

3D Reconstruction of 3D Printed Medical Metal Implants

Byounghun Ye[†] · Ku-Jin Kim^{††}

ABSTRACT

Since 3D printed medical implant parts usually have surface defects, it is necessary to inspect the surface after manufacturing. In order to automate the surface inspection, it is effective to 3D scan the implant and reconstruct it as a scan model such as a point cloud. When constructing a scan model, the characteristics of the shape and material of the implant must be considered because it has characteristics different from those of general 3D printed parts. In this paper, we present a method to reconstruct the 3D scan model of a 3D printed metal bone-plate that is one kind of medical implant parts. Multiple partial scan data are produced by multi-view 3D scan, and then, we reconstruct a scan model by alignment and merging of partial data. We also present the process of the scan model reconstruction through experiments.

Keywords : Additive Manufacturing, 3D Print, 3D Scan, Reconstruction, Medical Implant

3D 출력 의료용 금속 임플란트에 대한 3D 복원

예 병 훈[†] · 김 구 진^{††}

요 약

3D 출력된 의료용 임플란트(implant) 부품은 보통 표면에 결함이 발생되므로, 출력 후 표면을 검사하는 과정이 필요하다. 자동화된 표면 검사를 수행하기 위해서는 임플란트를 3D 스캔하여 점군(point cloud)과 같은 스캔 모델로 복원하는 방법이 효과적이다. 스캔 모델을 구성할 때, 임플란트는 일반적인 3D 출력 제조 부품과 다른 특성들을 가지므로, 임플란트의 형태와 재료의 특성에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 의료용 임플란트 부품의 한 종류인 금속 bone-plate의 3D 출력물에 대해 스캔 모델로 복원하는 방법을 제안한다. 다각도의 시점에서 3D 스캔을 수행하여 다수의 부분 스캔 데이터를 생성한 뒤, 이들에 대해 정렬(alignment)과 정합(merging)을 수행하여 스캔 모델로 복원한다. 또한, 실험을 통해 스캔 모델로 복원하는 과정을 보인다.

키워드 : 적층 제조, 3D 프린트, 3D 스캔, 복원, 의료용 임플란트

1. 서 론

최근 고령화에 따라 노인층이 증가하면서 만성질환과 관련된 의료서비스의 수요가 급성장하고 있으며, 의료 체계는 개인형 맞춤 의료의 방향으로 패러다임이 변화되고 있다. 인간 친화형 의료기기 산업의 활성화와 함께 3D 프린팅 의료기기 시장은 지속적인 성장을 보이고 있다[1]. 특히 3D 프린팅은 인체의 손상 부위를 대체하는 기능의 임플란트(implant), 보

조기와 같은 개인 맞춤형 제품군을 생산하는 데 있어 더욱 역할이 중요해지고 있다[2-7].

3D 프린터의 기계적인 요인이나 환경적 요인에 의해 출력물은 많은 영향을 받으며, 출력 중에 결함이 발생하는 경우도 빈번하다. 프린터의 기계적 문제로 리코팅(recoating) 오류에 의해 결함이 발생할 수도 있고, 필라멘트의 경우에는 소재의 관리 불량 또는 습도 등에 의해 재료가 파손되거나 소재가 고르게 출력되지 않는 등의 이유로 결함이 발생할 수 있다.

3D 프린터로 임플란트 부품을 출력할 경우, 주로 사용되는 재료는 티타늄과 같은 금속이다. 금속 필라멘트를 사용할 경우 3D 프린터 방식은 베드(bed)에 금속 파우더를 도포 후, 레이저를 이용하여 재료를 압출하고, 압출된 재료의 표면 위에 재료를 재도포한 뒤 다시 압출하는 과정을 반복하여 제작하는 방식이다. 이 경우에 3D 프린터 출력물의 표면에 발생할 수 있는 대표적인 결함은 크랙(crack)이다. 크랙은 표면에

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2020R1A2C1008912)이며, ASK 2022(춘계학술발표대회)에서 발표된 논문을 확장한 논문임.

※ 이 논문은 2022년 한국정보처리학회 ASK 2022의 "3D 프린팅 의료용 금속 임플란트 부품에 대한 스캔 모델 구성"의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.

† 준 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 석사수료

†† 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 교수

Manuscript Received : July 13, 2022

First Revision : October 4, 2022

Accepted : November 2, 2022

* Corresponding Author : Ku-Jin Kim(kujinkim@gmail.com)

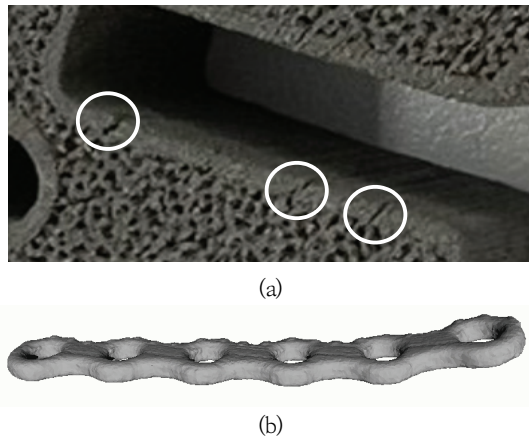


Fig. 1. The Example of Defects in 3D Printed Implants:
(a) Cracks and (b) Bending

생긴 갈라진 틈을 말하는데, 크랙의 발생 원인 중의 한 가지는 도포된 금속 파우더의 표면이 균일하지 않을 경우, 즉, 펠트풀이 불안정한 경우, 형상 적층 과정에서 오차가 생기는 것이다. 또한, 레이저를 이용하여 압출을 진행하는 과정에서, 레이저의 스펙클 잡음 현상(laser speckle noise)으로 초점이 정확하지 않아 정밀한 압출이 불가능한 경우에도 크랙이나 왜곡이 발생할 수 있다. 어떤 경우에는 소재가 가진 특성으로 인해 내부 응력 작용이 발생하여 금속 파우더가 단열체 역할을 함으로써, 레이저에 의한 열이 배출되지 않는 현상이 발생된다. 응력 현상은 보통 두께가 두꺼운 형상이나, 형상의 내부 구조에 대해서는 크게 영향을 주지 않는다. 반면, 두께가 얇은 형상이나 형상의 외벽 부분은 응력작용에 의해 휘거나 크랙이 발생될 수 있다. Fig. 1은 3D 프린팅된 임플란트에 크랙이 발생한 예와 임플란트가 휘어진 예를 보인다.

3D 프린터 출력물은 대부분 기존의 부품 또는 기존의 인체 손상 부위를 대체하기 위해 사용되기 때문에 기존의 부품 또는 부위가 받는 압력과 마찰을 유사하게 받게 된다. 의료 보조기나 임플란트의 경우에는 크랙으로 인해 인체 내부에서 파손이 발생할 수 있고, 이 경우 인체 내의 감염 등의 문제가 발생할 수 있다. 왜곡이나 뒤틀림이 발생하거나 매끄러운 표면이 오류로 인해 거친 표면으로 출력된 경우 부품 치수의 정밀도가 떨어지게 된다.

인체에 삽입되는 3D 프린팅 임플란트 부품은 기계적인 형상보다는 시술될 인체 부위의 형상과 유사한 유기적인 형상을 지닌다. 3D 프린팅을 수행할 때 발생하는 형상의 결함은 파손이나 치수 정밀도에 문제를 발생시킨다. 특히 개인 맞춤형 임플란트의 경우에는 3D 프린팅 시의 오류가 인체 내부에 삽입되는 임플란트의 치수 정밀도 및 내구성에 악영향을 주기 때문에 더 심각한 문제가 될 수 있다. 이에 따라 임플란트 부품에 대해 형상 정확도를 분석하여 결함을 검출하기 위한 방법이 필요하다[8-12].

현재까지 3D 프린팅 출력물의 표면 결함을 발견하기 위한

다양한 연구가 수행되어 왔다. Cerniglia and Montinaro [8]는 3D 프린터 출력물에 대해 결함을 발견하기 위한 비파괴적(non-destructive) 방법으로 레이저 초음파(laser ultrasound)와 레이저 열화상(laser thermography)을 이용하는 방법을 제안하고 이들의 성능을 비교하였다. Chen et al.[9]은 방향성 에너지 증착(directed energy deposition)을 위한 표면 결함 탐지 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기계 학습을 이용하여 센서를 사용하지 않고 자동으로 표면을 모니터링함으로써, 출력 과정 중에 점군(point cloud)을 얻어 표면의 결함을 탐지한다. 결함의 탐지를 위해서는 기계 학습 방법을 적용한다. Plessis et al.[10]은 3D 프린터 출력물에 대해 X선 단층촬영(X-ray tomography)을 적용하여 출력물 내부의 공동(pore)과 같은 결함을 발견하는 방법을 제안하였다.

3D 프린터 출력물에 대한 스캔 모델과 CAD 모델을 비교하는 방법도 연구되고 있다. Madrigal et al.[11]은 3D 점군으로 표현된 제조 부품에서 표면 결함을 발견하는 방법을 제안하였다. MPFH(model point feature histogram)이라는 3D 지역적 표현자(local descriptor)를 제안하고 제조 부품의 표면을 다수의 MPFH로 표현한 뒤 설계 모델과 비교하여 표면의 결함을 발견한다. Jovancevic et al.[12]은 비행기 동체의 외부 표면에 대해 3D 스캐닝을 적용하여 3D 점군을 생성한 뒤, 표면에 있는 찌그러진 부분, 돌출, 스크래치(scratch) 등의 결함을 탐지하고 추출하는 방법을 제안하였다.

임플란트 부품은 일반적인 제조 부품이나 제품과 달리 주로 금속 재료를 이용하여 출력되고 나사의 식립을 위한 구멍(hole)과 같은 형태적인 특징을 갖는다. 따라서, 임플란트 부품에 대해 3D 스캔 모델을 구성할 경우에는 금속 재료의 성질과 형태적인 특징에 맞는 구성 방법이 필요하다. 구성된 3D 스캔 모델은, CAD 모델과 정렬(alignment)한 후, 모델 표면상의 점들 간의 거리를 계산함으로써 두 모델의 형상 간의 유사도를 측정하고 형상이 서로 다른 부분을 판별할 수 있다. 두 모델 간의 형상을 비교하는 과정은 응용 분야에 따라 직접 구현하여 시스템을 구성하거나 점군 간의 거리 계산 또는 점군과 다각형 메쉬(polygon mesh) 간의 거리를 계산하는 기능을 제공하는 CloudCompare[13]와 같은 오픈 소스 라이브러리(open source library)를 사용할 수 있다.

본 논문에서는 임플란트로 많이 사용되는 금속판(metal plate) 형태 중에서 손목에 사용하는 요골 골절 금속판(radial fracture metal plate)의 3D 프린트 출력물에 대해 3D 스캔 모델을 구성하는 방법을 제안한다. Ye and Kim[14]이 제시한 방법에 따라 금속의 특성에 맞게 스캔을 수행하여 다 시점에서 금속판을 3D 스캔한 부분 데이터를 획득한 뒤, 이들에 대해 Zhu et al.[15]의 방법을 금속판의 형태적인 특성에 맞게 적용하여 정렬 및 정합(merge)을 수행함으로써 스캔 모델을 구성하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 금속 임플란트

부품에 대한 스캐닝을 위한 고려 사항과 이를 적용한 방법 및 실험 결과를 보인다. 3절에서는 금속판 형태의 임플란트 출력물을 3D 스캔할 때 고려할 사항 및 스캐닝으로 얻은 부분 데이터(partial data)를 한 개의 스캔 모델로 정렬 및 정합하기 위한 방법을 제안한다. 4절에서는 결론을 맺는다.

2. 스캐너 및 레이저 파장의 선정

의료용 임플란트를 3D 프린터로 출력할 경우 티타늄과 같은 금속 재료를 사용하는 것이 일반적이다. 스캐닝을 수행할 때, 금속 재료의 경우에는 스캐너의 타입 선택에 별도의 고려가 필요하다. 3D 스캐너의 종류는 크게 광학식과 레이저식으로 구분할 수 있다. 일반적으로는 레이저식 스캐너에 비해 패턴광을 사용하는 광학식 스캐너의 측정 속도가 더 빠르며, 분해능이 높아서 정밀한 형상 정보를 획득하는데 효과적이다. 그러나, 광학식 스캐너는 금속과 같이 빛이 반사되는 소재에 사용하기에는 부적합하다. 반사를 줄이기 위해 금속 소재의 경우, 백색 현상액을 도포하여 형상 정보를 획득하는 방법을 주로 사용한다. 그러나, 출력물에 백색 현상액을 도포할 경우 다음과 같은 문제점이 발생한다.

1. 형상 정보를 획득할 때, 현상액의 두께에 의해 출력물 표면에서 약 10 μ m의 오차가 발생할 수 있다.
2. 현상액 자체가 발암물질이므로 사용시 주의가 필요하고, 이에 따라 의료용 3D 프린팅 출력물 중 일부는 이러한 현상액 사용을 제한한다.

이에 따라 의료용 임플란트를 스캔할 경우 광학식 스캐너를 사용하기 어렵고, 광학식에 비해 반사에 강한 레이저 방식을 적용하여 스캔을 진행하는 것이 합리적이다. 일반적으로 레이저 타입의 스캐너는 공장 내의 인라인 검사 및 전수 검사 등에서 빠른 속도로 일부분의 형상을 검출하기 위해 사용되고 있지만, 크랙 등의 미세 형상 검출에 사용할 경우 해상도가 낮고 정밀도가 낮다는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 빠른 속도로 고해상도(2,560px) 처리가 가능하고, 내장 엔코더 트리거를 활용할 수 있는 레이저 스캐너로 Sick Ranger3 를 사용하였다.

레이저식 스캐너로 임플란트 출력물을 스캔할 때, 레이저 파장에 따라 스캔 결과에 차이가 발생할 수 있다. 일반적으로 사용되는 적색 레이저(red laser) 및 청색 레이저(blue laser) 파장을 비교할 때, 초점이 잘 맞고 정밀도가 높다는 이유로 적색 레이저가 청색 레이저보다 자주 사용된다. 그러나, 스캔의 대상이 금속 소재인 경우, 실험을 통해 청색 레이저가 더 적합하다고 판단하였다. 예를 들어, 티타늄 소재를 이용한 3D 프린팅 임플란트에 대해 스캔하여 획득한 형상을 비교한 결과 적색 레이저 및 청색 레이저를 적용할 때 각각 20,052개와 24,384개의 점(point)을 데이터로 획득하였다. 적색 레이저보다는 청색 레이저를 사용할 때 표면의 거칠기 등 세부

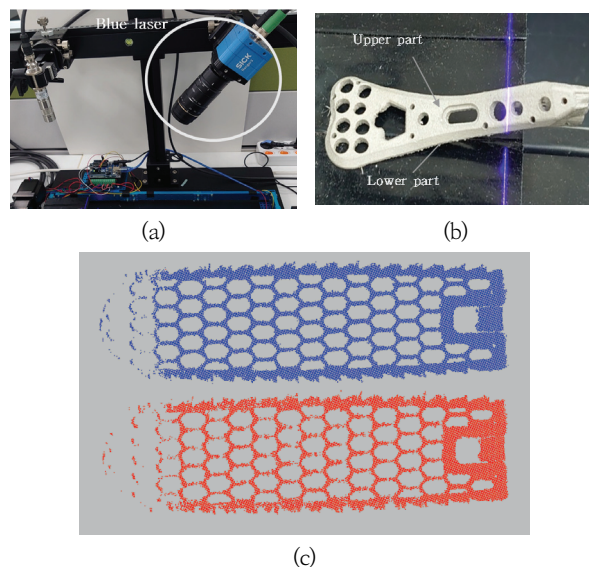


Fig. 2. The Scanner and Scanning Results (a) a 3D Scanner with the Blue Laser, (b) Scanning an Implant Part, and (c) the Scanned Points with Blue Laser (Upper) and Red Laser (Lower).

적인 형상 정보가 정확하게 획득된다고 판단하여 스캐너에서 청색 레이저를 적용하여 스캔을 수행하였다(Fig. 2 참조).

3. 금속판 임플란트와 스캐닝 방법

3.1 제안된 방법의 개요

3D 프린팅 임플란트 부품을 스캐닝하여 최종적인 3D 스캔 모델을 구성하는 과정을 Fig. 3과 같이 제안한다. 납작한 형태의 금속판에 구멍이 많다는 형태적인 특성에 맞게 3D 스캔한 부분 데이터를 얻은 뒤, 데이터의 정렬과 병합을 위해 Zhu et al.[15]의 방법을 적용한다.

부품 상단(upper part)과 하단(lower part)에 대해 각각 부분 스캔 데이터 (partial scan data)를 구성한다. 임플란트 부품을 일정 각도로 회전시키며 각각 스캔한 뒤, 스캔 데이터에 대해 노이즈(noise)를 제거하여 부분 스캔 데이터 u_i 와 l_i ($0 \leq i < n$)를 생성한다. u_i 는 이웃한 회전각에 대해 누적하여 정렬을 수행하며, 회전각을 연속적으로 변경하며 회전을 완료할 때까지 u_i 를 누적하며 정렬을 마치면 최종적으로 정합(merge)하여 상단 점군(upper point cloud)을 구성한다. l_i 에 대해서도 유사하게 적용하여 최종적으로 하단 점군(lower point cloud)을 구성한다. 상단 점군과 하단 점군을 각각 구성한 뒤, 이들을 정렬한 후 정합하여 3D 스캔 모델을 구성한다.

제시된 예에 대해 3D 스캔 모델을 구성할 때, 부분 스캔 데이터의 획득부터 정렬 및 정합을 거쳐 3D 복원을 종료하기까지 20분 이내의 시간이 소요되었다.

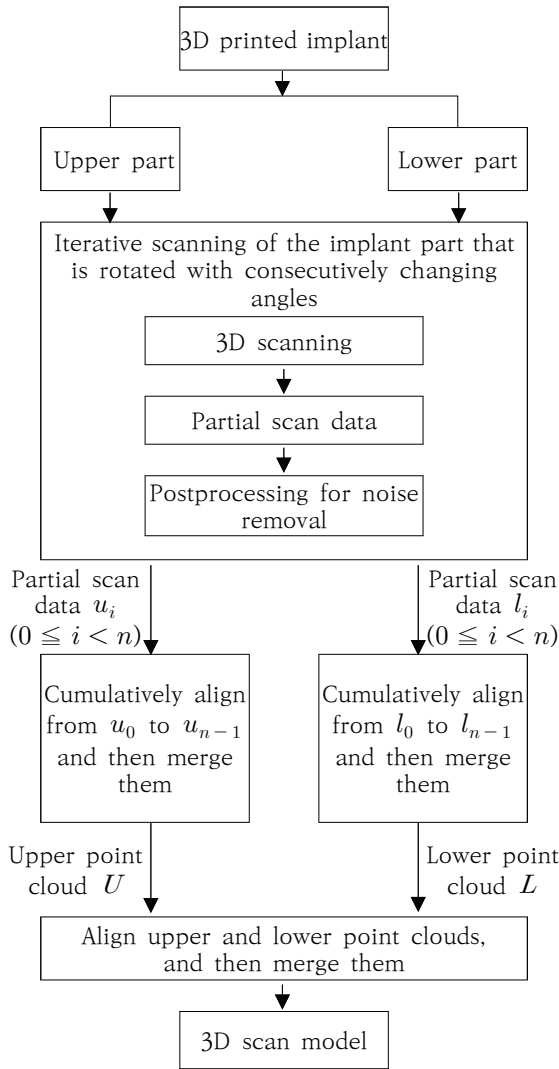


Fig. 3. The Overview of the 3D Reconstruction

3.2 부분 스캔 데이터의 획득

본 논문에서 고려하는 3D 프린터 출력물은 휘어짐이나 크랙 등의 결함이 존재할 수 있으므로 CAD 모델과 형상에 차이가 있고, 이에 따라 CAD 모델을 기준으로 삼아 부분 스캔 데이터 집합을 정렬하기가 어렵다. CAD 모델 대신 부분 스캔 데이터 집합 간에 특징점을 기준으로 초기 정렬을 수행한다. 임플란트 부품은 대부분 유기적인 형태로 형상의 특징 위치를 찾을 수 있으므로 특징점을 사용한다. 예외적으로, 일부 임플란트는 형태가 평평하거나 구멍과 같은 유사한 패턴이 반복되는 특성을 가지며, 이런 경우에는 나사 구멍, 형상의 테두리(edge) 또는 상황에 따라 베이스 플레이트 마커(marker)를 기준으로 각 형상 정보를 획득해야 한다. 형상 간에 겹치는 특징점이 많이 있어야 데이터 간의 정렬이 세밀하게 보정되어 신뢰도가 높은 데이터를 얻을 수 있으므로, 서로 겹치는 부분이 일정 면적 이상 발생하도록 부분 스캔 데이터를 구성한다.

3D 프린팅 임플란트 부품에 대해 전체적인 스캔 모델을 구성하기 위해 부품의 특징을 반영할 수 있는 스캔 방향을 설정한다. 각각의 부분 스캔 데이터는 전체적인 형상과 나사 식립 등에 사용될 부분을 고려하여 획득하여야 한다. 의료용 임플란트의 형상과 크기는 식립 가능 영역 내에 포함되어야 한다. 또한, 임플란트의 응력 분포가 좋아야 하고, 해부학적 구조물에 의해 허용되는 범위 내에서 가능한 한 직경이 크고 길이가 긴 형태가 선호된다. 그러나, 임플란트의 길이가 너무 긴 경우에는 식립 위치의 신경에 접근할 수 있는 위험 요소를 가지므로 길이가 제한된다. 임플란트는 보통 나사 식립을 위한 다수의 구멍을 가지며, 구멍을 통해 골유착이 된다. 어떤 종류의 임플란트는 구멍을 기준으로 식립할 나사의 각도를 검사하는 과정이 중요하다.

3D 스캐너는 카메라의 가시 범위에 있는 데이터만 획득할 수 있으며, 스캔 과정을 한번만 적용할 경우에는 가시 범위를 벗어나는 사각(blind spot)이 존재하는 경우가 빈번하다. 스캔 과정에서 사각이 존재하는 경우 온전한 스캔 모델을 구성할 수 없다. 이에 따라 임플란트 부품이 금속판 형태일 경우, 상단과 하단의 부분은 별개로 스캔 되어야 한다. 특히 구멍 부분의 정보를 온전히 얻기 위해서는, 카메라를 데이터의 구멍 기둥(hole pillar)과 형상의 측면이 보이도록 고정한 뒤 측정할 대상을 회전하거나 스캐닝 플레이트(plate)를 회전하여 스캔 방향 별로 부분 데이터들을 획득해야 한다. Fig. 4(a)는 한 개의 부분 스캔 데이터에 존재하는 구멍을 확대해서 보이며, 이때 구멍의 측면 부분이 완전하지 못한 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 회전하여 얻은 두 개의 부분 스캔 데이터를 정렬한 결과를 보이며, Fig. 4(a)의 경우보다 구멍의 측면 정보가 많아진 것을 볼 수 있다.

스캔 과정에서는 고정된 레이저에 대해 임플란트가 놓인 스테이지(stage)가 선형 이동하는 방식의 선형 스캔을 이용하였다. 스캔 모델을 구성하기 위해 부분 스캔 데이터를 획득할 때마다 대상물의 위치 정보가 일정하지 않으므로 직접 출력물을 회전하거나 이동하며 겹침이 있는 부분 스캔 데이터를 획득한다. 부분 스캔 데이터 간의 겹치는 부분은 이후의 정렬 과정을 위해 반드시 필요하다.

임플란트가 놓인 스테이지는 각 부분 스캔 데이터를 획득

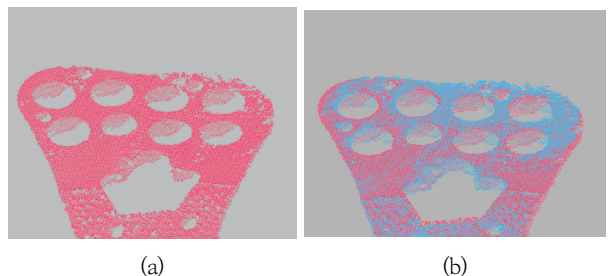


Fig. 4. The Alignment of Partial Scan Data: (a) a Partial Scan Data Set with Holes and (b) Alignment of Two Consecutive Partial Scan Data Sets.

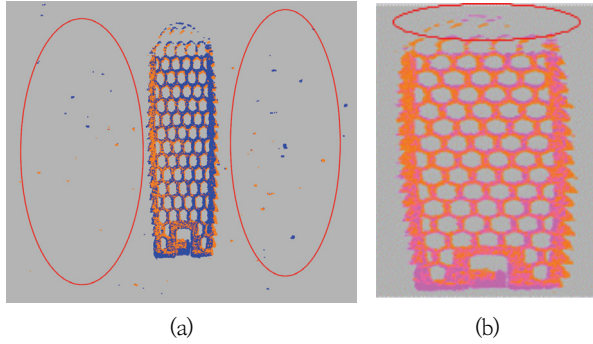


Fig. 5. The Examples of the Noise of the Partial Scan Data

할 때마다 회전된다. 초기에는 회전각 0° 인 상태에서 레이저로 선형 스캔을 수행하여 부분 스캔 데이터 u_0 를 획득한다. 그 이후, 회전 스테이지가 45° 회전함으로써 임플란트가 초기 상태에서부터 45° 회전된 상태에서 다시 레이저로 선형 스캔을 수행하여 u_1 을 획득하고, 다시 회전각을 45° 증가한 후 선형 스캔하는 과정을 반복하여 모든 부분 스캔 데이터 u_i ($0 \leq i < n$)를 획득한다. 부분 스캔 데이터 l_i ($0 \leq i < n$)도 유사한 방식으로 획득한다.

스캐닝 환경에 따라 초기에 얻어지는 스캔 데이터는 노이즈 및 불필요한 데이터를 포함할 수 있다(Fig. 5 참조) 노이즈 및 불필요한 데이터를 삭제하는 작업을 통해 필요한 데이터를 추출한 뒤 부분 스캔 데이터로 사용한다.

스캐너 좌표계로 획득하는 부분 스캔 데이터는 3차원 world 좌표계의 점군으로 변환하여 정렬 및 정합에 사용한다. 이후, 본 논문에서 언급하는 부분 스캔 데이터는 3차원 world 좌표계의 점군을 의미한다.

3.3 데이터의 정렬 및 정합

Zhu et al.[15]은 다시점에서 얻은 부분 스캔 데이터를 정렬 및 정합하는 방법을 제안하였다. 이 절에서는 Zhu et al.의 방법을 금속판의 형태적인 특성에 맞게 적용하여 스캔 모델을 구성하는 방법을 제안한다.

3D 프린팅 임플란트 부품의 스캔은 3D 스캐너 좌표계를 기준으로 이루어지지만, 스캔 데이터는 world 좌표계로 변환하여 사용한다. 형상의 사각이 없는 데이터를 얻기 위해, 부품을 이동하고 회전하여 각도별로 부분 스캔 데이터를 획득하고, 얻어진 각 데이터를 특징점 기준으로 대응하여 전체 스캔 모델을 구성하는 정렬 과정을 수행한다.

스캐너를 통해 카메라가 가장 넓은 면적을 스캔할 수 있는 것이 상단과 하단 패치이기 때문에 스캐닝 과정은 상단 패치와 일부 측면, 그리고 하단 패치와 일부 측면을 포함하는 상태로 수행된다. 정렬 과정은 ICP(iterative closest point) 알고리즘[16,17]을 이용하여 수행한다. ICP 알고리즘은 1992년에 제안된 이후 현재까지 두 점 집합 간의 위치 정렬을 위

Table 1. Algorithm for Alignment of Partial Scan Data Sets

```

For i := 0 to n-2 do begin
   $u_{i+1}$  := union of the aligned  $u_i$  and  $u_{i+1}$ ;
   $l_{i+1}$  := union of the aligned  $l_i$  and  $l_{i+1}$ ;
end
 $U$  := Merged data set of  $u_{i+1}$ ;
 $L$  := Merged data set of  $l_{i+1}$ ;
return  $U$  and  $L$ ;

```

해 일반적으로 사용되는 방법이며, 본 논문에서는 오픈소스 라이브러리(open source library)인 PCL[18]에서 제공하는 ICP 기능을 사용하여 정렬을 수행하였다.

상단 점군 U 와 하단 점군 L 를 각각 구성하며, 이 과정은 Fig. 3의 스캔 모델 구성 방법에서 스캐닝을 통해 얻은 부분 스캔 데이터를 정렬 및 정합하는 단계에서 사용된다. 상단 부분 스캔 데이터 u_i ($0 \leq i < n$)에 대해 연속적인 두 개의 회전각에 대응하는 데이터 집합에 대해 정렬한 뒤, 이들의 합집합을 구한다. 다음 회전각의 데이터 집합은 여기에 누적하여 정렬한다. 이 과정을 반복하여 최종적으로 모든 부분 스캔 데이터 집합이 정렬된 결과를 얻는다. 정렬하는 중간 과정에서는 정합을 수행하지 않는데, 그 이유는 정합을 할 경우 서로 중복되는 데이터가 삭제되며 데이터 집합의 밀집도가 떨어질 수 있기 때문이다. 이에 따라, 정합 과정은 모든 부분 스캔 데이터에 대해 정렬을 완료한 뒤에 수행된다. 하단에 대한 부분 스캔 데이터 l_i ($0 \leq i < n$) 들도 같은 방법으로 정렬 및 정합을 수행한다. Table 1은 이 과정을 알고리즘으로 제시한다.

부분 스캔 데이터를 정렬할 때 측면 정보를 참조하여 사용하며, 모든 부분 스캔 데이터 집합을 정렬한 후 정합하여 온전한 구멍의 정보를 구성할 수 있다. 또한 형상 모델의 측면 정보는 형상 데이터의 상단 점군과 하단 점군 간 정렬 시에도 참조 데이터로 사용된다.

정렬을 위해 사용되는 ICP 알고리즘[15,16]은 점 집합 S 에 대해 각 점으로부터의 최소 거리에 해당하는 점을 점 집합 T 에서 발견하여 점의 쌍을 구성한 뒤, 각 쌍에 속한 점들 간의 평균 제곱 오차(mean square error)가 최소화 되는 방향으로 T 를 이동한다. 이동된 위치의 T 에 대해 다시 같은 과정을 반복함으로써 두 점 집합 S , T 를 정렬한다. ICP는 정렬을 위해 널리 사용되어 온 알고리즘으로서, 두 점 집합의 초기 방향이 어느 정도 일치할 경우에는 원하는 결과를 얻을 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 최적화되지 않고 실패하는 경우가 자주 있다. 이에 따라 ICP 알고리즘을 두 단계로 적용하는 경우가 일반적이다[19]. 본 논문에서는 금속판 임플란트 형태의 특성에 맞게 ICP 알고리즘을 두 단계로 적용하는 방법을 제안한다.

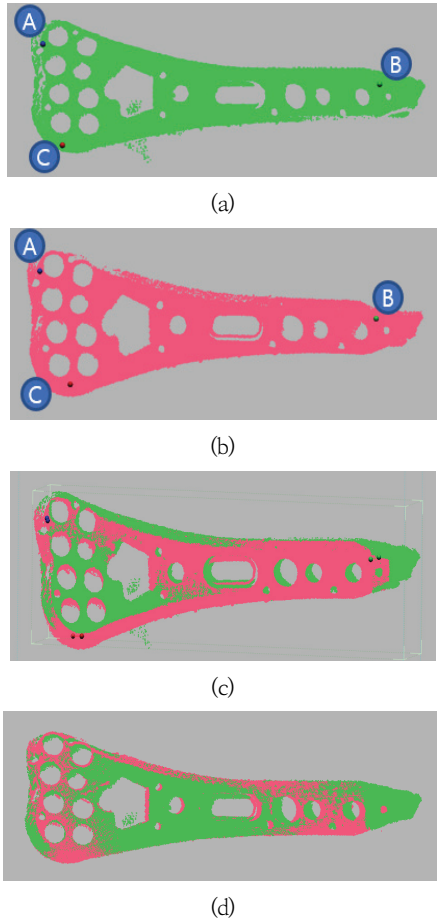


Fig. 6. Alignment of u_i and u_{i+1} : (a) u_i , (b) u_{i+1} , (c) the Initial Alignment of u_i and u_{i+1} with Three Feature Points (A-C), and (d) the Final Alignment of u_i and u_{i+1} .

두 개의 부분 스캔 데이터 u_i 와 u_{i+1} 를 정렬하기 위해, 첫 번째 단계에서는 소수의 특징점을 기준으로 ICP를 적용하여 초기 정렬을 수행한다. 두 개의 부분 스캔 데이터 u_i 와 u_{i+1} 를 정렬할 때, u_i 와 u_{i+1} 각각에 서로 대응되는 특징점들을 지정한 뒤(Fig. 6(a)-(b)), 특징점들이 서로 정렬되도록 ICP 알고리즘을 적용한다. 외곽부에 해당하는 특징점 A-C를 이용하여 u_i 와 u_{i+1} 를 정렬한 결과를 Fig. 6(c)에서 보인다. 특징점을 이용한 초기 정렬의 결과는 u_i 와 u_{i+1} 간의 일치도가 낮다.

두 번째 단계에서는 초기 정렬이 된 상태에서 전체 데이터를 특징점으로 이용하여 ICP를 재적용한다. Fig. 6(c)는 초기 정렬 상태이고, Fig. 6(d)는 초기 정렬된 상태에서 전체 데이터를 특징점으로 이용한 최종 정렬 상태를 보인다.

Fig. 7은 u_i 와 u_{i+1} 의 초기 정렬 상태 및 최종 정렬 상태에서 점 집합 S로부터 점 집합 T에 대해 점 간의 최소 거리를 구한 뒤, 거리에 따라 S에 속한 점의 색상을 지정하여 가시화한 결과를 보인다. S에 속한 점 p의 법선 벡터 방향이 N이고,

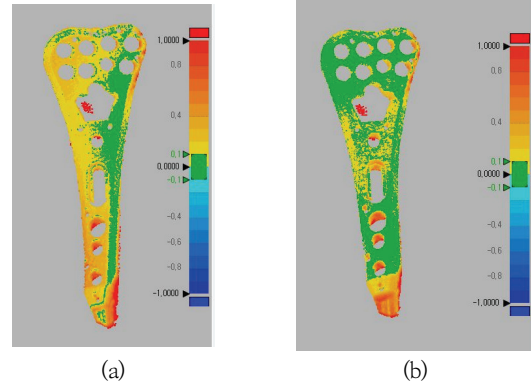


Fig. 7. Colored Distance Information for the Alignment of u_i and u_{i+1} with (a) the Initial Alignment and (b) the Final Alignment.

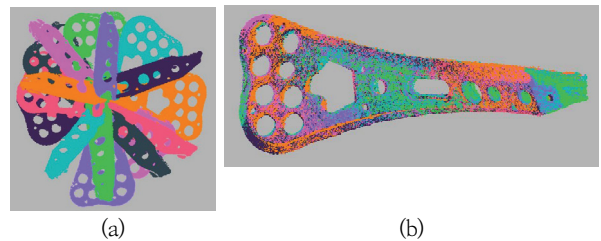


Fig. 8. The Example of u_i and U : (a) u_i ($0 \leq i < n$), Where Every u_i is Represented with Different Color and (b) U

T에서 발견한 최소 거리의 점이 q라 할 때, $(q-p) \cdot N > 0$ 이면 p와 q 간의 거리값을 양수로, $(q-p) \cdot N \leq 0$ 이면 거리값을 음수로 나타내었다. 녹색은 p와 q 간의 거리가 -0.1mm 부터 $+0.1\text{mm}$ 사이인 경우를 나타낸다. p와 q 간의 거리값이 $+0.1\text{mm}$ 보다 클 경우에는 적색으로 표시되고, p와 q 간의 거리값이 -0.1mm 보다 작을 경우에는 청색으로 표시되었다.

초기 정렬 상태인 Fig. 7(a)는 u_i 와 u_{i+1} 의 스캔 데이터가 우측에서 더 밀도 높게 분포되어 우측을 중심으로 정렬되었고, 상대적으로 데이터가 적은 좌측은 거리값이 더 큰 것을 볼 수 있다. 재정렬까지 수행된 후의 거리값 분포는 Fig. 7(b)에서 제시되었고, 초기 정렬 상태에 비해 전체적으로 더 작은 거리값이 분포된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8(a)는 모든 부분 스캔 데이터 u_i ($0 \leq i < n$)를 보이며, Fig. 8(b)는 모든 u_i 가 정렬된 후 정합된 최종 결과인 U 를 보인다. 여기에서, 각각의 부분 스캔 데이터는 서로 다른 색상으로 표시되었다.

상단에 대한 부분 스캔 데이터 집합 u_i ($0 \leq i < n$)를 정렬한 뒤 정합한 결과는 상단 점군 U 에 해당한다. 하단에 대한 부분 스캔 데이터 집합 l_i ($0 \leq i < n$)를 정렬한 뒤 정합한 결과는 하단 점군 L 을 구성한다(Fig. 9(a) 참조). 상단과 하단의 점군을 정렬할 경우에도 ICP를 두 단계로 적용하는 방법을 사용한다. 상단과 하단이 중첩되는 측면 데이터에

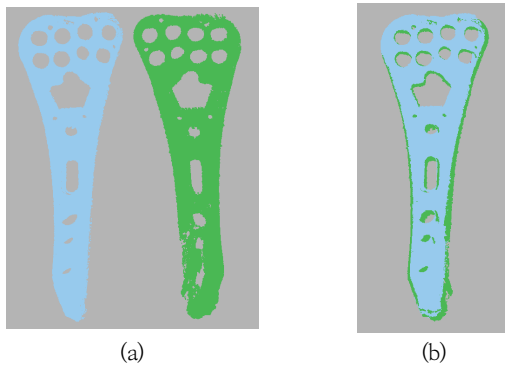


Fig. 9. The Alignment of U and L : (a) U (left) and L (right) and (b) the Aligned Result

서 소수의 특징점을 설정하고, 특징점을 이용하여 초기 정렬을 수행한다. 초기 정렬 상태에서 점군 상의 모든 점들에 대해 ICP 알고리즘을 적용하여, 최종 정렬을 수행한다. 최종적으로 정렬된 점군에 대해 데이터 정합을 수행하면 중복되는 점과 노이즈 등의 불필요한 데이터가 제거된다. 상단과 하단 점군의 최종 정렬 상태에서 정합을 완료한 결과로 얻은 점군이 임플란트 부품의 3D 스캔 모델로 사용된다(Fig. 9(b) 참조).

4. 결 론

3D 프린팅 출력물 표면에서는 크랙, 뒤틀림, 블룸이나 뾰루지 같은 결함이 발생할 수 있다. 일반적으로 3D 프린팅 출력물은 기존 부품을 대체하기 위해 사용되기 때문에, 이런 결함은 제품의 강도나 정밀도, 신뢰성에 문제를 야기한다. 출력물에서 결함이 있는 영역은 CAD 모델과 형상의 차이가 있는 부분이라고 볼 수 있으므로, 출력물과 CAD 모델의 형상을 비교하는 과정은 매우 중요하다.

본 논문에서는 3D 프린터 출력물의 형상을 다수의 부분 3D 스캔 데이터를 이용하여 스캔 모델로 복원하는 방법을 제안하였다. 자주 사용되는 임플란트 부품의 한 종류인 요골 골절 금속판의 3D 프린터 출력물에 대해 스캔 모델을 구성하는 각 과정에서 고려할 점을 제시하고 적합한 방법을 제안하였다. 또한, 실험을 통해 스캔 모델의 구성 과정을 보였다.

기존에 전문가의 육안에 의지하던 방법에 비해, 제안된 방법으로 스캔 모델을 구성함으로써 3D 프린터로 출력되는 삽입형 임플란트 부품의 표면 결함을 체계적이고 객관적인 방법으로 검사할 수 있다. CAD 모델과 스캔 모델 간의 거리를 계산하여 크랙이나 휘어짐, 뒤틀림 등의 결함을 발견하고 결함의 정도를 측정할 수 있으며, 3D 스캔의 정밀도가 높아질수록 결함의 발견이나 측정의 정확도가 높아질 수 있다. 또한, 스캔 모델을 구성함으로써 3D 프린팅 출력물의 형상 결함을 측정하기 위해 소요되는 시간을 최소화함으로써 생산성을 향상시킬 수 있다.

References

- [1] National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Ministry of Food and Drug Safety, The forecast analysis report for innovative medical devices, 2017.
- [2] U. Seo and K. -J. Kim, "3D printing based patient-specific orbital implant design and production by using a depth image," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.23, No. 8, pp.903-914, 2020.
- [3] Y. J. Jeong, D. H. Choi, and K. -J. Kim, "Algorithm for fabricating 3D breast implants by using MRI and 3D Scan Data," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.22, No. 12, pp.1385-1395, 2019.
- [4] S. Lee et al., "A review of three-dimensional printing technology for medical applications," *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol.80, No.2, pp. 213-225, 2019.
- [5] R. J. Mobbs, M. Coughlan, R. Thompson, C. E. Sutterlin, and K. Phan, "The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: Case report," *Journal of Neurosurgery*, Vol.26, pp.513-8, 2017.
- [6] R. K. Chen, Y. -A. Jin, J. Wensman, and A. Shih, "Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses - A review," *Additive Manufacturing*, Vol.12, Part A, pp.77-89, 2016.
- [7] H. Lal and M. K. Patralekh, "3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel," *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, Vol.9, No.3, pp.260-268, 2018.
- [8] D. Cerniglia and N. Montinaro, "Defect detection in additively manufactured components: Laser ultrasound and laser thermography comparison," *Procedia Structural Integrity*, Vol.8, pp.154-162, 2018.
- [9] L. Chen, X. Yao, P. Xu, S. K. Moon, and G. Bi, "Rapid surface defect identification for additive manufacturing with in-situ point cloud processing and machine learning," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.16, No.1, pp.50-67, 2021.
- [10] A. Plessis, I. Yadroitsava, and I. Yadroitsev, "Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights," *Materials and Design*, Vol.187, 2020.
- [11] C. A. Madrigal, J. W. Branch, A. Restrepo, and D. Mery, "A method for automatic surface inspection using a model-based 3d descriptor," *Sensors*, Vol.17, s17102262, 2017.

- [12] I. Jovancevic et al., "3D point cloud analysis for detection and characterization of defects on airplane exterior surface," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.36, No.74, pp.1-17, 2017.
- [13] CloudCompare 3D Point cloud and mesh processing software Open Source Project, <http://www.cloudcompare.org>
- [14] B. Ye and K. -J. Kim, "Scan model construction for 3D printout of metal implant parts," *Proceedings of the Annual Spring Conference of Korea Information Processing Society Conference (KIPS) 2022*, Vol.29, No.1, pp.18-20, 2022.
- [15] J. Zhu, Z. Li, S. Du, L. Ma, T. Zhang, "Surface reconstruction via efficient and accurate registration of multiview range scans," *Optical Engineering*, Vol.53, No.10, pp. 102104, 2014.
- [16] P. J. Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [17] Y. Chen and G. Medioni, "Object modelling by registration of multiple range images," *Image and Vision Computing*, Vol.10, No.3, pp.145-155, 1992.
- [18] Point Cloud Library, PCL 1.11.1 [Internet], <https://pointclouds.org>
- [19] S. Byun, K. Jung, S. Im, and M. Chang, "Registration of 3D scan data using image reprojection," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 18, No.9, pp.1221-1229, 2017.



예 병 훈

<https://orcid.org/0009-0005-6371-5067>

e-mail : 3168374@gmail.com

2012년 경운대학교 컴퓨터학부(학사)

2012년 ~ 2016년 (주)포디컬처 전임연구원

2016년 ~ 현 재 경북대학교

첨단정보통신융합산업기술원

책임연구원

2020년 경북대학교 컴퓨터학부 석사수료

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 적층 제조



김 구 진

<https://orcid.org/0000-0001-8743-4650>

e-mail : kujinkim@gmail.com

1990년 이화여자대학교 전자계산학과(학사)

1992년 KAIST 전자계산학과(석사)

1998년 POSTECH 컴퓨터공학과(박사)

1998년 ~ 2000년 Dept. of Computer Sciences, Purdue University, PostDoc.

2000년 ~ 2002년 아주대학교 정보통신전문대학원 BK21 조교수

2002년 ~ 2003년 Dept. of Mathematics and Computer Science, University of Missouri-St. Louis, Visiting Assistant Professor

2004년 ~ 현 재 경북대학교 컴퓨터학부 교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 기하모델링, 계산생물학