

## 비전 프로브를 이용한 기상에서의 복합곡면의 역공학

김경진\*, 윤길상, 조명우(인하대 기계공학과), 권혁동, 서태일(한국생산기술연구원)

Reverse Engineering of Compound Surfaces on the Machine Tool using a Vision Probe

K.J. Kim\*, K.S. Yoon, M.W. Cho (Inha University), H.D. Kwon and T. I. Seo(KITECH)

### ABSTRACT

This paper presents a reverse engineering method for compound surfaces using vision system. A CNC machining center is used as a measuring station, which is equipped with slit beam generator and vision probe. Since obtained data using slit beam or laser scanner may have much data loss along the edge of compound surfaces, an algorithm is presented in this study to recover missing geometric data at such region. First, b-spline interpolation is applied to extract edge information of the surface, and as a next step, b-spline approximation is applied to recover the missing geometric data. Finally, b-spline skinning method is applied to regenerate the surface information. Appropriate simulation and experimental works are preformed to verify the effectiveness of the proposed methods.

**Key Words :** Reverse Engineering (역공학), Vision probe (비전 프로브), On Machine Measurement (OMM: 기상측정)

### 1. 서론

다수의 복잡한 형상의 자유곡면은 해석적인 수식 표현이 어렵다는 특징을 가지고 있기 때문에 요구되는 제품의 형상을 수학적으로 구현하는 데에 많은 어려움이 있으며, 이러한 자유곡면의 모델링 문제를 해결하기 위하여 3 차원 측정기술을 활용한 역공학 (reverse engineering)<sup>[1-5]</sup>기술에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 역공학을 위한 측정기술로는 3 차원 측정기<sup>[3]</sup>를 사용하여 측정하는 방법과 레이저 스캐너를 사용하는 방법, 그 밖에 CT 나 MRI<sup>[6,7]</sup> 이용하여 측정하는 방법도 제기 되고 있다.

비전 시스템을 이용한 역공학의 경우 조명의 정도와 일정함 유지, 슬릿광의 산란 등 여러 가지 오차 요인 들에 의해서 측정 데이터에 다수의 오차를 포함하게 되며, 측정물이 급격한 함몰 부위를 가지거나 센서가 측정물에 가려질 경우에는 측정이 이루어지지 않게 된다. 또한 급격한 기울기를 가지는 측정 대상물에 대해서는 슬릿광의 구조적 특성상 데이터의 누락이 발생하게 되어 완전히 연결된 폴리라인 (polyline)이 생성되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이런 경향은 레이저 스캐너를 이용하여 측정하는 경우에도 발생하게 된다.

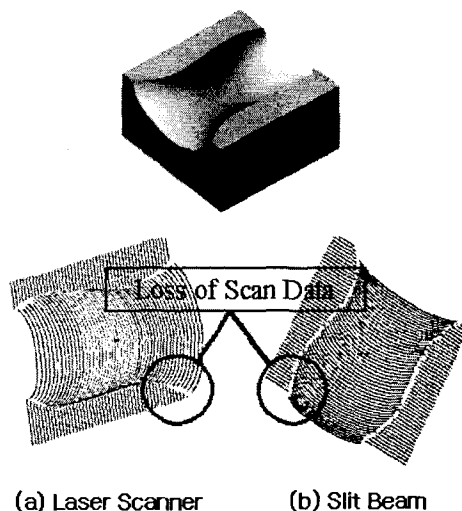


Fig. 1 Scan data loss at the edges of compound surfaces

Fig. 1 은 레이저 스캐너와 슬릿광을 이용하여 동일한 복합곡면을 측정 하였을 때 기울기가 급격히 변화하는 영역, 즉 측정된 대상물의 경우 에지 (edge) 부분에서 측정 데이터가 존재하지 않음을 알 수 있다. 이렇게 손실이 있는 측정 데이터를 이용하여 곡면을 재구성한다면, 데이터가 존재하지 않

는 특정 영역에 기대하지 않은 에러(error)를 가지게 될 것이다. 또한 에지의 데이터를 검출하지 않을 경우 자유 곡면은 특정 영역을 배제한 채 곡면을 재구성하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 비전 시스템을 통하여 에지에 대한 정보를 검출하여 자유곡면을 재구성하는 데 사용하였으며, 자유곡면 영역의 오차를 최소화하기 위해 B-spline approximation 을 적용하였고, 여기에 B-spline skinning method 를 이용하여 곡면을 재구성 하였다.

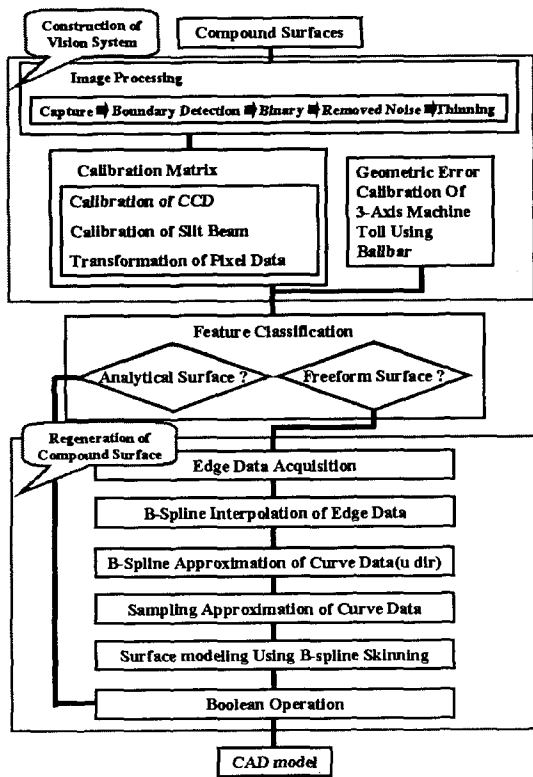


Fig. 2 Schematic diagram of the proposed methods

본 시스템은 CNC 공작기계 상에서 역공학을 구현하여 공작기계를 보유한 업체에서 용이하게 수행할 수 있는 시스템을 제시하고자 하였다. 슬릿광과 CCD 카메라를 이용하여 금형과 같은 복합곡면을 재구성하는 알고리즘을 Fig 2.에 도시화하였다.

## 2. 시스템 구성

### 2.1 슬릿광 기본 이론

슬릿광을 이용한 형상측정법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 CCD 카메라사이의 기하광학을

이용하여 삼차원 형상을 측정하는 기술이다. Fig 3.은 슬릿광을 이용한 3 차원 형상측정의 기본적인 시스템 구성을 보여준다.

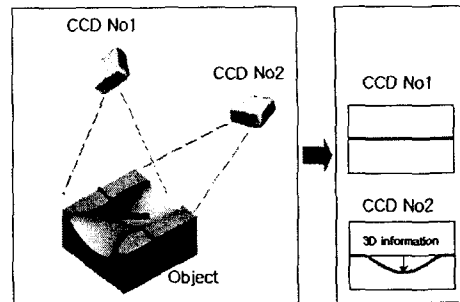


Fig. 3 Basic concept of the slit beam projection

### 2.2 카메라 보정

카메라 보정 기법으로는 복잡한 보정법 대신 카메라 렌즈의 왜곡을 쉽게 보정할 수 있는 두 보정면을 이용한 보정 기법을 적용하였다. 보정면에 대한 보정점을 공간상에서 기상측정에서 사용하는 접촉식 프로브로 각각의 점으로 이동시킨 후 영상을 획득하는 방법을 취하였다.<sup>[9]</sup>

보정면에 대한 3D 보정점  $P$  와 CCD 카메라에 잡힌 영상인 2D 영상점  $Q$  사이의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 보정 행렬( $A_1, A_2$ )은 각각의 보정면에서 영상좌표 변환 관계를 나타낸다.

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

식(1)의 보정행렬은 식(2)와 같이 최소자승법으로 구할 수 있다.

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

### 2.3 슬릿광 보정

슬릿광의 투영면의 식은 다음과 같이 측정좌표계에 대해 정의될 수 있다.

각각의 보정면에 대해 3D 점 데이터로부터 슬릿빔의 평면 방정식을 구할 수 있는데, 공간상에서 평면은 식(3)과 같이 표현한다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3)$$

식(3)에서 최소자승법을 적용하여 풀기 위해서  $a$  를 1 로 놓고, 식을 정리하고 다시  $a_1$  을 1 이라 놓고  $k+1$  개의 점 데이터를 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$X_1 = MC \quad (4)$$

$$C = [M^T M]^{-1} M^T X_1 \quad (5)$$

#### 2.4 CCD 카메라 투영선 방정식

각각의 보정면에 있는  $P_1, P_2$ 는 CCD 배열 가운데 임의의 한 점에서 물체로 투사된 투영선이 각각의 보정면과 만난 점들이다. 따라서  $P_1, P_2$ 는 식(2)에서 이미 구한 각각의 보정면에 대한 보정행렬을 이용하여 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$P_i = A_i^{-1} Q \quad (6)$$

임의의 3D 측정점과 이 측정점이 영상으로 맺힌 CCD 배열 가운데 한 점을 선으로 연결한 투영선은 식(6)에서 구한  $P_1, P_2$ 로부터 식(7)과 같은 공간상의 직선 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{x-x_1}{l} = \frac{y-y_1}{m} = \frac{z-z_1}{n} \quad (7)$$

여기서,  $l, m, n$  : 단위투영 벡터 ( $\vec{h}$ )  
 $x_1, y_1, z_1$  : 보정면 1에 대한 영상점  $Q$ 의 3D 좌표값 ( $P_1$ )

#### 2.5 슬릿빔과 투영선의 교점 계산

실제 측정 물체의 3D 점 데이터는 슬릿빔의 평면과 CCD 투영선의 직선이 만나는 교점을 계산함으로써 구해진다. 영상에서의 한 점  $Q$ 는 측정하고자 하는 물체의 한 점에 해당하기 때문에 다른 위치의 점 데이터를 측정하기 위해서는 다른 위치의 CCD 소자에 의해 생성되는 투영선 방정식을 매번 구하여 측정해야 한다.

$$x = \frac{(bm+cn)x_1 - (by_1 + cz_1 + d)l}{al + bm + cn}$$

$$y = \frac{(al+cn)y_1 - (ax_1 + cz_1 + d)l}{al + bm + cn} \quad (8)$$

$$z = \frac{(al+bm)z_1 - (ax_1 + by_1 + d)l}{al + bm + cn}$$

#### 2.6 Feature Classification

Fig 4(a)와 같이 평면과 자유곡면이 함께 존재하는 복합 곡면에서 평면의 경우 측정점을 그대로 사용할 수 있지만, 자유곡면은 측정점을 그대로 사용하면, 두 곡면이 접하는 영역에서의 데이터의 손실로 인해 곡면 재구성시 많은 오차가 발생하게 된다. 그러므로 자유곡면의 부분은 곡면이 시작하는 부분의 데이터가 필요하다. 예지는 두개의 곡면이

만나는 부분이기 때문에 자유곡면이 시작되는 부분으로 간주할 수 있으며, 데이터를 손실 없이 가지고 있는 평면의 데이터에서 경계의 데이터를 구할 수 있다. Fig 4(b)는 평면 영역을 결정한 후 복합 곡면에서 추출한 에지 데이터를 도시화하였다.

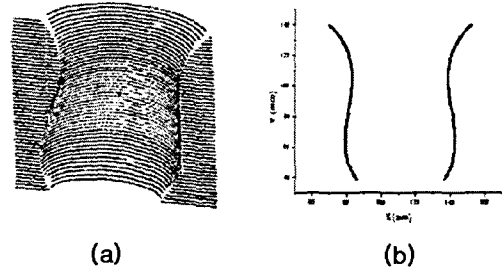


Fig. 4 Extracted edge data

### 3. 곡면 재구성

자유곡면과 평면이 접하는 영역인 에지 데이터 영역에서 곡면 재구성시 오차를 포함하게 되므로 에지 데이터를 곡면 생성시 반영하기 위하여 Fig. 4에서 추출한 에지 데이터에 B-spline interpolation을 적용하여 이를 보정하였다. 슬릿광을 이용하여 측정된 데이터는 슬릿광의 산란과 반사로 인한 오차를 함유하고 있을 가능성과 기울기가 급격히 변화하는 영역에서 측정 데이터가 존재하지 않기 때문에 보간(interpolation)에 의한 방법보다는 근사(approximation)에 의한 방법이 적절하다고 할 수 있다. Fig 5. 에서 보는 바와 같이 측정된 라인의 방향인 X 축 방향으로 B-spline approximation을 적용하고,  $m$  개의 데이터를 등간격으로 샘플링 한다. 측정라인을  $n$  개라고 가정한다면  $m \times n$  개의 데이터를 샘플링하게 된다. 샘플링한  $m \times n$  데이터를 B-spline skinning method을 적용하여 자유곡면을 생성하고 분류된 해석곡면 데이터와 불리안 작업(Boolean operation)을 통하여 복합곡면을 재구성한다.

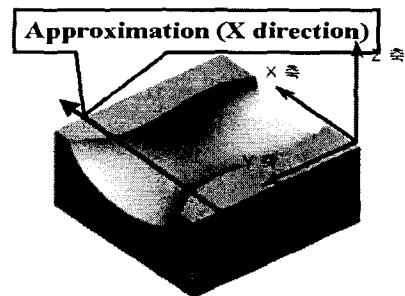


Fig. 5 B-spline approximation

### 3.1 B-spline interpolation

각각의 주어진 측정점  $Q_k$ , ( $k=0, \Lambda, n$ ) 에 대하여  $p$  차 non-rational B-spline 곡선을 이용하여 주어진 측정점을 보간한다.  $Q_k$  에 parameter 값,  $u_k$  를 할당하고 이에 적합한 knot vector  $U$  를 선택한다고 가정한다면, 다음과 같은  $P_i$  를 미지수로 하는  $(n+1)$  개의 선형식을 얻을 수 있다.

$$Q_k = C(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_k) P_i \quad (9)$$

위 식을 행렬식(matrix form)으로 표현하면,

$$[M_{k,i}] [P_i] = [Q_k] \quad (i, k=0, \Lambda, n) \quad (10)$$

이다.  $M_{k,i}$  은 각 성분들이  $N_{i,p}(\bar{u}_k)$  으로 결정되는  $(n+1)(n+1)$  인 정방행렬이므로  $M_{k,i}$  의 역행렬을 구해서 미지수인 조정점  $P_i$  를 구할 수 있다.  $u_k$  를 선택하는 방법은 여러 가지 방법 중에서 chord length 방법을 사용하였고, knot vector  $U$  의 선택은 평균법(averaging)을 사용하였다.

Fig. 6 은 에지 데이터에 B-spline interpolation 을 적용하여 이를 도시화한 것이다.

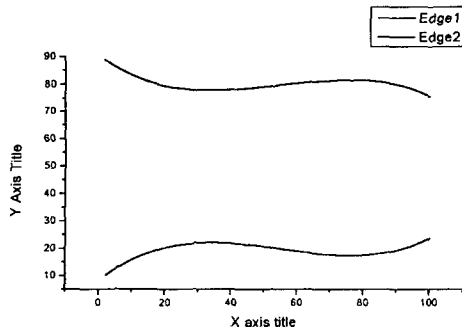


Fig 6. Edge data using b-spline interpolation

### 3.2 B-spline approximation

최소자승법을 이용한 B-spline approximation 에서  $p \geq 1$ ,  $n \geq p$  이고 측정점을 통하여 얻어진 점 데이터가  $Q_0, \Lambda, Q_m$  ( $m > n$ ) 이라 가정하면 다음과 같은  $p$  차의 B-spline 곡선을 얻을 수 있다.

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (11)$$

위의 식은 다음과 같은 조건을 통해서 최소자승법을 이용한 곡선의 근사를 수행하게 된다.

$$Q_0 = C(0), \quad Q_m = C(1)$$

$$\sum_{k=1}^{m-1} |Q_k - C(\bar{u}_k)|^2 \quad (12)$$

위의 식이 최소값을 가지는 조건에서 미지수인  $P_i$  를 구하게 된다. Fig. 7 은 B-spline approximation 을 각각의 측정 라인 데이터에 적용하여 이를 도시화한 것이다.

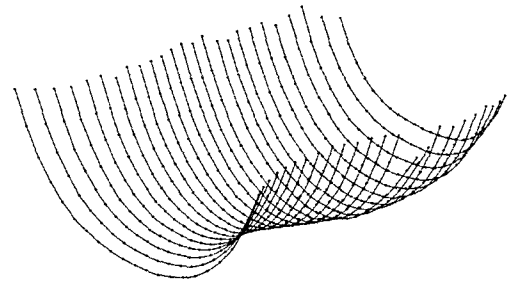


Fig 7. X-directional line data using b-spline approximation

### 3.3 B-spline skinned surface

Skinning 은 두 단면곡선을 혼합하여 곡면을 생성하는 lofting 방법의 일반화로서, 적합한 blending 함수를 단면 곡선들에 적용하여 원하는 곡면을 디자인하는 방법이다. B-spline 을 사용한 skinning 은 주어진  $(K+1)$ 개의 단면 곡선들  $C_k(u)$  ( $k=0, \Lambda, K$ ) 를 보간하여 이 곡선들이 결과 곡면의 등경곡선(isoparametric curve)이 되도록 하는 것으로, 동일 knot vector  $U$  에서 정의된  $p$  차의  $k$  번째 단면곡선  $C_k(u)$  는 다음과 같이 정의된다고 가정한다.

$$C_k(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) Q_{i,k} \quad (k=0, \Lambda, K) \quad (13)$$

$V$  방향으로 skinning 한 결과곡면을  $S(u, v)$  라 하고, 단면곡선  $C_k(u)$  가  $S(u, v)$  의  $v$  parameter 가  $\bar{v}_k$  로 상수인 등경곡선(isoparametric curve)을  $S(u, \bar{v}_k)$  라 하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(u, \bar{v}_k) = C_k(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) Q_{i,k} \quad (14)$$

## 4. Simulation 및 실험

슬릿광이나 레이저 스캐너를 이용하여 형상 측정 시 기울기가 급격하게 변화 하는 부분, 즉 에지 부분에서의 데이터 누락이 발생 하므로, 이런 경향을 simulation 시 반영하기 위해 추출한 CAD 데이터에서 누락이 발생하는 데이터 부분을 random 하게 제거하여 simulation 데이터로 사용하였다. 이러한 데

이터 누락을 보정 및 보완 하기 위하여 b-spline interpolation 과 b-spline approximation 을 적용하고 b-spline skinning method 를 적용하여 simulation 작업을 수행하였다. Fig. 8 은 누락된 데이터에 대하여 직선 조건과 b-spline interpolation 을 수행하였을 때의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 급격하게 기울기가 변화하는 모서리 부분의 오차가 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.

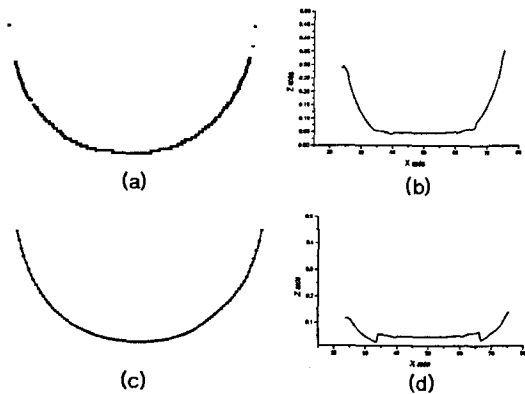


Fig. 8 Errors by linear and b-spline interpolation

또한, Fig. 9 는 simulation 을 통하여 재생성한 복합곡면과 오차를 나타낸 것이다.

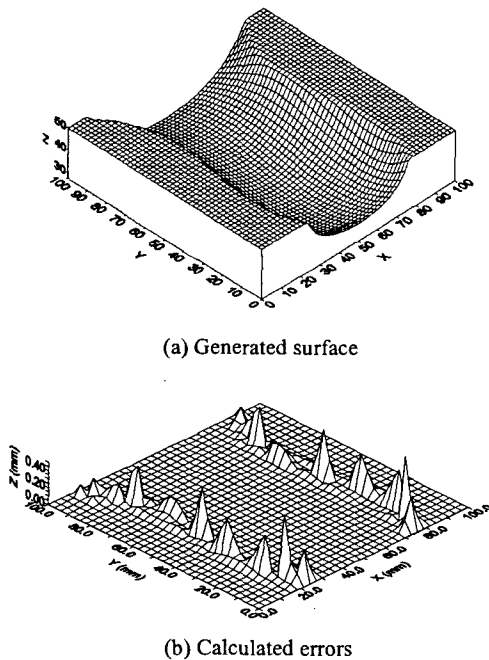
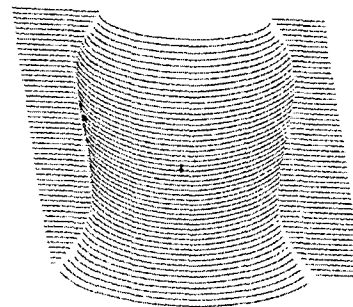


Fig. 9 Generated compound surface and error map 상기의 결과를 기초로 실험을 수행하였다. Fig.

10 은 실험을 통하여 얻어진 슬릿빔의 영상을 나타내고 있으며, Fig. 11 은 이에 대하여 본 연구에서 제안한 방법에 의한 역공학 시 발생하는 오차의 분포를 나타낸다. Simulation 결과에 비하여 오차의 분포가 보다 불규칙하고, 변화량이 큰 것은 이미지 프로세싱 단계에서 발생하는 노이즈와 가공오차등에 의한 결과라고 사료된다.



(a) Image of a slit beam on the compound surface



(b) Obtained scan lines after image processing

Fig 10. Obtained scan lines using vision probe

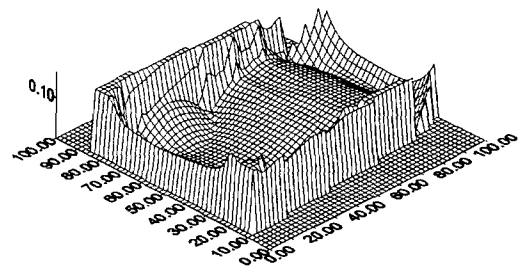


Fig 11. Error map of generated surface (RMS error=0.0295mm)

## 5. 결론

본 연구에서는 슬릿광과 비전 프로브를 이용한 CNC 공작 기계상에서의 복합 곡면의 형상 측정 시스템을 구현 하였다. 슬릿광과 레이저 스캐너로 형상 측정 시 발생하는 에지 부분에서의 데이터 누락 현상을 보완 및 보정하여 곡면을 재구성하기 위한 방법으로 에지 데이터에는 b-spline interpolation 을, 자유곡면 데이터에는 b-spline approximation 을 적용 하였다. 그리고 b-spline skinning method 를 통하여 자유곡면을 생성하고 불리안 작업을 통해서 CAD 모델을 재생성 하였으며, 실험을 통하여 복합곡면을 재구성한 결과 0.0295mm RMS error 값을 얻었다.

광원과 슬릿광의 정도와, 그리고 높은 분해능을 갖는 고해상도의 CCD 카메라를 사용할 경우 더 정확한 결과값이 예상할 수 있다. 이런 경우 CNC 공작기계의 기하학적인 오차도 곡면의 측정 오차값에 차지하는 비중이 상대적으로 커지게 되어 CNC 공작계의 기하학적인 오차도 간과할 수 없게 되므로 측정기로 사용한 CNC 공작기계의 오차를 보정해주어야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Liang-Chia Chen and Grier C I Lin, "An integrated reverse engineering approach to reconstruction free-from surface, " Computer Integrated Manufacturing Systems, Vol. 10, No.1 pp49~60, 1997.
2. Alan C. Lin, Shou-Yee Lin, Tae-Hao Fang, "Automated sequence arrangement of 3D point data for surface fitting in reverse engineering." Computer 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. Piszcatowaski, W.Swieszkowski, Z. Lechniak, "Reverse engineering of free-form surface," Journal of Materials Processing Technology", Vol. 76, pp. 128~132, 1998.
5. Seoung-Woo Kim, Yi-Bae Choi, Joung-Tae Oh, "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surface by phase-shifting grating projection moiré topography," International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol. 39 pp. 389~401, 1999.
6. H. Park, K. Kim, "Smooth surface approximation to serial cross-section," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 12, pp. 995~1005, 1996.
7. S. Liu and W. Ma, "Seed-growing segmentation of 3-

D surface from CT-contour data," Computer-Aided Design Vol. 31, pp. 517~536, 1999.

8. Les Pigl and Wayne Tiller, The NURBS Book, Springer, Berlin, 1995.
9. 박영근, 고태조, 김희술, "역공학에서 센서 융합에 의한 효율적인 데이터 획득", 한국정밀공학회지 제 18 권, 제 9 호, pp. 61~69, 2001.