대한기계확회 주최 제13회 전국학생설계경진대회(2023년)



참가부	대학부 (🖌)				
참가분야	공모주제 (🖌) / 자유주제 ()				
참가팀명	유망주				
설계제목	비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트랙 로봇				
지도교수/교사	(소속) 금오공과대학교 (성명) 신동원 (연락처) (이메일)				
대표자	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
·····································	김호영	금오공과대학교 기계시스템공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김호영	금오공과대학교 기계시스테고하고 / 2하녀	
2	박정인	<u>기계시그림등학과 / 3학년</u> 금오공과대학교 기계시스테고하과 / 3하녀	
3	김범준	거계시 <u>그 김영국과</u> / 3억년 금오공과대학교 기계시스템공학과 / 3학년	
4			
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 (✔) / 자유주제 ()		
참가팀명	유망주		
설계제목	비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트랙 로봇		
대표자명	김호영		
요약문	김호영 [설계배경] 전 세계적으로 재해 발생 건수가 증가하고 다양한 분야에서 로봇이 꾸준한 성장세를 보이며 재난현장에서도 로봇 기술의 활용이 증가하는 추세이다. 구 조대원 역시 재난의 위험성에 노출되어 인명피해가 발생한다. 구조대원의 안 전성과 대형 재난현장에서 구조대원의 수가 부족하거나 육체적인 부담으로 인해 골든타임을 놓쳐 발생하는 인명피해 최소화를 목표로 하였다. [설계내용] 몸체와 구동 캐터필러 사이에 위치하여 몸체 수평 제어를 전담하는 관절부 를 5 linkage closed link로 설계하고 총 4개의 캐터필러와 좌&우측 캐터필러 사이를 연결하는 추가 링크를 통해 비평탄 지형에서 유연한 구동이 가능하 도록 하였다. 몸체 위에 위치한 환자 이송부에 X자 링크 구조와 Rack and pinion을 적용하여 최종 목적지까지 구조대원의 육체적 부담없이 요구조자를 이송할 수 있다. 원격 구동을 위해 블루투스 모듈과 UWB를 활용하였고 ESP32 카메라 모듈을 로봇 전방에 부착하여 외부에서 내부 상황을 모니터 링 할 수 있다.		
설계프로젝트의 입상 이력	해당 사항 없음		

비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트랙 로봇

김호영*·박정인**·김범준***·신동원** *금오공과대학교 기계시스템공학과

Transformational Dual Track Robot to Overcome Non-Planar Environments

Ho-Young Kim^{*}, Bum-Jun Kim^{**}, Jeong-In Park^{***} and Dong-won Shin^{*†} * Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Key Words: 5 Linkage closed link(닫힌 구조의 5절 링크), Tandem caterpillar drive(다수의 캐터필러 구동), Kinematics(기구학), Leveling(수평유지), Remote control(원격 제어), object following(객체 추 종), X-shaped link(X자형 링크), Rack and pinion(톱니 구조)

초록: 본 로봇은 몸체와 구동 캐터필러 사이 관절부를 5 Linkage closed link로 설계하고 총 4개의 구동 캐터필러와 좌·우측 2개 캐터필러를 이어주는 연결 링크로 이동 시 기울기 변화를 최소화하였다. 역기 구학 해석을 통해 비평탄 지형 극복 시 몸체의 수평을 유지하고 무게 중심이 변하지 않도록 하였다. 몸 체 위는 X자 링크 구조와 Rack and pinion, 컨베이어 벨트가 적용된 환자 수송부로 구성되어 구급차 등 의 안전지대로 환자를 간편하게 이송할 수 있다. 또한, MPU 센서로 기울기 변화를 측정하고 원격 제어 를 위해 블루투스와 UWB 센서를 적용하였으며 내부 상황 모니터링을 위해 카메라 센서를 탑재하였다. 본 로봇은 재난현장에서 구조대원의 육체적인 부담을 감소시키고 골든타임내에 요구조자를 이송하는 것을 목표로 한다.

Abstract: This robot features a 5-linkage closed link mechanism connecting the body and four driving caterpillars, minimizing slope changes during movement. Through inverse kinematic analysis, it maintains horizontal orientation and center of gravity, even non-plannar environments. The upper body of a robot, with an X-link structure and conveyor belt-equipped patient transport, eases patient transfer to safety zones, including ambulances. Equipped with MPU, Bluetooth, UWB sensors, and cameras, it aims to reduce rescue personnel's physical burden and ensure timely victim transport within the 'golden hour.

1. 서 론

재난현장에서의 신속한 대응은 인명 구조와 안전을 위해 중요하다. 그러나 많은 경우에 구조 작업은 2차 재난의 우려가 있으며 위험하고 불안정한 환경에서 이루어진다. 구조대원 또한 위험에 노출되고 최 근 재난 발생 빈도 증가 및 인력 부족 문제로 재난 구조 작업은 더욱 어려운 과제가 되고 있다. 이에 따라 로봇 기술은 재난현장에서의 중요한 도구로 부상하고 있으며, 구조 작업의 효율성과 안정성을 향 상하는 방안이 강구되고 있다.

본 연구는 재난 구조 작업을 개선하고 구조대원의 인명피해를 줄이기 위한 목적의 로봇을 제안하였 다. '비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트랙 로봇'은 몸체와 구동 캐터필러 사이에 위치한 기구학적 구

조가 적용된 관절부를 통해 캐터필러의 접지력을 높이고 비평탄 지형 이동 시 몸체의 수평을 유지할 수 있다. 몸체의 기울기 변화는 MPU 센서를 통해 측정한다. 2차 재난의 여부에 따라 블루투스와 객체 추종 의 두 가지 원격 제어 기능을 고안하였다. 2차 재난의 우려가 없어 현장에 구조대원이 투입할 수 있는 상황일 시, UWB 센서를 활용한 객체 추종으로 구난 작업을 진행하고 투입 불가능한 상황일 시, 외부에 서 로봇에 부착된 카메라를 통해 내부 상황을 모니터링하며 블루투스로 로봇을 원격 제어한다. 또한, 몸 체 위에 환자 이송을 위한 X자 링크와 Rack and pinion, 컨베이어 벨트가 적용된 장치가 있는데 역시 블 루투스로 제어가 가능하다. 요구조자의 초기 위치부터 안전지대(ex, 구급차)까지 이송하는 과정에서 구조 대원의 개입이 최소화되도록 운영 프로세스를 개발하였다.

2. 기구부 설계 분석

일반적으로 재난현장에서 사용되는 로봇은 트랙 바퀴 혹은 캐터필러라 불리는 구동 방식을 사용한 다. 이 방식은 바퀴 구동에 비해 지면과 닿는 접지력이 높아 안정성이 뛰어나다. 하지만, 기존의 로봇들 은 하나의 긴 캐터필러를 사용하여 비평탄 지형을 이동할 때 캐터필러의 기울기가 변함에 따라 몸체의 기울기도 함께 변하여 안정성이 낮으므로 구난 작업에 적합하지 않다. 해당 문제점을 해결하기 위해 5 linkage closed link 구조와 변형 이중트랙 구조를 적용하였다. 이 장에서는 로봇이 지형에 맞게 관절부 링크가 적절히 제어되면서 비평탄 지형에서 구난 작업이 가능하도록 기구부를 설계하고, 설계 중에 발 생한 문제와 해결방안 및 기존 로봇과의 차이점을 기술하였다. 해당 로봇의 설계 형상은 Fig. 1과 같다.



(a) Before activation

(b) After activation

Fig. 1 3D modeling shape of a robot

2.1 관절부 설계

본 로봇의 수평 제어를 위해선 캐터필러와 몸체 사이에 하나의 링크만 사용하여도 되지만 이 경우, 링크의 위치 변화에 따라 몸체의 무게중심이 함께 변화한다. Fig. 2(a)처럼 5 linkage closed link 구조로 로봇의 관절부를 설계하여 로봇이 수평제어를 진행할 때 몸체의 무게중심이 동일하도록 설계한다. 또한, Closed link 구조의 장점으로 몸체와 캐터필러 사이의 내구성을 높이고 캐터필러의 접지력을 높인다. 각 캐터필러 구조는 편리한 자유도 계산을 위해 Fig. (b)처럼 링크 구조로 치환할 수 있다.



Fig. 2 Mechanical structure of a robot

초기 설계에선 Fig. 3(a)처럼 Link 1과 Link 2 사이에 모터가 위치하였다. 프로토타입을 제작하여 제어 해 본 결과, 하나의 링크가 움직일 때 Link 1과 Link 2 사이의 모터가 함께 이동하며 구동에 문제가 발 생하였다. Link 1을 담당하는 모터는 링크 구동 시 몸체와 충돌하는 것을 방지하고자 위치는 동일하지만 초기 설계보다 외부로 많이 돌출되도록 하였다. Link 2를 담당하는 모터는 Fig. 3(b)와 같이 캐터필러 판 에 모터 커버를 추가로 설계하고 캐터필러 판에 위치하도록 수정하였다. 하중이 가해지는 곳에 필렛을 사용하여 힘을 분산시키고 파손 가능성을 줄였으며 관절부 모터 토크를 고려하여 기존 150mm(Link 1), 100mm(Link 2)였던 길이를 100(mm), 100(mm)로 수정하였다. 모터 토크와 관련된 내용은 3.2절에 언급한 다.



(a) Before revision

(b) After revision

Fig. 3 Change of motor installation

로봇 구동에 오류가 생겨 사고가 발생할 수 있다. 이를 방지하고자 링크의 형상이 스타퍼(Stopper) 기 능을 수행할 수 있도록 설계하여 Link 1과 Link 2의 각도는 35도보다 작아질 수 없도록 하였다. 일정 각 도 이상이 되는 것을 방지하기 위해선 각 링크의 각도 변화가 80도 이상일 때, 더 이상 각도가 증가하 지 않도록 프로그래밍하였다. Fig. 4(a)는 링크가 스타퍼 기능으로 35도에서 멈춘 모습이다. Fig. 4(b)는 링크가 최대 각도인 80도로 움직였을 때의 모습이다.



(a) Minimum angle (b) Maximum angle Fig. 4 Link design with stopper

2.2 캐터필러(=무한궤도 바퀴) 설계

캐터필러의 크기와 형상에 따라 로봇이 극복할 수 있는 장애물의 높이가 결정된다. 캐터필러 반지름, 구동륜 간의 거리, 이동 거리를 설정하고 극복할 수 있는 높이를 계산하였다. 장애물 높이에 따른 캐터 필러의 기울기 변화는 아래의 수식으로 구할 수 있다. Fig. 5(a)에서 P점은 캐터필러가 이동함에 따라 반 경 r을 따라 이동하지만 Fig. 5(b)에서 P점은 사분점 이후 궤도의 직선 부분을 따라 움직이며 θ₁이 증가 한다.



(a) Initial state



Fig. 5 Caterpillar slope variation

● 초기상태(r = 캐터필러 반지름, H = 장애물 높이, L = 구동륜 간의 거리, S = 이동거리)

$$\sin(\theta) = \frac{r - H}{r} \qquad (1) \qquad \cos(\theta) = \frac{\sqrt{r^2 - (r - H)^2}}{r} \qquad (2)$$

기하학적 조건을 고려한 p점 이후 (θ₁ = 캐터필러 기울기)

$$r + Lsin(\theta_1) = H + rcos(\theta_1)$$
(3)

$$S + Lcos(\theta_1) + rsin(\theta_1) = L + rcos(\theta)$$
(4)

$$\cos(\theta_1 + \emptyset) = \frac{r - H}{\sqrt{r^2 + L^2}} \quad (5) \qquad \sin(\theta_1 + \emptyset) = \frac{-S + L + r\cos(\theta)}{\sqrt{r^2 + L^2}} \quad (6)$$

$$\cos(\emptyset) = \frac{r}{r^2 + L^2} \qquad (7) \qquad \sin(\emptyset) = \frac{L}{r^2 + L^2} \qquad (8)$$

● S를 표현 하기 위해

$$\cos(\theta_1 + \emptyset)^2 + \sin(\theta_1 + \emptyset)^2 = 1 \qquad (9) \qquad S = L + r\cos(\theta) + \sqrt{r^2 + L^2 - (r - H)^2} \qquad (10)$$

• 무한궤도의 기울기 $heta_1$ 을 구하기 위한 식

$$\tan(\theta_1 + \emptyset) = \frac{\tan(\theta_1) + \tan(\emptyset)}{1 - \tan(\theta_1)\tan(\emptyset)} = \frac{-S + L + r\cos(\theta)}{r - H}$$
(11)

H에 따른 θ₁구하는 식

$$\tan\left(\theta_{1}\right) = \frac{r\sqrt{r^{2} + L^{2} - (r - H)^{2}} - L(r - H)}{r(r - H) + L\sqrt{r^{2} + L^{2} - (r - H)^{2}}}$$
(12)

Recurdyn simulation은 원활한 해석을 위해 10배 Scale 한 값으로 진행하였다. MATLAB을 이용하여 수식을 계산한 결과와 Recurdyn에서 진행한 시뮬레이션의 결과값이 Fig. 6처럼 유사함을 확인하였다. 3D 프린팅으로 제작한 캐터필러로 검증해 본 결과, 해석 값과 동일하게 장애물의 높이가 50mm일 때 극복하였 고 75mm일 땐 극복하지 못하고 뒤집히는 모습을 확인하였다. Fig. 7은 Recurdyn simulation과 실물 실험 모습이다. Fig. 8은 Fig. 7(b)에서 나타난 장애물의 높이를 버니어 캘리퍼스로 측정한 사진이다.



(a) Compute the formula using MATLAB (b) Results of the recurdyn simulation Fig. 6 graph of θ_1 and H



(a) Recurdyn Simulation (b) Actual experiment Fig. 7 graph of θ_1 and H



Fig. 8 Height of the obstacle

기존 로봇들은 하나의 긴 캐터필러를 사용하여 로봇을 구동한다. 이 방식은 혐지 극복엔 애로사항이 없으나 비평탄 지형을 극복할 때의 캐터필러 움직임이 구난 작업을 진행하기에 부적합하므로 캐터필러 를 총 4개 사용하고 Fig. 9처럼 좌·우측 캐터필러 2개를 추가적인 링크로 연결한다. 앞에 위치하는 캐터 필러가 비평탄 지형을 극복하는 동안 연결 링크에 의해 뒤의 캐터필러가 따라오면서 하나의 긴 캐터필 러를 사용하는 것과 비교하여 더욱 유연한 구동이 가능하고 몸체의 안정성이 높아진다. 초기 설계에선 Fig. 9(a)처럼 연결 링크를 일자 형태로 제작하였다. 험지 극복 시 연결 링크가 장애물에 닿는 것을 방지 하기 위해 부채꼴 모양으로 수정하였다.



(a) Before revision(b) After revisionFig. 9 Alteration of caterpillar wheel form

전체적인 로봇 형상을 적용하여 Recurdyn simulation을 진행해보니 내구성이 낮고 Fig. 10(a)처럼 링크 의 구동에 따른 반력으로 앞바퀴가 들리는 문제가 발생하였다. 문제를 해결하기 위해 구동륜들 사이에 들어갈 추가적인 부품을 설계하고 무게를 지정하며 시뮬레이션을 반복하였다. 약 600g 이상인 경우 앞 바퀴가 들리지 않았고 문제 해결을 위한 부품을 가로 = 60(mm), 세로 = 70(mm), 높이 = 30(mm)의 직육 면체에 볼트 체결을 위한 직경 8의 구멍이 있는 형태로 설계하였다. 재질은 기존의 PLA보다 높은 밀도 를 가진 스테인리스 스틸로 설정하였다. 밑의 수식과 같이 925.7g이 나오는 것을 확인하였다. 7.8g/cm³ 은 스테인리스 스틸의 밀도로 프로토타입에 사용한 밀도 1.24g/cm³의 PLA와 비교하여 약 6.29 배가 높 고 내구성과 강도가 뛰어나 개선을 위한 재질로 선정하였다. Fig. 10(b)는 캐터필러 구동륜 사이에 무게 를 추가하기 위한 스테인리스 스틸 재질의 부품이 장착된 모습이다.

$$(60*70*30 - \pi * 4^2 \times 60) \times 7.8 = 925.7g$$



(a) Before revision (b) After revision Fig. 10 Alteration of caterpillar wheel form

2.3 환자이송부 설계

구난 작업을 마친 후 환자를 최종적으로 이송하기 위해서 몸체에 환자 이송을 위한 장치를 설계한다. 원하는 위치와 환자이송부의 높이를 동일하게 맞추기 위해 X자 링크 구조로 높이 조절부를 설계하고 밑판에 슬라이더 형상을 적용하여 X자 링크에 대한 스타퍼 기능을 수행하도록 한다. 원하는 높이에 도 달한 후 위판이 수평으로 움직일 수 있도록 Rack and pinion 구조를 적용한다. 기어의 이동에 따라 위판 의 위치가 수평으로 이동하고 원하는 위치에 적절히 정지한다. 마지막으로 위판에 설치된 컨베이어 벨 트가 작동하여 사람을 이동시킨다. 환자이송부의 형상은 Fig. 11의 노란색 부분이다.



Fig. 11 Patient Transportation Form

3.시뮬레이션 및 제어

3.1 로봇의 구동모터 선정

본 로봇을 구동시키기 위해 캐터필러 내에 존재하는 구동륜(wheel)의 토크 계산을 진행한다. 이를 위해서 Wheel의 자유물체도를 분석하여 외부에서 작용하는 힘을 파악하고 뉴턴의 제 2법칙을 통해 필요한 토크값을 계산한다.



Fig. 12 Patient Transportation Form

$\sum F_{Y} = mg - N = 0$	(13)	N = mg
$\sum F_X = F = ma$	(14)	
$\sum M_X = T - Fr = I\alpha$	(15)	T = Fr + Ia



Fig. 13 Frictional force graph according to external force

Fig. 13을 참고하여 필요 토크를 계산하기 위해 최악의 상황을 가정한다. 따라서 마찰력 F는 미끄러지 지 않는 조건하에 최대정지 마찰력일 때로 가정한다. F = μ_sN (16)

추가적으로 기구학적 적합조건인 미끄러지지 않을 때 x변위는 θ 에 종속되는 조건을 활용한다. $x = r\theta$ (17)

(15)에 (16),(16)을 대입하여 정리하면 (18)로 나타낼 수 있다. $T = mr^2 a + Ia$ (18)

이때 로봇을 구동하는 토크는 마찰력으로 인한 구동력이 대부분이므로 관성력 항은 무시할 수 있다. 위의 관계식들을 최종적으로 종합하여 모터의 토크를 계산하기 위한 수식은 아래와 같이 (19)로 정의할 수 있다.

 $T \cong Fr = \mu_s Nr$ (19)

 (19)에 물리적 특성값들을 대입하고 계산을 진행하면 T = 1 x 2kg x 9.81 m/S₂ x0.052m = 1.02N-m로 결론지을 수 있다.

3.1.1 구동 모터 Recurdyn Simulation

수식적으로 계산한 구동 모터의 정당성을 확인하기 위해 동역학 시뮬레이션 프로그램 Recudyn을 활용 하여 구동 모터의 토크값을 분석하고 수식적으로 계산한 값과 비교한다.

시뮬레이션을 통해 캐터필러 로봇을 분석하기에 앞서 캐터필러 구조의 바퀴를 간단하고 정확하게 분석 하기 위하여 캐터필러 바퀴를 링크-바퀴 구조로 대체한다.

Fig. 14는 캐터필러가 지면에 맞닿았을 때의 상황을 나타낸 것이다. Kutzbach DOF 공식을 통해 캐터필러 의 자유도를 분석한다.



Fig. 14 Caterpillar wheel contact with ground

kutzbach Dof식 $L = Link의 개수 J_1 = Full Joint 개수 J_2 = Half Joint 개수$ Dof = $3 \times (L-1) - 2 \times J_1 - 1 \times J_2$ (20) Dof = $3 \times (3-1) - 2 \times 2 - 1 = 1$ (21) 따라서 캐터필러가 지면에 맞닿았을 때의 구동형상은 1개의 자유도를 나타낸다 이를 Recurdyn 시뮬레이션을 위해서 자유도가 1로 동일한 두 개의 바퀴를 1개의 링크 + R joint 2개로 연결한 것으로 대치하였다.



Fig. 15 Replace with a link-wheel structure

링크-바퀴 구조로 대치한 형상의 자유도를 계산해보면 L = 4개 $J_1 = 4$ 개 Dof = 3 × (4-1) - 2 × 4 = 1 (22) 따라서 본 계산을 통해 캐터필러를 활용한 구동부와 링크-바퀴 구조로 형상은 같은 운동형태를 나타냄 을 확인하였다.



Fig. 16 Recurdyn Simulation with a link-wheel structure

링크 구조에서 앞의 부분은 하중을 받치기 위해서 아무런 역할도 하지 않기 때문에 고려하지 않고 캐 터필러 구동부를 링크 바퀴-구조로 대치한 후 본 로봇과 모든 치수들을 동일하게 설정하고 시뮬레이션 을 진행하였다.



Fig. 17 Recurdyn Simulation Driving Torque according to Time

Fig. 17 그래프의 Torque 단위를 N-m 단위로 변환한 후 확인하면 특이값 2개를 제외하고 수식적으로 계산했던 T = 1.02N-m 범위 내에서 매우 유사함을 확인하였다. 따라서 본 로봇을 주행시키기 위해서는 안전율과 손실률 = 3을 고려하여 T = 1.02N · m × 3 = 3.06N · m이상의 토크를 가진 모터를 선정한 다.

3.2 차체를 들어 올리기 위한 링크 구조의 토크 해석

로봇을 들어 올리기 위해 필요한 토크 계산을 위하여 캐터필러와 차체 사이에 결합한 링크 구조에 대 해 해석을 진행한다. 수평운동을 무시하고 수직 운동만 진행하므로 정역학적으로 계산을 진행한다.



L_link1 = 0.103m 링크1의 길이 M body =4kg 차체 body의 질량

L link2 = 0.064m 링크2의 길이

 $F_Body_divide4 = body <math>\bar{c} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$

M_link2 = 0.3kg link2 질량 F_link2 = 0.3 x 9.81 link2 하중

M_link1 = 0.4kg link1 질량 F_link1 = 0.4 x 9.81 link1 하중

Theta_link1 = θ link1과 지면과의 각도 Theta_link2 = δ link2와 수평면과의 각도 (b) physical dimensions

(a) Link Structure design

Fig. 18 Data for torque analysis



Fig. 19 Link design with Motor

Fig. 19는 차체를 들어올리기 위해 제작된 링크 구조의 모습이다. 링크 구조의 독립적인 움직임을 예 측하기 위하여 링크 구조의 자유도 계산을 진행한다. 링크 구조는 *L* =3개 *J*₁=2개로 구성되어 있다.

DOF = $3 \times (3-1) - 2 \times 2 = 2$ (23)

(23) 식에 따라 독립적으로 운동하는 자유도는 2개임을 알 수 있다. 이를 정확하게 제어하기 위해 모터2개를 활용한다.



Fig. 20 Free body diagram of Link1

$\sum M$

 $= (F_{-body_{-}vidie4} + F_{-link2}) \times L_{-link1} \times \cos\theta + F_{-link1} \times 0.5 + L_{-link1} \times \cos\theta - T_{-link1} = 0 \quad (24)$

Link 1의 자유물체도 모멘트 평형식을 계산하여 θ에 대한 T_LINK 1의 관계식을 도출하고 MATLAB 을 활용하여 (24)식에 대한 그래프를 그려낸다

3.2.2 Recurdyn Simulation

시뮬레이션을 통해 *T_link*2-δ 그래프, *T_link*1-θ그래프를 도출하고 수식적으로 계산한 정역학 평 형식 계산값과 비교한다. 이때 Table 2와 같이 θ,δ의 각도를 설정한다.

	Initial Degree	Final Degree
link1 θ	0 °	45 °
link2 δ	50 °	60 °

Table 2 Initial Degree and Final Degree of link

모든 물리적 특성(질량, 길이 등)을 실제 로봇과 맞춘 후 링크 구조를 활용하여 차체를 들어 올리는 시 뮬레이션을 진행한다.



Fig. 21 Initial Degree of Simulation

Fig. 22 Final Degree of Simulation

김호영 · 박정인 · 김범준



Fig. 23 Recurdyn Simulation T_{link1} graph according to θ (Theta_link1)



Fig. 24 Matlab T_{link1} graph according to θ (Theta_link1)

Fig. 23과 Fig. 24 Table 3을 통해 MATLAB과 Recurdyn을 통해 도출한 그래프 값이 매우 유사함을 확 인하였다.

	Recurdyn	Matlab
최대	<i>θ</i> = 2.18 °일 때 3.051N-m	<i>θ</i> = 2.18 °일 때 3.0291N-m
최소	<i>θ</i> = 44.4 °일 때 1.917N-m	<i>θ</i> = 44.4 °일 때 2.1658N-m

Table 3 Comparison of T_{link1} results of Recurdyn and Matlab

그래프를 통해 최대 토크를 계산하여 Link 1에 필요한 모터를 선정한다. 또한 링크 구동에 의해 발생 하는 각도 변화에 따른 토크를 알 수 있어 본 로봇의 움직임을 정확히 해석할 수 있다.



Fig. 25 Free body diagram of Link2

자유물체도를 통해 외부에서 작용하는 힘을 파악하고 뉴턴의 제1 법칙을 활용하여 정역학 평형식을 도출한다

$\sum M$

 $= F_{-body_{-}vidie4} \times L_{-link2} \times \cos\delta + F_{-link2} \times 0.5 + L_{-link2} \times \cos\delta - T_{-link2} = 0 \quad (25)$

Link 2의 자유물체도 모멘트 평형식을 계산하여 δ에 대한 T_LINK 2의 관계식을, MATLAB을 활용하여 (25) 식에 대한 그래프를 그려낸다



Fig. 26 Matlab T_{link2} graph according to δ (Theta_link2)





Fig. 27 Recurdyn Simulation T_{link2} graph according to δ (Theta_link2)

	Recurdyn	MATLAB
최대	<i>θ</i> = 60 °(-10.01)일 때 -0.633N-m	<i>θ</i> = 60 °일 때 -0.722021N-m
최소	<i>θ</i> = 50.17 °(-0.1698)일 때 -0.942N-m	<i>θ</i> = 50.17 °일 때 -0.9249N-m

Table 4 Comparison of T_{-link2} results of Recurdyn and Matlab

link2 δ는 Recurdyn에서 50°가 0°로 인식된다. 따라서 (50°) 0°부터 시계방향 (60°)10°증가하는 것으로 해석한다. Fig. 26과 Fig. 27 Table 4를 통해 MATLAB과 Recurdyn 시뮬레이션을 통해 도출한 그 래프 값이 매우 유사함을 확인하였다.

그래프를 통해 최대 토크를 계산하여 Link2에 필요한 모터를 선정한다. 또한 링크 구동에 의해 발생하는 각도 변화에 따른 토크를 알 수 있어 본 로봇의 움직임을 정확히 해석할 수 있다

3.3 ESP32 CAM + OV2640을 활용한 실시간 영상 스트리밍

소형 비디오카메라가 내장된 ESP32 WIFI 모듈을 활용하여 주변 환경을 인식하고 사용자가 원격으로 화면을 통해 확인할 수 있도록 하여 로봇의 탐사 및 구조기능 역할을 보조한다. 동작 원리는 ESP32에 아두이노로 웹 서버를 올리고 웹 서버를 통해 JPG 스트림을 전송하는 방식이다. ESP32-CAM에는 USB 커넥터가 없으므로 Arduino mega 2560을 활용하여 프로그램을 업로드한다.

프로그램용 UART 포트 GPIO1과 GPOI3를 활용한다. GPIO1(ESP32 CAM) - TX(Arduino) GPIO3(ESP32 CAM) - RX(Arduino) 방식으로 연결한다. 또한 Arduino mega 2560에 업로드 하기 위해서는 ESP32-CAM의 GPIO 0과 GND를 연결한 후 진행한다.



Fig. 28 Remote streaming using ESP32 CAM

Fig. 28과 같이 로봇의 전방에 설치된 소형 카메라 OV2640을 통해 사용자가 한눈에 재난현장을 확인 할 수 있으며 이를 통해 요구조자 수색 및 탐사 기능을 수행한다.

3.4 로봇의 기울기 측정을 위한 MPU6050 센서값 계산 및 상보필터 적용

MPU6050은 3축 가속도 센서와 3축 자이로 센서가 통합된 센서로 아두이노와는 I2C 통신 프로토콜을 통해 값을 주고받는다. 이때, SDA 핀을 통해 데이터를 주고받고 SCL은 동기화를 위한 CLOCK 역할을 담당한다.

가속도 센서는 3차원 공간상 좌표축을 기준으로 기울어진 각도를 측정하고 자이로 센서는 좌표축에서 회전한 정도를 나타낸다. MPU 6050 센서값을 통해 차체의 좌우 기울어짐 정도를 나타내는 roll, 앞뒤 기 울어짐 정도와 관련된 pitch 값을 해석해 본 로봇의 수평유지 기능을 수행할 수 있도록 한다.



Fig. 29 Principle of MPU6050

이때 MPU 6050 센서 내의 두 가지 센서를 분리하여 쓰기에는 각각 단점이 존재한다. 가속도 센서는 움직임이 없는 환경에서 매우 정확한 값을 가지지만 진동과 같은 움직임이 심한 상태에서는 중력과 가 속도가 혼합되기 때문에 정적인 상태에서 사용해야 하는 한계가 존재한다 자이로 센서는 민감도가 낮아 안정적으로 값을 측정할 수 있으나 적분 과정으로 인해 시간이 지날수록 오차가 누적되는 단점이 존재 한다. 따라서 각각의 센서를 조합하여 실시간으로 최적의 기울기를 얻기 위하여 상보필터를 적용하여 값을 받아들인다.

상보필터는 고주파 노이즈를 가진 가속도 값과 저주파 노이즈를 가진 자이로 값을 상호보완하여 센서 값을 정확하게 필터링한다.

alpha = 0.96 (26) angle_x = alpha*gyro_angle_x + (1.0 - alpha)*accel_angle_x (27) angle_y = alpha*gyro_angle_y + (1.0 - alpha)*accel_angle_y (28)

alpha는 자이로 값과 가속도 값의 반영비율로 필터링 결과를 확인하며 적절히 선정한다. 상보필터는 설계가 간단하고 연산량이 적어 필터링 기법으로 선정하였다. I2C통신을 위해 아두이노의 wire 라이브러 리를 활용하며 roll, pitch 각도를 얻기 위해 삼각함수 원리를 활용한 관계식을 정립하고 상보필터를 활용 한다.



MPU6050

Fig. 30 Measure the roll, pitch angle using the MPU6050

Fig. 30은 실제로 본 로봇의 몸체 중앙에 mpu6050을 설치한 후 실시간으로 기울어진 정도를 받아들이 는 모습이다.

3.5 역기구학을 통한 수평제어

MPU 6050 센서를 통해 차체의 기울어진 각도를 받아들이고 수평을 유지하기 위해서는 차체의 구동부 와 몸체 사이에 설치된 링크 구조를 정확히 제어해야 한다. 따라서 역기구학을 활용하여 각도 변화로 인한 궤적변화를 계산한다.

모터는 차체를 들어올리기 위한 구동 토크 계산을 고려하여 Dynamixel MX-64T, AX-18A을 이용하며 원 하는 각도만큼 구동할 수 있도록 Goalposition기능을 활용한다.



Fig. 31 Shape of Link Structure

$$x^{2} + y^{2} = l_{1}^{2} + l_{2}^{2} - 2l_{1}l_{2}\cos(180 - \theta_{2}) \quad (29)$$

$$\cos\theta_{2} = \frac{x^{2} + y^{2} - l_{1}^{2} - l_{2}^{2}}{2l_{1}l_{2}} = D \quad (30)$$

$$\theta_{2} = \cos^{-1}(D) \quad (31)$$

$$\sin(\theta_{2}) = \pm\sqrt{1 - D^{2}} \quad (32)$$

$$\theta_{2} = \tan^{-1}\frac{\pm\sqrt{1 - D^{2}}}{D} \quad (33)$$

$$\theta_{1} = \tan^{-1}(y/x) - \tan^{-1}(\frac{l_{2}\sin\theta_{2}}{l_{1} + l_{2}\cos\theta_{2}}) \quad (34)$$

역기구학 해석을 통해 계산한 값만큼 로봇의 몸체가 수평-수직이동을 하도록 알고리즘을 작성한다.

3.6 구동을 위한 원격제어

재난현장에 구조자가 투입될 수 있는지에 따라 블루투스와 객체 추종 기능 2가지를 구현하였다. 인력 이 투입될 수 없는 상황에서는 블루투스 기능을 활용하여 원격으로 로봇을 조종하도록 한다. ESP32 CAM을 활용하여 실시간으로 현장을 모니터링하고 사용자가 모바일 기기를 통해 로봇의 방향을 제어한 다.

인력투입이 가능한 현장인 경우 구조자가 육체적 부담을 덜고 재난현장의 상황 파악에만 오직 집중할 수 있게 사람 추종 기능을 추가하였다. 객체 추종 시스템 구성을 위하여 Qorvo사의 DWM 1001C 모듈을 활용하였다. UWB 센서와 Arduino mega 2560 사이에 UART 통신을 통해 거리값을 수신하도록 한다.

객체 추종 시스템의 알고리즘을 위해서 3개의 UWB 센서를 활용한다. 사람이 1개의 Anchor를 지니고 로봇의 전면부에 2개의 Tag용 UWB 센서를 지니도록 한다. Distancel과 Distance2의 값을 비교하여 Distancel의 값이 Distance2의 값보다 클 경우, 로봇은 우회전하고 반대 상황일 때는 좌회전하도록 한다. 또한 Distancel과 Distance2의 차이가 일정 수준 이하일 땐, 로봇은 계속 직진한다. 각 거리의 차이에 따 라 모터를 다른 속도로 회전시켜, 로봇이 사람을 따라 주행할 수 있도록 한다. Fig. 32는 객체 추종 시스 템의 구성을 시각적으로 나타낸 모습이다.



Fig. 32 Principle of Following Human system using UWB sensor

4. 결과 및 토의

4.1 완성된 설계 내용

현재 재난현장에서 구난 작업을 수행하는 모습은 Fig. 33 (a)와 같다. 요구조자 한 명을 이송하기 위해 최소 두 명 이상의 인력이 요구되고 구조자의 육체적인 부담이 상당하다. 본 로봇을 활용하여 관절부에 적용된 기구학적 구조와 4개의 구동 캐터필러 및 연결 링크로 이동 시 기울기 변화를 최소화하였다. 5 linkage closed link가 적용된 관절부 로 몸체의 수평과 무게 중심을 유지한다. 캐터필러 사이의 링크를 통해 더 유연한 구동이 가능하도록 한다. 몸체 위 의 환자이송부는 X자형 링크와 Rack and pinion, 컨베이어 벨트 구조를 적용하여 환자가 최종 위치에 안정적으로 이 송될 수 있도록 한다. 제어적인 측면으로선 원격 구동을 위해 블루투스와 UWB 센서를 활용하고 외부에서 내부 상황 을 모니터링 하여 상황에 맞는 판단을 즉각적으로 할 수 있도록 카메라 센서를 로봇의 전면부에 부착하였다.



(a) Current rescue operations(b) Designed rescue operationsFig. 33 Comparison of rescue operations

로봇의 완성된 모습은 Fig. 34와 같다. Fig. 34(a)는 로봇이 경사면에서 수평유지를 하는 모습이다. Fig 34(b)는 로봇이 최종 위치에 도달하여 환자를 컨베이어 벨트로 이동시키는 모습이다.



(a) Leveling

(b) transfer of patients

Fig. 34 Robot operations

4.2 타제품과의 차별성

- 비평탄 지형에서의 수평유지 : Fig. 35(a),(b) 로봇들은 비평탄 지형에서의 수평유지가 이루어지지 않아 험지 극복 시 몸체가 불안정하기 때문에 구난 활동에 사용되기에 부적합하다. 하지만 '비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트 랙 로봇'은 비평탄 지형 이동 시 MPU 6050 센서를 통해 받은 자이로&가속도 값을 이용하여 관절부 링크를 제어 하고 몸체 수평이 유지되도록 하여 안정한 요구조자 수송이 가능하다.
- 2) 몸체와 캐터필러 사이의 기구학적 구조: 5 Linkage Closed Link를 통해 안정적이면서 정밀한 제어가 가능하다. 또한, Closed Link 구조로 Open Link인 경우와 비교하였을 때, 접지력이 크고 안정적이다. Fig. 3에서 언급한 Link1과 Link2만 존재할 때와 비교하여 하중이 캐터필러에 고르게 분산된다.
- 3) <u>캐터필러 구조의 이점</u>: Fig. 35(a),(b) 로봇들은 하나의 긴 캐터필러로 로봇을 구동한다. 하지만 본 로봇은 두 개 의 캐터필러를 추가적인 링크로 연결한 구조로 기존의 캐터필러보다 유연한 구동이 가능하다. 이러한 구조를 통해 험지 극복 시 몸체의 기울기 변화가 줄어들어 안정성이 높다.
- 4) 블루투스와 객체 추종을 활용한 원격 구동 : 재난현장 내에서 구조자의 인명사고가 빈번히 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서 원격 구동을 위한 블루투스와 객체 추종을 고안하였다. 원격 구동을 비롯하여 로봇의 관절부 각도 변화까지 블루투스를 활용하여 모니터링한다. 2차 재난의 우려가 있는 경우, 블루투스 모듈을 활용한 원격 제어로 구난 작업 및 구호품 전달 기능을 수행하고 2차 재난의 우려가 없고 인명 구조 작업을 진행하는 경우 구조자의 육체적인 부담을 최소화할 수 있도록 객체 추종 기능을 통해 로봇이 구조자를 따라올 수 있도록 한다. 로봇이 구난 작업을 진행한 후 환자 이송부의 높이를 조절하고 요구조자를 원하는 위치에 최종적으로 이송할 수 있도록 옥.3절에서 언급한 X자 링크와 Rack and pinion, 컨베이어 벨트를 블루투스로 제어한다.

5) <u>내부 상황 모니터링</u> : ESP32 카메라 모듈을 로봇 전방에 설치하여 원격 구동 시 사용자가 외부에서 내부의 로봇 상황을 모니터링하고 적절히 제어한다. 재난현장에서 발생하는 구조대원의 인명피해를 감소시킬 수 있다.



4.3 활용방안 및 기대효과

본 로봇의 활용 시나리오는 다음과 같다. 재난현장에 투입된 상황을 가정하여 설명하면

- (1) 구조대원이 현장에 투입될 수 없는 상황일 시, 블루투스를 통한 원격조종으로 요구조자의 위치까지 로봇을 이동시키고 카메라로 내부 상황을 파악한다. 2차 재난의 우려로 구조대원이 투입 불가능한 상황일 시, 블루 투스를 통한 원격 제어로 내부 상황을 파악하고 구난 작업 혹은 구호품 전달 작업을 수행한다. 2차 재난의 우려가 없어 구조대원이 현장에 투입될 수 있는 상황일 시, 사람 추종 기능을 이용하여 요구조자의 위치까 지 로봇과 이동한다.
- (2) 요구조자를 로봇의 몸체에 실은 후, 동일한 방식으로 목표 지점(ex, 구급차)까지 환자를 이송한다. 이때, 로 봇의 링크 제어를 통한 몸체 수평유지 기능으로 안정적인 이송 및 험지 극복이 가능하다.
- (3) 목표 지점 앞까지 도달하면 블루투스로 X자 링크를 작동하여 로봇 몸체의 높이를 상승시키고 목표 지점과 동일한 높이로 위치시킨다.
- (4) Rack and pinion 구조와 컨베이어 벨트에 적용된 모터를 작동시켜 요구조자를 목표 지점(ex, 구급차)으로 이동시킨 후 해당 과정들을 반복한다.

이러한 기능들로 2차 재난에 의한 구조작업자의 인명피해 감소 및 구조 작업 중 육체적 부담을 줄일 수 있다. 재난 상황에서 골든타임 내에 환자를 이송하거나 구조 골든타임 연장을 위한 구호물(물/약물/영양액)을 전 달할 수 있다. 비평탄 지형에서의 안정적인 요구조자 수송이 가능하고 구조, 탐사, 수송 등 다양한 분야에서 활용할 수 있어 지속적인 정보 수집 및 적극적인 대응이 가능할 것으로 기대된다. 5. 결 론

재난현장에서 구조자의 육체적인 부담을 줄이고 신속한 구조 작업을 위해 '비평탄 지형 극복을 위한 변형 이중트랙 로봇'을 구상하였다. 기존 로봇은 험지 극복은 가능하지만, 몸체의 수평유지가 되지 않고 비평탄 지형 이동 시 안전성이 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문은 이런 문제를 해결하기 위해 MPU 셴 서로 기울기 값을 측정하여 역기구학 계산을 통한 값을 관절부 모터에 대입하여 몸체가 언제나 수평을 유지하도록 제작하였다. 5 Linkage closed link가 적용된 관절부의 기구학적 설계로 구동 캐터필러의 접지 력을 증가시키고 무게중심의 변화 없이 비평탄 지형을 극복할 수 있도록 하였다. 4개의 구동 캐터필러 와 캐터필러 사이의 연결 링크로 인해 전방 캐터필러의 이동이 후방 캐터필러에 영향을 주며 비평탄 지 형을 더욱 안정적으로 극복할 수 있다. 로봇의 기능을 효과적으로 활용하기 위해 블루투스와 UWB 센서 를 활용한 객체 추종 기능을 추가하여 원격 제어가 가능하게 하였다. 원격 제어 중 외부에서 내부 상황 을 파악하기 위해 로봇의 전방부에 카메라 센서를 장착하여 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하였다. 전체적인 구난 작업 동안 구조자의 육체적인 부담이 최소화되도록 몸체 위에 X자 링크와 Rack and pinion, 컨베이어 벨트 구조가 적용된 화자이송부를 장착하였다. 이를 통해 위험 지역에서 요구자를 수송 해 온 후에 안전 지역에 놓은 후 다시 구난 작업을 재개할 수 있는 운영 프로세스를 개발하였다. 위험 하고 불안정한 환경에서 구조자의 안전성을 높이고 2차 재난에 의한 인명피해를 최소화하며 신속한 구 조 작업이 가능하다. 본 로봇은 구조가 주된 목적이나, 탐사, 물품 수송 등의 기능 역시 수행할 수 있어 경제적인 효율성이 높고 군사 현장, 건설 현장 등 다양한 방면에서 상용화가 기대된다.

후 기

9개월 전 시스템 비전 연구실의 학부 연구생이 되어 동기들과 함께 팀을 구성하고 대회 준비를 시작 하였습니다. 로봇 제작 프로젝트는 예상치 못한 문제와 도전이 가득한 경험이었습니다. 예상치 못한 부 분에서 빈번하게 문제가 발생하였고 해결을 위해 늦은 새벽까지 팀원들과 노력하였습니다. 로봇의 완성 도가 높아질수록 발생하는 문제들은 난해했고 팀원들과의 긴밀한 의사소통과 협업의 중요성을 배웠습니 다. 아이디어 구상부터 제작까지 모든 과정을 진행하며 저의 부족함을 깨달았습니다. 로봇의 외관과 내 부 구조를 디자인하면서, 기능성과 시각적 매력을 동시에 고려하는 건 어려웠지만 창의성을 향상하는 좋은 기회였습니다. 대회를 진행하면서 엔지니어가 되기 위한 초석을 다질 수 있었고 꿈에 한 발짝 다 가가는 계기가 되었습니다. 이번 경험을 바탕으로 꾸준히 노력하여 훌륭한 엔지니어가 되도록 하겠습니 다. 마지막으로 좋은 피드백을 해주신 신동원 교수님과 3D 프린팅을 지원해 준 금오공과대학교 연구실 에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hwang Kim, Dongmok Kim, Hojoon Yang, Kyouhee Lee, Kunchan Seo, Doyoung Chang, & Jongwon Kim. Development of a wall climbing robot with vacuum caterpillar wheel system.
- (2) Giuk Lee, Kunchan Seo, Junhwan Park, Hwang Kim, Bongjoo Lee, Jeaho Kim, & Jongwon Kim. Design

of a transformable track mechanism for wall climbing robots. 한

- (3) D.K. Choi, S.W. Lee, D.Y. Change, N.S. Kim, H.S. Hong, & J.W. Kim. Development of Mobile Mechanism on Rough Terrain with Rocker-Bogie and Caterpillar.
- (4) Su-Hong Eom, Ji-An Jung, Won-Young Lee, Jin-Woo Sin, & Eung-Hyuk Lee (2022). A Study on the Correction of Straight Driving of Wheelchair Assistive Device to Move the Stairs with Wheel Type Caterpillar and Seat Position Variable Structure. Journal of IKEEE, 26(4), 79-90.
- (5) Ha-Jun Kim, Jun-Buem Park, & Jae-Young Pyun (2015). Human Detection and Ranging System Using IR-UWB Radar. The Journal of Korean Institute of Information Technology, 13(5), 1-10, 10.14801/jkiit.2015.13.5.1
- (6) Hak Sang Jung, Yoon Ho Choi, & Jin Bae Park. Posture Control of Quadruped Robot Using Gyroscope.