도마뱀 생체 데이터를 이용한 속보 걸음새 생성

Trotting Gait Generation Based on the Lizard Biometric Data

김 창 회* · 신 호 철[†] · 이 흥 호**

(Chang Hoi Kim · Ho Cheol Shin · Heung Ho Lee)

Abstract - A variety of studies on imitating the skeletal structure and the gait of legged animals have been done in order to develop walking robots which have an ability to adapt to atypical environments. In this paper, we analyzed the gait of a Bearded dragon lizard using the motion capture system, proposed a calibration scheme of the motion data and generated the trotting gait of a lizard based on the calibrated data. Also, we constructed the dynamic model based on the biometric data of a Bearded dragon lizard and applied the trotting gait of the lizard to the dynamic model. We verified the validity of the gait with the commercial dynamic simulation software.

Key Words : Lizard, Biometric data, Quadruped, Sprawl posture, Trotting gait

1. 서 론

사람이 접근하기 어려운 환경에서 원격으로 작업을 수행하기 위하여 개발이 시작된 로봇은 산업현장에서 활용이 되어 왔으며 최근에는 가정, 병원 등의 서비스 분야뿐만 아니라 재난현장, 국방 등의 분야로의 적용이 활발히 시도되고 있다. 이와 같이 로봇을 다양한 분야에 적용시키기 위해서는 다양한 환경에서 이동이 가능하여야 한다. 로봇의 이동 방식은 크게 바퀴 구동형과 다리 구동형으로 분류할 수 있다. 바퀴 구동형은 적은 에너지를 소모하고 평지에서 빠른 이동과 제어가 간단하다는 장점을 가지고 있으나 장애물이나 계단 등이 있는 험지에서의 이동성은 현격하게 떨어진다. 다리를 사용하여 이동하는 보행 로봇은 부착된 다리 형태에 따라 2족, 4족, 6족 등의 여러 형태로 개발이 되고 있다. 이러한 보행 로봇은 험난한 지형에서 용이하게 이동이 가능하나 기계적 구조 및 제어가 복잡하여 안정성이 떨어진 다. 4족 보행 방식은 자연계에서 포유류 및 뱀을 제외한 파충류의 이동방식으로써 안정성을 유지하면서 비교적 빠른 이동이 가능하다. 따라서 4족 보행 로봇을 산악과 같이 험한 지형에서 물건을 옮기거나 주변을 탐색하는 등의 분야에 적용을 하기 위한 연구가 폭넓게 수행되고 있다.

4족 보행 로봇의 안정성은 몸체의 이동에 따라 다리를 연속적으로 움직이는 걸음새에 의하여 결정되므로 걸음새에 관한 연구는 4족 로봇 개발의 기반이 되는 연구이다. 걸음새 생성을 위해서는 다리의 움직임 순서, 발끝의 궤적 및 안

정성 해석 등의 여러 요소를 복합적으로 고려하여야 한다. 보행 로봇의 안정성을 평가하는 방법은 무게 중심(center of mass : CoM)을 이용하는 방법, 세로 안정 여유(longitudinal stability margin : MSM)을 이용하는 방법, 에너지 안정 여유(energy stability margin : ESM) 등이 제안되었다[1-3]. 또한 4족 보행의 안정적 걸음을 위하여 phase 걸음새, intermittent crawl 걸음새, sway 걸음새, ZMP(zero moment point)를 이용한 걸음새 등의 걸음새가 제안된 바 있다[4-6]. 이러한 많은 노력과 관심에도 비정형 환경에 충분한 적응 능력을 갖기 위한 명확한 해결책은 제시되지 못하였으며 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 현재까지도 수행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 4족 보행 로봇을 개발함에 있어 동물의 골격 구조와 보행 방법을 모방하려는 노력이 이루어지고 있다.

포유류 및 파충류는 4 개의 다리를 이용하여 움직이는 대표적인 동물이지만 걷는 자세는 상이하다. 개나 말과 같이 기립자세(upright posture)로 보행하는 포유류의 걸음새에 대해서는 많은 연구가 되어 있고 이들의 걸음새를 모방한 견마형 로봇은 많이 개발된 바 있다[7-11]. 파충류의 경우에는 뱀의 형태와 운동 방식을 모방한 뱀 로봇이 개발된 바 있으며 도마뱀붙이의 수직벽을 이동하는 능력을 모방한 로봇, 수상에서 이동 가능한 도마뱀 로봇 등이 개발되고 있으나 도마뱀 걸음새를 모방한 보행 로봇은 초기 연구단계이다[12-13].

펼친 자세(sprawled posture)로 보행하는 도마뱀은 기립자세(upright posture)로 보행하는 포유류에 비하여 무게중심이 지면에 밀착되어 있고 4 개의 다리를 펼쳐서 움직이기 때문에 안정된 자세로 이동이 용이하다. 또한 몸통의 뛰어난 유연성으로 인하여 좁은 통로나 장애물이 있는 험한 지형도 쉽게 통과할 수 있다. 이러한 도마뱀의 형태는 재난현장에서의 정찰 및 탐지 등의 분야에 적용이 적합한 장점이 된다.

본 논문의 저자들은 선행연구에서 도마뱀의 동작을 구현하기 위한 기구학 모델을 제안한 바 있다[14]. 이를 바탕으

* Nuclear Technology convergence Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

** Electrical Engineering Division, Chungnam National University, Korea

[†] Corresponding Author : Nuclear Technology convergence Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
E-mail : smarhc@kaeri.re.kr

Received : August 26, 2013; Accepted : September 13, 2013

로 하여 본 논문에서는 턱수염도마뱀 (Bearded Dragon Lizard)의 걸음 형태를 분석하였으며 이를 기구학 모델에 적용하여 걸음새 기법을 제시하였다. 또한 턱수염 도마뱀의 생체 데이터를 획득하여 동역학 파라미터를 생성하고 상용 동역학 해석 프로그램에 적용하여 동력학 모델을 구축하였다. 구축된 도마뱀 모델에 생성된 걸음새를 적용하여 움직임을 분석함으로써 동력학 모델의 타당성을 확인하였다.

2. 도마뱀 동작 데이터 획득 및 보정

2.1 기구학 모델

그림 1은 도마뱀의 동작을 기구학적으로 해석하기 위한 기구학 모델을 보여주고 있다. 허리를 유연하게 움직이는 펼친 자세 움직임을 충실하게 구현할 수 있도록 몸통은 3개의 유니버설 관절과 1개의 수직회전 관절로 구성되었다.

그림 1 도마뱀 기구학 모델

Fig. 1 Kinematic model of the lizard

속보로 이동하는 도마뱀의 동작을 분석해보면 다리를 앞으로 뻗을 때 쇄골과 골반도 같이 뻗음으로써 짧은 다리로도 넓은 보폭으로 걷는 것을 알 수 있다. 이러한 움직임을 구현하기 위하여 쇄골 중앙에 어깨를 수평방향으로 회전시키는 수평회전 관절(j_5)을 배치하였다. 골반의 경우에는 골반의 폭이 어깨에 비하여 상대적으로 좁고 복부의 위치한 유니버설 관절(j_{16})로 이러한 동작을 어느 정도 보완할 수 있기에 몸통에 대한 골반의 수평 회전은 배제하였고 이를 보상하도록 동작 데이터를 보정하였다. 무릎 및 팔꿈치는 1자유도의 회전 관절로 설정하고 어깨 및 고관절은 구형관절을 배치하였으며 발의 움직임은 고려하지 않았다. 전체 모델은 25 자유도를 가지며 식 (1)과 같이 5개의 기구학 체인을 갖는다.

$$\begin{aligned} {}^0T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 \\ {}^0T_{lf} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 {}^9T_{lf} \\ {}^0T_{rf} &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 {}^9T_{rf} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0T_{lb} &= {}^0T_{14} {}^1T_{15} {}^2T_{16} {}^3T_{17} {}^4T_{18} {}^5T_{19} {}^6T_{20} {}^7T_{21} {}^8T_{lb} \\ {}^0T_{rb} &= {}^0T_{14} {}^1T_{15} {}^2T_{16} {}^3T_{17} {}^4T_{22} {}^5T_{23} {}^6T_{24} {}^7T_{25} {}^8T_{rb} \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 동작 데이터 보정

2.2.1 턱수염도마뱀 모션 캡처

몸 길이 약 32 cm 인 턱수염도마뱀의 동작 데이터를 획득하기 위하여 도마뱀의 관절 부위 피부에 직경 4 mm의 마커를 부착하였다. 그림 2에서 보여주는 것처럼 몸통 및 꼬리의 움직임을 측정하기 위하여 머리부터 꼬리까지 척추를 따라 9개의 마커를 부착하였으며 다리에는 고관절, 무릎, 발목 관절 부위에 마커를 부착하였다. 도마뱀의 보행 동작은 8대의 적외선 카메라 (Vicon Motion Co. MX-F40)를 사용하여 5 msec 간격으로 측정하였다. 측정은 온도 25.8 °C, 습도 54 %의 실내환경에서 이루어졌으며 평지에서 6회 측정하였고 23.6°의 경사면에서 6회 실시하였다. 경사면에서의 동작이 평지와 다른 것으로 예상하였으나 캡처된 데이터를 분석한 결과 평지와 같은 패턴으로 보행함을 확인할 수 있었으며 더 가파른 경사면에서는 미끄럼으로 인하여 측정할 수가 없었다.

그림 2 마커 부착된 턱수염도마뱀

Fig. 2 Markers adhered Bearded dragon lizard

2.2.2 동작데이터의 보정

본 논문에서는 광학식 모션 캡처 방식으로 도마뱀의 동작을 측정하였다. 약 1.5 m 거리에 떨어진 직경 4 mm의 소형 마커의 위치를 카메라를 이용하여 측정하므로 오차의 발생은 피할 수 없으며 도마뱀이 움직임에 따른 피부의 떨림으로 인하여 오차가 증가하게 된다. 또한 실제 관절 위치에 정확하게 마커를 부착하기는 용이하지가 않다. 측정 데이터에서 쇄골 중앙(j_5)과 어깨 관절(j_6, j_{10})에 부착한 마커의 간격은 최대 약 6 mm의 편차(var 2.37)가 있는 것을 확인할 수 있다. 어깨 관절, 고관절, 쇄골관절 및 골반 관절의 위치는 보행 패턴을 분석하는데 중요한 역할을 하기 때문에 관절의 위치는 기구학 모델의 특성에 부합되게끔 수정되어야 한다.

그림 3은 기구학 모델의 상부 몸통을 보여주고 있다. 그림 3을 살펴보면 쇄골 중심점 p_c 의 위치는 양쪽 어깨의 중앙에 위치하며 또한 쇄골 관절(j_5)과는 수직 방향으로 d_l 만

کم 떨어져 있어야 한다. 즉, 2T 좌표계를 기준으로 한 하였을 때 2p_c 의 위치는 식 (2)와 같아야 한다.

그림 3 상부 기구학 모델

Fig. 3 Upper body kinematic model

$${}^2p_c \equiv [l_3, -d_1, z, 1]^T \quad (2)$$

여기에서 l_3 는 j_2 관절과 j_5 관절 간의 링크 길이이고 d_1 은 쇄골관절과 어깨 관절 사이의 옵셋링크 길이이며 z 는 p_c 로부터 양쪽 어깨 길이의 차이이다. 따라서 양쪽 어깨 관절 위치를 식 (3)에 적용하여 보정된 쇄골 관절과 어깨 관절의 위치를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^2p_6 &= ({}^0T) {}^0p_6 \\ {}^2p_{10} &= ({}^0T) {}^0p_{10} \\ {}^2p_c &= \frac{{}^2p_6 + {}^2p_{10}}{2} \\ \tilde{p}_6 &= {}^0T ({}^2p_6 - [0, 0, z, 0]^T) \\ \tilde{p}_{10} &= {}^0T ({}^2p_{10} - [0, 0, z, 0]^T) \\ \tilde{p}_5 &= {}^0T [l_3, 0, 0, 1]^T \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 p_6, p_{10} 은 캡처된 양쪽 어깨 관절의 위치벡터이고 0T 는 D-H 변환행렬이며 $\tilde{p}_5$ 는 보정된 쇄골관절의 위치벡터이고 $\tilde{p}_6, \tilde{p}_{10}$ 은 보정된 양쪽 어깨 관절의 위치벡터이다. 같은 방식을 적용하여 골반 관절과 고관절의 위치를 보정하였다.

도마뱀은 보행시 그림 4에서 보여주는 것과 같이 팔을 앞으로 내뻗을 때 어깨를 지면으로부터 올려서 팔끝과 지면과의 거리를 유지한다. 그림 3과 같은 기구학 모델에서는 이러한 어깨의 상하 움직임은 구현할 수가 없다. 어깨의 상하 움직임을 고려하여 관절의 위치 값을 적절하게 보정하지 않으면 그림 5(a)와 같이 지면에 닿아 있는 발이 공중에 떠 있는 것으로 해석되어 걸음새 분석에 치명적 오류가 발생하게 된다. 이러한 오류를 보정하기 위해서 그림 5(b)에서 보여주는 것과 같이 어깨 관절의 상하 움직임에 따른 어깨 관절의 위치는 보정하면서 양쪽 팔꿈치 관절의 위치는 원래의 위치를 유지할 수 있도록 어깨 및 팔꿈치 관절의 위치를 보정하였다.

어깨 관절은 3 자유도의 구형관절이고 팔꿈치는 1 자유도의 회전관절로 모델링되어 다리 관절은 4 자유도를 가진다. 2개의 링크로 구성된 다리가 4 자유도를 가질 경우 한 개의 여유자유도로 인하여 팔꿈치의 위치는 일반적인 기구학 해

석 방법을 적용하여 구할 수 없다. 즉 팔꿈치의 위치는 어깨 관절을 중심으로 상완 길이를 반경으로 하는 구와 손끝을 중심으로 하여 팔뚝 길이를 반경으로 하는 구가 교차하여 만들어 내는 원주 형태의 무한 해가 존재한다. 본 논문에서는 어깨 관절(fr_1), 팔꿈치 관절(fr_2) 및 손끝(fr_3)이 이루는 평면(P_1)이 어깨의 높이가 변하더라도 일정하다고 가정하여 팔꿈치의 위치를 보정하였다.

그림 4 보행 시 양팔의 자세

Fig. 4 Limbs posture during walking

그림 5 쇄골 관절 수직방향 움직임 보정

Fig. 5 Vertical rotation calibration of clavicle joint

어깨 관절은 3 자유도의 구형관절이고 팔꿈치는 1 자유도의 회전관절로 모델링되어 다리 관절은 4 자유도를 가진다. 2개의 링크로 구성된 다리가 4 자유도를 가질 경우 한 개의 여유자유도로 인하여 팔꿈치의 위치는 일반적인 기구학 해석 방법을 적용하여 구할 수 없다. 즉 팔꿈치의 위치는 어깨 관절을 중심으로 상완 길이를 반경으로 하는 구와 손끝을 중심으로 하여 팔뚝 길이를 반경으로 하는 구가 교차하여 만들어 내는 원주 형태의 무한 해가 존재한다. 본 논문에서는 어깨 관절(fr_1), 팔꿈치 관절(fr_2) 및 손끝(fr_3)이 이루는 평면(P_1)이 어깨의 높이가 변하더라도 일정하다고 가정하여 팔꿈치의 위치를 보정하였다.

어깨관절을 기준으로 평면 P_1 은 식 (4)와 같다.

$$\vec{p}_1 \equiv \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix} = (fr_1 - fr_2) \times (fr_3 - fr_2) \equiv u_2 \quad (4)$$

쇄골관절의 수직방향 회전을 보정한 어깨 관절의 위치는 쇄골 관절이 지면과 평행하도록 θ 만큼 회전시켜 구할 수 있다. 보정된 어깨 관절 위치를 기준으로 하였을 때 팔꿈치 관절과 손끝과의 사이각은 식 (5)와 같다.

쇄골관절의 수직방향 회전을 보정한 어깨 관절의 위치는 쇄골 관절이 지면과 평행하도록 θ 만큼 회전시켜 구할 수 있다. 보정된 어깨 관절 위치를 기준으로 하였을 때 팔꿈치 관절과 손끝과의 사이각은 식 (5)와 같다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{l_6^2 + d^2 - l_7^2}{2l_6d} \right) \quad (5)$$

그림 9 걸음새 생성 흐름도

Fig. 9 Gait generation flowchart

도마뱀의 동작 측정은 여러 번에 걸쳐 수행하였으나 최종적으로 총 5 차례의 의미있는 보행 자세 데이터를 획득할 수 있었으며 1회 당 4~6 걸음을 걸어 총 25 걸음의 보행 자세를 측정할 수 있었다. 왼쪽 뒷발이 지면을 닫는 때를 걸음의 시작점으로 하여 보행 패턴을 분석하였다. 측정 결과 한 걸음을 걷는데 평균 0.56 초가 걸렸으며 보행 주기 동안에 지면에 발이 닿아있는 비율인 디듀티(duty)은 평균 0.42 이다. 한 걸음동안 평균 약 11 cm를 약 20 cm/sec 속도로 이동하는 것으로 측정되었다. 사람에 의하여 애완용으로 사육되고 있는 텍수염도마뱀을 대상으로 측정하였으므로 야생의 텍수염도마뱀은 훨씬 빠른 것으로 예상되며 또한 대상 도마뱀이 측정된 이동속도보다 훨씬 빠른 속도로 움직이는 것을 목격하기도 하였다. 표 1은 이러한 측정 결과를 보여준다. 매 걸음마다 디듀티의 편차가 심하고 최고 0.63에서 최저 0.16 까지 측정이 되었다. 디듀티가 낮으면 이동 속도가 빠를 것으로 예상되었으나 디듀티와 속도는 일치하지 않았다. 일례로 동일한 디듀티를 가지는 걸음이지만 이동속도는 차이가 많아서 최고로 빠르게 이동한 걸음 구간과 최저 속도 걸음 구간에서의 디듀티는 동일하게 0.4 이었다. 또한 디듀티가 제일 높았던 걸음구간에서의 이동속도는 26.7 cm 이었고 디듀티가 제일 낮았던 걸음 구간에서의 이동속도는 20.9 cm 이다. 이러한 결과를 통해 자연 상태 도마뱀은 매번 같은 주기로 걸음을 반복하지는 않는다는 것을 확인할 수 있다. 매 걸음마다 이동속도는 차이가 있지만 걸음 자세를 분석하여 보면 유사한 보행 패턴은 가진다는 것을 확인할 수 있으며 이러한 결과는 그림 10의 발목 관절의 궤적을 살펴봐도 확인할 수 있다. 그림 10은 텍수염도마뱀 발목이 x 방향으로 이동할 때 발목 관절의 움직임을 보여주고 있는데 그림 10(a)는 모션캡처 시스템 좌표계를 기준으로 한 XY 평면상에서의 발목관절 궤적을 보여주고 있으며 그림 10(b)는 같은 움직임을 몸통좌표계 기준으로 변환한 관절궤적이다. 그림 10(b)를 살펴보면 보행시 앞발과 뒷발이 다른 패턴을 유지하는 것을 알 수 있다.

표 1 측정된 걸음새 변수

Table 1 Measured gait parameter

항목	평균	최대값	최소값
걸음 주기(sec)	0.56	0.63	0.45
디듀티	0.42	0.61	0.16
이동거리(cm)	11	12.3	10.1
이동속도(cm/sec)	20	27.3	17.9

그림 10 XY 평면에서의 발목 관절 궤적

Fig. 10 Ankle loci on XY plane

그림 11은 몸통 좌표계를 기준으로 한 걸음 주기 동안의 발목 관절의 궤적을 보여주고 있으며 표 2는 한 주기 동안의 걸음새 변수 평균값을 보여주고 있다. 표 2와 그림 11을 살펴보면 보폭이나 발간격 등의 변수값이 왼쪽, 오른쪽 발 사이에는 크게 차이가 없으나 앞발과 뒷발 사이에는 차이가 나는 것을 알 수 있으며 발목 높이의 경우에는 현격한 차이를 보이고 있다. 이는 보행시 앞발과 뒷발의 역할이 다르다는 것을 의미하는 것으로 뒷발은 몸을 추진시키는 역할의 비중이 큰 반면에 앞발은 방향 전환 및 제동의 역할에 큰 비중이 있는 것으로 판단된다. 그림 11(b)의 XZ 평면에서의 발목 관절 궤적을 보면 보행시 지면을 딛고 있는 다리를 앞으로 뻗을 때 사람이 달리는 동작과 유사하게 다리를 뒤로 어느 정도 뻗은 상태에서 앞으로 옮기는 것을 알 수 있으며 다리를 앞으로 내딛는 동작은 뒤로 뻗은 구간, 앞으로 뻗은 구간, 지면에 착지하는 구간으로 세분할 수 있다.

그림 11 한걸음 주기의 발목 관절 궤적

Fig. 11 Ankle loci during one cycle

표 2 한 주기 동안의 걸음새 변수

Table 2 Gait parameter during one cycle

항목 (mm)	앞발		뒷발	
	왼쪽	오른쪽	왼쪽	오른쪽
보폭	60	58	55	48
발침 넓이	10	9	9	7
발 간격	24	25	37	39
최고 발목높이	27	26	21	18

그림 12는 보행시 발목의 높이 궤적 중 일부를 보여주고 있다. 그림 12에서 알 수 있듯이 대각방향의 다리가 비슷한 주기로 움직이지만 주기가 정확하게 일치하지는 않는다. 대각 방향의 다리가 지면에 닿는 순서도 일정하지는 않지만

대체로 (약 64 %) 뒷다리가 앞다리보다 먼저 지면에 닿는다. 앞발과 뒷발의 지면을 딛는 시간차는 최대 0.04 초로 측정되었다.

도마뱀 모델의 동력학 모델을 구축하기 위하여 냉동 상태의 텍수염 도마뱀 사체를 그림 13과 같이 기구학 모델의 관점에 해당하는 부분을 절단하여 각 부위 별로 무게 및 크기를 측정하였다. 본 논문의 저자들은 선행 연구를 통하여 측정한 비슷한 크기와 무게의 쿠반에놀 도마뱀을 대상으로 Micro CT 촬영을 수행하여 쿠반에놀의 형상데이터를 획득하였으며 이를 CAD 프로그램을 이용하여 3차원 형상 모델로 복원하여 각 부위별 관성모멘트를 구한 바 있다[15]. 텍수염 도마뱀의 각 부위별 관성모멘트는 선행 연구에서 획득한 값을 적용하였다. 표 3은 텍수염 도마뱀의 각 부위별 길이 및 무게를 보여준다.

표 3 텍수염 도마뱀 부위별 길이 및 질량

Table 3 Length and weight of a lizard

부위	질량(g)	길이 (cm)
머리	10.3	3.6
목	1.5	0.8
쇄골 길이	5.9	1.7
가슴	7.8	1.8
복부	10.8	3.6
골반	3.7	1.9
앞발 상완	0.8	2.4
앞발 팔뚝	0.5	1.7
뒷발 허벅기	1.3	2.3
뒷발 정강이	0.6	2.2
손	0.3	2.3
발	0.4	3.1
꼬리	1	2.9
	2	1.7
	3	0.9
	4	0.5
		7.7

그림 12 발목의 높이 궤적
Fig. 12 Ankle height trajectory

그림 13 텍수염 도마뱀 절단
Fig. 13 Bearded dragon lizard dissection

그림 14 도마뱀 CAD 모델
Fig. 14 Lizard CAD model

측정된 보행 자세 중에서 지면을 딛고 있는 구간이 명확하고 XY 평면상에서 4 개 발목 궤적이 단순한 걸음 주기를 선정하여 걸음세 보정 작업을 수행하였다. 그림 15는 보정 전의 한주기 걸음 궤적을 보여주고 그림 16은 보정을 거친 궤적을 나타낸다.

그림 15 보정 작업 전 발목의 궤적
Fig. 15 Ankle trajectory before calibration

그림 16 보정 작업 후 발목 궤적
Fig. 16 Ankle trajectory after calibration

캡처된 도마뱀의 동작 데이터를 살펴보면 앞 절에서 언급한 캡처 오차로 인하여 손끝, 발끝의 높이가 지면 아래에 위치하는 경우가 있다. 지면에 딛고 있을 때의 발목의 높이가 일정하며 걸음 주기 동안 움직임이 연속적이며 좌우 양쪽 다리의 움직임이 유사하도록 각 프레임에서의 발목의 위치

를 수작업으로 수정하였다. 수정된 발목의 위치는 앞 절에서 기술한 보정 기법을 적용하여 어깨, 고관절의 위치는 유지하고 손끝, 발끝의 위치는 지면과 일치하면서 고관절, 무릎, 발목이 이루는 평면이 일정하도록 무릎의 위치를 보정하였다.

보정된 한주기 걸음새에 대한 역기구학 해석을 통하여 도마뱀 모델의 관절 궤적을 구하고 이를 동역학 시뮬레이터에 입력하여 걸음 자세를 평가하였다. 그림 17은 우측 뒷다리의 관절 궤적을 보여준다. 그림 17에서 붉은 색 점선은 걸음 주기의 기준이 되는 골반관절의 궤적이다.

그림 17 뒷다리 관절 궤적

Fig. 17 Hind limb joint trajectories

본 논문에서는 상용 동력학 상용 소프트웨어인 Recurdyn을 사용하여 속보 걸음새에 대하여 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 18은 도마뱀 모델이 속보로 걷는 동작을 보여주고 있다.

그림 18 동력학 모델 시뮬레이션

Fig. 18 Dynamic model simulation

디딤돌 0.5로 한 걸음에 8.3 cm를 움직이는 걸음새를 동력학 모델에 적용한 결과 10 걸음을 걷는 동안에 80 cm 이동하는 것을 확인하였다. 적용한 걸음새에 비하여 약 4 %의 오차가 발생하였는데 이는 보행 초기 정지상태에서 걷기 시

작할 때 지면과의 미끄럼이 발생하고 보행 중 지면과 접촉시 발생하는 반력 때문인 것으로 판단된다. 그림 19는 발끝의 궤적을 보여준다. 보행 중 앞발을 내딛는 동안 발끝과 지면과의 거리가 적용한 걸음새와 차이가 발생한다. 이는 지면을 딛고 있는 발의 움직임으로 인하여 상부 몸통이 위로 약 0.5 cm 올라가기 때문이다.

그림 19 발목 궤적 시뮬레이션

Fig. 19 Ankle Loci Simulation

4. 결 론

본 논문에서는 모션 캡처 장비를 이용하여 획득한 텍수염 도마뱀의 걸음새를 분석하고 이를 기구학 모델에 적용하여 펼친 자세의 걸음새를 생성하였다. 이를 위하여 도마뱀 보행 데이터로부터 정확한 쇄골 및 골반 관절의 위치를 찾기 위한 기법을 적용하여 동작 데이터를 보정하였으며 보행시 도마뱀의 쇄골과 골반의 움직임을 반영할 수 있도록 여유자유도를 가지는 모델 다리의 기구학 해를 구하는 기법을 제안하여 동작데이터를 보정하였다. 도마뱀의 보행 자세를 분석하여 걸음새 생성에 필요한 주기, 보폭과 같은 변수들을 확보하고 추출한 한 주기 걸음새를 수정하고 확보한 변수를 적용하여 걸음새를 생성하였다. 또한 텍수염도마뱀의 부위별 생체데이터를 측정하여 동력학 모델을 구축하였으며 동역학 시뮬레이션을 통하여 생성된 걸음새의 타당성을 검증하였다. 동역학 시뮬레이션에서 지면과의 접촉 시에 발생하는 미끄러짐과 반발력에 대한 부분은 추가 연구를 통하여 보완할 예정이다.

감사의 글

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

References

- [1] P.V. Nagy, S. Desa, and W.L. Whittaker, "Energy based stability measures for reliable locomotion of statically stable walkers: theory and application", *International Journal of Robotics Research*, vol. 13, No. 3, pp. 272-287, 1994

- [2] D. Messuri and C. Klen, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-terrain Locomotion", *IEEE Journal of Robotics and automation*, vol 1, No. 3, pp. 132-141, 1985
- [3] Jung-Min Yang, "Design Fault-Tolerant Gaits for Quadruped robots Using Energy Stability margins", *The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineering*, Vol. 55D, No. 7, pp. 319-326, 2006
- [4] Ryo Kurazume, Kan Yoneda, "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle", *Autonomous robots*, Vol. 12, No. 2, pp.157-172, 2002
- [5] G. Santos and M. A. Jimenez, "Generation of discontinuous gait for quadruped walking vehicles", *Journal of Robotic System*, vol. 12, no. 9, pp/ 599-611, 1995
- [6] Se-Hoon Park, Yun-Jung Lee, and Yeong-Ho Ha, "Discontinuous Zigzag Gait Planning of Quadruped Walking robot with an Articulated Splene", *Journal of Control, Automation and System Engineering*, Vol. 10. No.8, pp. 703-710, 2004
- [7] Ron M. McLaughlin, "Kinetic and Kinematic Gait Analysis in Dogs", *Veterinary clinics of north America: small, animal practice*, Vol.31, No. 1, 2001
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Woorchul 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
- [14] Chang Hoi Kim, Ho Cheol Shin, Heung Ho Lee, "Kinematic Modelling of the Trot of a Lizard based on the Motion Capture", *Journal of The Institute of Electronics Engineerings of Korec System and Control*, Vol. 50, No. 8, 2013
- [15] Seong Soo Kim et. al, "A study on bio-mimetic motion of reptiles" Kaeri/CM-1707/2012, 2012
- [16] Donghoon Son, Dongsu Jeon, Woorchul 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

저 자 소 개

김 창 회 (金 昶 會)

현재 충남대학교 전기공학과 박사과정
 현재 한국원자력연구원 책임연구원
 Tel : 042-868-2930
 E-mail : chkim3@kaeri.re.kr

신 호 철 (申 昊 哲)

1998년 인하대학교 기계공학과 대학원졸업(박사)
 현재 한국원자력연구원 책임연구원
 Tel : 042-868-8836
 E-mail : smarthc@kaeri.re.kr

이 흥 호 (李 興 浩)

1994년 서울대학교 컴퓨터공학과 대학원졸업(박사)
 현재 충남대학교 전기공학과 교수
 Tel : 042-821-5656
 E-mail : leehh@cnu.ac.kr