

◆특집◆ 디지털 3차원 실물복제기

디지털 3차원 실물복제기 개발

장민호*, 김태완**, 정연찬***, 김동수****

Development of 3D Real Object Duplication System

Min Ho Chang*, Tae Wan Kim**, Yun Chan Chung*** and Dong Soo Kim****

Key Words : Real Object Duplication System (RODS: 실물복제기), Solid Freeform Fabrication (SFF: 임의형상제작), Selective Laser Sintering (SLS : 선택적 레이저 소결), 3D Printing (3DP: 3차원 프린팅), 3D Scanner (3차원 스캐너), Polyamide-12 (폴리아미드 12)

1. 서론

3차원 측정 시스템이 사용되었던 초창기에는 CMM (Coordinate Measurement Machine) 장비가 기술의 안정성이 뛰어나고, 접촉식 프로브(Probe)를 이용하여 형상 정보를 추출하기 때문에 고정밀도 3차원 형상 측정이 가능하다는 특징으로 역설계 (Reverse engineering)와 품질검사(Quality inspection) 분야에서 주로 사용되어 왔다. 그러나 CMM 장비에 기인하는 복잡한 형상에 대한 측정의 모호성, 접촉식으로 인한 측정 대상의 제한성 그리고 형상 측정 시 소요되는 시간적 효율 및 장비 사용의 편의성 등을 고려하기 시작하면서, 접촉식 장비보다는 광학적 장치를 이용한 비접촉식 장비로 연구 및 개발이 집중되기 시작하였다. 이러한 추세로 인해, 광학적 장치를 이용한 비접촉식 3차원 형상 측정 시스템은 급속도로 발전되어 왔으며, 불가피하게 보정되어야 했던 형상 측정 센서의 정밀도 부분에서도 접촉식 장비와 비슷한 수준의 높은 정밀도를 만족시키고 있는 실정이다. 하지만 비접촉식 3차원

형상 측정 시스템을 통해 획득한 데이터를 이용하여, 3차원 형상 모델을 생성하는 과정은 여전히 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 특히 장비 사용자의 경험적 기술력이 데이터 처리 과정에서 직접적으로 영향을 미치기 때문에 전문적으로 축적된 사용자의 노하우가 없다면 정확한 3차원 형상 모델을 얻기란 그리 쉽지 않다. 또한 특정 모델에 대해 반복적인 3차원 형상 측정이 필요할 경우, 전문가가 작업을 수행하더라도 동일 조건 및 방법으로 3차원 형상 측정 작업을 진행하기에는 어려움이 있다. 결국 이러한 경험적, 유동적 조건에 따른 3차원 형상 측정으로 인해 실물 모델과 최종 3차원 형상 모델 사이에서 오차가 발생하게 되는 것이다.

본 논문은 이러한 문제점을 해결하고자, 3차원 형상 측정 시스템에 자동화 기술을 적용한 3차원 자동 측정 시스템을 제시하고자 하였으며 독일의 기술 기준 및 규정, VDI/VDE 2634 Part II에 따른 정밀도 검사를 통해, 제작된 자동화 시스템의 정밀도 검증을 수행하고자 하였다. 또한 3차원 형상 측정 시스템을 통해 획득되는 대용량 스캔 데이터를 보다 효율적으로 관리하며 사용함으로써 기존의 스캔 데이터 처리 과정에서 발생할 수 있었던 시간적 소요 문제와 컴퓨터 사용 상의 한계를 극복할 방안을 제시하고자 하였다.

* 단국대학교 기계공학부
Email: mchang@dankook.ac.kr Tel. 031-8005-3506
** 서울대학교 조선해양공학과
*** 서울산업대학교 금형설계학과
**** 한국기계연구원 나노기계연구본부

2. 3차원 형상 모델 생성 II(제안방법)

2.1 스캔 데이터 획득

본 논문에서 제안하고자 하는 것은 3차원 형상 측정의 과정을 자동화함으로써, 사용자의 숙련도에 영향을 받지 않으며, 고정밀도의 스캔 데이터를 항상 동일한 데이터로 획득할 수 있게 하고자 하는 것이다. 또한 3차원 형상 측정 자동화에 따른 반복적 작업성을 확보함으로써, 효율적인 스캔 작업이 가능하도록 하고자 하였다. 물리적 시뮬레이션을 위해 Fig. 1, 2와 같이 두 가지 종류의 3차원 자동 측정 시스템을 제작하였다.

2.1.1 하드웨어 장비

Fig. 1은 ARX300 모델의 장비를 나타내고 있는 것으로, VDI/VDE 기준에 근거한 높은 정밀도의 고성능 3차원 측정 센서와 각 측정물에 맞게 제작되고 정밀하게 측정된 지그 시스템, 그리고 측정물이 X, Y, Z축을 기준으로 회전이 가능하며, Z 축에 따라 이송이 가능하도록 4축 구동 시스템으로 구성하였다. 따라서 복잡한 형상의 경우에도 다양한 각도에서 측정할 수 있기 때문에 최적의 측정 경로를 설정할 수 있게 하였다.

Fig. 2는 자동 측정 시스템인 ARX600 모델을 나타내고 있는 것이다. ARX600 모델 역시 측정물을 상대로 2축 회전이 가능하며 수직 방향으로의 이송이 가능하게 제작하였다. 또한 3차원 스캐너 자체적으로도 회전 및 이송이 가능하게 제작하여 다양한 각도에서 형상 측정을 할 수 있게 하였다.

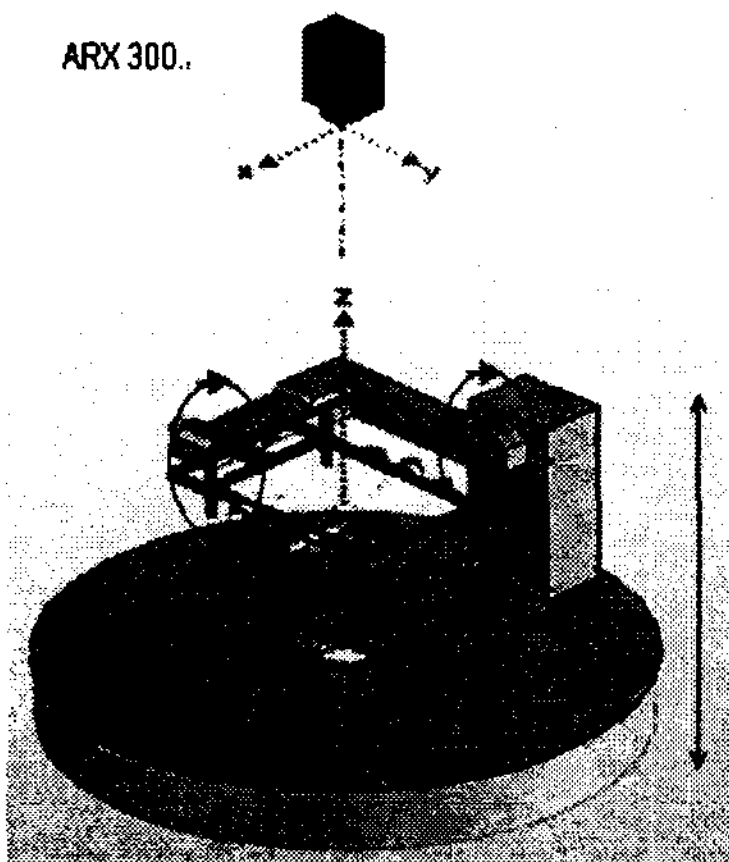


Fig. 1 Automatic Measurement System(ARX300)

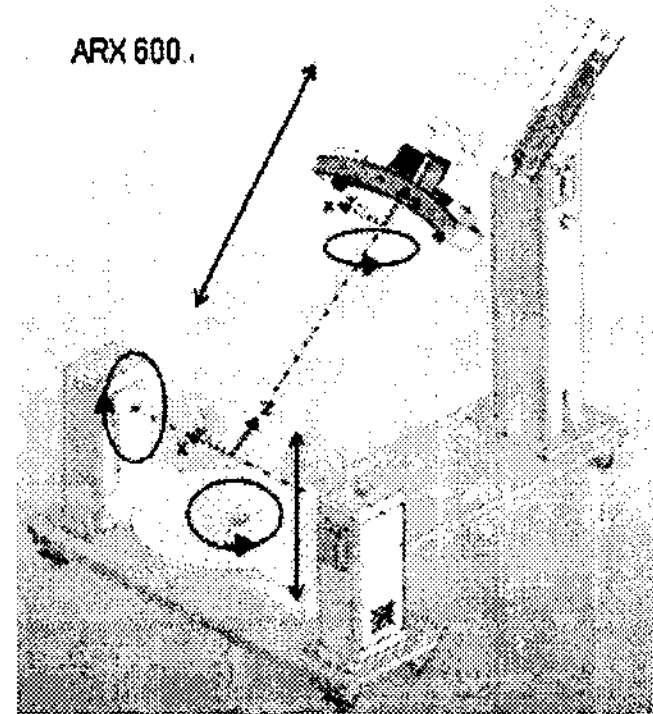


Fig. 2 Automatic Measurement System(ARX600)

2.1.2 스캔 경로 설정 및 시각적 동기화

경로 설정 편집기를 통해 원하는 위치로 측정물을 움직임으로써 측정 경로 설정을 수월하게 진행할 수 있으며, 전체적인 측정 경로를 한번의 작업으로 수행이 가능하게 하였다. 또한 특정 부품에 대해 최적 경로를 설정할 수 있게 하였으며, 미리 저장해 놓은 경로를 이용해 유사한 형상의 부품을 자동으로 측정할 수 있도록 하였다.

구동장치 부위의 위치와 움직임을 확인하고, 조종하기 위해 카메라를 통한 구동장치의 시각적 동기화를 설정하였으며, Viewing matrix를 바탕으로 한 소프트웨어적 기술을 적용함으로써 마우스를 통한 화면상의 조작으로도 편집기의 측정 경로 설정이 가능하여 최적의 경로를 설정하여 구동장치를 조종할 수 있게 하였다. 그리고 구동장치의 움직임을 계산하고 제어함으로써 소프트웨어적 센서에 의한 회전각을 정의하기 위해, 3차원 회전을 1차원 회전 각 3개로 표시하여 정해진 순서대로 회전할 수 있게 하는 방법을 채택하였다. 이러한 방법을 통해 스캔 데이터의 정렬을 위한 초기 위치의 통제가 가능하다.

Z [mm]	R1 [deg]	R2 [deg]	R3 [deg]
0	0	0	0
0	30	0	0
0	30	45	0
0	60	15	25
10	20	40	70
-10	40	-40	0
-10	10	55	5
-10	0	60	-20
-10	45	-60	-20
-25	45	-30	-50
-20	60	-20	-10
10	10	-20	-40
10	0	-20	40
10	30	20	-40

Fig. 3 Measuring path

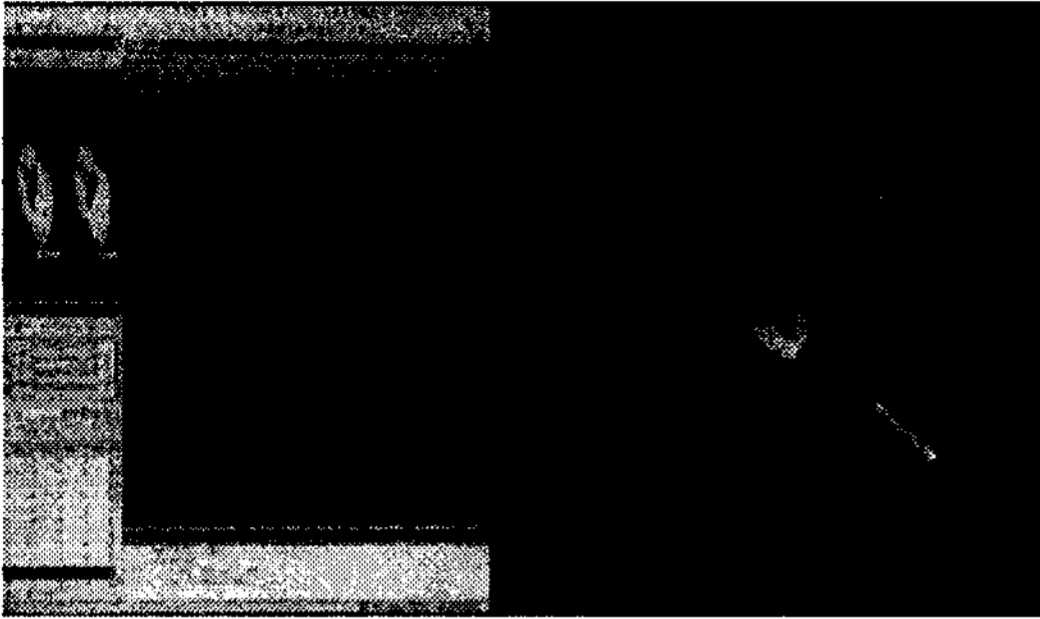


Fig. 4 Vision Synchronizing

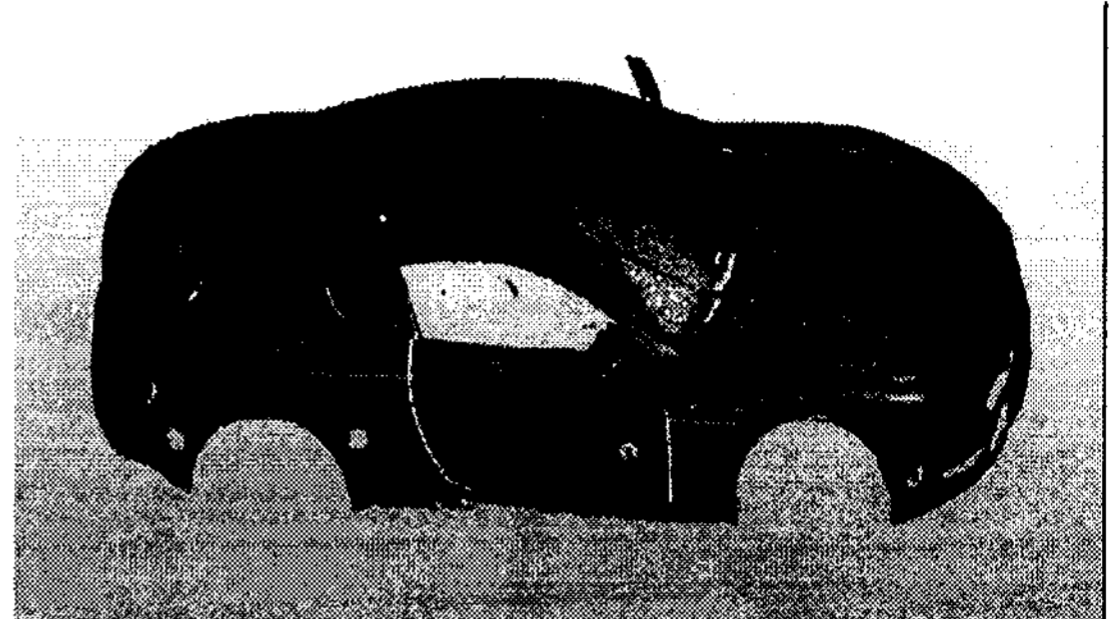


Fig. 6 Registration using ICP Algorithm

2.2 스캔 데이터의 Registration

본 논문에서는 3차원 형상 측정 시스템을 통해서 획득한 스캔 데이터를 ICP (Iterative Closet Point Set) 알고리즘과 reference targets을 사용함으로써 registration의 정밀도 향상 및 타당성을 증보할 새로운 방법을 제안하고자 한다.^{3,4} 즉, 앞서 언급하였던 ICP 알고리즘에 의한 registration 방법과 reference targets을 이용한 registration 방법을 병행하여 사용하고자 하였다. 먼저 ICP 알고리즘에 의한 방법으로 스캔 데이터 포인트 쌍에 대해 수직방향으로의 구속조건을 적용하고, 스캔 데이터의 tangent distant error와 sliding penalty rate를 최소화 함으로써 기존에 일반적으로 사용되어 온 registration 방법들보다 정밀한 registration이 가능해지도록 효과를 극대화한 방법이다.⁵ Fig. 6, 7에서 확인할 수 있듯이, 본 논문에서 제시하고 있는 병렬적 registration 방법을 사용한 스캔 데이터와 일반 ICP (Iterative Closet Point Set) 알고리즘을 사용한 결과를 비교해보면 ICP(Iterative Closet Point Set) 알고리즘을 적용한 방법보다는 두 가지 방법을 병합시켜 적용한 결과가 보다 정확하다는 것을 확인할 수 있다.

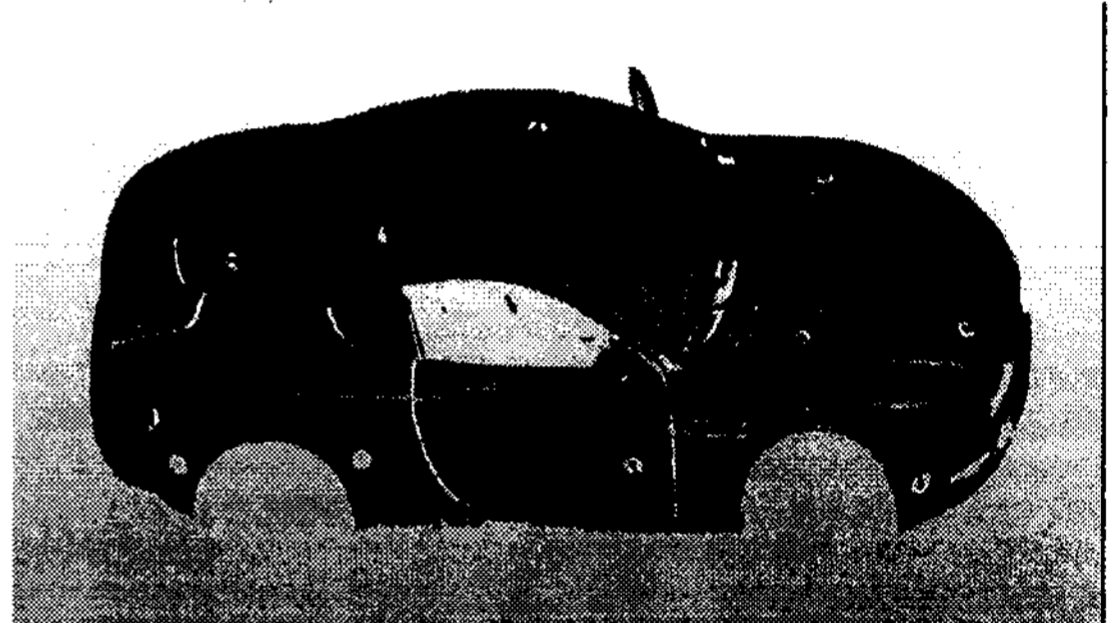


Fig. 7 Registration using suggest method

2.3 스캔 데이터를 이용한 3차원 형상 모델 생성

3차원 형상 측정 시스템을 통해 스캔 데이터를 획득할 때 일반적으로 용량이 큰 3차원 형상 스캔 데이터, 여러 개를 상대로 획득 및 후처리 과정을 거치면서 컴퓨터로 기인하는 소프트웨어적 대기 시간 낭비와 작업 진행 시 발생하는 컴퓨터 메모리상의 문제점을 해결하고자, 본 논문에서는 작업 중 직접적으로 활성화 되어있는 스캔 데이터에 RAM 메모리를 할당하고 그 외의 데이터들은 하드 드라이브(hard drive)에 저장시킴으로써 대용량 스캔 데이터에 대한 컴퓨터 사용의 한계를 극복하고자 하였다.

3. 사례연구(ARX600)

본 연구에서 제시하고 있는 3차원 자동 측정 시스템에 대해서 검증과 타당성 확보를 위해 직접적인 검사를 수행하였다. 여기서 광학적 3차원 스캐너는 Rexcan III 2.0 Mega Pixel 모델을 사용하였으며, 자동화 장치로는 ARX600 모델을 사용하였다. 또한 측정 장비의 제어 및 후처리 과정의 프로그램으로는 ezScan2006을 사용하였다.

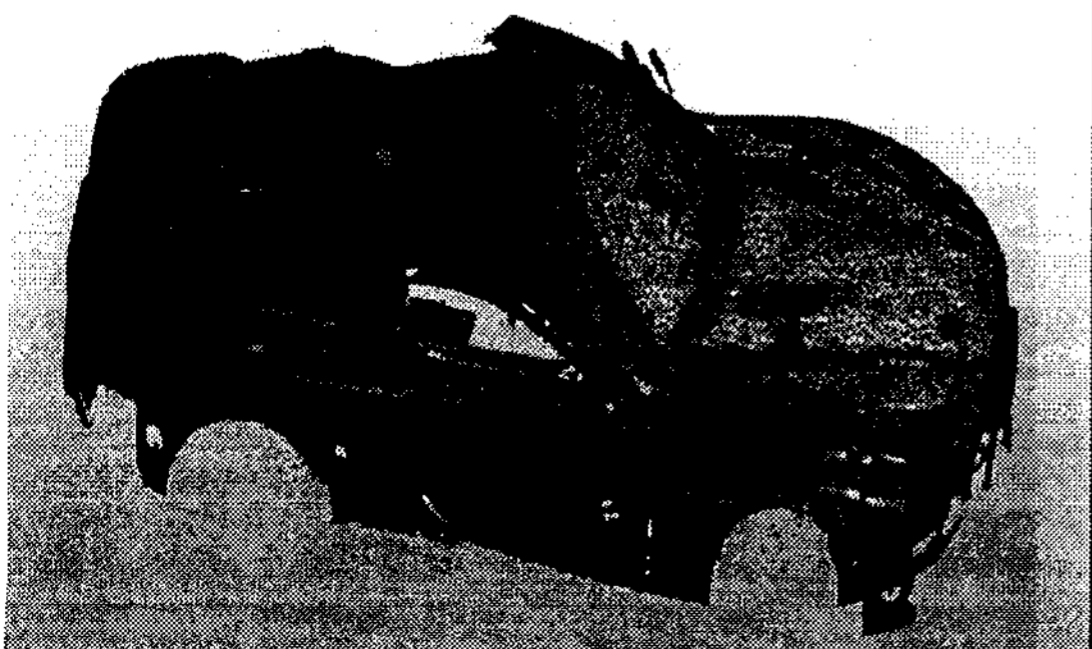


Fig. 5 Scanned patches

3.1 스캔 절차

3.1.1 스캔 데이터 획득

스캔 데이터 획득은 미리 구성되어진 120단계의 측정 경로 방향에 대해 측정물의 3차원 스캔 데이터를 획득하였다.

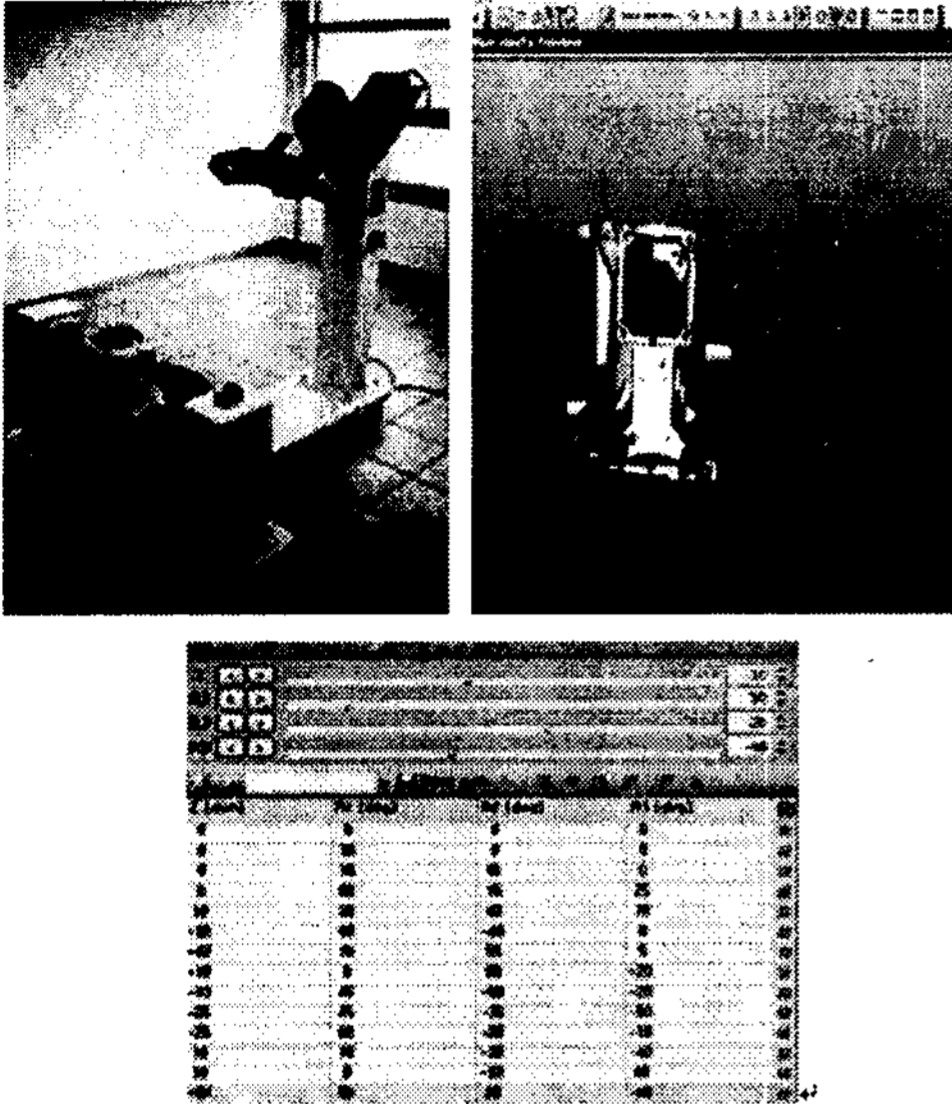


Fig. 8 Acquisition of Scan data by measuring path

3.1.2 스캔 데이터의 Registration

스캔 데이터 획득 과정에서 120단계의 측정 경로를 통해서 획득한 스캔 데이터(Patches)들은 본 논문에서 제시하고자 하는 ICP(Iterative Closet Point Set) 알고리즘과 reference targets을 사용한 방법에 의해 Fig. 9와 같은 registration 결과를 얻게 되었다.

120개의 대용량 스캔 데이터(1.02GB)들은 제안 방법을 통해 정렬 및 결합을 마치기까지 3분 정도의 시간이 소요되었다.

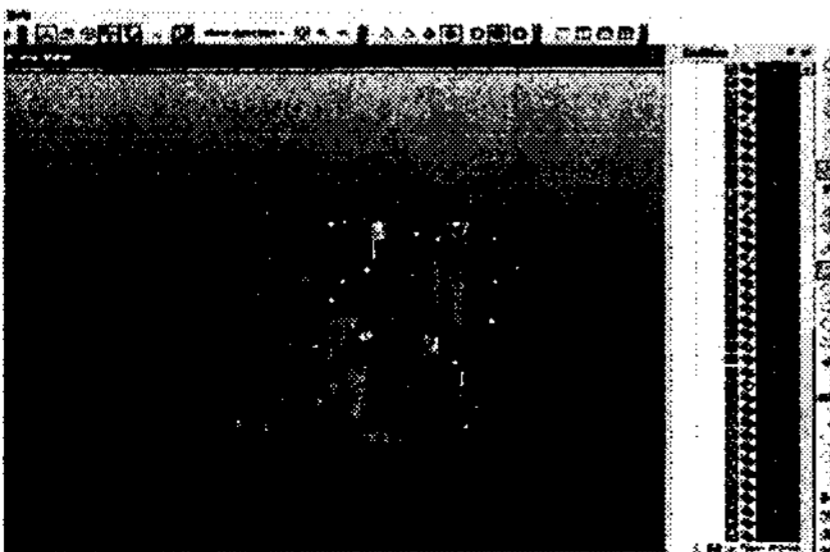


Fig. 9 Registration of 3D automatic measuring system

3.1.3 3차원 형상 모델 생성

120개의 스캔 데이터 정렬 및 결합을 마친 데이터(1.02GB)에 메쉬를 생성하여 3차원 형상 모델을 생성하는 과정은 ezScan2006 프로그램의 'large data processing mode'를 통하여 대용량의 스캔 데이터를 RAM과 하드 드라이브(hard drive)에 적절하게 할당 시키면서 데이터 처리가 되는데, 대용량 데이터의 효율적 관리를 통해 4분 안에 이 과정을 완료하였다.

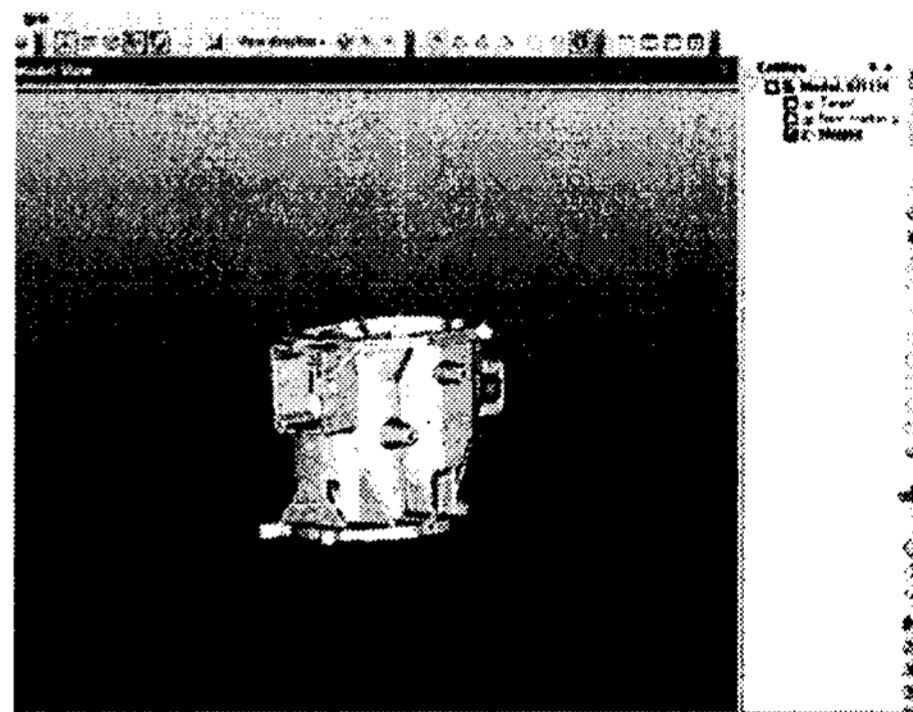


Fig. 10 Creating 3D model of large data

3.2 System Acceptance Test

독일의 기술 기준 및 규정인 VDI/VDE 2634 Part II에 따라 정밀도 검사를 수행함으로써, 제작된 3차원 자동 측정 시스템의 세부 항목별 정밀도에 대해 검증을 수행하고자 하였다. 검사 시 스캔 영역 및 측정 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Operation Mode and Conditions for test

Operation Mode and Conditions	
Scanning Volume(mm)	150 X 112.5 X 100
Temperature(°C)	22
Humidity(%)	50

3.2.1 Quality parameter probing error

Probing error는 측정 영역 내에서 일부 임의의 위치에 대한 3차원 자동 측정 시스템의 특징적인 오차를 나타낸다. 본 검사는 측정 영역 내에서 임의의 위치, 7곳으로부터 동일 구 시편에 대한 각각의 calibrated diameter와 measured diameter의 차이를 확인하여 정밀도를 검증하였다.

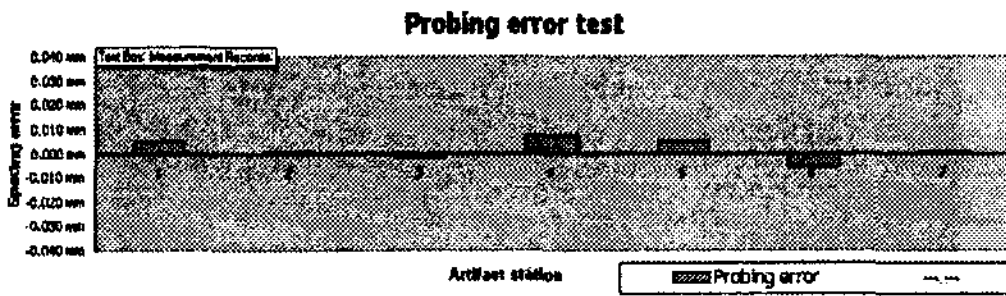


Fig. 11 Results of Probing error test

Table 2 Results of Probing error test

Object Position	Calibrated Diameter(A)	Measured Diameter(B)	Probing Error (B-A)
1	50.8mm	50.805mm	0.005mm
2	50.8mm	50.801mm	0.001mm
3	50.8mm	50.798mm	-0.002mm
4	50.8mm	50.897mm	0.007mm
5	50.8mm	50.805mm	0.005mm
6	50.8mm	50.794mm	-0.006mm
7	50.8mm	50.801mm	0.001mm

Average diameter=50.802mm
Average probing error=0.002mm

검사 결과 오차의 평균값은 2마이크로미터(μm)로 상당히 정밀한 측정 성능을 검사 결과로 확인할 수 있었다.

3.2.2 Quality parameter Sphere-spacing error

Sphere-spacing error는 스캔 영역 내의 임의적 위치, 7곳에서 두 개의 구 중심 거리에 대한 calibrated distance와 measured distance의 차이를 확인함으로써, 3차원 자동 측정 시스템의 길이 측정 정도를 검증하고자 하였다. Sphere-spacing error test 결과 역시, 평균 오차가 3마이크로미터(μm)로 고정밀 측정이 가능하다는 것을 검사를 통해서 검증할 수 있었다.

3.2.3 Quality parameter flatness measurement error

Flatness measurement error는 스캔 영역 내 임의적 위치, 6곳에서의 measured flatness와 calibrated flatness의 오차 범위를 의미한다. least-squares method에 의해 결정된 적합 평면으로부터 측정 포인트의 부호화된 거리를 나타냄으로써 3차원 자동 측정 시스템을 통해 획득된 스캔 데이터의 평탄(flatness) 정도 오차로 정밀도 검증을 수행하였다.

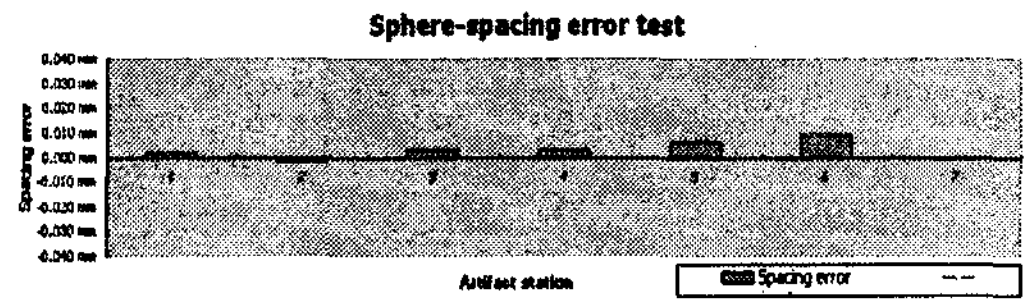


Fig. 12 Results of Sphere-spacing error test graph

Table 3 Results of Sphere-spacing error test

Object Position	Calibrated Distance(A)	Measured Distance(B)	Sphere-Spacing Error (B-A)
1	60.091mm	60.093mm	0.002mm
2	60.091mm	60.089mm	-0.002mm
3	60.091mm	60.094mm	0.003mm
4	60.091mm	60.094mm	0.003mm
5	60.091mm	60.097mm	0.006mm
6	60.091mm	60.100mm	0.009mm
7	60.091mm	60.090mm	-0.001mm

Average distance=60.094mm
Average sphere-spacing error=0.003mm

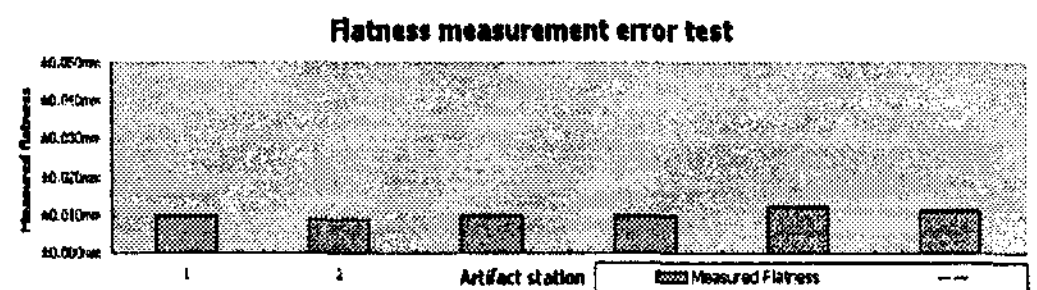


Fig. 13 Results of Flatness measurement error test

Table 4 Results of Flatness measurement error test

Object Position	Calibrated Flatness	Flatness Error(2-Sigma)
1	0.003mm	$\pm 0.010\text{mm}$
2	0.003mm	$\pm 0.009\text{mm}$
3	0.003mm	$\pm 0.010\text{mm}$
4	0.003mm	$\pm 0.010\text{mm}$
5	0.003mm	$\pm 0.010\text{mm}$
6	0.003mm	$\pm 0.012\text{mm}$
7	0.003mm	$\pm 0.011\text{mm}$

Average flatness error= $\pm 0.010\text{mm}$

3.2.4 Accuracy after merging of scan data

독일의 기술 기준 및 규정인 VDI/VDE 2634 Part II에 따른 정밀도 검사로 검증된 정밀도를 바탕으로, 획득된 스캔 데이터의 merge 단계 후의 정

밀도 역시 직접적인 검사를 통해서 검증을 수행하였다.

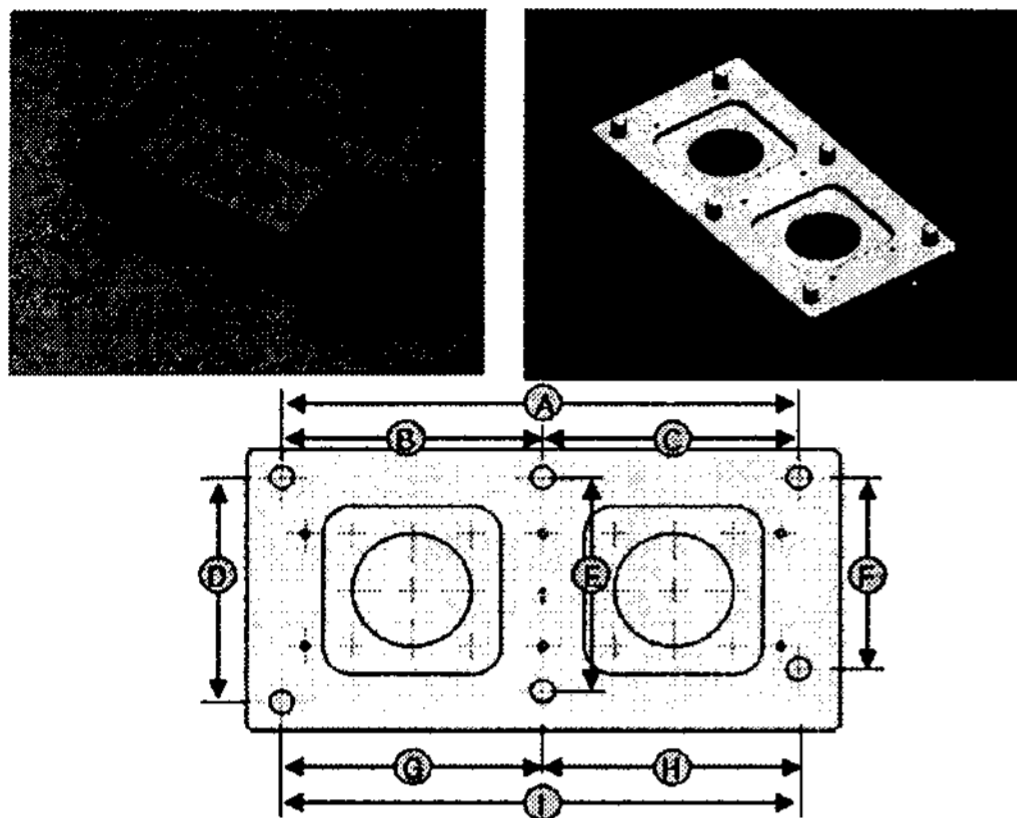


Fig. 11 Accuracy specimens after merging of scan data

Table 5는 스캔 데이터의 merge 과정 후의 정밀도 검사 결과의 일부를 나타내고 있는 것이다. 접촉식 CMM 장비와 측정 결과를 비교해 보면 평균 오차가 1마이크로미터(μm)로 상당히 정밀한 측정이 가능하다는 것을 검사를 통해 확인함으로써 본 논문에서 제시하고자 하는 3차원 자동 측정 시스템의 성능을 검증하였다.

Table 5 Results of test for accuracy after merging (mm)

ID	CMM	Rexcan	Deviation
A	87.006	87.009	0.003
B	44.000	44.001	0.001
C	43.006	43.008	0.002
D	39.981	39.979	-0.002
E	37.990	37.981	-0.009
F	33.993	33.992	-0.001
G	44.050	44.058	0.008
H	43.187	43.179	-0.008
I	82.213	82.213	0.000
Average			-0.001

4. 결론

본 논문에서는 3차원 형상 측정 시스템을 통한 스캔 데이터 획득 시 기존에 사용되었던 수동적인 방법에 의한 문제점, 즉 정형화되어 있지 않은 3차

원 형상 측정 방법과 시스템 사용자마다 달라질 수 있는 유동적 측정 조건으로 인해 3차원 형상 측정 및 스캔 데이터 처리 과정이 최종적으로 생성되는 3차원 형상 모델에 미치는 영향을 최소화하게 하고자 하였으며, 측정 경로의 설정을 통해 3차원 형상 측정의 과정을 자동화함으로써 특정 대상 및 유사 형상에 대해 측정 조건의 변화 없이 항상 동일한 데이터 획득이 가능한 반복적 측정이 가능하도록 하였다. 이때 본 논문에서 개발한 3차원 자동 측정 시스템은 독일의 기술 기준 및 규정인 VDI/VDE 2634 Part II에 따라 세부 항목별 정밀도 검사를 수행하여 검증 결과를 확인함으로써 본 시스템의 측정 성능 및 실용의 타당성을 입증하였다.

본 논문에서 제시한 3차원 자동 측정 시스템과 registration 정밀도 향상을 위해 제시한 방법, 그리고 대용량의 3차원 스캔 데이터를 효율적으로 관리하는 방법을 제시함으로써 기존의 3차원 형상 측정 시스템의 사용자가 정형화된 측정 메커니즘을 사용하여 최상의 조건을 만족하는 고정밀도 스캔 데이터 확보와 최적의 경로 설정을 통한 효과적인 스캔 데이터 획득을 구현할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. Trucco, E. and Verri, A., "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision," Prentice Hall, pp. 139-175, 1998.
2. Besl, P. and McKay, N., "A Method for Registration of 3-D Shapes," Trans. PAMI, Vol. 14, No. 2, pp. 125-130, 1992.
3. Tsai, R. Y., "A versatile camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
4. Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M., "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 10, pp. 965-980, 1992.
5. Kim, T. W., Seo, Y. H., Lee, S. C., Yang, Z. W. and Chang, M. H., "Simultaneous Registration of Multiple Range Views with Markers," CAD, pp. 336-338, 2007.