

지능형 뱀 로봇에 관한 연구

Research about Intelligent Snake Robot

김성주 · 김종수 · 전홍태

Seong-Joo Kim, Jong-Soo Kim and Hong-Tae Jeon

중앙대학교 일반대학원 전자전기공학부

요 약

기존 이동로봇의 활발한 연구와 더불어 다양한 형태의 이동로봇이 등장하였다. 이에 본 논문에서는 8축으로 구성된, 총 16 Degree Of Freedom을 가지는 다 관절 뱀 로봇을 제작하였다. 뱀 로봇은 지면과의 진행 마찰력을 고려하여 무동력 바퀴를 사용하였다. 또한 PC Cam과 초음파 센서를 사용하여 각 관절이 움직일 수 있는 Joint Angle을 나타내기 위하여 Target의 색상과 거리를 입력으로 하였다. 뱀 로봇은 머리부분, 몸통 그리고 꼬리부분으로 나뉘어 진행되는 방식을 가지며 PC Cam을 통해 화면에 보여지는 움직이는 특정 목표물에 대하여 진행을 하며, 진행 중 움직이거나 고정되어있는 Obstacle이 포착될 경우 충돌회피를 통하여 Target을 추종하는 방식을 실험적으로 보이고자 한다.

Abstract

There come various types of robot with researches for mobile robot. This paper introduces the multi-joint snake robot having 16 degree of freedom and composing of eight-axis. The biological snake robot uses the forward movement friction and the proposed artificial snake robot uses the un-powered wheel instead of the body of snake. To determine the enable joint angle of each joint, the controller inputs are considered such as color and distance using PC Camera and ultra-sonic sensor module, respectively. The movement method of snake robot is sequential moving from head to tail through body. The target for movement direction is decided by a certain article be displayed in the PC Camera. In moving toward that target, if there is any obstacle then the snake robot can avoid by itself. In this paper, we show the method of snake robot for tracing the target with experiment.

Key Words : Mobile Robots, Snake, Modular Robot, Collision Avoidance

1. 서 론

기존의 제조부문에서 이용되던 로봇 산업에서 발전하여 현재는 여러 형태의 로봇 산업으로 발전되어지고 있다. 로봇 산업은 건설, 의료, 원자력, 가스, 전력 등의 비제조업의 분야로 투입되기 시작하여 단순히 인간 팔의 운동기능에 유사한 것과 하체의 운동기능에 유사한 것뿐 아니라 다양한 동물의 형태를 모방하는 로봇, 인간의 감정을 표현할 수 있으며, 좀더 다이나믹한 환경에서 인간의 행동을 유사하게 표현할 수 있는 인간 친화적 로봇과 같은 3차 서비스 산업에 폭 넓게 적용되고 있다. 이러한 로봇 기술의 발전은 현재 지능을 가진 로봇의 등장을 가져왔으며 이에 초점이 맞추어지고 있다. 본 논문에서는 탐사용 로봇의 한 형태인 지능형 뱀 로봇에 대하여 기술하였다. 뱀 형태의 로봇은 복잡한 환경 하에서도 잘 움직이며, 넘어질 염려도 없다. 이런 특성을 로봇과 결합시키기 위한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

본 논문의 목적은 장애물을 가지고 있는 복잡한 환경에서

자율 주행을 함으로서 시각정보, 센서정보를 통하여 장애물과 대상을 판별하여 실제 뱀이 가질 수 있는 특정 움직임으로 장애물을 회피하여 목적 지점까지 도달하는 최소계획 경로를 실험적으로 보이는 것을 본 논문의 목적으로 정하였다.

뱀 로봇은 8개의 모듈로 구성되었으며, 16개의 linear-linked servo motor를 이용하여 각 모듈이 2 Degree Of Freedom을 가지는 형태의 로봇으로 구현하였다. 뱀 로봇은 Main Controller 와 8개의 Sub Controller 부분으로 구성되며 각 Sub Controller는 두 개의 Actuator를 내장하고 있다. Main Controller에서는 2.17ms의 주기로 PWM 신호를 보내어 16개의 Actuator를 제어하게 된다. 본론에서는 생물학적 뱀의 움직임과 종류 그리고 원하는 방향으로 진행하도록 하기 위한 뱀의 이동원리를 기술하였다. 그리고 실제 뱀과 같은 기계적 메카니즘을 실현하기 위한 시스템 구조와 역기구학을 통하여 각 관절의 Joint Angle을 유도하고 장애물이 전방 진행방향에 포착되었을 경우에 대하여 적절한 회피 동작을 구현함으로써 최소 경로를 통하여 목적지점까지 주행하는 알고리즘을 설명하였다. 실험 결과로는 위의 알고리즘을 기반으로 한 시뮬레이션 결과와 실시간으로 적용된 뱀 로봇의 움직임을 보였다. 본 논문의 결론에서는 실험된 뱀 로봇의 보완점과 동작 특성 그리고 향후과제에 대하여 기술하였다.

접수일자 : 2002년 12월 9일

완료일자 : 2003년 2월 10일

본 연구는 과학기술부의 뇌신경정보학 사업에 의해 지원받았습니다.

2. 뱀 로봇의 특성 및 구조

2.1 생물학적 뱀의 구조 및 특징

뱀 로봇을 구현하기 위해서 생물학적 측면에서 뱀의 구조와 여러 특징들을 조사하였다.

뱀의 등뼈는 약 300여 개로 구성되어 있으며 자유자재로 움직일 수 있도록 관절이 형성되어 있다. 뱀의 골격 형태와 구조는 다른 척추동물들과 비교하여 수와 형태측면에서 매우 단순하다. 다양한 골격구조를 갖는 다른 척추동물들과는 다르게 뱀은 두개골, 척추, 늑골의 세 종류로 이루어진다. 몸체는 모두 겹쳐진 형태의 비늘로 덮여있으며 비늘과 평평한 면으로 이루어진 각질의 피부는 몸의 탈수를 방지하는 역할을 한다. 뱀이 소리를 듣는 과정은 피부를 통하여 지면에서 들려오는 미세한 진동을 감지함으로써 소리를 구분한다. 뱀의 표면에 덮여 있는 비늘은 앞에서 뒤를 향하여 일정하게 배열되어 있다. 따라서 몸을 구부리게 되면 마찰력이 주로 뒤로만 작용함으로써 몸을 구부리면 꼬리 쪽의 몸이 앞으로 전진하게 되고 이어서 구부러진 몸을 바로 펴게되면 다시 앞쪽의 몸이 꼬리 쪽의 지지력을 이용하여 앞으로 전진이 가능하게 된다. 이러한 행동이 익숙해짐으로서 나아가서는 몸 전체가 지면에 닿지 않고 지지하는 부분만 땅에 닿음으로서 빠른 속도로 이동하는 것도 가능하게 된다. 이러한 기본동작을 바탕으로 하여 Lateral undulatory motion, Rectilinear motion, Concertina motion, Side-winding의 4가지 동작으로 표현된다[1][2][3].

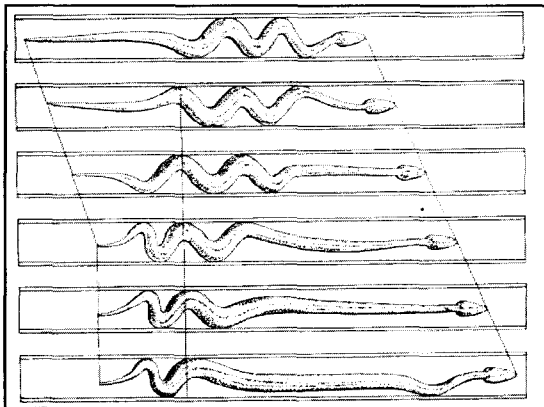


그림 1. 아코디언식 운동
Fig. 1. Concertina motion

제한된 뱀의 이동방식인 그림 1의 Concertina 이동은 미끄러운 표면이나 주위의 지형지물을 이용할 수 없는 상황이나 좁은 통로 같은 곳을 통과하기 위한 이동방식이다. 몸통을 아코디언의 바람통과 같이 접은 다음에 몸을 걸어 당길 수 있는 곳을 찾을 때까지 몸통의 전반을 밀어서 길게 뻗고 일단 걸어 당길 수 있는 장소를 찾아내면 몸통의 후반을 잡아 올리게 된다. 다시 몸통의 전반을 뻗어 다음에 새롭게 걸어 당길 수 있는 곳을 찾는다. 이와 같이 몸통의 전반과 후반을 교대하여 아코디언과 같이 수축과 이완을 반복하면서 전진하는 방식으로 뱀 로봇으로 구현할 수 있는 가장 적절한 방식이다[2].

2.2 로봇 시스템의 구성

생물학적 뱀의 구조적 특징과 진행방식을 고려하여 뱀 로봇의 프레임을 설계하였다. 16개의 선형 관절 서보 모터를 이용하여 구현된 8개의 링크와 16개의 자유도를 지니는 뱀 로봇의 형태는 그림 2와 같다. 뱀 로봇은 하나의 링크를 포함한 메인 컨트롤러와 8개의 서브 컨트롤러로 구성되며 각 서브 컨트롤러는 두 개의 서보 모터를 내장하고 있다. 메인 컨트롤러에서는 연산된 각 관절 값의 데이터를 메인 컴퓨터에서 받아 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 서브 컨트롤러로 보내어 16개의 서보 모터를 제어하게 된다.

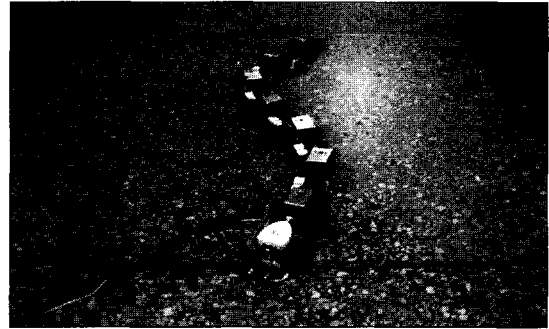


그림 2. 다 관절 뱀 로봇
Fig. 2. Multi-joint snake robot

가. 머리부 구성

그림 3은 구현된 뱀 로봇 시스템의 머리부분 블록도를 나타낸 것이다.

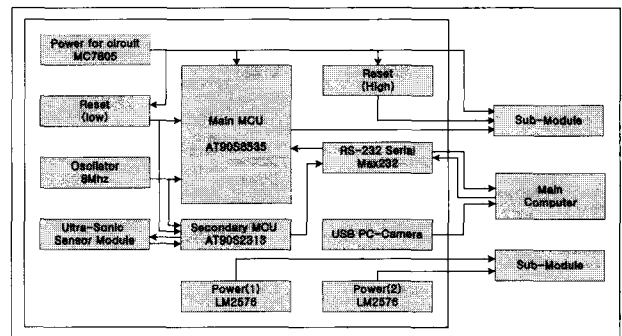


그림 3. 머리부 구성 블록도
Fig. 3. Block diagram of head part

나. 메인컨트롤러

메인 컴퓨터에서 연산된 관절 값의 연속적인 신호는 우선 메인 컨트롤러에 보내진다. 메인 컨트롤러는 서브 컨트롤러에 송신된 신호를 전달하는 역할을 담당한다. 이때, 뱀의 골격구조가 머리부터 꼬리까지 모듈라 형태로 연결되어 있다는 점을 감안하여 메인 컨트롤러에서는 각 모듈에 시리얼(serial) 방식으로 신호를 전송한다.

다. 초음파 센서

제안한 뱀 로봇 시스템에 사용된 초음파 센서(부록E, 참조)는 목표 지점이나 장애물과의 거리를 측정하기 위한 목적으로 구성되었으며, 시스템의 안정된 주행 성능을 보장하기 위해 사용된다.

라. 서브 컨트롤러

서보 모터를 구동하기 위한 서브 모듈에서는 시리얼로 받은 신호를 모터제어 신호인 PWM 파형으로 변환하는 역할을 수행한다. PWM 파형을 받은 모터는 이에 상응하는 각으로 위치를 바꾸게 된다. 위와 같은 순차적인 역할을 수행하도록 구성한 컨트롤러의 세부 항목들은 다음과 같다. 전달되는 데이터는 각 서보 모터 고유 번호, 속도 그리고 관절 값의 데이터로 구성된다. 서브 컨트롤러는 위치에 따라 부여된 고유 번호를 통해 서보 모터를 구별한다. 이로써 메인 컨트롤러로부터 전송 받은 값을 해당 서브 모듈에 정확하게 전달할 수 있게 된다. 서보 모터는 속도와 관절 값을 이용해 동작한다.

서브 컨트롤러가 제어하는 최소 단위인 모듈에는 2 자유도를 관장하기 위한 2개의 서보 모터가 포함되며, 각 모터에는 ATMEL사의 AT89C2051(부록F. 참조)이 컨트롤러로 사용된다. 즉, 한 개의 서보 모듈에는 2개의 AT89C2051이 두 개의 서보 모터를 구동시킨다.

3. 뱀 로봇의 역기구학적 방정식

생물학적 뱀의 대표적인 4가지 이동 방법 중Concertina 방법인 Motion에 대하여 규칙적인 반복 이동을 함으로서 목적지점 까지 주행하는 Motion Pattern을 제안하였다. 이러한 방법으로 주행 중에 Obstacle이 포착되었을 경우에 대하여 2가지 Motion Pattern에 대하여 Obstacle을 회피하게 된다. 뱀 로봇에 장착된 PC Camera에 의해 시각적으로 보여줄 수 있는 -20°에서 20°의 범위에 대하여 뱀 로봇은 목표물과 장애물에 대하여 정보 즉, 색상으로 구분되는 Red의 Target과Blue의 Obstacle 그리고 뱀 로봇의 기준 좌표계를 기준으로 한 각도 정보를 얻을 수 있다. 또한 초음파 센서를 이용함으로써 Target과 Obstacle에 대한 거리정보를 입력받을 수 있다. 이러한 거리정보와 각도정보를 입력으로 하여 역기구학을 유도 할 수 있다.

3.1 역기구학 방정식

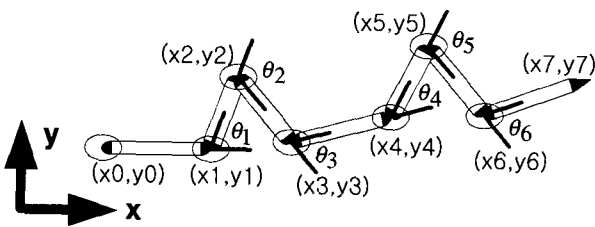


그림 4. 뱀로봇의 기계적 구조

Fig. 4. Mechanical structure of the snake robot

제안된 뱀 로봇의 이동은 머리, 몸통 그리고 꼬리 부분으로 나뉘며, 3단계의 반복적인 진행 방식을 갖는다. 임의의 위치에 놓여진 뱀 로봇은 Target을 찾는 과정을 통하여 목표지점을 연산하게 된다. 목표지점과의 거리 정보와 각도 정보를 입력으로 하여 7개의 관절은 다음과 같은 진행 방식으로 관절각도를 연산하게 된다. 첫 단계는 몸통과 꼬리부분 사이의 link 3, 4를 지면에 대하여 고정시킨다. 이때 진행 시 마찰력을 고려하여 수직으로 회전하는 각 actuator를 지면에 대하여 일정한 수평 각도를 유지하게 하였다. link 1, 2의

joints angle 1과 link 5, 6, 7의 joints angle 4, 5, 6의 연산을 수행한다. 우선 목표지점에 대한 joint angle 1은 제안된 일정 각도를 유지하게 되며, joints angle 4, 5, 6의 각도 값들은 다음과 같이 연산된다. 머리부분인 link7을 기준으로 목표지점과 이루는 각도 γ , 거리 입력정보를 이용하여 joint angle 4를 기준으로 한 목표지점 좌표를 구하여 사이의 거리를 계산한다.

$$x_{4p} = l_5 \cos(\theta_4) + l_6 \cos(\theta_4 + \theta_5) + l_7 \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + d \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6 - \gamma) \quad (2)$$

$$y_{4p} = l_5 \sin(\theta_4) + l_6 \sin(\theta_4 + \theta_5) + l_7 \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + d \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6 - \gamma) \quad (3)$$

각 joint angle에 대한 각도는 이 사이의 거리가 최소가 되도록 값을 연산하게되면 joints angle 4, 5, 6이 이루게되는 각도 값이 유도된다.

$$d^2 = [l_5 \cos(\theta_4) + l_6 \cos(\theta_4 + \theta_5) + l_7 \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - x_{4p}]^2 + [l_5 \sin(\theta_4) + l_6 \sin(\theta_4 + \theta_5) + l_7 \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - y_{4p}]^2 \quad (4)$$

이들 거리가 최소가 되기 위하여, 식(2)를 각 joints angle에 대한 편미분 연산의 해를 구하면 joint angle 4, 5, 6의 값을 구할 수 있으며 유도 결과는 다음과 같다.

$$\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{y_{4p}}{x_{4p}}\right), \quad \theta_5 = \theta_6 = 0 \quad (5)$$

목표지점에 대하여 첫 단계를 마치게면 머리부분의 이동 거리에 몸통과 꼬리 부분의 이동이 시작되어야 한다. 두 번째 단계는 몸통부분의 이동단계를 나타내었으며 그 진행 과정은 다음과 같다. 꼬리 부분인 link 1, 2와 머리부분의 link 7을 첫 단계의 각도 값을 유지시켜 지면에 대하여 고정시킨다. 이때 진행 시 마찰력을 고려하여 수직으로 회전하는 각 actuator를 지면에 대하여 일정한 수평 각도를 유지하게 된다. link 3, 4의 joint angle 2, 3 과 link 5, 6의 joint angle 4, 5, 6의 연산을 수행한다. 이때 기준좌표가 되는 joint angle 2와 목표지점사이의 좌표관계는 다음과 같이 연산된다.

$$x_{62} = l_3 \cos(\theta_2) + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \quad (6)$$

$$y_{62} = l_3 \sin(\theta_2) + l_4 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_6 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \quad (7)$$

이때 joint angle 2, 3을 유도하기 위하여 joint angle 4와 6사이의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{64}^2 = (x_{42} - x_{62})^2 + (y_{42} - y_{62})^2 \quad (8)$$

그럼으로 joint angle 4와 6사이의 거리가 최소가 되기 위하여 편미분 연산의 해를 구하면 joints angle 2와 3을 구할 수 있으며 연산결과는 다음과 같다.

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_{62}}{x_{62}}\right), \quad \theta_3 = 0 \quad (9)$$

삼각함수 법칙을 이용함으로써 고려되어야하는 나머지

joints angle 4, 5, 6을 연산할 수 있다.

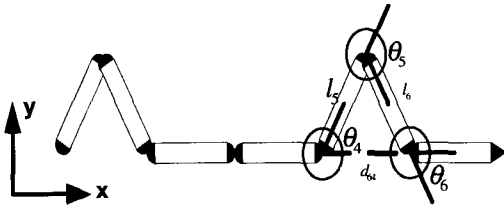


그림 5. 관절각 4, 5, 6의 값
Fig. 5. Determine of joints angle 4, 5, 6

$$L_6^2 = L_5^2 + d_{64}^2 - 2L_5d_{64}\cos\theta_4 \quad (10)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1}\left(\frac{L_5^2 + d_{64}^2 - L_6^2}{2L_5d_{64}}\right)$$

$$d_{64}^2 = L_5^2 + L_6^2 - 2L_5L_6\cos(\pi - \theta_5) \quad (11)$$

$$\theta_5 = \cos^{-1}\left(\frac{L_5^2 + L_6^2 - d_{64}^2}{2L_5L_6}\right) - \pi$$

$$L_5^2 = L_6^2 + d_{64}^2 - 2L_6d_{64}\cos\theta_6 \quad (12)$$

$$\theta_6 = \cos^{-1}\left(\frac{d_{64}^2 + L_6^2 - L_5^2}{2d_{64}L_6}\right) - \theta_2 + \theta_{before 2}$$

위 식의 계산으로 두 번째 단계에서 고려되어지는 joints angle 2, 3, 4, 5, 6 들이 계산된다. 세 번째 단계는 두 번째 단계에서의 joints angle 5, 6을 유지하며, joints 1, 2, 3, 4들이 이루어야되는 각도는 첫 단계의 값과 동일하게 유지시킴으로서 일정 거리를 앞으로 이동한 뱀 로봇은 처음 단계에서의 동작을 다시 유지하기 위한 단계이다.

4. 뱀 로봇의 추론 알고리즘

그림 6은 뱀 로봇에 장착된 USB PC 카메라를 이용하여 빨간 색상의 목표물과 파란 색상의 장애물을 분류하며 초음파 센서를 통하여 얻은 거리정보를 기본 입력으로 하여 2D와 3D 컴퓨터 모의실험과 실시간 시스템 구현 실험으로 뱀 로봇을 제어할 수 있는 구성도이다.

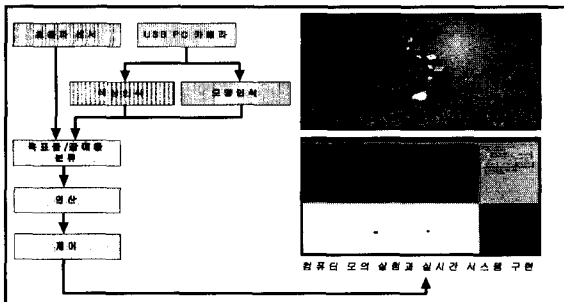


그림 6. 뱀 로봇의 모의실험 과 실시간 시스템 구현 구성도
Fig. 6. Model for simulation and online system

4.1 장애물 충돌회피

뱀 로봇은 사람의 접근이 어려운 유해환경, 해저, 우주에서의 탐사 등에 이용될 수 있다. 이에 좀더 지능화된 자율주행 로봇을 위한 방법으로는 주변환경인식, 충돌회피, 맵핑(mapping)기술, 경로계획과 같은 요소기술 분야에 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 본 논문에서는 뱀 로봇의 충돌회피를 위한 최적의 경로 계획을 연구하고자 한다.

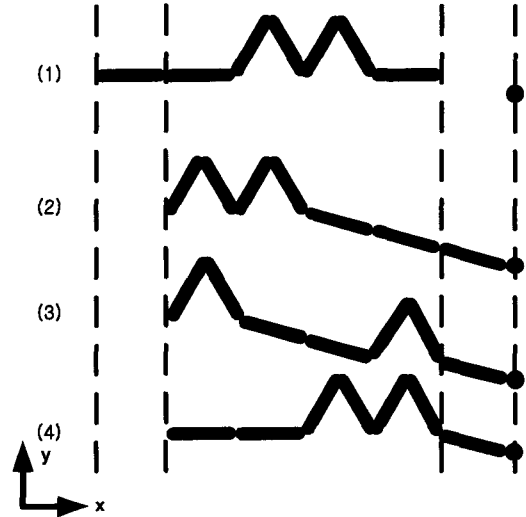


그림 7. 전진운동
Fig. 7. Moving forward of the snake robot

그림7의 예는 빨강색의 목표물에 대하여 제시된 진행방향을 기본으로 목표 지점까지 진행하는 것을 예시적으로 보였으며, 이에 대한 목표물의 거리 정보와 뱀 로봇의 머리부분과 목표물 사이의 각도 정보(+2.82480°)를 기본으로 실험하여 나타내었다.

위에서 제시된 진행 동작을 기본으로 하여 목표물을 향해 진행한다. 만약 진행 시에 파랑색의 장애물이 전방에 위치해 있는 상황에서 빨강색의 목표물보다 가까운 거리에 있을 경우에 대하여 중간지점(Intermediately Point)을 계산하여 진행하게 된다. 파랑색의 장애물과의 거리정보와 뱀 로봇의 머리부분과의 사이각을 입력으로 하여 중간지점의 좌표를 결정한다. 또한 초기 감지 범위에 대하여 장애물의 위치에 따라서 적용 범위를 다르게 설정하였다.

$$\text{Intermediately_distance} = \sqrt{(r^2) + (l_i^2)} \quad (13)$$

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{50}{r}\right)$$

l_i = 입력 적용범위, r = 장애물과의 거리

위에서 설명한 장애물 회피 방법을 그림으로 표현하면 아래와 같다. 그림 8과 9의 경우는 각각 장애물의 위치에 따른 중간지점 설정과 뱀 로봇의 진행 방향을 모의 실험하여 보여준 것이다.

장애물의 위치에 따른 뱀 로봇의 경로 선택을 실험하기 위한 컴퓨터 시뮬레이터는 2차원 시뮬레이터와 3차원 시뮬레이터로 구분하여 제작하였다.

그림 10은 2차원에서 실험할 수 있는 시뮬레이터이며 그림 11은 3차원에서 실험할 수 있는 시뮬레이터이다.

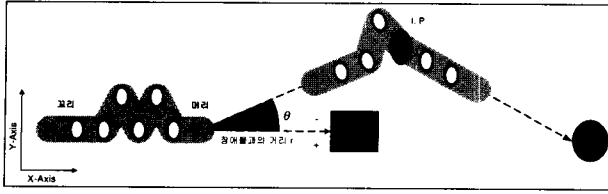


그림 8. 충돌회피 알고리즘(I)
Fig. 8. Collision avoidance algorithm(I)

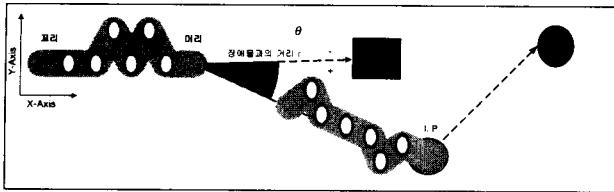


그림 9. 충돌회피 알고리즘(II)
Fig. 9. Collision avoidance algorithm(II)

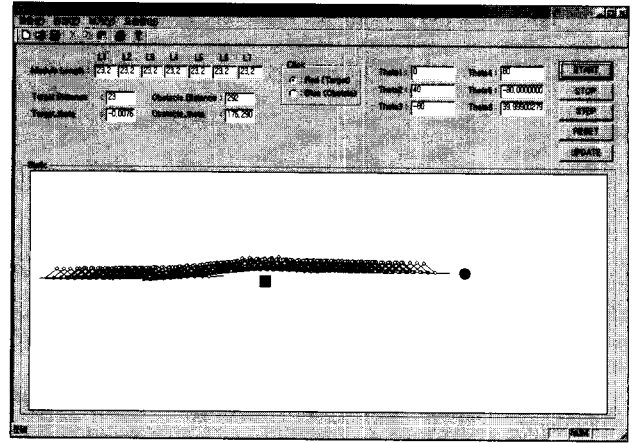


그림 12. 모의 실험 결과(1)
Fig. 12. The result of simulation(1)

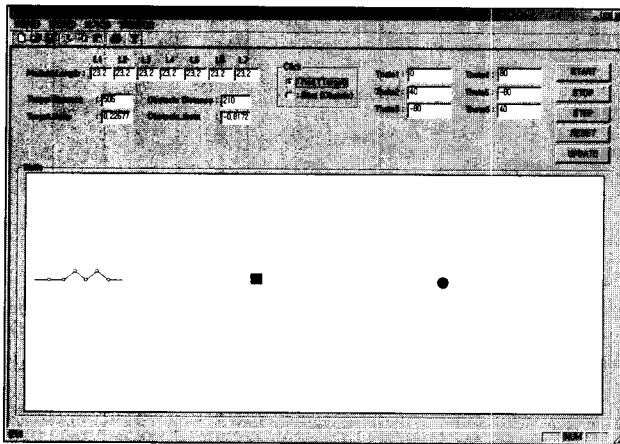


그림 10. 2차원 시뮬레이터
Fig. 10. Simulator(2D)

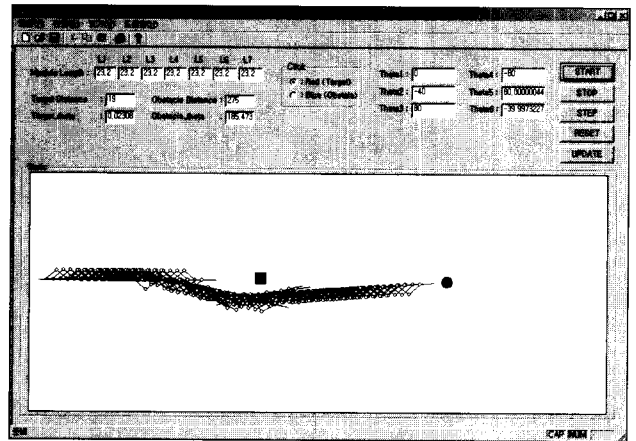


그림 13. 모의 실험 결과(2)
Fig. 13. The result of simulation(2)

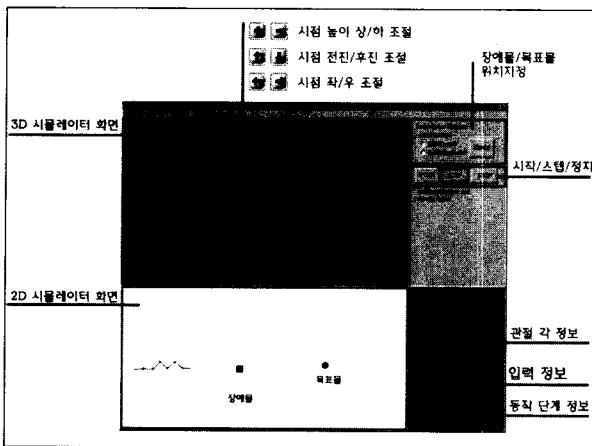


그림 11. 3차원 시뮬레이터
Fig. 11. Simulator(3D)

5. 결 론

본 논문에서는 뱀의 구조를 모방하여 모듈 형태로 구성된 뱀 로봇의 제작과정을 설명하였으며, 뱀의 동작 중 한가지 동작을 제작된 뱀을 이용하여 실험한 결과를 제시하였다. 지능 기법을 적용하여 충돌회피 및 목표물 근접 실험을 시뮬레이터를 통하여 구현하였으며, 지능 기법에 대해 소개하였다. 모듈 형태의 구조를 이용함으로써 뱀의 형태와 유사한 로봇의 제작이 가능하였고, 지능 기법을 도입하여 뱀의 행동 결정에 사용하여 적용한 결과를 보였다.

실시간 충돌회피 실험에서의 경우에는 대체로 센서의 실제 감지 능력을 배제하기 때문에 시뮬레이션 상에서는 우수한 능력을 발휘하나 실제 시스템에 적용하면 센서의 감도에 따라 이론과 많은 차이를 보였다. 또한 로봇의 형태와 조향방식, 사용한 센서의 종류와 각도, 배치 방법에 따라서 이러한 기술을 각각의 시스템에 적합하도록 구성해야 하는 문제점을 가지고 있으며 지속적으로 연구해야 할 과제이다. 또한 구현된 Concertina Motion 방식이 아닌 Side-Winding Motion의 방식을 접목시켜 좀 더 실제 뱀의 진행과 유사한 방식을 연구해야 할 과제이다.

또한, 그림 12와 13은 각각 장애물의 위치에 따른 로봇의 이동 궤적을 그린 실험 결과이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Gray and H. Lissmann, "The Kinematics of locomotion of the grass-snake," *J. Exp. Biol.*, vol. 26, pp. 354-367, 1950.
- [2] H. Lissmann, "Rectilinear locomotion in a snake (*Boa occidentalis*)," *J. Exp. Biol.*, vol. 26, pp. 368-379, 1950.
- [3] B.C. Jayne, "Kinematics of terrestrial snake locomotion," *Copeia*, vol. 4, pp. 915-927, 1986.
- [4] K. Dowling, "Limbless locomotion: Learning to crawl with a Snake Robot" *proc. IEEE Int. Conf. Robot. Auto.*, Detroit, MI, 1999, pp. 3001-3006.
- [5] Craig, J. J., "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Addison-Wesley, 1988.
- [6] Masashi Saito, Masakazu Fukaya, and Tetsuya Iwasaki, "Serpentine Locomotion with Robotic Snakes," *IEEE Control System Magazine*. Feb., 2002.

저 자 소 개



김성주(Seong-Joo Kim)

2002년 제12권 4호 참조

김종수(Jong-Soo Kim)

현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정 재학중

전홍태(Hong-Tae Jeon)

현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수