

역공학에서 센서융합에 의한 효율적인 데이터 획득

박영근*, 고태조**, 김희솔**

Efficient Digitizing in Reverse Engineering By Sensor Fusion

Young Gun Park*, Tae Jo Ko**, and Hee Sool Kim**

ABSTRACT

This paper introduces a new digitization method with sensor fusion for shape measurement in reverse engineering. Digitization can be classified into contact and non-contact type according to the measurement devices. Important thing in digitization is speed and accuracy. The former is excellent in speed and the latter is good for accuracy. Sensor fusion in digitization intends to incorporate the merits of both types so that the system can be automatized. Firstly, non-contact sensor with vision system acquires coarse 3D point data rapidly. This process is needed to identify and localize the object located at unknown position on the table. Secondly, accurate 3D point data can be automatically obtained using scanning probe based on the previously measured coarse 3D point data. In the research, a great number of measuring points of equi-distance were instructed along the line acquired by the vision system. Finally, the digitized 3D point data are approximated to the rational B-spline surface equation, and the free-formed surface information can be transferred to a commercial CAD/CAM system via IGES translation in order to machine the modeled geometric shape.

Key Words : Sensor Fusion(센서 융합), Vision System(비전 시스템), Scanning Probe(스캐닝 프로브), Reverse Engineering(역공학), Rational B-spline surface equation(유리 B-spline 곡면 방정식)

1. 서론

복잡한 자유곡면 형상을 갖는 제품을 제조하기 위한 제조법으로 최근 역공학이 대두되어 현재 상당한 연구가 진행되고 있다.^(1~5) 이를 위해서는 신속하고 정확하게 실물모형에 대한 점 데이터를 획득하여야 한다. 이러한 점 데이터를 획득하는 방법은 사용하는 센서의 종류에 따라서 크게 빛을 이용한 비접촉식 측정법과 접촉 변형량을 이용한 접촉식 측정법이 있다.^(6~9)

잘 알려진 바와 같이, 접촉식은 측정 속도가 느린 반면 정밀하게 데이터를 측정할 수가 있으며, 비접촉식은 일반적으로는 그와 반대이다. 특히, 역공학을 목적으로 측정할 때는 많은 점 데이터를 획득해야 한다. 이때, 접촉식의 경우는 작업자가 터치 프로브를 움직이면서 교시(teaching and playback)하여 측정하든지 아니면 스캐닝 프로브를 이용하여 자동으로 측정하는 방법을 선택한다.

2000년 11월 10일 접수

* 영남대학교 기계공학부 대학원

** 영남대학교 기계공학부, 정회원

비접촉식에 비해서는 정밀한 측정은 가능할지 몰라도 너무 많은 작업자의 개입이 필요하여 비능률적이다.

이러한 관점에서 3차원 측정기나 디지털링 머신 등에서 물체의 측정시 측정의 신속 및 자동화를 위하여 센서융합에 대한 연구가 상당히 진행되고 있다. Takeuchi 등은 적외선 카메라와 터치 프로브를 이용하여 3차원 측정기 위의 임의 위치에 놓여진 물체를 CAD 데이터에서 미리 만들어진 측정 경로를 따라서 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.⁽¹⁸⁾ 그 이후 3차원 측정기상의 임의 위치에 놓여진 물체를 작업자의 간섭을 최소화하면서 측정하기 위하여 물체를 먼저 인식하기 위한 다양한 방안들이 강구되었는데, Cho 등은 CCD카메라를 이용하여 스테레오 비전 시스템과 Z-layer를 이용하는 방안을 발표하였다.⁽¹⁹⁾ 이상과 같이 접촉식 센서를 사용할 때 이 센서의 단점인 측정속도와 너무 많은 작업자의 개입을 방지하기 위한 자동화의 개념은 보다 신속하고 정확하게 데이터를 획득할 수 있게 하는 중요한 요소 중의 하나이다.

이러한 목적으로 본 논문에서는 접촉식과 비접촉식 센서를 센서융합함에 의해 데이터를 획득하는 방법을 제안한다. 이 경우 비접촉식 센서는 측정용 장비 테이블 상의 임의 위치에 있는 물체를 인식하며, 거칠게 데이터를 측정하게 된다. 그리고 접촉식 센서는 비전 시스템으로 측정한 거친 데이터를 이용하여 만들어진 측정점에 대해 정밀한 측정을 하는데 사용이 된다. 이러한 방식의 센서융합에 있어서 중요한 것은 비전시스템의 캘리브레이션, 즉, 임의위치에 장착되는 비전용 카메라와 측정기의 좌표를 일치시키는 것이다. 즉, Fig. 1과 같은 방법으로 비접촉식과 접촉식의 센서를 융합하는데, 먼저 비전 시스템을 측정기에 부착된 스캐닝 프로브를 이용하여 캘리브레이션 한 다음 비전 시스템으로 실물모형을 측정한다. 이때 스캐닝 프로브의 위치는 이미 알고 있기 때문에 이를 이용하여 캘리브레이션하는 방법은 매우 효과적이며, 이후 비전 시스템과 측정기의 좌표계가 일치되기 때문에 측정경로의 시작점을 맞추기 위한 작업자의 수작업을 없앨 수가 있다. 이렇게 해서 얻어진 거칠은 점 데이터를 이용하여 터치 프로브의 측정경로를 설정하여 줌으로써 정확한 점 데이터를 무인으로 측정하게 된다. 이러한 시스템의 구현은 공작기계상에서 이루어지도록 하였으며, 그 구현결과가 소개된다.

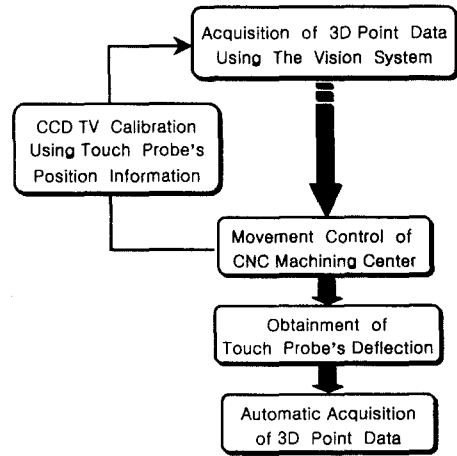


Fig. 1 The process of automatic measurement by the sensor fusion

2. 센서 융합 측정 시스템의 구성

본 연구에서 수행한 센서 융합 점 데이터 측정 시스템(Fig. 2)은 CCD 카메라와 프로젝터로 구성된 비전 시스템과 공작기계 주축에 장착된 스캐닝 프로브(SP2-1, Renishaw)로 구성된다. 비전 시스템은 임의의 위치에 존재해 있는 공작물에 대해 그 위치를 파악하여 프로브를 자동적으로 구동시키기 위한 초기 정보인 거친 점 데이터를 획득하며, 스캐닝 프로브는 비전 시스템의 보정, 그리고 정밀측정용 센서로 각각 이용된다. 보정을 하는 방법은 측정기의 테이블위에 위치를 미리 알고 있는 기준구를 이용하는 방법이 일반적이지만, 본 연구에서는 스캐닝 프로브의 탐침봉 위치를 기계좌표로부터 알 수 있기 때문에 이를 이용하는 방법을 제시한다. 따라

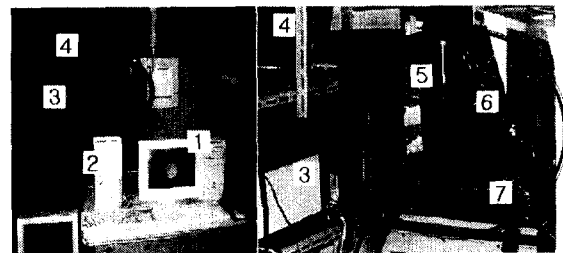


Fig. 2 3D measurement system with the sensor fusion

서, 두 측정 센서 시스템이 상호 유기적으로 정보를 교환하면서 신속하고 정확하게 3D 점 데이터를 측정하는 시스템을 구성하였다.

Fig. 2의 센서 융합 측정 시스템은 비접촉식 측정 장비인 CCD 카메라와 접촉식 측정 장비인 스캐닝 프로브를 장착하고 있으며 시스템 구성 요소에 대한 개략적인 설명은 다음과 같다.

- ① TV 수신 카드를 장착한 PC (CCD로부터 24 비트맵 파일 영상 획득)
- ② 프로브의 위치 제어와 탐침봉의 접촉 변형량 획득을 위한 PC
- ③ 프로젝터와 연결된 PC (슬릿빔 생성)
- ④ 슬릿 빔을 투사하는 프로젝터
- ⑤ 영상을 획득하는 흑백 CCD TV
- ⑥ 접촉식 센서 (3D 점 데이터를 측정하는 SP2-1 프로브)
- ⑦ 점토로 만든 실물 모형 (측정 물체)

3. 슬릿 빔을 이용한 3D 점데이터 측정

본 논문에 적용된 비전 시스템은 구조광으로서 일반적으로 사용하는 레이저 광 대신에 빔 프로젝터에서 투사되는 슬릿광을 사용하였다. 카메라 보정 기법으로는 카메라를 핀홀 모델로 가정한 복잡한 보정법⁽¹⁰⁾ 대신 카메라 렌즈의 왜곡을 쉽게 고려할 수 있는 다중 보정면을 이용한 카메라 보정 기법⁽¹¹⁾을 적용하였다.

Fig. 3과 같이 비전 시스템은 영상 획득을 위한 CCD 카메라와 화상 처리 보드(TV 수신 카드)를 내장한 PC, 슬릿광 생성을 위한 빔 프로젝터 그리고 측정 물체로 구성되어 있다.

Fig. 3을 보면 프로젝터에서 투사되는 슬릿빔은 공간상에서 평면이며, CCD 카메라 영상면에 맺힌 영상점과 측정 물체 상의 측정점을 연결한 투영선은 공간상에서 직선이 된다. 따라서 측정 물체의 3D 점 데이터는 슬릿빔의 평면과 CCD 카메라의 투영선이 만나는 교점을 구함으로써 간단히 얻을 수 있다. 이러한 시스템은 다음과 같은 순서로 측정이 이루어진다.

- ① 두 보정면을 이용한 카메라 보정
- ② 프로젝터 보정

- ③ CCD 카메라의 투영선 계산
- ④ 슬릿빔과 투영선의 교점 계산

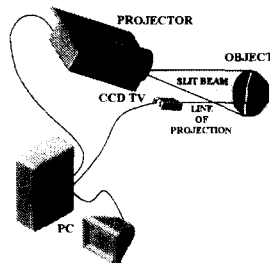


Fig. 3 The vision system applied to the sensor fusion

3.1 두 보정면을 이용한 카메라 보정

카메라의 왜곡에 대한 보정을 위해서는 먼저 Fig. 4와 같이 3D 정보를 알고 있는 보정면 상의 보정점들을 이용하여 각 보정면에 대한 보정행렬 (A_1, A_2)을 구해야 한다.

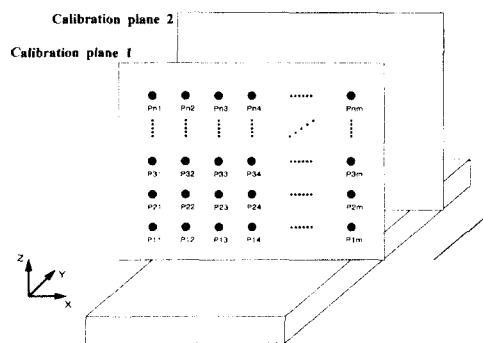


Fig. 4 3D calibration points on the calibration plane

보정면은 실제로 정밀하게 제작된 보정판이 아니라 공간상을 이동하는 탐침봉이 만드는 평면이다. 이 중에서 보정면 2는 가상의 보정면 1을 Y 축 방향으로 테이블을 이송했을 경우의 위치이다. Fig. 4의 보정면 1에 대한 3D 보정점 ($P_{11} \sim P_{1m}$)과 CCD카메라에 잡힌 영상인 Fig. 5의 2D 영상점 ($Q_{11} \sim Q_{1m}$) 사이의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 보정행렬 (A_1, A_2)은 각각 보정면 1, 2의 영상좌표 변환 관계를 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 보정면에 대한 보정점을 실제적으

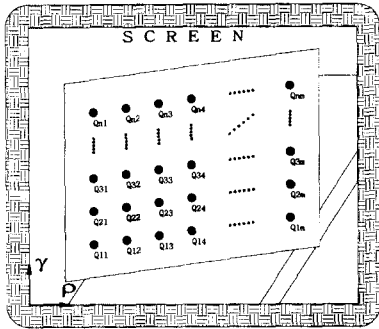


Fig. 5 2D calibration points on the CCD image

로는 공간상에서 스캐닝 프로브를 각각의 점으로 이동시킨 후 영상을 획득하는 방법을 취함으로써, 기준구가 부착된 면판을 사용하는 방법에 비하여 면판 그 자체의 보정 등의 부수적인 일을 제거하였다.

$$Q_i \approx A_i P_i \quad (1)$$

여기서, $i=1, 2 : (\text{보정면}), A_i : \text{보정행렬}$

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i & y_i & \dots & x_i \\ y_i & y_i & \dots & y_i \\ z_i & z_i & \dots & z_i \end{bmatrix}, \quad Q_i = \begin{bmatrix} \rho_i & \rho_i & \dots & \rho_i \\ \gamma_i & \gamma_i & \dots & \gamma_i \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

$$l = n \times m$$

식 (1)의 보정행렬은 식 (2)와 같이 최소 자승법으로 구할 수 있다.

$$A_i = Q_i P_i^T [P_i P_i^T]^{-1} \quad (2)$$

3.2 빔 프로젝터 보정

빔 프로젝터 보정은 보정이 완료된 카메라를 이용하여 프로젝트에서 방사되는 슬릿 빔에 대해 평면 방정식을 구하는 과정이다. 먼저, 식 (2)에서 구한 보정행렬을 이용하여 Fig. 6과 같이 정밀하게 제작된 보정면 1에 투사된 빔 프로젝터의 영상에 대해 Fig. 7과 같은 빔의 3D 위치 정보를 CCD카메라로 획득한 후 식 (3)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$B_1 = A_1^{-1} Q_1 \quad (3)$$

여기서, $B_1 = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_k]$,

$$Q_1 = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_k],$$

$$p_k = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad q_k = \begin{bmatrix} \rho \\ \gamma \\ 1 \end{bmatrix}$$

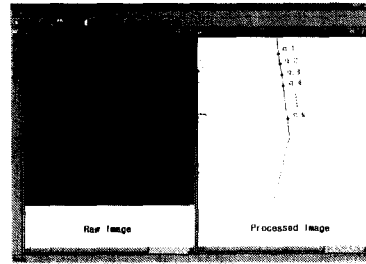


Fig. 6 CCD image of projected slit beam on the calibration plane 1

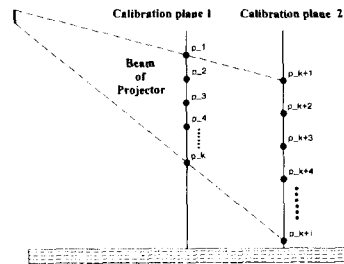


Fig. 7 Projected slit beam on the spatial calibration plane 1, 2

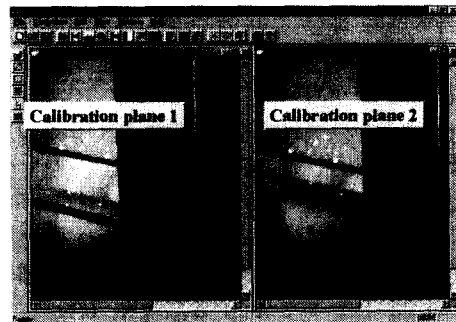


Fig. 8 The spatial calibration plane 1, 2 on the table

한편, Fig. 8과 같이 보정면 1을 y축 방향으로 일정량 이동시킨 보정면 2에 대해서도 동일한 방법

을 적용하여 빔의 3D 위치 정보(B_2)를 구할 수 있다. 식 (3)으로부터 보정면 1, 2에 대해 각각 구한 3D 점 데이터(p_1, p_2, \dots, p_{k+i})로부터 슬릿빔의 평면 방정식을 구할 수 있는데, 공간상에서 평면은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

평면 방정식의 계수 a 를 1로 두고 식 (4)를 행렬식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$-x = [y \ z \ 1] \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 $k+i$ 개의 점 데이터를 대입하면 식(6)과 같이 된다.

$$-\begin{bmatrix} x_{-1} \\ x_{-2} \\ \vdots \\ x_{-k+i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{-1} & z_{-1} & 1 \\ y_{-2} & z_{-2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{-k+i} & z_{-k+i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에 있는 평면 방정식의 계수는 식 (7)과 같이 최소 자승법을 적용하여 구할 수 있다.

$$C = [M^T M]^{-1} M^T X \quad (7)$$

여기서, $C = \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix}$, $X = -\begin{bmatrix} x_{-1} \\ x_{-2} \\ \vdots \\ x_{-k+i} \end{bmatrix}$,

$$M = \begin{bmatrix} y_{-1} & z_{-1} & 1 \\ y_{-2} & z_{-2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{-k+i} & z_{-k+i} & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 CCD 카메라의 투영선 방정식

Fig. 9의 이미지 평면상의 빔은 보정면 1과 2 사이에 측정 물체가 있을 경우 슬릿빔(프로젝터 빔)이 측정 물체에 비쳐서 생긴 곡선이며, 빔상에 있는 Q점은 카메라에 내장된 CCD 배열 가운데 임의의 한 점에서 렌즈를 투과하여 물체로 투사된 투영선이 측정 물체와 만난 점이다. 따라서 각 보정면 상에 있는 P_1, P_2 는 CCD 배열 가운데 임의의 한

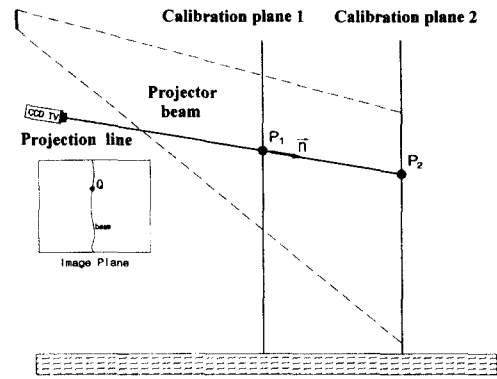


Fig. 9 Projection line of CCD TV

점에서 물체로 투사된 투영선이 각 보정면 1, 2와 만난 점들이다. 따라서 P_1, P_2 는 식(2)에서 이미 구한 각 보정면에 대한 보정행렬을 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_i = A_i^{-1} Q \quad (8)$$

여기서, $i = 1, 2$: 보정면, A_i : 보정행렬

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \gamma \\ 1 \end{bmatrix}$$

공간상에 있는 측정 물체에서 임의의 3D 측정 점과 이 측정점이 영상으로 맺힌 CCD 배열 가운데 한 점을 선으로 연결한 투영선은 식 (8)에서 구한 P_1, P_2 로부터 식(9)와 같은 공간상의 직선 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{x-x_1}{l} = \frac{y-y_1}{m} = \frac{z-z_1}{n} \quad (9)$$

여기서, l, m, n : 단위 투영 벡터 (\vec{n})

x_1, y_1, z_1 : 보정면 1에 대한 영상점 Q의 3D 좌표값 (P_1)

3.4 슬릿빔과 투영선의 교점 계산

실제 측정 물체의 3D 점 데이터는 슬릿빔의 평면과 CCD 투영선의 직선이 만나는 교점을 계산함으로써 구해진다. 따라서 슬릿빔의 평면 방정식인 식 (4)와 CCD TV 투영선의 직선 방정식인 식 (9)의 공통근을 식 (10)과 같이 구하여 측정 물체의 3D

점 데이터를 구한다.

식 (10)을 적용하여 측정 물체의 3D 점 데이터를 구하기 위해서는 먼저 카메라와 프로젝터 보정을 실시하여 슬릿빔의 평면 방정식을 구해야 하며, 그 다음부터는 측정 물체의 한 점을 측정할 때마다 매번 식 (9)의 CCD 투영선을 구하여야 한다. 즉, Fig. 9의 Q점은 측정하고자 하는 물체의 한 점에 해당하기 때문에 다른 위치의 점 데이터를 측정하기 위해서는 다른 위치의 CCD 소자에 의해 생성되는 투영선 방정식을 매번 구하여 측정을 해야한다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{(bm + cn)x_1 - (by_1 + cz_1 + d)l}{al + bm + cn} \\ y &= \frac{(al + cn)y_1 - (ay_1 + cz_1 + d)m}{al + bm + cn} \\ z &= \frac{(al + bm)z_1 - (ax_1 + by_1 + d)n}{al + bm + cn} \end{aligned} \quad (10)$$

4. 프로브를 이용한 3D 점 데이터 측정

본 논문에서는 스캐닝 프로브를 CNC 공작기계 주축에 장착해서 프로브가 측정 물체와 접촉할 때 발생하는 접촉 변형량을 이용하여 3D 점 데이터를 측정한다.⁽¹²⁾ 그리고 이 센서는 센서 융합 측정시 프로브의 탐침봉 센터의 위치 정보를 가지고 보정면 상의 보정점으로 이용된다.

4.1 측정 시스템의 구성

본 논문에서 사용한 접촉식 측정 시스템은 Fig. 10과 같이 다음으로 구성되어 있다.

- SP2-1 probe : 탐침봉(stylus)을 장착한 스캐닝용 프로브
- Probe Interface Card : 탐침봉의 접촉 변형량을 카운트(count)
- RS232C Cable : NC 코드 전송
- CNC Machine Tool : 주축에 프로브를 장착하고 DNC로 PC에 의해 구동
- PC : 프로브 인터페이스 카드 장착

4.2 측정 원리

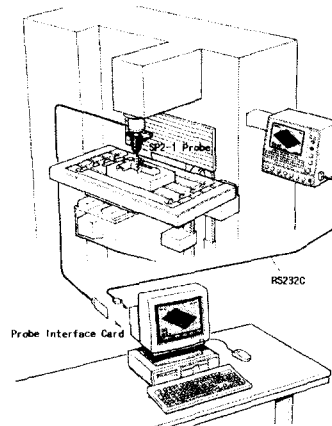


Fig. 10 Contact measurement system with touch probe

본 논문에서는 CNC 공작기계를 PC로 구동하며, 공작기계 주축에 장착된 프로브가 기계 원점에서부터 이동된 거리, 즉 탐침봉의 3D 위치 정보 (x, y, z)와 PC에 장착된 프로브 인터페이스 카드로부터 얻은 탐침봉의 접촉 변형량($\delta_x, \delta_y, \delta_z$)을 이용하여 탐침봉이 접촉한 측정 물체의 접촉 위치를 계산한다.

프로브를 이용한 3D 측정에서는 프로브에 장착된 탐침봉의 반경 보정이 측정 정밀도를 크게 좌우한다. 이를 위해서는 측정물체 표면의 법선벡터를 알아야 하고, 측정도 법선방향으로 이루어지는 것이 바람직하다. 그러나, 본 연구에서는 측정 물체의 형상을 무시하고 Z축 방향으로 탐침봉을 접촉시켜서 얻은 탐침봉의 접촉 변형량($\delta_x, \delta_y, \delta_z$)을 접촉점에 대한 법선 벡터로 가정하여 탐침봉의 반경 보정을 실시하였다. 그러나 좀더 정확한 측정을 하기 위해서는 비전 시스템에서 측정한 측정 물체의 초기 정보로부터 곡면의 법선을 구한 다음 각 측정점의 법선 방향으로 탐침봉을 접촉시켜 측정을 수행해야 한다. 측정순서는 다음과 같다.

- ① 프로브의 좌표축 보정
- ② 프로브 인터페이스 카드로부터 접촉 변형량 획득(DNC로 위치 제어)
- ③ 프로브의 위치와 탐침봉의 접촉 변형량으로부터 탐침봉의 센터 계산
- ④ 탐침봉의 반경 보정으로 접촉점 계산

4.3 프로브 좌표축과 탐침봉 반경 보정

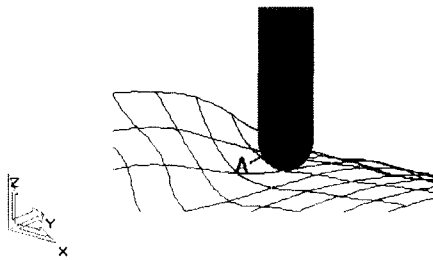
측정을 하기에 앞서 먼저 프로브의 보정과 탐침봉의 반경 보정을 실시해야 한다. 프로브의 보정은 엔드밀로 자체가공한 지그를 이용하여 주축 중심과의 center shift, 평행축에 대한 rotation을 계산하였다. 다음으로 측정 물체와 접촉한 접촉점 위치(\vec{A})는 탐침봉의 센터(\vec{B})와 Fig. 11에서 프로브가 접촉면에 수직한 접촉 변형 벡터(\vec{AB})를 사용하여 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$\vec{A} = \vec{B} + \vec{AB} \quad (11)$$

접촉 변형 벡터(\vec{AB})는 접촉한 곡면에서의 접촉변형량 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 를 법선 벡터로 사용하여 탐침봉의 반경 보정을 실시한다. 따라서 측정 물체와 탐침봉이 접촉한 위치(\vec{CP})는 식 (12)와 같이 측정할 수 있다.

$$\vec{CP} = \vec{B} + R \cdot \vec{n} \quad (12)$$

여기서, $\vec{n} = -\frac{\vec{AB}}{|\vec{AB}|}$: 접촉점의 법선 단위 벡터



R : 탐침봉(stylus)의 반경

Fig. 11 Contact deflection of the stylus

5. 3D 점 데이터 측정실험

본 논문에서 사용한 센서 융합 측정 시스템은 두 보정면을 이용하여 카메라와 프로젝터 보정을 실시하였다. 보정할 때 공작기계 주축에 장착된 프로브의 탐침봉 센터 위치는 Fig. 4에 있는 보정면

상의 보정점들($P_{11} \sim P_{nm}$)로 이용한다. 그러나 이때 실제로 보정판은 존재하지 않아도 된다. 또한 Fig. 12에서 공작기계 테이블 위에 설치된 수직 평판을 Fig. 6의 빔 프로젝터 보정면으로 사용하였다. 그러나 본 논문에 사용된 공작기계는 프로브를 장착한 주축이 Z축 방향으로만 이동이 가능하기 때문에(X, Y축 방향은 테이블이 이동) 탐침봉 센터를 보정점으로 사용하기 위해서는 Fig. 12와 같이 수평면에 박힌 반구의 센터 좌표를 측정하는 다음 이를 영상 이미지의 기준점으로 잡고 영상 이미지에서 프로브의 상대 좌표를 찾아야 한다.



Fig. 12 The center measurement of half sphere

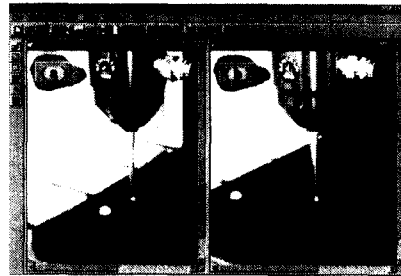


Fig. 13 Relative movement of a sensor on the CNC machine

따라서 Fig. 13과 같은 상대적 위치 정보를 이용하여 비전 시스템의 보정을 실시하는데, 보정 절차는 다음과 같다.

- ① Fig. 12와 같이 수평면에 박힌 구슬의 센터 3D 좌표 측정 및 CCD 영상 획득
- ② Fig. 12에 있는 수직 평면의 y좌표 측정
- ③ 공간상의 XZ 평면상에 일정 간격으로 탐침봉 센터 이동(3D 정보 획득)
- ④ 각 이동 위치에서 구슬이 포함되게 CCD 영상 획득(2D 정보 획득)

- ⑤ y축으로 일정량 테이블을 이동시킴
- ⑥ ③, ④번 절차 반복
- ⑦ 식 (2)를 이용하여 보정면 1, 2의 보정행렬 계산(카메라 보정)
- ⑧ ②에서 측정된 y값(보정면 1)으로 테이블 이동
- ⑨ Fig. 12에 있는 수직 평면에 투사한 슬릿빔 영상 획득(Fig. 6 참조)
- ⑩ ⑤번과 동일하게 테이블 이동(Fig. 8 참조)
- ⑪ y축으로 이동된 상태에서 ⑨번 절차 반복
- ⑫ 식 (3)과 (7)을 이용하여 빔의 평면 방정식 계산(프로젝터 보정)

5.1 탐침봉 센터의 위치 정보를 이용한 보정

센서 융합 측정 시스템은 Fig. 4에 있는 보정점들 대신 프로브의 탐침봉 센터의 위치 정보를 이용하여 보정을 실시하는데, Fig. 14는 CCD 카메라에서 획득한 24 비트맵 영상으로부터 탐침봉 센터의 상대위치 정보를 찾아내는 절차이다⁽¹³⁻¹⁴⁾.

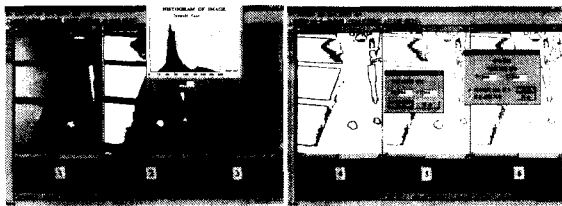


Fig. 14 3D point acquisition of stylus center from half sphere center

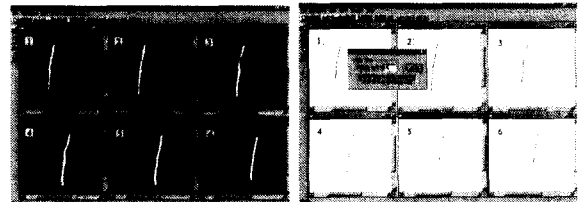
- ① CCD TV로부터 24 비트맵 영상 이미지 획득
- ② 24 비트 영상을 이진화
- ③ 소벨 연산자를 적용하여 에지 검출
- ④ 1 비트 영상으로 전환하여 반진
- ⑤ 허프 변환을 적용하여 반구의 센터 계산
- ⑥ 허프 변환을 적용하여 탐침봉의 센터 계산

이상과 같이 Fig. 14의 과정을 통해서 테이블 상에 있는 반구에 대한 탐침봉의 상대 위치를 찾아서 두 보정면을 이용한 보정을 실시한다.

5.2 센서 융합 점 데이터 측정

비전 시스템을 통한 측정 물체의 초기 정보 획득은 Fig. 15 (a)와 같이 공작기계의 테이블을 X축

방향으로 일정량 이동시키면서 측정 물체에 슬릿빔을 투사한 영상을 매 단계마다 획득한 후 5.1에서 기술한 영상처리를 한 Fig. 15 (b)의 2D 영상 정보를 식 (10)에 대입함으로 이루어진다⁽¹⁵⁾. Fig. 16은 비전 시스템으로 측정된 물체의 좌표점이다.



(a) Projected light (b) Processed data points
Fig. 15 Acquisition and processing of object image

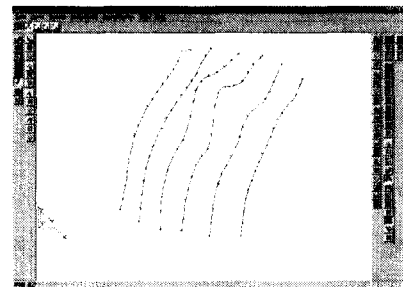


Fig. 16 Measured point data using the vision system

Fig. 16에서 획득한 초기 정보로부터 NC 코드를 생성하여 Fig. 17과 같이 자동적으로 공작기계에 장착된 프로브를 구동시키면서 측정 물체의 3D 점 데이터를 측정한다. 이때 측정을 하기 위한 점의 수는 모델링이 편리하도록 등간격으로 임의로 지정한 점들이다. 이 과정은 실제로 점 데이터를 이용하여 모델링한 후 CAD 모델로부터 측정경로를 생성할 수도 있으나 본 연구에서는 비전으로 측정된 점을 직접 사용하는 방법을 선택하였다.



Fig. 17 Automated measurement of point data

이렇게 하여 측정된 점 데이터가 Fig. 18이다. 한편 본 연구는 공작기계 상에서 이루어졌기 때문

에 정밀도의 관점에서 평가를 실시하지는 않고, 다만 비전 시스템과 접촉식 프로브를 이용하여 유기적으로 측정공정을 자동화할 수 있는가에 초점이 맞추어져 있다.

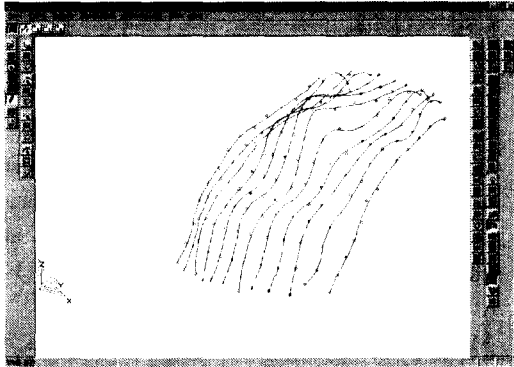


Fig. 18 Measured point data using the scanning probe

6. NURBS 근사를 통한 가공

측정된 물체의 3D 점 데이터를 본 논문에서는 *skinning method*를 적용한 NURBS 곡선 근사⁽¹⁶⁻¹⁷⁾로 측정 물체의 형상을 모델링하였다. 그리고 생성된 측정 물체의 합성 곡면은 IGES 파일로 전환된 후 상용 CAD/CAM 소프트웨어에서 가공 경로를 얻어 실제 가공을 수행할 수 있으며, Fig. 19는 점토로 만든 측정 물체와 상기 기술된 역공학으로 최종 가공된 제품이다.



Fig. 19 Machined product and clay model

7. 결론

본 논문에서는 비접촉식과 접촉식의 특징을 융합한 센서 융합 디지털링 시스템을 연구하였다. 측정기 상의 임의 위치에 놓여진 물체를 인식하고, 거칠은 점 데이터를 얻음으로써 접촉식 센서의 측정에 있어서 보다 자동화를 이룰 수 있어서 디지털링에 있어서도 센서융합에 의한 자동화가 가능함을 보였다. 그러나, 이 시스템을 이용하면 작업자의 개입을 보다 줄이면서 정확한 점 데이터를 신속하게 측정할 수 있지만, 아직 전용 디지털링 기계에서 본 연구를 실현하지 않았고, 비전 데이터로부터 거친 모델을 만들고, 이 데이터를 이용하여 범선방향으로 프로브가 측정을 하는 경로계획법 수립 등의 연구를 추가로 필요하다.

후 기

이 논문은 1999학년도 영남대학교 학술연구조성비와 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-002-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Liang-Chia Chen and Grier C I Lin, "An integrated reverse engineering approach to reconstruction free-form surfaces," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 49-60, 1997.
2. Alan C. Lin, Shou-Yee Lin, Tse-Hao Fang, "Automated sequence arrangement of 3D point data for surface fitting in reverse engineering," *Computers in industry*, Vol. 35, pp. 149-173, 1998.
3. QingJin Peng, Martin Loftus, "A new approach to reverse engineering based on vision information," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 38, pp. 881-899, 1998.
4. A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Swieszkowski, Z. Lechniak, "Reverse engineering of free-form surface," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128-132, 1998.
5. Seung-Woo Kim, Yi-Bae Choi, Jung-Taek Oh,

- "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moiré topography," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 39, pp. 389-401, 1999.
6. W. Tyler Estler, S. D. Phillips, B. Borchardt, T. Hopp, C. Witzgall, M. Levenson, K. Eberhardt, M. McClain, Y. Shen, and X. Zhang, "Error compensation for CMM touch trigger probes," *Precision Engineering*, Vol. 19, pp. 85-97, 1996.
 7. 김선호, 김인훈, "Scanning Probe를 이용한 OMM(On the Machine) 시스템 개발 및 평가," *한국정밀공학회지*, 제13권, 제10호, pp. 71-77, 1996.
 8. J. J. J. Direkx, W. F. Decraemer, and G. Dielis, "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.
 9. YUKIO SATO, HIROO KITAGAWA, and HIROICHI FUJITA, "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.
 10. ROGER Y. TSAI, "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. RA-3, No. 4, pp. 323-344, August 1987.
 11. 최이배, "영사식 다중 슬릿빔 토폴로그래피를 이용한 사람 얼굴의 삼차원 형상측정시스템 개발," *공학석사학위논문*, 한국과학기술원, 1993.
 12. 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM 시스템에서의 측정오차 해석," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제5호, pp. 34-42, 1998.
 13. 이상엽, *Visual C++ Programming Bible Ver. 6.x*, ㈜영진출판사, 1999.
 14. 하영호, 임재권, 남재열, 김용석, *디지털 영상 처리*, 도서출판 그린, 1998.
 15. 이현직, 고태조, 김희술, "센서 융합을 통한 효과적인 디지털이징에 의한 역공학," *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 419-422, 1999.
 16. 이현직, 고태조, 김희술, "Reverse Engineering을 위한 자유곡면의 Rational B-spline 근사," *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 573-576, 1998.
 17. 이현직, 고태조, 김희술, "점 데이터의 Rational B-spline 근사를 통한 역공학," *한국정밀공학회지*, 제16권, 제5호, pp. 160-168, 1999.
 18. Y. Takeuchi, H. Shimizu, I. Mukai, "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.
 19. M. W. Cho, M. K. Kim, K. Kim, "Flexible inspection system based on a vision guided coordinate measuring machine," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.