대한기계학회 주최

제14회 전국학생설계경진대회(2024년)

설계 최종 보고서

참가부	고등부				
참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ( )				
참가팀명	회회기계				
설계제목	원격 재난 대응용 Mecanum-Wheel-leg Hybrid Robot				
지도교수/교사	(소속) 인천과학예술영재학교 (성명) 이지영 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	김도연	인천과학예술영재학교			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김도연	인천과학예술영재학교 / 2학년	
2	신희서	인천과학예술영재학교 / 2학년	
3	박준석	인천과학예술영재학교 / 2학년	
4	박민찬	인천과학예술영재학교 / 2학년	

설계 요약문

참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ( )
참가팀명	회회기계
설계제목	원격 재난 대응용 Mecanum-Wheel-leg Hybrid Robot
대표자명	김도연
요약문	1. 설계의 필요성 및 목적 - 평지 구동 시와 험지 구동 시의 구동 방식을 구분하여 장애물 돌파 및 이동 효율성을 향상한 정찰 로봇의 설계가 필요 2. 설계 핵심 내용 (1) 설계 문제의 정의 : 메카넘-휠을 기반으로 다리를 전개하여 다양한 형태로 변형 가능한 메카넘-휠-레그 하이브리드 로봇을 설계 (2) 설계의 독창성 및 접근 방법 : 국내에 존재하는 기존 재난 대응용 로봇은 모두 빠른 기동성 혹은 협소 공간에서의 큰 기동성 중 하나에만 초점을 맞춤. 본 설계에서는 빠른 기동성 및 협소 공간에서의 기동성을 모두 갖춘 재난 대응용 정찰 로봇 설계에 집중함. (3) 설계의 제약조건 및 문제해결 방법 - 다리 구조의 견고성 및 기동성 : 가볍게 제작해 구조물의 무리를 줄임. - 모터 및 구동 시스템의 효율성: 작용하는 토크를 계산하고, 서브 모터를 설치한다 - 협소한 공간에서의 기동성: 협소한 공간에서 로봇이 원활하게 이동할 수 있도록 매카넘-휠을 사용 - 장애물 극복 능력 최적화: 최적화된 다리 개수를 찾아 설계에 사용 3. 설계 수행 일정 4. 설계 결과물 - 3d 모델링을 통해 Wheel-Leg를 설계. 허브를 매카넘-휠에 부착하고, 본 모터를 사용해서 전체적인 바퀴의 움직임을 구현.. 서브 모터를 회전해 Wheel-Leg를 전개하도록 설계. 5. 활용 방안 및 기대 효과 - 재난 현장의 빠른 파악을 통해 인명피해를 줄이는 데에 기여 - 널리 보급할 수 있고 사용하기 간편한 소형 로봇의 보급으로 재난 대응력 상승
설계프로젝트의 입상 이력	

1. 설계의 필요성 및 목적

건물 내 화재의 경우 요구조자의 정확한 위치를 파악하기 어려우며 파악하기 위한 로봇을 투입하더라도 장애물에 의한 제약이 존재한다. 화재 시 정찰 로봇은 화재 발생 초기 신속히 투입되어, 화재 현장 내부의 상황을 정확히 파악하게 해줌으로써 소방관의 화재 진압에 도움을 줄 수 있어야 한다. 대형 로봇의 경우 화재 잔해를 신속히 넘어 요구조자의 위치를 확인하고 대략적인 화재의 진화 정도를 확인할 수 있으나 이를 운반할 만한 장치가 마땅치 않고 협소한 공간을 침투하는 데 문제가 존재한다. 이에 평지에서는 메카넘-휠을 이용해 모든 방향으로 신속하게 기동이 가능하며 험지의 경우 바퀴를 변형한 구조를 통해 주파 가능한 형태의 로봇을 설계하고자 한다.

2. 설계 핵심 내용

(1) 설계 문제의 정의

해당 로봇은 평지와 비정형 지형 모두에서 효율적이고 신뢰성 있는 주행을 목표로 한다. 전통적인 원형 바퀴를 사용하는 로봇은 평지에서 빠르고 효율적으로 이동할 수 있으나, 높이가 높은 장애물이나 험지에서는 이동성이 제한된다. 또한, 기존 바퀴는 앞,뒤로만 이동할 수 있다는 제약이 있어 방향 변경 시 불필요한 경로로 이동하여 시간 및 에너지 소모가 불가피하다.. 이러한 문제를 해결하기 위해, 다양한 형태로 변형 가능한 메카넘-휠-레그 하이브리드 로봇의 설계가 필요하다. 이 로봇은 평지에서는 메카넘-휠로서의 기능을 하고, 장애물을 만나면 다리 형태로 변형하여 장애물을 극복할 수 있다.

(2) 설계의 독창성 및 접근 방법

1) 설계 방법 및 배경

1.1.) 다리 개수 설정

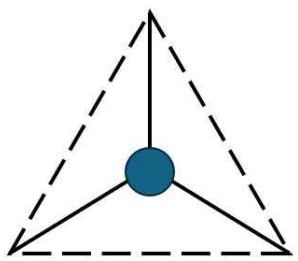
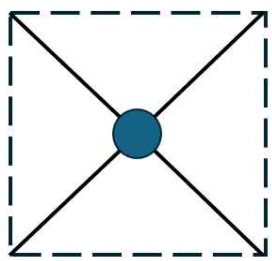
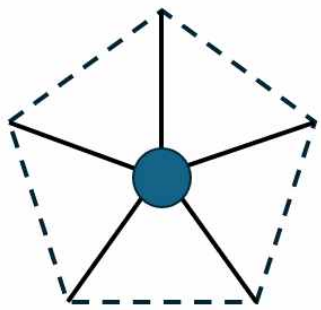
3-legs	4-legs	5-legs
		

Table 1. Shapes of Leg-Wheel Robot by Form

Table 1. 은 다리 개수에 따른 Wheel-leg Hybrid Robot의 바퀴 형상을 나타낸 표이다. 중심부터 도형의 꼭짓점까지의 거리를 같게 하였을 때 형상을 변화를 나타내었다. 다리의 개수가 늘어날수록 각 꼭짓점 사이 거리는 감소함을 확인할 수 있다.

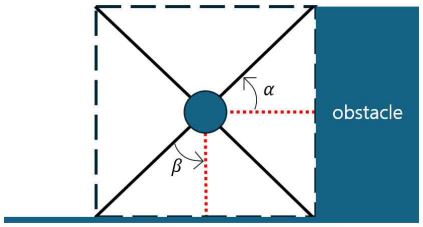


Fig 1. α and β with Maximum Obstacle Height

Fig 1. 은 장애물이 존재할 때 최대 장애물 높이를 계산하기 위한 α와 β를 표현한 그림이다. α와 β는 다음과 같이 표현된다.[2]

$$\alpha = \frac{\pi}{n}$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

$$R_{(\text{최대장애물높이})} = L(\sin(\alpha) + \cos(\beta))$$

$L(\text{중심과각꼭짓점사이거리}) = 10$으로 설정한 뒤 다리 수에 따른 최대 장애물 높이 H와 1회전시 이동 거리는 Python을 통해 구하였으며, 그 값은 Table 2.와 같다.

Number of Legs	Given Max Obstacle Height	Distance per Revolution	Calculated Max Obstacle Height
3	17.32	51.96	17.32
4	14.10	56.57	14.14
5	14.96	58.78	13.96

Table 2. (소숫점 둘째자리까지 표시함)

Table 2.에서 확인할 수 있듯 최대 장애물 높이는 3-Leg가 가장 높았으며 1회전당 이동 거리는 다리의 수가 높을수록 커지는 경향성을 보였다. 시간당 이동거리의 경우 바퀴의 회전수를 증가시키면 그 한계를 극복할 수 있으나 최대 장애물 높이는 바퀴의 크기와 다리의 수에 결정된다. 본 설계에서는 소형 Wheel-leg Hybrid Robot의 설계를 목표로 함으로 3-Leg를 채택하여 작은 크기에서도 높은 험지 주파능력을 갖는 Wheel-leg Hybrid Robot을 설계하였다.

1.2.) Wheel-Leg Hybrid Robot의 상황에 따른 역학적 분석

Wheel-Leg Robot의 역학적 분석은 모터를 선정하기 위한 토크를 구하는데 필수적이다. Wheel-Leg Hybrid Robot이 처하는 상황은 크게 평지에서 바퀴를 사용해 구르는 경우, 장애물 존재 시 바퀴를 사용해 구르는 경우, 다리 모드로 전환된 경우, 장애물을 넘는 경우로 나뉜다. 명칭을 각각 평지-바퀴 모드, 장애물-바퀴 모드, 평지-다리 모드, 장애물 주파 모드로 정의하고 사용하였다.

1. 평지-바퀴 모드

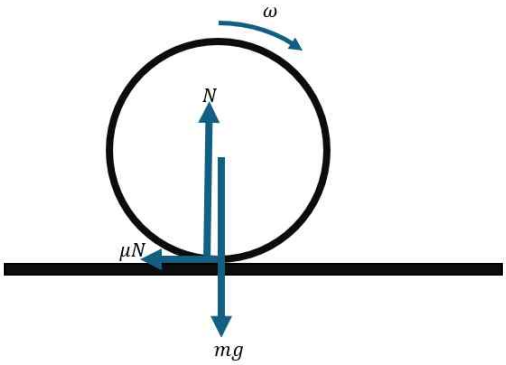


Fig 2. Rolling motion on flat terrain

Fig 2.는 평지에서 바퀴 모드로 구를 때의 운동을 기술한 그림이다. 평지-바퀴 모드에서의 구름 조건은 $v = R\omega$이며, $\tau = \vec{r} \times \vec{F} = R\mu N$으로 기술할 수 있다.

2. 장애물-바퀴 모드

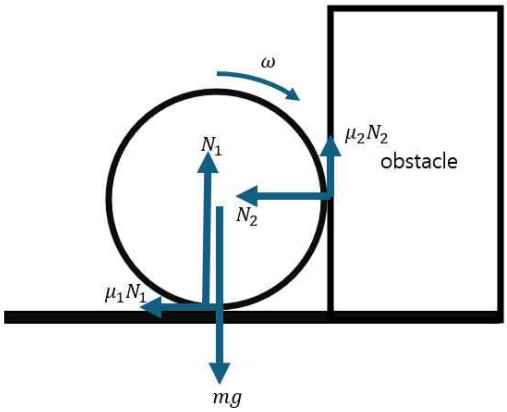


Fig 3. Rolling motion over obstacles

Fig 3.은 장애물이 존재하는 경우 바퀴 모드에서의 운동을 기술한 그림이다. 해당 조건에서의 역학적 분석은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{cases} N_2 - \mu_1 N_1 = 0 \\ \mu_1 + \mu_2 N_2 - mg = 0 \end{cases}$$

평형 조건에 의해 2개의 x, y축에 대한 평형식을 세울 수 있고, 토크에 대한 식은 아래와 같이 기술된다.

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} = I\dot{\omega} = R(\mu_1 N_1 - \mu_2 N_2)$$

평형 조건을 이용해 m, g, R, μ_1, μ_2로 나타내면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{\mu_1 (1 - \mu_2)}{1 + \mu_1 \mu_2} mgR$$

3. 평지-다리 모드

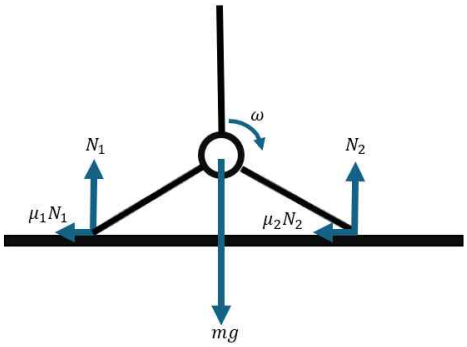


Fig 4. Rotational motion using legs on flat terrain

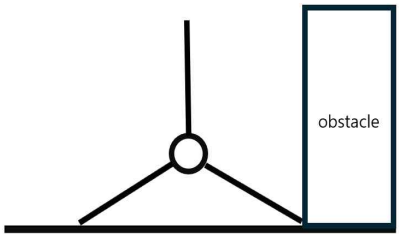
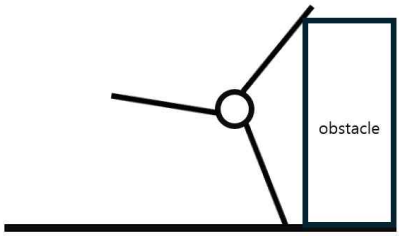
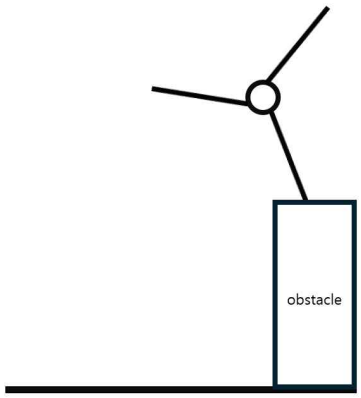
Fig 4.는 평지에서 다리를 전개한 경우 운동을 기술한 그림이다. 평지에서 다리 모드로 이동하기위한 최소 토크는 다음과 같다.

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} \approx R\sin\frac{\pi}{2}(N_2 - N_1)$$

다리와 평지의 접촉면적이 무시할 만큼 작으므로 작용하는 마찰력은 고려하지 않았다.

3. 장애물 주파모드

시간에 따른 Wheel-Leg Hybrid Robot의 장애물 주파 모습은 Table 3.와 같다.

Process 1	Process 2	Process 3
		
평지에서 다리가 전개되는 과정.	모터가 회전하여 장애물에 다리가 걸쳐지는 과정.	모터가 회전하여 장애물을 극복한 과정.

Process 2에서는 다리가 장애물과 맡닿는 거리, 각도에 따라 주파에 필요한 토크가 달라진다. Process 2.의 상황에서 작용하는 힘은 Fig 5.와 같다.

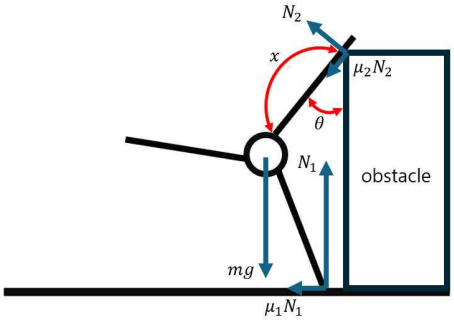


Fig 5. Force acting in Process 2

Fig 5. 상황에서 평형 조건식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \mu_1 N_1 + \mu_2 N_2 \sin\theta = 0 \\ mg = N_2 \sin\theta + N_1 - \mu_2 N_2 \cos\theta \end{cases}$$

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} = xN_2 + RN_1 \left(\sin\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right) - \mu_1 \cos\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right)\right)$$

식을 연립하여 τ를 $m, g, \mu_1, \mu_2, \theta$로 나타내면 아래와 같다.

$$\tau = \frac{mg}{\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu_2 \sin\theta}(\sin\theta - \mu_2 \cos\theta)\right)} \left(\sin\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right) - \mu_1 \cos\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right)\right) R - \frac{\mu_{1x}}{\mu_2 \cos\theta})$$

2) 설계의 독창성

재난 대응용 로봇의 국내 개발 현황은 아래 [Table. 1]과 같다.

[Table. 1] - 재난 대응용 로봇의 국내 개발 현황

종류	개발 현황	사진
화재 진압 로봇	디알비필드로봇(주)의 실내 화재 진압 로봇 -내화 성능: 1시간, 1000도 -주행속도: 8km/h -소화포: 40mm -소방 훈련 참가	
	현대로템과 위아의 실외 화재 진압 로봇 -내화:700도 -주행속도 40km/h -미분무 소화장치 및 소화포 탑재 -소방훈련 참가	
재난 정찰 로봇	KIRO -붕괴지역, 매몰자 탐지 -위험지 정찰	
공중 정찰 로봇	KIRO, 레인보우, X-Drone -드론에 탑재형 정찰 로봇 -재난 환경에서 통신 환경 구성을 위한 무선 중계기 투하	

재난 정찰 로봇의 경우 뱀의 형태로 유연한 기동성을 확보, 협소한 공간을 정찰할 수 있는 로봇과 무한궤도를 이용해 계단과 매몰 지역을 이동할 수 있는 로봇이 대부분을 이루었다. 기존 로봇의 경우 빠른 기동성과 협소한 공간에 큰 기동성 중 하나만 택한 로봇이 주였으나, 본 설계의 경우 일반적인 상황(평지)에서는 매카넘-휠을 이용해 신속한 기동이 가능할 수 있도록 하며, 계단과 같은 장애물은 구형 몸체에서 나오는 지지대를 통해 개척하고자 한다.

메카넘-휠은 모드 방향으로의 병진 운동이 가능하여, 기존에는 주로 4륜 차량에서 사용되었다. 본 연구의 메카넘-휠-레그 로봇은 2개의 휠 및 지지대로 구성되어 가벼운 장치로 다양한 움직임을 구현한다. 2륜 로봇에 메카넘-휠을 사용하여 불안정한 방향 전환을 극복하였다.

기존의 로봇들은 휠-레그로 바퀴의 연장을 택하기보다 험난한 지형을 이동할 수 있는 안정적인 모델을 선호하였다. 하지만 이 설계에서는 바퀴 자체를 연장하여 통과할 수 있는 장애물의 범위와 유형을 대폭 증가시켰다는 점에서 독창적이다.

3) 설계의 제약조건 및 문제 해결 방법

정해진 설계문제를 해결하기 위해 다음과 같은 제약조건을 만족해야한다.

1. 다리 구조의 견고성 및 내구성: 다리 구조가 반복적인 충격과 하중을 견딜 수 있어야 한다. 특히, 험지나 장애물에서의 주행 시 다리의 피로와 마모가 발생할 수 있다.

이를 해결하기 위하여 다리 부분의 지름을 매카넘-휠보다 작게 설계하였다. 따라서 평상시에는 하중이 다리에 집중되어 파손되는 일이 없도록 설계하였다.

2. 모터 및 구동 시스템의 효율성: 평지와 험지 모두에서 효과적으로 작동할 수 있는 모터와 구동 시스템이 필요하다. 특히, 다리 모드로 전환 시 필요한 토크와 이동속도를 계산하여 이를 적절히 제어할 수 있는 알고리즘을 설계해야한다. 이를 위해 가해지는 토크를 계산하고, 3d인쇄물이 버틸 수 있는 크기임을 확인하였다.

3. 협소한 공간에서의 기동성: 협소한 공간에서 로봇이 원활하게 이동할 수 있어야 한다. 대형 로봇의 경우 공간 제약으로 인해 이동이 어려울 수 있다. 이에 회전 반경을 줄이기 위해 다리와 바퀴의 독립적인 제어를 구현한다.
4. 장애물 극복 능력 최적화: 다양한 형태와 크기의 장애물을 효과적으로 극복할 수 있는 최적화된 다리 구조가 필요하다. 이를 앞선 실험 배경에서 소개하였다.

(3) 설계 내용

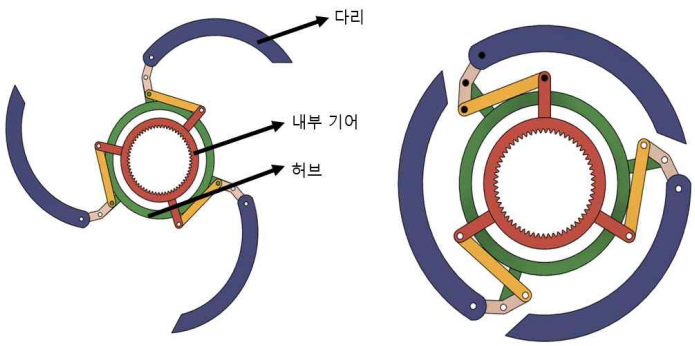


Fig 6. Designed Wheel-leg mechanism

Fig 6.은 3개의 다리로 구성된 Wheel-Leg mechanism이다. 내부기어, 허브, 다리로 구성되어 있으며, 부가적으로 다리 회전부 및 바로 구성되어 있다.

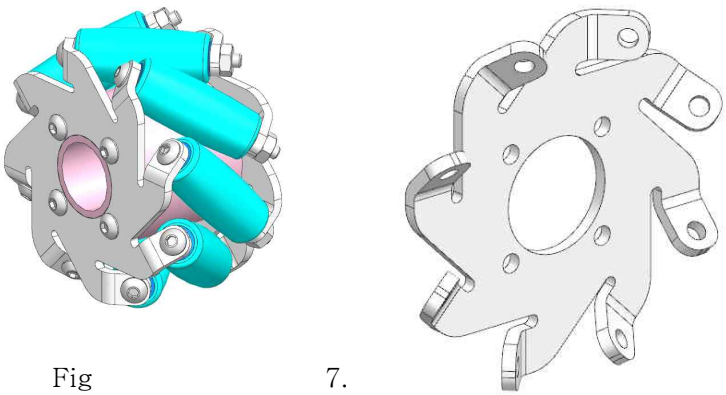


Fig 7. Mecanum-Wheel

Fig 7은 사용한 Mecanum-Wheel의 모습이다. 설계한 Wheel-Leg의 허브에 Mechanum-Wheel을 부착한다.

3. 설계 수행 일정

설계 진행 내용	4월	5월	6월	7월	8월	9월
설계 구체화	■	■				
다리 수 설정			■			
Wheel-Leg 역학적 분석				■	■	
3d 모델링					■	
Mecanum-Wheel 구매						■

4. 설계 결과물

(1) 최종 결과물 형상 및 작동원리

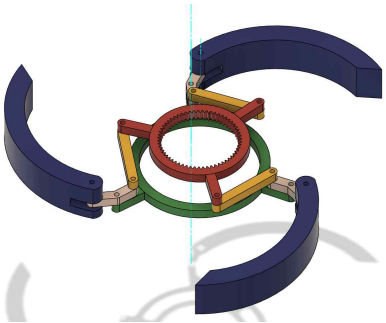


Fig 8. 최종 Wheel-Leg

서보 모터가 피니언 기어를 회전하면 내부 기어(ANNULAR GEAR)가 회전하며 다리가 전개된다. 내부기어와 연결되는 3개의 스포크를 통해 다리를 전개시키며 다리의 전개각이 최대가 되었을 때 스포크와 링키지(노란색)이 직각을 이루어 최대의 토크가 작용할 수 있도록 하였다.

Fig 9. 구매한 Mecanum-Wheel

실제 매카넘-휠을 구매하여 3d 프린팅한 최종 Wheel-Leg에 부착하였다. Wheel-Leg의 서브 모터가 작동할 때, 본 모터의 동작을 멈춤으로써 다리를 전개하여 장애물을 극복하는 과정에 해가 되지 않도록 하였다.

(2) 최종설계 결과물의 장단점 및 의의

최종 설계 결과물은 바퀴의 구조물 자체가 하중을 잘 견딘다는 장점이 있다. 하지만, 부품 사이를 연결하는 관절이 매끄럽지 못해 동시에 유기적인 전개가 발생하기 어렵다. 그럼에도, 로봇 자체의 크기는 작지만, 극복할 수 있는 장애물의 크기가 상당하다. 또한, 상당히 가볍게 제작되어 재난시 투입이 용이하고, 고급 부품을 사용하지 않아서 가격도 저렴하게 제작되었다.

5. 활용방안 및 기대효과

본 발명품은 기존 정찰 로봇이 가진 단점인 계단 등의 장애물에 대한 제약조건을 극복하였다. 동시에 매카넘-휠을 취함으로 전 방향 구름 운동이 가능하게 하여, 신속하고 유연한 움직임이 가능하다. 또, 평지와 험지에서의 구동 방식에 차이를 두어 장애물 돌파 및 재난 현장 이동 효율을 향상했다. 위와 같은 특징을 종합하여 미루어 보았을 때, 본 설계는 소형 로봇임에도 불구하고 다양한 장애물을 통과할 수 있어, 재난 현장에서의 피해자를 찾기에 유리하며, 인명 피해를 줄이는 데에 기여할 것이다..

<참고문헌>

Design and Analysis of a Wheel Leg Hybrid Robot with Passive Transformable Wheels
- Yusheng Shi *, Minglu Zhang, Manhong Li * and Xiaojun Zhang
Design and motion analysis of reconfigurable wheel-legged mobile robot
- Shuo Zhang, Jian-tao Yao, Ying-bin Wang, Zi-sheng Liu, Yun-dou Xu, Yong-sheng Zhao*