

이동로봇의 횡방향 안정성 증대를 위한 기구

정상국*(연세대학교 기계공학과), 최용제(연세대학교 기계공학과)

Design of a Mechanism to Increase Lateral Stability of Mobile Robot

S. G. Jung(Mechanical Eng. Dept, Yonsei Univ.), Y. J. Choi(Mechanical Eng. Dept, Yonsei Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the mechanism to increase lateral stability of a mobile robot using an energy stability margin theory. Previous measure of stability used in a wheeled mobile robot has been based on a static stability margin. However, the static stability margin is independent of the height of the robot and does not provide sufficient measure for the amount of stability when the terrain is not a horizontal plane. In this work, the energy stability margin theory, which is dependent on robot's height is used to develop a 2 dof mechanism to increase lateral stability. This proposed mechanism shifts the center of gravity of the robot to the point where the energy stability margin is maximized and overall stability of the robot equipped with this mechanism will be increased.

Key Words : Mobile Robot(이동 로봇), Lateral Stability(횡방향 안정성), Energy Stability Margin(에너지 안정성 여유), Static Stability Margin(정역학 안정성 여유)

1. 서론

최근 행성이나 위험지역 탐사를 위해 이동로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다. NASA 의 JPL 에서는 1997 년 바퀴 형태의 이동로봇 Sojourner⁽¹⁾를 화성에 착륙시킨 이후에 현재는 Spirit 과 Opportunity 를 이용하여 탐사 활동을 하고 있으며 Carnegie Mellon Univ. 와 NASA 는 1994 년 다리 형태의 이동로봇 Dante⁽²⁾를 개발하여 화산활동을 탐사하였다.

이러한 화성 표면이나 산지와 같이 구조화되지 않은 환경에 있는 로봇은 항상 전복의 위험에 노출되어 있으므로 험지에서 작동되는 무인 이동로봇의 개발에 있어서 핵심 요소는 예측 불가능한 지면에서의 전복에 대한 안정성이라고 볼 수 있다. 그러므로 무인 이동 로봇의 안정성 향상을 위한 이론들과 메커니즘들이 연구되었다.

이러한 안정성 향상을 위한 이론 중에서 Dominic A. Messuri 와 Charles A. Klein⁽³⁾은 에너지 안정성 여유 이론(energy stability margin theory)을 제안하였다. 본 이론은 안정성의 기준을 기존의 정역학 안정성 여유측면에서 고려하지 않고 로봇이 지면과

기울어진 각도에 따른 위치에너지 측면에서 고려하였다. 그리고 이 위치에너지가 같은 지점을 에너지 안정성 여유가 극대화 되는 지점으로 규정하고 로봇의 무게중심을 이 지점으로 이동 시킴으로서 전체 안정성을 증대시켰다.

또한 안정성 증대를 위한 메커니즘을 적용한 이동로봇 중에서 대표적인 것은 Siegwart⁽⁴⁾가 제안한 Shrimp 이다. Shrimp 는 스프링과 조인트의 결합을 이용하여 지면과의 충분한 안정성 유지 하에 이동 가능하며 바퀴 크기의 두 배 높이인 계단도 등반이 가능하다. 그러나 횡방향으로는 자유도가 존재하지 않기 때문에 종방향 이동에 비해 지면에 대한 안정성이 떨어지며 횡방향으로는 수평면과 40° 를 이룰 때 전복된다.

따라서 본 연구에서는 에너지 안정성 여유 이론을 적용하여 이동로봇의 횡방향 안정성을 향상시키는 기구를 제안한다. 먼저 로봇이 수평면과 이루는 각도에 대하여 에너지 안정성 여유가 극대화 되는 위치를 규정한 후 이동질량을 계산된 위치로 이동시키고자 2 자유도 평면 기구를 설계하였다. 또한 제안된 기구는 규정된 범위에서 로봇의 무게가 변하여도 안정성을 유지시킨다. 마지막으로 시뮬레이

선을 통하여 제안된 기구가 탑재된 이동로봇이 기존 로봇보다 0° 부터 45° 구간에서 횡방향 안정성이 증대됨을 확인하였다.

2. 무게 중심의 최적 경로 해석

2.1 이동 로봇의 좌표계

Fig. 1 은 본 논문에서 대상으로 삼고 있는 바퀴형 이동로봇의 일반적인 구조이다. 좌우 대칭의 구조를 가지고 있으며 운동방향을 종방향(Longitudinal), 로봇의 측면으로 향하는 방향을 횡방향(Lateral), 로봇의 위로 향하는 방향을 수직방향(Vertical)으로 정의 한다.

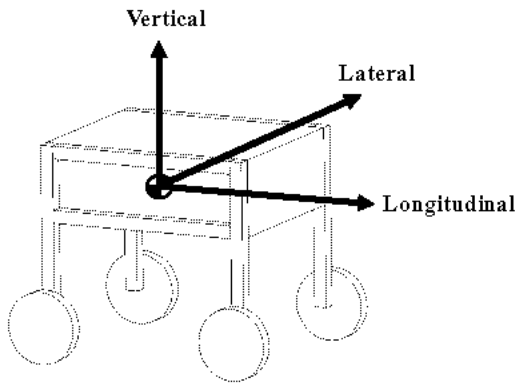


Fig. 1 Coordinate System of Wheeled Mobile robot

2.2 에너지 안정성 여유(Energy stability margin)

Fig. 2 는 이동로봇의 좌표를 Fig. 1 과 같이 나타냈을 때 횡방향으로 θ 만큼 기울어진 지면에 위치한 로봇을 나타낸다.

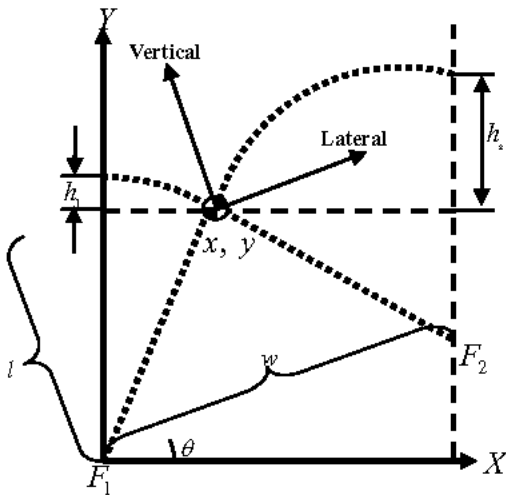


Fig. 2 Front view of the robot in Fig. 3, standing on an θ inclined plane

여기서 l 은 로봇의 높이, w 는 두 바퀴 사이의 거리, F_1 과 F_2 는 각 바퀴가 지면과 접촉한 지점을 나타낸다. Fig. 2 에서 로봇을 F_1 을 중심으로 반시계방향으로 회전 시켜서 무게중심(center of gravity,CG)이 F_1 에 수직인 직선과 접할 때 까지 로봇에 해 주어야 할 일은 mgh_1 , 반대로 F_2 를 중심으로 시계방향으로 회전시켜서 F_2 에 수직인 직선과 접할 때 까지 로봇에 해 주어야 할 일은 mgh_2 이다. 이 중 작은 일이 에너지 안정성 여유(Energy stability margin)이며 여기서는 mgh_1 이 에너지 안정성 여유이다. 에너지 안정성 여유란 외부의 운동 에너지에 의하여 전복되지 않고 견딜 수 있는 로봇 위치 에너지의 양적인 한계를 의미한다. 따라서 전체 로봇의 에너지 안정성 여유를 증대시키기 위하여는 무게중심이 h_1 과 h_2 가 같아지는 특정 위치로 이동 하여야 한다.

2.3 무게 중심의 최적 경로 해석

Fig.2 와 같이 좌표계를 설정하고 h_1 과 h_2 를 나타내면 다음과 같다.

$$h_1 = \sqrt{x^2 - y^2} - y \quad (1)$$

$$h_2 = \sqrt{(x - w \cos \theta)^2 + (y - w \sin \theta)^2} - (y - w \sin \theta)$$

여기서 θ 는 지면의 기울기, w 는 바퀴 사이의 거리, y 는 수평면에서 무게중심까지의 거리이다. 에너지 안정성 여유가 극대화 되기 위해서는 h_1 과 h_2 가 같아야 하므로 $h_1 = h_2$ 일 때의 x, y 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$x = \frac{1}{8} \sec 2\theta (m4w \cos^2 \theta m8y \cos \theta \sin \theta + \sqrt{2 \sin^2 \theta (w^2 + 8y^2 + w^2 \cos 2\theta - 8wy \sin \theta)}) \quad (2)$$

식(2)에서 -부호는 로봇이 Fig. 2 와 같이 F_1 을 중심으로 반 시계 방향으로 기울어 졌을 때 이며 + 부호는 시계 방향으로 기울어 졌을 때를 의미한다.

Fig. 3 은 식(2)를 이용한 예로 $\theta=20^\circ$ 에서 y 값을 0mm 부터 350mm 까지 변화시키며 에너지 안정성 여유가 최대가 되는 x 좌표들을 구한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 w 는 250mm 라고 가정하였다.

Fig. 3 에서 원으로 이루어진 곡선은 h_1 과 h_2 가 같은 x, y 의 궤적을 의미하며 이는 $\theta=20^\circ$ 에서 무게중심이 궤적상의 어느 위치에 있더라도 해당 높이에서의 에너지 안정성 여유가 최대가 됨을 의미한다.

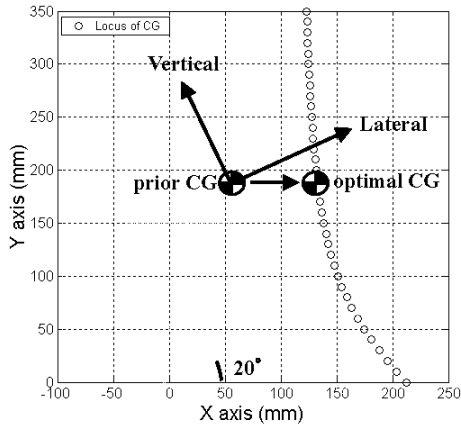


Fig. 3 Optimal locus of CG(circle) at 20° inclined plane

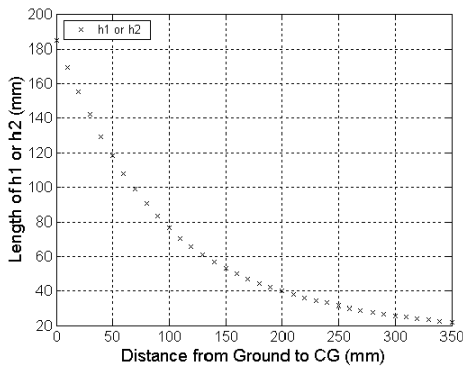


Fig. 4 Energy stability margin according to height of CG

Fig. 4 는 Fig. 3 에서 구한 x , y 값들을 식 (1)에 대입하여 h_1 또는 h_2 를 구한 결과를 나타낸 것이다. 이는 지면으로부터의 무게중심의 높이 (y)가 작을 수록 에너지 안정성 여유는 증대됨을 나타낸다. 그러나 로봇은 장애물과의 충돌을 방지하기 위해 본체와 지면 사이에 최소한의 유격은 존재해야 하며 이러한 관점에서 볼 때 최적 무게중심(optimal CG)의 위치는 Fig. 3 과 같이 수평으로 이동한 지점이며 그때의 무게중심의 위치 y 는 다음과 같다.

$$y = l \cos \theta + \frac{w}{2} \sin \theta \quad (3)$$

3. 로봇의 질량 모델링

Fig. 5 는 이동로봇의 질량 구성을 나타낸다. 로봇의 질량을 하중(load), 이동질량(moving mass), 고정질량(stationary mass)으로 구분한다.

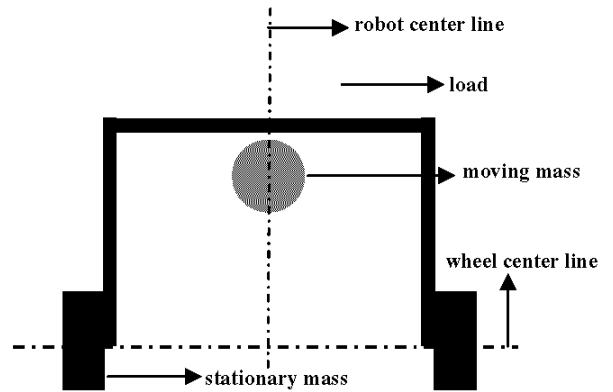


Fig. 5 Schematic diagram of robot mass system

여기서 하중은 로봇에 탐사나 관측 장비 등을 탑재하였을 때 별도로 부가되는 질량, 이동질량은 배터리 팩(battery pack)과 같은 로봇의 무거운 부분을 이동이 가능하도록 하기 위해 모아놓은 질량, 고정질량은 로봇의 바퀴 링크와 같은 전체 프레임에 포함된 질량이다. 그리고 안정성을 유지 시킬 수 있는 무게중심의 범위를 규정하기 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 앞에서 언급한 세 질량의 무게중심은 모두 로봇중심선(robot center line)상에 위치한다.
- 2) 고정질량의 무게중심은 바퀴중심선(wheel center line)의 상부에, 이동질량의 무게중심은 이동질량의 중앙에 위치한다.
- 3) 하중을 포함한 전체 질량의 무게중심은 바퀴중심선의 상부에 위치한다.
- 4) 하중을 제외한 로봇의 질량(이동 질량+고정 질량)을 m 이라 가정하고 이에 따른 고정 질량과 이동 질량의 비는 2:1 이다.

1)과 같이 가정하는 근거는 로봇이 좌우대칭 이기 때문이고, 2)와 같이 가정하는 근거는 고정질량에서 가장 질량이 큰 부분은 바퀴이며 바퀴의 무게중심은 바퀴 축에 있기 때문에 상부 링크의 질량까지도 고려하면 고정 질량의 무게 중심은 항상 바퀴 축 위에 있게 되기 때문이다. 3)과 같이 가정하는 근거는 가정 2)에서 고정질량의 무게중심이 규정되고 이동질량과 하중은 고정질량의 상부에 위치하므로 무게 중심은 바퀴중심선 상부에만 위치하기 때문이며, 마지막으로 4)와 같이 가정하는 근거는 바퀴의 총 무게가 배터리 보다 무겁기 때문이다. 예로 Shrimp 의 전체 질량이 3kg 이고 그 중 배터리가 차지하는 질량이 600g 이다. 제작 시 배터리는 이동질량에 포함되기 때문에 2:1 의 비율을 맞추기 위해 부가되어야 할 400g 질량은 배터리 케이스 등으로 부가 할 수 있다.

4. 기구 설계

본 기구 설계의 목적은 이동질량이 계산된 경로를 추종하게 함으로써 전체 무게 중심(하중+고정질량+이동질량)을 2.3 장에서 규정한 최적 무게중심으로 위치시키는 것에 있다. 그리고 이러한 과정을 무게중심 조절(CG adjustment)이라 정의한다.

하중이 포함된 전체 무게중심은 가정 3)에 의하여 바뀌 중심선 하부로는 이동이 불가능하고 만약 이동질량의 상부로 이동을 한다면 이동질량이 로봇 상판의 윗부분으로 이동을 해야 하므로 이와 같은 동작은 불가능 하다. 그러므로 지면으로부터의 무게중심 조절이 가능한 전체 무게중심의 이동 구간은 다음과 같다.

$$98.33\text{mm} \leq \text{CG of Robot} \leq 195\text{mm} \quad (4)$$

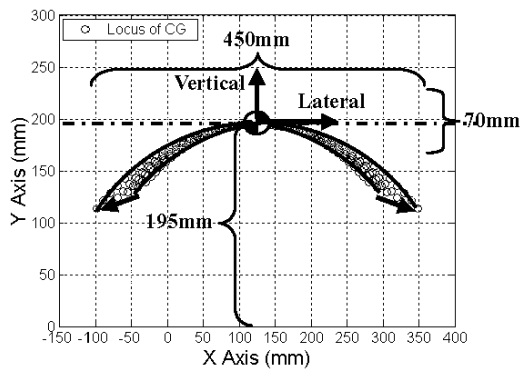


Fig. 6 Optimal locus of CG of moving mass with different CG and angle

그러면 무게중심 조절을 위한 이동질량의 궤적을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_m &= 3(x - 2/3x_{s+l}) \\ y_m &= 3(y - 2/3y_{s+l}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 첨자 m(moving)은 이동질량의 무게중심좌표, s+l(stationary+load)은 고정 질량과 하중을 합친 무게중심의 좌표이고, x 와 y 는 식(2)와(3)을 이용하여 구한 최적 무게중심의 좌표이다.

Fig. 6은 식(5)를 이용하여 로봇의 무게중심 x_{s+l} 이 식(4)의 범위에서 변할 때 이동 질량의 궤적 x_m , y_m 을 로봇 고정좌표(Fig. 1)에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 450mm와 70mm는 기구가 탑재되어야 할 공간이다. Fig. 6에서 무게 중심이 상부로 이동 할 수록 궤적은 바깥쪽으로 이동 함을 볼

수 있으며 이와 같은 궤적으로 이동질량의 무게중심을 위치시키기 위해서는 2 자유도 기구가 필요하다.

Fig. 6에서와 같이 기구를 탑재 할 수 있는 공간은 이동질량의 경로에 비해 좁다. 또한 20° 이상의 각도에서는 이동질량과 로봇의 다리 부분에 간섭이 발생한다. 그러므로 Fig. 7에서는 상판에 선형 구동기(linear actuator)를 탑재하여 공간 활용도를 높인 2자유도 기구를 제안한다.

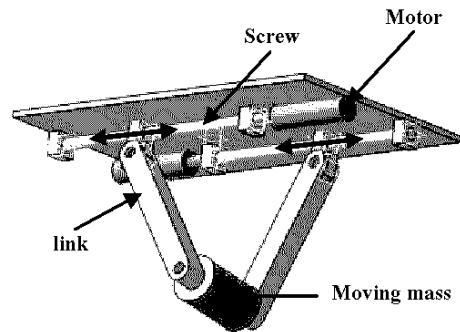


Fig. 7 Proposed 2 dof mechanism

Fig. 7은 두 개의 선형 구동기가 각각의 링크를 움직이며 이동질량을 규정된 위치로 이동시키는 기구이다.

링크의 길이를 합성하기 위하여 추종해야 할 궤적은 Fig. 6과 같다. 식(4)의 전 구간에서 모든 궤적을 추종하는 링크의 길이를 합성하는 것은 제한한 형태의 기구로는 불가능 하므로 무게중심 조절이 가능한 범위 내에 있는 특정 무게중심의 위치를 선정 하여야만 한다. 이에 바뀌중심선과 이동 질량의 무게중심의 평균값인 122.5mm를 추종해야 할 무게중심으로 결정하였다. 이와 같이 결정 한 이유는 로봇 높이의 중간 값으로 결정 함으로써 무게중심 조절 가능 구간을 넓게 하기 위해서다.

Fig. 8은 적합한 링크의 길이를 보여준다. 그림에서와 같이 링크는 길수록 이동질량이 도달 할 수 있는 궤적이 다양해 짐으로 무게중심 조절의 범위가 넓어지지만 기구 탑재 공간(450mm)의 물리적 한계에 도달하게 된다. 또한 요구 사항보다 짧아지면 도달 할 수 있는 위치가 제한되게 되거나 두 링크가 겹쳐지는 특이점(singular)에 도달할 수 있으므로 구동기의 길이와 이동 가능 공간을 고려하면 링크의 길이는 다음 식으로 표현 할 수 있다.

$$61.80\text{mm} \leq \text{link length} \leq 109.52\text{mm} \quad (6)$$

여기서 61.8mm 는 궤적 끝점(B)에서의 로봇 상판까지의 수직 높이이며 이 길이보다 짧으면 B 점에 도달 할 수 없고 같을 때에는 특이점이 발생하기 때문에 반드시 61.8mm 보다 는 커야 한다. 109.52mm 는 궤적과 상판의 우측 끝 점(A)까지의 최 단거리이며 계산결과 C 점이다. AC 의 길이보다 길면 오른쪽 링크가 A 점을 벗어나게 되므로 AC 의 길이보다 작거나 같아야 한다.

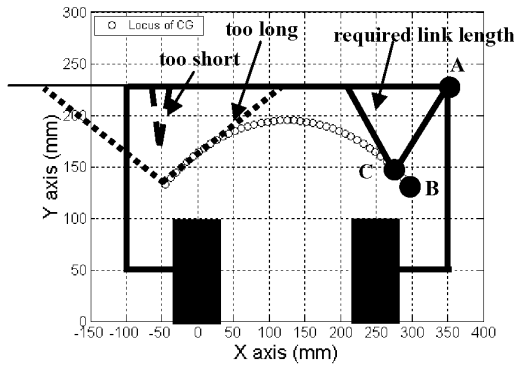


Fig. 8 Required link length of CG at 122.5mm from ground

그러므로 이동질량이 도달할 수 있는 다양한 궤적을 위하여 링크의 길이를 식(6)의 범위에서 가장 큰 값인 109.52mm 로 결정했다.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 9 은 합성한 기구에 대해 무게중심이 기준점인 122.5mm 일 때의 시뮬레이션한 결과를 보여준다.

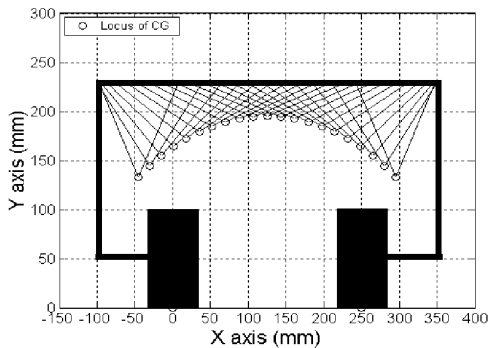


Fig. 9 Simulation results for proposed 2 dof mechanism

0° 부터 20° 까지의 무게중심 조절시 기구가 로봇 본체와의 간섭 없이 구동됨을 알 수 있다.

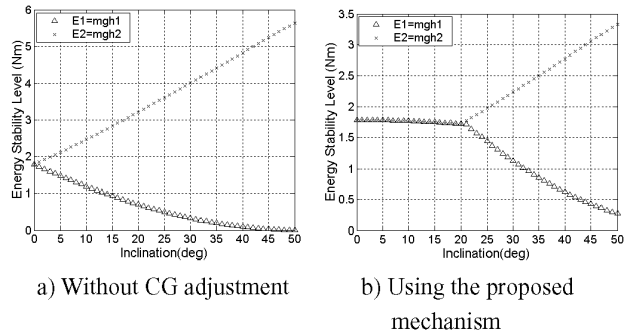


Fig. 10 Simulation results for CG at 98.33mm from ground

Fig. 10 은 로봇의 좌표계를 Fig. 2 에서와 같이 설정하고 무게중심이 지면에서 98.33mm 에 위치할 때 0° 부터 50° 까지의 기울기에 따른 에너지 안정성 레벨을 보여준다. 여기서 98.33mm 는 식(4)의 범위에서 무게중심이 위치 할 수 있는 가장 작은 값이다. Fig. 10(a)는 무게중심 조절을 하지 않은 상태이며 그래프에서 에너지 안정성 레벨이 가장 작은 값이 에너지 안정성 여유이므로 45° 에서 0.03Nm 이다. Fig. 10(b)는 무게중심 조절을 하였을 경우 이며 이때는 45° 에서 0.43Nm 로 무게중심 조절을 하지 않았을 경우 보다 에너지 안정성 여유가 0.4Nm 증가 하였음을 알 수 있다. 이는 무게중심 조절을 하기 이전에는 외부에서 무게중심으로의 0.03Nm 의 운동 에너지에도 전복이 되지만 무게중심 조절 후에는 그 한계가 0.43Nm 로 증가함을 의미한다.

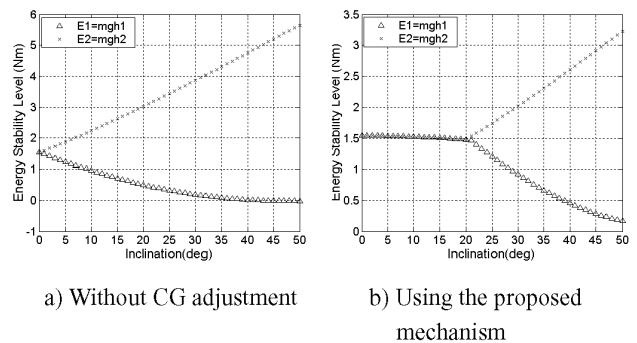


Fig. 11 Simulation results for CG at 122.5mm from ground

Fig. 11(a)는 무게중심이 122.5mm 에서 무게중심 조절을 하지 않았을 때이며 에너지 안정성 여유는 0 Nm 이다. 여기서 122.5mm 는 식(4)의 범위에서 무게중심이 위치 할 수 있는 중간 값이다. Fig. 11(b)는 무게중심 조절을 하였을 경우이며 에너지 안정성 여유는 0.29 Nm 이다. 무게중심 조절을 하

였을 경우에 하지 않았을 경우보다 0.29Nm 증가하였다. 수치적으로는 작다고 할 수 있으나 이는 무게중심 조절을 하지 않으면 45° 에서 전복됨을 의미하므로 물리적으로는 중요한 의미가 있다.

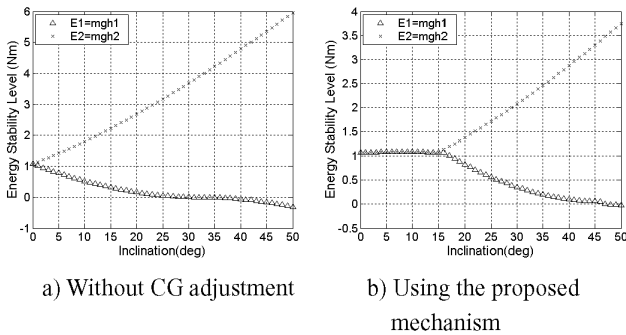


Fig. 12 Simulation results for CG at 195mm from ground

Fig. 12(a)는 무게중심이 195mm 에서 무게중심 조절을 하지 않았을 때이며 에너지 안정성 여유는 0 이하의 값을 갖고 있다. 여기서 195mm 는 식(4)의 범위에서 무게중심이 위치 할 수 있는 가장 큰 값이다. Fig. 12(b)는 무게중심 조절을 하였을 경우이며 에너지 안정성 여유는 0.06Nm 이다. 무게중심이 195mm 일 때는 기구의 물리적인 한계 때문에 0° 부터 20° 까지 전 구간에서 무게중심 조절이 불가능 하므로 15° 까지 하였으며 이는 0.06Nm 의 에너지 안정성 여유의 증대를 가져왔다.

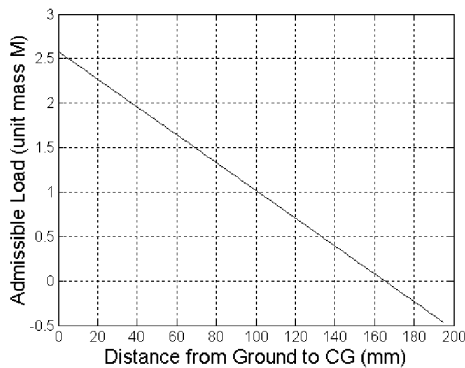


Fig. 13 Admissible load for maintaining stability

Fig. 13 는 하중이 걸렸을 때 무게중심 조절이 가능한 하중의 범위를 나타낸 것이다. 예를 들면 로봇 자체의 무게 중심이(고정질량 + 이동질량) 지면에서 100mm 에 있다고 가정하면 무게중심 조절이 가능한 하중은 1m 까지 이다. 이는 자중만큼의 무게가 더 실려도 무게중심 조절을 통해 45° 까지는 안정성을 확보함을 의미한다.

5. 결론

본 논문에서는 에너지 안정성 여유 이론을 적용하여 이동로봇의 횡방향 안정성을 향상시키는 기구를 제안하였다. 먼저 이동로봇이 수평면과 이루는 각도에 따라 에너지 안정성 여유가 극대화 되는 궤적을 규정하였고 이동질량을 본 궤적으로 이동시키고자 2 자유도 기구를 구성하였다. 또한 제작 후 무게중심이 설계된 위치와 일치하지 않거나 외부 하중에 의해 무게중심이 변할 때를 고려하여 무게중심 조절이 가능한 무게 중심의 범위와 가용 하중을 규정하였다. 제안된 기구를 이동로봇에 탑재하였다는 조건으로 시뮬레이션을 하였고 그 결과 무게중심이 지면과 이루는 거리가 98mm ~ 195mm 에 있을 때 로봇은 45° 까지 안정성을 유지했다.

참고문헌

1. Karl Iagnemma et al, "Experimental Validation of Physics-Based Planning and Control Algorithms for Planetary Robotic Rovers," International Symposium on Experimental Robotics ISER '99
2. Murali Krishna et al, "Tethering System Design for Dante II," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico-April 1997, pp. 1100-1105
3. Dominic A. Messuri and Charles A. Klein, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No. 3, September 1985, pp. 132-141
4. Roland Siegwart et al, "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain," Robotics and Autonomous Systems 40 (2002), pp. 151-162