

하이브리드 바퀴 기반 장애물 극복용 자율 주행 로봇에 관한 연구

정혜원* 박성현* 유혜빈* 박명숙* 김상훈*

*한경대학교 전기전자제어공학과

e-mail: kimsh@hknu.ac.kr

A Study on Autonomous Driving Robots to Overcome Obstructions in Hybrid Wheel

Hye-Won Jeong*, Sung-Hyun Park*, Hye-Bin YooHye-Bin Yoo*, Myung-Suk
Park*, Sang-Hoon Kim*

*Dept of Electrical, Electronic and Control, Hankyong National University

요 약

본 논문은 주행 로봇의 H/W에 관한 연구로서, 로봇 자체 지능을 통하여 주변 환경에 따라 변형되는 하이브리드 휠에 대한 바퀴 변형 방식을 제안한다. 더불어 바퀴 변형에 요구되는 다리의 개수, 극복 가능한 장애물의 높이, 계단주행 메커니즘을 구조적으로 분석하고, 개선된 성능을 입증하는 객관적인 실험데이터를 제시한다. 또한, 로봇 몸체 프레임을 설계하여 하이브리드 휠과 함께 장애물을 극복하는 응용 분야에 적용하여 제시한다.

연구를 제시한다.

1. 서론

현대산업의 발달과 고도화로 인해 우리 사회는 복잡 다
양화가 되면서 각종 사고와 위험에 노출되었다. 그의 예시
로 후쿠시마 원전 사고를 보면 극한 상황에서의 대처능력
의 확보가 어렵고 적은 수의 대응 인력으로 2차 사고를
예방할 수 없었다. 2차 사고가 발생했을 때 1차 사고로 인
해 누출된 방사능이 최고치를 달성해도 위험을 무릅쓰고
사람이 직접 들어가 구조 작업을 진행했다. 이러한 상황
을 보면 재난 로봇은 거의 상용화 되지 않았다는 것을 알 수
있다. 국내 소방공무원 1인당 담당 인구는 926명으로 줄
어드는 추세이다. [1] 하지만 이는 결코 적은 숫자가 아니
다. 상용화된 일부 재난 로봇을 보면 재난 로봇답지 않게
큰 크기를 갖고 있다. 몸체가 큰 로봇을 재난 현장에 투입
하게 되면 비좁은 길을 주행하지 못해 수색에 난항을 겪
게 된다. 또한, 구조가 복잡해 로봇 자체의 유지보수가 까
다롭다. 드론 역시 재난 로봇으로 사용하지만, 관리자의
세밀한 조작이 요구된다. [2] 재난 로봇은 보통 평탄하지
않은 공간을 주행해야 한다. 따라서 계단을 오르거나 장애
물들을 극복할 수 있어야 한다. 현재까지 이러한 계단이나
장애물들을 극복하는 새로운 많은 하이브리드 타입[5] 로
봇이 개발됐다. 하지만 오히려 평지에서의 부드럽고 빠른
주행에 초점이 맞춰져 왔다. 그래서 본 논문은 기존의 복
잡한 메커니즘의 바퀴 변형 타입을 개선하여 부드럽고 빠
른 주행과 함께 기구적으로 간단한 변형 메커니즘을 갖는
하이브리드 타입(hybrid type)의 변형 가능한 휠에 대한

2. 기존 재난 로봇 분석

기존 재난 로봇의 이동방식은 크게 바퀴, 무한궤도, 다
리를 이용한 이동방식으로 나누어 볼 수 있다. 각각의 이
동방식들의 특징을 보면 바퀴를 이용한 이동방식은 효율
적이면서 고속 주행이 가능하다. 하지만 장애물이나 계단
을 오르기가 어렵다는 단점을 갖는다. 다리를 이용한 이
동방식은 비 평탄 지형이나 장애물에도 잘 적응할 수 있
는 장점이 있다. 하지만 일반적으로 복잡한 메커니즘을 가
지고 있으며 동력 소비가 큰 단점을 갖는다. 마지막으로
무한궤도는 지면에 접촉하는 면이 넓어서 험난한 지형이
나 사막과 같은 환경에서도 안정적으로 주행할 수 있다.
하지만 장애물이나 계단을 오르기가 어려우며 무한궤도
방식은 지형에 미끄러져 자신의 정확한 위치를 예측하기
어렵고 연결부 하나가 파손되면 궤도 전체를 사용하지 못
한다. 각각의 이동방식은 위와 같은 단점 및 문제들을 갖
기 때문에 최근에는 각 이동방식의 장점만을 결합한 새로
운 이동방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. [4]

	Wheels	Tracks	Legs
Soft ground	o	+	o
Rough ground	+	o	++
Speed	+	o	-
Agility	+	o	+
Stability	o	+	+
Adaptability	o	-	+
Complexity	+	+	-
Payload	+	+	-
Efficiency	+	o	-
Reliability	+	o	-
Fault tolerance	o	o	+
Environmental effects	o	-	+

[Table..1 지형에 따른 이동방식 비교]

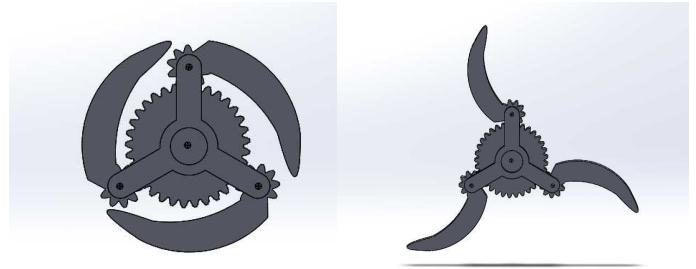
Table.1은 세 가지 이동방식에 대해 여러 가지 성능 지수를 비교하기 위해 정리한 표이다. [3] 대개 일반적으로 wheel을 이용한 이동방식이 가장 좋은 것으로 평가되었으며 이는 오늘날의 주행 시스템에서 가장 많이 볼 수 있다. 하지만 재난 로봇에 있어 이동방식의 선정은 로봇이 목표하는 기능과 더불어 극복하고자 하는 환경의 지형 특성에 맞게 선택해야 한다. 오늘날에는 이러한 이동방식들을 결합한 로봇들이 개발되고 있다. [4]

3. 본론

3.1 구동 메커니즘 및 몸체 설계

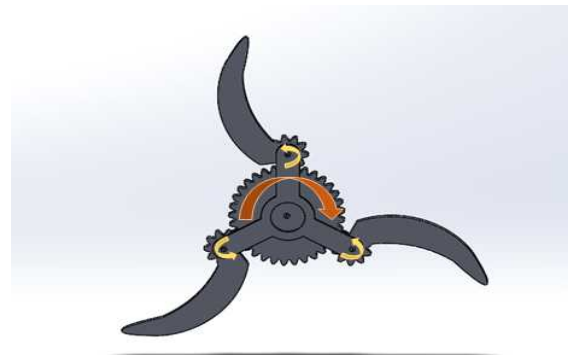
본 논문에서의 구동부의 연구 목표는 첫 번째 일반적인 건물 실내 환경인 평지와 계단을 동시에 잘 극복할 수 있는 능력을 소유한 로봇이어야 한다. 두 번째로는 빠르고 효율적으로 주행할 수 있어야 하며 구동부의 메커니즘이 최대한 간단한 구조로 구현 가능한 로봇을 설계하는 것이다. 그리고 로봇 몸체의 연구 목표는 재난 로봇으로서 최대한 작은 크기를 갖고 동시에 공간의 효율성이 높은 로봇을 설계하는 것이다.

위와 같이 선정된 연구 목표를 달성하기 위해 fig. 1과 같이 로봇의 바퀴와 다리를 모두 사용할 수 있는 바퀴 변형 기반 이동방식을 선정했다. 평지에서는 원형 바퀴로 주행을 수행하고 장애물이나 계단과 같은 비 평탄 지형에서는 원형 휠에서 3축 다리로 변형해 주행을 수행한다. 기존 바퀴 변형 방식은 스퍼기어나 웜기어 등의 기어를 사용해 리니어 액추에이터나 서보 액추에이터로 제어를 수행하는 경우가 대다수이다. 기존 바퀴 변형 방식과 다르게 본 논문에서 제시하는 변형 방식은 구동에 필요한 DC 모터의 주행 방향을 바꿔 지면과 바퀴의 마찰력만을 이용해 바퀴 변형을 수행한다.



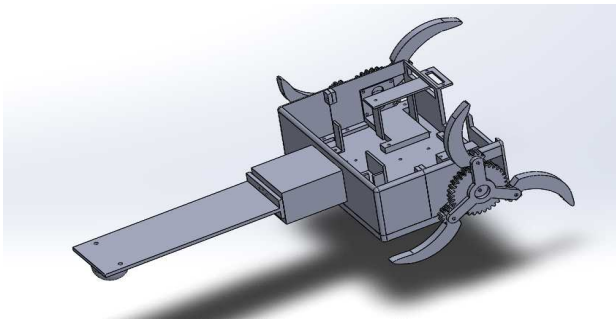
[fig.1 wheel 모형 설계]

구동 메커니즘의 주요 특징으로는 바퀴 내부에 있는 sun-gear와 leg에 존재하는 pinion-gear를 사용해 주변 환경의 지형 특성에 알맞게 원형 휠과 3축 다리로 변형한다. 변형을 수행하는 시점은 로봇 자체가 장애물을 만났을 시 수행된다. 평지에서는 부드럽고 고속으로 원형 휠로 주행을 한다. 만약 자갈밭이나 문턱, 계단과 같은 장애물을 마주치면 장애물의 지면과 바퀴의 마찰력으로 변형이 수행되며 이때 sun-gear와 각 leg에 합쳐진 pinion-gear가 회전하며 3축 다리로 변형된다. fig. 2는 sun-gear와 pinion-gear의 회전 방향을 나타낸다.



[fig.2 sun-gear와 pinion-gear의 회전 방향]

사람이 들어갈 수 없는 곳을 로봇이 대신하여 투입되는 상황에서는 크기가 작고 공간의 효율이 좋은 로봇이 우세하다. 이러한 상황에서는 높은 안전성과 안정성이 보장되어야 한다. 4륜의 경우, 높은 안전성과 구동력이 보장된다. 하지만 높은 자유도로 인해 안정성이 낮아지고 차체 구조가 복잡하여 유지보수에 불리하다. 3륜의 경우, 4륜보다는 비교적 가볍지만, 후륜의 무게 중심으로 인해 균형이 무너지는 문제가 발생한다. 2륜의 경우 높은 안정성과 차체 구조가 단순하다는 장점이 있지만 불안정한 균형과 4륜보다 구동력이 부족하다는 단점이 있다. 크기가 작고 공간의 효율성을 기반으로 차체 구조가 단순하고 높은 안정성이 보장되는 2륜을 선택했다. 그리고 2륜의 단점인 불안정한 균형을 해결하기 위해 몸체 뒷부분에 tail을 추가했고 모터의 동력이 필요 없고 자유로운 움직임을 보장하는 볼 캐스터를 추가해 구동력을 향상했다. fig. 3은 Solidworks로 설계한 로봇 전체 프레임이다.



[fig.3 로봇 전체 프레임]

4. 실험과 분석

4.1 다리의 개수

변형된 3축 다리가 넘을 수 있는 최대 장애물의 높이는 다리의 개수에 따라 다르다. leg가 장애물을 넘기기 위해서는 fig. 4와 같이 장애물의 윗면에서 다리와 장애물 사이의 접지가 이뤄져야 한다. [7]

	3 개	4 개	5 개	6 개	7 개
α	60 °	45 °	36 °	30 °	27 °
β	30 °	45 °	18 °	0 °	15 °
C/D	86.6%	70.7%	76.9%	75.0%	71.0%
S/D	5.2	5.7	5.9	6.0	6.1

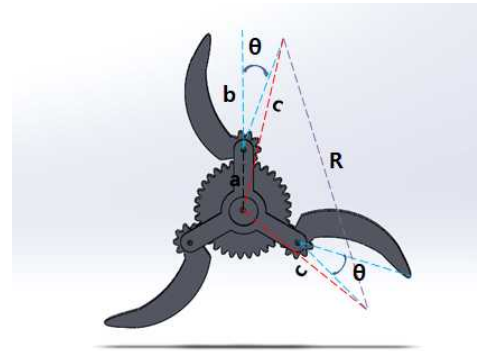
α : 장애물 윗면과 걸쳐지는 다리와 장애물 옆면의 법선이 이루는 각도
 β : 바닥에 지지하는 다리와 바닥의 법선이 이루는 각도
 C: leg가 극복할 수 있는 최대 장애물의 높이
 D: 다리의 길이
 S: 바퀴 1회전 시 이동거리

[Table.2 다리 개수에 따른 등반 및 주행 성능]

Table. 2에서 나타났듯이, 다리의 개수가 증가할수록 바퀴가 넘을 수 있는 최대 높이는 감소하지만, 바퀴가 1회전할 때 이동하는 거리는 증가한다. 다리가 3개인 3축 바퀴는 다른 개수의 leg에 비해 주행 성능이 떨어지지만, 장애물 극복 능력은 월등히 높다. 이에 따른 바퀴의 성능 분석에 따라 다리가 3개인 3축 바퀴를 사용했다.

4.2 극복 가능한 장애물 높이

본 논문에서 제안한 휠의 기하학적 형상으로부터 leg의 회전 각도와 leg 사이의 거리 관계는 fig. 3에서 확인할 수 있다. 제시된 수식을 통해 leg의 길이와 회전 각도에 따라 극복할 수 있는 장애물의 높이가 달라지는 것은 Table .3에서 확인할 수 있다.



a: 휠 중심에서 leg 회전 중심까지의 거리
 b: leg의 반경방향 거리
 c: 휠 중심에서 leg 끝까지의 거리
 θ : leg의 회전각도
 R: leg와 leg 사이의 거리

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta}$$

$$R = \sqrt{3(a^2 + b^2 + 2ab \cos \theta)}$$

$$R_{\max} = \sqrt{3} \times (a + b) \quad (\text{when } \theta = 0)$$

[fig.3 leg의 기하학적 설계 수식화]

	$\theta=0$	$\theta=15$	$\theta=30$	$\theta=45$	$\theta=60$	$\theta=75$	$\theta=90$
c	13.1cm	12.99cm	12.69cm	12.19cm	11.51cm	10.66cm	9.66cm
R	22.69cm	22.51cm	21.98cm	21.12cm	19.93cm	18.46cm	16.74cm
$R_{\max}$	22.69cm	22.69cm	22.69cm	22.69cm	22.69cm	22.69cm	22.69cm

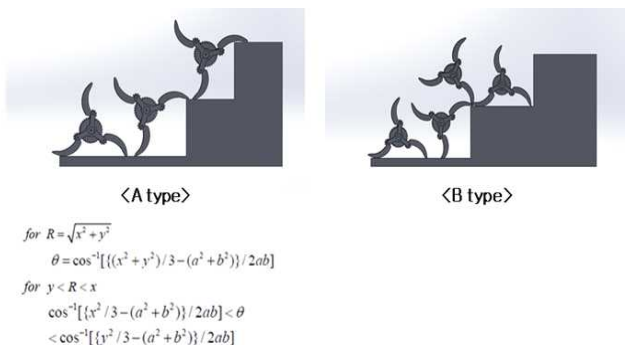
[Table.3 회전 각도에 따른 극복 가능한 장애물 높이]

휠 중심에서 leg 회전 중심까지의 거리인 a는 4.6cm, leg의 반경 방향 거리인 b는 8.5cm이다. R은 leg와 leg 사이의 거리를 뜻하는데 이 값은 극복 가능한 장애물의 높이도 뜻한다. Table. 3을 보면 회전 각도 θ 의 값에 따라 주행 가능한 장애물의 높이가 달라지는 것을 확인할 수 있다. θ 가 0도일 때 최대 극복 가능한 장애물의 높이 값이 나오고 22.69cm가 나온다. θ 값이 커질수록 c의 값이 감소하여 R 값이 줄어드는 모습을 확인할 수 있다.

4.3 계단주행 메커니즘

감사의 글

wheel과 계단 사이의 관계를 보면 leg가 장애물과 충돌 없이 부드럽게 올라가기 위해서는 바퀴의 leg가 계단의 각층에 일정한 위치에 접촉해야 한다. 따라서 leg를 회전하여 leg 간의 거리(R)와 계단 한 층의 대각선 길이를 같게 해주어야 함을 알 수 있다. leg 간의 최대 간격이 계단 한 층의 대각선 길이보다 크거나 같을 경우, 이때는 바퀴가 회전하면서 각각의 leg가 연속적으로 각각의 면을 디디면서 올라갈 수 있다. 장애물과의 충돌이 발생하지 않게 부드럽고 빠르게 오르기 위해서는 다음 식과 같이 계단의 대각선 길이와 같게 leg를 회전시켜야 한다. (A type) 반대로 leg 간의 최대 간격이 장애물의 대각선 길이보다 작을 경우, 이때는 바퀴가 회전하면서 층마다 2개의 leg가 함께 착지하면서 장애물을 극복할 수 있다. (B type) 이때의 회전각도 범위는 fig 4와 같이 표현된다.



[fig.4 계단주행의 기하학적 설계 수식화]

5. 결론

하이브리드 휠은 wheel-leg의 낮은 평지 주행 성능을 보완하기 위해 고안되었다. 평지 주행 시에는 바퀴가 원형상으로 지면과 연속적인 접지를 유지하며 회전하고 장애물을 만나게 되면 wheel-leg로 변형하여 장애물을 넘을 수 있었다. 하이브리드 휠을 사용하는 소형 로봇의 응용 분야 중 하나는 수색, 구조 임무이다. 특히, 임무의 특성상 요 구조자의 검출과 같은 사람을 대신하여 수행할 수 있다면, 임무의 성취도는 비약적으로 향상된다. 본 논문에서 개발된 하이브리드 휠은 변형을 위한 별도의 액추에이터가 존재하지 않아 설계의 단순함이 소형 로봇 설계에 적합할 뿐만 아니라 생산단가를 낮출 수 있어 로봇의 대량 생산에도 적합하다.

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2020R1F1A1067496).

참고문헌

- [1] 소방공무원 - 소방청 소방력 현황 / 인구 - 행정안전부 지방자치단체 행정구역 및 인구 현황
- [2] 차정훈, 유재석, 박창우 (2018) 드론을 활용한 감식 데이터의 딥러닝에 관한 연구 : 재난현장 및 실종자 수색을 중심으로, 한국화재감식학회 학회지, 9:3, 19-32
- [3] Freyr Hardarson, "Locomotion for difficult terrain", Royal Institute of Technology, A Survey Study, 1997
- [4] S. D. Herbert, A. Drenner, and N. Papanikolopoulos, "Loper: A quadruped-hybrid stair-climbing robot", IEEE Conference on Robotics and Automation, 2008
- [5] 평지 및 계단주행이 가능한 하이브리드 휠에 대한 연구
- [6] Chuanqi Zheng and Kiju Lee Wheel-Leg Reconfigurable Mechanism with Passive Gears for Mobile Robot Applications, IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA)
- [7] Yoo Seok Kim, Haan Kim, Gwang Pil Jung, Seong Han Kim, Kyu-Jin Cho, Chong Nam Chu A New Wheel Design for Miniaturized Terrain Adaptive Robot Journal of the Korean Society for Precision Engineering 30(1), 2013.1, 32-38(7 pages)