

# 삼각트랙을 구비한 외벽 등반로봇 플랫폼의 안정성 및 이동성 향상을 위한 토크 분배 알고리즘 개발

## Development of a Torque Distribution Algorithm for Improving Stability and Mobility of the Wall-climbing Robot Platform (ROPE RIDE) Equipped with Triangular Track Wheels

조선미<sup>1</sup>, 서근찬<sup>1</sup>, 김태균<sup>1</sup>, 김종원<sup>1</sup>, 김화수<sup>2,✉</sup>  
Sunme Cho<sup>1</sup>, Kunchan Seo<sup>1</sup>, Taegyun Kim<sup>1</sup>, Jongwon Kim<sup>1</sup>, and Hwa Soo Kim<sup>2,✉</sup>

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

<sup>2</sup> 경기대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.)

✉ Corresponding author: hskim94@kgu.ac.kr, Tel: +82-31-249-9806

Manuscript received: 2013.2.12 / Revised: 2013.5.2 / Accepted: 2013.6.5

*This paper presents a torque distribution algorithm for improving the stability and mobility of a wall-climbing robot platform. During ascent, the pitch moment caused by the payload or external disturbances separates the robot's triangular tracks from the wall, significantly deteriorating its stability. Moreover, the reaction forces stemming from the increase in the pulling force may degrade the robot's mobility. Thus, it is very important to minimize the reaction forces acting on the triangular tracks, as well as the fluctuations in the pulling force, during the climb. Through dynamic modeling of the proposed robot platform, we demonstrated the dependence of the robot's stability and mobility on the torque distribution of the triangular tracks. Extensive simulations using different climbing speeds were used to significantly improve the stability and mobility of the proposed robot platform.*

Key Words: Wall-climbing robot (외벽 등반로봇), Triangular track (삼각트랙), Torque distribution (토크 분배), Stability (안정성), Mobility (이동성)

### 1. 서론

고층 빌딩에서의 외벽 청소나 도장, 대형 탱크의 검사 등 사람이 직접 수행하는 위험한 작업을 대신하기 위하여 다양한 등반로봇들이 개발되고 있다. 등반로봇은 크게 자력으로 벽면에 흡착하여 이동하는 타입과 벽면에 흡착된 채로 크레인과 같은 보조 수단의 도움을 받아 이동하는 타입의 로봇들로 나뉜다. Stickybo의 경우, 4개의 다리를 이용하여 벽을 이동하는 데, 각 다리에는 Gecko 도마뱀의 발바닥을 모사한 미세 점모가 있어 van der Waals 힘을 이용하여 유리나 아크릴과 같은 평평한

표면에 부착되어 주행한다.<sup>1</sup> Electro-adhesive robot은 트랙에 부착된 필름에 전압을 걸었을 때 발생하는 정전기력을 이용하여 다양한 재질의 벽면을 주행할 수 있는 것으로 알려져 있으며, RiSE는 발바닥의 미세 발톱을 벽면의 돌기에 기계적으로 걸어 거친 표면의 수직벽을 주행할 수 있다.<sup>2,3</sup> Wall climbing VMRP robot은 본체 안의 임펠러를 고속으로 회전시켜 생기는 압력 차를 이용하여 거친 표면에도 흡착이 가능하며, 다양한 재질로 구성된 벽면을 주행하는 것이 가능하다.<sup>4</sup> 한편, 건물 외벽 위에서 청소, 도장 등의 작업을 수행하는 경우엔 크레인과 같은 보조 수단의 도움을 받아 이동하는

로봇들이 제시되었는데 대표적인 예로 TITO500, SIRIUSc, Windoro 등이 있다.<sup>5-7</sup> 그 외에도 다양한 로봇들이 연구된 바 있으나 모두 제한된 환경에서 제한된 용도로만 활용 가능하며, 실제 빌딩 외벽 및 발전 설비 등의 탱크 내부에 존재하는 다양한 형상의 장애물을 극복하는 것이 불가능한 구조를 가지고 있다.<sup>8,9</sup>

본 논문에서 제시하고 있는 외벽 등반로봇 플랫폼(ROPE RIDE)은 삼각트랙 이동 메커니즘을 갖추고 있어 외벽에 존재하는 다양한 형상의 장애물을 극복하는 것이 가능하다.<sup>10</sup> 일반적으로 직경이 큰 트랙 바퀴를 사용하는 경우엔 무게가 증가하므로 벽면 장애물과의 가벼운 접촉에 의해서도 쉽게 벽면에서 이탈될 수 있는 문제점이 있다. 따라서, 삼각트랙을 사용하는 경우 이와 같은 외란에 대하여 보다 안정적일 수 있으며 장애물을 승월할 때, 트랙에 작용하는 힘의 크기를 적절히 제한시킬 수 있다는 장점이 있다.<sup>11</sup> 본 논문의 외벽 등반로봇은 벽면 부착 시 요구되는 힘을 두 개의 프로펠러 추력기로부터 얻는 방식을 채택하고 있으며, 로프 등강기를 통해 벽면을 수직으로 이동하게 된다. 등반로봇이 건물 외벽 장애물을 극복하며 수직 이동하는 데 있어서 가장 중요한 요소는 안정성과 이동성이며, 이는 로봇 플랫폼의 각 삼각트랙에 가해진 토크 값의 영향을 받게 되므로 이를 적절하게 분배할 수 있는 삼각트랙 토크 분배 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여, 등반로봇의 삼각트랙이 항상 벽면에 밀착하여 이동하도록 삼각트랙에 작용하는 노면 반력과 장애물로부터 삼각트랙에 작용하는 반력을 동시에 최소화할 수 있는 최적의 토크 값을 주어진 삼각트랙과 장애물과의 접촉 조건으로부터 유도한다.

본 논문의 2장에서는 외벽 등반로봇 플랫폼(ROPE RIDE)의 구조와 동작원리에 대하여 소개하고 3장에서는 장애물 극복 시 등반로봇 플랫폼의 자유 물체도를 기반으로 운동방정식을 유도한다. 4장에서는 등반로봇의 안정성 및 이동성에 대한 정의와 토크 값이 미치는 영향을 분석하고 5장에서는 이를 기반으로 등반로봇 플랫폼에 대한 삼각트랙 토크 분배 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 6장에서는 Matlab과 Recurdyn을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 검증한다.

**2. 외벽 등반로봇 플랫폼(ROPE RIDE)의 구조 및 동작원리**

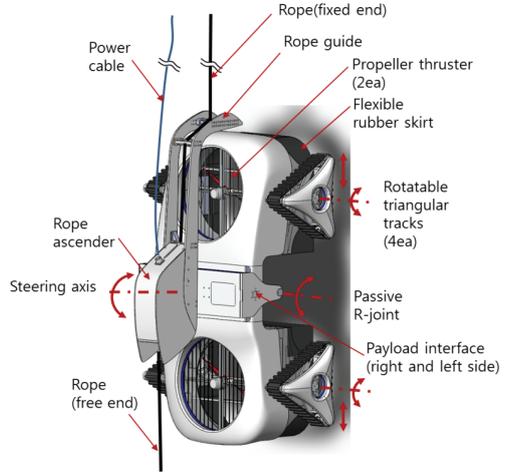


Fig. 1 Kinematic structure of ROPE RIDE

**2.1 기구구조 및 제원**

본 논문에서 제안하고 있는 외벽 등반로봇 플랫폼(ROPE RIDE)의 기구구조는 Fig. 1과 같다.

ROPE RIDE의 핵심 구성 요소는 로프 등강기, 프로펠러 추력기 및 4개의 삼각트랙이다. 로봇 플랫폼은 수동 조인트(Passive R-joint)를 기준으로 2개의 프로펠러 추력기와 4개의 삼각트랙 이동 메커니즘을 가지는 하부 바디 부분과, 그 위쪽으로 로프 등강 메커니즘과 가반하중이 탑재되는 상부 바디 부분으로 나뉜다. 상부 바디와 하부 바디는 자유롭게 회전하는 수동 조인트에 의해 연결되어 있기 때문에 로프 등강기에 의한 견인력은 하부 바디로 전달되지만, 로봇 플랫폼의 자세 변화에 의한 로프 견인방향 변화와 가반하중의 동작에 의하여 생기는 외부 모멘트 변화는 하부 바디에 영향을 미치지 않는다. 또한, 하부 바디 전체의 무게 중심은 수동 조인트와 동일한 위치가 되도록 설계하였기 때문에 하부 바디에 작용하는 중력에 의해 하부 바디가 수동 조인트를 기준으로 전도되지 않도록 하였다.

로봇 플랫폼은 로프 등강기와 하부 바디가 조향축으로 연결되어 있어 빌딩 옥상에 고정되어 수직으로 내려진 로프를 기준으로 하부 구조 전체가 360° 회전이 가능하다. 한편 하부 바디에 부착되어 있는 4개의 삼각트랙의 각 꼭지점에는 자유롭게 회전하는 폴리가 벽면과 접하며 바깥쪽 둘레를 이동할 수 있는 고무 트랙을 지지하는 구조로 설계되어 있다. 제작된 ROPE RIDE의 모습은 Fig. 2와 같으며 구체적인 제원은 Table 1에 요약되어 있다.

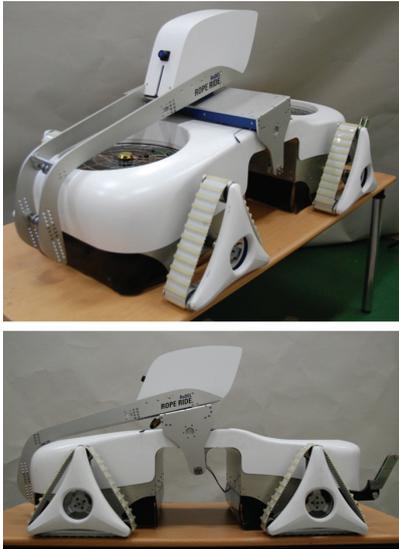


Fig. 2 Photograph of real ROPE RIDE

Table 1 Detailed specifications of ROPE RIDE

Item	Specification
Size	957 mm x 1500 mm x 758 mm (width x length x height)
Weight	75 kgf
Speed	Max. 15m/min
Payload	Max. 20 kgf
Motor	Rope ascender: 750W BLDC Triangular track: 200W DC Steering: 200W DC Propeller thruster: 3400W BLDC
Power	external DC 300 V

### 2.2 ROPE RIDE 의 동작원리

옥상에 고정된 로프가 수직으로 지면에 내려지면 로프 등강기의 로프 이송력을 이용하여 ROPE RIDE가 로프를 따라 상하 이동하는 동시에 2개의 프로펠러 추력기가 로봇 플랫폼을 벽면에 밀착시키게 된다. 프로펠러 추력기는 벽면과 로봇 플랫폼이 밀착되어 있지 않은 경우엔 프로펠러 자체 추력으로 로봇 플랫폼을 벽면에 밀어 붙이고 이미 벽면과 밀착되어 있는 경우엔 추력기 하단부를 둘러싸고 있는 고무스커트의 영향으로 프로펠러와 벽면 사이의 고무 스커트 내부 공간 압력이 낮아지도록 하여 추가적인 흡착력을 얻을 수 있게 해준다. 따라서 벽면의 재질이나 형상에 관계없이 일정 수준 이상의 흡착력을 제공할 수 있다. 본 연구에서 사용한 프로펠러의 추력은 7000RPM에서

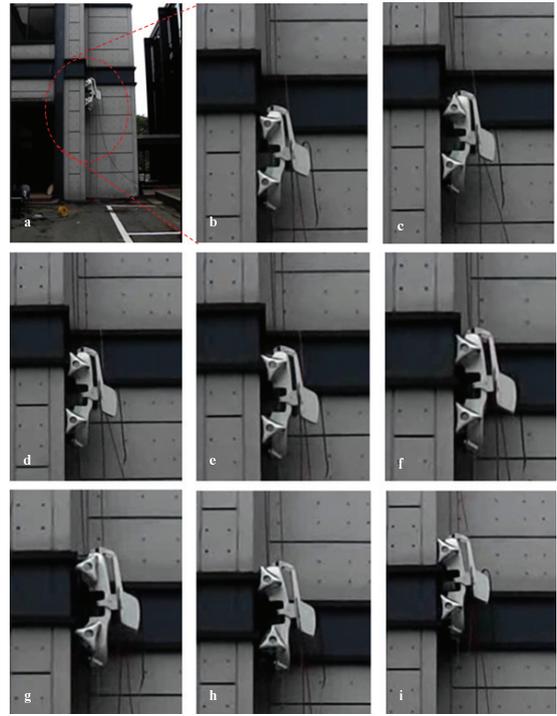


Fig. 3 Photograph of real ROPE RIDE climbing up a wall

50N임을 확인하였고 총 2개가 사용되었으므로 해당 RPM에서 100N의 추력을 보장함을 알 수 있다.

이때 하부 바디의 4개의 삼각트랙이 벽면과 접촉한 채로 이동하게 되는데, 편평한 면에서는 회전 없이 외부 트랙만 구동하여 이동하지만, 벽면에 장애물이 존재하는 경우에는 삼각트랙 전체가 축을 중심으로 회전함으로써 안정적으로 장애물을 극복하며 주행하게 된다. ROPE RIDE가 삼각트랙을 이용하여 벽면 상에 존재하는 높이 편차 100 mm의 장애물을 극복하며 실제 건물 외벽을 주행하는 모습이 위 Fig.3에 나와 있다.

### 3. ROPE RIDE 운동방정식 유도

#### 3.1 ROPE RIDE 하부 바디의 운동방정식

삼각트랙에 분배되는 토크 값을 계산하기 위해서는 먼저 로봇 플랫폼의 운동방정식을 구해야 한다. 로봇 플랫폼은 수동 조인트를 기준으로 상부와 하부 바디로 나뉘며 삼각트랙과 직접 연결되어 있는 하부 바디의 운동방정식을 먼저 구한다. 위 Fig. 4의 자유 물체도(Free body diagram)를 바탕으로

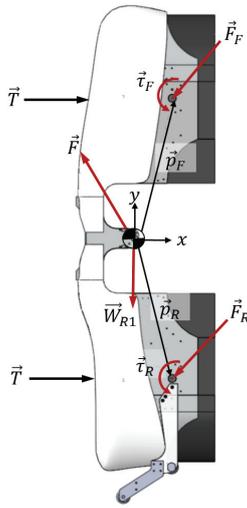


Fig. 4 FBD of lower body of ROPE RIDE

로봇 플랫폼의 하부 바디의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{F} + \vec{W}_{R1} + 2\vec{T} + \vec{F}_F + \vec{F}_R &= M \ddot{\vec{p}}_{cg} \\ \vec{\tau}_F + \vec{\tau}_R + \vec{p}_F \times \vec{F}_F + \vec{p}_R \times \vec{F}_R &= I \ddot{\vec{\theta}}_{cg} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서  $\vec{F}$  는 로프 등장기에 의하여 수동 조인트에 작용하는 힘이며,  $\vec{p}_F$ ,  $\vec{p}_R$  은 각각 하부 바디의 무게 중심으로부터 상, 하단부 삼각트랙 회전축까지의 위치이며,  $M$  은 하부 바디의 질량,  $I$  는 하부 바디의 질량 관성 모멘트,  $\ddot{\vec{p}}_{cg}$  는 하부 바디의 무게 중심에서의 가속도,  $\ddot{\vec{\theta}}_{cg}$  는 각가속도이다.

### 3.2 삼각트랙의 운동방정식

로봇 플랫폼이 외벽에 존재하는 장애물을 극복할 때 삼각트랙과 지면간의 접촉 상태는 시간에 따라 변화한다. 다음 Fig. 5의 자유 물체도에서 보는 바와 같이 삼각트랙과 지면 사이의 접촉상태에 따라 지면으로부터 트랙에 작용하는 반력인  $\vec{R}_1$ ,  $\vec{R}_2$  가 다양하게 변화하며, 트랙과 지면이 접촉하는 지점 또한 다양하게 변화한다.

따라서, 삼각트랙의 운동방정식을 보다 일반화하여 표현하는 것이 필요하며 이를 위하여 트랙에 작용하는 반력은  $\vec{R}_1$ ,  $\vec{R}_2$  의 합력인  $\vec{F}_{eff}$  로, 트랙과 지면이 접촉하는 지점은  $\vec{p}_{eff}$  가 작용하는 작용점의 위치인  $\vec{p}_{eff}$  로 정의한다. 삼각트랙과 지면의 접촉 상태 일반화 변수인  $\vec{F}_{eff}$  와  $\vec{p}_{eff}$  를 사용하여 표현

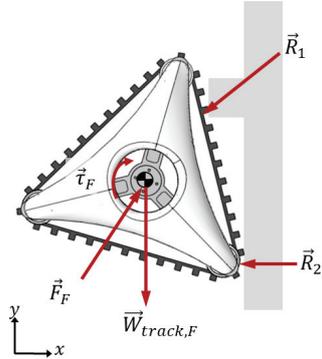


Fig. 5 FBD of front triangular tracks wheel

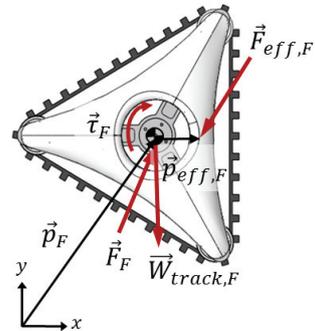


Fig. 6 FBD of front triangular tracks wheel considering contact parameters  $\vec{F}_{eff}$  and  $\vec{p}_{eff}$

한 삼각트랙의 자유 물체도는 Fig. 6과 같고 이를 바탕으로 상, 하부 삼각트랙의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\vec{F}_F + \vec{F}_{eff,F} = m \ddot{\vec{p}}_F \quad (2)$$

$$\vec{\tau}_F + \vec{p}_{eff,F} \times \vec{F}_{eff,F} = I_F \ddot{\vec{\theta}}_F$$

$$\vec{F}_R + \vec{F}_{eff,R} = m \ddot{\vec{p}}_R \quad (3)$$

$$\vec{\tau}_R + \vec{p}_{eff,R} \times \vec{F}_{eff,R} = I_R \ddot{\vec{\theta}}_R$$

위 식에서  $m$  은 삼각트랙의 질량,  $I_F$ ,  $I_R$  은 각각 상, 하부 삼각트랙의 질량 관성 모멘트,  $\ddot{\vec{p}}_F$ ,  $\ddot{\vec{p}}_R$  은 각각 상, 하부 삼각트랙의 가속도,  $\ddot{\vec{\theta}}_F$ ,  $\ddot{\vec{\theta}}_R$  은 각가속도이다.

## 4. ROPE RIDE 의 안정성 및 이동성

### 4.1 안정성 정의 및 삼각트랙 토크의 영향

로봇 플랫폼이 장애물을 극복하며 주행할 때,

안정성을 결정하는 중요한 척도 중의 하나는 피치 모멘트이다. 피치 모멘트는 로봇 플랫폼을 벽면으로부터 떨어뜨리는 방향으로 작용하는 모멘트로 주로 로봇 플랫폼의 무게중심과 벽면 사이의 수직 거리가 먼 경우, 혹은 로봇 플랫폼에 탑재되는 가반하중에 의하여 무게 중심이 이동하는 경우에 발생한다. 장애물을 극복할 때 피치 모멘트가 증가하게 되면 삼각트랙에 작용하는 노면 반력의 차이 즉, 각각의 삼각트랙 회전축에 작용하는 반력의 X-축 방향 성분의 차이  $|F_{Fx} - F_{Rx}|$ 가 증가하게 되어 상, 하부 삼각트랙 중 어느 하나의 트랙이 벽면으로부터 이탈하여 로봇 플랫폼의 주행 안정성을 저하시키게 된다.

3절에서 구한 운동방정식을 이용하여 삼각트랙에 작용하는 노면 반력의 차이  $|F_{Fx} - F_{Rx}|$ 를 삼각트랙 토크에 대한 식으로 전개하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |F_{Fx} - F_{Rx}| &= f_1(\tau_F, \tau_R) \\ &= \left\{ \left( \frac{-2p_{Ry}}{p_{Fy}^2 - p_{Ry}^2} \right) \right\} \left\{ - \left( 1 + \frac{p_{Rx}}{p_{eff,F}} \right) \tau_F - \left( 1 + \frac{p_{Rx}}{p_{eff,F}} \right) \tau_R \right. \\ &\quad \left. - 2p_{Ry}(B+C) + p_{Fy}(A_1 + A_2) + p_{Ry}(A_1 - A_2) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $A_1, A_2, B, C$ 는 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned} A_1 &= p_{Fy} \cdot 2T - p_{Fy} \cdot F_x - p_{Fy} \cdot M \ddot{p}_{cg,x} \\ A_2 &= p_{Ry} \cdot 2T - p_{Ry} \cdot F_x - p_{Ry} \cdot M \ddot{p}_{cg,x} \\ B &= I \ddot{\theta}_{cg} - p_{Fx} \cdot I_F \ddot{\theta}_F / p_{eff,F} - p_{Rx} \cdot I_R \ddot{\theta}_R / p_{eff,R} \\ C &= m(p_{Fx} \cdot \ddot{p}_{Fy} + p_{Rx} \cdot \ddot{p}_{Ry}) \end{aligned}$$

피치 모멘트를 상쇄시키는 방향으로 삼각트랙의 토크  $\tau_F, \tau_R$ 을 작용하게 되면, 위 식에 의하여 노면 반력 차이  $|F_{Fx} - F_{Rx}|$ 가 감소하여 로봇 플랫폼이 벽면 주행할 때, 안정성을 개선시킬 수 있으며 이에 본 논문에서는 상, 하부에 작용하는 노면 반력 차이  $|F_{Fx} - F_{Rx}|$ 를 로봇 플랫폼의 안정성을 판단하는 지표로 선정하였다.

#### 4.2 이동성 정의 및 삼각트랙 토크의 영향

로봇 플랫폼이 장애물을 극복하고 주행할 때 안정성과 더불어 이동성 또한 영향을 받게 된다. 로봇 플랫폼이 벽면에 구속되어 장애물을 극복할 때 로프 이동력이 크게 변화하게 되어 로봇 플랫폼의 이동을 방해하는 방향으로 삼각트랙에 작용하는 반력인  $F_{Fy}$ 와  $F_{Ry}$ 의 합이 증가하게 된다. 따

라서 로봇 플랫폼의 벽면 구속 이동 시 삼각트랙의 장애물 극복 능력에 따라 이동성이 저하될 수도 있게 된다. 로봇 주행 반대방향으로 삼각트랙에 작용하는 힘의 합인  $|F_{Fy} + F_{Ry}|$ 을 삼각트랙 토크  $\tau_F, \tau_R$ 에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |F_{Fy} + F_{Ry}| &= f_2(\tau_F, \tau_R) \\ &= \left| - \frac{1}{p_{eff,F}} \tau_F - \frac{1}{p_{eff,R}} \tau_R + m(\ddot{p}_{Fy} + \ddot{p}_{Ry}) - \frac{I_F}{p_{eff,F}} \ddot{\theta}_F \right. \\ &\quad \left. - \frac{I_R}{p_{eff,R}} \ddot{\theta}_R + 2W_{track} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

위 식으로부터 삼각트랙 토크  $\tau_F, \tau_R$ 에 따라 로봇 플랫폼의 이동을 방해하는 방향으로 작용하는 힘의 합  $|F_{Fy} + F_{Ry}|$ 을 조절하여 ROPE RIDE가 벽면을 타고 올라갈 때, 트랙이 받게 되는 반력의 크기를 작게 함으로써 보다 수월하게 벽면을 따라 이동할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 로봇 플랫폼의 이동성을 판단하는 지표로 로봇 플랫폼의 이동을 방해하는 힘의 합  $|F_{Fy} + F_{Ry}|$ 을 선정하였다.

### 5. 삼각트랙 토크 분배 알고리즘

#### 5.1 트랙과 지면 접촉상태 변화에 따른 토크 값 결정 및 분배 알고리즘

로봇 플랫폼이 벽면에 구속되어 장애물을 안전하게 이동하는 데 있어서 삼각트랙과 지면의 접촉상태 일반화 변수인  $\vec{F}_{eff}$ 와  $\vec{p}_{eff}$ 에 따라 삼각트랙에 실제로 가하는 토크 값이 변화한다. 그에 따라 삼각트랙 회전축에 작용하는 반력  $\vec{F}_F$ 와  $\vec{F}_R$  또한 변화하게 된다. 따라서 지속적으로 변화하는 최적의 삼각트랙 토크 값을 구하기 위해서는 3절에서 구한 로봇 플랫폼의 운동방정식을 연속적인 시간 변화를 고려하여 다시 전개하여야 한다.

연속적인 시간 변화를 고려하여 식 (1), (2), (3)을 다시 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \vec{F} + \vec{W} + 2\vec{T} + \vec{F}_{F,i} + \vec{F}_{R,i} = M \ddot{\vec{p}}_{cg,i} \\ \vec{\tau}_{F,i} + \vec{\tau}_{R,i} + \vec{p}_{F,i} \times \vec{F}_{F,i} + \vec{p}_{R,i} \times \vec{F}_{R,i} = I \ddot{\theta}_{cg,i} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \vec{F}_{F,i} + \vec{F}_{eff,F,i} = m \ddot{\vec{p}}_{F,i} \\ \vec{\tau}_{F,i} + \vec{p}_{eff,F,i} \times \vec{F}_{eff,F,i} = I_F \ddot{\theta}_{F,i} \end{cases} \quad (7)$$

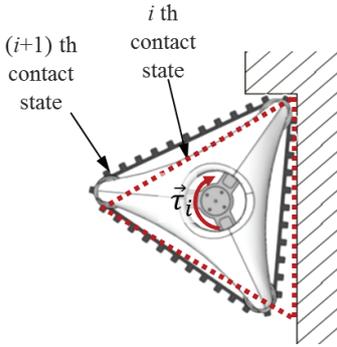


Fig. 7 State transition from the  $i^{th}$  contact state to the  $(i+1)^{th}$  contact state during overcoming an obstacle

$$\begin{cases} \vec{F}_{R,i} + \vec{F}_{eff,R,i} = m \ddot{\vec{p}}_{R,i} \\ \vec{\tau}_{R,i} + \vec{p}_{eff,R,i} \times \vec{F}_{eff,R,i} = I_R \ddot{\vec{\theta}}_{R,i} \end{cases} \quad (8)$$

$i$  번째 단계에서 토크 값  $\vec{\tau}_{F,i}$ ,  $\vec{\tau}_{R,i}$  이 삼각트랙에 주어질 때, 삼각트랙 회전축에는 반력 값  $\vec{F}_{F,i}$ ,  $\vec{F}_{R,i}$  가 해진다. 이 값들을 앞서 구한 운동방정식에 적용하여  $i$  번째 단계에서 삼각트랙과 지면간의 접촉상태 변수인  $\vec{p}_{eff,F,i}$ ,  $\vec{F}_{eff,F,i}$ ,  $\vec{p}_{eff,R,i}$ ,  $\vec{F}_{eff,R,i}$  를 계산할 수 있다. 다음 단계인  $i+1$  번째에서는 로봇 플랫폼의 안정성 및 이동성을 향상시키는  $\vec{F}_{F,i+1}$ ,  $\vec{F}_{R,i+1}$  를 얻기 위하여  $i+1$  번째 단계에 적절한 토크 값을 가해야 한다. 그러나  $i+1$  번째 단계에서 삼각트랙과 지면간의 접촉상태 변수가 변화하기 때문에 앞서 구한 운동방정식만으로는  $i+1$  번째 토크 값을 결정하는 것이 불가능하다.

위 Fig. 7에서 보는 바와 같이,  $i$  번째에서  $i+1$  번째로 트랙의 상태가 변화하는 데 걸리는 시간이 매우 짧다면 삼각트랙과 지면 간의 접촉상태의 변화 또한 크지 않게 된다. 따라서,  $i+1$  번째 토크를 계산하기 위하여 다음과 같이  $i$  번째 단계의 접촉상태 변수를 사용한다.

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_{F,i+1} &= f(\vec{F}_{F,i+1}, \vec{F}_{R,i+1}, \vec{p}_{eff,F,i}, \vec{F}_{eff,F,i}) \\ \vec{\tau}_{R,i+1} &= f(\vec{F}_{F,i+1}, \vec{F}_{R,i+1}, \vec{p}_{eff,R,i}, \vec{F}_{eff,R,i}) \end{aligned} \quad (9)$$

위 식 (9)를 바탕으로 로봇 플랫폼의 안정성과 이동성을 향상시키기 위하여 개발한 토크 분배 알고리즘은 Fig. 8과 같다. 삼각트랙 토크가 로봇 플랫폼에 작용하면 로봇 플랫폼의 각각의 센서를 통하여 트랙 회전축 반력 및 가속도, 각가속도 등을

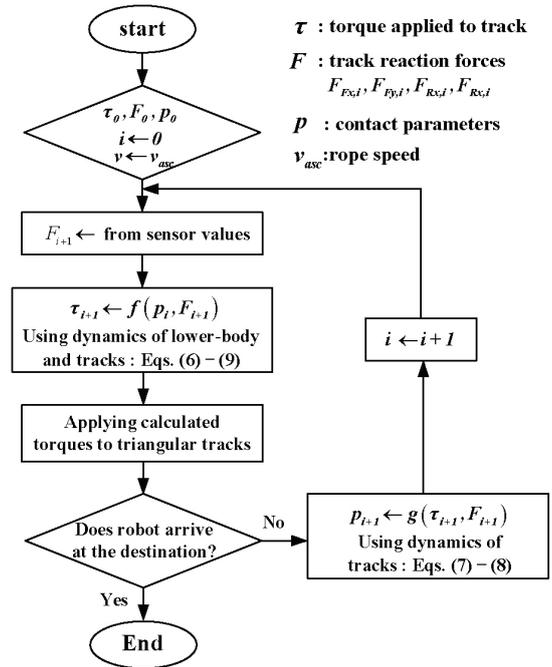


Fig. 8 Flowchart of torque distribution algorithm

측정하게 된다. 센서를 이용하여 측정된 값과 이전 단계의 접촉상태 변수 값을 로봇 플랫폼 하부와 삼각트랙의 운동방정식을 만족하며 동시에 식 (4)와 식 (5)의 지표를 최소화하는 최적의 삼각트랙 토크 값을 계산한 뒤 각각의 삼각트랙에 분배하여 준다. 계산된 삼각트랙 토크 값과 센서 측정 값을 삼각트랙의 운동방정식에 적용하여 지속적으로 변화하는 접촉상태 변수를 계산한다. 이와 같은 과정을 로봇 플랫폼이 목표지점에 도달할 때까지 반복함으로써 로봇 플랫폼이 안전하게 이동할 수 있도록 적절한 토크 값을 삼각트랙에 분배한다.

### 6. 토크 분배 알고리즘 검증

이 절에서는 5절에서 제안한 삼각트랙 토크 분배 알고리즘을 Matlab과 Recurdyn을 이용한 시뮬레이션 실험을 통하여 검증한다. 시뮬레이션에서는 서로 다른 로프 등강 속도에 대하여 로봇 플랫폼이 100mm 높이와 폭을 가지는 장애물을 승월하는 경우를 가정한다. 로봇 플랫폼 모델은 실제 제작한 로봇 플랫폼의 물성값을 토대로 구성하였으며 크게 로프 등강기, 바디, 트랙 회전축, 삼각트랙으로

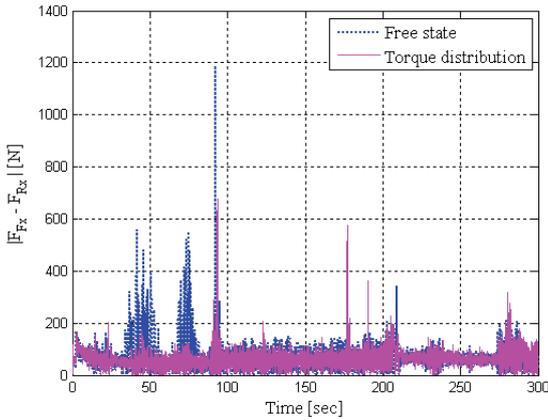


Fig. 9 Stability index during climbing up an obstacle of 100 mm height at the speed of 0.3 m/min

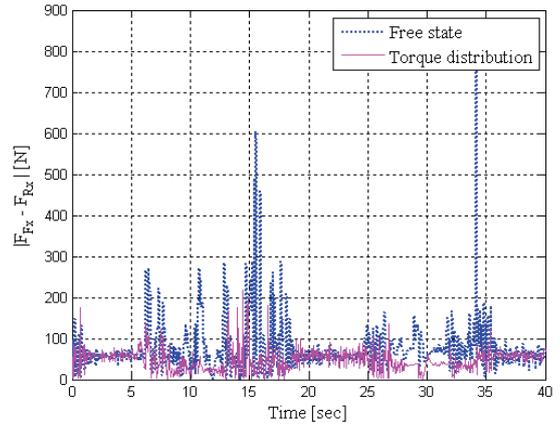


Fig. 11 Stability index during climbing up an obstacle of 100 mm height at the speed of 3 m/min

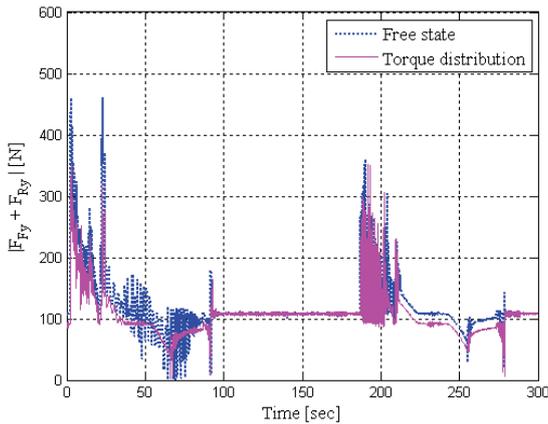


Fig. 10 Mobility index during climbing up an obstacle of 100 mm height at the speed of 0.3 m/min

크게 4 부분으로 나누어 단순화된 모델링을 하였다. 삼각트랙을 구성하는 우레탄고무와 벽면이 접촉하게 되는 경우에 대하여 우레탄고무에 일정한 힘이 가해졌을 경우의 탄성계수를 계산하여 적용함으로써 지면과 트랙간의 접촉환경을 설정하였고 추력은 상, 하단부 동일하게 50N씩 작용하도록 하였다. 제어 주기는 50msec로 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, 로프 등강 속도가 0.3m/min인 경우에 대하여 시뮬레이션 한 결과 측정된 안정성 및 이동성 지표가 Fig. 9와 Fig. 10에 나타나 있으며 여기서 파란색 점선과 분홍색 실선은 각각 토크를 가하지 않은 경우와 토크 분배 알고리즘을 적용한 경우를 의미한다. 안정성 지표인  $|F_{Fx} - F_{Rx}|$ 의 경우, 삼각트랙에 토크를 가하지 않은 경우와 토크 분배

알고리즘을 적용하여 주행하는 경우에 대하여 RMS 값은 각각  $|F_{Fx} - F_{Rx}|_{RMS}^{free} = 83.33[N]$ ,  $|F_{Fx} - F_{Rx}|_{RMS}^{torque} = 37.39[N]$ 으로 토크 분배 알고리즘을 적용함으로써 안정성 지표는 52.73%나 크게 향상됨을 확인할 수 있다. 특히, 50sec~100sec 부근과 175sec~200sec부근에서 토크를 가하지 않은 경우 안정성 지표값이 크게 증가하는 데 이는 삼각트랙이 벽면 이동 중 최초 장애물과 충돌하는 경우와 충돌 후 장애물을 극복하기 위해 회전하면서 다시 장애물과 재충돌하는 경우로 큰 반력을 받기 때문이다. 한편, 이동성 지표인 반력의 합의 RMS값은  $|F_{Fy} + F_{Ry}|_{RMS}^{free} = 124.66[N]$ ,  $|F_{Fy} + F_{Ry}|_{RMS}^{torque} = 110.40[N]$ 으로 토크 분배 알고리즘을 적용함으로써 이동성 지표는 11.44% 개선됨을 확인할 수 있다. 주목할 점은 이동성 지표의 경우 안정성 지표값이 증가하기 직전에 상대적으로 큰 값을 갖게 되는 데 이는 삼각트랙이 장애물을 만나고 이를 극복하기 위해 회전하기 직전까지 이동성이 순간적으로 저하되기 때문이라 판단된다.

한편, 로프 등강 속도가 3m/min인 경우에 대하여 동일한 높이의 장애물을 극복할 때 시뮬레이션 결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 나와 있다. 토크 분배 알고리즘을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우와 비교할 때, 안정성 지표는  $|F_{Fx} - F_{Rx}|_{RMS}^{free} = 101.94[N]$ 에서  $|F_{Fx} - F_{Rx}|_{RMS}^{torque} = 59.79[N]$ 으로 41.35% 향상되었다. 또한, 이동성 지표의 경우도  $|F_{Fy} + F_{Ry}|_{RMS}^{free} = 137.56[N]$ 에서  $|F_{Fy} + F_{Ry}|_{RMS}^{torque} = 122.57[N]$ 으로 노면 반력 합의 RMS값이 감소함으로써 이동성이 약 10.9% 개선됨을 확인할 수 있다.

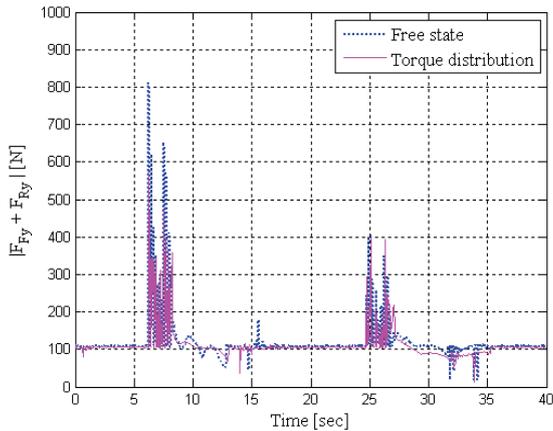


Fig. 12 Mobility index during climbing up an obstacle of 100 mm height at the speed of 3 m/min

### 7. 결론

본 논문에서는 삼각트랙을 구비한 외벽 등반로봇 플랫폼(ROPE RIDE)이 장애물을 극복하며 벽면을 주행할 때, 안정성과 이동성을 향상시키기 위해 삼각트랙 토크 분배 알고리즘을 개발하였다. 실시간으로 변화하는 변수들을 보다 일반화하기 위하여 삼각트랙과 지면 사이의 접촉상태 일반화 변수를 도입하고 토크 분배 알고리즘에 적용하였다. 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위하여 서로 다른 로프 등강 속도에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통하여 본 논문에서 제안하고 있는 삼각트랙의 토크 분배 알고리즘이 로봇 플랫폼의 장애물 극복 주행 시 안정성 및 이동성 지표를 크게 향상시키고 있음을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A1010046).

### 참고문헌

- Kim, S. B., 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.
- Spenko, M. J., Haynes, G. C., Saunders, J. A., Cutkosky, M. R., Rizzi, A. A., Full, R. J., and Koditschek, D. E., "Biologically inspired climbing with a hexapedal robot," Journal of field robotics, Vol. 25, No. 4-5, pp. 223-242, 2008.
- Illingworth, L. and Reinfeld, D., "Vortex attractor," US Patent, No. 6595753 B1, 2003.
- Akiniev, T., Armada, M., and Nabulsi, S., "Climbing cleaning robot for vertical surfaces," Industrial Robot, Vol. 36, No. 4, pp. 352-357, 2009.
- Elkmann, N., Kunst, D., Krueger, T., Lucke, M., Bohme, T., Felsch, T., and Sturze, T., "SIRIUS-Facade cleaning robot for a high-rise building in Munich, Germany," Proc. of the 7<sup>th</sup> international conference on climbing and walking robots, pp. 1033-1040, 2005.
- Zhang, H., Zhang, J., Zong, G., Wang, W., and Liu, R., "Sky cleaner 3: a real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning," IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 13, No. 1, pp. 32-41, 2006.
- Lee, G., Seo, K., Kim, H., Kim, S., Kim, H., and Kim, J. W., "Design of a transformable track mechanism for wall climbing robots," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 2, pp. 178-184, 2012.
- Kim, H., Seo, K., Kim, J., and Kim, H., "Design of tracked wheel mechanism for wall climbing robot," Proc. of KSPE Autumn conference, pp. 215-216, 2010.
- Cho, S., Seo, K., Kim, T., Kim, J., and Kim, H. S., "Kinematic analysis of the platform of a wall climbing robot equipped with triangular track wheels," Proc. of KSPE Spring conference, pp. 235-236, 2012.
- Seo, K., "Development of a wall climbing robot platform (ROPE RIDE) with a rope ascender," Ph.D Thesis, School of Mechanical and Aerospace engineering, Seoul National University, 2013.