

Omni-tread 뱀 로봇 모델링 및 개발

Omni-tread Type Snake Robot: Mathematical Modeling and Implementation

오 상 진, 이 지 홍*, 최 훈
(Sangjin Oh, Jihong Lee, and Hoon Choi)

Abstract : This article presents an omni-tread snake robot that designed to locomote on narrow space and rough terrain. The omni-tread snake robot comprises three segment, which are linked to each other by 2 degrees of freedom joints for the pitch and yaw motion. Moving tracks on all four sides of each segment guarantee propulsion even when the robot rolls over. The 2 DOF joint are actuated by 2 servo motors which produce sufficient torque to lift the one leading or trailing segments up and overcome obstacles. This paper applies articulated steering technique to get omni-tread snake robot's kinematics model.

Keywords : omni-tread, snake robot, stability, rolling motion, articulated steering

I. 서론

대규모 화재나 지진, 폭탄 테러등과 같은 대형 재난은 대규모 사상자를 유발한다. 이러한 재난사고는 1차 건물 등이 붕괴 할 때 사상자를 배출하고 1차 건물붕괴 시 부상당한 생존자들이 뒤늦은 구조작업에 의해 추가로 사상자들이 발생한다. 재난사고 후 빠른 구조 작업을 통해 많은 추가 사상자를 구할 수 있으며 그러기 위해 필요한 것이 신속하게 생존자들을 찾아내고 구조를 하는 것이다. 기존에는 생존자를 찾기 위해서 구조요원이나 수색 견을 이용해 생존 예상지역을 탐색했지만 생존예상지역까지 구조요원이나 수색 견들이 접근하기가 쉽지 않았다. 첫 번째로 생존예상 지역까지 접근하는 통로가 구조요원이나 수색 견들의 몸집보다 작은 경우가 많고, 두 번째로 불안정한 붕괴 장애물위를 무게가 많이 나가는 구조요원이나 수색 견들이 움직일 때 2차 붕괴의 위험이 더 많아 지기 때문이다. 기존 생존자 탐색방법으로는 위와 같은 어려움이 있기 때문에 최근 많은 나라에서 소형로봇을 이용한 생존자 탐색방법이 많이 연구되고 있다. 실제로 911 세계무역센터 테러[7] 사고 때 생존자 탐색 및 복구 작업에 다양한 로봇들이 사용되었고 지진 등 자연재해가 많은 일본에서도 지진발생시 인명을 구조하기 위한 로봇들이 연구되고 있다.

생존자 탐색을 위한 로봇들은 좁은 통로와 같은 지형을 쉽게 지나다닐 수 있어야 하고 붕괴 장애물위를 자유로이 극복할 수 있어야 한다. 좁은 지형을 쉽게 지나다닐 수 있는 로봇은 소형의 휠 혹은 트랙형태의 로봇이 적당하지만 이러한 소형로봇들은 붕괴 장애물들을 자유로이 극복할 수 없다. 이러한 로봇들이 극복할 수 있는 장애물은 로봇의 휠이나 트랙의 크기로 결정이 되기 때문에 소형로봇은 작은 장애물밖

에 극복할 수가 없다. 하지만 본 논문에서 제안하는 뱀 형태의 로봇은 3개의 모듈로 구성되어있고 각 모듈은 2 자유도를 가진 관절로 이어져있다. 이 관절을 이용하여 로봇의 크기보다 비교적 큰 장애물을 극복할 수 있고 각 모듈의 4면에는 움직일 수 있는 트랙이 부착되어 뱀 로봇이 경사진 지형에서 굴러도 자유로이 주행이 가능하다. 또한 로봇의 작업공간의 영상을 무선으로 전송하여 원격지에서의 주변상황을 및 로봇의 상태를 모니터링이 가능하도록 하였다.

본 논문의 II장에서는 omni-tread 형태[1]의 뱀 로봇의 기구부 대해 소개를 하였고 III장에서는 로봇을 제어하기 위한 제어 system을 IV장에서는 기구학 해석을 통해 모델링한 결과를 그 다음장에서는 로봇의 모델을 이용해 제작한 시뮬레이션과 실제 로봇의 실험결과를 비교 분석 하였다.

II. CALEB III 기구부 설계

이번 장에서는 로봇의 기구부 및 구동부 설계에 대해 소개를 하기로 한다.

1. 로봇의 개요

그림 1은 본 논문에서 제안하는 omni-tread 형태의 뱀 로봇인 CALEB III의 사진이다. 이 로봇은 사진에서 보는 바와 같이 야지 및 협소 공간에 자율적이며 안정적인 주행이 가능하도록 각 3개의 모듈[2]에 각 모듈당 4개씩 모두 12개의 무한 체도를 장착하였으며 장애물 극복 및 자세 제어에 용이하도록 각 관절에 두 개의 서보 모터를 연결하여 각 관절이 2 자유도의 운동을 할 수 있게 하였다[3,4]. 조작자의 시야에서 로봇이 벗어나도 원격지 시스템에서는 로봇에 달린 무선카메라에서 작업공간의 영상데이터를 받고 또한 로봇의 자세를 알 수 있도록 기울기 및 각종센서 데이터를 원격지 제어 프로그램의 UI에 표시해주어 사용자가 로봇주위의 환경 및 자세를 추정하면서 로봇을 제어할 수 있다 본 논문에서 제안한 로봇의 전체 기구부는 모듈화 구성을 통해 내부 부품들의 교환 및 유지 보수의 편리성을 추구하였다. 기구부는 크게 세 부분으로 나뉘는데 첫 번째는 로봇 모듈의 뼈대역할을 하는 로봇 프레임, 로봇 프레임 안쪽에는 각종 센서와 배터리 제어모듈을 수납할 수 있는 공간이 존재한다. 두 번째와 세

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 2. 5., 채택확정: 2008. 6. 16.

오상진, 이지홍 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

(nasaganu@cnu.ac.kr/jihong@cnu.ac.kr)

최 훈 : (주)코어벨(hchoi@corebell.co.kr)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2006-511-D00024) 및 산학협동재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

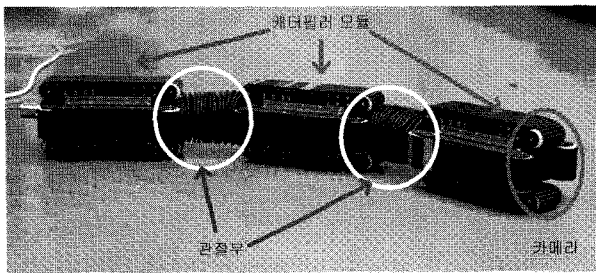


그림 1. 협소 공간을 위한 탐사 로봇 CALEB III.
Fig. 1. Robot exploring narrow space, CALEB III.

표 1. CALEB III의 제원.
Table 1. Specification for CALEB III.

분류	제원
몸체의 크기(3모듈 전체)	770mm(L)×115mm(W)×115mm(H)
총 중량	5.3kg
장애물 최대 극복 높이	195mm
평지 최고 주행 속도	4.8m/min
최대 전후 등판 능력	40°
운용 시간	1h
관절 회전각도	±55°

번째는 야지 및 협소공간에서 안정적인 주행 및 장애물 등판을 고려한 무한궤도 및 2자유도 관절구조이다.

2. 기구부 설계

로봇에 사용된 기구부는 ProE®를 이용하여 3차원으로 설계를 하였고 실제 제작하기 전에 ProE®상에서 각 모듈의 간섭체크 및 무게를 예상하여 설계를 보완하였다. 그림 2는 ProE®로 설계한 모듈의 설계도이다.

그림 2에서와 같이 각 구성 요소들을 모듈화 하여 내부 부품들의 교환 및 유지 보수가 용이하고 탐사 목적에 따라 센서들을 추가 및 제거하기 쉽도록 설계되었다.

3. 무한궤도 및 관절부 설계

협소공간의 비정형적 지형에서 기존의 휠 및 무한궤도의 단순한 형태의 독립 구동 방식은 구동 메커니즘 자체의 구조적 제약에 기인한 극복 불가능한 지형 및 자세 조건 등이 발생할 가능성이 크며, 때에 따라 과도한 토크로 인하여 전력 손실이 크게 발생하는 등의 문제점들을 가지게 된다. 이와 같은 단순한 무한궤도 형태의 독립 주행 방식을 사용할 때 발생할 수 있는 문제점들을 보완하기 위하여 본 연구에서는 로봇의 각 모듈들 사이에 2자유도의 관절 및 무한궤도 형태의 구동 부를 혼합 적용함으로써 수직 장애물 등판, 자갈, 풀숲 등의 굴곡 면 주행 등이 가능하도록 하였다. 이와 같은 로봇의 기능은 로봇의 주행 중 로봇과 지면의 접촉면을 변화시켜 보다 안정적이며 효율적인 주행이 가능하도록 할 것이다. 관절에 사용된 서보 모터의 최대 토크는 64Kg·cm이며 최대 관절 허용각은 ±55°이다. 그림 3은 CALEB III의 관절 구조를 보여주는 그림이다. 그림 3으로부터 관절 구조에 따른 피치(Pitch), 요(Yaw) 운동이 가능함을 확인할 수 있다.

기존 개발되었던 무한궤도 형태의 주행 방식을 적용한 캠

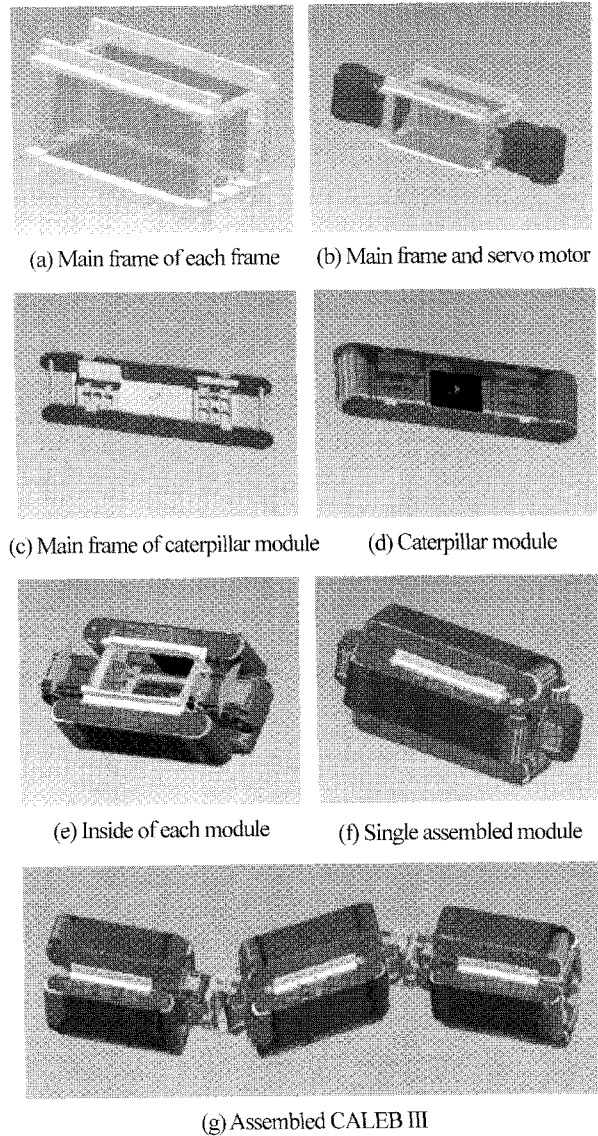


그림 2. CALEB III의 ProE 설계.
Fig. 2. CALEB III design by ProE.

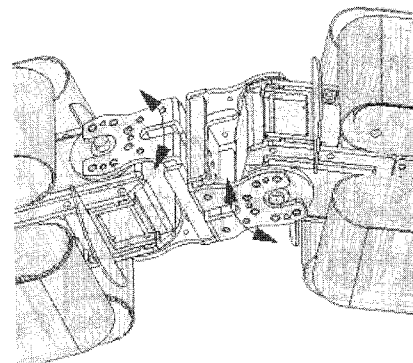
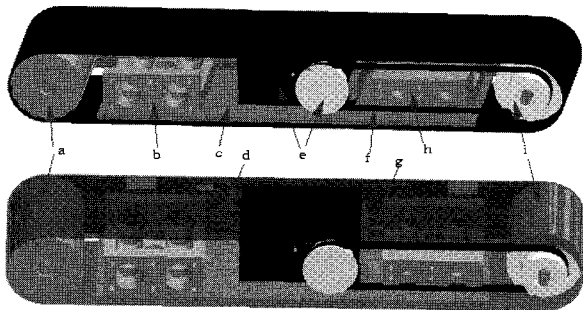


그림 3. CALEB III의 관절 구조.
Fig. 3. Joint actuated by two servo motors.

형 로봇 시스템의 경우 동시에 모든 면의 무한궤도 형 주행 장치를 같은 방향으로 회전시키는 것이 일반 적이었다. 하지만 본 연구에서 개발한 CALEB III는 각 몸체 모듈 주위의 4

개의 무한궤도 형 주행장치를 결합하여 각각 독립적으로 제어할 수 있다. 따라서 지면이나 장애물 등과 접촉한 면의 무한궤도형 주행장치만을 선택적으로 구동함으로써 에너지를 절감할 수 있다. 또한 경우에 따라 로봇 몸체 모듈 주위 무한궤도형 주행장치들을 각각 다른 방향으로 회전시킴으로써 주행 및 장애물 극복 등에 보다 많은 제어 융통성 구현이 가능하였다. 4개의 무한궤도 형 주행장치들은 각각 독립적으로 제어할 수 있다는 사실은 일부 무한궤도 형 주행장치가 고장 나더라도 정상 작동하는 다른 무한궤도 형 주행 장치를 이용하여 지속적인 작업을 수행하거나 조작자가 있는 곳으로 복귀가 가능하게 하였다.

동일한 구조의 무한궤도 형 주행장치들을 다수(12모듈) 이용하는 CALEB III의 구조적 특성상 추후 유지보수 및 운용의 용이성 확보할 수 있으며, 무한궤도 형 주행장치 모듈은 로봇 몸통모듈에 단지 고정되어 있고 모터제어용 신호선만 연결되는 단순한 구조이므로 작업현장 등에서도 무한궤도 형 주행장치 모듈들의 교체를 수분 내에 신속히 수행할 수 있다는 특징이 있다. 그림 4는 무한궤도 형 주행장치 모듈을 설명하며 그림 5는 이와 같은 무한궤도 형 주행장치 모듈들을 로봇의 몸체 모듈의 4면에 장착한 모습을 보여주는 개념도이다.



- a: 주행용 무한궤도 고정용 폴리(아이들링 폴리).
- b: 무한궤도 형 주행장치 좌우 지지 판 고정상자.
- c: 무한궤도 형 주행장치 하부 지지 판.
- d: 무한궤도 형 주행장치 좌우 지지 판.
- e: 무한궤도 형 주행장치 구동용 액츄에이터.
- f: 동력전달 용 소형 타이밍 벨트.
- g: 동력전달용 소형 타이밍 벨트 장력조절용 나사.
- h: 무한궤도 형 주행장치 좌우 지지 판 고정상자.
- i: 주행용 무한궤도 고정용 폴리(구동 폴리).

그림 4. 무한궤도형 주행장치 모듈.

Fig. 4. Caterpillar module.

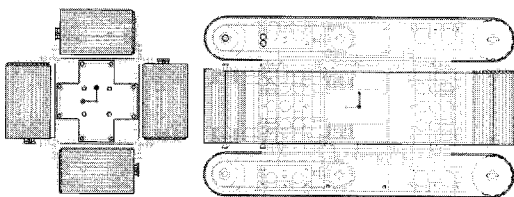


그림 5. 로봇 몸체 모듈의 4면에 장착한 무한궤도 형 주행장치 개념도.

Fig. 5. Front and side view of single module.

III. CALEB III의 제어 시스템

1. 로봇 제어부 구현

CALEB III의 제어방식은 CALEB III이 탐사 로봇이라는 역할에 적합하도록 무선의 원격제어시스템으로 설계되었다. 그림 6은 CALEB의 제어 시스템 구조를 보여주고 있다. 전체 제어 시스템의 구조는 그림 6과 같이 이동로봇제어시스템과 원격제어 시스템으로 구성되어 있다. 이동로봇시스템은 메인 제어기를 중심으로 관절 모터 제어, 무한궤도 제어 및 센서 데이터 처리부분으로 구성되어 있으면 메인 제어기로는 AVR128을 이용하였다. 원격 제어 시스템은 PC 기반으로 로봇에서 전송하는 영상을 출력하는 부분과 로봇의 캐터필러와 관절모터에 명령을 주는 부분과 로봇으로 구성되어 있다. 두 제어 시스템간의 통신은 bluetooth를 이용한다. Bluetooth를 이용함으로써 두 시스템간 무선통신으로 100~150m까지 로봇을 제어할 수 있다. 원격 제어 시스템에서 전달받은 캐터필러 및 관절 모터 데이터를 로봇의 메인 제어기에서 두 명령을 분류 후 캐터필러에게는 PWM으로 제어 명령을 각 관절 모터에게는 RS485방식으로 제어명령을 내린다. RS 485방식을 사용함으로써 메인 제어기에서 각 관절 모터마다 제어신호선을 연결 할 필요 없이 하나의 485버스를 이용하여 단 2개의 제어신호와 2개의 전원 선을 이용하여 다수의 관절 모터를 제어 할 수 있는 장점을 가지게 되었다.

CALEB III는 2개의 리튬 폴리머 배터리가 내장되어 있어 외부의 전원을 공급받지 않고도 로봇을 움직일 수 있고 장시간 구동이 필요할 경우는 외부 전원을 공급받아 움직일 수 있다.

2. 원격 조작 시스템 구현

조작자의 시야에서 벗어나 로봇이 구동하는 경우 조작자가 직접 로봇의 상태를 확인하는 것이 불가능하다. 본 연구에서는 조작자가 로봇을 직접 보지 않더라도 로봇을 제어하기 쉽도록 원격지 프로그램을 개발하였다. 조작자는 원격지 프로그램을 이용하여 로봇의 각 관절에 대한 위치 명령 캐터필러 모듈에 주행속도 명령을 전송할 수 있으며 로봇 측으로부터는 로봇의 작업공간 주변 영상 및 각 관절의 위치 및 모터 상태정보 등을 수신하여 로봇의 원격제어에 활용할 수 있다. 그림 7은 원격제어 스테이션의 GUI화면 구성을 보여주

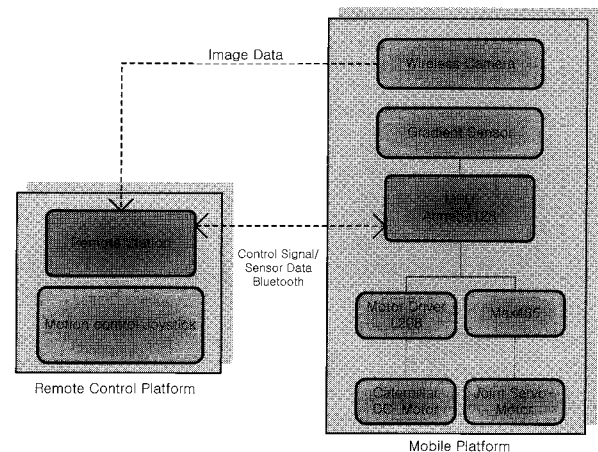


그림 6. 제어 시스템 구조.

Fig. 6. Structure of control system.

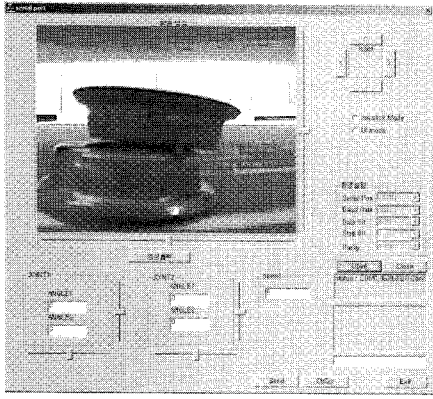


그림 7. 원격제어스테이션의 GUI 화면.
Fig. 7. GUI of remote control station.

고 있다. 그림 7로부터 로봇 측으로부터 전송된 로봇 작업공간의 주변 영상 및 각종 관절 모터 위치 및 각 캐터필러 모듈의 속도를 확인할 수 있다.

IV. 기구학적 해석

Omni-tread 형태의 뱀 로봇은 그림 8에서 보이는 것과 같이 articulated steering[5]을 이용하여 분석을 하였다. 본 논문에서는 각각 모듈을 하나의 점으로 근사화 하여 모델링을 실시하였다.

1. 직진 및 커브 주행

$$\theta_f - \theta_m = \phi_1 \tag{1}$$

$$\theta_m - \theta_r = \phi_2 \tag{2}$$

수식 (1), (2)의 ϕ_1, ϕ_2 는 각 모듈의 각속도 $\omega_f, \omega_m, \omega_r$ 로 아래와 같이 다시 표현 할 수 있다.

$$\omega_f - \omega_m = \frac{d\phi_1}{dt} \tag{3}$$

$$\omega_m - \omega_r = \frac{d\phi_2}{dt} \tag{4}$$

각 3개의 모듈의 각각 속도 ${}^f v_f, {}^m v_m, {}^r v_r$ 는 아래와 같이 표현 가능하다.

$${}^f v_f = [v_f \ 0]^T \tag{5}$$

$${}^m v_m = [v_m \ 0]^T \tag{6}$$

$${}^r v_r = [v_r \ 0]^T \tag{7}$$

첫 번째 모듈의 속도와 각속도를 이용하여 첫 번째 관절 C_1 의 속도 벡터(${}^f v_{c_1}$)를 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$${}^f v_{c_1} = \left[v_f \quad -\frac{L}{2}\omega_f \right]^T \tag{8}$$

두 번째 모듈의 속도와 각속도를 이용하여 첫 번째 관절 C_1 의 속도 벡터(${}^m v_{c_1}$)를 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$${}^m v_{c_1} = \left[v_m \quad \frac{L}{2}\omega_m \right]^T \tag{9}$$

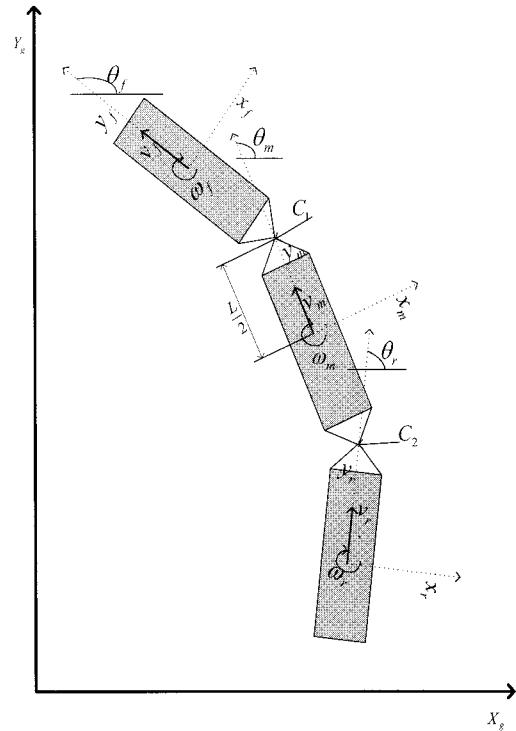


그림 8. Omni-tread 형태의 뱀 로봇의 좌표 정의.
Fig. 8. Coordinate of omni-tread type snake robot.

두 번째 모듈의 속도와 각속도를 이용하여 두 번째 관절 C_1 의 속도 벡터(${}^m v_{c_2}$)를 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$${}^m v_{c_2} = \left[v_m \quad -\frac{L}{2}\omega_m \right]^T \tag{10}$$

세 번째 모듈의 속도와 각속도를 이용하여 두 번째 관절 C_2 의 속도 벡터(${}^r v_{c_2}$)를 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$${}^r v_{c_2} = \left[v_r \quad \frac{L}{2}\omega_r \right]^T \tag{11}$$

${}^f v_{c_1}$ 과 ${}^m v_{c_1}$ 는 서로 연결된 같은 관절 C_1 의 속도를 표현 하고 있고 역시 ${}^m v_{c_2}$ 과 ${}^r v_{c_2}$ 도 서로 연결되어있는 같은 관절 C_2 의 속도를 나타내고 있으므로 각각 아래와 같이 다시 정의 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ -\omega_f \frac{L}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \sin \phi_1 \\ -\sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \frac{L}{2} \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} v_m \\ -\omega_m \frac{L}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & \sin \phi_2 \\ -\sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \frac{L}{2} \end{bmatrix} \tag{13}$$

두 식을 풀어서 정리를 하면 (14), (15), (16)을 얻을 수가 있다.

$$\omega_f = \frac{1}{1 + \cos \phi_1} \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{2}{L} \tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right) v_f \tag{14}$$

$$\omega_f = \frac{1}{1 + \cos \phi_1} \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{2}{L} \tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right) v_f \tag{15}$$

$$v_m = v_r - \frac{L}{2} \tan\left(\frac{\phi_2}{2}\right) \frac{d\phi_2}{dt} \quad (16)$$

첫 번째 모듈의 위치 (x, y) 와 각도 (θ_f) 는 아래와 같이 표현된다. 여기서 $x_{f0}, y_{f0}, \theta_{f0}$ 는 로봇의 초기 위치이다.

$$x_f(t) = x_{f0} + \int v_f(t) \cos \theta_f(t) dt \quad (17)$$

$$y_f(t) = y_{f0} + \int v_f(t) \sin \theta_f(t) dt \quad (18)$$

$$\theta_f(t) = \theta_{f0} + \int w_f(t) dt \quad (19)$$

수식 (17), (18), (19)를 이용하여 로봇의 속도와 각 관절 각도를 이용하여 로봇의 진행방향 및 위치를 추정할 수 있다.

2. 안정도 해석

그림 9의 로봇의 무게 중심을 계산하기 위해 그림 10과 같이 좌표 계를 설정했고 표 2의 DH-parameter를 이용해 로봇의 local-coordinate에서 각 관절 각도에 따른 각 모듈의 무게 중심의 좌표를 계산 후 각 무게 중심들의 평균을 이용하여 통합 무게 중심을 구했다.

구해진 통합무게 중심을 모듈의 접지 면을 이용하여 static stability analysis[9]를 이용하여 현재 상태에서 각 관절각도가 얼마만큼 움직이면 unstable 해지는지를 계산하여 고의로 로봇을 unstable하게 만들어 로봇이 rolling motion[6]을 취하게 하였다.

그림 11에서 접지 다각형의 꼭지점을 아래와 같이 정의하고

$$p_i = [p_x, p_y, p_z], \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (20)$$



그림 9. Omni-tread 형태의 뱀 로봇.
Fig. 9. Profile of omni-tread type snake robot.

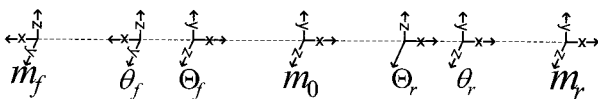


그림 10. 좌표 계 설정.
Fig. 10. 3D coordinate of omni-tread type snake robot.

표 2. DH-계수.
Table 2. DH-parameter of caleb III.

Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i
-3	0	0	-13	0
-2	θ_f	-90	-3	0
-1	Θ_f	0	-13	0
1	Θ_r	0	13	0
2	θ_r	90	3	0
3	0	0	13	0

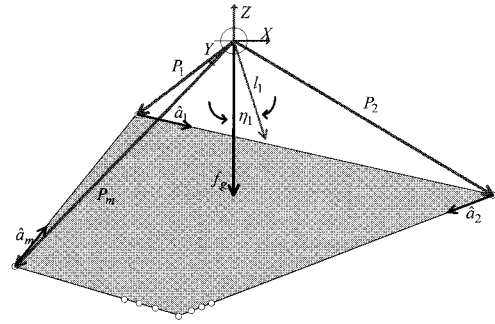


그림 11. 정지 상태에서 안정도 해석.
Fig. 11. Static stability analysis.

로봇과 지면과 접촉한 점의 좌표는 (20)과 같이 표현 하고 각 접촉점은 시계방향으로 돌아가면서 정의한다.

$$a_i = p_{i+1} - p_i, \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (21)$$

$$a_m = p_1 - p_m \quad (22)$$

$$l_i = (1 - \hat{a}_i \cdot \hat{a}_i^T) p_{i+1} \quad (23)$$

$$\hat{a} = a / \|a\|$$

$$\eta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{f}_g \cdot \hat{l}_i), \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (24)$$

$$\sigma_i = \begin{cases} +1, & (\hat{f}_i \times \hat{l}_i) \cdot \hat{a}_i < 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$a = \min(\eta_i), \quad i = \{1, \dots, m\} \quad (25)$$

a 의 값이 0보다 크면 현재 로봇의 자세는 안정한 것이고 0보다 작으면 로봇은 불안정한 상태이다. 이러한 안정도 해석은 다음 장에서 소개하는 롤링 모션을 만들어 내기 위한 경로계획의 구현 도구로 사용된다.

V. 구동 실험

1. 직진 및 커브 주행

그림 1(a)의 작업공간(A와 B사이의 거리는 120cm, B와 C사이의 거리는 36cm)을 전 후진 및 커브 주행을 이용하여 주행 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에는 수식 (17), (18), (19)를 이용하였으며 시뮬레이션을 검증하기 위해 실제 로봇을 시

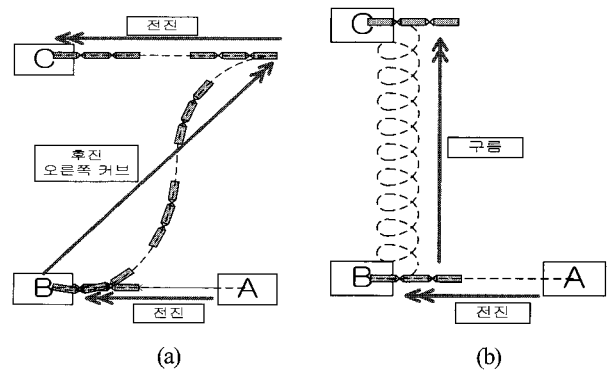
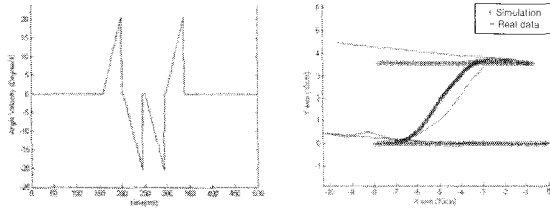


그림 12. (a) 직진 및 커브를 이용한 경로 (b) 직진 및 rolling 을 이용한 경로.
Fig. 12. (a) Path for straight and curved motion (b) Path for rolling motion.

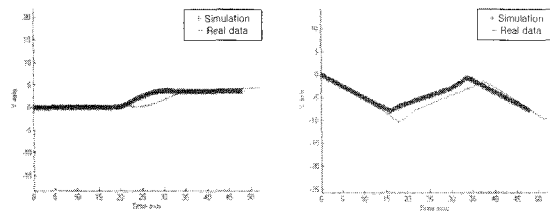
표 3. 로봇 주행 조건.

Table 3. Condition for experiments.

Parameter	
Speed	8cm/s
Simulation time	52초
초기 위치	$x=0, y=0$
초기: θ_f	0rad



(a) 관절모터의 각속도 변화 (b) 로봇의 궤적



(c) 시간에 따른 X좌표의 변화 (d) 시간에 따른 Y좌표의 변화

그림 13. 시뮬레이션과 실제 주행데이터.

Fig. 13. Simulation and experiment data.

플레이션 조건을 표 3과 같이 입력하고 로봇이 구동하는 모습을 공중에서 촬영하였다. 본 실험의 목적은 첫째 시스템의 모델링의 결과와 실제 실험결과가 얼마나 일치 하는지 확인 하기 위함이고 둘째 직진과 커브 주행의 모델링결과 보다 rolling모션의 모델링 결과를 경로 계획에 추가함으로써 더 효과적인 경로 계획이 가능함을 보이는 것이다.

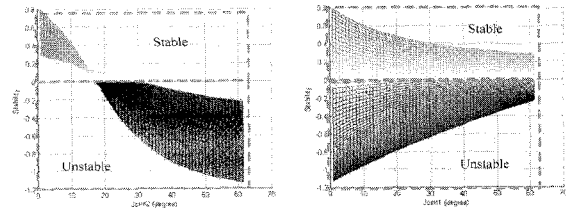
실제 실험 데이터를 얻기 위해 로봇에는 마커를 장착하고 천장에 카메라를 설치후 움직이는 로봇을 촬영하였다. 촬영된 영상에서 마커의 위치를 로봇의 중심좌표로 취했다. 시뮬레이션 및 실제주행에 사용한 파라미터는 표 3과 같다.

그림 13(a)의 시뮬레이션 결과와 실제 로봇 주행 데이터 결과 비교는 위와 같다.

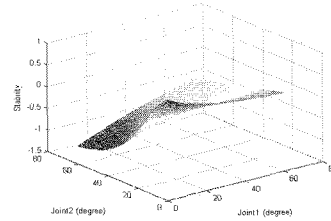
위 데이터는 A에서 출발하여 B를 거쳐 C로 도달하는 시뮬레이션과 실제 로봇 결과를 비교 하였다. 로봇의 각 모듈의 무게가 모두 다르기 때문에 시뮬레이션결과와 다르게 로봇의 실제 무게 중심이 로봇주행 실험에 영향을 미쳐 실제 robot 주행결과와 시뮬레이션결과가 차이가 생기는 것으로 생각된다.

2. 롤링 모션(rolling motion)

로봇이 한번 Unstable하게 만들 때 마다 11.5×3.14/4 만큼 회전방향으로 이동하는 것을 예상할 수 있으나 stability가 무너지는 때의 robot의 3차원 좌표를 예측하기가 난해하기 때문에 본 논문에서는 Θ, θ 에 따른 안정/불안정 영역만 표시를 하였다. 그림 15의 각 자세는 그림 14의 구성공간에서 로봇의 Θ, θ 를 안정한 영역에서 불안정한 영역으로 옮겼다



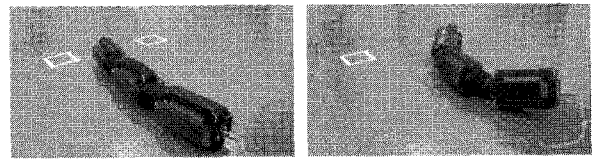
(a) Stability of Θ (b) Stability of θ



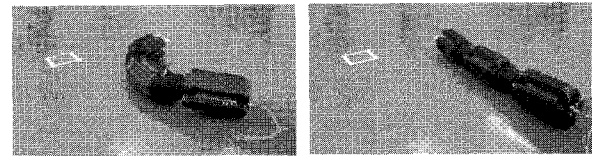
(c) stability of Θ and θ

그림 14. 두 개의 관절의 Θ, θ 의 변화에 따른 stability.

Fig. 14. Stability of changing Θ, θ about two joint.



(a) step 1 (b) step 2



(c) step 3 (d) step 4

그림 15. Step별 rolling motion.

Fig. 15. Rolling motion of each step.

가 다시 안정한 영역으로 돌아오는 각 자세를 나타낸 것이다. 이와 같이 로봇을 그림 15의 자세들을 반복하면서 롤링 모션을 하게 된다.

그림 14는 그림 9의 Θ, θ 의 변화에 따른 안정도를 그린 것이다. 그림 14(a)의 불안정 영역은 15도 이상부터 나타나지만 그림 14(b)의 불안정 영역은 0도 이상부터 나타나기 때문에 Θ 보다 θ 가 안정도에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. Θ 은 관절을 위 아래로 움직이는 것이고 θ 는 관절을 양 옆으로 움직이는 것이다. 실제로 무게 중심을 로봇과 지면의 접지면 밖으로 이동시키는 것은 앞의 모듈을 위아래로 드는 것보다 양 옆으로 움직이는 것이 더 많이 기여를 하게 됨으로 시뮬레이션 결과와 실제 물리적인 현상과 일치함을 확인할 수 있었다.

최초 직진주행 때만 실제 시뮬레이션과 실험결과가 유사하고 그 이후 오른쪽 왼쪽 커브 시 시뮬레이션과 실험결과가 많이 다름을 확인할 수 있었다. 하나의 모션에서 다른 모션으로 바뀔 때 다시 말하면 직진주행을 하다가 반대방향으로 커브모션을 취할 때 로봇의 관성에 의한 미끄러짐이 최초 예상하던 것보다 많음을 확인할 수 있었고 그런 순간 순간에

시뮬레이션과 실험데이터는 큰 오차를 보였다.

3. 실험결과 분석

실험목적이었던 ‘많은 modeling이 을 가지고 있을 때 더 효율적인 경로를 생성할 수 있다’는 가정은 그림 12(a)의 path를 따라가는 실험(실험 1)과 그림 12(b)의 path를 따라가는 실험(실험 2)의 결과를 분석한 결과 옳았음을 확인할 수 있었습니다. 실험 1의 수행시간은 평균 52초를 소요하였고 실험 2은 수행시간이 평균 32초를 소요한 것으로 확인 되었습니다. 실험 2가 실험 1에 비해 20초 정도 더 시간을 단축하였고 Power소모 측면에서 분석해 보아도 실험 1은 caterpillar모터를 최대 속도로 52초 동안 구동하였고 실험 2의 경우는 16초간 caterpillar모터를 최대속도로 구동하게 되어 46초 동안 caterpillar 모터의 파워소모를 줄일 수 있었다.

VI. 결론

본 논문은 협소공간 및 비정형적인 지형을 주행하기 알맞은 형태인 omni-tread 형태의 뱀 로봇을 제작하였으며 제작한 로봇에 대한 수학적 모델링을 하였고 실제 모델링 결과로 simulator를 제작하고 실제 실험결과와 비교하여 제안된 모델링이 옳음을 확인하였다. 위와 같이 4면에 caterpillar가 부착되어있고 각 관절이 2자유도를 가진 joint로 연결이 되어있는 구조를 가진 로봇은 좁은 장소에서도 자유롭게 움직일 수 있어서 배관 내부를 검사하기 용이 하며 자기 몸보다 큰 장애물들을 2자유도 관절을 이용해 극복 할 수 있어서 로봇이 주로 활동해야 할 장소가 협소하고 장애물이 많은 지역, 예를 들어 재난 구조용 로봇 이나 배관탐사용 로봇으로 활용이 가능하다. 또한 omni-tread 형태의 로봇이 구현 가능한 모든 움직임에 대해 modeling이 가능할 때 한가지 혹은 두 가지 움직임에 대해 modeling한 것보다 효율적인 경로계획이 가능함을 실험 1, 2를 통해 증명하였다. 추후연구로는 로봇의 lateral shifting(횡 방향 이동) rotating[4]등에 좀 더 정확한 모델링을 유도하려 한다. 또한, 로봇의 속도를 알 수 있는 센서와 내장

된 카메라에서 측정된 optical flow 등을 이용하여 실제 로봇의 속도를 측정하고 본 연구에서 제안된 모델을 활용하여 Kalman filter기법을 적용하여 보다 정교한 로봇의 위치를 추정하도록 한다.

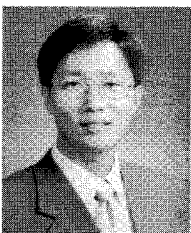
참고문헌

- [1] G. Granosik, M. Hansen, and J. Borenstein “The OmiTread serpentine robot for industrial Inspection and Surveillance.” *International Journal on Industrial Robotics, Special Issue on Mobile Robots*, vol. IR32-1, pp. 139-148, March 18th, 2005.
- [2] A. Crespi, A. Badertscher, A. Guignard, and A. J. Ijspeert, “AmphiBot I: An amphibious snake-like robot,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50, Issue 4, pp. 163-175, March 2005.
- [3] J. Koo, “Using atomic actions to control snake robot locomotion,” *CS 229 Machine Learning Final Project*, Autumn 2006.
- [4] J. G-Gomez, H. Zhang, E. Boemo, and J. Zhang, “Locomotion capabilities of a modular robot with eight pitch-yaw-connecting modules,” *The 9th International Conference on Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies for Mobile Machines*, CLAWAR 2006, Brussels, Belgium, September 12-14, 2006.
- [5] J. Y. Wong, *Theory of Groend Vehicles Second Edition*, John Willy & sons, Inc 1993.
- [6] H. Takahashi and Y. Konishi, “Path generation for autonomous locomotion of articulated steering wheel loader,” *Computer-aided civil and Infrastructure Engineering*, vol. 16, pp. 159-168, 2001.
- [7] J. Casper and R. Murphy, “Human-robot interaction during the robot-assisted urban search and rescue response at the world trade center,” *IEEE Trans. On SMC*, vol. 33, no. 3, pp. 367-385, 2003.
- [8] S.-J. Oh, H.-J. Kwon, J. H. Lee, and H. Choi” Mathematical modeling for omni-tread type snake robot,” ICCAS 2007.
- [9] K. Iagnemma, S. Dubowsky: *Mobile robots in Rough Terrain*. New York: Springer. 2004.



오 상 진

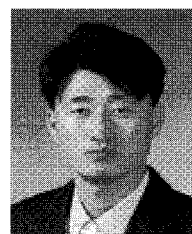
1980년 8월 15일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 메카트로닉스 공학과 석사 과정 재학중. 관심 분야는 지능 로봇 시스템의 설계, 협소 공간 탐사로봇, 위치추정, 경로계획 및 영상처리.



최 준

1961년 3월 18일생. 1983년 숭실대 전산과 졸업. 2002년 충남대학교 컴퓨터 공학 석사. 1982년 12월~2000년 2월 한국 전자 통신 연구원. 1991년 5월~1993년 7월 Alenia Spazio Spa. 1999년 1월~1999년 12월 APSCC 위성통신 전문위원. 2002

년 3월~현재 (주)코어벨 대표이사. 2007년~현재 충남대학교 메카트로닉스 공학부 겸임교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 컴퓨터 네트워크, 특수 목적 로봇.



이 지 홍

1960년 4월 21일생. 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사. 1983년~1988년 현대중공업 로봇사업부 연구원. 1991년 한국과학기술원 연수연

구원. 1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심 분야는 로보틱스, 지능제어, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템.