

강아지풀 형상을 닮은 관내 주행로봇 개발

최용호[†] · 양현석* · 박노철**

Development of a pipeline robot like foxtail

Yong-Ho Choi, Hyun-Suk Yang and No-Chul Park

Key Words : Inpipe robot(관내 주행로봇), environment of pipe(관 환경), Flexible leg(탄성 다리), Adapted to environment (환경 적응)

Abstract

Generally inpipe robot needs force above standing for contacting robot to pipe. If the environment of the pipe-inside does not change, there is not a problem. But if the pipe radius change, or occur the obstacle which it does not intend, problem gets. So it uses a different system and must know an environment change, and changing the shape or a form of the robot. The research uses the flexible leg and is the robot which is adapted to the environment change of the pipe. The advantage of this robot is possible to move when it does not need to recognize a change of environment of pipe. Leg is bend with one direction. When it moves part that there are legs effect of leg direction the robot is moved with only one direction. If friction between legs and pipe is sufficient, not only verticality pipe moving, but also curved pipe moving. Also the obstacle of the pipe inside occurs and the diameter of the pipe inside changes, this robot can move if it does not use another system or device.

기호설명

θ_1 : 관 내부에서의 다리 각도
 θ_2 : 로봇 초기의 다리 각도
 K_θ : 비틀림 스프링 상수
 F : 로봇에 가하는 힘
 f : 다리에서 받는 힘
 μ : 다리와 벽면 사이 마찰계수
 l : 다리 길이
 N : 다리의 수

1. 서론

일반적으로 관내 주행로봇은 관내 벽과 로봇이 접촉하기 위해서 일정 이상의 힘을 벽으로 밀어주어야 한다. 만약 관 내부의 환경이 변하지 않는다면 큰 문제가 되지 않지만 관의 직경이 변하거나 곡관 부분이 생긴다면, 또는 관 내부에 장애물이 있다면 주행 시 문제가 발생한다. 때문에 관 내부의 환경이 변화하는지 알 수 있는 active 요소가 필요하게 되고(ex 센서) 관내 환경 변화를 인식해서 능동적으로 로봇의 모양이나 형상을 변화시켜야 한다.

강아지풀 메커니즘 로봇 연구는 배관 및 협소 구역을 자유롭게 이동할 수 있는 로봇에 관한 것으로, wheel 이나 track 형이 아닌 flexible한 다리를 이용한 worm type 형태의 in-pipe 로봇이다. 본

[†] 책임저자, 비회원, 연세대학교 대학원 기계공학부
E-mail : susin81@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2824 FAX : (02)364-6769

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 연세대학교 대학원 기계공학부

연구의 가장 큰 특징은 직경의 변화가 있는 관이나 수직관이나 곡관에서도 *passive*하게 적응하여 주행 할 수 있다는 것이 특징이다. 한 방향으로 붙어있는 *flexible*한 다리에 의하여 수직관내에서도 *self-locking*이 되며, 로봇에 전원이 공급되지 않아도 중력 방향에 대해서 *self-locking*이 가능하다. 본 연구의 목적은 *sensor*등을 통하여 *active*하게 주위환경에 적응하는 것이 아니라, 환경변화에 *passive*하게 적응함으로써 최소의 에너지를 이용하여 안정적인 주행을 하는 것에 있다. 수천 개의 *flexible*한 다리들이 큰 힘을 견딜 수 있게 해주며, 각각의 다리들은 로봇이 불규칙한 환경에 적응하여 쉽게 주행할 수 있도록 도움을 준다.

2. 구동 메카니즘(Mechanism)

2.1 강아지풀 이동 원리

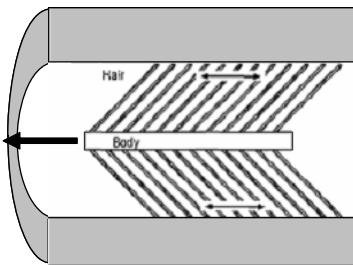


Fig. 1 Concept of foxtail inpipe robot

Foxtail robot 구동 mechanism은 다음과 같다. Pipe 안에 *flexible*한 다리가 달린 로봇을 넣을 때 *flexible* 다리는 Fig. 1 과 같이 모두 일정한 방향을 향하게 고정시킨다. 다리를 직접 움직이거나, 다리와 연결된 몸체를 움직이면 일정한 각도를 이루고 있는 *flexible*한 다리의 영향으로 로봇은 한쪽 방향으로만 진행하게 된다.

2.2 Motion equation

로봇 본체와 연결된 다리와 pipe 벽면 사이에 이루는 마찰력을 이용하여 motion equation을 세

우면 다음과 같다. 우선 로봇에 달린 다리의 초기 각도를 θ_2 , 관 내부로 들어가면서 좁아지는 다리의 각도를 θ_1 이라고 하고, 다리의 비틀림 상수를 K_θ 라고 한다. 하나의 다리가 가지는 관 내부에서 θ_1 에서 θ_2 로 가려는 힘의 크기는

$$f_1 = \frac{K_\theta(\theta_2 - \theta_1)}{l}$$

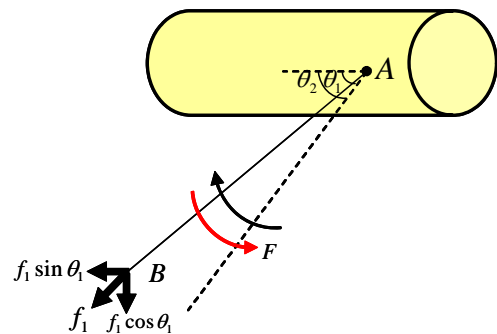
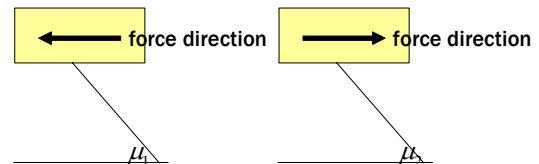


Fig. 2 Motion equation of foxtail



μ_1 : coefficient of friction when push(direction) force
 μ_2 : coefficient of friction when pull(direction) force

Fig. 3 Two case of force direction

이다. 여기서 l 은 다리의 길이이다. 다리와 pipe 벽과 생기는 마찰력의 크기는 $\mu f_1 \cos \theta_1$ 이다. 여기서 μ 값 마찰 계수로 Fig. 3 같이 미는 힘이 작용할 때와 당기는 힘이 작용할 때 마찰계수를 다르게 생각한다. 실제 실험을 통해서 양 방향에 따른 마찰계수는 다르다는 것을 확인했다. 로봇의 양 방향으로 같은 힘을 가하고 똑같은 힘이 작용할 때 다리와 pipe 벽면과 만나는 지점을 B에 작용하는 마찰력의 차이가 강아지풀 로봇을 움직이는 원리가 된다.

미는 힘이 작용하는 경우(case1) A지점에서의 다리에 전달하는 힘의 크기는 $F_N \sin \theta_1$ 이 되고 여

기서 F_N 은 다리 각 하나가 받는 힘 $F_N = \frac{F}{N}$ 이 된다. 마찰력과 관련된 힘은 B 지점에서의 수직항력이므로 B 지점에서의 수직항력을 계산하면, $F_N \sin \theta_1 \cos \theta_1$ 이다. 즉 다리 하나가 받는 마찰력의 크기는,

$$\mu_1 (f_1 \cos \theta_1 - F_N \sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

가 되고 전체 다리가 받는 마찰력의 합은,

$$N \times \mu_1 (f_1 \cos \theta_1 - F_N \sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

이다.

당기는 힘이 작용하는 경우(case2) A 지점에서의 다리에 전달하는 힘의 크기 및 B 지점에서의 수직항력이므로 B 지점에서의 수직항력을 계산하면, 다리 하나가 받는 마찰력의 크기는,

$$\mu_2 (f_1 \cos \theta_1 + F_N \sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

이고, 전체 다리가 받는 마찰력의 합은,

$$N \times \mu_2 (f_1 \cos \theta_1 + F_N \sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

이다.

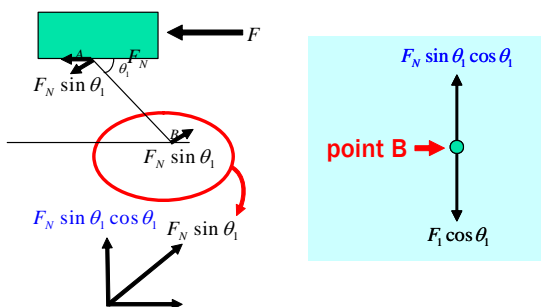


Fig. 4 Case1, when being the force which pushed

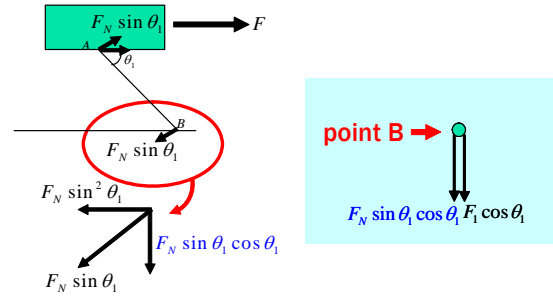


Fig. 5 Case2, when being the force which pulled

즉 다리의 방향 및 탄성의 영향으로 힘의 작용 방향에 따라서 마찰력의 차이가 발생하고, 그 결과 로봇이 한쪽 방향으로만 이동이 가능하다.

3. Motion equation - simulation

3.1 로봇 움직임 simulation

강아지풀 로봇의 움직임을 시뮬레이션 하기 위해서 다음과 같이 가정하였다.

우선 0~1초 사이에는 미는(case1)힘을 가하였고 1~2초 사이에는 당기는 힘(case2)힘을 가하였다. 힘이 이렇게 작용하는 경우 로봇의 움직임을 simulation하면 다음과 같다.

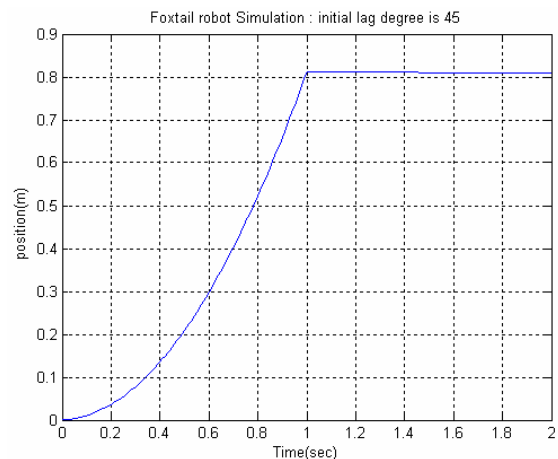


Fig. 6 Foxtail movement simulation

Fig. 6의 그래프에서 보여주는 결과와 같이 0~1초 사이에서는 로봇의 전진하는 결과를 보여주고 있고 1~2초 사이에서는 로봇이 거의 움직이지 않는 모습을 볼 수 있다. 이는 Motion equation 결과에

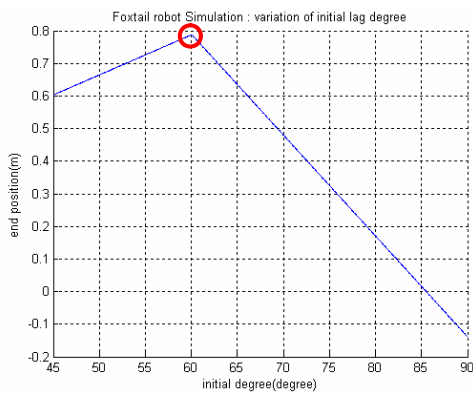
서 나타나는 마찰력 차이에서 case2에서 발생하는 마찰력의 크기가 크기 때문에 움직이지 않는다.

simulation 가정 부분은 다음과 같다.

다리의 길이 : $L = 0.02\text{m}$
로봇의 질량 : $M = 2\text{kg}$
로봇의 다리 질량의 합 : $m = 0.5\text{kg}$
다리의 초기 각도 : $\theta_1 = 45\text{degree}$
다리의 나중 각도 : $\theta_2 = 60\text{degree}$
다리의 수 : $N = 400$
힘 : $F = 4\text{N}$
torsional spring stiffness : $K = 0.001\text{N/radian}$
coefficient of friction(case1) : $\mu_1 = 0.5$
coefficient of friction(case2) : $\mu_2 = 0.7$

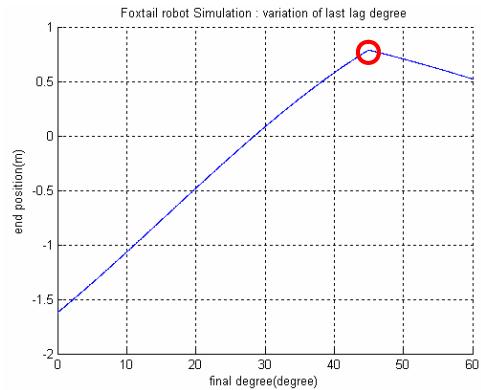
3.2 로봇의 움직임 최적화

강아지풀 로봇이 움직이는데 가장 중요한 역할을 하는 요소는 다리의 재질 및 조건이다. 위 simulation에서 가정한 부분은 최적화된 부분이 아니라 단순히 가정을 전제로 한 부분이기 때문에 조건의 변화를 통한 로봇 움직임의 최적화를 찾아보았다. 최적화 조건을 찾기 위해서 변화시킨 조건은 초기 다리 각도, 최종 다리각도 및 다리의 torsional spring 상수 값이다. 결과는 다음과 같다.



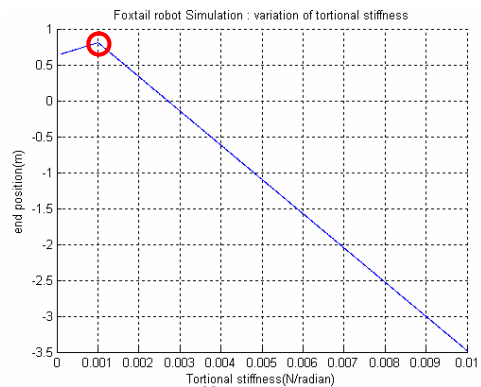
Initial angle - Displacement
 $\theta_2 = 45\sim 60\text{degree}$

Fig. 7 Foxtail robot simulation variation of initial leg degree



Final angle - Displacement
 $\theta_1 = 0\sim 60\text{degree}$

Fig. 8 Foxtail robot simulation variation of final leg degree



Torsional stiffness - Displacement
 $K = 0.001\sim 0.01\text{N/radian}$

Fig. 9 Foxtail robot simulation variation of torsional stiffness

Fig. 7의 그래프는 모든 조건은 Fig. 6의 조건과 동일하지만 초기 다리 각도를 45도에서 90도 까지 변화시킨 경우 2초 후 최종 위치를 나타내는 그래프이다. 본 simulation을 통해서 초기 다리 각도는 60도 근처에서 제일 잘 움직인다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8의 그래프는 모든 조건은 Fig. 6의 조건과 동일하지만 최종 다리 각도를 0도에서 60도 까지 변화시킨 경우 2초 후 최종 위치를 나타내는 그래프이다. 본 simulation을 통해서 관 안에 들어간 다리의 각도는 45도 근처에서 제일 잘 움직인다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 그래프는 모든 조건은 Fig. 6의 조건과 동일하지만 다리의 탄성 정도에 따른 움직임의 변화를 나타내고 있다.

물론 위에서 찾은 값들이 로봇이 진행하는데 제일 적합한 값은 아니다. 하지만 설계된 로봇이 있고, 극복해야하는 관의 사이즈가 결정된다면, 위의 방법을 위의 방법을 이용해서 로봇이 진행하는데 좋은 다리의 선택 및 모양을 결정 할 수 있다.

3.3 실험

강아지풀 로봇의 움직임을 증명하기 위해서 간단한 prototype 로봇을 만들어 실험을 했다. 본 로봇은 3부분으로 나뉘며 크게 다리가 붙어있는 hair body가 위 아래로 있고 가운데에 모터 밑 hair body를 움직일 수 있는 링크가 있는 부분으로 구성되어 있다. 상하로 움직이는 mechanism을

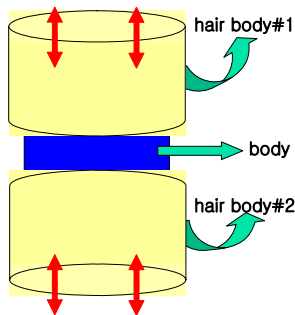


Fig. 10 Concept of prototype foxtail robot

모터와 링크를 이용해서 구현하였고 원운동을 직선운동으로 변환하여 전체 움직임을 상하 운동을 하게 만들었다. 수평인 지형을 이동할 때와는 달리 수직인 지형에서 위쪽 방향으로 진행하기 위해서는 중력방향으로 밀리지 않도록 전체적인 body locking이 되어야 한다. hair body가 하나만 있다면 body locking이 되지 않으므로 전진의 불가능하다.(2차 평면에서 실험을 통해서 확인) 그래서 수직 운동을 하기 위해서는 2개의 hair body를 만들어서 구동부와 지지부분을 반복적으로 변화시키는 mechanism을 선택하였다. 전체적인 robot의 무게 중심을 고려해서 모터는 좌우, 상하 대칭으로 설계하였고, 다리가 pipe 벽면에 골고루 접촉하기 위해서 원통형 대칭구조를 이루게 하였다. 실험에 쓰인 파이프는 길이 1m, 관 내부 지름은 150mm인 플라스틱 자바라를 사용하였다.

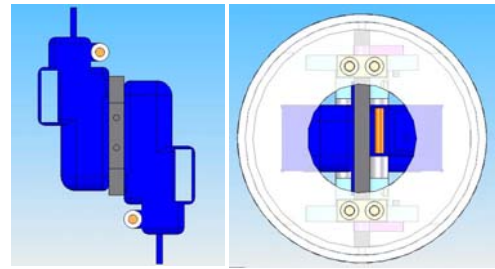


Fig. 11 Parts of foxtail robot



Fig. 12 Using pipe for experiment

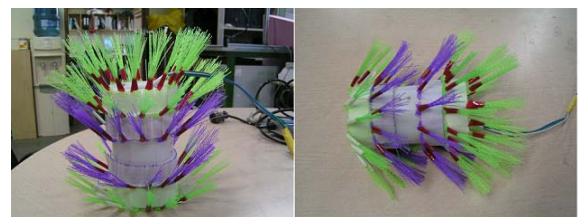


Fig. 13 Prototype foxtail inpipe robot

실험에 쓰인 prototype robot은 길이 120mm에 hair body가 40mm 길이 변환이 가능하다. 로봇의 직경은 다리부분을 제외한 부분이 90mm이고 2개의 소형 DC 모터를 사용하였다. 실험 결과 수직 형태의 관 1m을 올라가는데 20초 정도가 소요되었으며(5mm/sec), 실험에 쓰인 관을 곡관 형태로 변형시켜도 로봇이 다리를 이용, 적응하면서 올라가는 것을 확인하였다.

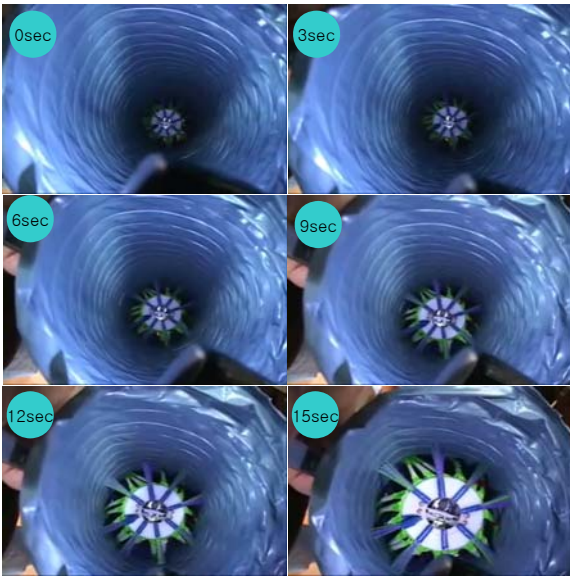


Fig. 14 Result of experiment

4. 결 론

지금까지 강아지풀 로봇의 운동방정식을 통해서 로봇이 pipe관 내부에서 움직일 수 있다는 것을 증명하였고, 또 한 간단한 prototype 로봇을 통해서 이를 증명하였다. 강아지풀 로봇이 가지는 가장 큰 장점은 험한 지형에서도 간단히 모터만 이용해도 주행이 가능하다는 점이다. 하지만 지금까지 수행한 로봇이 가지는 가장 큰 단점은 한 쪽 방향으로만 주행이 가능하고, 반대쪽 방향의 주행은 불가능하다는 점이다. 추후 계획은 반대 쪽 방향이 진행이 가능하도록 다리의 방향을 바꿔주는 mechanism을 연구해서 양 방향 진행이 모두 가능한 로봇을 개발 중이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 재난극복 이동 기술 개발 및 화점/인명 탐지 기술 개발 과제의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Mita, M. Kakushima, K. Ataka, M. Toshiyoshi, H. Fujita, 2005, "Foxtail Actuator" Solid-State

Sensor, Actuator and microsystems, Volume1, 5-9, pp. 682-683.

(2) A. Manuello Bertetto, M, Ruggiu, 2001, "In-pipe inch-worm pneumatic flexible robot" IEEE/ISME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, Volume1, 2, pp. 1226-1231.

(3) Fukuda. T, Hosokai. H, Uemura. M, 1989, "Rubber gas actuator driven by hydrogen storage alloy for in-pipe inspection mobile robot with flexible structure" Robotics and automation, 1989. proceedings IEEE International Conference on 14-19 May, Volume11, 3, pp.1847-1852.

(4)Muramtsu. M, Namiki. N, Koyama. R, Suga. Y, 2000, "Autonomous mobile robot in pipe for piping operation" Intelligence Robot and System, 2000.(IROS 2000), IEEE/RSJ International Conference, Vol 3, pp. 2166-2171

(5)se-gon Roh, Hyouk Ryeol Choi, 2005 "Differential-drive on-pipe robot for moving inside urban gas pipeline" Robotics, IEEE Transactions on, Volume 21, Issue 1, Feb 2005, pp.1-17