

인체 흉상 복제를 위한 역공학 시스템

최희련*, 전용태, 장민호, 노형민, 박세형 (한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터)

A reverse engineering system for reproducing a 3D human bust

H. R. Choi*, Y. Jun, Minhoo Chang, H-M. Rho, and S. Park (CAD/CAM Research Center, KIST)

ABSTRACT

A dedicated reverse engineering (RE) system for rapid manufacturing of human head in a 3D bust has been developed. The first step in the process is to capture the surface details of a human head and shoulder by three scanners based upon the digital moiré fringe technique. Then the multiple scans captured from different angles are aligned and merged into a single polygonal mesh, and the aligned data set is refined by smoothing, subdividing or hole filling process. Finally, the refined data set is sent to a 4-axis computer numerically control (NC) machine to manufacture a replica.

In this paper, we mainly describe on the algorithms and software for aligning multiple data sets. The method is based on the recently popular Iterative Closest Point (ICP) algorithm that aligns different polygonal meshes into one common coordinate system. The ICP algorithm finds the nearest positions on one scan to a collection of points on the other scan by minimizing the collective distance between different scans. We also integrate some heuristics into the ICP to enhance the aligning process. A typical example is presented to validate the system and further research work is also discussed.

Key Words Reverse engineering (역공학), Registration and Merge (데이터 합성), Reconstruction (복원)

1. 서론

물체의 외관을 3D 측정기를 이용하여 측정 한 후 얻어진 측정 점으로부터 물체의 CAD 정보를 구하는 과정을 역공학 (RE: Reverse Engineering) 이라 한다. 역공학 분야는 3 차원 CAD 모델링 없이 생성된 기계부품의 CAD 모델링, 문화재의 디지털 복원, 의료분야, 맞춤형복과 헬멧등과 같은 신체 밀착형 제품 제작등에 널리 쓰이고 있다 [1].

본 연구에서 개발 중에 있는 RE 시스템은 인체의 흉상을 비접촉 방법의 하나인 영사식 모아레 방법을 이용하여 측정하고, 삼각면 생성 (triangulation), 데이터 레지스트레이션 (registration), 머징 (merging), 스무딩 (smoothing), 데시메이션 (decimation) 기능을 통하여 폴리곤 데이터를 생성/편집한 후, 4 축 NC 기계를 이용하여 인체의 흉상을 복제하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 가공된 사람의 흉상은 장식물등에 적용될 수 있고 기념식, 졸업식, 시상식등 특별한 행사에 이용될 수 있을 것이다.

레지스트레이션 작업은 여러 방향 (multi-view)

에서 나뉘어 측정된 각각의 데이터를 하나의 좌표계로 위치를 통일 시킨 후 단일 폴리곤 모델로 통일시켜주는 작업이다. 본 논문에서는 ICP(Iterative Closest Point)기반의 레지스트레이션 기능을 위주로 설명한다.

본 논문의 구성을 알아보면 2 장에서는 레지스트레이션에 관련된 지금까지의 연구들을 간단히 알아보고 3 장에서는 현재 개발중인 RE 시스템의 전체구조와 본 시스템에 적용된 레지스트레이션 방법을, 4 장에서는 실행 예를 통하여 구현된 기능을 분석해 본다. 마지막으로 5 장에서는 결론과 향후 연구에 대해 알아본다.

2. 기존의 연구

지난 10 년 동안 레지스트레이션에 관련된 연구가 활발하게 진행되어 왔다 [2-6]. 레지스트레이션 연구는 서로 대응되는 두 데이터의 특징형상들로부터의 레지스트레이션, 두개의 이미지에 의해 표현되는 평면상의 모든 점들 사이의 거리를 최소화하

는 ICP 기반 레지스트레이션으로 분류된다. 그 중에서 널리 이용되는 방법이 Besl 과 Mckay [2] 가 제안한 ICP 기반 레지스트레이션으로, 이 방법은 레지스트레이션 작업을 위하여 각 측정데이터의 겹치는 영역에서의 각 폴리곤 모델간의 거리차가 최소가 되도록 변환행렬 값을 계산하여 적용한다. Champleboux 등[12]은 물체의 표면 거리를 나타내는 octree-spline 이라고 불리워지는 저장 공간을 줄여주는 자료구조를 이용하였다

3. 본 론

Fig. 1 은 인체 흉상의 모델에 대한 역공학 시스템의 전체 흐름을 보여준다. 자동적으로 인체흉상을 측정하기 위하여 세 대의 측정기를 사용하였으며 각각의 측정기는 영상식 모아래 방법을 이용하였다 [7].

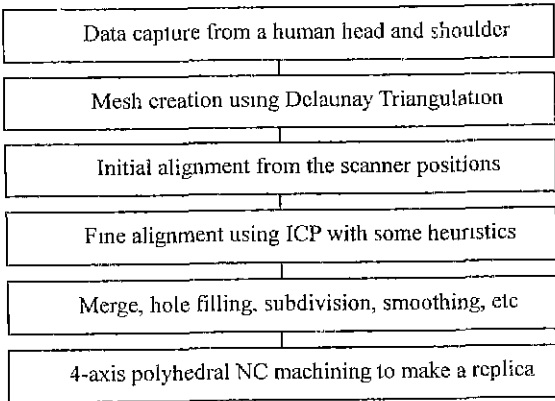


Fig. 1 Schematic diagram of the RE system

측정된 데이터들을 Delaunay Triangulation 법을 적용하여 폴리곤을 생성한 후, 각 측정기의 상대위치 정보로부터 1 차 (rough) 레지스트레이션을 한 다음 그 정보를 토대로 휴리스틱 조건이 포함된 ICP 알고리즘에 의해 2 차 (fine) 레지스트레이션 작업을 한다. 레지스트레이션 작업이 끝나면 스무딩, 구멍메우기 (hole filling), 폴리곤 분할 (subdivision) 등의 폴리곤 정제하는 단계가 이어진다. 마지막으로 폴리곤 정보로부터 가공정보를 생성한 후, 4축 NC 기계를 이용하여 형상을 복제하게 된다. 각 단계에 대한 자세한 설명은 다음과 같다

3.1 측정 시스템의 구성

Fig. 2 와 같이, 개발된 시스템에서 인간 모델과 각 스캐너 사이의 거리는 대략 1040mm 로 정하고 측정기 간 각도는 95°로 하였다. 만약, 측정기의 위

치들이 고정되어 있다면 2 차 레지스트레이션을 할 필요가 없이, 세 대의 측정기의 상대위치로부터 자동 레지스트레이션을 수행할 수 있지만, 실제적으로는 측정기의 위치 고정 (calibration) 과정에서 애러가 발생될 수 있으며, 측정기의 상대 위치가 어떤 이유로 변하였을 경우, 또는 측정 중일 때 인간 모델이 움직였을 경우를 대비하여 2 차 레지스트레이션 과정을 포함시켰다

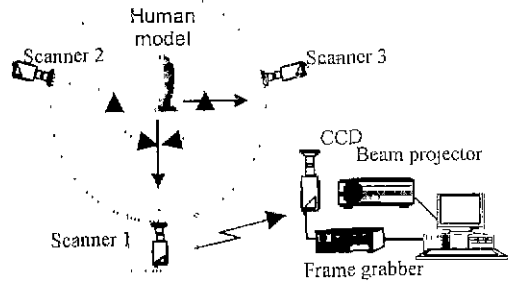


Fig. 2 The relative position of three employed scanners ($R = 1040 \text{ mm}$, $\phi = 95^\circ$)

3.2 폴리곤 생성 (Triangulation)

측정 점으로부터 폴리곤을 생성하기 위하여 2D 와 3D 에서 널리 사용되고 있는 Delaunay Triangulation 을 이용하였다 [8] 이 방법은 Voronoi 영역의 경계를 공유하는 모든 점 데이터사이의 edge 를 생성시켜 폴리곤의 한 빈으로 만들며, 전체 점 데이터를 포함하는 convex space 내부에 폴리곤 정보를 얻는 것이다. Delaunay Triangulation 의 상세한 알고리즘은 논문과 교재 등을 참고하기 바라며 여기서는 생략한다 Fig. 3 은 측정 점으로부터 폴리곤을 생성한 예를 보여주고 있다.

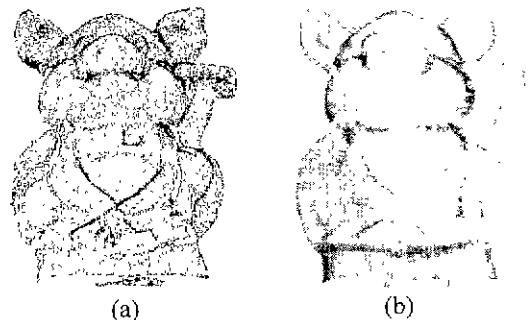


Fig. 3 Triangulation example (a) Scanned point set (b) Generated triangles (shaded image)

3.3 레지스트레이션

여러 시점에서 획득한 복수의 데이터들을 하나의 좌표계로 위치를 통일시키는 레지스트레이션 작

업을 위하여 각 측정 데이터의 점치는 영역에서의 각 폴리곤 모델간의 거리 차가 최소가 되도록 변환 행렬 값을 계산하는 ICP 방법을 가장 많이 사용하고 있다 [9]. 측정된 인간 모델의 형상을 완벽하게 복제하기 위해서는 레지스트레이션 할 때 두개의 측정점들이 만들어내는 중복영역에 대한 이동/회전 변환(rigid transformation) 단계가 필요하다. 2차 레지스트레이션 알고리즘은 다음 두 단계를 포함한다. 1) 각 측정점 점들에서 중복되는 영역을 결정한다. 2) 기준이 되는 측정면에 다른 측정면을 레지스트레이션 시켜주는 변환행렬을 구한다 [10].

Fig. 4에서처럼 A와 B는 같은 모델을 다른 방향에서 측정한 mesh로 mesh A 상에 있는 정점 v_a 와 대응되는 mesh B 상에 존재하는 정점 v_b 를 찾는다. 첫번째로 정점 v_a 의 법선을 계산하고 mesh B를 분할할 수 있게 확장한다. 두번째, mesh B 내의 삼각망의 내부에 위치하는 분할 점의 좌표를 계산한다. 같은 방법으로 이런 절차를 mesh A의 모든 정점에 대해 수행한다.

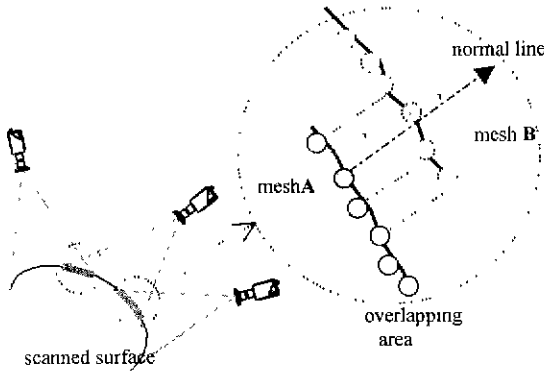


Fig. 4 Finding point pairs in overlapping area.

중복 영역의 모든 point pair 들을 찾아낸 후, point pair 들을 align 시키는 변환 행렬을 계산한다 즉 다음 방정식처럼 두 점 사이의 거리를 계산한다.

$$\text{Dist} = \sum \| \mathbf{A}_i - \mathbf{R}(\mathbf{B}_i - \mu\mathbf{B}_c) - \mathbf{T} - \mathbf{B}_c \|^2 \quad (1)$$

\mathbf{A}_i 와 \mathbf{B}_i 는 mesh A, B 상의 존재하는 서로 대응되는 점들이고 $\mu\mathbf{B}_c$ 는 \mathbf{B}_i 의 중심점을 나타낸다. \mathbf{T} 는 이동 벡터를, \mathbf{R} 는 회전 행렬을 나타낸다. \mathbf{T} 의 계산은 다음과 같다.

$$\mathbf{T} = \mu\mathbf{A}_c - \mu\mathbf{B}_c \quad (2)$$

회전 행렬 \mathbf{R} 는 다음 순서에 따라 결정된다 (단계 1) Covariance 행렬 계산

$$\text{Cov} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\mathbf{B}_i - \mu\mathbf{B}_c)(\mathbf{A}_i - \mu\mathbf{A}_c)^T] = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(단계 2) 식 (3)으로부터 \mathbf{Q} 행렬 계산

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} C_{xx}+C_{yy}+C_{zz} & C_{yz}-C_{zy} & C_{zx}-C_{xz} & C_{xy}-C_{yx} \\ C_{yz}-C_{zy} & C_{xx}-C_{yy}-C_{zz} & C_{xy}+C_{yx} & C_{zx}+C_{xz} \\ C_{zx}-C_{xz} & C_{xy}+C_{yx} & C_{yy}-C_{xx}-C_{zz} & C_{yz}-C_{zy} \\ C_{xy}-C_{yx} & C_{zx}+C_{xz} & C_{yz}-C_{zy} & C_{zz}-C_{xx}-C_{yy} \end{bmatrix}$$

행렬 \mathbf{Q} 의 최대 고유값에 따른 단위 벡터 $\mathbf{P} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ 는 최적 회전에 의해 계산된다.

(단계 3) 회전 행렬 \mathbf{R} 계산

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

위의 각 단계를 수행할 때까지 반복한다. 자세한 수학적 절차는 Besl[2]의 논문에서 자세하게 설명되어 있다. ICP 알고리즘의 수행조건은 point pair의 거리가 정해진 범위 내에 들어가거나, motion의 양이 작아질 때까지, 또는 알고리즘 반복 수 등으로 조절할 수 있다.

특히, ICP 알고리즘은 한 데이터 집합이 다른 데이터 집합의 부분 집합이어야 한다는 제한요소를 가지고 있기 때문에 이것을 극복하기 위해 다음과 같은 휴리스틱 조건을 알고리즘에 포함시켰다

1. 거리가 어느 한도 이상의 point pair는 무시한다.
2. 한 점이라도 매쉬 경계위에 있는 point pair를 제거한다.
3. 거리 또는 법선 벡터 등의 고유의 성질이 근접한 점들의 성질들과 다른 모든 point pairs 또한 삭제한다.

본 연구에서는 INUS[®]사에서 개발한 ICP 모듈을 사용하여 전체 기능을 구현하였다 [11].

3.4 폴리곤 합성 (merge)

레지스트레이션된 데이터는 한 개의 좌표계로 일치된 상태이지만 데이터 자체는 여전히 많은 부분에서 중복되어 있으며 위상 정보도 update되어 있지 않다 따라서, 데이터 합성의 최종 목표는 중복된 데이터를 숨이내며 전체 모델 형상에 따라서 위상정보를 새롭게 부여하는데 있다. 데이터 합성을 위한 두 단계는 아래와 같다

- 1 단계) 중복부위 제거.
- 2 단계) 한쪽의 데이터를 상대편에 잘라 맞추기

Turk와 Levoy[3]는 Fig 5와 같이 다음의 3가지

순서를 통한 합성방법을 제안하였다. 1) 중복되는 영역 제거 2) 겹치는 폴리곤을 잘라내기 3) 경계부분을 재생성. 위의 알고리즘은 본 시스템에도 적용되었으며 전체 형상은 폴리곤을 생성한 순서대로 차례차례 되도록 하였다.

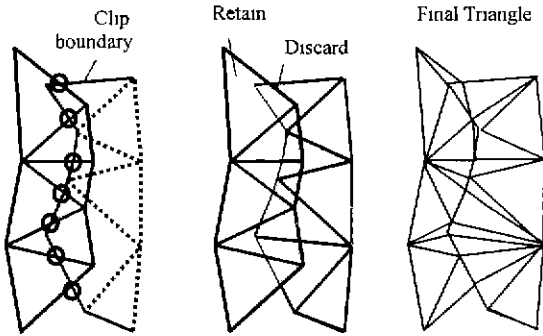


Fig. 5 Merging two triangle meshes [3].

3.5 데이터 후처리 작업

모델 측정, 또는 레지스트레이션 과정에서 발생할 수 있는 에러로 인해 합성된 폴리곤이 잘못된 정보를 담고 있는 경우가 발생된다. 본 연구에서는 새 개의 view 에서만 인체의 흉상을 측정하는 관계로 측정이 되지 않는 부위를 포함하게 된다. 따라서, 측정이 되지 않는 부위를 메워주는 기능이 필수적이다. Fig. 6 은 인체 얼굴 부위에 있는 구멍을 메우는 hole-filling 기능의 예를 보여주고 있다. Hole-filling 은 구멍의 경계 정보로부터 구멍 부분을 폴리곤으로 메워준 후, subdivision 과 주변의 삼각망과 매끄럽게 연결시켜주는 smoothing 기능을 일정한 공차 범위에 들 때 까지 반복 적용하게 된다.

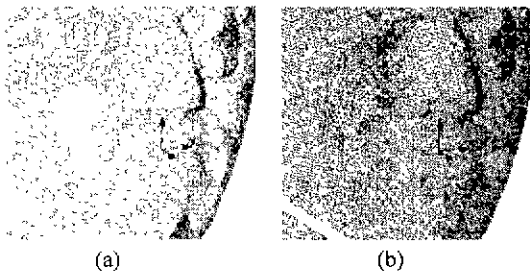


Fig. 6 Hole-filling

4. 실험 결과 및 분석

본 시스템의 전반적인 과정을 보여주기 위하여 테스트를 수행하였다. Fig. 7 은 모델의 정면에서 측정된 점 데이터를 보여주고 있으며 데이터의 개수는 115,857 이다. Fig. 8(a)와 (b)는 세 방향에서 측정된 데이터와 이들을 이용하여 레지스트레이션한 전

체 환조 형상을 각각 보여준다.

Fig. 9 는 레지스트레이션된 폴리곤 모델과 이로부터 4 축 NC 가공경로를 생성한 후, 기계가공을 통하여 복제한 replica 를 각각 보여주고 있다

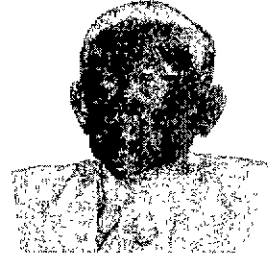


Fig. 7 Scanned points: 115,857 points



(a)



(b)

Fig. 8 Data alignment of a human model (a) three single image (b) combined image



(a)

(b)

Fig. 9 Duplicated human model. (a) Reconstructed triangle mesh (b) a physical replica using machining

5. 결론 및 향후 연구

본 논문을 통하여 인체의 흉상을 복제할 수 있는 역공학 시스템 대해 알아보았다. 본 시스템은 다음의 3 가지 부분으로 구성된다. 1) 영상식 모아레 원리에 기초한 3 차원 측정 시스템, 2) 데이터 레지스트레이션과 합성, smoothing, hole filling, subdividing, 그리고 decimation 으로 이루어진 폴리곤 편집기능, 3) 폴리곤으로부터 물리적 모델을 복제하는 4 축 NC 기계 시스템

본 논문에서는 여러 방향에서 측정된 부분 모델들로부터 하나의 완전한 모델을 만들어 주는 레지스트레이션 기술에 대하여 중점적으로 설명하였다. 적용된 레지스트레이션 방법은 ICP 알고리즘의 큰 제한조건인 데이터 집합 A 에 데이터 집합 B 가 부분 집합이어야 한다는 한계를 보완하고자 몇 가지 휴리스틱 조건을 부여하였다. 이런 휴리스틱 조건은 시간을 절약해주고 안정적인 레지스트레이션을 수행하는데 도움을 주었다.

향후 연구과제로는 역공학 시스템의 완전 자동화를 위하여 측정점으로부터 특징형상을 이용한 자동 레지스트레이션과 자동 세그멘테이션 작업등이 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 기술개발용역사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Eggert, D., Fitzgibbon, A., Fisher, R., "Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering of CAD models," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 69, pp. 253-272, 1998
2. Besl, P. J., McKay, N. D., "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 14, pp. 239-256, 1992.
3. Turk G, Levoy, M., "Zippered polygon meshes from range images," *Proc. SIGGRAPH '94*, ACM, pp. 311-318, 1994.
4. Blais, G., Levine, M. D., "Registering mutiview range data to create 3D computer objects," *IEEE Trans. Pattern Anal Mach Intell.* Vol. 17, pp. 820-824, 1995.
5. Zhang, Z., "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces," *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 13, pp 119-152, 1994.
6. Dorai, C, Wang, G, Jain, A. K., Mercer. C., "Automatic 3D object model construction from

multiple views," *Proceedings of the 13th IAPR International Conference on Pattern Recognition*, pp. 770-774, 1996.

7. Ryu, W, Ahn, J., Kang, Y., Rho, H., "Measurement of human face using projection moiré topography," *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 441-444, 2000.
8. Escobar, J., Montenegro, R., "Several aspects of three-dimensional Delaunay triangulation," *Advances in Engineering Softwares*, Vol. 27, pp. 27-39, 1996
9. Chen, Y., Medioni, G., "Object modeling by registration of multiple range images," *Image Vision Comput.*, Vol. 10, pp. 145-155, 1992.
10. Pulli, K., Multiview "Registration for large data sets," *Second International Conference on 3-D Imaging and Modeling*, Ottawa, Canada, 1999.
11. RapidForm2000TM, <http://www.rapidform.com>.
12. Champlébois, Guillaume, Stéphane Lavalée, Richard Szeliski, Lionel Brunie, "From Accurate Range Imaging Sensor Calibration to Accurate Model-Based 3-D Object Localization," *Proceeding of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 83-89, 1992.