

논문 2013-50-8-32

# 모션 캡처에 기반한 도마뱀 속보에 대한 기구학적 모델링

## (Kinematic Modelling of the Trot of a Lizard Based on the Motion Capture)

김 창 회\*, 신 호 철\*, 이 흥 호\*\*

(Chang Hoi Kim, Ho Cheol Shin<sup>Ⓢ</sup>, and Heung Ho Lee)

### 요 약

미래의 전쟁에서 인명 피해를 최소화하기 위한 방안으로 로봇의 중요성이 부각되고 있으며 최적으로 진화된 생물체를 모방하는 생체모방로봇에 대한 연구가 활발하게 추진되고 있다. 도마뱀 모방형 로봇은 협소한 지역에서 은밀한 접근 및 은닉을 필요로 하는 정찰 및 감시 등의 임무를 수행하기에 적합하다. 본 논문에서는 적외선 마커를 이용하여 도마뱀의 보행동작을 분석하였다. 쿠반 예늘의 관절 부위에 21 개의 마커를 부착하고 광학적 모션 캡처 장비를 사용하여 도마뱀의 보행 동작을 측정하였다. 측정된 데이터를 분석하여 펼친 자세로 속보로 보행하는 도마뱀의 걸음 동작을 분석하였다. 또한 도마뱀의 걸음새를 충실하게 구현 가능하도록 25 자유도를 갖는 기구학 모델을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 모델링의 타당성을 확인하였다.

### Abstract

The importance of the robots has emerged as the means of minimizing the casualties in the future war, and, thus, the biomimetic robots mimicking the optimized organisms has been actively studied. The robot inspired lizard is suitable for reconnaissance and the surveillance in narrow areas. In this paper, we analyzed the locomotion of a lizard by motion capture system using the infrared markers. We attached 21 markers to the joints of the lizard. By considering the measured data, we analyzed the walking motion of the lizard which trots in a sprawled posture. Moreover, we proposed the 25 dof kinematic model which was able to reproduce the gait of the lizard faithfully. The model was verified by simulations.

**Keywords :** Biomimetic robot, Lizard locomotion, Sprawled posture, Gait, Kinematic model

## I. 서 론

미래의 전쟁에서 무인화 장비는 미래의 전투에서 승리를 결정지을 수 있는 중요한 역할을 수행할 것으로

예측되고 있다. 무인화 장비를 대표하는 로봇은 시가전이나 테러전에서 인명 피해를 최소화하면서 효과적으로 대응할 수 있으며 은밀한 접근 및 은닉을 필요로 하는 정찰 및 순찰 등의 분야에서도 활용이 가능하다<sup>[1]</sup>. 로봇이 정찰 혹은 순찰 등의 임무를 수행하기 위해서는 다양한 지형에서 목표 지점으로 접근이 가능하여야 한다. 이러한 기능을 수행하기 위한 이동 방식에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 전통적으로 가장 많이 사용되는 바퀴를 이용한 이동 방식은 적은 에너지를 사용하면서 신속하게 이동할 수 있다는 장점이 있으나 평지 혹은 바퀴 크기의 반 이하의 장애물이 있는 곳에서만 적용이 가능하다. 이러한 바퀴를 이용한 이동 방식의 한계점을 극복하기 위하여 생체모방 로봇에 대한 연구가 광범위

\* 정회원, 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부  
(Nuclear Technology Convergence Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

\*\* 정회원, 충남대학교 전기공학과  
(Electrical Engineering Division, Chungnam National University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail:smarthc@kaeri.re.kr)

※ 이 논문은 기초기술연구회 협동연구사업 융복합 Seed(국방R&D) 과제의 연구비 지원으로 수행되었음(Seed-11-3)

접수일자: 2013년6월5일, 수정완료일: 2013년7월22일

하게 수행되어 왔다<sup>[2-6]</sup>.

현존하는 생명체는 다양한 서식환경에서 생존하기 위하여 오랜 시간에 걸쳐 최적화된 결과물이다. 이러한 최적화된 생물체의 움직임을 관찰하여 영감을 얻는 생체모방로봇은 자유롭게 이동할 수 있는 바퀴벌레의 다리 구조를 모방한 보행로봇으로부터 시작되었으며 말이나 개의 이동메커니즘을 모방한 4족 로봇, 인간과 유사한 기능을 구현하기 위한 2족 로봇이 개발되었다<sup>[7]</sup>.

포유류 및 파충류는 4 개의 다리를 이용하여 움직이는 대표적인 동물들이지만 걷는 자세는 상이하다. 개나 말과 같이 기립자세(upright posture)로 걷는 포유류의 외형적 행동 특징에 대해서는 많은 연구가 되어 있어, 이를 바탕으로 말과 같이 무거운 짐을 운반할 수 있는 견마형 로봇이 개발되고 있다<sup>[8-12]</sup>. 파충류의 경우에는 뱀의 형태와 운동 방식을 모방한 뱀 로봇이 개발되었으며 도마뱀붙이의 수직벽을 이동하는 능력을 모방한 로봇이 개발되었으나 도마뱀의 걸음새를 모방한 로봇의 개발은 아직까지 초기 연구단계이다<sup>[13-15]</sup>.

펼친 자세(sprawled posture)로 보행을 하는 도마뱀은 기립자세로 걷는 포유류에 비하여 무게중심이 지면에 밀착되어 있고 긴 몸통과 꼬리를 가지고 있으며 4 개의 다리가 펼쳐져서 움직이기 때문에 안정된 자세의 유지가 용이하다. 또한 몸통의 뛰어난 유연성으로 인하여 좁은 통로나 장애물이 있는 험한 지형도 통과할 수가 있다. 이러한 형태학적 장점을 모방한 로봇을 개발하면 경찰 또는 재난 현장에서 인명 탐지 등의 분야에 적용이 적합할 것이다.

본 논문에서는 광학식 모션캡처 방식을 사용하여 속보(trot)로 움직이는 도마뱀의 걸음새를 분석하였으며 분석된 결과에 기초하여 도마뱀의 걸음새를 구현하기 위한 로봇의 기구학 모델을 제안하였으며 제안된 모델의 걸음새를 캡처된 도마뱀의 걸음새와 비교하고 시뮬레이션하여 모델의 타당성을 확인하였다.

## II. 본 론

### 1. 도마뱀 동작 분석

#### 가. 동작 측정을 위한 장치 구성

음향, 기계장치, 자력 및 광학 등의 측정 매체를 사용하여 살아있는 동물의 움직임을 캡처하는 경우에는 대



그림 1. 도마뱀 보행자세 측정을 위한 적외선카메라 배치

Fig. 1. Arrangement of the infrared cameras for the measurement of the lizard locomotion.

상 동물에 부착되는 측정매체가 목표 동물의 동작에 영향을 주지 않아야 한다. 적외선 마커를 이용한 모션 캡처 시스템은 추가 장비, 연결 케이블 등의 장비를 필요로 하지 않고 다양한 크기의 마커를 대상 동물의 피부의 원하는 부위에 원하는 숫자만큼 부착이 가능하다. 본 논문에서는 영국의 Vicon Motion 사의 적외선 카메라(MX-F40) 8 대를 사용하여 쿠반 에놀(Cuban anole) 도마뱀의 움직임을 측정하였다. 각각의 카메라는 100 Based-T Ethernet을 통하여 MX Ultranet에 연결되며 MX Ultranet은 획득된 데이터를 Gigabit Ethernet을 통하여 PC로 전송한다.

도마뱀의 움직임은 5 msec 마다 측정되었다. 그림 1은 측정을 위하여 제작한 관측틀 및 적외선카메라 배열을 보여준다. 도마뱀을 일정한 방향으로 움직이도록 유도하기 위한 관측틀은 나무로 제작되었으며 표면에 점토 칠을 하여 광학적 잡음을 방지하였다.

대상 도마뱀은 몸길이 약 32 cm인 쿠반 에놀 이며 도마뱀의 동작을 캡처하기 위하여 쿠반 에놀의 관절 부위 피부에 직경 4 mm 인 마커 21 개를 부착하였다. 그림 2는 마커를 부착한 쿠반 에놀의 모습을 보여주고 있다. 그림 2에서 보여주는 것처럼 몸통 및 꼬리의 움직임을 측정하기 위하여 머리부터 꼬리까지 척추를 따라 9 개의 마커를 부착하였으며 다리에는 골반, 무릎, 발목 관절 부위에 마커를 부착하였다.

캡처된 데이터는 Vicon Motion 사의 Nexus 프로그램을 사용하여 그림 3과 같이 3 차원 형상으로 매핑하였다. 마커 간의 거리는 도마뱀이 빠르게 이동할 경우 피부의 움직임과 광학적 측정 방식으로 인한 오차가 발생하게 된다. 표 1은 모션 캡처에 의하여 측정된 마커 사이 링크의 평균 길이를 보여준다. 같은 개체일 지라도 성장에 따라 각 링크의 길이는 길어지며 쿠반 에놀

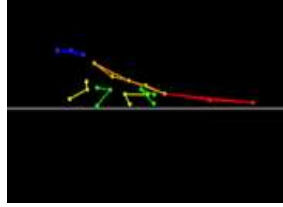


그림 2. 마커부착 위치  
Fig. 2. Marker position.

그림 3. 캡처된 쿠반 예놀  
Fig. 3. Captured Cuban Anole.

표 1. 마커 사이 링크 길이  
Table 1. Link length between markers.

명칭		관절 길이 (mm)	링크비율
머리		29	1.3
목		16	0.7
몸통	Body1	23	1.0
	Body2	20	0.9
	Body3	28	1.2
꼬리	Tail1	17	0.8
	Tail2	52	2.3
	Tail3	46	2.0
왼쪽 앞발	어깨	17	0.8
	팔꿈치	13	0.6
	손목	17	0.8
오른쪽 앞발	어깨	13	0.6
	팔꿈치	15	0.7
	손목	18	0.8
왼쪽 뒷발	고관절	9	0.4
	무릎	22	1.0
	발목	23	1.0
오른쪽 뒷발	고관절	10	0.4
	무릎	23	1.0
	발목	19	0.8

개체에 따라 길이가 다르기 때문에 각 링크의 길이보다는 각 링크의 길이 비율을 비교하는 것이 도마뱀의 자세를 이해하기가 용이하다. 표 1의 링크 비율은 뒷발의 넓적다리 길이를 기준으로 한 각 링크의 길이의 비율을 보여준다.

나. 쿠반 예놀의 동작 분석

4족 동물의 걷는 방식은 걷기(walk), 대각의 다리가 동시에 움직이는 속보(trot), 몸통을 중심으로 좌우 같은 쪽의 다리가 동시에 움직이는 측대보(pace), 전후 같은 쪽의 다리가 동시에 움직이는 질주(bounce)로 구분할 수 있다. 3개 이상의 다리가 지면과 항상 닿아있으

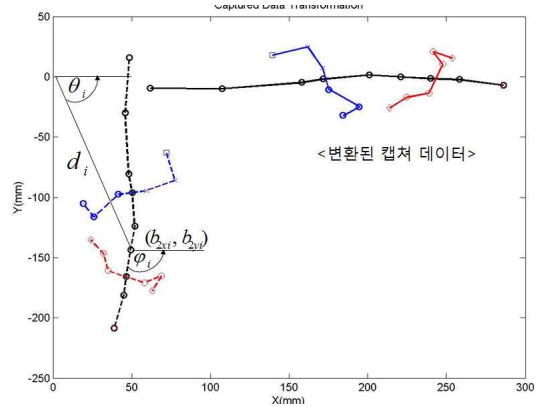


그림 4. 캡처 데이터 변환  
Fig. 4. Captured data transformation.

며 무게중심이 지면과 닿아있는 지점을 연결한 다각형 내에 위치하도록 하여 정적인 평형상태를 유지하는 걷기는 느린 속도로 은밀하게 움직이기 때문에 모션캡처 장비가 설치된 실험실과 같은 낮은 환경에서는 관측하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 쿠반 예놀이 속보로 움직이는 동작을 관측하여 기구학 해석을 수행하였다.

자연 상태에서 주변 상황에 따라 자유롭게 움직이는 도마뱀을 폭이 비교적 적은 관찰틀 위에 올려놓았다더라도 일정한 방향으로 움직이는 경우는 흔하지 않다. 이와 같이 움직이는 도마뱀으로부터 캡처한 데이터를 이용하여 속도, 각 관절의 각도 및 걸음새 등을 해석하기 위해서는 도마뱀이 일정한 방향으로 움직인 것으로 변환하여야 한다. 본 논문에서는 식 (1)을 이용하여 x 축을 따라 움직이는 것으로 동작데이터를 변환하였다.

$$\begin{aligned}
 d_i &= \sqrt{b_{2xi}^2 + b_{2yi}^2}, \quad i=1, \dots, 390 \\
 \theta_i &= \tan^{-1}\left(\frac{b_{2yi}}{b_{2xi}}\right) \\
 \bar{b}_{12i} &= \bar{b}_i - \bar{b}_{2i} \\
 \varphi_i &= \tan^{-1}\left(\frac{b_{12yi}}{b_{12xi}}\right) \\
 \tilde{m}_{ij} &= \tilde{m}_j - \bar{b}_{2i}, \quad j=1, \dots, 22 \\
 \hat{m}_{ij} &= R_{\varphi_i} \tilde{m}_{ij} + [d_i, 0, 0]^T,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기에서  $\bar{i}$ 는 캡처된 프레임 번호,  $d_i$ 는 원점으로부터  $b_{2i}$  마커의 거리,  $\varphi_i$ 는  $\bar{b}_{12i}$ 의 x 축과의 각도,  $\tilde{m}_{ij}$ 는  $j$  번째 마커의 위치,  $\tilde{m}_{ij}$ 는  $b_{2i}$ 를 원점으로 한  $m_{ij}$  마커의 위치이다.  $R_{\varphi}$ 는  $b_{2i}$  마커의 위치를 x 축으로 회전시키는 회전 행렬 이고  $R_{\varphi_i}$ 는  $\bar{b}_{12i}$ 를 x축과 평

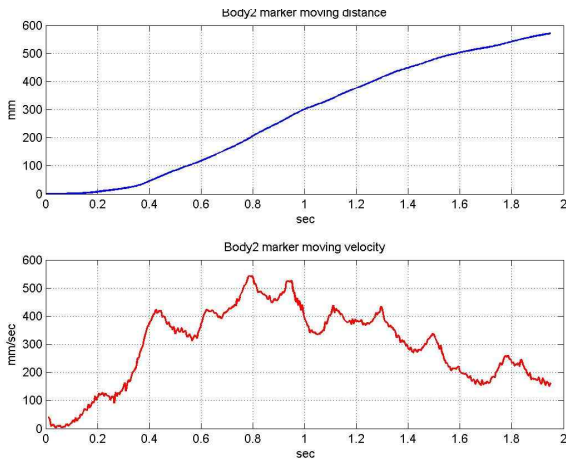


그림 5. 쿠반 예늘의 이동 거리 및 순간 속도  
Fig. 5. Moving distance and instance velocity of the Cuban anole.

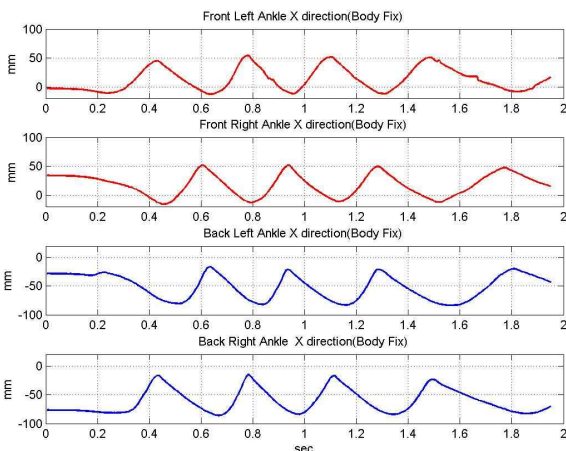
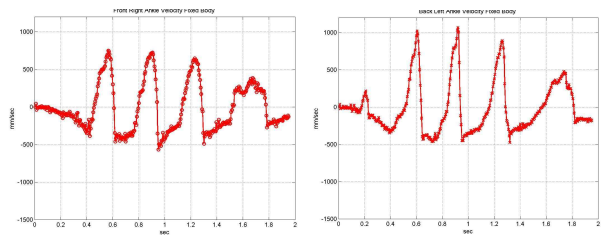


그림 6. 이동시 발목 궤적  
Fig. 6. Ankle trajectories of periodic locomotion.

행하도록 회전시키는 회전 행렬이다. 식(1)을 사용하여 구한  $\hat{m}_{ij}$  는 그림 4에서 보여주는 것과 같이 도마뱀이 x 축 방향으로 움직인 것으로 변환된 마커의 위치이다. 그림 5는 변환된 이동 궤적에 따른 이동거리 및 순간속도를 보여준다. 그림 5에서 보여주는 것과 같이 관측된 도마뱀은 약 1.8 초 동안에 0.55 m를 이동하였는데 순간최고속도는 약 0.57 m/sec 이고 평균속도는 약 0.3 m/sec 로 움직였다.

그림 6은 도마뱀이 걸을 때의 다리의 움직임을 분석하기 위하여 몸통 중앙에 부착된 마커(b2)를 기준으로 하였을 때의 다리 발목에 부착된 마커의 x 방향 궤적을 보여주고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 약 55 cm를 이동하는데 속보로 4 걸음을 걸어 한 걸음에 약 13.6



(a) 오른쪽 앞발 (b) 왼쪽 뒷발

그림 7. 보행시 발목의 순간속도  
Fig. 7. Instance velocities of the ankle while trotting.

cm를 이동하였다. 앞발은 약 1 cm를 몸통 바깥 방향으로 뺏으며 수직방향으로 약 2 cm 위로 올리는 궤적을 그리면서 앞으로 내딛는데 반하여, 뒷발은 약 3 cm를 바깥 방향으로 뺏으며 수직 방향으로 약 1 cm를 위로 올리는 궤적으로 걷는다. 앞발의 보폭은 약 5.8 cm 이고 뒷발은 약 6.5 cm으로 뒷발의 보폭이 앞발에 비하여 넓었다. 대각 방향의 앞발과 뒷발이 같은 주기로 움직이기 위해서는 뒷발이 앞발보다 빨리 움직여야만 한다.

그림 7을 보면 뒷발은 최고 약 1.1 m/sec의 순간속도로 앞으로 뺏는 것에 비하여 앞발은 최고 약 0.7 m/sec의 순간속도로 앞으로 뺏는 것을 확인할 수 있다.

## 2. 도마뱀 걸음새 기구학적 해석

### 가. 기구학 모델링

그림 8은 한 걸음 주기 동안의 쿠반 예늘의 걷는 자세를 평면과 측면에서 보여준다. 대각 방향의 다리가 같이 움직이며 기립 자세로 움직이는 포유류와 달리 다리를 앞으로 뺏을 때 어깨와 골반도 같이 뺏음으로써 짧은 다리라도 넓은 보폭으로 걸을 수 있으며 허리를 좌우로 틀어서 몸의 균형을 유지하는 안정된 걸음새를 보여준다.

그림 8과 같이 걷는 쿠반 예늘의 걸음새를 기구학적으로 해석하기 위하여 그림 9와 같이 모델링하였다. 펠친 자세 보행 동작을 충실하기 구현하기 위하여 제안한 모델의 목 부분은 1 개의 유니버설 관절로 이루어져 있으며 몸통은 2 개의 유니버설 관절과 1 개의 수직 회전관절로 구성된다. 무릎 및 팔꿈치는 1 자유도의 회전관절로 이루어졌으며 어깨 및 고관절 관절은 구형(spherical) 관절로 이루어졌고 두 개의 앞발을 연결하는 어깨 중앙 및 두 개의 뒷발을 연결하는 골반 중앙에 수평회전 관절이 있어 전체 모델은 25 자유도를 가지도

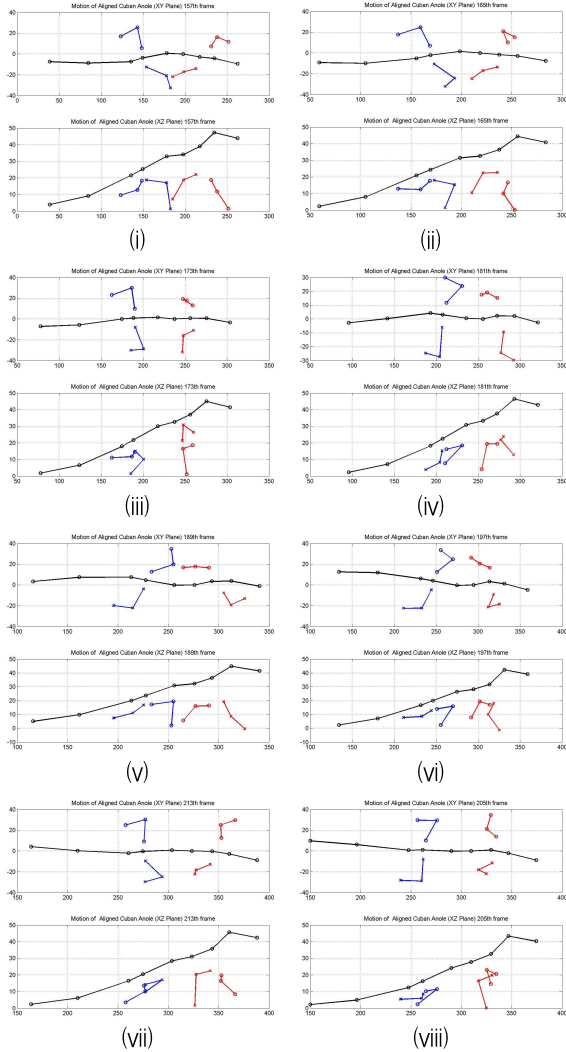


그림 8. 쿠반 예늘의 걸음새  
Fig. 8. Gait of the Cuban anole.

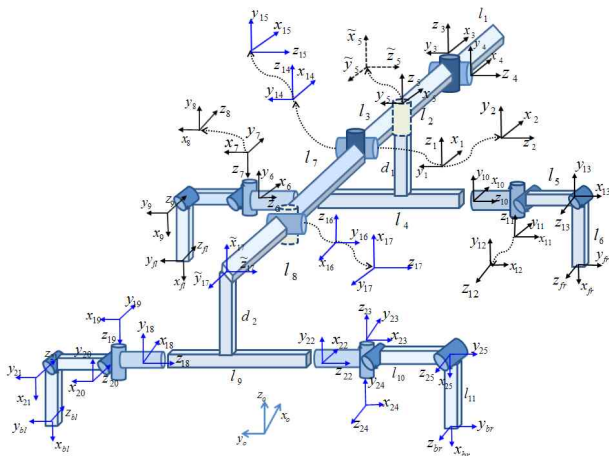


그림 9. 도마뱀 기구학 모델  
Fig. 9. Kinematic model of the lizard.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$\pi/2$	0	0	$\theta_2$
3	$-\pi/2$	$l_2+l_3$	0	$\theta_3$
4	$\pi/2$	0	0	$\theta_4$
Head	0	$l_1$	0	

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
5	$-\pi/2$	$l_3$	0	$\theta_5$
5̄	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$

Front Left Limb					Front Right Limb				
$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
6	0	$d_1$	$-l_4/2$	$\theta_6 - \pi/2$	10	0	$d_1$	$l_4/2$	$\theta_{10} - \pi/2$
7	$\pi/2$	0	0	$\theta_7 - \pi/2$	11	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{11} - \pi/2$
8	$-\pi/2$	0	0	$\theta_8$	12	$\pi/2$	0	0	$\theta_{12}$
9	0	$l_5$	0	$\theta_9$	13	0	$l_5$	0	$\theta_{13}$
FL	0	$l_6$	0	0	FR	0	$l_6$	0	0

그림 10. 앞발의 DH 파라미터  
Fig. 10. DH parameters of the front limbs.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
14	0	0	0	$\theta_{14}$
15	$\pi/2$	0	0	$\theta_{15}$
16	$-\pi/2$	$l_7$	0	$\theta_{16}$
17	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{17} - \pi/2$
17t	0	$l_8$	0	0

Back Left Limb					Back Right Limb				
$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
18	0	$d_2$	$-l_9/2$	$\theta_{18} - \pi/2$	22	0	$d_2$	$l_9/2$	$\theta_{22} - \pi/2$
19	$\pi/2$	0	0	$\theta_{19} - \pi/2$	23	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{23} - \pi/2$
20	$-\pi/2$	0	0	$\theta_{20}$	24	$\pi/2$	0	0	$\theta_{24}$
21	0	$l_{10}$	0	$\theta_{21}$	25	0	$l_{10}$	0	$\theta_{25}$
BL	0	$l_{11}$	0	0	BR	0	$l_{11}$	0	0

그림 11. 뒷발의 기구학 파라미터  
Fig. 11. DH parameters of the back limbs.

록 하였다. 지면과 접촉하게 되는 발목 관절은 고려하지 않았다. 그림 10과 그림 11은 도마뱀 기구학 모델의 DH 파라미터를 보여준다.

나. 역기구학 해석

유니버설 관절이 직렬로 연결된 몸통의 관절 위치는 식 (2)와 같다.

$${}^i P_{i+1} = {}^0 T^{-1} {}^0 P_{i+1}, \tag{2}$$

여기에서  ${}^0 P_{i+1}$ 는 기준좌표계에서의  $i+1$  번째 좌표계의 원점이고  ${}^0 T^{-1}$ 는 기준좌표계에서  $i$  번째 좌표계로의 역변환행렬이다. 캡처된 데이터로부터 식(2)의  ${}^0 P_{i+1}$ 는 알 수 있으며  $i$  번째 좌표계를 기준으로 한  $i+1$  번째 좌표계의 원점은 순차적으로 구할 수 있으며  ${}^0 T^{-1}$  변환행렬 내의 위치값으로부터 각 관절값을 구할 수 있다.

다리 관절은 어깨의 구형 관절과 팔꿈치의 회전관절 이 2 개의 링크로 직결되어 4 자유도를 갖는다. 이와 같은 경우 1 개의 여유자유도로 인하여 무한해가 존재하게 되나 3 자유도의 구형 관절의 그림 9와 같이 좌표계를 할당하고 캡처데이터로부터 각 좌표계의 원점의 위치를 알 수 있을 경우에는 식 (3)과 같이 발끝 관절의 변환행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_\beta &= \vec{p}_\beta - \vec{p}_9 \\ \vec{z}_\beta &= (\vec{p}_9 - \vec{p}_8) \times \vec{x}_\beta \\ \vec{y}_\beta &= \vec{z}_\beta \times \vec{x}_\beta \end{aligned} \quad (3)$$

$${}^0_\beta T = \begin{bmatrix} \frac{\vec{x}_\beta}{|\vec{x}_\beta|} & \frac{\vec{y}_\beta}{|\vec{y}_\beta|} & \frac{\vec{z}_\beta}{|\vec{z}_\beta|} & \vec{p}_\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기에서  $\vec{p}_8$  는 어깨 관절의 위치,  $\vec{p}_9$  는 무릎 관절의 위치이며  $\vec{x}_\beta$ ,  $\vec{y}_\beta$ ,  $\vec{z}_\beta$  은 왼쪽 손목 좌표계( ${}_\beta T$ )의 좌표축 벡터이다.

손목좌표계를 기준으로 한 어깨의 위치  ${}^8P$  는 식 (4)와 같다. 식 (4) 우변의 변환행렬식은 식(3)으로 구할 수 있고  ${}^0P$  은 캡처 데이터로부터 알 수 있으므로 식 (4)로부터 팔꿈치 관절값  $\theta_9$  을 구할 수 있다.

$${}^8P = \begin{bmatrix} -l_5 \cos(\theta_9) - l_6 \\ l_5 \sin(\theta_9) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_8 P, \quad (if |\vec{z}_\beta| \neq 0) \quad (4)$$

여기에서  $l_5$  는 상박 링크의 길이이고  $l_6$  는 하박 링크의 길이이다.

변환행렬  ${}^5T_8$  는 DH 파라미터로부터 식 (5)와 같다.

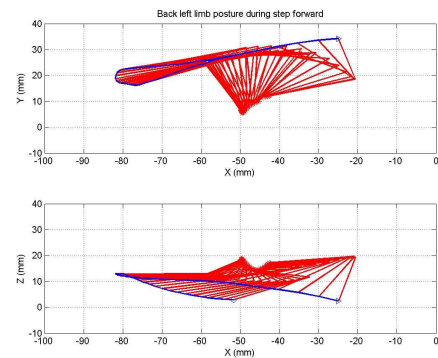
$${}^5T_8 = \begin{bmatrix} s_6 s_7 c_8 + c_6 s_8 & -s_6 s_7 s_8 + c_6 c_8 & s_6 c_7 & d_1 \\ -c_6 s_7 c_8 + s_6 s_8 & -c_6 s_7 s_8 + s_6 c_8 & -c_6 c_7 & 0 \\ -c_7 c_8 & c_7 s_8 & s_7 & -l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서  $s_6$  은  $\sin(\theta_6)$  이고,  $c_6$  은  $\cos(\theta_6)$  이다. 어깨 관절의 변환행렬  ${}^5T_8$  은 식 (6)와 같이 구해진다. 식 (5)와 식(6) 으로부터 어깨 관절의 관절값  $\theta_6, \theta_7, \theta_8$  을 구할 수 있다.

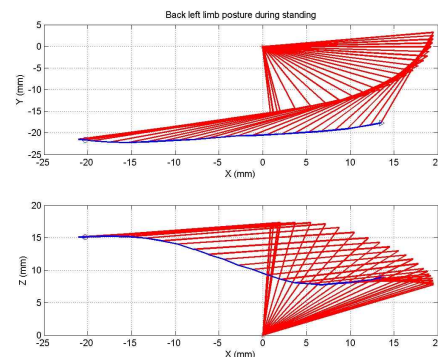
$$\begin{aligned} {}^\beta T_8 &= ({}^8T_9 T_9) {}^9 T_8 \\ {}^0 T_8 &= {}^0 T_9 T_9 T_9 T_8 \\ {}^5 T_8 &= {}^0 T_5 T_5 T_5 T_8 \end{aligned} \quad (6)$$

### III. 시뮬레이션

보행하는 동물의 다리 동작은 지면을 딛고 있는 상태와 공중에 떠서 앞으로 내딛는 상태로 구분할 수 있다. 그림 12는 쿠반 예닐의 왼쪽 뒷발의 한 주기 동안의 걷는 동작을 보여주고 있다. 한 주기 동안의 다리 관절의 변화를 명확하기 분석하기 위하여 그림 12 (a)의 다리를 내딛는 과정을 몸통 좌표계의 원점( ${}^0T$ )를 기준으로 하여 관절의 자세를 나타낸 것으로 파란색 실선은 발목의 궤적을 보여준다. 그림에서 보여주는 것과 같이 지면을 딛고 있던 다리가 지면에서 떨어지면서 뒤로 약 3 cm 뺀 후 몸통 바깥쪽으로 펼치면서 앞으로 내딛는다. 이 과정에서 골반 관절도 다리와 같은 방향으로 이동하여 보폭을 넓히는 것을 알 수 있다. 그림 12 (b)



(a) 다리를 내딛는 과정



(b) 지면에 닿아 있는 과정

그림 12. 한 주기 동안의 다리 자세 변화  
Fig. 12. Limb posture transition during one gait cycle.

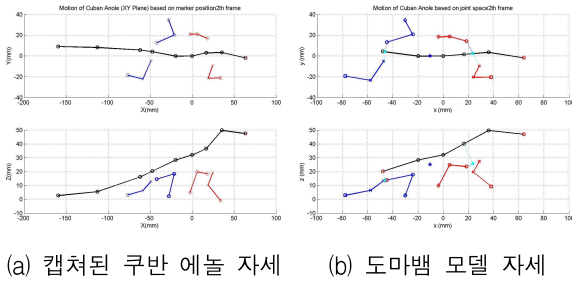


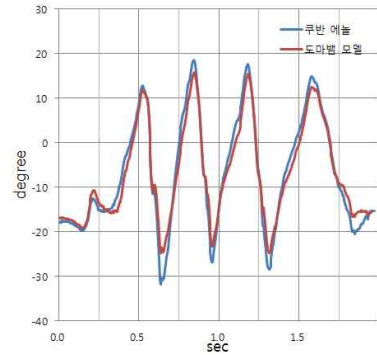
그림 13. 도마뱀 자세 비교  
Fig. 13. Comparison of the lizard posture.

의 발끝이 지면에 닿아 있는 과정은 발끝 좌표계를 기준으로 그린 것으로 파란색 실선은 골반 좌표계의 궤적을 보여준다. 그림에서 보여주는 것과 같이 지면에 발을 딛고 몸통을 앞으로 미는 과정에서 골반의 위치가 약 0.8 cm 정도 지면으로 내려오게 된다.

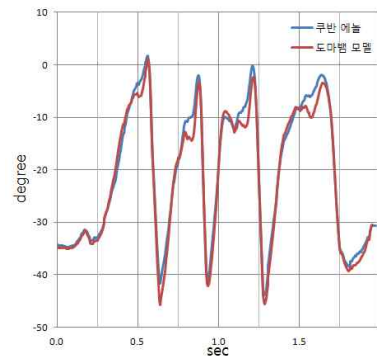
쿠반 예늘의 움직임을 제안된 기구학 모델이 충실히 추종할 수 있는지를 확인하기 위하여 캡처 데이터로부터 기구학 파라미터 및 42 자유도의 관절값을 계산하고 이를 제안된 기구학 모델의 해당 관절값으로 적용하였다. 그림 13 (a)는 모션 캡처를 통하여 획득한 42 자유도를 가지는 쿠반 예늘의 자세이고 그림 13 (b)는 25 자유도를 가지는 모델의 자세로써 그림에서 알 수 있듯이 제안된 모델이 쿠반 예늘의 몸통 자세를 충실하게 구현함을 알 수 있다.

그림 14는 왼쪽 뒷발 고관절의 궤적을 보여준다. 파란색 점선이 쿠반 예늘의 관절 궤적이고 붉은색 실선이 기구학 모델의 관절 궤적이다. 그림 14 (a)에 나타난 쿠반 예늘의 고관절의 롤 관절( $j_{22}$ ) 궤적은 오프-셋 각도  $90^\circ$  와 회전 방향에 대한 보정을 수행한 값이다. 고관절의 롤( $j_{22}$ ), 피치( $j_{23}$ ), 요( $j_{24}$ ) 관절 및 무릎 관절에서 다소의 차이가 발생하는 것은 양쪽 어깨 및 골반을 몸통 중심에 수직 회전관절을 갖는 하나의 링크로 모델링하였기 때문이다. 표 2는 쿠반 예늘 보행 주기 동안의 관절 범위를 나타낸다.

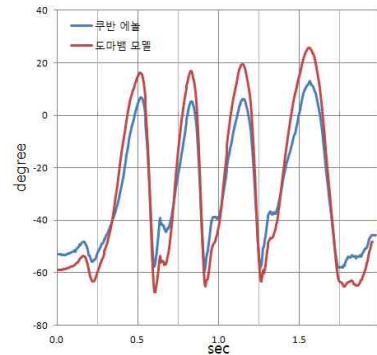
그림 15는 도마뱀 모델의 왼쪽 뒷발을 내딛는 자세의 변화를 보여주고 있다. 그림 15 (a)에서 다리가 앞으로 내딛는 동작과 연계하여 고관절이 이동하는 것을 알 수 있다. 그림 15 (b)는 고관절 좌표계( ${}_{22}T$ )를 기준좌표계로 설정하여 고관절을 고정시켰을 경우의 다리 자세의 변화를 보여준다. 그림을 살펴보면 고관절을 고정시킬 경우에는 보폭이 약 2.6 cm 인데 반하여 도마뱀 모델의



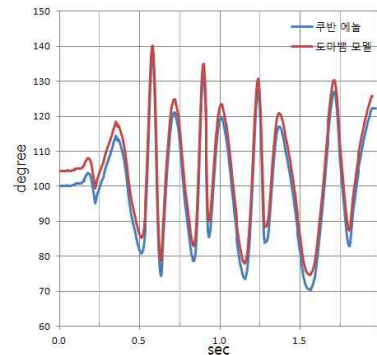
(a) 고관절 롤 관절궤적



(b) 고관절 피치 관절궤적



(c) 고관절 요 관절궤적

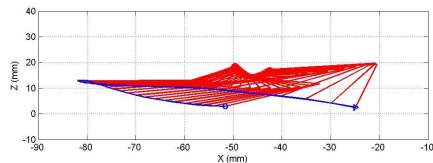
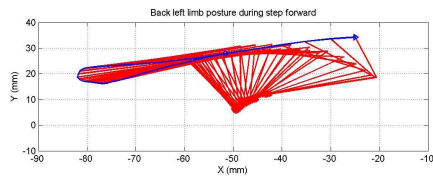


(d) 무릎 관절궤적

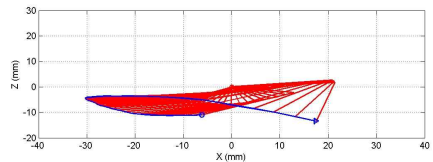
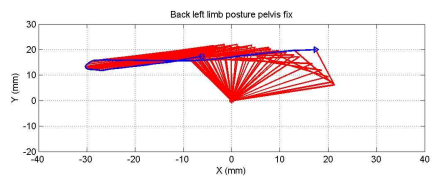
그림 14. 다리 관절 궤적  
Fig. 14. Joint trajectories of the limb.

표 2. 보행 주기 동안의 관절 범위  
Table 2. Joint ranges of periodic gaits.

번호	관절 명칭	동작 범위 (°)
1	몸통 수평회전	-3 ~ 3
2	몸통 수직회전	15 ~ 26
3	목 수평회전	-18 ~ -5
4	목 수직회전	-29 ~ -24
5	어깨 수평회전	5 ~ 42
6, 10	좌, 우 어깨 롤	155~225, -200~-130
7, 11	좌, 우 어깨 피치	1~42, 35~80
8, 12	좌, 우 어깨 요	-50~40, -100~10
9, 13	좌, 우 팔꿈치	35~100, 35~100
14	중앙 몸통 수직회전	172 ~ 182
15	중앙 몸통 수평회전	-10 ~ -3
16	하부 몸통 수직회전	-12 ~ 12
17	골반 수평회전	8 ~ 12
18, 22	좌, 우 골반 롤	75~115, 73 ~ 115
19, 23	좌, 우 골반 피치	-42 ~ -3, -45~-3
20, 24	좌, 우 골반 요	-65~20, -60~20
21, 25	좌, 우 무릎	95~135, 60~105



(a) 도마뱀 모델의 다리 자세 변화



(b) 골반 고정시 다리 자세 변화

그림 15. 도마뱀 모델의 다리를 내딛는 자세 비교  
Fig. 15. Comparison of the swing limb postures.

보폭은 약 3.0 cm 로써 보폭이 약 15% 늘어나게 되어 보행 속도가 증가한다. 같은 주기로 다리를 움직일 경

우 척추를 움직임에 따라 보행 속도가 증가함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 쿠반 에놀을 대상으로 하여 도마뱀의 동작 분석을 수행하였다. 도마뱀의 동작 데이터는 마커의 광학적 위치에 기반한 모션 캡처 시스템을 이용하여 측정하였다. 도마뱀 피부에 부착된 21 개의 마커의 궤적을 분석하여 걸음새 및 관절 동작을 분석하였다. 분석 결과 도마뱀이 펼친 자세로 보행할 때 어깨 및 골반을 움직여서 보폭을 넓게 하여 이동 속도를 증가시키는 것을 확인하였다. 이와 같은 도마뱀의 보행 자세 특징을 구현 가능한 25 자유도의 기구학 모델을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 제안된 모델이 펼친 자세의 걸음새를 충실하게 구현함을 확인하였다. 제안된 도마뱀의 기구학 모델은 최적설계, 동역학 분석 및 생체모방형 로봇의 걸음새 계획에 사용될 수 있다.

#### REFERENCES

- [1] Jo Ja-Yun, Hwang Sun-Myung, "Research about rough road conquest of UGV", *Journal of Security Engineering*, Vol. 6, No. 2, 2009.
- [2] Han Chang-soo, "Legged Robot and Mobile Mechanism", *Journal of the KSME*, Vol. 48, No. 9, pp. 34-38, sep. 2008.
- [3] A. P. Russell, V. Bels, "Biomechanics and kinematics of limb-based locomotion in lizards: review, synthesis and prospectus", *Comparative Biochemistry and Physiology*, Part A 131, pp. 89-112, 2001.
- [4] Tsu-tian Lee and Ching-long Shih, "A Study of the Gait Control of a Quaruped Walking Vehicle", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 2, pp. 61-69, 1986.
- [5] Hiroshi Kimura, Yasuhiro Fukuoka and Avis H. Chhen, "Adaptive dynamic Walking of a Quadruped robot on Natural Ground Based on Biological Concepts", *Journal of Robotics Research*, Vol. 26, 2007.
- [6] Ig Mo Koo, Tae Hun Kang, Gia Loc Vo, Tran Duc Trong, Yong Kuk Sung, and Hyouk Ryeol Choi, "Biologically Inspired Control of Quadruped Walking Robot", *Int. Journal of Control*,



- automation, and Systems*, vol. 7, No. 4, pp. 577-584, 2009.
- [7] Yoon Byeong Ho, Kim Yeong Kook, Kim Soo Hyeon, "State of the arts of Biological Inspired Robot", *Magazine of the ICROS*, Vol. 18, No. 1, pp. 26-30, 2012.
- [8] Ron M. McLaughlin, "Kinetic and Kinematic Gait Analysis in Dogs", *Veterinary clinics of north America: small, animal practice*, Vol.31, No. 1, 2001.
- [9] F. Miro, R. Santos, J.L. Garrido-Castro, A.M. Galistay, R. Medina-Carnicer, "2D versus 3D in the kinematic analysis of the horse at the trot", *Vet Res Commun*, Vol. 33, pp. 507-513, 2009.
- [10] Seungchul Lim, Kwang Han Kim, "Locomotion of Dog-like Quadruped robot: Walk and Trot", *Journal of the Korea Society for simulation*, Vol. 20, No. 1, pp. 51-59, 2011.
- [11] Cerl-O bae, Byeong-Won Ahn, Hyun-Soo Kim, "A Study on Trot Walking for Quadruped Walking Robot", *Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 8, No. 7, pp. 1418-1423, 2004.
- [12] Tae Hun Kang, Hyun Sup Song, Ig Mo Koo, Hyouk Ryeol Choi, "Development of Quaruped Walking Robot AiDIN for Dynamic Walking", *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 1, No. 2, pp. 203-211, 2006.
- [13] Zhendong Dai, Hao Zhang, Hongkai Li, "Biomimetics of Gecko Locomotion: From Biology to Engineering", *International Conf on Reconfigurable Mechanisms and Robot*, pp. 464-468, June, 2009.
- [14] Woochul Nam, Tae Won Seo, Byungwook Kim, Dongsu Jeon, Kyu-Jin Cho, Jongwon Kim, "Kinematic Analysis and Experimental Verification on the Locomotion of Gecko", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 6, pp. 246-254, 2009.
- [15] Donghoon Son, Dongsu Jeon, Woochul Nam, Doyoung Chang, Tae Won Seo, Jongwon Kim, "Gait planning based on kinematics for a quadruped gecko model with redundancy", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, pp. 648-656, 2010.
- [16] Tae Hun Kang, Hyun Sup Song, Hyouk Ryeol Choi, "Biologically Inspired Approach for the Development of Quadruped Walking Robot", *Journal of control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 307-317, 2006.
- [17] Kan Yoneda, Hiroyuki Iiyama, and Shigeo Horose, "Intermittent Trot Gait of a Quadruped Walking Machine Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk", *Proc. of the IEEE International Conf on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minesota, USA, April, 1996.
- [18] Duncan J. Irschick, Bieke Vanhooydonck, Anthony Herrel and Anemone Andronescu, "Effects of loading and size on maximum power output and gait characteristics in geckos", *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 206, pp. 3923-3934, 2003.
- [19] Roland Kehl, "Markerless Motion Capture of Complex Human Movements from Multiple views", Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005.
- [20] J. J. Chen, A. M. Peattied, K. Autumn and r. J. Full, "Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter", *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, pp. 249-259, 2006.
- [21] Zhen-dong Dal, Jiu-rong Sun, "A Biomimetic Study of Discontinuous-Constraint Metamorphic Mechanism for Gecko-Like Robot", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 4, pp. 91-95, 2007.

저 자 소 개



김 창 회(정회원)  
1986년 아주대학교 전자공학과  
(학사)  
1999년 한남대학교 전자공학과  
(석사)  
현재 충남대학교 전기공학과  
(박사과정)

1987년~현재 한국원자력연구원 원자력융합기술  
개발부 책임연구원  
<주관심분야 : 경로 계획 및 극한작업 로봇>



이 흥 호(정회원)  
1973년 서울대학교 공업교육과  
(학사)  
1977년 서울대학교 공업교육과  
(석사)  
1994년 서울대학교 컴퓨터공학과  
(박사)

1979년~현재 충남대학교 전기공학과 교수  
2011년~현재 충남대학교 산업대학원 원장  
<주관심분야 : 전기설비자동화 신호처리>



신 호 철(정회원)  
1992년 인하대학교 기계공학과  
(학사)  
1994년 인하대학교 기계공학과  
(석사)  
1998년 인하대학교 기계공학과  
(박사)

2000년~현재 한국원자력연구원 원자력융합기술  
개발부 책임연구원  
<주관심분야 : 로봇 설계 및 제어>