creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사학위논문

1-자유도 변형 바퀴 로봇의 턱 장애물 극복을 위한 궤적 최적 설계

Optimal Design of 1-DOF Transformable Wheel Robot Trajectory for Step-overcoming

2022년 8월

서울대학교 대학원

기계공학부

심 정 원

1-자유도 변형 바퀴 로봇의 턱 장애물 극복을 위한 궤적 최적 설계

Optimal Design of 1-DOF Transformable Wheel Robot Trajectory for Step-overcoming

지도교수 김 윤 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 4월

서울대학교 대학원

기계공학부

심 정 원

심정원의 공학석사 학위논문을 인준함

2022년 6월

위 원 장 : 김 도 년 (인)

부위원장 : 김 윤 영 (인)

위 원 : 김 영 수 (인)

초 록

변형 바퀴는 평지에서 원형으로 효율적으로 주행하고, 장애물 등반 시에는 바퀴의 형상을 변형하는 효과적인 모바일 로봇 플랫폼이다. 동기화된 세 개의 바퀴 메커니즘을 통해 변형 형상을 설계하면 다양한 폭과 높이의 장애물을 안정적으로 극복할 수 있다. 기존의 2-자유도 메커니즘 기반 변형 바퀴 플랫폼은 장애물 등반 시 구름접촉을 가정하기 때문에 두 개의 모터와 복잡한 설계를 필요로 하였다. 본 연구에서는 비용 효율성과 모빌리티 제어의 복잡성을 개선하기 위해 단일 액추에이터를 사용하고 다양한 접촉을 고려한 1-자유도 변형 전략을 제안한다. 또한 다목적 최적화를 적용해 다양한 턱 장애물을 안정적으로 극복할 수 있는 변형 바퀴 메커니즘의 궤적을 설계한다.

1-자유도 변형 바퀴는 기구학적 특성이 1차원이기 때문에 최초로 초기접촉각이라는 새로운 변수를 도입했고 2차원적인 장애물 형상과 변형 형상이 일대일 대응관계를 이루는 전략을 수립했다. 바퀴의 일정한 회전운동을 가정하고 가장 험난한 장애물을 등반할 때의 초기접촉각에 의해 최대 변형 형상을 결정할 수 있다. 원형 상태에서 최대 변형까지의 반경과 각도를 각각 다른 차수의 다항함수로 설계하고 회전각도를 매개변수로 삼아 1-자유도 함수를 설계했다. 최적의 궤적을 설계하기 위해 정기구학 기반의 모션 시뮬레이션을 개발하고 주행 안정성과 장애물 극복능력과 관련된 성능지수를 정의했다. 두 개 이상의 목적함수를 가지는 다목적 최적화의 파레토 최적해를 탐색하기 위해 NSGA-II 알고리즘 코드를 연동시키고 설계변수에 따른 성능지수의 트레이드오프 관계를 분석했다. 최적화 결과로 목표 주행 성능에 따른 메커니즘의 변형 궤적을 설계했고 하나의 변형 궤적으로 다양한 폭과 높이의 장애물을 등반할 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 변형 바퀴, 운동학, 장애물 극복, 성능지수, 다목적 최적화, 궤적 최적화
학 번 : 2020-29815

목 차

1. 서 론 1
1.1 연구의 배경 1
1.2 선행연구의 한계점 3
1.3 연구목표 및 내용 4

2. 1-자유도 변형 바퀴의 등반 전략 7
2.1 새로운 전략의 필요성 7
2.2 초기접촉각의 정의 8
2.3 목표 장애물 형상과 최종 형상 정의 9
2.4 매개변수를 이용한 1-자유도 궤적 설계 10

3. 기구-정역학적 해석 15
3.1 정기구학 기반의 모션 시뮬레이션 15
3.2 변형 바퀴의 기구-정역학적 해석 모델 15

4. 다목적 최적 설계 정식화 22
4.1 목표 성능지수 정의 22
4.2 NSGA-II 알고리즘 24
4.3 제한조건 정의 26
4.4 최적화 정식화 27

5. 최적화 결과 및 분석 31
5.1 최적화 결과 31
5.2 데이터 분석 31

6. 결 론 37

참고문헌 38

Abstract 39

List of Tables

Table 1 Nomenclature **18**
Table 2 Specifications of transformable wheel robot for motion analysis **19**
Table 3 Parameters for NSGA-II algorithm **28**
Table 4 Performance index results for three cases, $PI_{(1)}$: driving stability, $PI_{(2)}$: ability for step-overcoming **33**

List of Figures

Fig. 1 Conventional mobile robot platforms:
(a) Starship robot (Starship technologies) (b) Ava telepresence (AVA robotics) (c) CLOi sevebot (LG Electronics) **5**
Fig. 2 Examples of robots using the wheel-link mechanism [1-2]:
(a) CRAB I (b) Mars 2020 rover **5**
Fig. 3 Examples of robots using transformable wheel mechanism [3-4]:
(a) TurboQuad (b) STEP **5**
Fig. 4 The 2-DOF transformable wheel assuming rolling contact [5]:
(a) circular shape (b) transform shape **6**
Fig. 5 The 2-DOF wheel shapes determined by the widths (S) and heights (H) of the obstacle..... **6**
Fig. 6 Wheel mechanism of the STEP platform [4]:
(a) size of motor box (b) front view of the motor box..... **6**
Fig. 7 The concept and sign of initial contact angle and climbing situation when the initial contact angle is (a) negative (b) $0°$ (c) positive, respectively **11**
Fig. 8 Adaptive transformable wheel:
(a) design parameters in the initial state (r_i, θ_i) and climbing state (r_t, θ_t) (b) example of overcoming different obstacle (S', H') with the same shape (r_t, θ_t) by changing the initial contact angle (α') **11**
Fig. 9 Range of obstacles that can be overcome with the same shape ($r = 180mm, \theta = 15°$) by changing the initial contact angle **12**
Fig. 10 (a) The shape of the transformable wheel when climbing certain obstacles by changing the initial contact angle and 1-DOF profile $f(r)$ forming one intersection with the dotted line (b) transformable wheel configuration at the intersection according to the rotation angle of motor **13**
Fig. 11 Correlation between two functions with different degrees using parameter φ : (a) cubic polynomial function, $r = g(\varphi)$ (b) quantic polynomial function, $\theta = h(\varphi)$ (c) 1-DOF mechanism profile $f(r)$ formed by parameterization..... **14**

Fig. 12 Motion simulation based on kinematic of 1-DOF transformable wheel for step-overcoming **20**
Fig. 13 Kineto-static analysis model of transformable wheel and FBD ... **21**
Fig. 14 Pareto-optimal solution method for multi-objective optimization using NSGA-II algorithm and non-dominated sorting condition **29**
Fig. 15 Design constraints that determine the final shape (r_f, θ_f) and the range of the initial contact angle (α_f) when climbing the most difficult obstacle **30**
Fig. 16 NSGA-II optimization result and pareto-front solution **34**
Fig. 17 Transformable wheel shape of three cases for climbing obstacle 300mm width and 120mm height **35**
Fig. 18 Motion simulation of overcoming various obstacles using 1-DOF deformation trajectory **36**

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 인공지능의 발달로 로봇은 위험한 일을 대신하는 것을 넘어서 인간과 소통하는 휴머니티를 실현하고 있다. 그 예로 주변 환경을 인지하고 목표 지점까지 배송을 수행하거나 고객을 안내하는 서비스 로봇이 있다. Fig. 1은 서비스 로봇 중에서도 대표적인 배달 로봇과 텔레프레전스 로봇이며 바퀴를 사용하여 이동한다. 바퀴는 구조가 단순하고 구동이 간단하기 때문에 평지 주행에 효율적인 구조이다. 하지만 바퀴의 단순함 뒤에는 생활 속 인공장애물을 극복하지 못하는 단점이 존재하고 이는 서비스 로봇의 활동 반경 제약으로 이어진다.

평지 구조에 효율적인 바퀴 구조의 장점을 유지하면서 장애물 극복능력을 향상시키고자 하는 시도는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째, Fig. 2와 같이 바퀴에 링크 구조물을 결합하여 지면과 바퀴 사이의 마찰력으로 장애물을 극복하는 CRAB I [1]과 화성 탐사로봇에 사용되는 Mars rover [2]가 있다. 두 가지 모두 낮은 장애물에서는 바퀴의 하중 분배를 통해 본체의 흔들림을 최소화했지만 계단과 같이 지면과 수직인 장애물을 극복할 때 마찰력에 의존하기 때문에 마찰계수에 의해 등반 가능성이 결정되는 한계점을 가지고 있다.

두 번째, 바퀴 자체를 변형시켜 장애물을 극복하는 선행연구가 존재한다. 대표적으로 TurboQuad [3]는 두 개의 반원 구조를 통해 낮은 마찰 의존도로 수직 장애물을 극복할 수 있다. 하지만 서비스

로봇의 최종 목표인 라스트 마일을 극복하는 과정에서 안정성은 필수 고려사항이다. TurboQuad는 등반 과정에서 발생하는 롤 현상 (roll)으로 인해 불안정하고 등반 가능한 장애물의 높이가 바퀴 크기로 제한된다.

반면 STEP [4]은 120° 방향으로 동기화된 세 개의 메커니즘을 구동하여 역동적인 움직임으로 높낮이가 다른 장애물을 극복할 수 있다. 평지에서는 원형상태로 빠른 움직임이 가능하고 수직 장애물의 형상에 맞게 유효반경과 각도를 변화시켜 안정적인 장애물 극복능력을 가지고 있다. 이러한 장점들 때문에 미래의 서비스 로봇 플랫폼뿐만 아니라 퍼스널 모빌리티, 탐사 로봇 등 분야에 적용 가능하다.

하지만 2-자유도 변형 바퀴 플랫폼인 STEP [5]은 구름접촉 (rolling contact)을 가정하여 장애물을 극복하기 때문에 변형을 위한 모터가 양쪽에 두 개씩 사용되고 설계와 제어의 복잡성이 존재한다. 또한 로봇의 주행 과정에서 안정성 이외의 성능지수 (performance index)에 대한 고려가 부족하다. 다양한 접촉 상황을 고려하고 장애물 극복능력을 고려한 1-자유도 변형 바퀴를 개발할 수 있다면 적은 개발비용으로 라스트 마일을 극복하는 서비스 로봇 플랫폼을 제작할 수 있다.

1.2 선행연구의 한계점

1.2.1 복잡한 설계와 제어의 복잡성

선행연구인 STEP은 Fig. 4처럼 주행을 위해 항상 바퀴와 지면의 구름접촉을 가정하고 2-자유도 변형 전략을 기반으로 장애물을 등반한다. 이로 인해 Fig. 5와 같이 변형 바퀴의 형상 (r,θ)이 목표 장애물의 폭 (S)과 높이 (H)에 의해 결정되고 축 방향 회전모터 이외에도 변형을 위한 모터가 각각 두 개가 필요하다. 적응형을 바탕으로 다양한 크기의 장애물을 등반할 수 있지만, 메커니즘을 표현하기 위해 Fig. 6과 같이 모터박스 내 복잡한 설계가 요구된다. 또한 많은 수의 모터는 제어의 복잡성과 제작비용의 증가로 이어진다.

1.2.2 장애물 극복능력에 대한 고려 부족

설계변수에 따른 바퀴의 중심점을 정의하고 궤적을 설계하는 기존의 연구 [5]에서 단일 성능지수인 주행 안정성만을 고려했다. 바퀴 중심점에서의 가속도를 계산하여 바퀴에서 로봇 플랫폼으로 전달되는 충격량을 최소화했지만, 험지 주행 로봇에 필수적인 미끄럼과 관련된 장애물 극복능력을 고려하지 않았다. 특히, 성능지수를 평가하는 운동해석 시뮬레이션에서 미끄럼이 발생하지 않지만 실제 주행에서는 바퀴 본체와 지지대의 무게중심점 위치에 따라 등반 성공여부가 결정된다. 따라서 안정성만으로는 변형 바퀴의 등반 형상에 따른 미끄럼 발생을 예측할 수 없다는 한계점을 가지고 있다.

1.3 연구목표 및 내용

본 논문에서는 비용 효율성과 제어의 복잡성을 개선하기 위해 단일 액추에이터로 구동하는 1-자유도 변형 전략을 제안한다. Fig. 4와 같이 변형 바퀴는 동기화된 세 개의 메커니즘 시스템으로 구성되며 주행 과정에서 유효반경 (r)과 각도 (θ)에 의해서 로봇의 성능지수가 결정된다. 1-자유도 변형 바퀴는 두 설계변수가 종속적인 관계를 이루기 때문에 좀 더 안정적으로 극복할 수 있는 변형 메커니즘의 궤적 설계가 필수적이고 다목적 최적화를 적용해 다양한 턱 장애물을 극복할 수 있는 1-자유도 궤적을 설계하였다.

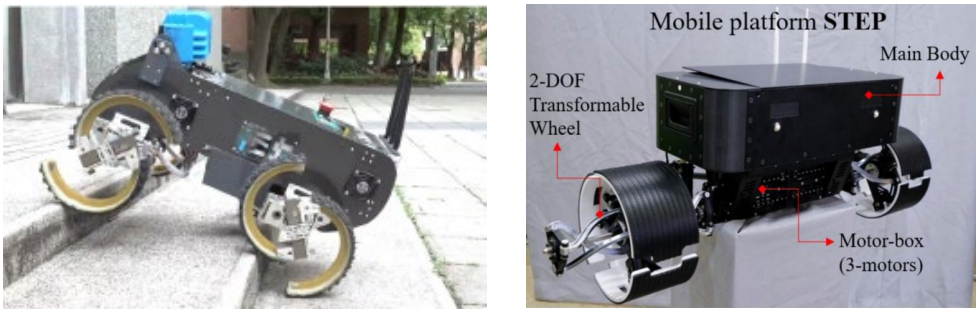
2장에서는 등반 형상을 표현하기 위한 새로운 변수를 정의하고 구름 접촉 이외에도 다양한 접촉 상황을 고려하여 1차원적인 변형 메커니즘 궤적으로 2차원적인 장애물 형상을 극복하는 전략을 소개한다. 또한 최적의 궤적을 판별하기 위해 정기구학 (forward kinematics) 기반의 모션 시뮬레이션을 개발하고 3장에서 기구-정역학적 (kineto-static) 해석 모델을 통한 가속도, 마찰계수, 반력, 토크 등의 출력값 계산방법에 대해 설명한다. 4장에서 안정성뿐만 아니라 장애물 등반 여부를 판별하기 위해 필요마찰계수 (required friction coefficient)를 새로운 성능지수로 정의하고 로봇의 미끄럼 발생을 예측했다. 다목적 최적화의 파레토 최적해 (pareto-optimal solution)를 탐색하기 위해서 유전 알고리즘을 적용하고 하나의 메커니즘 궤적으로 폭과 높이가 다른 계단 장애물을 등반할 수 있음을 확인했다. 또한 케이스 스터디를 통해 최적화 결과들을 비교 및 분석하였다.

(a) (b) (c)

Fig. 1 Conventional mobile robot platforms:
(a) Starship robot (Starship technologies) (b) Ava telepresence (AVA robotics) (c) CLOi servebot (LG Electronics)

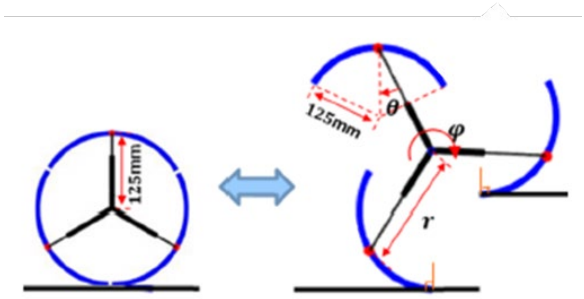
(a) (b)

Fig. 2 Examples of robots using the wheel-link mechanism [1-2]:
(a) CRAB I (b) Mars 2020 rover



(a) (b)

Fig. 3 Examples of robots using transformable wheel mechanism [3-4]:
(a) TurboQuad (b)STEP



(a) (b)

Fig. 4 The 2-DOF transformable wheel assuming rolling contact [5]:
(a) circular shape (b) transform shape

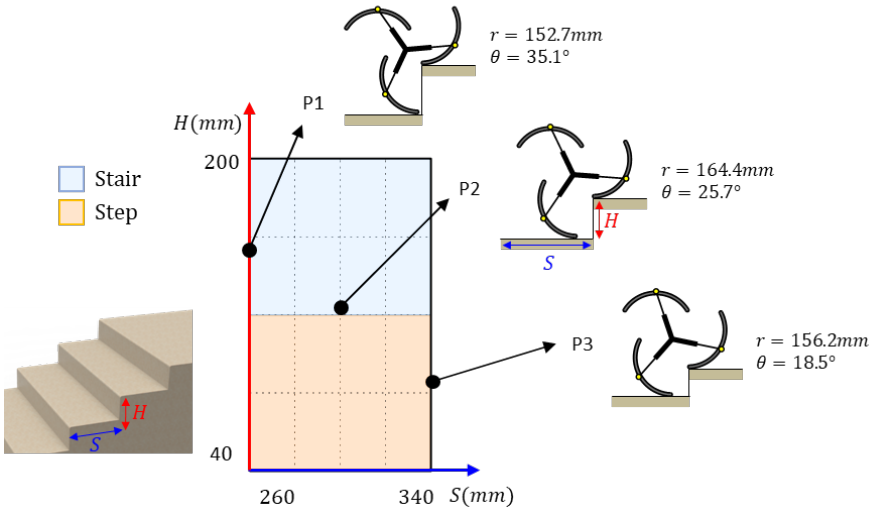
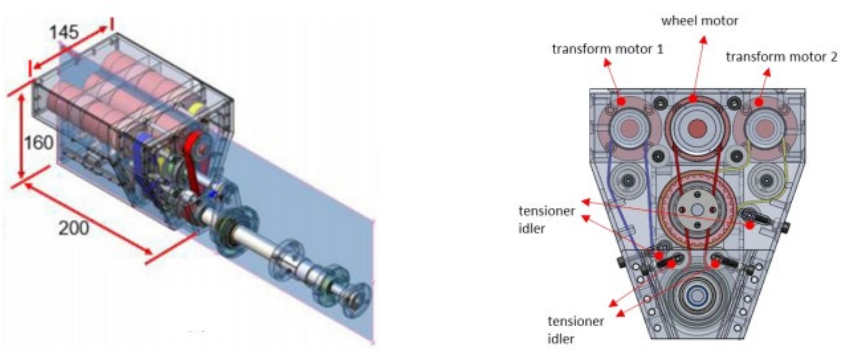


Fig. 5 The 2-DOF wheel shapes determined by the widths (S) and heights (H) of the obstacle



(a) (b)

Fig. 6 Wheel mechanism of the STEP platform [4]:
(a) size of motor box (b) front view of the motor box

2.1-자유도 변형 바퀴의 등반 전략

2.1 새로운 전략의 필요성

1-자유도 변형 바퀴 로봇은 앞으로 나아가기 위한 회전모터와 메커니즘 변형을 위한 변형모터가 각각 하나씩 양 측면에 사용된다. 변형 바퀴는 동기화된 세 개의 메커니즘과 이를 변형시키는 모터에 의해서 유효반경과 각도가 결정되며 로봇의 성능지수와 직관된다.

본 연구의 목표는 원형상태에서 최종 형상까지의 변형 메커니즘 궤적을 하나의 프로파일로 정의하고 다양한 폭과 높이의 턱 장애물을 등반하는 것이다. 1.3에서 언급하였듯이 변형 궤적을 하나의 프로파일로 설계했기 때문에 유효반경과 각도는 종속적인 관계를 가진다. 구동기를 감소시키는 것은 획기적인 도전이지만, 기구학적 특성이 1차원이기 때문에 구름접촉만을 사용하는 기존의 전략으로는 2차원적인 장애물 형상 (S,H)을 극복할 수 없다.

이를 위해 최초로 초기접촉각 (initial contact angle)의 개념을 도입했고 바퀴의 형상과 등반하고자 하는 장애물 형상이 일대일 대응관계를 형성하는 전략을 수립했다. 본 연구에서는 원형상태 기준 $v = 10m/s$ 이동속도가 가능하도록 일정한 회전속도 $\dot{\varphi} = \text{constant}$ 을 가정하고 초기접촉각에 따라 바퀴의 유효반경, 각도 그리고 회전각도가 결정된다. 원형상태 ($r = 120mm, \theta = 0°$)를 초기조건으로 두고 r 과 θ 를 각각 다른 차수의 다항함수로 설계했으며, 회전각도를 매개변수로

사용하여 다른 두 개의 함수를 하나의 메커니즘 프로파일로 종속시키는 1-자유도 변형 전략을 개발했다.

2.2 초기접촉각의 정의

초기접촉각이란 (α), Fig. 7과 같이 접촉점이 다른 장애물로 바뀌었을 때, 휠 풋 (wheel-foot)의 중심점을 기준으로 접촉점과 바퀴의 끝점이 이루는 각도를 의미한다. 이때, 휠 풋은 세 개의 파트로 분할되어 지면과 접촉하는 변형 바퀴의 일부이며 동기화된 움직임을 가진다. 휠 풋의 형상정보인 두께 (t)는 10mm이고 장애물의 모서리 기준 $t/2 = 5mm$ 만큼 떨어진 지점에서 첫 접촉점이 발생함을 가정한다.

선행연구 [5]에서는 Fig. 7(b)와 같이 가장 이상적인 접촉인 $0°$ 만을 고려하여 장애물을 등반했다. 본 연구에서는 하나의 메커니즘 변형 궤적만으로 여러 장애물을 극복하기 위해 양수 및 음수의 접촉 상황을 고려한다. 또한 Fig. 8과 같이 초기접촉각을 변화시키면 동일한 메커니즘 형상 (r_t, θ_t)으로 다른 장애물 (S', H')을 극복할 수 있는 적응성을 확보할 수 있다.

뿐만 아니라 Fig. 5를 통해서 알 수 있듯이 2-자유도 변형 바퀴는 장애물 형상 (P1~P3)에 따라 등반하는 순간의 메커니즘 형상이 달라진다. 반면에 1-자유도 변형 바퀴는 초기접촉각을 변화시켜 Fig. 9와 같이 하나의 바퀴 형상 ($r = 180mm, \theta = 15°$)만으로 폭과 높이가 다른 장애물을 극복할 수 있는 이점이 있다.

2.3 목표 장애물 형상과 최종 형상 정의

변형 바퀴는 유효반경과 각도에 의해 엔드 이펙터 (end-effector)의 궤적이 결정되며 특정 기구로 해당 움직임을 구현할 수 있다. 실제 바퀴 제작을 고려하면 메커니즘의 설계영역은 바퀴 내부로 한정되고 불필요한 변형으로 복잡한 기구를 설계하지 않도록 최종 형상 (r_f, θ_f)을 정의해야 한다. 초기접촉각과 더불어 바퀴의 형상을 결정하는 목표 턱 장애물의 크기를 식 (1)과 같이 이전 연구들과 동일한 범위를 사용했으며, 장애물의 폭과 높이의 간격을 각각 20mm, 40mm로 설정했다.

$$260mm \le S \le 340mm \qquad (1)$$

$$40mm \le H \le 200mm$$

Fig. 10(a)는 초기접촉각을 변화시켜 특정 장애물을 등반할 때 필요한 변형 바퀴의 형상을 의미한다. 가장 험난한 장애물 ($S_{\max}, H_{\max}$)을 극복할 때의 형상이 초기상태 기준으로 가장 바깥에 위치함을 알 수 있고 해당 장애물을 등반할 때 필요한 초기접촉각에 의해 r_f 와 θ_f 가 결정된다. 마지막으로 초기 원형상태 (r_i, θ_i)와 최종 형상을 연결하면 유효반경과 각도가 종속적인 관계를 가지는 1-자유도 메커니즘 궤적이 설계된다.

2.4 매개변수를 이용한 1-자유도 궤적 설계

폭 $S_{\max}$ 와 높이 $H_{\max}$ 의 장애물을 등반할 때 필요한 형상 (r_f, θ_f)을 결정했다면, 변형 바퀴의 메커니즘 형상을 결정하는 함수를 설계할 수 있다. 본 연구에서는 r 과 θ 의 프로파일을 각각 3차와 5차 다항식으로 설계했다. 두 함수의 종속적인 관계를 가지는 1-자유도 변형 바퀴는 초기 변형 과정에서 r 에 비해 θ 가 빠르게 변하면 휠 풋의 접촉점이 주행 방향과 반대로 생성될 수 있다. 이는 로봇의 불안정성으로 이어지고 상대적으로 변형 타이밍을 늦추기 위해 다른 차수의 함수로 설계했다. 최종적으로 Fig. 11과 같이 φ를 매개변수로 활용하여, 차수가 다른 r 과 θ 의 프로파일 식 (2), (3)을 종속적인 관계의 1-자유도 변형 궤적 $f(r)$로 매개변수화 했다.

$$r = g(\varphi) = \sum_{m=0}^{3} b_m r^m \tag{2}$$

$$\theta = h(\varphi) = \sum_{n=0}^{5} c_n \theta^n \tag{3}$$

추가적으로 원형상태와 최종 형상을 연결한 메커니즘 프로파일 $f(r)$ 이 Fig. 10(a)처럼 점선들과 하나의 교차점 (a1~a5)을 형성하면 식 (3)과 같이 장애물의 크기와 바퀴 형상 간의 일대일 대응관계가 형성된다. 즉, 변형모터의 회전각도과 하나의 변형 궤적만으로도 다양한 폭과 높이의 장애물을 등반할 수 있다.

$$[S, H] = g(f(r), \alpha) \tag{3}$$

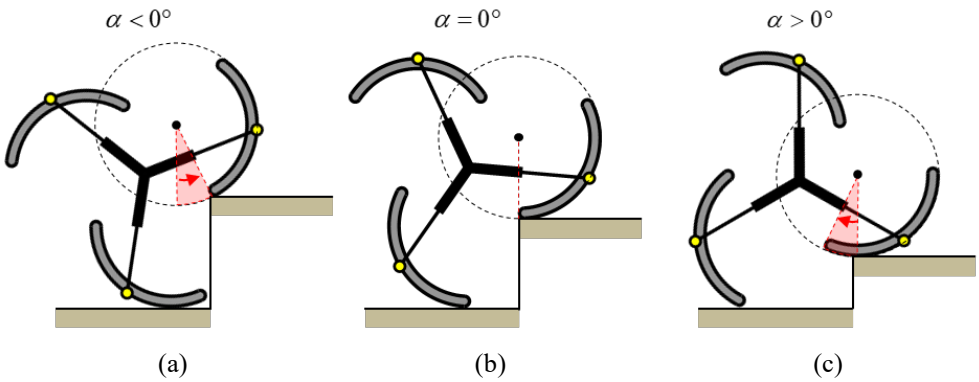


Fig. 7 The concept and sign of initial contact angle and climbing situation when the initial contact angle is (a) negative (b) 0 ° (c) positive, respectively

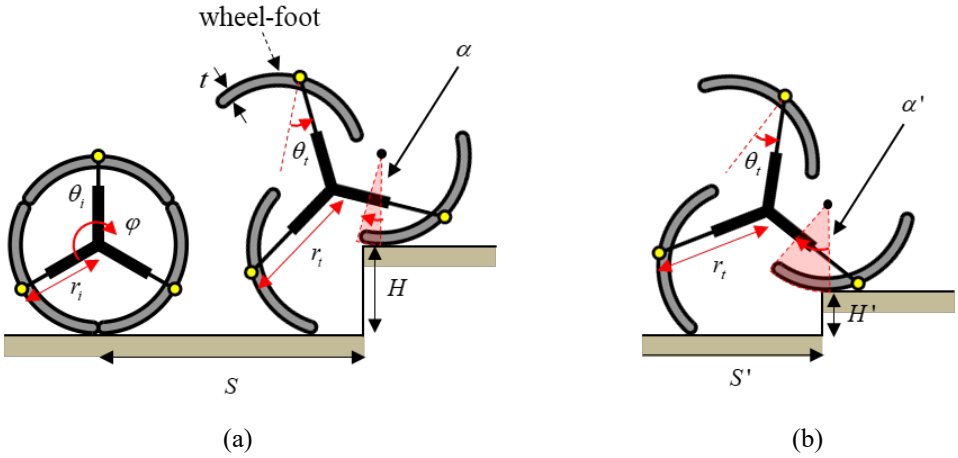


Fig. 8 Adaptive transformable wheel:
(a) design parameters in the initial state (r_i, θ_i) and climbing state (r_t, θ_t) (b) example of overcoming different obstacle (S', H') with the same shape (r_t, θ_t) by changing the initial contact angle (α')

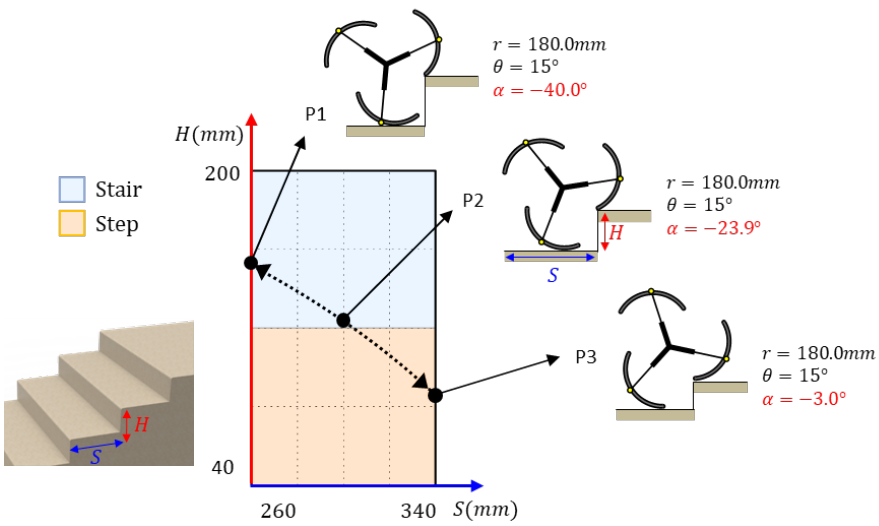
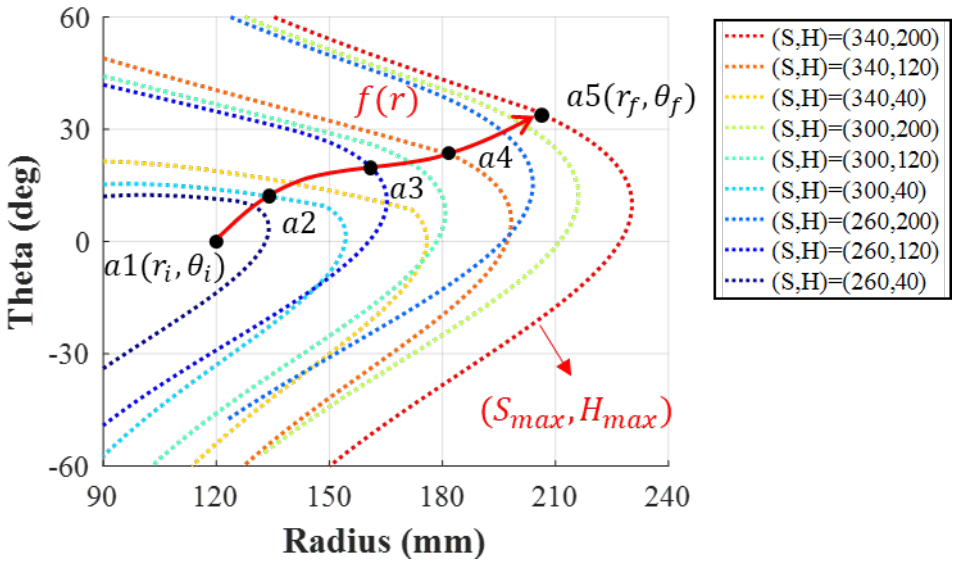
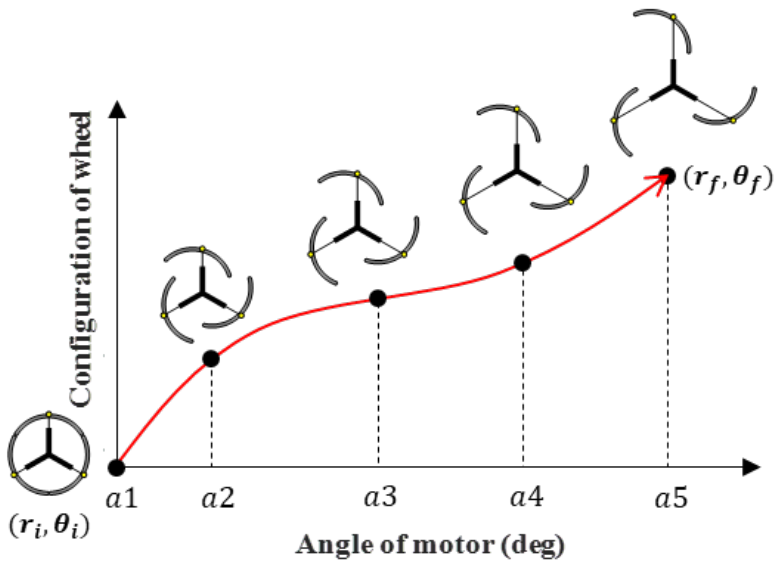


Fig. 9 Range of obstacles that can be overcome with the same shape ($r = 180mm, \theta = 15°$) by changing the initial contact angle

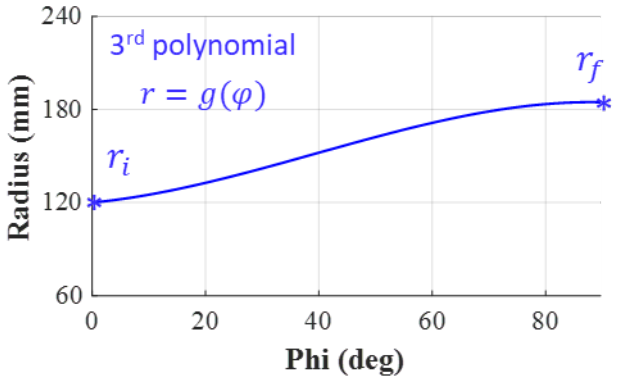


(a)

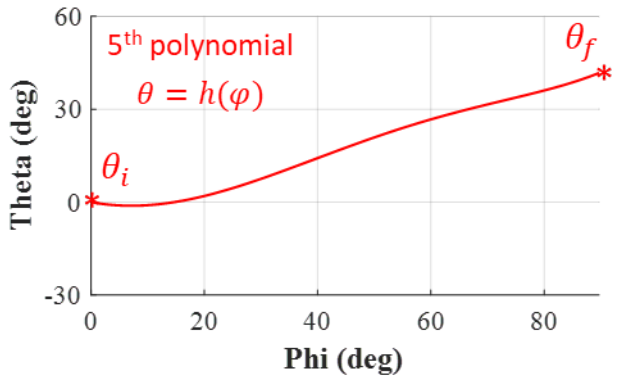


(b)

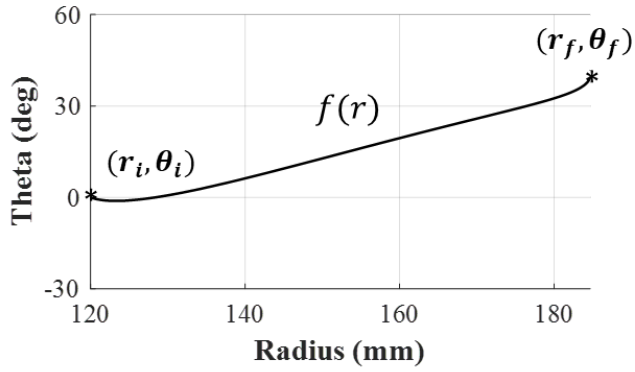
Fig. 10 (a) The shape of the transformable wheel when climbing certain obstacles by changing the initial contact angle and 1-DOF profile $f(r)$ forming one intersection with the dotted line (b) transformable wheel configuration at the intersection according to the rotation angle of motor



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Correlation between two functions with different degrees using parameter φ: (a) cubic polynomial function, $r = g(\varphi)$ (b) quantic polynomial function, $\theta = h(\varphi)$ (c) 1-DOF mechanism profile $f(r)$ formed by parameterization

3. 기구-정역학적 해석

3.1 정기구학 기반의 모션 시뮬레이션

1-자유도 메커니즘 궤적에 의해서 변형 바퀴의 유효반경과 각도가 변화하고 로봇의 경로가 결정된다. 어떠한 프로파일이 최적인지 탐색하고 평지 주행뿐만 아니라 장애물을 등반할 때 로봇의 안정성을 평가하기 위해 Fig. 12와 같이 MATLAB을 통한 정기구학 기반의 모션 시뮬레이션을 개발했다. 로봇을 측면에서 바라본 2차원 형상의 구동 움직임을 관찰할 수 있으며, 시간에 따른 변형 바퀴의 회전 중심 CoR (Center of Rotation)을 통해 속도 및 가속도를 계산할 수 있다.

3.2 변형 바퀴의 기구-정역학적 해석 모델

Fig. 13은 변형 바퀴의 기구-정역학적 해석 모델이며 시뮬레이션을 통해 계산된 가속도 a_w 와 부품들의 무게중심점에 의해서 주행을 위한 필요마찰계수, 토크를 계산할 수 있다. 필요마찰계수란 [6~8], 지지대의 마찰계수를 임의의 상수로 가정했을 때 정적인 상태를 유지하며 장애물을 등반하기 위해 필요한 마찰계수이다. 동역학 프로그램과 다르게 기구학 기반의 시뮬레이션은 미끄럼이 발생하지 않는다. 따라서 기구-정역학적 해석을 통해 계산된 필요마찰계수에 의해서 등반 가능성을 예측할 수 있고 마찰계수 값이 클수록 미끄럼이 발생할 수 있음을 의미한다.

Table 1은 기구-정역학적 해석에 필요한 기호들의 명명법을 정리한 것이고 구체적인 연립방정식의 설명은 다음과 같다. 먼저 Fig. 13의 자유물체도 (FBD, Free Body Diagram)에 의해서 x, y 방향 힘 평형식과 모멘트 평형식 (5)~(10)을 세울 수 있다. 또한 식 (4)와 같이 마찰력은 수직항력과 마찰계수의 곱셈이고 필요 토크의 크기가 동일함을 적용하면 식 (8.2)와 식 (10.2)으로 표현 가능하다.

Table 2는 변형 바퀴 플랫폼 STEP의 스펙이며 지지대의 마찰계수 μ_t를 0.1로 가정하여 대입하면 6개의 미지수로 이루어진 식 6개로 힘 평형식과 모멘트 평형식을 정리할 수 있다. 이때, 바퀴와 지지대의 관성모멘트는 각각 $m_w / 2 \times \left\{ (r_o / 2)^2 + (r_i / 2)^2 \right\}$와 $m_t \times L^2 / 12$으로 가정하며, 연립방정식 풀이를 위해 식 (11)처럼 행렬화를 진행하고 $[6 \times 6]$행렬식의 역행렬을 우변에 곱해 쉽게 미지수 6개를 계산할 수 있다. 최종적으로 계산된 P_w를 N_w으로 나누면 정적인 상태를 유지하며 장애물을 등반하기 위해 필요한 마찰계수 $\mu_{req.w}$를 계산할 수 있다. 기구-정역학적 해석을 통해서 계산된 주행 결과 데이터는 1-자유도 궤적 설계 최적화를 위한 목적함수로 사용된다.

$$\textit{known}; \qquad P_w = \mu_{req.w} N_w\,, \quad P_t = \mu_{req.t} N_t\,, \quad M_{wt} = M_{tw} \tag{4}$$

$$\sum F_x = m_w a_{w.x}; \qquad P_w + F_{wt.x} = m_w a_{w.x} \tag{5}$$

$$\sum F_y = m_w a_{w.y}; \qquad N_w + F_{wt.y} = m_w a_{w.y} + m_w g \tag{6}$$

$$\sum M_w = I_w \alpha_w; \qquad M_{wt} - N_w(x_1 - x_2) + P_w(y_1 - y_2) = I_w \alpha_w \tag{7}$$

$$\sum F_x = m_t a_{t.x}; \qquad -P_t - F_{tw.x} = m_t a_{t.x} \tag{8.1}$$

$$-\mu_{req.t} N_t - F_{tw.x} = m_t a_{t.x} \tag{8.2}$$

$$\sum F_y = m_t a_{t.y}; \qquad N_t - F_{tw.y} = m_t a_{t.y} + m_t g \tag{9}$$

$$\sum M_t = I_t \alpha_t; \qquad -M_{tw} + \frac{2}{L}(F_{tw.x}\sin\beta - F_{tw.y}\cos\beta - P_t \sin\beta - N_t \cos\beta) = I_t \alpha_t \tag{10.1}$$

$$-M_{tw} + \frac{2}{L}(F_{tw.x}\sin\beta - F_{tw.y}\cos\beta - \mu_{req.t} N_t \sin\beta - N_t \cos\beta) = I_t \alpha_t \tag{10.2}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -(x_1 - x_2) & y_1 - y_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\mu_{req.t} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{L}{2}(\mu_{req.t}\sin\beta + \cos\beta) & \frac{L}{2}\sin\beta & -\frac{L}{2}\cos\beta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_w \\ P_w \\ N_t \\ F_{wt.x} \\ F_{wt.y} \\ M_{wt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{wt} \\ a_{w.y} + g \\ \alpha_w \\ a_{t.x} \\ a_{t.y} + g \\ \alpha_t \end{bmatrix} \tag{11}$$

Table 1 Nomenclature

m_w	바퀴의 질량
m_t	지지대의 질량
N_w	바퀴의 수직항력
N_t	지지대의 수직항력
μ_w	바퀴의 필요마찰계수
μ_t	지지대의 필요마찰계수
P_w	바퀴의 마찰력
P_t	지지대의 마찰력
F_{wt}	바퀴 회전중심에서의 힘
F_{tw}	지지대 끝점에서의 힘
M_{wt}	바퀴의 필요토크
M_{tw}	지지대의 필요토크
I_w	바퀴의 관성모멘트
I_t	지지대의 관성모멘트
α_w	바퀴의 회전가속도
α_t	지지대의 회전가속도
L	지지대의 길이
β	지지대와 지면이 이루는 각도
g	중력가속도

Table 2 Specifications of transformable wheel robot for motion analysis

Parts	Parameters	Values
Wheel	m_w	$16kg$
	I_w	$53000kg \cdot mm^2$
Tail	m_t	$2kg$
	I_t	$60000kg \cdot mm^2$
	L	$600mm$
	μ_t	0.1

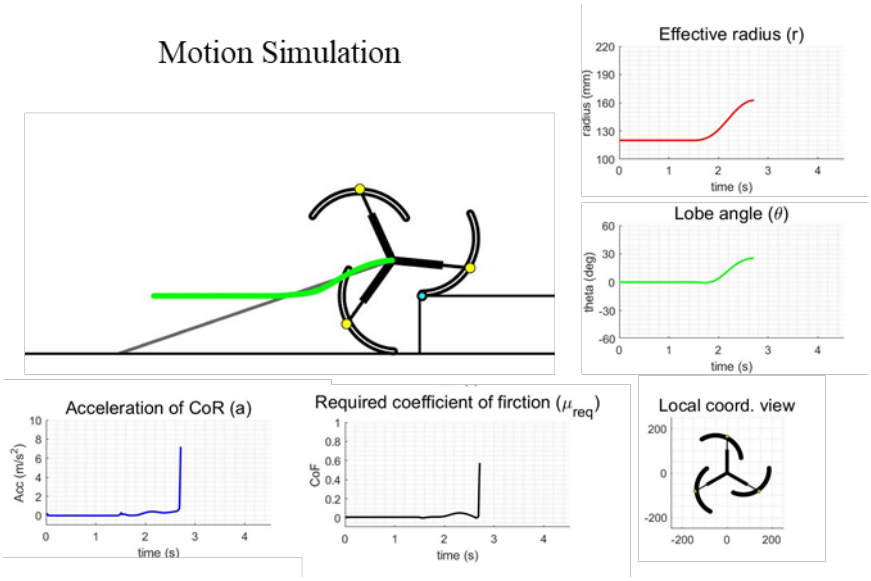


Fig. 12 Motion simulation based on kinematic of 1-DOF transformable wheel for step-overcoming

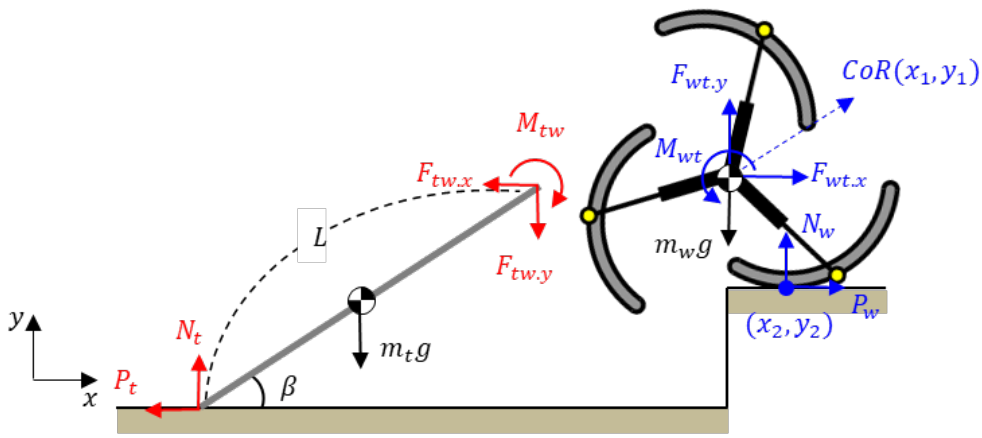


Fig. 13 Kineto-static analysis model of transformable wheel and FBD

4. 다목적 최적 설계 정식화

4.1 목표 성능지수 정의

1-자유도 변형 바퀴 로봇은 감소된 자유도로 인해 좀 더 정교한 변형을 필요로 하며 사용자에게 서비스를 제공하기 위해 안정성에 대한 성능평가는 필수적이다. 대표적으로 로봇의 안정성과 관련된 지표는 충격량이 있으며 변형 바퀴의 중심인 CoR에서의 가속도와 관련이 있다. 특히 접촉점이 다음 장애물로 이동하는 순간 큰 충격량이 발생하기 때문에 이를 최소화하는 노력이 필요하다.

또한 배달로봇의 주목적은 흔들림 없이 물품을 운반하거나 서비스를 제공하는 것이며 등반순간 뿐만 아니라 주행 과정에서 안정성도 고려해야 한다. 이를 위해 하나의 턱 장애물을 등반하기 위한 형상 변형 스텝 수를 N 이라고 했을 때, 평균가속도를 의미하는 $\frac{\sum\|\mathbf{a}_{CoR}\|}{N}$ 를 감소시켜야 한다. 충격량과 관련된 두 가지 상황을 모두 고려하여 본 연구에서는 첫 번째 성능지수로 식 (12) [5]을 선정하였다.

$$PI_{(1)} = min\left\{max(\|\mathbf{a}_{CoR}\|) + \frac{\sum\|\mathbf{a}_{CoR}\|}{N}\right\} \tag{12}$$

나아가 유효반경과 각도를 변화시켜 수직 장애물을 등반하는 변형 바퀴는 장애물을 극복하는 순간 미끄러짐에 취약하다. Fig. 13과 같이 크게 변형 바퀴 본체와 지지대로 파트를 분류할 수 있고 지지대에서 발생하는 마찰계수를 가정하면, 각 파트의 무게중심점 위치에 따라 접촉점에서의 수직항력과 마찰력을 계산할 수 있다. 3.2에서 언급하였듯이, 필요마찰계수는 정적인 상태를 유지하기 위한 마찰계수 값이므로 $\mu_{req.w}$ 가 높을수록 미끄럼이 발생하고 식 (13)과 같이 등반하는 순간 필요마찰계수를 최소화하는 것이 필요하다.

$$PI_{(2)} = min\left\{\mu_{req.w}\right\} \tag{13}$$

정리하면 로봇의 안정성과 장애물 극복능력과 관련된 두 가지 성능지수를 사용하였으며, 설계된 하나의 프로파일을 사용하여 2.3에서 언급하였던 25가지의 장애물 형상에 대해 시뮬레이션을 진행했다. 이를 통해 두 가지 성능지수의 결과값을 도출하고 가중치를 동일하게 주어 데이터를 합산하였다. 로봇의 주요 사용목적에 따라 장애물 형상에 따른 가중치를 조절하면 다른 최적화 결과를 도출할 수 있다.

4.2 NSGA-II 알고리즘

1-자유도 변형 바퀴는 유효반경과 각도의 종속적인 관계에 의해 엔드 이펙터의 궤적이 하나로 결정되기 때문에 사용목적에 따라 최적의 궤적을 만족하는 메커니즘을 설계한다. 사용자에게 서비스를 제공하거나 물품을 전달하는 배달로봇의 경우 안정성을, 탐사로봇의 경우 장애물 극복능력을 최우선적으로 고려해야 한다. 이처럼 두 가지 이상의 목적함수를 가지는 최적화 문제에서 파레토 최적해를 찾기 위해 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 알고리즘[9]을 사용했다.

다목적 최적화의 정식화 (formulation)는 잘 정의 (well-posed) 되어있지 않고 설계공간이 비선형적 (non-linear)이기 때문에 최적의 해를 찾는데 어려움이 있다. 이로 인해 확률론적 최적화 방법론인 유전 알고리즘을 선택했다. 그중에서도 Fig. 14와 같이 비지배 정렬 (non-dominated sorting) [10]을 통해 사전 우수해를 판별하고 연산속도에서 장점이 있는 NSGA-II 알고리즘을 적용했다. 모든 척도에서 데이터 A가 B보다 우위에 있을 때, ‘A가 B를 지배한다.’라고 표현하며 이후에 과밀거리 (crowding distance)에 따라 순위를 부여한다.

후손 개체를 생성하는 유전자 알고리즘은 데이터 조작 기법에 따라 생성되는 개체의 밀도와 유사성이 달라진다. 본 논문에서는 Table 3와 같이 모집단 크기 (population size)를 100개로 설정하였고 최대 반복 횟수 100회에 도달할 때까지 수행했다.

4.2.1 교차방법

유전 알고리즘은 지역 최적점 (local optimum)에 빠지지 않도록 확률에 따라 개체의 유전자를 서로 조합한다. 교차 (crossover) 방법으로 설계변수의 전역 영역 (global basin)이 좁은 다목적 최적화 문제에서 유용한 SBX (Simulated Binary Crossover) [11]를 사용하였다. 또한 교차율 (crossover probability) P_c을 0.8로 설정하고 밀집도를 컨트롤하는 교차 인덱스 (crossover index), n_c는 10으로 사용하였다. 해당 값이 클수록 모개체와 가까운 값이 생성된다.

4.2.2 변이방법

유전 알고리즘의 또 다른 특징으로 특정 유전자의 변이 (mutation)를 일으켜서 모개체에 없는 속성을 만들고 해집단에서 살아남을 확률을 만든다. 이러한 방법은 해집단의 다양성을 높이고 특정 최적해에 빠져드는 경우를 방지하는 주요 기법이다. 변이 방법으로 PM (Polynomial Mutation) 기법 [12]을 사용하였으며, 변이 인덱스 (mutation index), n_m을 5로 설정하여 최적화를 진행하였다. 또한 변이율 (mutation probability) P_m은 개체당 원소 개수 (decision variable) $n=7$에 대해서 $1/n$ 값을 사용했다.

4.3 제한조건 정의

실제 변형 바퀴 메커니즘 제작을 위해서는 Fig. 15와 같이 부품끼리의 접촉 제한조건 세 가지를 고려해야 한다. 특히, 휠 풋끼리의 접촉은 불안정한 주행을 발생시키고 부품뿐만 아니라 모터의 고장으로 이어진다. 나아가 파트를 결합시키고 메커니즘을 구동시키는데 필요한 축의 공간 확보를 고려해야 한다. 이처럼 네 가지 설계 제한조건을 통해서 가장 험난한 장애물을 등반할 때의 초기접촉각 범위를 식 (14)와 같이 결정할 수 있다. 또한 부등식 제약조건 (inequality constraint)을 만족하는 초기접촉각에 따라 1-자유도 변형 궤적 $f(r)$의 마지막 변형 형상이 결정된다.

$$-113.65° \le \alpha_f \le 27.09° \tag{14}$$

추가로 설계된 궤적 $f(r)$ 이 α_f 의 범위를 만족하더라도 변형 과정에서 네 가지의 제한조건을 위반할 수 있다. 이러한 경우에는 비지배 정렬을 통해 제약 조건을 처리한다. 아래와 같이 세 가지 경우에 대해 i 가 j 를 제한적으로 지배한다고 정의하고 최적화를 진행했다. [10]

1) i는 feasible하지만 j가 infeasible한 경우

2) i와 j 모두 infeasible하고 i가 constraint를 적게 위반하는 경우

3) i와 j 모두 feasible하고 i가 우위에 있는 경우

4.4 최적화 정식화

NSGA-II 알고리즘을 모션 시뮬레이션에 연동시켰으며 다목적 최적화 정식화는 식 (15)와 같다. 초기상태인 원형 형상은 고정되어 있고 α_f 에 의해 최종 변형 형상이 결정되기 때문에 n 차 다항함수를 설계하기 위해 필요한 설계변수는 $(n-1)$ 개가 필요하다. 예를 들어, 3차 다항 함수로 설계되는 r 프로파일은 양 끝점에서의 기울기인 일계도 함수, 5차 다항함수로 설계되는 θ 프로파일은 일계도 함수와 이계도 함수가 설계변수이다. 설계변수의 범위는 국소 최저치 (local minima)에 빠지지 않는 적절한 값으로 설정했다. 또한 목적함수에 시그마 기호가 존재하는 이유는 25가지 턱 장애물에 대한 가중치를 모두 동일하게 주었기 때문이다. 1-자유도 변형 바퀴가 특정 장애물을 등반하기 위해 사용된다면 가중치를 달리하여 데이터 처리가 가능하다.

$$
\begin{aligned}
&\textit{Find} && b_m\ (m=0,1\cdots 3) \\
& && c_n\ (n=0,1\cdots 5) \\
&\textit{Min} && PI_{(1)} = \sum_{i=1}^{25}\left\{ max(\left\|a_{CoR}^{i}\right\|) + \frac{\sum\left\|a_{CoR}^{i}\right\|}{N} \right\} \\
& && PI_{(2)} = \sum_{i=1}^{25}\left\{ \mu_{req.w}^{i} \right\} \\
&\textit{Subject to} && -113.65° \le \alpha_f \le 27.09° \\
& && -1 \le g'(\varphi_i) \le 1 \\
& && -1 \le g'(\varphi_f) \le 1 \\
& && -1 \le h'(\varphi_i) \le 1 \\
& && -1 \le h'(\varphi_f) \le 1 \\
& && -0.1 \le h''(\varphi_i) \le 0.1 \\
& && -0.1 \le h''(\varphi_f) \le 0.1
\end{aligned}
\tag{15}
$$

Table 3 Parameters for NSGA-II algorithm

Parameters	Values
Population size, N_p	100
Number of iterations	100
Crossover probability, P_c	0.8
Mutation probability, P_m	$1/n$ (number of decision variables)
Crossover index, n_c	5
Mutation index, n_m	10

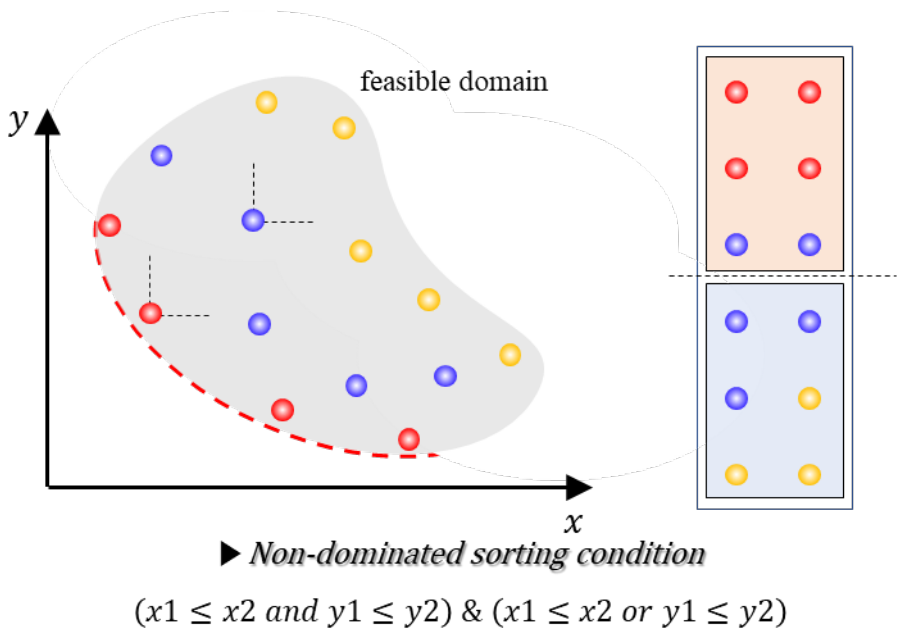


Fig. 14 Pareto-optimal solution method for multi-objective optimization using NSGA-II algorithm and non-dominated sorting condition

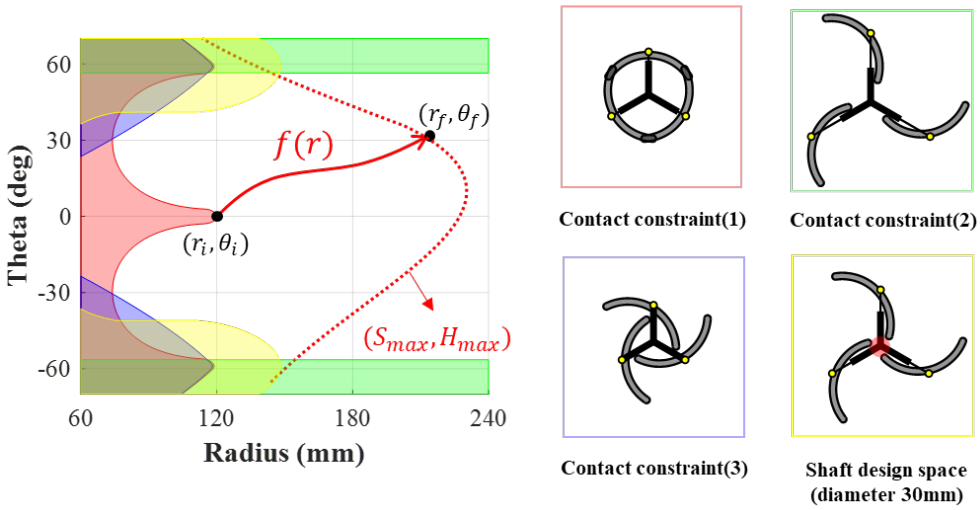


Fig. 15 Design constraints that determine the final shape (r_f, θ_f) and the range of the initial contact angle (α_f) when climbing the most difficult obstacle

5. 최적화 결과 및 분석

5.1 최적화 결과

NSGA-II 알고리즘을 통한 다목적 최적화의 파레토 최적해 탐색 결과는 Fig. 16과 같다. 빨간색 점은 100번째 데이터, 회색 점은 이전 데이터를 의미하며 각각의 데이터들은 프로파일 $f(r)$의 정보를 가지고 있다. 최적화가 진행됨에 따라 비지배 정렬에 의해서 데이터들이 바깥으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 최적화 결과를 통해 두 성능지수 간의 트레이드오프 (trade-off) 관계가 존재하며, 턱 장애물을 등반할 때 주행 안정성과 관련된 가속도와 장애물 극복능력인 필요마찰계수는 반비례 관계임을 알 수 있다.

5.2 데이터 분석

최적화 결과에서 임의로 세 개의 데이터를 선택하여 폭 300mm, 높이 120mm의 턱 장애물을 등반할 때의 변형 형상을 비교해 보았다. Fig. 17과 같이 장애물 극복능력과 관련된 $PI_{(2)}$ 가 개선될수록 접촉점과 CoR의 거리가 멀어지고 초기접촉각이 음수 방향으로 커지는 것을 확인하였다. 이로 인해 휠 풋의 끝점으로 찍으면서 장애물을 등반하게 되고 장애물 극복능력이 향상된다. 그 이유는 기구-정역학적 해석에서 준정적 평형상태를 가정하고 접촉점과 무게중심 사이의 거리가 멀어질수록 모멘트 평형을 이루기 위한 지면

반력이 작아지기 때문이다. 반면 로봇의 안정성 측면에서는 좋지 않기 때문에 사용목적에 따라 적절한 변형 궤적을 선택해야 한다.

수치적으로 세 가지 궤적에 대해 성능지수를 비교하면 Table 4의 결과를 얻을 수 있다. 첫 번째 대비 세 번째 궤적을 사용하여 턱 장애물을 극복하면 $PI_{(1)}$ 은 72.9% 증가하였고 $PI_{(2)}$ 는 38.6% 감소하였다. 이를 통해 로봇의 주행 안정성과 관련된 가속도 성능지수의 값이 민감성이 있다는 것을 알 수 있다. 추가적으로 본 논문에서는 하나의 턱 장애물에 대한 성능지수 결과를 도출하고 비교하였지만 초기접촉각을 변화시키는 1-자유도 변형 전략을 통해 Fig. 18과 같이 하나의 궤적을 사용하여 다양한 장애물을 극복할 수 있다.

Table 4 Performance index results for three cases, $PI_{(1)}$: driving stability, $PI_{(2)}$: ability for step-overcoming

	$PI_{(1)}$ (m/s^2)	$PI_{(2)}$
Case(1)	7.48	0.57
Case(2)	11.17	0.39
Case(3)	12.93	0.35

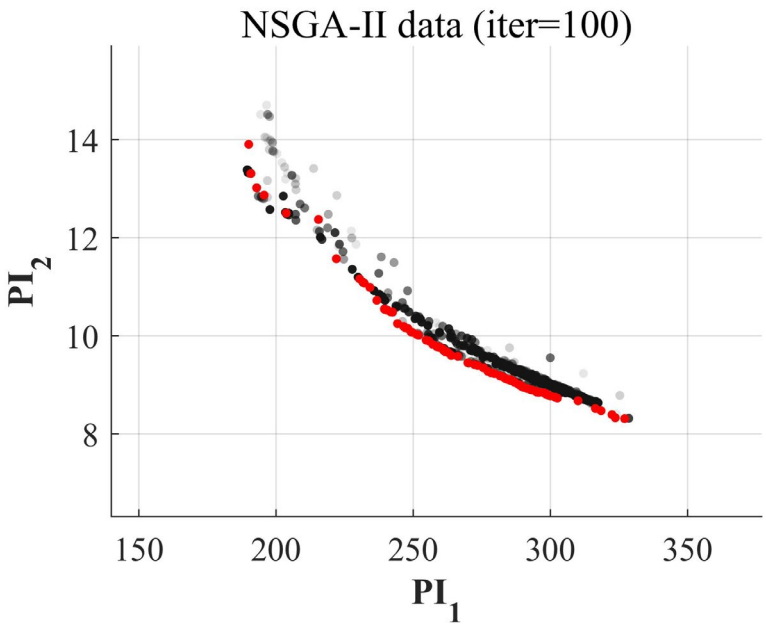


Fig. 16 NSGA-II optimization result and pareto-front solution

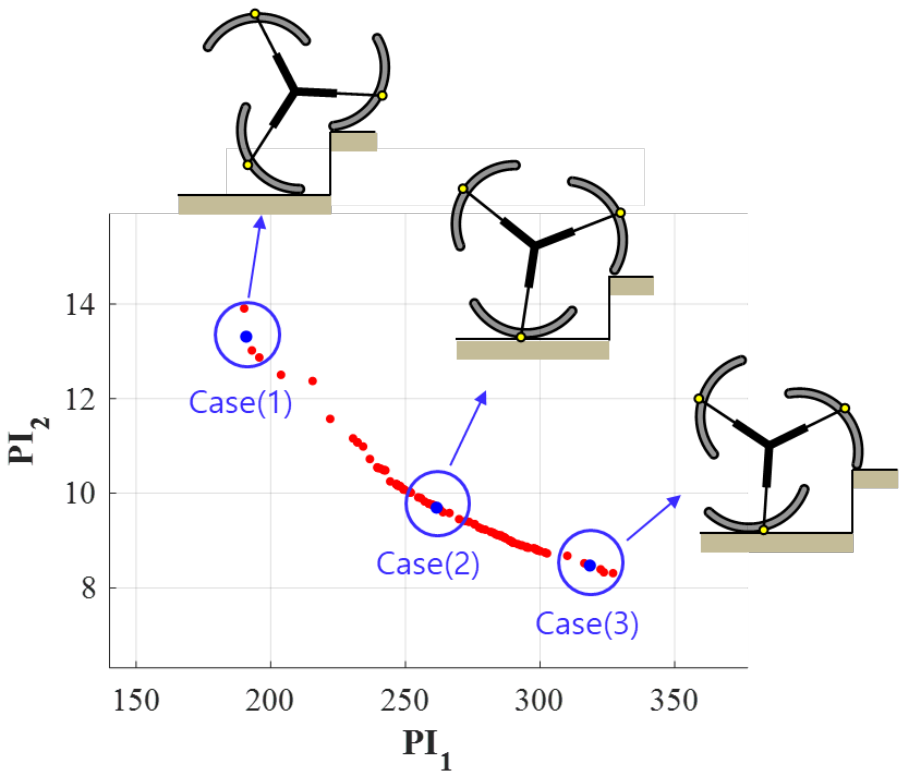


Fig. 17 Transformable wheel shape of three cases for climbing obstacle 300mm width and 120mm height

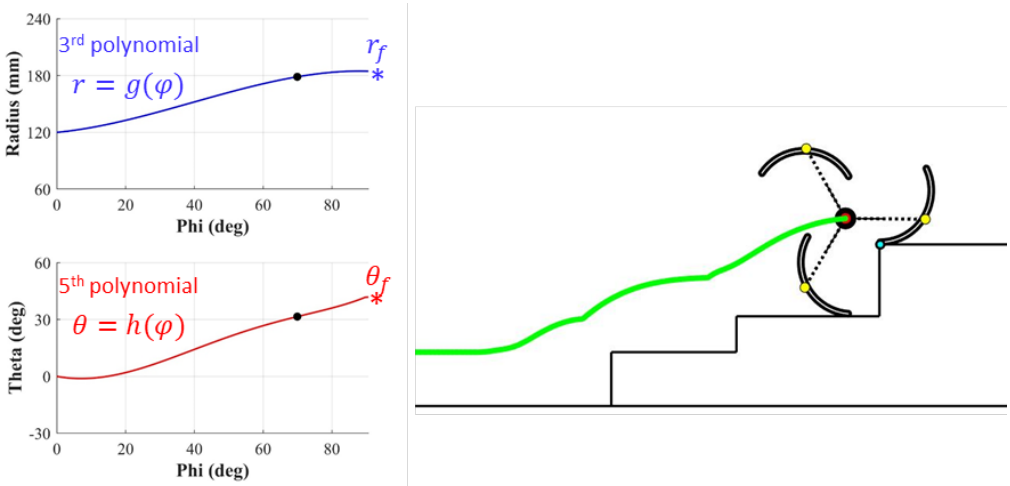


Fig. 18 Motion simulation of overcoming various obstacles using 1-DOF deformation trajectory

6. 결　　론

본 연구는 하나의 액추에이터만으로 다양한 폭과 높이의 장애물을 극복할 수 있는 1-자유도 변형 바퀴 로봇의 등반전략을 제시하였다. 초기 접촉각이라는 새로운 변수를 도입하여 바퀴의 형상과 장애물 형상이 일대일 대응관계를 이루도록 하는 전략이었다. 바퀴의 형상을 결정하는 r과 θ의 프로파일을 각각 다른 차수의 함수로 정의하고 매개변수 φ를 사용하여 종속관계를 형성하는 1-자유도 변형 궤적을 설계했다. 또한 실제 변형 바퀴 형상을 고려하고 설계자가 입력한 변형 궤적에 따라 실시간으로 등반 과정을 확인할 수 있는 정기구학 기반의 모션 시뮬레이션을 개발했다. 안정성과 장애물 극복능력을 고려한 두 가지 성능지수를 선정하고 NSGA-II 알고리즘의 다목적 최적 설계를 통해 1-자유도 변형 바퀴 궤적의 파레토 최적해를 탐색하였다.

추후 연구로 설계된 궤적이 최적인지 검증하기 위해 2-자유도 변형 바퀴 모듈을 설계했고 테스트 벤치실험을 진행할 예정이다. 최종적으로 1-자유도 변형 바퀴 궤적 설계는 기구 위상 최적화 (mechanism synthesis by topology optimization) 기초 연구로 활용될 것이며, 정해진 위상에 스프링을 추가하여 갑작스러운 변화와 충격에 대응할 수 있는 메커니즘을 개발할 것이다.

참고 문헌

[1] Siegwart, Roland, et al. "CRAB-Exploration Rover with advanced obstacle negotiation capabilities." *Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA 2006) ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 28-30, 2006*. European Space Research and Technology Centre (ESTEC), 2006.

[2] Toupet, Olivier, et al. "A ros-based simulator for testing the enhanced autonomous navigation of the mars 2020 rover." *2020 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2020.

[3] Wang, Ting-Hao, and Pei-Chun Lin. "A Reduced-Order-Model-Based Motion Selection Strategy in a Leg-Wheel Transformable Robot." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (2021).

[4] Kim, Youngsoo, et al. "STEP: A new mobile platform with 2-DOF transformable wheels for service robots." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25.4 (2020): 1859-1868.

[5] Kim, Kijung, et al. "Optimal trajectory planning for 2-DOF adaptive transformable wheel." IEEE Access 8 (2020): 14452-14459.

[6] Choi, Dongkyu, et al. "Improvement of step-climbing capability of a new mobile robot RHyMo via kineto-static analysis." Mechanism and Machine Theory 114 (2017): 20-37.

[7] Kim, Youngsoo, et al. "Curved-spoke tri-wheel mechanism for fast stair-climbing." IEEE Access 7 (2019): 173766-173773.

[8] Thueer, Thomas, and Roland Siegwart. "Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots." Robotics and Autonomous Systems 58.5 (2010): 508-519.

[9] Deb, Kalyanmoy, et al. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." IEEE transactions on evolutionary computation 6.2 (2002): 182-197.

[10] Deb, Kalyanmoy, et al. "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II." International conference on parallel problem solving from nature. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000.

[11] Deb, Kalyanmoy, and Ram Bhushan Agrawal. "Simulated binary crossover for continuous search space." *Complex systems* 9.2 (1995): 115-148.

[12] Basu, M. (2008). Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *30*(2), 140-149.

ABSTRACT

Optimal Design of 1-DOF Transformable Wheel Robot Trajectory for Step-overcoming

Jeong Won Shim
Department of Mechanical Engineering
The Graduate School
Seoul National University

A transformable wheel is a mobile robot platform climbing up or down step obstacles of various heights. The tri-segmented transformable wheel changes its effective radius and tilting angle for stable locomotion with high energy efficiency. Compared with a two-degree-of-freedom (2-DOF) wheel mechanism, a 1-DOF wheel mechanism has critical advantages in cost, weight, and actuator control. This study presents a multi-objective optimization of a 1-DOF transformable wheel mechanism for highly adaptive locomotion. However, if a 1-DOF mechanism driven by a single actuator is designed for a step obstacle of a specific geometry, it cannot be used directly for other obstacles of different widths and heights because it does not have sufficient DOFs to be used for the others. To resolve this critical issue, we propose employing an initial contact angle between the wheel-foot and a step as a new design variable. We show that this idea enables us to establish a one-to-one mapping between configurations of the wheel shapes and the target obstacles. However, the 1-DOF mechanism cannot represent all desirable wheel transformations because of its radius and angle correlation. Therefore, its locomotion trajectory must be planned elaborately. To find the optimal trajectory, we carried out a motion simulation based on kinematics and calculated its acceleration and required friction coefficient by kineto-static analysis. More importantly, we employed a non-dominated sorting genetic algorithm-II to identify a Pareto-optimal front and examined the trade-off between performance indices. Finally, we successfully established the optimal profiles of 1-DOF transformable wheel mechanisms utilizing the Pareto-optimal front.

Keywords : Transformable wheel, Kinematics, Obstacle overcoming, Performance index, Multi-objective optimization, Trajectory optimization
Student Number : 2020-29815