

논문 2013-50-9-16

소형 도마뱀 운동 분석을 위한 마커리스 모션 캡처 알고리즘

(Markerless Motion Capture Algorithm for Lizard Biomimetics)

김 창 회*, 김 태 원*, 신 호 철*, 이 흥 호**

(Chang Hoi Kim, Tae Won Kim, Ho Cheol Shin[©], and Heung Ho Lee)

요 약

본 논문에서는 마커를 부착하기 어려운 소형도마뱀의 관절을 측정하기 위한 마커리스 모션 캡처 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서는 먼저 스테레오 비전과 같은 다시집 영상에서 적응적 이진화를 통해 도마뱀의 실루엣 영상을 획득하고 세선화를 수행하여 도마뱀의 뼈대 영상을 획득한다. 이후, 직교-대각 성분 제거 알고리즘 및 A* Search를 통해 머리와 꼬리 점, 및 머리와 꼬리를 잇는 척추라인을 구한다. 어깨관절과 고관절의 좌표는 3x3 마스크를 이용하여 척추라인과 다리가 만나는 지점을 구하여 획득하고 모폴로지 단기 영상을 통해 발바닥 좌표들을 검출한다. 최종적으로 각각의 다리에서 어깨관절 및 고관절 좌표와 발바닥 좌표를 잇는 직선과 해당 다리의 뼈대 좌표간의 직교 거리 비교를 통해 무릎과 팔꿈치 좌표를 구한다. 최종적으로 제안한 알고리즘으로 검출된 각 관절의 다시집 영상의 2차원 좌표들로부터 각 관절의 3차원 좌표를 복원한다. 실제 도마뱀을 촬영한 스테레오 영상에 제안된 알고리즘을 적용하여 2차원 주요 관절 지점 검출 및 3차원 복원을 수행하여 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a algorithm to find joints of a small animal like a lizard from the multiple-view silhouette images is presented. The proposed algorithm is able to calculate the 3D coordinates so that the locomotion of the lizard is markerlessly reconstructed. The silhouette images of the lizard was obtained by a adaptive threshold algorithm. The skeleton image of the silhouette image was obtained by Zhang-Suen method. The back-bone line, head and tail point were detected with the A* search algorithm and the elimination of the ortho-diagonal connection algorithm. Shoulder joints and hip joints of a lizard were found by 3x3 masking of the thicked back-bone line. Foot points were obtained by morphology calculation. Finally elbow and knee joint were calculated by the ortho distance from the lines of foot points and shoulder/hip joint. The performance of the suggested algorithm was evaluated through the experiment of detecting joints of a small lizard.

Keywords : lizard, biomimetics, markerless motion capture, silhouette image, 3D reconstruction

I. 서 론

생체모방 연구란 사람이나 동물이 갖는 디자인적 요

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

** 정희원, 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: 2013년7월11일, 수정완료일: 2013년8월26일

소나 기능, 생물체의 특성 등을 연구 및 모방하여 인류의 과제를 해결하려는 과학의 한 분야이다. 생체모방 연구는 특히 로보틱스 분야에서 오래전부터 이루어져왔다. 이는 자연의 생물체가 가지는 골격의 구조나 움직임 방식 등이 우리가 살아가는 지구 환경 위에서 가장 완벽하게 적용된 것이기 때문이다. 따라서 로봇의 성능을 향상시키기 위해 생물체를 연구하고 모방하는 것은 충분히 합리적인 접근 방법이며 오히려 필수적인 일이다. 이러한 생체모방 연구에 의해 개발된 생체모방 로봇은 대상이 되는 생물체의 형태와 대표적인 기능적 특징을 모사한 것으로 기존의 로봇들이 할 수 없었던 고유의 기능과 움직임을 가진다. 그림 1은 세계 각국에서



그림 1. 생체모방 로봇
Fig. 1. Biomimetic robot.

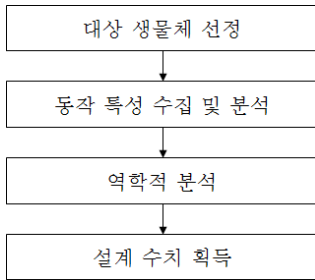


그림 2. 생체 운동 모사 연구 단계
Fig. 2. procedures for biomimetics.

개발된 생체모방 로봇의 모습이다.

소형 파충류의 특징을 모방한 생체 모방형 로봇의 연구는 일반적으로 그림 2와 같은 순서로 진행된다. 우선 대상 생물체를 선정하고 대상 생물체의 형태와 운동 특징 정보를 다양한 방법을 통해 수집하고 분석하여 일반화된 모델을 만들고 역학적 분석을 수행하며 대상 생물체의 환경 적응적 특성, 기구적 효율, 에너지 효율 등, 생체모방 로봇 설계에 필요한 파라미터를 획득한다.

특히 동작 특성 수집 및 분석 단계는 실제 생물체의 운동을 수치화 하여 이후의 역학적 분석의 토대가 되는 데이터를 확보하는 것으로 생체모방 연구에서 매우 중요한 부분이다. 이때, 획득하는 데이터는 대상 생물체의 이동 방식 및 이동에 필요한 각 관절의 궤적 및 토크, 및 대상 생물체가 외부로부터 받는 힘 등이 있다. 이 중, 대상 생물체의 주요 관절의 움직임을 얻는 모션캡처는 일반적으로 대상 생물체를 촬영한 다시점 영상을 분석하여 획득한다.

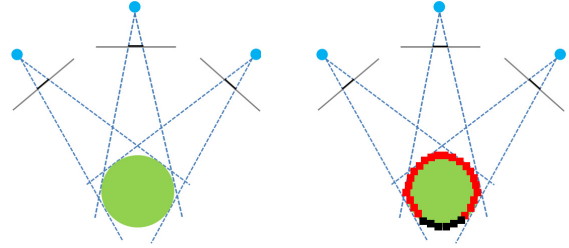


그림 3. 공간조각법을 이용한 2차원 형상 복원
Fig. 3. 2d reconstruction using space carving.

이러한 모션캡처 방법 중 주로 활용되는 방법은 수작업으로 영상 내의 관절 좌표를 구하는 방법과^[1] 마커를 사용하는 마커기반 모션캡처^[2], 마커 없이 3차원 형상을 직접 획득한 뒤 관절 지점을 찾는 마커리스 모션캡처 등이 있다^[3]. 이러한 방법들 중, 수작업으로 관절 지점을 찾는 방법은 많은 작업시간을 필요로 한다. 즉, 대상체의 순간 운동 속도를 고려하면 관측 데이터는 대부분 고속카메라를 사용하여 촬영된 영상이며 이러한 영상은 각 카메라에서 1초에 100프레임 이상이 획득된다. 따라서 수작업으로 관절지점을 찾는 방법은 너무 많은 시간이 소요된다. 또한 마커를 사용하는 방법은 소형 도마뱀과 같이 대상 생물체의 크기가 매우 작아 적외선 마커를 붙이기 힘들다. 또한 마커를 붙이는 행위 자체가 도마뱀의 움직임을 경직시켜 올바른 실험데이터를 얻기 힘들다는 문제점이 있다. 따라서 소형 도마뱀이나 그보다 작은 생물체의 생체 운동 모사 연구에는 마커리스 모션캡처 알고리즘을 사용한 접근이 필수적이다.

마커리스 모션캡처의 일반적인 방법은 실루엣 해석을 통한 형상 복원방식(Shape from silhouette)이다. 이는 그림 3에서 보여주는 것과 같이 여러 대의 카메라로 촬영한 영상에서 대상 생물체의 실루엣을 획득하고 이를 3차원 공간상에 역영상(back-projection) 하여 공간상의 교차 공간을 획득하는 방법으로 이러한 방법을 시각체법(visual hull) 또는 공간조각법(space carving)이라 한다^[4-5].

실루엣 정보를 사용하는 공간조각법, 시각체법은 보통 실험 대상 주위에 다수의 카메라를 배치하여 다시점 영상을 획득하며, 카메라를 많이 사용할수록 3차원 복원 품질이 좋아진다. 그러나 카메라의 수가 많아지면 시간당 저장 할 영상의 양이 많아져 시스템이 거대해진다는 문제가 있다. 또, 공간조각법이나 시각체법은 자기 폐색(self occlusion) 문제가 나타나며 이를 해결하기 위해 각 영상에서 색상 매칭을 수행하는 단위색차조각법 등이 있지만 관측대상물의 부위별 색상 차이가 크지 않

을 경우에는 색상 매칭이 올바르게 이루어지지 않는다는 문제가 있다.

미래의 전쟁에서 무인화된 로봇은 시가전이나 테러전에서 효과적으로 대응이 가능하고 또한 인명 피해를 최소화할 수 있다. 은밀한 접근 및 은닉을 필요로 하는 정착이나 순찰 등의 분야에서는 소형 파충류나 곤충과 같은 방식으로 이동 접근이 가능한 생체모방형 로봇을 필요로 한다. 본 논문에서는 소형 파충류 모방형 로봇 개발의 일환으로 소형 생물체의 운동 방식을 효과적으로 관측이 가능한 소형도마뱀 마커리스 모션캡처 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법은 카메라 두 대를 사용하여 획득한 다시점 영상에서 대상물의 실루엣을 구하고 실루엣 내의 주요 관절 지점을 검출하여 3차원 복원을 수행하는 것이다. 제안된 알고리즘은 소형도마뱀을 대상으로 하여 성능을 검증하였다.

II. 본 론

1. 주요 관절 좌표 검출 알고리즘 흐름도

제안하는 알고리즘은 그림 4에 나타난 순서로 양안 카메라의 각각의 영상으로 부터 도마뱀의 주요 관절의 위치를 검출하여 3차원 복원하게 된다. 즉, 스테레오 조정^[6] 된 각각의 카메라 영상에서 도마뱀 실루엣을 검출하고 이후 세선화(thinning)를 수행하여 도마뱀의 뼈대를 얻는다. 이후 뼈대에서 머리와 꼬리에 해당하는 좌표를 검출하여 척추 라인을 구하고, 어깨관절 및 고관절 좌표와 발바닥 좌표를 검출한 뒤 무릎 및 팔꿈치 좌표를 검출한다. 최종적으로 양쪽 이미지에서 검출된 주요 좌표는 삼각법(triangulation)을 통해 3차원 좌표로 복원된다.

2. 알고리즘 세부 구현

가. 실루엣 영상 획득

실험 스테이지 배경으로 하얀색 시트를 깔고 그 위에 도마뱀을 올려놓고 촬영하는 방식으로 도마뱀 영상을 획득하였다. 도마뱀의 실루엣은 이진화(threshold) 알고리즘을 적용하였으며, 조명의 영향을 배제하기 위하여 블록 단위로 이진화를 수행하는 적응적 이진화(adaptive threshold)를 통하여 이진화된 이미지를 얻는다^[7]. 그림 5. (a)는 스테레오 조정이 끝난 베이스 영상이며 (b)는 적응적 이진화 결과로 획득한 이진 영상이다.

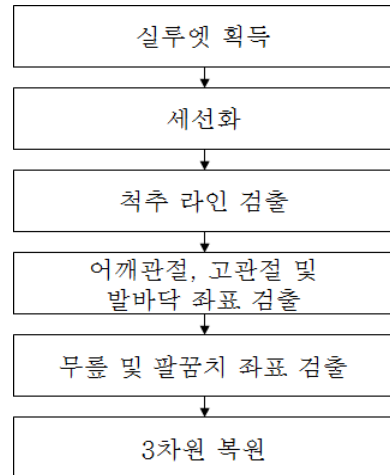
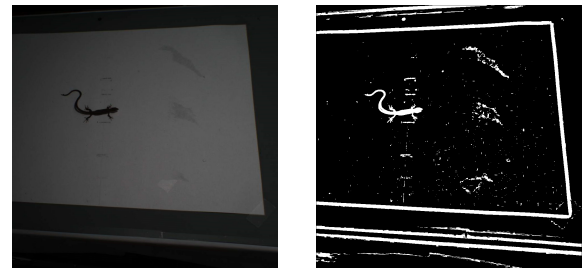


그림 4. 마커리스 모션캡처 알고리즘 흐름도
Fig. 4. Flow chart of the markerless motion capture algorithm.



(a) 베이스 영상 (b) 적응적 이진화 결과

그림 5. 베이스 영상과 적응적 이진화 결과
Fig. 5. Base Image and result of adaptive threshold.

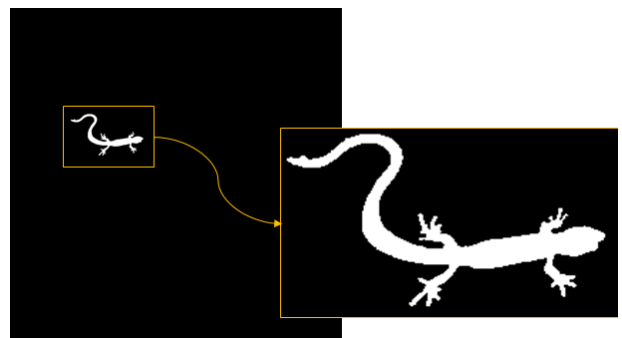


그림 6. 도마뱀 실루엣 영상
Fig. 6. Silhouette image of a lizard.

이때, 이진 영상의 내부에는 도마뱀 실루엣과 더불어 각종 노이즈가 존재하는데 이는 레이블링(labeling)과 외곽선(contour)을 이용하여 제거한다. 그림 6은 노이즈를 제거한 도마뱀 실루엣 영상이다.

나. 세선화

세선화 알고리즘은 뼈대화(skeletonize) 알고리즘이라고도 불리며 어떤 두께를 가진 이진 영역을 둘러 깎아

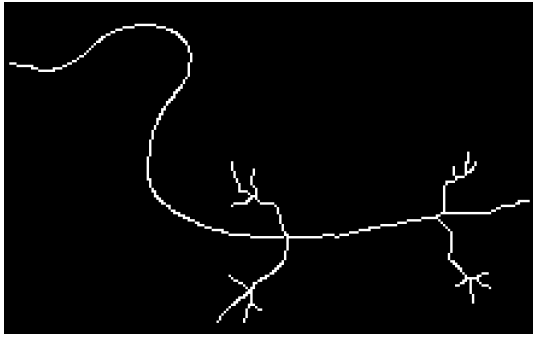
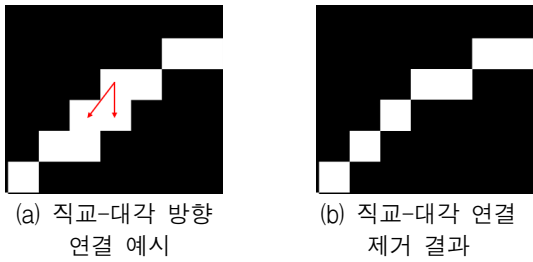
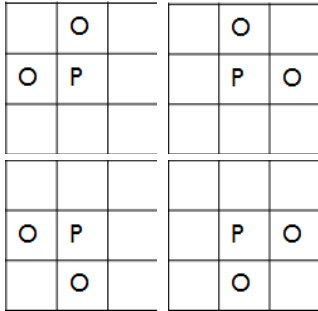


그림 7. 도마뱀 뼈대 영상
Fig. 7. Skeleton image of a lizard.



(a) 직교-대각 방향 연결 예시
(b) 직교-대각 연결 제거 결과



(c) 직교-대각 연결 성분 제거용 마스크

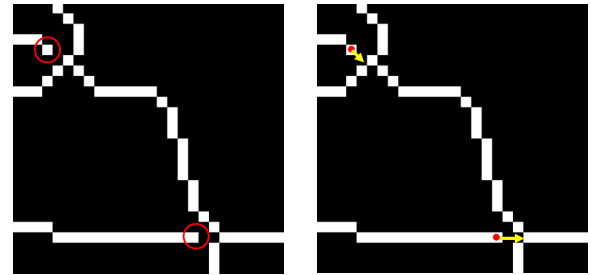
그림 8. 직교-대각 연결의 제거
Fig. 8. Elimination of ortho-diagonal connection.

한 픽셀 두께의 선분으로 만드는 알고리즘이다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 Zhang-Suen 방법을 이용하여 세선화를 수행하였다^[8]. 그림 7은 세선화 결과로 획득한 도마뱀 뼈대 영상이다.

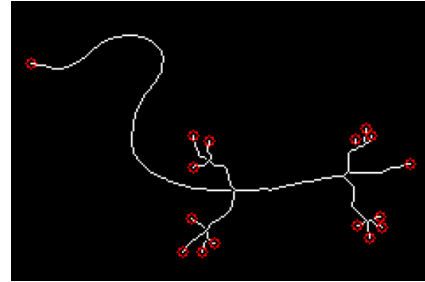
Zhang-Suen 알고리즘을 통해 획득한 도마뱀 뼈대 영상은 그림 8. (a)와 같이 직교 방향과 대각 방향이 동시에 연결된 영역이 존재하므로 뼈대 영상의 255 픽셀 값을 갖는 흰색 영역에 그림 8. (c)의 네 개의 마스크를 순회하여 원형으로 마킹된 부분에 255 픽셀 값이 존재하면 중심 픽셀 값을 0으로 바꿔준다.

다. 척추 라인 검출

위에서 획득한 도마뱀 뼈대 영상에서 척추 라인을 검출하기 위해 끝점을 찾는다. 이 때, 끝점이란 뼈대 영상의 선분들의 끝에 해당하는 지점을 말한다. 앞서 직교-



(a) 끝점 좌표 오검출 예
(b) 처리 전략



(c) 처리 결과

그림 9. 끝점 검출
Fig. 9. End-points detection.

대각 연결 성분이 제거된 도마뱀 뼈대 영상의 255 픽셀 값을 갖는 영역에 3 x 3 마스크를 순회하면 뼈대 중간에서는 마스크내의 255 픽셀 값을 갖는 픽셀의 개수가 3개이고 끝점에서는 2개이기 때문에, 마스크 내의 255 픽셀 수가 2개인 경우 끝점으로 검출하였다.

이 때, 직교-대각 성분 제거 연산의 결과로 뼈대의 선분 교차점 부분이 끊어진 경우 그림 9. (a)와 같이 끝점으로 오검출된다. 이러한 오검출을 제거하기 위해 그림 9. (b)와 같이 모든 끝점 좌표에 3 x 3 마스크를 적용한 뒤, 끝점 좌표와 연결된 255 픽셀 값을 가지는 픽셀을 검출하여 끝점 좌표의 진행 방향을 검출한다. 이 때, 진행 방향은 수직 방향과 대각 방향, 즉 여덟 방향 중 하나가 되며 직교-대각 성분 제거 결과로 뼈대의 선분 교차점이 끊어져 오검출된 끝점 좌표 일 경우, 해당 방향으로 3 픽셀 진행하는 동안 다른 뼈대 좌표와 만나게 되므로 오검출된 끝점 좌표를 검출할 수 있다. 그림 9. (c)는 최종적으로 검출된 끝점 좌표이다.

이후 끝점 좌표들 간의 최근접 이웃 거리(nearest neighbor distance)를 계산하여 값이 큰 끝점 두 개를 머리와 꼬리의 후보점으로 결정한다. 그 다음 두 후보점에서 머리와 꼬리 좌표를 특정하기 위하여 도마뱀의 머리가 꼬리보다 더 많은 면적을 차지한다는 도마뱀의 형태 정보를 이용한다. 즉, 도마뱀 실루엣 영상에서 머리와 꼬리 후보점을 중심으로 척추 라인 길이의 1/10 크기의 마스크를 생성한 뒤, 마스크 내부의 255 픽셀의 개수를

세어 더 많은 쪽을 머리 좌표, 적은 쪽을 꼬리 좌표로 결정한다.

머리와 꼬리를 잇는 뼈대 경로는 A* search를 통해 획득한다^[9]. 이 때, 뼈대가 끊어져 있으면 A* search의 경로가 생성되지 않으므로 직교-대각 방향 연결을 제거하기 전 뼈대 이미지에서 A* search를 수행한다. 그림 10은 머리와 꼬리 좌표, 척추 라인을 검출한 결과이다.

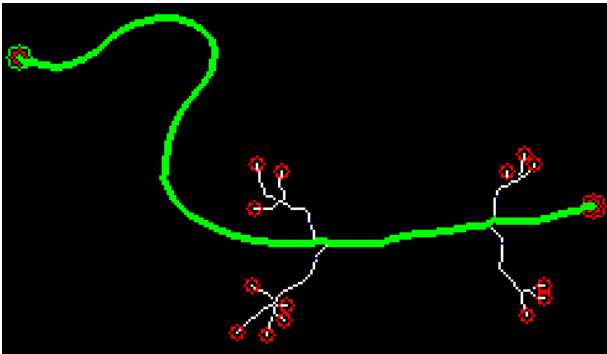


그림 10. 머리, 꼬리, 척추 라인 검출 결과
Fig. 10. Head, tail and back-bone line detection.

라. 어깨관절, 고관절 및 발바닥 좌표 검출

도마뱀의 앞, 뒷다리가 몸통과 연결되는 관절 중 앞다리 부위를 어깨관절, 뒷다리 부위를 고관절이라 한다. 이러한 관절 부위는 그림 11과 같이 획득한 척추 라인을 뼈대 색상과 다른 색으로 두껍게 뼈대 영상위에 다시 그린 뒤, 3 x 3 마스크를 척추 라인 영역에 순회하여 뼈대와 척추 라인의 픽셀 값이 동시에 마스크 내에 존재하는 지점을 검출함으로써 획득할 수 있다.

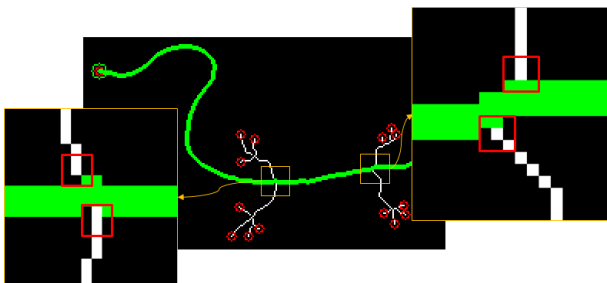


그림 11. 어깨관절 및 고관절 좌표 검출
Fig. 11. Shoulder-joint and hip-joint detection.

획득한 네 관절 좌표를 각각 왼쪽 앞발, 오른쪽 앞발, 왼쪽 뒷발, 오른쪽 뒷발로 구분하기 위하여 우선 k-means 알고리즘을 사용한다^[10]. k-means 알고리즘은 입력 데이터를 임의의 k개 군집으로 분류하는 알고리즘이다.

앞서 획득한 네 개의 관절 좌표를 입력으로 하고, k값을 2로 하여 k-means 알고리즘을 수행하면 어깨 관절에 해당하는 앞다리 쪽 그룹과 고관절에 해당하는 뒷다리 쪽 그룹으로 나눌 수 있다.

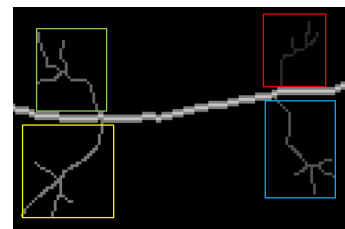
이후, 각각의 그룹에서 관절 점의 좌, 우는 식 (1)을 사용하여 판별 할 수 있다.

$$d(x,y) = (x_{ed} - x_{st})(y - y_{st}) - (x - x_{st})(y_{ed} - y_{st}) \tag{1}$$

여기서 $d(x,y)$ 는 점 $P(x,y)$ 의 위치 관계 판별 값이며, (x_{st}, y_{st}) 는 점 P_1 의 좌표, (x_{ed}, y_{ed}) 는 점 P_2 의 좌표, (x,y) 는 새로운 점 P 의 좌표이다.

만약, $d(x,y) < 0$ 이면 $P(x,y)$ 는 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 의 왼쪽에 위치하고 $d(x,y) > 0$ 이면 $P(x,y)$ 는 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 의 오른쪽에 위치하며 $d(x,y) = 0$ 이면 $P(x,y)$ 는 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 위에 위치한다. 따라서, 각 관절 그룹의 중심점에서 임의의 반지름을 가지는 원을 그려 척추 라인에 만나는 두 점 중 머리 쪽에 가까운 점을 P_1 , 꼬리 쪽에 가까운 점을 P_2 로 선택하면 어깨 관절과 고관절의 좌우를 판별할 수 있다.

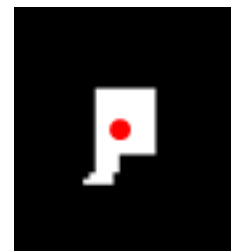
위와 같이 획득한 네 좌표, 즉, 왼쪽 어깨관절, 오른쪽 어깨관절, 왼쪽 고관절, 오른쪽 고관절을 시작 좌표로 하여 8방향 연결성을 이용해 레이블링하면 각각의 다리 영역을 그림 12. (a)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) 다리 영역 레이블링



(b) 분할된 다리 영역



(c) 모폴로지 연산 후 영역 중심 표시

그림 12. 다리 영역 분할 및 발바닥 좌표 검출
Fig. 12. Leg segmentation and foot position detection.

그림 12. (b)와 같이 분할 된 다리 영역에 모폴로지 팽창(dilation)과 침식(erosion) 연산을 수행하여 발바닥 영역만을 남긴 뒤, 그림 12. (c)와 같이 그 중심점을 구하여 발바닥 좌표를 검출한다. 머리, 꼬리, 척추라인, 어깨 관절, 고관절, 발바닥 좌표 검출 결과를 베이스 영상에 오버랩하여 표시하면 그림 13과 같다.

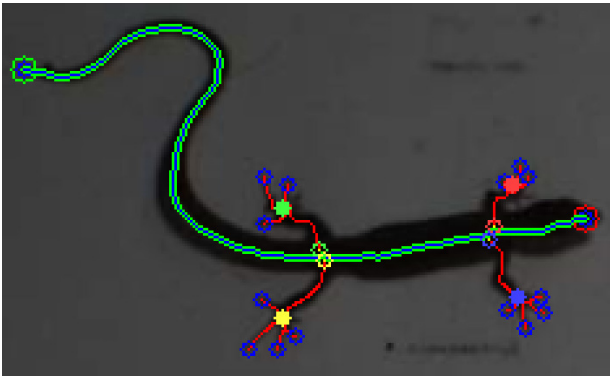


그림 13. 어깨, 고관절 및 발바닥 좌표 검출 결과
Fig. 13. Shoulder, hip-joint and palm detection.

마. 무릎 및 팔꿈치 좌표 검출

무릎 및 팔꿈치 좌표는 각각의 다리에서 어깨관절 및 고관절의 좌표와 발바닥 좌표를 이용하여 검출한다. 식 (2)와 같이 각 다리의 어깨, 고관절 좌표를 P_1 , 발바닥 좌표를 P_2 라고 할 때, 선분 $\overline{P_1P_2}$ 와 다리의 뼈대 좌표들 $S = (s_1, \dots, s_N)$ 사이의 직교 거리를 측정하여 그중 가장 큰 값을 무릎 및 팔꿈치 좌표로 결정한다.

$$S^* = \operatorname{argmax}_{S = (s_1, \dots, s_N)} (\operatorname{orthodist}(\overline{P_1P_2}, S)) \quad (2)$$

식 (2)를 통하여 얻은 무릎 및 팔꿈치 좌표를 그림 13에 오버랩하면 그림 14와 같이 도마뱀의 주요 관절 위치를 나타낼 수 있다.

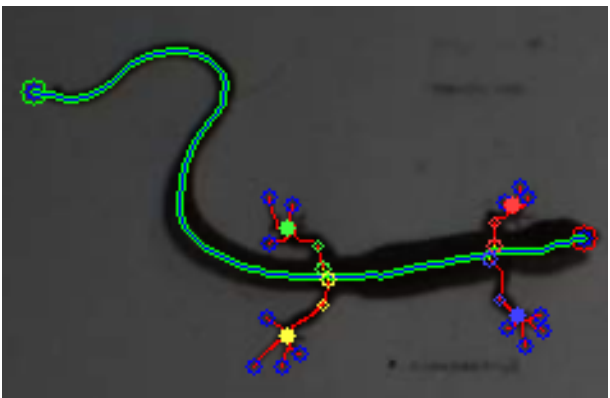
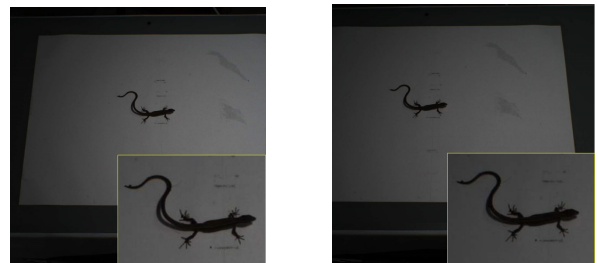


그림 14. 무릎 및 팔꿈치 검출 결과
Fig. 14. Result of knee and elbow detection.

III. 실험 및 결과 고찰

서로 다른 자세를 취하고 있을 때와 다리의 가려짐이 발생했을 때에도 제안한 알고리즘이 올바르게 동작함을 보이기 위하여 그림 15와 같은 두 세트의 영상을 선정하여 결과를 확인하였다.

그림 16은 각각의 영상에서 제안한 알고리즘으로 주요 관절을 검출한 결과와 획득한 관절 좌표를 이용하여 3차원 복원한 결과를 보여준다. 제안한 알고리즘은 도마뱀의 다리가 영상에 보이지 않는 경우에도 보이지 않는 다리를 제외한 나머지 다리를 왼쪽 앞발, 오른쪽 앞발, 왼쪽 뒷발, 오른쪽 뒷발로 올바르게 분류하는 것을 확인할 수 있다.

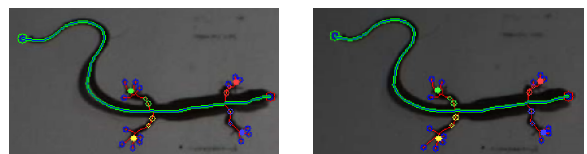


(a) 다리의 가려짐이 발생하지 않은 실험영상 (좌/우)

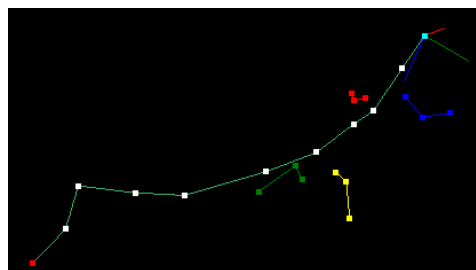


(b) 좌측 앞발의 가려짐이 발생한 실험영상 (좌/우)

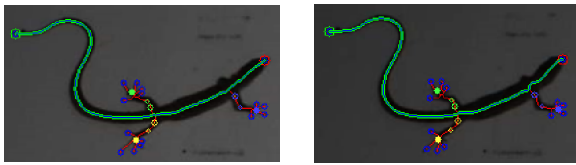
그림 15. 실험 영상
Fig. 15. Experiment Image.



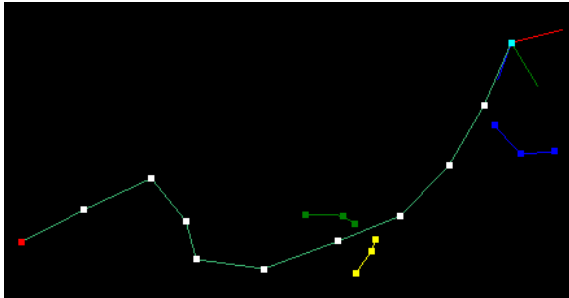
(a) 첫 번째 실험 영상 관절 좌표 검출 결과 (좌/우)



(b) 첫 번째 실험 영상 3차원 복원 결과



(c) 두 번째 실험 영상 관절 좌표 검출 결과 (좌/우)



(d) 두 번째 실험 영상 3차원 복원 결과

그림 16. 실험 결과 및 3차원 복원 결과

Fig. 16. Result of experiment and 3d reconstruction.

표 1은 그림 16. (b)의 3차원 좌표들로부터 도마뱀의 네 다리의 길이를 구하여 실제 도마뱀의 측정값과 비교한 것이다. 이 때, 도마뱀의 왼쪽 부분이 오른쪽 부분보다 오차가 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 실험 영상에서 카메라의 설치 위치가 수직 위가 아니라 약간 오른쪽으로 치우쳐졌기 때문이다. 이는 측정 시 카메라의 각도를 수직으로 세팅하거나 반대 쪽 측면을 촬영한 영상을 활용하여 해결할 수 있다.

표 1. 도마뱀 각 다리 별 길이 비교

Table 1. Compare to length of each leg of the lizard.

측정부위	제한한 알고리즘(mm)	실제 측정치 (mm)	오차 (mm)
앞다리(좌)	7.4	10.2	2.8
앞다리(우)	10.3	9.9	0.4
뒷다리(좌)	12.2	10.4	1.8
뒷다리(우)	11.0	11.3	0.3

IV. 결 론

본 논문에서는 마커기반 모션 캡처 시스템을 적용할 수 없는 소형 도마뱀의 생체 운동 분석 연구를 위하여 주요 관절의 3차원 좌표를 복원하는 마커리스 모션 캡처 알고리즘을 제안하였다. 스테레오 카메라를 이용하여 촬영한 도마뱀 영상에서 제안된 알고리즘을 적용하여 도마뱀의 실루엣을 구하고 실루엣 내의 주요 관절의 위치를 검출함으로써 주요 관절의 3차원 좌표를 복원할

수 있으며 이를 통하여 도마뱀의 관절 움직임 및 이동 방식 등의 생체 운동 분석이 가능하다. 실험을 통하여 4 개의 다리가 모두 보이지 않는 경우에도 나머지 다리의 3차원 좌표 복원이 가능함을 입증하였으며 도마뱀의 각 부위별 실측치와의 정량적인 비교를 통해 생체 운동 분석 연구에 사용하기에 충분한 성능을 보임을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Floyd. S., Keegan. T., Palmisano J, Sitti M, "A novel water running robot inspired by basilisk lizards.", *Proc. of the IEEE/ RSJ intl. conf. on intell. robot. and sys*, pp. 5430 - 5436, Beijing, China, Oct. 2006.
- [2] Jason. K. Moore, J.D.G. Kooijman, A.L. Schwab, "Rider motion identification during normal bicycling by means of principal component analysis", *Multibody Syst Dyn*, 25. pp. 225 - 244, 2011.
- [3] Luca Ballan, Guido Maria Cortelazzo, "Marker-less motion capture of skinned models in a four camera set-up using optical flow and silhouettes.", *Proc. of 3D PVT'08*, pp. 18 - 20, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, June 2008.
- [4] Laurentini. A., "The Visual Hull Concept for Silhouette Based Image Understanding.", *IEEE PAMI*, Vol. 16, no. 2, pp. 150-162. 1994.
- [5] Kutulakos, K. N. and Seitz, S. M., "A theory of shape by space carving", *International Journal of Computer Vision*, 38(3), pp. 199 - 218, 2000.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman., "Multiple View Geometry in Computer Vision.", Cambridge University Press, 2000.
- [7] Gonzales. R.C. Woods. R.E., "Digital Image Processing.", Addison-Wesley, 2nd edition, Sep. 1993.
- [8] Zhang. T. and Suen. C., "A fast parallel algorithm for thinning digital patterns.", *Communications* 27, pp. 235 - 239. 1984.
- [9] S. Russell and P. Norvig., "Artificial Intelligence: A Modern Approach." Prentice-Hall, 1995.
- [10] Krishna, K., and M. Narasimha Murty., "Genetic K-means algorithm." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 29.3 pp. 433-439, 1999.
- [11] Sangbae Kim, Matthew Spenko, Salomon Trujillo, Barrett Heyneman, Daniel Santos, Mark R. Cutkosky, "Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 65-74, 2008.

- [12] 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", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA) 2012*, pp. 4347 - 4354, 2012
- [13] <http://usavision.com/2011/11/17/us-airforce-develops-fly-bot/>
- [14] <http://techcrunch.com/2011/06/01/darpa-video-shows-the-evolution-of-the-hummingbot-namo-uav/>
- [15] Ho Yeol Choi, In Kyu Park, "Multi-view Image Deblurring for 3D Shape Reconstruction", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 49, No. 11, pp. 47-55, 2012.
- [16] HeeDong Kim, SeongDae Kim, Refinement of Depth Map for Shape from Silhouette Method and Multi-view Images", *2006 IEEE Autumn Conference*, pp. 643-646, 2006.

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>



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>



김 태 원(정회원)
2009년 충남대학교 메카트로닉스
공학과 졸업(학사)
2011년 충남대학교 메카트로닉스
공학과 졸업(석사)
2011년~현재 한국원자력연구원

<주관심분야 : 컴퓨터 비전, 3차원 복원, SLAM>



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

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