

## 경면 다면체의 모서리 추출

### Extracting Roof Edges of Specular Polyhedra

°박원식\*, 조형석\*

\* 한국과학기술원 기계공학과(Tel : +82-42-869-3253; Fax : +82-42-869-3210; E-mail : pws@lca.kaist.ac.kr)

**Abstracts** This paper introduces a new vision technique for extracting roof edges of polyhedra having specularly reflecting surfaces. There have been many previous works on object recognition using edge information. But they can not be applied to specular objects since it is hard to acquire reliable camera images of specular objects. If there is a method which can extract the edges of specular objects, it is possible to apply edge-based recognition algorithms to specular objects. To acquire the reliable edge images of specular objects, scanned double pass retroreflection method is proposed, whose main physical characteristic is curvature-sensitive. This utility of the physical characteristic is motivated by the idea that roof edges can be characterized as local surfaces of high curvature. In this paper, the optical characteristics of double pass retroreflection are discussed and a series of simulation studies are performed to verify and analyze the sensor characteristics. The results from a series of simulations show the effectiveness of the proposed method.

**Keywords** Specular Object, Retroreflection, Double Pass Retroreflection, Edge Extraction

#### 1. 서론

##### 1.1 연구동기

최근들어 시각인식(vision)을 이용한 공정자동화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 자동화된 생산공정에서 유리, 금속, 플라스틱 등의 재질로 된 경면물체(specular object)가 빈번히 취급되고 있으나, 이에 적용될 수 있는 시각인식방법에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

##### 1.2 관련 연구 사례

경면물체는 shape from shading [1], photometric stereo [2], stereo matching [3] 등과 같은 기존의 3 차원 시각인식방법으로 인식되기 어렵다. 이는 이러한 방법들이 물체표면을 완전난반사(lambertian)표면으로 가정하여 세워진 방법들이기 때문이다. 이러한 방법들을 통해 경면물체를 인식하고자 하면 그림 1에 보이는 바와 같은 경면반사가 심각한 노이즈(noise)로 작용하게 된다.

이러한 난점을 극복하기 위한 여러 연구사례가 있다. Healy와 Binford [4]는 단순화된 Torrance-Sparrow 모델을 통해 경면물체의 곡률(curvature)을 측정하였고, Solomon과 Ikeuchi [5]는 4개 점광원을 사용한 photometric stereo를 제안하였다. 이러한 방법들은 표면의 반사특성이 사전에 주어져야 하며, 전체 표면에 걸쳐 반사특성이 균일해야하는 제약을 가지고 있다.

그외에 경면반사를 적극적으로 활용하여 경면물체를 인식하는 방법들도 발표된바 있다. 이들은 대부분 특별히 고안된 조명장치나 센서시스템을 사용한다. Nayar 등 [6]은 127개의 점광원이 분포된 반구형 조명장치를 이용하여 이들을 순차적으로 점멸함으로써 경면물체의 형상을 측정하였고, Kim과 Cho [7]는 링(ring)형상의 조명장치를 이용하여 등경사면을 추출하여 경면물체를 인식하였다. 그리고 Ryu과 Cho [8]는 레이저 광원과 포물면경, 센서배열을 이용하여 경면물체의 3 차원 형상을 측정하였다. 본 논문에서 특기될만한 것으로서 Reynolds 등 [10]은 이중경로 재귀반사(double pass retroreflection)를 제안하여 경면표면의 굴곡을 검사하는 장치를 개발하였다.

##### 1.3 연구내용

본 논문에서는 경면을 갖는 다면체의 모서리를 추출하기 위한 시각인식방법을 제안한다. 다면체의 모서리는 두 평면이 교차하여 생기는 부분으로서 지붕 모양을 갖는다. 대부분의 시각인식 작업에서 경계선(edge)은 소프트웨어로 구현된 필터를 사용한다. 그러나 본 논문에서는 광학적인 방법으로 구현된 필터, 즉 광학 시스템을 제안하고자 한다. 이 광학 시스템은 Reynolds 등 [10]이 제안한 이중경로 재귀반사(double pass retroreflection; DPR)를 개선하여 구성되었는데, 물체의 표면 위를 스캐닝하게 되므로, 본 논문에서 스캐닝되는 이중경로 재귀반사(scanned double pass retroreflection; SDPR)이라 한다.

본 논문에서 다루어질 내용은 이중경로 재귀반사의 광로형성원리와 그 광로를 광학시스템으로 구현한 시스템구성에 대해 먼저 설명한다. 그리고 이중경로 재귀반사를 이용한 곡률감지 방법에 대해 설명하고 모의실험으로 시스템의 곡률에 대한 민감도를 해석한다. 마지막으로 제안된 방법을 검증하기 위해 수행된 모의실험에 대해 기술하고 그 결과에 대해 토의한다. 모의실험결과를 통해 제안된 방법은 경면 다면체의 모서리를 추출하기 위한 효과적인 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

#### 2. 이중경로 재귀반사 스캐닝

##### 2.1 재귀반사

본 논문에서 사용되는 DPR과 SDPR 광로는 재귀반사(retroreflection)라는 인위적인 반사형태를 사용한다. 재귀반사는 물체표면에 빛이 입사했을 때, 반사되는 빛이 입사해온 방향을 거슬러 반사되는 현상을 말한다. 대표적인 재귀반사체로는 직각을 이루는 거울 3개가 이루는 구석진 면으로 만들어진 것과 미세한 유리구슬들의 밀면에 경면처리하여 고르게 도포하여 만들어진 것이 있다. 본 논문에서 사용되는 후자의 것으로서 그 반사형태는 그림 2에 보이는 바와 같다. 그림에서 일반적인 반사체가 보이는 경면반사(specular reflection)성분과 난반사(diffuse) 성분 외에 재귀반사(retroreflection)성분이 나타나고 있다.

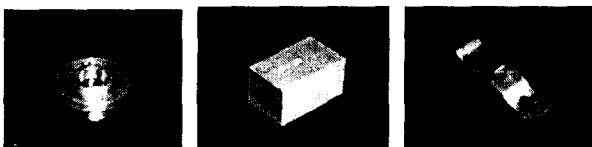


그림 1 일반적인 경면물체의 영상  
Fig. 1 Typical camera images of specular objects

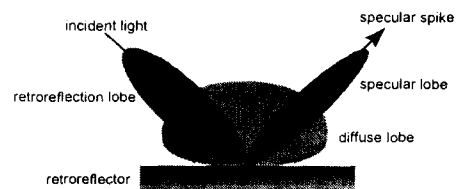


그림 2 유리구슬로 제작된 재귀반사체의 반사특성  
Fig. 2 Light reflection of glass bead type retroreflector

## 2.2 제안된 광로의 원리

이중경로 재귀반사를 구현하기 위해서는 그림 3에 보이는 바와 같이, 카메라와 레이저 광원을 가까이 평행하게 두고서 나란히 경면물체를 향하게 하고 반대편에 재귀반사체를 두면 카메라 영상에는 어두운 바탕에 밝은 점이 나타난다. 본 논문에서 이 밝은 점을 이중경로 재귀반사의 특징점이라 하며 간단히 특징점이라고도 한다. 이 특징점은 대상물체를 거울로 삼아 재귀반사체 위의 점 B를 보는 것과 같은 원리로 카메라에 영상화된 것이다. 이때 상을 맺도록 하는 반사광은 점 B와 카메라의 핀홀의 위치가 정반사조건을 만족하도록 대상물체 위의 점 C를 경유하여 반사되는 것이다. 이러한 광선추적(ray tracing)에 필요한 수식이 다음에 설명된다.

입의 점 A에 레이저광선을 입사시키면 그 반사광의 진행 방향은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{V}_{ab} = \mathbf{M}_a \cdot \vec{V}_{la} \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 1 - 2n_{ax}^2 & -2n_{ay}n_{ax} & -2n_{az}n_{ax} \\ -2n_{ay}n_{ax} & 1 - 2n_{ay}^2 & -2n_{az}n_{ay} \\ -2n_{az}n_{ax} & -2n_{az}n_{ay} & 1 - 2n_{az}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고,  $\vec{n}_a = (n_{ax}, n_{ay}, n_{az})$ 는 점 A의 표면법선벡터,  $\vec{V}_{la}$ 와  $\vec{V}_{ab} = (V_{abx}, V_{aby}, V_{abz})$ 는 각각 레이저 광선과 반사광 AB의 방향벡터이다. 그리고 반사파 AB는 다음과 같이 직선의 방정식으로 표시된다.

$$\frac{x_a - x_b}{V_{abx}} = \frac{y_a - y_b}{V_{aby}} = \frac{z_a - z_b}{V_{abz}} \quad (3)$$

여기서  $(x_b, y_b, z_b)$ 는 점 B의 좌표이다. 점 B는 광선 AB가 재귀반사체와 만나는 점이므로 다음과 같이

$$\Psi(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

로 표시되는 재귀반사체와의 교점으로 구하여질 수 있다.

점 B는 재귀반사체 위의 점이므로 입사광선 AB의 반대방향으로 재귀반사성분이 강하게 나타난다. 그림에 나타난 재귀반사분포에서 어떠한 점 C에서 정반사되어 카메라에 입사되는 광선이 이중경로 재귀반사의 특징점이 된다. 이중경로 재귀반사에서의 광선추적(ray tracing)을 통한 광로모델이 [11]과 [12]에 상세히 기술되어 있다.

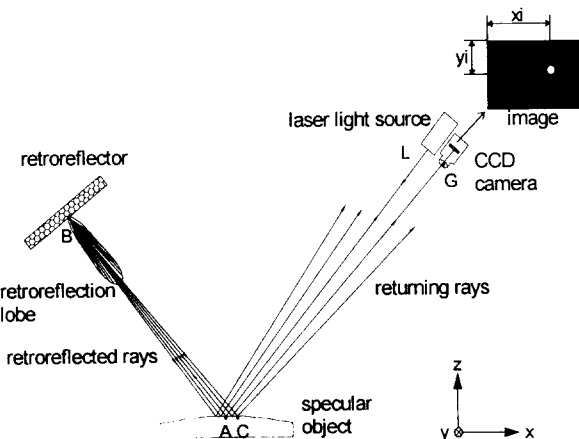


그림 3 이중경로 재귀반사의 원리  
Fig. 3 Fundamental principle of DPR

## 2.3 시스템 구성

그림 4는 이중경로 재귀반사를 이용해 경면물체를 인식하기 위해 구성된 장치를 나타내고 있다. 재귀반사체는 반구형으로 하여 중앙부에 위치한 대상물체를 둘러싸고 있으며, 그 천정의 작은 통로를 통하여 카메라의 시야(field of view)와 레이저 광선, 회귀광선(returning ray)가 통과하게 되어있다. 그리고 이들은 갈바노미터 거울로써 대상물체의 표면 위를 스캐닝(scanning)하게 된다. 빔 스플리터(beam splitter)는 카메라와 레이저의 광축을 작게 하기 위해 사용된다. 그림 4에서, 갈바노미터 거울이 움직임에 따라 변하는 광로를 표시하였으나, 각각의 광로는 그림 3의 것과 같은 이중경로 재귀반사 광로이다. 그림에서는 1개의 갈바노미터 거울만이 나타내어져 있으나, 실제로는 2개의 거울이 서로 직교된 축을 중심으로 회전하여 대상물체의 표면 위를 스캐닝하게 된다.

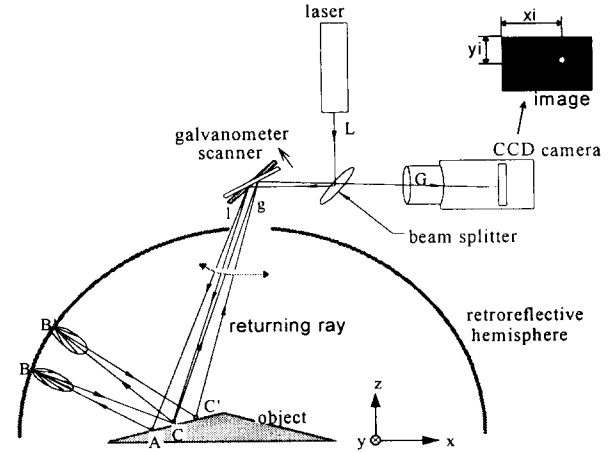


그림 4 SDPR의 개략적인 시스템 구성  
Fig. 4 Schematic configuration of the SDPR system

## 3. 이중경로 재귀반사를 이용한 모서리 추출

### 3.1 SDPR 시스템을 이용한 곡률 감지

본 논문에서 경면다면체의 모서리를 추출하기 위해 다면체 표면의 곡률을 측정하는 것을 목적으로 한다. 본 장에서는 그림 4에 보이는 장치가 곡률감지로서 기능을 가지는 것을 보기 위해 모의실험으로써 검증하고자 한다.

이론적으로는 다면체는 평면으로 이루어진 물체이며 모서리는 평면 간의 교차된 영역으로서 곡률은 무한히 크다. 그러나 실제적으로 무한히 큰 곡률은 존재하지 않으며, 미시적(microscopic view)으로 관찰하면 모든 모서리는 유한한 크기의 곡률을 가질 것이다. 그리고 다면체의 표면에서 모서리의 부분 보다는 평면으로 된 부분이 지배적으로 큰 비중을 차지할 것이다.

그림 5는 모의실험조건을 나타내고 있다. 갈바노미터와 빔 스플리터는 광로형성에 영향을 주지 않으므로 그림에서 생략되었다. 모의실험에서 사용된 반사체의 직경은 300mm 이고 카메라 광축과 레이저 빔의 간격은 5mm 이며, 이것들은 대상물체가 놓인 정반에서 약 450mm 떨어져 있다.

이와 같은 조건에서 측정되는 위치의 곡률반경과 위치, 경사를 변화시켜가며 카메라 영상에 나타난 특징점의 화소좌표를 관찰한다. 이때 그림에서 보이는 바와 같이 레이저를 수직으로 조사하여 물체 표면에서 입사하는 위치로써 일관되게 관찰한다.

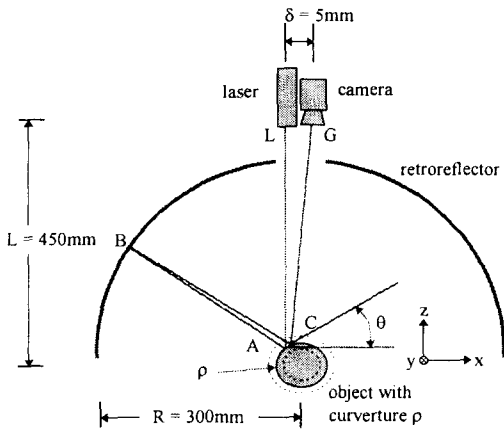


그림 5 SDPR의 곡률감도 해석을 위한 모의실험  
Fig. 5 Simulation study on the curvature-sensitive characteristic of SDPR

이와 같은 구성에서, 물체표면의 곡률변화에 따른 특징점의 위치를 관찰해보면 그림 6에 표현된 바와 같이 곡률의 변화에 따라 그 위치가 변한다. 그림 6에서는 곡률반경이 무한대인 평면에 대한 화소좌표와 곡률반경이 매우 작아져서 모서리와 같이 각진 표면에 대한 특징점이 표현되어 있다. 본 논문에서는 대상물체 표면의 곡률과 특징점의 화소좌표의 위치 사이에 높은 상관관계가 있음을 관찰하고 이에 대한 검증을 이후의 모의 실험으로써 보이고자 한다.

따라서, 표면의 곡률을 측정하는 양으로써 다음과 같이 특징점의 이동거리를 사용한다.

$$I(x, y) = \sqrt{(x_i - x_\infty)^2 + (y_i - y_\infty)^2} \quad (5)$$

여기서,  $I(x, y)$ 는 평면인 경우와 임의의 곡면 간의 특징점의 화소좌표의 거리이다. 그리고  $(x_\infty, y_\infty)$ 는 평면인 경우의 특징점 위치,  $(x, y)$ 는 측정하고자 하는 곡면 또는 각진 표면의 특징점 위치이다.

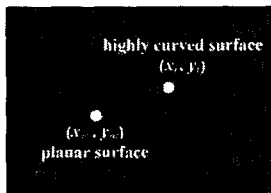


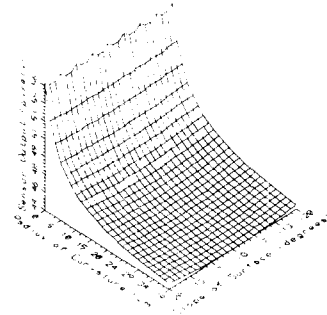
그림 6 모서리 부분에서 특징점 화소좌표의 급격한 변화  
Fig. 6 Abrupt change in the pixel coordinates of characteristic spot at edge point

그림 7(a)는 물체표면의 경사와 곡률반경에 대하여 특징점의 화소좌표의 이동거리를 나타내고 있다. 경사는  $-20^\circ \sim 20^\circ$  사이에서 변화되었으며, 곡률반경은 0 cm ~ 40 cm 사이에서 변화되었다. 그림에서 보이는 바와 같이 특징점의 화소좌표는 물체의 곡률반경에 따라 크게 변화하지만 표면의 경사에 대해서는 둔감한 현상이 나타난다.

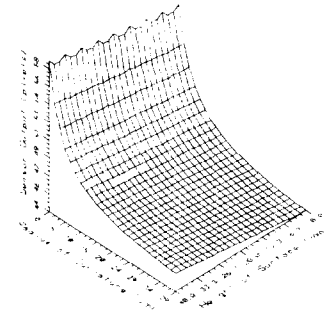
그리고 곡률반경과 물체의 높이에 대한 특징점의 화소좌표 이동량은 그림 7(b)에 나타나 있다. 곡률반경은 0 cm ~ 40 cm, 높이도 0 cm ~ 40 cm 사이에서 변화되었다. 이 경우에도 곡률반경이 특징점의 화소좌표 변화에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타난다.

그림 7(c)는 물체의 곡률을  $10^{-7} \text{ mm}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$  사이에서 변화시켜 가며 특징점 화소좌표의 이동량을 나타낸 것이다. 곡률이  $10^{-7} \text{ mm}^{-1}$  이면 곡률반경은  $10^7 \text{ mm}$  가 되므로 거의 평면에 가까운 표면이다. 그리고 곡률의 상한치인  $10^{-1} \text{ mm}^{-1}$  인 경우는 곡률반경이 10 mm 인 표면이다. 이러한 곡률범위에서 특징점 화소좌표의 이동량은  $10^2 \text{ mm} \sim 10^7 \text{ mm}$  범위의 곡률반경에 대해

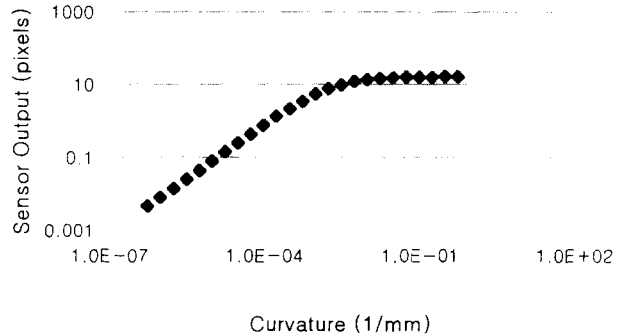
서는 어느 정도의 분해성능을 보이나, 더 작은 곡률반경에 대해서는 감도가 떨어짐을 볼 수 있다. 그러나 본 논문의 목적인 평면과 모서리와 구분에는 충분한 성능을 가진다고 볼 수 있다. 그리고 이러한 곡률감지 성능은 시스템의 구성에 따라 사용 영역을 변화시키는 것이 가능하다.



(a)



(b)



(c)

그림 7 이중경로 재귀반사의 곡률감도 : (a) 표면의 곡률반경과 경사각에 대한 특징점 화소좌표; (b) 표면의 곡률반경과 높이에 대한 특징점 화소좌표; (c) 곡률에 대한 특징점 화소좌표의 이동 거리

Fig. 7 Curvature-sensitive characteristics of double pass retroreflection : (a) Plot of pixel coordinates of characteristic spot w.r.t the radius of curvature and the slope of surface; (b) Plot of pixel coordinates of characteristic spot w.r.t the radius of curvature and the height of surface; (c) Plot of pixel coordinates of characteristic spot w.r.t the curvature of surface

### 3.2 모의실험

본 논문에서 제안된 SDPR을 이용하여 경면 다면체의 모서리를 추출하는 것이 가능함을 모의실험으로써 검증한다. 일반적인 다면체는 그림 8(a), (b)에 보이는 바와 같이 지붕 형상과 같은 모서리로 이루어져 있다. 따라서 이러한 형상에 대한 모의실험을 수행함으로써 일반적인 다면체에 대한 적용 가능성을 볼 수 있다.

앞에서 곡률을 측정하기 위한 양으로 정의된 식 (5)를 사용

하기 위해서는 평면에 대한 특징점의 화소좌표  $(x_x, y_x)$ 를 미리 구해야 한다. 그러나 경면 다면체의 표면을 스캐닝하며 특징점의 화소좌표를 구하여 보면, 대부분의 경우에는 일정한 위치에 고정되어 있고 모서리 부분에서만 다른 위치로 이동하게 된다. 이는 다면체 표면의 대부분은 평면으로 이루어져 있고 모서리에 해당하는 부분의 비중은 평면에 비해 현저히 작기 때문이다. 따라서  $(x_x, y_x)$ 를 구하기 위해 별도의 작업을 수행하지 않고 다음과 같이  $(\mu_x, \mu_x)^T$ 로 대체할 수 있다.

$$(x_x, y_x)^T \cong (\mu_x, \mu_x)^T \quad (6)$$

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

$$\mu_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (8)$$

따라서, 화소좌표의 이동량도 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(x_i, y_i) = \sqrt{(x_i - \mu_x)^2 + (y_i - \mu_y)^2} \quad (9)$$

이와 같은 방법을 사용하여 수행하는 모의실험의 구체적인 절차는 다음과 같다.

1. 그림 4에 보이는 바와 같이 SDPR 시스템의 반사체 중심부에 대상물체를 두고 물체 위를 스캐닝하며 특징점의 화소좌표  $(x_i, y_i)$ 를 구한다.
2. 식 (7), (8)을 이용하여 평면에 대한 특징점의 화소좌표  $(\mu_x, \mu_x)$ 를 구한다.
3. 식 (9)를 이용하여 물체표면 전체에 대한 곡률분포를 구한다.
4. 곡률분포를 적당한 비례로 영상화한다.

그림 8(c), (d)는 각 대상물체에 대하여 위에서 설명된 1, 2, 3번 작업을 수행한 결과이며, 8(e), (f)는 4번 작업까지 수행한 결과이다.

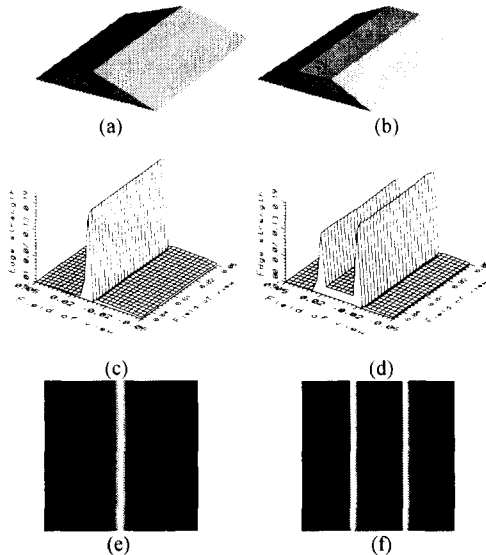


그림 8 경면 다면체의 모서리 추출 : (a) 물체 1의 형상; (b) 물체 2의 형상; (c) 물체 1의 곡률분포; (d) 물체 2의 곡률분포; (e) 물체 1에 대한 모서리 추출 결과; (f) 물체 2에 대한 모서리 추출 결과

Fig. 8 Edge detection of specular polyhedra : (a) shape of object 1; (b) shape of object 2; (c) edge map of object 1; (d) edge map of object 2; (e) reconstructed edge image of object 1; (f) reconstructed edge image of object 2

#### 4. 결론

본 논문에서는 경면 다면체의 모서리를 추출할 수 있는 시각인식방법을 제안하였고, 이를 모의실험으로 검증하였다. 다면체의 모서리는 높은 곡률을 갖는 부분으로 보아 SDPR 시스템의 곡률감지특성을 이용하여 모서리를 추출할 수 있었다.

경면물체는 기존의 일반적인 조명하에서 사용되는 시각인식 알고리즘으로는 경계선, 모서리 등을 안정적으로 추출하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 제안된 모서리 추출방법은 이러한 경면물체를 경계선이나 모서리 등의 정보를 이용하여 인식하는데에 큰 효과를 줄 수 있다.

제안된 방법은 영상에 나타난 특징점의 급작스런 움직임을 이용하기 때문에 정교한 보정작업을 요구하지 않는 장점을 갖는다. 그러나 이중경로 재귀반사의 특성상 대상물체의 표면의 조도가 높아야 한다는 제한점도 가진다.

모의실험을 통한 검증을 통해 제안된 방법은 경면 다면체의 모서리를 추출하는데에 효과적임을 알 수 있었으나, 이에 대한 실험적인 검증이 향후 진행될 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] A. P. Pentland, "Local shading analysis," IEEE Trans. on PAMI, vol. 6, no. 2, pp.172-177., 1984.
- [2] R. J. Woodham, "Photometric stereo : A reflectance map technique for determining surface orientation from a single view," Image Understanding Systems and Industrial Applications, Proc. SPIE 22<sup>nd</sup> Annual Technical Symp., San Diego, California, Aug. 1978, vol. 155, pp. 136-143.
- [3] D. Marr and T. Poggio, "Cooperative computation of stereo disparity," Science, vol. 194, no. 4262, pp. 238-287, October., 1976.
- [4] G. Healy and T. O. Binford, "Local shape from specularity," CVGIP, vol. 42, pp. 62-86, 1988.
- [5] F. Solomon and K. Ikeuchi, "Extracting the shape and roughness of specular lobe objects using 4 light photometric stereo," IEEE Trans. on PAMI, vol. 18, no. 4, pp. 449-454, 1996.
- [6] S. K. Nayar, A. C. Sanderson, L. E. Weiss, and D. D. Simon, "Specular surface inspection using structured highlight and gaussian images," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 6, no. 2, pp. 208-218., 1990.
- [7] J. H. Kim and H. S. Cho, "Neural network based inspection of solder joints using a circular illumination," Image and Vision Computing, vol. 13, no. 6, pp. 479-490, 1995.
- [8] Y. K. Ryu, H. S. Cho, "New optical measuring system for solder joint inspection," Optics and Lasers in Engineering, vol. 26, no. 6, pp. 487-514, 1997.
- [9] Y. K. Ryu and H. S. Cho, "New optical sensing system for obtaining the three-dimensional shape of specular objects," Optical Engineering, vol. 35, no. 5, pp. 1483-1495, 1996.
- [10] R. L. Reynolds, F. Karpalar, D. A. Clarke, and O. L. Hargeniers, "Theory and applications of a surface inspection technique using double-pass retroreflection," Optical Engineering, vol. 32, no. 9, pp. 2122-2129, 1993.
- [11] 박원식, 유영기, 조형석, "재귀반사 특성을 이용한 경면물체의 3차원 형상 측정," 한국정밀공학회지, vol. 13, no. 11, pp. 64-72, 1996.
- [12] W. S. Park and H. S. Cho, "Measurement of the 3-dimensional shapes of specular objects using recursive triangulation," in Proc. Pacific Conf. on Manufacturing, Seoul Korea, Oct. 1996, pp. 389-394.
- [13] G. F. Marshall, Laser beam scanning, Marcel Dekker Inc., 1985.
- [14] B. K. P. Horn, Robot vision, The MIT Press., 1986.
- [15] R. Kingslake, Applied optics and optical engineering, Academic Press., 1965.