

방향성 곡률에 의한 거리 영상의 표면 분할과 근사화

正會員 金根中* 正會員 金淳伯**
 正會員 金明起** 正會員 金斗泳**

Surface Segmentation and Fitting for Range Image using Directional Curvature

Keun-Chung Kim*, Soon-Back Kim**, Myung-Ki Kim**, Doo-Young Kim** *R.M.*

要 約

최근 컴퓨터 시각 분야에서 Range 데이터를 3차원 물체의 인식에 유용하게 사용하고 있다. 본 논문에서는 Range 데이터를 이용한 물체 인식의 중간 단계로 표면 분할과 표면 근사화를 위한 파라메타 추출 방법을 연구하였다. Range 데이터의 특성을 이용하여 곡률 계산에 의해 표면을 몇개의 조각으로 분할하고 이를 수식적으로 기술하는 방법을 제안하였다. 표면의 특징점을 정확히 추출하기 위해 곡률 계산시 가우시안 필터링과 스케일 공간 추적 기법을 도입하였고, 4가지 방향에 대한 곡률을 계산하여 Jump 경계와 Crease 경계를 찾은 후 이들을 폐곡선으로 연결하여 표면 조각을 얻었다. 표면 조각들은 Labeling 기법에 의해 분리되고 각 표면 조각을 수식적으로 기술하기 위해 표면 근사화 기법을 제시하였다. 표면의 분할과 사용한 근사화 기법의 타당성을 확인하기 위해 복원 처리하고 평균 자승 오차로 결과를 검토하였다.

Abstract

This paper is concerned with the surface segmentation and the surface fitting technique as an intermediate step for the recognition of 3-D objects using the directional curvature of range data. The surface is segmented into finite regions and each region of surface is described mathematically. In order to extract the characteristics of the surface precisely, Gaussian filtering and scale-space tracking techniques are introduced in the curvature calculations. Calculating the curvatures along 4 directions and finding jump and crease boundaries, these boundaries are connected in a closed boundary to obtain surface patch. The surface fitting and reconstruction techniques are proposed using the region labeling and eigen value approaches.

* 양산전문대학 전자계산과
 Dept. of Computer Science, Yang-San Junior College

** 동아대학교 전자공학과
 Dept. of Electronic Engineering, Dong-A Univ.

論文番號 : 94183

接受日字 : 1994年 7月 8日

I. 서론

3차원 물체의 인식은 컴퓨터 시각의 궁극적인 목표이다. 기존 영상 데이터는 명암도에 의해 물체의 표면을 나타내기 때문에 물체 형상에 대한 3차원 정보가 많이 소실되는 반면에 Range 데이터는 물체 표면에 대해 기하학적 구성 요소인 3차원 정보를 제공하므로 물체 형상의 묘사와 인식에 용이하게 사용된다.^(3,5,12,14) 본 논문에서는 Range 데이터를 이용하여 3차원 물체의 표면 분할을 구현하고 분할한 표면 조각(surface patch)에 표면 근사화 기법을 적용하여 표면을 복원하는 방법을 제시한다. Range 데이터를 이용한 컴퓨터 시각에서 표면의 분할(segmentation)과 표면의 근사화(fitting)는 인식의 최종 단계인 정합(matching)을 제대로 수행하기 위한 중요한 사전 작업이다. Range 데이터와 같이 기하학적인 요소로 구성된 거리 영상(Range Image)의 표면에서 미분기하학적 해석으로 표면의 형태 분류나 혹은 표면의 불연속적인 표면 특징을 이용하여 표면 분할하는 방법이 연구되었다. Jain과 Besl은 주곡률(principal curvature)로부터 계산한 Gaussian 곡률과 평균 곡률을 표면 형태 분할에 이용하였고⁽⁶⁾, T.J.Fan은 방향별 곡률 계산으로 추출한 표면 특징을 Jump 경계와 Crease 경계로 분류하여 표면 분할하였다.⁽⁷⁾ 이러한 곡률 계산은 잡음의 영향을 줄이기 위해 가우시안 필터링과 1,2차 미분 계산을 특징 추출에 사용하므로 곡률계산으로 추출한 표면 특징은 위치 편차를 갖는다. 그러므로 4개의 가우시안 필터링한 영상과 4방향의 곡률 계산으로 표면 특징을 추출하고 표면 특징의 위치 편차를 보정하는 스케일 공간 추적(scale-space tracking)기법을 도입한 방향별 곡률 계산을 정확한 표면 경계선의 검출에 구현하여 거리 영상을 표면 분할하였다.

인식에서 전처리 단계로 중요한 과제인 표면 분할은 다수개의 표면을 갖는 거리 영상에 방향별 곡률 계산으로 검출한 Extrema와 영교차(zero-crossing) 등의 표면 특징에 스케일 공간 추적을 이용하여 Extrema와 영교차의 정확한 위치를 검출하였다. 깊이가 불연속하는 표면에서는 곡률값이 반대 부호의 두개의 Extrema와 1개의 영교차가 발생하며 방향의 불연속에는 1개의 Extrema 혹은 1개의 영교차와

Extrema가 존재한다. range 데이터의 양자화 특성에 의해 영교차가 2개 이상 존재 할 경우에는 국부 마스크의 조작으로 영교차를 추출할 수 있었다. 이러한 표면 특징을 조사하여 깊이가 불연속하는 화소의 모임인 경계선을 jump 경계로 하고 방향이 불연속하는 화소의 모임을 crease 경계로 분류하였고⁽⁸⁾, 두 경계선을 병합하고 연결하여 표면조각에 상응하는 폐곡선을 만들었다. 스케일 공간 추적기법은 4개의 분산값으로 Gaussian 필터링하여 거리영상의 잡음에 대한 적응성을 높이고, 분산 값이 큰 영상에서 곡률 계산에 의한 표면 특징점을 표면 특징의 존재 유무로 판단하고 적은 분산값의 영상에서 곡률 계산으로 찾은 특징을 표면 특징점의 위치로 결정하여 표면 특징을 정확히 찾는 방법으로 분할 과정에 대한 신뢰성을 부여하였다. 다수개의 폐곡선으로 구성된 표면은 라벨링으로 표면을 분할한다. 이때 사용하는 라벨링은 체인 코드(chain code)의 방향 정보에 따라 폐곡선의 화소를 주사하여 폐곡선을 다수개의 영역으로 구분화하였다.

인식의 중간 표현 단계인 표면 근사화(surface fitting)는 표면 분할 결과를 검증하고 표면 근사화 다항식의 계수와 표면에서 면의 형태등의 정보를 획득하기 위한 방법이다. C.H.Chen과 A.C.Kak은 표면 조각을 Lagrange 함수를 사용한 최적해 방법으로 평면으로 근사화하였고⁽⁹⁾ T.J.Fan은 최소 자승법에 의해 $z=f(x,y)$ 형태의 2차 곡면으로 근사화하였다.⁽⁷⁾

본 논문에서는 보다 일반적인 곡면에도 근사화가 적용 가능하도록 $f(x,y,z)=0$ 형태의 일반 2차 곡면 방정식으로 근사화하였다. 표면 조각으로 부터 Scatter 행렬을 구하고 고유 벡터 해석에 의해 근사화할 수 있음을 제시하였다. 이 방법은 Scatter 행렬의 계수 선정에 따라 평면, 타원면, 일반 2차 곡면의 근사화가 모두 가능하였다. 그러나 평면을 일반 2차 곡면으로 근사화하는 경우 쌍곡면을 부적절하게 근사화 될수도 있으므로 평면 근사화, 타원 곡면 근사화, 일반 2차 곡면 근사화의 3단계를 표면 조각에 차례로 적용하여 표면 형태 분류와 적절한 근사화 방정식을 찾았다. 표면 분할 과정에서 구한 표면 조각과 근사화 과정에서 획득한 근사화 방정식의 계수는 정합에서 유용한 입력 데이터로 사용할 수 있을 것이다. 이상의 처리 알고리즘은 합성 거리 영상과 ERIM⁽¹⁵⁾에서

만든 실제 거리 영상에 대하여 실험하였다.

II. 거리 영상의 표면 분할

1. 곡률의 성질과 표면의 불연속성

미분 기하학으로 부터 $y=f(x)$ 로 표현되는 곡선에 대한 곡률 k 는 미소 곡선의 진행 방향인 접선성분의 값과 이때 곡선에 직교하는 법선 성분의 변위값의 관계식으로 식(1)과 같이 2차 미분식으로 표현할 수 있고,

$$k = \frac{f''}{(1+f'^2)^{3/2}} \quad (1)$$

또한 $(x,y,f(x,y))$ 로 기술이 가능한 물체 표면에서 미소 표면의 접선에 수직으로 생성하는 법선 곡률(normal curvature) k_n 이 극치값을 가질때 유도되는 식(2)를 표면상의 주곡률 방정식으로 할 수 있다. Besl과 Jain⁽⁶⁾은 식(2)의 2개의 근인 최대 곡률 k_1 과 최소 곡률 k_2 를 이용하여 식(3)의 가우스 곡률과 식(4)의 평균 곡률에 의해 표면을 flat, peak, pit, ridge, valley, minimal, saddle ridge, saddle valley 등 8개의 표면 형태로 분할하였다.

$$|G|k_n^2 - (g_{11}d_{22} + g_{22}d_{11} - 2g_{12}d_{12})k_n + |D| = 0 \quad (2)$$

$$\text{여기서, } G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{12} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+f_x'f_x' & f_x'f_y' \\ f_x'f_y' & 1+f_y'^2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{12} & d_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1+f_x'^2+f_y'^2}} \begin{bmatrix} f_{xx}f_{yy} \\ f_{xy}f_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\text{가우스 곡률 : } K = k_1 \times k_2 \quad (3)$$

$$\text{평균 곡률 : } H = \frac{k_1+k_2}{2} \quad (4)$$

또한 T.J.Fan⁽¹³⁾은 표면상의 임의의 위치에서 조사 방향에 수직으로 곡률값을 생성하게 하는 식(5)의 방향별 곡률(directional curvature) k_ϕ^N 을 제시하였다.

$$k_\phi^N = - \frac{f''}{(1+f'^2)^{3/2}} \sqrt{\frac{1+(p \cos\phi - q \sin\phi)^2}{1+p^2+q^2}} \quad (5)$$

여기서 ϕ : 조사방향 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)

f, f'' : ϕ 에서 1차 미분과 2차 미분이다.

p, q : 수평과 수직방향에서 1차 미분이다.

N : 표면에서 단위 법선 벡터이다.

본 논문에서는 식(5)를 표면 분할하기 위한 표면 특징의 해석에 사용하였고 식(3)과 식(4)는 오목면(concave)혹은 볼록면(convex), 평면등의 표면 형태를 분류할때 사용하였고 또한 식(2)에 의해 표면 특징을 추출하여 표면을 분할한 결과보다 식(5)의 표면 특징에 의해 추출한 표면 분할 결과가 우수함을 실험에서 보였다. 그림 1(a)는 육면체와 구면체로 합성한 거리 영상을 보였고 식(2)의 주곡률 방정식에 의해 그림 1(c)의 표면 성질에 따른 표면 특징을 그림 1(d)에서 보였다. 깊이가 불연속한 표면에서는 영교차와 반대 부호를 갖는 두개의 최대치(peak)가 생성되고 표면 방위가 불연속한 표면에서는 1개의 최대치가 생성되었다.

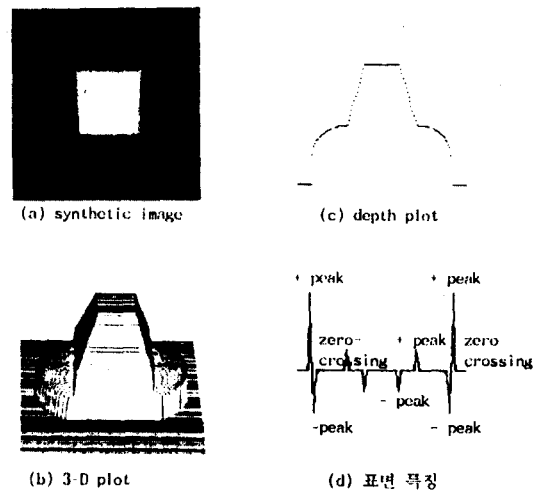


그림 1. 합성거리영상의 3차원 표현과 표면의 불연속
Fig 1. 3-D plot and surface discontinuity of a synthetic range image.

그림 1의 거리 영상의 표면 특성을 표면 깊이 불연속과 표면 법선 벡터의 불연속으로 분류할때 거리 영상은 서로 다른 표면 특성을 갖는 다수개 표면들의 모임이다. 표면은 곡률 계산에 의해 인접 화소간의 깊이가 불연속하는 표면 위치에서 곡률값은 영교차와 반대 부호의 최대치를 갖고 인접 표면간의 법선 방향인 방위가 불연속하는 표면 위치에서는 한개의 최대치를 갖는 표면 영역으로 구분되었다. 다음은 표면이 갖는 깊이와 법선 벡터의 불연속등 표면 특성을 이용하여 곡률 계산시 추출한 표면 특징을 공간적인 결합과 연결하기 위해 다음과 같은 표면 경계를 도입한다.⁽¹⁷⁾

- Jump 경계 : 물체의 표면이 불연속한 위치로 즉, 거리영상에서 깊이가 급격히 변하는 위치에서 1개의 영교차와 2개의 반대 부호의 peak를 갖는다.
- Crease경계 : 물체 표면 방위가 불연속한 위치로 즉, 표면에서 법선 벡터가 불연속하는 위치에서 1개의 peak 혹은 1개의 peak와 영교차를 갖는다.

2. 표면의 특징 추출

1) 가우시안 필터링

거리 영상에서 표면 특징을 추출할때 잡음의 영향을 줄이고 방향별 곡률 계산과 스케일 공간 추적을 이용하기 위한 사전 단계로 거리 영상에 4개의 분산(σ)값에 따른 다음의 가우시안 함수 g 와 화소 $p(x,y)$ 을 콘볼루션(convolution)하여 필터링 하였다.

$$g = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

이때 사용하는 가우시안 마스크의 크기는 가우시안 함수의 크기가 1에 근사한 $6x\sigma$ (여기서 $\sigma=0, 0.5, 1.0, 1.5$)로 선택한다.

2) 곡률의 계산

물체의 표면은 공간상에 존재하므로 조사하는 방향

에 따라 곡률값은 다르다. 그러므로 가우시안 필터링한 4개의 거리 영상에 식(5)의 방향별 곡률 방정식 $k\theta$ 을 적용하여 표면상의 임의의 위치 $p(x,y)$ 에 4개의 조사 방향($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)에 수직으로 생성하는 곡률값을 구한다. 이때 사용하는 1차 미분은 그림 2의 방향별 미분 마스크로 4개의 가우시안 필터링한 거리 영상에 콘볼루션하여 곡률값을 계산하고 2차 미분은 동일한 방향의 1차 미분한 결과 데이터와 그림 2의 미분 마스크를 콘볼루션으로 계산하였고 이러한 1,2차 미분치를 식(5)의 방향별 곡률 방정식에 사용하여 표면의 불연속점인 표면 특징을 검출하였다.

0 0 0 0 0	0 0 1 0 0
0 -1 0 1 0	0 0 0 1 0
0 -1 0 1 0	-1 0 0 0 1
0 -1 0 1 0	0 -1 0 0 0
0 0 0 0 0	0 0 -1 0 0
(a)	(b)

0 0 0 0 0	0 0 1 0 0
0 1 1 1 0	0 1 0 0 0
0 0 0 0 0	1 0 0 0 -1
0 -1 -1 -1 0	0 0 0 -1 0
0 0 0 0 0	0 0 -1 0 0
(c)	(d)

그림 2 4방향별 미분 마스크
(a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135°
Fig 2. Derivative masks of 4 directions.
(a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135°

3) Extrema와 영교차의 추출

곡률 방정식에 의해 깊이가 불연속한 표면에서는 영교차와 반대 부호를 갖는 두개의 최대치가 생성되고 법선 벡터가 불연속한 표면에서는 1개의 최대치 혹은 영교차와 1개의 최대치가 생성된다. 그러므로 4개의 방향에 따라 계산한 곡률값을 조사하여 표면 특징인 영교차와 Extrema를 검출하였다. Extrema는 방향별 마스크로 국부 영역내에서 곡률값을 조사

하였을때 임의의 화소의 곡률 절대값이 인접 화소에 존재하는 곡률들의 절대값보다 큰 최대치로 정의한다. 또한 실험에서는 공간 해상도 내에서 최대 곡률 절대값의 10% 이하인 곡률값을 갖는 화소 즉, 잡음이나 거리 영상의 양자화 특성에 의해 생성한 표면 특징인 화소는 버리고 Extrema 추출 작업을 하였다. 영교차는 곡률값이 현재의 위치에서 zero이고 이전과 이후의 위치에서는 반대 부호의 곡률값을 갖는 것으로 정의한다. 실제로 표면 특징은 곡률 계산에 의해 zero점보다는 반대 부호를 갖는 곡률값이나 혹은 곡률 계산시 양자화 오차에 의한 2개 이상 존재하는 경우가 있다. 반대 부호의 두 곡률값에서 영교차의 위치는 절대값이 zero에 가까운 화소의 위치로 하였고, 양자화 오차에 의한 2개 이상의 영교차 위치는 각각의 zero와 이웃한 곡률값이 절대값 차가 zero에 근접한 경우의 zero를 영교차의 위치로 결정하였다. 그림 3은 필터링한 거리 영상에 대해 0° 방향으로 곡률 계산할 때 Extrema와 영교차를 추출한 결과를 나타낸 것으로 조사방향에 수직인 성분의 표면 특징이 강조되고 조사방향과 일치하는 성분의 특징은 억압되어 방향별 곡률 방정식의 원리가 부합되고 있음을 보였다.

4) 스케일 공간 추적

곡률 계산으로 추출한 표면 특징은 필터링과 곡률 계산의 1,2차 미분에 의해 표면 고유의 특징점에서 위치 이동을 하게 되므로 특징의 위치 편차를 보정하기 위해 본 논문에서는 분산 σ 값에 따른 스케일 공간 추적(scale-space tracking) 기법을 곡률 계산으로 추출한 Extrema와 영교차등의 표면 특징에 적용하여 표면 특징의 존재와 위치의 신뢰성을 갖도록 하였다. 표면의 특징을 추출하기 위한 가우시안 필터링과 곡률 계산 단계에서 4개의 분산값으로 필터링 처리한 거리 영상들을 구성하였고 이러한 영상에 독립적으로 방향별 곡률 계산하여 추출한 표면 특징의 영상은 분산값과 곡률값에 의해 4가지 스케일을 갖는 영상이다. 가우시안 필터링의 스케일이 증가함에 따라 S/N비가 증가하고 따라서 곡률 계산시 표면 특징에 대한 위치의 손실을 갖는 반면에 특징의 존재에 대한 신뢰성을 가질 수 있다. 필터링한 4개의 영상에서 특정 방향의 곡률 계산으로 만든 특징 영상들에 대해 σ 값을 이용하여 스케일 공간 이동시 4개의 특징 영상 모두에서 동일한 특징이 존재할때 특징에 대한 존재 여부와 정확한 위치 선정을 결정하였다. 즉, 4가지 스케일의 표면 특징 영상들에서 가장 큰 대역폭($\sigma=1.5$)의 필터링과 곡률 계산으로 추출한 특징 영상에서 특징의 존재 유무만 판단하였고 가장 적은 대역폭($\sigma=0.0$)의 필터링(원 영상)과 곡률 계산으로 추출한 특징의 위치를 표면 특징의 위치로 결정하였다. 실험에서는 영교차와 Extrema의 위치 결정을 각각 독립적으로 수행하였고 영교차와 Extrema에 대한 위치 선정은 그림 11과 같이 대역폭이 가장 큰 곳에서 낮은 곳으로 σ 값을 0.5 정도로 공간 이동 하면서 표면 특징의 존재 유무의 판단과 정확한 위치 추출을 하였다. 또한 Extrema를 공간 이동하여 추출할때 분기가 발생하면 즉, 공간 이동 마스크내에 2개의 Extrema가 존재할 경우 큰 곡률값을 갖는 화소를 선택하였고 영교차를 공간 이동하여 추출할때 인접한 화소에 2개의 영교차가 존재하는 분기가 발생하면 공간 이동 작업은 멈추고 이전의 스케일 단계에서 존재하는 위치를 영교차의 위치로 결정하였다. 그림 4에서는 4개 방향에서 곡률 계산으로 만든 표면 특징을 스케일 공간 추적한 결과를 보였다.

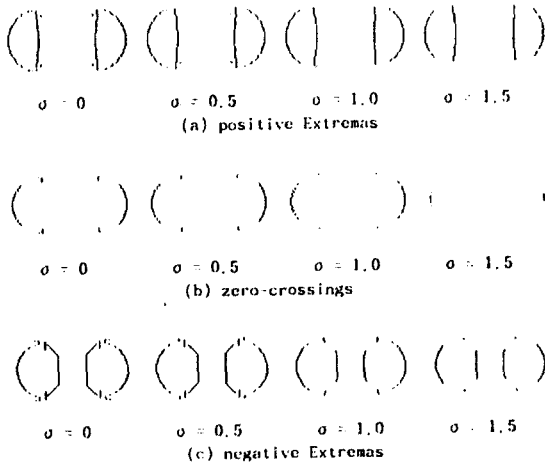


그림 3. σ 값의 변화에 따른 표면상의 Extrema와 영교차($\theta = 0^\circ$)
 Fig 3. Extremas and zero-crossings in vertical direction for σ increasing from 0 to 1.5

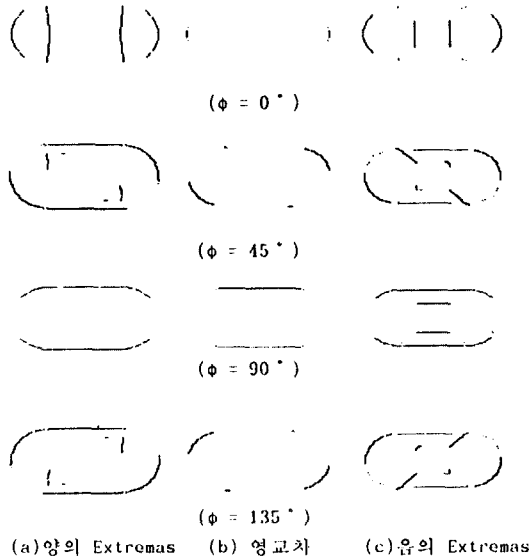


그림 4. 4개의 방향별 곡률계산과 스케일 공간 추적의 결과
Fig 4. Results of 4 directional curvature computations and scale-space tracking.

5) 병합과 세선화

그림 4의 4개 방향에서 각기 추출한 영교차와 Extrema의 표면 특징에 곡률 계산시 사용한 4개의 방향값을 설정하고, 표면 특징인 개개의 영상을 논리 합하여 3개의 영상으로 병합(merge)을 하면 영교차와 Extrema 영상들은 4개의 방향 정보를 갖게 되었다. 한개의 화소 위치에서 2개의 방향값이 존재할 수 있게 되므로 이러한 경우에는 큰 곡률값을 갖는 방향값의 화소를 선택하였다. 또한 같은 표면 특징이 인접한 화소에서 발생할 수 있기에 가장자리를 보존(ridge preserving)하는 세선화(thinning)작업을 하였다. 세선화는 3x3 마스크내에서 화소들이 불연속이거나 끝점(end point)인 경우는 삭제하고, 임의 화소가 그 자신의 방향에 수직인 곳에 같은 표면 특징이 존재하면 마스크내 수직 성분의 화소중 작은

곡률값을 갖는 화소는 삭제하였다. 그림 5는 병합한 영상의 세선화 처리한 결과를 보였다.

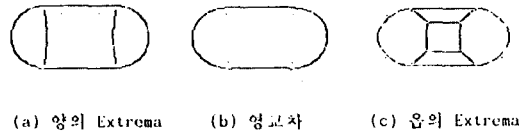


그림 5. Extrema와 영교차의 세선화 결과
Fig 5. Results of thinning Extremas and zero-crossing.

6) 공간적 결합과 연결

영교차와 Extrema의 세선화한 결과를 1개의 영상으로 병합한 후, 이러한 표면 특징들에서 Jump 경계와 Crease 경계를 찾기 위해 7x7 공간 마스크를 영교차와 Extrema에 적용하여 다음과 같은 종류의 라벨(label)에 의해 표면 특징들을 공간 결합(space grouping)하였다. Type 3-6은 7x7크기의 공간 마스크 내에 영교차인 중심 화소의 방향 정보를 이용하여 화소 방향에 수직으로 반대 부호인 2개의 Extrema 혹은 1개의 Extrema가 존재하는 여부에 따라 결정하고 Type 1-2는 마스크내에서 Extrema만 존재하는 경우이고 조사가 된 화소는 0으로 하여 중복 조사를 방지하였다.

- Type 1 : 고립된 양의 Extrema(+)
- Type 2 : 고립된 음의 Extrema(-)
- Type 3 : 연관된 양의 Extrema와 영교차(+0)
- Type 4 : 연관된 음의 Extrema와 영교차(-0)
- Type 5 : 연관된 양/음 Extrema와 영교차(+0-)
- Type 6 : 고립된 영교차(0)

다음 단계는 경계점에서 발생하는 특징 화소를 곡선으로 모으기 위해 공간적인 연결(space linking)을 하는 것이다. 먼저 라벨이 Type 3-6이 하나이면 영교차의 위치로 라벨값의 위치를 결정하였다. 만일 Type 1-2같이 고립된 것일 경우 Extrema 위치로 라벨값의 위치를 결정하였다. 같은 라벨로 된 이웃점은 진행 방향이 45° 이내로 인접하는 화소는 연결을 하고 이때 한 화소의 빈 값은 채워서 연결한다. 만일 임의 화소에서 진행 방향으로 분기가 발생할 때

는 가장 긴 가지를 선택하였다. 즉, 표면은 라벨값을 이용하여 다음과 같은 두개의 경계로 연결하여 곡선 형태로 변환시킨다.

- a) Jump 경계 : Type 5, Type 6
- b) Crease 경계 : Type 1, Type 2, Type3, Type 4

그림 6은 합성 거리 영상에서 추출한 두 경계를 보인 것으로 개개의 라벨을 각각 연결과 잔가지 제거 작업을 한 결과에 Type 1,2,3,4 와 Type 5,6으로 구분한 후 두개의 표면 경계로 분류하였다.



그림 6. 표면경계의 분류
Fig 6. Classification of surface boundaries.

7) 표면의 조각화

표면 경계인 Jump와 Crease 경계를 병합하면 표면은 개곡선과 폐곡선의 경계선을 갖게 된다. 개곡선은 한개 혹은 두개의 끝점을 갖고 있다. 이러한 끝점을 8방향 체인 코드의 방향 정보를 이용하여 다른 곡선과 연결하였다. 즉, 개곡선의 끝점을 5×5 공간 마스크내의 중심 화소로 하고 끝점 화소가 진행하는 방향정보를 추출한다. 추출한 방향 정보의 방향으로 중심 화소에서 거리가 7개 화소 이내로 다른 곡선과 혹은 곡선의 끝점을 만나면 빈 겹은 채워서 개곡선을 폐곡선화하여 그림 7과 같은 표면 조각(surface patch)을 만들었다.

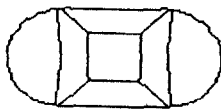
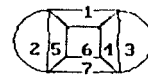


그림 7. 표면의 조각
Fig 7.Patches of the surface.

Ⅲ. 표면의 복원

1. 영역의 라벨링

전처리 과정을 통해서 만든 표면 조각들을 구분하기 위해 영역 라벨링(labeling)기법을 적용하였다. 영역 라벨링은 8방향 체인 코드의 방향 정보를 이용하여 폐곡선인 경계선을 추적하여 진행 방향에 따라 2개 이상의 폐곡선 영역들을 구분화하는 방법으로 그림 8은 합성 거리 영상인 그림 1의 표면을 분할한 조각에 라벨링 기법을 이용하여 영역을 분리한 결과로서 7개의 영역으로 분리되었다.



(a) 표면 조각 (b) Region Labeling

그림 8. 표면을 라벨링으로 영역의 구분화
Fig 8. Region labeling in surface

2. 표면 근사화(Surface fitting)

라벨링한 표면 조각에 2차 곡면 방정식을 적용하여 개개의 조각에 대응하는 곡면을 근사화하였다. 표면 근사화는 Scatter 행렬과 고유치에 의해 구할 수 있다. 먼저 직선을 근사화하는 수식 전개에 의해 본 논문의 근사화 과정이 타당함을 제시한 후 이를 곡선과 곡면에 확장하여 곡면체도 근사화 할 수 있음을 보인다.

1) 직선의 근사화

입력 데이터(x_i, y_i): $i=1,2,\dots,N$)가 주어진 경우 수식(7)에 의해 직선을 근사화할때

$$f(x,y) = ax + by + c = 0 \tag{7}$$

최소 자승 오차(least square error) E는 식(8)과 같다.

$$E = \sum_{i=1}^N |f(x_i, y_i)|^2 = \sum_{i=1}^N (ax_i + by_i + c)^2 \tag{8}$$

계수 a,b,c에 대해 E를 최소로 하는 조건은 각각의 계수로 1차 미분한 결과가 0일때 이므로 1차 미분한 3개의 연립 방정식을 식(9)의 매트릭스 형태로 표시할 수 있다. 식(10)의 행렬은 대칭 행렬로 Scatter 행렬이라고 한다.⁽¹⁵⁾

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$S = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix} \quad (10)$$

$V_i = [x_i, y_i, 1]^T$ 로 두면 Scatter 행렬 S는 벡터 V_i 로 구성될 수 있다.

$$S = \sum_{i=1}^N V_i V_i^T \quad (11)$$

식(7)의 계수를 $W = [a, b, c]^T$ 로 표시하면 식(9)은 식(12)와 같이 된다.

$$SW = 0 \quad (12)$$

식(12)에서 S가 주어진 입력 데이터로부터 결정되어진 값이므로 W가 zero 벡터가 아닌 근사적인 해를 얻기 위해서 식(13)으로 나타낼 수 있다. λ_{min} 은 S의 고유치중 최소 값이며, W는 λ_{min} 에 대응하는 고유 벡터이다.

$$SW = \lambda_{min} W \quad (13)$$

2) 2차 곡선의 근사화

입력 데이터 $\{(x_i, y_i) : i=1,2,\dots,N\}$ 가 주어진 경우 2차 곡선 방정식을 식(14)과 같이 두면

$$f(x,y) = ax^2 + by^2 + dx + ey + f = 0 \quad (14)$$

$V_i = [x_i^2, y_i^2, x_i, y_i, 1]^T$ 로 표시할 수 있다. 이때 Scatter 행렬 S는 식(15)이다.

$$S = \sum_{i=1}^N V_i V_i^T \quad (15)$$

수식(14)의 계수를 $W = [a, b, d, e, f]^T$ 로 표시하면 식(13)과 같은 고유 벡터를 구하는 특성 방정식으로 곡선을 근사화 할 수 있다. 여기서 S의 최소 고유치에 대응하는 고유 벡터가 식(14)의 계수를 나타내는 값이다. 이상과 같이 2차 곡선 근사화 방정식을 Scatter 행렬로 하고 Scatter 행렬의 고유 벡터 해석에 의해 곡선을 $f(x,y)=0$ 의 형태로 근사화 할 수 있음을 보였다. 그러나 Scatter 행렬에 의한 곡선의 근사화는 $y=f(x)$ 형태의 곡선 근사화와 달리 직선의 근사화를 2차 곡선(특히쌍곡선)의 근사화로 나타낼 수 있다. 그림 9에서 이 예를 보이고 있다. 직선으로 근사화되는 데이터인 그림 9(a)에 식(14)를 적용한 경우 최소 고유치에 대응한 계수는 그림 9(b)와 같이 쌍곡선의 데이터로 되고 있다. 따라서 Scatter 행렬에 의한 근사화는 직선 방정식에 대한 고유 벡터 해석을 먼저 처리하여 근사화 오차가 임계치 이하이면 직선 근사화를 사용하고 오차가 임계치 이상이면 곡선 근사화를 적용하는 것이 타당하다.

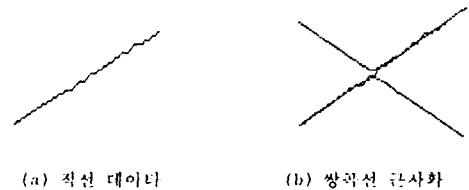


그림 9. 직선에 대한 곡선 근사화
Fig 9. Curve fitting for a line

3) 곡면의 근사화

입력데이터 $\{(x_i, y_i, z_i) : i = 1,2,\dots, N\}$ 가 주어진 경우 식(16)의 2차 곡면 방정식은 직선의 근사화 과정과 동일한 수식 전개에 의해서 곡면을 근사화 하는 곡면 방정식의 계수를 획득 할 수 있다.

$$f(x,y,z) = Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fxz + Gx + Hy + Iz + J = 0 \quad (16)$$

이때 Scatter 행렬은 식(17)이고

$$S = \sum_{i=1}^n V_i V_i' \quad (17)$$

여기서,

$$V_i = [x_i^2, y_i^2, z_i^2, x_i y_i, y_i z_i, x_i z_i, x_i, y_i, z_i, 1]^T \quad (18)$$

곡면 방정식의 계수는 식(19)이며

$$W = [A, B, C, D, E, F, G, H, I, J]^T \quad (19)$$

식(16)의 곡면 방정식에 대한 고유 벡터를 구하는 특성 방정식은 식(20)이다.

$$SW = \lambda_{min} W \quad (20)$$

여기서 λ_{min} 는 Scatter 행렬 S의 고유치중에서 최소 값이며 W는 λ_{min} 에 대응하는 고유벡터로 2차 곡면 방정식인 식(16)의 계수이다. 실제로 거리 영상의 표면 형태는 구면이나 타원면과 같은 완전한 표면 보다는 표면을 주사(scan)하는 관점에 따라 불완전한 형태의 곡면을 가질 수 있다. 이 경우 T.J.Fan이 제시한 $f(x,y) = A+Bx+Cy+Dxy+Ex^2+Fy^2$ 형태의 곡면 방정식⁷⁾ 보다도 일반 2차 곡면으로 근사화 하는 것이 적절하다. 곡선 근사화 과정에서 직선형 데이터에 곡선 근사화를 적용시 쌍곡선이 발생하였으므로 2차 곡면 방정식 식(16)을 Scatter 행렬에 의해 평면에 적용하면 평면으로 근사화 되지 않고 쌍곡면으로 근사화 될 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 표면 근사화 그리고 2차 곡면 근사화등 3가지 근사화를 근사화 오차의 임계치에 의해 순서대로 적용하여 표면을 재구성하였다. 오차가 임계치 이하인 경우는 먼저 식(21)의 평면 방정식을, 이상이면 식(22)의 타원 곡면 방정식과 일반 2차 곡면 방정식을 차례대로 표면 조각에 적용하여 표면 형태에 상응하는 근사화를 하였다.

$$f(x,y,z) = Gx+Hy+Iz+J=0 \quad (21)$$

$$f(x,y,z) = Ax^2+By^2+Cz^2+Gx+Hy+Iz+J=0 \quad (22)$$

이상과 같은 곡면을 근사화하는 수식을 실험으로 구

현하기 위해서 라벨링한 개개의 표면 조각에 대응하는 Range 데이터를 원 영상에서 랜덤하게 취하고 취한 화소들의 거리값 z와 좌표값 x,y를 이용하여 근사화 방정식 식(21)에 대해 Scatter 행렬을 구하고 식(20)의 고유 벡터의 해석에서 고유치가 최소일때 갖는 고유 벡터내의 계수를 자코비 방법(Jacobi method)으로 찾는다. 이러한 계수를 평면 근사화 방정식의 계수로 취하고 취한 계수에 의해 평면을 근사화한다. 그리고 최소 고유치에 대응하는 고유 벡터와 영상 좌표치를 곱한 근사화 오차에 임계치를 설정한다. 근사화 오차가 임계치 이상이면 평면을 곡면으로 부적절한 근사화를 하므로 식(22)의 타원 곡면 방정식과 식(16)의 일반 2차 곡면 방정식을 차례대로 식(20)의 고유 벡터 해석에 적용하여 근사화 방정식의 계수를 찾고 이를 이용하여 곡면을 근사화하였다. 이때 추출한 계수가 표면이 갖는 고유 정보로 표면 형태를 묘사할 수 있는 표면 파라메타이다. 가령 평면의 표면 계수는 (G,H,I,J)의 값이고 타원 곡면은 2차곡면에 비해 D,E,F항이 없는 (A,B,C,G,H,I,J)의 값이므로 이러한 계수에 의해 표면 형태를 묘사할 수 있을 것이다. 그림 10은 영역 라벨링한 그림 8(b)의 7개의 표면 조각에서 개개의 조각에 대응하는 표면 근사화를 근사화 오차의 임계치에 따라 평면과 타원 곡면으로 근사화하여 표면 계수를 찾고 이를 이용하여 표면을 재구성한 것이며, 입체적인 검증을 위해 3차원 그래픽으로도 표현하였다. 표 1에서는 임계치에 따라 표면 근사화한 결과를 원 영상에 대해 평균 자승 오차(mean square error)로 비교한 바, 완전한 형태를 갖는 표면은 평면과 타원 곡면 방정식으로 표면을 재구성 할 수도 있음을 보였다.



(a) 복원한 거리 영상

(b) 3-D plot

그림 10. 표면의 복원 영상
Fig 10.Reconstruction image of surface

표 1. 표면 근사화 방식
Table 1. Fitting mode of surface fitting by threshold.

threshold = 0.89

patch fitting	1	2	3	4	5	6	7
fitting mode	평면	타원곡면	평면	평면	타원곡면	평면	평면
MSE	0.00000	0.83566	4.79035	4.14346	0.87126	1.00000	0.71653

IV. 실험 및 검토

방향별 곡률 계산과 스케일 공간 추적을 이용하여 거리 영상의 표면 분할에 사용한 데이터는 2개의 구면체와 육면체를 합성한 그림 1과 그림 12,13의 실제 거리 영상이다. 그림 1(a)의 거리 영상에 곡률 계산과 정확한 표면 특징 추출을 하기 위해서 4개의 분산값으로 가우시안 필터링한 4개의 영상을 구성하고, 개개의 영상에 방향별 곡률 계산으로 찾은 특징점을 영교차와 Extrema로 판정하는 경우를 그림 11에서 보였다. 또한 그림 11은 분산값에 따라 스케일 공간 추적을 할때 표면 특징의 존재 유무와 정확한 위치 결정에 사용할 수 있는 정보를 보였다. 그림 1의 표면에서 국부 영역내 최대 곡률값을 갖는 Extrema와 영교차를 4개 방향에서 조사 한 결과가 그림 4이고 조사 방향에 수직으로 Extrema와 영교차가 검출되므로 본 논문에서 사용한 방향별 곡률 방정식은 법선 곡률의 원리에 상응함을 알 수 있었다. 다음은 표면의 경계를 분류하는 절차로 방향별의 특징을 병합하고 세선화한 영상에서 깊이가 급격히 변

하는 표면인 Jump경계와 표면 법선의 진행 방향이 다른 표면인 Crease경계를 그림 6에서 나타내었고, 그림 7은 표면의 경계를 병합하여 폐곡선으로 연결한 것으로 그림 1(a)의 합성 거리 영상은 7개의 폐곡선으로 분할 처리된 조각을 보였다. 표면 분할 알고리즘의 타당성 여부를 판정하기 위해 본 논문에서는 표면을 근사화하였다.

평면과 타원 곡면 방정식으로 근사화한 그림 10(b)의 영상과 그림 1(a)의 원 영상을 3차원 그래픽으로 비교하면 근사화로 재구성한 영상은 원래의 거리 영상과 동일한 표면 형태를 갖고 또한 같은 경계선 위치를 갖임을 확인하였다. 본 논문에서 사용한 분할 과정의 타당성을 조사하기 위해 그림12(a)의 2 cylinder와 그림 13(a)의 Cup등의 실제 거리 영상을 표면 분할하여 표면의 경계선에 상응하는 표면 조각을 그림 12(f)와 그림 13(f)에서 보였다. 그리고 실제 거리 영상은 배경과 인접한 표면에서 양자화 오차에 기인한 표면 특징이 존재하므로 표면 특징을 공간결합과 연결하여 표면경계 추출시 필요한 공간 마스크 크기 결정에 많은 시행착오를 하였다.

본 논문에서 표면에 따른 근사화 기법으로 제시한 평면과 타원 곡면, 2차 곡면의 근사화 방식을 공간 해상도가 128×128이고 depth level이 256인 2 cylinder 와 Cup 등의 실제 거리 영상에 적용하였다. 근사화 오차의 임계치(실험에서 0.1)에 의해 2 cylinder의 상단 표면은 식(21)의 평면 방정식으로, 그 외 2 cylinder 의 표면과 Cup의 표면은 식(16)의 2차

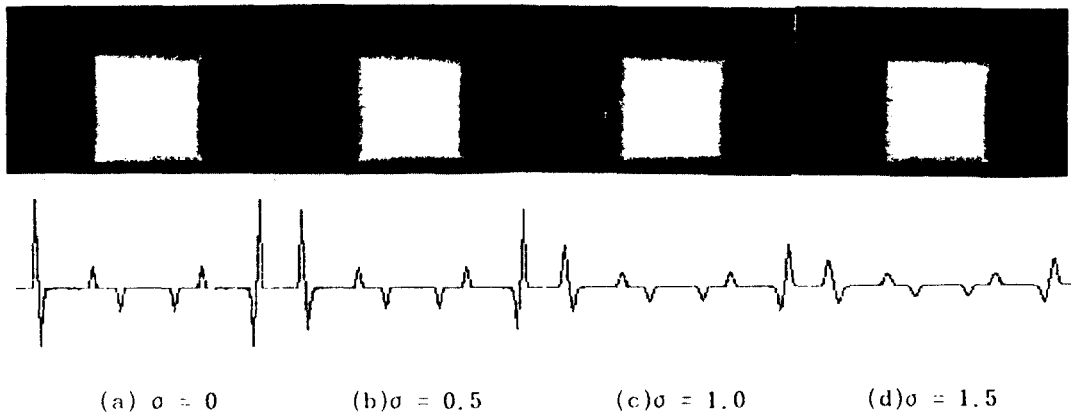
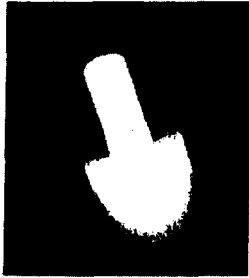


그림 11. Extrema와 영교차의 위치와 존재여부를 판정하는 패턴
Fig 11. Pattern of detecting locations and beings for Extremas and zero-crossings.

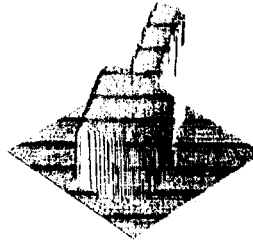
곡면 방정식에 의해서 그림 12(g)와 13(g)같이 원 영상에 근접한 표면을 재구성할 수 있었다. 또한 표면 근사화의 결과를 객관적 평가 기준인 평균 자승 오

차(mean square error)의 식(23)으로 조사하였다.

$$MSE = \frac{1}{128^2} \sum_{x=1}^{128} \sum_{y=1}^{128} ((f(x,y) - g(x,y))^2) \quad (23)$$



(a) 2 cylinder



(b) 3-D plot



(c) Jump 경계



(d) Crease 경계



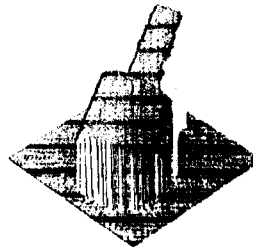
(e) 병합



(f) 표면 조각



(g) 복원 영상

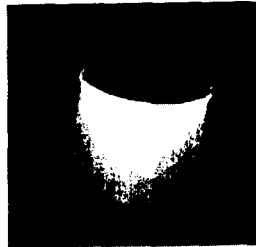


(h) 3-D plot

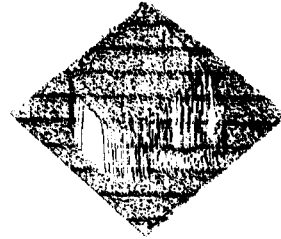
그림 12 2 cylinder영상의 분할
Fig 12. Segmentation of 2 cylinder image

여기서 xy 는 영상 좌표치이고 $f(x,y)$ 와 $g(x,y)$ 는 각각 원 영상의 깊이값과 재구성한 영상의 깊이값이다.

2차 곡면 방정식으로 재구성한 그림 12(g)와 그림 13(g)의 개개의 원 영상에 대한 화소당 평균 자승 오차는 3.58과 8.14정도인 반면에 타원 곡면 방정식으



(a) Cup



(b) 3-D plot



(c) Jump 경계



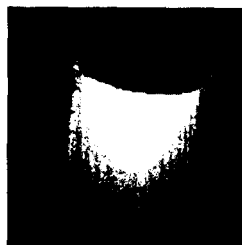
(d) Crease 경계



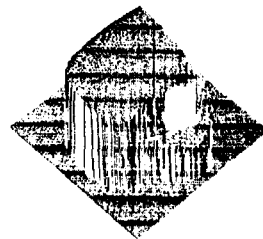
(e) 병합



(f) 표면 조각



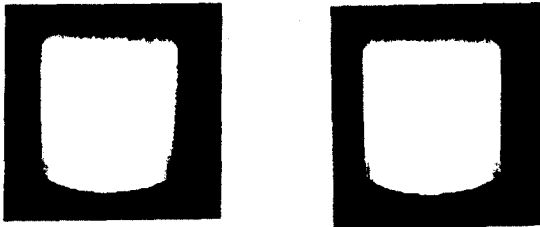
(g) 복원 영상



(h) 3-D plot

그림 13 Cup 영상의 분할
Fig 13. Segmentation of Cup image

로 2 cylinder와 Cup을 근사화한 영상의 MSE는 각각 14.63과 14.53으로 조사되었다. 반면에 1 Cylinder와 같이 완전한 원통 곡면을 갖는 그림 14(a)의 실제 거리 영상에 표면 근사화를 적용하면 오차의 임계치에 의해 그림 14(b)의 상단 표면은 평면으로 원통면은 타원 곡면에 의해 적절한 근사화가 되었다.



(a) 원 영상

(b) 근사화 영상

그림 14. 실린더 영상의 타원 곡면 근사화
Fig 14. Fitting of elliptic surface using 1 cylinder.

이를 원 영상에 2차 곡면 근사화로 재구성한 영상과 MSE로 각각을 비교하면 각각 1.86과 2.38로 조사되었다. 그러므로 평면에 2차 곡면 방정식으로 근사화하면 쌍곡면이 발생하므로 근사화 오차에 임계치를 설정하고 오차가 임계치 이하인 경우는 평면 방정식을 먼저 근사화에 적용한다. 오차가 임계치 이상이면 타원 곡면과 2차 곡면 방정식을 차례대로 곡면 근사화에 적용하였다. 표 2에서는 다양한 표면 형태의 영상에 이를 2차 곡면 방정식으로 근사화하여 재구성한 영상과의 평균 자승 오차를 구하여 본 논문의 표면 근사화에 대해 신뢰성을 부여하고 또한 표면의 여러가지 형태에 따른 표면 계수를 보였다.

그림 15는 한번의 가우시안 필터링과 식(2)의 주곡률 방정식에 의해 표면 특징을 추출하고 표면 특징을 공간 결합과 연결한 후, 표면경계를 분류하고 표면을 분할한 결과로서 표면 분할 과정을 수행하는 전체 소요시간은 그림 12(f)와, 그림 13(f)의 표면 조각 추출 시간보다 적은 반면에 배경에 인접한 표면에서 경계선의 왜곡 정도가 심하여 거리 영상의 정확한 표면 경계선 위치 검출에 불리함을 알 수가 있었다. 또한 그림 16은 실제 거리 영상에서 가우스 곡률과 평균

표2 합성영상에서 표면계수의 분류
Table 2. Classification of surface coefficient.

+/- : Sign of surface coefficient,
cylinder(D, E, F) > sphere(D, E, F) x 10

Class	Coef. M.S.E	Surface Coefficient									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Cylinder	0.972	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+
Ellipsoid	0.708	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
Hyperboloid 1	1.011	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+
Hyperboloid 2	0.735	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+
Elliptic Paraboloid	0.670	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+
Hyperboloid paraboloid	0.716	-	+	-	+	+	+	+	-	-	+
Quadric cone	0.690	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+
Sphere	0.756	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+



(a) 2 cylinder



(b) Cup

그림 15. 주곡률에 의한 표면 분할($\sigma=0.5$)
Fig 15. Surface segmetation by using principal curvature($\sigma=0.5$)



① H=0, K=0 : Flat surface
② H<0, K=0 : Ridge surface
(a) 2 cylinder ($\sigma = 1.5$)



① H>0, K=0 : Valley surface
② H<0, K=0 : Ridge surface
(b) Cup ($\sigma = 2.5$)

그림 16. 표면형태의 분류
Fig 16. Classification of surface shape

곡률을 이용하여 표면 조각을 flat, ridge, valley 등의 표면 형태로 분류한 결과이고 거리 영상을 분할한 표면 조각과 표면 근사화 과정에서 추출한 표면 계수와 함께 정합 단계에서 유용하게 사용할 수 있는 표면 파라메타로 보였다.

V. 결 론

표면에서 곡률 계산으로 추출한 표면 특징인 Extrema와 영교차는 필터링과 미분에 의해 고유의 표면 특징에 대해 위치상의 편차를 가지므로 스케일 공간 추적 기법을 곡률 계산으로 추출한 표면 특징에 적용하여 표면 특징의 위치 편차를 없게 하였다. 이러한 정확한 표면 특징으로 표면 경계를 검출하고 표면 조각을 찾았으므로 표면 분할에 대한 신뢰성을 부여할 수 있었다.

표면 방정식을 Scatter 행렬의 고유 벡터 해석으로 근사화에 적용하여 표면을 재구성하였고 평면에 곡면 방정식으로 근사화시 발생하는 비적합 근사화를 배제하기 위해 근사화 오차에 임계치를 설정하여 임계치에 따라 평면과 타원 곡면 그리고 2차 곡면 근사화를 차례대로 적용하여 표면 형태에 따른 적절한 표면 근사화 방식을 제시하였다. 차후로 다양한 실제 거리 영상에서 다각도 관점으로 분할하고 인식하는 방법이 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. D.H Ballard and C.M.Brown, Computer Vision, Prentice-Hall, pp.235-237, 1982
2. Rafael C.Gonzales and Richard E. Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley, pp.491-493, 1992.
3. C.H.Chen and A.C.Kak, "3-D Poly : A Robot Vision System for Recognizing Objects in Occluded Enviroment", Technical Report TR-EE 88-48, Robot Vision Lab, School of Electrical Engineering Purdue University, pp.22-28, 1988.
4. M.M.Lipschutz, Differential Geometry, McGraw Hill, pp.164-185, 1969.
5. P. J. Besl and R.C.Jain, "Three-dimensional Object Recognition" ACM Computing Surveys, vol.17, no.1, pp.75-145, March, 1985.
6. P.J.Besl and R.C.Jain, "Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Image", IEEE Trans. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.33, pp.33-80, June, 1986.
7. T.J.Fan, G.Medioni, and R.Nevatia, "Segmented Description of 3-D Surfaces" IEEE International Journal of Robotics Automation, pp.527-538, December, 1987.
8. 최환인, 정광웅, 김두영, "영역 라벨링에 의한 경계선 세그먼트의 데이터 구조 추출" 한국통신학회, 제 17권, 제 1호, pp.80-88, 1992.
9. W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, pp.360-380, 1988.
10. S.A.Liebwitz and D.P.Casasent "Classification of range surface type using optically generated derivative estimates", Intelligent Robots and Computer Vision VIII: Algorithms and Techniques, SPIE Proco, 1192, pp.239-259, 1990
11. I.D.Faux and M.J.Pratt, Computational Geometry for Design and Manufacture, John Wiley and Sons, pp.107-113, 1980.
12. 김근중, 김순백, 김명기, 김두영, "Range data의 표면 분할과 표면 파라메타 추출", 제 6회 영상처리 및 이해에 관한 워크샵 발표 논문집, 경주, pp.87-93, 1994.1월.
13. T.J.Fan "Describing and Recognizing 3-D Objects using Surface Properties", Ph.D thesis, Univ. of Southern California Los Angeles, California, pp.147-148, 1988.
14. Farshid Arman, J.K.Aggarwal, "Model-Based Object Recognition in Dense-Range Images--A Review", ACM Computing Surveys, vol.25, No.1, pp.5-43, March 1993.
15. Richard O.Duda and Peter E.Hart, Pattern

Classification and Scene Analysis, John Wily & Sons, Inc., New York, pp.114-118, 1973.

16. W.Eric L.Grimson, Object Recognition by Computer: The Role of Geometric Constraints, The MIT Press, pp.139-144, 1990.



金根中(Keun Chung Kim)정희원
 1984년 2월 : 동아대학교 전자공학과(공학사)
 1986년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과(박사과정수료)

1991년 3월~현재 : 양산전문대학 전자계산과 조교수
 *주관심분야 : 영상처리및 컴퓨터비전



金淳伯(Soon Back Kim)정희원
 1990년 2월 : 동아대학교 전자공학과(공학사)
 1992년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1995년 3월 : 동아대학교 대학원 전자공학과(박사과정)

*주관심분야 : 영상처리및 컴퓨터비전



金明起(Myong Ki Kim)정희원
 1951년 8월 : 해군사관학교(이학사)
 1958년 6월 : 미국해군공과대학 전자공학과(공학사)
 1966년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1976년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1977년 3월~현재 : 동아대학교 전자공학과 교수
 *주관심분야 : 디지털신호처리



金斗泳(Doo Young Kim)정희원
 1972년 2월 : 부산대학교 전자공학과(공학사)
 1975년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1983년 9월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(박사수료)

1977년 3월~현재 : 동아대학교 전자공학과 교수
 *주관심분야 : 디지털신호처리, 영상처리및 컴퓨터비전