

특집논문 (Special Paper)
방송공학회논문지 제27권 제2호, 2022년 3월 (JBE Vol.27, No.2, March 2022)
<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.2.207>
ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

3D 볼류메트릭 모델의 동적 복원 알고리즘

박 병 서^{a)}, 김 동 욱^{a)}, 서 영 호^{a)†}

Dynamic Reconstruction Algorithm of 3D Volumetric Models

Byung-Seo Park^{a)}, Dong-Wook Kim^{a)}, and Young-Ho Seo^{a)†}

요 약

최신 볼류메트릭 기술이 제공하는 높은 기하학적 정확도와 사실성은 실제 객체와 캡처된 3D 모델 간 높은 일치도를 보장한다. 그럼에도 불구하고 이렇게 획득된 3D 모델은 프레임 간 완전히 독립적인 3D 모델로 시퀀스를 구성하고 있다는 측면에서, 매 프레임 모델 표면 구조(Geometry)의 일관성이 보장 되지 않으며, 정점(Vertex)의 밀도가 매우 높고 정점 간 연결 노드(Edge)가 매우 복잡해지는 특징을 확인 할 수 있다. 이 기술을 통해 생성된 3D 모델은 영화나 비디오 게임 제작 파이프라인에서 제작된 모델과는 본질적으로 다르며, 실시간 렌더링, 애니메이션 및 시뮬레이션, 압축과 같은 응용 분야에서 직접 사용하기에 적합하지 않다. 이와는 대조적으로 우리의 방법은 프레임 간 3D 모델 표면 구조의 높은 일관성을 확보하는 리메싱(Remeshing)과 비강체 표면(Non-rigid Shape)의 대응(Correspondences) 및 매칭(Matching)을 통한 점진적 변형(Deformation) 과정 및 텍스처 전달(Texture Transfer) 과정을 연결함으로써 볼류메트릭 3D 모델 시퀀스 품질의 일관성을 유지하며, 후 처리 과정의 자동화를 제공한다.

Abstract

The latest volumetric technology's high geometrical accuracy and realism ensure a high degree of correspondence between the real object and the captured 3D model. Nevertheless, since the 3D model obtained in this way constitutes a sequence as a completely independent 3D model between frames, the consistency of the model surface structure (geometry) is not guaranteed for every frame, and the density of vertices is very high. It can be seen that the interconnection node (Edge) becomes very complicated. 3D models created using this technology are inherently different from models created in movie or video game production pipelines and are not suitable for direct use in applications such as real-time rendering, animation and simulation, and compression. In contrast, our method achieves consistency in the quality of the volumetric 3D model sequence by linking re-meshing, which ensures high consistency of the 3D model surface structure between frames and the gradual deformation and texture transfer through correspondence and matching of non-rigid surfaces. And It maintains the consistency of volumetric 3D model sequence quality and provides post-processing automation.

Keyword : Volumetric Capture, Remeshing, Correspondence, Dynamic Reconstruction, Texture Transfer.

I. 서론

다양한 3D 정보 획득 장비와 기술의 발전으로 3D 모델 생성 기술은 많은 관심을 받고 있으며, 움직이는 객체를 실시간으로 복원하거나 객체의 움직임을 모델링하는 기술에 대한 연구가 최근 들어 활발하게 진행되고 있다. 복잡한 동적 상황에서 시간적으로 연관성이 있는 고정 및 이동 객체의 3D 불류메트릭 모델의 복원을 위해서는 시간적 흐름에 따른 물체의 변화에 대한 일관성을 보장하는 동적 복원 기술^{[1][2]}을 필요로 한다. DynamicFusion^[3]은 단일 깊이 센서에서 촬영한 깊이영상을 이용 하여 3D 모델을 실시간으로 복원하기 위한 기술로, 단일 RGB-Depth 카메라가 획득하는 제한된 양의 깊이 정보를 점진적으로 누적하여 모델의 완성도를 높여가는 방법론을 제안하였다. 이와 같은 동적 복원 알고리즘은 IR, RGB, Depth 등의 다중센서를 필요로 한다. 우리는 이와 같은 선행 연구를 모티브로 하여 다수의 RGB 카메라를 이용한 사진 측량법(Photogrammetry)을 통해 생성된 3D모델에 점진적 누적을 통한 동적 복원방법을 적용 하여 표면의 노이즈 정보를 보간 하고 폐색(Occlusion)에 의해 손상된 모델을 교정함으로써 시간의 흐름에 따라 일관된 품질의 모델을 생성 할 수 있는 기법을 제안한다.

II. 관련 연구

1. 리메싱(Remeshing)

리메싱에 대한 연구는 아주 오랫동안 진행되어 왔으며 매우 다양한 접근 방식을 제시하고 있다^[4]. 리메싱 혹은 리

토폴로지에 대한 연구는 불규칙한 구조의 표면에 대해 우수한 품질의 표면을 재 구성하는 것을 목표로 한다. 표면의 우수한 품질의 정의에는 세 가지 품질, 즉 충실도(Fidelity), 단순성(Simplicity) 및 요소 품질(Element Quality)이 포함된다^[5]. 메시는 개체의 기하학적 구조를 충실하게 표현할 수 있어야 한다. 또한, 효율적인 표현 및 계산을 위해 정점의 수와 메시 연결의 복잡성을 줄여야 하며, 이는 메시 구조의 단순성을 요구한다. 또 표면에 대한 편미분, 적분, 기저함수의 효율적인 연산을 위해 좋은 모양의 삼각형, 즉 좋은 품질을 가진 삼각형 메쉬가 필요하다^[6]. 리메싱 기술은 입력의 메시 구조를 수정^[7]하여 생성되거나 처음부터 새로운 메시를 생성하기도^[8] 한다.

구조적 리메싱(Structured Remeshing)은 구조화되지 않은 입력 메시를 구조화된 메시로 대체한다. 구조화된 메시에서 모든 내부 정점(Vertex)은 일정한 수의 연결 노드(Edge)와 면(Face)으로 둘러싸여 있다. 구조화된 메시는 구조화되지 않은 메시에 비해 특정 이점을 제공한다. 구조화된 메시의 연결 그래프는 훨씬 더 간단하므로 알고리즘에서 효율적인 탐색(Traversal) 및 지역화(Localization)를 가능하게 한다. 우리 연구에서의 리메싱은 사진측량법에 의해 생성된 3D 시퀀스의 프레임 별, 불규칙한 구조의 메시를 구조화 하여 비슷한 구조의 일반화된 메시를 만들어 냄으로서 프레임 간 공통된 특징의 표면을 달성하는데 이용된다.

2. 형상 일치(Shape matching)

서로 다른 두 3D 객체 간 표면의 매칭 방법(Shape matching)은 지오메트리 프로세싱 분야에서 많은 연구의 핵심에 있다. 시간의 흐름에 따라 움직이는 객체의 비강체(non-rigid) 표면에 대한 매칭은 회전(Rotation) 및 이동(Translation)으로 간결하게 표현될 수 있는 강체(rigid) 표면의 경우와 달리 두 객체 간 표면의 일치 지점에 대한 대응(Correspondences) 점 혹은 대응 영역의 계산에 의존된다.

3D 객체의 대응 연구는 측지 거리(Geodesic Distance)^[9], 면을 구성하는 정점의 각도^[10], 표면의 기울기(Gradient)와 발산(Divergence)을 기반으로 하는 기저 함수^[11] 등을 통해 표면의 특성을 식별하는 다양한 연구로 수행되어 왔다.

우리의 논문에서는 3D 객체의 대응점 탐색은 객체가 변

a) 광운대학교 전자재료공학과(Kwangwoon university Electronic Materials Engineering)

‡ Corresponding Author : 서영호(Young-Ho Seo)
E-mail: yhseo@kw.ac.kr
Tel: +82-2-940-8362

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1046-395X>

* 이 논문의 연구결과 중 일부는 한국방송-미디어공학회 “2021년 추계 학술대회”에서 발표한 바 있음.

* This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education in 2022 (NRF-2018R1D1A1B07043220).

· Manuscript received January 24, 2022; Revised February 28, 2022; Accepted February 28, 2022.

형 되더라도 표면을 구성하는 요소의 거리 보존이 이루어지는 상황에 초점을 맞추고 있다. 인체의 움직임을 예로 들면 일반적인 관절 동작에 있어서 표면이 찢어지거나 크게 늘어나는 변형 없이 일정하게 구부러지는 특성을 발견할 수 있는데, 이와 같은 등척성(Isometric)의 특징을 유지하고 객체 간 대응점의 효율적 탐색을 구현하기 위한 방안으로 3D 시퀀스의 모든 메시를 리메싱 처리하여 구조를 일반화하는 것을 선행한다.

III. 볼류 메트릭 모델의 동적 복원

그림 1은 제안하는 3D 볼류메트릭 모델의 동적 복원 알고리즘을 나타낸다. 3D 모델 시퀀스 내의 움직이는 물체와 변형되는 물체의 정보 획득하기 위한 첫 번째 절차로 시퀀스 내 프레임을 일정 시간 간격으로 샘플링을 한다. 키 프레임과 키 프레임 사이 각 중간 프레임 3D 모델과 키 프레임의 비교를 위해 키 프레임과 각 중간 프레임 메시의 구조를 일치 시키는 리메싱 과정을 수행하여 각 비교 대상이 동일한 기하학적 구조를 가지게 한다. 이 결과는 두 객체의 대응점(Correspondence)을 이용한 변형(Deformation) 과정에서 활용된다. 변형을 통해 일치된 두 모델을 현재 수행중인 단계의 중간 프레임에 업데이트한다. 이 과정은 모든 키 프레임과 그 중간 프레임에 대하여 반복적으로 수행된다.

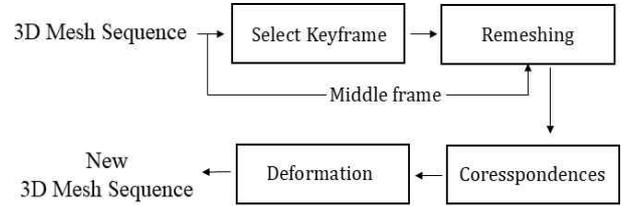


그림 1. 3D 볼류메트릭 모델의 동적 복원 알고리즘
 Fig. 1. Dynamic Reconstruction Algorithm of 3D Volumetric Models

1. 키 프레임 선택

3D 시퀀스의 키 프레임은 다음의 조건을 충족할 때 이루어진다. 1)마지막 키프레임을 추가한 후 15 프레임 이상 지났을 때, 2)키 프레임과 현재 프레임 메시 모델의 대응점 간 유클리디언 디스턴스 합계가 20cm를 초과 할 때, 3)키 프레임과 현재 프레임 메시의 정점 수의 차이가 1천개 이상 일 때. 각 키 프레임의 선택 조건은 개별 파라미터로 설정하여 실험적으로 결정 하였다.

2. 리메싱

리메싱 프로세스에서는 표면의 구조적 리메싱(Structured remeshing)을 구현하기 위해 그림 2와 같이 메시의 지역화를 통한 정점 연결 노드의 병합(Edge Collapse), 분할(Edge Split), 뒤집기(Edge Flip) 및 정점 재배치(Vertex Shift)

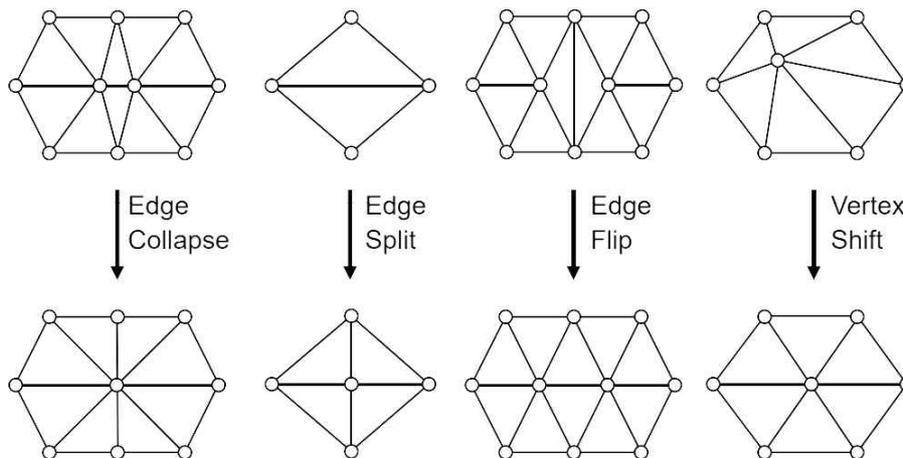


그림 2. 리메싱 알고리즘 적용 예
 Fig. 2. Example of application of remeshing algorithm

Shift)의 조합을 이용하였다. 우리 방식에서 표면 품질의 가장 중요한 기준은 정점의 최소/최대 각도이다. 키 프레임 변형 단계의 대응점 간 측지 거리(Geodesic Distance) 계산에 있어 예각 삼각형만 있는 메시 구조가 바람직하기 때문이다^{[12][13][14]}. 입력 메시에 기준 보다 작은 예각이 출현하거나 기준 이상의 둔각이 출현할 경우 그림 1의 방법을 통해 삼각형의 각도를 균일화하였다. 모든 키 프레임 S 와 중간 프레임 T 에 대하여 리메싱을 수행한다.

3. 대응점 탐색 및 키 프레임 변형

키 프레임과 중간프레임의 표면 $S, T \subset \mathbb{R}^3$ 의 대응은 $f: S \rightarrow T$ 를 통해 표현되는데, 대응점의 탐색은 Sahillioğlu^[15]의 방법을 따른다. 견고하게 일치될 수 있는 사지와 모델의 중심과 같은 몇 가지 특수 샘플 사이에 S, T 의 6개 극점(Extreme Points)으로 초기 대응점을 설정 하였다. S 와 T 사이 초기 대응점이 결정되면 KD-Tree 검색을 통해 S 의 정점 s 와 T 에 대해 k 개의 가장 가까운 목표 정점 p 를 계산하고 이를 반복적으로 최적화(Optimization) 하여 키 프레임 S 를 중간 프레임 T 의 형태로 점진적으로 변형한다^[16]. 그림 3은 대응점 탐색 및 키 프레임 변형 절차에서의 중간 프레임 업데이트 과정을 나타낸다. S 는 다음 키 프레임 S_i 가 등장 할 때 까지 S 와 S_i 사이 모든 중간 프레임 T_j 에 대해 변형을 반복하고 변형이 완료된 S' 을 해당 프레임 T_j 에 업데이트 한다.

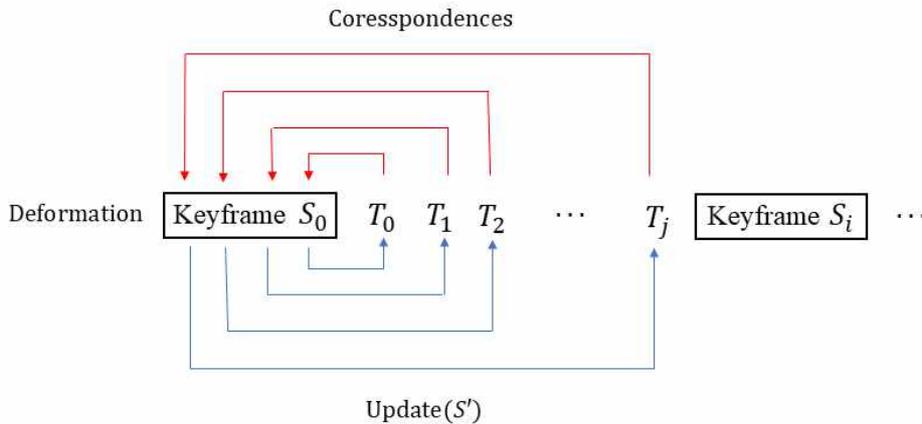


그림 3. 대응점 검색 및 키프레임 변형 절차
Fig. 3. Correspondence point search and keyframe deformation procedure

IV. 실험 결과

실험에는 볼류메트릭 촬영 스튜디오에서 남성/여성 모델을 사진측량 기법을 통해 직접 촬영한 데이터를 사용하였다. 남성 모델을 촬영한 데이터 셋 1은 총 100프레임의 3D 모델 시퀀스로 구성 되었으며, 여성 모델을 사촬영한 데이터 셋 2은 총 150프레임의 3D모델 시퀀스로 구성 되었다. 키 프레임과 중간 프레임의 모델을 리메싱 적용 전 후로 구분하여 각 각 정렬한 결과를 그림 4에 표기 하였다. 그림 4

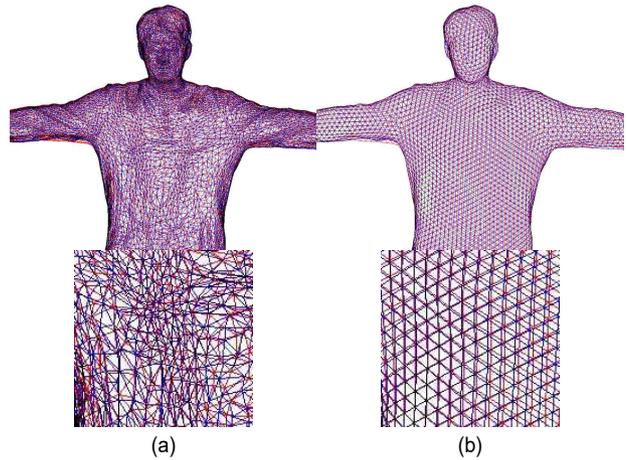


그림 4. 데이터셋 1의 키 프레임(15프레임)과 중간프레임(30프레임) 리메싱 적용 후 메시 구조 (a)적용 전, (b)적용 후
Fig. 4. After applying remeshing to the key frame (15 frames) and intermediate frames (30 frames) of dataset 1, the mesh structure (a) before and (b) after application

의 각 영상에서 붉은색 엣지는 키 프레임 메시 구조를 나타내며 파란색 엣지는 중간 프레임 메시 구조를 나타낸다. 그림 4(a)의 리메싱 적용 전 영상에 비해 그림 4(b)의 리메싱 적용 후 영상이 표면 구조가 단순하며 정삼각형에 가까운 고른 품질의 삼각형을 구조를 가지고 있기 때문에 구조적으로 유사하며 일관된 기하학적 특징을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 5는 데이터 셋 2를 이용해 그림 1에서 제안한 알고리즘의 초기 대응점 탐색 결과를 표시한 영상이다. 각 대응부위의 극점이 준수하게 매칭 되어 있음을 확인할 수 있다.

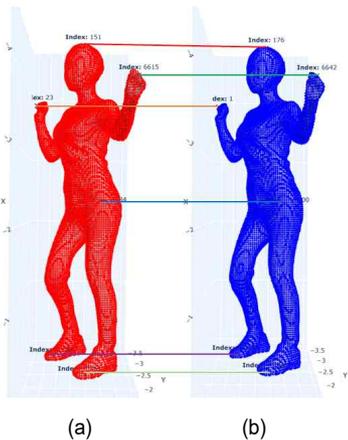


그림 5. 데이터셋 2의 키 프레임(1프레임)과 중간프레임(15프레임)의 초기 대응 구조 (a)키 프레임(1프레임), (b)중간프레임(15프레임)
 Fig. 5. Initial correspondence structure of key frame (1 frame) and intermediate frame (15 frames) of dataset 2 (a) key frame (1 frame), (b) intermediate frame (15 frames)

그림 6과 그림 7은 데이터셋 2를 이용해 그림 1에서 제안한 알고리즘의 대응점을 이용한 변형 과정의 각 결과 영상을 나타낸다. 그림 6은 리메싱 이후 키 프레임의 디포메이션 적용 전 후 영상을 나타낸다. 그림 6의 각 (a)와 (b)영상에서 붉은색 엣지는 키 프레임 메시 구조를 나타내며 파란색 엣지는 중간 프레임 메시 구조를 나타낸다. 그림 6(b)의 결과 영상을 보면 키 프레임의 연결 노드의 구조가 중간 프레임과 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 키 프레임과 변형된 중간 프레임간의 에러율을 나타내는 영상으로 클라우드컴페어(CloudCompare)^[17]의 에러 측정 함수(Distances)를 통해 에러의 평균과 표준편차를 계산

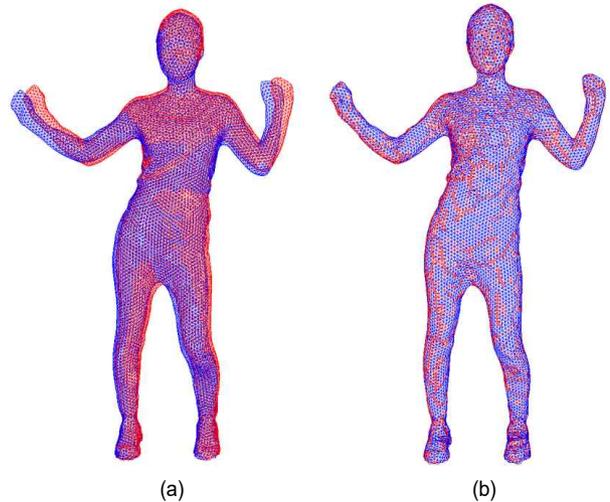


그림 6. 데이터셋 2의 키 프레임과 중간 프레임의 대응점 계산을 통한 변형 전 후 (a)적용 전, (b)적용 후
 Fig. 6. Before and after (a) before and after (b) after deformation through the calculation of the correspondence point between the key frame and the middle frame of Dataset 2

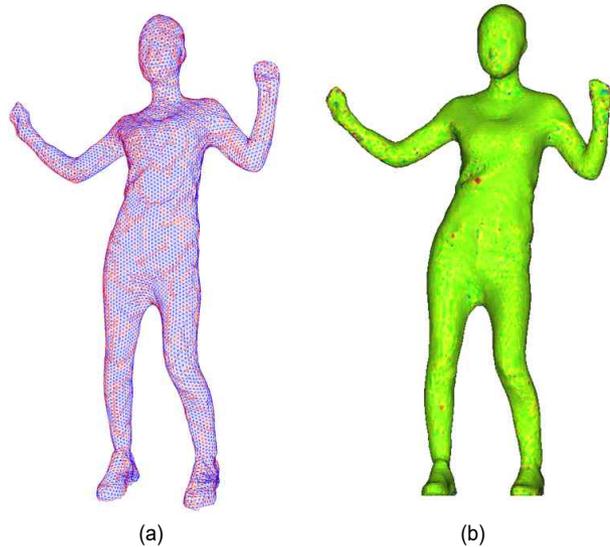


그림 7. 데이터셋 2의 키 프레임과 중간 프레임의 대응점 계산을 통한 변형 적용 결과 (a)표면 구조, (b)에러맵
 Fig. 7. Deformation application result by calculating the corresponding point between the key frame and the middle frame of Dataset 2 (a) Surface structure, (b) Error map

하였다. 두 모델의 일치도가 높을수록 초록색을 표시하며, 표면이 포지티브 방향으로 불일치하면 붉은색을 네거티브 방향으로 불일치하면 푸른색을 띄게 된다. 두 모델의 평균

에러(Mean distance)는 0.23mm, 표준편차(std deviation)는 0.13mm를 달성 하였다.

그림 8은 알고리즘의 범용성을 확인하기 위해 오픈된 데이터인 TOSCA 데이터 셋^[18] 중 Non-rigid world의 Cat 데이터를 이용하여 정량적인 평가를 수행한 결과이며 그림 8

(a)의 키프레임 데이터를 그림 8(b)와 그림 8(c)에 맞춰 변형한 결과를 에러 맵으로 표현하여 그림 8(d)와 그림 8(e)에 표시 하였다. 이때 각 에러 맵의 색상 범례는 그림 9와 같다. 그림 9는 키 프레임에 해당하는 그림 8(a)를 각 그림 8(b)와 그림 8(c)에 맞춰 변형했을 때 변형된 표면과 원본과

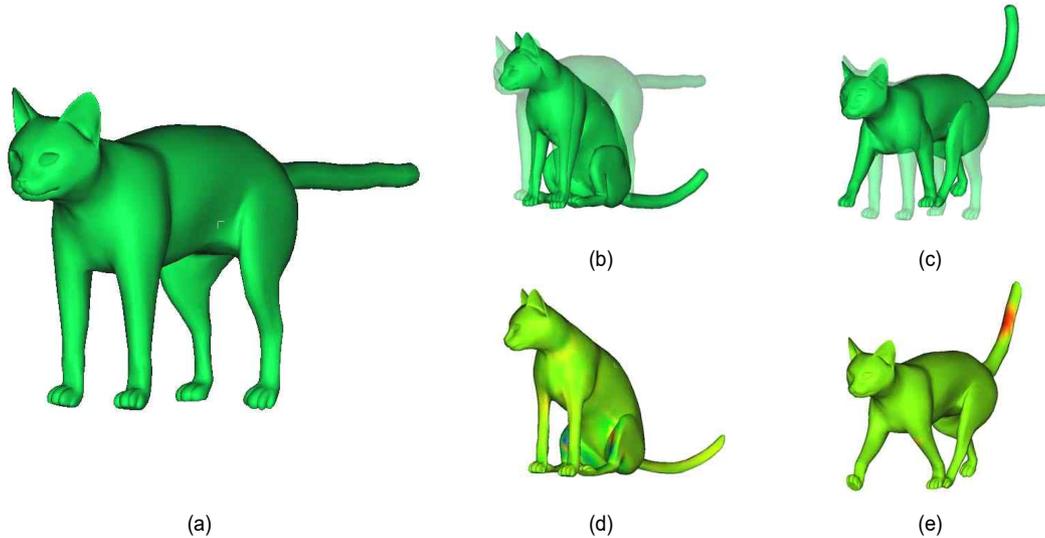


그림 8. TOSCA - Cat 키 프레임 변형 적용 결과 (a)Cat 키 프레임 데이터 (b)동작 1, (c)동작 2, (d)키 프레임을 동작1에 맞추어 변형한 결과 영상, (e)키 프레임을 동작2에 맞추어 변형한 결과 영상
 Fig. 8. Result of applying Tosca - Cat key frame Deformation (a) key frame data (b) Pose 1, (c) Pose 2, (d) Deformation result according to Pose 1, (e) Deformation result according to pose 2

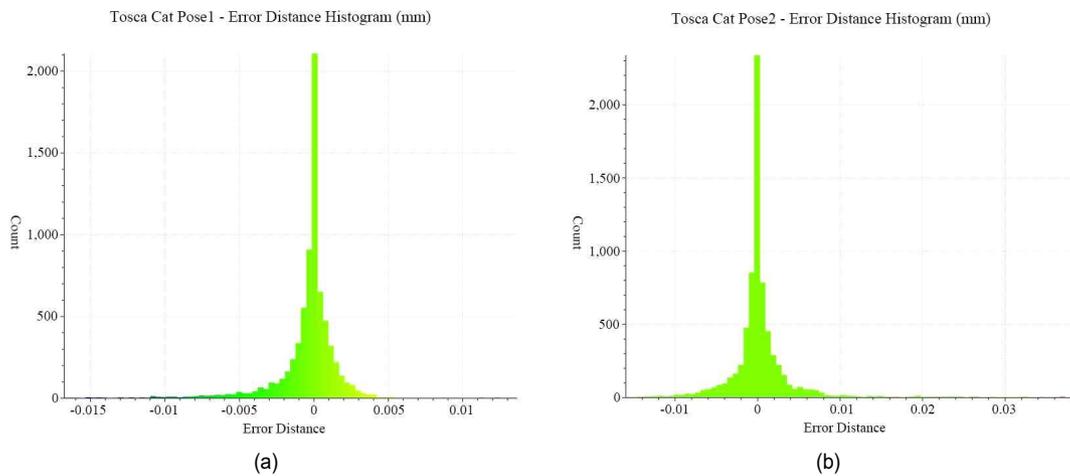


그림 9. TOSCA - Cat 키 프레임 변형 적용 결과 히스토그램 (a)동작1 에러 히스토그램, (b)동작2 에러 히스토그램
 Fig. 9. Deformation application result by calculating the corresponding point between the key frame and the middle frame of Dataset 2 (a) Surface structure, (b) Error map

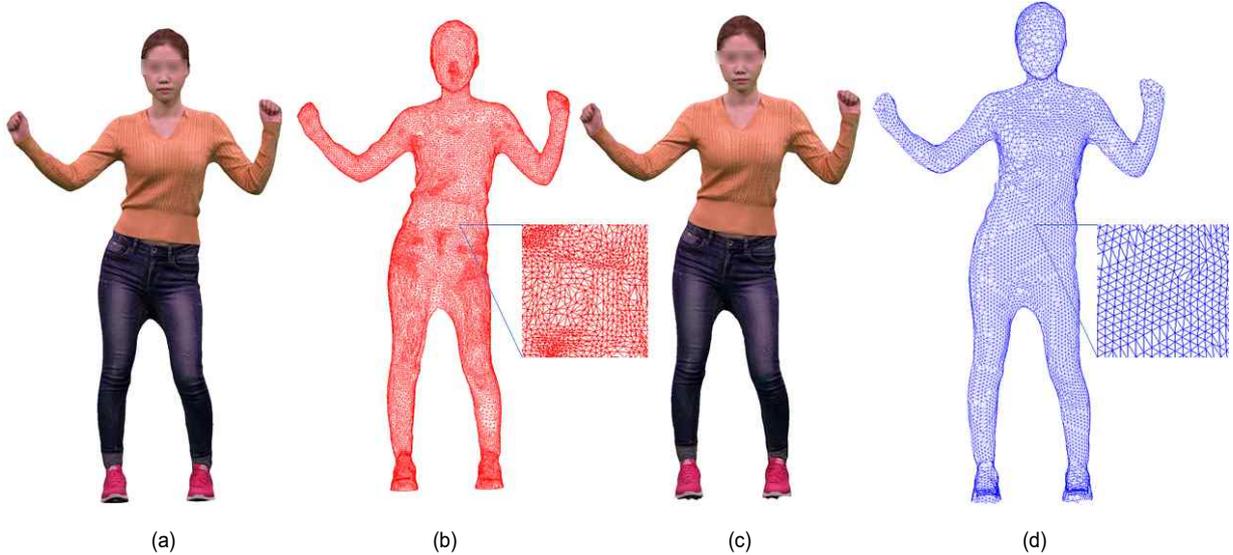


그림 10. 데이터셋 2의 중간 프레임 원본과 리메싱 후 변형 된 메시 비교 (a)중간 프레임 텍스처 원본 (b)중간 프레임 메시 원본 (c)텍스처 전송 결과 (d)변형된 키 프레임 메시 구조

Fig. 10. Comparison of original intermediate frame from dataset 2 and deformed mesh after remeshing (a) original intermediate frame texture (b) original intermediate frame mesh (c) texture transfer result (d) deformed keyframe mesh

의 차이를 히스토그램으로 표현한 그래프이며 그림 8(d)의 결과는 그림 9(a)에 그림 8(e)의 결과는 그림 9(b)에 표시하였다. 동작1의 평균 에러는 0.0352mm 표준편차는 0.2022 mm, 동작2의 평균 에러는 0.0995mm 표준편차는 0.4060 mm를 달성하였다. 또 표 1에서 TOSCA Cat의 9개 동작의 평균 에러는 0.06mm의 값을 보이며, Xuming^[19]의 방법에 비해 약 98.88%, Marinov et al.^[20]에 비해 22.23%, Estellers et al.^[21]에 비해 20.39% 오차가 개선된 것을 확인 할 수 있다.

그림 10은 키 프레임 변형 이 후 중간 프레임의 텍스처를 전송(Texture Transfer)한 최종 결과 영상이다. 각 연결 노드의 구조가 원본 대비 간소화 되었으며 규칙적인 구조를 갖는 것을 확인 할 수 있다. 또 텍스처 전송 결과 또한 구조의 변경에 따른 왜곡(Distortion) 없이 동일하게 적용됨을 확인 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 3D 볼류메트릭 모델의 동적 복원 알고리즘을 제안하고, 성능을 평가하였다. 리메싱 방법과 프레임 간 대응점을 이용해 3D 모델을 점진적으로 변형하여 모델의 완성도를 높여가는 방법을 통해 각 프레임 간 표면의 일치도 측정에서 평균 에러(Mean distance) 0.23mm, 표준편차(std deviation) 0.13mm의 정량적 수치를 달성 하였으며, 사진 측량법(Photogrammetry)을 통해 생성된 3D모델 시퀀스의 일관된 품질을 확보하기 위한 방법으로 제안한 방법이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

표 1. CloudCompare를 사용한 TOSCA Cat의 정확도 수치 비교
 Table 1. Numerical comparison for accuracy of the TOSCA Cat by using the CloudCompare

Error Distance (TOSCA Cat)		
Method	Value	Ratio
Xuming.[19]	1.17mm	0.00%
Marinov et al.[20]	0.32mm	72.65%
Estellers et al.[21]	0.24mm	79.49%
our	0.06mm	94.88%

참 고 문 헌 (References)

- [1] R. Newcombe et al., "KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking," in *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp.127-136, 2014.
doi: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378>.
- [2] K. Guo, F. Xu, T. Yu, X. Liu, Q. Dai and Y. Liu, "Real-Time Geometry, Albedo, and Motion Reconstruction using a Single RGB-D Camera," in *ACM Trans. on Graphics(ToG)*, Vol.36, No.4, Article 44a (August 2017).
doi: <https://doi.org/10.1145/3072959.3083722>
- [3] R. Newcombe et al., "DynamicFusion: Reconstruction and tracking of non-rigid scenes in real-time," in *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.343-352, 2015.
doi: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298631>
- [4] P. Alliez et al., "Recent advances in remeshing of surfaces," in *Springer*, Berlin, Heidelberg, pp. 53 - 82, 2008.
doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-33265-7_2
- [5] P. Alliez et al., "Isotropic surface remeshing," in *Proc. Shape Model. Int.*, pp. 49 - 58, 2003.
doi: <https://doi.org/10.1109/SMI.2003.1199601>.
- [6] J. Shewchuk, "What is a good linear element? interpolation, onditiinin g, and quality measures," in *Proc. 11th Int. Meshing Roundtable*, pp. 1 15 - 126, 2002.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.19.2164>
- [7] Y. Wang et al., "Isotropic Surface Remeshing without Large and Small Angles," in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 25, no. 7, pp. 2430-2442.
doi: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2837115>.
- [8] S. Melzi et al., "Intrinsic/extrinsic embedding for functional remeshing of 3D shapes", *Computers & Graphics*, Vol 88, pp. 1-12, 2020.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2020.02.002>.
- [9] Y. Sahillioğlu and Y. Yemez. "Coarse-to-fine combinatorial matching for dense isometric shape correspondence", *Computer Graphics Forum*. Vol. 30, No. 5, pp. 1461 - 1470, 2011.
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2011.02020.x>
- [10] Y. Lipman and T. Funkhouser. "Möbius voting for surface correspondence." *ACM Trans. Graph.* Vol. 28, No.3, 2009.
doi: <https://doi.org/10.1145/1531326.1531378>.
- [11] M. Ovsjanikov, M. Ben-Chen, J. Solomon, A. Butscher, and L. Guibas. "Functional maps: A flexible representation of maps between shapes." *ACM Transactions on Graphics*, Vol.31, No.4, pp. 1-11, 2012.
doi: <https://doi.org/10.1145/2185520.2185526>
- [12] R. Kimmel and J. Sethian, "Minimal discrete curves and surfaces," in *Proc. Nat. Academy Sci.*, vol. 95, pp. 8431 - 8435, 1998.
doi: <https://doi.org/10.1145/2508363.2508379>
- [13] X. Ying, X. Wang, and Y. He, "Saddle vertex graph (SVG): A novel solution to the discrete geodesic problem," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 6, pp. 170:1 - 170:12, 2013.
doi: <https://doi.org/10.1145/2504435.2504442>.
- [14] K. Crane, F. de Goes, M. Desbrun, and P. Schroder, "Digital geometry processing with discrete exterior calculus," in *Proc. ACM SIGGRAPH 2013 Courses*, pp. 7:1 - 7:126, 2013.
doi: <https://doi.org/10.1145/2504435.2504442>.
- [15] Sahillioğlu, Yusuf. "A genetic isometric shape correspondence algorithm with adaptive sampling." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37. No.5, pp. 1-14, 2018.
doi: <https://doi.org/10.1145/3243593>
- [16] Sumner, Robert W., and Jovan Popović. "Deformation transfer for triangle meshes." *ACM Transactions on graphics (TOG)*, Vol. 23, No.3, pp.399-405. 2004.
doi: <https://doi.org/10.1145/1015706.1015736>
- [17] <http://www.cloudcompare.org/>, Dec. 2016.
- [18] http://tosca.cs.technion.ac.il/book/resources_data.html, November. 2010.
- [19] X. Ge, "Non-rigid registration of 3D point clouds under isometric deformation", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 121, pp. 192-202, 2016.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.009>
- [20] M. Marinov, L. Kobbelt, "Optimization methods for scattered data approximation with subdivision surfaces", *Graphical Models*, vol. 67, pp. 452-473, 2015.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2005.01.003>
- [21] V. Estellers, F. Schmidt and D. Cremers, "Robust Fitting of Subdivision Surfaces for Smooth Shape Analysis," *2018 International Conference on 3D Vision (3DV)*, 2018, pp. 277-285.
doi: [10.1109/3DV.2018.00040](https://doi.org/10.1109/3DV.2018.00040)

저 자 소 개



박 병 서

- 2019년 2월 : 광운대학교 경영학과 졸업
- 2019년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과(석박통합과정)
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3396-8264>
- 주관심분야 : 포인트 클라우드, 딥러닝, 2D/3D 영상 처리

저 자 소 개



김 동 욱

- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 공학석사
- 1991년 9월 : Georgia 공과대학 전기공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 정교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4668-743X>
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램, 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP설계, Wireless Communication



서 영 호

- 1999년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2008년 2월 : 한성대학교 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1046-395X>
- 주관심분야 : 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램