

변형 트랙 메커니즘을 이용한 등반로봇 설계

Design of a Transformable Track Mechanism for Wall Climbing Robots

이기욱¹, 서근찬¹, 김황¹, 김선호^{1,✉}, 전동수¹, 김홍석², 김종원¹
Giuk Lee¹, Kunchan Seo¹, Hwang Kim¹, Sun Ho Kim^{1,✉}, Hong Seok Kim² and Jongwon Kim¹

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

² 서울과학기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology)

✉ Corresponding author: sunkim@rodel.snu.ac.kr, Tel: 02-880-7144

Manuscript received: 2010.9.30 / Revised: 2011.7.14 / Accepted: 2011.9.23

This paper presents a transformable track mechanism for wall climbing robots. The proposed mechanism allows a wall climbing robot to go over obstacles by transforming the track shape, and also increases contact area between track and wall surface for safe attachment. The track mechanism is realized using a timing belt track with one driving actuator. The inner frame of the track consists of serially connected 5R-joints and 1P-joint, and all joints of the inner frame are passively operated by springs, so the mechanism does not require any actuators and complex control algorithms to change its shape. Static analysis is carried out to determine design parameters which enable 90° wall-to-wall transition and driving over projected obstacles on wall surfaces. A Prototype is manufactured using the transformable track on which polymer magnets are installed for adhesion force. The size of the prototype is 628mm X 200mm X 150mm (Length X Width X Height) and weight is 4kgf. Experiments are performed to verify its climbing capability focusing on 90° wall to wall transition and driving over projected obstacle.

Key Words: Climbing Robot (등반 로봇), Transformable Track (변형 트랙), Passive Joint (수동 관절)

기호설명

L = length of link

$\theta_{initial}$ = initial angle of first link

θ_{guide} = angle of guide

θ_{AB} = angle of first link

θ_{BC} = angle of second link

v = velocity of track

t = time

k_c = constant of compression spring

$l_{initial}$ = initial length of compression spring

1. 서론

국내외적으로 고층빌딩 외벽 청소 및 도장, 대형 선박의 블라스팅 및 도장, 대형 탱크의 검사 등의 극한환경에서 작업자의 안전을 보호하고 작업 효율을 높이기 위하여 등반로봇의 연구가 활발히 이루어 지고 있다.

등반로봇 기구부의 설계 및 제작에 있어서 가장 중요시 되는 기능은 흡착기능과 승월기능으로 나뉜다. 흡착기능은 다양한 재질의 수직 벽면에 로봇을 안정적으로 흡착시키는 것을 말하며, 승월 기능은 로봇이 다양한 형상의 벽면 및 벽면상의 장애물을 넘어 주행이 가능하도록 것을 의미한다.

흡착 기능과 관련된 연구는 주로 기존의 진공, 자석을 이용한 방법 뿐만 아니라, 케코도마뱀의

발바닥을 모사하여 van der Waals 힘으로 흡착하는 방법, 정전기를 이용하여 흡착하는 방법, 미세 발톱을 이용하여 기계적으로 거친 벽면에 부착하는 방법 등이 활발히 연구되고 있다.¹⁻⁷

반면 다양한 형상의 벽면 및 벽면상에 존재하는 장애물 승월 기능에 관한 연구는 대표적으로 Hirose 교수의 NINJA-1 과 같이 다수의 다리 메커니즘을 이용하여 한 평면에서 다른 경사진 평면으로 이동하는 방법과, 슬라이딩 메커니즘을 활용하여 이동하는 방법 등의 연구가 진행되고 있으나, 흡착 기능에 대한 연구에 비해 다양한 관점에서 연구 접근이 이루어지지 못하고 있으며, 실제로 사용하기에는 제어의 어려움이 있다.^{1,2,8,9} 하지만 빌딩의 외벽 등 실제로 로봇이 주행해야 하는 환경은 요철, 곡면, 면과 면의 조합 등 다양한 형상의 장애물을 포함하고 있기 때문에, 이를 효과적으로 극복하기 위한 장애물 승월 메커니즘의 개발 또한 매우 중요하며, 다양하고 효과적인 접근 방식이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 단순하고 가벼운 기구구조로 벽면간의 전환주행 및 장애물 승월이 가능한 기구 메커니즘을 개발하는 것을 목적으로, 변형이 가능한 캐터필러 트랙 메커니즘을 이용하여 승월 기능을 구현하였다. 또한 개발된 메커니즘의 타당성을 검증하기 위해 기구를 제작하였다. 본 연구 목적은 기구 메커니즘 개발이므로, 흡착기능은 영구자석을 이용하여 간단하게 구현하였다. 캐터필러 트랙에 폴리머 자석을 장착하여 흡착기능을 구현하였으며, 승월 기능은 캐터필러 트랙 기구의 역기구학 분석을 통해 로봇의 등반 주행을 분석한 후, 그 주행을 가능하게 하는 설계변수의 값들을 정하여 구현하였고, 이를 등반로봇의 시제품을 제작하여 실험을 통해 검증하였다.

2. 로봇의 기구구조 및 동작원리

2.1 로봇의 기구구조

본 연구를 통해 개발한 변형 트랙 메커니즘을 이용한 로봇의 기구 구조부는 Fig. 1 에서 보는 바와 같다. 로봇의 벽면간 전환 주행 및 장애물 승월에 대한 안정성을 유지하면서, 로봇 기구부의 구조를 단순하고 가볍게 하기 위하여 로봇의 링크의 수는 6 개로 결정하였다.

로봇의 트랙 메커니즘은 타이밍벨트를 사용하였으며, 벨트 내부를 구성하는 6 개의 링크는 5 개

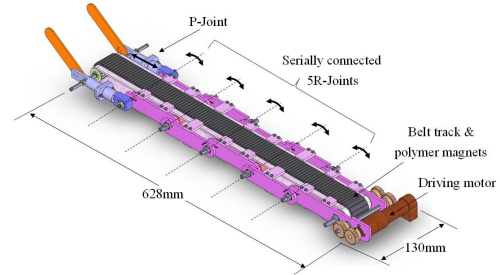
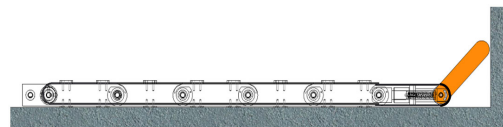
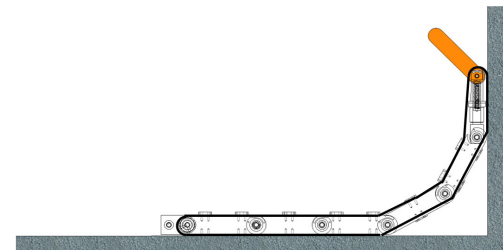


Fig.1 Structure of the climbing robot



< Case 1: Required track length = 1270 mm >



< Case 2: Required track length = 1266 mm >

Fig. 2 Change of required track length

의 회전 조인트를 통해 직렬로 연결되어 있다. 이로 인해 전체 트랙의 형상이 벽면 형상에 대응하여 변형이 가능하다. 또한, 회전 조인트의 회전에 의한 링크간의 각도 변화에 따라 Fig. 2 에서와 같이 트랙의 필요 길이가 변하더라도, 변형된 트랙 길이를 보상하고 구동을 위한 벨트의 최소 장력을 유지하기 위하여 로봇의 첫번째 링크에 1 개의 직진 조인트를 설치하였다.

로봇은 기구부의 설계와 제어를 단순화하고 로봇 무게의 경량화를 위하여 로봇의 뒷부분에 설치된 1 개의 모터만을 통해 구동이 되며, 앞서 언급한 5 개의 회전 조인트와 1 개의 직진 조인트는 모두 토션 스프링과 압축 스프링을 통해 수동적으로 구동이 되는 관절이다. 본 로봇에서는 하나의 구동 관절을 통하여 나머지 6 개의 관절들을 조절할 수 있도록 함으로써 목표로 했던 단순하고 가벼운 승월 메커니즘을 구현할 수 있도록 하였다.

타이밍 벨트의 바깥 면에는 로봇의 벽면 흡착

력을 발생시키기 위해 폴리머 자석을 부착하여 철판 벽면과의 흡착 기능을 구현하였다. 또한 첫 번째 링크에는 부가적으로 가이드를 부착함으로써, 로봇이 장애물을 만났을 때 첫 번째 링크를 쉽게 떼어낼 수 있도록 하였다.

2.2 로봇의 동작 원리

로봇의 전체적인 동작 원리는 상기 명시한 바와 같이 뒷부분에 설치된 1 개의 모터에 의해 구동이 되며, 5 개의 회전 조인트와 1 개의 직진 조인트 및 가이드는 이를 통해 수동적으로 구동이 된다.

2.2.1 회전 조인트의 동작 원리

로봇의 5 개의 회전 조인트에는 토션스프링을 사용하여, 각 관절에 연결된 두 링크가 벽면 쪽 방향으로 항상 회전을 하게 하는 회전력을 발생하게 하였다. 모든 링크가 벽면에 부착된 경우에는 벨트의 흡착력에 의해 링크가 굽혀지지 않아 로봇의 형태가 유지되며, 일부 링크가 벽면에 붙지 않고 떨어져있는 경우에는 토션스프링을 통해 생성된 관절의 회전력을 통해 떨어진 링크를 벽면 쪽으로 밀어붙이게 된다. 그 결과 로봇이 주행하면서 떨어진 링크가 다시 벽면에 재부착이 이루어질 때까지, 트랙의 형상이 벽면의 모양에 따라 지속적으로 바뀌게 된다.

이러한 기구구조는 90 도, 270 도 벽면 전환 뿐만 아니라 다양한 장애물을 넘을 수 있게 한다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 로봇이 창틀과 같은 요철 장애물을 넘어가는 운동을 예를 들면 로봇의 동작 원리는 다음과 같이 진행된다.

첫 번째 링크에 달려있는 가이드와 장애물 사이의 상호 작용력에 의해 먼저 첫 링크가 벽면에서 떨어지게 되며, 이 상태에서 로봇이 계속 주행을 하게 되면 이 후 뒤따라 오는 링크부터 점차적으로 벽면에서 떨어지게 되는 동시에, 토션스프링을 통해 생성된 관절의 회전력에 의해 떨어진 앞쪽 링크가 다시 벽 쪽으로 회전을 하게 되어 재부착이 연속적으로 이루어 지게 된다. 이러한 방법으로, 로봇은 구동 시 벽면에서 미끄러지지 않고 부착력을 유지하면서 장애물을 넘어가게 된다.

2.2.2 직진 조인트의 동작 원리

변형 트랙 메커니즘을 이용한 등반 로봇은 주행하면서 장애물에 따라 각각의 회전 조인트의 회

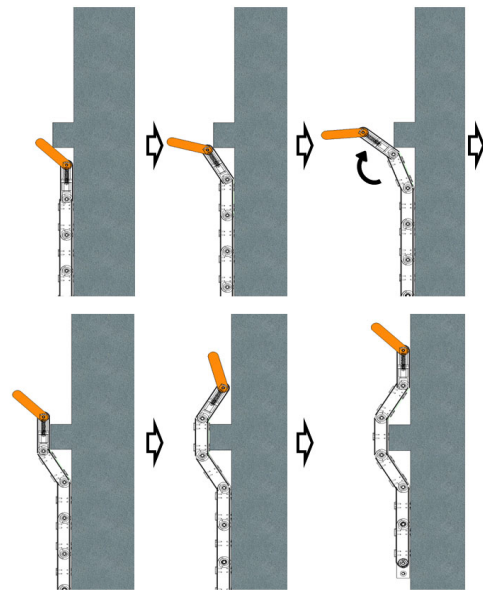


Fig. 3 Move over the obstacle

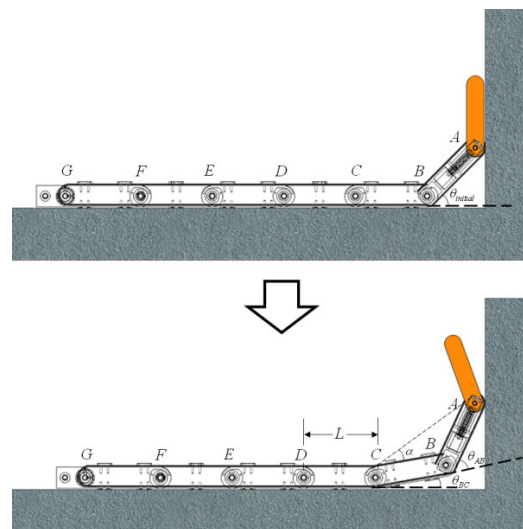


Fig. 4 Kinematic of 90° wall to wall transition

전에 의해 트랙 형상이 변하게 되어 전체 트랙의 필요 길이가 달라진다. 이 때 트랙에 설치된 타이밍 벨트의 장력을 충분히 얻지 못해 안정적인 구동이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 본 로봇에서는 직진 조인트를 로봇의 앞 부분에 설치하였으며, 로봇 첫 링크의 부착된 직진 조인트의 압축스프링의 복원력을 이용하여 직진 운동을 발생시켜 변형된 트랙 길이를 보상하고, 구동에 필요한 타이밍 벨트의 최소 장력을 유지할 수 있도록 하

였다.

2.3 가이드의 동작 원리

로봇의 첫 링크에 부착되어 있는 가이드는 로봇이 90° 벽면과 같은 경사가 있는 장애물 혹은 벽면을 만났을 때 첫 번째 링크를 벽면에서 떼어 내 주는 역할을 한다.

로봇의 트랙은 하나의 모터로 구동되기 때문에 슬립이 일어나지 않는다는 조건하에서는 벽면과 부착된 로봇바디의 이동속도는 같게 된다. 이러한 조건하에 로봇의 등반 주행을 역기구학 방법으로 해석을 해보면, 90° 벽면과 같은 경사가 있는 장애물을 만났을 때 첫 링크가 장애물과 만나는 각도가 0° 일 경우 기구학적으로 등반이 불가능하게 된다. 이러한 이유로 첫 링크에 가이드를 부착함으로써 첫 링크가 장애물을 만나는 각도를 항상 0° 이상으로 만들어, 로봇이 장애물을 벨트의 슬립 없이 등반할 수 있게 하였다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(L + L \cos \theta_{initial} - vt)^2 + (L \sin \theta_{initial} + vt)^2}}{2L} \right) \tag{1}$$

$$\theta_{BC} = \tan^{-1} \left(\frac{L \sin \theta_{initial} + vt}{L + L \cos \theta_{initial} - vt} \right) - \alpha$$

이때 기구적으로 주행이 가능하기 위해선 θ_{BC} 의 최소값은 0° 이상이어야만 한다. 식(1)을 바탕으로 계산을 하였을 경우 $\theta_{initial}$ 이 45° 일 경우 θ_{BC} 의 최소값이 0° 이상이 나와 기구적으로 로봇의 등반이 가능한 것을 알 수 있다.

또한 슬립이 없다는 조건하에 로봇이 진행하게 되면 Fig. 4 에서 첫 번째 링크 AB 의 재부착이 일어날 경우 두 번째 링크 BC 가 세 번째 링크 CD 를 벽면에서 떼어낸 후 진행을 하게 된다. 이와 같은 형태로 계속 진행을 하게 되면 로봇의 실제 진행모습은 Fig. 5 와 같이 계속 같은 형태의 진행을 반복하면서 90° 벽면 전환이 가능함을 알 수 있다.

3. 등반 로봇 설계를 위한 설계변수 값 선정

변형 트랙 메커니즘을 이용한 로봇이 다양한 벽면과 장애물을 안정적으로 극복하기 위해서는 앞서 언급한 동작원리와 연관된 설계변수 값들을 선정해야 한다. 선정해야 할 설계 변수 값들은 구동에 필요한 타이밍 벨트의 장력을 유지하기 위해 직진 조인트에 사용되는 압축스프링의 설계 값과, 첫 링크가 장애물을 만나는 각도를 조절하기 위한 가이드의 각도 및 로봇이 미끄러지지 않기 위한 링크의 부착력의 값이다.

먼저 실제 벽면에서 일반적으로 볼 수 있는 90° 경사의 벽면 전환을 목표로 하고, 이를 가능하게 하는 설계변수 값들을 결정하였다. 먼저 역기구학 분석을 통해 90° 벽면 전환 주행 모션을 추정한 다음, 그 등반 모션을 여러 단계로 나눈 후, 분석한 등반 모션에 대한 정적 해석을 통하여 설계변수 값들을 결정하는 순서로 진행하였다.

3.1 수직 벽면 전환 주행을 위한 역기구학 분석

첫 번째 링크의 진행방향과 전환 주행할 벽면이 수직을 이루는 경우 등반이 가능한 모션이 나오질 않는다. 따라서 가이드를 통하여 Fig. 4 와 같이 일정각도 이상이 된 후 벽면에 부착되어야 하는데, 이 때 첫 번째 링크와 수평 바닥면이 이루는 각도 θ_{BC} 는 다음의 식에서 구할 수 있다.

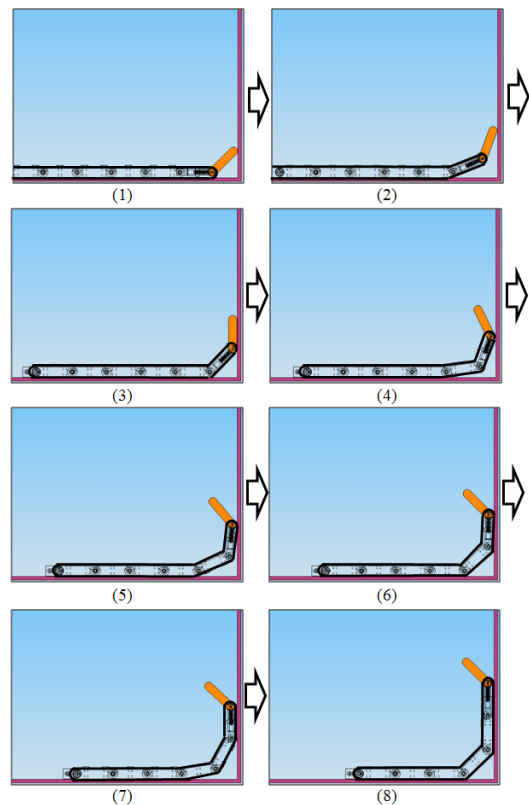


Fig. 5 90° wall to wall transition motion by inverse kinematics

3.2 수직 벽면 전환 주행의 해석을 통한 설계 변수 선정

3.2.1 가이드의 초기 설치 각도의 계산

역기구학을 통한 로봇의 등반 주행을 바탕으로 가이드의 초기 설치 각도를 계산하였다. 그 결과 등반 주행에서 첫 번째 링크 AB가 수평 벽면과 만나는 각도가 45° 이므로, 가이드는 Fig. 6 과 같이 링크 AB가 수직 벽면과 만나기 전 링크 AB를 들어줘서 θ_{AB} 45°를 만들어줘야 한다. 이를 기구적으로 분석한 결과 θ_{guide} 는 45°로 결정하였다.

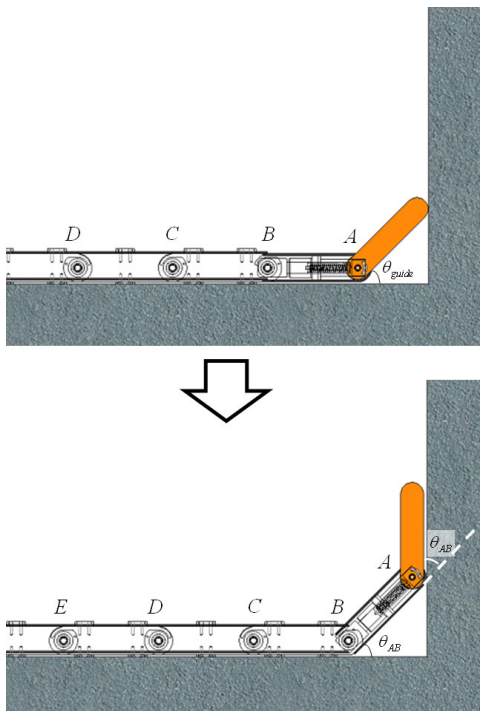


Fig. 6 Angle of guide mechanism

3.2.2 직진 조인트 압축스프링의 설계 값 계산

로봇이 90° 벽면 전환을 할 때 생기는 트랙의 필요 길이 변화를 바탕으로 직진 조인트에 설치된 압축스프링 설계 값을 다음의 과정을 통해 계산하였다. Fig. 2와 같이 90° 벽면 전환 시 발생하는 트랙의 필요 길이 변화는 5mm 이내이며, 트랙의 필요 길이 변화량이 최대 일 때의 로봇 링크들의 위치는 Fig. 7에 나타나 있다. 모든 링크가 일직선이 되었을 때의 초기 벨트의 길이는 1270mm로, 이때 필요한 직진 조인트의 초기 설치 길이는 42mm이다. 로봇의 구동 시 필요한 최소 벨트 장력을

$T_{initial}$ 이라 할 때 이러한 값들을 바탕으로 식 (2)를 정의할 수 있다.

$$k(l_{initial} - 0.042 + \frac{0.005}{2}) \geq T_{initial} \quad (2)$$

스프링의 설계 시 스프링상수를 작게 하여 벨트의 장력 변화량을 최소화하는 것이 적합하므로, 식 (2)에 의하여 압축스프링의 탄성계수 k_c 를 2.9N/mm로 결정하였고 그 초기길이 $l_{initial}$ 은 72mm로 결정하였다.

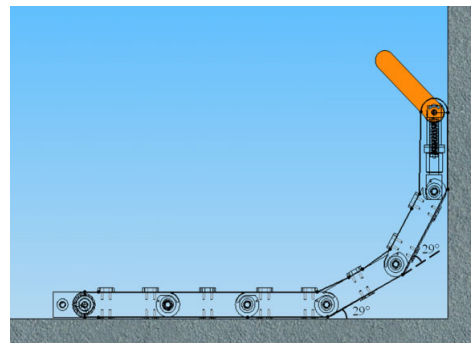


Fig. 7 Maximum change of track length

3.2.3 미끄러지지 않기 위한 트랙의 부착력 계산

로봇의 전체 무게를 W_{tot} , 벽면과 폴리머 자석간의 마찰계수를 μ , 자석의 단위면적당 부착력을 G , 흡착된 링크의 개수가 n , 그리고 흡착된 링크들 중 로봇의 진행방향의 앞에서부터 i 번째 링크의 흡착 면적을 A_i 라고 할 때, 로봇이 운동을 하면서 미끄러지지 않기 위해서는 다음의 식(3)을 만족시켜야 한다.

$$W_{tot} \leq \sum_{i=1}^n \mu G A_i \quad (3)$$

마찰계수 μ 는 폴리머 자석과 벽면과의 마찰계수 측정 실험을 통하여 결정하였으며 그 값은 0.4이다. 또한 기구의 전체 무게인 W_{tot} 는 등반 로봇의 기구 구조와 제어를 단순화 하고자 하는 기존의 목표를 달성하기 위하여 5kgf로 제한하였다. 각 링크의 흡착면적 A_i 는 모두 0.004 m²이며, 90° 벽면 전환 주행에 대한 분석을 통하여 90° 벽면 전

환 시 붙어있는 링크의 수가 최소 4 개이므로, 위의 식(3)에서 사용된 흡착면적의 개수 n 은 4 로 결정하였다. 이러한 변수값들을 바탕으로 식(3)을 계산하였을 때 필요한 단위면적당 최소 부착력 G 는 6250 N/m^2 임을 알 수 있다.

4. 시제품 제작 및 실험

제작된 로봇의 시제품은 Fig. 8 과 같다. 크기는 길이 628mm, 폭 130mm, 높이 38mm 이며 (가이드 부분 제외), 무게는 모터를 포함하여 4kgf 로 기준에 설정하였던 설계 목표치에 부합한다. 로봇의 모터는 maxon DC motor 를 사용하였으며 maxon motor 사의 EPOS 24/5 모터 컨트롤러로 외부의 PC 와 연결하여 유선으로 제어하였다. 에너지 또한 24V 의 변압기에서 유선으로 공급받는다.

로봇에 사용된 가이드의 초기 각도는 앞에서 논의한 대로 45° 로 설정하였으며, 직진 조인트에 사용되는 압축스프링의 스프링 상수 k_c 는 2.9 N/mm 초기길이 $l_{initial}$ 은 72mm 이다. 또한, 트랙에 사용된 자석의 단위면적당 부착력 G 는 시중의 판매되는 폴리머 자석의 값을 바탕으로 앞에서 계산된 최소 부착력보다 큰 제품을 선택하여, 14200 N/m^2 로 선정하였다

면과 면 사이의 각도 조절이 가능한 철판으로 된 테스트 벤치를 90° 로 유지한 채 벽면 전환 주행 실험을 하였으며, Fig.9 는 90° 벽면간 전환 주행 중인 로봇의 모습을 보여준다. 이는 앞서 역기구학 분석으로 산출한 등반 주행과 유사하게 올라가는 것을 보였다. 이와 같은 실험을 통하여 90° 벽면 전환은 성공적으로 가능한 것을 알 수 있다.

5. 결론

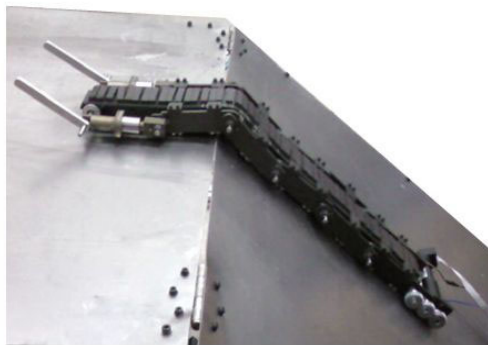


Fig. 8 Prototype of the climbing robot

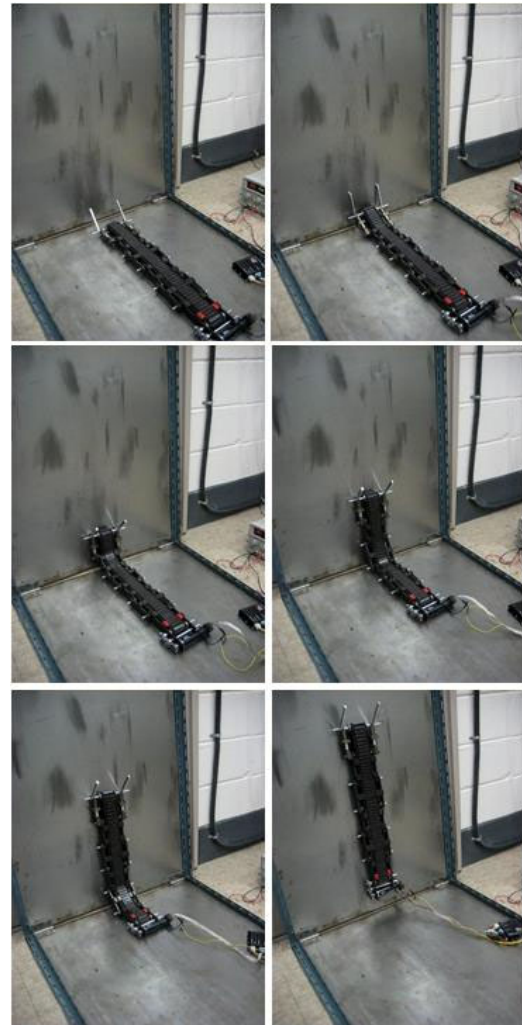


Fig. 9 90° Wall to wall transition driving

본 연구에서는 등반로봇에 적용이 가능한 변형 트랙 메커니즘을 이용한 등반로봇의 설계와 제작을 하였다. 필요한 설계변수 값을 선정 후 그에 맞추어 시제품을 제작하였고, 이를 이용하여 등반 운동 실험을 수행, 90° 의 각도를 갖는 벽면간 전환 주행이 가능함을 확인하였다.

제안된 메커니즘은 장애물 극복을 위해 수동관절만을 사용함으로써 모터의 무게를 최소화할 수 있다는 점과, 벽면과의 부착면적을 증가시켜 구동시 로봇의 안정성을 증가한다는 장점이 있다. 또한 기구구조를 단순화 할 수 있으며, 하나의 구동부의 제어를 통하여 1 개의 직진 조인트와 5 개의 회전 조인트가 수동적으로 움직이기 때문에 제어

가 단순하다는 장점을 가지고 있다.

추후 90°의 각도를 갖는 벽면뿐만 아니라, 270°의 각도를 가지는 벽면과 건물 외벽에서 일반적으로 볼 수 있는 낮은 창틀 정도의 사이즈의 장애물도 넘을 수 있는 로봇 기구구조의 설계변수 값을 찾아내어 추가적인 주행 실험이 필요하다.

또한 본 연구의 주제인 다양한 벽면 전환 기능이 가능한 기구구조 개발이 완료된 후에는 한정된 벽면에만 부착이 가능한 자석이 아닌, 다양한 벽면에 부착이 가능한 흡착유닛으로 교체를 할 필요가 있다. 그리고 추후 로봇의 조향을 위해 독립적인 조향장치도 추가할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업(11045)과 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(N0. 2009-0086350)과 2007 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(J03000).

참고문헌

- Hirose, S., Nagakubo, A. and Toyama, R., "Machine that can walk and climb on floors, walls and ceilings," International Conference on Advanced Robotics, Vol. 1, pp. 753-758, 1991.
- Xu, Z. and Ma, P., "A wall climbing robot for labeling scale of oil tank's volume," Robotica, Vol. 20, No. 2, pp. 209-212, 2002.
- Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Mattoli, V. and Cutkosky, M. R., "Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1268-1273, 2007.
- Prahlad, H., Pelrine, R., Stanford, S., Marlow, J. and Kornbluh, R., "Electroadhesive Robots-Wall Climbing Robots Enabled by a Novel, Robust, and Electrically Controllable Adhesion Technology," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3028-3033, 2008.
- Asbeck, A. T., Kim, S., Cutkosky, M. R., Provancher, W. R. and Lanzetta, M., "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays," The International Journal of Robotic Research, Vol. 25, No. 12, pp. 1165-1179, 2006.
- Seo, K. C., Chang, D. Y., Lee, K. H., Kim, H., Lee, K. H., Nam, U. C. and Kim, J. W., "Design of an attachment device for robotic systems climbing the rugged vertical surfaces," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 97-98, 2007.
- Seo, K. C., Lee, K. H., Nam, U. C., Kim, B. W. and Kim, J. W., "Optimal Design of a Vacuum Attachment Device Capable of Attaching to the Irregular Surface by Using Taguchi Methodology," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 227-228, 2008.
- Minor, M. A. and Mukherjee, R., "Under-actuated kinematic structures for miniature climbing robots," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 125, No. 2, pp. 281-291, 2003.
- Zhang, H., Zhang, J., Wang, W., Liu, R. and Zong, G., "A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings," Industrial Robot, Vol. 34, No. 2, pp. 150-160, 2007.