

가변형 단일 궤도를 이용한 장애물 극복방법에 관한 연구

Study of a Variable Single-tracked Crawler for Overcoming Obstacles

김지홍, 이창구*

(Jeehong Kim and Chang-Goo Lee)

Abstract: In our paper, we propose an asymmetric single-tracked wheel system, and describe its structure and the method for maintaining the length of a transformable track system. And the method is reducing the gap of lengths. Therefore, we propose an efficient structure for transforming and explain motions with kinematics. Our transformable shape single-tracked mobile system has an advantage to overcome an obstacle or stairs by the variable arms in the single unity track system. But we will make the variable shape of tracked system get a drive that has a force to stand against a wall. In this case, we can consider this system to a rigid body and have a notice that this single tracked system is able to get vary shape with the variable arm angle. Considering forces balance along x-axis and y-axis, and moments balance around the center of the mass we have. If this rigid body is standing against a wall and doesn't put in motion, the force of flat ground and the rigid body sets an equal by a friction. In the same way, the force of a wall and the rigid sets an equal by a friction.

Keywords: variable single-track, dynamics, motion, kinematics, moment

I. 서론

지형 변화에 능동적으로 적응할 수 있는 궤도형 이동체는 이미 많은 분야에서 그 성능을 인정받고 있다. 군용의 차량과 건설기계용 차량 등이 그 대표적 예이며 단순한 트랙 적용에 그치지 않고 궤도의 형태를 다양화 함으로써 지형 적응성을 높이고자 노력하고 있다. 지형 적응성이라는 면에서 궤도형태의 가변성은 매우 주목 할만 하다.

하지만 단순히 궤도형태의 바퀴를 채용하는 것으로만 계단형 혹은 수직 벽 형태의 장애물을 극복하기에는 매우 부족한 면이 있다. 무엇보다 궤도가 지면 접촉 면적과 로봇 혹은 차량의 지면에 대한 항력의 분산에 의한 무게분산의 장점이 있다고 할 수 있지만 궤도 높이의 반보다 높은 장애물을 만났을 때는 장애물을 넘어가지 못하고 피해가야 하는 어려움도 있다.

이러한 이유로 본 논문에서는 좀더 효과적으로 궤도형 바퀴를 사용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 특히 본 논문에서 제시하고 있는 트랙 시스템은 트랙을 이루는 단일 벨트 안에 변형이 가능한 링크 구조를 구성하고 있어 가변시 돌레 길이의 변화로 벨트의 장력변화가 매우 크겠지만 이에 대한 보상과 제어 방법은 참고문헌[1-3]을 참조하기 바란다.

II. 동작 궤적(motion trajectory)

그림 1은 앞부분의 가변 arm의 가변 운동의 기구학 해석을 위해 직교 좌표계에 투영한 변환 형태의 구조를 보여주고 있다. 좌표계에서 지구 중력의 영향으로 뒷바퀴는 좌표계의 원점이 되고 이 구조의 바닥 트랙과 바퀴는 X축과 평행하게 놓인다. 그리고 이 구조는 1자유도의 기구로 이동체의 앞부분에 가변할 수 있는 arm을 두고 회전 중심을 몸체와 연결한

단 하나의 독립된 능동 회전부를 갖는다.

이러한 이유로 구동기가 연결된 능동 뒷바퀴와 arm의 회전중심의 몇몇 주요 점의 위치에 의해 변환 회전각(θ)을 구할 수 있다. 그러나 회전각의 변화는 몸체의 회전각(α , β)을 변화시킬 수 있고 회전 방향에 따라 지면과 접촉한 바퀴에 의해 회전 중심부의 위치가 바뀌게 된다. 이 몸체와의 회전각은 수동적인 변수로 몸체와 지면 쪽의 트랙 사이에 형성하는 각이다.

$$\tan \alpha = \frac{S \cdot \sin \theta}{B - S \cdot \cos \theta}, \quad \tan \beta = \frac{L \cdot \sin \theta}{B + L \cdot \cos \theta}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{S \cdot \sin \theta}{B - S \cdot \cos \theta} \right), \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{L \cdot \sin \theta}{B + L \cdot \cos \theta} \right)$$

$$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

회전 중심점(Ca)의 위치는 다음과 같다. 여기서 각 바퀴에 대한 기호를 제 정의하여 앞으로의 설명을 돕고자 한다. 뒷바퀴의 중심은 EW, 회전이 가능한 arm frame으로 구성된 가변부의 중심은 CA, 그 양 단의 바퀴 중 긴 쪽의 바퀴는 FW, 짧은 쪽은 RW로 한다. 또한 회전 중심인 CA로부터 가변부

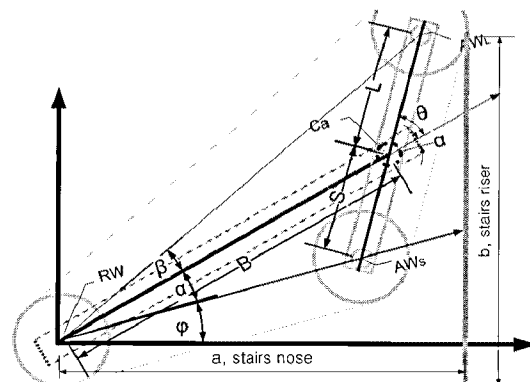


그림 1. 논문에서 제안한 구조와 주요 변수.

Fig. 1. Projection on a system coordinates(upper: CCW angle θ , down: CW angle θ).

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009.1.10., 수정: 2010.1.30., 채택확정: 2010.2.7.

김지홍: 전북대 제어계측공학과(jeehong@chonbuk.ac.kr)

이창구: 전북대 전자공학부 제어로봇전공(changgoo@chonbuk.ac.kr)

※ 상기 논문은 제어·로봇·시스템학회 전북제주지부의 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

암프레임 양단의 바퀴까지의 거리를 각각 L, S라고 한다. 그리고 뒷바퀴(EW)는 해석의 편의성을 위해 좌표의 원점에 존재한다고 하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$T_x R_\phi, R_\alpha T_{x=b}, R_\theta T_{x=l} \text{ or } R_\theta T_{x=s}$$

여기서 T와 R은 각각 이동행렬과 회전 행렬을 의미한다. 가변부 arm의 짧은 쪽 바퀴의 중심점은 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} SW_x \\ SW_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CAx - S \cdot \sin(\pi/2 - \theta - \alpha) \\ CAy - S \cdot \cos(\pi/2 - \theta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 긴 쪽 바퀴의 중심점은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} FW_x \\ FW_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CAx + L \cdot \cos(\theta + \alpha) \\ CAy + L \cdot \sin(\theta + \alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 몸체와 지면 사이의 각은 그림 1에서 보는 것처럼 각 α 와 각 ϕ 에 의해 만들어진다. 수식 (1)과 (2)를 이용하여 각 바퀴와 가변을 위한 회전중심점의 단위 시간에 대한 위치 변화를 구해보자. 위치 변환 식을 일차 미분하여 각 좌표변화에 따른 속도 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F\dot{W}_x \\ F\dot{W}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & L \cdot \cos(\alpha + \phi + \theta) \\ -L \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & L \cdot \cos(\theta + \alpha + \phi) \\ -B \cdot \sin(\alpha + \phi) & +B \cdot \cos(\alpha + \phi) \\ -L \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & L \cdot \cos(\theta + \alpha + \phi) \\ -B \cdot \sin(\alpha + \phi) & +B \cdot \cos(\alpha + \phi) \\ -d \cdot \sin(\phi) & +d \cdot \cos(\phi) \\ \cos(\phi) & \sin(\phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\phi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} R\dot{W}_x \\ R\dot{W}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & -S \cdot \cos(\alpha + \phi + \theta) \\ S \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & -S \cdot \cos(\theta + \alpha + \phi) \\ -B \cdot \sin(\alpha + \phi) & +B \cdot \cos(\alpha + \phi) \\ S \cdot \sin(\theta + \alpha + \phi) & -S \cdot \cos(\theta + \alpha + \phi) \\ -B \cdot \sin(\alpha + \phi) & +B \cdot \cos(\alpha + \phi) \\ -d \cdot \sin(\phi) & +d \cdot \cos(\phi) \\ \cos(\phi) & \sin(\phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\phi} \\ \dot{d} \end{bmatrix}$$

몸체에 뒷바퀴를 기준으로 하는 직각 좌표계를 이용해 각 바퀴의 좌표에 관한 식을 구하고 그 좌표들의 시간에 대한 변위를 구하는 작업에서 원점에 놓여 있는 바퀴가 움직여 변화가 생긴 경우를 포함하는 식을 구하기 위해 기준바퀴의 좌표인 EW점에서의 변위를 d라고 하여 식을 구한다. 이 때 물리적으로 EW점의 변위는 중력에 반하여 움직일 수 없고 지면과 평행하게 움직여야 함으로 지면의 각 ϕ 을 반영하게 된다. 또한 각 α 는 각 θ 에 종속된 각이다. 식 (1)에서 보인 것처럼, 뒷바퀴에서 지면 쪽 바퀴에 이르는 바닥면 트랙과 몸체 사이의 각은 가변부 arm frame의 회전에 의해 만들어지는 각이다. 이 각의 시간에 대한 변화는 독립적으로 움직이는 각 θ 에 의해 계산된다. 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\dot{\theta} \cdot S \cdot (\cos\theta + \sin\theta)}{(B - S \cdot \cos\theta)^2} \cos^2\alpha \quad (4)$$

위 식을 이용해 각 α 의 변화를 각 θ 에 의해서만 계산하기 어렵다. 위 식에서 종속되는 각 α 를 제거하기 위해 다음 두

식을 이용한다.

$$m^2 = B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta, \\ S^2 = B^2 + m^2 - 2 \cdot B \cdot m \cdot \cos\alpha$$

위 식을 연립하여 풀면 다음의 식 (5)가 된다.

$$\frac{B - S \cdot \cos\theta}{m} = \cos\alpha \quad (5)$$

식 (4)에 식 (5)의 결과를 대입하여 풀면 다음의 식 (6)이 된다.

$$\rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\dot{\theta} \cdot S \cdot (\cos\theta + \sin\theta)}{(B - S \cdot \cos\theta)^2} \frac{(B - S \cdot \cos\theta)^2}{m^2} \\ \rightarrow \dot{\alpha} = \frac{\dot{\theta} \cdot S \cdot (\cos\theta + \sin\theta)}{B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta} \quad (6)$$

이제 식 (6)은 각 α 의 미분 값을 θ 에 의해서만 계산할 수 있게 되었다. 식 (6)을 이용해 식 (3)을 다시 작성하면 식 (7)과 같다.

III. 동적 해석(dynamics)

벽에 기대고 있는 시스템은 벽에 대항하는 대항력, 수직의 무게와 몸체의 회전에 의한 회전력 때문에 토크를 갖게 된다. 각 작용력들은 항력이 몸체를 따라 작용하고 있기 때문에 기하적으로 분석할 수 있다.

제한된 트랙 시스템이 수직 벽과 같은 장애물을 극복하기 위한 방법은 계단 모서리 혹은 수직 벽의 최상단 수평 모서리에 트랙을 경사지게 접촉시키고 모서리의 수직 벽의 항력과 대항력으로 미끄러지는 것을 방지하여 마치 모서리를 잡고 오르는 듯한 동작을 취하여 수직 벽장애물을 등판하는 방법이 있다. 그림 2에 도시 한 것처럼 이것은 장애물 벽면의 마찰력과 이동체의 뒷바퀴의 추진력을 이용하여 몸체의 회전력을 증가시켜 오르게 하는 방식으로 높은 마찰력과 적절한 등판 각도를 찾는 것이 중요하다.

또 하나의 방법은 수직 벽과 트랙의 마찰력 그리고 무게중심에 대한 회전모멘트(rotation moment force)를 이용해 수직 벽을 등판하여 오른 후 앞서 언급한 것과 같이 수직 벽의 상단 모서리에 트랙을 걸친 후 등판하는 방법이 있다. 즉 수직 벽의 높이보다 높은 자세를 갖는 트랙 형태를 이용해 등판하

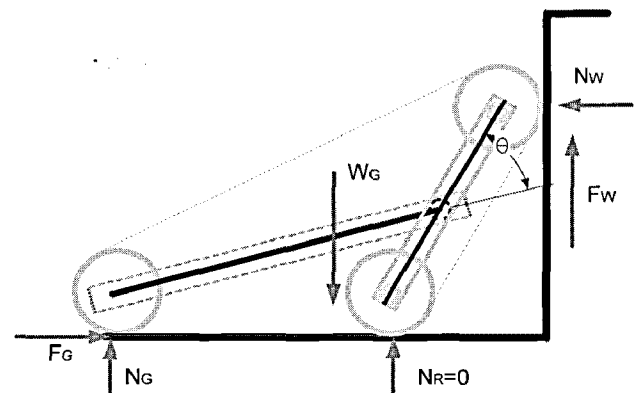


그림 2. 벽 오르기 운동 해석을 위한 힘 방향도.
Fig. 2. Analysis of an equilibrium state of forces in rise a wall.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} F\dot{W}_x \\ F\dot{W}_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -L \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) - \frac{S \cdot (\cos\theta + \sin\theta) \cdot \{L \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) + B \cdot \sin(\alpha + \varphi)\}}{B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta} \\ -L \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) - B \cdot \sin(\alpha + \varphi) - d \cdot \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \\
 &\quad \begin{bmatrix} L \cdot \cos(\alpha + \varphi + \theta) + \frac{S \cdot (\cos\theta + \sin\theta) \cdot \{L \cdot \cos(\theta + \alpha + \varphi) + B \cdot \cos(\alpha + \varphi)\}}{B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta} \\ L \cdot \cos(\theta + \alpha + \varphi) + B \cdot \cos(\alpha + \varphi) + d \cdot \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} R\dot{W}_x \\ R\dot{W}_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) + \frac{S \cdot (\cos\theta + \sin\theta) \cdot \{S \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) - B \cdot \sin(\alpha + \varphi)\}}{B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta} \\ S \cdot \sin(\theta + \alpha + \varphi) - B \cdot \sin(\alpha + \varphi) - d \cdot \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \\
 &\quad \begin{bmatrix} -S \cdot \cos(\alpha + \varphi + \theta) - \frac{S \cdot (\cos\theta + \sin\theta) \cdot \{S \cdot \cos(\theta + \alpha + \varphi) + B \cdot \cos(\alpha + \varphi)\}}{B^2 + S^2 - 2 \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta} \\ -S \cdot \cos(\theta + \alpha + \varphi) + B \cdot \cos(\alpha + \varphi) + d \cdot \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

는 것이다. 즉 장애물의 높이보다 높은 자세의 트랙 형태를 취하고 접근하여 장애물의 모서리 부분을 지렛대의 받침 점으로 이용하여 트랙의 모양을 곧은 형태로 가변과 동시에 장애물에 오르게 하는 것이다.

케도형 바퀴를 가진 이동체에서 이상의 장애물을 오르기 위한 방법들은 트랙의 동력전달의 장점을 최대한 이용한 것이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 단일화 되어있는 트랙이 험지 주행용 로봇의 바퀴 시스템으로 필요한 이유들 가운데 하나이다. 더불어 변형이 가능한 트랙의 형태는 다양한 높이의 수직 벽 장애물과 다양한 지형에 적응성을 높일 수 있다.

수직 벽 장애물에 오를 때 이동체의 몸체는 트랙의 뒷부분을 중심으로 회전하는 힘 즉 모멘트 힘이 발생해야 하며 그 크기와 방향이 수직 벽을 오르는 성능이 된다. 모멘트 힘은 무게중심과 거리로 계산된다. 본 논문에서 사용된 이동체의 제원은 다음 표와 같다.

수식 (8)-(11)은 표 1을 이용하여 무게중심을 계산하기 위해 유도된 수식이다. W_A 는 회전하는 arm frame의 shaft에 집중된 무게에 의한 힘이고 W_R 은 뒤 바퀴에 집중된 무게에 의한 힘이다. Body에 무게는 frame 양단에 동일한 무게로 집중되어 있고 그 크기를 각각 $W_{B/2}$ 라고 하고, 회전이 가능한 가변

arm frame의 무게는 frame의 중심에 집중되어 있으며(W_F) 이 무게중심은 회전 중심과는 다른 점이다.

$$W_A = W_F + W_M + W_B / 2$$

주행 시스템의 구조는 두 부분으로 나누어 각각의 무게중심으로부터 시스템 전체의 무게중심을 구하기로 한다. 먼저 body 쪽의 무게는 body와 뒤쪽의 주행 모터와 바퀴를 합한 무게인 W_R 과 가변 arm frame을 회전시키는 회전용 모터 무게 W_M 의 합으로 나타난다. 그 위치는 양단의 무게 $W_R + 0.5W_B$ 와 $W_M + 0.5W_B$ 의 비율에 의해 결정이 된다.

$$W_{RB} = W_B / 2 + W_R \quad (8)$$

가변 arm frame의 무게중심의 위치와 body부분의 무게중심의 위치에 의해 구한다. 이 때 주행 시스템의 총 무게는 W_G 이고 이 것은 각각의 무게의 합으로 구하여 진다.

$$W_G = W_A + W_{RB} \quad (9)$$

위 식과 앞서 언급한 기구해석 식을 이용하여 회전 가능한 arm frame을 회전시켜 장애물 극복을 위한 이동체의 형태를 변형하여 접근 각을 만들 회전 각을 계산한다. 회전 가능한 arm frame을 회전시키는 구동기는 body frame에 부착되어 있어 body frame를 기준으로 회전 가능한 arm을 회전시키며 그 회전 각을 θ 라고 한다. 이 각의 변화에 의해 이동체의 body frame의 기울기도 변하게 되는데 이러한 변화가 무게중심을 변하게 한다.

수평한 지면에서 arm frame을 θ 만큼 회전하면 body frame은 α 만큼 기울어지게 되고 또한 회전 가능한 arm frame의 회전에 대한 무게중심의 변화에 의해 body frame과 이루는 각에 대해 arm frame의 body frame에 미치는 영향이 달라진다. 이러한 사항들을 고려하여 식을 재정리하면 다음과 같다.

표 1. 시뮬레이션 및 실험을 위한 기구의 제원.

Table 1. Specification of the vehicle.

	weight(g)	length(축간, mm)
Rotatable arm frame	400 (W_F)	295 (255)
Body frame (inside)	800 (W_{B1})	575 (510)
Body frame (outside)	500 (W_{B2})	560 (510)
Wheel	850	80
Linking arm motor	1125 (W_M)	
Motor for driving	675 (W_R)	

$$x_C = (W_A \cdot x - W_{RB} \cdot x) \cdot \frac{W_A}{W_G}$$

$$= \left((n \cdot (FWx - RWx) + RWx - CAx) \cdot \frac{W_F}{W_A} + CAx - 0 \right) \cdot \frac{W_A}{W_G} \quad (10)$$

$$y_C = (W_A \cdot y - W_{RB} \cdot y) \cdot \frac{W_A}{W_G}$$

$$= \left((n \cdot (FWy - RWy) + RWy - CAy) \cdot \frac{W_F}{W_A} + CAy - 0 \right) \cdot \frac{W_A}{W_G}$$

$$n = W_{RW} / (W_{RW} + W_{FW}) \quad (11)$$

VI. 시뮬레이션 및 결론

회전모멘트를 유도하고 그 크기를 알아본다. 이동체가 앞서 제시한 장애물을 오르는 동작을 하는 경우 적절한 등판 각도와 마찰력을 이용할 수 있다고 하였다. 그렇다면 적절한 등판각 즉 접근 각은 어떻게 되고 마찰력은 어느 정도여야 하는 것인지 계산하기 위해 회전 모멘트와 마찰력 그리고 가변부인 회전 가능한 arm frame의 회전각에 의한 수동 바퀴들의 위치와의 관계식을 유도 하도록 한다. 이 회전 모멘트 값의 방향으로 몸체의 뒷부분에 발생한 회전 모멘트가 이동체의 앞부분에 운동 방향을 유도해 볼 수 있다. 먼저 수식 수평 수직 분력에 의한 이동체에 작용하는 힘들의 평형 상태를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F_x : F_G - N_w &= 0 & F_G &= \mu_G N_G \\ \sum F_y : N_G + F_w + N_r - W_G &= 0 & F_w &= \mu_w N_w \\ F_G = \mu_G N_G = N_w, & & F_w &= \mu_w \mu_G N_G \end{aligned} \quad (4.2-5)$$

이 시스템을 강체 형태로 가정하고 가변부 arm의 회전각에 의해 형태를 바꿀 수 있는 시스템임에 주목하자. X-Y축을 따라 힘이 평형 되었고 무게 중심 부근에서 회전력이 평형을 이루고 있다고 하자. 만일 이 강체가 벽에 대항하여 놓여져 있고 움직이지 않는 상태에서 평지의 힘과 강체는 마찰력으로 동등한 크기의 힘을 갖게 된다. 같은 방식으로 벽과 강체의 힘도 마찰로 인해 동등하게 된다.

위의 수식에서 F_G 와 F_w 는 마찰에 관련한 부분으로 지면에서의 마찰과 벽면에서의 마찰을 의미한다. 그림 2처럼, 만일 본 시스템이 임계정지 상태에 있다면 이동거리 x 와 y 가 0이 된다. 또한 각 방향의 가속도 성분은 0이 된다. 이런 조건과 수식으로부터 다음과 같은 간략한 수식을 만들 수 있다.

실제로 x 방향과 y 방향의 가속도는 뒷바퀴로부터 기인하고 이 힘은 물체를 따라 앞 방향으로 미는 힘이 된다.

$$F_G - N_w = \frac{W_G}{g} \ddot{x}, \quad F_w + N_G - W_G = \frac{W_G}{g} \ddot{y}$$

모멘트 힘에 의해 트랙 이동체가 위 쪽 방향으로 회전하기 시작하면 앞쪽의 회전 가능한 arm frame의 short side의 바퀴는 지면에 대해 항력이 없어지게 된다. 따라서 반시계 방향으로 회전하기 시작하는 경우 항력 N_R 은 고려되지 않고 회전하기 전까지는 항력에 의해 시계방향으로의 회전을 방해하여 모멘트 힘이 0이 되도록 한다.

N_w 의 위치는 장애물의 벽과 트랙의 가변부인 회전하는

arm frame의 긴 쪽의 바퀴가 접촉한 부분이다. 장애물의 벽에 접촉한 초기의 몸체와 지면 사이의 작은 이 회전 각에 의해 결정되고 이 회전각을 접근 각 이라고 부른다. 그리고 각 바퀴의 위치는 이동체의 제원과 이 회전각을 이용하여 수식 (1)과 (2)로부터 계산 된다. 유도된 F_G 는 모멘트를 계산하기 위한 수식에서 무게를 밀어서 벽면에 오르게 하는 힘이다.

$$\sum M_G = F_w \cdot (Dist_x(FW) + R) + N_w \cdot (Dist_y(FW) + R) - W_G \cdot (Dist_x(Ca) - x_c) \quad (12)$$

식 (12)에서 $Dist_x()$ 는 수평/수직 거리를 나타냄으로 직각좌표계 상의 x, y 좌표값으로 대치가 가능하며 회전 모멘트가 발생하는 위치는 뒷바퀴의 수직 항력인 N_G 가 발생하는 점이고 회전력을 발생 시키는 작용점들은 각각 트랙의 바퀴들의 위치인 RW, FW, CA 에 위치 하고 있다. 그래서 (12) 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\mu_w \mu_G N_G \cdot (FWx + R) + \mu_G N_G \cdot (FWy + R) - W_G \cdot (CAx - x_c) = \sum M_G \quad (13)$$

만약 μ_w 과 μ_G 가 같은 재질의 마찰계수라면 이 둘은 μ 로 대체될 수 있고 수식은 다음과 같이 된다.

$$M_G(\mu) = \mu^2 N_G \cdot (FWx + R) + \mu N_G \cdot (FWy + R) - W_G \cdot (CAx - x_c) > 0 \quad (4.2-9)$$

$$N_G = \frac{W_G}{\mu_w \mu_G + 1} = \frac{W_G}{\mu^2 + 1} \quad (14)$$

수직분력 F_y 와 $F_w = \mu_w N_w = \mu_w \mu_G N_G$

N_G 의 크기는 마찰 계수와 무게에 의해 최대 정지 마찰력 (μ)과 동등한 크기로 계산 된다. 평형이 깨지는 순간의 이동체의 무게에 의한 힘과 추진력과 벽면 마찰력 그리고 body frame의 뒷부분에 있는 주행 바퀴에서의 모멘트 힘은 마찰 계수를 근으로 하는 이차방정식으로 유도 된다.

$$\begin{aligned} \dot{M}_G(\mu_0) &= 2\mu_0 N_G \cdot (FWx + R) + N_G \cdot (FWy + R) = 0 \\ \mu_0 &= -\frac{(FWy + R)}{2(FWx + R)} \quad \because \text{den, num} > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

회전력의 크기변화는 일차 미분 방정식에 의해 판별된다. 회전력에 대한 이차방정식은 두 개의 근을 갖는 오목한 형태고 회전력의 최소값은 좌반면에 위치한다. 마찰계수의 특성과 수식의 이런 특성으로 마찰계수가 증가하면 등판을 위한 회전력도 증가하는 값을 보이게 된다. 유도된 이차방정식을 일차 미분하여 0일 때의 마찰 계수 μ_0 를 구할 수 있다.

이동체의 형태를 결정하는 회전 가능한 arm frame의 회전 각 θ 에 의해 위에서 계산된 N_G 와 N_w 를 이용한 모멘트 force에 대한 그래프는 아래와 같다. 그래프에서 알 수 있는 것처럼 이동체의 정지상태를 깨는 데 필요한 N_G 와 N_w 는 회전 가능한 arm frame의 회전 각 θ 에 무관하지만 계수가 커지면 N_G 는 감소하고 계단 벽에 발생하는 수평 항력 N_w 는 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉 무게중심의 위치가 변화하여도 그 위치가 body frame의 뒤 바퀴와 지면에 접촉해 있는 회전 가능한 arm frame의 짧은 쪽바퀴 사이에 있기 때문에 그 위치

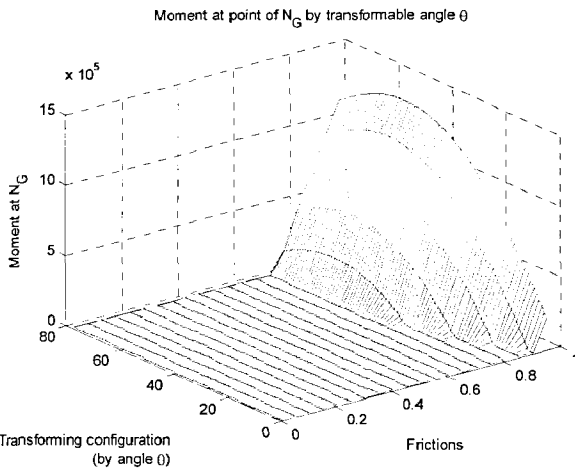


그림 3. 수직항력, 마찰계수와 마찰력에 의한 모멘트 변화.
 Fig. 3. Moment forces on the point of N_G and friction coefficients for overcoming an obstacle like a wall in variable shapes of the track.

의 변화가 모멘트에 크게 영향을 미치지 않는 것이다. 또한 단일 트랙 이동체는 마찰 계수가 0.6 이하 일 때 F_x 가 단일 트랙 이동체의 무게보다 월등히 크게 되지 않으면 그래프에서와 같이 양의 방향으로 모멘트 힘을 갖지 못하여 벽을 타고 오를 수 없다. N_G 는 N_w 와 동일한 힘을 가지고 있으며 방향은 반대이다.

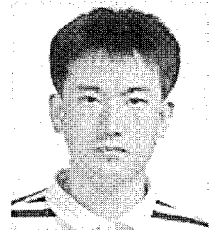
N_G 의 크기는 마찰 계수에 따른 N_w 의 그래프에서 보는 것과 같다. 따라서 마찰 계수가 0.8라고 하면 N_G 가 7000gf 이상의 크기이면 적절한 모양형태 각에 의해 양의 방향의 모멘트 힘을 얻을 수 있고 벽을 타고 오를 수 있다. 만일 마찰 계수가 0.8이하 이면 수평방향의 힘인 수평분력 중 F_G 가 지면에서의 수직 벽항력과 마찰 계수에 비례한 값이기 때문에 작은 마찰력에 의해 상대적으로 수평방향으로 큰 힘을 미치겠지만 수직 벽분력 중 F_w 의 크기는 작아지기 때문에 상승방향의 힘은 작아지게 된다. 즉 마찰 계수 0.8이하에서의 회전 모멘트 힘은 음의 방향으로 작용하게 된다. 이것은 무게중심의 위치와 각 주요 부분의 무게의 비율이 이러한 결과를 유도하였음은 직관적으로 자명하다. 즉 무게중심을 이동시켜 단일 트랙 이동체의 앞부분을 비교적 가볍게 하고 전체적인 무게를 줄인다면 모멘트 힘의 크기와 마찰 계수에 따른 회전방향도 바뀔 것이다.

현실적으로 마찰 계수를 0.6 이상 만들기는 어렵기 때문에 요철이 있는 벨트를 사용하고, 적절한 모양에 의해 지면에 접촉되지 않은 회전 가능한 arm frame의 긴 쪽 바퀴의 중심이 계단벽 보다 높이어었다면 계단 벽과 계단코 사이의 모서

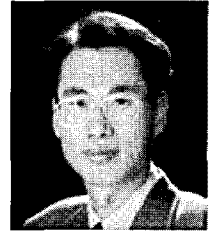
리에 의지하여 벽을 타고 오르게 한다. 그러나 단일 트랙 이동체가 전면부에 있는 회전 가능한 arm frame을 이용해 특정한 접근 각을 만들어 일정한 속도로 장애물에 접근한다면 작은 마찰 계수를 갖는 트랙 벨트의 종류라 할지라도 충분히 계단과 같은 장애물의 높은 계단 벽을 등판하여 타고 오를 수 있을 것이다. 이 때 중요한 것은 접근 속도와 접근 각이 될 것이다.

참고문헌

- [1] 김지홍, 이창구, “단일 궤도를 갖는 가변형 로봇 바퀴구조,” 제어·로봇·시스템학회 논문지 제15권 제2호, pp. 198-202, 2009.
- [2] J. H. Kim and C. G. Lee, “Mechanism for variable transformation shapes of a single-tracked mobile structure” *ADVANCES IN MOBILE ROBOTICS (CLAWAR2008)*, p. 752.
- [3] J. H. Kim, C. G. Lee, and G. H. Kim, “Study of machine design for a transformable shape single-tracked vehicle system” *Mechanical and machine theory 2010*.
- [4] G. W. Kohler, N. Sleight, and M. Salaske, “Manipulator vehicle of the nuclear emergency brigade in the federal republic of germany,” *Proc. of 24th Conf. on Remote System Technology*, pp. 196-218, 1976.
- [5] Y. Maeda, S. Tsutani, and S. Hagihara, *Prototype of Multifunctional Robot Vehicle*, ICAR, pp. 421-428, 1985.
- [6] T. Iwamoto and H. Yamamoto, *Mechanical Design of Variable Configuration Tracked Vehicle*, *J. of Mechanical Design*, vol. 112, pp. 289-294, 1990.



김지홍
 2000년 전북대학교 제어계측공학 학사.
 2003년 전북대학교 제어계측공학 석사.
 2010년 전북대학교 제어계측공학 박사.
 2000년~2001년 특허청 산하 Kipris 근무.
 2003년~2005년 고등기술연구원 근무.
 관심분야는 내장형 시스템, 로보틱스, 미들웨어, 로봇 기구학, 제어공학.



이창구
 1981년 전북대학교 전기공학과 학사.
 1983년~1991년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1991년 전북대학교 전기공학과 박사. 1992년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 홈 제어 시스템, 임베디드시스템.