

진동을 이용한 PZT 구동의 소형 이동 로봇에 관한 연구

Study of small mobile robot actuated by PZT using vibration

한성준* · 김성현** · 양현석*** · 박영필†

Sung-Joon Han, Sung-Hyun Kim, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

Key Words : Micro robot(소형 로봇), three legs(세 다리), bimorph piezoelectric actuator(바이모프 피에조 액츄에이터), vibrating (진동), locomotion(운동), friction(마찰), dynamics(동역학)

ABSTRACT

Micro robots have been developed for many applications: medical, industrial, military, and so on. A small mobile robot was built and it has three legs made of bimorph piezoelectric actuators. It proceeds by vibrating the rear leg and it rotates by vibrating one of the front legs. The locomotion of the robot is described by relative position of mass center and the friction between the legs and the floor. This paper describes the principles of locomotion and modeling of the robot. Modeling was simulated to investigate the dynamics of its mobility. The simulation results verified the modeling by showing similar movement of the robot as measured. It remained, however, several problems through experiments such as crooked direction of forward movement and proceeding speed.

1. 서 론

근래에 소형 이동 로봇에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 소형 이동 로봇은 협소 구역이나 사람들이 갈 수 없는 위험 지역 등에서 정보를 얻거나 파손된 부분을 직접 수리하는 데에 유용하게 쓰일 수 있다. 이러한 소형 이동 로봇은 향후 의학이나 군사 정보, 환경 분야 등 다양하게 응용될 것으로 보인다.

소형 이동 로봇은 그 크기와 무게에 제한을 받으면서 동시에 이동 속도는 보장되어야 한다. 로봇의 크기와 무게의 제한으로 인해 기존의 모터 사용을 배제하고, 새로운 액츄에이터(actuator)로 대체가 필요하다. 마이크로 액츄에이터에는 피에조(piezoelectric), 형상 기억합금(shape memory alloy)⁽⁹⁾, 전자기(electromagnetic), 공압(air pressure) 등을 이용한 여러 종류가 있는데 그 중에서 힘, 응답 속도, 에너지 효율 등에서 뛰어난 성능을 지닌⁽¹⁾ 피에조(piezo) 액츄에이터는 소형 이동 로봇의 구동부로 많이 쓰이고 있다⁽¹⁻⁶⁾.

피에조 액츄에이터를 사용한 소형 이동 로봇 중에서 진동 모드를 이용한 로봇⁽¹⁾⁽²⁾, 마찰력을 추진력으로 한 로봇⁽³⁾⁽⁴⁾, 메카니즘을 이용한 로봇⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 등이 있다. 진동 모드를 이용한 로봇은 바닥과 로봇 사이의 마찰력을 고려하기 쉽지 않아서 운동에 대한 정확한 해석이 없다⁽¹⁾⁽²⁾. 메카니즘을 이용한 로봇은 역학적 해석은 충분하나 로봇 자체의 크기가 커지는 단점이 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 마찰력을 추진력으로 이용한 로봇에 관한 기존의 연구들은 로봇의 전진 운동만 고려하였거나⁽³⁾, 회전 운동만 고려하였으며⁽⁴⁾, 로봇의 운동에 대한 역학적 분석이 결여되어 있다⁽³⁾⁽⁴⁾.

본 논문은 소형 이동 로봇의 설계 및 제작, 그리고 로봇의 운동에 대한 역학적 해석에 대해 다루고 있다. 피에조 액츄에이터에서 발생하는 진동을 이용하여 평면에서 임의의 방향을 갈 수 있는 소형 이동 로봇을 설계하고 제작하며, 로봇의 운동에 대해 역학적으로 분석을 하는 데에 그 목적이 있다.

2. 소형 이동로봇 설계

소형 이동 로봇의 구동에 알맞도록 피에조 액츄에이터(piezo electric actuator)를 이용하여 로봇의 다리를 구성하도록 하였다. 다리들은 모두 피에조로 이루어져 있고, 인가된 전기장에 의하여 변형률이

† 책임저자: 정희원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : park2814@yonsei.ac.kr

Tel: (02) 2123-2814, Fax: (02) 312-2159

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 정보저장기기 연구센터

*** 연세대학교 기계공학부

발생하는 피에조의 성질을 이용하여 로봇의 운동을 일으키도록 한다. 피에조의 기본 구동기는 피에조 스택(piezo stack), 피에조라미네이트(piezolaminate), 피에조튜브(piezo tube), 바이모프(bi-morph) 등의 종류가 있는데, 로봇 다리의 역할을 하기 위해 바이모프 타입의 피에조를 선택하였다. 바이모프 피에조 액츄에이터는 두 개의 피에조 층이 서로 반대의 방향성을 가지도록 부착되어 있는 빔(beam)의 형태이다. 양 면의 피에조에 (+) 전압을 인가하면 한 면의 피에조가 인장하여 빔이 구부러지고, (-) 전압을 가하면, 다른 한 면의 피에조가 인장하여 빔이 다른 방향으로 구부러진다. 이러한 바이모프 타입의 피에조 액츄에이터에 전압을 싸인파(sinusoidal wave)로 가하면, 피에조 빔은 진동을 하게 된다.

로봇의 설계 목표는 피에조의 진동을 이용하여 로봇이 평면에서 임의의 방향으로 운동할 수 있도록 하는 것이다. 로봇이 평면 위에서 직진과 회전을 하려면, 피에조 액츄에이터가 2개 이상 필요한데, 본 논문에서는 프로토타입으로 세 개의 액츄에이터를 이용하여 세 다리 시스템의 로봇을 설계하였다. 프로토타입 로봇의 세 개의 다리 중 뒤에 있는 다리는 전진을 담당하고, 앞에 있는 두 개의 다리는 각각 우회전과 좌회전을 담당한다.

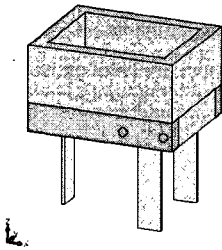


Fig.1 Design of three-legged mobile robot

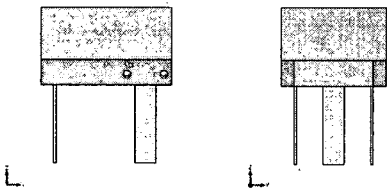


Fig.2 Design of three-legged mobile robot at side view and front view

3. 로봇 모델링 및 해석

3.1 로봇 운동에 관한 모델링 및 해석

Fig.3은 로봇의 운동을 모델링하기 위하여 로봇을

간략하게 나타낸 그림이다. 앞의 두 다리와 뒷다리 사이의 중간, 그리고 앞의 두 다리 사이의 중간 지점에 로봇의 무게 중심이 있다고 가정하였다. 로봇의 무게 중심에 local reference frame을 일치시켜 로봇의 정면을 x축, 로봇의 위를 z축이라 하고, y축은 오른손 법칙에 따라 정했다.

평면 위에서 로봇이 자유롭게 이동할 수 있으려면 직진과 회전 운동을 할 수 있어야 한다. 세 다리 로봇이 직진과 회전 운동을 할 수 있는지 알아보기 위해 각각에 대해 모델링을 하였다. 모델링 해석을 위하여 세 개의 다리의 진동으로 로봇이 운동할 때 세 개의 다리 모두 바닥과 떨어지지 않으며, 피에조 액츄에이터 다리는 탄성이 없다고 가정하였다.

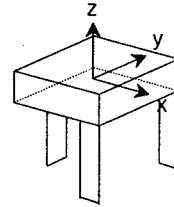


Fig.3 Local coordinate on three-legged mobile robot

(1) 직진 운동에 관한 모델링 해석

직진 운동에 관한 모델링은 로봇을 측면에서 바라보고, xz 평면에서 2차원으로 해석하였다. 로봇의 뒷다리 진동으로만 직진 운동을 하므로 두 개의 앞다리는 xz 평면에서 하나의 다리로 가정할 수 있다. 운동방정식에서 첨자 1은 뒷다리, 첨자 2는 앞다리에 해당하며, 첨자 x는 x축 방향, 첨자 z는 z축 방향으로의 성분을 각각 나타낸다.

$$\sum F_x = -F_{1x} - F_{2x} = m\ddot{x} \quad (1)$$

$$\sum F_z = N_1 + N_2 - mg = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_y = N_1 b - N_2 b + F_{1x} h + F_{2x} h = 0 \quad (3)$$

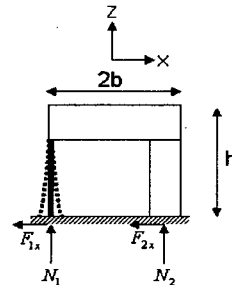


Fig.4 Translational motion model of three-legged mobile robot

진진 운동방정식을 이용하여 뒷다리를 진동시킬 때 세 다리에 작용하는 수직항력(N)과 마찰력(F)을 구하고, x축 방향으로의 로봇의 가속도를 계산하면 다음과 같다.

$$N_1 = \frac{b - \mu_{2x}h}{2b + (\mu_{1x} - \mu_{2x})h} mg \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{b + \mu_{1x}h}{2b + (\mu_{1x} - \mu_{2x})h} mg \quad (5)$$

$$F_1 = \mu_{1x}N_1, \quad F_2 = \mu_{2x}N_2 \quad (6)$$

$$\ddot{x} = \frac{-gt(\mu_{1x} + \mu_{2x})}{2b + (\mu_{1x} - \mu_{2x})h} \quad (7)$$

(2) 회전 운동에 관한 모델링 해석

회전 운동에 관한 모델링은 로봇을 정면에서 바라보고 yz 평면에서의 운동방정식과 위에서 바라본 xy 평면에서의 운동방정식을 유도하였다. 앞다리 중 하나의 다리를 진동시키면 y축 방향으로 로봇이 힘을 받을 뿐만 아니라 z축을 중심으로 모멘트를 받아 회전을 하기 때문이다. 뒷다리에 작용하는 수직항력과 두 개의 앞다리에 작용하는 수직항력의 합은 같다고 가정할 수 있다. 운동방정식에서 첨자 R은 오른쪽 다리를, 첨자 L은 왼쪽 다리를 각각 나타내고, 첨자 y는 y축 방향으로의 성분을 뜻한다.

$$\sum F_y = -F_{2Ry} - F_{2Ly} - F_{1y} = m\ddot{y} \quad (8)$$

$$\sum F_z = N_1 + N_{2R} + N_{2L} - mg = 0 \quad (9)$$

$$\sum M_x = (N_{2L} - N_{2R})w - (F_{2Ly} + F_{1y} + F_{2Ry})h = 0 \quad (10)$$

$$\sum M_z = -(F_{2Ry} - F_{1y} + F_{2Ly})b + (F_{2Lx} - F_{2Rx})w = I_z \ddot{\phi}_z \quad (11)$$

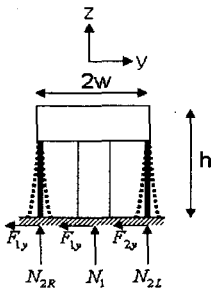


Fig.5 Rotational motion model of three-legged mobile robot at side view

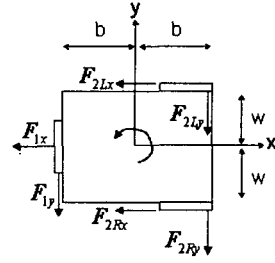


Fig.6 Rotational motion model of three-legged mobile robot at top view

회전 운동방정식을 이용하여 오른쪽 다리와 왼쪽 다리에 작용하는 수직항력 및 마찰력을 구하고, y축 방향으로의 가속도와 z축 방향으로의 각가속도를 계산하면 다음과 같다.

$$N_{2R} = \frac{w - (\mu_{2Ly} + \mu_{1y})h}{2w + (\mu_{2Ry} - \mu_{2Ly})h} \frac{mg}{2} \quad (12)$$

$$N_{2L} = \frac{w + (\mu_{2Ry} + \mu_{1y})h}{2w + (\mu_{2Ry} - \mu_{2Ly})h} \frac{mg}{2} \quad (13)$$

$$F_{2Ry} = \mu_{2Ry}N_{2R}, \quad F_{2Ly} = \mu_{2Ly}N_{2L}$$

$$F_{2Rx} = \mu_{2x}N_{2R}, \quad F_{2Lx} = \mu_{2x}N_{2L}$$

$$F_{1y} = \mu_{1y}N_1 = \mu_{1y} \frac{mg}{2} \quad (14)$$

$$\ddot{y} = \frac{-gw(\mu_{2Ry} + 2\mu_{1y} + \mu_{2Ly})}{2(2w + (\mu_{2Ry} - \mu_{2Ly})h)} \quad (15)$$

$$\ddot{\phi}_z = \frac{1}{I_z} \{b(\mu_{1y}N_1 - \mu_{2Ry}N_{2R} - \mu_{2Ly}N_{2L}) + w\mu_{2x}(N_{2L} - N_{2R})\} \quad (16)$$

3.2 로봇 위치 해석

3.1에서 살펴본 바와 같이 로봇은 x축, y축 방향으로의 가속도와 z축 방향으로의 각가속도를 가지고 운동을 한다. 이들 세 가지의 가속도를 시간에 따라 구하면 일정 시간이 흐른 후 로봇의 위치를 계산할 수 있다.

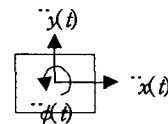


Fig.7 Acceleration of three-legged mobile robot

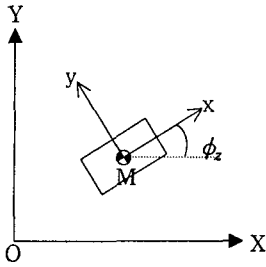


Fig.8 Rotational motion model of three-legged mobile robot

Fig. 8에서 O는 절대좌표계(global coordinate)의 원점을 나타내고, M은 이동 로봇의 무게중심의 위치로 로봇좌표계(local coordinate)의 원점을 나타낸다. 절대좌표계에서 이동 로봇의 위치 벡터를 P_O , 이동좌표계에서의 위치 벡터를 P_M 이라 하고, 회전 변환 행렬(rotation matrix)인 $R(\phi_z)$ 를 이용하여 절대좌표계에서의 로봇의 속도를 계산한다.

$$P_O = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}, P_M = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R(\phi_z) = \begin{bmatrix} \cos \phi_z & \sin \phi_z & 0 \\ -\sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R(\phi_z)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_z & -\sin \phi_z & 0 \\ \sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$P_O = R(\phi_z)^{-1} P_M \quad (19)$$

3.3 마찰 모델

마찰 모델은 여러 종류가 있으나, 크게 쿨롱 마찰 모델과 점성 마찰 모델이 있다. 쿨롱 마찰 모델은 두 마찰면의 상대속도가 0일 때와 0이 아닐 때의 마찰 계수 값이 불연속임에 비해 점성 마찰 모델은 연속적이며, 피에조를 이용한 소형 이동 로봇의 운동을 더 잘 설명한다⁽³⁾. 따라서 본 논문에서는 점성 마찰 모델을 적용하여 로봇의 운동을 모델링하였다. 점성 마찰 모델에 따르면, 두 물체의 상대속도가 포화 속도(v_{sat})보다 작은 구간에서 마찰 계수가 상대 속도에 비례하고, 포화 속도보다 크면 마찰 계수가 일정한 값(μ_{max})을 갖는다.

$$\mu = (\mu_{max} / v_{sat})v \quad \text{for } -v_{sat} \leq v \leq v_{sat} \quad (20)$$

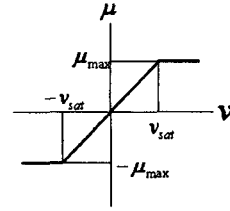


Fig.9 Viscous friction model

모델링 해석을 위하여 마찰 계수는 두 물체의 상대 속도에 비례한다고 가정하고 세 개의 다리와 바닥 사이에서 x축, y축 성분의 마찰 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\mu_{1x} = \left(\frac{\mu_{max}}{v_{sat}} \right) (\dot{\delta}_1 + \dot{x}), \quad \mu_{1y} = \left(\frac{\mu_{max}}{v_{sat}} \right) \dot{y} \quad (21)$$

$$\mu_{2x} = \left(\frac{\mu_{max}}{v_{sat}} \right) \dot{x}, \quad \mu_{2y} = \mu_{2Ly} = \left(\frac{\mu_{max}}{v_{sat}} \right) (\dot{\delta}_2 + \dot{y}) \quad (22)$$

여기서 $\dot{\delta}$ 는 로봇이 멈추어 있을 때, 싸인과의 전압에 의해 발생하는 피에조 액츄에이터 끝단의 횡방향 속도를 의미한다. (+) 방향은 세 다리의 횡방향에 해당하는 x축 및 y축의 (+) 방향으로 한다. μ_{max} 와 v_{sat} 는 마찰 계수를 결정하는 요소인데, 이는 실험을 통하여 $\mu_{max} = 0.2$, $v_{sat} = 0.101 \text{ mm/s}$ 로 정하였다.

4. 시뮬레이션

4.1 전진 속도 시뮬레이션

전진 운동에 대한 모델링 해석을 통하여 구한 가속도 식(7)을 이용하여 로봇의 전진 운동 속도를 구했다. 피에조 액츄에이터의 진동 주파수는 200Hz이며, 크기는 0.2mm로 설정하여 식(21)과 식(22)로부터 세 발에 작용하는 마찰력의 마찰계수를 구하였다. 시뮬레이션에서의 샘플링 시간은 0.0001초로 하여 룬지쿠타(Runge-Kutta) 방법으로 수치해석을 한 결과는 fig.8과 같다. 해석 결과 로봇의 평균 속도는 33mm/s로 계산되었다.

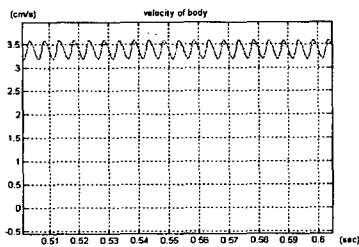
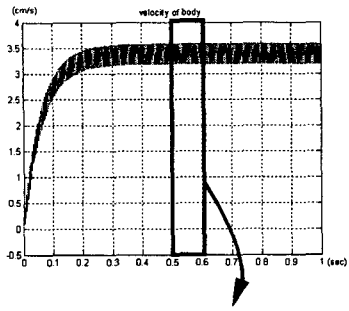


Fig.10 Velocity of the robot,
 $f=200\text{Hz}$, $A=0.2\text{mm}$

4.2 회전 운동을 하는 로봇의 위치

직진 운동을 하는 로봇의 위치는 로봇의 속도와 시간으로 쉽게 구할 수 있다. 여기서는 로봇이 회전 운동을 할 때 위치 계산한 결과를 그래프로 나타내었다. 로봇이 회전 운동을 하도록 오른쪽 다리와 왼쪽 다리에 순서대로 크기 0.2mm 주파수 200Hz 의 싸인파 진동이 일어날 경우, 식(7), 식(15), 식(16)으로부터 세 개의 가속도를 구하고 식(19)을 이용하여 절대좌표계에서 3초 동안의 로봇의 위치를 계산하여 평면에 나타내면 fig.11 및 fig.12와 같다.

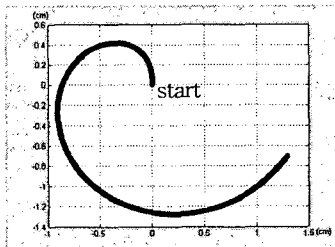


Fig.11 Left turning motion of the robot for
3sec, $f=200\text{Hz}$, $A=0.2\text{mm}$

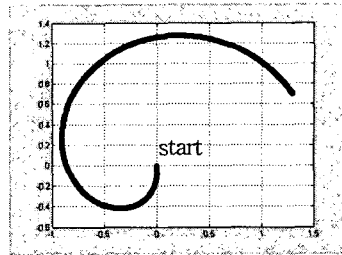


Fig.12 Right turning motion of the robot for
3sec, $f=200\text{Hz}$, $A=0.2\text{mm}$

4.3 직진+회전 운동을 하는 로봇의 위치 계산

로봇이 직진 운동과 회전 운동을 같이 하려면, 로봇의 뒷다리와 앞다리를 함께 진동시켜야 한다. 여기서는 뒷다리와 왼쪽 다리를 함께 진동시켰을 경우, 식(19)을 사용하여 절대좌표계에서 로봇의 이동 속도를 계산하고, 3초 동안의 로봇의 위치를 xy평면에 나타내면 fig.13과 같다. 이때의 샘플링 시간 (sampling time)은 0.1ms 로 하였다.

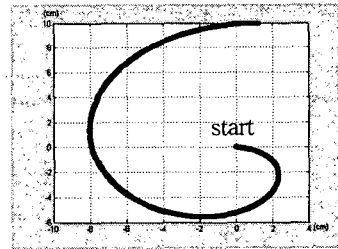


Fig.13 Forward and left turning motion of the
robot, $f=200\text{Hz}$, $A=0.2\text{mm}$

5. 제작 및 실험

5.1 세 다리 로봇 (three-legged robot) 제작

모델링 해석 결과를 통하여 세 다리로 구성된 프로토타입 로봇이 2차원 평면에서 직진과 회전을 구현할 수 있음이 입증되었다. 따라서 프로토타입 설계대로 로봇의 몸체를 제작하였다. 로봇 몸체는 가벼우면서 강도 있는 아세탈로 제작하였다. 피에조 액츄에이터는 길이 31.80mm , 너비 6.35mm , 두께 0.65mm 로 Piezo Systems, Inc.의 T220-A4SS-203X를 사용하였다.

Fig.14에서 로봇의 무게는 $m=21.0\text{g}$ 이고, 앞다리와 뒷다리의 간격은 40mm , 앞의 두 다리 사이 간격은 40mm , 바닥으로부터 로봇의 무게 중심 높이

는 32mm이다. 실험으로 로봇의 질량 관성 모멘트는 $I_{xx}=7.95 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{yy}=8.65 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{zz}=1.19 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 임을 측정하였다⁽¹⁰⁾.

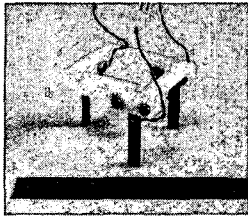


Fig.14 Three-legged mobile robot

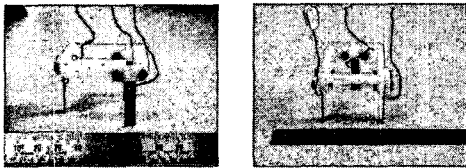


Fig.15 Three-legged mobile robot at side view and front view

5.2 파워 및 구동 주파수

피에조는 인가된 전압과 변형률이 비례하는데 로봇이 적당한 속도를 내려면 가능한 피에조의 큰 변형률이 필요하므로 피에조가 파괴되지 않는 범위 내에서 높은 전압을 가했으며, 피에조의 1차 공진 주파수의 싸인파 전압을 가했다.

T220-A4SS-203X를 0.2mm의 변형을 일으키며 진동시키기 위하여 피에조의 인가 전압은 주파수를 200Hz, 크기를 120Vpp를 가했다. 전압의 싸인파를 만들기 위하여 function generator를 사용하였다. Function generator의 최대 전압 크기가 ±10Vpp이므로 게인이 15인 PZT amplifier, PI, Inc.를 사용하여 피에조 액츄에이터에 120Vpp의 전압을 가하도록 하였다.

5.3 로봇 직진 및 회전 실험

로봇의 직진 운동과 회전 운동에 관한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실제 제작한 로봇을 실험하여 로봇 운동을 측정하였다. 바닥은 압축 나무판인 MDF 판을 이용했고, 수평계로 바닥의 수평을 맞추었다. 로봇을 바닥에 위치시킨 다음 function generator와 PZT amp.로 원하는 로봇 다리에 전압을 가하였다. 로봇이 운동하는 모습은 디지털 캠코더를 이용하여 초당 30 프레임씩 352 x 240 해상도의 비트맵 영상으로 변환하여 저장하였다.

Fig.16는 로봇의 직진 운동을 동영상으로 찍은 후 3초씩 편집하여 나타낸 사진이다. 운전 조건으로 로봇 뒷다

리에 120Vpp, 200Hz의 전압을 가하였다. 전진 속도는 대략 40mm/s로 측정되었다. Fig.17는 로봇의 회전 운동을 마찬가지로 2초씩 편집하여 나타낸 사진이다. 운전 조건으로 로봇 오른쪽 다리에 120Vpp, 200Hz의 전압을 가하여 좌회전을 하도록 하였다. 로봇 무게중심의 회전 반경은 대략 50mm로 측정되었다.

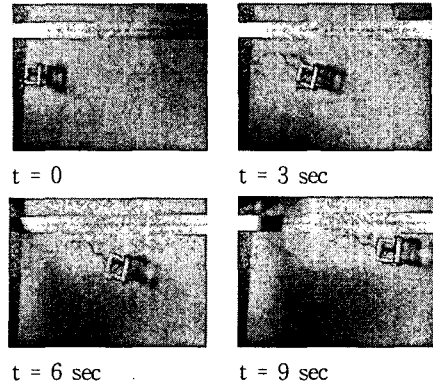


Fig.16 Image of the robot moving forward

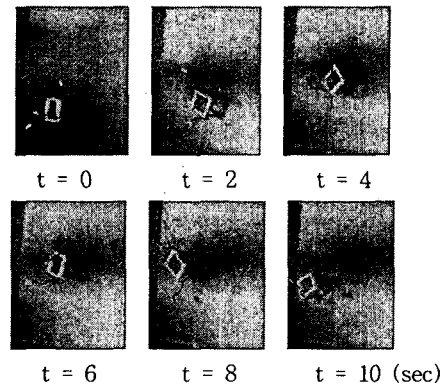


Fig.17 Image of the robot turning to the left

5. 결론

모델링 해석한 결과와 실험한 결과를 비교하면, 해석한 바와는 로봇의 전진 속도가 33mm/s이고, 실험 결과는 40mm/s으로 비슷한 값을 갖는다. 그러나 Fig.16에서 보는 바와 같이 로봇이 정확한 직진 운동을 하지 못했고, 실험을 통해 로봇에 연결된 전선의 무게, 바닥의 수평 정도, 로봇 몸체 및 피에조의 형상 오차 등이 에러의 요인이라고 판단하였다. 직진 운동과는 달리 회전 운동

은 매우 균일한 속도로 5cm의 회전 반경을 그리며 회전을 했다. 그러나, Fig.11의 모델링 해석 결과에서처럼 로봇이 나선형으로 회전을 하진 않았다. 그 이유는 로봇 다리에 작용하는 마찰력을 계산할 때의 값이 정확한 값이 아니었기 때문으로 생각된다.

향후, 로봇이 안정적으로 직진 운동을 보장할 수 있도록 로봇을 재점검하며, 나아가 로봇 구동에 필요한 파워와 앰프, 피에조 구동 드라이버 등 전반적인 회로를 로봇에 탑재하여 일체형 로봇이 되도록 하는 것이다.

참 고 문 헌

(1) Toshiyuki Matsuoka et al., 1993, "Mechanical analysis for micro mobile machine with piezoelectric element", Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1685-1690.

(2) Antanas Daugela et al., 1995, "Piezo ceramic based locomotive drive", Proc. of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.187-192.

(3) Kazuo Tani, 1996, "Friction models for a mobile machine using piezo vibration", Proc. of AMC-MIE, pp.717-722.

(4) Ryoji Fukui, et al., 2001, "Micro robot actuated by rapid deformation of piezoelectric elements", 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.117-122.

(5) Nicolae O. Lobontiu, et al., 1998, "Design and analysis of elastodynamic locomotion for robotic insects", Part of the SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation, pp.118-127.

(6) Michael Goldfarb, et al., 2002, "Development of a piezoelectrically-actuated mesoscale robot quadruped", Journal of Micromechatronics, Vol. 1, No. 3, pp.205-219.

(7) Kiyoshi Ioi, 1999, "A mobile micro-robot using centrifugal forces", Proc. of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.736-741.

(8) Kiyoshi Ioi, 2001, "Study on turning motion of micro robot driven by cyclic force", Proc. of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1319-1324.

(9) Jaewook Ryu, et al., 2002, "A ciliary motion based 8-legged walking micro robot using cast IPMC actuators", Proc. of Interational Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.85-91.

(10) 박영필, 1997, "컴퓨터 주변기기의 방진, 완료보고서", 연세대학교 기계공학과, 4장.