

회전관성형 주행 메커니즘을 가진 내시경 로봇의 연구

이재우

와세다 대학교 창조 이공학 연구과

Research of Colonoscope Robot With Rotary Inertia Type Locomotion Mechanism

Jaewoo Lee

Department of Creative Science and Technology, Waseda University

요약 본 논문에서는 환자의 대장 내에서 자율적으로 이동이 가능한 자율주행 형 대장 내시경의 주행 메커니즘으로서 회전관성을 이용하여 환자의 장내 주행이 가능한 새로운 주행메커니즘의 설계 방법에 대해 제안한다. 상업용 대장 내시경은 시술할 때 환자에게 장시간의 고통과 불편감을 제공하여 환자들이 시술을 꺼리게 되어 내시경 검사가 필요한 대장 암 등의 조기 진단에 차질을 빚고 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 환자의 장관 내에서 자율적으로 이동함으로써 불편감이나 고통을 줄일 수 있는 로봇 형 차세대 내시경에 대한 연구가 진행되어 왔다. 회전관성을 이용하는 주행 메커니즘에서는 회전관성을 일으키기 위하여 flywheel을 모터로 구동하여 에너지를 저장한다. flywheel에 의한 에너지 저장과 방출에 의하여 장내에서 로봇이 주행할 때 일어나는 stick-slip 현상을 효율적으로 극복할 수 있다. 이를 위해 flywheel의 속도제어가 가능하고 고주파 노이즈에 강건한 제어를 설계하고 구현하였다. 여기서 제시하는 회전관성을 이용한 주행 메커니즘은 다른 메커니즘에 비해 구조가 간단할 뿐 아니라 주행도 효율적임을 실험을 통하여 증명하였다.

Abstract This paper suggests a new design that makes use of rotary inertia that can allow autonomous movement of an autonomous colonoscope robot in the colon of a patient as a locomotive mechanism. As commercial colonoscopy causes a lengthy time of pain and discomfort to the patients when colonoscopy patients are reluctant to receive surgery, there is a tendency to avoid the test in the early diagnosis of colorectal cancer. To solve this problem, research has been conducted on the next generation of robotic colonoscopes that can reduce the discomfort and pain by moving autonomously within the colon of the patients. In the driving mechanism utilizing the rotational inertia, a flywheel is driven by a motor to store energy and produce rotational inertia. By the energy stored and released by the flywheel, the stick phenomenon that occurs when the robot is running in the intestine can be overcome effectively. To do this, a controller that can control the velocity of the flywheel and is robust to high frequency noise was designed and implemented. The driving mechanism using the rotational inertia presented here showed that the structure is also effective and the experiment can be run easily compared to another mechanism.

Keywords : rotary inertia, locomotive mechanism, robotic colonoscope, autonomous locomotion, flywheel

1. 서론

상업용 대장 내시경은 시술할 때 환자에게 장시간의 고통과 불편감을 제공하여 환자들이 시술을 꺼리게 되어 내시경 검사가 필요한 대장 암 등의 조기 진단에 차질을

빚고 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 환자의 장관 내에서 자율적으로 이동함으로써 불편감이나 고통을 줄일 수 있는 로봇 형 차세대 내시경에 대한 연구가 널리 진행되어 왔다.

1995년 Slatkin 등[1]은 traction and extension 메커

*Corresponding Author : Jae-Woo Lee(Waseda Univ.)

Tel: +82-51-631-4890 email: jwlhee@gmail.com

Received March 16, 2016

Revised (1st May 23, 2016, 2nd June 1, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

니즘을 사용하여 inchworm의 주행을 모사하는 장 내 주행이 가능한 내시경을 개발하였다. 내시경은 traction이라 불리는 모듈을 공기압을 이용하여 장의 직경방향으로 부풀려서 장벽을 잡는다. 이 때문에 traction 모듈은 gripper라고도 부르는데 장벽에 부담을 주지 않는다는 측면에서 장점이 있다.

1997년에 Italy의 Dario[2]는 대장 내벽에 클램핑이 가능한 진공 패드를 장착한 이동 메커니즘을 제안하였다. 이 메커니즘은 대장 내벽에 상처를 내지 않고 진공 흡착에 의해 추진력을 발휘할 수 있다는 장점이 있다. 진공을 위한 마이크로 밸브의 탑재와 이를 위한 공기압의 공급 그리고 유체의 공급/절연을 위한 밸브 절환의 delay time의 감소가 문제로 대두되었다.

국내에서도 대장 내시경의 고통을 줄일 수 있는 방법의 일환으로서 대장 내부에서 자율주행이 가능한 주행메커니즘의 연구가 진행되어 왔다. 2001년도에 KAIST의 Park 등[3]은 캠(Cam)구동 방식의 이동 메커니즘을 제안하였다. 이 방식은 기존의 방식이 주로 인치웜(inchworm)의 locomotion이 대장의 직경이 달라짐에 따라 추진력이 변하는 문제를 극복하지 못한 데 비하여 마치 지네처럼 40여개의 발을 부착하여 이를 캠 주위에 45° 간격으로 8개씩 부착하여 모두 5개의 cam을 사용하여 주행하는 방법을 사용하여 대장의 내경이 달라지더라도 이를 극복할 수 있는 방안을 제시하였다. 장의 직경 변화에 대처할 수 있다는 점에서 inchworm locomotion 방식에 비해 진일보하였으나 너무 기구적 메커니즘이 복잡하다는 면에서 단점도 있다. 2010년에는 한국 항공대학교의 Park 등이 장벽을 밀 수 있는 Clamping Leg를 사용하는 Inchworm 방식의 locomotion을 제안하였다[4]. 이 방식에서는 6개의 다리를 클램프처럼 사용하여 장벽을 밀고 나아갈 수 있는 시스템을 개발하였다. 다리는 로봇의 앞쪽과 뒤쪽에 3개씩 설치하여 전후진이 가능하도록 하였다.

본 논문에서는 환자의 대장 내에서 자율적으로 이동이 가능한 자율주행 형 대장 내시경의 주행 메커니즘으로서 회전관성을 이용하여 환자의 장내 주행이 가능한 새로운 주행메커니즘의 설계 방법에 대해 제안한다.

회전관성을 이용하는 주행 메커니즘에서는 회전관성을 일으키기 위하여 flywheel을 모터로 구동하여 에너지를 저장한다. flywheel에 의한 에너지 저장과 방출에 의하여 장내에서 로봇이 주행할 때 일어나는 stick-slip 현

상을 효율적으로 극복할 수 있다. 또한 여기서 제시하는 회전관성을 이용한 주행 메커니즘은 다른 메커니즘에 비해 구조가 간단할 뿐 아니라 주행도 효율적임을 실험을 통하여 증명하였다.

2. 주행메커니즘 설계

2.1 회전관성형 구동방식

Fig. 1은 회전관성 형 구동 기구의 3차원 CAD도면이다. ‘회전관성’ 형 구동방식은 외부에 핀을 가진 flywheel이 내부에 장착된 모터에 의해 천천히 가속되어 flywheel이 고속 회전에 이를 때 급격히 감속시킨다. 이렇게 하면 flywheel에 의한 회전관성력이 발생되어 본체 자체가 회전하게 되는 데 이로 인해 장내에서 로봇이 나선 형상의 핀에 따라 추진할 수가 있게 되는 원리이다. 장점은 회전체를 고속 회전시킴으로 인해 큰 에너지를 축적할 수가 있고, 관성력으로서 큰 힘을 비교적 연속적으로 얻어낼 수 있는 점을 들 수 있다. 또한 일단 회전을 시작하면 flywheel의 무게로 인한 회전 관성 때문에 동작 시에 로봇이 장과 내부에 협착할 경우에도 자연스럽게 동작을 이어갈 수 있다는 것이다.

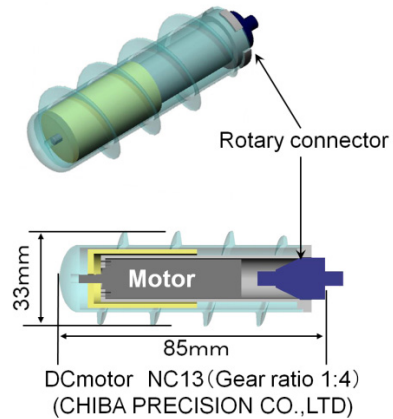


Fig. 1. rotational inertia type of robot design.

Flywheel의 직경은 $\varnothing 20mm$, 높이는 $15mm$ 의 구리소재의 원형 봉을 소재로 하였다. Flywheel의 질량은 $42g$ 이고 관성모멘트는 $21g \cdot cm^2$ 로 설계하였다. 또한 본체의 직경은 핀을 제외하고 $30mm$ 가 되게 설계하였다. 핀의 실제 높이는 $8mm$ 가 된다. 후면의 rotary

connector는 모터의 케이블을 접속하는 연결부이다. 상세한 로봇의 사양과 회전관성을 일으키는 플라이휠의 사양은 Table. 1에 나타나 있다.

회전 관성 형 구동방식의 장점으로는 (1) 비교적 큰 관성력을 연속적으로 발휘할 수 있고 이로 인해 (2) 연속적인 운동이 가능하다는 것을 들 수 있다. 하지만, 이 형태도 대장의 벽에 회전력이 작용하는 단점이 있다.

Table 1. robot design specification of flywheel type

	Spec.	value	unit
flywheel	thickness	1.5	mm
	length	40	mm
	diameter	20	mm
	weight	31.1	g
	moment of inertia	2680	$g \cdot mm^2$
Motor	type	chiba precision	NC13
	voltage	12	v
	Gear ratio	4:1	-
Overall length(robot)		85	mm
Overall diameter(robot)		33	mm

2.2 핀의 형상 설계

로봇이 대장 내부에서 원활하게 전진하기 위해서는 대장의 주름을 타고 전진하는 것이 하나의 방법이다. 로봇의 주름의 형상에 맞추어 로봇외부에 주름을 타고 갈 수 있도록 핀을 설계하여 부착하면 전진이 가능할 것으로 판단하였다. 이에 따라 로봇의 외부표면에 Fig. 2와 같이 나선형상의 핀을 만들어서 대장의 주름을 타고 쉽게 전진할 수 있게끔 설계하였다.

나선 각도가 주행성능에 주는 영향을 조사하기 위해 설계파라미터(design parameter)로서 나선각도(screw angle), 나선 수(number of screw), 핀 선단부의 반경(radius of fin edge)을 다르게 설계하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 나선 각도(screw angle)은 각각 4° , 8° , 12° 의 세 종류로 설계하였으며, 나선 수(number of screw)는 1줄과 2줄 나사의 형태로 하였다. 또한 핀 선단부의 반경(radius of fin edge)은 R1.5와 R1.0의 두 종류로 설계하였다.

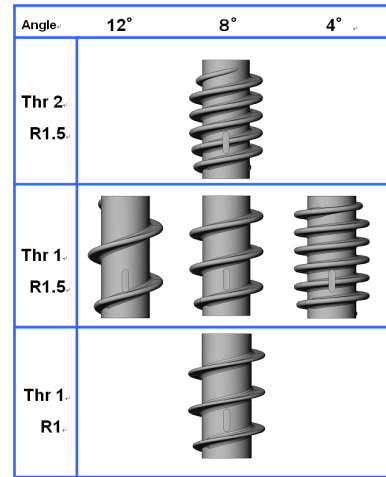


Fig. 2. fin configuration that is mounted on the surface of robot

3. 제어장치

로봇의 제어장치로서 DC motor driver와 제어용 알 고리즘을 개발하였다. DC motor driver는 Fig. 3과 같다.

3.1 속도 제어용 모터드라이버

내시경 로봇에 사용되는 구동 모터의 드라이버는 디지털 방식보다는 아날로그 방식이 더 유리하다. 디지털 방식은 PWM을 사용하므로 고주파 펄스가 의료기기에 영향을 미칠 영향을 고려하지 않으면 안 된다. 따라서 일반적으로 사용되는 디지털 방식의 속도제어 드라이버를 사용하지 않고 본 연구에서는 아날로그 feedback 방식의 속도 제어 드라이버를 설계하였다. 이렇게 함으로써 PWM 파형을 사용하지 않고서도 DC 모터를 구동할 수가 있다. 모터 드라이버의 제어방법으로는 속도 제어를 사용하였다. 속도 제어를 하면 회전 관성 형에 있어서 flywheel의 회전속도를 미리 정하여 입력할 수 있다. 즉, 회전가속도를 제어할 수 있어서, flywheel을 자유롭게 감속시킬 수 있다. 모터의 회전속도를 feedback시키는 방법으로는 encoder나 tacho-generator를 부착할 수 있지만 마이크로하게 설계해야 하는 내시경 로봇의 사양에는 보다 더 compact하게 설계할 필요가 있다. encoder나 tacho-generator를 부착하는 공간을 절약하기 위하여 모터의 역기전력(back e. m. f.)를 검출하여 feedback하는 방법을 활용하였다. Fig. 3(a)에 제작된 속

도 제어회로를 표시하였다.

Fig. 3(a)의 모터 구동회로는 다시 정 전류 회로, 역기 전력 검출회로, 속도 지령 회로 그리고 feedback회로로 좀 더 세분하여 설명한다.

3.1.1 정 전류 회로

이 회로는 모터를 구동하기 위해 필요한 전류를 공급하기 위한 드라이버회로의 최종 단에 있는 회로이다. 일반적으로 op-amp와 power transistor를 조합하여 설계하는 것이 보통이나 여기서는 내시경로봇에 필요한 compact한 회로를 만들기 위하여 power op amp LM12CL을 사용하였다. 정 전류 타입의 LM12CL은 최대 10A까지의 전류공급이 가능하다. 정 전류 타입의 소자를 사용함으로써, 모터에 흐르는 전류의 최대치를 지정할 수가 있으므로 토오크의 크기를 안정적으로 유지할 수 있는 이점이 있다.

3.1.2 역기전력 검출회로

여기서는 모터의 양단의 전압에서 내부 저항분을 보상해 주는 것으로 모터의 역기전력을 검출한다. 일반적인 DC permanent motor는 회전자의 회전속도에 비례하여 역기전력이 커진다. 이를 이용하면 속도 feedback회로를 설계할 수 있다. 또한 차동부분의 증폭배율을 조정함으로써 D/A지령 전압의 최대치와 모터의 최대 역기전력을 일치하게 할 필요가 있다.

모터의 내부저항의 보상원리를 아래와 같이 계산한다. 우선 power OP amp의 출력전압을 V, 모터의 전류를 I, 그의 내부저항을 R_i , 전류 검출저항을 R_m , 양단의 전압을 V_m 이라 하자.

그러면 아래의 관계식이 성립한다.

$$V = V_m + E + I \cdot R \tag{1}$$

$$V_m = I \cdot R_m \tag{2}$$

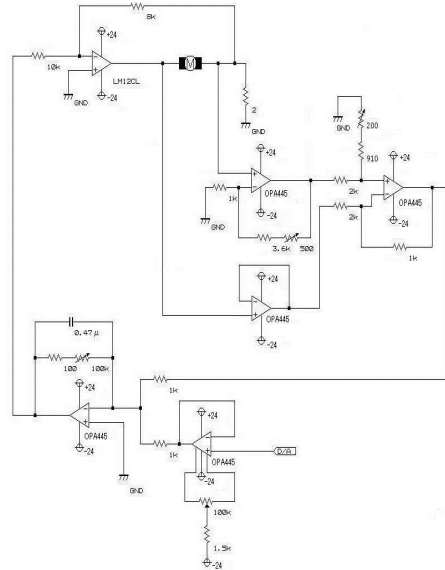
(2)식으로부터

$$I = \frac{V_m}{R_m} \tag{3}$$

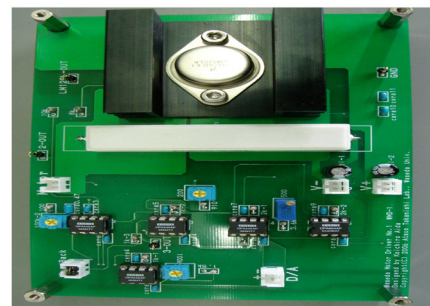
이다. (3)을 (1)에 대입하고 E로 표현하면

$$E = V - V_m \left(1 + \frac{R_i}{R_m} \right) \tag{4}$$

과같이 유도할 수가 있다. (4)식으로부터 모터의 내부저항 R_i 를 보상하여 역기전력 E를 계산하기 위해서 power OP amp의 출력전압 V에서 전류검출저항 R_m 의 양단의 전압 V_m 을 $(1 + R_i/R_m)$ 배 한 전압을 빼면 됨을 알 수가 있다.



(a) Driver circuit diagram



(b) Motor driver board implemented

Fig. 3. Motor control driver circuit

3.1.3 속도지령 회로

D/A보드에서의 속도 지령전압을 입력하는 회로이다. 본 연구에서 사용된 보드는 Contec (사)의 DA12-16 (PCI type)이다. 이 보드의 최대 출력전류는 5mA이다.

이 때문에 전류치의 부족을 보충하기 위해 voltage follower를 사용하였다.

3.1.4 Feedback 회로

검출한 역기전압과 D/A에서의 속도 지령전압을 비교하여 정 전류 회로부에 피드백을 거는 부분이다. 가변저항을 사용하여 게인 조정이 가능하도록 설계되어 있다. 여기서는 0.1배에서 100배까지의 조정이 가능하지만 실제로는 속도 feedback이 가능하도록 하려면 고배율로 설정해 놓을 필요가 있다. 또한 이 가변저항과 병렬로 고용량의 세라믹 컨덴서를 삽입하여 모터의 발진을 막는 효과가 있도록 설계하였다. 이상의 설계사항을 이용하여 실제로 제작한 보드는 Fig. 3(b)와 같다.

4. 주행 실험과 고찰

4.1 주행 실험장치

원통 모양의 비닐 파이프위에 절단하여 펠친 돼지의 내장을 깔고 비닐파이프에 clip으로 고정하였다. Fig. 4는 실험장치의 모양을 나타낸다.

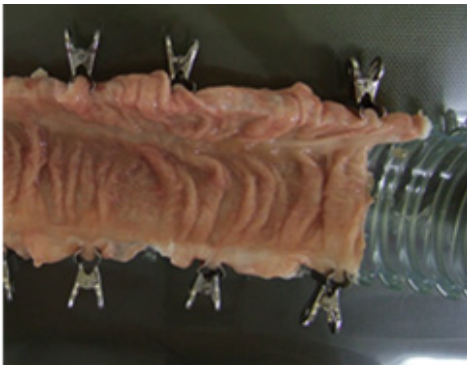


Fig. 4. *in vitro* test environment for locomotion of rotational inertial type robot

4.1 주행성능평가

로봇의 주행실험성능을 확인하기 위하여 나선각도, 나선수, 핀 선단부 형상의 변화를 설계 변수로 하여 변수값을 바꿔가면서 주행 실험을 수행하고 성능지표로서 추진효율을 기록하였다.

4.1.1 나선 각 변화가 추진효율에 미치는 영향

나선각도 4°, 8°, 12°의 경우 추진거리(mm), 회전수(rpm), 추진 효율(mm/rev)의 측정 결과를 Table 2에 표시하였다. Table 2를 보면 나선각도가 늘어날수록 추진거리가 늘어나는 것을 알 수 있다. 측정결과에서도 알 수 있듯이 이유는 나선각도가 커지면 추진효율(1회전 당 추진거리)이 늘어난 것이 원인이라고 판단된다. 추진효율은 아래와 같이 계산하였다.

$$efficiency = distance / no. of rotation \quad (4)$$

특히, 나선각도가 커지게 되면, 회전수도 많아지게 됨을 알 수 있다. 이것은 나선 각도가 작아지면 대장과 로봇과의 접촉 면적이 커져서, 대장으로부터 받는 마찰력, 즉, 회전에 방해가 되는 힘이 커지게 되는 까닭이다. 실제로 나선각도 4°에서의 실험에서 장과의 밀착으로 인해 감겨버리는 현상이 발생했다.



Fig. 5. winding up between colon wall and fin of robot occurs when screw angle becomes small

이러한 결과로부터 나선각도를 크게 하면 회전수와 회전효율이 같이 증가하여 그 결과 추진거리도 같이 크게 늘어나는 것을 알 수 있었다.

Table 2. difference with screw angle

screw angle [deg]	distance [mm]	No. of rotation[rpm]	efficiency [%]
4	3	0.08	37.5
8	110	5.25	21
12	240	7.75	31

4.1.2 나선의 수, 핀 선단 부 형상변화가 추진효율에 미치는 영향

다음으로 나선의 수가 1 또는 2 그리고 핀 선단부의 반경을 1mm와 1.5mm로 변화시킨 경우의 결과를 Table 3에 표시하였다.

Table 3. difference between No. of screw and fin radius

No. of screw	Radius of fin[mm]	Distance [mm]	No. of rotation[rpm]	Efficiency [%]
2	R1.5	110	5.25	21
2	R1.5	10	0.44	23
1	R1.0	140	7.25	19

Table 3. 으로부터 나선의 수가 늘어나면 성능이 저하되는 것으로 판단된다. 핀의 곡률반경인 Radius of fin 값을 변동시킴으로써 핀 선단부의 형상변화를 주었는데 곡률이 낮을수록 효율도 낮아짐을 볼 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 (1) 인체의 대장 속에서도 원활히 움직일 수 있는 새로운 형태의 장내 주행 메커니즘인 회전관성형 주행메커니즘을 제안하였다. 이것은 로봇에 부착되어 있는 flywheel의 회전관성을 이용하여 로봇의 장내 주행을 원활히 한다. (2) 장 내를 주행하는 로봇의 구동장치로서 PWM의 고주파에 의한 인체영향을 회피하기 위하여 op-amp를 이용한 구동회로를 개발하였다. 그리고 실험을 통하여 (3) 로봇설계에 필요한 파라미터들 구하였다. 마지막으로 위의 주행 로봇이 (4)대장 내에서 원활히 운동함을 확인하였다.

References

[1] Slatkin, A. B., Burdick, J., Grundfest, W., "The Development of a Robotic Endoscope", Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 162-171, Vol. 2, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iros.1995.526155>

[2] Dario, P., Carrozza, M. C., Lencioni, L., Magnani, B., D'Attanasio, S., "A Micro Robotic System for Colonoscopy", Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 1567-1572, Vol. 2, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1997.614363>

[3] J. S. Park, B. K. Kim, K. D. Kim, J. O. Park, S. H. Kim, Y. S. Hong, "Locomotive Mechanism with Cam for a Robotic Colonoscope", J. of KSME B, Vol. No. pp. 271-276, 2001.

[4] H. J. Park, S. H. Leem, B. K. Kim, "Inchworm Like Robotic Colonoscope Using Legs for Clamping", Journal of KSME A, Vol. 34, No. 6, pp. 789-795, 2010.

이재우(Jae-Woo Lee)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산 공학과(공학석사)
- 2013년 2월 : 일본 와세다 대학교 선진공학연구과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 1992년 12월 : 삼성 전자 생산기술연구소 주임연구원
- 1994년 3월 ~ 1999년 12월 : 현대중공업(주) 로봇시스템 사업부

전기팀장

- 2000년 1월 ~ 2007년 7월 : 뉴로시스템즈(주) CEO
- 2013년 3월 ~ 2015 12월 : 동서대학교 메카트로닉스 융합공학부 조교수
- 2016년 1월 ~ 현재 : 와세다 대학교 Takanishi Lab 초빙연구원

<관심분야>

메디컬 로봇틱스, 컴퓨터 비전, 신호처리