

수직통로를 극복하기 위한 협소구역 이동용 다관절 로봇 설계

이지수*, 김성현 (연세대학교 대학원 기계공학과)
양현석 (연세대학교 기계공학과), 박노철 (연세대학교 정보저장공학협동과정)

Design of Articulated Mobile Robot to Overcome Vertical Passages in Narrow Space

J. S. Lee, S. H. Kim (Mechanical Eng. Dept. Yonsei. University)
H. S. Yang (Mechanical Eng. Dept., Yonsei University), N. C. Park (CISD, Yonsei University)

ABSTRACT

The robot to search and rescue is used in narrow space where human cannot approach. In case of this robot, it can overcome obstacles such as wrecks or stairs etc. Also, this robot can do various locomotion for each object. In this reason, an articulated robot has advantages comparing with one module robot. However, the existing articulated robot has limits to overcome vertical passages. For expanding contacted territory of robot, a novel mechanism is demanded.

In this paper, the novel mechanism of articulated mobile robot is designed for moving level ground and vertical passages. This paper proposes to change wheel alignment. The robot needs two important motions for passing vertical passages like pipe. One is a motion to press wheels at wall for not falling into gravity direction. The other is a motion that wheels contact a vertical direction of wall 및 tangential direction for reducing loss of force. The mechanism of the robot focused that two motions can be acted to use just one motor. Length of each link of robot is optimized that wheels contact a vertical direction of wall 및 tangential direction through kinematic modeling of each link. The force of pressing wall of robot is calculated through dynamic modeling. This robot composes four modules. This mechanism is confirmed by dynamic simulation using ADAMS program. The articulated mobile robot is elaborated based on the results of kinematic modeling and dynamic simulation.

Key Words : articulated mobile robot(다관절 로봇), narrow space(협소구역), vertical passage (수직통로)
ADAMS simulation(아담스 시뮬레이션)

1. 서론

사람이 접근하기 힘든 건물붕괴, 지진 등의 재난지역이나 하수도, 배관 등의 협소구역에 로봇을 투입하여 탐사 및 검사를 수행하도록 하는 연구가 최근 진행되고 있다. 위험작업을 로봇이 대신함으로써 인명 피해를 최소화 할 수 있고 작업 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 작업을 수행하는 로봇은 작업 환경의 특성상 건물간해, 계단 등의 장애물을 극복할 수 있어야 한다. 또한, 목적에 맞게 다양한 모션이 가능해야 한다. 이러한 이유로 한 개의 모듈보다는 여러 모듈이 합쳐진 다관절 로봇의 형태가 유리하다. 다관절 로봇의 대표적인 로봇으로는 뱀을 모방하여 제작한 뱀 로봇과 파이프를 검사하기 위한 로봇이 있다. 하지만, 뱀 로봇과 같이 평지를 다니는 다관절 로봇의 메커니즘으로는 수직통로를 올라가는데 한계가 있다. 반면에 파이프 검사용 로봇은 곡면을 다니도록 설계되어 있기 때문에 수직통로 등은 잘 극복하지만 일반 평지를 다니는 데에는 어려움이 있다. 탐사시 로봇이 접근할 수 있는 영역을 넓히기 위해서 평지와 수직 통로 모두를 극복할 수 있는 메커니즘이 필요하다.

본 논문에서는 다관절 로봇이 평지에서 이동이 가능하고, 수직으로 서 있는 파이프 배관에서도 이동이 가능하도록 하는 새로운 메커니즘을 제시한다. 이와 같은 목적을 수행하도록 하기 위하여 바퀴의 각도를 변환하는 메커니즘을 제시하고 기구학적 해

석을 통해 로봇의 크기를 최적화하였다. 동역학 해석을 통해 메커니즘을 검증하였다.

2. 로봇의 설계

2.1 바퀴의 각도 변화 메커니즘

다관절 로봇이 수직통로를 잘 올라가기 위해서는 두 가지의 중요한 모션이 필요하다. 중력방향으로 로봇이 떨어지지 않도록 하기 위해 바퀴를 벽면에 밀착시키는 모션, 힘의 손실을 줄이기 위해 바퀴가 면의 접선 방향에 수직으로 만나도록 하는 모션이 필요하다. 두번째 모션은 슬라이더를 밀어주는 힘의 손실을 줄일 뿐만 아니라 파이프 배관을 오를 때 롤링을 억제하는데도 도움을 주는 모션이다. 로봇의 무게와 제어해야 할 액추에이터의 수를 줄이기 위해서 위의 두가지 모션을 하나의 모터로 구동가능하도록 그림 1 과 같이 바퀴의 각도 변화 메커니즘을 제안한다.

$$DOF = 3(L-1) - 2J_1 = 3(6-1) - 2 \cdot 7 = 1 \text{ DOF} \quad (1)$$

그림 1 을 살펴보면 6 개의 링크와 7 개의 회전 조인트로 구성되어 있으므로 1 자유도를 갖는다.

2.2 설계목표

앞에서 설명한 내용을 고려하여서 다음과 같이 설계 목표를 정한다. 첫째, 최소 4 개의 모듈로 구성되며 한 개의 모듈은 바퀴를 구동하는 모터 한 개, 바퀴를 벽면에 압착하도록 하는 모터 한 개로 구성된다. 특히, 바퀴를 구동하는 모터는 모터 한 개로 바퀴 두 개를 구동한다. 둘째, 바퀴는 첫번째, 세번째 모듈은 밑부분에, 두번째, 네번째 모듈은 윗부분에 위치한다. 그 이유는 모듈 하나에 대한 무게를 줄일 수 있고, 파이프 배관에서 네 방향으로 힘을 전달할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 셋째, 직경 200mm 배관 내에서 바퀴를 지지하는 다리를 각각 45°의 각으로 켜둘 때 바퀴가 면의 접선 방향에 수직으로 닿도록 한다. 넷째, 각 모듈과 모듈 사이에는 다양한 모션을 구현할 수 있도록 좌우이동(yawing)과 상하이동(pitching)을 담당하는 모터를 번갈아서 구성한다.

3. 기구학적 해석

3.1. 각 링크에 대한 길이 모델링

링크 길이에 대한 해석을 하는 목적은 반지름이 r 인 파이프 배관에서 바퀴 다리를 45°의 각으로 켜둘 때 배관의 접선 방향에 수직으로 닿을 수 있도록 하는 최적의 L_0, L_1, L_2 값을 구하기 위함이다.

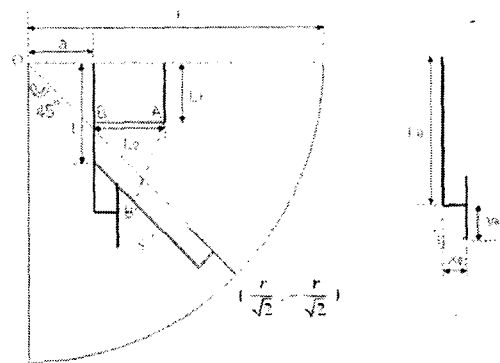
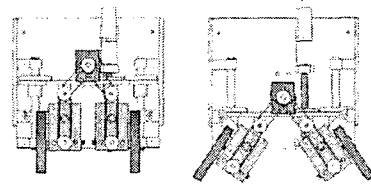


Fig. 1 Mechanism of changing wheel alignment

L_0 는 바퀴 다리의 길이, L_1 는 슬라이더부터 고정점 A 의 길이, L_2 는 고정점 A 부터 바퀴다리까지의 길이이다. 바퀴를 바깥쪽 방향으로 단 이유는 바퀴를 지지하는 다리가 먼저 파이프에 닿는 일이 없도록 하기 위해서이다. 또한, 협소구역에 투입되는 로봇이기에 가능한 작은 크기의 링크 길이를 선정하여야 한다.

그림 1 은 파이프 안에서 로봇의 오른쪽 바퀴 다리부분 모습이다. 각 링크간의 관계를 통해 식 (2), (3)을 얻을 수 있다.

$$a\sqrt{2} + x_0 + L_0 + y_0 = r \quad (2)$$

$$t = a + x_0\sqrt{2} \quad (3)$$

또한, A 점과 B 점 사이의 거리는 L_2 로 일정하다고 할 때 식(4)을 얻는다.

$$L_2 = \frac{2-\sqrt{2}}{\sqrt{2}} L_1 + \frac{(a+x_0\sqrt{2})^2}{\sqrt{2}L_1} + \frac{\sqrt{2}-2}{\sqrt{2}} (a+x_0\sqrt{2}) \quad (4)$$

배관 반지름은 100mm 이고 바퀴의 폭은 10mm, 반지름은 20mm 라고 가정한다. 그림 2 은 로봇의 중심에서 다리까지의 거리인 a 값을 선정하기 위한 해석 결과이다. a 값의 최소값을 20mm 로 한 이유는

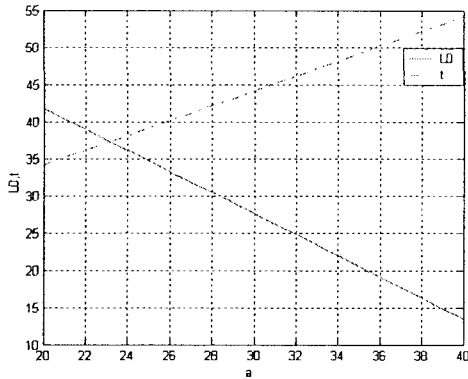


Fig. 2 Variation of L_0 and t due to a

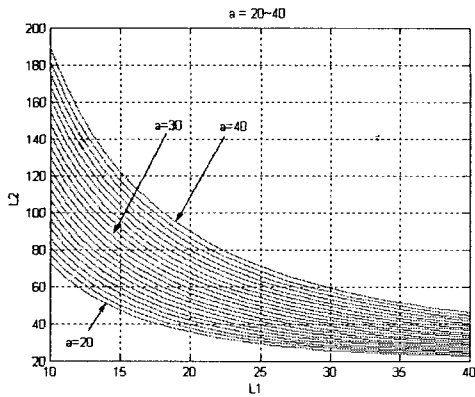


Fig. 3 Variation of L_2 due to L_1 at $a = 20 \sim 40$

바퀴를 구동하기 위한 베벨기어의 크기를 고려하여 선정하였다. 밀어주는 길이 t 는 그 역할을 하는 스크류의 길이 및 고정을 고려하였을 때 $t < L_0$ 가 성립하여야 한다. 즉, 두 직선의 교점의 왼쪽에서 a 를 선정한다. 그림 3 을 보면 a 값이 커질수록 점점 그래프의 곡선이 위로 올라가는 것을 알 수 있다. 이는 결국 L_2 을 점점 크게 하는 경향으로 a 값이 작을수록 적은 L_2 값을 선정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 결국, a 는 최소값인 20mm 로 선정하였고, 이때의 L_0 는 41.7mm, t 는 34.4mm 가 된다.

그림 5 는 L_1 의 변화에 따른 타이어와 파이프가 이루는 각의 변화에 대한 결과이다. $\phi - \theta$ 값이 크지 않아야 슬라이더를 밀어주는 힘의 손실을 줄일 수 있다. L_1 을 선정함에 있어서 그래프 궤적은 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 한편, L_1 는 $L_0 - y_0$ 값인 21.7mm 를 넘지 말아야 하고, L_2 는 $r - a$ 값인 80mm 를 넘지 말아야 한다. 결국, L_1 은 21.7mm 로 선정하였고 이때의 L_2 는 32.8mm 가 된다. 이와 같이 각 링크의 길이를 선정하였을 때 로봇의 높이는 123.4mm, 폭은 106mm 가 된다.

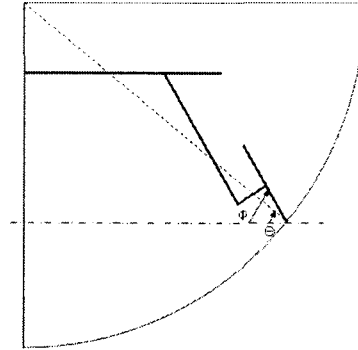


Fig. 4 Mechanism of contacting passage

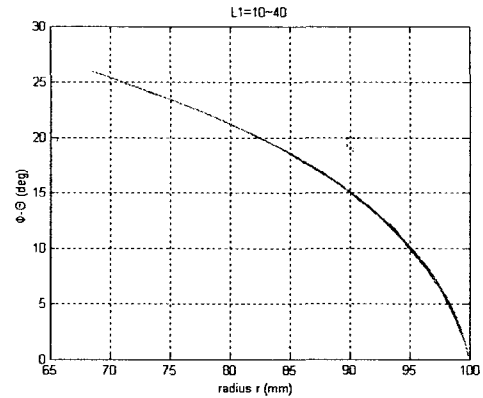


Fig. 5 Variation of $\phi - \theta$ due to r at $L_1 = 10 \sim 40$

3.2 통과 가능한 너비와 조인트와 관계 해석

통과 가능한 너비와 조인트와의 관계를 해석하는 목적은 3.1 절에서 선정한 링크의 크기대로 로봇을 설계하였을 때 직경 200mm 인 배관을 통과하려면, 모듈과 모듈 사이를 잇는 조인트의 각이 얼마나 필요한지 구하기 위해서이다. 그림 6 에서처럼 Kevin J.가 제안한 방법에 의하면 로봇의 길이, 폭, 조인트 각에 대한 관계식은 다음과 같다.[1]

$$R_i = \frac{L}{2 \tan \frac{\theta}{2}} - \frac{d}{2} \quad (5)$$

$$R_o = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (R_i + d)^2} \quad (6)$$

$$W = R_o - \frac{\sqrt{2}}{2} R_i \quad (7)$$

3.1 절에서 구한대로 d 는 106mm 으로 하고 L 값은 150mm 로 가정하였을 때, 그림 6 과 같은 결과를 얻는다. 결국, 200mm 이하의 파이프 배관을 통

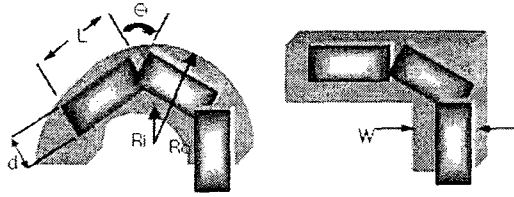


Fig. 6 Analysis of passage width to pass

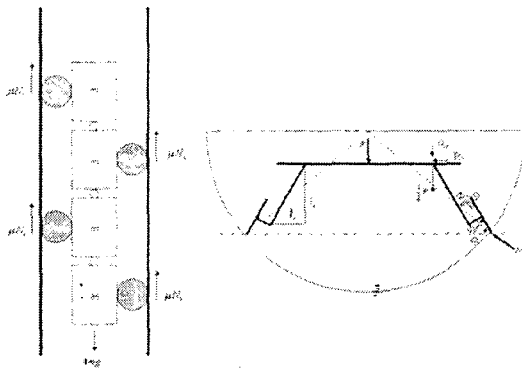


Fig. 7 Static analysis of robot in vertical passages

과하려면 조인트 값 θ 는 24.64° 이상은 확보 되어야 한다.

4. 정역학 해석

정역학 해석을 하는 목적은 로봇이 수직으로 서 있는 배관 안을 주행할 때 필요한 벽면으로 밀어주는 힘을 구하기 위함이다. 이는 결국 슬라이더를 미는 역할을 하는 스크류 구동 모터를 선정함에 있어 중요한 인자가 된다. 그림 7 에서 모듈 한 개의 질량을 m 이라고 할 때 관계식은 다음과 같다.

$$\mu(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) = 4m(g + a) \quad (8)$$

$$m(g + a) = \frac{\tau}{\gamma_0} \quad (9)$$

로봇이 등속운동하고 한 개 모듈의 질량이 1kg , 마찰계수가 0.4 라면 $\tau \geq 2\text{kgf} \cdot \text{cm}$, $N_1 \geq 2.5\text{kgf}$ 인 결과를 얻는다. N_1 에 대한 결과는 모듈 한 개에 대한 바퀴 하나에 대한 해석이며, 실제 바퀴 2 개로 바퀴다리의 각도를 변환시킨 메커니즘에 대한 해석을 수행해야 한다. 그림 7 을 살펴보면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$N = \frac{N_1}{2} \quad (10)$$

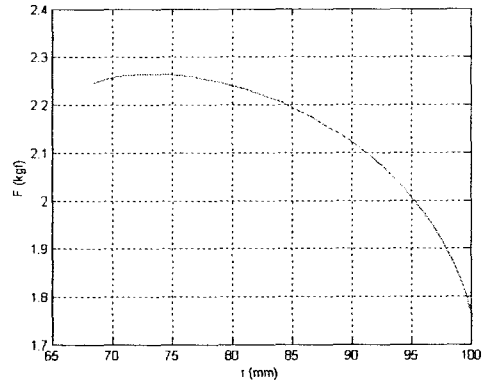


Fig. 8 Variation of F due to radius r

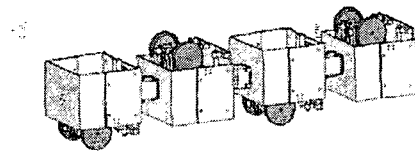


Fig. 9 Design of articulated robot

$$\sum F_x = N \cos \theta - R_x \quad (11)$$

$$\sum F_y = N \sin \theta - \frac{1}{2} F = 0 \quad (12)$$

$$\sum M = \frac{1}{2} Fl_x - R_x l_y = 0 \quad (13)$$

그림 8 은 식(11)에 의해 파이프 배관의 크기에 따라 필요한 힘을 구한 결과이다. F 는 역시 바퀴가 파이프 면의 접선 방향에 수직을 닿았을 때 가장 작은 값인 1.78kgf 임을 알 수 있다. 또한, F 의 최대값은 2.25kgf 로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 스크류 구동 모터를 선정한다.

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 목적

ADAMS 시뮬레이션을 수행하는 목적은 로봇 제작에 앞서서 앞 절에서 설계한 메커니즘을 검증하고 로봇이 원하는 모션을 수행하는지 확인하기 위해서이다. 또한, 동역학 해석을 통해 바퀴에 걸리는 수직항력, 바퀴구동을 위한 토크, 조인트가 받는 토크 등의 데이터를 얻기 위함이다.

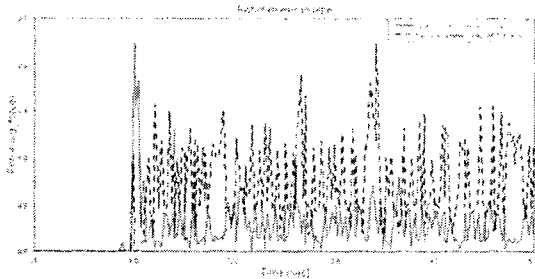


Fig. 10 Contact force

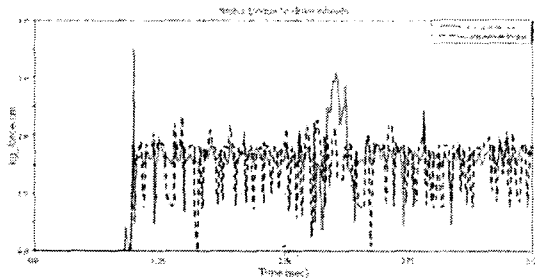


Fig. 11 Motor torque to drive wheel

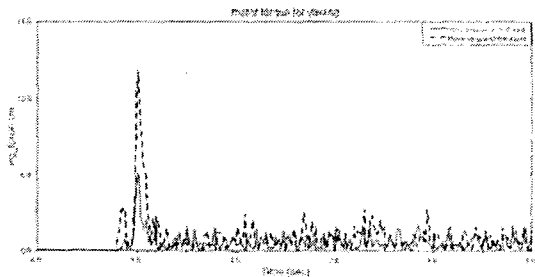


Fig. 12 Motor torque for yawing

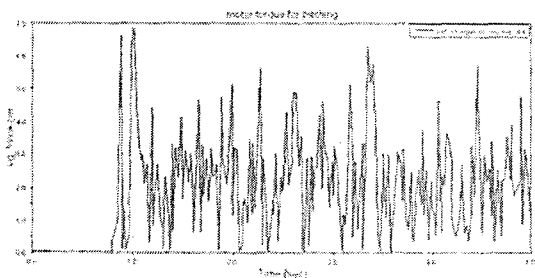


Fig. 13 Motor torque for pitching

5.2 로봇의 수직통로 이동에 대한 시뮬레이션

앞의 절에서 설계한 인자 값들을 가지고 로봇을 구성하여 200mm 인 파이프 배관에서 바퀴의 다리를 각각 45°로 뺐을 때의 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 첫번째 모듈과 두번째 모듈의 바퀴의 수직항력을 얻은 값이다. 4장에서 구한 N 값인 1.25kgf 과 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 구동바퀴에 대한 토크

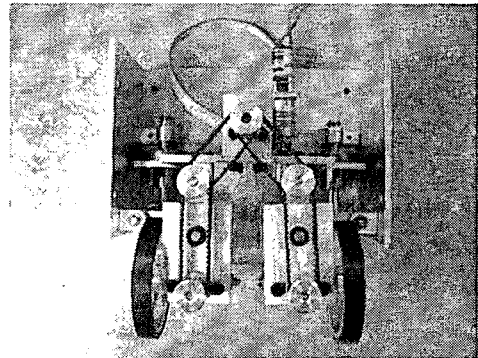


Fig. 14 Prototype of one module

그래프인데 역시 앞 절에서 구한 τ 값인 2kgf와 유사한 결과를 나타내고 있다. 그림 12와 13은 수직통로를 올라갈 때 좌우이동과 상하이동 조인트 부분이 받는 토크를 구한 것이다. 좌우이동의 최대 토크는 12.2 kgf·cm이며 상하이동은 6.9 kgf·cm로 나타났다. ADAMS 시뮬레이션을 통해 로봇이 바퀴의 각도를 변화시키는 메커니즘을 통해 수직으로서 있는 파이프 배관을 극복할 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 다관절 로봇이 수직통로를 극복하기 위한 새로운 메커니즘을 제시하였다. 평지에서는 일반 자동차와 같이 이동하다가 수직통로를 만났을 때 바퀴 다리의 각도를 변화시키는 메커니즘으로 벽을 밀며 올라가는 방법을 제안했다. 협소구역을 다니는 로봇이기에 크기가 작아지도록 기구학적 해석을 통해 링크의 길이를 최적화 하였다. 정역학 해석을 통해 수직통로를 오를 때 파이프 배관의 크기에 따라 벽면에 밀착하는 힘을 계산하였다. 최소 4개의 모듈로 구성하였으며, 동적 해석 프로그램인 ADAMS를 사용하여 동역학 시뮬레이션을 수행하여 메커니즘을 검증하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대 성장동력 사업의 “협소구역 검사용 유니트 기술개발”의 위탁과제로 수행하면서 얻어진 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kevin J. Dowling, 1997, *Blind Locomotion : Learning to Crawl with a Snake Robot? The robotics*

Institute CMU

2. K. Osuka, 2003, 개발 of Mobile Inspection Robot for Rescue Activities : MOIRA? Kyoto University, Proc. Of IEEE Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp.3373-3377
3. C. K. Song, 2003, ADAMS ver. 12, Intersivision, Seoul
4. S. Hirose., 1999, Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25, \phi 50, \phi 150$ pipes? Proc. of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.2309-2314
5. M. Mori, 2001, 개발 of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility? Tokyo Institute of Tech., Proc. of IEEE Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp.1552-1557
6. J. Ostrowski, 1996, Fast Kinematics for a Serpentine Robot? Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.1294-1299
7. T. Kamegawa, 2004, 개발 of The Snake-like Rescue Robot SAGA? Tokyo Institute of Tech., Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 5081-5086