

디지털 영상에서 부화소 정밀도의 실제 경계 추정

김태현*, 문영식*, 한창수**

Estimation of Real Boundary with Subpixel Accuracy in Digital Imagery

Tae Hyeon Kim*, Young Shik Moon*, Chang Soo Han**

ABSTRACT

In this paper, an efficient algorithm for estimating real edge locations to subpixel values is described. Digital images are acquired by projection into image plane and sampling process. However, most of real edge locations are lost in this process, which causes low measurement accuracy. For accurate measurement, we propose an algorithm which estimates the real boundary between two adjacent pixels in digital imagery, with subpixel accuracy. We first define 1D edge operator based on the moment invariant. To extend it to 2D data, the edge orientation of each pixel is estimated by the LSE(Least Squares Error) line/circle fitting of a set of pixels around edge boundary. Then, using the pixels along the line perpendicular to the estimated edge orientation, the real boundary is calculated with subpixel accuracy. Experimental results using real images show that the proposed method is robust in local noise, while maintaining low measurement error.

Key Words : Real boundary(실제 경계), Subpixel accuracy(부화소 정밀도), edge operator(경계 연산자), moment invariant(모멘트 불변)

1. 서론

최근 제조공정에서 주로 인력에만 의존해야 했던 제품의 양·불량체크나 최종 목시검사 등의 공정을 자동화하고 있다. 고속으로 이송되고 있는 제품의 제조 상태를 명확하게 판정하기 위한 비접촉식 측정기술로서 인공 시각 기술인 머신 비전 기술을 이용한 외관검사, 치수검사 등이 많이 이용되고 있으나, 제품에서 요구되는 높은 정밀도는 실 측정을 어렵게 할 뿐만 아니라 고가의 장비를 요구하고 있다. 즉, 높은 정밀도를 만족시키기 위해 고해상도의 카메라를 사용하게 되는데 이는 결국 샘플링 비율을 높이는 것이 된다. 이러한 문제

점을 해결하기 위해 다양한 시각 검사 장치가 연구되고 있다.

디지털 영상은 실세계의 형상을 영상 평면에 투영하여 샘플링 과정을 거쳐 얻게 되는데 이러한 과정에서 경계의 손실이 발생하여 정확한 경계 데이터를 제공하지 못한다. 디지털 영상 정보를 이용한 계측 시스템들은 부화소(Subpixel) 영역에서의 정밀도를 높이는 연구를 많이 수행해 왔는데 이는 디지털 영상내의 화소와 화소 사이에 존재하는 실제 경계를 추정하여 정밀도를 높이려고 하는 것이다.

A.J.Tabatabai 등은 1차원 모멘트를 이용하여 단 경계(step edge)의 위치를 구하였다⁽¹⁾. 단 경계는

* 한양대학교 전자계산학과

** 한양대학교 기계공학과

난소 증가하는 것으로 가정하고 각 경계 내부 부분과 바깥쪽 부분의 화질 분포 및 통계적 수치를 이용하여 경계 위치를 소수점이하 자리까지 구하게 된다. 모멘트의 계산에 있어 한 방향에 대해서만 고려하였기 때문에 2차원 영상에 적용하였을 때는 많은 오차를 갖게 된다. A. Huertas 등은 LoG 필터(Laplacian of Gaussian filter)를 사용하여 1/n 해상도의 부화소 위치를 결정하는 알고리즘을 연구하였다⁽²⁾. 이는 단경계 영상에만 적용가능하고 많은 계산시간을 요구한다는 문제점이 있다. M. Kosworo 등은 1차원 형태의 국부 에너지 함수(Local Energy function)를 정의하였고 이를 이용하여 여러 형태의 에지를 정의한 다음 각각을 분류하여 각 형태에 맞는 알고리즘을 적용하여 부화소 정도의 에지 위치를 추정하는 연구를 수행하였다⁽³⁾. 또한 이를 2차원 영역으로 확장하여 영상데이터에 적용하는 것이 가능하도록 하였다. 이는 디지털 영상에서 발생할 수 있는 다양한 형태의 에지에 적용 가능한 모델을 제시하였고 성능 또한 우수한 것으로 판명되었다. 그러나 2차원으로 확장한 방법은 잡음에는 약하다는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 디지털 영상 내 물체의 실제 경계위치 추정을 위한 부화소정도 알고리즘에 대해 기술한다. 이를 위해 먼저 단경계에 대한 실제 경계 추출을 위해 모멘트를 이용한 1차원의 경계 연산자를 정의하며 이를 2차원 데이터에 적용하는 방법에 대해 기술한다.

2. 전체 시스템

원 해석을 위한 계측 시스템의 하드웨어 구조를 Fig.1에 나타내었다. 전체 시스템은 물체 이동부와 비전 시스템으로 구성되어 있으며 물체 이동부에서 카메라 앞으로 물체를 이동시킨 후 영상을 취득하여 원 해석을 하게 된다. 영상 취득 보드 및 카메라는 주 컴퓨터로부터 제어된다. 조명방식은 백라이트(Back light) 기법을 사용하였으며 영상 취득, 검사 소프트웨어의 실행 등도 주컴퓨터에서 동작된다. 백라이트 조명 기법은 물체 후면에서 카메라 방향으로 평면광을 조사하는 방식이다. 본 시스템에서 사용된 조명원은 할로겐 램프를 사용하였고 광섬유를 통해 평면 필터로 전달되어 평면광을 만들어내게 된다. 백라이트 기법은 조명을

배경하는 영상을 취득하기 때문에 배경에 잡음이 거의 없다. 또한 물체와 배경이 명확하게 구분되므로 물체의 윤곽선을 추출할 때 효과적인 조명 기법이다.

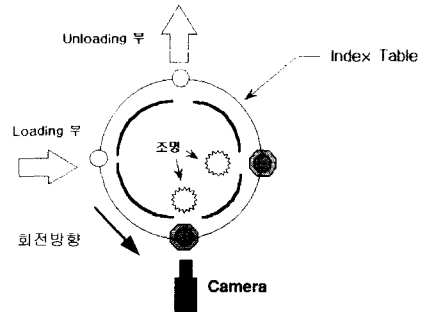


Fig. 1 System Configuration

전체 검사과정은 Fig. 2와 같다. 영상취득 과정에서 얻은 영상으로부터 이진 영상을 구하고, 경계 추적 알고리즘⁽⁴⁾을 사용하여 경계 점의 위치 데이터를 모두 추출한다. 추출된 경계 데이터를 이용하여 원의 방정식을 구하게 되는데 최소자승법을 이용하여 반지름 및 중심위치를 구한다.

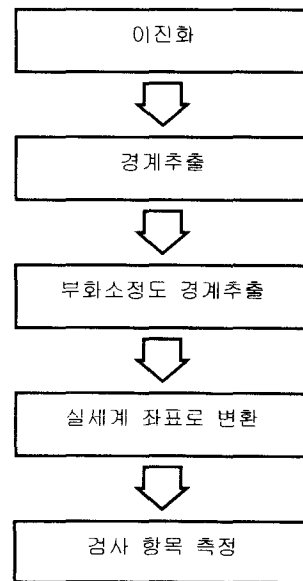


Fig. 2 Measurement Procedure

3. 경계 위치

디지털 영상은 실세계의 형상을 영상 평면에 투영하여 샘플링 과정을 거쳐 얻게 되는데 이러한 과정에서 경계의 손실이 있게 된다. 1 차원의 예를 들면, 길이가 약 1.3 화소인 물체의 경우 실제 경계가 Fig. 3 과 같이 화소 내부에 위치하게 되는데 영상 입력 단계에서 샘플링 과정을 거치면서 실제 경계 정보를 잃게 된다.

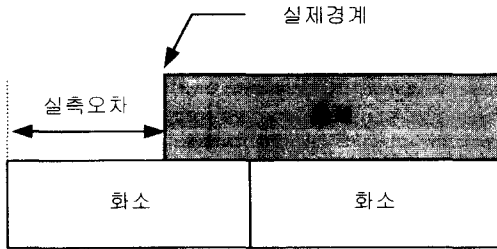
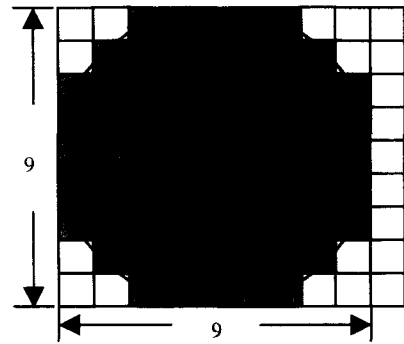


Fig. 3 Real boundary and sampled data

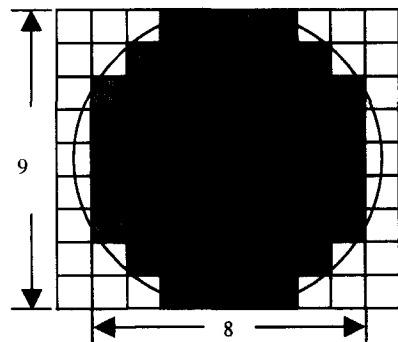
2 차원의 경우도 마찬가지로인데 원의 경우 영상 내 위치에 따라 경계데이터의 좌표가 다르게 나타난다. 임의의 원에 대한 경계를 구한 후 0.5 화소 이내에서 이동 시키게 되면 이전의 경계와 다르게 샘플링 될 수 있다. 즉 화소의 정수배 만큼 이동하는 경우에는 같은 경계 데이터를 유지하지만 각 x, y 방향으로 ± 0.5 화소 이내에서 이동시키는 경우는 서로 다른 경계데이터를 만들어내게 된다. 이의 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림 (a)는 지름이 9 인 원이 9x9 화소 내에서 영역을 완전히 채운 형태이고 그림 (b)는 가로 방향으로 약 0.5 화소 정도 이동시킨 후의 것으로써 샘플링된 원의 폭이 8 화소로서 원래의 것과 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 실세계의 물체를 디지털화하여 취득하는 과정에서 발생하게 되는데, 카메라의 CCD 에 투영된 신호를 샘플링하고 이진화하는 과정에서 각 픽셀 영역에 절반 이상을 차지할 때 물체의 영역으로 결정된다.

취득된 영상으로부터 실제 반지름을 계산하는 과정은 일반적으로 영상을 이진화한 후 경계 추출 과정을 거쳐 구한 각 데이터들을 이용하여 계산하게 된다. 본 논문에서는 이진화 알고리즘으로 p-tile 방식의 이진화 알고리즘을 사용하였다⁽⁵⁾. P-tile 방식은 입력 영상의 히스토그램을 이용하여 물체

가 차지하는 비율 만큼을 문턱치(threshold value)로 정하는 방법으로 물체가 영상 내에서 차지하는 면적을 알고 있을 때 효과적인 방법이다. 본 논문에서 사용한 실험 영상은 물체의 면적을 알고 있으므로 대강의 경계를 구할 수 있다. 또한 정확한 경계는 본 논문에서 제안하는 부화소 정밀도의 경계 추정 알고리즘을 사용할 것이므로 전체 알고리즘에는 크게 영향을 미치지 않는다.



(a) Original image



(b) 0.5 pixel shifted image

Fig. 4 Edge location of circle image

4. 원 해석 알고리즘

최적 해상도 결정을 위해 디지털화 된 경계 화소 데이터로부터 원의 방정식의 각 파라미터를 구해야 한다. 이는 최소사승법을 이용하여 구하게 되며, 중심이 $P_0(x_0, y_0)$, 반경이 r 인 원의 방정식은 다음과 같다.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

여기서 경계상의 점을 $P_i(x_i, y_i)$ 로 놓고 오차 함수(error function) E 를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2]^2,$$

n : 경계 화소의 수

여기서 $z = x_0^2 + y_0^2 - r^2$ 으로 놓으면,

$$E = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)^2$$

위의 식을 최소화하는 x_0, y_0 를 구하기 위해 각 미지수에 대해 편미분을 한다. 즉

$$\frac{\partial E}{\partial x_0} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)(-2x_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_0} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)(-2y_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z) = 0$$

위의 식을 풀면 x_0, y_0, z 를 구할 수 있고, 반경 r 은 아래의 식으로부터 구한다.

$$r = (x_0^2 + y_0^2 - z)^{1/2}$$

5. 모멘트를 이용한 부화소 정도 경계 추출

본 절에서는 정밀 계측을 위한 부화소 정도 경계 추출 알고리즘을 제안하는데 먼저 모멘트를 이용한 부화소 정도의 1차원 단경계 추출에 대해 기술하고 이를 2차원 데이터에 적용하는 방법에 대해 기술한다.

5.1.1 차원 모멘트에 기반한 단경계 추출

단경계(Step edge)에 대한 경계 추출을 위해 먼저 1차원의 경계 연산자에 대해 설명한다. 단경계를 샘플링한 데이터는 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 라는 여러 수들의 나열로 표현되며 이들은 단조 증가이거나 감소

의 형태를 갖는다¹¹⁾. 이상적인 경계는 하나의 연속적인 밝기값 h_1 의 데이터 다음에 나타나는 또 다른 연속적인 밝기값 h_2 사이의 경계이다. 전체 영역 중 h_1 에 속하는 영역의 길이, 즉 실제 경계 위치를 k 라 할 때, $k=p_1 n$ 으로 표현될 수 있으며 이때 p_1 은 전체 영역에 대한 h_1 영역의 비율이며 n 은 입력데이터의 수이다. 이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

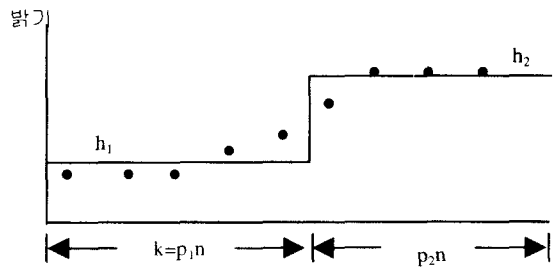


Fig. 5 Sampled data and ideal edge location

여기서 샘플된 경계데이터를 이용하여 실제 경계 위치를 구하기 위한 처음 세개의 모멘트 m_i 는 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{m}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^i \quad i=1,2,3$$

x_j^i : j 번째 밝기값을 i 제곱한 값

이상적인 경계내의 h_1 값의 갯수를 k 라 할 때, 실제 경계 데이터를 구하는 방법은 샘플된 경계 데이터와 출력인 실제 경계 데이터의 처음 세개의 모멘트를 같게 보존하는 것이다. 이는 3개의 미지의 변수 p_1, h_1, h_2 에 대한 다음의 3가지 방정식을 푸는 것과 같다.

$$\sum_{j=1}^k p_j h_j^i = \bar{m}_i$$

$$p_1 = \frac{k}{n}$$

$$\sum_{j=1}^k p_j = 1$$

위의 3개 방정식에 대한 해법은 다음과 같다.

$$h_1 = \bar{m}_1 - \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}$$

$$h_2 = \bar{m}_1 + \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p_1}{p_2}}$$

$$p_1 = \frac{1}{2} \left[1 + \bar{s} \sqrt{\frac{1}{4 + \bar{s}^2}} \right]$$

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{m}_1)^3}{\bar{\sigma}^3} \equiv \frac{\bar{m}_3 + 2\bar{m}_1^3 + 3\bar{m}_1\bar{m}_2}{\bar{\sigma}^3}$$

$$\bar{\sigma}^2 = \bar{m}_2 - \bar{m}_1^2$$

위의 결과로부터 $k=p_1n$ 가 정수가 아님을 알 수 있고 k 로 정할 수 있다. 여기서 첫번째 화소는 $i=0.5$ 에 위치하며 다음 화소는 1의 간격으로 위치하므로 에지 위치의 부화소 측정을 가능하게 하는 것이다. 즉 경계 위치는 샘플링 지점에 있을 필요는 없다. Table 1은 서로 다른 형태의 경계에 대해 위의 기법을 적용하여 실제 경계위치를 추정한 결과를 나타내고 있다. 예를 들어 각 입력 데이터의 첫번째 데이터가 원점이라 하였을 때, (a)는 9개의 입력데이터를 이용하여 계산을 하였고 실제 경계의 위치는 원점으로부터 3.506만큼 떨어진 지점으로 추정되었다.

Table 1 Edge location for 1D edge patterns

Input sequence	Calculated edge location
(a) 0 0 0.5 1 1 1 1 1 1	3.506
(b) 0 0 0.25 1 1 1 1 1 1	3.860
(c) 0 0 0.25 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	3.861
(d) 0.1 .2 .3 .4 .6 .8 1 1	4.997

5.2.2 차원으로의 확장

앞 절의 1차원 데이터에 적용한 기법을 확장하여 2차원 데이터에 적용할 수 있다. 2차원의 데이터는 Fig. 6과 같이 1차원 데이터의 연속이며 방향성을 갖는 것으로 모델링 할 수 있다. 즉 실제 경계위치는 k 로 표현될 수 있으며 방향성분 θ 를 갖는다. 이 모델로부터 2차원의 경계를 연속적이라고 가정하였을 때 경계위치는 경계에 수직인

선상에 존재하는 데이터들로부터 구할 수 있다. 경계의 기울기 θ 를 추정하고 이에 수직인 방향을 결정하여 동일선상의 데이터들에 부화소 정도 알고리즘을 적용하는 것이다.

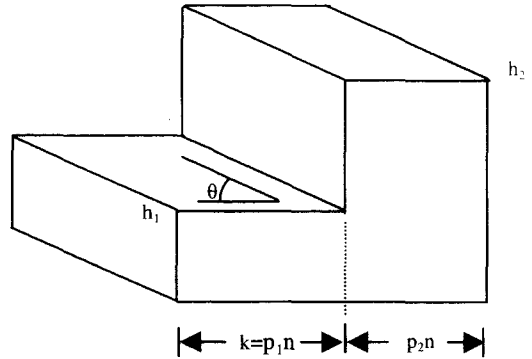


Fig. 6 2D step edge model

경계의 기울기는 두 가지 방법으로 계산할 수 있다. 첫 번째는 마스크를 이용하여 각 화소별 기울기를 추정하는 방법이다⁽²⁾. 이를 위해 방향성분을 추정할 수 있는 소벨 에지 연산자(Sobel edge detector)를 사용하여 기울기를 추정한다. 두 번째 방법은 전체 경계로부터 분할된 직선이나 원의 데이터를 이용하여 각 화소의 기울기를 추정하는 방법이다. 즉 하나의 직선상의 모든 점은 기울기가 모두 같다고 가정하여 전체 개체로부터 직선이나 원의 성분을 분할하고 각각의 방정식을 구하여 각 화소별 기울기를 추정하는 방법이다. 이러한 방법은 국부적인 잡음에 강한 장점이 있다. 아래에 제안하는 실제 경계 추정 알고리즘을 나타내었다.

실제 경계 추정 알고리즘

- Step 1. 영상을 이진화(p-tile 방식)
- Step 2. 디지털 경계 추출
- Step 3. 전체 경계를 이용한 세그먼트 인자추정
- Step 4. 각 화소별 실제경계추정

6. 실험 결과

실제 경계 위치 추정을 위한 계측 시스템의 하드웨어 시스템은 물체 이동부와 비전 시스템으로 구성되어 있으며 물체 이동부에서 카메라 앞으

로 물체를 이동시킨 후 영상을 취득, 물체의 경계를 추출하여 계측하게 된다. 영상 취득 보드 및 카메라는 주 컴퓨터로부터 제어된다. 조명방식은 백라이트(Back light) 기법을 사용하며 영상 취득, 검사 소프트웨어의 실행 등도 주컴퓨터에서 동작된다.

전체 계측 과정은 영상취득 과정에서 얻은 영상으로부터 이진 영상을 구하고, 경계 추적 알고리즘⁶⁾을 사용하여 디지털화 된 경계 위치 데이터를 모두 추출한다. 추출된 경계 데이터를 이용하여 실제 경계 위치를 추정하게 된다. 실험을 위해 원형 표준 시편(Master ball)을 사용하였는데 모양은 구형태이고 지름은 25mm 이며 제작 정밀도는 1 μ m 이다. 이를 Fig. 7.에 나타내었다.

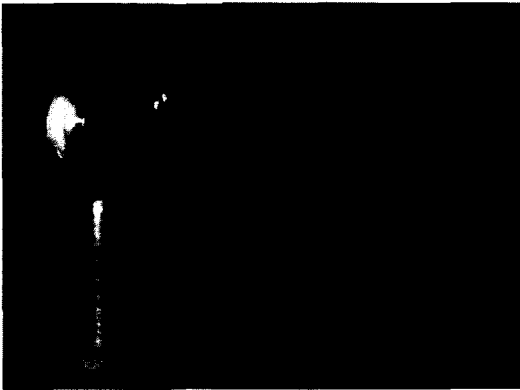


Fig. 7 Master ball and its back light-illuminated image

제안된 방법을 이용하여 부화소 정도의 실제 경계를 추정하였다. 실험을 위하여 Fig. 8 을 사용하였는데 이는 길이 100 픽셀의 직선 경계를 갖는 영상으로 양끝이 1 화소 정도 기울어져 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용한 결과를 Fig. 9 에 나타내었는데 점선으로 표시된 것은 이진화 후에 경계 추적과정을 거쳐 구한 디지털 경계이며 실선은 부화소 정도 알고리즘을 적용하여 추정된 실제 경계이다. 디지털 경계는 50~60 번째 화소에서 전이가 일어나는 형태로 추출 되었으며 이는 실제 경계와는 많은 오차를 보이고 있다. 부화소 정도로 추정된 경계데이터는 연속적인 형태로 나타나고 있으며 실제 경계와 오차가 적음을 알 수 있다.



Fig. 8 Line boundary image

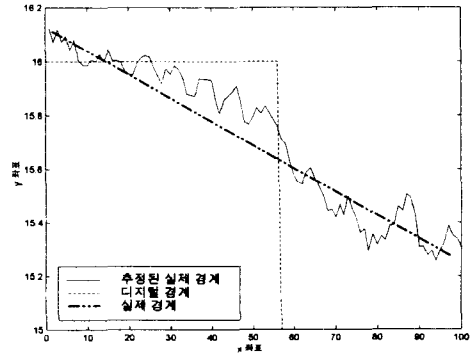


Fig. 9 Digital boundary and estimated real boundary

제안된 방법을 2 차원의 원형 표준 시편에 적용한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 물체의 오른쪽 상단 부위를 나타내었는데 점선은 이진화만 수행하여 구한 디지털 경계이고 실선은 추정된 실제 경계이다. 물체와 배경의 중간 부위에 매끄러운 곡률을 유지하며 경계를 잘 찾았음을 알 수 있다.

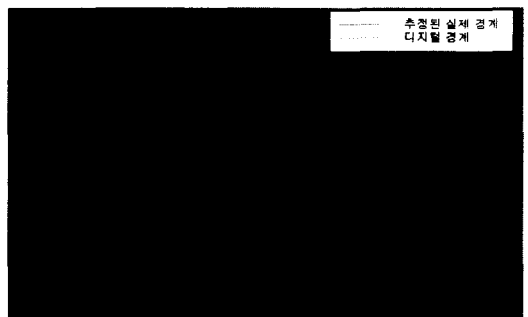


Fig. 10 2D Digital boundary and estimated real boundary

제안된 경계 추정 방법의 2 차원 확장 성능을 평가하기 위해 소벨 연산자를 이용하여 방향을 추정한 것과 비교하였다. 성능을 평가하기 위해 원 형태의 물체를 취득한 50 장의 영상으로부터 부화

소 정도의 경계를 추출한 후 이로부터 원의 반지름을 추정한다. 각 반지름 데이터의 표준편차를 비교하여 성능을 평가하였는데 결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서 나타난 바와 같이 제안된 방법이 소벨 연산자를 사용하여 추정하는 것보다 약 2.5 배 정도 우수함을 알 수 있다. 주목할 것은 실험을 위해 카메라의 calibration 을 고려하지 않았다는 것이다. 고정밀의 계측에서는 렌즈 왜곡에 의한 오차 및 카메라 calibration 알고리즘 자체의 오차가 영향을 주므로 알고리즘 간의 비교를 어렵게 한다. 따라서 알고리즘간이 비교는 camera calibration 을 하지 않은 영상 좌표계에서 구한 표준편차를 이용하여야 한다⁽³⁾.

Table 2 Comparison with subpixel accuracy algorithms

	소벨 연산자를 이용한 방법	제안된 방법
원의 반지름 표준편차(화소)	0.0250276	0.0101967

7. 결론

본 논문에서는 디지털 영상 내 물체의 실제 경계위치 추정을 위한 부화소정도 알고리즘에 대해 기술하였다. 단경계에 대한 실제 경계 추출을 위해 먼저 1차원의 경계 연산자를 정의하였고 이를 확장하여 2차원 데이터에 적용하였다. 2차원으로 확장하기 위해 방향을 고려할 때 전체 경계로부터 분할된 직선 성분이나 원의 데이터를 이용하여 각 화소의 기울기를 추정하는 방법이 국부적인 잡음에 강하며, 추정 오차의 범위가 작다는 결론을 얻었다.

향후 과제로는 단경계 뿐만 아니라 다양한 형태의 경계들에 대해서도 적용할 수 있도록 알고리즘을 확장, 성능을 평가하고, Calibration 알고리즘을 적용하여 렌즈 왜곡으로부터 발생하는 오차를 제거하여 실제 계측분야에 적용할 수 있도록 개선하는데 있다.

후 기

본 연구는 (주)센트랄에서 지원하는 “3차원 비접촉식 검사시스템 개발” 과제의 연구비로 수행되

었음.

참고문헌

1. A.J.Tabatabai and O.R. Mitchell, “Edge location to subpixel values in digital imagery,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-6, no. 2, pp.188-201, Mar. 1984.
2. A. Huertas and G. Medioni, “Detection of intensity changes with subpixel accuracy using Laplacian-Gaussian masks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, no. 5, pp.188-201, Sept. 1986.
3. M. Kisworo, S.Venkatesh and G. West, “Modeling Edges at Subpixel Accuracy Using the Local Energy Approach,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-16, no. 4, pp.405-410, Apr. 1994.
4. D. H. Ballard and C.M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall, 1982.
5. M.Sonka, V.Hlavac and R.Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, 1993.