

다중 위상차를 갖는 조합형 캠을 이용한 다족형 이동 메커니즘

김경대* · 정연구* · 김병규† · 박종오**

(2002년 3월 27일 접수, 2002년 9월 23일 심사완료)

Locomotion Mechanism Using a Combination Cam with Multi-Phases

Kyungdae Kim, Younkoo Jeong, Byungkyu Kim and Jong-Oh Park

Key Words : Combination Cam(조합형 캠), Inspection Robot(탐사 로봇), Locomotion(다족형), Multi-Legs(이동 장치)

Abstract

Robots that can move along the narrow and rough tube are very important as the request for the inspection increases. It is necessary for the inspection robots to have a capability to move successfully at even overturned situation and have a simple mechanism to reduce the unexpected failure possibility for the successful completion of the given mission. Through this paper, the authors propose a novel and simple mechanism using a combination cam device to generate the locomotive motion of multi-legs. This robot uses one DC motor and one combination cam shaft to generate the locomotive motion and can move rough tubes without failure even at the overturned situation. The robot also shows enough dragging force for the connected line that is very important for a wired inspection robot. Kinematics analysis to design the specification of the robot will be followed and several applications show this robot's potential capabilities.

| 기호설명 | |
|----------------|---------------------|
| a | : 캠의 장반경 |
| b | : 캠의 단반경 |
| h | : 홈의 진폭 |
| m | : 홈의 주기 |
| L | : 다리의 길이 |
| x_c | : 캠과 다리의 접촉점 x 좌표 |
| z_c | : 캠과 다리의 접촉점 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 |
| $\dot{\theta}$ | : 캠의 회전속도 |

| | |
|-----------|-------------------|
| τ | : 모터의 구동 토크 |
| P | : 축방향 구동력 |
| α | : 다리의 기울기 |
| μ | : 다리와 캠사이의 마찰계수 |
| μ_c | : 다리와 지면사이의 마찰계수 |
| N | : 수직하중 |
| β | : 리이드 각 |
| β_i | : i 번째 다리의 리이드각 |

1. 서론

로봇에게 있어서 이동 할 수 있는 능력이란 이동성(Mobility)이 중요시되는 이 시대에 있어서 매우 중요하다. 로봇의 이동기능은 로봇이 수행할 수 있는 작업의 영역을 확대할 뿐 아니라, 인간이 수행하지 못하는 여러 역할들을 수행할 수 있다는 가능성을 내포하고 있으므로 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 로봇에게 이동성을 제공하는 가장 용이한 방법은 바퀴(Wheel)를 사용하는 것이라 할 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 바퀴는 로봇의 이동환경이 평평하게 형성되어 있지 못할 경우 로봇의 이동성 자체를 제한한다는

* 한국과학기술연구원(KIST) 마이크로시스템연구센터
 ** 지능형 마이크로시스템 개발 사업단(IMC)
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원
 E-mail : bkim@kist.re.kr
 TEL : (02)958-6730 FAX : (02)958-6910

한계를 지니고 있으므로 정형화되지 않은 환경에서의 이동성을 제공하기 위해 다리를 지니고 있는 로봇에 관한 연구가 수행되었다.^(2,3) 다리를 이용하는 이동성은 이동환경의 거칠기(Roughness)가 증가할지라도 로봇의 이동성이 덜 영향을 받을 수 있다는 장점이 있는 반면, 로봇의 이동을 제어하기 위해서는 복잡한 운동방정식을 풀어나가야 하는 단점이 존재한다. H. Adachi는 이러한 평지에서의 바퀴구동의 높은 효율성과 다리를 가지고있는 이동로봇의 험한 지형에서의 장점을 절충하여 바퀴와 다리의 복합 구조를 갖는 이동로봇을 개발하였다.⁽⁴⁾ 그러나 본 로봇은 이동중 전복될 경우 이동기능을 회복하지 못하는 한계를 지니고 있다.

본 논문에서는 지형이 평탄하지 못하고 협소한 공간을 수월하게 이동해 갈 수 있는 가볍고 소형화된 다족형 로봇을 제안하고자 한다. 본 로봇은 1개의 모터와 조합형 캠 구조의 장치를 이용하여 방사형의 다족형 로봇의 이동 매커니즘을 구현하였다. 특히 다리가 많은 지네와 같은 동물의 이동원리에서 착안된 다상 이동장치(Multi-phase locomotion)는 여러 개의 다리가 물결 치듯이 움직이며 로봇을 원하는 전진 또는 후진을 할 수 있도록 한다. 또, 길이방향을 중심으로 다리가 방사형으로 골고루 분포됨으로 작업 중 로봇의 위치가 뒤집히더라도 계속해서 움직여 갈 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 로봇은 관탐사 로봇이나 인체의 장기의 탐사 로봇 등으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 제안된 다족형 로봇의 이동 원리

2.1 조합형 캠 축을 이용한 다리의 운동

지네와 같이 많은 수의 다리를 가지고 있는 생물체는 많은 수의 다리가 서로 다른 위상을 갖고 물결 치듯이 움직이며, 몇 개의 다리가 혹 접촉력을 잃어버리더라도 미끄러지지 않고 다양한 형태의 지면을 성공적으로 이동해 다닌다. 작은 크기의 이동체에 있어서 이러한 구조는 매우 효과적일 수 있으며, 탐사 로봇에 있어서 이와 같은 다족형 생물체의 이동 원리를 이용한다면 복잡하고 다양한 관로나 좁고 험한 지형에서도 성공적으로 이동해 다니는 로봇의 개발이 가능할 것이다.

캠은 회전운동을 왕복운동으로 전환시켜주는 기계적 타원형태를 갖는 일반 캠과 원통 주위로 홈이 파여 있음으로 직선운동을 유발하는 배럴(Barrel) 캠을 Fig. 1에서와 같이 조합할 경우 배럴 캠의 홈에 연결이 되어있는 링크의 반대편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 타원형 움직임이 된다.

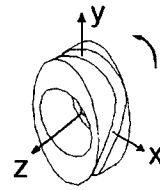


Fig. 1 a Combination Cam

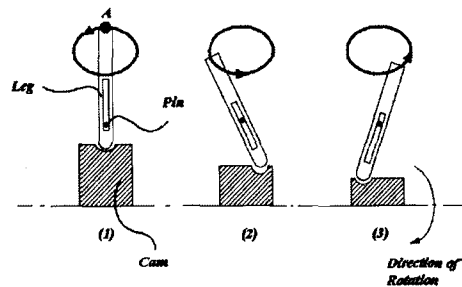


Fig. 2 Motion of the combination cam and a leg

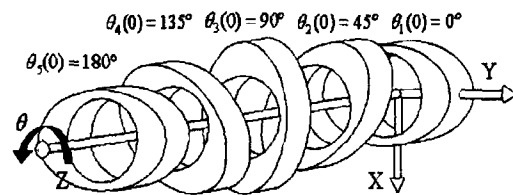


Fig. 3 A combination cam shaft with multi-phases

이러한 두 가지 종류의 캠이 수직으로 조합된 조합형 캠이 Fig. 3에서 보는 바와 같이 축 방향으로 서로 다른 위상차를 갖고 연결되어 있을 경우, 이러한 다리의 움직임은 서로 다른 위상차를 갖는 타원형 운동이 된다. 이러한 원리를 기초로 비교적 단순한 구조를 사용하여 다 위상 다 족 운동의 구현이 가능하다.

2.2 다리의 운동 해석 및 피벗 위치 설계

Fig. 4은 Combination Cam을 Y-X 평면과 Z-X 평면에 대해서 표시한 그림이다. 캠과 접촉을 하고 있는 다리 끝점(x_c, y_c, z_c)의 궤적 및 속도 성분은 타원의 방정식 및 파여 있는 경로의 형상(Sine function)으로부터 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 단 경로의 형상은 진폭 h, 주기 m을 갖는 사인파의 형태를 지니고 있다.

$$\begin{aligned}
 x_c &= \sqrt{(a \cdot \cos(\theta))^2 + (b \cdot \sin(\theta))^2} \\
 y_c &= 0 \\
 z_c &= h \cdot \sin(m\theta)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

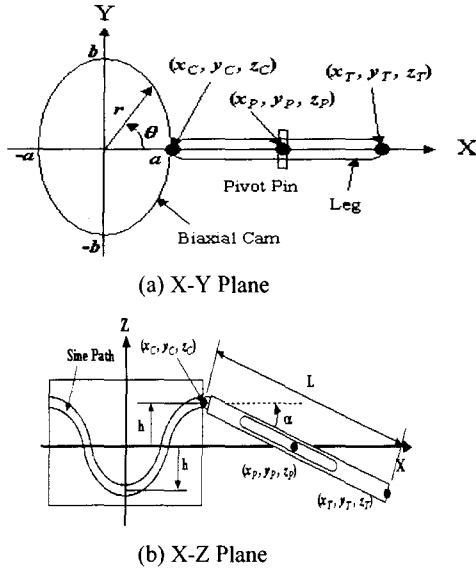


Fig. 4 Coordinate system of biaxial cam

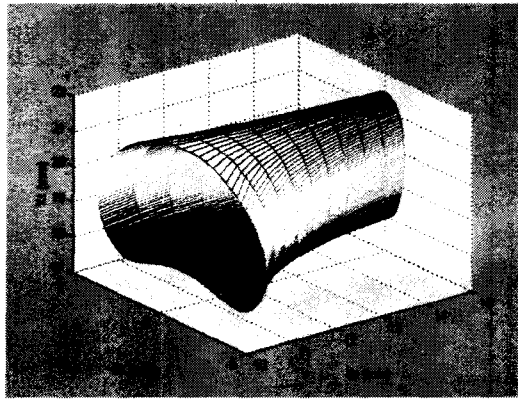


Fig. 5 Trajectory of the leg tip with various positions of pivot pin

다리의 상대편 끝점 (x_T, y_T, z_T) 의 궤적은 다리의 기울어진 각도를 α 라고 할 경우 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_T &= x_c + L \cdot \cos(\alpha) \\ y_T &= 0 \\ z_T &= z_c + L \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{h \cdot \sin(m\theta)}{x_p - x_c} \right\} \quad (3)$$

식 (2)를 살펴볼 때 다리 끝 단 (x_T, y_T, z_T) 의 움직임은 캠의 형상(a,b)과 캠의 위에 파여 있는 홈의 파형(진폭:h, 주기:m), 다리의 길이(L) 및 다

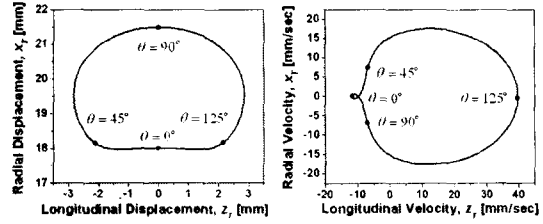


Fig. 6 Trajectory and velocity of leg tip

Table 1 Specifications of the combination cam and a leg of the robot

| | | | |
|-----|-------|-------|--------|
| a | 5.5mm | L | 12.5mm |
| b | 9mm | x_p | 12mm |
| h | 2mm | m | 2 |

리의 움직임 중심이 되는 Pivot Pin의 위치 (x_p) 에 의해 좌우되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Pivot Pin의 위치 (x_p) 변화에 따른 다리 끝 단의 움직임을 3 차원 곡면으로 보여주고 있다. 로봇의 움직임에 실질적으로 기여하는 부위는 X 축 방향으로 길이가 긴 영역이며 이 부위가 Z 축 방향으로 넓게 분포되어 있는 것이 로봇의 이동상 유리하다. 따라서 Pivot Pin의 짧을수록 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 Pivot Pin의 위치 x_p 를 선정함에 있어서는 캠의 형상(a,b)을 및 캠 표면에 접촉하는 부위에서 x_p 사이의 공간을 고려하여 값을 설정하여야 한다. 로봇의 크기를 고려하여 선정한 캠 및 로봇의 다리의 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 6는 설계된 사양에 대한 다리의 궤적 및 속도 궤적을 보여주고 있다. 본 속도 궤적은 로봇의 전체적인 움직임의 속도를 해석하는데 사용되어질 수 있다.

2.3 다족형 로봇 구조에 로봇의 움직임 및 건 인력해석

각 다리는 서로 다른 초기 위치를 갖게 되고 그 위상차가 45도이며, 캠의 주위로 8개의 다리가 배열되어 있다고 할 경우 각 다리의 초기 각도는 식 (4)와 같은 형태로 표현되어질 수 있다.

$$\theta_{i,j}(0) = \{(i-1) + (j-1)\} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (4)$$

여기서 $(1 \leq i \leq 5, 1 \leq j \leq 8)$

위 식에서 i 는 Fig. 10에서 축 방향으로 직렬로

연결된 각 캠의 순서에 따른 인덱스이며 j 는 캠에 방사형으로 배치된 각 다리의 순서를 나타내는 인덱스이다. 또, 식 (2)에 의해 표현된 다리 선 단의 거동을 시간에 대해서 미분하면 Cartesian 공간에서 선 단의 속도 성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_T &= \left\{ 1 - L \cdot \sin(\alpha) \frac{z_P - z_C}{k^2} \right\} \frac{dx_C}{d\theta} \dot{\theta} \\ &+ L \cdot \sin(\alpha) \frac{x_P - x_C}{k^2} \frac{dz_C}{d\theta} \dot{\theta} \\ \dot{z}_T &= \left\{ 1 - L \cdot \cos(\alpha) \frac{x_P - x_C}{k^2} \right\} \frac{dz_C}{d\theta} \dot{\theta} \\ &+ L \cdot \cos(\alpha) \frac{z_P - z_C}{k^2} \frac{dx_C}{d\theta} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2} \\ \alpha &= \tan^{-1} \left\{ \frac{h \cdot \sin(m\theta)}{x_P - a \cdot \cos(\theta)} \right\} \\ \frac{dx_C}{d\theta} &= \frac{ab(b^2 - a^2) \cos(\theta) \sin(\theta)}{(b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta))} \\ \frac{dz_C}{d\theta} &= m \cdot h \cos(m\theta) \end{aligned}$$

로봇 몸통의 이동 속도는 캠의 주위에 배열되어 있는 다리 중에서 지면 또는 주위와 접촉을 이루고 있는 다리의 선 속도에 의해 결정되어진다. 방사형으로 배열이 되어있는 다리 중에서 지면 또는 주위와 접촉을 이루고 있는 다리는 평지의 경우 가장 바깥쪽으로 나와있는 다리이며 다리와 접촉면 사이의 미끄럼(Slip)이 없다고 가정할 경우 각 지점에서 바깥쪽으로 나와있는 다리들의 선 속도가 그 순간에서의 로봇의 이동속도라고 말할 수 있다. 모터의 회전속도를 $\dot{\theta}$ 이라 하면 식 (4) 및 식 (5) 그리고 식 (2)를 이용한 접촉다리의 관정에 의해 로봇의 이동속도를 계산해 낼 수 있다. Fig. 7은 모터의 회전속도를 변경시켜 갈 경우 로봇의 평균 이동속도를 보여준다. 이동속도를 시간에 대해 적분하면 이동 거리를 해석할 수 있다.

Fig. 8은 Cam의 회전에 의해 홈(groove)에 닿고 있는 다리에 전달되는 추력을 산출하기 위한 힘의 평형에 관한 그림이다. Cam을 회전시키는 모터의 토크가 τ 이고, 접촉시의 캠의 반경이 r 이라 할 경우 다리의 끝 단에 전달될 수 있는 추력은 힘의 평형방정식에 의해 식 (6)와 같이 산출되어질 수 있다. 단, 수직력 N 은 $P \cdot \cos(\beta)$ 으로 표현되었다.

$$P = F \cdot \left(\frac{\cos(\beta) - \mu \sin(\beta)}{\mu \cos(\beta) + \sin(\beta)} \right) \quad (6)$$

여기서,

$$\beta = \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{m \cdot h \cdot \cos(m\theta)}{r} \right) \right\}, F = \frac{\tau}{r}$$

각 다리는 Pivot pin을 중심으로 링크 구조로 연결되어 있으므로 반대편 끝 단의 다리에 대한 전달력 F_T 은 지뢰대의 원리에 의해 식 (7)과 같이 산출된다.

$$F_T = P \cdot \left(\frac{x_P - x_C}{x_T - x_P} \right) = P \cdot R(\theta) \quad (7)$$

여기서,

$$R(\theta) = \left(\frac{x_P - \sqrt{(a \cdot \cos \theta)^2 + (b \cdot \sin \theta)^2}}{\sqrt{(a \cdot \cos \theta)^2 + (b \cdot \sin \theta)^2} + L \cdot \cos(\alpha) - x_P} \right)$$

로봇의 다리에 의해 발생될 수 있는 추력은 지면에 닿고 있는 다리에 의해 전달되는 추력의 합으로 계산할 수 있다. 만일, n 개의 다리가 지면에 닿아 로봇을 구동하고 있다면 발생시킬 수 있는 전체 추력은 식 (8)와 같이 지면과 접촉이 일어나는 다리에서 발생되는 추력의 합으로 표현될 수 있다.

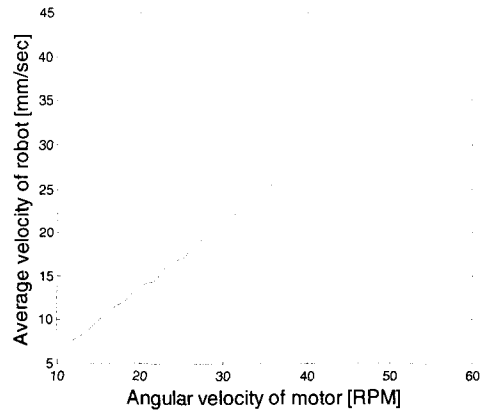


Fig. 7 Average velocity of robot vs. angular velocity of motor

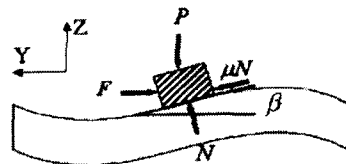


Fig. 8 Free body diagram of one leg tip

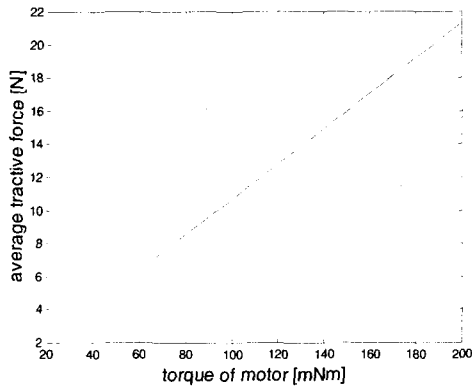


Fig. 9 Average tractive force of robot vs. torque of motor

$$F_{total} = \sum_{i=1}^n F_T(i) \quad (8)$$

여기서,

$$F_T(i) = \frac{\tau_i}{r_i} \left\{ \frac{\cos(\beta_i) - \mu \sin(\beta_i)}{\mu \cos(\beta_i) + \sin(\beta_i)} \right\} \cdot R(\theta_i)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{h \cdot \sin(m\theta_i)}{x_p - x_c} \right\}$$

$$\beta_i = \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{m \cdot h \cdot \cos(m\theta_i)}{r_i} \right) \right\}$$

τ_i : i 번째 다리에 전달되는 토크

지면과 접촉을 이루고 있는 다리를 선별한 후, 전달되는 추진력의 총합을 모터의 입력 토크 별로 산출하여 보면 다리와 지면 사이에 미끄럼이 없을 경우 Fig. 9 와 같이 로봇의 견인력 특성 그림을 얻을 수 있다.

3. 다족형 로봇의 제작 및 실험

3.1 로봇의 제작

앞장에서 기술된 로봇 다리 및 전체적인 움직임 해석을 기초로 로봇의 사양을 설계하였다. 캠 및 로봇의 다리의 설계를 위해서는 Table 1 에 기술된 사양을 따랐다. 제작된 로봇의 전체 길이는 62mm, 직경은 캠에 의해 몸체로부터 다리가 최대로 밀려나간 경우 43mm 에서 최소로 수축된 경우 36mm 의 크기를 가지며, 몸체 내부에 장착된 구동기는 Maxon 사의 DC 모터(정격 400mW)를 사용하였다. 제작된 로봇은 크게 Biaxial Cam 부분, 로봇의 몸체 부분 그리고 다리부분으로 구성되어 있다. Fig. 10 은 본 로봇의 제작에 사용된 조합형

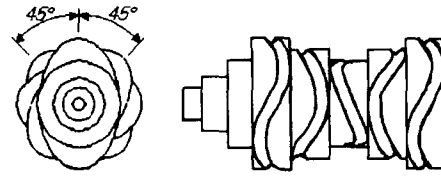


Fig. 10 Shape of the biaxial cam chain

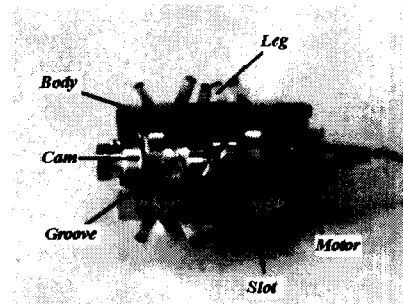


Fig. 11 Sectional view of robot

캠을 보여주고 있고 Fig. 11 은 제작된 로봇의 외관을 보여주고 있다. 본 로봇에는 Cam 의 반경방향으로 45°의 차이를 가지고 8 개씩 방사형으로 배치되어있으며, 길이방향으로는 5 개씩 모두 40 개의 다리가 장착되어있다.

지면에 닿아 로봇을 이동시키는 구동력을 전달하는 다리의 다른 쪽 끝은 실리콘재질의 발을 장착하여 지면과의 마찰력을 증가하였다 Fig. 12 는 로봇 다리의 장착 구조를 보여주고 있다. Fig. 12 (b)의 그림에서 보듯이 다리의 한쪽 끝 단과 캠의 홈이 접촉을 잘 유지하도록 하기 위해 예압 스프링 장치가 사용되었다.

3.2 로봇의 이동성능 및 견인력 실험

Fig. 13 은 본 이동 로봇의 이동 성능 및 견인력을 측정하기 위한 실험 장치의 구성 모습을 보여주고 있다. 이동 성능을 확인하기 위해서는 로봇의 움직임 방향의 반대 방향으로 작은 추를 달고 로봇의 이동에 따라 엔코더가 회전하게 함으로 이동 거리를 측정하였다. 견인력의 측정을 위해서는 로봇의 이동 반대 방향에 로드셀(Load Cell)을 장착하고 로봇과 로드셀 사이를 텅스텐 선으로 연결하였고 PC-Lab Card 812PG 를 사용하여 로드셀의 값을 측정하였다. Fig. 15 는 시간에 대한 로봇의 움직임을 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 실험 결과는 움직임을 해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

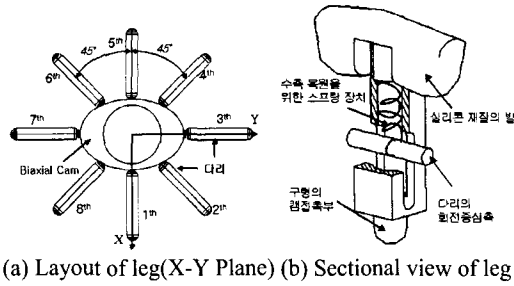


Fig. 12 Configuration of a leg of robot

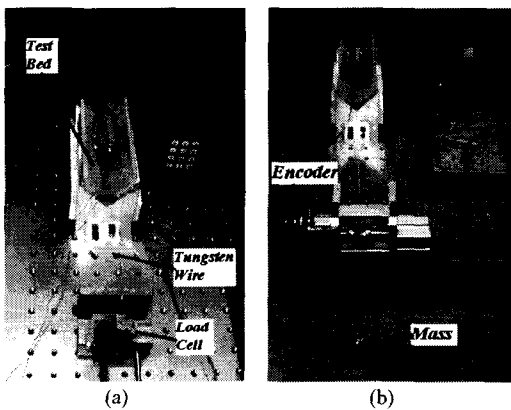


Fig. 13 Experimental setup

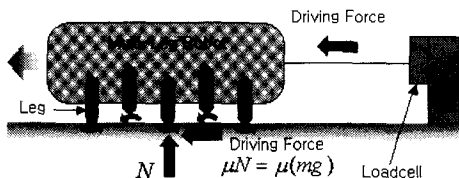


Fig. 14 Model to detect the dragging force

모터가 낼 수 있는 구동토크 값이 τ 라 할 지라도 로봇의 실제 견인력은 로봇의 다리와 지면과의 마찰력에 의존하게 된다. 따라서, 로봇이 낼 수 있는 실제 견인력은 다리와 노면 사이의 마찰 계수를 μ_e 라고 할 경우 식 (9)와 같이 표현된다.

$$P = \mu_e N = \mu_e (mg) \quad (9)$$

Fig. 16 은 모터를 로봇에 장착한 상태에서 로봇을 로드셀에 텅스텐와이어로 묶어 놓고 실리콘 재질의 바닥 위에서 움직이게 한 후 그 신호를 측정 한 실험결과와 동일한 실험 조건을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 로봇의 구동력은 지면의 마찰 상태와 로봇의

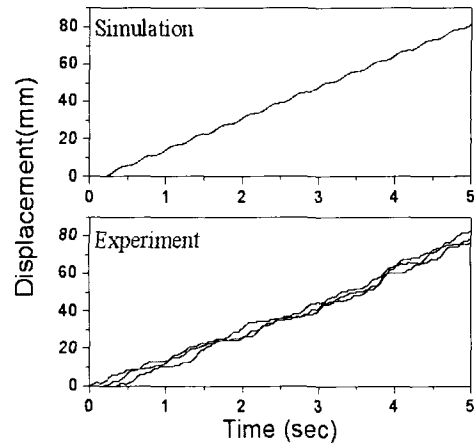


Fig. 15 Experiment and simulation of displacement

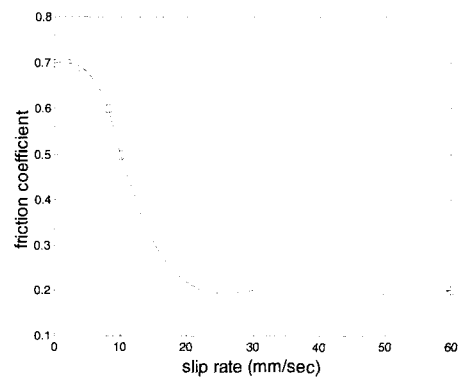


Fig. 16 Profile of friction coefficient

자중과의 상관관계에 의해서 결정된다. 지면은 정적인 마찰과 동적인 마찰에 따라 그 마찰계수가 변화하게 된다. 특히 로봇의 발 부분을 실리콘 재질을 사용하였기 때문에 로봇의 이동하고자 하는 속도와 지면과의 미끄러짐(Slip)에 따라 마찰계수가 변화한다. Fig. 16 은 미끄러짐에 따른 마찰계수의 변화를 보여준다. Fig. 17 은 마찰계수 곡선을 이용한 로봇의 견인력 시뮬레이션의 결과와 실험 결과를 보여준다. 실험 및 해석 결과 로봇이 제공할 수 있는 견인력은 평균 약 25gf 정도 인 것을 알 수 있다. 본 견인력은 본 로봇의 구동을 위해 사용된 모터의 토크가 발생시킬 수 있는 구동력과 비교할 때 작은 값에 속하지만 로봇의 구동 및 탐사에 필요한 Wire 를 끌기에 충분한 크기이다. 또한 로봇 다리의 지면 접촉부의 형상을 스파이크의 형태를 사용하여 개선할 경우 더욱 크게 증가시킬 수도 있다.

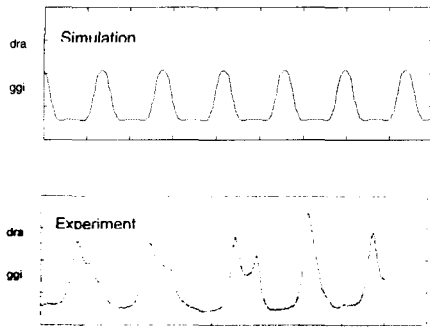


Fig. 17 Experiment and simulation of driving force

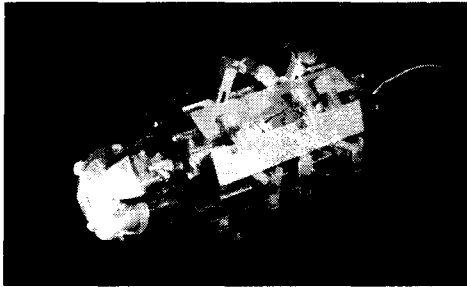


Fig. 18 Integrated locomotive robot with a micro-camera

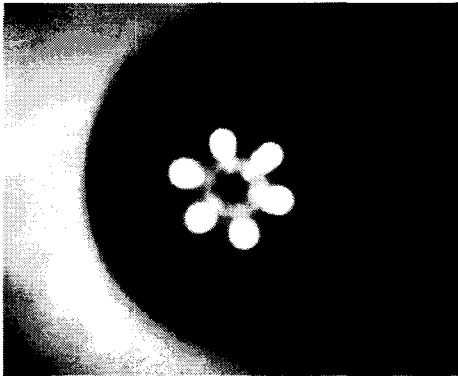


Fig. 19 Application example: tunnel inspection

3.3 로봇의 적용 실험

로봇의 탐사 로봇으로의 적용성을 확인해 보기 위해 로봇의 전반부에 마이크로 카메라 모듈을 통합하였다. 카메라는 CMOS 소자이고, 6 개의 White LED 를 장착하여 어두운 터널에서도 광원을 지닐 수 있도록 하였다. 카메라 모듈을 통합한 이동 로봇의 모습은 Fig. 18 과 같다. 카메라의 초점거리는

약 40mm 로 설정되어 있다. Fig. 19 는 터널 탐사시의 로봇의 모습을 보여주고 있다. 이상과 같은 적용 실험을 확대할 경우 범용 관탐사 로봇으로의 활용도 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 1 개의 모터로 40 개의 다리를 위상차를 갖고 움직여 줄 수 있는 로봇의 이동 장치를 조합형 캠과 링크 구조를 이용하여 구현하였다. 특히 본 로봇은 방사형으로 형성되어 있는 로봇의 특성으로 지지점이 불완전한 곳에서도 성공적으로 이동해 갈 수 있는 특징을 지니고 있다. 본 로봇은 하나의 모듈로서 앞뒤로 서로 연결시킬 경우, 굽어진 관로 및 환경이 균일하지 않은 곳의 탐사용으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21 세기 프론티어 사업의 일환인 지능형 마이크로시스템 사업단의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Suzumori K., Miyagawa T., Kimura M., Hasegawa Y., 1999, "Micro Inspection Robot for 1-in Pipes," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 4, No. 3.
- (2) Hirai K., Hirose M., Haikawa Y., Takenaka T., 1998, "The Development of Honda Humanoid Robot," *Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation*.
- (3) Pratt G.A., 2000, "Legged Robots at MIT : What's New Since Raibert," *IEEE Robotics & Automation Magazine*.
- (4) Adachi H., Koyachi N., Ara T. i, Shimizu A., Nogami Y., 1999, "Mechanism and Control of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot," *Proceedings of the International Conference on Robots & Automation*, pp. 1792~1797.
- (5) Akira Torige, Shigeki Yagi, Hirofumi Makino, Tomonori Yagami, Noriaki Ishizawa, 1997, "Centipede Type Walking Robot(CWR-2)," *Proceedings of 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 402~407.