

# 뱀의 구동원리를 이용한 4족보행 로봇의 개발

## Development of Quadrupedal Robot Mimicking the Motion of Snake

김성현<sup>1</sup>·김예승<sup>1</sup>·김민송<sup>1</sup>·송진혁<sup>1</sup>·윤동원<sup>†</sup>

Seonghyeon Kim<sup>1</sup>, Yeseung Kim<sup>1</sup>, Minsong Kim<sup>1</sup>, Jinhyeok Song<sup>1</sup>, Dongwon Yun<sup>†</sup>

**Abstract:** Snake robots are slower than wheeled robots or legged robots, while they have an excellent terrainability in a disastrous area. Considering their advantages and disadvantages, a legged robot whose legs are snake robots, 'Quadnake' was proposed in this research. Five motions of the snake were analyzed. Applying these motions, Quadnake could implement eight kinds of motions which snake robots and quadruped walking robots can implement. As a result of it, Quadnake can have the advantages of both a snake robot and a walking robot. It is expected to move stably in a harsh terrain with snake's motion and move fast with walking.

**Keywords:** Snake Robot, Quadruped Walking Robot, Hyper-Redundant Robot, Side Wind Motion, Sinus Lifting Motion

### 1. 서론

로봇이 움직이는 형태에는 여러 가지가 있다. 그 중 가장 많은 형태는 바퀴와 다리이다. 바퀴가 달린 로봇은 빠른 속도를 낼 수 있지만 다리가 달린(legged) 로봇은 바퀴가 달린(wheeled) 로봇보다 거친 표면이나 험준 지형에서 잘 움직일 수 있다는 장단점을 가지고 있다<sup>1</sup>.

생체모방 로봇은 오랜 세월을 거쳐서 생물이 살아가는 환경에 최적화된 움직임을 모사하기에 특정 환경에서 뛰어난 이동성을 보인다<sup>2,3</sup>. 그 중에서도 뱀 로봇은 초여유자유도의 이동형 로봇으로, 굉장히 많은 종류의 모션을 할 수 있으며 땅에 닿는 부분이 많아 움직임이 안정적이다<sup>4</sup>. 게다가 뱀 로봇은 거칠고 좁은 지형에서 다리가 달린 로봇 보다도 더 잘 움직일 수 있으므로, 무너진 빌딩 등의 재난현장에서 구조용으로 많은 기대를 받고 있다<sup>5</sup>. 그렇지만 뱀 로봇은 일반 보행 로봇 보다도 더 느리다는 단점이 있다<sup>6</sup>.

그 동안 많은 뱀 로봇들이 앞서 서술한 장점을 극대화하고 단점은 최소화하기 위해 연구되어 왔다. 수동바퀴를 도입하여

sideslip을 제한하거나<sup>7-9</sup> 자연의 뱀을 그대로 모방하는 형식으로 로봇의 이동성을 향상시키려는 연구와<sup>10,11</sup> 모듈형의 로봇을 통해 가장 최적화된 뱀 로봇의 형태를 찾으려는 연구들이 진행되어 왔다<sup>12</sup>.

하지만 우리는 뱀 로봇에만 국한되지 않고 뱀의 움직임 자체에 집중하여 그 장점을 최대한 활용하려고 하였고 일반 보행로봇에 그 움직임을 접목시키려고 시도하였다. 이에 우리는 다리가 뱀의 형태를 띠고 있는 보행로봇 Quadnake를 구상하였고 뱀 로봇의 다재 다능한 움직임을 적용하여 각 로봇의 장점을 최대한 활용하고자 하였다.

이 논문에서는 Quadnake의 기구학적 모션 플래닝과 시뮬레이션, sideslip을 최소화하기 위한 비등방성 마찰판, 그리고 Quadnake의 움직임에 대하여 연구하여 보았다.

### 2. 이론적 분석

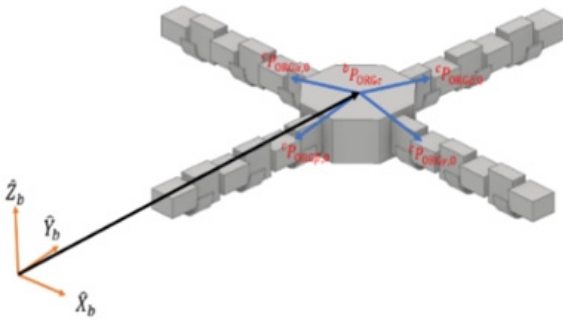
#### 2.1 기구학적 분석

Quadnake에서 로봇의 각 다리 한 쪽을 독립된 뱀 로봇이라고 볼 수 있다. 따라서 다리 하나를 분석하고 이들의 평균 값으로 로봇의 head angle과 로봇의 속도에 대한 기구학을 분석했다[Fig. 1].

Received : May. 16. 2019; Revised : Jul. 2. 2019; Accepted : Jul. 30. 2019

1. Undergraduate Student, DGIST, Daegu, Korea (ksh0522, rhgkrsus1, mini1774, songjinhuk@dgist.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: Department of Robotics, DGIST, Daegu, Korea (mech@dgist.ac.kr)



[Fig. 1] Kinematic model of Quadnake

고정된 기준 좌표계는  $b$ 로 나타냈고 로봇 몸체의 중심의 좌표계는  $c$ 로 나타냈다. Quadnake가 4개의 다리를 가진 것을 고려해 각 다리의 좌표계를  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 로 나타냈다.

그러므로 joint  $i$ 의 위치와 방향에 관한 프레임은 식 (1)의 homogeneous transformation matrix로 표현할 수 있다<sup>[13]</sup>.

$${}^bT = {}^bT_{\chi,0} {}^cT_{\chi,i} {}^0T \quad (1)$$

$\chi$ 는 각 다리에 해당하는 좌표 표기  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 를 의미한다. 다리 하나가 향하는 방향은 각 링크와 글로벌 좌표 사이의 각도의 평균으로 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N {}^b\theta_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} {}^b\theta_{i,x} \\ {}^b\theta_{i,y} \\ {}^b\theta_{i,z} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos^{-1} \left( \frac{{}^b\hat{X} \cdot ({}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}})}{\| {}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}} \|} \right) \\ \cos^{-1} \left( \frac{{}^b\hat{Y} \cdot ({}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}})}{\| {}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}} \|} \right) \\ \cos^{-1} \left( \frac{{}^b\hat{Z} \cdot ({}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}})}{\| {}^bP_{OR\bar{G}+1} - {}^bP_{OR\bar{G}} \|} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

$N$ 은 다리 하나당에 링크의 개수이다.  ${}^bP_{OR\bar{G}}$ 는  $b$  좌표계에 서 본  $i$  좌표계의 원점의 위치를 의미하며,  $i = N$ 이면  $N$ 번째 좌표계의 원점의 위치,  $i = N+1$ 이면  $N$ 번째 링크의 끝단의 위치를 나타낸다.  ${}^bP_{OR\bar{G}}$ 는 다음과 같이 구한다.

$${}^bP_{OR\bar{G}} = {}^bT_{i-1} {}^iP_{OR\bar{G}} \quad (3)$$

로봇 전체의 heading angle 값은 다음과 같다.

$$\bar{\theta}_{Robot} = \frac{\bar{\theta}_\alpha + \bar{\theta}_\beta + \bar{\theta}_\gamma + \bar{\theta}_\delta}{4} \quad (4)$$

다음은 무게중심에 대한 분석이다. 모든 링크의 질량이 같다는 가정하에 무게중심은 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} {}^cP &= \frac{1}{Nm} \begin{bmatrix} m \sum_{i=1}^N {}^c x_{i,CM} \\ m \sum_{i=1}^N {}^c y_{i,CM} \\ m \sum_{i=1}^N {}^c z_{i,CM} \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \\ &= \frac{1}{N} \begin{bmatrix} e^T {}^c x_{CM} \\ e^T {}^c y_{CM} \\ e^T {}^c z_{CM} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$m$ 은 링크 하나의 무게,  ${}^c x_{i,CM}, {}^c y_{i,CM}, {}^c z_{i,CM}$ 은 각 링크의 무게중심(center of mass)의 좌표를 나타내며,  $e^T$ 는 다음의  $1*N$  벡터를 나타낸다.

$$e^T = [1, 1, 1, \dots, 1] \quad (6)$$

총 무게중심의 위치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$${}^cP_{Robot} = \frac{e^T m_\alpha P_\alpha + e^T m_\beta P_\beta + e^T m_\gamma P_\gamma + e^T m_\delta P_\delta + m_{Body} {}^cP_{Body}}{e^T m_\alpha + e^T m_\beta + e^T m_\gamma + e^T m_\delta + m_{Body}} \quad (7)$$

$m_{Body}$ 와  ${}^cP_{Body}$ 는 각각 로봇 몸체의 질량과 로봇 몸체의 무게중심을 나타낸다. 만약 모든 링크의 질량이 같고, 몸체의 무게 중심이 몸체의 중심과 같으면 무게중심의 위치는 다음과 같다.

$${}^cP_{Robot} = \frac{m(P_\alpha + P_\beta + P_\gamma + P_\delta)}{4Nm + m_{Body}} = \frac{P_\alpha + P_\beta + P_\gamma + P_\delta}{4N + m_{Body}/m} \quad (8)$$

만약  $m_{Body}$ 가  $4Nm$ 보다 매우 작다면, 분모의  $m_{body}/m$  항을 무시할 수 있을 것이다. 위의 무게중심을 글로벌 좌표계로 나타내면 다음과 같이 나타난다.

$${}^bP_{Robot} = {}^bT {}^cP_{Robot} \quad (9)$$

위의 무게중심을 이용하여 로봇 전체의 tangential 속도를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{v}_i &= {}^b\dot{P}_{Robot,x} \cos \bar{\theta}_{Robot,x} + {}^b\dot{P}_{Robot,y} \cos \bar{\theta}_{Robot,y} \\ &\quad + {}^b\dot{P}_{Robot,z} \cos \bar{\theta}_{Robot,z} \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.2 뱀의 움직임 분석

뱀의 대표적인 motion으로는 lateral undulation이 있다<sup>[1]</sup>. 이 움직임의 경우, 뱀의 비늘에서의 비등방성(anisotropy)의 마찰 특성과 유동적인 무게의 분배가 중요하게 작용한다<sup>[3]</sup>. 비등방성은 앞뒤방향의 마찰계수보다 좌우방향의 마찰계수가 더 큰 것으로, 뒤에서 앞으로 진행하는 수평방향의 sine wave의 움직임을 구현하는데 도움을 준다.

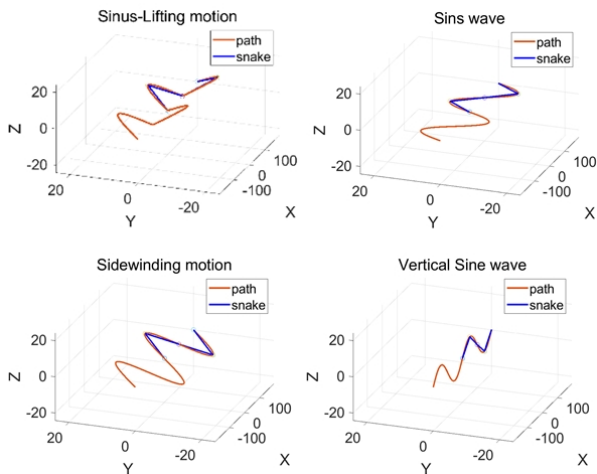
유동적인 무게 분배 특성은 빠른 속도로 움직이는 뱀들에게 나타나며 비등방성을 증가시킨다. Sinus-lifting motion은 sine 파동에서 최고, 최저점이 땅에서 살짝 띄워지고 다른 부분은 눌러지는 모션이며<sup>[4]</sup>, 이를 통해 파장의 특정한 부분에 무게가 집중되어 비등방성이 커진다. 이 motion은 단순한 sine wave에 비해 약 50% 더 효율적이다<sup>[5]</sup>.

그 밖의 움직임으로는 sidewinding motion이 있는데 이 움직임은 비스듬히 기울어진 모양의 sine wave를 통해 앞뒤가 아니라 양옆으로 이동하는 motion이다<sup>[6]</sup>. 그리고 이는 일반적인 sine wave motion 보다 더 효율적이다<sup>[5]</sup>.

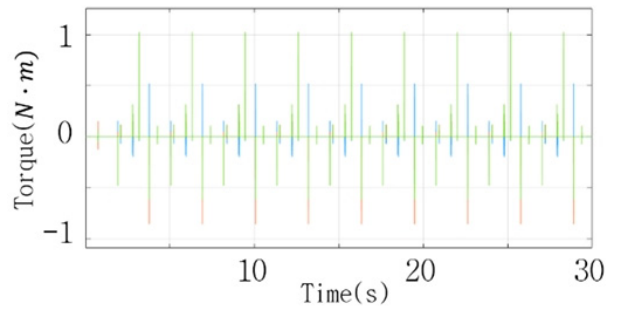
움직임 분석 후에는 뱀 로봇에 구현할 4가지의 모션을 정하고 각 모션들을 수식화 한 뒤, MATLAB을 이용하여 2D와 3D로 시뮬레이션 하였다[Table1][Fig. 2].

[Table 1] Equations of each motion

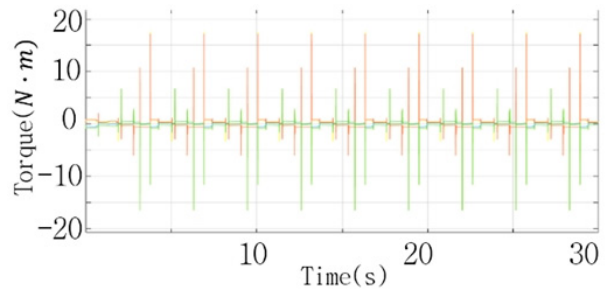
Motion	Top view (x-y plane)	Side view (x-z plane)
Sinus-lifting motion	$A \sin(Bx)$	$ A \sin(Bx) $
Sidewinding motion	$A \sin(Bx)$	$A \sin(Bx)$
Sine wave	$A \sin(Bx)$	$z = 0$
Vertical sine wave	$y = 0$	$A \sin(Bx)$



[Fig. 2] Path simulation of each motions



[Fig. 3] time-torque graph of horizontal-directed motor of vertical sine wave



[Fig. 4] time-torque graph of vertical-directed motor of vertical sine wave motion

## 2.3 시뮬레이션

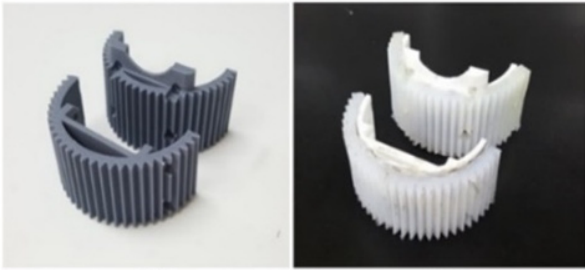
앞서 진행한 기구학적 분석과 동작 분석을 바탕으로 Simscape와 Simulink를 이용하여 실제 뱀로봇에 필요한 토크를 중심으로 시뮬레이션을 진행하였다 [Fig. 3][Fig. 4].

지면에 계속해서 부딪히는 수직 방향의 모터에서는 계속하여 오버슛이 나타나는 것을 확인했다. 이 오버슛은 수치적인 에러로써 이는 무시 될 수 있으며, 각 방향의 모터들에 걸리는 토크는 최대 1 Nm 정도로 이를 고려하여 각 관절에 들어가는 모터를 선정하였다.

## 3. 로봇의 설계 및 제작

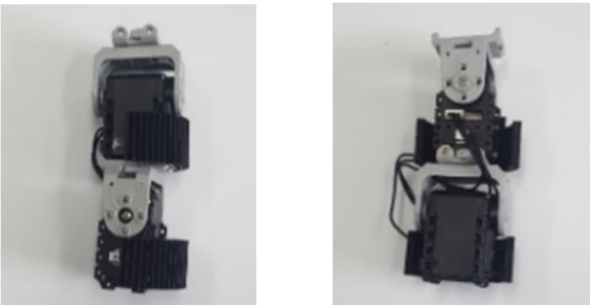
### 3.1 뱀로봇의 피부구조

본 절에서는 뱀의 모션에 의한 추진력을 생성하기 위한 비등방성 마찰특성을 가지는 피부를 다룬다. 먼저 [Fig. 5(a)]와 같이 일반 PLA 재질을 활용하여 피부구조를 만들었다. soft material의 경우 마찰계수의 비등방성을 더 크게 만들 수 있기 때문에<sup>[17]</sup> 이를 위하여 PLA 판과 경도가 Shore A 40인 실리콘을 혼합하여 다른 한 종류의 피부구조를 더 만들었다. 표면에 비등방성을 구현하는 무늬를 넣었고, 다양한 동작 시, 발판이 골고루 바닥에 닿도록 원통형으로 제작하였다[Fig. 5].



(a) (b)

[Fig. 5] Skin of the snake robot( (a) is skin made of PLA, (b) is skin made of PLA and silicon)



[Fig. 6] Unit module of the snake robot



[Fig. 7] Image of the snake robot

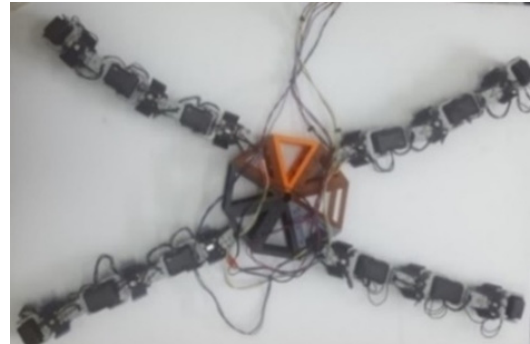
### 3.2 뱀 로봇의 구동모듈

뱀 로봇은 수동 바퀴나 능동 추진 장치 등을 부착하여 앞으로 진행하기도 하지만<sup>6)</sup> 이런 외부 장치가 달린 뱀의 형태는 다리의 형태로 쓰기에 적합하지 않다. 따라서 조인트 이외에 아무런 장치가 달리지 않은 형태를 쓰기로 하였다.

제작의 편의성과 앞서 분석한 동작들의 원활한 구현을 위해 우리는 두 조인트를 직각으로 붙인 형태를 하나의 모듈로써 정하였다. 이를 연속적으로 이어 붙인 형태를 뱀 로봇으로 하였고 실험을 위한 실제 뱀 로봇에는 5개의 모듈의 사용하였다[Fig. 6][Fig. 7]. 각 모듈을 이루는 모터로는 로보티즈사의 AX-12A를 사용하였다. 이 모터의 stall torque는 1.5 N·m 이고 한 모듈의 무게는 약 70 g으로 사이즈는 0.07 m X 0.04 m X 0.04 m로 선을 포함하지 않은 뱀 로봇의 무게는 700 g이다.

### 3.3 Quadnake

앞서 설계한 뱀 로봇을 8각형 몸체에 일정 간격으로 부착



[Fig. 8] Image of the Quadnake

시키는 형식으로 Quadnake를 설계하였다. 하지만 각 다리에 사용된 모듈의 개수는 보행의 편의성을 고려하여 각 3개로 조정하였다[Fig. 8]. 총 무게는 약 2600 g로 각 다리의 길이는 약 0.4 m이다. 8각형 몸체의 모서리의 길이는 약 0.08 m, 높이는 0.06 m이다.

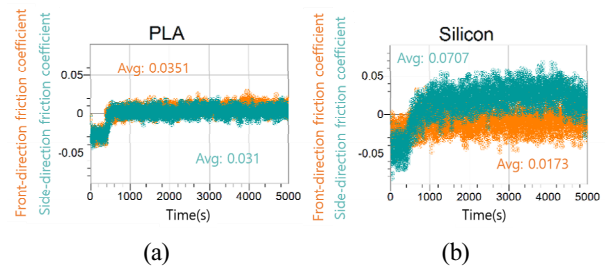
## 4. 실험

### 4.1 피부 구조의 마찰특성

앞서 설계하고 제작한 두 종류의 발판의 비등방성을 확인하기 위해 마찰계수를 측정하는 실험을 진행하였다. 그 결과 일반 PLA 발판에서는 유의미한 결과를 얻을 수 없었지만, 실리콘을 붙여서 만든 발판에서는 무늬결의 수평방향과 수직방향의 마찰계수가 유의미한 차이를 띄어서 더 큰 비등방성을 확인할 수 있었다[Fig. 9].

### 4.2 뱀형 구동의 기초실험

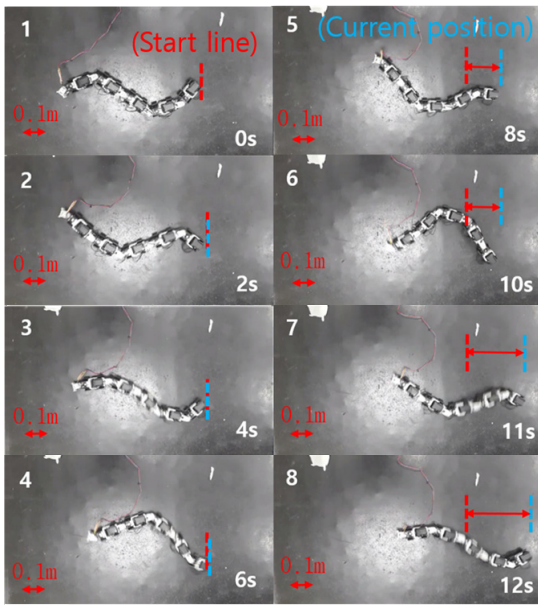
앞서 분석한 뱀의 동작들은 기본적으로 sine wave를 바탕으로 두고 있으므로 가장 먼저 뱀 로봇이 수평, 수직으로 sine



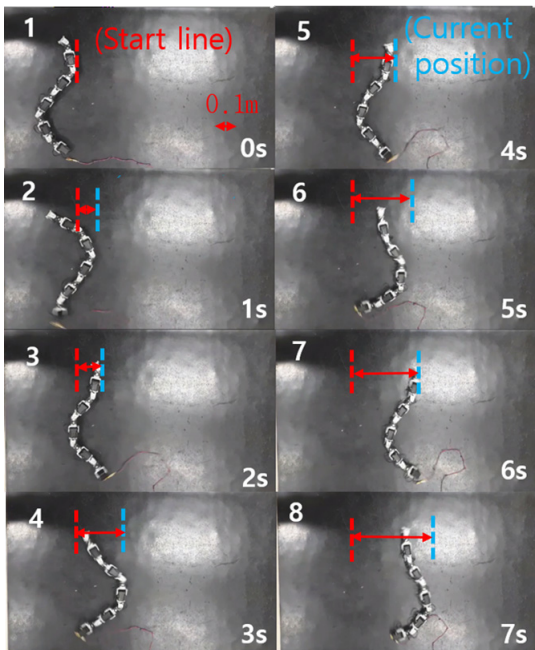
[Fig. 9] Graph of the result of the friction factor experiment. (a) is for PLA skin and (b) is for PLA & silicon skin. Blue points are vertical direction's friction factor and red points are horizontal direction's

wave에 따라서 움직이도록 하였다. 동작의 구현은 앞서 시물레이션 한 그래프의 기울기에 비례한 값을 순서대로 각 조인트들이 위치값으로 가지게 하여 구현하였다<sup>18)</sup>. 그 후 나머지 동작들을 구현하였다[Fig. 10].

구현한 동작들을 실험한 결과 시물레이션 한 대로 움직이는 것을 확인할 수 있었고, 수평 방향의 Sine wave 동작의 경우 비등방성의 차이로 인하여 sinus lifting motion보다 이동이 느린 것을 확인할 수 있었다.



(a)

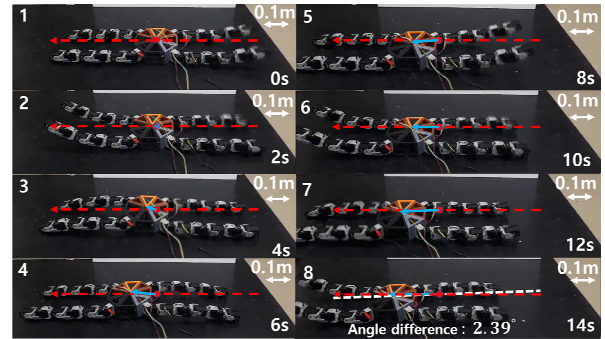


(b)

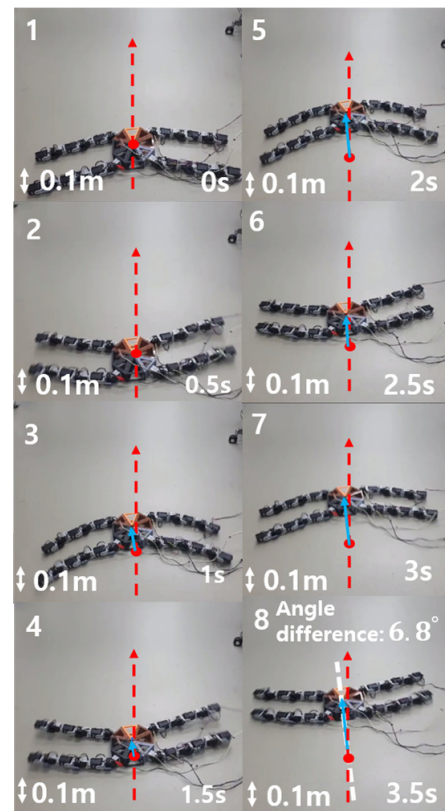
[Fig. 10] (a) is Sinus lifting motion of the snake robot, (b) is Sidewinding motion of the snake robot

#### 4.3 Quadnake

뱀 로봇에서의 실험을 마친 후, Quadnake의 4개의 다리에 뱀의 모션을 응용하여 구동 실험을 수행하였다. 뱀로봇과는 다르게 Quadnake의 경우 마주보는 두 다리를 이어지는 하나의 다리로 생각하여 제어할 수 있으므로, 이에 맞춰서 제어하였다[Fig. 11]. Sidewinding의 경우 이런 방식으로 제어할 경우 중간의 몸체 때문에 다리가 고정되어 로봇이 제대로 이동할 수가 없었다. 이를 해결하기 위하여 뱀 로봇처럼 각각의 다리를 개별적으로 제어하였고, 그 결과 제대로 잘 움직이는 것을 확인할 수 있었다[Fig. 12]. 또한 앞뒤 다리의 sidewinding의



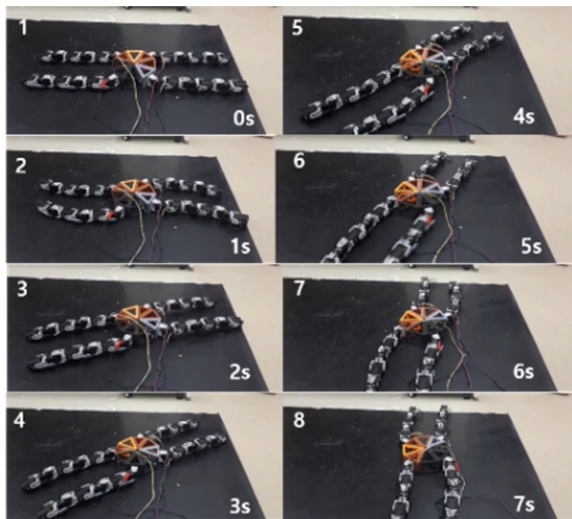
[Fig. 11] Vertical sine wave motion of the Quadnake



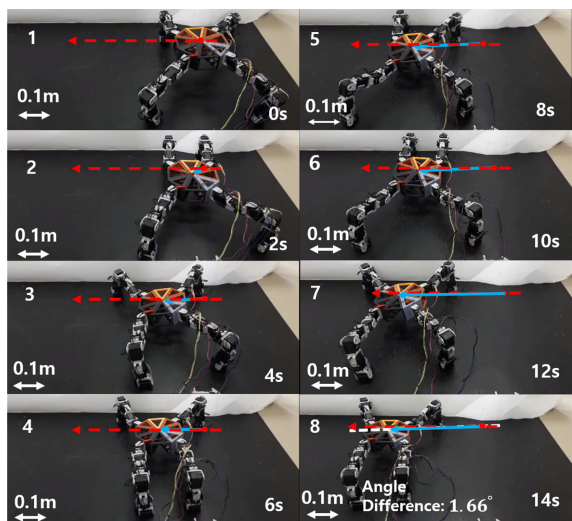
[Fig. 12] Sidewinding motion of the Quadnake

진행방향을 반대로 하여, 제자리에서 회전하는 움직임도 구현할 수 있었다 [Fig. 13]. 직진성을 확인하고자 초기위치를 기준으로 8개 스냅샷에서의 현재 위치를 선형회귀해 기울기를 비교했다. 8번째 스냅샷에는 해당 직선의 기울기를 표시했다. 그 결과, Vertical sine wave motion의 경우, 약 2.39°정도의 각도차가 있음을 확인했다. 그리고 Sidewinding의 각도차는 약 6.8°임을 확인할 수 있었다.

다음으로 Quadnake에 일반적인 사족 보행로봇의 보행동작을 추가하였는데, 이는 바닥을 디디는 3개의 다리를 구부려 무게중심을 이동한 후 나머지 한 다리를 들어 앞으로 옮기는 동작을, 4개의 다리로 반복하여 구현하였다[Fig. 14]. 이 보행 동작을 실험한 결과, 앞서 구현한 vertical sine wave에 비해서는 1.4배 정도 빠른 속도로 움직이고, 땅을 밀어 움직이는 sidewinding와는 거의 같은 속도로 움직인다는 것을 확인할 수 있었다. Walking motion의 경우, 1.66°의 각도차를 보였다.



[Fig. 13] Rotating motion of the Quadnake using Sidewinding



[Fig. 14] Walking motion of the Quadnake

## 5. 고찰

이 연구에서는 보행 motion과 뱀의 motion이 모두 가능한 로봇, Quadnake를 새로이 제안했다. 다양한 motion들의 구현을 통해 다재 다능한 움직임의 구현이 가능한 prototype을 구현했다. 특히 이번 연구를 통해 구현된 보행 motion의 직진성과 속도는 vertical sine wave motion의 직진성과 속도에 비해 크게 향상되었음을 알 수 있었다. Sidewinding과 보행을 비교했을 때에도 보행 motion이 상대적으로 더 뛰어난 직진성을 보임을 확인할 수 있었다. 하지만 서론에서 기대했던 바와는 다르게 보행 움직임이 sidewinding에 비해 더 나은 속도를 보인다고 보기는 어려웠다. 이번 연구에서의 실험에서는 주로 Quadnake의 구현, 모터의 각도 제어를 통한 동작 구현과 그 비교에 중점을 두었기 때문에 다음과 같은 결과가 나타났다고 분석했다. 그러므로 차후의 연구에서는 뱀의 움직임과 보행 움직임에 있어 향상된 속도와 직진성을 구현하기 위해 더 향상된 비등방적인 마찰 특성의 구현과 동역학적인 분석을 기반으로 한 제어의 구현이 필요할 것이다.

## 6. 결론

이번 연구에서는 뱀 로봇을 다리로 갖는 로봇, Quadnake를 제안했다. 뱀 로봇의 5가지 motion들에 대해 Matlab을 이용하여 모델링을 수행한 후, 직접 뱀 로봇을 만들어 open loop 제어를 통해 motion들을 구현했다. 그리고 Quadnake를 만들어 앞서 실험한 움직임들을 구현했다. 개발된 로봇을 이용하여 기존의 뱀형 로봇과 4족 보행 로봇의 장점을 가진 새로운 형태의 보행을 구현할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 DGIST UGRP 프로그램의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] D. C. Kar, "Design of statically stable walking robot: a review," *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, no.11, pp. 671-686, Nov, 2003.
- [2] J. W. Burdick, J. Radford, and G. S. Chirikjian, "A 'sidewinding' locomotion gait for hyper-redundant robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, USA, pp. 101-106, 1993.
- [3] D. Yun, "Development of a mobile robot mimicking the frilled lizard," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 1787-1792, Apr, 2018.
- [4] D. Yun, K. S. Kim, and S. Kim, "Thrust characteristic of a caudal fin with spanwise variable phase," *Ocean Engineering*, vol. 104, no. 1, pp. 344-348, Aug, 2015.

[5] A. A. Transteth, K. Y. Pettersen, and P. Liljebäck, "A survey on snake robot modeling and locomotion," *Robotica*, vol. 27, no. 7, pp. 999-1015, Dec, 2009.

[6] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl, and J. T. Gravdahl, "Introduction," *Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control*, 1<sup>st</sup> ed. Springer Science & Business Media, 2012, ch 1. sec. 1, pp. 1-34.

[7] S. Hirose and M. Mori, "Biologically inspired snake-like robots," *2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China*, pp. 1-7, 2004.

[8] M. Tanaka and K. Tanaka, "Control of a snake robot for ascending and descending steps," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 2, pp. 511-520, Apr, 2015.

[9] M. Luo, R. Yan, Z. Wan, Y. Qin, J. Santoso, E. Skorina, and C. D. Onal, "OriSnake: Design, fabrication, and experimental analysis of a 3-D origami snake robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1993-1999, Jul, 2018.

[10] C. Wright, A. Buchan, B. Brown, J. Geist, M. Schwerin, D. Rollinson, M. Tesch, and H. Choset, "Design and architecture of the unified modular snake robot," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN, USA*, pp. 4347-4354, 2012.

[11] L. Chen, S. Ma, Y. Wang, B. Li, and D. Duan, "Design and modelling of a snake robot in traveling wave locomotion," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, no. 12, pp. 1632-1642, Dec, 2007.

[12] M. Yim, Y. Zhang, and D. Duff, "Modular robots," *IEEE Spectrum*, vol. 39, no. 2, pp. 30-34, Feb, 2002.

[13] J. J. Craig, 2009. *Introduction to robotics: mechanics and control* (3). [Online]. Available: mech.sharif.ir/c/document\_library/get\_file?uid=5abb247-1430-4e46-942c-d692dead831f&groupId=14040

[14] S. Toyoshima, M. Tanaka, and F. Matsuno, "A study on sinus-lifting motion of a snake robot with sequential optimization of a hybrid system," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 139-144, Jan, 2014.

[15] D. L. Hu, J. Nirody, T. Scott, and M. J. Shelley, "The mechanics of slithering locomotion," *National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 106, no. 25, pp. 10081-10085, 2009.

[16] K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni, and A. Naaktgeboren, "Differentiable and piecewise differentiable gaits for snake robots," *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA*, pp. 1864-1869, 2007.

[17] H. T. Tramsen, S. N. Gorb, H. Zhang, P. Manoonpong, Z. Dai, and L. Heepe, "Inversion of friction anisotropy in a bio-inspired asymmetrically structured surface," *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 15, no. 138, Jan, 2018.

[18] R. M. Alexander, *Principles of Animal Locomotion*. Princeton University Press. 2003. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt4cg9j1>



**김 성 현**

2016~현재 DGIST 학부생

관심분야: 로봇틱스, 생체모방, 메커니즘

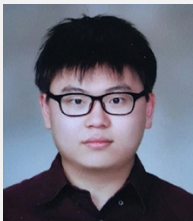


**송 진 혁**

2016~현재 DGIST 학부생

2019~현재 DGIST 로봇공학전공 학위연계 과정

관심분야: 로봇틱스, 생체모방, 로봇 제어



**김 예 승**

2016~현재 DGIST 학부생

관심분야: 로봇틱스, 생체모방, 메커니즘



**윤 동 원**

2002 부산대학교 기계공학부(공학사)  
2004 광주과학기술원 기전공학(공학석사)  
2013 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)  
2014~2015 UC Berkeley EECS(포닥연구원)  
2004 국방과학연구소 연구원  
2005~2016 한국기계연구원 선임연구원  
2016~현재 DGIST 로봇공학과 조교수

관심분야: Biomimetic robot, soft robotics, sensors and actuators



**김 민 송**

2016~현재 DGIST 학부생

관심분야: 로봇틱스, 생체모방, 로봇 제어