

저속 주행 시 도마뱀 몸체의 편요 움직임을 제어하는 허리 및 꼬리의 움직임 원리

Movement Analysis of Waist and Tail of Lizard for Controlling Yawing for Motion in Slow Trotting

김정률, 김종원, 박재흥*, 김종원
(Jeongryul Kim¹, Jong-Won Kim¹, Jaeheung Park², and Jongwon Kim¹)

¹Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

²Department of Transdisciplinary Studies, Seoul National University, and Advanced Institutes of Convergence Technology

Abstract: Mammals such as dogs and cheetahs change their gait from trot to gallop as they run faster. However, lizards always trot for various speeds of running. When mammals run slowly with trot gait, their fore leg and hind leg generate the required force for acceleration or deceleration such that the yaw moments created by these forces cancel each other. On the other hand, when lizards run slowly, their fore legs and hind legs generate the forces for deceleration and acceleration, respectively. In this paper, the yaw motion of a lizard model is controlled by the movement of their waist and tail, and the reaction moment from the ground produced by the hind legs in simulation. The simulation uses the whole body dynamics of a lizard model, which consists of 4 links based on the *Callisaurus draconoides*. The results show that the simulated trotting of the model is similar to that of a real lizard when the movement of the model is optimized to minimize the reaction moment from the ground. It means that the body of a lizard moves in such a way that the reaction moment from the ground is minimized. This demonstrates our hypothesis on how lizards trot using body motion.

Keywords: trot gait, lizard, yawing, active tail, reaction moment from the ground

1. 서론

생물에서 영감을 얻어 생물의 특성에 대한 연구를 공학으로 구현하는 생체 모사 공학은 각 분야에서 연구되고 있다 [1,2]. 특히 다리를 통해 주행하는 족 로봇의 경우 실제 동물들의 걸음걸이에 대한 연구를 수행하고 있다.

Trot은 4족 동물의 걸음걸이 중 하나로, 대각 방향의 다리를 쌍으로 하여 지면에 번갈아 가며 접촉하여 지면에서의 반력을 이용하여 앞으로 나아가는 것이다[3]. 이 걸음걸이는 몸체의 pitch, roll, yaw 회전 방향의 모멘트를 지면에 접촉한 대각 방향의 다리가 각각 반대 방향으로 힘을 주어 제어하는 것이 가능하기 때문에 주행 중에 안정성이 높다는 장점이 있다[4]. 따라서 대부분의 4족 동물은 저속에서 걸음걸이로 trot을 사용한다.

그 중에서 개나 치타와 같은 4족의 포유동물은 주행 속도가 증가할 때 trot에서 gallop으로 그 걸음걸이를 바꾼다[3]. Gallop은 뒷다리로 지면을 찬 후 앞다리로 착지하고 다시 뒷다리로 지면을 차는 것을 반복하여 앞으로 나아가는 걸음걸이이다[3]. 저속의 trot에서 4족의 포유동물은 앞다리와 뒷다리

에서 둘 다 동일한 감속과 가속을 발생시킨다. 반면에 고속의 trot에서 앞다리는 감속하는 역할을 더하고, 뒷다리는 가속의 역할을 더한다[4,5]. 마지막으로 gallop에서 앞다리는 감속의 역할만을 수행하고, 뒷다리는 가속의 역할만을 담당하게 된다[6,7]. 이렇게 4족의 포유동물은 주행 속도가 증가함에 따라 앞다리는 감속, 뒷다리는 가속하는 역할로 구분되도록 걸음걸이가 변하게 된다.

하지만 위의 포유동물과는 다르게 도마뱀은 주행 속도에 따라 달리는 걸음걸이가 변하지 않는다. 대부분의 도마뱀은 trot의 한 가지 걸음걸이만을 사용한다[3]. 주행 속도가 증가할 때 포유동물은 앞다리와 뒷다리의 역할을 구분하는 방향으로 걸음걸이를 바꾸는 반면, 도마뱀은 이미 저속의 trot에서 앞다리는 감속, 뒷다리는 가속하는 것으로 역할을 구분하였기 때문에[8] 걸음걸이를 바꿀 필요가 없고, trot을 유지한다. 다만 고속에서는 도마뱀 허리의 움직임만 달라진다[9].

저속의 trot에서 도마뱀의 앞다리는 감속, 뒷다리는 가속하는 것으로 다리의 역할이 구분될 수 있는 원리를 살펴보기 위하여 4족의 포유동물과 도마뱀을 그림 1과 같이 transverse plane (위에서 바라본 평면)에서 나타내 보았다. 그림 1(a)와 같이 포유동물은 1개의 몸체로 가정할 수 있다. 포유동물이 저속의 trot을 수행할 때, 뒷다리에서 발생하는 추력으로 몸체에 yaw 회전 방향의 모멘트가 발생한다. 이때 발생한 yaw 회전방향의 모멘트를 보상하기 위하여 앞다리에서도 동시에 추력을 발생시킨다. 이렇게 저속의 trot에서 4족의 포유동물은 앞다리와 뒷다리가 동시에 같은 방향으로 추력을 발생하여 지면에서의 반력 모멘트 없이 몸통의 yaw 모멘트를 상쇄시킨다. 반면에 도마뱀은 허리와 꼬리를 축으로 각 몸체가

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received April 11, 2013 / revised May 11, 2013 / accepted June 10, 2013

김정률, 김종원, 김종원: 서울대학교 기계항공공학부
(jrkim@rodell.snu.ac.kr/jwkim@rodell.snu.ac.kr/jongkim@snu.ac.kr)

박재흥: 서울대학교 융합과학기술부(park73@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2012-041247)에 의해 연구되었음.

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0000348).

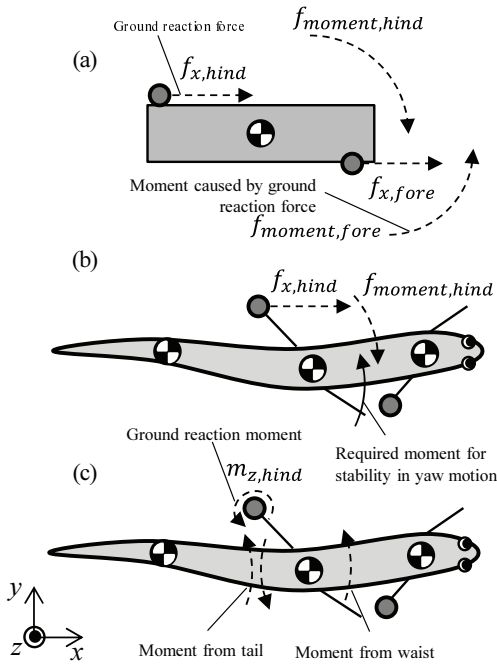


그림 1. 낮은 속도에서 포유동물과 도마뱀 운동 비교.
 Fig. 1. Comparison of movements between mammals and lizards at low speed (a) Force from the ground in mammals, (b) Force from the ground in lizards, (c) Moment from the ground and from waist & tail in lizards.

yaw 회전 방향으로 다르게 움직이므로 포유동물과는 다르게 여러 개의 몸체로 가정할 수 있다. 그림 1(b)와 같이 도마뱀도 뒷다리에서 발생하는 추력으로 인해 다리가 달린 몸체에 모멘트가 발생하는데, 이 추력으로 인한 모멘트를 상쇄하기 위한 반대 방향의 모멘트를 감속만을 수행하는 앞다리[8]로는 발생시킬 수가 없다. 도마뱀은 이 필요한 모멘트를 그림 1(c)와 같이 허리와 꼬리의 움직임, 또는 뒷다리가 접촉한 지면에서의 반력 모멘트를 통해 발생시킨다고 가정할 수 있다. 이때, 지면에서의 반력 모멘트는 도마뱀의 발의 크기가 작아서 제한된다. 따라서 도마뱀의 허리와 꼬리가 이 반력 모멘트를 최소화하도록 움직이는 것으로 유추할 수 있다.

이와 유사한 실제 사람의 걸음에 대한 연구가 있다[10]. 사람이 걸을 때, 팔의 움직임과 지면에서의 반력 모멘트 사이에는 관계가 있고, 팔의 움직임은 지면에서의 제한된 반력 모멘트를 대신하여 몸을 제어하기 위한 운동으로 해석할 수 있다[10].

따라서 본 논문에서는 도마뱀이 yaw 회전방향의 움직임을 제어할 때, 도마뱀이 지면 반력 모멘트를 최소화하도록, 허리와 꼬리를 S자의 형태로 하여 보행한다는 가설을 세우고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

시뮬레이션은 도마뱀의 transverse plane (위에서 바라본 평면)으로 제한한 2차원 공간에 앞다리를 제외한 부분의 도마뱀 동역학 모델을 수립하여 whole body dynamics를 이용하고자 한다. 앞다리를 제외하는 이유는 모델을 좀더 간단하게 분석하고자 하는 것으로, 앞다리에서 수행하는 감속의 역할을 뒷다리가 대신 하는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션에서는 도마뱀 모델의 뒷다리와 허리 및 꼬리

의 움직임을 통해 도마뱀 모델의 움직임을 구현 및 제어하고자 한다. 그 이후로 허리와 꼬리의 움직임과 지면에서의 반력 모멘트의 관계를 확인하고, 이를 통해 지면에서의 반력 모멘트가 최소화된 도마뱀의 허리와 꼬리 움직임을 구현함으로써 실제 도마뱀의 몸체 움직임 원리에 대하여 연구하고자 한다.

II. 모델링

도마뱀 모델은 그림 2와 같이 4개의 링크로 가정하였다. 링크 길이 및 무게는 실제 도마뱀인 Callisaurus draconoides [6]를 바탕으로 구성하여 표 1에 정리하였다.

서론에서 언급한 것과 같이 도마뱀의 모델은 허리 및 꼬리의 움직임과 뒷다리에서의 반력 모멘트를 검증하기 위한 것으로 앞다리는 없다고 가정하였다. 또한 몸통에 비해 질량이 작은 다리는 질량이 없다고 가정하여 다리의 관절은 모델링하지 않았다. 동역학 모델에 사용한 기호는 표 2에 정리하였다.

모델을 구성하는데 기본적인 벡터는 다음과 같다. 각 링크의 전진 방향의 좌표벡터는 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, 좌우 방향의 좌표벡터는 $y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$ 로 정의하였다. 지면에서의 고정 좌표축을 기준으로 각 링크의 각도벡터는 $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 로 정의하였다. 각 링크의 질량벡터는 $m = [m_1, m_2, m_3, m_4]^T$, $M = \text{diag}(m)$ 으로 정의하였고, 각 링크의 관성모멘트벡터는 $I = [i_1, i_2, i_3, i_4]^T$, $I = \text{diag}(i)$ 로 정의하였다. 계산을 위하여 sin함수와 cos함수 벡

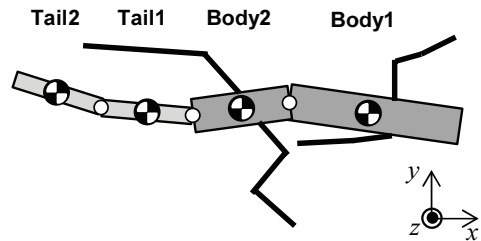


그림 2. 도마뱀 동역학 모델 (4개의 링크).
 Fig. 2. 4-link model of lizard.

표 1. 도마뱀 모델에 사용한 Callisaurus draconoides의 형태 및 무게.

Table 1. Morphometrics of a Callisaurus draconoides for the model.

Callisaurus draconoides	
Total length (m)	0.156
Body1 length (m)	0.055
Body2 length (m)	0.033
Tail1 length (m)	0.033
Tail2 length (m)	0.035
Body1 width (m)	0.015
Body2 width (m)	0.015
Tail1 width (m)	0.005
Tail2 width (m)	0.003
Total mass (g)	9.54
Body1 mass (g)	4.95
Body2 mass (g)	2.97
Tail1 mass (g)	0.99
Tail2 mass (g)	0.63

표 2. 수학적인 표기.

Table 2. Nomenclature.

Symbol	Description
(C_x, C_y)	Position of center of mass
$m_{i=1,2,3,4}$	Mass of links
$l_{i=1,2,3,4}$	Length of links
$w_{i=1,2,3,4}$	Width of links
$q_{i=1,2,3,4}$	Angle between link i and global x axis
$j_{i=1,2,3}$	Angle of joint i
$u_{i=1,2,3}$	Actuator torque of joint i
$F_{i=1,2,3}$	Joint constraint force of joint i
F_x	Reaction force in x direction from ground
F_y	Reaction force in y direction from ground
M_z	Reaction moment in z direction from ground
d_x	Distance in x direction between C_x and x position of foot
d_y	Distance in y direction between C_y and y position of foot

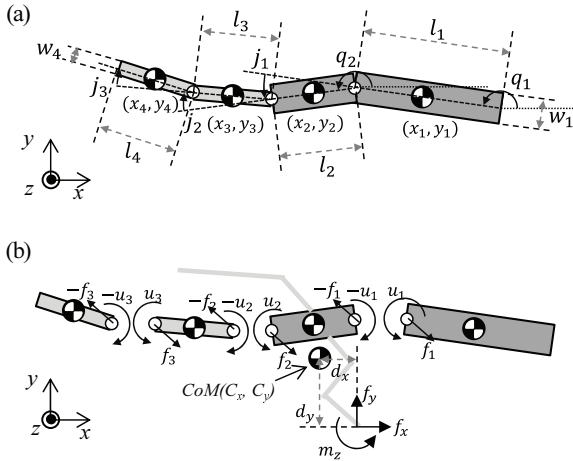


그림 3. 도마뱀 모델의 기구학 파라미터 및 각 관절에 가해지는 힘과 모멘트.

Fig. 3. (a) Kinematic parameters for the model of lizard, (b) Forces and torques acting on each link of the model of lizard.

터를 다음과 같이 $\text{sing} = [\text{sing}_1, \text{sing}_2, \text{sing}_3, \text{sing}_4]^T$, $\text{Sing} = \text{diag}(\text{sing})$, $\text{cosq} = [\text{cosq}_1, \text{cosq}_2, \text{cosq}_3, \text{cosq}_4]^T$, $\text{Cosq} = \text{diag}(\text{cosq})$ 으로 정의하였다. 또한 그림 3(a)에서 상대 각도 $j_i = q_{i+1} - q_i$ 로 정의하였다.

그림 3(a)에서 각 링크는 x, y 방향으로 식 (1), (2)와 같은 제한 조건을 가지고 있다[11, 12].

$$x_{i+1} - x_i = \frac{1}{2}(l_{i+1}\cos q_{i+1} + l_i\cos q_i) \quad (1)$$

$$y_{i+1} - y_i = \frac{1}{2}(l_{i+1}\sin q_{i+1} + l_i\sin q_i) \quad (2)$$

이를 벡터화하면 식 (3), (4)와 같다

$$Cx = \frac{1}{2}L\cos q \quad (3)$$

$$Cy = \frac{1}{2}L\sin q \quad (4)$$

여기서 C 와 L 은 식 (5), (6)으로 정의한다.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & l_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 3(b)에서 각 링크의 x, y 방향의 운동 방정식은 (7), (8)로 유도된다.

$$m_i\ddot{x}_i = f_{ext,x,i} + f_{x,i} - f_{x,i-1} \quad (7)$$

$$m_i\ddot{y}_i = f_{ext,y,i} + f_{y,i} - f_{y,i-1} \quad (8)$$

이를 벡터화 하면 (9), (10)과 같다.

$$M\ddot{x} = F_{ext,x} + C^T F_x \quad (9)$$

$$M\ddot{y} = F_{ext,y} + C^T F_y \quad (10)$$

여기서 뒷다리에서만 지면에서의 반력이 존재한다고 가정하였으므로 지면에서의 반력 벡터는 $F_{ext,x} = [0, f_x, 0, 0]^T$, $F_{ext,y} = [0, f_y, 0, 0]^T$ 로 정의하였다. 또한 각 조인트에서 발생하는 반력 벡터는 $F_x = [f_{x1}, f_{x2}, f_{x3}]^T$, $F_y = [f_{y1}, f_{y2}, f_{y3}]^T$ 로 정의하였다.

제한 조건인 식 (3), (4)을 시간에 대하여 두 번 미분하면 식 (11), (12)를 얻을 수 있다.

$$C\ddot{x} = -\frac{1}{2}L(\text{Cos}q\dot{q}^2 + \text{Sin}q\ddot{q}) \quad (11)$$

$$C\ddot{y} = \frac{1}{2}L(-\text{Sin}q\dot{q}^2 + \text{Cos}q\ddot{q}) \quad (12)$$

식 (9), (10), (11), (12)에 의하여 각 조인트 반력 벡터 F_x 와 F_y 는 식 (13), (14)로 구할 수 있다.

$$F_x = (CM^{-1}C^T)^{-1} \left(-\frac{1}{2}L(\text{Cos}q\dot{q}^2 + \text{Sin}q\ddot{q}) - CM^{-1}F_{ext,x} \right) \quad (13)$$

$$F_y = (CM^{-1}C^T)^{-1} \left(\frac{1}{2}L(-\text{Sin}q\dot{q}^2 + \text{Cos}q\ddot{q}) - CM^{-1}F_{ext,y} \right) \quad (14)$$

Fig. 3(b)에서 각 링크의 모멘트 방정식은 식 (15)와 같다.

$$i_i\ddot{q}_i = u_i - u_{i-1} - \frac{1}{2}l_i\text{sin}q_i(f_{x,i} + f_{x,i-1}) + \frac{1}{2}l_i\text{cos}q_i(f_{y,i} + f_{y,i-1}) + d_{y,i}f_{ext,x,i} + d_{x,i}f_{ext,y,i} + m_{ext,z,i} \quad (15)$$

식 (15)에서 d_{yi} 는 y_i 에서 지면에 닿은 발의 y 좌표까지의 거리이며, d_{xi} 는 x_i 에서 지면에 닿은 발의 x 좌표까지의 거리이다. 위의 식을 벡터화한 식이 (16)으로 지면에서의 외력과 허리 및 꼬리의 토크에 의해 움직이는 도마뱀의 동역학 모델이다.

$$I\ddot{q} = C^T u - \frac{1}{2}\text{Sin}qLF_x + \frac{1}{2}\text{Cos}qLF_y + D_y F_{ext,x} + D_x F_{ext,y} + M_{ext,z} \quad (16)$$

여기서 조인트 토크 벡터는 $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ 로 정의하고, 지면에서의 반력과 body2 중심 사이의 거리 벡터는 $D_x = \text{diag}([0, d_{x2}, 0, 0]^T)$, $D_y = \text{diag}([0, d_{y2}, 0, 0]^T)$ 로 정의한다. 또한 지면에서의 반력 모멘트 벡터는 $M_{ext,z} = [0, m_z, 0, 0]^T$ 로 정의한다.

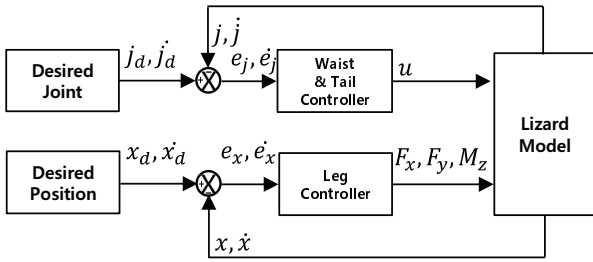


그림 4. 도마뱀 모델 제어 알고리즘 (비례미분 제어기).
Fig. 4. Control algorithm of Lizard model (PD controller).

III. 제어 알고리즘

본 논문에서 사용한 도마뱀 동역학 모델의 제어의 기본 알고리즘은 그림 4와 같다. 도마뱀 모델 제어기는 다리와 허리 및 꼬리의 제어기 두 가지로 분리하고 각기 다른 운동을 제어하여 동역학 모델의 걸음걸이인 trot을 수행하였다.

두 제어기 모두 PD 제어기(비례미분 제어기)를 사용하였다. 다리 제어기는 동역학 모델 질량중심의 전진 방향 속도와 좌우 방향 속도, 다리가 달린 몸체의 각도를 지면에서의 반력인 f_x, f_y , 반력 모멘트 m_z 로 제어하도록 설계하였다. 마찬가지로 허리 및 꼬리 제어기는 각 조인트의 각도 및 각속도를 각각의 조인트 토크인 u_1, u_2, u_3 를 이용하여 제어하도록 설계하였다.

IV. 결과

도마뱀의 목표운동은 전진 방향으로 50 mm/s(0.32 body/s)의 속도로 이동하고, 각 발걸음마다 10 mm/s(주행 속도의 20%)의 감속 및 가속을 수행하도록 함으로서 실제 관찰한 도마뱀의 저속 주행시의 움직임과 유사하도록 하였다. 각 발걸음은 1초에 한번씩 다리를 지면에 접촉하여 앞으로 진행하도록 하였다. 이에 다리가 연결된 몸체인 body2는 2초를 주기로 같은 운동을 반복하도록 목표 값을 설정하였다. 위의 내용을 정리하여 전진 방향으로 $0.05t - 0.01\sin(2\pi t)/2\pi$ (m), 좌우 방향으로 $-0.01\sin(2\pi t)/2\pi$ (m), 다리가 달린 몸체의 각도를 $\pi + 0.092\pi \sin(\pi t)$ (rad)로 목표 값을 설정하였다.

이러한 도마뱀의 움직임을 추종하도록 명령하고, 다리 제어기와 허리 및 꼬리 제어기를 통해서 도마뱀의 동역학 모델을 시뮬레이션한 결과는 그림 5와 같다. 모델의 무게 중심 및 body2의 각도의 desired value를 점선과 같이 설정하고, 실제로 PD 제어기를 통해 제어된 결과는 실선으로 표기하였다. 그림 5의 결과를 살펴보면 실제 제어가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6에서는 지면에서의 반력 모멘트와 허리 및 꼬리의 움직임의 관계를 확인하기 위하여 허리 및 꼬리의 움직임을 달리 하였을 때, 지면에서의 반력 모멘트를 추출하여 보았다. 지면에서의 모멘트를 최소화하는 허리 및 꼬리 움직임을 구하고자 최적화 방법을 사용하였다. 최적화는 식 (17)과 같이 각 조인트의 목표 각도인 J를 body2의 움직임과 같은 함수인 sin 함수로 가정하고, 설계 변수인 a_i 와 b_i 를 변경하여 각 조인트 목표 각도를 대입하였을 때, 지면에서의 반력 모멘트 절대값의 평균이 최소가 되도록 하는 것이다.

$$J_{i=1,2,3} = a_i \times \sin(2\pi t + b_i) \quad (17)$$

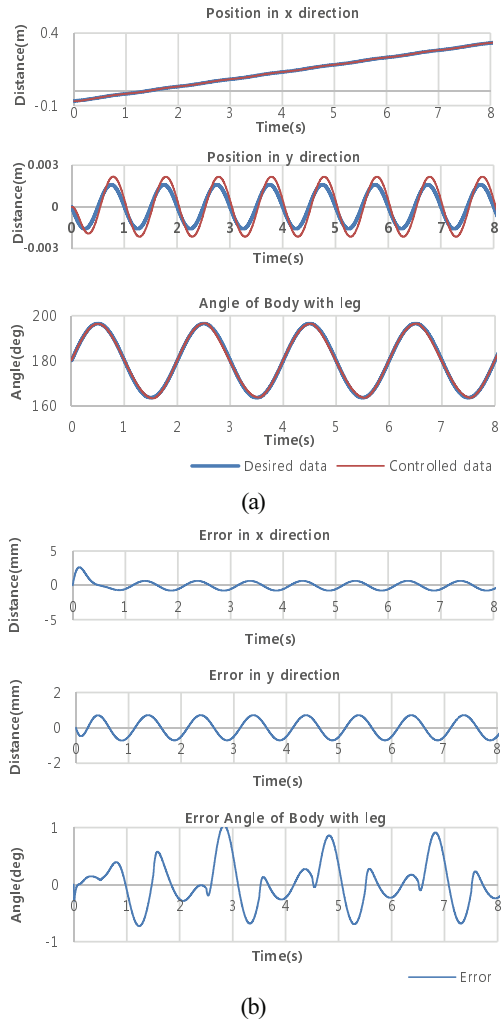


그림 5. 도마뱀 모델의 목표 움직임과 제어된 움직임 비교 그래프와 에러 그래프.

Fig. 5. (a) Comparison between desired and controlled motion in movement of the model, (b) Error between desired and controlled motion.

표 3. 지면에서의 반력 모멘트의 절대값의 평균.

Table 3. Average of absolute value of reaction moment on the ground 1) Optimized joint angle, 2) Half angle of optimized value, 3) Double angle of optimized value, 4) Zero joint angle.

Angle case	$\sum m_x / \text{Simulation Time (Nmm)}$
Optimization of joint angle	0.097
Half angle of optimization value	0.245
Double angle of optimization value	0.367
Zero joint angle	0.336

그림 6 1)은 최적화 방법을 통하여 지면에서의 반력을 최소로 하는 허리 및 꼬리의 움직임을 적용하였을 경우의 지면에서의 반력 모멘트이고, 그림 6 2)는 최적화된 움직임에서 각도를 1/2로 감소시킨 경우의 지면에서의 반력 모멘트이다. 그림 6 3)은 최적화된 움직임에서 각도를 2배로 증가시킨 경우의 지면에서의 반력 모멘트이고, 그림 6 4)는 허리 및 꼬리가 움직이지 않는 경우에 지면에서의 반력 모멘트이다. 각

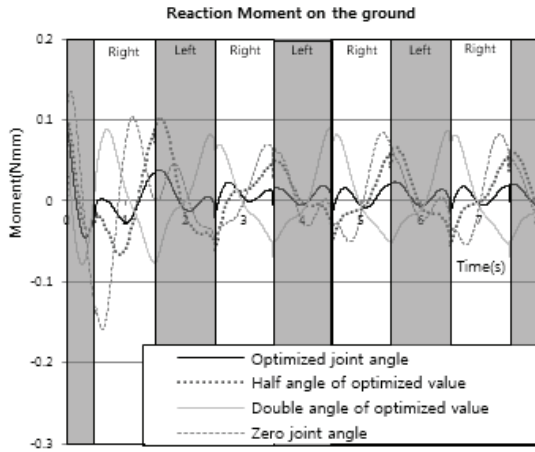


그림 6. 꼬리의 움직임에 따른 지면에서의 반력 모멘트 비교.
 Fig. 6. Reaction moment on the ground 1) Optimized joint angle, 2) Half angle of optimized value, 3) Double angle of optimized value, 4) Zero joint angle.

지면에서의 반력 모멘트의 절대값의 평균은 표 3에 정리하였다. Body2의 동일한 yaw 회전 방향의 움직임을 제어할 때, 도마뱀의 허리 및 꼬리의 움직임에 따라 지면에서의 반력 모멘트가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

V. 고찰

결과를 통해 2차원 공간에서 동역학 시뮬레이션을 통해 구현한 결과 그림 5와 같이 도마뱀은 자신의 허리 및 꼬리와 지면에서의 반력 모멘트를 이용하여 yaw 회전 방향의 움직임을 잘 제어하는 것을 확인하였다.

VI. 결론

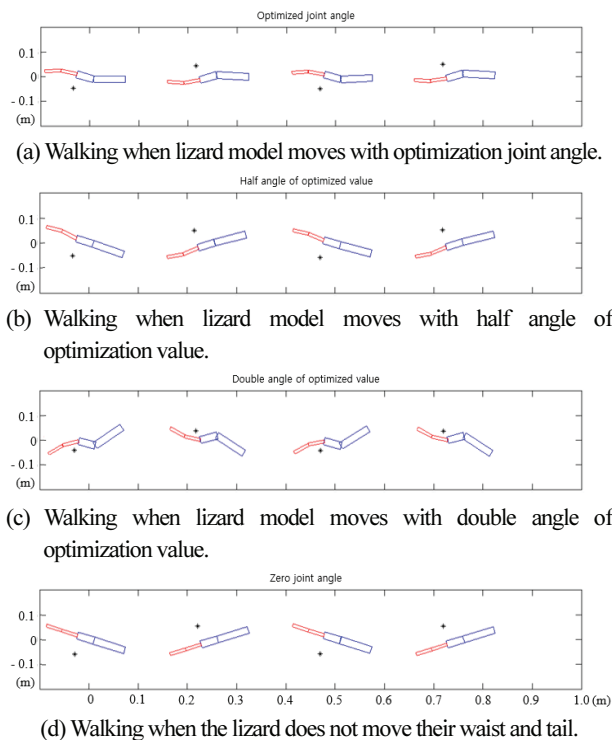
본 연구에서는 허리 및 꼬리의 움직임과 지면에서의 반력 모멘트를 이용하여 앞다리의 추력 없이 몸체의 yaw 회전 방향의 움직임을 제어하는 도마뱀 모델의 동역학 시뮬레이션을 구현하였다. 지면에서의 반력 모멘트를 최소한으로 하는 허리 및 꼬리의 움직임을 구현하였을 때, 실제 도마뱀과 유사한 움직임이 수행되는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 실제 도마뱀이 지속적으로 주행할 때 지면에서의 반력 모멘트를 최소로 하도록 허리 및 꼬리를 움직인다는 가설을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이 가설은 실제 도마뱀의 움직임과 지면에서의 반력 모멘트를 측정하여 비교함으로써 추가적으로 검증할 수 있을 것이다.

이 연구는 추후 실제 도마뱀의 허리 및 꼬리의 움직임을 다르게 했을 때 지면에서의 반력 모멘트를 측정함으로써 추가적으로 검증할 수 있을 것이다. 또한 이후 연구에서는 4개의 다리를 모두 고려하여, 고속 주행에서의 도마뱀 허리 및 꼬리의 움직임의 원리를 지면의 반력 모멘트와 몸통 관절의 토크 값을 통해 에너지 최소화화 관련하여 추출할 수 있을 것이다.

REFERENCE

[1] H. C. Shin, K. M. Jeong, and J. J. Kwon, "Development of a snake robot with 2-DOF actuator modules," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 7, pp.

그림 7. 도마뱀 모델의 시뮬레이션.
 Fig. 7. Simulation of walking lizard model.



697-703, Jul. 2011.

[2] A. E. Minetti, "Kinesiology based human-like walking pattern design for a bipedal robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 7, pp. 659-667, Jul. 2011.

[3] R. M. Alexander, *Principles of Animal Locomotion*, Princeton University Press, New Jersey, USA, 2003.

[4] D. V. Lee, J. E. A. Bertram, and R. J. Todhunter, "Acceleration and balance in trotting dogs," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 202, no 24, pp. 3565-3573, Dec. 1999.

[5] D. V. Lee, "Effects of mass distribution on the mechanics of level trotting in dogs," *Journal of Experimental Biology*, vol. 207, no. 10, pp. 1715-1728, Apr. 2004.

[6] A. E. Minetti, "The biomechanics of skipping gaits: a third locomotion paradigm?" *Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 265, no. 1402, pp. 1227-1233, Jul. 1998.

[7] K. J. Parsons, T. Pfau, and A. M. Wilson, "High-speed gallop locomotion in the Thoroughbred racehorse. I. The effect of incline on stride parameters," *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, no. 6, pp. 935-944, Mar. 2008.

[8] J. J. Chen, A. M. Peattie, K. Autumn, and R. J. Full, "Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 2, pp. 249-259, Jan. 2006.

[9] R. Ritter, "Lateral bending during lizard locomotion," *Journal of Experimental Biology*, vol. 173, pp. 1-10, 1992.

[10] J. Park, "Synthesis of natural arm swing motion in human bipedal walking," *Journal of Biomechanics*, vol. 41, no. 7, pp. 1417-1426, 2008.

[11] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, and Ø. Stavdahl, "Modelling and control of obstacle-aided snake robot locomotion based on jam resolution," *Proc. of the IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, pp. 3807-3814, May 2009.

[12] P. Liljebäck, K. Y. Pettersen, Ø. Stavdahl, and J. T. Gravdahl, "Controllability and Stability Analysis of Planar Snake Robot Locomotion," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no 6, pp. 1365-1380, Jun. 2011.



김정탈

2009년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2009년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 로봇 설계, 로봇 제어.



김종원

2012년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2012년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 로봇 설계, 로봇 제어.



박재홍

1995년 서울대 항공우주공학과 졸업. 1999년 동 대학원 석사. 2006년 Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics 박사. 2006년~2009년 Stanford University 연구원. 2007년~2008년 Hansen Medical 연구원. 2009년~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 융합과학부 교수. 관심분야는 로봇 움직임 및 힘 제어, 전신제어 프레임워크, 로봇-환경 상호작용, 바이오 미케닉스, 의료 로봇.



김종원

1978년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1980년 한국과학기술원 기계항공공학부(공학석사). 1987년 University of Wisconsin-Madison, Mechanical Engineering (공학박사). 1993년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 건설 설계, 로봇 설계, 로봇 제어.