

대장 내시경용 캠구동 방식 이동메커니즘

박지상* · 김병규* · 김경대* · 박종오* · 김수현** · 홍예선***

Locomotive Mechanism with Cam for a Robotic Colonoscope

Jisang Park*, Byungkyu Kim*, Kyoung-Dae Kim*,
Jong-Oh park*, Soo Hyun Kim** and Yeh-Sun Hong***

Key Words : Colonoscope(대장내시경), Cam(캠), Groove(홈), Locomotive Mechanism(이동메커니즘), Microrobot.(미소로봇)

Abstract

Conventional colonoscope is semiflexible tube that should be manipulated by operator for inspection and treatment. Therefore, it sometimes causes pain for the patient and even perforation to the wall of colon if a surgeon is not well trained. For safe colonoscopy, self-propelling robots with inchworm locomotion are studied. But, inchworm locomotion has some problems in adaptiveness to the variation of colon diameter. In this paper, we propose novel locomotive mechanism which can move in the colon without any external assistance. It has several cams that have constant phase difference each other and located along the centerline of the mechanism. This mechanism could realize the robotic endoscope which has continuous and smooth thrust force.

기호설명

- a : 캠의 장반경
- b : 캠의 단반경
- h : 홈의 진폭
- L : 다리의 길이
- x_c : 캠과 다리가 접하는 점의 x 좌표
- z_c : 캠과 다리가 접하는 점의 z 좌표
- x_p : 핀의 x 좌표
- z_p : 핀의 z 좌표
- x_T : 다리 끝단의 x 좌표
- z_T : 다리 끝단의 y 좌표
- θ : 캠의 회전각

1. 서론

현재의 외과적 수술 및 치료는 의사의 매우 능숙한 손동작에 전적으로 의존한다. 이러한 것은 대장 내시경 시술에서도 예외가 아니다. 대장내시경 시술에서 쓰이고 있는 기존의 내시경은 직경이 9mm 정도이고, 의료진이 말단부만 잡고서 밀어 넣어야 하므로 어느 정도 강성을 가지고 있어야 한다. 따라서 환자는 내시경 시술 시 고통이나 불편감을 느끼게 되고 특정 부위의 진단이나 치료를 위해서는 숙련된 의사를 필요로 한다. 이러한 기존의 내시경이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위한 연구가 세계적으로 이루어지고 있다. 인체의 장기 내부에서 스스로 이동 할 수 있는 내시경로봇의 개발은 장기 내부의 질병을 초기에 검사하고 치료하는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

지금까지의 자율구동 내시경로봇의 이동메커니즘은 주로 인치웜 메커니즘(Inchworm Mechanism)에 초점이 맞추어져 있다. 이탈리아의 Dario 는 내

* 한국과학기술연구원(KIST)

** 한국과학기술원(KAIST)

*** 한국항공대학교

시경을 장벽에 고정(Clamp)시키기 위해 진공홀(Suction Holes)을 사용하고 이동을 위한 장치로 실리콘 고무 벨로즈(Bellows)를 사용한 인치웸 방식의 자가 추진 내시경에 관하여 연구하였다.¹⁾ Slatkin 등은 실리콘 풍선을 이용한 인치웸 구동 방식의 내시경을 개발하였으며²⁾, Vijayan 은 클램퍼(Clamper)모듈에 진공컵(Vacuum Cup)을 장착하여 미끄러짐을 방지하려는 시도를 하였다.³⁾ 한편, 벨기에의 Reynaerts 는 형상기억합금을 이용하여 반경 방향으로 패드(pad)를 뺀채서 장기 안에 고정할 수 있는 내시경을 개발하였다.⁴⁾ 이와 같이 기존의 자율주행 내시경에 관한 연구는 주로 인치웸 방식을 이용하고 있는데, 직경변화가 심하고, 미끄러우며, 신축성이 큰 대장과 같은 환경에서는 클램퍼의 직경변화가 대장의 직경변화를 따라가지 못하고, 심하게 고정력을 높일 경우 대장의 조직이 손상되어 인치웸 방식은 효과적인 구동장치가 되지 못하는 것이 현실이다.

본 논문에서는 대장 조직에 손상을 주지 않으며 마치 유충이 이동하는 것과 같이 부드러우며 연속적인 운동을 할 수 있는 캠에 의한 내시경 구동 메커니즘을 제시하였다.

2. 이동메커니즘의 구조

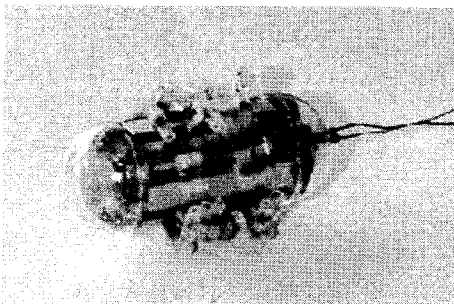


Fig. 1. Photograph of the Locomotive Mechanism

본 논문에서 제시한 대장내 이동메커니즘은 크게 캠과 몸체와 다리로 나눌 수 있다. 이동메커니즘의 전체 길이는 62mm 직경은 캠에 의해 몸체로부터 다리가 최대로 밀려나간 경우 43mm 에서 최소로 들어온 경우 36mm 이다. 사용한 모터는 Maxon 사 제품으로 길이가 36.3mm, 직경이 10mm 이다.

2.1 캠(Cam)

캠은 이동장치의 중앙에 길이방향으로 위치하며, 서로 45°의 위상차를 가지고 모두 5 개가 일렬로 연결되어있다. 캠의 개수는 위상차에 따라 가감할 수 있다. 또한 이동메커니즘의 전체 길이를 줄이기 위하여 캠의 내부에 모터를 장착하기 위한 $\phi 10$ 의 구멍을 내었다. 캠을 구동하는 모터는 캠의 회전축의 역할을 동시에 한다.

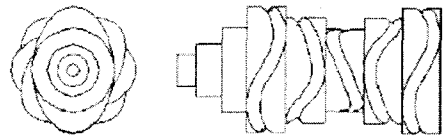


Fig. 2. Shape of the Cam

그림 2 에서 보는 바와 같이 캠의 외부 표면에는 사인곡선(Sine Curve)을 따라 U 자형 홈을 파서 다리의 일단부가 그 홈을 따라서 운동하도록 하였다.

2.2 몸체(Body)

이동메커니즘의 몸체는 내부의 캠의 회전운동에 의한 변위를 외부로 돌출된 다리 끝단의 원형 운동으로 변환한다. 몸체에는 길이 방향으로 슬롯(Slot)이 있어 여러 개의 다리가 슬롯을 따라 길이 방향(Longitudinal Direction)으로 장착될 수 있다. 이 슬롯의 구속을 받아 다리가 캠 형상에 의해 반경방향(Radial Direction)으로 왕복운동을 하게 된다. 이와 동시에 다리의 한쪽 끝단은 캠의 U 자형 홈을 따라 움직이므로 다리는 고정점을 중심으로 회전운동도 하게 된다.

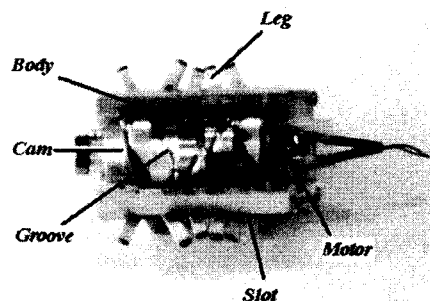


Fig. 3. Sectional View of Locomotive Mechanism

2.3 다리(Leg)

제시된 이동메커니즘의 다리는 캠의 반경방향으로 45°의 차이를 가지고 8 개씩 배치되어있으며, 길이방향으로는 5 개씩 모두 40 개의 다리가 장착되어있다.

대장과 직접 닿아서 내시경 장치에 구동력을 제공해야 하므로 다리의 한쪽 끝은 실리콘과 같이 부드러운 물질로 감싸서 다리가 대장에 닿을 때 발생할 수 있는 상처를 방지할 수 있게 하였다. 대장의 조직은 매우 약한 힘이나 압력에 의해서도 손상을 입을 수 있으므로 내시경시술 시에 특별한 주의를 요하는 부분이다. 다리의 반대쪽 끝은 캠의 주위에 패어진 U 자형 홈을 이탈하지 않고 따라 갈 수 있도록 구형의 형상을 가지고있다.

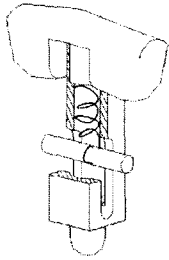


Fig. 4. Sectional View of the Leg

다리와 몸체가 닿는 면에는 다리의 길이방향으로 슬롯이 있어 다리를 관통하는 핀과 몸체의 구속을 받는 다리는 캠에 의한 왕복운동과 홈에 의한 회전운동의 복합으로 다리의 끝단은 원형 운동을 하게 된다. 또 내부에 있는 길이 방향의 원통형 공간에 인장스프링을 장착하여 구형의 끝단이 항상 캠과 접촉력을 유지할 수 있도록 하였다.

3. 이동원리

본 장에서는 제시된 메커니즘의 이동원리에 관하여 설명한다.

3.1 다리 끝 궤적(Tip Trajectory)

다리의 끝은 그림 5 에서와 같이 캠에 패어진 홈과 몸체의 핀의 안내를 받아 원형 운동을 하게 된다. 그림 5 의 (1)의 A 점에서 시작한 다리 끝 운동은 캠이 회전함에 따라 (2)와 (3)의 위치를 지나 다시 A 점으로 돌아오게 된다. 캠의 회전 방향

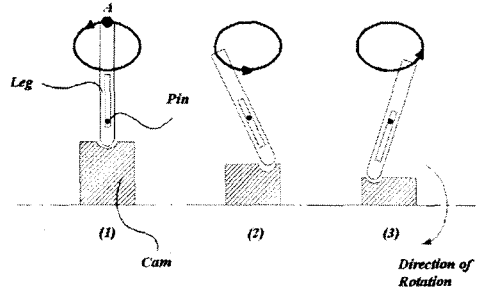


Fig. 5. Circular Motion of the Leg Tip

을 반대로 하면, 이 원운동의 회전 방향도 반대로 되어 이동메커니즘이 전진 및 후진을 가능하게 한다. 이 원의 궤적은 캠의 형상과 캠 표면의 홈 그리고 다리의 기하학적 관계에 의해서 구할 수 있다. 캠의 형상은 식(1)에서와 같이 타원이고, 캠 표면의 홈은 Sine 곡선을 따라가도록 하였다.

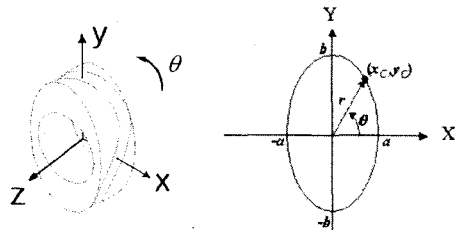


Fig. 6. Coordinate system for the Cam

그림 6 은 캠의 좌표계의 설정에 관한 그림으로서 타원의 중심에 x-y 축의 원점을 캠의 두께의 중간 점에 z 축의 원점을 두었다.

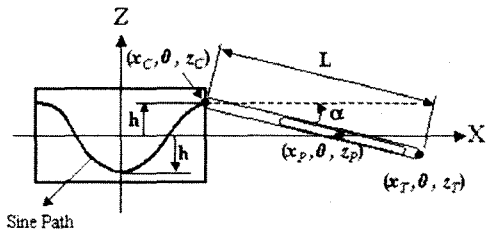


Fig. 7. Coordinate system for the Leg

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, z = h \sin(2\theta) \quad (1)$$

그림 7 은 캠의 회전각 $\theta = 45^\circ$ 일 때의 캠과 다리의 배치를 그린 것으로 이때 x 축과 다리 사이

의 각 α 가 최대가 된다. 또 식(2)로부터 다리 끝 단의 좌표를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_T &= x_C + L \cos(\alpha) \\ z_T &= z_C + L \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

그림 8 은 x 축 방향으로 놓여있는 다리 끝 궤적을 θ 를 0 에서 180 까지 증가 시키며 그린 것이다.

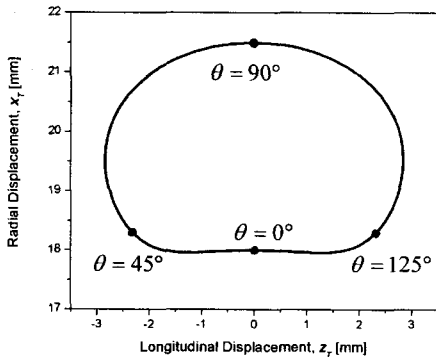


Fig. 8. Tip Trajectory of the Leg
($a=9.0\text{mm}$, $b=5.5\text{mm}$, $h=2.0\text{mm}$, $L=12.5\text{mm}$)

3.2 다리 끝 속도(Tip Velocity)

다리 끝의 속도는 식 (2)를 시간에 대하여 미분하여 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_T &= \left\{ 1 - L \sin(\alpha) \frac{z_P - z_C}{d^2} \right\} \frac{dx_C}{d\theta} \dot{\theta} + L \sin(\alpha) \frac{x_P - x_C}{d^2} \frac{dz_C}{d\theta} \dot{\theta} \\ \dot{z}_T &= L \cos(\alpha) \frac{z_P - z_C}{d^2} \frac{dx_C}{d\theta} \dot{\theta} + \left\{ 1 - L \cos(\alpha) \frac{x_P - x_C}{d^2} \right\} \frac{dz_C}{d\theta} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2} \\ \frac{dx_C}{d\theta} &= \frac{ab(b^2 - a^2)\cos(\theta)\sin(\theta)}{(b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta))} \\ \frac{dz_C}{d\theta} &= 2h \cos(2\theta) \end{aligned}$$

이다.

식 (3)을 이용하여 다리 끝의 속도를 구하면 그림 9 와 같다. 이때 모터의 회전 속도는 30RPM 으로 하였다.

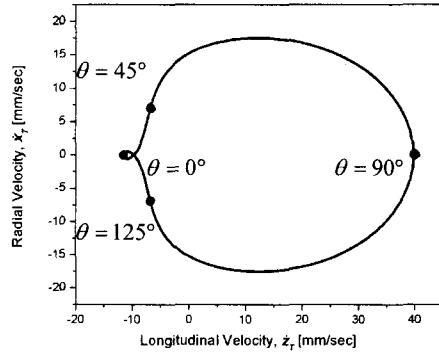


Fig. 9. Tip Velocity of the Leg

4. 이동메커니즘의 설계변수

본 장에서는 제시된 이동메커니즘의 거동에 결정적인 영향을 미치는 설계변수에 관하여 고찰해 보고자 한다.

그림 8 과 그림 9 에서 보인 다리 끝 궤적과 속도는 타원형 캠의 장반경(a)이 9.0mm, 단반경(b)이 6.5mm, 캠 표면 홈의 진폭(h)이 2mm, 다리의 길이 (L)가 12.5mm, 중심선으로부터 편이 떨어진 거리 (x_P)가 12mm 그리고 모터의 회전수($\dot{\theta}$)는 30RPM 으로 하였을 때를 기준으로 그린 것이다. 이러한 설계변수들 아래, 지름방향(Radial Direction)으로의 다리끝의 위치 x_T 는 18mm 에서 21.5mm 사이의 값을 가지며 길이 방향 z_T 는 약 6mm 의 변위를 가지며 거의 원에 가까운 궤적을 그린다.

이러한 다리끝 궤적과 속도는 캠의 형상, 홈의 경로, 중심선으로부터 편이 거리 등에 영향을 받는데, 그림 10 과 그림 11 에서는 비교적 쉽게 변화시킬 수 있으며 다리끝 궤적과 속도에 민감한 영향을 미치는 중심선으로부터 편이 거리 x_P 를 변화시켜가며 이동메커니즘의 거동을 살펴보았다.

그림 10 에서 x_P 가 10mm 일 때, 길이방향으로의 변위 z_T 가 $\pm 6\text{mm}$ 사이의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이와 반대로 x_P 가 커지면, 그 변화폭이 상대적으로 작아짐을 확인할 수 있다. 이것은 지렛대와 같이 운동하는 다리의 특성을 고려할 때 타당한 결과라고 할 수 있다.

그림 11 에서 x_p 가 10mm 일 때, 다리끝의 최고 속도가 길이방향으로는 약 150mm/sec, 반경방향으로는 40mm/sec 까지 증가하는 것을 볼 수 있다.

x_p 가 커짐에 따라 길이방향 다리끝 속도의 감소하는 정도가 반경방향의 속도감소 폭에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, 길이방향의 속도는 이동메커니즘의 이동속도와 추력에 직접적인 영향을 미친다.

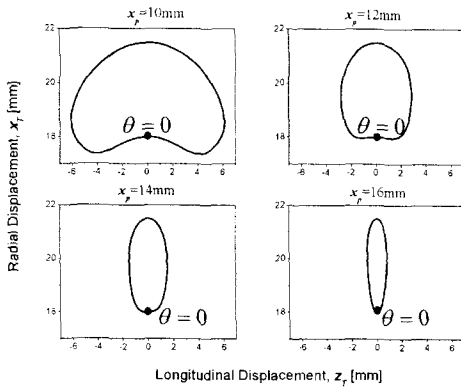


Fig. 10. Different Tip Trajectories of the Leg with Variation of Pin Position

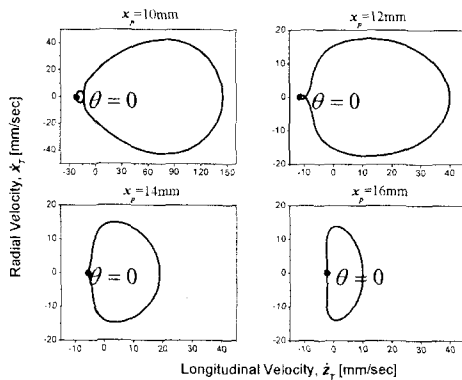


Fig. 11. Different Tip Velocities of the Leg with Variation of Pin Position

이상에서 살펴 본 x_p 와 같은 설계변수를 조절함으로써 원하는 이동메커니즘의 다리끝 궤적과 속도를 만들어 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 실험

본 장에서는 제시된 이동메커니즘의 이동특성을 평가하기 위하여 실제 대장과 유사한 모사장치를 실리콘으로 제작하여 실험을 수행하였다. 제작된 이동메커니즘의 치수는 Fig. 8.에서 주어진 것과 동일한 것으로 하였다.

5.1 실험장치

그림 12 의 (a)에서는 로드셀(Load Cell)을 이용하여 추력을 측정하였고, (b)에서는 엔코더를 이용하여 이동변위를 측정하였다. 로드셀과 엔코더에서 나온 신호는 PC 에 장착된 PC-Lab Card 812PG 를 통하여 1msec 마다 기록하였다.

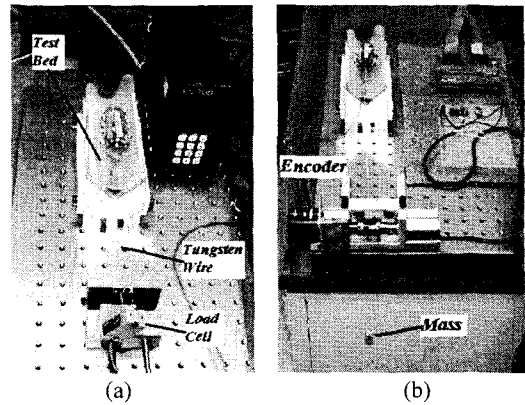


Fig. 12. Experimental Setup

5.2 실험결과

5.2.1 추력

이동메커니즘을 로드셀에 텅스텐와이어로 묶어 놓고 인체 모사장치 위에서 움직이게 한 후 증폭기를 통과하여 그 신호를 받았다.

그림 13 에서 추력이 급하게 증가하는 부분들을 볼 수 있는데 이는 그림 8 과 그림 9 에서 보듯이 θ 가 45°에서 90°사이 구간에서의 다리끝의 변위와 길이방향 속도가 0°에서 45°사이 구간의 다리끝 변위와 길이방향 속도보다 급하게 증가하기 때문이다. 이러한 것은 그림 10 과 그림 11 에서와 같이 여러 가지 설계변수들을 적절히 변화시킴으로써 연속적이고 일정한 추력을 만들어 낼 수 있다.

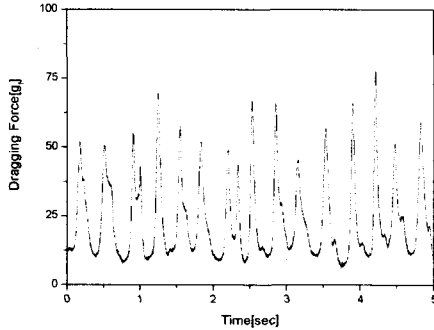


Fig. 13. Thrust Force

5.2.2 변위

그림 14 는 이동메커니즘에 연결된 줄에 10g 의 추를 달고 이동할 때 엔코더를 이용하여 측정 한 변위이다.

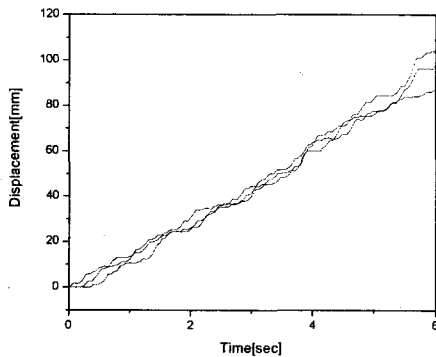


Fig. 14. Displacement

그림에서와 같이 여러 번 반복실험을 통하여 일정한 모터 회전수에서 일정한 이동속도를 가지는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

하나의 모터 축에 연결된 여러 개의 캠에 의하여 연속적인 추진력을 만들어내는 이동메커니즘을 제시하였다. 캠의 형상과 캠 표면의 홈을 이용하여 몸체 밖의 다리끝은 왕복운동과 회전운동의 복합운동을 할 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 협소한 공간에서 이동할 수 있는 메커니즘을 구현하였다. 소형의 이동메커니즘은 대장과 같이 부드럽고

변하기 쉬운 환경에서 뿐만 아니라 딱딱한 파이프와 같은 환경에서도 이동할 수 있다.

앞으로는 시뮬레이션을 통하여 캠의 형상과 다리의 개수 그리고 핀의 위치 등을 바꾸어 가며 부드럽고 연속적인 추력과 속도를 가지고 실제 대장에서 이동할 수 있는 설계변수들에 관한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 21C 프론티어 개발사업, 지능형 마이크로 시스템 개발사업의 일환으로 지원을 받아 수행된 연구의 일부분입니다.

참고문헌

- (1) Dario, P., Carrozza, M.C., Lencioni, L., Magnani, B., and D'Attanasio, S., 1997 "A Micro Robotic System for Colonoscopy," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1567 - 1572.
- (2) Slatkin, A. B., Burdick, J., and Grundfest, W., 1995 "The Development of a Robotic Endoscope," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 162-171.
- (3) Vijayan K. Asari, Sanjiv Kumar, and Irwan M. Kassim, 2000 "A Fully Autonomous Microrobotic Endoscopy System," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.28, pp.325-341.
- (4) Reynaerts, D., Peirs, J., and Brussel, H., 1996 "Design of a Shape Memory Actuated Gastrointestinal Intervention System," Int. Conf. on New Actuators, pp. 409 - 412.