

3D 형상정보 자동 수집을 위한 구면좌표계식 스캐닝 시스템[§]

박상욱* · 맹희영**† · 이명상* · 권길선** · 나미선**

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, ** 국가기록원 복원기록과

Spherical-Coordinate-Based Guiding System for Automatic 3D Shape Scanning

Sang Wook Park*, Hee-young Maeng**†, Myoung Sang Lee*, Kil Sun Kwon** and Mi-Sun Na**

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** National Archives of Korea

(Received April 17, 2014 ; Revised July 21, 2014 ; Accepted July 22, 2014)

Key Words: Spherical Coordinate(구면좌표계), 3D Scanning(3 차원 스캐닝), 3D Measuring System(3 차원 측정 시스템), Point Cloud Data(점군데이터), White Structured Light(백색 구조형 광)

초록: 3D 스캐닝을 이용한 3D 형상정보를 구축하기 위해서는 피측정물의 촬영부터 시작하여 획득된 데이터의 합성과정까지 여러 단계를 거치는데, 이는 많은 시간과 복잡하며 번거로운 수작업을 요구한다. 본 연구에서는 복잡하고 많은 시간이 소요되는 과정에서 생기는 불필요한 준비과정이나 진행단계별 수작업 요소들을 자동화하여 작업자의 숙련도에 따라 발생하는 데이터 품질의 차이를 최소화 할 수 있도록 하였으며, 작업자의 실수로 인해 발생하는 데이터의 부재를 사전에 예방 할 수 있어 결과적으로 3D 스캐너를 통한 3 차원데이터 획득과정의 시간적, 데이터적 효율성과 형상정밀도를 증가시킴을 증명하였다.

Abstract: Several types of automatic 3D scanners are available for use in the 3D scanning industry, e.g., an automatic 3D scanner that uses a robot arm and one that uses an automatic rotary table. Specifically, these scanners are used to obtain a 3D shape using automatic assisting devices. Most of these scanners are required to perform numerous operations, such as merging, aligning, trimming, and filling holes. We are interested in developing an automatic 3D shape collection device using a spherical-coordinate-based guiding system. Then, the aim of the present study is to design an automatic guiding system that can automatically collect 3D shape data. We develop a 3D model of this system and measuring data which are collected by a personal computer. An optimal design of this system and the geometrical accuracy of the measured data are both evaluated using 3D modeling software. The developed system is then applied to an object having a highly complex shape and manifold sections. Our simulation results demonstrate that the developed system collects higher-quality 3D data than the conventional method.

1. 서 론

백색 구조형 광 기반 3D 스캐너를 이용하여 3D 형상정보 수집 및 구축하는 과정은 스캐닝 작업, 각 영역별 데이터 수집, 그리고 수집된 데이터의 종합적인 합성(merge and align) 과정 등 크게 3 가지로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 위 과정은

일일이 수작업을 통해 수집하고 편집하는바, 데이터를 합성한다든지 배치 작업 중 많은 오차가 발생할 뿐만 아니라 상당한 작업 시간을 요한다.

특히, 대칭형상 또는 완만한 곡선 형태의 피측정물이 아닌 장인에 의해 제작된 수가공품 또는 상면과 측면의 방향성이 크게 차이 나는 형상과 같은 경우에 직교좌표계식 측정기구로 전체 표면을 한꺼번에 측정하기가 곤란하며, 측정데이터도 특정 부위에 집중된 3D 점군 데이터가 형성되는 원인으로 꼽을 수 있다.⁽¹⁾

이러한 문제점들을 개선할 목적으로써 본 연구는 구면좌표계식 기구를 이용하여 위도각 및 경도각 좌표를 획득하며, 일정 구간마다 데이터를 자

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, maeng@seoultech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

동으로 수집하고 이들 데이터를 통합 좌표계로 변환 및 합성하여 전체의 3D 형상정보를 자동으로 구축할 수 있는 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 구면좌표계 기구와 시스템 설계

2.1 구면좌표계식 3D 스캐닝 기구의 적용

본 연구에서는 Fig. 1 및 Fig. 2 와 같이 NC 로터리 테이블(rotary table)과 소형 로터리테이블(rotary table)을 각각 x-y 평면, y-z 평면 상의 2 개의 회전축으로 구성하였고, 스캐너의 초점거리를 맞추기 위해 선형구동기(linear actuator)를 외팔보형상(arm) 축에 설치하여 다양한 크기의 피측정물에 유연하게 대응(최대 200mm)할 수 있도록 고안하였다.

3D 스캐너는 T-scan(오차정밀도 0.003 mm)을 사용하였고, y-z 평면의 회전축은 정밀공작기계용 NC 로터리테이블(오차정밀도 0.005"($\approx 25 \mu\text{m}/\text{m}$))을 사용하여 기구 오차를 최소화 하도록 하였다.

시스템은 Fig. 2 와 같이 마이크로컨트롤러를 통해 동시 제어하여 3D 스캐너의 측정 데이터도 실시간으로 각 축의 각도 데이터와 동시에 읽어 들이면서 순차적으로 스캐닝을 반복함으로써 완성된 3D 형상정보를 구축할 수 있도록 하였다.

한편 3D 스캐닝 데이터의 합성(merge) 알고리즘을 구면 좌표계 P점의 위치에서 시작하여 이동하는 스캐너의 좌표(r, θ, Φ)와 동차좌표계를 사용한 변환 행렬을 이용하여 회전하여 경도의 위상 각도를 입력하여 연산되도록 하였다.

이를 바탕으로 측정된 데이터는 2 개의 각도와 하나의 반지름으로 이루어지므로 이를 적용시키기 위하여 원통좌표계로 변환하는 과정이 필요하다.⁽²⁾

2.2 구면좌표계식 스캐닝 기구 상세설계

본 연구를 위한 실험장비는 Fig. 1 및 Fig. 2 와 같으며, 크게 측정물을 회전시켜주는 로터리테이블, 측정장비와 피 측정물의 간격을 조정해주는 선형구동기 그리고 3D 스캐너와 액츄에이터 간의 연결 및 지지 홀더와 스캐너와 홀더의 무게를 보상하여주는 단진자(pendulum) 구조로 구성하였다.

Fig. 3 은 기구의 상세 설계 모델이며, A 는 스캐너와 선형구동기 홀더와 3D 스캐너 파트 이며 B 는 피측정물을 올려놓는 로터리 테이블 그리고 C 는 A 파트를 시계 및 반시계 방향으로 운동을 가능케 하는 NC 로터리 테이블이다. 기구를 설계함에 있어 가장 중요한 부분은 피 측정물의 중심축, 로터리 테이블의 중심축과 스캐너장치의 시스템 중심축이 모두 일치하도록 하였다.

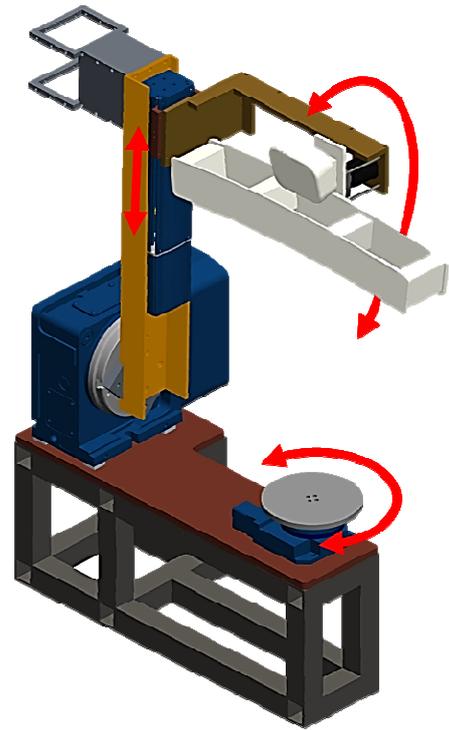


Fig. 1 Schematic 3D model of Spherical coordinate system

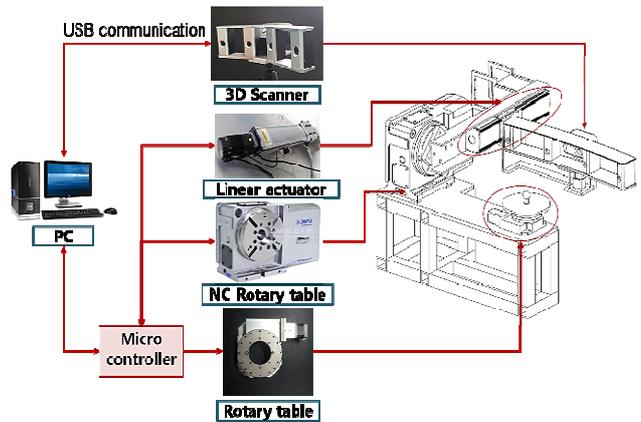


Fig. 2 Diagram and relationship of this system

3D 스캐너를 이용하여 피측정물을 측정함에 있어 가장 중요한 요소는 피측정물의 위치와 카메라간의 각도를 설정할 때 스캐너의 초점과 측정물 표면의 법선 방향과 스캐너의 방향이 일치해야 최적의 데이터를 얻을 수 있으므로 이를 구현하기 위해 조립공차를 최소화 하여 설계 및 제작을 하였으며, 각 요소 부품들의 직진도, 진원도, 직각도, 평행도, 진직도, 동축도 등을 다양한 측정도구를 이용하여 측정 및 평가 하였다.

3 개의 축으로 구성된 본 기구는 Fig. 1 및 Fig. 3 과 같으며 780×400×1300(mm) 의 사이즈로 제작하였다.

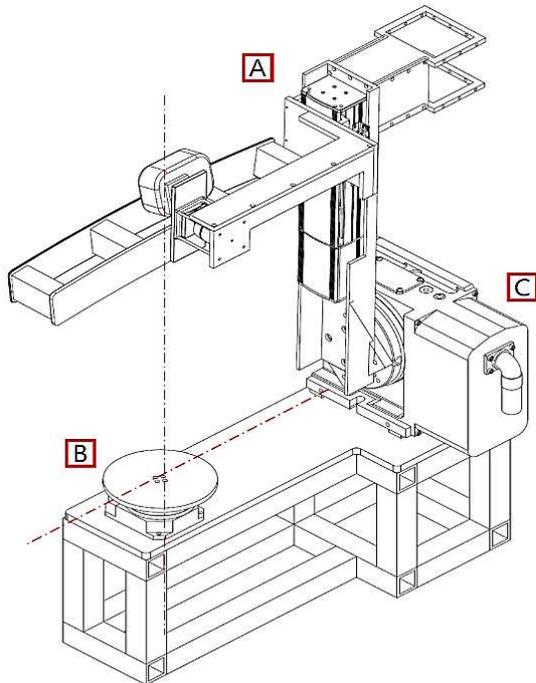


Fig. 3 Schematic model of this system

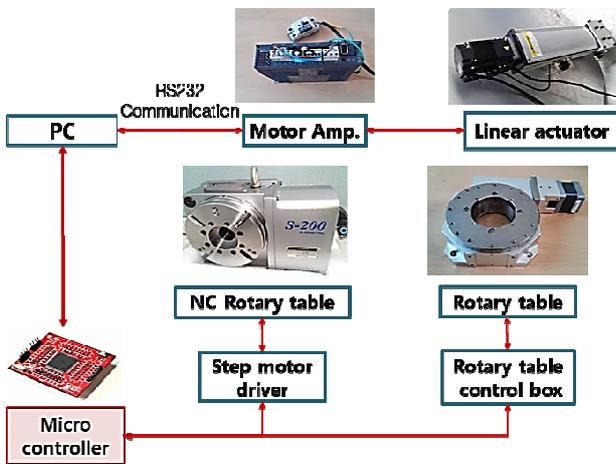


Fig. 4 Diagram of the control system setup

2.3 기구 제어장치의 설계 및 제작

본 연구의 실험장비는 앞서 언급한 바와 같이 3개의 축으로 구성되어 있는데 이는 전자 제어를 통한 컨트롤 시스템을 필요로 한다. 24V 파워 서플라이와 220V 단상전원을 통하여 모터 앰프, 선형 구동기, NC 로터리 테이블의 전원을 공급하며, 5V 어댑터를 이용해 마이크로 컨트롤러 제어를 할 수 있도록 Fig. 4와 같이 구성하였다. PC-선형 구동기 간에 RS232 통신으로 제어하며, 나머지 NC 로터리 테이블과 턴테이블은 마이크로 컨트롤러의 제어를 통해 PC와 실시간으로 통신할 수 있

도록 하였다.

2.4 스캐닝 데이터 합성 알고리즘 적용

스캐닝으로 얻은 데이터의 위상은 기구부의 구면좌표를 지향하지 않고 스캐너의 고정좌표로 위상이 결정되며, 기구부의 구면좌표 위상을 맞추기 위하여 변환행렬(transformation matrix)을 사용하였으며, 스캐너 위상에서 기구부의 위상으로 변경하는 알고리즘을 적용하였다.⁽³⁾ 변환행렬을 사용한 위상 변화는 스캐너에서 얻은 데이터의 -z 방향 성분을 모두 z 방향으로 축을 이동시키며 이동되는 방향의 크기를 모든 데이터와 일치되도록 하였다. 스캔된 기구부의 θ (위도)는 Z 축, Φ (경도)는 X 축으로 회전한다(Table 1).

변환행렬의 구현방법은 식 (1)과 같이 4×4 행렬로 이루어져 있으며, 각 위치에 따라 회전 및 이동 그리고 투영과 같은 행렬 연산이며 이에 관한 연산은 식 (2)와 같은 4×4 행렬을 이용하여 스캔 데이터의 위상을 회전하였다.^(4,5)

구면좌표계 P 점의 위치에서 이동하는 스캐너의 좌표(r, θ, Φ)를 가지고 원점 O에 위치한 대상을 스캐닝 하는 방식으로 획득된 데이터는 항상 $\theta = 0, \Phi = 0$ 위치에서 데이터가 생성되며, r의 (Z 축)방향은 스캐너의 위치 P를 기준으로 $-r$ (-z) 방향으로 데이터가 최종데이터의 좌표 $(r, \theta, \Phi) = (r, 0^\circ, 0^\circ)$ 를 생성한다. 위와 같은 구면좌표 데이터의 기초적 설정개념을 Table 1과 같이 표현하였다.

Φ 의 X 축 회전은 식 (2)를 연산하여 X 축을 회전축으로 회전하게 되며, 기구부와 스캐너의 위상을 동일 위상으로 변환한다. 회전되는 Φ 의 각도는 기구부에서 발생한 Φ 의 위상과 반대 방향으로 각도를 입력하여 연산된 데이터는 Fig. 5와 같은 결과를 보인다.

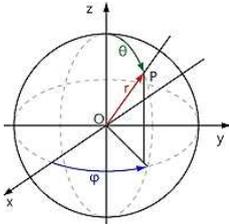
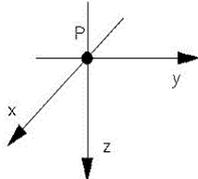
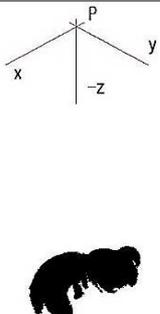
위와 같은 과정을 통해 변환된 3차원 데이터는 사전에 입력된 경계영역 이외의 부분은 제거된 패치(patch) 형태로써 3차원 구면 공간에 배치되는데, 이것을 합성 알고리즘으로써 응용 및 적용하였으며, 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다.

$$[x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [ax \ by \ cz \ 1] \quad (1)$$

$$= [x^* \ y^* \ z^* \ 1]$$

$$[x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi & 0 \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Table 1 Coordinate and a shape data between apparatus and a 3D scanning part

	Apparatus part	3D Scanner part
Spherical coordinate	 <p>(a) Apparatus spherical coordinate</p>	 <p>(b) Scanning data spherical coordinate</p>
3D Shape data	 <p>(c) Apparatus coordinate shape</p>	 <p>(d) Scanning coordinate shape</p>

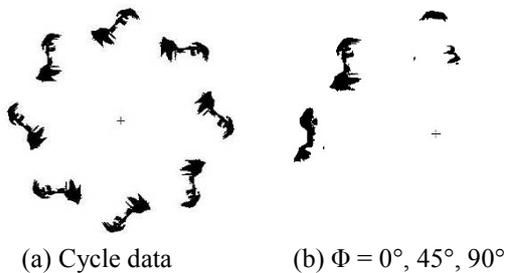


Fig. 5 Results of operated data using transformation matrix algorithm

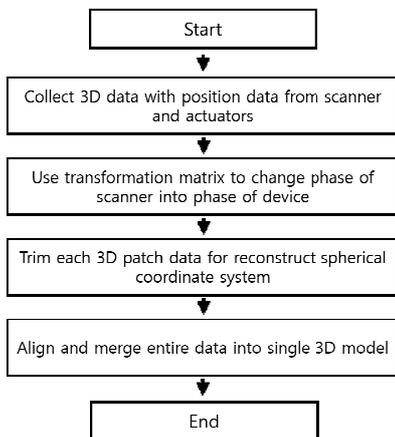


Fig. 6 The flow chart of merge algorithm

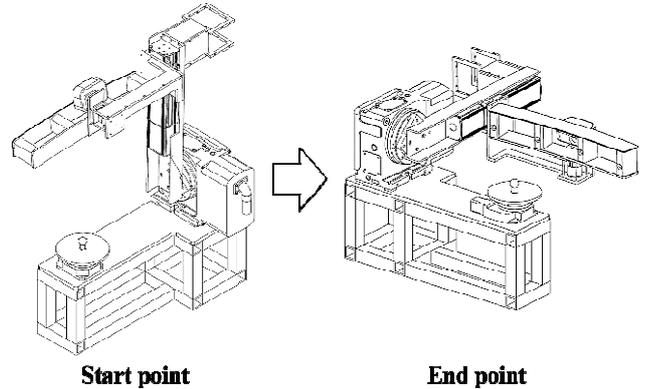


Fig. 7 Calibration test using master ball

3. 기구정밀도 평가 방법

기구의 올바른 정렬을 확인할 수 있도록 Fig. 7 과 같은 방법으로 적합성 평가를 위해 진구도 3 μm 이내의 마스터볼을 이용하여 축간의 정렬 및 정밀도를 검사하는 방법을 사용하였다.

초기 조립시 마스터볼의 실제 원주와 3 차원 데이터상의 원주를 비교하여 조립 정밀도를 점차 높여 나가는 방식을 사용하였으며, 3 차원 모델링 소프트웨어를 이용하여 피측정물과 3 차원 데이터의 형상공차를 비교하여 평가 및 분석 하였다.

목표 기준치인 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 의 범위 내에 들어올 수 있도록 3D 스캐너 장치 파트의 자중에 의한 처짐은 단진자 구조를 이용하여 보정하였으며, 로터리 테이블의 진원도는 아베의 원리(Abbe's principle)를 고려해 보정하여, 측정데이터의 진구도가 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 이내에 들어올 수 있도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 기구오차의 보정 및 검증

본 연구에서 시스템 신뢰성 평가 방법의 하나로 3 μm 이내의 마스터볼(master bell)의 3 차원 측정 데이터를 모델링 소프트웨어를 이용하여 형상화 하며, 결과 데이터의 편차 특성을 분석하고 측정 상태, 환경 그리고 기구의 적합성을 검사 및 확인 하였다. Fig. 9 은 기구의 측정 방법에 대한 도식이며, 마스터볼의 실제 표면 데이터와 3 차원 측정 데이터의 비교 그래프이다. 마스터볼에 대한 3 차원 형상데이터는 Fig. 8 과 같으며, 몇 군데의 오류 영역을 제외하면 형상공차는 비교적 우수함을 알 수 있었다. 그림에서 보이는 A, B, C 는 각각 스캔 데이터의 오류, 마스터볼의 표면 매질을 입히는 과정에서 생긴 압입 자국이며 이를 통해 측정데이터의 정교함을 알 수 있었다. 마지막으로, C 는 원

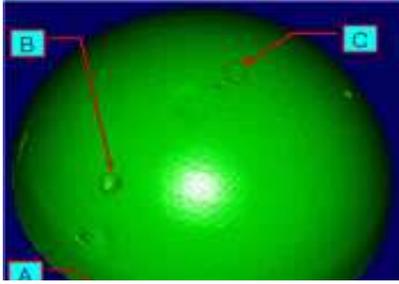


Fig. 8 The 3D scanning data of master ball with an error

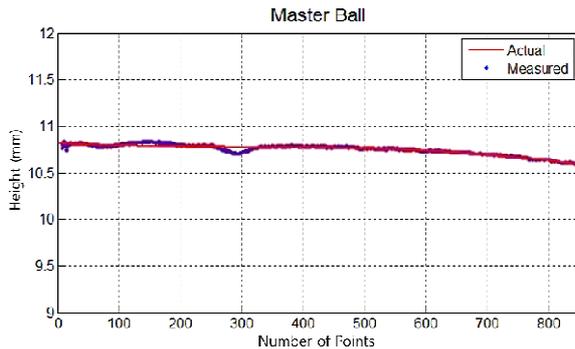
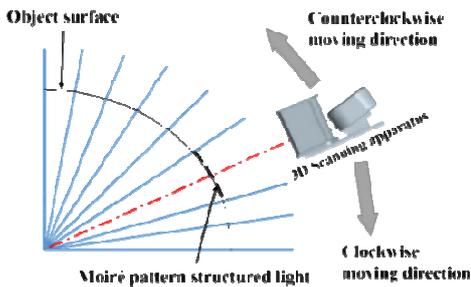


Fig. 9 Test of system calibration using master ball and measurement data

주방향의 비교적 두터운 띠가 생성되었는데, 이는 구면좌표계 변환과정에서 동일 위상에 많은 점군 데이터가 중첩되어 발생한 것으로 판단된다. 백색광 3 차원스캐너의 특성상 피 측정물의 매끄러운 표면이나 금속, 복잡형상 등 직진성을 가지는 빛의 반사성에 해당되지 않는 난반사, 빛의 흡수성이 높은 검은색 계열의 피측정물은 데이터의 부정확성을 일으키며, 이를 완전히 없앨 수는 없다. 이와 같은 문제를 극복하기 위한 대체 방안으로 본 시스템은 측정데이터의 산포도를 통해 이를 필터링 하여 제거하는 알고리즘을^(1,6) 적용하였다. 이는 NC 로터리 테이블의 시계, 반시계방향의 측정데이터의 최대 및 최소값의 차이를 통하여 진구도 오차를 평가하였으며, 이를 통해 얻은 절대값 평균오차는 0.022 mm 를 넘지 않는 결과를 보였다.

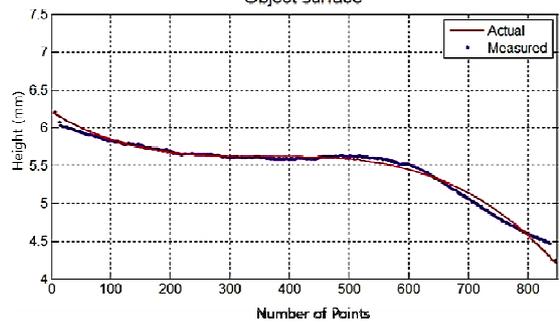
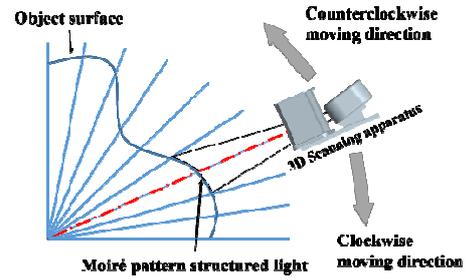


Fig. 10 Test of system accuracy using an actual object

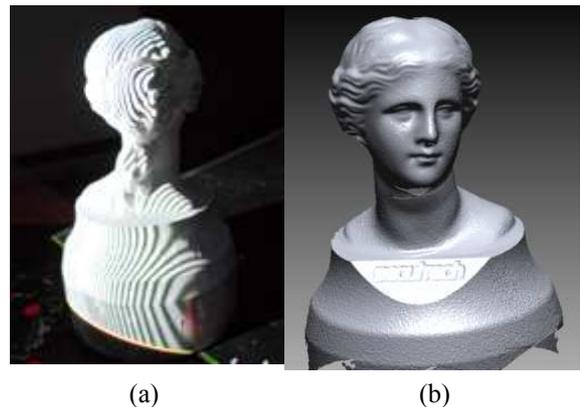


Fig. 11 Picture of scanning simulation and the result of single 3D shape data

4.2 형상 가공물을 이용한 시스템 검증

두 번째 평가방법으로, 머시닝 센터에서 가공된 금속 피측정물에 대해 적용 및 평가하는 실험을 실시하였다. Fig. 11(b)는 수집된 3 차원 형상 데이터를 배열, 합성 및 구멍채우기(fill hole) 작업까지 마친 결과를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10 은 Fig. 11 의 어깨 형상 부근 곡면을 실제 설계 곡선 값과 획득된 데이터 곡선 값과 비교한 형상오차를 그래프로 나타낸 결과이다.

이번 평가의 경우, 800 개의 직선 점군 데이터와 모델링 곡선 오차의 절대값 평균오차로써 0.051mm 를 나타내었으며, 3D 모델링 프로그램에서의 이상적인 기하곡선과 다축가공기를 통한 가공품의 공차를 고려 하였을 때, 이는 받아들여질

Table 2 3D shape data of assigned positions

$\theta \backslash \Phi$	0°	45°	90°
0°			
90°			
180°			
270°			



Fig. 12 The actual picture of this system

만한 범위라 판단된다.

Table 2 는 시스템 상에 사전에 입력된 θ 와 Φ 에 따라 정량적인 움직임으로 얻은 패치 데이터이며, 이를 자동적으로 배열, 합성 및 구멍채우기를 거치면 Fig. 11 과 같은 결과를 얻을 수 있다. (θ, Φ) = (0, 0), (90, 0), (180, 0), (270, 0)에서 획득된 데이터는 동일한 방향에서 측정된 데이터이기 때문에 중복이 되어 기존방식의 데이터에 비해 점군 데이터

Table 3 Comparison of traditional type result and spherical coordinate type result

	Traditional type	Spherical coordinate type
Elapsed time for Scanning (Approx.)	50 min.	20 min.
Number of point cloud	1,894,292	1,246,631
Number of mesh	3,772,726	2,474,344
Data volume (STL type)	270 MB	226 MB
User experience	Need to experience	Not necessary

와 메쉬가 비교적 적게 측정되는 장점을 확인할 수 있었다.^(6,7)

4.3 종래 방식의 스캐닝 데이터 및 구면좌표계식 스캐닝 데이터의 비교 분석

상용화된 기존 방식의 회전식 3D 스캐너는 회전원판에 피측정물을 올려놓고 직접 움직거나 장착된 회전 액추에이터를 구동하여 회전각도를 조절하며, 스캐너의 각도를 수동적으로 조절하며 번거로운 수작업을 통하여 진행되는 방식이며, 작업자의 숙련도에 따라 데이터의 품질결정이 되는데, 이는 기기의 교정(calibration), 스캐너와 피측정물의 배치, 주변 광량, 스캐너 소프트웨어의 설정 최적화 등의 내/외부적 요인이 존재한다.

또한, 한 컷의 3D 데이터를 획득한 후 다른 부분을 촬영할 때 카메라와 프로젝터의 초점을 매번 수동으로 재조정 해야 하는 번거로움이 있으며, 이는 일정한 품질의 데이터를 얻기 어려운 주요 원인이 되고, 포개진(manifolded) 영역이나 복잡형상에서 특정부분을 다양한 각도에서 집중적으로 촬영하여야 하므로, 이는 데이터와 촬영시간의 증가, 작업자의 실수에 의한 데이터의 부재 등이 야기된다.

뿐만 아니라, 데이터 획득 이후에 배열, 합성과 같은 후처리 작업이 필요한데, 이는 전문적인 3D 역설계 소프트웨어의 사용이 요구된다. 따라서, 위와 같은 원인들로 인해 지속적인 교육과 훈련이 요구된다.

수작업으로 후처리 작업을 하기 위해서는 많은 중복영역이 필요한데, 중복영역이 많아질수록 촬영수가 늘어나므로 측정시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 데이터 용량이 늘어나며, 후처리 작업과정에서 데이터 처리량이 많아지므로 고성능 하드웨어가 요구되며, 촬영 횟수는 피측정물의 형상 복잡도에 따라 유동적이다.

반면, 3D데이터의 후처리 과정 중 합성 작업을 수행할 때, 기구의 위치정보를 실시간으로 통신할 수 있기 때문에 이를 통해 획득된 3D 데이터를 구면 좌표상에 자동 정렬하며,⁽⁸⁾ 3차원 데이터의 경계영역 형성을 통한 패치 형태의 데이터를 적용하여 중복영역을 최소화하여⁽⁹⁾ 전체 데이터 양을 줄일 수 있었고 앵추에이터들의 정량적인 움직임으로 번거롭고 반복적인 수작업과정이 요구되지 않아 측정시간을 단축시킬 수 있는 효과가 있었다.

기본적으로 본 기구장치는 기존의 회전식 스캐너와 달리, 초기 위치가 정해져 있기 때문에 처음 한번의 스캐너기구 교정, 소프트웨어 환경설정 최적화 과정만이 요구되므로, 스캐너의 초기 측정방향 및 피측정물의 형상 복잡성에 대한 고민이 필요 없다. 작업자의 숙련도에 따른 데이터 품질에 영향을 거의 미치지 않으며, 중복영역에 대한 재촬영으로 야기되는 작업의 지연과 데이터의 중복을 감소시킬 수 있다. 숙련된 작업자에 의한 결과들과 본 개발 시스템에 대한 실험 결과값과 비교하면 Table 3 과 같다.

Fig. 11 의 피측정물을 기준으로 숙련된 작업자의 경우 기본적으로 피측정물의 제물대 원판을 30°씩 회전하였고, 불규칙적인 각도의 부분촬영을 하였으며 총 26컷을 촬영하는데 약 50분가량이 소요되었다. 이와 다르게 본 개발 시스템을 이용하여 정량적인 움직임을 통해 약 20분간 총 12컷을 촬영하였다. 이는 60% 정도의 촬영시간 감소를 나타내었다. 위의 과정을 통해 획득된 데이터를 이용하여 3차원 공간상의 점군 데이터는 숙련자의 데이터인 경우 약 190만개, 본 시스템의 경우 약 124만개로 약 34.19%의 데이터 감소량을 보였다. 메쉬(mesh)의 경우 각각 약 377만 개, 247만 개로 약 34.41% 감소함을 보였다. 이에 따른 결과로 STL 형태의 3차원 데이터는 수작업 시 270 MB, 본 시스템 이용 시 226 MB 로써, 약 16.3%의 총 데이터 감소량을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 기존 스캐닝 방식과 구면좌표

계식 스캐닝 방식의 문제점을 파악할 수 있었고 그 문제점을 해결함으로써 새로운 방식의 스캐닝 시스템을 개발할 수 있었다.

기존 스캐닝 방식의 측정 소요시간에 비해 기구적으로 측정 테이블과 측정부 자체를 자동으로 회전함으로써 측정 시 측정 장비의 조작 시간을 단축시켜 전체 측정시간을 종래에 비해 40%로 크게 단축시킬 수 있었다. 스캐너에서의 실제 데이터를 수집하는 시간이 한 컷 당 약 1 분 20 초 정도인 것을 감안하면 본 연구에서 사용된 피측정물을 기준으로 종래 방식에서 약 35 분 정도 소비되나, 구면좌표계 방식에서는 13 분 내외로 대폭 단축시킬 수 있었다.

일반적인 3 차원 스캐너를 이용하여 측정하기 어려운 각도 또한 촬영이 용이하며, 숨은(hidden) 영역을 최소화 하여 양질의 데이터를 얻을 수 있었고 작업자의 숙련도에 영향을 받지 않고 안정된 데이터를 얻을 수 있었다.

따라서, 본 개발 시스템은 기존에 비교적 촬영하기 간편한 인공치아, 산업현장에서 복잡성이 낮은 부드러운 곡면의 물체등과 같은 단순형상의 촬영에 사용되는 회전식 스캐너와 달리, 포개진 영역이 많은 복잡형상의 물건이나 파손, 훼손에 주의할 요하는 높은 가치를 지닌 행정박물 등에 사용이 가능하도록 고안되어 처음으로 적용된 자동 스캐너 장치이다.

후 기

본 연구는 행정자치부 국가기록원 행정박물 형태 및 재질에 따른 3 차원 디지털화 기술 연구 사업으로 지원된 연구입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Maeng, H. and Sung, B., 2009, "Development of 3D Measuring System for Artificial Pontic Using Spherical Coordinate System Mechanism," *Journal of the KSMTE*, Vol.19, No.4, pp.427~433.
- (2) Umeyama, S., 2001, "Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns," *IEEE Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No.4, pp. 376~380.
- (3) Stamos, I. and Allen, P. K., 2000, "3-D Model Construction Using Range and Image Data," *IEEE International Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 531~536.
- (4) Cline, A. K. and Renka, R. L., 1984, "A Storage-Efficient Method for Construction of a Thiessen Triangulation," *Rocky Mountain Journal of*

- Mathematics*, Vol. 14, Number 1.
- (5) Han, S., Lee, S., Kim, S. P., Kim, C. and Heo, J., Lee, Heebum, 2011, "A Comparison of 3D R-Tree and Octree to Index Large Point Clouds from a 3D Terrestrial Laser Scanner," *Journal of KSGPC*, Vol. 29, No. 1, pp. 36~49.
- (6) Lorensen, W. and Cline, H., 1987, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics*, Vol. 21, pp. 163~169.
- (7) Kim, E.-K., 1996, "Error Correction in Laser Scanner 3D Measurement," *IEIE*, Vol. 33, No.5, pp. 950~957.
- (8) Chu, C. W., 2006, "Implementation of 3D Structure Reconstruction System from Multiple Images," *FCV 2006*, Japan.
- (9) Choi, J. H., Son, T. G. and Lee, K., 2010, "Virtual scanning System for Accuracy Evaluation of 3D Overlapped Point-Clouds Registration Algorithm," *KSPE Spring Conference*, pp. 829~830.