



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



치과보정물 적용을 위한 3 차원 구조광 스캔 시스템 개발

Development of structured light based 3D scan system
for application of dental correction

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원
정보통신학과
정동호

치과보정물 적용을 위한 3 차원 구조광 스캔 시스템 개발

지도교수 권 구 락

이 논문을 정보통신공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

정보통신학과

정동호

정동호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이범식 (인)

위원 조선대학교 교수 엄태원 (인)

위원 조선대학교 교수 권구락 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목 차	4
그림 목 차	5
ABSTRACT	7

제 1장 서론	1
---------------	---

제 1절 연구목적 및 기술배경	1
1. 연구목적	1
2. 기술배경 : 3차원 스캐닝 기법	1
가. 레이저 스캐닝	2
나. 구조광 스캐닝	3
다. 비전 기반 스테레오 스캐닝	4
제 2절 3차원 스캔 시장 분석	4

제 2 장 구조광 스캐너 개발	9
------------------------	---

제 1절 광원모듈	9
1. LED 광원부 개발	9
2. DLP(Digital Light Proceesing) 이미지 구현보드 개발	10
제 2절 카메라 모듈	13
제 3절 회전 모션 스테이지	14
1. 회전 모션 스테이지 기구부	14
2. 회전 모션 스테이지 제어모듈	15

제 3 장 3차원 점 데이터 획득 기법	18
제 1절 광원-디텍터 보정기술	18
1. 구조광 패턴 조사 기술	18
2. 광원모듈-디텍터 위치 결정	20
3. 광원모듈-디텍터 간 캘리브레이션	21
제 2절 3차원 점 데이터 획득 기술	22
1. 3차원 점 데이터 변환 기술	22
2. 3차원 점 데이터 정합 기술	24
3. 3차원 점 데이터의 법선 연산	25
4. 3차원 표면 생성 알고리즘	25
제 4 장 3차원 형상 모델링	28
제 1절 3차원 데이터 후처리 기법	28
1. 형상 노이즈 제거 기술	28
2. 메쉬 정규화 기술	29
3. 3차원 데이터 압축 기술	30
4. 데이터 보간 방법	31
5. 3차원 형상 평가 기술	32
제 5 장 실험 결과 및 평가	33
제 1절 스캔 실험 결과	33
1. 3차원 스캔 데이터 실험 결과 - 스캔 정확도	33
2. 3차원 스캔 데이터 실험 결과 - 스캔 시간	35
제 2절 디지털 치과보정 시스템 적용	36

제 6 장 결론 38

참고문헌 40

표 목 차

표 1. 세계 3차원 레이저 스캐너 산업분야별 시장 동향	6
표 2. 세계 3차원 레이저 스캐너 산업분야별 시장 예측	6
표 3. 스캔오차 측정 결과	34
표 4. 스캔오차 측정 시험결과	35
표 5. 스캐닝 시간 측정 시험결과	36

그림 목 차

그림 1. 삼각측량 기반 3차원 스캐닝 기법	2
그림 2. 구조광 기반 3차원 형상 획득 방법	4
그림 3. 세계 국내 스캐너 시장규모	5
그림 4. 국내 3D 스캐너 시장규모	7
그림 5. 국내 3D 콘텐츠 시장규모	8
그림 6. 구조광 광원모듈(RGB LED)	9
그림 7. 구조광 광원모듈 동작상태	10
그림 8. DLP 시스템 블록다이어그램	11
그림 9. 구조광 광원모듈(RGB LED)	11
그림 10. 구조광 광원모듈(RGB LED) 확산 실험	12
그림 11. 카메라 모듈 및 출력데이터	13
그림 12. 회전 모션 스테이지의 3D 설계 모델링	14
그림 13. 모터의 토크 힘 결정을 위한 합성하중과 토크 계산	15
그림 14. 다축 제어용 신호처리 보드의 Artwork 이미지 및 PCB	16
그림 15. Trapezoidal(사다리꼴) 속도 프로파일 형태	16
그림 16. Micro stepping을 위한 회로설계와 PWM 동작신호 출력결과 화면	17
그림 17. 수직, 수평 구조광 패턴	18
그림 18. 대상객체 위에 조사된 구조광 패턴 실험 결과	19
그림 19. 스캔 대상 객체와 카메라 화각 결정 개념	20
그림 20. 카메라 데이터와 연산된 빔 프로젝터 방향 데이터	21
그림 21. 본 실험에서 연산한 카메라와 광원모듈 간의 수학적 관계 값	22
그림 22. 대상객체의 카메라 데이터와 유추된 빔 프로젝터 방향 데이터	23
그림 23. 대상객체의 단일 면 스캔 데이터 결과	23
그림 24. 획득된 스캔 데이터 결과(0~360도: 60도 간격)	25
그림 25. 스캔 점 데이터와 표면 데이터 결과	27
그림 26. 3차원 형상의 노이즈 제거 결과	28
그림 27. 메쉬 정규화 결과	29

그림 28. 메쉬 정규화 결과(스템퍼드버니 모델)	30
그림 29. 데이터 압축기술	30
그림 30. 데이터 보간 결과	31
그림 31. 스캔 데이터의 평균구배와 가우시안구배 지도 결과	32
그림 32. 스캔 시료 및 스캔 데이터	33
그림 33. 스캔 시료 측정 기준 위치	34
그림 34. 6면의 획득된 스캔 데이터 결과(좌) 및 단일 정밀 스캔 데이터(우)	35
그림 35. 기존 시스템과 처리과정 비교	37
그림 36. 정밀 공정과정과 최종 결과물	37

ABSTRACT

Development of structured light based 3D scan system for application of dental correction

Dong-ho Jung

Advisor : Prof. Goo-Rak Kwon

Department of information Communication Engineering
Graduate School of Chosun University

In this paper, a structured light based 3D scanning system for dental correction is proposed. The system consists largely of hardware scanner and scanning software. The scanner consists of light source, detector, rotary stage, and arm controller. The scanning program includes structured light control, geometry calibration, 3D point cloud acquisition, and 3D geometry modeling. The light source is white LED projector which can control 40 pattern light. The scan data can be control various direction by the rotary stage. A size of the target object is less than 10cm and measurement distance is about 20cm.

The system is applied structured light scanning thecnique to acquire accurate 3D model. The structured light scanning provides accurate results even if the measurement range is short. The scan accuracy of the proposed system is under 0.01mm. A scanning speed of the system for full 3D model is under 1min and a scanning speed of a part of scan data is about 18 seconds.

The scanner performance can be applied to dental area. To design artificial teeth or dental implant, 3D scan data of the dental correction is needed. The proposed scan system is optimized to the area.

제 1장 서론

제 1절 연구목적 및 기술배경

1. 연구목적

3차원 콘텐츠 기술의 발전으로 인하여 다양한 분야에서 3차원 기술이 적용되고 있다. 특히, 3차원 형상을 가시화하고 가공할 수 있는 하드웨어 기반 시스템의 발전은 일반 서비스 분야에서 3차원 콘텐츠의 수요 증가를 이끌고 있다. 스마트폰, 3D TV 뿐 아니라 3D 데이터를 병렬적으로 처리할 수 있도록 하는 그래픽 가속기는 기존 2차원 영상으로 제공되던 서비스 분야를 3차원으로 대체하게 하고 있으며 증강현실 및 가상 현실 기술은 사용자에게 체험적 서비스를 제공하는데 기여하고 있다.

3차원 정보는 2차원 영상에 비해 보다 직관적인 정보를 사용자에게 제공하기 때문에 정보 분석 분야에 적극 적용되고 있다. 특히 의료영상 분야에서는 오래전부터 3차원 데이터를 획득할 수 있는 기법에 대한 연구가 한창 진행 중에 있다. X선으로 인체 내부를 측정하고 이를 기반으로 정보를 분석하는 것은 한계가 있기 때문에 CT, MRI 등을 이용하여 3차원 볼륨 정보를 분석하거나 단층정보를 해석하는 것으로 기존의 시스템의 한계를 뛰어 넘고 있다. 치과분야에서도 치아 구조를 3차원으로 획득하고자 하는 시도가 오래전부터 있어 왔다. 기존은 X선을 이용하여 치아 내부 정보를 파악하였으나 테라 헤르츠 광원 등을 이용하여 보다 정밀한 분석을 시도하고 있다. 뿐만 아니라 임플란트, 틀니 등 사용자에게 이물감이 없이 인공치아를 접착시키기 위해 3차원 스캐닝 기법이 적용되고 있다. 기존에는 숙련된 전공자의 경험의 의지하여 보철물 등을 설치하였으나 최근 들어서는 환자의 치아정보, 잇몸 정보 등을 3차원 스캐닝 기법으로 획득한 후 이에 최적화 되어 있는 인공치아를 가공하는 방법이 적극 적용되고 있다. 3차원 현상을 획득하는 방법에는 다양한 접근법이 존재한다. 장기와 같은 인체 내부정보를 획득하기 위해서는 재질 내부로 투과하는 장파장의 신호를 이용하여 내부산란 신호를 획득함을 통해 3차원 정보를 볼륨으로 획득하는 3차원 볼륨 스캐닝 기법과 표면에 신호를 조사하여 반사하는 신호를 분석하여 3차원 형상을 획득하는 표면 스캐닝 기법이 있다. 본 연구에서는 환자의 치아 정보를 획득하기 위해 구조광 시반의 표면 스캐닝 기법을 이용한 3차원 스캐너와 데이터 처리 프로그램에 대한 연구를 진행한다.

2. 기술배경 : 3차원 스캐닝 기법

재질 표면의 3차원 스캔 기술은 측정방법에 따라 레이저 스캐닝, 구조 광 (structured light) 스캐닝, 비전 기반 스테레오 스캐닝 기술로 구분 할 수 있다. 각 기술들은 비접촉식 방식의 삼각법(triangulation) 기반으로 3차원 공간 정보를 추정한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 삼각측량법은 광원과 디텍터 사이의 위치와 대응관계를 이용하여 대상객체의 3차원 정보를 추정하는 기법이다. 이때 광원의 형태, 종류, 디텍터의 종류에 따라 스캐닝 방식이 구분된다.

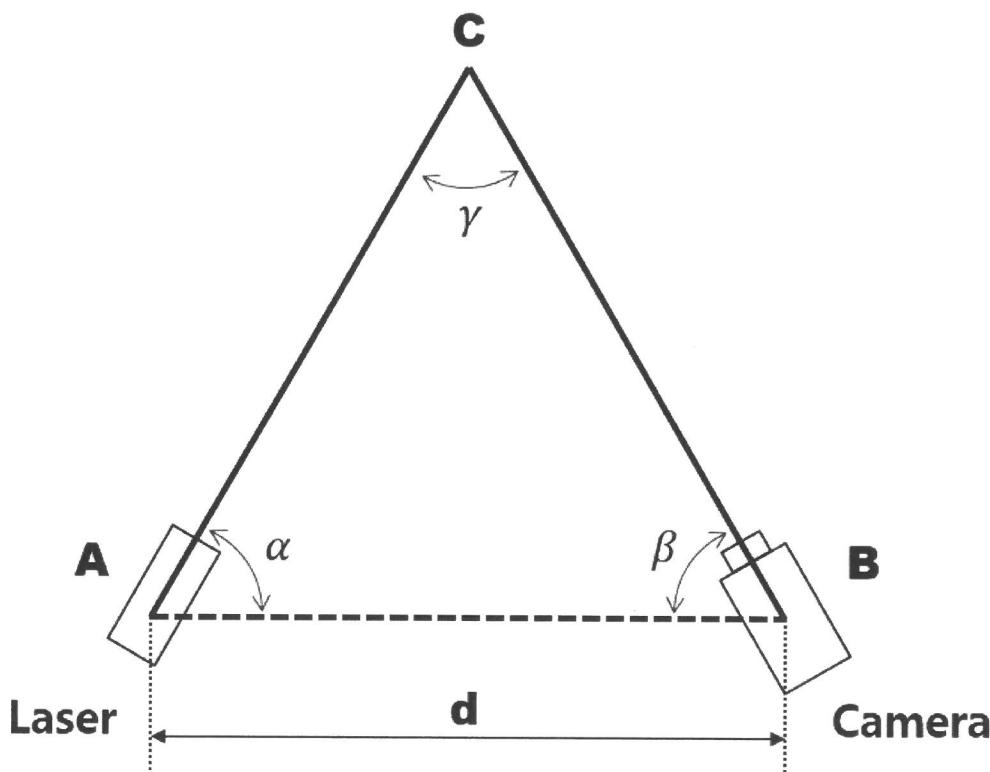


그림 1. 삼각측량 기반 3차원 스캐닝 기법

가. 레이저 스캐닝

레이저 스캐닝 기술은 레이저를 대상 객체에 조사하여 반사되는 신호를 측정함을 통해 3차원 정보를 획득하는 기술이다. 대표적인 기술로 LiDAR(Light Detection and

Ranging) 스캐닝 기술, 라인 레이저 스캐닝 기술 등이 있다. LiDAR 스캐닝 기술은 조사한 레이저가 대상 객체의 표면에 조사되어 돌아오는 시간을 연산하여 3차원 깊이 정보를 계산하는 방법으로 빠른 시간에 3차원 공간 정보를 획득 할 수 있는 유용한 방법이다. 이 방법은 먼 거리의 3차원 공간 정보를 넓은 범위에 대해 빠르게 획득 할 수 있는 장점을 가지고 있으나 3차원 모델의 정밀도는 상대적으로 떨어지며 단일 객체의 3차원 모델 생성에는 적합하지 않다. 라인 레이저 스캐닝 기술은 라인 빔을 객체에 조사하고 라인에 의해 방영되는 표면 변화를 측정하여 3차원 데이터를 생성하는 방법이다. 일반적으로 라인 레이저 기반 스캐닝 기술은 삼각법을 이용하여 대상 객체의 3차원 표면 정보를 획득한다. 라인 레이저 스캐닝 기술은 구조광 방법과 비교하여 광원의 세기가 크고 주변광에 의한 간섭효과가 적으므로 상대적으로 먼 거리의 측정이 가능하고 외부 조명 환경으로 인한 제한이 적다. 또한 대상 객체의 정밀한 3차원 측정이 가능하므로 중소형 객체의 3차원 모델 생성에 적합하다. 하지만 한 번에 획득할 수 있는 데이터의 양이 적고 온전한 3차원 데이터를 획득하기 위해서는 대상 객체를 전체를 측정해야 되기 때문에 측정 시간이 오래 걸리는 한계를 가지고 있다. 이에 라인 레이저 기반 스캐닝 기법은 국소영역을 스캐닝하거나 외부 문화재 등을 복원하는 데 적용되고 있다.

나. 구조광 스캐닝

구조광 스캐닝 방법은 라인 레이저 스캐닝 방법과 유사하게 삼각법 기반의 3차원 측정 기술이다. 일반적으로 구조광 스캐닝 기술은 다양한 패턴을 가지는 백색광을 대상 객체의 표면에 조사하여 3차원 형상 정보를 얻는다. 구조광 기법은 면광원을 대상 객체에 조사하여 한 번에 한 면적에 대한 정보를 획득하기 때문에 온전한 3차원 형상을 획득하기에 용이한 기법이다. 또한, 구조광 방식은 정밀한 3차원 데이터 획득이 가능하기 때문에 제조, 3D 역설계 분야에서 많이 사용되고 있다. 하지만 구조광 방식은 주변 조명에 의한 영향을 많이 받는 편이며 거리에 따른 빛의 세기 감소가 커 중·장거리의 객체 정보를 획득하기에는 어려움이 있다. 이에 소형 객체를 정밀하게 측정하고자 하는 분야에 활용되고 있으며 치과 분야에서 치과기공을 목적으로 개발이 진행되고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 구조광 스캐닝 기법은 다양한 패턴의 광원을 대상 표면에 조사함을 통해 디텍터와 구조광 사이의 삼각 수학관적 계를 정립함으로써 3차원 정보를 유추한다.

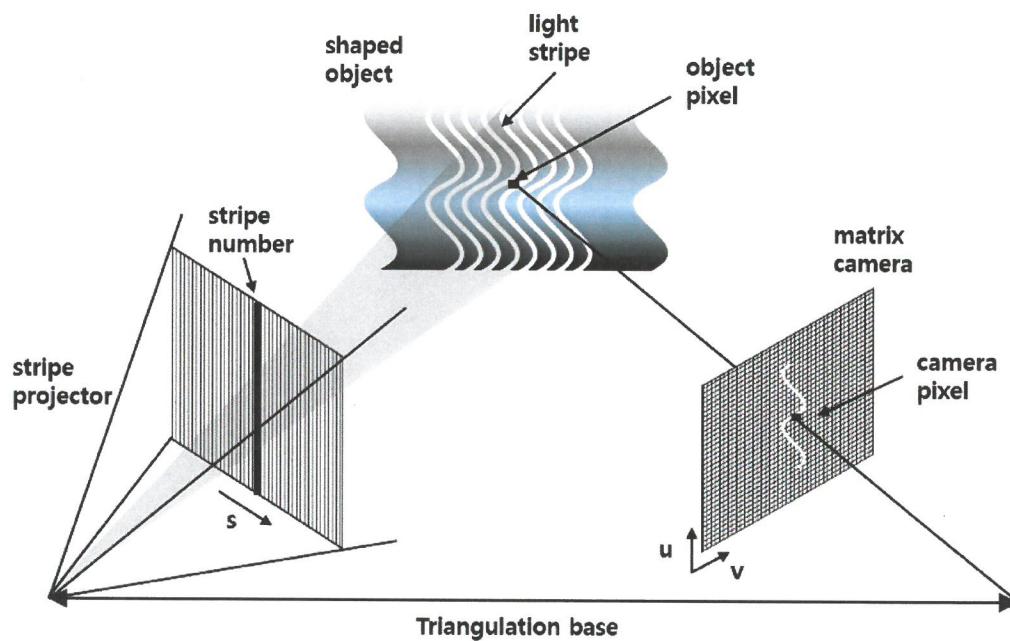


그림 2. 구조광 기반 3차원 형상 획득 방법

다. 비전 기반 스테레오 스캐닝

비전 기반의 스캐닝 기술은 두 장 혹은 여러 장의 영상에서 대응되는 점들을 찾고 이를 이용해서 3차원 정보를 역추적하는 기술이다. 획득된 다양한 이미지 정보의 대응점을 알고리즘으로 연산한 후 3차원 정보를 구하는 방법 외에 두 대의 카메라의 삼각수학적 관계를 정립함을 통해 실시간으로 3차원 지도를 획득할 수 있는 기법이다. 본 방법은 추가적인 광원 없이 3차원 정보를 획득 할 수 있으며 그로인해 개발 비용을 많이 감소시킬 수 있다. 하지만 직접광을 사용하지 않기 때문에 주변광의 영향을 많이 받으며 3차원 데이터의 질이 좋지 못하다. 비전 기반의 스캐닝 방식은 기계적 구성요소 없이 3차원 정보를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있으나 연산 시간이 오래 걸리고 구조광, 레이저 기반 스캐닝 방식과 비교하여 데이터의 정밀도가 떨어지는 문제를 가지고 있다. 데이터를 정합하기 위한 추가적인 알고리즘의 적용이 필요하다.

제 2절 3차원 스캔 시장 분석

3D 레이저 스캐너 세계 시장은 2013년 20억 달러 규모에서 2018년에 40억 달러 수준으로 연 평균 14.6%의 성장률을 보이며 증가 할 것으로 전망된다. 세계 산업분야별 시장 점유율이 75.6%로 가장 높은 AMD용 3차원 레이저 스캐너 시장 규모는 2008년 4,400 억 원에서 2012년에는 연평균 17.3% 성장한 약 8,320억 원을 기록할 것과 시장 점유율은 변동이 없을 것으로 전망된다. 세계 산업분야별 시장 점유율이 13.9%로 두 번째로 높은 자동차부품 설계용 3차원 레이저 스캐너 시장 규모는 2008년 810억 원에서 2012년에는 연평균 17.8% 성장한 약 1,560억 원을 기록할 것과 시장 점유율은 14.2%로 증가할 것으로 전망된다.

세계 시장 점유율이 8.2%인 기계 설계용 3차원 레이저 스캐너 시장 규모는 2008년 480 억원에서 2012년에는 연평균 17.1% 성장한 약 897억원을 기록할 것으로 전망된다. 일반사용자용 3차원 레이저 스캐너 세계 시장 규모는 2008년 130억원에서 2012년에는 연평균 14.4% 성장한 약 221억원을 기록할 것으로 전망된다. 향후, 선박건조, 건물 건축, 예술품 관리, 국방 분야 등 새로운 분야에 대한 수요가 발생하여 신규 시장이 형성될 것으로 예상된다.

세계 3D 스캐너 시장 규모

(단위: 억달러)

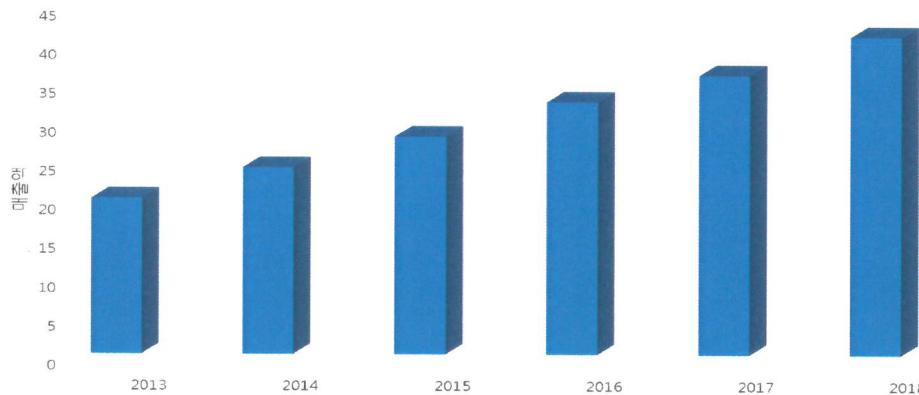


그림 3. 세계 국내 스캐너 시장규모

표 1. 세계 3차원 레이저 스캐너 산업분야별 시장 동향

(단위: 억원)

구분	2008년	2009년	2010년	2011년	2012년	연평균 증가율
AMD용 3차원 레이저 스캐너	4,400	5,150	6,050	7,093	8,320	17.3%
자동차부품 설계용 3차원 레이저 스캐너	810	954	1,124	1,324	1,560	17.8%
기계설계용 3차원 레이저 스캐너	480	560	654	766	897	17.1%
일반사용자용 3차원 레이저 스캐너	130	147	170	193	221	14.4%
전체	5,820	6,811	7,998	9,376	10,998	17.3%

* 출처 : Frost and Sullivan, World Optical Digitizers and Scanners Markets,

표 2. 세계 3차원 레이저 스캐너 산업분야별 시장 예측

(단위: 억원)

구분	2013년	2015년	2017년	2019년	2021년	연평균 증가율
AMD용 3차원 레이저 스캐너	9,759	13,428	18,476	25,422	34,979	17.3%
자동차부품 설계용 3차원 레이저 스캐너	1,838	2,550	3,539	4,911	6,814	17.8%
기계설계용 3차원 레이저 스캐너	1,052	1,443	1,978	2,713	3,720	17.1%
일반사용자용 3차원 레이저 스캐너	253	331	433	567	742	14.4%
전체	12,902	17,752	24,426	33,613	46,255	17.3%

* 출처 : Frost and Sullivan, World Optical Digitizers and Scanners Markets,

3D CAD 모델링 소프트웨어의 조작은 전문가의 입체 조형 능력이 필요함에 따라 CAD 모델링을 통해 생산된 3D 모델이 아닌 휴대용 스캐너의 요구가 증가하고 있으며 그에 따른 저가형 제품들이 출시되고 있다. 세계적 3D 프린터 회사인 미국의 3D systems社는 399달러의 핸디 스캐너를 시판 하였으며 미국의 MakerBot社는 949달러의 휴대용 레이저 스캐너를 출시하였다. 캐나다의 벤처 기업인 Matter and Form社는 443달러의 텐테이블 방식의 휴대용 레이저 스캐너를 출시하였으며 이는 스캔 1회당 소요시간 3분 내외로 형상을 획득 할 수 있다. 3차원 레이저 스캐너의 국내 시장 규모는 2009년 약 450억 원에서 연평균 5%의 성장을 지속하여 2012년에는 약 510억 원을 기록할 것으로 전망된다. 소비자들의 건강에 대한 관심도가 높아져 헬스 케어와 연동되는 3차원 레이저 스캐너 제품들의 소비가 늘어나 3차원 레이저 스캐너의 국내 시장 규모는 계속 증가할 것으로 전망된다.

국내에서는 기술에 대한 전문지식 및 기반시설 부족으로 인해 자체 개발이 어려운 현실이며 학계와 연구소에서 꾸준히 연구개발을 하고 있으며, 고정도를 요구하는 연구개발용, 교정검사용 및 표준기기와 물성·화학 및 의료용 분석기기의 대부분과 반도체 생산용 각종 고가 계측기, 이동 통신용 무선 측정기 등 전반적인 계측기기의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 국내 시장은 아직까지 그 규모가 너무 작고, 시장관련 데이터의 정확성이 떨어져 측정 분야별 계측 관련 3차원 레이저 스캐너 시장 규모 추정은 어려운 실정이다.

국내 3D 스캐너 시장 규모

(단위: 억원)

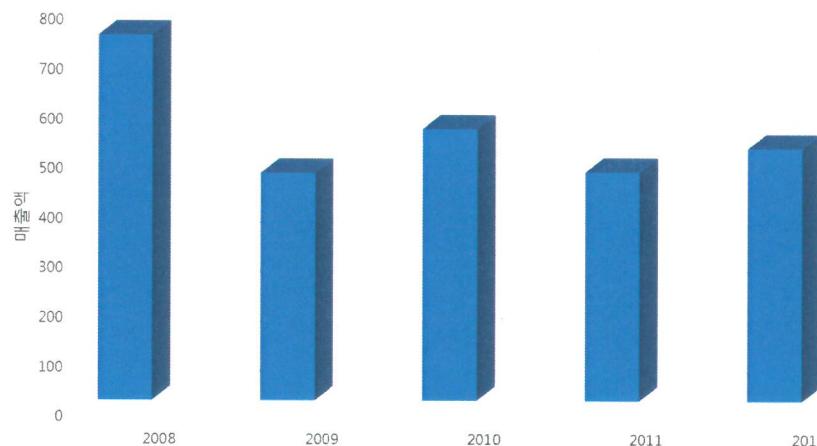


그림 4. 국내 3D 스캐너 시장규모

2012년 세계 스마트콘텐츠 시장규모는 1,368억 달러에서 매년 18.8%로 성장하여 2015년에는 2,293억 달러에 이를 것으로 전망된다. 국내 스마트콘텐츠 시장 규모는 2012년 1조 9,473억 원에서 연평균 22% 성장하여 2015년에 3조 5,399억 원에 이를 것으로 예상된다. 국내 스마트콘텐츠 매출의 규모를 기기별로 살펴보면 스마트폰 76.1%, 태블릿PC 17.6%, 스마트 TV 6.3% 순이며 지역별로 국내 90.4%, 해외 9.6%로 국내시장 의존율이 높다.

국내 3D 콘텐츠 시장 규모

(단위: 억원)

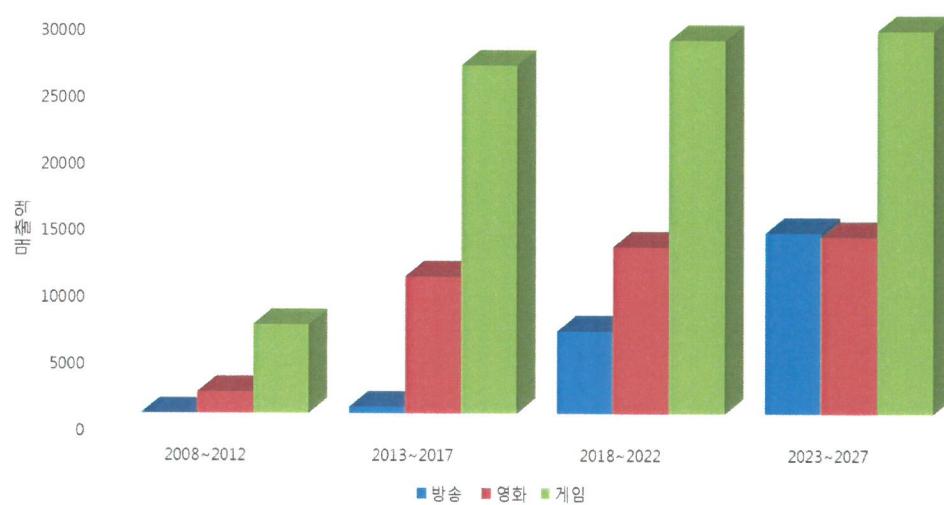


그림 5. 국내 3D 콘텐츠 시장규모

제 2 장 구조광 스캐너 개발

구조광 스캐닝 매커니즘은 광원모듈로부터 물체 표면에 스트라이프 무늬와 같은 특정 구조화된 광 패턴을 투영시키고 이때 변형된 패턴의 형태를 카메라모듈에서 인식하여 삼각측량법을 이용해 3차원 형상정보를 획득하는 방식이다. 대상 객체의 360도의 전방향 각도를 스캐닝하기 위해서는 객체를 회전시키기 위한 회전 요소가 필요하다. 개발된 구조광 스캐너는 광원모듈, 카메라모듈, 다중 자유도의 회전 모션 스테이지 및 회전 모션 스테이지 제어모듈로 구성하였다.

제 1절 광원모듈

1. LED 광원부 개발

스캐너용 구조광 광원모듈은 RGB 분리형 LED 광원을 활용하였다. 고출력 LED 광원을 분리 설계하였으며 각각의 분리형 광원에서 조사된 광을 DLP에 조사하여 광학렌즈를 통해 전면부에 조사된다. 그림6은 제작된 구조광 광원모듈이며, 메인보드에서 LED 광원을 위한 파워를 공급하고, 광원부에서 광원을 조사하는 방식으로 설계하였다.

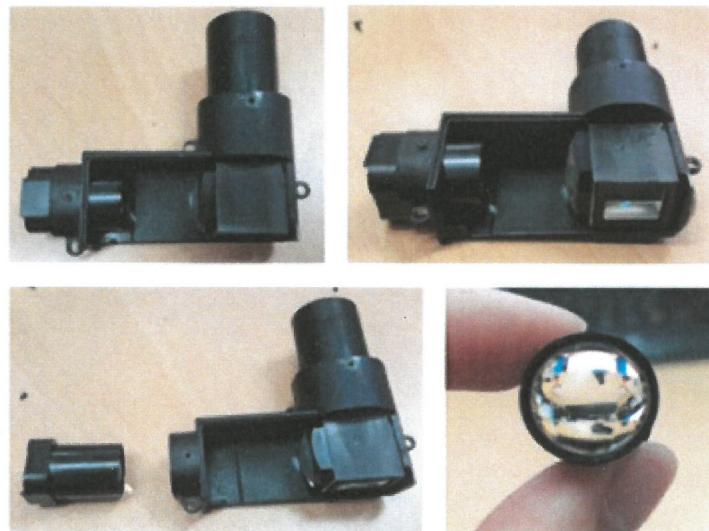


그림 6. 구조광 광원모듈(RGB LED)

대상객체의 크기를 기반으로 광원의 포커싱을 결정할 수 있는 광원모듈을 개발하였다. 광원의 구조는 빔 합성부, 영상 생성을 위한 DLP, 광원의 포커싱을 조절하기 위한 렌즈부로 나눌 수 있다. 모듈에서 좌측에 위치한 부분이 광원이 조사되는 부분이며, 우측 부분이 Projection Lens 부이고 두 광학계 사이에는 Cube 형태의 Beam Splitter Polarizer를 설계하였다. 광원모듈은 전체 7cm × 6cm × 3cm 이하의 크기를 가지도록 소형화 하였다.

그림7은 제작된 광원모듈의 빔이 조사되는 형태에 대한 테스트 사진이며 동작상태를 확인하기 위해 렌즈에서부터 구조광이 발산되어 나가는 점을 확인하였다.

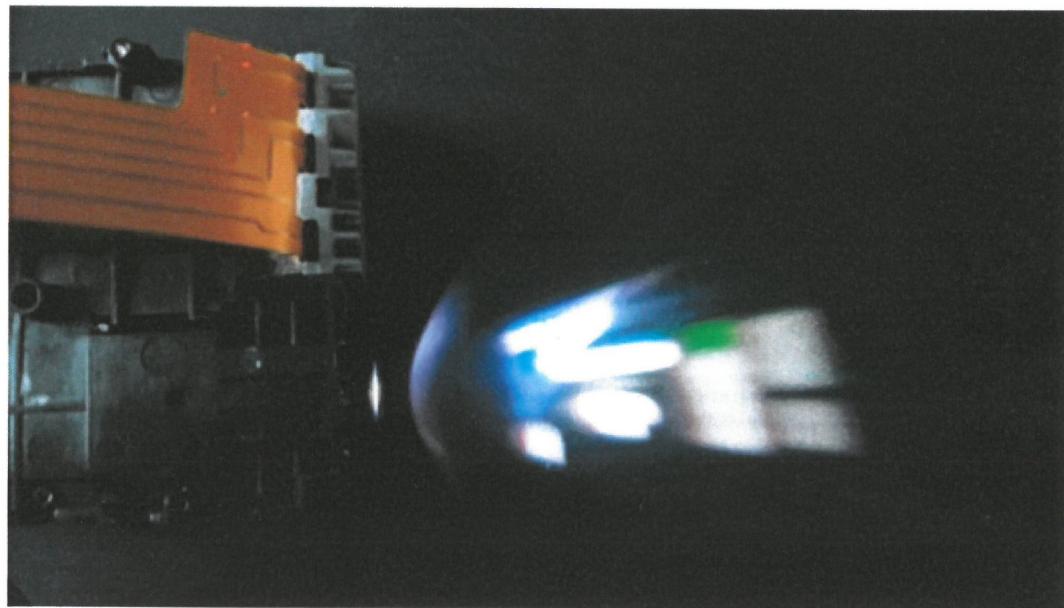


그림 7. 구조광 광원모듈 동작상태

2. DLP(Digital Light Processing) 이미지 구현보드 개발

DLP 이미지 구현 보드 제작을 위한 DLP chip은 개발하고자 하는 사이즈의 광원 모듈 구현을 위해 Texas Instruments사(미국)의 DLP3000 모델을 적용하였다. DLP3000의 구동을 위한 컨트롤러로 DLPS300을 선정하여 아래 그림과 같은 블록도의 컨트롤 구동보드를 제작하였다.

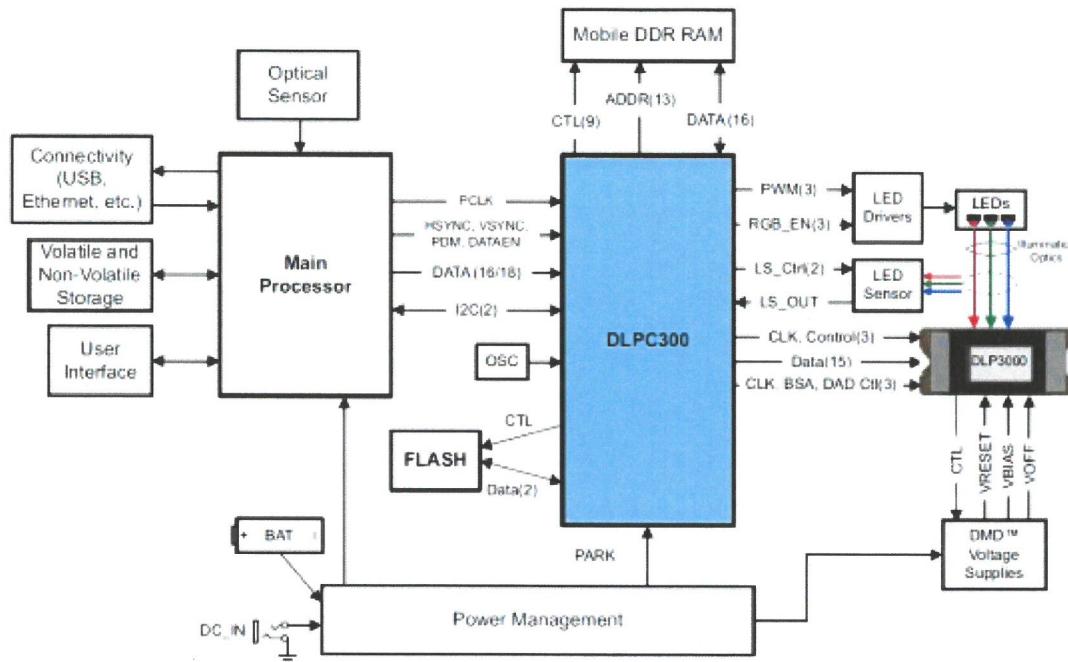


그림 8. DLP 시스템 블록다이어그램

DLP 시스템 구성은 Texas Instruments사에서 제공하고 있는 그림 8의 DLP 시스템을 블록다이어그램을 활용하여, 회로를 구성하였으며 그림9는 DLP 구조광 광원모듈(RGB LED) 광원 보드의 사진이다.

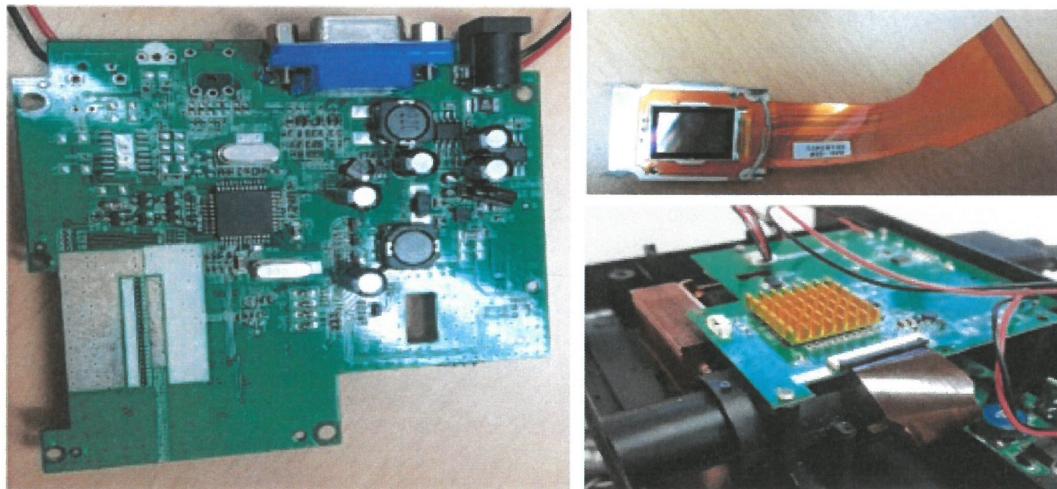


그림 9. 구조광 광원모듈(RGB LED)

대상객체 크기를 고려하여 최적의 광원 발산 크기 결정을 위한 실험을 그림10과 같이 진행하였다. 20cm부터 80cm까지의 거리에서 빔의 확산 면적을 확인하였고 그 결과 20cm 기준 빔 확산 면적은 $14\text{cm} \times 11\text{cm}$ 이며 80cm 기준 $40\text{cm} \times 30\text{cm}$ 이며 주요 대상 객체 크기가 8cm 이하임을 고려할 때 20cm에서 목표하는 빔 확산 거리를 획득 할 수 있음을 확인하였다. 스캐너의 소형화를 위해서는 광원모듈부터 대상객체까지의 거리를 최대한 줄이는 것이 용이하기 때문에 광원모듈과 대상객체의 목표거리에서 빔 포커싱이 이루어지는 것을 확인하였다.

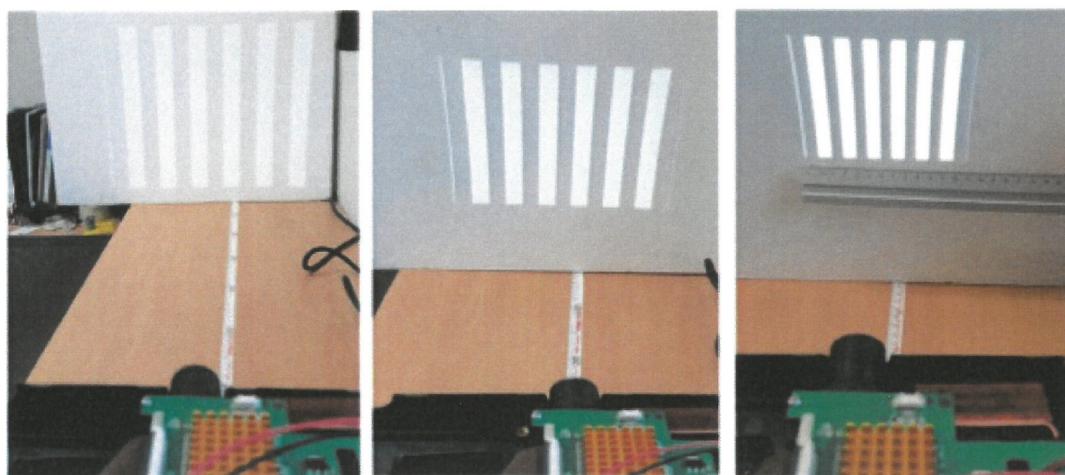


그림 10. 구조광 광원모듈(RGB LED) 확산 실험

제 2절 카메라 모듈

조밀한 3D 점 데이터 획들을 위해 고해상도 영상을 입력 받을 수 있는 카메라모듈을 선정하였다. 카메라는 500Lux의 주변광 환경에서 YUY2 Format 기준 1280×720 의 720P 레졸루션 데이터를 최대 30frame per second의 속도로 전송 가능하고 화각은 65도로 렌즈를 설계하여 그림 11처럼 20cm 거리에서 대상객체의 범위를 포함 할 수 있도록 설계하였다. 카메라를 PC 환경에서 데이터를 입력받을 수 있는 USB 3.0 통신 프로토콜을 최적화하여 통신 속도를 최대화 하였다.

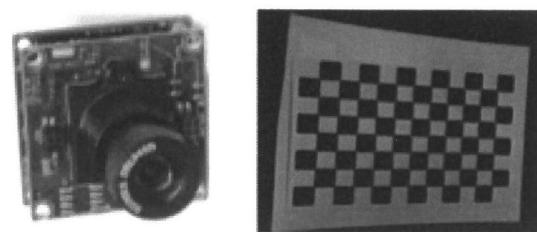


그림 11. 카메라 모듈 및 출력데이터

제 3절 회전 모션 스테이지

1. 회전 모션 스테이지 기구부

회전 모션 스테이지는 대상 객체를 회전시키기 위한 Plate 축과 광원모듈을 회전시키기 위한 ARM 축으로 구성되어 있다. 그림 12처럼 Plate 축을 통해 대상 객체의 360° 데이터를 획득하고 추가로 더욱 정밀한 스캐닝이 필요한 경우 ARM 축이 $45 \sim 90^{\circ}$ 로 회전한다. 이는 회전 요소를 추가하여 더 조밀한 3D 점 데이터를 획득할 수 있고 카메라 공간에서 가려짐에 의해 획득되지 못하는 Missing 데이터가 감소하는 효과를 볼 수 있다.

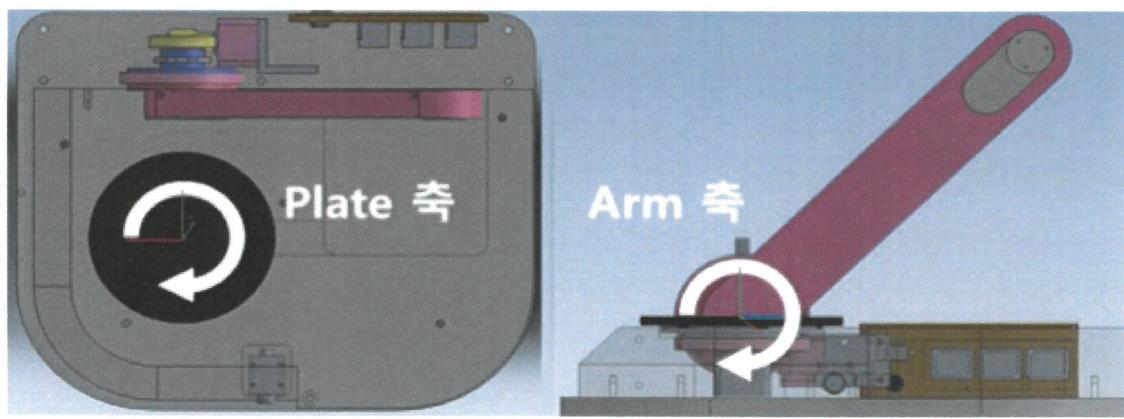
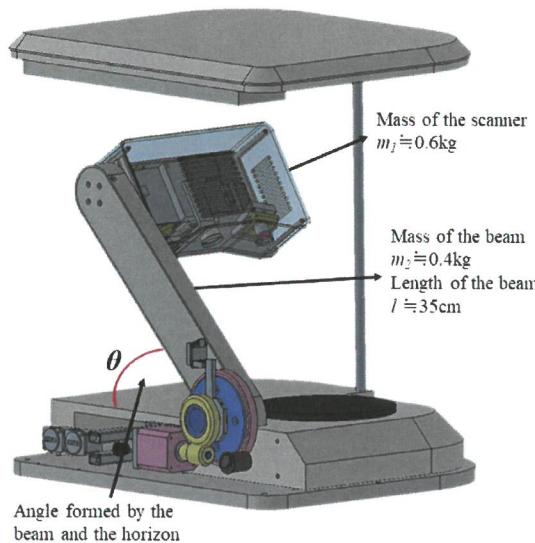


그림 12. 회전 모션 스테이지의 3D 설계 모델링

회전 모션 스테이지의 저진동 고안전성을 위한 축 설계를 고려하여 ARM 축에 사용될 모터의 선정을 위해 스캐너 모듈과 Beam의 하중을 고려한 토크를 그림 13과 같이 계산하였다. ARM 축의 모터가 스캐너 모듈을 회전시키기 위한 토크가 부족한 경우 모터의 탈조 현상이 발생하여 정확한 각도에 대한 회전이 불가능하다. 때문에 모터 선정 시 스캐너 모듈과 이를 지지하는 Beam의 합성하중을 고려하여 모터에 필요한 토크 스펙을 결정하는 수학적 계산이 필요하다.



- 1) Basic simplification
 - Set the center of the gear to be the origin
 - Mass of the scanner is concentrated on the end of the beam
 - Mass of the beam is distributed in a uniform and isotropic manner
- 2) Centroid of the scanner + beam structure

$$\text{Centroid } P = \frac{m_1 l + m_2 \frac{l}{2}}{m_1 + m_2} = \frac{2m_1 l + m_2 l}{2(m_1 + m_2)}$$
- 3) Torque required to rotate the gear

$$T_g = (m_1 + m_2) \times \frac{2m_1 l + m_2 l}{2(m_1 + m_2)} \cos \theta = \left(m_1 l + m_2 \frac{l}{2} \right) \cos \theta$$
- 4) Torque required for the motor (= Torque required for the worm)
 - Think of the mechanical efficiency of power transmission c
 - $P_g = c \cdot P_w$ ($0 < c < 1$)
 - $P_g = T_g \omega_g, P_w = T_w \omega_w$
$$T_w = \frac{1}{c} \cdot \frac{\omega_g}{\omega_w} \cdot T_g$$

$$= \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{40} \cdot (0.6\text{kg} \times 35\text{cm} + 0.4\text{kg} \times 17.5\text{cm}) \cos \theta$$
- 5) Determine the torque specification required for the motor

$$T_w = \frac{0.7}{c} \cdot \cos \theta, (0 < c < 1) = k \cdot TH$$
 - T_H is holding torque of the motor
 - k stands for the torque drop generated when motor rotates
 - Consider the worst case where $c=40\%$, $k=0.3$, and $\theta=45^\circ$
 - T_H of the motor should be greater than $4.95 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

그림 13. 모터의 토크 힘 결정을 위한 합성하중과 토크 계산

2. 회전 모션 스테이지 제어모듈

회전 모션 스테이지를 정밀 제어하기 위한 제어모듈을 그림 14와 같이 제작하였다. 2 Channel 스텝모터 제어가 가능하고 안정적인 모터 전류 공급을 위한 내부 전원설계를 진행하였다.

회전 프로파일을 만들기 위해서 PWM Control이 가능한 바이풀라 스텝모터 드라이버 칩을 사용하여 제어모듈을 설계하였다. 기존의 GPIO 형식의 Pulse 커맨드 방식은 가감속 제어를 하기 어려운 단점이 있고 가감속 제어가 안될 시 스캐닝 결과에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 Pulse duty비와 주파수 출력 변조를 통해서 가감속이 가능하도록 제어 모듈을 설계하였다. 또한 모터의 탈조 및 공진을 방지하기 위한 그림 15처럼 Trapezoidal 방식의 가감속 프로파일을 설계하여 더욱 모터 회전의 안전성을 높였다.

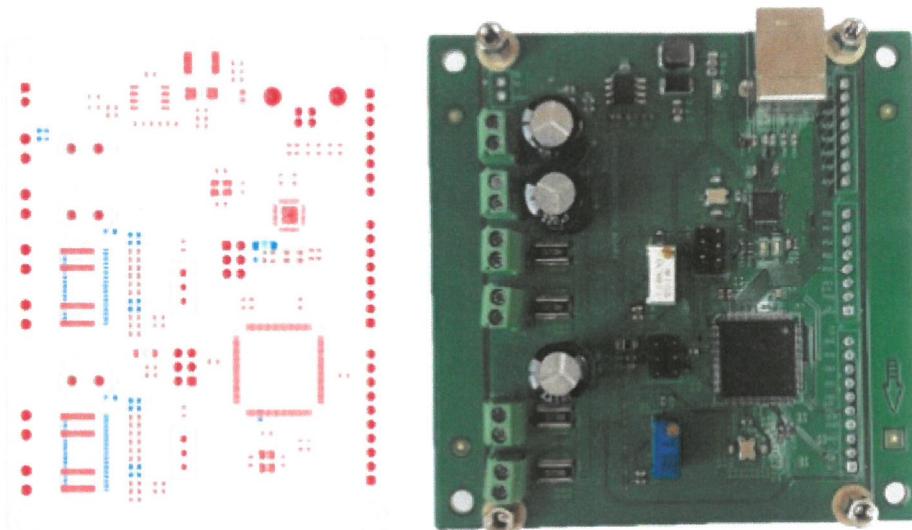


그림 14. 다축 제어용 신호처리 보드의 Artwork 이미지 및 PCB

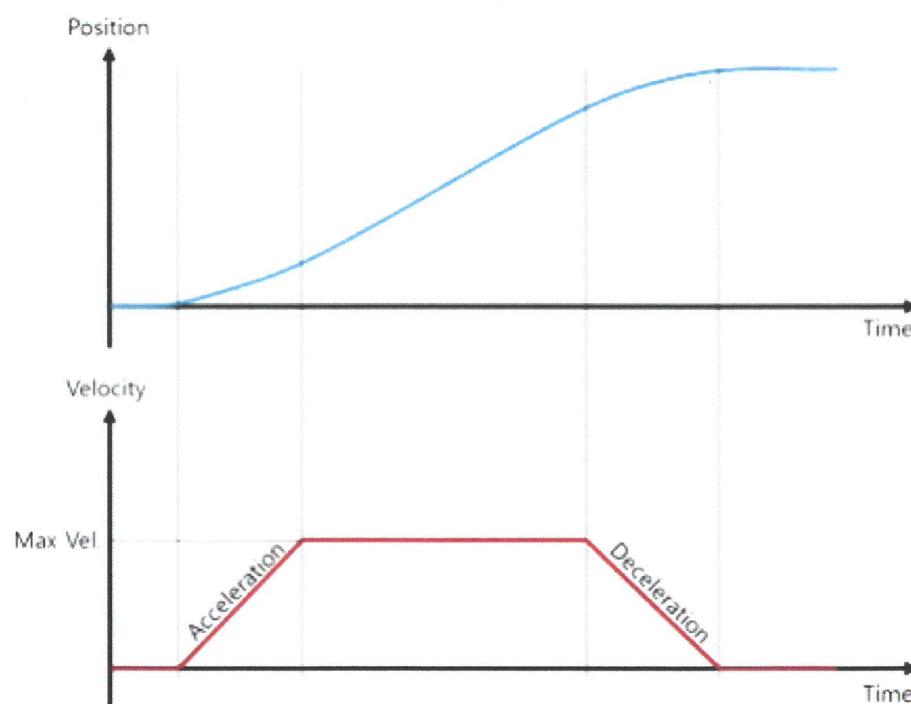


그림 15. Trapezoidal(사다리꼴) 속도 프로파일 형태

42각(1.8°) 스텝모터와 128 분주비를 활용한 마이크로스텝 각도제어를 통해 회전 할때마다 각도가 맞지 않아 발생할 수 있는 누적오차를 최소화 하였다. 그림 16은 누적오차로 인해 스캐닝 단면들을 Merge할 경우 회전변환의 결과가 틀어지는 현상이 발생하기 때문에 항상 정확한 각도를 움직일 수 있도록 마이크로 스텝이 가능하도록 설계 하였다.

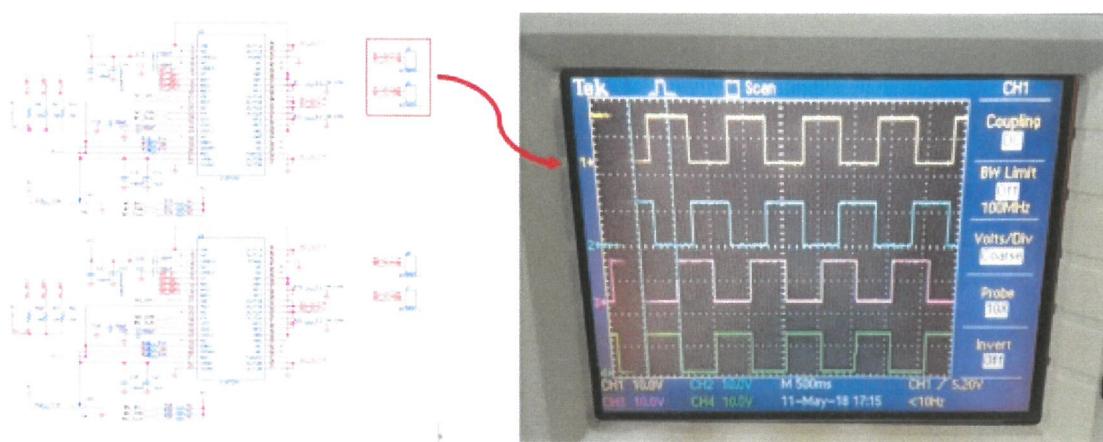


그림 16. Micro stepping을 위한 회로설계와 PWM 동작신호 출력결과 화면

제 3 장 3차원 점 데이터 획득 기법

제 1절 광원-디텍터 보정기술

1. 구조광 패턴 조사 기술

카메라와 프로젝터 광원 사이의 상관관계를 정의하기 위해서는 대상 객체 위에 조사될 패턴을 결정해야 한다. 구조광 패턴은 구 모듈 사이의 대응점을 연산하기 위한 방안으로 패턴의 종류와 량에 따라 스캔 데이터의 품질 및 측정 시간이 결정된다. 본 연구에서는 다양한 간격을 가지는 수직, 수평으로 구성된 40개의 패턴을 적용한다. 패턴의 저주파 영역의 형상은 굵은 광 패턴을 통해 형상을 추출하며 고주파 영역의 형상은 세밀한 광 패턴의 조합을 통해 형상을 유추한다.

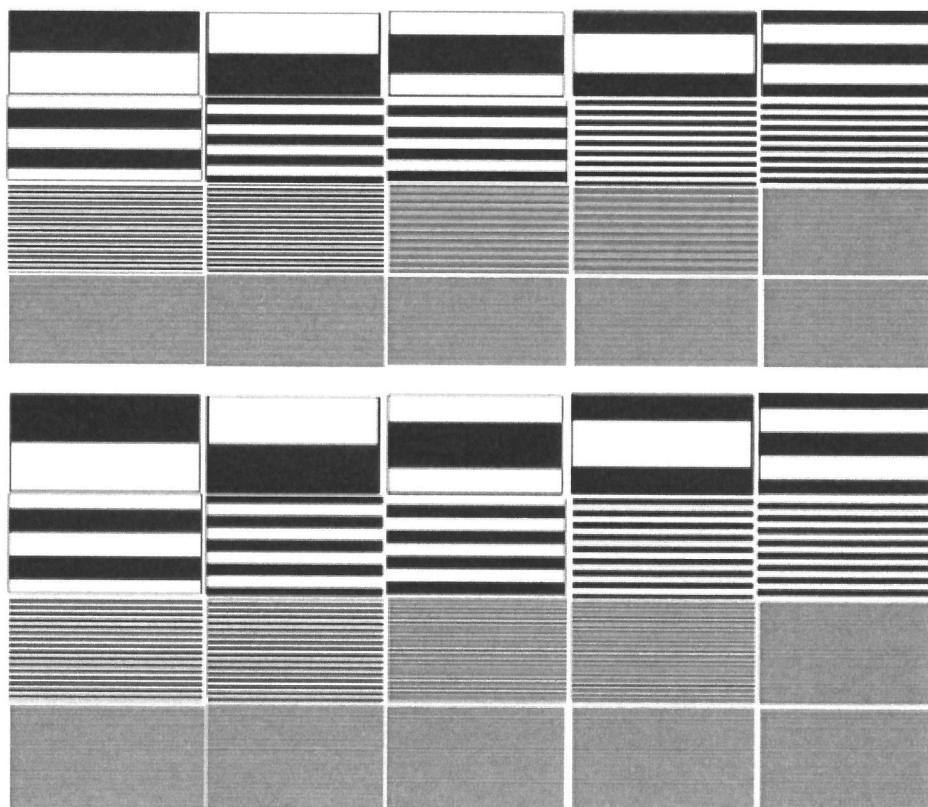


그림 17. 수직, 수평 구조광 패턴

그림 17은 본 연구에서 적용된 패턴의 종류를 보여준다. 해당 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 다양한 두께를 가지는 패턴들이 수직과 수평으로 존재하는데 이는 형상의 거시적 데이터와 미시적 데이터를 동시에 획득하기 위해서이다. 패턴의 간격이 작을수록 더 정밀한 형상을 얻을 수는 있으나 거시적인 형상을 얻는 것은 어렵기 때문에 이를 모두 적용하는 패턴을 생성해야 한다. 또한 패턴은 대상객체의 측정위치와 크기 등을 고려하여 적용되어야 하는데 패턴의 범위보다 작은 대상객체에 적용할 경우 단일 패턴의 범위를 벗어나는 결과로 인해 윤전한 데이터가 나오지 않을 가능성이 존재하게 된다.

그림 18은 대상객체에 조사되는 패턴의 실험 결과를 보여준다. 측정하고자 하는 객체는 치과용 틀니 데이터로 대상 객체의 크기를 고려하여 패턴이 조사될 수 있도록 하였다. 이때 프로젝터의 초점 거리와 카메라의 화각범위를 주요 변수로 고려하여야 하는데 프로젝터의 초점 거리가 길게 되면 대상객체 보다 먼 거리에서 광원을 조사해야 되므로 전체 시스템의 크기가 커질 수 있으며 카메라의 화각과 맞지 않게 되면 프로젝터와 카메라의 위치 관계를 정립할 수 없다. 이 모든 변수를 고려하여 광 패턴을 설계해야 하며 해당 연구에서는 측정거리 20cm를 기준으로 구조광 패턴을 설계 적용하였다.

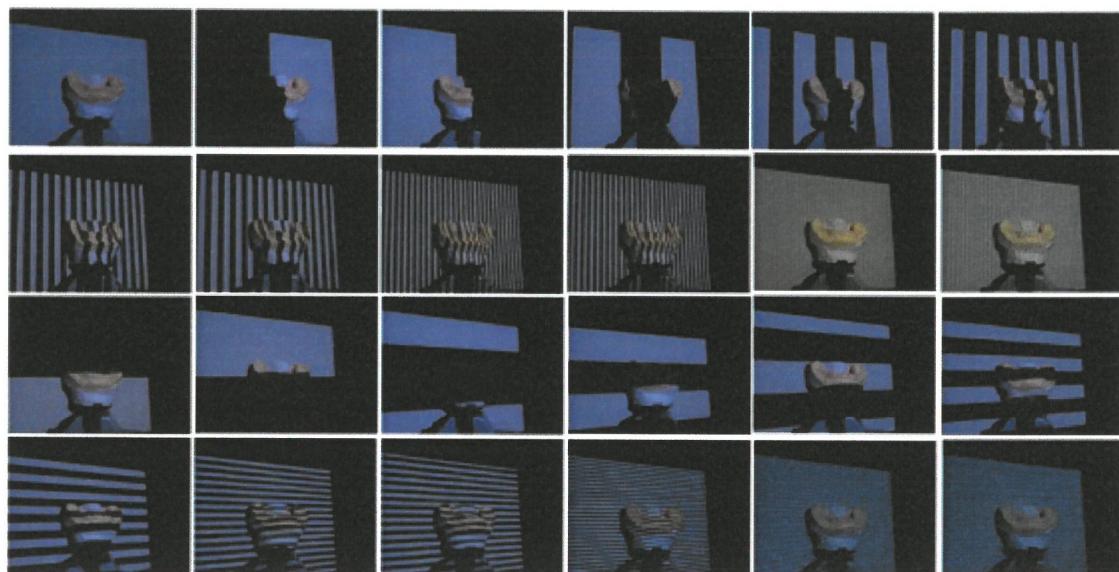


그림 18. 대상객체 위에 조사된 구조광 패턴 실험 결과

2. 광원모듈-디텍터 위치 결정

광원과 디텍터 간의 파마미터를 구하는 캘리브레이션을 적용하기 전 스캔 데이터를 최적으로 획득하기 위해서는 카메라의 화각 및 측정거리를 결정하는 시뮬레이션을 수행해야 한다. 3차원 스캔 데이터의 정밀도를 향상하기 위해서는 대상 물체를 최대한 포함하는 카메라 화각이 결정되어야 하며 대상물체의 픽셀 데이터를 최대한 활용할 수 있는 구조 설계를 수행한다. 본 연구에서 대상객체의 크기는 가로, 세로 10cm 미만이며 측정거리 약 20cm 내외에서 대상객체의 범위를 최대한 확보할 수 있기 위해서는 표준화각 렌즈가 아닌 망원 렌즈 계열의 렌즈를 설정해야 한다. 그림 19에서 보는 바와 같이 카메라 좌표축과 대상객체가 놓여있는 축이 수직관계가 아니므로 회전축 평면을 중심으로 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 범위를 커버할 수 있는 카메라와 렌즈 화각을 결정한다.

본 스캐너에 적용된 카메라는 최대 해상도 13MP(4224×3156)를 가지면서 20fps 처리속도를 가지며 고속스캔 연산을 위해서 Ultra HD(3840×2160)급 해상도 범위에서 동작할 수 있도록 설정하며 UBS3.0 통신 인터페이스에서 동작 가능하도록 한다. 최종 제품의 부피와 수직회전 등을 고려하여 측정거리는 234mm로 결정하며 초기 측정 위치는 회전축을 기준으로 45° 위치에서 스캐닝을 시작하도록 함. 프로젝터의 조사 범위의 중심이 회전판의 중심에 위치하도록 기구 설계를 하였으며 이를 위해 축 기준 12° 를 하부 회전시키도록 한다.

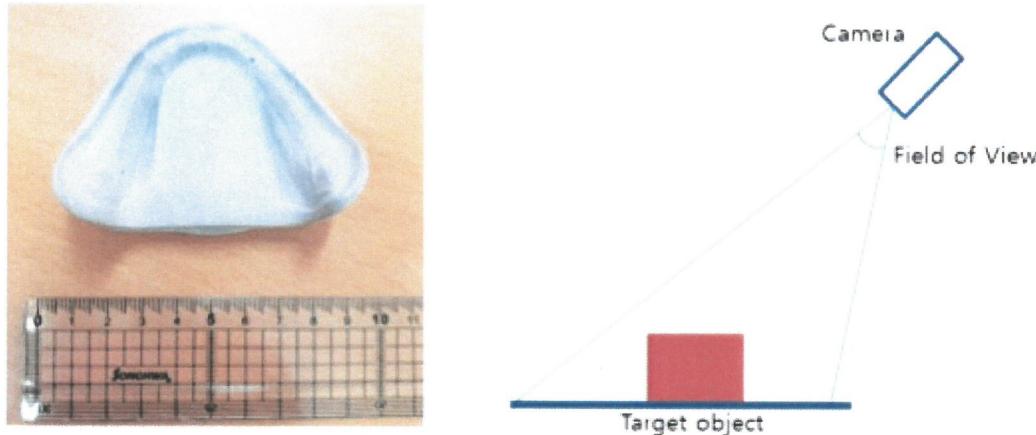


그림 19. 스캔 대상 객체와 카메라 화각 결정 개념

3. 광원모듈-디텍터 간 캘리브레이션

카메라를 통해 획득된 2차원 영상의 한 픽셀이 3차원 공간으로 변환되기 위해서는 프로젝터 광원과 디텍터 간의 삼각 수학관계가 정립되어야 한다. 이를 위해서는 프로젝터 위치에서 바라보는 가상의 이미지 공간을 유추해야 한다. 이를 해결하기 위해 체크보드를 측정하고자 하는 대상 위치에 두고 측정 각도를 달리하여 데이터를 획득하여 두 공간 상의 위치 관계를 정립한다. 본 연구에서는 1cm 정사각형을 가지는 7×11 보드를 사용하였으며 3개의 방향에서 구조광 객체를 획득한다. 한 방향에서 획득한 데이터는 40여개의 패턴을 조사하며 총 120장의 데이터를 획득한다.

카메라가 바라보는 3가지 방향에서 뽑은 코너 점 77개와 광원모듈의 패턴들의 모양을 통해서 빔 프로젝터가 바라보는 방향에 대해 유추한다. 한 이미지에서 77개의 대응점을 구할 수 있으므로 총 9,240개의 대응점이 구해진다. 획득된 대응점을 기반으로 수치최적화를 통해 구 모듈 사이의 위치 관계를 정립한다. 그림 20은 카메라가 바라보는 방향에서 찍은 영상과 연산한 77개의 코너 점들이며 이미지 데이터와 코너 점들을 기준으로 빔 프로젝터 공간으로 변환한 77개의 점과 빔 프로젝터의 방향에서 바라본 체크보드의 유추 데이터를 보여준다.

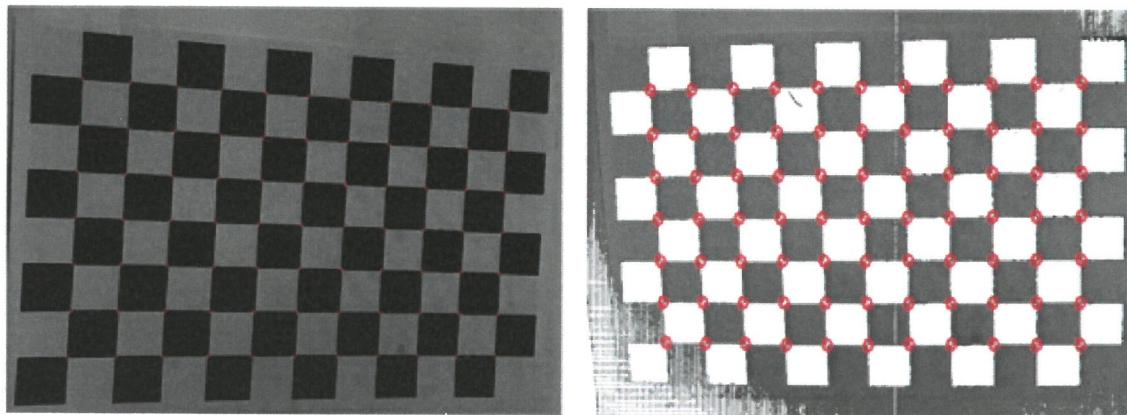


그림 20. 카메라 데이터와 연산된 빔 프로젝터 방향 데이터

앞서 정의한 관계를 통해 획득한 카메라 내부인자와 프로젝터의 내부인자, 그리고 두 모듈간의 수학적 관계를 행렬로 정의 하면 그림 21과 같은 결과로 귀결된다.

Calibration

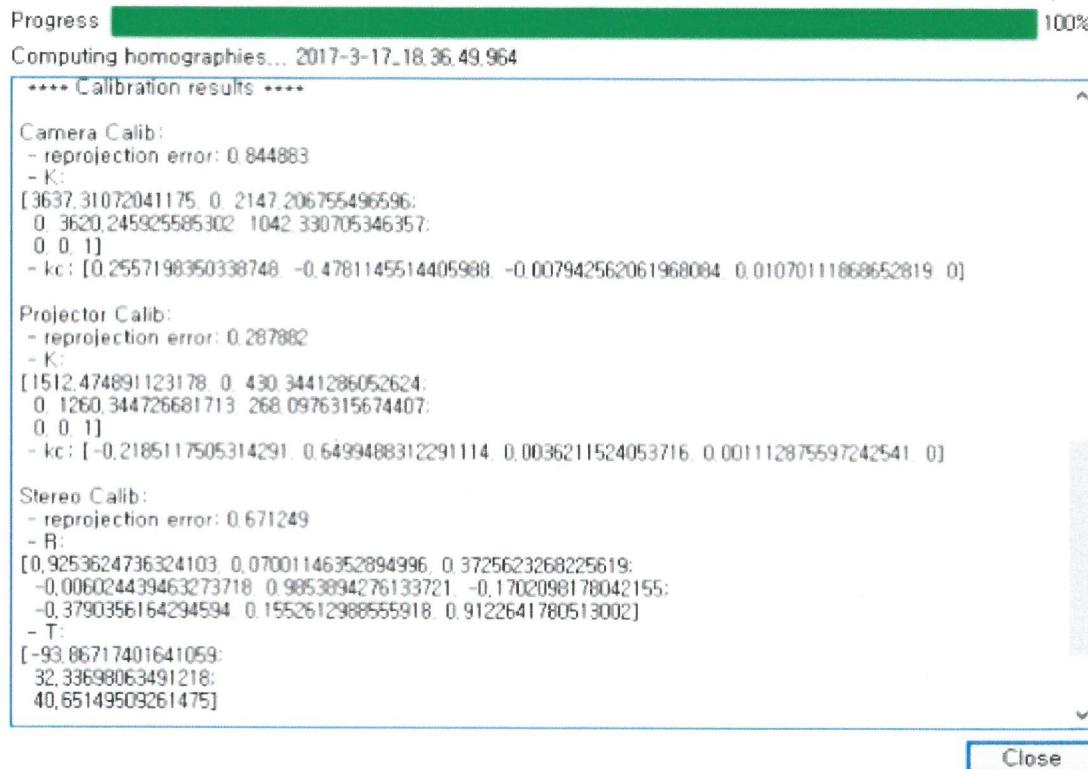


그림 21. 본 실험에서 연산한 카메라와 광원모듈 간의 수학적 관계 값

제 2절 3차원 점 데이터 획득 기술

1. 3차원 점 데이터 변환 기술

위에서 구한 각 모듈간의 수학적 관계를 통해 대상객체의 3차원 점 데이터를 획득한다. 대상객체 위에 변조된 구조광을 40개의 패턴으로 조사하고 이를 카메라로 획득한다. 앞에서 카메라와 프로젝터의 관계를 정립하였으므로 대상객체 위에 조사되는 패턴 광원의 특징 점을 기준으로 이미지의 한 픽셀은 3차원 공간의 한 점으로 변환 될 수 있다. 그림 22는 대상객체를 카메라가 측정한 이미지와 수학적 관계를 통해 유추한 프로젝터 공간에서 바라본 데이터 결과를 보여준다. 그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이 실 데이터는 카메라 공간에서 바라본 데이터를 기반으로 가상 데이터가 추정되기

때문에 카메라에서 획득되지 않는 데이터는 소실되게 된다. 예를 들어 형상의 구조에 의해 카메라에서 가려져 보이는 영역은 실 데이터가 존재하지 않기 때문에 추정될 수 없다. 프로젝터 방향에서 유추된 데이터를 보면 카메라에서 보이지 않는 부분(회색부분)은 데이터가 추정되지 않은 것을 확인 할 수 있다. 데이터의 품질을 확인하기 위해 데이터를 Decoding 한 결과는 그림23과 같다.

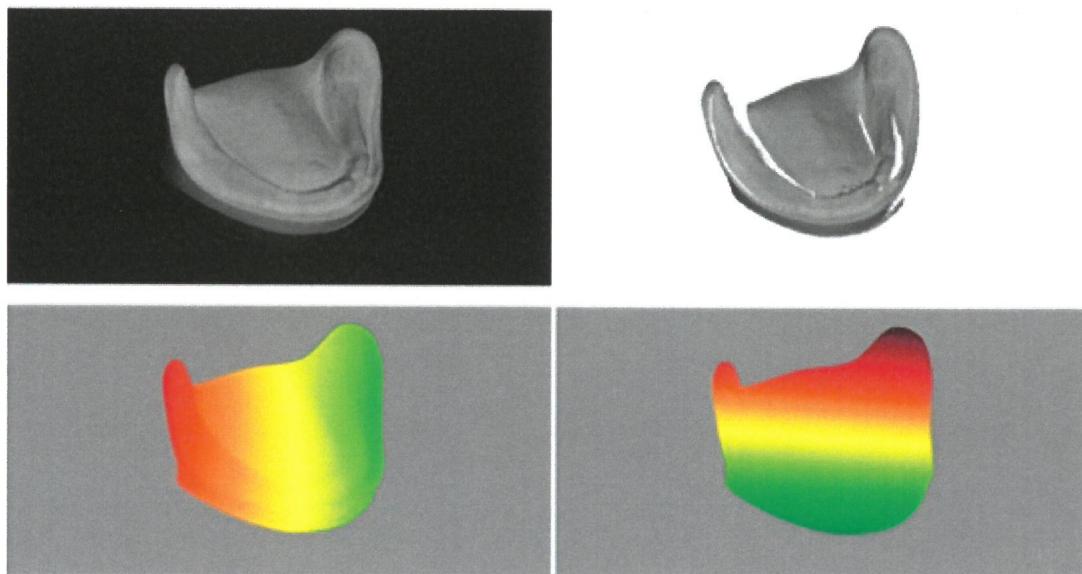


그림 22. 대상객체의 카메라 데이터와 유추된 빔 프로젝터 방향 데이터

단일 면에 대한 3차원 점 데이터를 환산하면 그림 23 같은 결과를 얻을 수 있다.

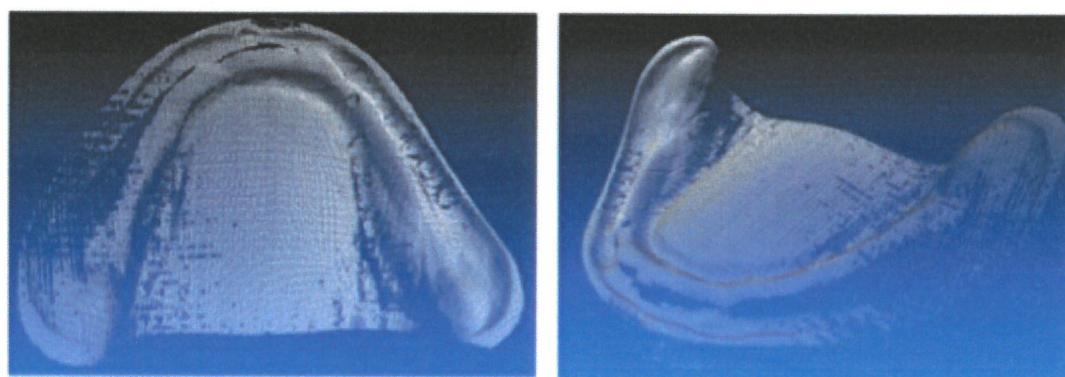


그림 23. 대상객체의 단일 면 스캔 데이터 결과

2. 3차원 점 데이터 정합 기술

구조광 스캐닝 방법은 카메라가 획득하지 못하는 영역에 대해서는 3차원 점 데이터 변환이 어렵다. 그렇기 때문에 다른 방향에서 영상을 획득하여 보간하는 방법을 거치게 된다. 본 연구에서는 대상객체를 중심으로 수평 회전하는 방식을 통해 데이터를 보간하도록 한다. 부분 스캔 데이터의 좌표계는 상대 좌표계로 데이터 정합을 위한 좌표계 통일이 선행되어야 한다. 이를 위한 데이터 정합 알고리즘을 개발하여 데이터 정합을 위해서는 각 스캔 데이터의 외부 인자를 유추하고 이를 역변환 하도록 한다.

레이저-카메라의 삼각법에 의한 3차원 형상복원을 위해 카메라 내부인자(camera intrinsic parameter)에 해당하는 초점거리(focal length), 주점(principal points), 그리고 왜곡변수(distortion coefficients)를 추정해야 하는데 카메라 공간의 한 픽셀과 3차원 실 공간의 한 점 사이의 수학적 관계는 수식(1) 같다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x s c_x \\ 0 f_y c_y \\ 0 0 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

R , t 는 카메라 외부인자(extrinsic parameter)를 A 는 카메라 내부인자를 의미하며 카메라 좌표계와 월드 좌표계를 초기에 일치시키면 카메라 외부 인자를 단위행렬로 가정할 수 있다. f_x 와 f_y 는 영상의 초점거리를 의미하며 c_x 와 c_y 는 주점(principal point)을 의미한다. 본 식을 통해 3차원 공간의 한 점 (X, Y, Z)는 이미지 공간의 한 픽셀 (u, v)로 변환된다. 본 연구에서는 모터제어를 통해 회전 각도와 거리 값을 하드웨어적으로 알고 있기 때문에 위의 식을 통해 획득된 스캔 데이터를 쉽게 정렬할 수 있다. 그림2-x는 획득된 부분 스캔 데이터를 의미하며 위의 식으로 정렬을 한다. 정렬된 데이터는 완벽하게 데이터가 정합되지 않고 오차 값을 포함하게 된다. 이를 보정하기 위해서 본 연구에서는 ICP(Iterative Closest point) 방법을 이용한다. ICP 기법은 근접한 점 데이터 간의 거리 오차 에너지를 최소화하는 방법으로 두 점 데이터 군 사이의 최적 정합 결과를 보장한다.

그림 24는 60도 간격으로 대상객체를 360도를 스캔한 결과를 보여준다. 각 방향에서 측정하여 획득할 수 있는 데이터는 측정 당시 형상과 카메라의 방향에 따라 결정되기 때문에 360도 회전함을 통해 데이터의 부족한 부분을 채우고 이를 정합하여 온전한 3

차원 데이터를 얻도록 한다. 본 연구에서는 첫 번째 방향을 기준으로 좌표계 기준을 결정하고 다른 방향의 스캔 데이터 좌표계를 첫 번째 좌표계에 갖추도록 설계한다.

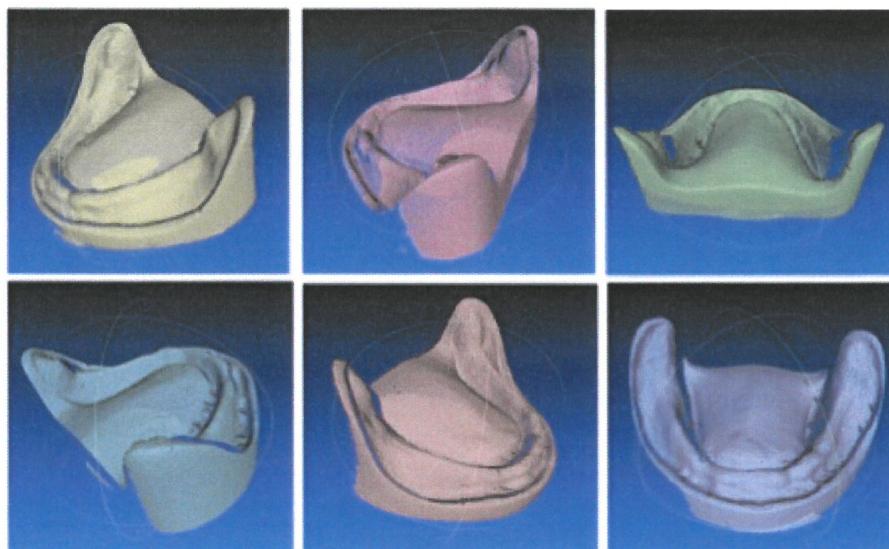


그림 24. 획득된 스캔 데이터 결과(0~360도: 60도 간격)

3. 3차원 점 데이터의 법선 연산

3차원 스캔 점 데이터는 임의의 공간 상의 위치좌표(x, y, z) 정보 만 가지고 있으므로 surface를 위한 메쉬(mesh)를 생성하기 위해서는 한 점에 이웃하는 점들을 연산하여 각 점에 대한 법선벡터를 선행적으로 구해야 한다. 이때 한 점의 이웃 점들을 찾고 관계를 정립하기 위해 KNN(K Nearest Neighbors) 알고리즘을 적용하며 이웃 점까지의 거리를 계산하기 위해 Euclidean 거리 연산자를 사용한다. 임의의 한 점과 이웃하는 점들 사이의 관계를 정립한 후 한 점에 대한 법선을 연산하기 위해 이웃하는 점과 자기 자신을 포함하는 임의의 평면을 생성해야하는데 본 연구에서는 Linear Least Square 방법을 이용하여 수식(2)처럼 평면을 연산한다.

$$\min \sum_{i=1}^n dist(x_i, \Pi)^2 \quad (2)$$

여기서 $dist$ 는 한 점 x_1 과 이웃하는 점군 Π 와의 유클리디안 거리를 의미한다.

4. 3차원 표면 생성 알고리즘

3차원 점 데이터의 표면을 생성하기 위해 SSD(Smooth Signed Distance) surface reconstruction 기반 표면 생성 알고리즘을 적용한다. 획득된 점 데이터를 기반으로 법선 데이터를 추출하고 음함수곡면(implicit surface) S 를 생성한다.

$$S = \{x | f(x) = 0\} \quad (3)$$

$$f(p_i) = 0 \text{ and } \nabla f(p_i) = n_i \quad \forall (p_i, n_i) \in D \quad (4)$$

음함수곡면은 최소제곱법이 최소화되는 방향으로 표면이 결정된다. p_i 와 그 점의 법선 n_i 는 표면 S 에서 샘플링 된 점 군 데이터 D 의 한 점을 의미한다. 표면은 데이터 에너지를 최소화하는 방향으로 생성된다. 데이터 에너지 E 는 local 에너지 E_D 와 non-local 에너지 E_R 의 합이다. E_D 는 점 데이터들이 얼마나 가까이 있는지에 대한 값이고 E_R 은 점 데이터들의 먼 거리 영향을 의미한다.

$$E_D(f) = \sum_{i=0}^N f(p_i)^2 + \lambda_1 \sum_{i=0}^N \| \nabla f(p_i) - n_i \|^2 \quad (5)$$

$$E_R(f) = \lambda_2 \int_V \| Hf(x) \|^2 dx \quad (6)$$

$$E(f) = E_D(f) + E_R(f) \quad (7)$$

$$E(f) = \sum_{i=0}^N f(p_i)^2 + \lambda_1 \sum_{i=0}^N \| \nabla f(p_i) - n_i \|^2 + \lambda_2 \int_V \| Hf(x) \|^2 dx \quad (8)$$

여기서 $Hf(x) = [\partial \nabla f(x)/\partial x_1 \ \partial \nabla f(x)/\partial x_2 \ \partial \nabla f(x)/\partial x_3]$ 이며 N 은 데이터의 크기를 나타낸다.

위의 식을 근사화하기 위해 Signed Euclidean distance function을 적용한다.

$$Q(v) = \lambda_1 \sum_{i=0}^N \| v(p_i) - n_i \|^2 + \lambda_2 \int_V \| Dv(x) \|^2 dx \quad (9)$$

여기서 Dv 는 벡터 필드 v 에서 자코비안(Jacobian)을 의미한다.

그림 25는 본 연구에서 개발한 스캔 데이터와 표면 생성 알고리즘을 적용한 결과를 보여준다.

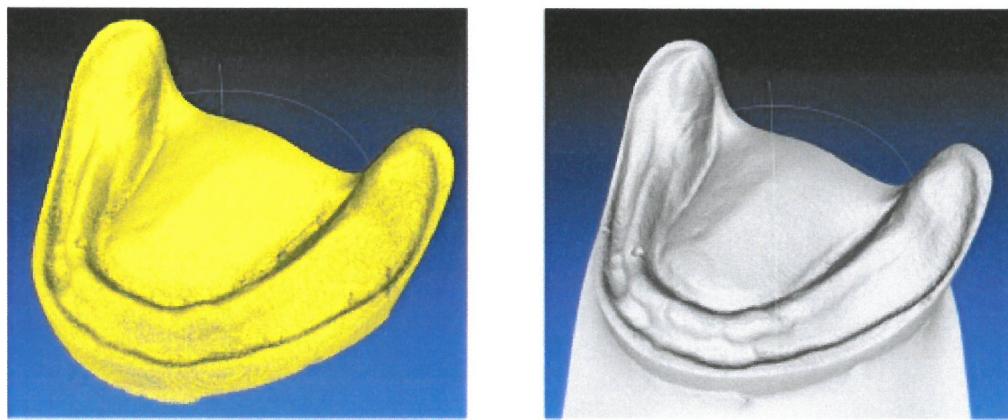


그림 25. 스캔 점 데이터와 표면 데이터 결과

제 4 장 3차원 형상 모델링

제 1절 3차원 데이터 후처리 기법

1. 형상 노이즈 제거 기술

스캔 데이터는 일반적으로 노이즈를 포함하고 있으며 이는 3차원 형상 모델링을 통해 제거 가능하다. 일반적으로 영상에서는 이웃 픽셀정보를 기반으로 해당 픽셀에 대한 필터링을 적용함을 통해 노이즈를 제거한다. 하지만 3차원 형상은 영상과 달리 이웃하는 점 데이터가 균일하지 못하여 영상처럼 세기 값만 존재하지 않기 때문에 다른 접근법이 필요하다. 본 연구에서는 자코비안 라플라스 필터링 기법을 적용하여 3차원 형상모델의 노이즈를 제거하도록 한다.

라플라스 기반 필터링은 점 위치의 선형 확산을 기반으로 하는 노이즈 제거 방법으로 라플라스 연산자를 적용하는 방법이다. 라플라스 연산자는 구배의 발산으로 정의되며 유clidean 공간에서 2차 미분 연산자로 정의된다.

$$\Delta f = \nabla f = \sum_i \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \quad (10)$$

비연속성 특성을 가지는 3차원 점 데이터의 한 점에 대한 라플라스 연산은 평균구배 노멀로 표현 가능하다. 그림 26은 3차원 형상의 노이즈를 제거한 결과를 보여준다. 해당 그림은 구배 가시화를 통해 노이즈의 정도를 파악할 수 있도록 하였다.

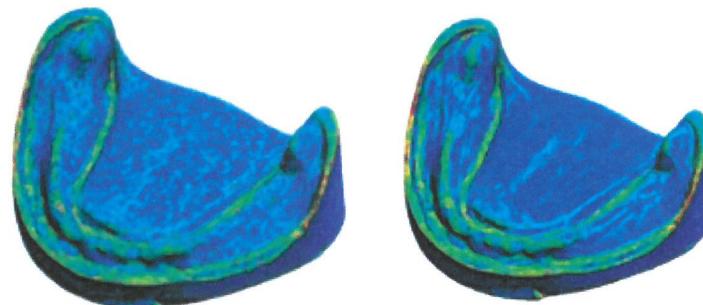


그림 26. 3차원 형상의 노이즈 제거 결과

2. 메쉬 정규화 기술

3D 스캔 데이터의 메쉬 구조는 스캔 당시의 점 데이터 위치를 기반으로 하며 이는 메쉬의 질(Quality)을 결정한다. 3차원 데이터의 효율적인 사용 및 형상 모델링을 위해 안정적인 메쉬 구조로 변환하는 리메쉬 알고리즘의 개발이 필요하며 본 실험에서는 점 위치 간의 쿼드릭 에너지가 최소화 되는 최적 위치를 구하므로 메쉬 위치변환이 가능한 리메쉬 알고리즘을 적용한다.

쿼드릭은 x, y, z 에서 2차 다항구조로 표현될 수 있는 모든 표면을 의미하며 에너지가 안정화 되는 방향으로 메쉬를 정규화 할 수 있다. 그림 27은 리메쉬가 적용된 결과를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 메쉬 정규화가 적용되기 전(왼쪽)은 메쉬의 크기가 비균일하며 삼각형태가 제각각인 것을 알 수 있다. 이는 에너지 상으로는 불안정한 상태로 외부 힘의 작용에 따라 형상이 무너지는 결과를 도출할 수 있다. 이에 반해 메쉬 정규화가 적용된 형상은 메쉬의 구조가 균일하다. 이는 형상이 안정화되어있는 것을 의미한다. 이와 같이 형상 내부 에너지의 형태가 안정화 되는 구조를 유지하는 것이 중요한데 쿼드릭 기반 메쉬 정규화 방법은 형상의 변형을 최소화하면서 메쉬 구조를 안정적으로 변환하는 방법이다.

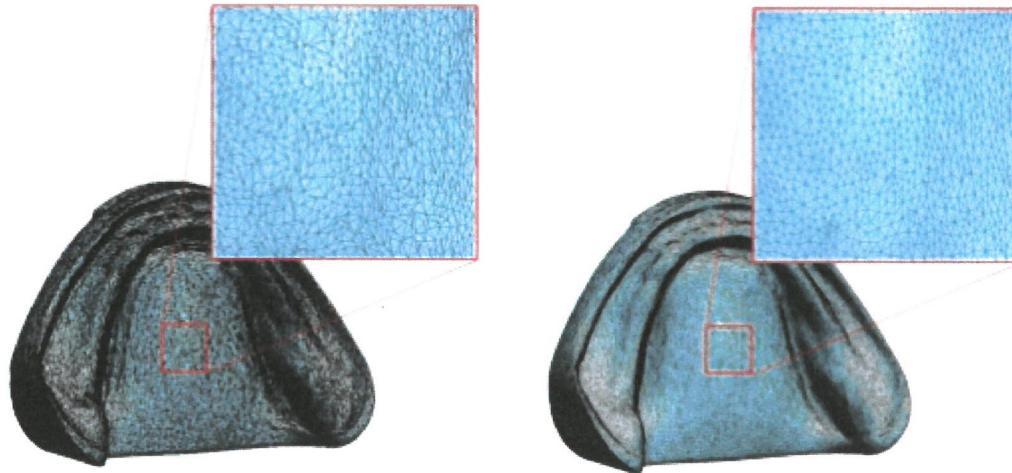


그림 27. 메쉬 정규화 결과

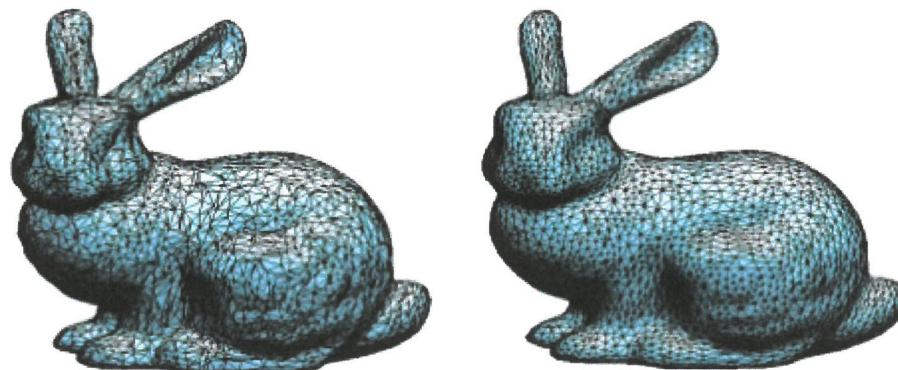


그림 28. 메쉬 정규화 결과(스탬퍼드버니 모델)

3. 3차원 데이터 압축 기술

3차원 형상 데이터의 크기는 스캔 정밀도에 따라 수 천 점 데이터에서 수백만 개의 점 데이터로 구성될 수 있기 때문에 적용영역에 따라 최적의 데이터 크기가 결정되어야 한다. 정밀한 데이터가 요구되는 분야에서는 Raw 데이터가 이용되어야 하며 모바일 환경 같은 분야에서는 데이터 압축을 통한 저용량 데이터가 요구된다. 3차원 데이터를 압축하거나 증가시키기 위해서는 3차원 형상 모델링 정보를 파악해야 하며 3차원 데이터의 엣지(edge)부분은 유지하면서 형상 특징점이 적은 곡면부를 smoothing하는 기법이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 특징점을 유지하면서 3차원 점 데이터를 압축하는 방법을 개발하여 적용한다.

그림 29는 8,654개의 점 군으로 이루어진 3차원 모델을 압축한 결과를 보여준다. 데이터는 1,117개로 약 87%의 데이터 압축이 된 결과를 나타낸다.

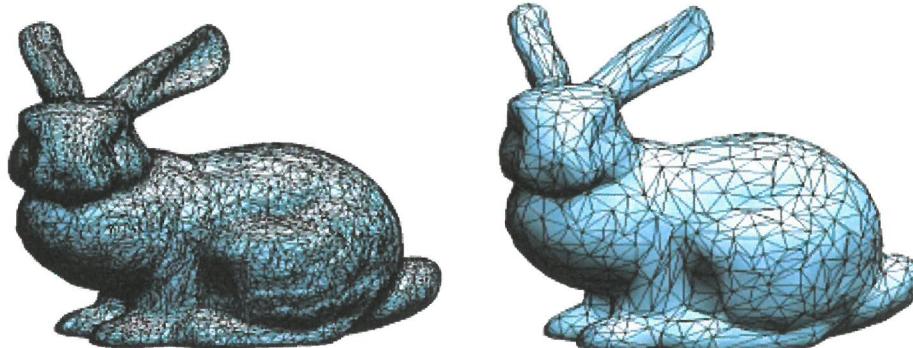


그림 29. 데이터 압축기술

4. 데이터 보간 방법

3D 스캔 데이터는 3차원 점 데이터를 기반으로 표면을 추정하기 때문에 가려짐 혹은 에러 등에 의해 데이터가 소실되는 영역에서 데이터 훈(hole)이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 이웃 형상 정보를 이용하여 데이터 보간을 수행해야 하며 본 과제에서는 삼각 메쉬 간의 가중치를 최소화 하는 방향으로 데이터를 보간하는 알고리즘을 구현한다.

그림 30은 스캔 데이터가 온전하지 못 함으로 인해 발생하는 데이터 소실 영역을 데이터 보간 방법을 통해 채운 결과를 보여준다. 그림 30에서 보는 바와 같이 점 데이터가 부정확하거나 데이터가 소실되게 되면 온전한 표면을 생성할 수 없게 된다. 하지만 표면의 이웃 정보를 기반으로 에너지가 최소화되는 방향으로 데이터를 보간하게 되면 해당 그림 오른쪽에서 보는 바와 같이 데이터를 보간할 수 있다. 하지만 데이터의 보간은 형상 특징점이 명확한 영역에서는 온전한 보간 처리하기에 어렵다. 해당 그림에서도 보간된 메쉬의 결과가 균일하지 못할 뿐 아니라 이웃하는 점들을 이어주는 수준에서 보간이 완료된 것을 확인 할 수 있다. 만약 보간하려고 하는 형상이 뾰족한 형상이거나 모서리 부분의 형상이었다면 온전하게 복원하기는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 형상의 이웃정보가 명확하다면 스캔으로 얻지 못하는 형상의 정보를 어느 정도 복원하는 것을 확인 할 수 있다.

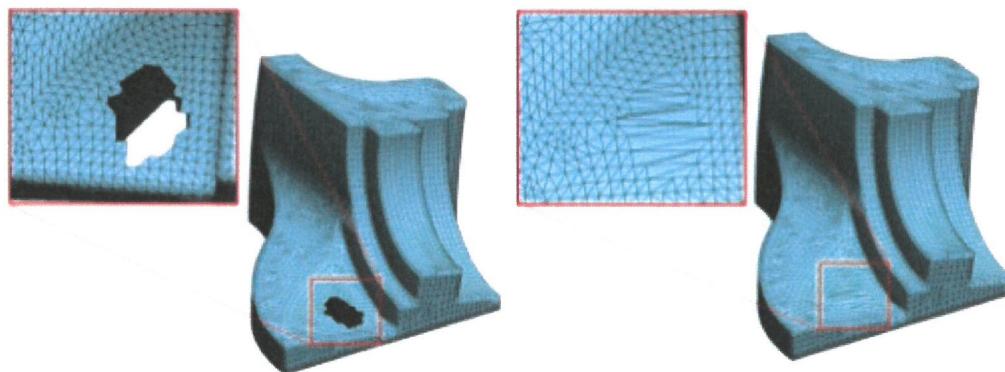


그림 30. 데이터 보간 결과

5. 3차원 형상 평가 기술

3차원 데이터의 형상의 질을 평가하기 위해서는 다양한 방법이 존재하지만 본 연구에서는 형상의 구배 지도를 이용하여 형상 모델을 평가하는 알고리즘을 적용한다. 형상의 구배는 한 점의 이웃 정보와의 관계를 통한 형상 정보를 나타내는 것으로써, 무한의 곡률 중에 가장 큰 곡률과 가장 작은 곡률 방향을 결정하여 해당 점의 형상 정보를 파악하는데 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 평균 구배 지도와 가우시안 구배 지도를 적용하여 형상 모델을 평가한다. 그림 31은 본 연구에서 획득한 스캔 데이터에 적용한 평균구배지도와 가우시안 구배지도 결과를 보여준다. 구배지도의 균질성을 고려하여 형상 데이터의 품질을 결정할 수 있는데 해당 스캔 데이터의 구배지도 균질성 결과는 그림과 같다.

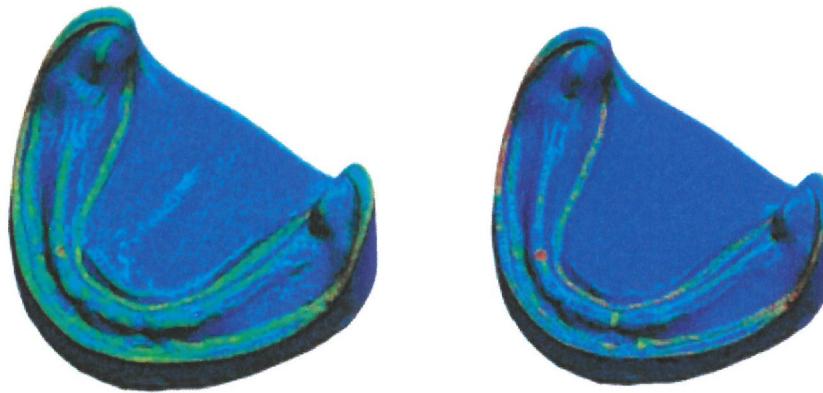


그림 31. 스캔 데이터의 평균 구배와 가우시안 구배 지도 결과

3차원 스캔 점 데이터의 3차원 형상 모델을 적용하기 위한 3차원 형상 모델의 후처리 기술의 적용으로 인하여 스캔 데이터 품질은 메쉬구조와 표면지도 등을 고려할 때 향상된 것을 확인 할 수 있다.

제 5 장 실험 결과 및 평가

제 1절 스캔 실험 결과

1. 3차원 스캔 데이터 실험 결과 – 스캔 정확도

개발된 구조광 스캐너에 대한 오차에 대한 정확도 측정을 위해 시료를 선정하고 스캔 데이터(CAD data)에 대한 값의 비교를 통해 스캔오차를 분석하였다. 또한 스캔오차 비교를 위해서 스캔 시료에 대한 6곳의 길이를 비교 및 측정하여 각 포인트에 대한 스캔 오차를 계산하였다. 그림 32는 해당 실험을 위해 적용한 시료이다.

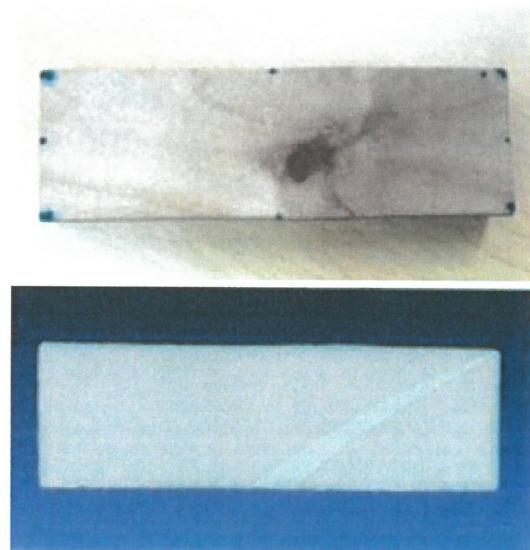


그림 32. 스캔 시료 및 스캔 데이터

시험은 먼저 시료를 스캔 후 그림 33과 같이 시료와 스캔 데이터의 동일 위치에서 길이를 측정 후 스캔 오차를 계산하는 방법으로 진행하였다. 측정결과 스캔오차의 평균이 $21.6 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 국외의 구조광을 이용한 스캐너 상용제품 중 Shining 3D 사의 AutoScan-DS200의 정확도가 $15 \mu\text{m}$ 임을 고려할 때 시제품 단계에서 만족할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 표 3과 표 4는 스캐닝 정확도 오차 측정시험 결과를 정리하였다.

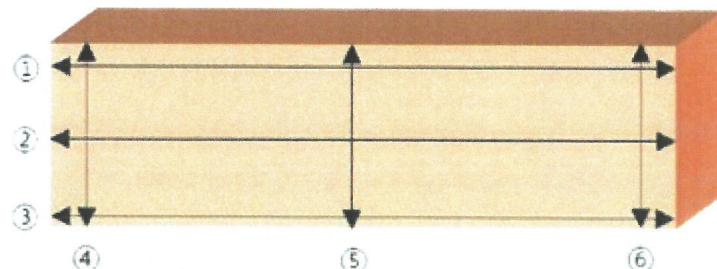


그림 33. 스캔 시료 측정 기준 위치

표 3. 스캔 오차 측정 결과

구분	1	2	3
스캔 시료			
스캔 데이터			
	4	5	6
스캔 시료			
스캔 데이터			

표 4. 스캔 오차 측정 시험결과 (단위 : mm)

측정 포인트	1	2	3	4	5	6
스캔 시료	75.08	74.99	74.99	24.15	24.26	24.20
스캔 오차	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03

2. 3차원 스캔 데이터 실험 결과 - 스캔 시간

개발된 구조광 스캐너의 평균 측정시간에 대한 평가를 내리기 위해 단면에 대한 정밀 스캐닝과 360° 전체 면에 대한 Full 스캐닝 시간을 측정하였다. 단면에 대한 측정 시간은 스캐닝 시작 시점 즉 대상객체 위에 40개의 광 패턴을 조사하기 시작하는 시점부터 패턴 영상을 획득하고 3차원 점 데이터를 생성하기까지의 시간을 측정하였다. Full 스캐닝에 대한 측정 시간은 마찬가지로 40개의 광 패턴 조사 시점부터 60도 간격으로 대상객체를 회전 한 후 다시 40개의 광 패턴을 조사하는 과정을 총 6회 360도를 수행하여 그림 34와 같은 패턴 영상을 획득하고 3차원 점 데이터를 생성하기까지의 시간을 측정하였다. 평균값을 도출하기 위해 각각의 조사방법으로 5회 반복 측정하였다. 시간 측정결과 단일 면에 대한 정밀 스캐닝은 평균 18.19초, 360도 Full 스캐닝 시간은 60.554초의 결과를 얻을 수 있었다.

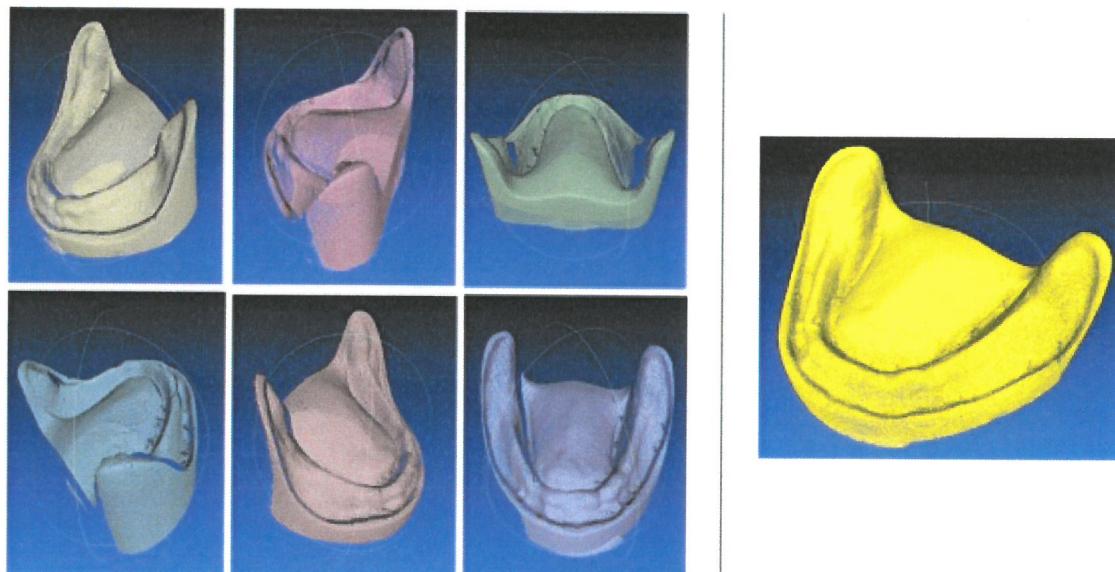


그림 34. 6면의 획득된 스캔 데이터 결과(좌) 및 단일 정밀 스캔 데이터(우)

표 5. 스캐닝 시간 측정 시험결과

측정 횟수	1	2	3	4	5	평균
단일 정밀 스캐닝	18.20	18.23	18.09	18.20	18.23	18.19
Full 스캐닝	60.70	60.51	59.66	61.09	60.81	60.554

제 2절 디지털 치과보정 시스템 적용

제안하는 시스템은 치의학 분야 디지털화의 한 부분으로 스캐너와 CAD/CAM 시스템, 그리고 기계가공을 통합하여 보철물의 제작과정을 자동화하고 표준화하는 목적으로 한다. 기존의 치과 보철물 제작은 기공사의 기술 숙련도에 의존한 수작업으로 하기 때문에 제작시간이 오래 걸리고 정형화되어 있지 않다. 또한, 전문가에 의존적이기 때문에 많은 환자를 대하기 어려우며 사람에 따라 결과물의 품질이 달라진다. 이에 반해 제안하는 기술은 환자로부터 치아 본을 뜯고, 이를 스캔하고 CAD 모델을 생성한 후 밀링장비를 통해 보철물을 가공하여 환자에게 제공하는 구조를 가지고 있다.

본 시스템은 자동화 과정을 통해 정량적 평가가 가능하다. 본 논문에서 제안한 스캐너의 측정시간은 1분정도이며, 이후 밀링머신의 가공시간은 20여분이 소요된다. 결국 본 시스템은 1시간 내외로 최종 결과물을 획득할 수 있다. 또한 전자기계를 적용하기 때문에 보철물의 품질을 일정하게 유지할 수 있다. 스캐너의 측정오차는 0.01mm이고 밀링머신의 가공오차는 0.01mm이기 때문에 최종 보철물의 가공오차는 0.02mm가 된다. 일반적으로 환자에게 이물감이 없는 의치 적합 기준은 0.12mm정도임을 고려할 때 제안하는 시스템의 정밀도는 환자에게 최적의 가공물을 제공할 수 있다. 제안하는 시스템은 one-stop 구조로서 환자의 병원내원 횟수를 평균 2~3회로 단축할 수 있으며 3차원 데이터 축적을 통해 사후 관리를 용이하게 할 뿐 아니라 3차원 형상 모델링을 통해 원하는 구조의 변경이 자유롭다. 그림 35는 기존 방식과 디지털 방식의 처리과정의 차이를 보여준다.

Analog method(기존 방식)

1. 환자 방문 치과병원	2. 헌상제작 및 모델제작 치과병원	3. 화스팅 제작 가공소	4. 구강내 시각 및 조정 치과병원	5. 마감작업 가공소	6. 치아 제작 가공소	7. 채벌 및 wax wash 가공소	8. Resin packing & 열증착 가공소	9. 완성 병원

Digital method

1. 환자 방문 치과병원	2. Special Try를 이용한 인상 채득 환자 정보 채득 치과병원	3. 스캔 및 CT를 이용 부위 관계 복원 가공소	4. 디지털 배양 및 디자인 가공소	5. CAM manufacturing 가공소

그림 35. 기존 시스템과 처리과정 비교

본 논문에서 제안한 스캐너를 적용하여 획득한 3차원 구강 구조를 CAD 데이터로 변환한 후 치과의사의 지도아래 차아구조를 수정하고 정밀 가공이 가능한 밀링머신을 통해 치아 보철물을 제작한다. 그림 36은 제안하는 스캐너를 통해 획득된 데이터를 기반으로 하여 최정 치과 보철물을 제작한 결과를 보여준다. 본 결과물은 인체에 무해한 치과용 잇몸 블럭 소재를 사용하여 가공하였다.

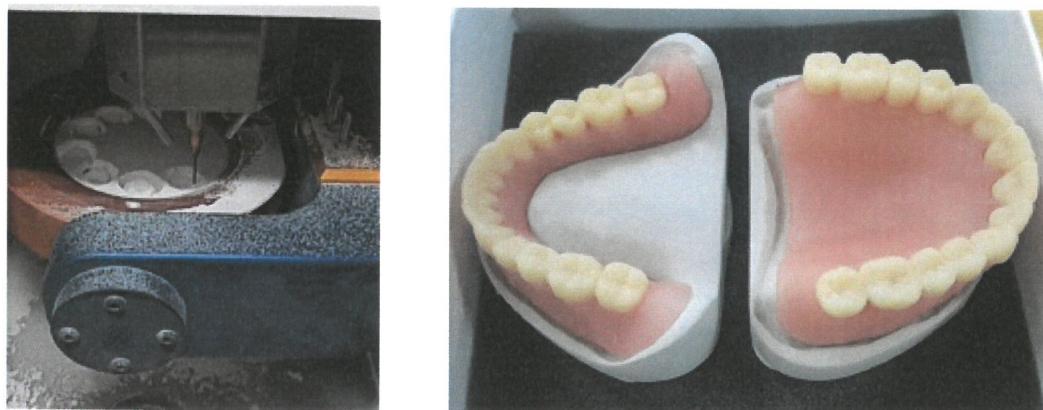


그림 36. 정밀 공정과정과 최종 결과물

제 6 장 결론

본 연구에서는 치과 보정기 조정을 위한 목적으로 소형 구조의 스캔 시스템을 개발하였다. 해당 연구에서는 스캔 시스템을 위해 스캔 하드웨어 뿐 아니라 스캐닝 알고리즘, 3차원 형상 모델링 기술, 후처리 기술 등의 개발하였으며 최적화 하였다. 최종 실험결과에서 알 수 있듯이 스캔 데이터의 정확도는 약 0.01mm 수준으로 치과용 보정기를 적용하기에 적합 수준의 결과를 도출하였다. 뿐만 아니라 스캔 시간에서도 온전한 3차원 형상을 측정하는데 1분 내외의 결과를 얻을 수 있도록 하여 현장에 적용하는데 부족함이 없도록 하였다. 또한 단면의 스캔 데이터를 획득하는 데 평균 18초 정도의 측정시간을 소요하도록 설계하였으며 사용자가 원하는 정밀도를 획득할 때까지 측정 각도를 조절 가능하도록 하였다.

본 연구의 결과물인 구조광 스캐너의 주 목적은 소형 치과 보정기의 객체를 측정하기 위한 목적으로 개발되었으나 3차원 스캐닝이 적용되는 대부분의 분야에서 적용가능하도록 설계가 되었다. 치과 구조물의 특성을 고려하여 외부 환경광을 최소화하는 구조로 설계되었으나 실내의 외란광에 하에서는 스캔이 가능하도록 광원의 세기를 조절 가능하게 하였다. 또한 스캐닝 패턴과 스캔 범위를 조절할 수 있도록 하여 대상 객체의 크기와 범위에 맞게 적용이 가능한 구조이다. 본 결과물의 측정 정밀도는 제조용에서 적용되는 고정밀 스캐너와 비교하면 정밀도가 떨어진다. 고정밀 스캐너의 경우, 광원과 디텍터의 정렬을 고가의 정밀제어 기계를 통해 하기 때문에 정확한 데이터 획득이 가능하지만 가격이 올라간다. 본 스캐너의 경우는 일반적 경우에 적용하능한 분야에 적극 활용할 수 있다. 본 연구에서 적용한 모듈은 저가로 적용이 가능하기 때문에 개발 단가를 낮출 수 있으며 비교적 정확한 스캔 결과를 획득하기 때문에 3D 콘텐츠 제작 등의 분야에서도 적용될 수 있다.

하지만 본 시스템은 구조광 스캐닝 방식이 가지는 강한 주변광에 의한 영향으로부터 자유로울 수 없으며 컨케이브한 구조의 형상에서는 온전하게 3차원 형상을 획득하기 어렵다. 구조광 스캐너는 특정 파장대역의 광 신호만 선별하여 스캔하는 방식이 아닌 표면에 반사된 가시영역 대의 신호를 측정하기 때문에 주변 광에서 가시영역의 광 신호를 강하게 보내게 되면 스캔 결과에 지대한 영향을 끼치게 된다. 뿐만 아니라, 기본적으로 광 스캐너의 경우 광원이 조사되고 반사되어 돌아오는 신호를 기반으로 데이터를 획득하기 때문에 볼록한 영역이 많은 구조물에서는 가려짐 현상으로 인해 온전한

데이터의 획득이 쉽지 않다. 또한, 대상객체의 표면의 반사도가 높거나 정반사 재질의 경우에는 스캔 데이터 결과를 만족할 수 없다. 디텍터로 활용되는 이미지 센서가 표현할 수 있는 색의 범위는 상대적인데 반사 표면에서 정반사가 발생함으로 인해 범위 밖에 신호가 들어오게 되면 데이터 획득이 불가능 하다. 이를 개선하기 위한 광원모듈 개발 및 원하는 파장대역의 정보만 수용할 수 있는 디텍터의 개발이 필요하다.

추후 연구에서는 보다 다양한 환경에서 적용가능하도록 하기 위해 단파장 가시광원 신호를 조사하는 광원을 설계하고 밴드패스 필터를 적용한 디텍저 모듈의 개발을 하도록 한다. 또한 신호의 디지털화를 통해 특정 노이즈 대역의 신호를 분류하도록 하는 변환 알고리즘을 적용하도록 한다. 광 스캐너의 가장 큰 한계 중 한가지는 대상 표면만 측정하는 것인데, 이를 해결하기 위해 순간적으로 강한 에너지를 조사할 수 있는 테라 헤르츠 광원의 적용을 검토할 수 있다. 펄스 신호를 통해 피코초 시간 범위 안에 광원을 조사할 경우 순간적으로 고 에너지의 조사가 가능하기 때문에 표면 내부의 정보를 획득할 수 있는 스캐너의 개발이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Pipitone, F.J., Marshall, T.G., 1982, A wide-field scanning triangulation rangefinder for machine vision, International Journal of Robotics Research, 2(1), pp. 39-49.
- [2] Hall, E.L., Tio, J.B.K., McPherson, C.A., 1982, Measuring curved surfaces for robot vision, Computer, 15(12), pp. 42-54.
- [3] Blais, F. 2004, Review of 20 years range sensor development, Journal of Electronic Imaging, 13(1)
- [4] Hartley, R., Zisserman, A., 2003, Multiple view geometry in computer vision, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-54051-3.
- [5] M. Himmelsbach, A. Müller, T. Luttel, H.J. Wunsche, 2008, LIDAR-based 3D object perception, Proceedings of 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems
- [6] Joan R. Rosell , Jordi Llorens , Ricardo Sanz , Jaume Arno , Manel Ribes-Dasi, Joan Masip, Alexandre Escola , Ferran Camp, Francesc Solanelles, Felip Gra cia , Emilio Gil, Luis Val, Santiago Planas, Jordi Palacín, 2009, Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning, Agricultural and Forest Meteorology, 149, pp. 1505-1515.
- [7] Koyuncu, Baki and Kullu, Kurtulus, 2010, Development of an Optical 3D Scanner Based on Structured Light, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, pp.17-22.
- [8] Morgan Quigley, Siddharth Batra, Stephen Gould, Ellen Klingbeil, 2009, High-Accuracy 3D Sensing for Mobile Manipulation: Improving Object Detection and Door Opening, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2816-2822.
- [9] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi and R. Scopigno, 2001, A low

- cost 3D scanner based on structured light, *EUROGRAPHICS 2001*, 20(3).
- [10] Mohit Gupta , Amit Agrawal , Ashok Veeraraghavan, Srinivasa G. Narasimhan, 2011, Structured Light 3D Scanning in the Presence of Global Illumination, Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 713–720
- [11] J. P. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras, 2007, Multi-view stereo reconstruction and scene flow estimation with a global image-based matching score, *Journal of computer vision*, 72(2), pp.173–180.
- [12] C. Hernández and F. Schmitt, 2004, Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling, *Computer Vision and Image Understanding*, 96(3), pp397–404.
- [13] Seung Joo Lee, Min Ki Park, In Yeop Jang, and Kwan H. Lee, 2014, Fast multiview three-dimensional reconstruction method using cost volume filtering, *Optical Engineering*, 53(3) pp. 033104–1–10
- [14] Seung Joo Lee, Min Ki Park, Kwan H. Lee, 2014, Full 3D surface reconstruction of partial scan data with noise and different levels of scale, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(8), pp.3171–3180.
- [15] Stewart, C. V., Tsai, C. L., & Roysam, B. (2003). The dual-bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration. *IEEE transactions on medical imaging*, 22(11), 1379–1394.
- [16] Stewart, C. V., Tsai, C. L., & Roysam, B. (2003). The dual-bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration. *IEEE transactions on medical imaging*, 22(11), 1379–1394.
- [17] Taubin, G. (2012, September). Smooth signed distance surface reconstruction and applications. In *Iberoamerican Congress on Pattern Recognition* (pp. 38–45). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] GARLAND, Michael; HECKBERT, Paul S. Surface simplification using quadratic error metrics. In: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. p. 209–216.
- [19] NGO, Hanh T.-M.; LEE, Won-Sook. Feature-first hole filling strategy for 3D meshes. In: *International Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. p. 53–68.

- [20] HUISKEN, Gerhard, et al. Flow by mean curvature of convex surfaces into spheres. Australian National University, Centre for Mathematical Analysis, 1984.
- [21] CHEN, Yun Gang, et al. Uniqueness and existence of viscosity solutions of generalized mean curvature flow equations. *Journal of differential geometry*, 1991, 33.3: 749–786.
- [22] Evans, L. C., & Spruck, J. (1991). Motion of level sets by mean curvature. I. *Journal of Differential Geometry*, 33(3), 635–681.
- [23] Lisle, R. J. (1994). Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis. *AAPG bulletin*, 78(12), 1811–1819.
- [24] Chang, S. Y. A., & Yang, P. C. (1987). Prescribing Gaussian curvature on S². *Acta Mathematica*, 159(1), 215–259.