

도마뱀 로봇 설계를 위한 생체운동 모사 다물체 동역학 시뮬레이터 개발[§]

박용익* · 서봉철* · 김성수*[†] · 신호철**

* 충남대학교 메카트로닉스공학과, ** 한국원자력연구원

Development of Multi-Body Dynamics Simulator for Bio-Mimetic Motion in Lizard Robot Design

Yong-Ik Park *, Bong Cheol Seo *, Sung-Soo Kim *[†] and Hocheol Shin **

* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Robot Technology Team, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 26, 2013 ; Revised March 11, 2014 ; Accepted April 10, 2014)

Key Words: Bio-Mimetic(생체모사), Motion Capture(모션 캡처), Multi-Body Dynamics Simulator (다물체 동역학 시뮬레이터), Lizard Robot(도마뱀 로봇)

초록: 본 논문에서는 도마뱀 로봇 설계를 위한 생체운동 모사 다물체 동역학 시뮬레이터가 개발되었다. 시뮬레이터에 사용된 다물체-기구 동역학 모델은 상용 소프트웨어인 RecurDyn 에 쿠반에늘 도마뱀의 모션 캡처 데이터와 Micro-CT 데이터를 적용하여 생성되었다. 다양한 도마뱀의 보행 운동 특성 해석을 위해서 생체운동 시뮬레이터는 궤적 생성모듈, 역기구학 모듈, 역동역학 모듈로 구성된다. 궤적생성 모듈은 도마뱀의 속도에 따른 척추운동과 발 궤적을 생성한다. 또한, 도마뱀 로봇 설계를 위해서 역기구학을 통한 관절 각도 계산과 그를 통한 역동역학 해석으로 이동속도에 대한 요구 조인트 구동력을 생성한다.

Abstract: In this study, a multibody simulator was developed to analyze the bio-mimetic motion of a lizard robot design. A RecurDyn multibody dynamics model of a lizard was created using a micro-computerized tomography scan and motion capture data. The bio-mimetic motion simulator consisted of a trajectory generator, an inverse kinematics module, and an inverse dynamics module, which were used for various walking motion analyses of the developed lizard model. The trajectory generation module produces spinal movements and gait trajectories based on the lizard's speed. Using the joint angle history from an inverse kinematic analysis, an inverse dynamic analysis can be carried out, and the required joint torques can be obtained for the lizard robot design. In order to investigate the effectiveness of the developed simulator, the required joint torques of the model were calculated using the simulator.

1. 서 론

탐사 임무를 수행함에 있어 동굴, 도심 등의 협소/은닉 지역에서 감시 정찰 임무를 수행하기 위해서는 소형 로봇이 효과적인 수단이다. 협소/은닉 지역에서 감시/정찰 임무를 수행하기 위해서는 효과적인 이동과 인공/자연 구조물을 등반할 수 있고, 임의의 방향

감시가 가능한 소형 도마뱀 생체 모방 로봇이 유리하기 때문에 도마뱀 운동 분석을 통한 도마뱀 로봇 개발^(1,2)이 수행되고 있다. 하지만 대부분의 도마뱀 로봇은 제한된 자유도로 인해 실제 도마뱀과 같은 범용적인 움직임을 수행할 수 없다는 단점이 있다.

이러한 도마뱀 생체모방 로봇을 설계하기 위해서는 수학적 모델을 이용한 다양한 시뮬레이션이 필요하며, 이러한 시뮬레이션을 기반으로 최적 경로를 생성하기 위한 경로 계획 및 구동력의 요구도 등을 구할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 모션 캡처와 Micro-CT 데이터를 이용하여 도마뱀의 운동을 모사할 수 있는 도마뱀 다물체 기구-동역학 모델을 개발

§ 이 논문은 대한기계학회 동역학 및 제어부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 6. 4.-6., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

하였으며, 이러한 도마뱀 다물체 기구-동역학 모델을 기준 모델로 삼아 보폭, 이동속도 등의 이동 조건에 따라 로봇 개발에 활용하기 위한 지면 반력과 조인트 구동력 등의 데이터 생성을 유기적으로 수행할 수 있는 도마뱀 다물체 동역학 시뮬레이터를 개발하였다. 또한, 개발된 시뮬레이터를 이용한 도마뱀 보행 시뮬레이션을 통해 개발된 시뮬레이터의 유용성을 확인하였다.

2. 생체운동 모사 다물체 동역학 시뮬레이터

도마뱀 동역학 시뮬레이터는 도마뱀의 이동속도, 보폭, 척추의 회전각도 등의 시뮬레이션 입력이 주어지면 최종적으로 획득하고자 하는 도마뱀 다리 조인트 요구 구동력, 지면 반력 등의 결과 값을 출력하는 형식으로 작동한다. 본 연구에서는 상용 다물체 해석 프로그램인 RecurDyn⁽³⁾을 이용하여 시뮬레이터를 구성하였다. Fig. 1은 도마뱀 동역학 시뮬레이터의 수행 순서이다. 도마뱀의 속도가 입력되면 발 궤적 생성기에서 입력된 속도에 따라 척추운동과 발 궤적을 생성한다. 생성된 척추운동과 발 궤적을 역기구학 해석을 통해 관절 각도로 변환하고, 그를 통한 역동역학 해석을 통해 이동속도에 대한 요구 조인트 구동력을 생성한다.

3. 시뮬레이터를 위한 도마뱀 다물체 기구-동역학 기준 모델 생성

3.1 도마뱀 모션 캡처 데이터를 이용한 기구 모델 생성

모션 캡처 데이터를 이용한 기구 모델 개발을

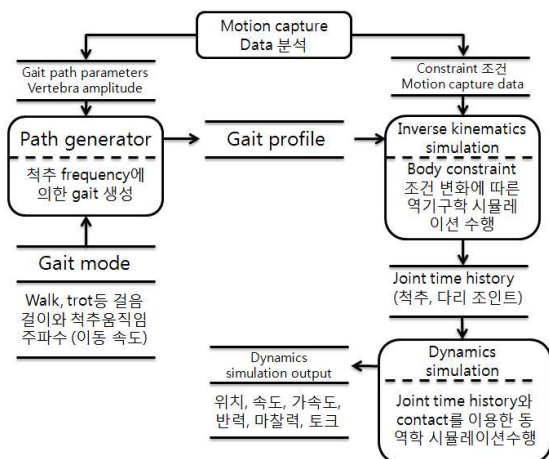


Fig. 1 Data flow of the bio-mimetic motion simulator

위해, Fig. 2의 쿠반에놀을 대상으로 모션 캡처를 수행하였다.^(4,5) 대상이 너무 작을 경우 모션 캡처를 위한 마커 부착이 어려워짐으로, 약 23cm 크기의 쿠반에놀을 선정하여 연구를 수행하였다.

모션 캡처는 도마뱀이 촬영범위를 벗어나지 않게 하기 위한 runway와 모션 캡처를 위한 8대의 vicon 카메라를 이용하여 100fps 캡처 속도로 촬영되어졌으며, Fig. 3은 모션 캡처 실험 장비를 나타낸다.

Fig. 4는 쿠반에놀의 모션 캡처 데이터이다. 데이터는 진행방향을 x, y 좌표로, 높이를 z 방향으로 표시하는 3차원 데이터로 나타난다.

도마뱀의 바디 길이는 Fig. 4에 보여지는 모션 캡처 데이터의 마커 간 거리를 이용하여 계산되어진다. 하지만, 마커가 부착된 도마뱀 체표면의 길이 변화에 따라 촬영 스텝 마다 마커 간 거리가 오차를 갖게 되며, 길이를 결정하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 누적 분포 평균을 이용하여 도마뱀 바디 길이를 결정하였다. 누적 분포



Fig. 2 Cuban Anole lizard for motion capture



Fig. 3 Motion capture equipment

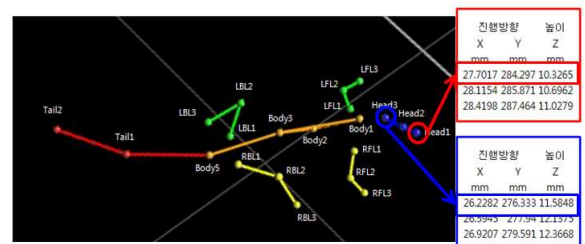


Fig. 4 Cuban Anole motion capture data

평균이란 Fig. 5 와 같이 특정 범위 값 a와 b를 정하고 a, b 사이에 해당하는 평균 값을 구하는 방식이며, 도마뱀 바디 길이 오차를 최소화 하기 위해서 a, b 구간은 데이터 분포가 밀집되어있는 구간으로 선정하였다. 이러한 누적 분포 평균 방식을 통해 계산된 도마뱀 바디 길이는 Table 1 과 같다.

Fig. 6 은 Table 1 의 해당 길이를 도식적으로 표시한 그림이며 Table 1 에서의 첫 번째 열의 번호는 도마뱀의 해당 부분을 나타내고 있다. 생성된 데이터를 이용하여 Fig. 7 과 같은 RecurDyn 도마뱀 기구 모델을 정의하였다.

도마뱀 기구 모델은 척추 모션을 위해서 6 개의 3 자유도 회전조인트로 구성되며, 다리 모션을 위해서 4 개의 3 자유도 어깨 회전 조인트와 4 개의 1 자유도 팔꿈치 조인트로 구성되어있다. 따라서 총 40 자유도 (Base body DOF 6 + Joint DOF 34) 를 갖는 도마뱀 기구 모델이 생성되었다.

3.2 Micro-CT 를 이용한 도마뱀 동역학 파라미터 생성

도마뱀 동역학 모델을 생성하기 위해 정확한 도

Table 1 Cuban anole body length data

	Body	Length (mm)	Deviation
①	Head	28.568	2.017
②	Neck	14.745	5.710
③	Body 1	25.049	6.533
④	Body 2	20.065	1.921
⑤	Body 3	44.470	4.719
⑥	Tail 1	52.261	3.950
⑦	Tail 2	43.768	0.000
⑧	Humerus	13.245	6.561
⑨	Ulna	16.894	12.358
⑩	Femur	22.246	16.891
⑪	Tibia	22.557	20.143

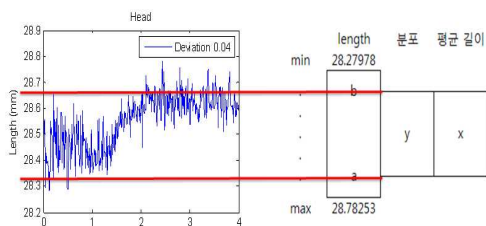


Fig. 5 Cumulative distribution mean method to calculate lizard body length

마뱀 동역학 파라미터를 획득할 필요가 있다. 이를 위해서 정밀 저울을 이용하여 도마뱀의 실제 질량을 측정하였으며, 도마뱀의 부피를 측정하기 위해서 Fig. 8 의 Micro-CT 장비를 이용하였다. 정적인 자세를 유지해야 하는 Micro-CT 촬영 특성상 도마뱀은 정적인 상태를 유지하도록 하여 촬영을 수행하였으며, Micro-CT 촬영 데이터를 3 차원 형상 복원 프로그램인 Rapidform 에 적용하여 Fig. 9 와 같은 도마뱀 3D CAD 모델을 생성하였다.

Micro-CT 로부터 생성된 도마뱀 3D CAD 모델은

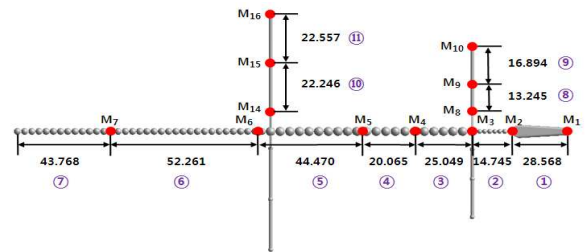


Fig. 6 Body length of RecurDyn lizard kinematics model

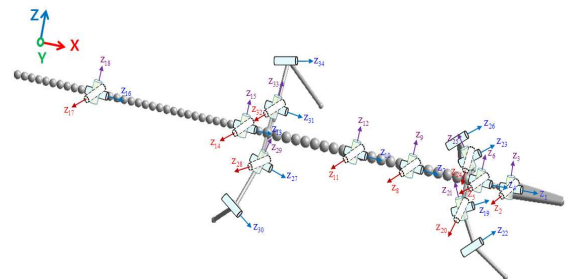


Fig. 7 RecurDyn lizard kinematics model



Fig. 8 Micro-CT equipment

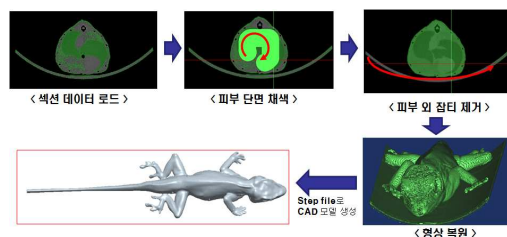


Fig. 9 Lizard 3D CAD model using Micro-CT data

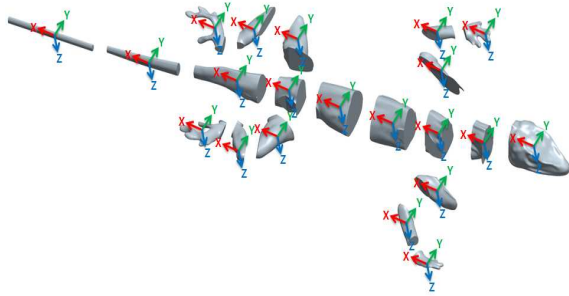


Fig. 10 Lizard CAD model for dynamics parameters

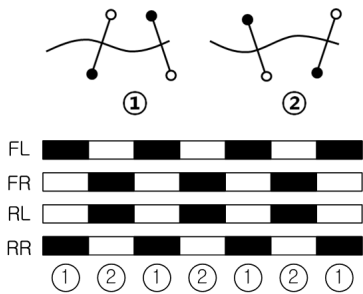


Fig. 11 Lizard gait pattern (trot)

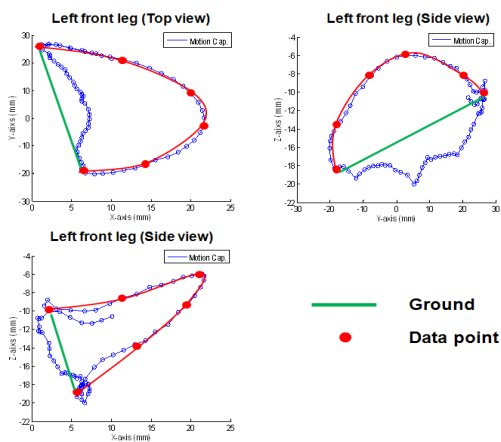


Fig. 12 Gait motion analysis from motion capture data

Fig. 10 과 같이 Fig. 6 의 도마뱀 모델 바디 길이와 동일한 비율로 등분되어졌으며, 각 바디에 해당하는 실제 도마뱀 질량 데이터를 적용하여 동역학 회전 관성 파라미터를 생성하였다.

4. 도마뱀 로봇 설계를 위한 동역학 시뮬레이션

4.1 도마뱀 운동 속도에 따른 발 궤적 및 척추 모션 생성

도마뱀 걸음새는 이동방법에 따라 trot 과 walk 로 분류된다. 네 개의 발을 한발씩 이동하며 저속

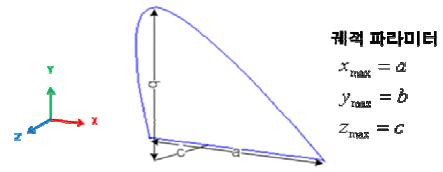


Fig. 13 Basic gait motion pattern

으로 이동하는 걸음새를 walk 라 하며, 대각에 위치한 앞발과 뒷발을 동시에 이동하여 빠른 속도로 진행하는 걸음새를 trot 이라 한다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 도마뱀의 trot 걸음새에 대한 연구가 진행되었다. Fig. 11 은 trot 걸음새의 보행 패턴을 나타내며, FL 과 FR 은 각각 왼쪽 앞발과 뒷발을 의미하고, RL 과 RR 은 각각 오른쪽 앞발과 뒷발을 의미한다. 또한, 검은색 구간은 발이 지면을 딛는 구간을 의미하며, 흰색 구간은 발을 들어 이동하는 구간을 의미한다. 이러한 trot 걸음새는 Fig. 11 의 ①, ② 와 같은 2 가지 동작을 반복하는 특징을 갖는다.

발 궤적 생성기는 이동속도와 발 궤적의 최대 보폭이 주어지면 그에 상응하는 도마뱀 발 궤적을 생성하는 모듈로서, 모듈에 내장되어있는 기본 발 궤적을 입력 조건에 맞도록 변형하는 방식으로 발 궤적을 생성한다. 이러한 기본 발 궤적은 Fig. 12 의 파란색 원으로 표시된 도마뱀 모션 캡처 데이터에서 추출한 궤적 생성 데이터(빨간색 점)를 식 (1)의 cubic spline 함수⁽⁷⁾에 적용하여 생성된다. 식 (1)에서 h 는 모션 캡처의 각 영상 프레임의 시간 차이를 q_i 는 시간 t_i 에서의 모션 캡처 데이터를 나타낸다. 또한, m_i 는 시간 t_i 에서의 보간 함수의 이차 도함수 값을 나타내고 있다. 이러한 cubic spline 함수는 3 차원 발 궤적을 생성하기 위해서 3 축(x, y, z)에 대해 생성 되어야 하며, Fig. 13 은 Fig. 12 의 도마뱀 모션 캡처 데이터와 식 (1)을 통해 생성된 3 차원 상의 도마뱀 기본 발 궤적을 나타낸다. 여기서, a 는 보폭을 나타내며, b 는 발을 들어올릴 수 있는 높이, c 는 발을 옆으로 뻗을 수 있는 거리를 의미한다.

$$S_x^i(t) = \frac{m_{i+1}(t-t_i)^3 + m_i(t_{i+1}-t)^3}{6h_i} + \left(\frac{q_{i+1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}m_{i+1}\right)(t-t_i) + \left(\frac{q_i}{h_i} - \frac{h_i}{6}m_i\right)(t_{i+1}-t)$$

where, $h_i = t_{i+1} - t_i$ (1)

$$q_i = S_x^i(t_i), q_{i+1} = S_x^{i+1}(t_{i+1})$$

$$m_i = S_x''(t_i), m_{i+1} = S_x''(t_{i+1})$$

따라서, 발 궤적 생성기에 입력된 이동속도와 발 궤적 최대 보폭을 통해 Fig. 12의 a, b, c 궤적 파라미터가 결정되며, 이러한 궤적 파라미터를 도마뱀 기본 발 궤적 함수에 곱해주는 것으로부터 식 (2)와 같이 입력 조건에 상응하는 최종 발 궤적을 생성하게 된다. 여기서 $S_x(t), S_y(t), S_z(t)$ 는 식 (1)의 cubic spline 함수로 표현된 x, y, z 축 방향으로의 도마뱀 발 궤적 보간 함수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Phi_x(t) &= aS_x(t) \\ \Phi_y(t) &= bS_y(t) \\ \Phi_z(t) &= cS_z(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Figure 14는 발 궤적 생성기에서 생성된 발 궤적을 나타낸다. 생성된 발 궤적은 trot 형태의 발 궤적을 수행하며, 입력되는 이동속도 값에 따라 이동할 수 있는 발 궤적을 생성하게 된다. 이동속도를 90mm/sec, 180mm/sec, 270mm/sec로 변경하였을 때 생성되는 발 궤적을 확인하여, 속도 증가에 따라 발 궤적의 수행횟수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

도마뱀 척추 모션은 Fig. 15와 같이 모션 캡처

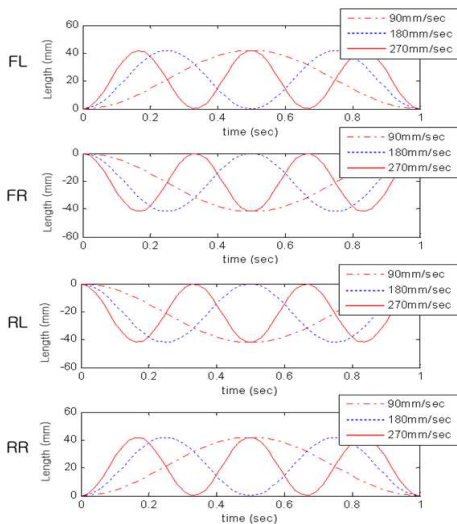


Fig. 14 Gait profile according to the speed change (x-axis)

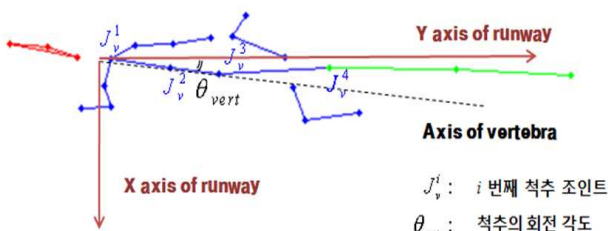


Fig. 15 Definition of vertebra rotational angle

데이터로부터 생성되었다. 첫 번째 척추 조인트 (J_v^1)과 두 번째 척추 조인트 (J_v^2) 사이의 회전 각도를 구하기 위해서 식 (3)을 이용하였다.

$$\theta_{vert} = \tan^{-1} \left(\frac{J_{vx}^2 - J_{vx}^1}{J_{vy}^2 - J_{vy}^1} \right) \quad (3)$$

Fig. 16은 모션 캡처 데이터와 식 (4)를 통해 획득한 첫 번째 척추 조인트의 모션을 나타내며, 최소각도는 약 -5.5° , 최대 각도는 약 12.0° 임을 알 수 있다. 이러한 최대, 최소 각도의 차이는 도마뱀이 runway 위를 일직선으로 걷지 않기 때문에 발생하는 측정 오차이며, 실제 도마뱀은 좌우 회전 각도가 유사한 각도를 갖는다. 따라서, 실제 도마뱀의 척추 회전각도는 5.5° 와 12.0° 의 평균값인 8.75° 를 기준으로 최대, 최소 각도가 $\pm 8.57^\circ$ 인 모션을 갖는 것으로 볼 수 있다.

이와 같이 분석된 척추 조인트 회전 범위를 바탕으로 식 (4)와 같은 척추 모션 함수를 정의하였다. 식 (4)는 뱀의 척추 모션⁽⁸⁾과 유사한 형태를 갖는 함수로서, 도마뱀의 척추 모션이 뱀의 척추 모션과 유사하다는 점에 착안하여 정의되었다.

$$\begin{aligned} f_v(t) &= 9^\circ \cos(4\pi t + 0.25(i-1)) \\ \text{where } i &: \text{Vertebra joint number} \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 도마뱀 역기구학 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용하는 도마뱀 모델은 총 34개의 조인트 자유도를 가지고 있다. 역기구학 시뮬레이터는 발 경로 생성기에서 생성된 발 경로 (12 자유도)와 모션 캡처 데이터로부터 획득한 팔꿈치 조인트 입력데이터(4 자유도), 사인 함수 형태로 주어진 척추 조인트 입력데이터(18 자유도)를 사용하여 역기구학 출력데이터인 다리 관절 각도를 생성한다. Fig. 15는 역기구학을 통해 생성된 다리 관절 각도이다. 다리 하나는 어깨 3자

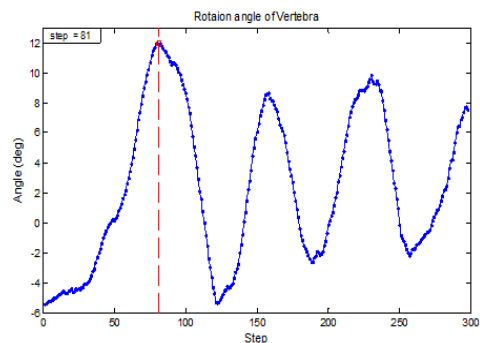


Fig. 16 Vertebra rotational angle of lizard

Table 2 Characteristics of contact model

Spring coefficient(N/mm)	100000
Damping coefficient(Ns/mm)	3
Friction coefficient	0.8

Table 3 Maximum value of ground reaction force

	FL (N)	FR (N)	RL (N)	RR (N)
90 mm/sec	0.2758	0.4052	0.1030	0.1671
180 mm/sec	0.3381	0.4092	0.2585	0.2271
270 mm/sec	0.4050	0.6304	0.4315	4.8157

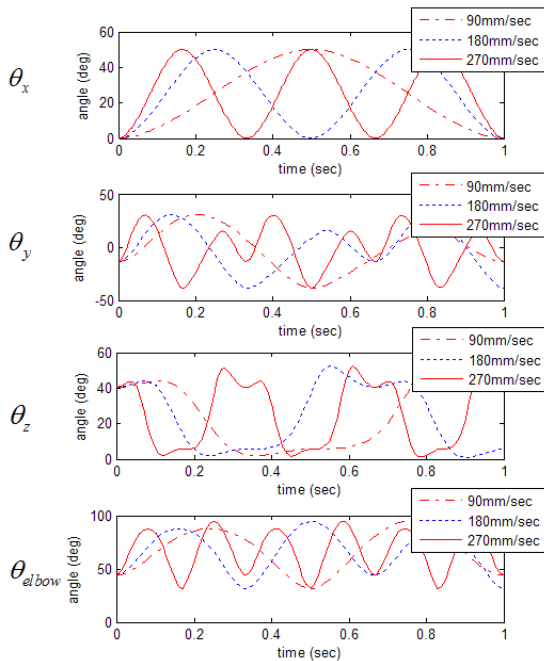


Fig. 17 Joint angle time history (Left leg)

유도와 팔꿈치 1 자유도로 구성되어 네 개의 조인트 결과 값을 출력한다. 역기구학은 이동 속도를 90mm/sec, 180mm/sec, 270mm/sec 에서 생성된 발 궤적을 이용하여 수행 하였으며, 이동 속도 증가에 따른 다리 관절 각도가 생성된다.

4.3 도마뱀 동역학 해석

역동역학 모델은 도마뱀 로봇 발의 형상을 반구로 가정하고 접촉요소를 적용하여 생성하였다. 시뮬레이터의 경우 역기구학에서 생성된 다리 관절 각도와 어깨 조인트 입력데이터, 척추 입력데이터를 포함한 총 34 개의 입력 데이터를 이용하여 역동역학 해석을 수행하며, 도마뱀이 지면을 걸으며 발생하는 지면 반력 및 마찰력, 34 개 조인트의 구동력을 생성한다. 또한, Table 2 는 역동역학 시뮬레이션에 적용된 지면 접촉 계수를 나타낸다.^(8,9)

역기구학을 통해 생성된 다리 관절 각도와 도마뱀 다물체 동역학 모델을 이용하여 동역학 시뮬레이션을 수행하였고, 결과는 Fig. 16 과 같다. 시뮬레이션에 이용된 도마뱀 모델은 대각 방향의 앞

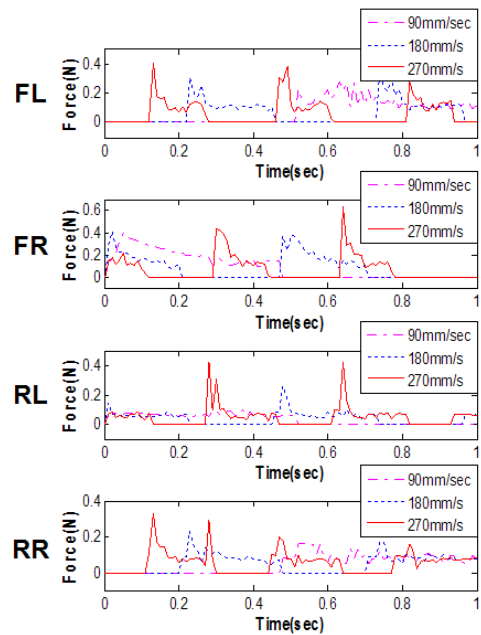


Fig. 18 Reaction force of each foot

발과 뒷발이 동시에 이동하는 trot 형태의 걸음새를 갖기 때문에 Fig. 18 의 시뮬레이션 결과에서 0N 으로 출력되는 구간은 도마뱀의 발이 공중에 위치한 구간이며, 반력이 발생하는 구간은 도마뱀의 발이 지면에 닿아있는 구간을 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 보면, 대각에 놓인 발들이 서로 동일한 시점에 지면 반력을 발생한다는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 시뮬레이션에 적용한 trot 걸음새의 특성에 부합하는 결과라는 것을 알 수 있다. 또한, Table 3 을 보면 속도가 증가할수록 각 발에 작용하는 지면 반력의 최대값이 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 보행에 있어서 발생하는 지면 반력의 일반적인 경향에 부합하는 결과이다. 따라서, 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 도마뱀 생체운동 모사 다물체 동역학 시뮬레이션 플랫폼의 타당성을 입증하였다.

Figure 19 는 동역학 시뮬레이터에 의해 생성된 조인트 구동력을 나타낸다. 90mm/sec, 180mm/sec,

Table 4 Maximum value of required joint torque

	Roll (Nmm)	Pitch (Nmm)	Yaw (Nmm)	Elbow (Nmm)
90 mm/sec	5.1453	2.4868	5.8506	2.7764
180 mm/sec	6.9271	2.8664	7.7648	3.3235
270 mm/sec	8.9042	3.9487	10.1809	4.8157

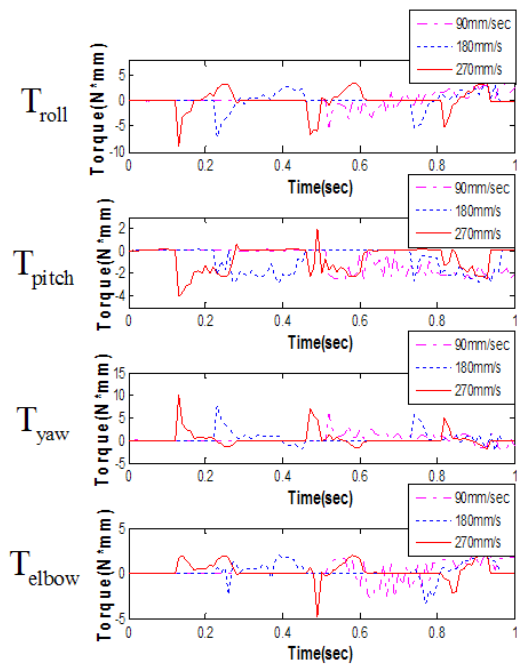


Fig. 19 Required joint torque for the left leg

270mm/sec 로 이동하기 위해서 필요한 각 조인트의 최대 요구 구동력은 Table 4 와 같으며, 이동 속도 증가에 따라 필요 요구 구동력이 증가하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

또한, 이러한 시뮬레이션 결과는 제안된 다물체 동역학 시뮬레이션 플랫폼을 이용하여 보행 변화에 따른 도마뱀 관절의 요구 구동력을 획득할 수 있다는 것을 의미하며, 이러한 요구 구동력을 통해 도마뱀 로봇 설계에 필요한 동역학적 요구도를 측정하기 위한 용도로 사용될 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 모션 캡처 데이터와 Micro-CT 데이터를 이용하여 도마뱀 동역학 시뮬레이터를 위한 도마뱀 다물체 기구-동역학 기준 모델을 생성하였다.

또한, 다양한 속도입력 조건에서의 시뮬레이션

해석을 수행할 수 있도록, 도마뱀 로봇 설계를 위한 다물체 동역학 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 다물체 동역학 시뮬레이터를 이용하여 이동 속도 변화에 따라 수행되는 발 궤적 생성, 역기구학 해석, 동역학 해석 결과를 통해 다물체 동역학 시뮬레이터의 유용성을 확인하였다. 실제 도마뱀 데이터를 기반으로 모델이 생성되었기 때문에, 이러한 다물체 동역학 시뮬레이터를 통해서 도마뱀 로봇 설계에 유용한 데이터를 생성할 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 원자력연구원 주관 위탁 연구 과제 (2013-0173)에 의해서 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Dai, Z. D. and Sun J. R., 2007, "A Biomimetic Study of Discontinuous-Constraint Metamorphic Mechanism for Gecko-Like Robot," *Journal of Bionic Engineering* 4, pp. 091~095.
- (2) Zaaf, A., Van Damme, R., Herrel, A. and Aerts, P., 2001, "Spatio-Temporal gait Characteristics of Level and Vertical Locomotion in A Ground-Dwelling and A Climbing Gecko," *Journal of Experimental Biology* 204, pp. 1233~1246.
- (3) *RecurDyn user's manual 2012*, FunctionBay Incorporation.
- (4) Park, Y. I., Kim, S. S., Shin, H. C., Kim, C. H. and Kim, S. O., 2012, "Development of Bio-Mimetic Multibody Kinematic Model with Motion Capture Data," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*.
- (5) Kim, S. S., Park, Y. I., Seo, B. C. and Shin, H. C., 2013, "A Study on the Bio-Mimetic Motion for the Reptile Robot Simulation Model," *Proceedings of 7th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio (BAMN2013)*.
- (6) Inagaki, K. and Kobayashi, H., 1993, "A Gait Transition for Quadruped Walking Machine," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 525~531.
- (7) John, H. M. and Kurtis, D. F., 2004, *Numerical Methods Using Matlab – Fourth Edition*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 280~290.
- (8) Hirose, S., 1993, *Biologically Inspired Robot : Snake-Like Locomotors and Manipulators*, A Oxford University Press.
- (9) Shin, H. C., Kwon, J. J., Seo, B. C., Kim, T. W. and Kim, S. S., 2013, "Development of Snake Robot

- Based on Multi-Body Dynamics Simulation,”
Proceeding of Multibody Dynamics, pp. 797~803.
- (10) Lim, C. S. and Lim, Y. W., 2010, “The
Experimental Study on the Transient Brake Time of
Vehicles by Road Pavement and Friction Coefficient,”
Journal of the Korean Society of Civil Engineers,
Vol.30, No.6, pp. 587~597.