

역공학의 정밀도 향상을 위한 점 데이터의 다단계 획득 및 역모델 형성

김권흠*, 장경열*, 유우식*, 박정환**, 고태조**, 배석형***

A Multi-Step Digitizing Method and Reverse Model Generation for Improvement of Reverse Engineering Accuracy

Quan qia Jin*, Jang, K. Y.*, Yoo, W. S.*, Park, J. W.**, Ko, T. J.** and Bae, S. H.***

ABSTRACT

This paper describes a Multi-step Digitizing Method and Reverse Model generation algorithm for improvement of reverse engineering accuracy. Reverse engineering is the process of reproducing computational model by directly extracting geometric information on the physical objects. For the improvement of measuring data accuracy, we propose a multi-step digitizing method. First, measuring cloud-of-point by use of a laser scanning system. Second, gathering digitizing data by a scanning touch probe. Fine digitizing plan generated from coarse surface model directly from the cloud-of-point and it allows CMM more accurate scanning data. Finally in this paper we propose the algorithm of generating NURB surface from more accurate measuring points.

Key words : Reverse Engineering(역공학), Multi-Step digitizing(다단계 디지털링), NURB surface(NURB 곡면)

1. 서 론

기존의 일반적인 제품가공은 설계데이터로부터 시작된다. 하지만 실제 산업현장에서는 주어진 실물로부터 기하학적인 형상정보를 추출하여 실물을 재생산하는 경우도 많다. 이러한 실물로부터 기하학적인 형상정보를 추출하여 실물을 재생하는 과정을 역공학이라 한다. 복잡한 자유곡면 현상을 갖는 제품을 제조하기 위한 제조법으로 최근 역공학이 대두되어 현재 상당한 연구가 진행되고 있다¹⁾.

현재 소비자의 수요가 다양하고 신속하게 변화하고 있으며, 또한 요구되는 형상도 다양해지고 있다. 이를 만족시키기 위하여 현재 제조업은 제품개발을 위한 기간의 단축뿐만 아니라 측정정밀도 요구도 높아지고 있다. 다양한 제품을 빠른 시간 내에 공급할 수 있기

위하여 제품개발 초기로부터 모든 단계를 효율화하고, 제품경쟁력을 달성하기 위한 동시공학의 개념이 보편화되고 있다. 이를 위해서는 신속하고 정확하게 실물 모형에 대한 점 데이터를 획득하여야 한다. 현재 사용되고 있는 측정기술은 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 나눌 수 있다. 접촉식 방법은 정밀한 데이터 획득이 가능한 반면 측정속도가 느리고 많은 작업자의 개입이 필요하여 비능률적이며 또한 자유곡면이나 접촉 불가능한 재질에 한계가 있다. 반면 비접촉식은 측정속도가 빠르고 많은 측정 점 데이터를 획득할 수 있지만 측정정밀도가 낮으며, 또한 많은 noise와 측정 오차가 포함되어 불규칙적인 형태를 가지므로 CAD 작업자의 상당한 작업시간이 필요로 한다.

이러한 관점에서 3차원측정기나 디지털링 머신 등에서 물체를 측정할 때, 측정의 신속 및 자동화를 위하여 센서융합에 대한 연구가 상당히 진행되고 있다. Takeuchi 등은 적외선 카메라와 터치프로브를 이용하여 물체를 먼저 인식하고, 물체를 CAD데이터에서 미리 만들어진 측정경로를 따라 측정할 수 있는 방법을 제시하였다²⁾. 국내에서도 비접촉식과 접촉

*인천대학교 산업공학과

**영남대학교 기계공학과

***KAIST 가상현실 연구센터

- 논문투고일: 2003. 03. 12

- 심사완료일: 2003. 05. 12

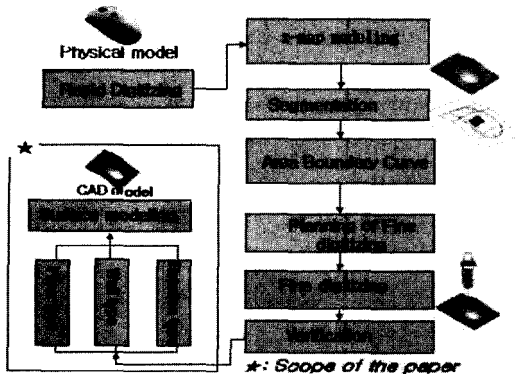


Fig. 1. Schematic diagram for the R.E system.

석센서의 융합을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[14-16].

본 연구에서는 점 군 데이터의 정밀도를 높이기 위해 비접촉식의 신속하고 많은 측정데이터를 획득할 수 있는 장점과 접촉식의 정밀한 반복측정이 가능한 장점을 점목한 센서 융합에 의한 다단계 점 데이터 획득방법을 연구하였다. 또한, 본 연구에서는 다양한 기하학적 형상을 갖는 모델을 선정하여 각 곡면특성에 따라 곡면을 모델링하는 알고리즘을 제시하였다.

Fig. 1은 역공학에서 센서융합방식에 의해 실물모형으로부터 CAD모델을 구축하기 위한 과정을 보여주고 있다. 이 과정에서 비접촉식 측정기를 이용하여 실물모형으로부터 신속하게 많은 점 데이터를 획득한다. 비접촉식에 의해 획득한 데이터를 이용하여 근사 곡면모델을 구축한 후, 거친 모델을 이용하여 터치프로브의 경로계획을 세우게 된다. 이를 통하여 최종적인 터치프로브 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 일련의 과정을 통하여 자동으로 신속하고 정확하게 형상을 추출함과 동시에 정밀한 접촉식 데이터로부터 역모델을 생성한다.

본 연구에서는 Fig. 1의 과정에서 접촉식 측정장비로부터 얻어진 3차원 점 군 데이터를 이용하여 곡면을 Floor type, Wall type, Rotation type 등으로 분할하여 보다 효율적으로 정밀모델링 하는 방법을 제시하였다.

2. 센서융합에 의한 점데이터 획득

2.1 초기형상정보 추출

본 연구에서는 모델의 유효성을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같은 형상을 모델링 하였다. 이 모델은 sphere, pocket, slant 등의 기하학적 형상을 갖고 있기

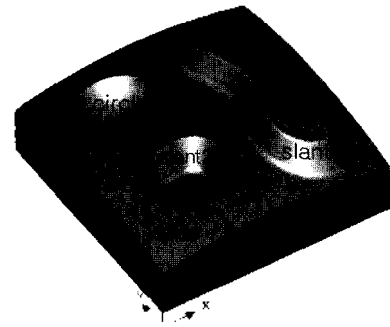


Fig. 2. CAD model for verification.

때문에 다양한 형상의 특징을 연구할 수 있다.

위에서 형성한 모델을 머시닝센터에서 실물가공을 하였다. 이를 비접촉식 측정기를 이용하여 모델에 대한 점 데이터를 획득하였다.

일반적으로 CAD시스템에서 위 그림과 같은 형상을 갖는 물체를 한꺼번에 하나의 곡면으로 표시하는 것은 불가능하다. 보통 하나의 물체는 여러 개의 patch를 갖는 조합곡면의 결합에 의해 모델링 되는데, 곡면들간의 경계는 뾰족한 모서리나 불랜딩 곡면이 된다. 먼저 비 구조화된 점 군 데이터로부터 곡면을 형성하는 과정을 살펴보면 전반적으로 다음의 과정을 거친다.

1. Segmentation

점 군 데이터를 하나의 곡면(composite surface)으로 표현 가능한 영역으로 분할해야 하는데, 이는 sharp edge, blending 곡면의 경계선을 찾는 과정이다.

2. Classification

분할된 하나의 영역에 속한 점 데이터로 형성할 곡면의 종류를 분류한다. 단순 곡면인 평면, 원통, 구면, 원뿔, 토러스 등 단순 이동곡면, 회전곡면(Rotational surface) 들을 찾고 이에 해당되지 않으면 자유곡면으로 분류한다. 자유곡면은 다시 Floor type, Wall type 등으로 분류한다.

3. Surface fitting

주어진 점들을 해당하는 종류의 곡면으로 fitting한다. 곡면의 파라미터를 찾기 위해서 최소자승법이 이용된다.

4. B-rep model building

위 단계에서 만들어진 곡면의 경계는 점 군 영역의

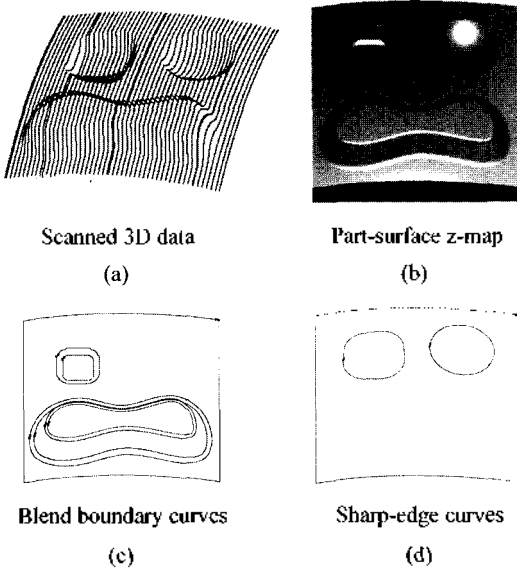


Fig. 3. Digitized data and z-map model.

경계를 넘는 사각형 상의 곡면이 된다. Sharp edge 경계를 공유한 곡면들 간에는 곡면교차 계산을 통하여 trimming되고, blending곡면과 이웃한 곡면은 경계 곡선 투영에 의하여 trimming 된다.

본 연구에서는 먼저 비접촉식 레이저 스캐너를 통해 점 데이터를 획득하여 이를 이용하여 CAD근사 모델을 생성하였다. 근사 CAD모델로는 z-map을 사용하였다. Z-map은 자료구조가 간단하고, 읍세팅이나 블렌딩 등의 곡면조작이 매우 편리한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 영역화 작업은 본 연구과제의 일부분으로 이루어진 연구¹⁹⁾를 활용하였다. Fig. 3은 레이저 스캐너를 통해 획득한 점 데이터와 근사 z-map모델 및 경계곡선을 나타낸다.

2.2 측정경로 생성 및 접촉식에 의한 정밀측정

역공학에서 측정경로는 측정물을 가장 잘 표현할 수 있는 것이 좋다. 본 연구에서는 위의 비접촉식에 의해 구현한 CAD모델을 이용하여 곡면의 특성에 따라 Floor type, Wall type, Rotation type 등으로 나누어 Fig. 4와 같이 측정경로를 설정하여 접촉식에 의해 정밀측정을 수행하였다. Fig. 5는 접촉식에 의해 측정된 점 데이터를 나타낸다.

접촉식 측정에 의해 측정된 구조화된 데이터는 정밀할 뿐 아니라 곡면형성에 적합하도록 계획하여 얻은 점들이다. 그러나 곡면을 형성하는 전반적인 절차

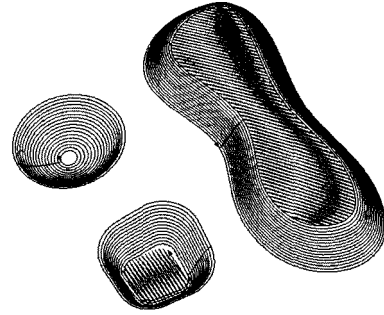


Fig. 4. Measuring path from z-map model.

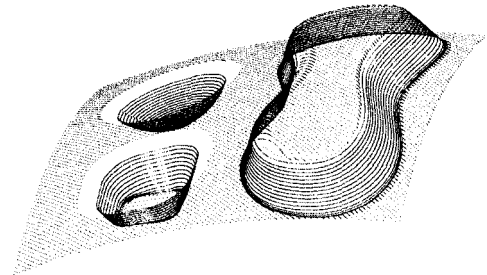


Fig. 5. Digitized point cloud.

는 위에서 제시한 방법과 큰 차이가 없다. 구조화된 점 군 데이터는 segmentation, classification, fitting, B-rep model building 각 단계에 필요한 초기 값을 가지고 있으며, 또한 높은 품질을 보장하는 데이터이므로 각각의 단계를 보다 효율적으로 수행한다. 본 논문에서는 주로 접촉식에 의해 측정된 점 데이터를 이용하여 각 곡면의 특징에 따라 보다 효율적으로 모델링하는 방법에 대하여 논하고자 한다.

3. 역모델 생성 알고리즘

본 절에서는 각각의 곡면특성에 따라 Floor type, Wall type, Rotation type 등으로 나누어 각 곡면의 특징에 따라 역모델을 생성하는 알고리즘을 설명하고자 한다.

3.1 평면의 투영을 활용한 Floor type 곡면의 B-spline곡면 생성방법

주어진 데이터를 $\{q_r\}_{r=0}^R$ 라 하면 B-spline surface 의 수학적 표현은 아래와 같다.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)p_{i,j} \tag{1}$$

위 식에서 차수 p, q 는 3차로 지정하였다. 위에서 각 측정점 데이터에 (u_r, v_r) 파라미터를 할당하기 위하여 측정데이터를 적절한 평면에(X, Y plane) 투영하여 2차 bounding box($[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$)를 계산하였다. bounding box내에 위치한 측정점데이터의 x_r, y_r 의 상대적인 위치로부터 아래식과 같이 u_r, v_r 파라미터를 계산하였다.

$$u_r = \frac{x_r - x_s}{x_e - x_s}, v_r = \frac{y_r - y_s}{y_e - y_s} \quad (2)$$

오차함수 f 를 최소화하는 계산:

$$f = \sum_{r=0}^R \{S(u_r, v_r) - q_r\}^2$$

$$= \sum_{r=0}^R \left\{ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u_r) N_{j,q}(v_r) p_{i,j} - q_r \right\}^2$$

$$\frac{\partial f}{\partial p_{k,i}} = 2 \sum_{r=0}^R \left\{ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u_r) N_{j,q}(v_r) p_{i,j} - q_r \right\}$$

$$N_{k,p}(u_r) N_{l,q}(v_r) \equiv 0 \quad (3)$$

초기 knot vector는 일반적으로 uniform knot vector를 이용하고 자유도(DOF)가 더 필요한 경우 최대오차가 발생하는 knot span에 새로운 knot 삽입을 한다. 에러를 최소화하는 기법으로 식 (3)을 이용한 최소자승법을 이용하였다.

이상의 알고리즘을 적용하여 top, base, bottom surface에 대한 모델링 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

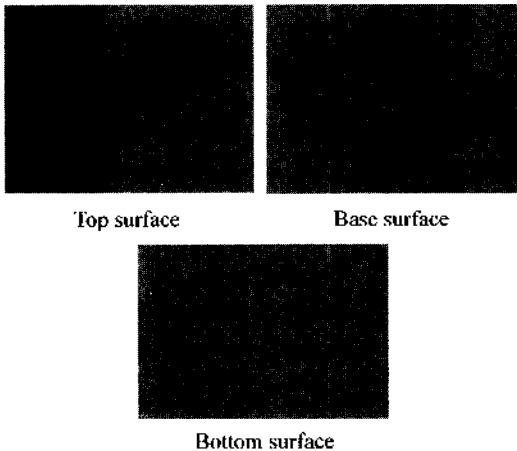


Fig. 6. Modeled surface with B-spline surface approximation.

3.2 Wall type 곡면의 Ruled 곡면 생성 방법

Wall type surface은 두 단계로 나누어 모델링작업을 수행하였다.

Step 1. B-spline 곡선 근사

B-spline의 수학적 모델은 아래와 같이 표현한다.

$$C(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) p_i \quad (4)$$

$$T = \{t_0, \dots, t_1, t_{p+1}, \dots, t_n, t_{e'}, \dots, t_e\},$$

$$\begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & & 1 & 2 & 3 \\ & p+1 & & & & p+1 & & \end{matrix}$$

측정 data(curve) $\{q_r\}_{r=0}^R$ 에 아래와 같이 t_r 파라미터를 할당한다.

Chord-length parameterization:

$$t_0 = 0, t_R = 1, t_r = \frac{\|q_r - q_{r-1}\|}{\sum_{k=1}^R \|q_k - q_{k-1}\|}$$

$$; r = 1, \dots, R-1 \quad (5)$$

곡선 식에서 차수는 일반적으로 $p = 3$ 로 하고, 직선 등의 특수한 경우 $p = 1$ 로 결정한다.

곡선의 에러를 최소화하기 위하여 오차함수 f 는 최소자승법을 사용하여 자유도가 필요한 경우 최대오차가 발생하는 knot span에 새로운 knot를 삽입하였다.

오차함수 f 를 최소화하는 조정점 $\{p_i\}$ 계산식은 아래와 같다.

$$f = \sum_{r=0}^R \{C(t_r) - q_r\}^2$$

$$= \sum_{r=0}^R \left\{ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t_r) p_i - q_r \right\}^2$$

$$\frac{\partial f}{\partial p_k} = 2 \sum_{r=0}^R \left\{ \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t_r) p_i - q_r \right\} N_{k,p}(t_r) \equiv 0 \quad (6)$$

Step 2. Ruled surface construction

위의 두 B-spline curve는 아래 식 (6)과 같이 표현되고 surface 곡면은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$C(t) = \sum_{i=0}^{n_C} N_{i,p_C}(t) p_i, \quad D(t) = \sum_{i=0}^{n_D} N_{i,p_D}(t) q_i \quad (7)$$

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^1 N_{i,p}(u) N_{j,1}(v) p_{i,j} \quad (8)$$

각 각의 knot vector \hat{T}_C, \hat{T}_D 의 모든 knot를 포함하는 공통의 knot vector \hat{T} 결정하기 위하여 \hat{T} 상



Fig. 7. The results of ruled surface fitting.

에서 정의되는 knot-inserted curve $\tilde{C}(t), \tilde{D}(t)$ 는 아래의 같이 계산한다.

$$\tilde{C}(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) \tilde{p}_i, \quad \tilde{D}(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) \tilde{q}_i, \quad (9)$$

$\tilde{C}(t), \tilde{D}(t)$ 는 동일한 knot vector 상에서 정의되고, 같은 수의 조정점을 가진다.

최소자승법에 의해 오차함수 f 를 최소화하는 계산으로 조정점 $\{p_i\}$ 를 계산하여 Ruled surface를 생성한다.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^1 N_{i,p}(u) N_{j,1}(v) p_{i,j} \quad (10)$$

$$p_{i,0} = \tilde{p}_i, p_{i,1} = \tilde{q}_i, U = \tilde{T}, V = \{0, 0, 1, 1\}$$

이상의 알고리즘을 적용하여 vertical surface와 slant surface에 대해 각각 surface를 형성하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

이 경우 vertical surface는 8개의 ruled surface로 구성이 되어 있으며, Slant surface는 XY-plane에 수평인 두 B-spline 곡선을 생성하고 Ruled surface를 생성한 후 아래위로 확장 하여 구성하게 된다.

3.3 회전곡면(Rotation type)의 Orthogonal B-spline 곡면생성 방법

회전곡면을 모델링하는 과정은 B-spline 곡선근사, 국부 좌표계 변환(local coordinate transformation), 곡면보간(surface fitting), 그리고 전역 좌표계 변환(Global coordinate transformation) 과정을 순차적으로 거치게 된다^[21].

Step 1. 국부 좌표계 시스템 추정

입력: 측정 data ${}^{\Omega}\{\Psi_k\}_{k=0}^K$

출력: 국부좌표계 $\omega = \{o, i, j, k\}$

Procedure:

이차곡면근사:

$${}^{\Omega}\{\Psi_k\} \Rightarrow q(x, y, z) = x^T Q_u x + v^T x + d = 0;$$

$$Q_u = \begin{bmatrix} q_1 & q_4/2 & q_6/2 \\ q_4/2 & q_2 & q_5/2 \\ q_6/2 & q_5/2 & q_3 \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} q_7 \\ q_8 \\ q_9 \end{bmatrix}, d = q_{10}$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (11)$$

원점: $o = -Q_u^{-1} v/2$

축: $k \equiv$ (가장 큰 eigenvalue를 가지는 Q_u 의 eigen-vector)

나머지 i, j 는 i, j, k 가 서로 수직이 될 수 있도록 결정 한다.

Step 2. 국부 좌표계 변환

입력: ${}^{\Omega}\{\Psi_k\}_{k=0}^K$ (global), $\omega = \{o, i, j, k\}$,

$\Omega = \{O, I, J, K\}$

출력: ${}^{\omega}\{\Psi_k\}_{k=0}^K$ (local)

Procedure:

$${}^{\omega}\Psi_k = R({}^{\Omega}\Psi_k - T); R = \begin{bmatrix} i \bullet I & i \bullet J & i \bullet K \\ j \bullet I & j \bullet J & j \bullet K \\ k \bullet I & k \bullet J & k \bullet K \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T = o - O;$$

Step 3. 적교 NURBS-곡면 보간

입력: ${}^{\Omega}\{\Psi_k\}_{k=0}^K$

출력: local NURBS surface ${}^{\omega}S(u, v)$

Procedure:

1) Spherical-coordinate 변환

$${}^{\Omega}\{\Psi_k\} = \{(x_k, y_k, z_k)\} \Rightarrow {}^{\omega}\{\Phi_k\} = \{(\rho_k, \phi_k, \theta_k)\}$$

2) Base-sphere 생성

Arc-angle $\phi_e - \phi_s, \theta_e - \theta_s$ 을 만족하는 반지름 1인 NURBS sphere $B(u, v)$ 생성(최대 2×4 개의 회전2차 Bezier(RQB) patch로 구성)

3) 곡면매개변수 동기화

각 $\Phi_k = (\rho_k, \phi_k, \theta_k)$ 에 대하여 $B(u, v)$ 에 대응하는 매개 변수를 계산한다.

(u_k, v_k) 는 Φ_k 와 원점을 잇는 직선과, $B(u, v)$ 의 교점 계산에 의하여 결정한다.

$$\{\Phi_k\} = \{(\rho_k, \phi_k, \theta_k)\} \Rightarrow \{\hat{\Phi}_k\} = \{(\rho_k, u_k, v_k)\}$$

4) Single-valued B-spline 곡면 보간

XY-plane 투영에 의한 single-valued(non-parametric) B-spline 곡면보간

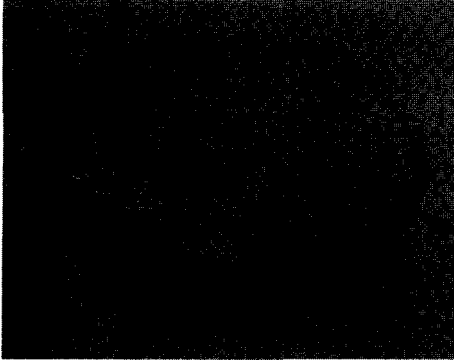


Fig. 8. The result of orthogonal NURBS modeling for sphere.

$$\{\hat{\Phi}_k\} \Rightarrow F(u, v)$$

5) NURBS-surface 생성

Symbolic product operation에 의한 NURBS 곡면 생성

$$S(u, v) = F(u, v)B(u, v)$$

Step 4. 전역 좌표계 변환

입력: ${}^{\Omega}S(u, v)$ (local), $\Omega = \{O, I, J, K\}$

출력: global NURBS surface ${}^{\Omega}S(u, v)$ (global)

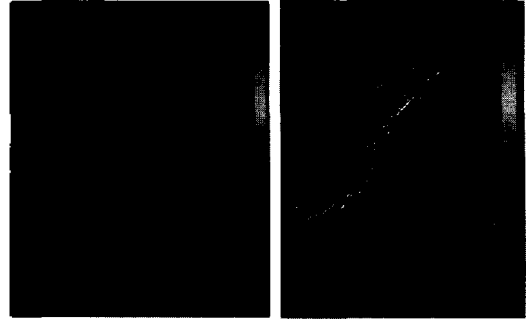
Procedur: ${}^{\Omega}S(u, v) = R^{-1}{}^{\omega}S(u, v) + T$ (affine-transform invariance property에 의하여 곡면의 조정점 변환을 통하여 곡면변환)

이상의 과정을 거쳐서 Fig. 8와 같은 회전형상의 skinning 곡면인 sphere 곡면을 모델링 할 수가 있다.

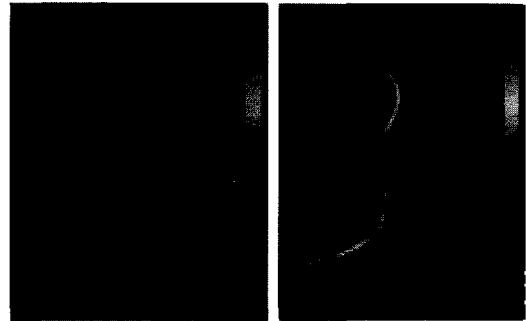
4. 모델링 분석 및 결과

4.1 모델링 결과 분석

본 연구에서 제시한 방법을 검증하기 위하여 특징 곡면인 base곡면과 slant곡면에 대하여 오차 분석을 수행하였다. Fig. 9(a)에서 접촉식에 의해 측정된 데이터를 이용하여 위에서 제시한 방법으로 형성한 서피스 모델과 측정 점 데이터간의 오차 분석 결과를 나타낸다. Fig. 9(b)에서는 비접촉식으로 측정된 데이터로 수행한 서피스 모델링과 측정점 데이터간의 오차를 나타낸다. Fig. 9에서 접촉식에 의해 측정된 데이터와 서피스곡면 오차는 base곡면의 경우 0.014~ -0.02이고, slant surface 경우 0.0091~ -0.0086이다. 반면 비접촉식의 경우 base곡면은 0.098~ -0.3, slant 곡면의 경우 0.201~ -0.079로 접촉식에 의해 측정된 데이터로

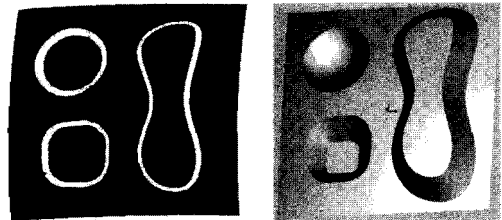


Base surface Slant surface
(a) Cloud point-surface difference for digitized data



Base surface Slant surface
(b) Cloud point-surface difference for scanned data

Fig. 9. Cloud point -surface difference.



(a) (b)

Fig. 10. Modeling result for the test sample.

모델링한 결과가 비접촉식에 비해 훨씬 정밀한 결과를 나타내고 있다.

4.2 모델링 결과

위에서 각각 모델링된 곡면을 합성하면 Fig. 10(a)과 같이 된다. 본 역모델 생성의 입력 데이터가 CMM측정 probe의 중심점 데이터이므로 반지름만큼 읍셋하여 주어야 한다. 본 측정에서 사용한 프로브볼의 지름은 3φ이므로 각각의 곡면을 확장시킨 후 반지름 만큼 읍셋 한 후 읍셋곡면들의 교차곡선으로 트립

곡면을 생성하면 Fig. 10(b)와 같은 최종곡면을 얻게 된다.

5. 결론 및 토론

본 연구에서는 비접촉식 측정과 접촉식 측정의 장점을 이용하여 다단계 점 데이터 획득방법에 대하여 논하였다. 본 연구와 관련된 선행연구로는 CAD 모델이 없는 실물로부터 비접촉식 측정 방법으로 다량의 점 데이터를 획득한 후 근사곡면 모델을 구축하고 이를 영역화하여 영역별 경계곡선을 얻는 연구^[20]와 개별 영역에 대하여 형상특징에 적합한 측정정보에 의하여 접촉식으로 측정을 수행하는 연구^[14] 수행하였다. 본 연구에서는 주로 측정데이터를 이용하여 각 면의 특징에 따라 곡면을 floor type, wall type, Rotation type으로 나누어 각 곡면의 모델링방법에 대한 알고리즘을 설명하고 그 결과를 보여주었다. 본 연구에서 구조화된 점 데이터는 정밀할 뿐 아니라 곡면 형성에 적합하도록 계획하여 얻은 점들로서 각 단계에 필요한 초기값을 가지고 있으며 또한 높은 품질을 보장하는 데이터이므로 곡면 모델링과정을 보다 정밀하고 효율적으로 수행할 수 있었다.

본 연구의 최종목표는 역공학을 하는데 있어서 무인 자동으로 신속하게 실물모형의 형상정보를 획득하고 이를 모델링하여 역설계를 가능하게 하는 체계적인 시스템을 구축하는 것이다. 3차원 측정기로 측정된 데이터는 probe ball center data이므로 측정데이터를 offset시켜줘야 한다. Offset 했을 경우 곡면이 우는 경향이 나타난다. 향후 이러한 문제를 해결하는 연구가 추가로 필요하다.

후 기

본 연구는 인천대학교 차체연구비 지원과 한국과학재단 복직기초연구(과제번호 2000-2-30400-002-3) 지원 및 동북아전자물류연구센터 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Chen, L. and Lin, G., "An Integrated Reverse Engineering Approach to Reconstruction Free-form Surfaces," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 49-60, 1997.
2. Lin, A., Lin, S. and Fang, T., "Automated Sequence Arrangement of 3D Point Data for Surface Fitting

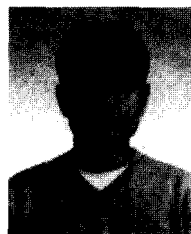
- in Reverse Engineering," *Computers in Industry*, Vol. 35, pp. 149-173, 1998.
3. Peng, Q. and Loftus, M., "A New Approach to Reverse Engineering Based on Vision Information," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 881-899, 1998.
4. Werner, A., Skalski, K., Piszczatowski, S., Swieszkowski, W. and Lechniak, Z., "Reverse Engineering of Free-form Surface," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128-132, 1998.
5. Kim, S. W., Choi, Y. B. and Oh, J. T., "Reverse Engineering: High Speed Digitization of Free-form Surfaces by Phase-shifting Grating Projection Moire' Topography," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 389-401, 1999.
6. 이현직, 고태조, 김희승, "점 데이터의 Rational B-spline 근사를 통한 역공학," 한국정밀공학회지, 제 16권, 제5호, pp. 160-168, 1999.
7. Estler, W. T., Phillips, S. D., Borchardt, B., Hopp, T., Witzgall, C., Levenson, M., Eberhardt, K., McClain, M., Shen, Y. and Zhang, X., "Error Compensation for CMM Touch Trigger Probes," *Precision Engineering*, Vol. 19, pp. 85-97, 1996.
8. 김선호, 김인훈, "Scanning Probe를 이용한 OMM (On the Machine) 시스템 개발 및 평가," 한국정밀공학회지, 제13권, 제10호, pp. 71-77, 1996.
9. Dirckx, J. J. J., Decraemer, W. F. and Dielis, G., "Phase Shift Method Based on Object Translation for Full Field Automatic 3-D Surface Reconstruction from Moire Topograms," *Applied Optics*, Vol. 27, No. 6, pp. 1164-1169, 1988.
10. Sato, Y., Kitagawa, H. and Fujita, H., "Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-Ray Projections," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-4, No. 6, pp. 641-646, 1982.
11. 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM 시스템에서의 측정 오차 해석," 한국정밀공학회지, 제15권, 제5호, pp. 34-42, 1998.
12. Takeuchi, Y., Shimizu, H. and Mukai, I., "Automatic Measurement of 3-Dimensional Coordinate Measuring Machine by Means of CAD and Image Data," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 565-568, 1990.
13. Cho, M. W., Kim, M. K. and Kim, K., "Flexible Inspection System Based on a Vision Guided Coordinate Measuring Machine," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.
14. 박영근, 고태조, 김희승, "역공학에서 센서융합에 의한 효율적인 데이터 획득," 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, pp. 61-70, 2001.
15. 이현직, 고태조, 김희승, "센서 융합을 통한 효과적인 디지털타입에 의한 역공학," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 419-422, 1999.
16. 윤길상, 조명우, "다중센서를 이용한 자유곡면의 역공학," 한국정밀학회지, 제19권, 제8호, 2002.

17. 양민양, 이용기, "역공학을 위한 측정점의 영역화," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 173-179, 1999.
18. Sarkar, B. and Menq, C-H., "Smooth-surface Approximation and Reverse Engineering," *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 9, pp. 623-628, 1991.
19. 박정환, 정연찬, 최병규, "Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링," 한국정밀공학회지, 제15권, 제11호, pp. 180-188, 1998.
20. 김재현, 신양호, 박정환, 고태조, 유우식, "역공학에서 Z-map을 이용한 특징형상 탐색 및 영역화," 한국정밀공학회지, 제20권, 제2호, 2003.
21. Bae, S.-H. and Choi, B. K., "NURBS Surface Fitting Using Orthogonal Coordinate Transform for Rapid Product Development," *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 683-690, 2002.



김 권 흠

2000년 중국연변대학교 기계학과 조교수
2002년 인하대학교 기계공학과 석사
2002~현재 시립인천대학교 산업공학과 박사과정



장 경 열

2001년 시립인천대학교 산업공학과 학사
2003년 시립인천대학교 산업공학과 석사



유 우 식

1986년 서울대학교 산업공학과 학사
1988년 KAIST 산업공학과 석사
1992년 KAIST 산업공학과 박사
1996년 규오공과대학교 조교수
1996~현재 시립인천대학교 부교수
관심분야: Geometric Modeling, Reverse engineering, e-logistics



박 정 환

1995년 KAIST 산업공학과 박사
1995~1997년 미국 Chrysler Technology Center 연구원
1997~현재 영남대학교 기계공학부 부교수



고 태 조

1983년 부산대학교 공학사
1985년 부산대학교 석사
1994년 포항공과대학교 박사
1985~1995년 대우종합기계공업연구원
1995~현재 영남대학교 전임강사, 조교수, 부교수
관심분야: CAD/CAM, 공작기계, 나노 가공



배 석 형

1994년 KAIST 기계공학과 학사
1996년 KAIST 기계공학과 석사
2002년 KAIST 산업공학과 박사
2002년~현재 KAIST 가상현실연구센터 Post Doc.
관심분야: Surface modeling, CAD/CAM, and Reverse engineering