



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

2-자유도 적응형 변형바퀴 로봇의 기구학 기반 궤적 최적 설계

Optimal trajectory planning for 2-DOF adaptive
transformable wheel robot based on kinematics

2018 년 6 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 기 중

2-자유도 적응형 변형바퀴 로봇의 기구학 기반 궤적 최적 설계

Optimal trajectory planning for 2-DOF adaptive
transformable wheel robot based on kinematics

지도 교수 김 종 원

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018 년 4 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 기 중

김기중의 공학석사 학위논문을 인준함

2018 년 6 월

위 원 장 _____ 이 건 우 _____ (인)

부위원장 _____ 김 종 원 _____ (인)

위 원 _____ 이 윤 석 _____ (인)

초 록

바퀴 구조는 평지 주행에 효과적인 형태를 가지고 있어 인간 생활 환경에서 동작하는 다양한 종류의 서비스 로봇에 사용되는 구조이지만, 턱 또는 계단과 같은 장애물에 대해서는 이동성의 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 다양한 크기의 턱 장애물을 효과적으로 극복할 수 있는 적응형 변형바퀴의 개념이 제시되었다.

적응형 변형바퀴는 기존의 다른 변형 바퀴와 달리 높은 자유도를 가지고 있어 주행과정에서 바퀴의 움직임 조절할 수 있고, 이를 통해 장애물을 보다 효과적으로 극복할 수 있다. 본 논문은 이러한 적응형 변형바퀴가 턱 장애물을 주행하는 과정에서 발생하는 흔들림을 최소화하고 바퀴가 로봇 본체에 미치는 안전성, 효율성을 높이기 위해 바퀴 중심점의 궤적을 최적화하는 연구에 대해 다룬다. 장애물과 바퀴에 대한 기구학적 분석을 통해 장애물 극복 과정에서 바퀴가 반드시 통과하는 지점을 확인하였고, 이를 만족하는 다양한 궤적에 대한 최적화 목적함수와 제한조건을 선정하여 주어진 조건에서 최적의 바퀴 움직임을 찾는 최적 설계 방법론을 도출하였다. 최적화 결과로써 최적의 바퀴 중심 경로 외에 바퀴의 운동을 위한 설계변수 변화량 궤적 또한 확인하였다

주요어 : 변형 바퀴, 턱 장애물, 안정성, 최적화, 궤적 계획

학 번 : 2016-29038

목 차

1. 서론.....	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 선행 연구 조사	3
1.3 연구 목표 및 내용.....	6
2. 적응형 변형 바퀴 구조의 기구학 해석	7
2.1 적응형 변형바퀴의 개념 및 설계변수	7
2.2 턱 장애물 주행 과정	9
3. 최적 궤적 결정 방법.....	12
3.1 최적화 목적함수	12
3.2 경로 생성	14
3.3 궤적 계획	17
3.4 제한 조건	20
4. 최적화 결과 분석.....	23
4.1 최적화 알고리즘	23
4.2 최적화 전후 결과 비교.....	25
5. 결론	31
참고문헌	32
Abstract	34

표 목차

[표 1] 장애물 크기에 따른 최대 변형 크기.....	10
[표 2] 다양한 조건에서의 최적화 결과.....	29

그림 목차

[그림 1] 서비스 로봇 예시.....	1
[그림 2] 바퀴의 턱 장애물 통과 과정	2
[그림 3] 바퀴+링크 구조 로봇 예시	5
[그림 4] 휠 트랜스포머 형태.....	5
[그림 5] quattroped 형태.....	5
[그림 6] 적응형 변형바퀴의 형태 및 개념	7
[그림 7] 턱 장애물 통과를 위한 바퀴의 변형 형태.....	9
[그림 8] 장애물에 따른 바퀴 변형 형태	10
[그림 9] 선행 변형에 따른 β 의 차이	11
[그림 10] 선행 변형을 포함하는 주행 과정	11
[그림 11] 전체 경로 생성.....	16
[그림 12] 바퀴 중심점과 접촉점에 의한 바퀴 자세 도출.....	18
[그림 13] step 별 바퀴 중심점, 접촉점 위치	19
[그림 14] 바퀴의 간섭 여부 확인점.....	20
[그림 15] 주행 과정에서 발생하는 간섭 상황	22
[그림 16] 궤적 최적설계 알고리즘.....	24
[그림 17] 최적화 이전 주행 과정	26
[그림 18] 최적화 이후 주행 과정	28

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 서비스 로봇에 대한 연구가 증가하는 추세에 따라 인간 생활 환경에서 동작 가능한 로봇의 중요성 또한 높아지고 있다. 현재 여러 분야에서 다양한 종류의 서비스 로봇이 개발되어 사용되고 있으며 배달 로봇, 텔레프레젠텐스 로봇 등이 대표적이다. 이 중 인간 생활 환경에서의 이동성은 로봇의 구동 방식에 직접적인 연관을 가지고 있다.

그림1은 현재 사용되고 있는 서비스 로봇의 예시로 대부분 바퀴 구조를 기반으로 구동한다. 바퀴 구조는 필요 에너지가 적고 부드러운 궤적을 빠른 속도로 주행할 수 있다는 점에서 평지 주행에 가장 적합한 구조로 평가되고 있다. 따라서 험지 주행 로봇이 다리, 트랙 등 다양한 구조를 이용하는 것과 달리 평지를 주로 다니게 되는 서비스 로봇 플랫폼은 바퀴 구조를 가장 일반적으로 사용한다.



그림 1 서비스 로봇 예시
(a) 피자 배달로봇 (b) 공항 안내로봇 (c) 텔레프레젠텐스 로봇

하지만 바퀴 구조는 평지가 아닌 지형에서는 이동성의 한계를 가지고 있다. 인간 생활 환경은 대부분 평지로 이루어져 있지만 계단이나 보도블럭 같은 턱 장애물 또한 쉽게 마주할 수 있다.

바퀴가 턱 장애물을 올라갈 때는 턱의 수직면과 모서리를 이용하며, 수직면을 타고 올라가는 방식으로 장애물을 극복한다. 턱 장애물에서의 바퀴 이동성의 한계는 이 수직면에서 주로 발생하는데, 그림2 (a)와 같이 바퀴가 수직면에 계속 접촉하기 위해서는 지면에 닿아 있는 다른 바퀴가 밀거나 당겨 주어야 하며, 이를 위해서는 바퀴와 지면사이의 높은 마찰계수가 필요하다. 또한 바퀴가 수직면에 닿는 순간 충격을 방지하기 위해서는 바퀴의 속도가 낮아야 하기 때문에 전체 속도가 느리고, 바퀴가 수평으로 접근해 수직으로 올라가기 때문에 궤적의 기울기가 갑작스럽게 변하게 되어 불안정한 모습을 보인다. 더욱이 이런 수직면이 존재하지 않는 경우에 그림2 (b)와 같이 바퀴가 턱에 끼여서 주행이 불가능하게 되는데, 이를 방지하기 위해서는 지름이 턱 높이의 2배 이상으로 큰 바퀴가 필요하다.

이렇듯 바퀴 구조는 턱 장애물을 통과하기 어렵다. 하지만 이러한 이동성의 한계를 극복할 수 있다면 인간 생활 환경에서 효과적으로 사용될 수 있는 주행 플랫폼을 만들 수 있다.

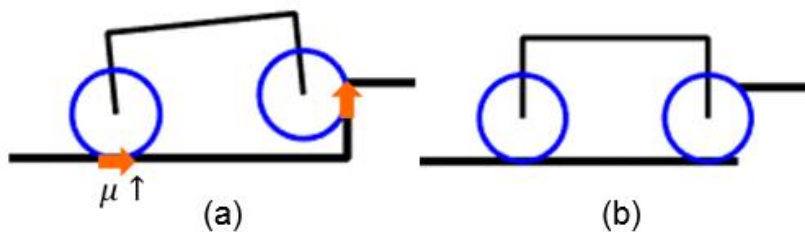


그림 2 바퀴의 턱 장애물 통과 과정 (a) 수직면 존재 (b) 수직면 없음

1.2 선행연구 조사

바퀴 구조의 이동성 한계를 극복하기 위한 선행 연구는 크게 2가지 종류로 구분 할 수 있다.

1.2.1 바퀴 구조에 수동형 링크를 추가한 형태의 로봇

라커-보기(Rocker-Bogie) [1]는 바퀴에 라커와 보기 구조를 이용한 형태로 화성탐사로봇에 사용되는 등 널리 알려진 구조이다. 험지를 주행할 때도 본체의 흔들림이 적고 일반적인 바퀴 구조보다 높은 장애물을 낮은 마찰계수로 통과할 수 있는 특징[2]을 이용해 계단 주행에 대한 연구가[3] 진행된 바 있다. Shrimp rover [4]는 라커-보기를 변형한 구조로 스프링을 부착한 링크를 추가해 험지 주행시의 이동성을 향상시켰다. CRAB [5]은 4개의 보기 구조를 이용한 구조로 바퀴의 하중 분배를 고르게 만들어 필요 마찰계수를 감소시켰다.

바퀴-링크 구조를 통해 로봇은 턱 장애물을 보다 효과적으로 극복할 수 있지만, 장애물 극복을 위해 수직면을 반드시 필요로 하는 경우가 대부분이며 여전히 장애물 통과에 많은 시간이 걸린다는 한계점을 가지고 있다.

1.2.2 변형바퀴를 이용하는 로봇

일반적인 원 상태에서 다른 모양으로 형태를 바꿀 수 있는 변형 바퀴를 이용한 로봇에 대한 연구이다. Wheel-Transformer [6]는 3개의 로브로 구성된 바퀴가 벌어지는 1자유도 변형바퀴를 이용해 바퀴 반지름의 3.5배 높이의 장애물을 효과적으로 극복할 수 있다. 또한 장애물과의 마찰을 이용하여 별도의 구동 없이 변형할 수 있다는 특징을 가지고 있으나 변형 과정에서 수직면을 필요로 한다. Quattroped [7]는 반원 형태로 변형되는 바퀴를 이용한 로봇으로, 바퀴가 2자유도를 가지고 있어 주행 궤적을 조절할 수 있으며 수직면이 없는 턱을 극복할 수 있다. 하지만 턱 주행과정에서 2차례 정지하고 바퀴를 회전시켜야 한다는 한계점을 가지고 있다. 변형 바퀴를 이용한 로봇은 일반적인 바퀴 구조에 비해 높은 장애물 극복이 가능하고 속도가 빨라지는 등 이동성이 증가했지만 수직면이 없는 턱 장애물의 통과와 빠른 속도의 주행이라는 2가지 조건을 모두 만족하는 경우는 없었고, 변형 형태가 하나뿐이기 때문에 다양한 크기의 장애물에 대한 고려가 부족하다.



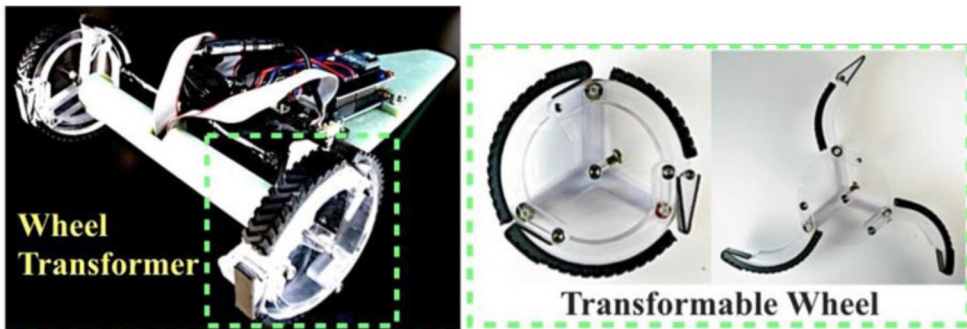
(a)

(b)

(c)

그림 3 바퀴+링크 구조 로봇 예시 [1-5]

(a) 라커-보기 (b) Shrimp rover (c) CRAB

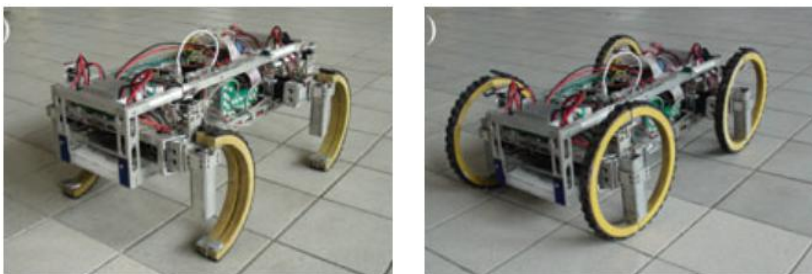


(a)

(b)

그림 4 휠 트랜스포머 [6]

(a) 전체 로봇 형상 (b) 휠 트랜스포머 구조



(a)

(b)

그림 5 quattroped [7]

(a) 변형 바퀴 형태 (b) 원형 바퀴 형태

1.3 연구 목표 및 내용

이러한 한계를 극복하기 위해 3자유도 바퀴를 이용해 장애물 크기에 맞춰진 형태로 변형이 가능한 적응형 변형바퀴가 제시되었다. 적응형 변형바퀴는 최종적으로 턱 주행이 가능한 역진자 구조 로봇에 사용되는 것이 목적으로, 이를 위해서 바퀴는 이동성 외에도 높은 안정성을 필요로 한다. 본 논문에서는 바퀴의 안정성에 대한 성능 지표를 정의하고 이를 기반으로 평지에서 원형 바퀴 상태로 출발, 변형을 통해 턱 장애물 통과 후 다시 원형 바퀴로 돌아오기 까지의 주행 과정에 대한 바퀴 중심의 이동 궤적을 최적화하기 위한 연구를 진행하였다.

2장에서는 새로운 적응형 변형바퀴의 개념을 소개하고 설계변수를 정의하였다. 또한 턱 장애물을 극복하기 위한 바퀴의 형태를 기구학적으로 분석하여 장애물 극복 과정에서 필수적으로 통과하는 지점을 확인하였다. 3장에서는 적응형 변형바퀴 로봇의 성능지표를 정의하였고, 바퀴 중심점의 궤적 계획, 제한 조건과 최적설계 변수 등 최적화 방법을 논의하였다. 마지막으로 4장에서는 최적화 이전과 이후의 결과를 비교하고 다양한 조건에서의 최적화 결과를 정리 결과를 분석하였다.

2. 적응형 변형바퀴 구조의 기구학 해석

2.1 적응형 변형바퀴의 개념 및 설계변수

적응형 변형바퀴는 턱 장애물을 효과적으로 극복하기 위한 바퀴로, 현재까지 연구된 대부분의 변형바퀴가 한가지 형태로만 변형되는 것과 달리 다양한 크기의 장애물에 모두 대응할 수 있도록 연속적인 변형이 가능한 것이 특징이다. 전체 바퀴는 반지름의 크기는 125mm인 원형바퀴가 3개로 나뉘어진 형태의 로브로 구성되며 r , θ 방향의 2 자유도 변형이 가능하다.

평지에서는 가장 효과적인 원형 바퀴 상태로 주행하고, 장애물을 마주하는 경우 그림6과 같이 원형 상태에서 3개의 로브가 벌어지는 형태로 변형하여 통과한다. 이 때 r 방향의 최대 변형량은 220mm 이고,

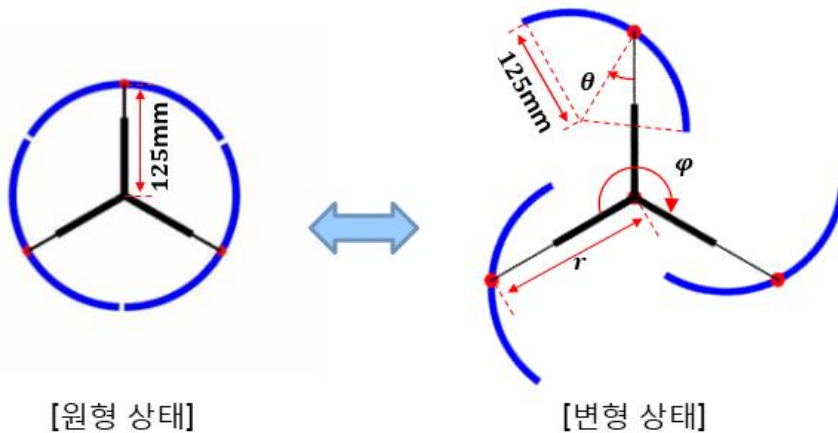


그림 6 적응형 변형 바퀴 개념

θ 방향의 최대 변형량은 $\pm 40^\circ$ 으로 계단을 포함한 실내환경에 존재하는 대부분의 턱 장애물에 적용할 수 있으며, θ 의 방향에 따라 대칭적인 구조로 변형이 가능해서 앞뒤 방향의 장애물을 모두 대응할 수 있다. 각각의 로브는 원형 바퀴의 일부로 주행과정에서 항상 지면과 구름 접촉(rolling contact)을 유지하기 때문에 점 접촉(point contact)과 회전운동 구간이 존재하는 다른 변형바퀴에 비해[7] 적응형 변형바퀴는 안정적인 움직임이 가능하다.

2.2 턱 장애물 주행 과정

턱 장애물은 지면의 높이가 갑자기 바뀌는 장애물로, 장애물의 높이 h 와 장애물까지의 거리 s 로 정의할 수 있다. 높이는 일반적인 실내환경에서의 최대 높이가 153mm 정도로 알려져 있으며, 연속된 턱 장애물이라고 볼 수 있는 계단 장애물의 경우 공공 계단의 최대 높이가 180mm로 정해져 있다. 거리 s 는 그림7과 같이 로브 하나의 길이인 l 과 나머지 β_0 로 구분할 수 있다.

$$s = n \times l + \beta_0 \quad (0 < \beta_0 < l)$$

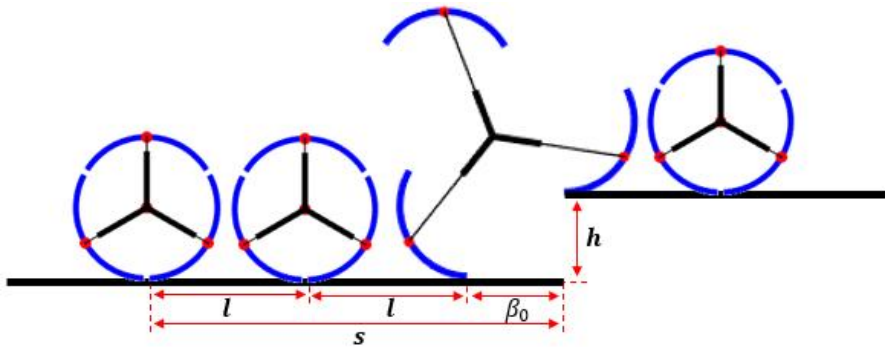


그림 7 턱 장애물 통과를 위한 바퀴의 변형 형태

β_0 는 변형 이전의 마지막 로브의 접촉점에서 장애물까지의 거리를 나타내는 값으로, 이 값에 의해 턱을 극복하는 순간의 바퀴 형태가 결정된다. β_0 의 크기가 클수록 경우 턱 극복을 위한 바퀴의 크기, 특히 r 의 크기가 증가하게 되며 β_0 가 l 에 가까운 경우 그림8과 표1와 같이 r 방향의 최대 변형 크기가 220mm를 초과하게 된다.

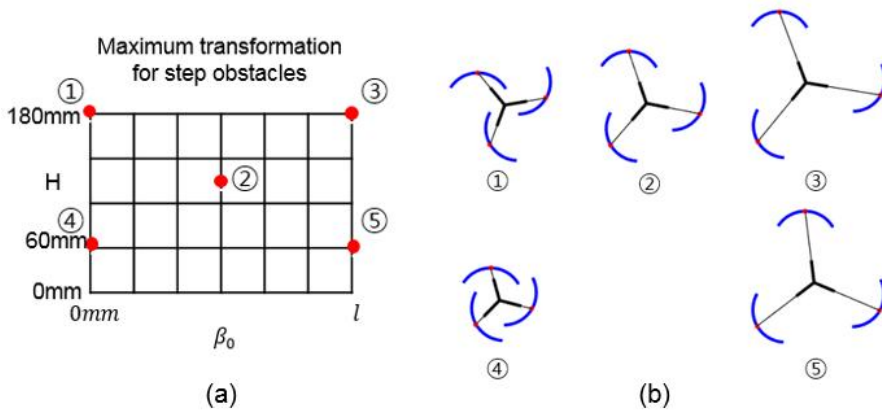


그림 8 장애물에 따른 바퀴 변형 형태
(a) 목표 장애물 크기 (b) 해당 장애물 통과를 위한 변형 형태

표 1 장애물 크기에 따른 최대 변형 크기

장애물 크기		최대 변형 크기	
h (mm)	β_0 (mm)	r (mm)	θ (°)
60	0	130	15.5
60	l	278	7.2
120	$0.5l$	212	19.1
180	0	163	39.7
180	l	295	20.6

β_0 의 크기를 변경하기 위해 선행 변형 과정을 도입하였다. 선행 변형 상태는 평지에서 r 방향 길이만 변화한 바퀴 변형 상태로, 기존의 턱 극복 과정과 동일하게 지면과 수직 접촉을 유지할 수 있다.

그림9는 같은 장애물 조건에 대해 선행 변형이 추가된 주행과정을 나타낸 것으로 β_0 가 $\Delta\beta$ 와 β 로 분리되어 바퀴 크기를 결정하는 변수가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

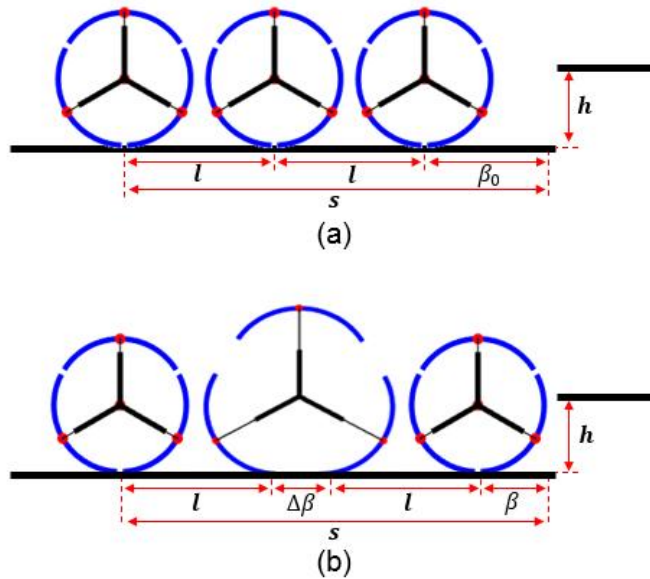


그림 9 선행 변형에 따른 β 의 차이

결과적으로 적응형 변형바퀴의 턱 장애물 주행 과정은 그림10과 같이 시작 위치에서 선행 변형 위치와 턱 극복 위치를 지나서 종료 위치로 가는 과정으로 볼 수 있다. 이 4 지점의 위치는 모두 주행 과정에서 필수적으로 통과하는 위치이며 이를 각각 P1, P2, P3, P4로 정의한다. P1과 P4는 시작지점과 종료지점으로 주행 과정의 변화와 무관하게 항상 동일한 점이지만, P2와 P3는 β_0 와 β 의 크기에 따라 위치가 결정된다

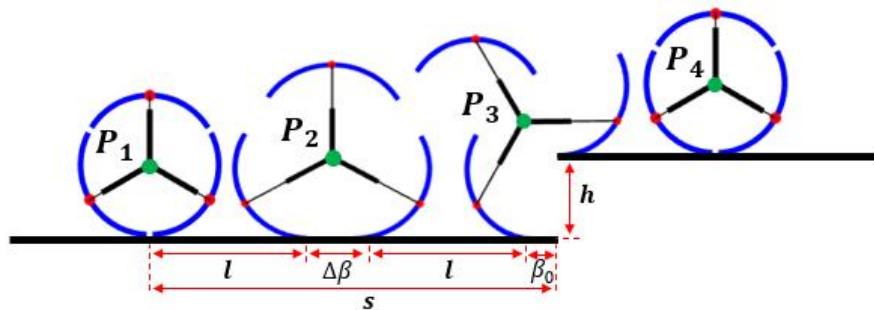


그림 10. 선행 변형과정을 포함하는 주행 과정

3. 최적 궤적 결정 방법

3.1 최적화 목적함수

서비스 로봇은 보통 폭이 좁은데 비해 무게중심의 위치가 높아 작은 충격이나 흔들림에도 안정성이 많은 영향을 받는다. 따라서 바퀴의 안정성은 주행 과정에서 플랫폼에 전달되는 충격과 흔들림을 최소화하는 것으로 정의할 수 있다.

바퀴에서 로봇 플랫폼으로 전달되는 충격량의 크기는 바퀴 중심점의 속도 변화로 나타낼 수 있다. 가속도의 크기가 가장 큰 순간이 곧 충격량이 최대가 되어 가장 불안정한 상황이며, 이 때의 안정성을 높이기 위해서는 가속도 크기의 최대값을 최소화하는 것이 필요하다.

접촉면이 수직하게 바뀌는 특성상 턱 장애물은 다른 험지에 비해 흔들림이 더 크게 발생한다. 적응형 변형바퀴의 흔들림은 바퀴의 접촉로브가 바뀌는 순간과 로봇이 장애물을 극복하는 순간에 크게 발생하는데, 이는 직선 경로 주행에 비해 안정성에 큰 악영향을 끼치는 동시에 경로의 길이가 늘어나게 되어 주행에 필요한 에너지를 증가시킨다.

흔들림은 궤적의 기울기 변화, 즉 속도의 방향 변화로 정의할 수 있고, 속도의 크기를 일정하게 하는 경우 방향은 충격량 기준과 유사하게 바퀴 중심점 가속도의 크기로 표현 가능하다. 에너지 효율과도 연관이 되기 때문에 흔들림은 전체 주행 과정에서 모두 감소되어야 하므로 가속도 크기의 평균값을 최소화하는 것이 필요하다.

마지막으로 가속도의 크기가 작지만 불연속적인 경우가 존재할 수 있는데, 이 경우 속도 변화에 의한 충격량 크기나 흔들림은 작지만 불연속적 변화 순간 로봇 플랫폼에 전달되는 힘이 급격하게 변화하고, 이는 역진자 구조 로봇의 안정성에 큰 영향을 준다. 따라서 가속도는 전체 주행 과정에 대해 진행 방향과 높이 방향 모두가 연속이 되어야 한다.

따라서 턱 장애물 주행에 대한 바퀴의 성능지표는 전체 주행 과정에 대해 바퀴 중심의 가속도가 연속인 조건에서 가속도 크기의 최대값과 평균값을 모두 최소화하는 것으로, 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Index} = \min\left(\max(|\ddot{a}|) + \frac{\sum |\ddot{a}|}{n}\right) \quad (1)$$

3.2 경로 생성

2장에서 정의한 바와 같이 변형바퀴의 주행과정에는 반드시 지나야 하는 4개의 점 P_1, P_2, P_3, P_4 이 존재한다. 따라서 전체 경로는 각각 인접한 두 점인 P_1 과 P_2 , P_2 와 P_3 , 그리고 P_3 와 P_4 를 연결하는 3개의 곡선 경로 f_1, f_2, f_3 로 구성된다. 두 점의 정보를 이용하면 그림11와 같이 f_1, f_2, f_3 의 곡선식을 생성할 수 있다.

시작점과 종료점인 P_1, P_4 는 위치는 초기조건에 의해 결정되며, 턱 장애물 통과 이전과 이후는 원형 바퀴 상태로 움직이기 때문에 P_1, P_4 의 기울기, 곡률은 모두 0으로 고정된다. P_2, P_3 점의 경우 β 값에 따라 위치를 계산할 수 있지만 기울기와 곡률의 값은 정해지지 않는다. 따라서 2점의 기울기 a_2, a_3 와 곡률 c_2, c_3 , 그리고 β 가 결정되면 식 (2)~(4)와 같이 4점의 위치, 기울기, 곡률의 정보를 정리할 수 있다. 여기서 인접한 2점에서 위치와 기울기 정보를 이용하면 식 (5)와 같이 f_1, f_2, f_3 를 3차 다항식(cubic equation)으로 구할 수 있고, 곡률의 정보까지 이용하면 식 (6)과 같이 f_1, f_2, f_3 를 5차 다항식(quantic equation)으로 구할 수 있다. 따라서 위 5개 변수는 최적화 설계변수로 볼 수 있다.

$$\text{위치} : f(p_{1x}) = P_{1y}, f(p_{2x}) = P_{2y}, f(p_{3x}) = P_{3y}, f(p_{4x}) = P_{4y} \quad (2)$$

$$\text{기울기} : f'(p_{1x}) = 0, f'(p_{2x}) = a_2, f'(p_{3x}) = a_3, f'(p_{4x}) = 0 \quad (3)$$

$$\text{곡률} : f''(p_{1x}) = 0, f''(p_{2x}) = c_2, f''(p_{3x}) = c_3, f''(p_{4x}) = 0 \quad (4)$$

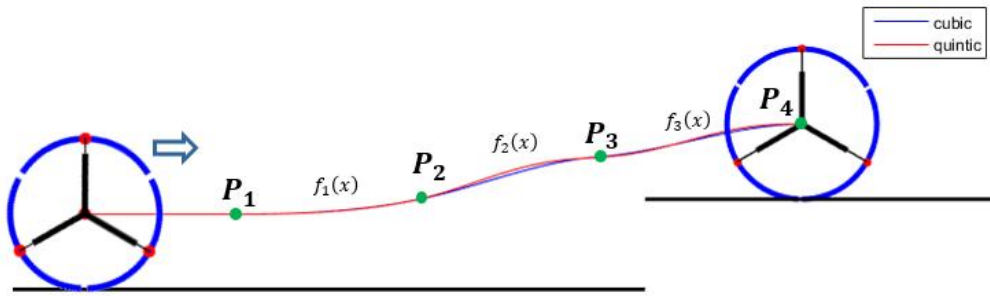
$$\rightarrow f_i(x) = b_{3i}x^3 + b_{2i}x^2 + b_{1i}x + b_{0i} \quad (i = 1,2,3) \quad (5)$$

$$\rightarrow f_i(x) = b_{5i}x^5 + b_{4i}x^4 + b_{3i}x^3 + b_{2i}x^2 + b_{1i}x + b_{0i} \quad (i = 1,2,3) \quad (6)$$

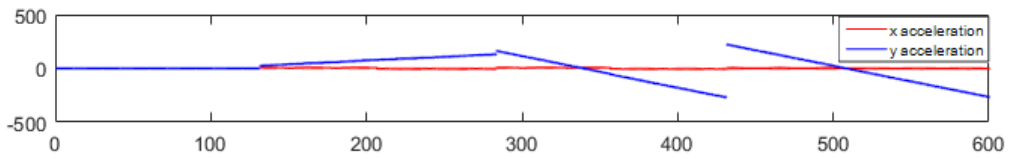
그림11는 3차식과 5차식으로 구성된 경로를 비교한 것으로 (a)는 실제 경로를, (b)는 동일한 방식으로 궤적 계획을 진행한 가속도 값을 step에 따라 표시하여 비교하였다. 실제 경로는 거의 차이가 나지 않지만 y 방향 가속도의 경우 5차식 경로는 모든 구간에서 연속을 유지하는 반면 3차식 경로는 곡선이 바뀌는 지점, 특히 장애물을 통과하는 순간에 급격한 변화가 발생한다. 이는 바뀌에 갑작스러운 힘의 변화가 생기는 것을 의미하므로 안정성이 감소할 것으로 예상되며 3.1의 제한 조건을 위배하게 된다.

제한 조건인 가속도 연속조건을 만족하기 위해서는 가속도의 방향인 곡률 또한 연속이 되어야 한다. 이는 전체 경로가 C2 연속성을 만족해야 한다는 뜻으로, 곡선이 바뀌는 경계지점에서 서로 다른 두 곡선의 곡률이 일정하게 유지되어야 한다. 5차 다항식은 경계값의 위치, 기울기, 곡률을 모두 지정할 수 있는 가장 낮은 차수의 다항식으로, [8] 세 곡선 경로를 모두 5차 다항식으로 생성하면 경계값의 기울기, 곡률을 동일하게 지정할 수 있기 때문에 전체 주행 과정에서 경로의 C2 연속성을 충족시킬 수 있다.

따라서 5 개 변수($\beta, a_1, a_2, c_1, c_2$)를 결정하면 위와 같이 3 개의 5 차식 경로 곡선(f_1, f_2, f_3)을 생성할 수 있다



(a)



(b)

그림 11 전체 경로 생성 방법

(a) 실제 경로 (b) 3, 5차식의 x, y 방향 가속도

3.3 궤적 계획

생성된 경로에 대해 시간에 따른 바퀴 중심점의 움직임을 결정하기 위한 궤적 계획(trajjectory planning)을 진행하였다. 전체 주행 과정에서 가속도의 크기를 연속하게 만드는 것이 목적으로, 주행 과정을 일정 시간(Δt) 간격의 step으로 나누고 i 번째 step의 x, y 좌표를 x_i, y_i 로 표시했다. 이 때 x 방향 변화량(Δx)이 항상 일정하다면 i step 에서의 곡률과 x, y 가속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$x \text{ 가속도: } \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \frac{\Delta x_{i+1} - \Delta x_i}{\Delta t^2} = 0 \quad (7)$$

$$y \text{ 가속도: } \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \frac{\frac{\Delta y_{i+1}}{\Delta t} - \frac{\Delta y_i}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{\Delta y_{i+1} - \Delta y_i}{\Delta t^2} \quad (8)$$

$$\text{곡률: } \frac{d^2 y_i}{dx^2} = \frac{\frac{\Delta y_{i+1}}{\Delta x_{i+1}} - \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}}{\Delta x_i} = \frac{\Delta y_{i+1} - \Delta y_i}{\Delta x^2} \quad (9)$$

Δx 가 항상 일정하기 때문에 x 가속도는 0이고 y 가속도는 경로의 곡률과 정비례 관계가 되는데, 3.2 장의 경로 생성 과정에 의해 전체 경로가 C2 연속성을 만족하게 되었기 때문에 곡률은 전체 주행과정에 대해 연속이며 곡률과 비례 관계에 있는 y 가속도 또한 항상 연속이다. 따라서 생성된 경로에 대해 일정한 Δt 에 따라 Δx 가 일정하게 되도록 바퀴 중심점의 궤적 계획을 진행하는 경우 전체 주행 과정에 대해 x, y 방향의 가속도가 연속이 되는 조건을 만족할 수 있다.

궤적계획에 따라 시간에 따른 바퀴 중심점의 위치를 결정할 수 있다. 하지만 적응형 변형바퀴는 변형에 사용되는 r, θ 자유도와 바퀴 회전에 사용되는 φ 자유도의 3 자유도 변형바퀴로, 바퀴 중심의 위치는 오직 2자유도만을 정하기 때문에 바퀴의 형태를 완전히 정의할 수 없다. 따라서 주행과정에서 바퀴의 형태와 움직임을 확인하기 위해서는 1자유도를 추가로 정의할 방법이 필요하다. 바퀴 접촉점은 지면과 닿아 있으므로 높이 방향 자유도가 없고, 지면과 접촉하는 로브의 회전에 따라 위치가 결정되므로 1 자유도를 가진다. 따라서 바퀴 접촉점의 위치를 통해 필요한 1 자유도를 결정할 수 있다.

그림12을 보면 바퀴 중심점, 접촉점의 위치를 통해 바퀴의 위치와 형태가 하나로 정해진다는 것을 알 수 있다. 또한 이를 통해 r, θ, φ 변수를 모두 확인 할 수 있다.

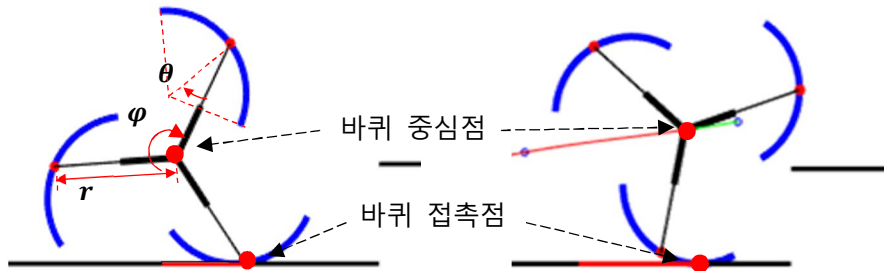


그림 12 바퀴 중심점과 접촉점에 의한 바퀴 자세 도출

그림13의 바퀴의 중심점과 접촉점 사이의 거리는 바퀴의 변형량과 연관된 값으로, 불필요한 변형을 막기 위해서는 이 값의 변화를 최소화해야 한다. 바퀴 중심점은 x방향 변화량이 일정하도록 정해져 있으므로, x방향으로 1자유도인 바퀴 접촉점 또한 x 변화량이 일정하도록 궤적 계획을 진행해 전체적인 바퀴의 변형량을 줄일 수 있다.

결과적으로 곡선 경로가 주어졌을 때 가속도를 연속으로 만드는 바퀴 중심점 궤적과 변형량을 줄일 수 있는 바퀴 접촉점 궤적을 결정, 그림13과 같이 매 step에서 바퀴 중심점과 접촉점의 위치를 알게 되어 주행 과정에서의 바퀴의 위치와 형태를 확인할 수 있다.

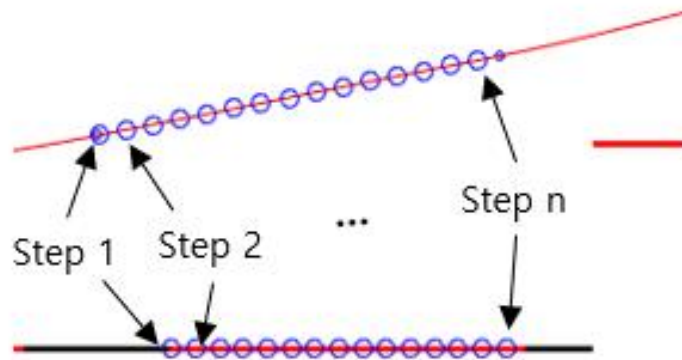


그림 13. step 별 바퀴 중심점, 접촉점 위치

3.4 제한 조건

3.4.1 바퀴의 기구학적 위치

바퀴의 움직임을 알면 주행 과정에서 발생할 수 있는 주행 실패 상황을 분석해 제한 조건을 정리할 수 있다. 간섭은 대부분 로브의 끝부분에서 발생하기 때문에 그림 14에 각 점을 표시하고 그 좌표를 바퀴 중심점을 기준으로 정리하였다.

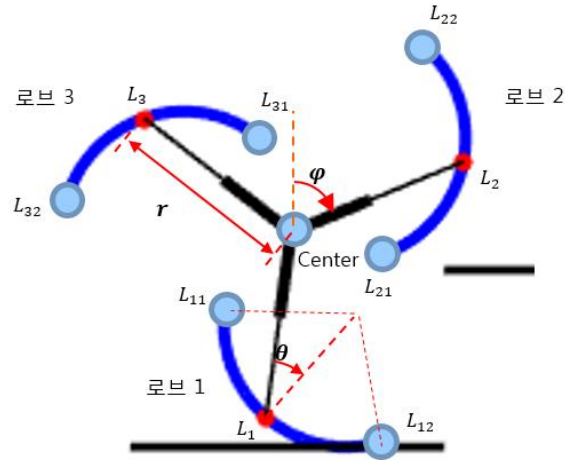


그림 14 바퀴의 간섭 여부 확인점

$$L_{11(12)_x} = \text{center}_x + r \cos\left(-\frac{\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \times 2 \cos\left(\frac{\pi}{3} \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(-\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (10)$$

$$L_{11(12)_y} = \text{center}_x + r \sin\left(-\frac{\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \times 2 \sin\left(\frac{\pi}{3} \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(-\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (11)$$

$$L_{21(22)_x} = \text{center}_x + r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) + 125 \times 2 \cos\left(\pi \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(-\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (12)$$

$$L_{21(22)_y} = \text{center}_x + r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) + 125 \times 2 \sin\left(\pi \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(-\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (13)$$

$$L_{31(32)_x} = \text{center}_x + r \cos\left(\frac{7\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \times 2 \cos\left(\frac{2\pi}{3} \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (14)$$

$$L_{31(32)_y} = \text{center}_x + r \sin\left(\frac{7\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \times 2 \sin\left(\frac{2\pi}{3} \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{6}\right) \quad (15)$$

3.4.2 주행 실패 상황

주행 실패 상황은 바퀴에서 간섭이 발생하는 경우로 크게 바퀴와 지면 사이의 간섭, 바퀴와 장애물사이의 간섭으로 분류할 수 있다. 각각의 간섭을 바퀴 중심점의 좌표($center_x, center_y$)를 기준으로 제한 조건을 정리하였다.

바퀴와 지면 사이의 간섭은 그림15 (a)와 같은 경우로, 원형 상태나 선형 변형 상태에서 변형을 시작하는 순간 L_{32} 점의 y 좌표가 0보다 작은 경우 발생한다.

$$L_{32y} = center_x + r \sin\left(\frac{7\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \theta\right) < 0 \quad (16)$$

바퀴와 장애물 사이의 간섭은 로브 1, 2, 3에서 모두 발생 가능하며 그림15 (b)~(d)에 표현되어 있다. 로브 1에서 발생하는 간섭은 장애물의 수직면 위치에 로브가 들어가는 경우로, 수직면이 존재하는 장애물을 통과할 수 없게 만들며 $\beta < 0$ 인 경우에 발생한다. 로브 2의 간섭은 턱을 극복하는 순간에 장애물과 겹치는 경우로 정해진 경로를 따라갈 수 없게 만든다. L_{21} 점의 y 좌표가 턱의 높이 보다 작을 때 로브2의 중심점 ($lobe2_x, lobe2_y$)과 턱 모서리 사이의 거리가 로브 반지름의 길이 보다 작은 경우에 발생한다.

$$L_{21y} = center_x + r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) - 125 \sin\left(\pi \pm \frac{\pi}{6} - \varphi - \theta\right) < h \quad (17)$$

$$lobe2_x = center_x + r \sin(\varphi) - 125 \sin(\varphi + \theta) \quad (18)$$

$$lobe2_y = center_y + r \cos(\varphi) - 125 \cos(\varphi + \theta) \quad (19)$$

$$\rightarrow \sqrt{(lobe2_x - s)^2 + (lobe2_y - h)^2} < r_2 \quad (20)$$

마지막으로 로브 3의 간섭은 로브가 턱에 올라간 후 다시 원형 바퀴로 돌아오는 과정에서 발생하는 간섭으로, 장애물에 걸렸기 때문에 계속 주행하지 못하게 된다. 지면과의 간섭과 유사하게 L_{32} 점이 장애물에 들어가는 경우 발생한다.

$$L_{32x} = \text{center}_x + r \cos\left(\frac{7\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \theta\right) > s \quad (21)$$

$$L_{32y} = \text{center}_x + r \sin\left(\frac{7\pi}{6} - \varphi\right) + 125 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \theta\right) < h \quad (22)$$

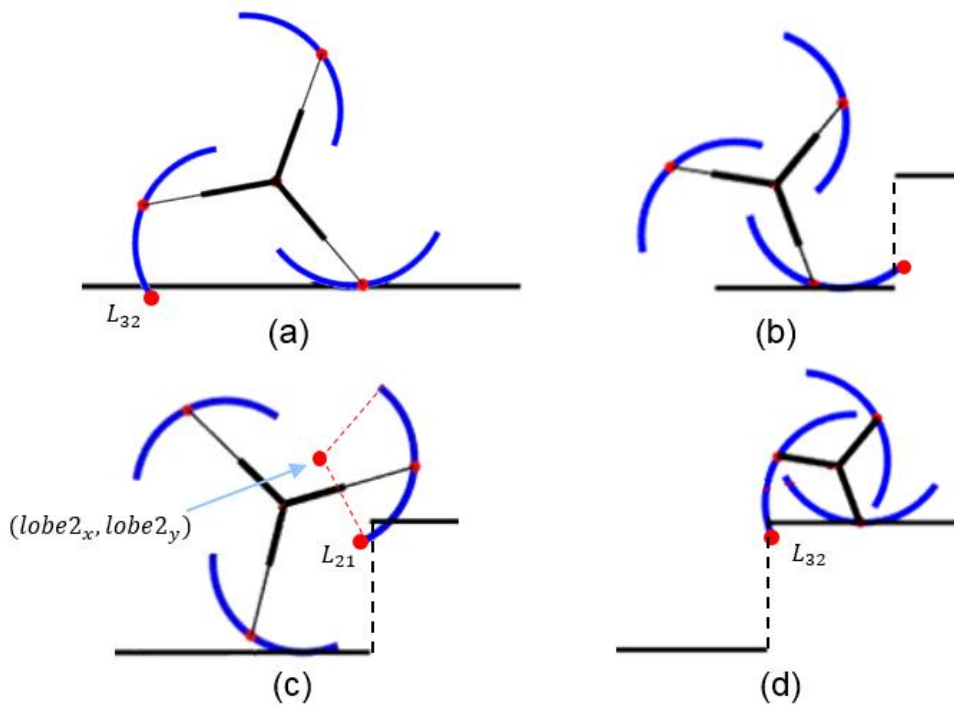


그림 15. 주행 과정에서 발생하는 간섭 상황
지면과 (a) 로브3의 간섭, 장애물과 (b) 로브1 (c) 로브2 (d) 로브3의 간섭

4. 최적화 결과 분석

4.1 최적화 진행

$\beta, a_1, a_2, c_1, c_2$ 변수에 대한 최적화를 Matlab 시뮬레이션을 이용해 진행하였고 최적화 알고리즘은 그림16과 같다. 먼저 장애물에 대해 주어진 정보를 확인하고 이에 대한 각 변수의 초기값과 탐색범위, 탐색간격을 지정한다. 여기서 탐색범위는 기존의 최적화 결과를 참고하여 범위를 좁힐 수 있다. 변수가 정해지면 3장의 방법과 같이 바퀴 중심점의 경로를 생성할 수 있고 바퀴 중심점과 접촉점의 궤적 계획을 통해 바퀴의 자세를 계산하여 제한 조건 만족 여부 확인이 가능하다. 최종적으로 제한 조건을 위배하지 않는 결과 중 전체 범위에 대해 목적함수를 최소화하는 최적의 변수 조합을 구하였다. 동일한 방법으로 다양한 장애물 높이와 시작 위치에 대한 최적화를 진행하였다.

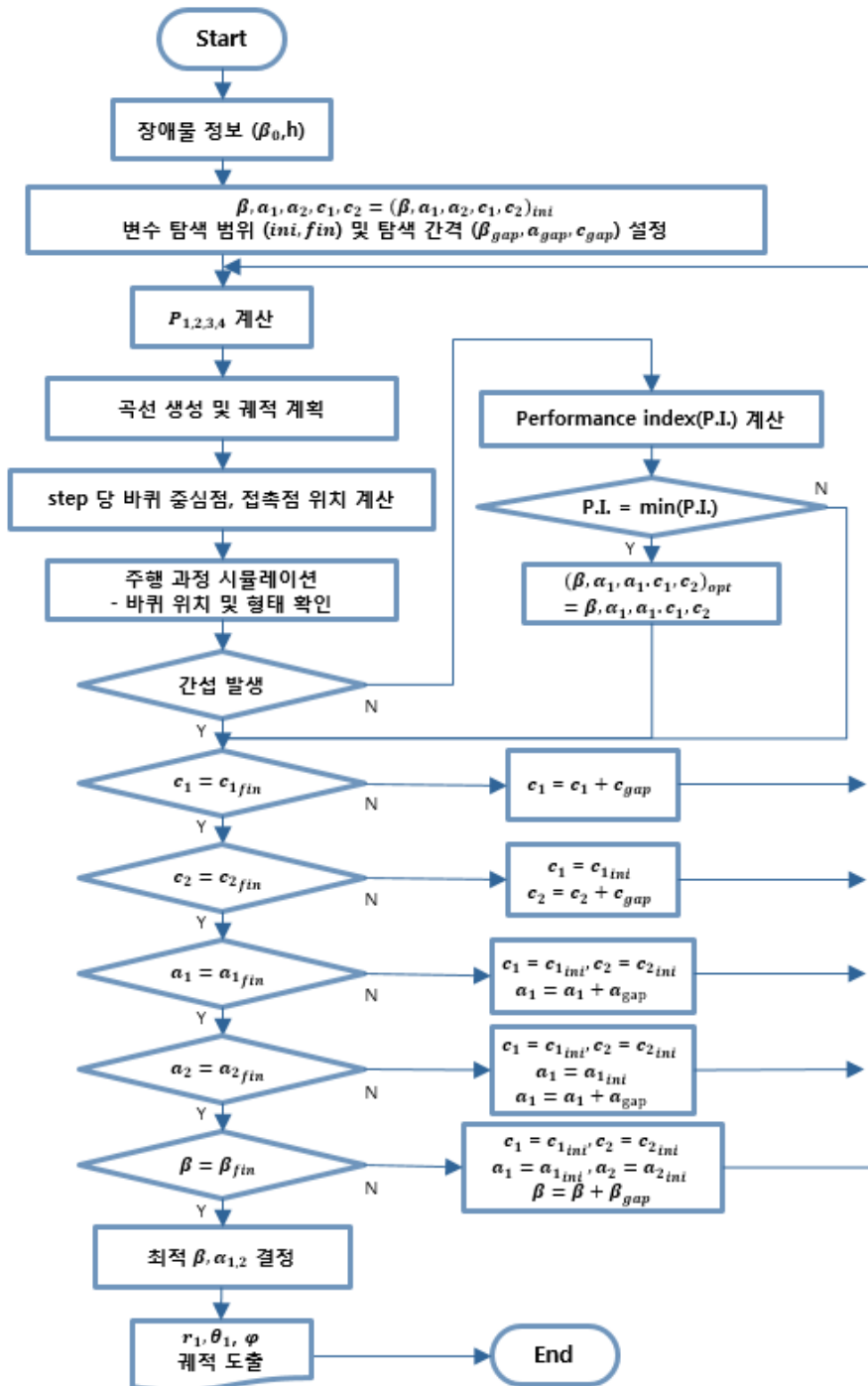


그림 16. 궤적 최적설계 알고리즘

4.2 최적화 전후 결과 비교

최적화를 진행하지 않는 경우는 턱 장애물 주행에 필요한 시간은 동일하지만 선행 변형 과정이 존재하지 않으며, 턱 극복을 위한 변형 바퀴 형태에 대해 r, θ 변수가 선형적으로 변화한다고 가정하였고 이때의 가속도 변화를 최적화 이후의 결과와 비교하였다. 그림17은 150mm 높이의 장애물에 대해 $\beta_0 = 0.9l$ (=234mm) 인 시작위치에서의 최적화 이전의 주행 과정을 나타낸 것으로 장애물 주행의 각 과정에서 바퀴의 위치와 형태, 그리고 x, y 방향 가속도의 변화를 표시하였다.

최적화가 진행되지 않은 경우 먼저 그림17 (a)와 같이 바퀴 중심 경로에서 흔들림이 크게 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 특히 변형을 시작하는 지점인 ③과 장애물을 통과하는 지점인 ④에서는 경로의 기울기가 불연속적이되어 x, y 방향 가속도 모두 불연속적으로 변화하는 등 안정성에 많은 문제가 있다는 점을 확인할 수 있다. 또한 (b)의 궤적의 경우 r 방향으로 작은 시간 동안 큰 변화가 필요하다는 문제점이 존재한다.

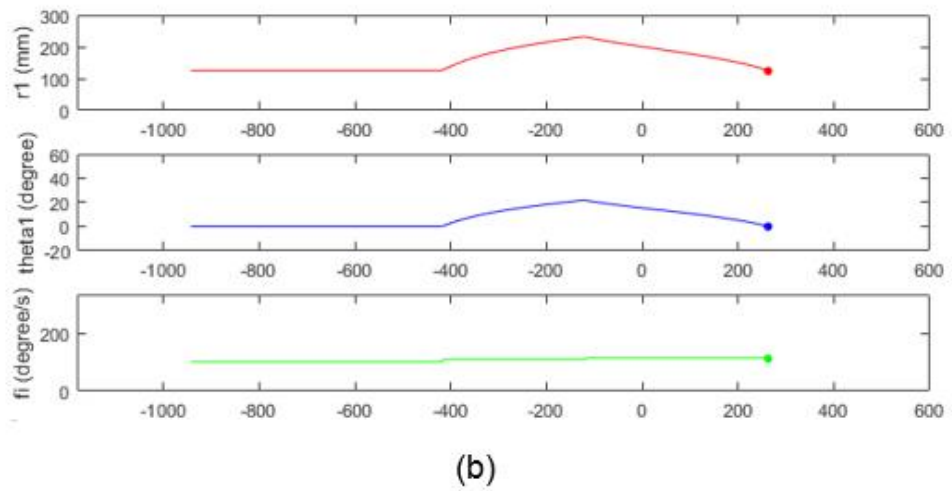
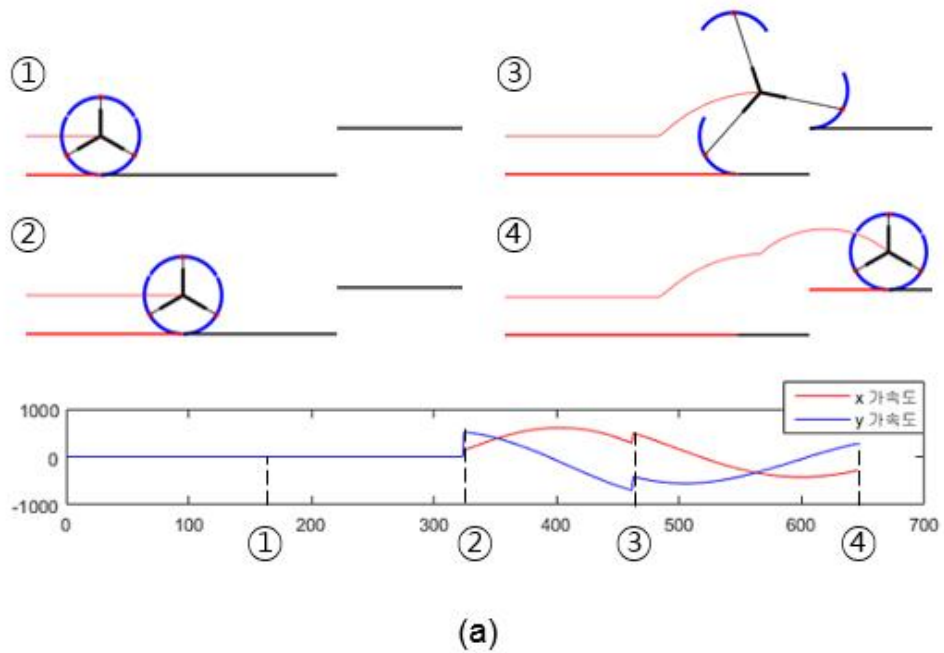
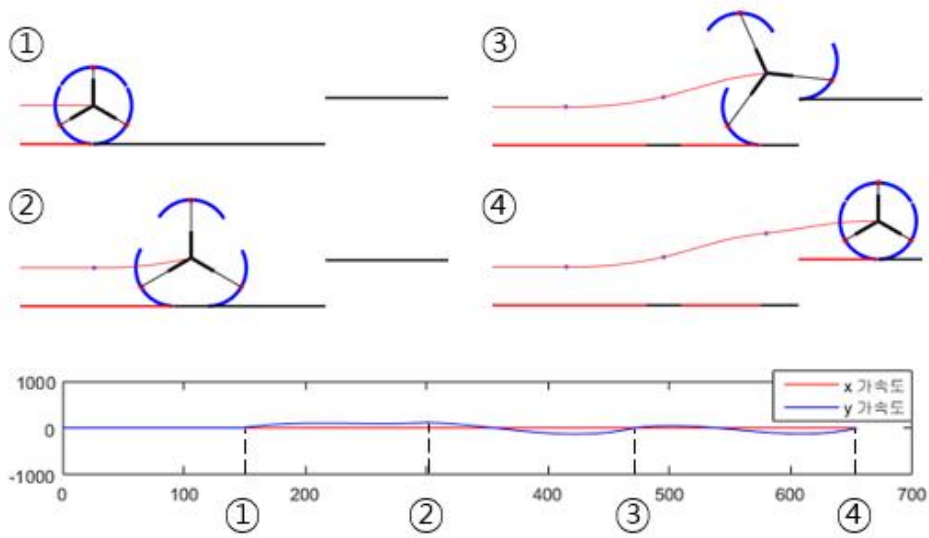


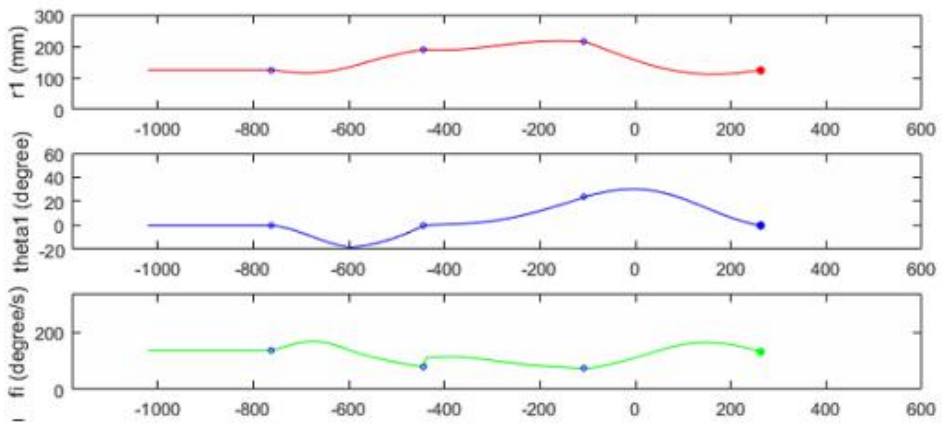
그림 17 최적화 이전 주행 과정
 (a) 등반 과정 (b) 변수의 궤적

그림18는 동일한 장애물 크기와 시작위치에 대해서 최적화를 진행한 결과를 정리한 것으로, (a)에서 바퀴 중심 경로의 흔들림이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있고, 변형을 시작하는 지점과 장애물을 통과하는 지점에서도 궤적의 기울기가 연속적이 되어 가속도 크기가 급격하게 변화하는 현상이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 궤적 계획에 의해 x 방향 가속도는 일정하게 정리되었고, y 방향 가속도는 연속이 되어 전체 구간에서 가속도가 연속이 되는 제한 조건을 만족하였다. 마지막으로 목적함수가 최소화되었기 때문에 전체적인 가속도의 크기가 감소한 것을 육안으로 확인할 수 있다.

(b)에서는 선행변형과정이 포함되어 r방향의 최대 변형크기가 감소하였고, 변형이 최적화 이전에 비해 더 긴 시간 동안 일어나기 때문에 최적화 결과 변수의 급격한 변화가 감소한 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 18 최적화 이후 주행 과정
(a) 등반 과정 (b) 변수의 궤적

표2 에서는 다양한 초기조건 h , β_0 에 대한 최적화 결과와 목적함수 증감비율을 정리하였고, 결과적으로 모든 조건에서 목적함수가 크게 감소한 것을 확인하였다.

표 2 다양한 조건에서의 최적화 결과

h	150			180		
β_0	0.3l	0.6l	0.9l	0.3l	0.6l	0.9l
β	0.20	0.26	0.47	0.21	0.25	0.46
α_1	10	13	13	13	13	13
α_2	-1	4	7	-2	3	6
c_1	2e-3	2e-3	1e-3	6.5e-3	2.5e-3	1.5e-3
c_2	0.5e-3	1e-3	0	2e-3	0	-1e-3
목적함수 (감소비율)	910 (28%↓)	384 (69%↓)	200 (82%↓)	1152 (23%↓)	523 (63%↓)	332 (76%↓)

초기조건이 장애물 높이가 높고 초기 위치가 짧을수록 목적함수가 안 좋아지는 경향을 확인할 수 있는데, 이는 장애물의 기울기가 클수록 더 좁은 구간에서 모든 변형이 완료되어야 하기 때문에 경로의 기울기가 커지고 가속도의 크기가 늘어나기 때문이라고 볼 수 있다. 특히 β_0 가 작아 초기 위치가 장애물에 가까운 경우 장애물과의 간섭이 더 쉽게 발생하기 때문에 제한조건을 만족하기 어려워 목적함수 감소 비율이 줄어들게 된다.

변수 β 의 경우 β_0 가 감소할수록 β/β_0 의 크기는 계속 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이는데, β 가 지나치게 작아지는 경우 장애물을 극복하는 순간의 간섭을 회피가 어렵기 때문이다. 궤적의 기울기 a_1, a_2 는 β_0 가 작을수록 두 값 사이의 차이가 커지는데, 이 차이가 클수록 장애물을 극복하는 순간의 궤적이 위로 올라가기 때문에 간섭을 피하는데 유리하다. 이는 결국 궤적의 흔들림이 더 많이 발생한다는 것을 뜻으로 곡률 c_1, c_2 의 값 또한 커지게 된다.

정리하자면 β_0 가 작을수록 변수 β, a_1, a_2 는 장애물 극복과정에서의 간섭을 피하는 값으로 결정되며, 이 과정에서 흔들림이 커지기 때문에 목적함수를 최소화하기 위한 c_1, c_2 값 또한 커지게 된다.

5. 결론

본 연구는 적응형 변형바퀴의 턱 장애물 주행 과정에서 안정성 향상을 위한 바퀴 궤적의 최적설계 방법을 제시하였다. 기구학적 분석을 통한 주행과정을 정의하고 Matlab 시뮬레이션을 통해 경로 생성과 궤적 계획을 진행하여 결과를 확인하였다.

2가지 종류의 장애물 높이와 다양한 바퀴 초기 위치에 대해 동일한 방법으로 최적화를 진행한 결과 이전과 비교하여 목적함수가 최대 75% 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 바퀴 중심 궤적의 최적 설계 방법은 주행 과정에서 바퀴가 로봇 본체에 전달하는 충격을 최소화 할 수 있어 적응형 변형바퀴를 이용한 역진자 구조 로봇의 개발에 대한 기반 연구로 활용될 것이다.

참고 문헌

- [1] D. Bickler, “The new family of JPL planetary surface vehicles” , In CNES Missions, Technologies, and Design of Planetary Mobile Vehicles, D. Moura, Ed., Cepadues–Editions Publisher, Toulouse, France, pp. 301–306, 1993
- M. D. Berkemeier, et al, “Elementary Mechanical Analysis of Obstacle Crossing for Wheeled Vehicles” , International Conference on Robotics and Automation, CA, USA, May 19–23, 2008
- [2] H. S. Hong et al, “Optimal design of hand–carrying rocker–bogie mechanism for stair climbing” , Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27 no. 1, pp 125–132, 2013
- [3] R. Siegwart, et al, “Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain” , Robotics and Autonomous Systems, vol. 40, pp. 151–162, 2002
- [4] R. Siegwart, et al, “CRAB - exploration rover with advanced obstacle negotiation capabilities” , 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA 2006) ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 28–30, 2006
- [5] Y. Kim, et al, “Wheel Transformer: A Wheel–Leg Hybrid Robot with Passive Transformable Wheels” , IEEE Transactions on robotics, vol. 30, no. 6, 2014

- [6] S. Chen, et al, “Quattroped: A Leg-Wheel Transformable Robot” , IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol. 19, no. 2, April 2014
- [7] S. Macfarlane and E. Croft, “Jerk-Bounded Manipulator Trajectory Planning: Design for Real-Time Applications” , IEEE Transactions on robotics and automation, vol. 19, no. 1, 2003
- [8] S. Macfarlane and E. A. Croft, “Jerk-Bounded Manipulator Trajectory Planning: Design for Real-Time Applications” , IEEE Transactions on robotics and automation, vol. 19, no. 1, February 2003

Abstract

Optimal trajectory planning for 2-DOF adaptive transformable wheel robot based on kinematics

Kijung Kim

Department of Mechanical & Aerospace Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Wheel mechanism is used in various service robots operate in human living environment, because of its effectiveness on flat ground. However, wheel mechanism has limitation on mobility for obstacles such as step or stair, which can be widely encountered in human living environment. In order to overcome this limitation, the concept of adaptive transformable wheel is proposed which can effectively overcome various size of step obstacles. Unlike other transformable wheel, adaptive transformable wheel has high degree of freedom which make it possible to control the shape of the wheel during the movement, and overcome obstacles more effectively.

This paper deals the optimization of the wheel center trajectory to minimize the fluctuation and to improve the stability and efficiency of the wheel. Objective function, overcoming process and constraints for step obstacle is decided based on kinematic analysis. Optimum wheel center trajectory and the profile of each wheel variable for optimal trajectory are derived as result. Finally, optimization is conducted by simulation, and optimization results of various initial conditions are verified

Key Words : Transformable wheel, Step obstacle, Stability, Optimization, Trajectory planning,

Student Number : 2016-29038