

碩士學位論文

3차원 비접촉 측정기로 얻어진
다면이미지의 자동접합 알고리즘 개발



濟州大學校 大學院

機械工學科

洪 熏 基

110.469

2000年 12月

3차원 비접촉 측정기로 얻어진 다면이미지의 자동접합 알고리즘 개발




指導教授 趙慶鎬

洪熏基

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



洪熏基의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 인 동환 
委 員 조경호 
委 員 정동원 

濟州大學校 大學院

2000年 12月

Development of An Automatic Registration Algorithm for Multi Range Images Obtained by the 3D Scanner

Hun-Ki Hong

(Supervised by Professor Kyung-Ho Cho)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2000

목 차

SUMMARY	i
I. 서 론	1
II. 3차원 자동접합 알고리즘의 개발	5
1. 개요	5
2. 자동접합 알고리즘 구현의 난해성	6
3. 알고리즘 설명	9
1) 입력 대응점을 기준으로 하는 지역 좌표계의 설정	10
2) 데이터 클리핑(data clipping)	11
3) 최적화를 위한 샘플링 데이터와 대응점들의 선정	14
4) 최적의 변환행렬 탐색	15
III. 적용 결과 및 토의	19
IV. 결론	25
부록. A - 고속가공기를 이용한 모델 제작	27
부록. B - 신속조형기술을 이용한 모델제작	31
부록. C - 변환행렬	37
1) 직선·회전이동	37
2) 원점을 지나는 임의의 축에 대한 좌표변환	38
3) 임의의 축에 대한 좌표변환	42
참고문헌	44

Summary

Reverse engineering enables us to create CAD models of new or existing products by capturing surface data fast and easily. To describe an object in the three-dimensional senses, however, the multiple range images are required in general. These multiple images are to be registered or merged properly to restore or reconstruct the measured object in the computer system. Recently, several methods to automate the registration processes have been studied and developed for the accurate reconstruction of the object in the computer system. A new registration algorithm in this research has been developed for the 3D automatic registration of the multiple range images. Our new method is similar to the iterative approaches. But we confirm that our new algorithm works more powerfully than the existing methods, when the overlapped area between images is narrow. It is due to the introduction of the local coordinate systems.

The advantages of the local coordinate systems are as follows.

1. We can eliminate the unnecessary data points effectively. So, we can reduce the calculation load in the computer system.
2. The selection of sampling points for the optimization process is easier in the local coordinate systems
3. It is easy to obtain the proper initial solution of the optimization because of the introduction of the local coordinate systems

High-speed machining has been improved significantly over the past several years. This kind of machine will be used not only in hard tooling applications but also in product development efforts. Contrary to the

traditional production methods like the CNC(Computer Numerical Control), RP(Rapid Prototyping) system generates physical object directly from the geometric data. RP and related technologies are being applied in many ways throughout the product development process. By using these technologies, we tried to machine one CAD model at the first stage into which we merged multiple range images of objects such as 'Harubang' images, human face images. Even though we can not demonstrate the efficiency of these technologies by comparing them with the existing ones, both high-speed machine and RP system will be emerging technologies. They can play promising roles in reducing the production time in the industrial world in the near future. The machined models can be seen in Appendix A and B.



I. 서 론

오늘날 수요자의 다양한 기호에 따라 제품 모델이 다양화되고 종전에 비해 훨씬 제품 형상이 복잡해지고 있다. 또한 국내외 시장에서 경쟁이 치열해지면서 제품의 개발 기간, 시작 기간의 단축이 요청되고 있으며 이에 따른 시장 도입시기를 앞당기려는 노력이 경주되고 있다. 특히 세계적으로 경쟁이 치열한 자동차, 전자 산업 등의 분야에서 빠른 제품의 시작과 생산을 위한 급형의 신속한 제작은 관련산업체의 시급한 문제로 인식되고 있다. 이처럼 시장의 요구가 복잡해지면서 제품 개발 기간을 단축시키기 위한 새로운 기술들이 요구되고 있다.

제품 개발 기간을 단축할 수 있는 기술로 동시공학(Concurrent Engineering)[1]의 개념이 도입되고 있다. 동시공학이란 개념 설계 단계에서 생산의 모든 단계를 고려하여 설계가 이루어지고, 설계가 끝이 나면 모든 단계의 준비가 동시에 이루어지는 기술로서, 생산 준비 기간 및 비용을 획기적으로 단축시킬 수 있는 기술이다. 이러한 동시공학의 기술들로는 역공학기술(Reverse Engineering)[2-7], 고속가공기술(High Speed Machine)[8-11], RP 시스템(Rapid Prototyping System)[12-17] 등이 있다.

역공학기술은 3D Scanner에서 얻어진 데이터들을 가지고 기존의 공업 제품의 CAD모델이나 이러한 제품을 바탕으로 한 새로운 CAD모델을 보다 쉽고 빠르게 제작할 수 있는 방법이다. 여러 가지 이유로 컴퓨터 모델이 존재하지 않는 기존의 제품으로부터 컴퓨터 모델을 얻을 수 있는 방법이 점점 더 많이 필요하게 되었다. 산업의 고도화에 따라서 심미적인 곡면이나 복잡한 형상을 가진 부품의 수요가 급증하고 있는 추세이다. 하지만 CAD 소프트웨어를 이용해서 이러한 복잡한 자유곡면을 생성하는 것 자체가 쉽지 않으며, 추후에 모델의 변경이 있을 경우에 더욱 큰 어려움이 따른다. 따라서 이러한 부분에 역공학 기술을 이용한다면 제품설계가 용이해질 것이다. 실제로 자동차 산업, 항공기산업, 가전산업, 신발, 장난감 등에서와 같이 미적인 형상을 요구하는 곳에서 많이 쓰이고 있는데 이러한 미적인 형상들을 진흙이나 나무로 만든 후에 3차원 스캐너를 이용하여 측정

하고 측정된 데이터를 바탕으로 설계분야에 적용시키고 있다. 금형 제작과 같은 경우는 최초 설계정보를 바탕으로 금형을 제작한 다음 실제 제품의 양산에 필요한 여러 가지 제약 사항들을 고려하여 형상이 부분적으로 바뀌게 된다. 금형과 같은 제품은 제작시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 재설계를 통해서 다른 모델을 만드는 것이 아니라 최초에 제작한 금형에 국부적으로 사상가공을 하거나 용접하는 방법을 통해서 수정하여 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 과정을 거치면서 많은 경우 최초의 설계정보는 무의미해진다. 또한 대량생산에 사용되는 금형의 경우에는 여러 개의 동일 금형을 요구하기 때문에 모두 수작업을 통해서 모두 만들어 주어야 하므로 많은 노동력과 시간이 소요된다. 이러한 경우에 역공학기술을 적용하면 변형된 금형의 형상이 반영된 새로운 CAD모델을 쉽게 재생성할 수 있으며, 이를 곧바로 이용하여 가공을 위한 NC코드를 만들 수 있다.

현재 많은 연구개발이 이루어지고 있는 고속가공기를 이용한 제품개발 또한 제품개발시간을 단축시킬 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다. 최근의 공작기계 발전동향에서 볼 수 있는 것은 절삭시간과 비절삭시간의 동시 단축을 위한 고속화 기술이다. 이 중 비절삭시간의 단축을 위한 ATC, APC 등 주변기기의 시간단축은 몇 년 전부터 급격히 발전함에 따라 이제는 거의 한계치에 도달한 것으로 보고되고 있는 반면 절삭시간 단축을 위한 주축의 고속화, 이송계의 고속화기술은 보다 치열해지는 실정이다[10-11].

RP 시스템은 새로운 제품의 원형을 보다 짧은 시간에 만들 수 있는 기술이다. 국내에서는 기존방법에 비하여 산업적으로 많이 활용되고 있지는 못하지만 점차 적용범위가 확대하려는 많은 연구와 노력이 이루어지고 있으며 전세계적으로 자동차, 전자, 항공, 중공업 등 거의 모든 제조관련분야에 걸쳐서 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 동시공학의 필수적인 기술로써 사용되고 있다.

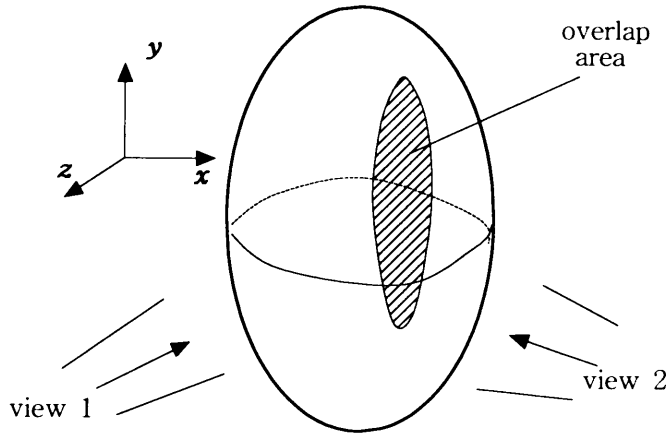


Fig. 1 Object and two different views

Fig. 1에서처럼 측정 대상이 크거나 측정 방향을 바꾸어 여러 번 측정하여야 대상물의 3차원 정보를 모두 획득할 수 있는 경우에는 여러 방향과 거리에서 측정된 데이터(multiple range images)가 존재한다. 3차원 데이터의 자동 정합 혹은 접합(automatic 3D registration)이라 함은 여러 방향에서 얻어진 데이터들을 자동으로 접합하여 원래 대상물의 3차원 형상을 복원하는 기술을 의미한다. 이때 접합이 될 부분은 어느 정도 중복되어 측정되어야 한다. 따라서, 보다 구체적으로 말하면, 3차원 데이터의 접합작업은 이러한 중복 측정영역이 상호 일치하도록 측정 데이터를 이동하여 합체하는 작업이라 할 수 있다.

3차원 접합에 관한 연구는 3차원 비접촉 측정기술의 발달과 더불어 1990년도 초·중반부터 활발히 진행되고 있다. 기존의 3차원 자동 접합에 관한 연구는 크게 나누어 반복적 접근법(iterative approach)[18-21]과 특징형상에 근거한 방법(feature-based approach)으로 대별할 수 있다. 반복법의 가장 대표적이고 현재 널리 사용되는 방법으로는 Besl and McKay[19]가 제안하고 Chen and Medioni[20]와 그 외의 여러 연구자들[23-24]에 의해서 개선된 ICP법(iterative closest point algorithm)이 있다. 이 방법에서는 알고리즘에서 특별히 설정된 여러 개의 기준점들 상호간의 거리의 최소오차자승합(sum of least squared errors)을 최소화하는 방향으로 반복적으로 접합을 위한 변환행렬을 탐색하는 방법이다. 이 방법은 초기해가 양호할 경우에는 매우 효과적으로 최적의 변환행렬을 탐색하지만, 그렇

지 못할 경우에는 국지해에 빠져 접합결과가 불량해지는 문제점이 있다[25].

특징형상에 근거한 접합방법[26-29]들은 대부분 기존의 컴퓨터 비전 등의 분야에서 많이 연구되어 왔던 물체인식(object or pattern recognition)과 매칭(matching) 기술을 3차원 측정 데이터의 접합에 사용하고자 하는 방법들이다. 이러한 방법에서는 기본적으로 초기해를 사용하지 않는다는 장점이 있지만, 일반적으로 위의 반복법 보다 훨씬 많은 처리시간을 요하고 확연한 특징형상이 없는 경우에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다[25].

본 연구에서는 3차원 측정 데이터를 자동 접합하는 새로운 방법을 개발하여 실제로 측정된 데이터의 접합에 적용하여 그 작동성능을 검토하였다. 새로 개발된 방법은 위의 분류상으로 볼 때 반복적 접합법에 속하지만, 기존의 반복법이 갖는 몇 가지의 문제점을 해결할 수 있는 실험적 결과를 확인하였다. 그리고 3D Scanner에서 측정된 데이터를 Delcam사의 Copycad 프로그램을 이용하여 3차원 형상 데이터로 변환하고 이를 고속가공기(하림기공 HR600)와 RP System (ModelMaker II, Z402)을 이용하여 측정된 모델을 제작하였다.



II. 3차원 자동접합 알고리즘의 개발

1. 개요

앞에서 언급되었던 바와같이 3차원 비접촉 측정자료의 자동접합과 관련하여 현재까지 개발된 방법 중에서 가장 널리 사용되는 반복법에서는 사용자의 초기 입력치를 바탕으로 초기 변환행렬을 가정하고 적절하게 설계된 최적화기법을 사용하여 설정된 목적함수를 감소시키는 방향으로 변환행렬을 반복적으로 개선시켜 최종적으로 수렴된 변환행렬을 얻는다.

본 연구에서는 비교적 수행시간이 짧아 실용화에 용이한 반복적 접근법으로 분류될 수 있는 새로운 자동접합 방법을 개발하였다. 이 방법에서는 기존의 유사 방법에 비하여 다음과 같은 차이점을 가진다.

- (1) 기존의 방법에서는 초기 변환행렬을 구하기 위해서 사용자로부터 최소한 3쌍 이상의 대응점을 입력받아야 하였으나(일반적으로 가능한 여러 개의 대응점을 입력할수록 좋은 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있음), 본 연구에서 개발된 방법에서는 사용자가 2쌍의 대응점만을 입력한다.
- (2) 기존 방법에서는 사용자가 대응점들을 입력할 때, 대응점들 간에 오차가 크면 클수록 접합결과는 부정확해지는 문제가 있다. 이에 따라, 사용자는 대응점의 선정에 각별한 주의를 요하고, 상황에 따라서는 여러 번의 시행착오를 거쳐야 만족스러운 접합결과를 얻을 수 있다.
- (3) 본 연구에서 개발된 방법에서는 2쌍의 대응점 상호간의 오차가 접합결과에 미치는 영향이 기존 방법에 비하여 크게 완화되어 있어서, 대응점 선정에 각별한 노력을 요하지 않는다.

2. 자동접합 알고리즘 구현의 난해성

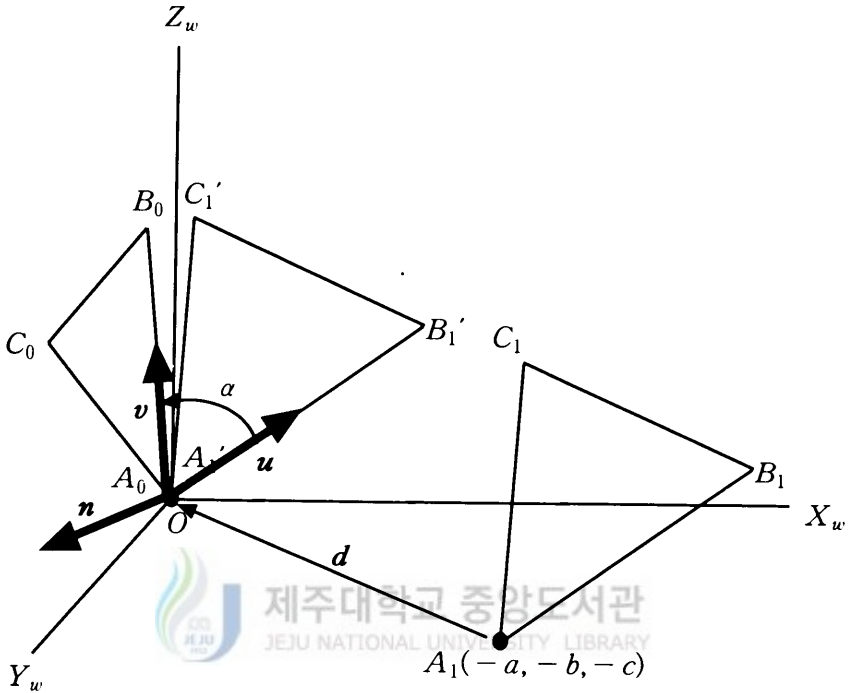


Fig. 2 Translation and rotation of two triangle

자동접합 문제를 단순화시켜서 3차원 공간상에서 같은 크기, 같은 변의 길이를 갖는 삼각형 $\triangle A_0B_0C_0$ 와 $\triangle A_1B_1C_1$ 를 자동접합하는 경우를 생각해 보자. $\triangle A_0B_0C_0$ 의 점 A_0 는 원점에 위치해 있다. 우선 삼각형 $\triangle A_1B_1C_1$ 의 점 A_1 와 $\triangle A_0B_0C_0$ 의 점 A_0 가 원점에 만나도록 $\triangle A_1B_1C_1$ 를 (a, b, c) 만큼 이동시킨다. (수식에 대한 자세한 내용은 부록. C 참조)

$$\mathbf{d} = A_0 - A_1 = [a \ b \ c] \quad (1)$$

$$[X_1' \ Y_1' \ Z_1' \ 1]^T = \text{Trans}(a, b, c) \cdot [X_1 \ Y_1 \ Z_1 \ 1]^T \quad (2)$$

(a, b, c)만큼 A_1 을 이동시킨 후, $\overline{A_1'B_1'}$ 가 $\overline{A_1B_1}$ 와 일치되도록 하기 위해서 $\overline{A_1'B_1'}$ 를 평면 $A_0B_1'B_0$ 에 수직인 \mathbf{n} 축에 대하여 α 만큼 회전 이동시켜 보자. α 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \frac{B_1' - A_1'}{|B_1' - A_1'|}, \quad \mathbf{v} = \frac{B_0 - A_0}{|B_0 - A_0|}, \quad \mathbf{n} = \frac{\mathbf{u} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{u} \times \mathbf{v}|} \quad (3)$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \cos \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \cos^{-1}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}) \quad (5)$$

식 (2)에서 \mathbf{n} 축에 대하여 α 값만큼 $\overline{A_1'B_1'}$ 를 이동시키면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.



$$[X_1' \ Y_1' \ Z_1' \ 1]^T = Rot(\mathbf{n}, \alpha) \cdot Trans(a, b, c) \cdot [X_1 \ Y_1 \ Z_1 \ 1]^T \quad (6)$$

Fig. 3에서처럼 \mathbf{n}_1 는 $\triangle A_0B_0C_0$ 에 대한 법선벡터이고, \mathbf{n}_2 는 $\triangle A_1''B_1''C_1''$ 에 대한 법선벡터이다.

\mathbf{v} 축에 대해서 $\triangle A_1''B_1''C_1''$ 를 β 만큼 회전이동하면 $\triangle A_0B_0C_0$ 와 완전히 일치하게 된다.

식 (3)의 식들로부터 β 는 다음과 같이 구해진다.

$$\beta = \cos^{-1}(\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) \quad (7)$$

식 (6)에서 \mathbf{v} 축에 대해서 β 만큼 회전 이동시키면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$[X_1' \ Y_1' \ Z_1' \ 1]^T = Rot(\mathbf{v}, \beta) \cdot Rot(\mathbf{n}, \alpha) \cdot Trans(a, b, c) \cdot [X_1 \ Y_1 \ Z_1 \ 1]^T \quad (8)$$

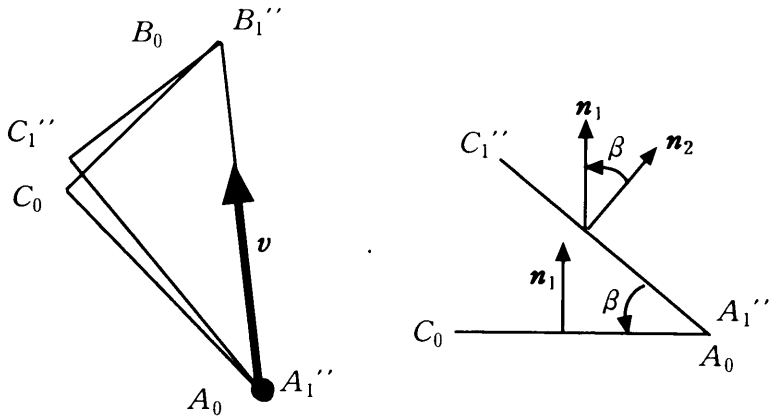


Fig. 3 Rotation for \mathbf{v} axis

앞에서의 경우처럼 같은 크기, 같은 변의 길이를 갖는 삼각형들을 자동접합하는 경우는 수학적으로 손쉽게 풀이가 가능하다. 그러나 본 연구에서 두 개의 방향에서 측정된 물체의 점 데이터를 접합시키기 위하여 사용자가 입력한 두 쌍의 대응점을 이용한다. 이 두 쌍의 대응점들은 서로 정확하게 일치하는 것이 아니므로 오차가 생기는데 이러한 오차가 크면 클수록 접합결과는 부정확해지는 문제점이 있다. 그리고 Fig. 4에서처럼 중복영역이 작은 경우에 일반적으로 세 쌍 이상의 대응점으로도 양호한 초기해를 얻기가 어렵다. 따라서 효과적으로 변환행렬을 탐색하지 못하고 국지해에 빠져 접합결과가 불량해지는 문제점이 있다.

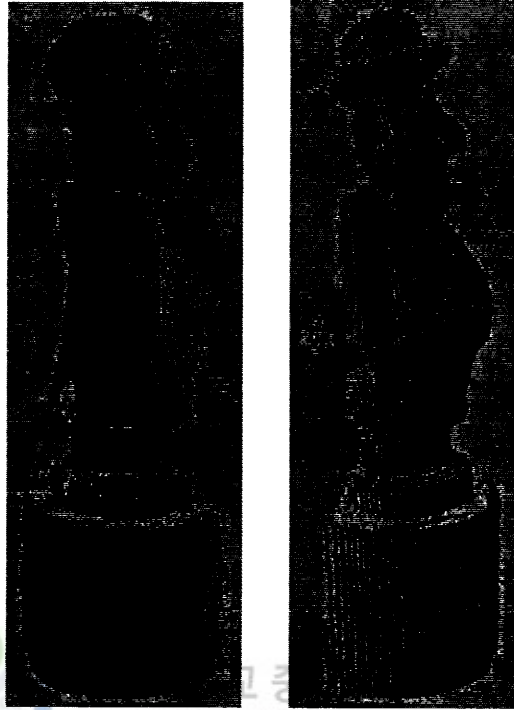


Fig. 4 Two range images with a narrow overlapped areas

3. 알고리즘 설명

두 개의 방향에서 측정된 물체의 데이터를 접합시키기 위하여 일반적으로 두 개의 측정 데이터 중에서 하나를 기준 이미지 데이터(reference data)라 하여 고정하고 나머지 데이터를 이에 접합시키기 위한 변환행렬을 구해 가는 방식을 취한다. 본 연구에서도 이와 같은 방법으로 변환행렬을 구한다. 다음은 본 연구에서 개발된 새로운 접합방법에 대한 설명이다.

기준 이미지의 측정데이터를 Q_j ($j=1, 2, \dots, jMax$) 이라 하고 이동시키고

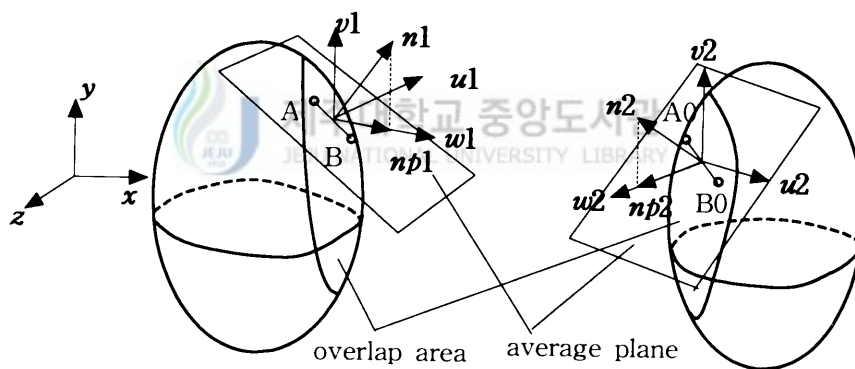
자 하는 이미지의 측정데이터를 P_i ($i=1,2,\dots,iMax$) 이라고 하면, 본 연구에서 제안하는 방법에서는 다음 조건을 만족하도록 Q_j 위의 두 점 A, B 와 P_i 위의 두 점 A_0, B_0 를 입력하여야 한다. 즉 대응점 A, B 와 A_0, B_0 들은 중복 측정영역에서 곡률 변화가 급격하거나 잡음이 많은 지역을 피하여 선정되어야 한다. 이렇게 입력된 2쌍의 대응점을 바탕으로 다음의 방법으로 지역 좌표계를 Q_j, P_i 데이터 집합에 대하여 설정한다.

1) 입력 대응점을 기준으로 하는 지역 좌표계의 설정

다음의 2)~4)항의 과정에서 필요로 하는 샘플링 점들을 중첩영역의 일부에서만 선정하면 최적 변환행렬의 탐색과정이 국지해에 빠질 위험이 크다. 다시 말해서, 가능한 전체 중첩영역에 골고루 분포하도록 샘플링 점들을 선정하는 것이 바람직하다. 따라서, 본 연구에서 도입하고자 하는 지역 좌표계의 의미는 중첩영역에서 가능한 넓게 분포하도록 하고, 불필요한 데이터의 제거를 효율적으로 하고자 함에 있다. 이를 위한 구체적인 방법은 다음과 같다. Fig. 5는 Fig. 1의 두 측정 방향에서 얻어진 다면 이미지들을 나타낸다. 본 연구에서는 이들 이미지에 다음과 같은 방법으로 지역 좌표계를 설정한다.

- (1) 점 A 로부터 반경(=5) 이내에 있는 Q_j 의 점들의 집합을 A 의 이웃점들이라 하여 $Anei$ 으로 표기한다. 같은 방법으로 구한 점 B 의 이웃점들을 $Bnei$ 라 한다.
- (2) $Anei$ 및 $Bnei$ 의 모든 점들에 대하여 공간상의 임의의 평면까지의 거리의 총합을 최소화하는 평면을 구하여 이를 $Anei$ 및 $Bnei$ 의 평균평면이라 한다(Fig. 5 참조). 이때 r 의 크기에 따라 평균평면의 계산부하는 변한다. 그러나 r 이 너무 작으면 평균평면의 계산은 빠르나 평균평면이 중첩 영역을 전체적으로 조망하는 정보의 신뢰도는 저하될 수 있음에 유의해야 한다. 즉 r 이 작을 경우 A, B 의 이웃점 중 특이점, 예컨대 잡음이 큰 점들 혹은 곡률 변화가 큰 점들의 영향을 크게 받아 평균평면의 방향이 바뀔 가능성이 크기 때문이다.

- (3) 위에서 구한 평균평면의 법선벡터를 전역좌표계의 $x-z$ 평면에 투사하여 얻은 벡터를 np 라 한다. 만약 np 의 z 방향 성분이 음이면 np 의 방향을 역전시킨다.
- (4) Q_i 의 지역 좌표계를 lcQ(local coordinate system of Q)라 하면, lcQ의 원점은 두 점 A, B의 중점에 위치하고 lcQ의 양의 w 축을 np 의 방향과 일치시킨다. lcQ의 v 축을 전역좌표계의 y 축과 일치시킨다. 이렇게 하면, lcQ의 y 축은 v , w 축과 더불어 오른손 좌표계가 되도록 자동적으로 설정된다.
- (5) 이동시키고자 하는 데이터 P_i 에 대한 지역 좌표계 lcP(local coordinate system of P)의 설정도 앞서와 같은 방법으로 한다.



(a) reference image (view 1) (b) moving image (view 2)

Fig. 5. Reference and moving images & their local coordinates

2) 데이터 클리핑(data clipping)

원래의 측정 데이터의 양 Np , Nq 은 측정 기기의 분해능에 따라서 조금씩 다르지만 일반적으로 수만 단위의 측정점에 대한 3차원 공간 좌표값으로 그 크기가 매우 크다. 따라서, 본 연구에서는 변환행렬을 구하는 과정에서 이렇게 방대한 데이터를 모두 사용하지 않고 필요한 데이터만 선택하여 사용함으로써 전체 처리과정의 효율을 증진토록 하였다. 이를 위한 방법은 다음과 같다.

(1) 위의 1)항에서와 같이 설정된 지역 좌표계 lcQ , lcP 로 측정 데이터 Q_j , P_i 를 모두 좌표변환 시킨 것을 각각 QQ_j , PP_i 라 하자.

(2) QQ_j 를 둘러싸는 최소의 직사각형을 구한다. 이 직사각형의 각 면은 lcQ 지역 좌표계의 $u-v$, $v-w$, $w-u$ 평면과 평행하다. 이 직사각형은 차후의 최적화 과정에서 필요로 하는 여러 연산(예컨대, 데이터 샘플 등)에서 다루어지는 데이터들의 한계 영역을 표시하는데 사용 될 것이기 때문에 $spzQ$ (sampling zone of Q)라 칭한다. $spzQ$ 의 w 상·하한 값에서 w 의 하한 값을 지정된 상수 cf (clipping factor, 0.2~0.3)로 재설정한다 (Fig. 6 참조). 즉, $spzQ_min_w = cf \times spzQ_min_w$ 로 한다.

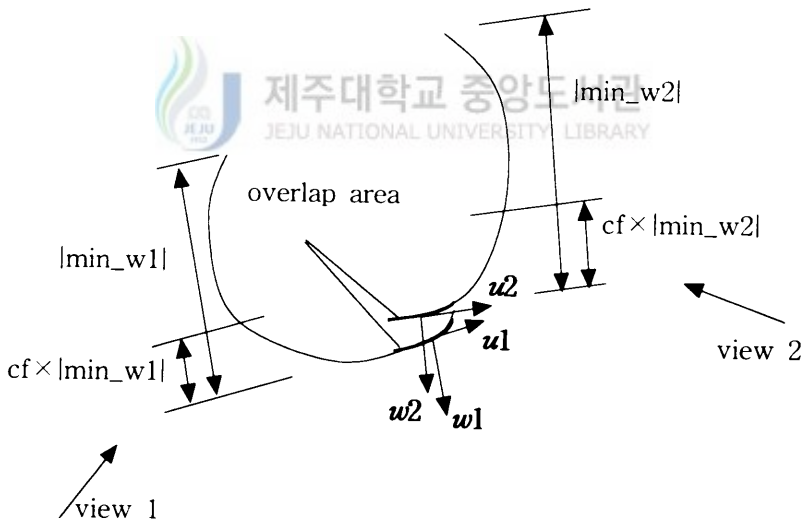


Fig. 6 Top view of local coordinates and clipping ranges

(3) QQ_j 중에서 $spzQ$ 밖의 점들은 버리고 내부의 점들만을 모은 것을 $QCP_m (m=1, 2, \dots, M)$ 라 한다

(4) 같은 방법으로 PP_i 에 대한 $spzP$ (sampling zone of P)를 구하고 $spzP$ 의 w

의 하한값을 지정된 상수 cf 로 재설정하여 $spzP$ 내부의 점들만을 모은 것을 $PCP_n(n=1,2,\dots,N)$ 라 한다.

여기서, w 축의 하한 값을 재설정하여 클리핑영역의 경계로 하는 이유는 다음과 같다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 $w>0$ 인 영역의 측정 데이터들의 상당 부분은 중복 측정영역에 포함되지만 초기 입력 대응점 2쌍 만으로는 이들 중 불필요한 영역을 추정할 수 있는 정보가 거의 없다. 또한 $w>0$ 의 상당 부분은 중첩영역에 해당한다. 따라서, $w>0$ 영역에 대하여는 클리핑하지 않는다. 그러나 $w<0$ 의 영역에서는 측정점의 w 값이 작아질수록 측정기에서 볼 때 물체 뒤로 돌아가는 영역에 해당하고, 이들 중 상당부분은 중첩영역의 w 값 보다 훨씬 작은 값을 가진다. 즉, w 값이 작아질수록 해당 측정점은 중첩영역에 포함될 가능성이 낮아진다. 본 연구에서는 이러한 점들을 차후의 처리과정에서 불필요한 점들이라고 하여 제거시킨다.

Fig. 7은 실제의 비접촉 측정으로 얻은 이미지(검은 색)와 그림에 표시된 것처럼 A , B 및 A_0 , B_0 입력점들을 기준으로 설정된 지역 좌표계에서 앞에서 기술된 방법으로 측정 데이터를 클리핑한 후의 결과(흰색)를 보이는 것이다. 본 연구에서는 u , v 방향으로는 클리핑 경계를 명시적으로 설정하지는 않는다. 그러나, Fig. 7에서 보는 바와 같이 w 방향의 클리핑만으로는 u , v 방향의 불필요한 측정 데이터가 동시에 제거되는 효과가 있음을 알 수 있다.

- (1) 이상의 방법으로 얻어진 데이터 QCP_m, PCP_n 들은 모두 각각의 지역 좌표계 lcQ , lcP 로 표현된 측정 데이터의 부분집합들로서 다음과 같은 장점을 준다.
- (2) 처리과정에서 불필요한 데이터를 제외시킴으로써 전체 처리과정의 계산부하를 대폭 감소시킨다.
- (3) 지역 좌표계로 표현된 이들 점들은 다음의 다 항에서 기술될 샘플링 데이터

와 대응점 선정과정을 용이하게 할 뿐만 아니라,

(4) 다음의 4)항에서 기술되는 최적화 과정의 적절한 초기해가 된다.

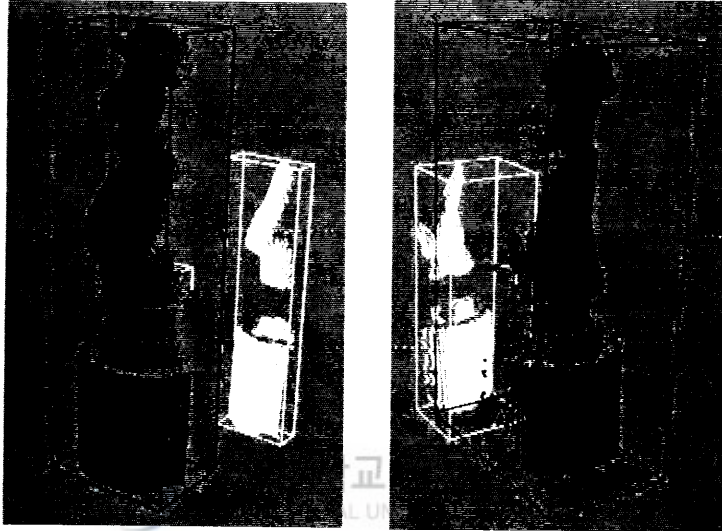


Fig. 7 Measured images(black) and their clipped images(white) for an object

3) 최적화를 위한 샘플링 데이터와 대응점들의 선정

다음의 4)항에서 상술될 최적화 과정에서 필요로 하는 샘플링 데이터와 이들에 대응하는 대응점들을 다음과 같은 방법으로 선정한다.

- (1) lcP 지역 좌표계의 $u-v$ 평면 중 $spzP$ 에 속하는 영역을 일정 간격으로 분할하는 격자를 $u-v$ 평면에 생성한다.
- (2) PCP_n 점들을 $u-v$ 평면으로 투영시킬 때 위의 각 격자점들에 가장 가깝게 투영되는 PCP_n 의 점들을 샘플링 점 SP_l ($l=1, 2, \dots, N_s$)라 한다.

(3) QCP_m 의 점들 중에서 각 SP_i 에 (지정된 최대 거리 이내에서) 가장 가까운 점들을 SP_i 의 대응점 CP_i 라 한다. 이때 지정된 최대거리 이내의 점이 QCP_m 중에 존재하지 않을 수도 있다. 이 경우에는 해당 샘플링점을 SP_i 리스트에서 삭제한다.

4) 최적의 변환행렬 탐색

P_i , Q_j 사이의 일부 중복 영역이 일치하도록 P_i 를 이동하고자 하는 것이 3차원 측정 데이터 자동 접합의 궁극적 목적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 위의 CP_i , SP_i 만을 이용하여 지역 좌표계에서 수행되는 다음과 같은 반복적 최적해 탐색방법을 사용한다.

(1) 최적화 변수



제주대학교 중앙도서관
NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\begin{aligned}
 X^T &= \{ x_1, x_2, \dots, x_6 \} \\
 &= \{ tu, tv, tw, ru, rv, rw \}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서, tu, tv, tw 는 각각 지역 좌표계 u, v, w 방향으로 점 SP_i 을 병진 이동시키고자 하는 값이고, ru, rv, rw 는 각각 u, v, w 축을 중심으로 SP_i 를 회전이동 시키고자 하는 값이다.

$$(2) \text{ 초기해 : } X^0 = \{ 0, 0, 0, 0, 0, 0 \} \tag{10}$$

사용자가 지정한 두 쌍의 입력점을 바탕으로 초기해의 독립변수들의 값을 모두 0으로 초기화한다.

(3) 최적화의 목적함수

변환행렬을 탐색할 탐색하기 위해서 알고리즘에서 특별히 설정된 여러 개의 기준 점들 상호간의 거리의 오차자승합으로 표현되는 목적함수는 다음과 같다.

$$\Phi(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{e} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_s} e_i^2 \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{e}^T = \{ e_1, e_2, \dots, e_{N_s} \}$ 이고, $e_i = |\overline{CP}_i - T(\mathbf{X}) * \overline{SP}_i|$ 는 두 점 사이의 거리이고, $T(\mathbf{X})$ 는 최적화 변수 \mathbf{X} 에 따른 변환행렬이다.

(4) 반복적인 수치해 탐색

목적함수의 극값($\Phi'(\mathbf{X}^k) \neq 0$)이 0이 아닌 현재의 해에서 \mathbf{X}^k 에서 $\Delta \mathbf{X}$ 만큼 변화시켜 $\Phi'(\mathbf{X}^{k+1})$ 가 최소값(극값)이 되도록 반복해서 최적화 변수를 탐색한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^{k+1} &= \mathbf{X}^k + \Delta \mathbf{X} \\ \Phi'(\mathbf{X}^{k+1}) &= 0 \\ &\approx \Phi'(\mathbf{X}^k) + \Phi''(\mathbf{X}^k) \Delta \mathbf{X} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)는 $\Phi'(\mathbf{X}^{k+1})$ 를 테일러 급수의 1차항까지 전개한 것이다.

여기서, k 는 반복횟수이다.

식 (11)을 미분하면 다음과 같다.

$$\Phi'(\mathbf{X}) = \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial \mathbf{e}^T}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{e} = \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (13)$$

여기서, $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{X}}$ 를 자코비안 행렬이다.

$\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J} \approx \Phi''(\mathbf{X})$ 를 헤시안 행렬이라고 하여 식 (12)를 다시 쓰면,

$$H\Delta X = -J^T e \quad (14)$$

$$H\Delta X = B \quad (15)$$

여기서, $B = [b_i] = -J^T e$ 이다.

$$\therefore \Delta X = -H^{-1}B \quad (16)$$

그러나, H 가 ill-posed 행렬일 때는 H^{-1} 가 부정확하게 계산되기 때문에 이러한 상황에서는 식 (15)의 해를 식 (16)처럼 단순히 계산할 수 없다.

본 연구에서는 식 (15)를 다음과 같은 방법으로 스케일링하고 부정치성 (ill-posedness) 개선을 위해서 일반화 방법의 하나인 Marquardt conditioning 법[25]을 적용하여 수렴성을 향상시키도록 하였다. 즉, 식 (15)를 스케일링하여 다음과 같이 바꾼다.

$$H^* \Delta X = B^* \quad (17)$$

여기서, 스케일링한 헤시안 행렬은 $H^* = [h_{ij}^*]$, $h_{ij}^* = h_{ij}/s_i$ 이고, $s_i = |h_{ii}|$

$H = [h_{ij}]$, $B^* = [b_i^*]$, $b_i^* = b_i/s_i$ 이다. 또한, Marquardt conditioning을 적용하여 식 (17)을 다음과 같이 수정하여 사용한다. 즉,

$$H^{**} \Delta X = B^* \quad (18)$$

여기서, $H^{**} = [h_{ij}^{**}]$, $h_{ii}^{**} = h_{ii}^{**}(1 + \lambda)$, $h_{ij}^{**} = h_{ij}^{**}$, $i \neq j$, $\lambda = 10^{-20} \sim 10^{-30}$

Marquardt법에서의 해의 개선은 다음과 같이 한다.

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \alpha \Delta \mathbf{X}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (19)$$

여기서, α 는 step size correction factor 이다. λ 의 도입 의의는 λ 가 작아질수록 식 (18)은 식 (17)의 대각선 요소의 효과를 크게 하고자 함에 있다. 따라서, well-posed 상황에서는 λ 의 값을 작게 하고, ill-posed 상황에서는 λ 의 값을 크게 하도록 α 와 연계하여 매 iteration 마다 λ 값을 적절한 수치로 변화시켜 사용한다[25].

식 (19)에서 $|\Delta \mathbf{X}| < \varepsilon$ 이면 $\mathbf{X}^* = \mathbf{X}^k$ 가 수렴된 해이고, 아니면 k 를 1씩 증가시키며 위의 과정을 수렴될 때까지 반복한다.

수렴된 변환행렬 $T(\mathbf{X}^*)$ 는 지역 좌표계에서 SP_i 을 CP_i 에 가능한 일치하도록 이동시키는 변환행렬이다. 이를 바탕으로 P_i 를 이동하여 기준 이미지 Q_j 와 접합하기 위한 최종작업은 다음과 같이 수행된다. 즉, 모든 PP_i 의 점에 $T(\mathbf{X}^*)$ 를 적용하여 QQ_j 에 가깝게 이동한 뒤에 지역 좌표계 lcQ 와 전역좌표계 사이의 관계를 이용하여 모든 PP_i 의 점들을 전역 좌표계로 변환한 것이 Q_j 와 접합하기 위하여 P_i 를 이동한 최종결과에 해당된다.

III. 적용 결과 및 토의

본 연구에서 새로이 개발된 3차원 측정 데이터의 자동접합 알고리즘을 테스트하기 위하여 몇 가지의 측정실험과 측정 데이터의 접합시험을 수행하였다. Fig. 8는 본 연구실에 설치되어 있는 3차원 비접촉 측정장비를 사용하여 측정된 하루방 모형의 다면 이미지들이다. 사용된 측정장비는 모아레 간섭무늬(3D moire inter-ferometric fringe scanner)를 이용한 비접촉 측정법을 사용한다. 이 장비의 해상도는 640×480 dpi, 정밀도는 0.2mm, 측정시간은 5-10 sec/image, 측정영역은 $250 \times 180 \times 150$ mm이다.

Fig. 8의 상단 좌로부터 하루방의 좌측면1, 좌측면2, 우측면1, 우측면2의 측정 이미지들이고, 하단의 좌로부터가 하루방의 뒷면과 앞면의 이미지들이다. Fig. 10(a)는 하루방의 우측면의 2개 이미지들을 본 연구에서 개발된 방법으로 자동 접합한 결과이다. 이 예제는 2개 이미지의 공통 측정 부분이 상당히 작은 경우로서 기존의 방법으로 접합하고자 할 때에는 3쌍 이상의 대응점들을 각 이미지로부터 추출하는 것이 어려운 경우이다. 따라서, 기존의 상용 접합 소프트웨어를 사용하여서는 몇 번의 시행착오로도 만족스러운 접합결과를 거의 얻을 수가 없었다. 그러나, 본 연구에서 개발된 방법에서는 단지 2쌍의 대응점을 간단히 선정해 주는 작업으로 Fig. 10(a)의 결과를 얻을 수 있게 되어 본 연구에서 개발된 방법의 우수성을 확인할 수 있었다. Fig. 10(b)는 같은 방법으로 하루방의 좌측면 이미지 2개의 자동접합 결과이다.

Fig. 10의 예제에서 다루어진 하루방 이미지 데이터 크기는 평균 9,000~11,000 points/image 이다. 그러나, 본 연구에서 도입된 지역 좌표계에서의 데이터 클리핑 작업결과로 접합을 위한 최적변환행렬 탐색과정에서는 평균적으로 3,000~4,000 points/image을 다루게 되어 PC 펜티엄 II에서 대략 10~12 sec의 소요시간으로 접합결과를 얻을 수 있었다.

이러한 변환행렬 계산시간과 초기의 대응점 선정시간, 시행착오에 따른 반복 작업 등을 모두 고려하면, 본 연구에서 개발된 방법은 기존의 상용시스템 보다

전체 작업시간을 대략 5배 이상 단축시킬 수 있는 것으로 평가된다.

Fig. 11(a), (b)는 각각 인물의 우측면과 정면의 측정 이미지들이고, Fig. 12(a), (b)는 이들의 접합결과들이다. Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이 두 개의 측정 이미지들의 프로파일(profile)이 접한 후 거의 일치하여 접합결과가 매우 양호함을 알 수 있다. 이들 이미지들은 대략 23,000 points/image 의 데이터 점들로 구성되나, 데이터 클리핑 후 변환행렬 탐색에서 사용되는 데이터 점들은 대략 14,000 points/image 였고, 계산 소요시간은 대략 13sec 정도였다.

이상의 예에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 개발된 방법은 특히 측정영역의 공통부분이 작은 경우에도 초기 대응점 선정의 용이성을 제공하여 시행착오에 따른 반복작업을 줄이면서도 양호한 접합결과를 얻을 수 있게 한다.



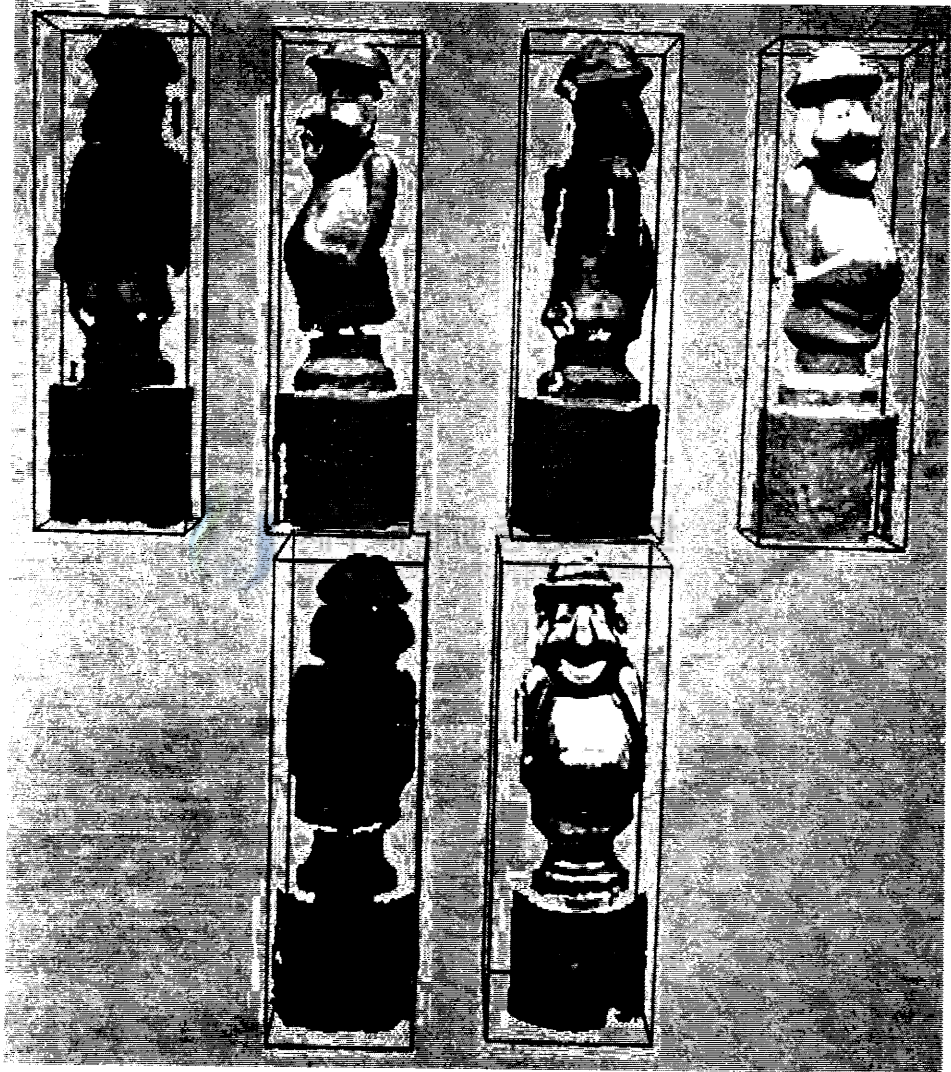


Fig. 8 3D multiple range images of the Harubang model

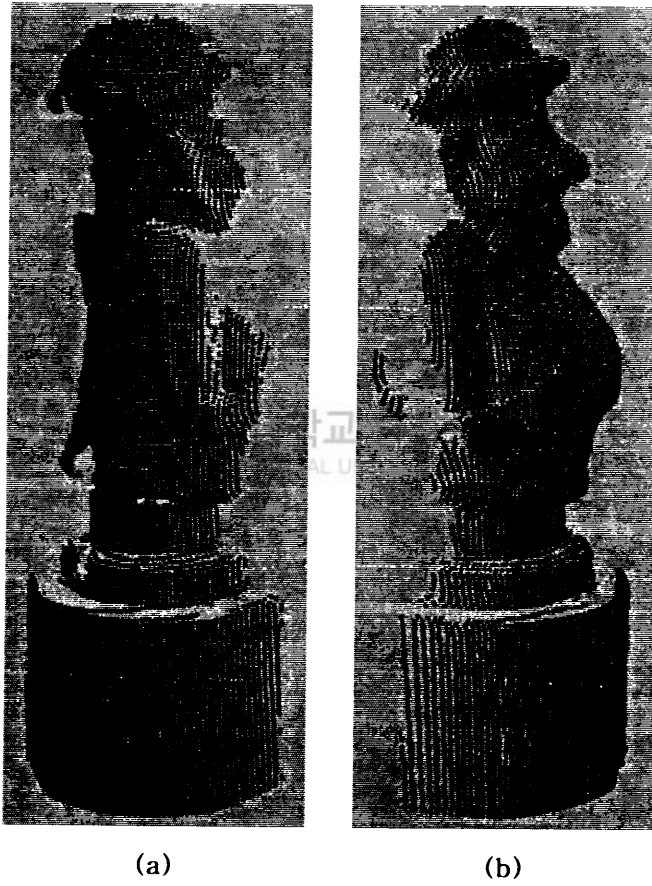


Fig. 9 3D registration examples : (a) right1 (b) right2

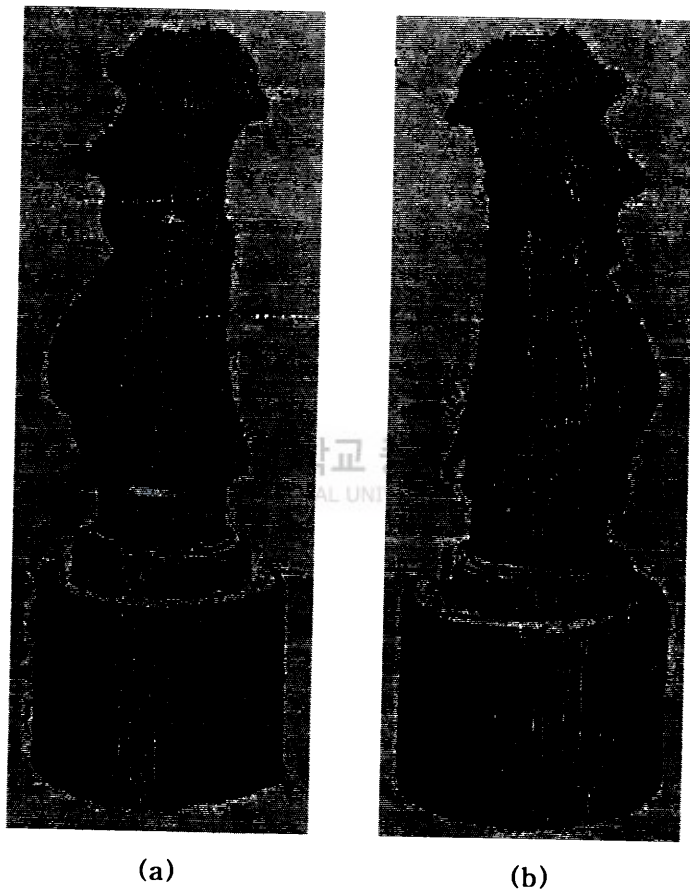


Fig. 10 3D registration examples: (a) registered images of Fig. 9 (a), (b) and (b) left registered image of the Harubang

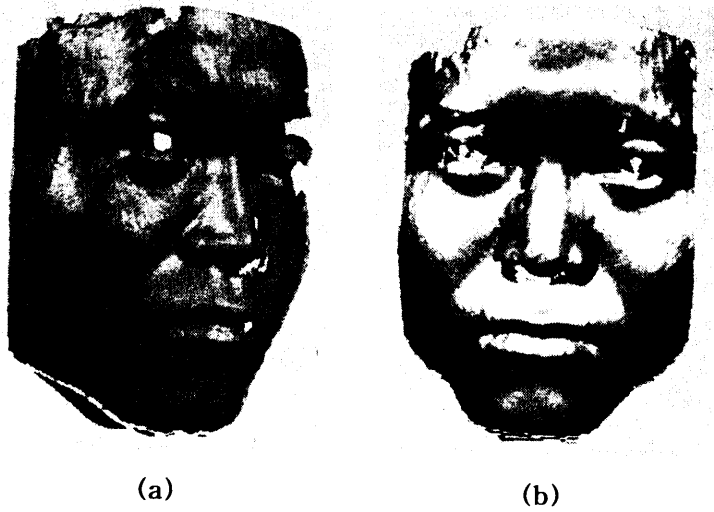


Fig. 11 Registration example: (a) right (b) front

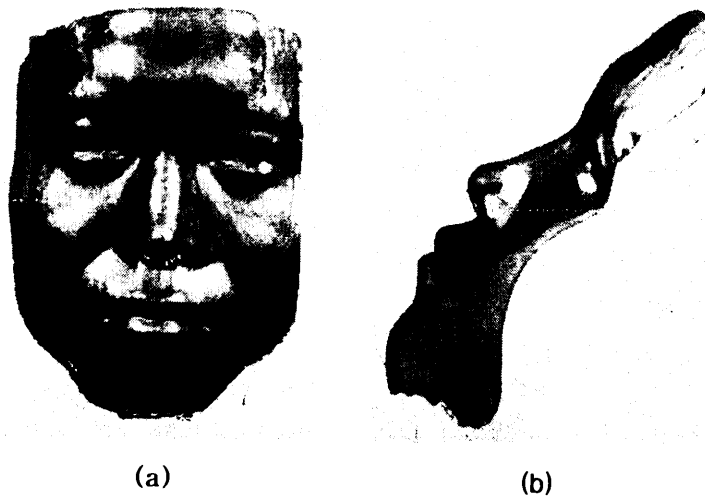


Fig. 12 Registration example : (a) registered images of a human face and (b) side view of (a)

IV. 결 론

최근 3차원 비접촉 측정기술이 크게 발전함에 따라, 이 기술을 응용하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 3차원 측정 데이터의 자동접합은 이러한 응용에 필요한 소프트웨어 기술로서 측정 데이터로부터 3차원 물체를 복원하기 위한 역공학 기술 분야의 요소기술에 속한다. 본 연구에서는 기존의 방법과는 다르게 다음과 같은 차이점이 있는 3차원 자동 접합방법을 새로 개발하였고, 개발된 알고리즘의 작동성능을 실제의 3차원 비접촉 측정 데이터에 적용하여 아래와 같은 바람직한 작동성능을 확인하였다.

- 기존 방법에서는 일반적으로 3쌍 이상의 대응점을 사용자가 지정하여야 했고, 대응점의 지정의 오차가 접합결과에 큰 영향을 미치기 때문에 대응점 선정에 각별한 주의가 요구되었다. 그러나, 본 연구에서는 개발된 방법에서는 대응점의 개수를 2쌍으로 줄였고, 접합결과가 대응점 선정시의 오차에 크게 영향을 받지 않음을 실험적으로 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안하는 평균평면 및 지역 좌표계가 제공하는 다음과 같은 장점 때문으로 사료된다. 즉, 대응점 선정이 다소 부정확하더라도 이에 의거한 평균평면의 법선벡터는 크게 영향을 받지 않기 때문에 중첩영역에 대한 두 지역 좌표계 lcQ 및 lcP 의 u, v, w 축들의 방향이 서로 크게 어긋나지 않아 최적화에서 필요로 하는 초기해가 양호하게 생성될 수 있기 때문으로 풀이된다.
- 입력된 2쌍의 대응점에 근거하여 설정되는 측정 데이터의 지역 좌표계를 도입함으로써 불필요한 데이터를 용이하게 제외시킬 수 있었고 전체 처리과정의 계산부하도 크게 감소시킬 수 있게 되었다.
- 측정 데이터를 지역 좌표계로 변환하면 최적화 과정에서 필요로 하는 샘플링 점들과 이들의 대응점 선정과정을 용이하게 할 수 있고, 최적화 과정의 적절한

초기해를 손쉽게 구할 수 있게 한다.

- 사용자의 대응점 선정의 용이성과 최적해 탐색시의 수렴성 향상 등은 전체적으로 기존의 3차원 측정 데이터의 자동집합에 관한 상용시스템 보다 작업효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.



부록. A - 고속가공기를 이용한 모델 제작

수요자의 다양한 기호에 따라 제품 모델이 다양화되고 종전에 비해 훨씬 제품 형상이 복잡해지면서 제품의 개발 기간, 시작 기간의 단축이 절실히 요청되고 있다. 그래서 공작기계의 고속화에 대한 많은 연구개발[8]이 이루어지고 있다. 최근의 공작기계 발전동향에서 볼 수 있는 것은 절삭시간과 비절삭시간[10-11]의 동시 단축을 위한 고속화 기술이다. 이중 비절삭시간의 단축을 위한 ATC, APC 등 주변기계의 시간단축은 몇 년 전부터 급격히 발전함에 따라 이제는 거의 한계치에 도달한 것으로 보고되고 있는 반면 절삭시간 단축을 위한 고속 주축과 고속 이송계의 연구가 집중적으로 이루어지고 특히 기계의 신뢰성 면에서 단시간의 수요자 성능만족보다는 장시간의 성능보장측면에서 관련된 세세한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 최대 주축회전수가 24,000rpm(Table 1 참조)인 Fig. 13의 수직형 고속가공기(하림기공 HR600)을 이용하였다. 그리고 공작물은 ABS수지를 사용하였다. 모델가공에서 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 결과모델을 제작할 수 없었다. 왜냐하면 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 여러 방향에서 측정된 데이터들을 가지고 자동접합을 하였지만 데이터들을 하나의 CAD모델로 만드는 프로그램[6]을 구할 수가 없었다. 그래서 부득이 3차원 스캐너에서 측정된 데이터들을 자동접합하지 않고 Fig. 14에서처럼 Delcam사의 Copycad프로그램을 이용하여 각각의 측정데이터들을 3차원 형상모델을 만들고 이를 가공하였다. Fig. 15와 Fig. 16는 고속가공기를 이용하여 가공된 모델들이다.

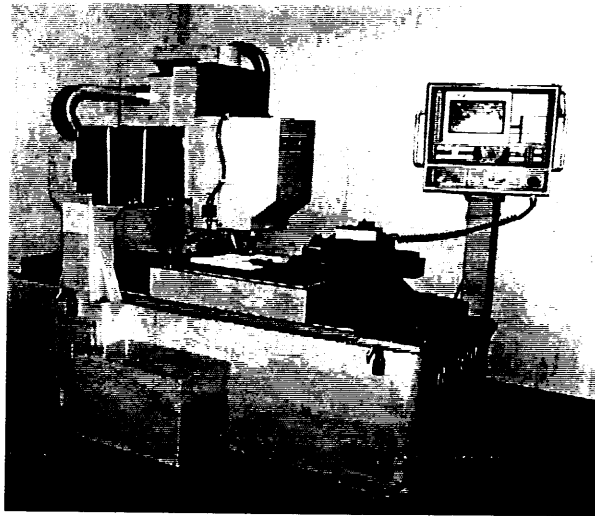


Fig. 13 High Speed Machine(HR-600)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 1 Machine Specifications

ITEMS	MODELS	
		HR-600
TRAVEL	X.Y.Z(mm)	500 × 600 × 150(250)
TRAVEL SIZE	W × D	550 × 650
LOAD OF WORK TABLE	Kgs	200
SPINDLE SPEED	R.P.M	3000-24000
MAX TOOL DIA	mm	1-12
RAPID TRAVERSE		10-15000mm/min
FEED RATE		10-12000mm/min

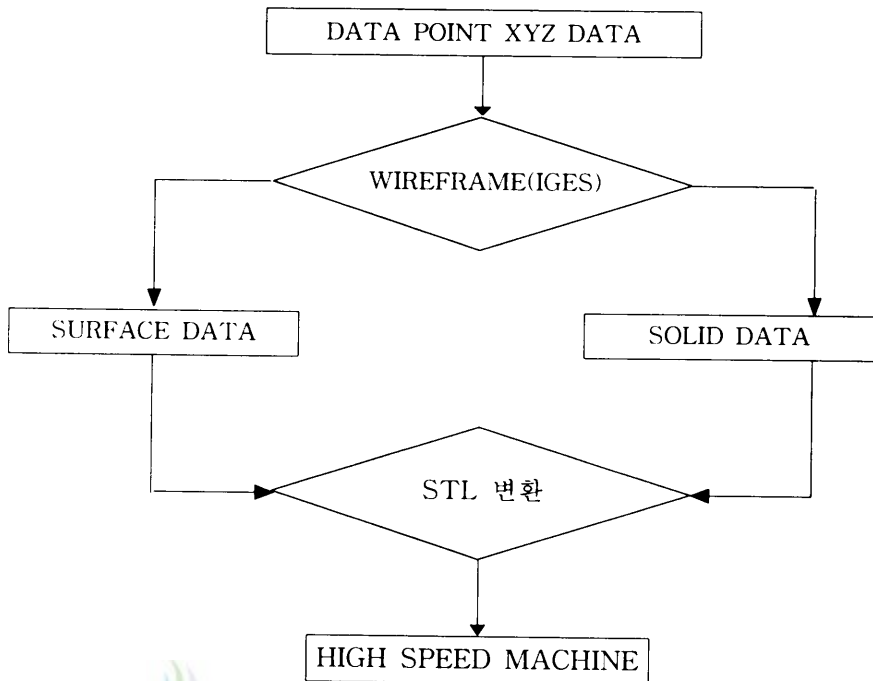


Fig. 14 High Speed Machine & 3D Laser Scanner Process

Table 2 Cutting Condition & Machining Time

가공조건 가공방법	공구(Tool)	주축회전속도	이송속도	소요시간
황삭가공	초경평엔드밀 8φ	3,000rpm	500mm/sec	3시간30분
중삭가공	초경볼엔드밀 3φ	6,000rpm	1,000mm/s ec	2시간30분
정삭가공	초경볼엔드밀 1φ(Long형)	12,000rpm	2,000mm/s ec	17시간

위의 표는 가공된 6개의 모델을 가공하는데 걸리는 소요시간과 가공조건을 나타낸다.

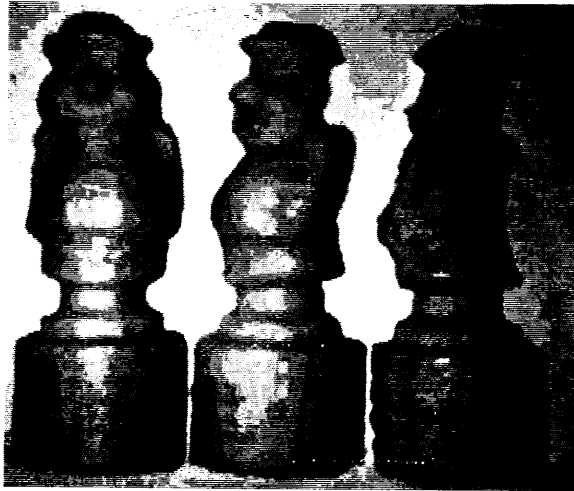


Fig. 15 Machining models by using High
-Speed Machine: Front, Left1, Left2

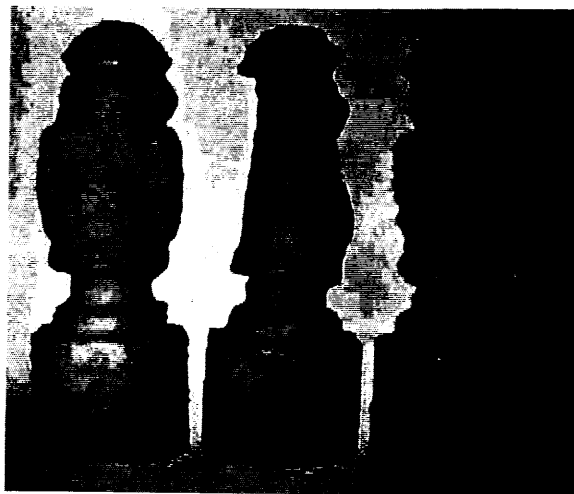
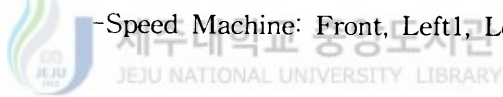


Fig. 16 Machining models by using High
-Speed Machine: Front, Left1, Left2

부록. B - RP 시스템을 이용한 모델제작

RP기술은 최근 몇 년간 자동차, 전자, 항공, 중공업 등 거의 모든 제조관련분야에 걸쳐서 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 동시공학의 필수적인 기술로써 사용되어 왔다.

RP기술은 컴퓨터에 저장된 3차원 형상모델의 기하학적자료로부터 그 물리적인 모형형상을 신속하게 조형해 내는 것으로 주어진 설계 제품의 수학적 모델을 그 이전에 존재하였던 그 어떤 가공방식과도 비교할 수 없는 빠른 시간 안에 물리적인 모형으로 재현해낸다는 것이 그 대표적인 장점이라고 하겠다. 이 기술은 설계된 제품 형상의 기하학적인 복잡성이나 반복성에 전혀 구애받지 않고 그 어떤 제품형상도 조형이 가능하다. 그러나 RP장비는 재료의 수축현상, 단층효과에 의한 오차, 재료의 한계성이 존재한다. 그러한 문제점들 때문에 아직까지는 주로 설계검증을 위하여 산업현장에서 많이 사용되고 있지만 부차적인 과정없이 직접 금형을 제작하려는 많은 연구가 이루어지고 있어서 멀지 않은 장래에 실용화될 것으로 보여진다.

본 연구에서는 Delcam사의 Copycad프로그램을 이용하여 3차원 스캐너에서 측정된 데이터를 형상 데이터로 변환시키고 Sanders사의 ModelMaker II[17]를 이용하여 모델을 제작하였다.

RP와 고속가공기는 기존의 방법에 비하여 제품개발기간을 단축시킬 수 있다는 점에서 현재 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 이러한 단계에서 서로의 장단점을 비교하기는 어렵지만 RP기술은 기존의 모델제작과정(CNC기술)과는 확연히 다른 개념을 도입하여 제품개발에 적용시킨 것이기 때문에 기존의 모델제작과정을 근거로 발전하여온 High-speed Machine과는 몇 가지 장단점이 존재한다.

- (1) 복잡성: RP가 High-speed Machine보다 좀 더 복잡한 형상을 제작하는데 용이하다.
- (2) 재료상의 문제점: RP장비는 재료의 수축현상, 단층효과에 의한 오차, 재료의

한계성이 존재한다.

- (3) 장소: RP장비는 사무실과 같은 환경에서도 사용이 가능하지만 고속가공기는 소음과 먼지 등의 문제 때문에 별도의 장소를 필요로 한다.

본 연구에서는 Delcam사의 Copycad프로그램을 이용하여 3D Scanner에서 측정된 데이터를 형상 데이터로 변환시키고 Sanders사의 Model Maker II(Fig. 17)와 Z-Corp사의 Z-402(Fig. 18)를 이용하여 모델을 제작하였다.

ModelMaker II(Table 3 참조)는 다른 장비에 비하여 속도가 느리지만 그대신 조형 정밀도가 높은 파르나 형상특징이 미세하고 까다로운 파트들을 제작할 때에는 조형 성능상 유리하다. ModelMaker II는 노즐로부터, 가열 용융된 왁스와 같은 액체 방울을 연속적으로 떨어뜨려 퇴적 고화시킨다. 치수정밀도를 향상시키기 위해 얇은 층을 만든 후 표면에 대한 밀링가공을 하고 있다. 두 개의 노즐을 사용하여 한쪽 노즐에서 용점이 낮은 왁스를 이용하고, 그 부분만 후처리 작업에서 가열하여 제거하는 방식이다. 가공된 왁스 모델은 디자인 검증 외에 로스트 왁스 주조에 사용되고 있다. 국내에서는 귀금속업계에서 많이 사용하고 있다. 이 장비는 저가의 소형장비로 정밀한 조형물에 강점을 갖고 있다.

Z-402(Table 4 참조)는 흔히 볼 수 있는 잉크 젯 프린터(Ink-Jet Printer)의 print head부를 떼어다가 RP장비의 핵심부인 재료 결합 장치로 이용한 것이다. 종이 위에서 활자를 프린팅하는 것과 같은 방식으로 종이 대신 분말상의 재료가 조형대에 놓여지고 잉크 대신에 순간 접착제와 같은 binder액이 분말상태의 재료 위에 선택적으로 프린트하듯이 뿌려져 한 층 안의 소재를 결합시켜 나가게 된다. 이 장비는 다른 장비들보다 속도 면에서 20배정도 빠르다. 100×200mm 정도의 넓이를 가진 제품을 시간당 약 50mm의 층 두께로 쌓을 수 있어 일반적인 RP장비들이 수 시간 혹은 수일이 걸리던 작업을 빠르면 수분 내로 해결이 가능한 속도이다. 주재료로 쓰이는 소재분말의 가격이 1,000 입방 cm 당 약 \$13 정도로 다른 RP장비보다 훨씬 저렴하다는 장점이 있다. 장비가격은 저가이다.

본 실험에서 ModelMaker II와 Z-402를 이용하여 6개의 모델을 제작하고 후처리작업을 하는데 각각 50시간, 13시간이 소요되었다. Fig. 19과 Fig. 20는

ModelMaker II를 이용하여 가공된 모델들이고, Fig. 21과 Fig. 22는 Z-402를 이용하여 가공된 모델들이다.

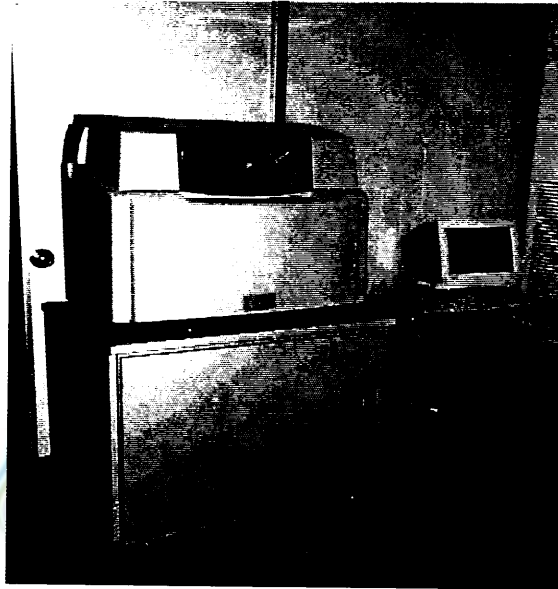


Fig. 17 ModelMaker II

Table 3. ModelMaker II Specifications

Technology	Ink Jet, 3D plotting
Material	Plastic wax
Build Volume	30.5cm × 15.2cm × 22.8cm
Layer Thickness	0.013mm ~ 0.13mm
Accuracy	23cm크기에서 0.013mm이하

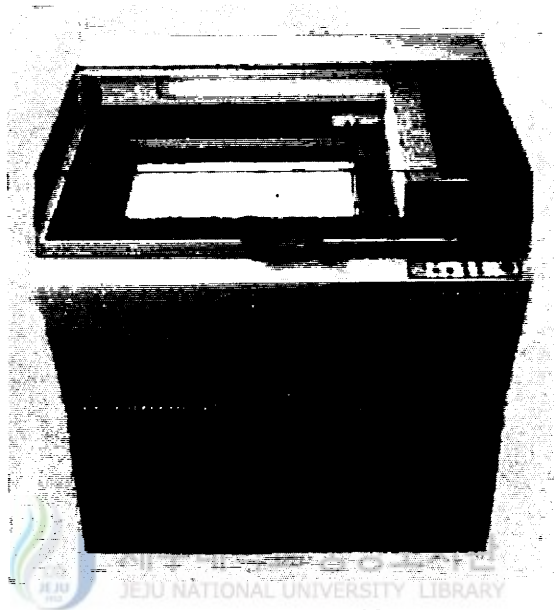


Fig. 18 Z-402

Table 4 Z-402 Specifications

Technology	3D Printing (128-jet Ink Jet)
Material	Powder (starch and cellulose based)
Build speed	1 ~ 2 inch/hour
Build Volume	8" × 10" × 8" (203 × 254 × 203cm)
Layer Thickness	0.003" ~ 0.010" (0.076mm ~ 0.254mm)
Accuracy	X/Y axis: 0.5% (0.005" per 1") Z axis: 1% (0.01" per 1")

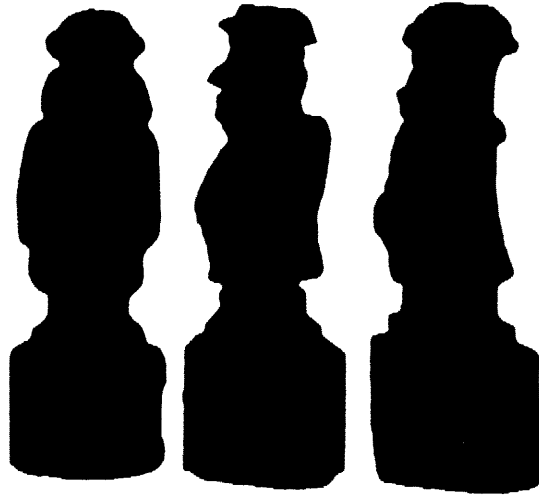


Fig. 19 Machining models by using Model
Maker II: Front, Left1, Left2

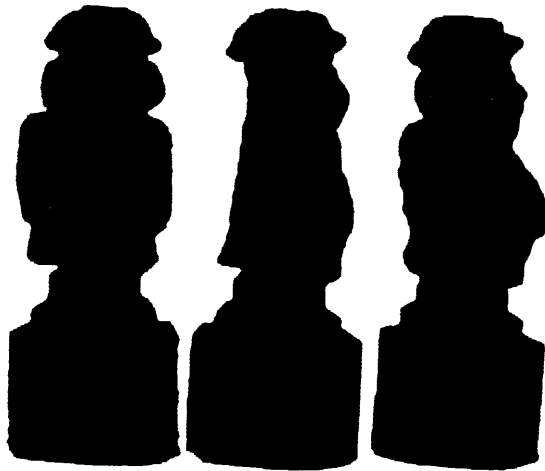
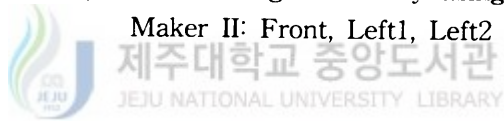


Fig. 20 Machining models by using Model
Maker II: Back, Right1, Right2

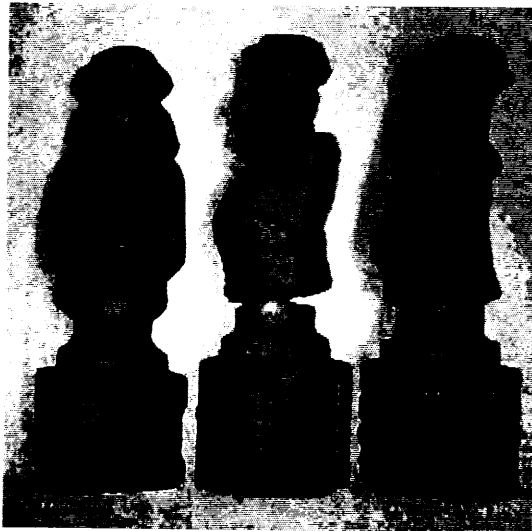


Fig. 21 Machining models by using
Z402: Front, Left1, Left2



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

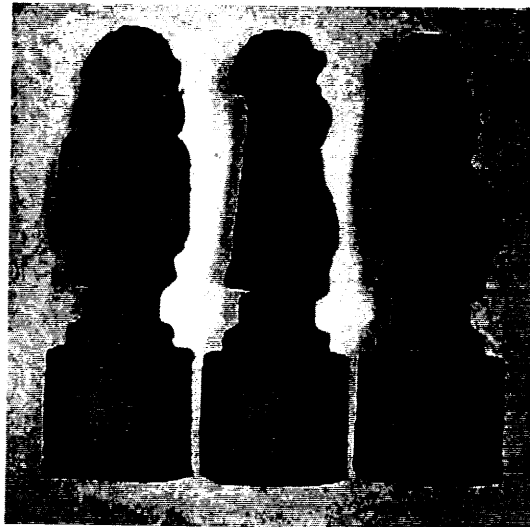


Fig. 22 Machining models by using
Z402: Back, Right1, Right2

부록. C - 변환행렬

3D Scanner에 얻어진 다면 이미지들을 자동 접합하는 과정은 기준 이미지 데이터와 이동될 데이터를 상호 일치시키기 위한 변환행렬을 구하는 과정이다. 부록. C에서는 변환행렬에 대한 기초적인 개념들을 소개한다.

1) 직선 · 회전이동

Fig. 23에서처럼 점 $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$ 를 갖는 공간상의 삼각형 $\triangle ABC$ 가 세계 좌표계에서 X_w 축에 대하여 90° 회전하고 다시 Z_w 축에 대하여 γ 만큼 회전하고 나서 Z_w 축 방향으로 c 만큼 이동하여 $\triangle A''B''C''$ 가 될 때, 변환행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

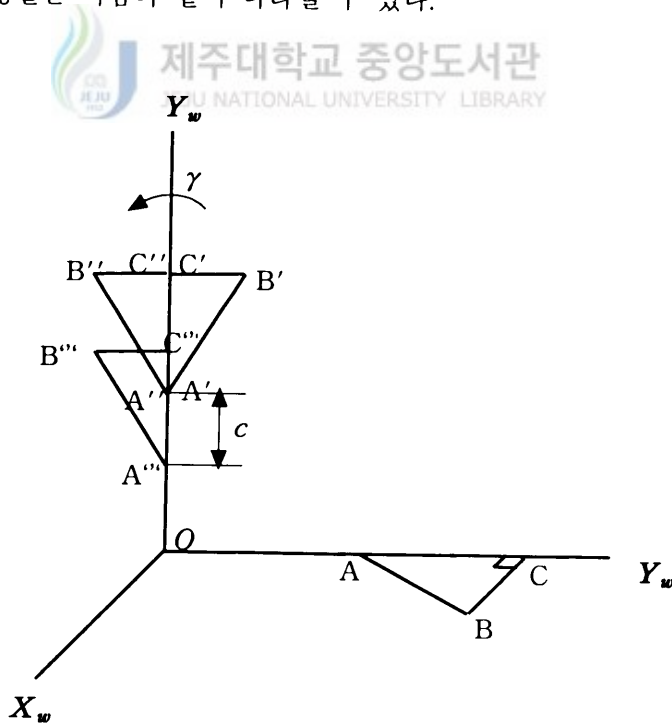


Fig. 23 Translation and rotation

$$[P''] = Trans(0, 0, c) \cdot Rot(Z_w, \gamma) \cdot Rot(X_w, \alpha) \cdot [P] \quad (20)$$


여기서,

$$[P] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad [P''] = \begin{bmatrix} x_1'' & x_2'' & x_3'' \\ y_1'' & y_2'' & y_3'' \\ z_1'' & z_2'' & z_3'' \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \pi/2$$

변환행렬만 계산하면

$$Trans(0, 0, c) \cdot Rot(Z_w, \gamma) \cdot Rot(X_w, \alpha)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$


제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & 0 & -\cos \gamma & c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

2) 원점을 지나는 임의의 축에 대한 좌표변환

월드 좌표계의 원점을 지나는 임의의 축을 중심으로 회전하는 경우를 생각해 보자. 즉 그림 Fig. 24에서와 같이 물체상의 한 점의 좌표가 (x_0, y_0, z_0) 으로 표시되어 있을 때, 원점을 지나면서 월드 좌표계에서 n_x, n_y, n_z 의 성분을 갖는 단위 벡터 \mathbf{n} 을 회전축으로 이 점을 θ 만큼 회전시켰을 때 얻어지는 새로운 점 P' 의 월드 좌표계에 대한 좌표값 (x_1, y_1, z_1) 를 구해보자

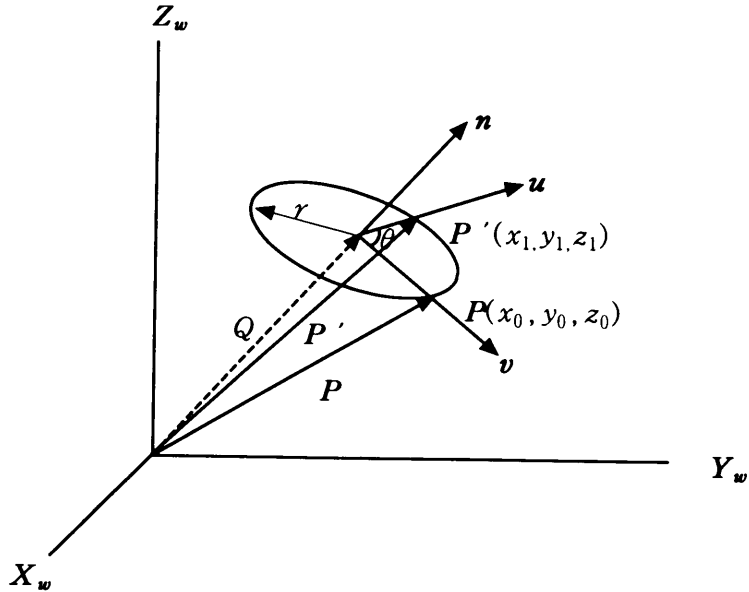


Fig. 24 An arbitrary transformation matrix for an axis passing through the origin

Fig. 24에서 P, P' 은 n 을 축으로 갖는 원뿔상의 점이고, n 에 수직인 평면에서 볼 때는 Q 를 중심으로 반지름 r 을 갖는 원상에 있음을 알 수 있다. 따라서 P, P', Q 를 각각 P, P', Q 의 위치 벡터라 할 때 다음 식이 성립함을 알 수 있다.

$$P' = Q + r \cos \theta \cdot v + r \sin \theta \cdot u \quad (22)$$

식 (22)에서 v 는 Q 에서 P 를 향하는 방향으로의 단위 벡터이고, u 는 점 P, P', Q 로 이루어지는 평면상에서 v 에 수직한 단위 벡터이다. 즉 이들은 다음 식을 만족한다.

$$r \cdot v = P - Q \quad (23)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{n} \times \mathbf{v} = \frac{\mathbf{n} \times (\mathbf{P} - \mathbf{Q})}{r} \quad (24)$$

식 (23), (24)을 식 (22)에 대입하면

$$\begin{aligned} \mathbf{P}' &= \mathbf{Q} + (\mathbf{P} - \mathbf{Q})\cos\theta + r\sin\theta \frac{\mathbf{n} \times (\mathbf{P} - \mathbf{Q})}{r} \quad (\mathbf{n} \times \mathbf{Q} = 0) \\ &= \mathbf{Q}(1 - \cos\theta) + \mathbf{P}\cos\theta + (\mathbf{n} \times \mathbf{P})\sin\theta \end{aligned} \quad (25)$$

그런데 $\mathbf{Q} = (\mathbf{P} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$ 이므로 이를 식 (25)에 대입하면

$$\mathbf{P}' = (\mathbf{P} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}(1 - \cos\theta) + \mathbf{P}\cos\theta + (\mathbf{n} \times \mathbf{P})\sin\theta \quad (26)$$

식 (26)의 $\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}$ 를 행렬 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{n} = x_0 n_x + y_0 n_y + z_0 n_z = [n_x \ n_y \ n_z] \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식 (26)의 $\mathbf{n} \times \mathbf{P}$ 를 행렬 형식으로 표현하면,

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ x_0 & y_0 & z_0 \end{bmatrix} \\ &= (n_y z_0 - n_z y_0)i + (n_z x_0 - n_x z_0)j + (n_x y_0 - n_y x_0)k \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

식 (27)과 식 (28)를 식 (26)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P} = & \left\{ (1 - \cos \theta) \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} [n_x \ n_y \ n_z] + \cos \theta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right. \\ & \left. + \sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (29) \end{aligned}$$

식 (29)를 동차 변환 행렬식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Rot}(\mathbf{n}, \theta) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서,

$$\text{Rot}(\mathbf{n}, \theta) =$$

$$\begin{bmatrix} n_x^2 + (1 - n_x^2) \cos \theta & n_x n_y (1 - \cos \theta) - n_z \sin \theta & & & \\ n_x n_y (1 - \cos \theta) + n_z \sin \theta & n_y^2 + (1 - n_y^2) \cos \theta & & & \\ n_x n_y (1 - \cos \theta) - n_y \sin \theta & n_y n_z (1 - \cos \theta) + n_x \sin \theta & & & \\ 0 & 0 & & & \\ & & n_x n_z (1 - \cos \theta) + n_y \sin \theta & 0 & \\ & & n_y n_z (1 - \cos \theta) - n_x \sin \theta & 0 & \\ & & n_z^2 + (1 - n_z^2) \cos \theta & 0 & \\ & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

3) 임의의 축에 대한 좌표변환

공간상의 형상 S 가 Fig. 25에서처럼 임의의 점 $M_0(x_0, y_0, z_0)$ 을 지나는 L 축에 대해서 θ 만큼 회전한다면 다음과 같이 변환행렬을 구할 수 있다.

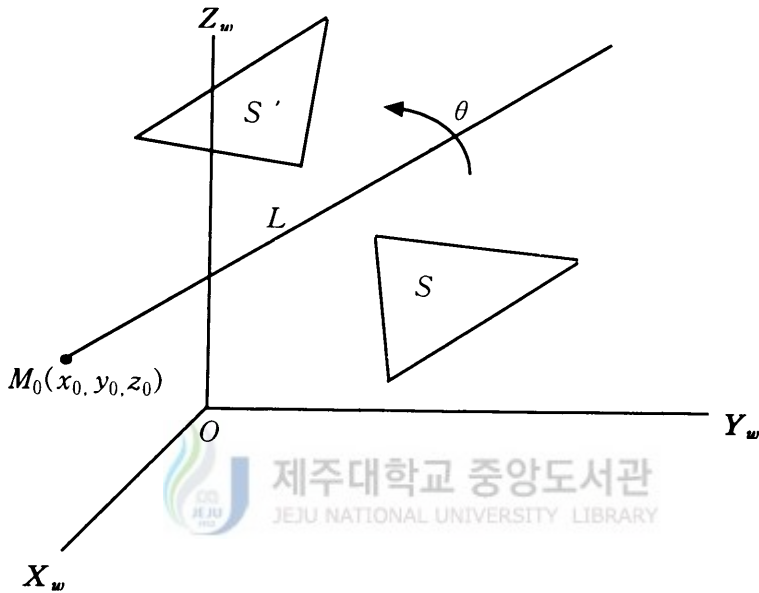


Fig. 25 Rotation for an arbitrary axis

우선 L 축과 공간상의 어떤 물체를 원점을 지나도록 $(-x_0, -y_0, -z_0)$ 만큼 직선 이동시킨 후 L 축에 대해서 θ 만큼 회전이동 시키고 다시 (x_0, y_0, z_0) 만큼 직선 이동시키면 변환행렬이 구해진다.

$$[P'] = Trans(x_0, y_0, z_0) \cdot Rot(L, \theta) \cdot Trans(-x_0, -y_0, -z_0) \cdot [P] \quad (32)$$

여기서,

$$[P] = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ \cdots \ P_n], \quad [P'] = [P'_1 \ P'_2 \ P'_3 \ \cdots \ P'_n] \text{ 이고,}$$

$$[P_1] = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, [P_2] = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \dots \dots [P_n] = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 이고,}$$

$$[P_1'] = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, [P_2'] = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \dots \dots [P_n'] = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

참고문헌

- [1] Sherif D., El Wakil, 1999, Processing and Design for manufacturing, PWS Publishing Company, pp. 1-16
- [2] 윤정호, 전형환, 손석배, 박정욱, 이관행, 1999, "Mechatronics 부품의 Reverse Engineering 사례 연구", 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회논문집, pp.357-361
- [3] 최영, 박진표, 1998, "RP 데이터 생성을 위한 역설계 시스템", 한국정밀공학회 98년도 춘계학술대회논문집 pp. 566-569
- [4] 우혁제, 이관행, 1998, "리버스 엔지니어링으로 생성된 데이터를 이용한 3차원 급속 시작 기술 연구", 한국정밀공학회 98년도 춘계학술대회논문집 pp.903-908
- [5] 강석주, 유중학, 1999, "Reverse Engineering에 의한 曲面加工 誤差補正에 關한 研究", 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회논문집 pp. 397-400
- [6] 배석훈, 1999, "Reverse Engineering을 위한 Computer Graphics의 응용 RapidForm의 소개", 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회논문집, pp.1110-1112
- [7] Lee K. H., 2000, "Direct Integration of Reverse Engineering and Rapid Prototyping", International Journal of Computers and Industrial Engineering Vol. 38, No. 4, pp. 25-34
- [8] Ven Den Bramembussche P., 1996, "Accurate Tracking Control Of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes", Mechatronics Vol. 6, No. 5, pp.507-521
- [9] 이상조, 1997, "첨단가공기술동향", 대한기계학회 Vol. 37, No. 5, pp 43-50
- [10] 대우중공업(주) 부설 공작기계연구소, 1997, 고속 CNC 공작기계 개발, 과학기술처 제3차년도 최종보고서 pp. 3-23
- [11] 나카자와 히로무 외 16인, 1995, 최신공작기계설계기술, 半島出版社.
- [12] NCMS, 1998, The Road to Manufacturing 1998 Industrial Roadmap for the Rapid Prototyping Industry, NCMS Report 0199RE98
- [13] RPMI, 1999, Orchestrating the Path to RP&M's Future, A Report On the Fourth Year of The RPMI
- [14] Nakagawa T., 정해도, 1998, 적층 조형 시스템 3차원 카피 기술의 신전개, 성안당, pp. 101-114

- [15] Kai C. C. , Fai L. K., 1996, RAPID PROTOTYPING : PRINCIPLES & APPLICATIONS IN MANUFACTURING, John Wiley & Sons, Inc., pp. 27-149
- [16] Lee K. W., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, ADDISON-WESLEY, pp. 378-431
- [17] Sanders, 2000, ModelMaker II OPERATING MANUAL
- [18] Besl P. J. and McKay N. D., 1992, "A method for registration of 3D shapes", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, pp. 239-256
- [19] Chen Y. and Medini G., 1992, "Object modeling by registration of multiple range images", Image and Vision Computing, Vol. 10, No. 3, pp.145-155
- [20] Eggert D., Fitzgibbon A.W. and Fisher R. B., 1996, "Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering", Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, pp. 243-247
- [21] Masuda T. and Yokoya N., 1995, "A robust method for registration and segmentation of multiple range images", Computer Vision and Image Understanding, Vol. 61, pp. 295-307,
- [22] Burtnyk N. and Greenspan M., 1998, "Multiple view registration of range data using signature search", NRC No. 38316,
- [23] Chua C. S., 1996, "3D free-form surface registration and object recognition", International Journal of Computer Vision, Vol. 17, pp.77-99
- [24] Turk G. and Levoy M., 1994, "Zippered polygon meshes from range images", Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, SIGGRAPH, pp. 311-318
- [25] Press. W. H, Flannery B. P., Teukolshy S. A. and Vetterling W. T., 1992, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press
- [26] Dorai C., Weng J. and Jain, A. K., 1994, "Optimal registration of multiple range views", Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, pp. 569-571

- [27] Dorai C., Wang G., Jain A. K. and Mercer C., 1996, "From images to models: Automatic 3D object model construction from multiple views" Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.770-774
- [28] Gueziec A. and N. Ayache, 1994, "Smoothing and matching of 3D space curves", International Journal of Computer Vision, Vol. 12, No. 1, pp.79-104
- [29] Stein F. and Medioni G., 1992, "Structural indexing: Efficient 3D object recognition", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligences, Vol. 14, No. 2, pp. 125-145
- [30] 조경호, 홍훈기, 1999, "3차원 비접촉 측정기로 얻어진 다면 이미지의 자동접합에 관한 연구", 제주대학교 산업기술연구소 논문집 10권 2호 pp. 37-44
- [31] Hun-Kee Hong, Kyung-Ho Cho, 2000, "A New Method for the Automatic Registration of Multiple Range Images Obtained by the 3D Scanner", JSST 2000, pp. 66-70
- [32] 홍훈기, 조경호, 2000, "물체 주위를 돌아가며 3차원 스캐너로 획득된 다면 이미지의 자동접합에 관한 연구", 한국 CAD/CAM학회 논문집 제5권 제3호, pp.285-292

감사의 글

2년이라는 기간동안 많은 것들을 배웠습니다. 아직도 부족한 것이 많지만, 그 동안 배움의 기회를 가질 수 있었던 것에 대해서 감사합니다. 논문을 쓸 수 있었다는 사실 뿐만 아니라 많은 사람들과 친분을 가질 수 있었다는 사실에 더한 기쁨을 느낍니다.

그 동안 저를 지도해 주시고, 어려울 때에 따뜻한 충고를 해주신 분들에게 감사의 뜻을 전합니다. 먼저, 많은 경험과 지식을 주시려고 노력하셨던 조경호 교수님께 감사합니다. 열심히 하시는 모습만으로도 저에게는 많은 자극이 되었고, 인간적인 면에서도 많은 것을 배웠습니다. 지금 생각하면 지도교수님께 배울 수 있었다는 사실이 행운이었다고 생각합니다. 그리고 저의 논문에 세심한 지도와 배려를 해주신 임종환 교수님, 정동원 교수님께 감사합니다. 논문을 쓰는데 많은 도움이 되었습니다. 지금은 미국에 계시지만, 대학원 생활이 어떤 것인지를 느끼게 해주신 김귀식 교수님께 감사하고, 개인적으로 접할 기회는 많지 않았지만, 많은 것을 일깨워 주신 허종철 교수님, 권기린 교수님, 현명택 교수님께도 감사합니다.

큰 형님처럼 가르침을 주신 박경석 선배님과 반듯한 모습의 김성익 선생님, 항상 여유로운 모습의 이성철 선생님, 많은 배움의 기회를 주신 김희곤 과장님, 사회선배로써 모범이 되셨던 김창호 선생님께 감사합니다. 항상 열심히 일하는 모습 그리고 어려울 때 따뜻한 충고를 해주신 경부형에게 감사의 뜻을 전합니다. 경부형의 따뜻한 배려로 이렇게 석사과정을 마칠 수가 있었습니다. 그리고 대학원 생활에 있어서 많은 도움을 주신 상필이 형, 명범이 형에게 감사합니다. 여러모로 많은 도움과 배려를 해 주었던 용이, 성환, 창수, 동원, 양훈, 형일이에게 앞으로도 그런 좋은 모습들을 계속 간직하기를 바랍니다. 대학원 생활을 함께 했던 윤석, 승현, 석우, 혁진, 상철, 병수, 민호에게도 계속 좋은 일이 있기를 바라고, 자료를 찾는데 많은 도움을 주었던 후배 상용이와 영근이에게 고마움을 전합니다.

모델제작을 할 수 있도록 배려와 격려를 아끼지 않으셨던 제주지방중소기업청 관계자분들과 RP모델 제작에 많은 조언과 도움을 주신 세종시스템의 정우철 차장님과 김대리님께 감사의 마음을 전합니다.

논문이 나오기까지 변함없는 관심과 애정을 주셨던 부모님과 열심히 사시는 형님내외분께 감사의 마음을 전하고, 논문을 쓰는데 많은 배려를 해주었던 동생들에게 감사합니다.

석사과정이 끝났지만, 끝남이 아니라 새로운 시작이라고 생각합니다. 앞으로도 계속 노력하고 발전하는 사람이 되도록 노력하겠습니다.