

구조 로봇에 적합한 가변형 단일 트랙 메커니즘

임성균[†] · 박동일* · 곽윤근**

Variable Geometry Single-Tracked Mechanism for Rescue Robot

Im, Sung-Kyun Park, Dong-il Kwak, Yoon-Keun

Key Words : Rescue(구조), VGST(가변형 단일트랙), Symmetric Configuration(대칭 구조), Against Overturn(전복 대비), Transformation(변형)

Abstract

This paper introduces a new type of driving mechanism for rescue robot that has a variable geometry single-track which satisfies the pre-conditions of rescue robot. This mechanism is a symmetric configuration that has dual directions and prepares against overturn. By using transformation, it can reduce the energy consumption in steering and rotating. And also it maximizes the ability to overcome obstacles, like steps. It is designed to make the size of robot compact and to have the low center of gravity in driving on steps. Finally, we optimized the design variables of components determining the shape of reverse-trapezoid frame to enhance the adaptability to 4 phases of climbing steps.

기호설명

θ : Attack Angle, ϕ : 바퀴의 회전각
 F : 마찰력, N : 반발력
 r : 바퀴 반지름 m : 로봇의 질량
 H : 장애물 높이 h : 무게중심의 높이
 M_d : 구동 모멘트 M_o : 로봇 회전 모멘트
 d, c : 두 개의 바퀴 중심간의 거리

1. 서 론

현재 로봇의 활용분야는 인간 보조나 안전 지원을 넘어서 이제는 흥미 유발이라든지 복지지원 또는 인간친화의 범위까지 확산되는 등 인간과 관련된 거의 모든 생활 전반에 실현 가능한 여러 가지 형태로 흡수되어 크고 작은 편의를 제공하고 있다.

그러나, 이러한 인간과 로봇의 유기적인 결속력도 예기치 못한 자연재해와 인재 앞에서는 속수무책일 수 밖에 없는 것이 현실이다. 인간은 재해 예방과 인재 방지를 위해 부단한 노력을 해 왔지만 붕괴, 지진, 테러, 전쟁 등 일단 발생하게 되면 문명이 발달한 사회일수록 그 피해와 사상자 규모는 실로 엄청나다.

현재까지 진행 중인 이라크 전쟁의 사상자 규모(사망: 4700 여명)가 2001년 911 테러의 희생자(사망: 3100 여명)와 비슷하거나 2003년 이란 대지진 참사의 피해(사망: 28000 여명)보다 오히려 적은 점에서 단일 재난 및 재해의 심각성을 알 수 있으며, 피해 규모의 확산을 방지하는 길은 바로 사고의 생존자를 최대화 하는 것이다.[1,2]

이러한 생존자를 구조(Rescue)하는 노력에 로봇의 역할이 대두되는데, 이는 이제까지 고정관념화 돼왔던 인간보조나 인간친화와 같은 로봇의 기능과는 사뭇 차원이 다르다고 할 수 있다.

실례로 미국은 911 테러 당시 8대의 로봇을 현장에 투입하여 수명의 생존자와 사체를 발굴하는 성과를 거두었는데, 이처럼 인간이 접근할 수 없는 위험한 지역이나 정보가 없는 미지의 지형에서 인간 대신 귀중한 생명을 구조하는 로

[†] 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : kavakavakaist@hotmail.com
 TEL : (042)869-3252 FAX : (042)869-5201

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

봇의 역할은 사회적이고 대중적이며 현실적인 이슈가 되고 있다.[1,2]

이러한 구조로봇의 연구는 현재까지 주로 험로나 계단 등반에 중점을 두거나,[3,4] 로봇의 에너지 효율을 극대화 하는 방향이었다.[4,5] 따라서 본 논문에서는 기존의 연구 방향들을 기본으로 하되, 추가적으로 구조 로봇이 갖추어야 할 필수조건에 적합한 새로운 형태의 구조로봇 구동 메커니즘의 구현을 제시하였다.

2. 시스템의 설계

2.1 구조 로봇의 기본적인 구동 메커니즘

그림 1에서는 구조 로봇이 갖추어야 할 구동 메커니즘의 필수 조건들을 선정하였고, 그에 포함된 기본 구조를 도출하였다.

우선 계단을 포함한 각종 우발적인 장애물의 극복을 위해서는 로봇의 3 가지 주행기구 중 지형 적응성이 우수한 트랙형 구조가 적합하며, 트랙 구동 메커니즘의 에너지 효율을 높이기 위해서는 구조의 변형을 통한 지면과의 접촉면 변화를 생각해 볼 수 있고, 인명구조의 긴박한 상황에서 용이한 조작, 수리를 위해서는 단일 트랙 구조가 적합하겠다. 트랙의 형상도 변화하면서 동시에 단일 트랙구조가 되면 예상치 못한 협소 공간을 통과하기 위한 최적, 최소화에 접근할 수 있고, 무게중심을 낮게 하거나 전복에 대비한 구조 등 험로 주행간에도 안정성을 추구할 수 있는 가변형 트랙구조가 적합하다.

이러한 연관성을 바탕으로 가변형 단일 트랙형 로봇의 구동 메커니즘을 선정하였다.

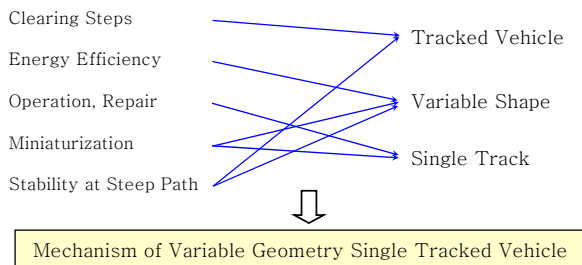


Fig. 1 Pre-Conditions and Designs for Rescue Robot

2.2 계단 환경 분석

로봇이 적응해야 할 환경 중 기본적인 가장 빈번하게 접할 계단을 분석해 보면, 단(tread)은 최소한 26cm 이상이 되어야 하고, 높이(rise)는 최대 18cm를 초과하지 못한다.

따라서 단일 트랙의 구동 메커니즘을 지닌 로봇이 계단을 극복하는 과정은 먼저 평지와 첫 번째 계단 사이의 높이 차이를 극복해야 하는 과정과 첫 번째 계단을 등반함으로써 자연스럽게 생성된 로봇 자체의 기울어짐을 두 번째 이후 계단의 경사(34.6°)에 적용시켜 승단하는 것이다.

첫 번째 계단을 극복하기 위해서 Attack Angle이 양방향으로 형성된 역 사다리꼴 형태의 로봇이 적합하며, 두 번째 이후 계단 등반은 로봇의 신속성을 위해 3 개 이상의 계단 모서리와 접촉한 상태로 주행하는 방법이 적합하겠다.

결국, 역 사다리꼴 형태의 로봇이 자체 Attack Angle을 이용하여 첫 번째 계단을 등반하고, 그 이후 계단은 최소 0.63m의 트랙 길이를 이용하여 등반하게 되는데, 가변(transformation)이라는 기능을 두 단계 사이에 적절하게 부여하여 로봇의 성능을 최대화 하는 것이다.

2.3 새로운 시스템의 제시 및 계단 등반 절차

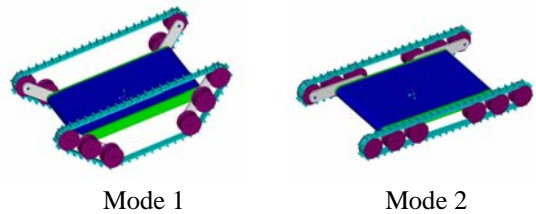


Fig. 2 Concept of Variable Configuration Single Tracked System for Rescue Robot

Fig. 2는 가변형 단일 트랙 구조 시스템을 제시한 것으로 평지 주행이나 회전 시 에너지 효율을 높이기 위한 Mode 1, 계단이나 장애물 극복 시 안정성을 위한 Mode 2를 나타낸 것으로 트랙 길이의 변화는 없으며, 계단을 등반하는 과정은 Fig.3에 명시하였다.

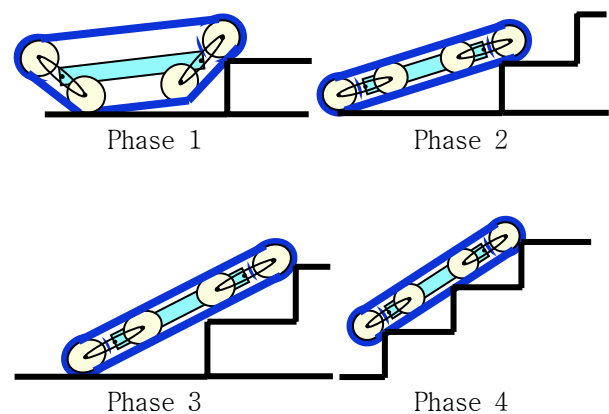


Fig. 3 Phases of Overcoming Steps

계단 등반 과정은 우선 로봇 자체의 Attack Angle 을 이용하여 첫 번째 계단을 오르고, 이후 트랙 변형을 통해 Mode 2 구조를 가진 상태로 두 번째 계단을 등반한다. 3 번째 이후 계단은 로봇이 마치 34.6° 의 일반 경사지를 오르는 효과를 가지게 된다.

2.4 시스템의 Attack Angle

Fig.4 는 로봇이 평지의 장애물을 통과하는 그림이며 이로부터 식 (1)을 구할 수 있다.

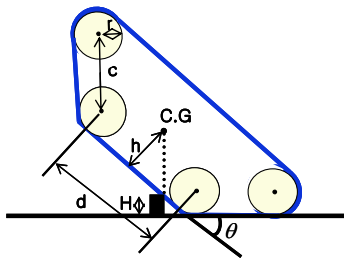


Fig. 4 Climbable Height of Obstacle

$$H = \frac{d}{2} \sin \theta + \frac{c}{4} \sin 2\theta + r - \frac{h}{\cos \theta} \quad (1)$$

식 (1)에서 θ 변화에 따른 장애물 높이 H 의 관계를 알아보기 위해 $c = 0.3m$, $d = 0.6m$ 로 가정하였다. Fig.5 는 $r = 0.1m$ 일 때, h 와 θ 의 변화에 대한 H 의 변화를, 그리고 $h = 0.1m$ 일 때, r 과 θ 변화에 대한 H 의 관계를 나타낸 것이다.

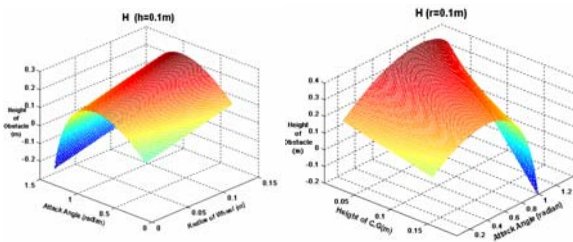


Fig. 5 Relation of H and θ

θ 가 40° ~ 50° 일 때 H 가 최대값이 되므로 장애물 극복을 위한 최적의 Attack Angle 은 40° ~ 50° 의 중간 값인 45°로 적용하겠다.

2.5 계단등반 성능 지수(Phase 1)

Fig.6 는 Phase 1 상황 시 가해지는 힘과 설계 변수를 나타낸 것이다.

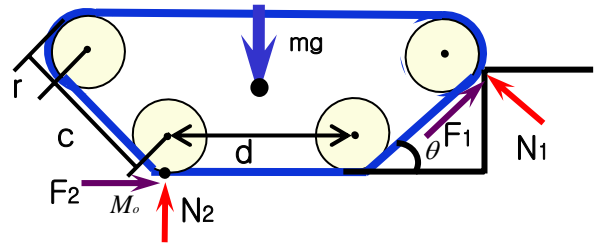


Fig. 6 Free-Body Diagram of Phase 1

Fig.6로부터 로봇의 힘 평형식은 식 (2)와 같고, 로봇이 첫 계단에 진입하면 등반을 위해 차체가 회전을 하게 되므로 식 (3)의 모멘트 M_o 는 평형식이 아닌 반 시계방향을 기준으로 성립된 것이며 모멘트 값(T)이 양수일 경우 등반이 가능한 조건을 나타낸 것이고, 0 또는 음수일 경우는 로봇이 계단을 등반하지 못하거나 미끄러지는 현상(slip)을 의미하는 것이다.

$$\begin{aligned} F_x : F_2 + F_1 \cos \theta - N_1 \sin \theta &= 0 \\ F_y : F_1 \sin \theta + N_2 + N_1 \cos \theta - mg &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_o : (d + r \sin \theta + \frac{0.18 - r + r \cos \theta}{\tan \theta} + 0.18 \tan \theta) \cos N_1 \\ + (d \sin \theta + r - r \cos \theta) F_1 - \frac{dmg}{2} = T \end{aligned} \quad (3)$$

F_i 는 N_i 과 μ 의 곱으로 구해진다고 가정하고, 식 (2)로부터 구해진 마찰력과 반발력을 식 (3)에 대입 후, $\frac{mg}{\mu^2 + 1}$ 로 양변을 나누어 주면 식(4)와 같은 Phase 1 성능 지수를 구할 수 있다.

$$d \left(\frac{\mu}{\tan \theta} + \frac{\mu^2 - 1}{2} \right) + r \left(\mu + \frac{\mu(\cos \theta - 1)}{\sin^2 \theta} + \frac{\mu^2(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} \right) + \frac{0.18\mu}{\sin^2 \theta} \quad (4)$$

또한 식 (4)에 $\theta = 45^\circ$ 을 대입하면, 다음과 같다.

$$\left(\mu + \frac{\mu^2 - 1}{2} \right) d + 0.414(\mu^2 + \mu)r + 0.36\mu \quad (5)$$

식 (5)의 r 항과 상수 항은 항상 0 보다 크므로 d 항이 이 성능 지수의 지배적 역할을 하며, d 와 r 의 관계를 알아보기 위해 경계값 $d \geq 2r$ 을 대입한 것이 Fig.7에 나와 있다.

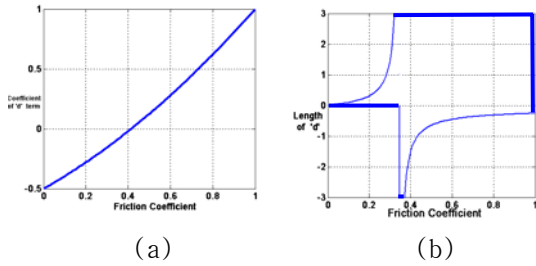


Fig. 7 d term(a) and Range of d(b)

Fig.7(a)에서 μ 가 0.4 이상일 때 d의 계수가 양의 값을 가지고 이는 식 (5)가 d, r 값에 상관없이 양수, 즉 등반이 가능함을 알 수 있다.

그러나 Fig.7(b)에서 적절한 d의 값을 정해주면 μ 가 0.4 이하일 때도 등반이 가능한 설계변수 값을 정할 수 있다. 예를 들어 μ 가 0.2 이라도 $d=0.35m$, $r=0.12m$ 이면 식 (5)가 0 보다 크므로 등반이 가능하게 된다.

2.6 계단등반 성능 지수(Phase 3)

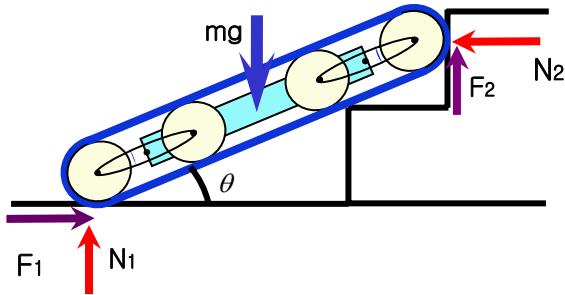


Fig. 8 Free-Body Diagram of Phase 3

Phase 3의 성능지수 역시 Phase 1의 경우와 마찬가지로의 방법으로 구해보면 식 (7)과 같다.

$$0.7 \sin \theta \mu + 0.35 \cos \theta (2\mu^2 - 1) + r(\mu^2 + \mu) \quad (7)$$

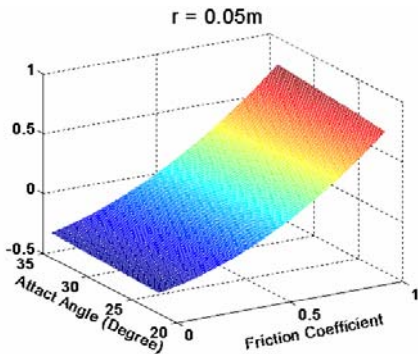


Fig. 9 Performance Index of Phase 3

식 (7)에 적용되는 θ 범위는 $22^\circ \leq \theta \leq 34^\circ$ 이고, $d=0.7m$ 이며, $r=0.05m$ 라 가정하면 Fig. 9와 같

은 μ 변화에 대한 성능지수 관계를 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 μ 값이 0.45 이상이 되어야 등반이 가능하므로 계단 등반 과정에 있어 앞서 제시한 Phase 1의 성능지수보다 더 지배적인 특성을 띄고 있으며, 또한 r 값이 커질수록 등반이 쉬워지게 된다.

2.7 구동 모멘트 및 최소 접촉 길이(Phase 4)

Phase 4와 같이 계단을 일반 경사지처럼 주행하기 위해 필요한 최대 구동 모멘트를 구하려면 우선 평지에서의 구동 모멘트를 알아야 한다.

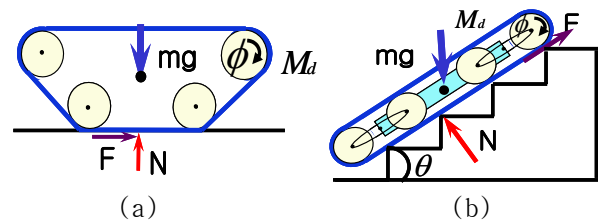


Fig. 10 Free-Body Diagram for Driving Moment

Fig.10 으로부터 평지에서 최대 구동 모멘트와 계단에서의 최대 구동 모멘트를 식(8), 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$m\ddot{x} = F, \quad \ddot{x} = r\ddot{\phi}, \quad J = \frac{1}{2}m_w r^2 \quad (8)$$

$$M_a \leq J\ddot{\phi} + Fr \quad \therefore M_a \leq r\mu g(m + m_w/2)$$

$$F = mg \sin \theta + \mu mg \cos \theta$$

$$\therefore M_a \leq rg(\sin \theta + \mu \cos \theta)(m + \frac{m_w}{2}) \quad (9)$$

위 식은 로봇이 주행하기 위해 구동 모멘트가 마찰력보다 작거나 같아야 미끄러짐(slip) 현상이 일어나지 않는다는 가정하에 수립한 것이다. 또한 계단을 주행하는데 필요한 최소 접촉 길이를 Fig.11과 식 (10)에서 나타내고 있다.

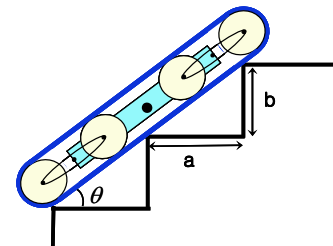


Fig. 11 Minimum Contact Length for Phase 4

$$h \tan \theta + \sqrt{a^2 + b^2} \leq \frac{d}{2} \quad \therefore 1.385h + 0.632 \leq d \quad (10)$$

3. 설계변수의 최적화

3.1 설계변수의 제한조건

Mode 2 에서 로봇 몸체의 두께를 0.08m, 트랙의 두께를 0.01m, Clearance Depth 를 0.03m 라 가정하면, 전복 대비 구조가 되기 위해 r 은 최소 0.06m 가 된다. 또한 구동과 변형을 위한 축이 동일한 이중축 구조를 띄게 되므로 바퀴간 최소 0.03m 가 이격되어야 한다. 식 (10)으로부터 d=0.7m 가 된다.

Mode 1 에서는 $\theta = 45^\circ$ 가 결정됨에 따라 h, d 의 수식이 c 와 r 의 값으로 바뀌며, 로봇의 높이가 0. 계단 크기(0.18m)보다 크거나 같은 조건이 생긴다.

식 (11)은 로봇의 설계변수인 c 와 r 의 제한 조건을 나타낸다.

$$\begin{aligned} r + c &\leq 0.35, & 0.06 \leq r &\leq 0.1 \\ 2r + 0.03 &\leq c, & -0.414r + 0.254 &\leq c \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 목적함수 선정

목적함수로는 식 (1), (5), (7), (10)을 이용하며, 함수 값에 영향을 미치지 않는 상수 항을 제거하였고, 해당 등식을 이용 c 와 r 만의 함수로 표시하였으며, 각 함수의 범위를 나누어 줌으로써 표준화(Normalization) 하여, 각 함수를 더한 최종 목적 함수는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} f = & (1.88 \mu^2 + 3.76 \mu + 14.29)c \\ & - (7.124 \mu^2 + 7.124 \mu - 31.64)r \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 12 는 식 (11)의 변수 범위에 식 (12)를 적용, 최소값을 가지는 최적점을 나타낸 것이다.

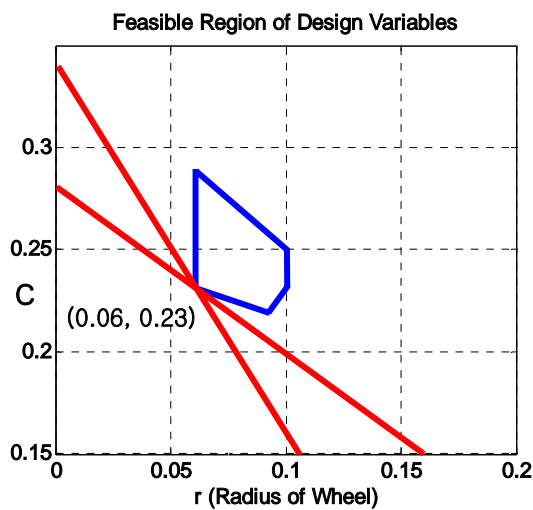


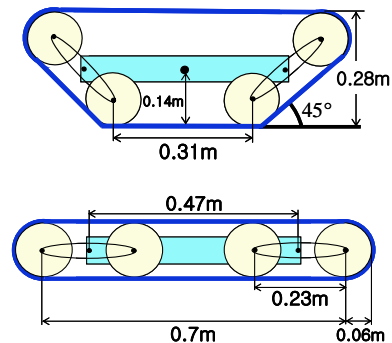
Fig. 12 Optimal Point for Design Variables

4. 결론

본 연구에서는 구조 로봇에 적용할 수 있는 가변형 단일 트랙의 구동 메커니즘을 설계하였다.

평지에서 주행, 회전, 방향 전환 간 효율성을 극대화하고 동시에 계단 극복 시 신속하면서도 안정적인 등반을 만족하기 위해서 변형을 통한 트랙의 가변성을 이용하였는데, 이 메커니즘은 역 사다리꼴 형태로 양 방향성을 지니며, 재난 지역에서 빈번히 일어날 수 있는 차체 전복의 문제점을 완벽히 해소할 수 있는 구조이다. 또한 다양한 각도의 변형을 통하여 수 많은 대칭 구조를 가짐으로써 여러 지형에의 적응성을 지닌다.

최적화 과정을 통해 r=0.06m, c=0.23m, Mode 1 에서의 d=0.31m, Mode 2 에서의 d=0.7m 임을 얻을 수 있었고, 계단 등반 과정 중 Phase 3 의 분석으로부터 트랙과 계단과의 마찰계수 μ 가 최소한 0.43 이상은 되어야 계단 등반이 가능함을 확인하였다.



참고문헌

- (1) Michael R. Blackburn, H. R. Everett, Robin T. Laird, 2002, "After Action Report to the Joint Program Office: CRASAR Related Effort at the WTC," Technical Document 3141, 5-15.
- (2) Scott L. Andresen, 2002, "Urban Search and Rescue Roots: From Tragedy to Technology," IEEE Intelligent System, 81-83.
- (3) Taro Iwamoto, Hiroshi Yamamoto, 1990, "Mechanical Design of Variable Configuration Tracked Vehicle," J. of Mechanical Design, Vol. 112, 289-294.
- (4) Kan Yoneda, Yusuke Ota, Shigeo Hirose, 1997, "Development of Hi-Grip Crawler using a Deformation of Powder," JSRJ, Vol.15, 1188-1193.
- (5) J. D. Martens, W. S. Newman, 1994, "Stabilization of a Mobile robot Climbing Stairs," Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, 2501-2507.