

# 뱀형 로봇의 설계 및 주행 알고리즘

## Design of Snake Robot and Snakelike Locomotion

이 덕 재, 이 창 훈, 김 용 호  
(Duck Jai Lee, Chang Hoon Lee, Yong Ho Kim)

배재대학교 전자공학과(전화:(042)520-5663, 팩스:(042)520-5773, E-mail : [duck755@hotmail.com](mailto:duck755@hotmail.com))

**요약** : 뱀형 로봇은 자유도보다 액추에이터의 수가 적은 논홀로믹 구속조건(nonholonomic constraint)을 가지며, 단순한 신체구조 이지만 초-여유자유도 구속조건(hyper-redundant constraint)을 이용해서 기묘한 운동과 다양한 기능을 만들어내는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 6개의 관절로 각 링크가 2차원 상에서 직렬로 연결된 뱀형 로봇의 기구설계 및 기구학과 동력학을 바탕으로 설계된 기구에 대해 해석하여 운동방정식을 유도하여 추진원리와 운동원리에 관하여 알아본다. 기본적인 운동 메커니즘을 해석하여 구현한 알고리즘을 제작한 로봇에 적용하여 그 추진원리와 운동원리를 검증한다. 실험용 로봇은 링크 중앙에 법선 방향으로 마찰력이 발생할 수 있도록 수동바퀴를 가지고 있으며, PC와 RF(Radio Frequency)로 직렬통신을 하며 PC에서의 운동 명령의 조작에 의해 전진, 후진, 좌/우 방향으로 회전을 할 수 있도록 운동 알고리즘을 적용할 수 있도록 제작 되었다. 특징으로는 일반적으로 토크를 입력으로 하지 않고 각도를 입력으로 하여 관절을 제어하고 있다는 점이 있으며, 운동방정식 또한 이에 대한 관계를 바탕으로 유도한 것이다.

**Keywords** : Snake Robot, Nonholonomic Constraint, Serpenoid Curve

### I. 서 론

최근 목적에 맞추어 전문화된 기능을 갖추며 환경에 효율적으로 대응하는 로봇을 실현하기 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 이러한 로봇 총칭하여 생물체형 로봇(bio-morphic robot)이라 하며 이는 동물이나 생물체를 관찰, 해석하여 그 기능을 체계화함으로써 구현할 수 있다. 이러한 연구는 미국이나 일본 등 일부 선진국을 중심으로 활발히 진행 되었으며 휴먼, 곤충, 물고기, 파충류 등의 다양한 형태로 연구 되고 있다. 최근 국내에서도 로봇에 다각적인 접근이 이루어지고 있으나 인공지능이나 인공 생명의 개념을 도입한 인간형 로봇과 다 개체 로봇(group-robot)에 관한 연구가 일반적이며 생물체형 로봇에 관한 연구는 아직 미비한 상황이다. 따라서, 본 논문에서는 생물체형 로봇 가운데 제어에 여러 가지 어려움을 내포하고 있는 뱀형 로봇을 제작하여 구조적인 특성과 기능을 도입하고 동적 기능에 대하여 살펴본다. 뱀형 로봇은 제작된 구조적 특징에 따라 두 가지 형태로 구분된다. 차륜이 옆으로 미끄러지지 않는다는 논홀로믹 구속조건을 사용하여 진행의 법선 방향의 마찰이 진행 방향의 마찰보다 크게 되지 도록한 차륜 구속조건을 이용한 로봇[1, 2, 3, 4, 5]과 법선 방향과 진행 방향에 점성 마찰이나 동적 마찰이 다른 기구를 설계해서 위치결정 제어 시스템을 리야프노프 안정론에 근거한 퍼지 안정해석 방법을 이용한 로봇이 있다.[6] 본 논문에서 차륜 구속조건을 이용한 뱀형 로봇을 설계/제작하여 기존의 뱀 로봇의 이론들에 대한 결과들을 직접적으로 로봇에 적용하고 실험에서 나타난 데이터를 바탕으로 뱀의 운동학적 메커니즘을 규명하며 기본적인 뱀의 움직임(전진, 후진, 좌/우)들을 실현 한다.

### II. 뱀형 로봇의설계

#### 2.1 마찰 모델 (Friction Model)

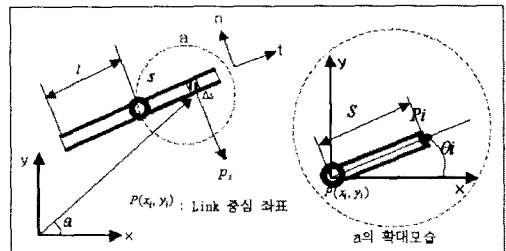


그림1. 뱀형 로봇 링크의 미소부분

$p$ 점을 기준으로 점  $p_i$ 의 좌표를 표현하면 식(1)과 이며

$$P_i = (x_i + S \cos \theta, y_i + S \sin \theta) \quad (1)$$

이것을 행렬식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} s \quad (2)$$

뱀형 로봇의 링크는 강체이므로 링크의 일부분( $\Delta s$ )의 해석으로 링크전체에 대한 움직임을 해석할 수 있다. 따라서 링크의 미소거리를 미분하여 속도 값을 구하면

$$\dot{p}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \theta_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix} s \dot{\theta}_i \quad (3)$$

식(3)이며 이식을 링크에 대하여 해석하기위해 n-t좌표로 변환하면 식(4)의 형태가 된다. 이식의 속도 값을

$$\dot{p}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ s \dot{\theta}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

바탕으로 마찰력을 계산한 결과는 식(5) 이다. 여기서

$$df_{nt} = - \begin{bmatrix} c_t & 0 \\ 0 & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} dm_i$$

$$dm_i = (m_i ds) / (2l_i) \quad (5)$$

$c_n$ 는 n-t좌표에서 t축 방향에 작용하는 마찰계수이며,  $c_n$ 는 n축의 방향에 작용하는 마찰계수이다.  $dm_i$ 는 링크 일부에 해당되는  $\Delta s$ 의 길이에 해당되는 미소질량으로 바퀴형에서는 k지점에서만 작용한다. 수식에서 음(-)의 의미는 마찰방향과 뱀 로봇의 진행방향이 반대방향임을 의미 한다. (k는 P점에서 바퀴까지의 거리)

$$df_{xy} = - \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} df_{nt} \quad (6)$$

식(6)은 식(5)을 x-y좌표로 다시 변환한 결과이며 이식을 미소질량을 링크의 전체질량에 대하여 적용하여 전체적인 마찰력을 구할 수 있으며 식(7)과 같다.

$$f_{nt} = -m_i \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_n \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(8)은 식(7)의 전체 마찰력을 토크로 변환한 것이며 거리 s를 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\tau_i = \int s df_{nt} = -\frac{m_i l_i^2}{2} c_n \dot{\theta}_i \quad (8)$$

이식으로 전체 토크는 n-t좌표에서 n축 방향으로만 힘이 작용함을 수 있다.

$$D_f := \begin{bmatrix} C_f M^0 \\ 0 \quad C_n M \end{bmatrix}, D_r := C_n J, \Omega_\theta := \begin{bmatrix} C_\theta - S_\theta \\ S_\theta C_\theta \end{bmatrix}, f := \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$f = -\Omega_\theta D_r \Omega_\theta^T \tau, \tau = -D_\theta \dot{\theta}$$

식(7)과 (8)을 모든 링크에 대하여 정리하면 식(9)와 같다.

## 2.2 모델링 및 기구 설계

수동바퀴 사용한 뱀형 로봇의 모델링 방법은 수동바퀴의 위치에 따라 두 가지 형태로 구분 된다. 즉 수동바퀴가 관절과 동일한 축선 상에 위치하는 형태와 관절과 관절 사이 어느 한 지점에 위치하는 형태 즉, 링크의 한 지점에 수동바퀴를 고정하는 형태로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 로봇의 방향성은 좋으나 실제 뱀형 로봇구현 시 관절과 동일한 축에 수동 바퀴를 위치 시켜야 함으로 복잡한 구조적 장치가 필요하다. 또한 수동바퀴 자체가 회전축이 되므로 마찰력이 증가하여 바퀴가 미끄러지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 구조적으로 간단하고 조정이 쉬운 후자의 형태를 설계 한다.

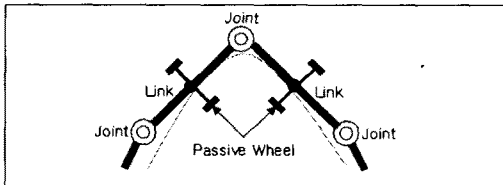


그림2. Model of the snake-like robot

그림2는 수동바퀴가 링크의 중앙에 위치한 뱀형 로봇을 모델링 한 것이며 링크(link), 관절(Joint), 수동바퀴(passive wheel)로 구성된다. 각 구성 요소들은 하나의 모듈로 표현되며 실제 뱀형 운동학적 메커니즘은 2개의 모듈을 갖는 구조로 모든 설명이 가능하기 때문에

2개의 모듈만으로 표현 한다.

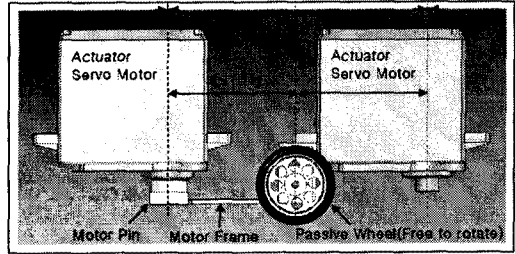


그림3. Mechanism of the snake-like robot

뱀형 로봇은 Solidworks라는 툴을 사용하여 설계키와 동일한 3차원 로봇을 설계하였다. 설계된 뱀형 로봇은 오류검사 및 시뮬레이션을 통하여 구조적인 문제점 최소화 하였으며 기구제작에 필요한 도면을 작성 하였다. 그림3은 뱀형 로봇의 설계도로 서보모터의 회전축은 모델링의 관절에 해당되며, 회전축과 회전축 사이의 거리는 모델링의 링크길이 나타낸다. 또한 수동바퀴가 링크의 중앙에 위치함을 나타낸다.

## III. 뱀형 로봇의 알고리즘 적용

### 3.1 뱀형 로봇의 알고리즘

뱀형 로봇을 실질적으로 적용하기 위해서는 뱀형 로봇의 운동원리를 수식적으로 규명할 필요가 있다.

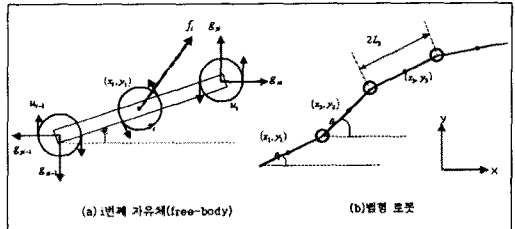


그림4. 뱀형 로봇 다이어그램

다음은 뱀형 로봇의 운동원리를 규명하는 과정이며 수식의 간략한 표현을 위하여 아래와 같이 정의 한다.

$$A := \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \in IR^{(n-1) \times n}, w := \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} e^T M x \\ e^T M y \end{bmatrix}$$

$$E := \begin{bmatrix} e & 0 \\ 0 & e \end{bmatrix}, e := [1 \dots 1] \in IR^n, m := \sum_{i=1}^n M_i$$

$$D := \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & -1 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \in IR^{(n-1) \times n}, J_i = m_i l_i^2 / 3$$

그림4의 (a)에 운동방정식( $f=ma$ )을 적용하여 x축과 y축에 작용하는 힘을 구하면 식(10)과 같다.

$$M\ddot{x} = f_x + D^T g_x, \quad M\ddot{y} = f_y + D^T g_y \quad (10)$$

식(11)은 각 모듈의 x, y의 벡터와 링크와 링크의 각( $\theta$ )의 논홀로믹 구속조건을 나타낸다.

$$Dx + AL \cos\theta = 0, \quad Dy + AL \sin\theta = 0 \quad (11)$$

식(10)을 이용하여 뱀형 로봇의 전체적인 토크( $\tau = fl$ )를 구하면 식(12)가 되며 여기서  $\tau$ 는 인접하는 링크에

의해서 작용하는 토크이며  $u$ 는 각 모듈의 링크에 중심에 작용하는 토크로 뱀형 로봇의 순수입력이다.

$$J\ddot{\theta} = \tau - S_{\theta}A'g_x + C_{\theta}A'g_y + D'u \quad (12)$$

식(11)을 사용하여  $g_x, g_y$ 를 구하여 식(12)에 적용하여 정리하면 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & mI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C\dot{\theta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & S \\ S' & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D' \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} R & S \\ S' & Q \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} D_t & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{L}' \\ E' \end{bmatrix} \Omega_{\theta} D_p \Omega_{\theta}' [ \mathcal{L} \quad E ] \quad (13)$$

$$\mathcal{L} := [S_{\theta}N' - C_{\theta}N']', B := D_{\theta}D', K := j^{-1}D'B^{-1}, p := 1/(e'e)$$

$$H := LA'(DM^{-1}D')AL, N := M^{-1}D'(DM^{-1}D')^{-1}AL,$$

$$j := J + S_{\theta}HS_{\theta} + C_{\theta}HC_{\theta}, C := S_{\theta}HC_{\theta} - C_{\theta}HS_{\theta}, e_p := pe$$

또한, 이 식을 이용하여 관절에 작용하는 토크의 값을 관절의 각도 값으로 변환하면 식(14)와 같이 두식으로 분리된다.

$$\begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & mI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_p'R e_p & e_p'S \\ S'e_p & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_p'R \\ S' \end{bmatrix} K \dot{\phi} = 0$$

$$\dot{\phi} + D_j^{-1}(C\dot{\theta}^2 + R\dot{\theta} + S\dot{w}) = Bu \quad (14)$$

분리된 두식의 의미는 다음과 같다. 첫 번째 식으로부터 움직임  $\psi$ 와  $w$ 를 제어한다. 아래 식은 관절토크  $u$ 로부터 뱀 로봇의 위치와 자세를 제어한다.

### 3.2 뱀모양 곡선(Serpentoid Curve)

x-y평면 위의 임의의 점(x, y)가 다음과 같은 곡선위에 있으면 이 곡선을 뱀모양 곡선이라고 정의하며 곡선의 방정식은 식(15)와 같다.

$$x(s) = \int_0^s \cos(\xi_{\sigma}) d\sigma, y(s) = \int_0^s \sin(\xi_{\sigma}) d\sigma$$

$$\xi_{\sigma} := a \cos(b\sigma) + c\sigma \quad (15)$$

여기서 a, b는 스칼라이고, s는 원점에서 임의의 점까지의 호의 길이이다. 식(15)를 미소 호의 길이에 대하여 미분하면 식(16)과 같다.

$$\frac{dx}{d\sigma} = \cos(\xi_{\sigma}), \frac{dy}{d\sigma} = \sin(\xi_{\sigma})$$

$$\tan \theta_i = \frac{dx}{d\sigma} / \frac{dy}{d\sigma} = \cos(\xi_{\sigma}) / \sin(\xi_{\sigma}) \quad (16)$$

이것을 i번째 절대 관절각  $\theta_i$ 을 구하면,  $\theta_i = \xi_{\sigma}$ 이다. 이 식으로부터 상대각도 값을 구하면 식(17)이 된다.

$$\phi_i = \frac{d\theta_i}{d\sigma} = a \sin(b\sigma) + c \quad (17)$$

이 식을 식(14)에 대입하면 뱀모양 움직임을 얻을 수 있다.

## IV. 실험

### 4.1 뱀형 로봇의 구성

뱀형 로봇의 시스템 구성은 프로세서, RF모듈, 구동부, 전원부로 구성되며 그림 5와 같다. 마이크로 프로세서( $\mu C$ )는 80C196KC를 사용하며 로봇의 전반적인 알고리즘의 실행 및 각 모터가 정형과 굴곡운동을 하도록 PPM(Pulse Proportional Modulation)파를 생성하며 PC와의 양방향 통신을 통한 명령을 실행한다. 구동부(Actuator)는 6개의 서보모터(servo - motor)를 사용하

며 프로세서의 ISO(hi speed output)포트로부터 PPM파를 입력받아 관절을 회전 시킨다. RF모듈 양방향통신이 가능하며 PC와 프로세서간의 무선시리얼(RS232) 통신으로 로봇을 제어 한다.

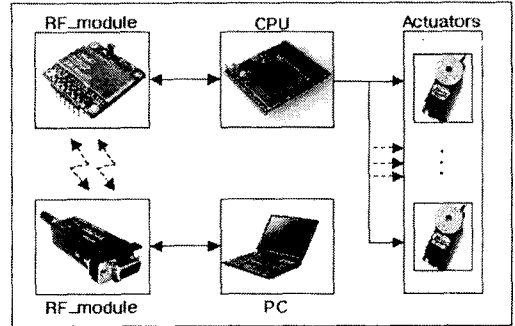


그림5. 뱀형 로봇의 시스템 구성도

실행 중 모터의 과도한 전류소비가 일시적인 전압강하 현상으로 무선통신 장애현상이 발생하는 문제점이 발생하여 대용량 커패시터를 병렬 연결하여 해결하였다.

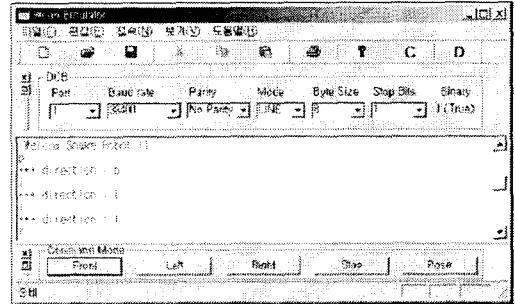


그림6. Emulator of the snake-like robot

에뮬레이터(Emulator)는 PC와 프로세서간의 원활한 무선통신을 위해서 전송속도와 포트, 패리티비트 등을 설정할 수 있으며 모니터프로그램을 사용할 수 있도록 hex파일의 다운로드 기능을 갖추어 뱀형 로봇의 알고리즘개발을 용이하게 하였다. 또한 로봇의 움직임을 제어하는 위한 명령모드 기능을 추가하였다.

### 4.2 알고리즘 구현

뱀형 로봇의 구동원리는 같은 주기를 갖는 사인곡선(Sine Curve)을 각 모듈 관절에 특정시간 간격으로 전달함으로써 뱀의 움직임을 구현할 수 있다.

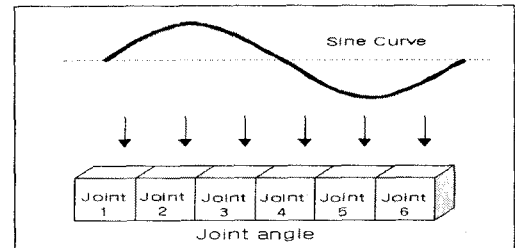


그림7. 알고리즘 적용 도식도

그림 7은 6개의 모듈 이루어진 뱀형 로봇의 알고리즘 적용 방법을 도식화한 것이며 모듈의 관절(Joint)에 일정 위상차이만 사인곡선을 인가함을 나타낸다. 이것은 관절1에서부터 사인곡선의 값을 차례로 이동(shift)시키는 효과와 같다.

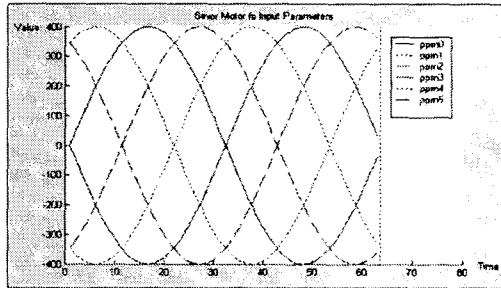


그림8. 알고리즘으로 얻은 Parameters

그림 8은 식(16)로부터 계산된 값을 나타내며 실질적으로 서보모터의 각도 값을 의미하며 각 신호의 값은 ppm0~2와 ppm3~5의 x축을 중심으로 서로 대칭한다. 각 관절에 인가되는 신호는  $\frac{1}{3}\pi$  위상차를 보이며 각 모터에 위상 값은 다음과 같다.

$$ppm0 = 0, ppm1 = \frac{1}{3}\pi, ppm2 = \frac{2}{3}\pi$$

$$ppm3 = \pi, ppm4 = \frac{4}{3}\pi, ppm5 = \frac{5}{3}\pi$$

여기서 ppm은 각 모듈 관절에 입력되는 신호로 서보모터의 회전각을 제어 하기위한 신호이다.

#### 4.3 실험결과

그림 9~11은 실제 설계 제작한 뱀형 로봇의 주행결과들을 1초 간격으로 나타낸 것이며 로봇의 좌/우회전 주기는 약 6초를 나타낸다.

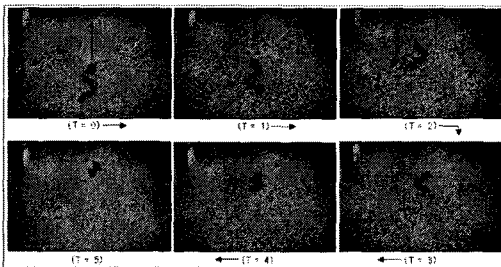


그림9. 뱀형 로봇의 전진 운동 결과

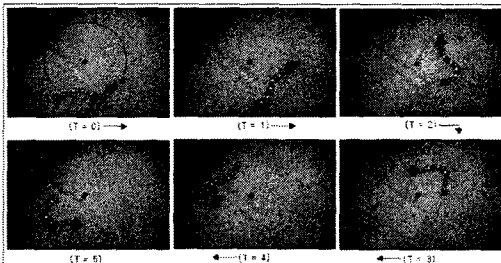


그림10. 뱀형 로봇의 우회전 운동 결과

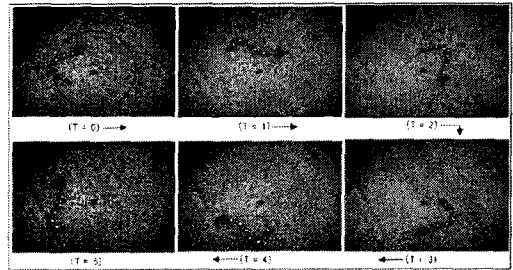


그림11. 뱀형 로봇의 좌회전 운동 결과

## V. 결론

뱀형 로봇의 마찰모델을 통하여 뱀의 운동메커니즘은 수직방향으로만 힘이 작용하며 수평방향으로는 힘이 작용하지 않는다, 이론을 통하여 규명된 결과들을 직접 설계 제작한 뱀형 로봇에 적용하여 뱀의 진진 운동, 회전운동을 실험한 결과 국외의 연구 결과에 뒤지지 않는 자연스러운 움직임을 보이는 결과를 보였다. 본 논문에서는 기본적인 뱀형 로봇을 제작 하여 뱀의 운동 메커니즘을 규명하였으나 내부의 방위 및 자이로 센서와 CCD카메라를 등을 이용하여 움직임을 계속하는 피드백 제어수법을 사용하면 높은 환경적응력을 가질 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] S. Hirose, *Biologically Inspired Robots (Snake like Locomtor and Manipulator)*, Oxford University Press, 1993
- [2] J.Ostrwski and J.Burdick, "Gait Kinematics for a Serpentine Robot," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1294-1299, Minne soat 1996.
- [3] P. Prautsch, and T. Mita, "Control and Analysis of the Gait of Snake Robot," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Application*, 502-507, Hawaii, 1999.
- [4] F Matsuno, and K. Mogi, "Redundancy Controllable System and Control of Snake Robots Based on Kinematic Model," in *Proc. of IEE Int on Decision and Control*, 4791-4796, Dec. 2000.
- [5] H. Date M. Sampei, and S. Nakaura, "Control of a Snake Robot in Consideration of Constraint Force," in *Proc fo IEEE Int. Conf. on Control Applications*, 966-971, 2001
- [6] M. Saito, M. Fukaya, and T. Iwasaki, "Serpentine Locomotion with Robotic Snakes," *IEEE Control Systems Magazine*, 64-81, February 2002