 점을 구하기 위하여 제안된 주행 메커니즘을 그림 6과 같이 ADAMS 동역학 해석 모델을 생성하여 모의 실험을 수행하였다. 모의실험은 설계 변수인 앞 단 현가장치의 스프링 및 댐퍼 상수를 임의로 변경해가며 로봇이 둔턱에 충돌할 때 로봇 몸체로 전달되는 충격력을 측정하였다. 반복적인 모의실험을 통하여 현가장치의 스프링 상수 k는 약 20~60 N/mm, 댐퍼 상수 c는 약 1~8N-sec/mm의 범위에서 로봇에 전달되는 충격이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이때의 충격력의 변화는 약 15kN~26kN 사이를 나타내었다.

위의 실험 범위를 고려하여 k는 40N/mm, c는 6N-sec/mm를 중점으로 실험계획법을 통하여 구한 실험 점들은 그림 7과 같다. 이때의 실험 점들은 표 2에 정리하였다.

구해진 실험 점들에서의 반응치를 구하기 위하여 설계 변수를 변경해가며 로봇이 둔턱에 충돌할 때 로봇 몸체로

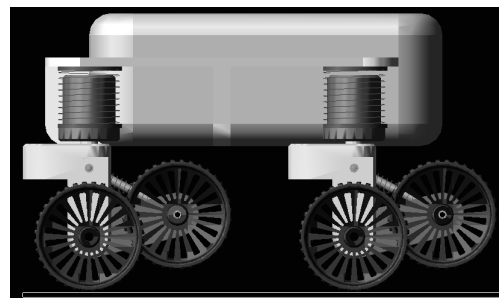


그림 6. 실외 경비로봇의 ADAMS 모델

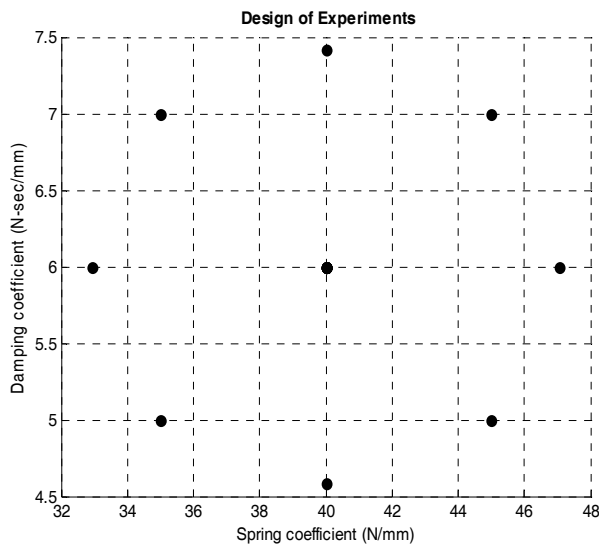


그림 7. 중심 합성 계획법을 이용한 실험점

전달되는 충격력을 ADAMS 모의실험을 이용하여 측정하였다. 반응 표면 모델은 최적화에 용이한 2차 다항식으로 가정하였고, 앞서 구한 실험 점들의 설계 변수 값과 모의 실험을 통하여 구한 반응치 값을 이용하여 반응 표면 모델을 계산하면 식 (5)와 같다.

$$\hat{f}(x_1, x_2) = 269340.43 - 6715.74x_1 - 43068.19x_2 + 87.28x_1^2 - 15.3x_1x_2 + 3715.18x_2^2 \quad (5)$$

여기서 x_1 은 스프링 상수 k , x_2 는 댐퍼 상수 c 를 각각 의미한다. 식(5)의 반응 표면 모델과 각 실험 점에서 구한 실험값을 그림 8에 나타내었다.

식 (5)는 주행 메커니즘의 설계 변수 k , c 와 로봇이 둔턱에 충돌 시 받는 충격력 사이의 근사 함수이므로 이를 최소화하도록 하는 설계 변수를 구해야 한다. 이를 최적

표 2. 실험점들의 위치

k (N/mm)	c (N-sec/mm)
35.0000	5.0000
35.0000	7.0000
45.0000	5.0000
45.0000	7.0000
32.9289	6.0000
47.0711	6.0000
40.0000	4.5858
40.0000	7.4142
40.0000	6.0000

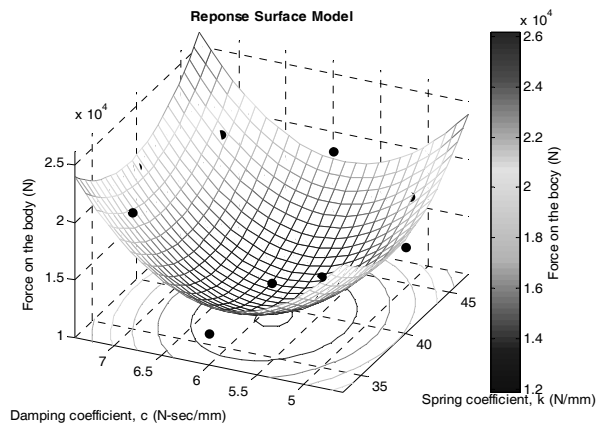


그림 8. 반응 표면 모델

표 3. 최적 설계변수

Variable	Value
k (N/mm)	38.9864
c (N-sec/mm)	5.8765

화 문제로 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & 269340.43 - 6715.74x_1 - 43068.19x_2 \\ & + 87.28x_1^2 - 15.3x_1x_2 + 3715.18x_2^2 \quad (6) \\ \text{subject to } & \min(x_i) \leq x_i \leq \max(x_i), \quad i = 1, 2 \end{aligned}$$

식(6)의 최적화 문제를 해결하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 비선형 계획(Nonlinear programming) 중 하나인 공액경사도법(Conjugate gradient method)를 이용하였다. 공액경사도법을 이용하여 구한 주행 메커니즘의 최적 현가장치 설계 변수들의 값은 표 3에 나타내었다.

4. 모의실험 결과

3장에서 반응표면법을 이용하여 구한 최적 설계 변수들의 실용성 검토를 위하여 모의실험을 수행하였다. 실험 환경은 20cm 높이의 둔턱을 로봇이 10km/h의 속도로 주행하며 극복하도록 설정하였다. 실험 결과 그림 9과 같이 능동적인 제어 없이도 주행 메커니즘 자체의 구조적 특성을 이용해 장애물을 극복하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 과정에서 로봇이 둔턱에서 발생하는 충격을 주행 메커니즘의 현가장치에서 대부분 흡수하여 로봇 앞 단이 거의 들리지 않으며 안정적으로 주행하는 것을 확인하였다. 한편 최적 설계 변수의 값과 다른 설계 변수로 모의실험을 수행하였을 경우 로봇 앞 단이 충격에 의하여 크게 들리거나 심할 경우 뒤로 전복되는 현상도 발생하여 반응표면

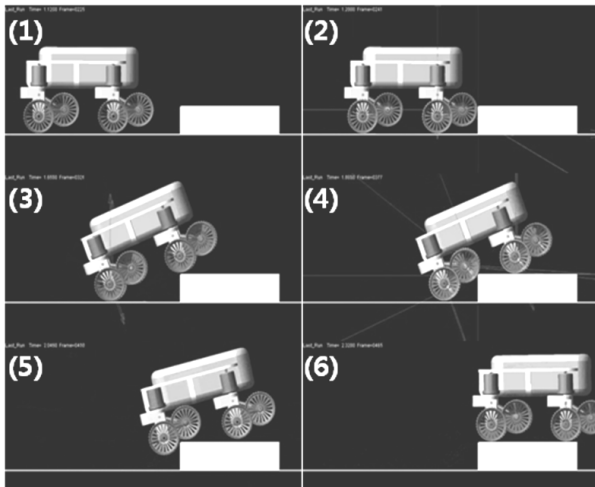


그림 9. 모의 실험 결과

법으로부터 구해진 최적 설계 변수 값이 고속이동과 장애물 극복을 적절히 만족하는 설계변수 값을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 고속 주행과 장애물 극복을 동시에 만족하는 실외 경비로봇의 주행 메커니즘과 설계 변수 최적화에 대하여 논하였다. 제안된 주행 메커니즘은 단일 바퀴 구조에 추가적인 보조 바퀴와 현가장치를 추가하여 고속 주행 시에도 장애물 극복과 충격 흡수에 용이하도록 설계하였다. 주행 메커니즘의 주 설계 변수인 현가장치의 스프링 및 댐퍼 상수와 로봇의 안정적인 주행성과 관계가 있는 충격사이의 수학적 함수를 구하기 어려우므로 이를 반응표면법을 이용하여 근사 함수를 계산하였다. 최적 설계 변수 값을 도출하기 위하여 근사 함수인 반응 표면 모델에 비선형 최적화 알고리즘 중 하나인 공역경사도법을 이용하였다. 마지막으로 ADAMS 모의실험을 통하여 최적 설계 변수 값의 실용성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] <http://imm.kist.kr>
- [2] <http://www.secom.co.jp/isl/e2>
- [3] <http://robowatch.de>
- [4] <http://www.activrobots.com/ROBOTS/Seekur.html>
- [5] Mohsen M. Dalvand and Majid M. Moghad-am, "Stair Climber Smart Mobile Robot (MSRox)," Autonomous Robots, pp.3-14, 2006.

- [6] 정해관, 고두열, 우춘규, 광윤근, "고속 주행용 실외 경비로봇을 위한 구동 메커니즘", 로봇학회논문지 제4권 제2호, pp. 163-168, 2009년 6월.
- [7] Xiao-Pei Lu, Heng-Lung Li and P. Papalambros, "A design procedure for the optimization of vehicle suspensions," International Journal of Vehicle Design, Vol.5, pp.129-142, 1984.
- [8] A.E. Baumal, J.J. McPhee, P.H. Calamai, "Application of genetic algorithms to the design optimization of an active vehicle suspension system," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.163, Issues 1-4, 21 September, 1998, pp.87-94.
- [9] Zhongzhe Chi, Yuping He and Greg F. Naterer, "Design Optimization of Vehicle Suspensions with A Quarter-vehicle Model", Transactions of The Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol.32, Issue 2, pp.297-312, 2008.



고 두 열

2006 아주대학교 기계공학과(공학사)
2008~현재 카이스트 기계항공시스템학부 박사과정
관심분야: 주행로봇 메커니즘 설계, 주행로봇의 비전 기반 자율주행 알고리즘



정 해 관

2003 카이스트 기계공학과(공학사)
2005 카이스트 기계공학과(공학석사)
2009 카이스트 기계항공시스템학부(공학박사)
2010~현재 연구개발인력교육원 기획연수1팀 부연구위원
관심분야: 주행로봇 메커니즘 설계 및 자율주행



우 춘 규

- 1995 부산대학교 기계공학부 (공학사)
- 1997 카이스트 기계공학과(공학석사)
- 2007 카이스트 기계항공시스템학부(공학박사)

2010~현재 (주)다사로봇 지능로봇사업부 책임연구원
관심분야: 주행로봇 메커니즘 설계 / 해석 및 시스템 통합



김 수 현

- 1978 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1980 한국과학기술원(공학석사)
- 1991 Imperial College, Univ. of London(공학박사)

1991~현재 카이스트 기계항공시스템학부 교수
관심분야: 로봇 메커니즘 설계 및 제어