

## 거리 데이터의 캐드 형식으로의 변환

正會員 沈學俊\*, 李商郁\*

## Conversion of the range data into the CAD format

Hack Joon Shim\*, Sang Uk Lee\* Regular Members

## 要 約

본 논문에서는 실세계 물체의 거리 데이터로부터 그 물체의 CAD 모델을 생성하는 알고리즘을 제시하였다. 거리 데이터로부터 얻어진 거리 영상을 분리가능한 영역으로 분할한 후, 각 분할 영역과 그 경계를 각각 자유 곡면과 자유 곡선으로 모델링하였다. 또, 본 논문에서는 곡면 모델링에서 대부분의 근사 오차가 표면과 배경의 경계에서 발생한다는 것에 주목하여 이러한 경계를 배제하는 새로운 기법을 제안하였다. 즉, 임의의 모양의 경계를 가진 분할 영역을 자신을 포함하는 최소직사각형의 영상으로 확장하여 곡면 근사식을 구한 후, 다시 그 영역의 경계 정보를 이용하여 원래 물체 표면에 속한 화소들만 분리하였다. 이러한 분할 영역의 확장과 근사 후 표면의 trimming 과정을 통하여 근사 오차를 크게 줄일 수 있었다. 최종적으로, 모델링한 곡면과 곡선을 IGES(Initial Graphics Exchange Specification) 형식의 entities 중 하나인 trimmed surface로 표현하였다. 실제 거리 데이터를 이용한 모의 실험에서는, IGES 입출력을 지원하는 CAD 프로그램을 이용하여, 제안하는 기법으로 얻어진 IGES 화일이 대상 물체의 CAD 형식임을 확인하였다. 다양한 모의 실험 결과를 제시하고 검토하였다.

## ABSTRACT

In this paper, a multi-stage algorithm to convert the range data of a real object into the CAD format is presented. In our approach, after segmenting the range image, each segmented area and its boundary are modeled as a free-form surface and a free-form curve, respectively. Since the main error in surface modeling is due to the step edge, which occurs between the object and the background, a new technique to exclude the step edge in surface modeling is proposed in this paper. Each segmented area of an arbitrary boundary is expanded to a rectangular image conserving the continuity of the range data, and the approximated surface is trimmed to separate only the pixels on the object surface using the boundary information. With this expansion of a segmented area

\* 서울대학교 제어계측공학과  
 論文番號 : 95162-0427  
 接受日字 : 1995年 4月 27日

and trimming of the approximated surface, we reduce the approximation error significantly. Finally, the modeled surface and curve are represented as a trimmed surface, which is one of the entities of IGES(Initial Graphics Exchange Specification) format. In computer simulation of real range data, by employing a CAD program of IGES exchange utility, it is confirmed that the IGES file obtained by the proposed algorithm is the CAD format of the object. We present and discuss various simulation results.

## 1. 서론

컴퓨터 비전(computer vision)은 공정 자동화의 핵심 기술로서 부품의 식별, 검색 등에 이용된다. 비전 시스템의 입력이 되는 영상은 주로 2차원 밝기 영상과 3차원 거리 영상이다. 거리 영상은 밝기 영상에 비해 물체 표면의 직접적인 정보를 제공하므로, 그림자나 과도한 빛의 반사 등과 같은 외부의 영향을 받는 일이 적고, 물체가 겹쳐져 있는(occluded) 부분을 쉽게 찾을 수 있는 장점이 있다. 그러나, 거리 데이터는 아직 밝기 데이터보다 잡음에 약하고 그 획득 비용이 비싼 것이 단점이다.

현대의 대량 생산의 산업 구조에서는 제품의 설계에서부터 제작까지 컴퓨터를 이용하는 것이 필수적이고, 이를 CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing)이라 한다. 설계 과정은 크게 개념 설계, 구체 설계, 상세 설계의 3단계로 나뉜다<sup>(1)</sup>. CAD에 의한 설계는 각 단계가 데이터 베이스를 중심으로 집중되어 있으므로, 다수의 설계자가 일관된 모델을 가지고 설계할 수 있다. 또 CAD에 의한 설계는 반복 작업이나 오류의 발견, 수정 등을 자동적으로 수행한다. 그러나, 설계자가 처음 제품을 구상할 때는 스케치로 도면을 설계하거나, 고형물인 경우 진흙이나 플라스틱 등으로 만들어 본 후, 이를 기반으로 CAD를 이용하여 상세 설계를 하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 CAD 형식에 필요한 모든 인자(parameter)들을 직접 측정하여야 하고, 이는 물체가 복잡할수록 작업량이 과다하게 증가한다. 따라서, 기존의 물체로부터 CAD 모델을 자동적으로 얻을 수 있다면 이는 reverse engineering이나 초기 설계 단계에서 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

이러한 배경에서 시작된 연구 사례들을 살펴보면 다음과 같다. Naik와 Jain<sup>(2)</sup>은 거리 영상을 표면의 Gaussian 곡률과 평균 곡률을 이용하여 영역 분할한

후, 분할된 각 영역을 포함하는 최소직사각형을 입력 영상으로 하여 B-spline 함수를 기저로 한 곡면으로 근사시켰다. 반면에 Chen과 Schmitt<sup>(3)</sup>은 에지를 기반으로 한 영역 분할 알고리즘을 사용하였다. 우선, 표면의 특징으로서  $C^0$ ,  $C^1$ 의 불연속점과 표면 곡률의 극대점으로 이루어지는 곡선을 추출하였고, 이 특징들을 이용하여 Triangular Gregory-Bezier(TGB) patch 모델을 만들었다. TGB의 각 patch를 표현하는 G1-연속인 다항식을 구하였다.

기존의 연구와 비교하여 본 논문은 두 가지에 주안점을 두었다. 첫 번째로 정확한 곡면 모델링을 위하여 영역의 확장 및 근사 후 trimming 과정을 제시하였다. 이는 각 분할 영역을 자신을 포함하는 최소직사각형으로 확장시킬 때 배경 화소들에게 물체 표면의 거리값을 연속적으로 할당하여 물체 표면과 배경 사이의 step edge를 제거하는 것이다. 연속적으로 확장된 영역을 2개의 매개 변수를 이용한 근사식으로 모델링한 후 다시 경계 정보를 이용하여 원래 물체 표면에 속한 화소들만을 분리하는 trimming 과정을 거쳤다. 제안하는 방법에 의해 곡면 근사 오차가 대폭 줄어드는 것을 실험으로 확인하였다.

두 번째로 본 논문은 레이저 카메라로 실측한 거리 데이터로부터 시작하여 완전한 형태의 IGES(Initial Graphics Exchange Specification) 화일의 생성까지를 다루었다. IGES는 현재 가장 널리 이용되는 CAD 데이터 교환 표준이다. 그러므로, IGES 입출력을 지원하는 CAD 프로그램을 이용하여 변환 결과를 변형하는 응용이 가능하다.

본 논문의 전체적인 변환 과정을 그림 1에 나타내었다. 다음 2, 4, 5 장에서 그림 1의 각 해당 단계에 대한 자세히 서술하였다. 3 장에서는 본 논문이 제안한 분할 영역의 확장과 trimming에 대하여 설명하였고, 그에 대한 실험 결과를 실었다. 끝으로 실제 물체를 대상으로 한 변환 결과를 6 장에, 본 논문에 대한 결론을 7 장에 실었다.

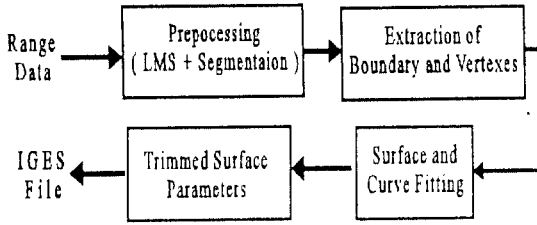


그림 1. 전체 블럭다이어그램  
Fig. 1. Overall blockdiagram

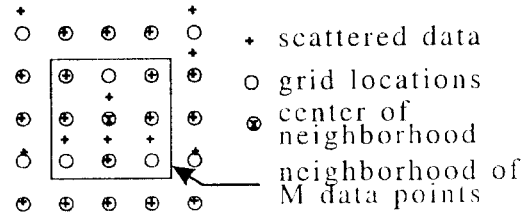


그림 2. 등간격의 grid 거리 영상의 추정  
Fig. 2. Estimation of uniformly spaced grid range image

## II. 거리 데이터의 전처리

본 장에서는 레이저 카메라를 이용하여 획득한 거리 데이터로부터 등간격의 거리 영상을 생성하는 과정과 이 거리 영상을 분리 가능한 영역으로 분할하는 영역 분할을 다루었다.

### 1. MLMS(Moving Least Median of Square-error)

본 논문에서 사용한 거리 정보 획득 장치는 슬라이드 테이블 위에 장착된 레이저 카메라를 이용한다. 슬라이드 테이블은 수평 방향으로 일정한 간격으로 움직이고, 한 위치에서는 입사광의 각도를 수직 방향으로 균일하게 변화시키면서 거리를 측정한다. 따라서, 얻어진 거리 데이터들은 그림 2와 같이 수평 방향으로만 균일한 간격으로 나열되고, 수직 방향으로 대상 물체의 표면과 그 거리에 따라 불규칙한 간격을 갖는다.

이후의 처리는 등간격의 거리 영상을 대상으로 하므로, 등간격의 grid 위치를 나타내는

그림 2의 'o' 에서 거리 데이터들을 이용하여 그 거리값을 추정한다. 그림 2의 가운데 사각형은 grid 위치 '⊗' 를 중심으로 가까운  $M$  개의 거리 데이터를 포함하는 경계를 나타낸다. 또, 그림 2의 '+' 는 획득한 거리 데이터의 위치를 나타낸다.

가장 일반적인 추정 방법은 LSS(Least Sum of Square-error)과 LMS(Least Sum of Median-error) 추정이다. LSS는 추정치와 참값과의 오차의 제곱의 합을 최소화하는 것이고, LMS는 오차 제곱의 중간값(median)을 최소화하는 것이다.

LSS 추정은 Gaussian noise에 강한 장점이 있는

반면, breakdown point<sup>[4]</sup>가 0 %이므로, 표면의 불연속성을 보존하지 못하고, outlier의 영향을 많이 받는다. breakdown point는 그릇된 추정 결과를 가능하게 하는 데이터의 최소 비율을 의미한다. 따라서, breakdown point가 0 %라는 것은 단 하나의 잘못된 데이터(impulsive noise = outlier)에 의해서도 전체 추정이 영향을 받는다는 것을 의미한다.

실세계에 존재하는 일반적인 인공 제품은 불연속성을 경계로 하여 몇 개의 면으로 이루어져 있다. 이러한 물체의 거리 데이터를 LSS 추정을 이용하여 등간격의 거리 영상으로 보간한다면 경계의 불연속성은 보존하기가 어렵다. 또, 아직까지는 거리 정보의 획득에서는 그 기술의 한계로 인해 예기치 못했던 impulsive noise가 발생할 경우가 많다. 이런 impulsive noise 역시 LSS 추정에서는 보간 다항식의 차수를 높여도 그 영향을 배제할 수 없다.

그러나, 제곱오차의 중간값(median)을 최소화하는 추정은 50%의 breakdown point를 가지므로 위 2가지의 성능이 우수하다<sup>[5]</sup>.  $j$  번째 위치에서의 참값과 추정값을 각각  $z_j, f(x_j, y_j)$  라 할 때 국소적인 LMS 추정은 다음과 같은 수식으로 표현된다. 이는  $f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \dots$ 로 가정하면, 오차 제곱의 중간값을 최소화 하는 parameter vector  $\alpha = (a_0, a_1, \dots, a_n)$  를 구하는 것이다.

$$\min_{\alpha} \left\{ \text{med}_{0 \leq i \leq M} \{ z_i - f(x_i, y_i) \}^2 \right\}. \quad (1)$$

본 논문에서는 실행 시간의 단축을 위해 중심 grid 위치에서 가장 가까운  $M$  개의 이웃점들로부터  $N_p$  개의 점을 임의로 선택하는 과정을  $N_s$  번 반복하여 각 경우에 대해 parameter vector  $\alpha$ 를 구하였다.  $f(x, y) =$

$ax+by+c$ 를 가정하였으므로, 각 data set는  $N_p=3$ 개의 점으로 이루어져 있다. 이 점들을 이용하여 구한 평면 방정식의 계수들이 바로 parameter vector  $\alpha = \{a, b, c\}$ 를 구성하는 것이다. 이와 같은 방법으로 구한  $N_s$ 개의 각 평면에 대해  $M$ 개의 이웃점들과의 오차 제곱들 중의 중간값을 찾고, 그 중간값을 최소로 하는 평면 방정식으로부터 grid 위치의 거리값을 계산한다. 이를 다시 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\min_{0 \leq j < N} \left\{ \text{med}_{0 \leq i < M} \left\{ \left\{ z_i - f_j(x_i, y_i) \right\}^2 \right\} \right\} \quad (2)$$

$$f_j(x, y) = a_j x + b_j y + c_j, \quad a_j = \{a_j, b_j, c_j\}.$$

2. 영역 분할

영상을 동일한 성질을 갖는 영역으로 분할하는 것은 영역 기반의 물체 인식에서 필수적이다. 본 논문에서도 대상 물체를 표면 단위로 CAD 형식에 필요한 인자들을

추출하므로, 강인한 영역 분할이 단순한 전처리 이상의 중요성을 갖는다. 본 논문에서 이용한 영역 분할 방법<sup>(6)</sup>은 clustering을 이용한 것으로, 특정한 성질을 기준으로 비슷한 성질을 갖는 화소들을 모아 하나의 영역으로 분할한다. 여기서 가장 중요한 것이 물체의 어떤 성질을 기준으로 표면을 구분하느냐 하는 것이다.

본 논문에서는 그 기준 성질로 화소의 좌표  $(x, y, z)$ 와 단위 법선 벡터 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 의 6개의 성질을 이용하였다. 먼저 6개의 성질이 모두 의미를 갖도록 하기 위해서 비슷한 크기의 분산을 갖도록 전처리 과정을 거친다. 물체의 표면을  $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 의 6차원 공간에서 제곱오차를 최소화하는 기준으로 먼저  $B$ 개의 영역으로 나눈다<sup>(7)</sup>. 각 영역의 경계가 crease edge의 조건을 만족하는지 조사하여 만약 만족하면 그 경계에 접한 2개의 영역은 병합한다. 본 논문에서는  $B$ 의 값은 실험적으로 20으로 하였고, 단위 법선 벡터는 각 화소를 중심으로

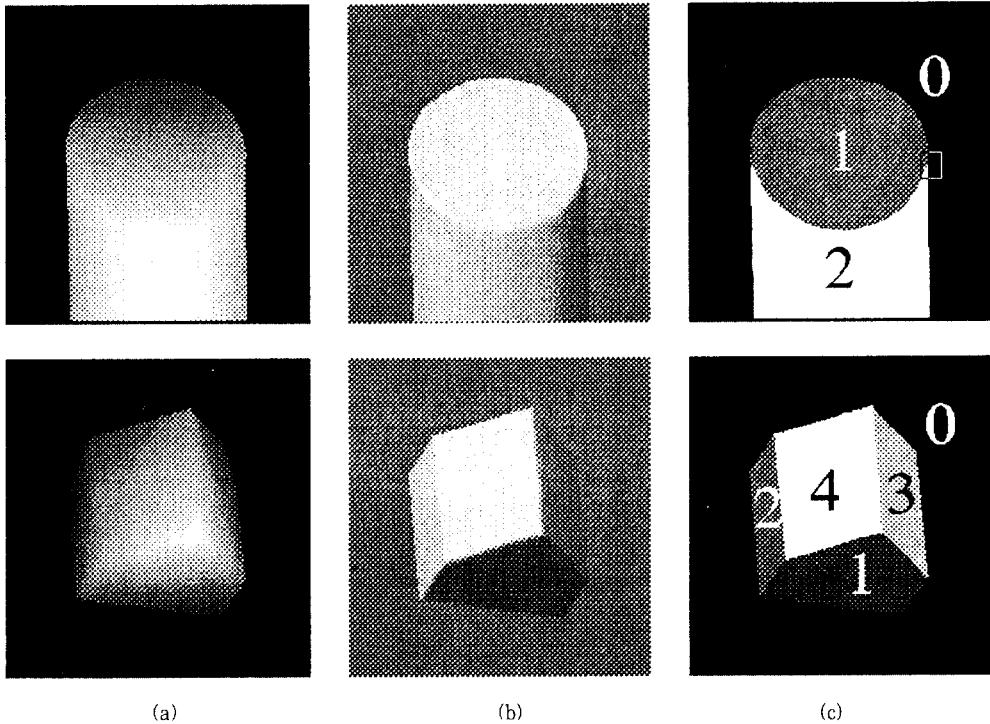


그림 3. Cylinder와 House 영상의 영역 분할  
 (a) 거리 영상 (b) 의사 밝기 영상 (c) 영역 분할  
 Fig. 3. Segmentation of Cylinder and House images  
 (a) Range image (b) Psuedo intensity image (c) Segmentation

로, 5×5 크기의 윈도우 내의 이웃점들을 입력으로 평면에 근사시킴으로써 구하였다.

진처리 과정의 실험 결과를 그림 3에 나타내었다. Cylinder 영상은 석고로 만들어진 원기둥 모양의 물체의 거리 영상이고, House 영상은 도화지로 만든 집 모양의 다면체이다. 그림 3 (a)는 MLMS에 의하여 추정된 등간격의 거리 영상이고, 그림 3 (b)는 단일 광원을 가정하고 법선 벡터로부터 구한 의사 밝기 영상이다. 그림 3 (c)는 각 거리 영상의 영역 분할 결과이다.

### Ⅲ. 분할 영역의 확장과 trimming

본 논문은 대상 물체를 영역 분할한 후, 분리된 각 영역을 CAD 형식에서 지원하는 특정한 surface entity 형태로 표현하였다. 대상 물체의 정확한 CAD 모델을 얻기 위해서는 우선 곡면 근사의 오차를 줄이는 것이 필수적이다.

임의의 형태의 삼차원 자유 곡면을 표현하는 가장 일반적인 방법은 식 (3)과 같이 2 개의 매개 변수의 함수를 이용하는 것이다. 매개 변수를 이용한 곡면의 표현은 삼차원 강체 운동에 대해 불변인 장점이 있다. 이는 고정된 대상 물체의 경우에는 시점 이동에 대한 불변과 같은 의미이다. Superquadrics등을 이용한 implicit 함수 형태의 표현<sup>8,9)</sup>은 일반적인 CAD 시스템에서 아직 지원하지 않는다.

$$x = f^x(s, t), y = f^y(s, t), z = f^z(s, t) \quad (3)$$

$$S_0 < s < S_1, T_0 < t < T_1.$$

식 (3)을 이용하면 parametric grid  $\{(s_j, t_l) | i = 0, \dots, M, j = 0, \dots, N\}$ 에서 주어진 거리 데이터  $P_{ij} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}$ 와의 제곱 오차를 최소화함으로써 곡면을 복구할 수 있다. 그러나, 각 분할 영역은 임의의 모양의 경계를 가지므로, 위와 같은 직사각형 형태의 parametric grid를 이용하면 물체 표면과 배경 사이의 경계에서 큰 근사 오차가 발생한다. Naik와 Jain<sup>12)</sup>은 거리 영상을 영역 분할한 후, 각 분할 영역을 위와 같은 직사각형 parameter grid 위에서 bicubic B-spline 함수를 기저로 한 곡면으로 복구하였는데, 역시 대상 물체의 경계에서 큰 오차를 보였다. 이러한 오차는 매개 변수를 이용한 곡면 근사의 근본 원리인 smoothness에 기인한 것이므로, 기저 함수의 차수를 높여내려도 피할 수 없다.

이를 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)는 그림 3 (c)의 Cylinder 영상의 2 번 영역을 삼차원 mesh로 표시한 것이다. 그림 4 (b)는 B-spline 곡면으로 복원한 것을 같은 방법으로 나타낸 것이고 그림 4 (c)는 근사 오차를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 오차의 대부분은 영역 1과 영역 2의 경계에서 발생한다. 또, 이와 같이 배경까지 포함하여 복구한다면 물체 표면과 배경의 개념적인 분리가 불가능하므로 대상 물체의 CAD 모델을 얻으려는 목적에 부합하지 못한다.

이는 불규칙한 모양의 경계를 가진 분할 영역을 직사각형 parametric grid 위에서 복구하였기 때문에 생긴 결과이다. 물론 경계 모양에 상응하는 curvilinear

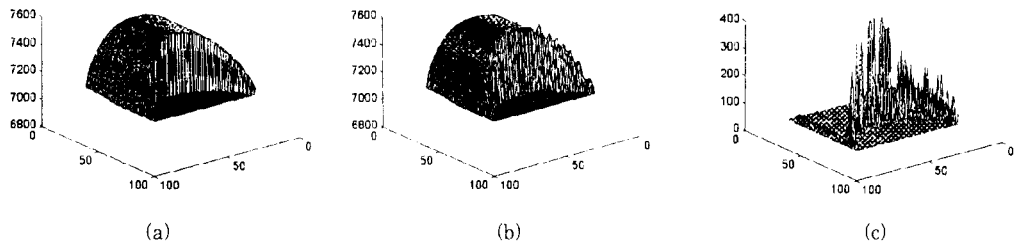
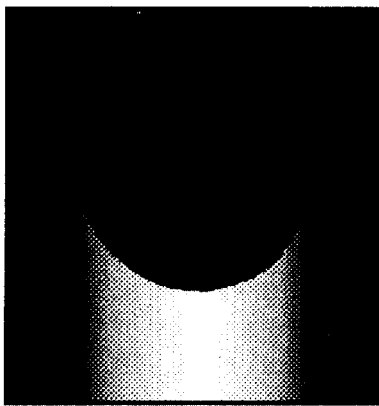


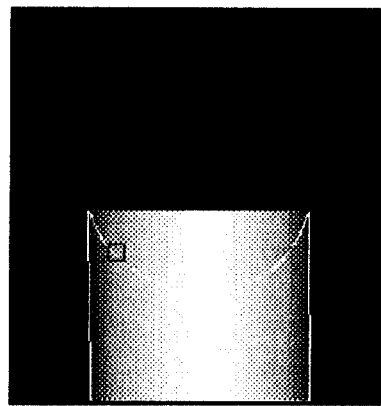
그림 4. Naik 알고리즘에 의한 Cylinder 영상의 영역 2의 복원  
 (a) 영역 2 (b) 영역 2의 복원 (c) 영역 2의 오차  
 Fig. 4. Restoration of the region 2 of the Cylinder image using Naik's algorithm  
 (a) Region 2 (b) Reconstruction of Region 2 (c) Error of the reconstruction

이차원 좌표계<sup>[10]</sup>를 이용하면, 물체 표면 상의 거리 데이터만을 모델링할 수 있지만, 이는 복잡한 경계를 가진 분할 영역인 경우 그 계산량이 필요 이상으로 많다. 따라서, 본 논문에서는 단순한 직사각형 parametric grid 를 사용하고 배경 영역의 화소에도 물체 표면의 거리값을 연속적으로 할당하여 오차의 주원인인 step edge를 제거하였다. 즉, 경계에서의 거리값을 수직축 방향으로 배경 영역까지 확장하였다. 이를 그림 5에 나

타내었다. 그림 5 (a)는 Cylinder 영상에서 영역 2 만을 분리한 거리 영상이고, 이를 직사각형 형태로 확장한 것이 그림 5 (b)이다. 그림 5 (b)에서 영역 2의 경계를 흰 실선으로 표시하였다. 그림 5 (c)는 그림 5 (b)에서 작은 네모로 둘러싸인 부분을 확대하여 화소 단위로 표시한 것이다. 각 화소의 수치는 0.1 mm 단위이고, 그 값이 클수록 레이저 카메라에 가까운 화소이다. 그림 5 (c)에서 대각선을 이루는 점무늬 화소들은 물체의 경계



(a)



(b)

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 7240 | 7248 | 7252 | 7262 | 7270 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7241 | 7248 | 7252 | 7262 | 7270 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7241 | 7250 | 7252 | 7262 | 7270 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7241 | 7249 | 7256 | 7262 | 7270 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7241 | 7249 | 7257 | 7263 | 7270 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7243 | 7250 | 7257 | 7265 | 7271 | 7278 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7241 | 7248 | 7257 | 7265 | 7272 | 7279 | 7285 | 7288 | 7297 |
| 7239 | 7249 | 7257 | 7264 | 7273 | 7280 | 7286 | 7288 | 7297 |
| 7239 | 7248 | 7258 | 7264 | 7272 | 7280 | 7286 | 7293 | 7297 |

(c)

그림 5. Cylinder 영상의 영역 2의 확장

(a) 영역 2의 거리 영상 (b) 영역 2의 확장 (c) (b)의 일부분의 확대

Fig. 5. Extension of the region 2 of Cylinder

(a) Range image of the region 2 (b) Extended range image of the region 2  
(c) Enlargement of the small square in (b)

위의 화소들이다. 각 경계에서의 거리값을 수직 방향으로 확장하여 배경 영역의 화소들에게 할당하였다. 이제 그림 5 (a) 대신 그림 5 (b)를 입력 영상으로 하여 복구한다면 경계의 step edge에 의한 오차를 대폭 줄일 수 있다.

물론 복구 후에는, 복구된 영상에서 원래 그 영역에 속한 화소들만을 취하고, 원래 배경이었던 화소들은 분리하는 trimming 과정이 필요하다. 전장의 영역 분할 결과를 이용하여 각 화소가 원래 그 영역에 속하는지를 판별한다. 이와 같은 trimming 과정에 의해 물체 표면과 배경의 개념적인 분리도 가능하다.

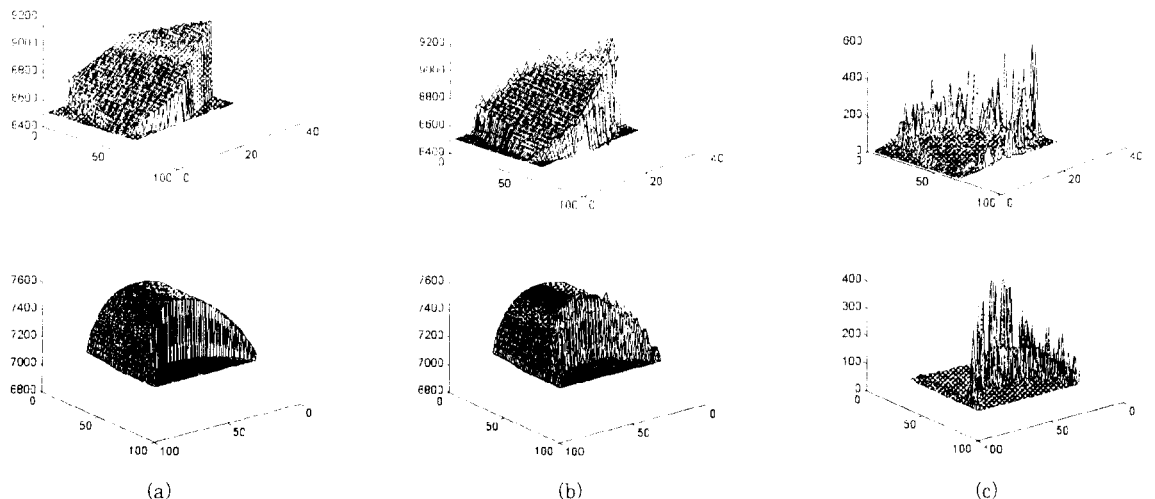
제안하는 방법에 의한 근사 오차 감소를 실험으로 확인하였다. 기저 함수는 bi-quadratic non-uniform B-spline<sup>[11]</sup> 함수로 하였고, node는 수평, 수직 방향으로 모두 26 개 이다. 그림 6은 그림 3에서 나타낸 House 영상의 1번 영역과 Cylinder 영상의 2번 영역에 대한 실험 결과이다. 그림 6 (a)는 영역 분할 정보로 분리된 해당 영역이다. 그리고, 그림 6 (b)와 그림 6 (c)는 분할 영역과 배경을 parameter grid 위에서 복구한 결과와 그 근사 오차이다. 그림에서 보듯이 물체 표면과 배경 사이의 경계에서 큰 오차를 보인다. 그림 6 (d)와 그림 6 (e)는 본 논문에서 제안하는 방법에 의한 결과와 그 오차이다. 그림 6 (c)와 그림 6 (e)를 비교해 보면, 그림 6 (e)에서는 근사 오차가 해당 영역에

걸쳐 고르게 분포함을 알 수 있다. 이는 그림 6 (c)의 경계에서의 큰 값의 오차를 모두 제거했기 때문에 영역 내부의 미세한 오차들만을 표시한 것이다.

표 1은 두 가지 방법을 정량적으로 비교하기 위하여 SNR 를 계산한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 분할 영역의 확장과 복구 후 trimming은 curvilinear 이차원 좌표계와 같은 복잡한 계산 과정 없이 대부분의 곡면 근사 오차를 제거할 수 있었다. 또, 이러한 trimming 과정은 물체 표면과 배경을 근본적으로 분리하므로, 이 후의 물체의 CAD 형식에 의한 표현을 가능하게 한다.

#### Ⅳ. 경계와 정점의 검출

전 장에서 설명한 표면의 trimming은 영역 분할 정보를 이용하여 대상 화소가 물체 표면에 속하는지 배경에 속하는지를 구분하였다. 그러나, 원래 trimming은 경계 정보를 이용하는 것이다. 즉, 일반적인 CAD 형식에서 지원하는 trimmed surface  $S$ 는 하나의 곡면  $D$ 와 그 곡면 위에 위치한 계곡선  $C$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $S$ 는  $D$  위의 점들 중  $C$ 와  $C$ 의 내부의 점들로 구성된다. 따라서, 대상 물체의 분할된 각 영역을 trimmed surface로 표현하기 위해서는 곡면 근사식 뿐만 아니라 그 영역의 경계까지 모델링을 해야 한다.



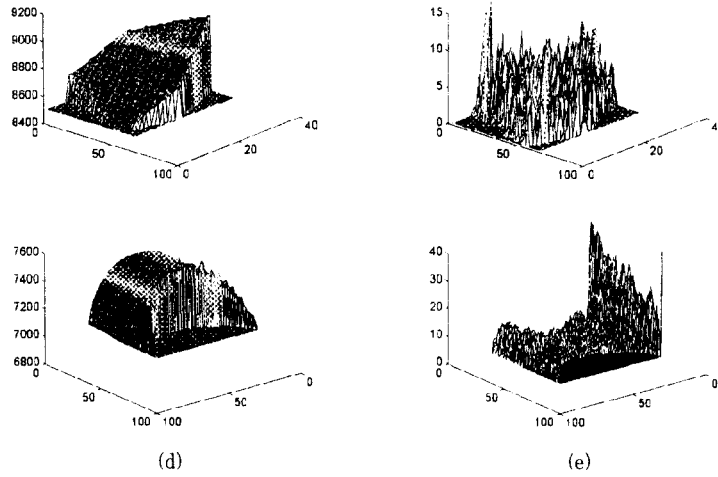


그림 6. 분할 영역의 확장 방법의 비교(House 영상의 영역 1과 Cylinder 영상의 영역 2)  
 (a) 분리된 영역 1(House)과 영역 2(Cylinder) (b) Naik의 알고리즘에 의한 결과 (c) Naik의 알고리즘에 의한 오차  
 (d) 제안하는 확장법과 trimming에 의한 결과 (e) 제안하는 확장법과 trimming에 의한 오차  
 Fig. 6. Comparison of the extension methods of the segmented image(Region 1 of House and region 2 of Cylinder)  
 (a) Separated region 1(House) and region 2(Cylinder) (b) Approximation result of Naik's method  
 (c) Approximation error of Naik's method (d) Approximation result of the proposed method  
 (e) Approximation error of the proposed method

표 1. 곡면 근사의 PSNR 비교  
 Table 1. Comparison of PSNR of approximation

| 영상       | 영역 | Naik의 알고리즘 | 제안하는 분할영역의 확장 및 trimming |
|----------|----|------------|--------------------------|
| Cylinder | 1  | 30.89dB    | 79.20dB                  |
|          | 2  | 35.80dB    | 67.65dB                  |
| House    | 1  | 27.40dB    | 71.15dB                  |
|          | 2  | 25.56dB    | 59.87dB                  |
|          | 3  | 25.40dB    | 62.44dB                  |
|          | 4  | 29.46dB    | 74.83dB                  |

먼저, 경계 정보 추출을 위하여 영역 분할된 영상을 단순히 밝기 영상이라 가정하고, erosion-residue를 이용한 에지 검출 연산자<sup>[12]</sup>를 적용한다. Erosion은 dilation과 함께 수학적 형태학(mathematical morphology)의 기본 연산이다. Gray-scale morphology의 erosion과 dilation은 대상 영상을  $f$ , struc-

turing element를  $b$ ,  $b$ 의 정의구역을  $D$  라 했을 때, 다음과 같이 정의된다.

$$d(x, y) = \max_{(i, j) \in D} \{ f(x-i, y-j) + b(i, j) \} \quad (4)$$

$$e(x, y) = \min_{(i, j) \in D} \{ f(x+i, y+j) - b(i, j) \}.$$

본 논문에서는  $f$ 는 영역 분할된 영상이고, structuring element  $b$ 는 정의구역  $D = \{(0, -1), (0, 1), (-1, 0), (1, 0)\}$ 에서 모든 값이 0이다. 따라서, erosion-residue 에지 검출 연산자는 다음과 같이 정의된다.

$$G_e(x, y) = f(x, y) - e(x, y) \quad (5)$$

$$= f(x, y) - \min_{(i, j) \in D} \{ f(x+i, y+j) \}.$$

본 논문에서는  $G_e(x, y)$ 를 그대로 사용하지 않고 각 화소 위치에  $f(x, y)$  값과  $e(x, y)$  값을 모두 저장한다. 정의에 의하여  $f(x, y)$ 는  $(x, y)$ 가 속한 영역의 번호이고,  $e(x, y)$ 는  $(x, y)$  화소에 접한 영역 중 가장 번호가 낮은 값이다. 그러므로, 임의의 화소 위치에서 경계의 존재 여부뿐만 아니라 그 경계에 이루는 인접 영



역의 정보까지를 알 수 있다.

본 논문에서는 위와 같이 추출한 경계를 길이를 매개 변수로 하여 cubic spline curve로 표현한다. 그러나, cubic spline curve에 의한 근사는 곡률 변화가 큰 부분에서는 근사 오차가 커진다. 따라서, 곡률이 크게 변하는 점을 정점으로 정의하고 이 정점을 매듭으로 하여 경계를 segment 단위로 나누면 각 segment는 곡률이 어느 범위 내에서 일정한 특성을 갖는다. 이런 segment들을 cubic spline curve로 근사시키면 큰 오차 없이 경계를 표현할 수 있다.

정점의 검출은 2 단계로 이루어진다. 첫 단계에서는 앞에서 구한 경계 영상을 입력으로 2 개 이상의 경계가 만나는 점을 정점으로 검출한다. 어느 한 경계를 trace 하다가 다른 경계와 만나면 모든 경계들의 진행 방향을 조사하여 교점을 정점으로 한다. 정점 검출의 2 단계는

1 단계 검출을 끝낸 경계 영상을 입력으로 하여 곡률 변화의 국소 극대점을 검출한다. 1단계에서 구한 정점 사이의 경계를 추적하면서 곡률 변화가 임계값보다 큰 경우 정점으로 추가한다.

그림 7은 영역 분할된 영상으로부터 경계와 정점을 추출한 결과이다.

### V. IGES 형식에서의 변환

본 논문에서는 대상 물체의 거리 데이터로부터 전장까지 서술한 과정을 거쳐 최종 결과인 IGES(Initial Graphics Exchange Specification) 형식을 생성한다. IGES는 미국에서 CAD/CAM 데이터 교환의 표준 형식으로 채택된 규격으로 전세계적으로 가장 넓게 사용되고 있다<sup>[13]</sup>. IGES는 처음에는 서로 다른 CAD로 작

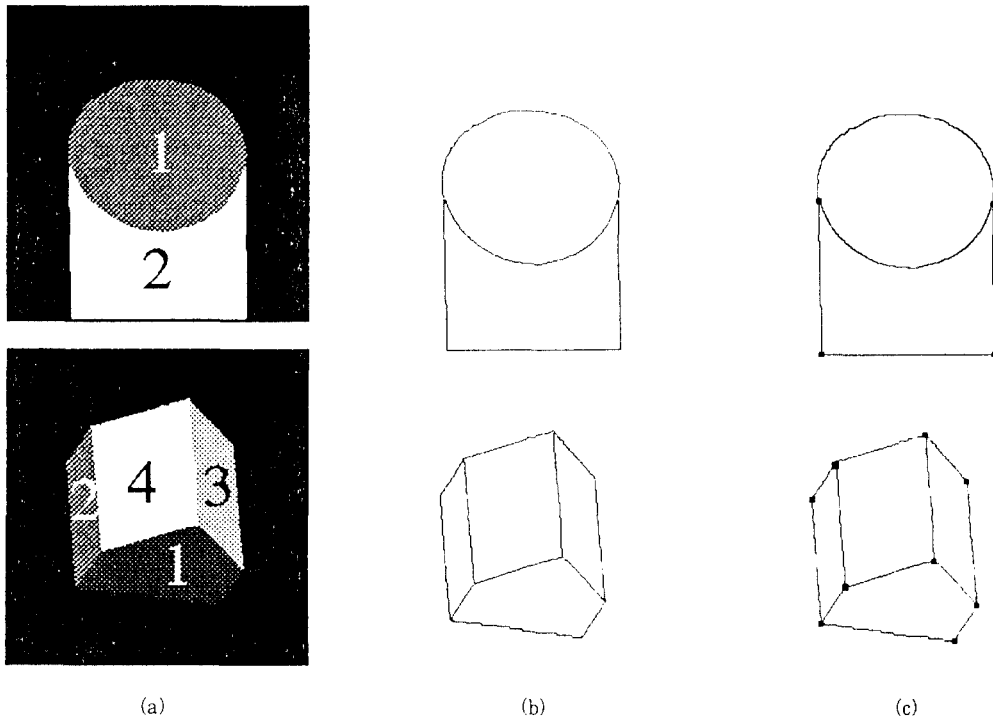


그림 7. Cylinder 영상과 House 영상의 경계와 정점의 검출  
 (a) 영역 분할 (b) 경계 영상 (c) 정점의 검출  
 Fig. 7. Extraction of boundary and vertexes of Cylinder and House images  
 (a) Segmentation (b) Boundary images (c) Detection of vertexes

성된 도면 모델의 교환을 목적으로 개발되었지만, CAD 시스템의 발전의 따라 자유 곡면, 3차원 솔리드 모델, 기본 입체(primitive)에 근거한 모델, FEM( Finite Element Method ) 모델, trimmed surface entity 등을 취급할 수 있도록 확장되어, 현재 version 5.0이 공개되어 있다. 표 2에 IGES 형식이 지원하는 기하학적 entity들을 나타내었다. 본 논문에서 사용하는 entity는 Type No. 112, 114, 142, 144 이다.

본 논문은 영역 분할에 의해 분리된 각 영역을 trimmed surface(Type 144)로 표현한다. Trimmed surface는 매개변수로 표현된 하나의 곡면(untrimmed surface, parametric spline surface entity, Type 114)과 그 위에 위치한 단순폐곡선(Curve on a parametric surface, Type 142)으로 구성된다. Untrimmed surface의 매개 변수 평면인 정의구역을  $D$ , 그 위에서 사상  $S(u, v)$ 라 했을 때, 표면 위에 위치한 폐곡선을  $D$ 에 정사영시키면  $D$ 는 정사영된 폐곡선에 의하여 내부, 외부, 그리고 경계의 3 부분으로 나누어진다. Trimmed surface는 원래의 untrimmed surface와 동일한 사상  $S(u, v)$ 를 갖지만, 내부와 경계선의 정의구역을 합한 부분만을 정의구역으로 한다. 따라서, trimmed surface는 자신의 데이터는 없이 원래의 곡면과 그 곡면 위에 있는 폐곡선에 대한 포인터만을 그 데이터로 갖는다.

곡면은 parametric spline surface(Type 114)를 이용하여 표현한다. Parametric spline surface는 곡면의  $(x, y, z)$  좌표를 매개변수  $s, t$ 의 3차 다항식으로 표현하므로, 필요한 인자는 아래 식의 계수  $ax(i, j), ay(i, j), az(i, j), \dots, sz(i, j)$ 와 매개변수들의 매듭값  $TU(i), TV(j)$ 이다.

$$\begin{aligned}
 X(u, v) &= ax(i, j) + bx(i, j) * s + cx(i, j) * s^2 + dx(i, j) * s^3 \\
 &+ ex(i, j) * t + fx(i, j) * t * s + gx(i, j) * t * s^2 + hx(i, j) * t * s^3 \\
 &+ kx(i, j) * t^2 + lx(i, j) * t^2 * s + mx(i, j) * t^2 * s^2 + nx(i, j) * t^2 * s^3 \\
 &+ px(i, j) * t^3 + qx(i, j) * t^3 * s + rx(i, j) * t^3 * s^2 + sx(i, j) * t^3 * s^3 \\
 Y(u, v) &= \dots \\
 Z(u, v) &= \dots \\
 TU(i) &\leq u \leq TU(i+1), \quad i=1, \dots, M, \quad s=u-TU(i) \\
 TV(j) &\leq v \leq TV(j+1), \quad j=1, \dots, N, \quad t=v-TV(j).
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

본 논문에서는 3장에서 제안한 확장 방법에 의해 직사각형으로 확장된 분할 영역을  $M \times N$  개의 patch로 등분하므로, 정의구역  $D$  역시 수평, 수직 방향으로, 각각  $M, N$  등분하여 균일한 간격으로 매듭값  $TU(i), TV(j)$ 을 정하였다. 거리 영상의  $x, y$  좌표를 매개변수로 하였으므로,  $Z(u, v)$ 에 대한 계수  $az(i, j), \dots, sz(i, j)$ 만을 구하면 된다. 각 patch를 수평, 수직

표 2. IGES 형식이 지원하는 기하학적 entity  
Table 2. Geometric entities of IGES

| Type No. | Entity Type               | Type No. | Entity Type                   |
|----------|---------------------------|----------|-------------------------------|
| 100      | Circular arc              | 122      | Tabulated cylinder            |
| 102      | Composite curve           | 124      | Xformation matrix             |
| 104      | Conic arc                 | 125      | Flash                         |
| 106      | Copious data              | 126      | Rational B-spline curve       |
| 108      | Plane line                | 128      | Rational B-spline surface     |
| 110      | Line                      | 130      | Offset curve                  |
| 112      | Parametric spline curve   | 140      | Offset surface                |
| 114      | Parametric spline surface | 141      | Boundary                      |
| 116      | Point                     | 142      | Curve on a parametric surface |
| 118      | Ruled surface             | 143      | Bounded surface               |
| 120      | Surface of revolution     | 144      | Trimmed parametric surface    |

방향으로 3 등분하여 그 3 등분점들과 끝점들 모두 16 개의 점을 식 (6)에 대입하여 16원 1차 연립방정식을 풀었다. 여기서 입력점을 더 많이 잡아 최소자승법으로 계수를 결정하면 patch 내부에서의 근사오차를 줄일 수는 있지만, patch 간의 경계에서 불연속이 되므로 각 patch에서 입력점을 16 개로만 하였다.

영역의 경계를 이루는 폐곡선은 먼저 curve on a parametric surface(Type 142)로 표현하였다. Curve on a parametric surface는 주어진 곡선을 parameterized surface에 연관시키고 그 위에 위치하도록 한다. Parameterized surface의 사상을  $S(u, v)$ , 그 정의구역은  $D$ .  $D$  상에서 정의된 2차원 곡선을  $B(s)$ 라 할 때 curve on a parametric surface  $C(s)$ 는 다음과 같이  $S(u, v)$ 와  $B(s)$ 의 합성 함수로 정의된다.

$$\begin{aligned}
 S &= S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \\
 D &= \{(u, v) | u_1 \leq u \leq u_2 \text{ and } v_1 \leq v \leq v_2\} \\
 B(s) &= (u(s), v(s)) \text{ for } a \leq s \leq b \\
 C(s) &= SoB(s) \\
 &= S(B(s)) \\
 &= (x(u(s), v(s)), y(u(s), v(s)), z(u(s), v(s)))
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

이는  $B(s)$ 와  $S(u, v)$ 를 합성하여 parameterized surface 상의 곡선  $C(s)$ 를 삼차원 공간에서 표현한 것이다. 따라서, Curve on a Parametric Curve Entity  $C(s)$ 도 자신 고유의 데이터는 없이  $B(s)$ 와  $S(u, v)$ 에 대한 포인터만 저장하고 있다.

본 논문에서는 4 장에서 구한 경계 영상의 폐곡선을 길이  $s$ 를 매개변수로 하여 parametric spline curve(Type 114)  $B(s)$ 로 표현하였다. 앞에서 검출한 각 정점을 매개 변수의 매듭으로 하면, 인접한 정점 사이는 하나의 segment가 된다. 각 segment를 삼등분했을 때, 2 개의 삼등분점과 segment의 양 끝점, 모두 4 개의 점을 입력으로  $s$ 의 삼차식의 계수  $ax(i), \dots, dy(i)$ 를 구한다.

$$\begin{aligned}
 X(u) &= ax(i) + bx(i) * s + cx(i) * s^2 + dx(i) * s^3 \\
 Y(v) &= ay(i) + by(i) * s + cy(i) * s^2 + dy(i) * s^3 \\
 T(i) &\leq u \leq T(i+1), \quad i = 1, \dots, N \quad s = u - T(i)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

경계를 parametric spline curve로 표현한 후 마

지막으로 각 trimmed surface를 모아 원래의 거리 영상이 포함된 물체를 IGES 형식으로 나타내었다.

### VI. 실험 결과

본 논문에서 사용한 레이저 카메라가 한 수평 위치에서 수직 방향으로 레이저를 스캔하여 획득할 수 있는 거리 데이터의 범위를 그림 8에 표시하였다. 그림 8에서 모든 수치의 단위는 0.1 mm 이다. 폭, 길이, 높이 모두 10 cm 정도의 대상 물체를 (7000 - 8000)×0.1 mm 사이에 위치시킨 후 거리 데이터를 측정하였다.

본 논문에서는 물체의 분할된 각 영역을 IGES 형식에서 지원하는 trimmed surface 형태로 표현하였다. 그림 9와 그림 10은 각각 거리 영상 Cylinder와 House로부터 trimmed surface의 표현에 필요한 인자를 추출하는 전체 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

거리 영상은 모두 240×256의 크기이고, 486-DX66에서 각 단계에 소요된 시간은 표 3과 같다. 전처리 과정에서 소요 시간이 큰 것은 LMS 추정을 위해 추출한 각 data set에 대해 오차를 계산하고 이를 정렬하는 과정에 기인한 것이다. 본 논문은 시간 소모가 큰 CAD 인자의 실측 과정을 자동화하는 것이고, 이러한 모델링 과정은 한번만 수행하면 되므로, 소요 시간은 큰 의미를 갖지 못 한다. 본 논문에서는 MS-Windows™ 3.1의 GUI(Graphic User Interface)를 기반으로 구현하였으므로 각 단계의 입력 영상에 대해 해당 메뉴를 선택함으로써 알고리즘을 수행시킬 수 있다.

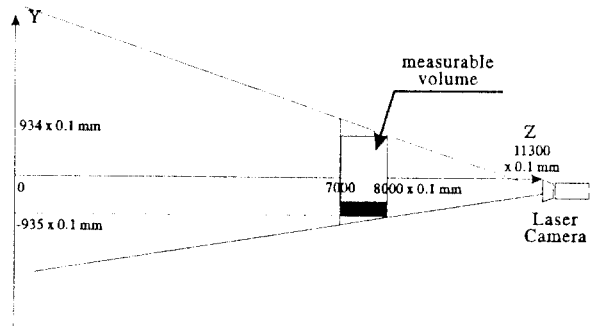


그림 8. 거리 데이터의 범위  
Fig. 8. Range of range data

그림 9 (e)와 그림 10 (d)는 그 이전 단계까지 구한 trimmed surface의 인자들을 이용하여 복구한 영상이다. 그림 9의 (c), (f)와 그림 10의 (e), (f), (g), (h)는 3장에서 제안한 방법대로 분할 영역을 확장한 후 parametric spline surface로 근사시킨 것을 나타내고, 그 위의 흰 실선은 추출한 경계와 정점을 이용

하여 parametric spline curve로 모델링된 각 영역의 경계를 나타낸다. 이 곡면들을 trimming 과정을 거친 후 하나로 모은 것이 그림 9 (e)와 그림 10 (d)의 복구된 영상이다.

비교를 위하여 그림 11에서 원래 거리 영상과 추출한 CAD 인자를 이용하여 복원한 영상, 그리고, 두 영상의

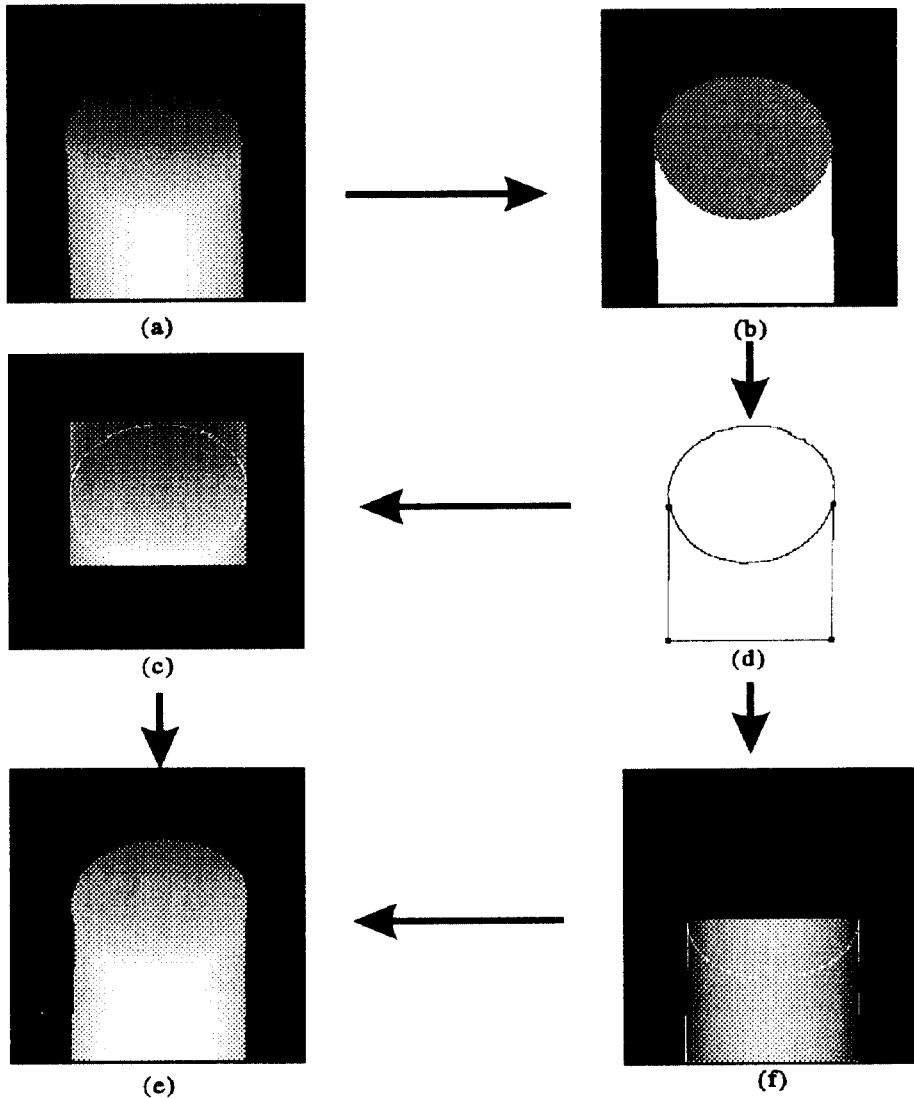


그림 9. Cylinder의 실험 결과

(a) 거리 영상 (b) 영역 분할 (c) 영역 1의 분리 (d) 경계와 정점의 검출 (e) 복구된 영상 (f) 영역 2의 분리  
 Fig. 9. Result of the Cylinder image  
 (a) Range image (b) Segmentation (c) Separation of region 1 (d) Extraction of edge and vertex  
 (e) Reconstructed image (f) Separation of region 2

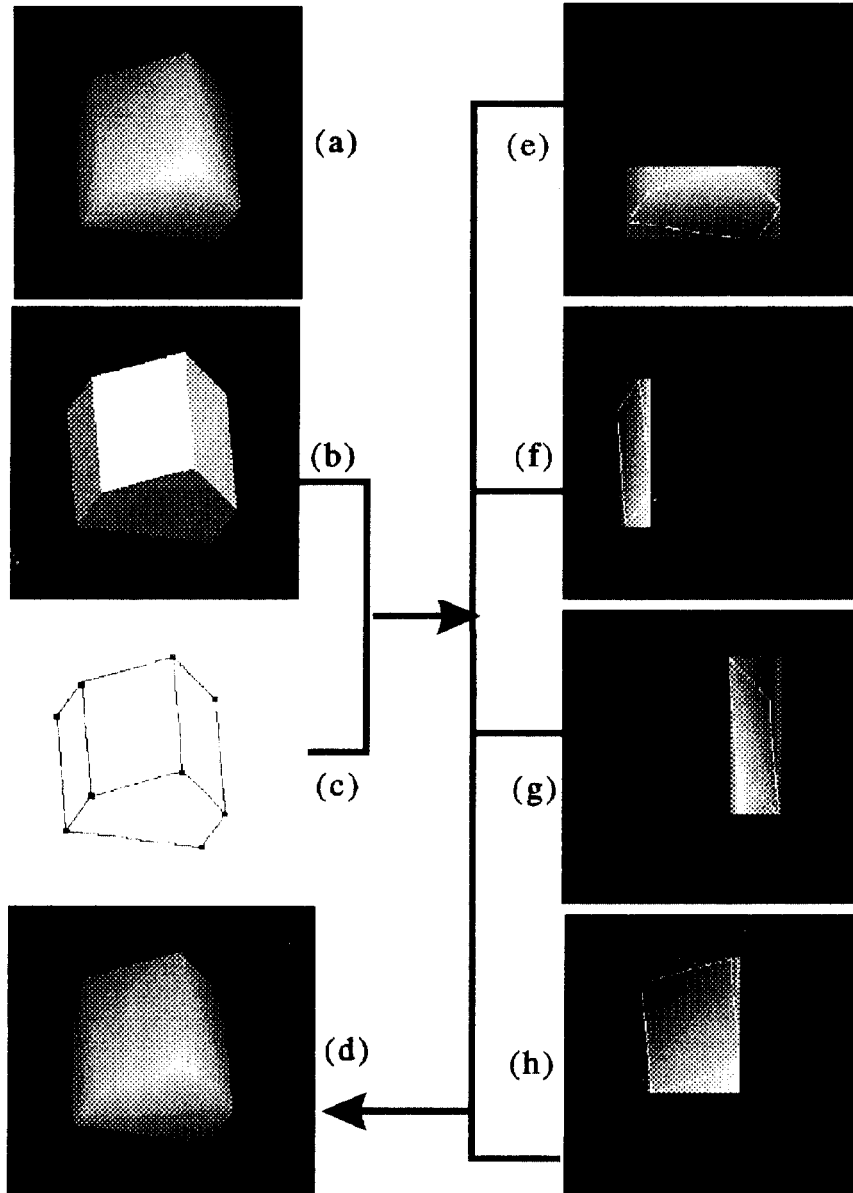


그림 10. House의 실험 결과

(a) 거리 영상 (b) 영역 분할 (c)경계와 정점의 검출 (d)복구된 영상 (e) 영역 1의 분리 (f) 영역 2의 분리 (g) 영역 3의 분리 (h) 영역 4의 분리

Fig. 10. Result of the House image

(a) Range image (b) Segmentation (c) Extraction of edge and vertex (d) Reconstructed image (e) Separation of region 1 (f) Separation of region 2 (g) Separation of region 3 (h) Separation of region 4

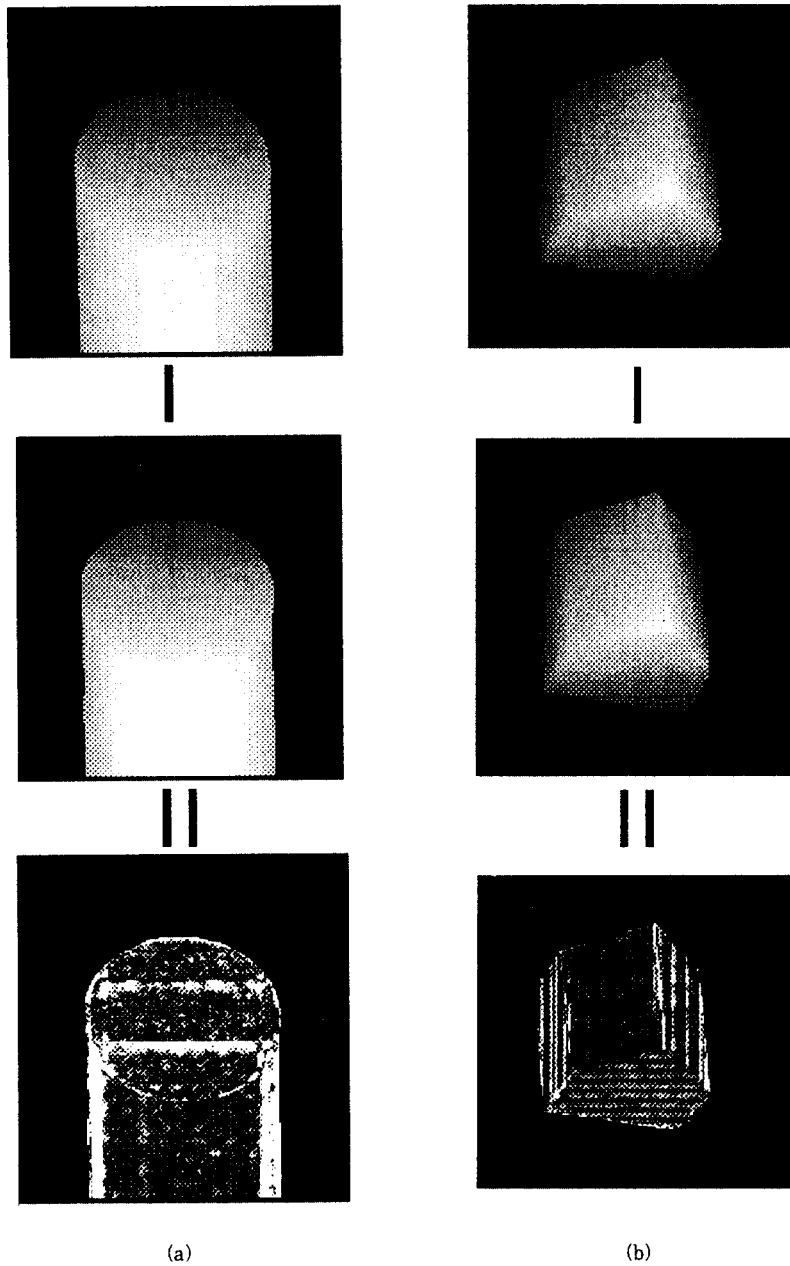


그림 11. 원 영상과 복구 영상의 비교  
(a) Cylinder 영상 (b) House 영상  
Fig. 11. Comparison of original image and reconstructed image  
(a) Cylinder image (b) House image

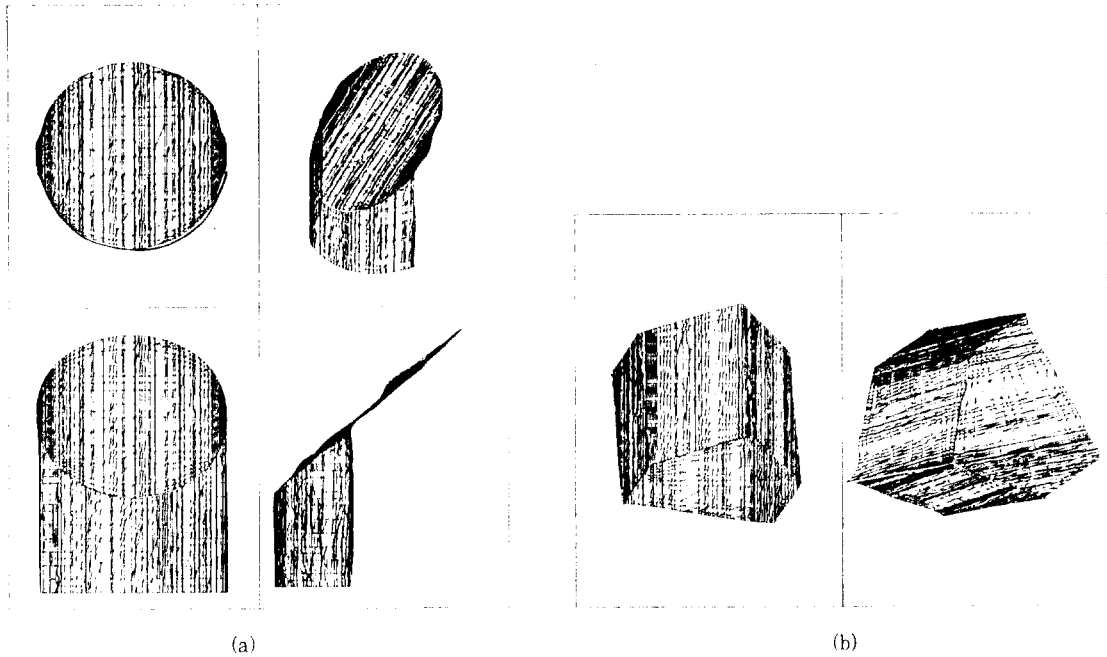


그림 12. IGES 형식으로의 변환 확인  
(a) Cylinder (b) House

Fig. 12. Confirmation of the conversion into IGES format  
(a) Cylinder (b) House

표 3. 각 단계에 의한 소요 시간  
Table 3. Time consumption in each stage

|          | 전처리 과정    | 경계와 정점의 검출 | 곡면과 경계 곡선의 모델링 |
|----------|-----------|------------|----------------|
| Cylinder | 12 분 30 초 | 18.5 초     | 3.9 초          |
| House    | 9 분 35 초  | 29.3 초     | 4.2 초          |

차이를 나타내었다. 오차 영상을 보면 격자나 줄무늬 형태로 오차가 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 직사각형 형태로 확장된 표면을 parametric spline surface로 근사시킬 때,  $M \times N$ 개의 patch로 분할하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고, 물체와 배경 사이의 경계 화소를 따라서는 항상 오차가 존재한다. 곡면 근사에 의한 오차는 그 값이 크더라도 대부분 15에서 40 정도이나, 경계를 따라 발생하는 이러한 오차는 그 화소의 물체의 소속 여부 자체를 바꾸므로 7000에서 8000 정도의 오차값을 갖는다. 따라서, 물체의 경계를 정확히 근사시키는 것이 무엇보다 중요하다.

최초 거리 영상을 참고으로 했을 때 SNR은 Cylinder 영상은 35.25 dB, House 영상은 33.06 dB이었다. 이는 대상 물체 표면의 재질에 따른 결과라 생각한다. 본 논문에서 사용한 레이저 카메라는 물체 표면이 전반사의 성질이 강하면 거리 정보의 신뢰도가 떨어진다. 석고 표면은 거의 전반사가 일어나지 않으므로, Cylinder 영상의 거리 데이터는 정확한 거리 정보를 가지고 있고, 그 경계도 더 정확히 구할 수 있다. House 영상은 도화지로 만들었기 때문에 분할 영역들의 경계는 Cylinder보다 불규칙하고, 정점을 검출하기가 어려웠다. 또, 경계를 parametric spline sur-

face로 표현할 때 그 길이를 매개 변수로 하므로 불규칙한 부분은 상대적으로 길이가 길어져서 경계의 정확한 모델링이 어렵다.

전반사 성질이 강한 물체는 일상 생활에서 흔히 볼 수 있고 자동차 차체와 같이 CAD에 의한 설계가 필수적인 것도 있다. 따라서, 본 논문을 이러한 물체에 적용하려면 표면의 전반사를 제거할 수 있는 표면 처리가 필요할 것이다. 또는 stereo<sup>(14)</sup>나 패턴광<sup>(15)</sup>을 이용하면 표면에 재질과 무관하게 거리 데이터를 얻은 후 그로부터 CAD 모델을 생성할 수 있을 것이다.

그림 12는 각각 Cylinder와 House의 거리 데이터로부터 생성한 IGES 화일을 상용 CAD 프로그램으로 입력받은 것을 나타낸 것이다. 본 논문은 미국 CAD-MAX 사의 CADMAXTM 프로그램을 이용하여 변환 결과를 확인하였다.

### Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 거리 데이터를 대상 물체의 CAD 형식으로 변환하는 다단계 과정과 곡면 모델링의 오차를 줄일 수 있는 새로운 방법을 제시하였다.

먼저 거리 데이터를 MLMS(Moving Least Median of Square-error) 추정을 이용하여 등간격의 grid 거리 영상으로 만들었다. 그리고, 이 거리 영상을 각 화소의  $(x, y, z)$  좌표와 법선 벡터의  $(\alpha, \beta, \gamma)$  성분, 모두 6 개의 성질을 기준으로 영역 분할하였다.

분할된 각 영역과 그 경계를 각각 자유 곡면과 자유 곡선으로 모델링한 후 IGES 형식이 지원하는 trimmed surface로 표현하였다. 이와 같은 trimmed surface를 하나로 통합하여 대상 물체의 IGES 형식을 생성하고, 이를 상용 CAD 프로그램으로 확인하였다. 그리고, 본 논문에서 제안한 분할 영역의 확장과 근사 후 trimming 과정은 곡면 근사 오차의 주요 원인인 배경과 물체 사이의 경계에 의한 step edge를 제거할 수 있었다. 이러한 방법은 물체 표면의 화소와 배경 화소를 개념적으로 분리하므로 대상 물체의 CAD 모델 생성이라는 본 논문의 최종 목표에도 부합한다. 이는 표면을 trimmed surface 형태로 표현하기 때문에 가능한 것이다. 그리고 분할 영역의 경계 정보 추출과 모델링을 위해 erosion-residue 에지 검출 연산자를 영역 분할 영상에 적용하여 각 영역의 경계를 추

출한 후, 정확한 경계 모델링을 위하여 곡물의 극대점을 정점으로 검출하였다.

결론적으로 본 논문은 새로운 분할 영역의 확장 및 근사 후 trimming 과정에 의해 곡면 근사 오차를 대폭 줄였을 뿐만 아니라, 기존의 연구들<sup>(2,3)</sup>이 수식적인 표현에 그친 데 반하여 완전한 IGES 화일의 생성까지를 수행하였으므로, 상용 CAD 프로그램으로 대상 물체를 직접 조작, 수정할 수 있는 가능성 등 그 응용의 폭이 넓다.

그러나, 본 논문은 하나의 시각에서 취득한 거리 데이터만을 다루므로 대상 물체의 전체적인 CAD 모델을 얻을 수 없다. 따라서, 향후 연구 방향은 여러 시각으로 거리 데이터를 얻었을 때, 이들을 하나의 CAD 형식으로 통합하는 것이다. CAD-based computer vision은 패턴 매칭이나 인식에서 기준을 물체의 CAD 모델을 이용하는 것이다. 따라서, 이처럼 대상 물체의 완전한 CAD 모델을 얻을 수 있다면, 이 CAD 모델을 이용한 CAD-based computer vision 시스템의 구현도 가능할 응용이 될 것이다.

### 參考文獻

1. Chris McMahon and Jimmie Brown, *CADCAM From Principles to Practice*, Addison-Wesley, 1993.
2. S. M. Naik and R. C. Jain, "Spline-based surface fitting on range images for CAD applications," *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp.249-253, 1988.
3. X. Chen and F. Schmitt, "Vision-based construction of CAD models from range images," *Proceedings on Computer Vision Conference*, pp.129-136, 1993.
4. P. J. Rousseeuw and A.M. Leroy, *Robust Regression and Outlier Detection*, New York: Wiley, 1987.
5. S. S. Sinha and B. G. Schunck, "A two-stage algorithm for discontinuity preserving surface reconstruction", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 1, pp.36-55.



- Jan. 1992.
6. R. Hoffman and A. K. Jain, "Segmentation and classification of range images". *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-9, No. 5, pp.608-620, Sep. 1987.
  7. R. Dubes and A. K. Jain, "Clustering techniques: The user's dilemma". *Pattern Recognition*, Vol. 8, pp.247-260, Aug. 1976.
  8. T. E. Boult and A. D. Games, "Recovery of superquadrics from 3-D information." *Proc. IEEE Conf. Comp. Vision and Pattern Recognition*, pp.68-76, Jun. 1986.
  9. F. Solina and R. Bajcsy, "Recovery of parametric models from range images : The case for superquadrics with global deformation." *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 12, No. 2, pp.131-147, Feb. 1990.
  10. R. M. Bolle and B. C. Vemuri, "On three-dimensional surface reconstruction methods". *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 13, No. 1, pp.1-13, Jan. 1991.
  11. J. H. Ahlberg, E. N. Nilson, and J. L. Walsh, *The Theory of Splines and Their Applications*, Academic Press, 1967.
  12. J. S. J. Lee, R. M. Haralick, and L. G. Shariro, "Morphological edge detection". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 2, pp.142-156, Apr. 1987.
  13. K. Reed, D. Harrod, and William Conroy, *The Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Version 5.0*, NISTIR 4412, Sep. 1990.
  14. T. D. Williams, "Depth from camera motion in a real world scene". *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-2, pp. 511-516, Feb. 1980.
  15. K. L. Boyer and A. C. Kak, "Color encoded structured light for rapid active ranging". *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-9, No. 1, pp.14-28, Jan. 1987.



沈學俊(Hack Joon Shim) 정회원

1969년 5월 9일생  
 1993년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학사)  
 1995년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)  
 1995년 3월~현재 : 서울대학교 제어계측공학과 박사과정

\*주관심 분야 : 컴퓨터 비전, 특징기반 추적

李商郁(Sang Uk Lee)

정회원

1949년 8월 11일생  
 1973년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
 1976년 5월 : 미국 Iowa 주립대학교 전기공학과 졸업(MSEE)  
 1980년 1월 : 미국 Univ. of Southern California 전기공학과 졸업(Ph.D.)  
 1980년 1월~1981년 9월 : 미국 General Electric Co. 연구원  
 1981년 9월~1983년 3월 : 미국 M/A-COM. Research Center 선임연구원  
 1983년 4월~현재 : 서울대학교 제어계측공학과 교수