

광섬유 연결 종단면 검사를 위한 원형 검출과 근사화 방법

김진수*

Circle Detection and Approximation for Inspecting a Fiber Optic Connector Endface

Jin-soo Kim*

Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

요 약

영상인식 분야에서 원형 검출은 가장 많이 사용되는 기술 중의 하나이다. 기존에 제안된 많은 원형 검출방법들은 허프변환에 기초하고 있고, 충분히 강인한 알고리즘을 제공한다. 그러나 허프변환은 해석적 곡선의 각점을 원의 중심 좌표와 반지름으로 대응시키는 과정을 도입함으로써 매우 많은 메모리와 실행시간을 필요로 하고, 또한 가끔씩 부정확한 원을 검출하는 경우가 발생하게 된다. 본 논문에서는 광섬유 연결 종단면 검사에 적합한 최적의 원형 검출 방법과 근사화 방법을 제안한다. 제안한 방법은 에지 검출에 기초하여 초기 중심좌표와 반지름을 바탕으로 간단화된 K-means 알고리즘을 도입함으로써 차 영역의 넓이가 최소가 되도록 하는 방법으로 원을 근사화한다. 모의실험을 통하여 제안한 방식은 기존의 오픈라이브러리로 제공되는 OpenCV의 허프변환에 비해 원 검출 및 근사화에 있어 약 67% 정도의 성능 개선이 이루어졌고, 또한, 실행 시간에 있어 약 80% 정도 개선됨을 보인다.

ABSTRACT

In the field of image recognition, circle detection is one of the most widely used techniques. Conventional algorithms are mainly based on Hough transform, which is the most straightforward algorithm for detecting circles and for providing enough robust algorithm. However, it suffers from large memory requirements and high computational loads, and sometimes tends to detect incorrect circles. This paper proposes an optimal circle detection and approximation method which is applicable for inspecting fiber optic connector endface. The proposed method finds initial center coordinates and radius based on the initial edge lines. Then, by introducing the simplified K-means algorithm, the proposed method investigates a substitute-circle by minimizing the area of non-overlapped regions. Through extensive simulations, it is shown that the proposed method can improve the error rate by as much as 67% and also can reduce the computing time by as much as 80%, compared to the Hough transform provided by the OpenCV library.

키워드 : 광섬유 연결 종단면, 허프변환, 원형근사화

Key word : Fiber Optic Connector Endface, Hough Transform, Circle Approximation

접수일자 : 2014. 08. 22 심사완료일자 : 2014. 09. 21 게재확정일자 : 2014. 10. 10

* **Corresponding Author** Jin-soo Kim(E-mail: jskim67@hanbat.ac.kr Tel:+82-42-821-1147)

Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.12.2953>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

원과 타원형 검출은 얼굴검출 및 추적, 자동검사, 의료영상 등의 컴퓨터 비전과 영상인식 기술에서 핵심적인 기능으로서 가장 많은 관심을 받아 온 분야 중의 하나이다. 기존에 디지털 영상 내에 존재하는 선형과 원형을 효과적으로 검출하기 위해 매우 다양한 연구가 수행되었으며, 가장 많이 알려진 방법은 대부분 허프변환(Hough Transform)에 기초하고 있다. 허프변환은 1962년 P. Hough에 의해 고안되었고, 1972년에 R. Duda와 P. Hart이 기존의 허프변환을 변형하여 일반화된 허프변환(Generalized Hough Transform)을 제안하였다[1]. 이를 기초하여 일반화된 허프변환을 확장한 형태로 고안되었는데 그것이 원형 허프변환(CHT: Circular Hough Transform)이고, 이것이 오늘날 원형 검출에 가장 활발히 사용되고 있는 방법이다[2, 3]. 이러한 허프변환은 잡음, 객체결합, 형태왜곡 등에 강인한 특성을 갖고 있으나 매우 많은 연산량과 메모리를 필요로 하는 단점을 안고 있다[3].

한편, 기존에 제한된 원형 검출의 단점을 극복하기 위해 다양한 시도가 있었다. Khamees[4] 등은 배경보다 밝거나 어두워지는 경계 조건을 전처리 시점에 도입하여 원형 물체의 에지 검출에 활용하였다. 원형 물체의 경계치에 기울기의 대칭성을 활용하여 원의 내부와 외부로의 에지 방향성을 구하여 연산량을 절감하여 고속 알고리즘을 구하려고 시도하였다. 그리고 원형 허프변환의 효율성을 개선하기 위해 Chattopadhyay 등은 Ant-system 알고리즘을 원형 검출에 도입하여 교차하는 원들과 그렇지 않은 원들을 모두 검출하도록 알고리즘을 고안하였으나 연산량이 많은 것은 극복하지 못하였다. Pan[5]등은 확률적 쌍 투표(PPV: Probabilistic Pairwise Voting)라는 기법을 도입하여 선들의 교차점을 찾아서 원형 물체의 검출, 폐색구간 및 잡음에 강인한 원형검출 기법을 통하여 원형 허프변환의 문제점을 극복하고자 하였다. Chung등은 원형 검출을 위해 중심 좌표에 대해 고속의 탐색 기법을 도입하여 고속화 방안을 제시하였다. Yang등은 산림자원의 통계와 활용을 위해 간단한 에지검출 방식과 N-각형 탐색 기법을 도입하여 원형 목재 검출에 활용하는 방법을 제시하였다. 또한 컴퓨터비전을 위한 오픈 라이브러리 함수로 제공되고 있는 OpenCV[6]에서도 원형 검출을 위한 알고리

즘이 제시되어 다양한 분야에 활용되고 있다. 현재 원형 검출에 사용되고 있는 OpenCV 라이브러리 함수는 에지영상에서 0이 아닌 화소들에 대해서도 원형 탐색을 수행함으로써 많은 계산량을 필요로 하고 있고, 또한, 잡음이나 이물이 있는 원형 영상에 있어서는 오검출하는 등의 불완전하게 동작하는 것이 관찰된다. 그리고 이외에도 매우 많은 문헌에서 원형 허프변환이 갖는 문제점들을 극복하고자 매우 많은 노력이 이루어졌으나 대부분의 기법들이 3D 누적공간의 표시와 저장을 위한 매우 큰 메모리 공간과 더불어 매우 과다한 연산량과 같은 문제점을 완전히 해결하지 못하고 있다.

본 논문에서는 광 접속 소자의 종단면 검사에 활용이 가능한 원형 검출과 근사화 방법에 대한 새로운 방식을 제안한다. 광 접속 소자의 종단면은 단일 원으로 구성되어 있어서 매우 단순한 구조를 가지고 있어서, 기존의 원형 탐색 알고리즘과 달리 3D 누적공간 내에서의 수많은 탐색을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 광 접속 소자의 단면이 갖는 단순한 특성에 최적적으로 부합하는 원형 탐색 및 근사화 방안을 제안한다. 제안한 방법은 먼저 원 접속 소자 종단면 영상을 이진화하고, 이진화된 원 영상에 대해 에지를 구하여, 구하여진 에지좌표를 통하여 간단화된 K-means 알고리즘을 도입함으로써 성능을 최적화하도록 설계된다. 즉, 매우 많은 연산량을 필요로 하는 K-means 알고리즘과 달리 본 논문에서는 에지 좌표의 개수를 활용하여 왜곡 수렴 정도에 따른 오차율을 평가하고 그 결과를 활용하여 연산량을 제한함으로써 원형 탐색과 근사화에 대한 효율성을 개선하는 방식으로 설계된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 기존에 가장 활발히 사용되고 있는 원형 허프변환의 원리에 대해 간단히 설명하고, 광 접속 연결 종단면 영상이 갖는 특징과 더불어 IEC 61300-3-35에서 정의하고 있는 광 접속 연결 종단면 검사 및 측정 조건에 대하여 살펴본다. III장에서는 본 논문에서 에지좌표 개수를 활용하여 오차율을 최소화하면서 최적화된 원형 검출 및 근사화 방안을 제안한다. IV장에서는 기존의 OpenCV 라이브러리 함수와 비교하여 제안된 방식의 효율성 측면에서 다양한 실험을 통하여 비교 분석한다. 또한, 제안된 알고리즘이 갖는 오차율 특성을 분석함으로써 안정된 결과를 도출할 수 있음을 보인다. 끝으로 V장에서는 이상의 실험결과를 바탕으로 결론을 맺는다.

II. 원형 허프변환과 광 접속 소자의 종단면 영상의 특징

2.1. 기존의 원형 허프변환

F. Yan[1] 등이 제안한 원형 허프변환은 캐니 에지 검출기를 통하여 얻어진 에지를 입력 신호로 하여 원형을 검출한다. 원형 허프변환은 파라미터 공간에서 각 파라미터의 밀집된 특성을 얻기 위해 파라미터 투표과정을 거치게 되는데, 이때 누적공간에서 국부적인 최대값을 하여 원형 허프변환을 구하게 된다. 원은 반지름과 중심좌표에 의해 고유한 것이 결정되므로, 파라미터 공간의 정의는 다음과 같은 고유한 원의 방정식이 존재하느냐에 따라 결정된다[2, 3].

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (1)$$

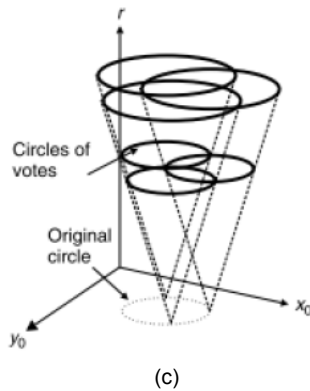
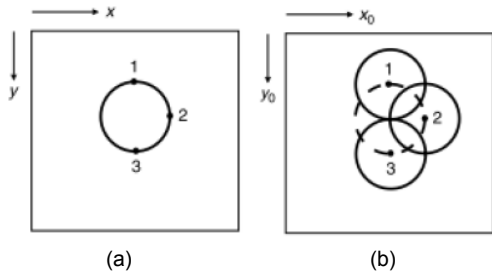


그림 1. 원형 허프변환의 개념도[3] (a) 원 포함 영상 (b) 누적 공간 (c) 3D 누적 공간

Fig. 1 Conceptual diagram for Circular Hough Transform[3] (a) Image with a circle (b) Accumulated space (c) 3D accumulated space

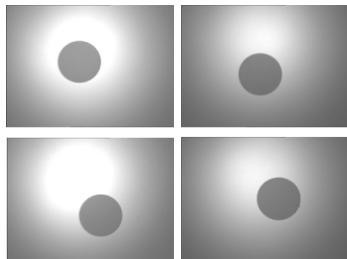
여기서, 고유한 원은 중심좌표 (x_0, y_0)와 반지름 r 에 의한 세 개의 파라미터에 의해 결정된다.

그림 1 (a)는 단일 중심좌표 (x_0, y_0)에 반지름 r 을 갖는 원을 갖는 영상을 나타내고, (b)는 3개의 에지좌표에 의해 정의될 수 있는 동일한 반지름을 갖는 세 원들을 나타낸다. 즉, 동일한 반지름 공간에서 원의 중심이 다른 경우에 대한 누적공간을 나타내고 있다. 이를 반지름이 다른 값으로 대응하면, (c)와 같이 반지름이 다른 3D 누적공간을 표현할 수 있게 된다. 따라서 F. Yan[1] 등은 영상에서 에지를 구한 후에 각 에지의 좌표를 저장하고, 그 좌표에 대해 식(1)에 대입하여 3개의 파라미터 공간에 대응시키는 과정 즉 투표과정을 사용함으로써 중심좌표 (x_0, y_0)와 반지름 r 을 갖는 원을 찾을 수 있게 된다. 그런데 원형 허프변환은 누적행렬을 저장할 적절한 크기를 선택하는 것이 어렵고 잡음이 있는 경우의 에지는 잘못된 원을 검출할 가능성이 높다. 또한, 고차원의 파라미터공간은 허프변환 과정에 속도 저하를 야기하고 누적공간을 저장하기 위해서는 많은 메모리 공간을 필요로 하는 단점을 갖고 있다. 이러한 원형 허프변환 기법을 최적화하기 위해 매우 다양한 방안이 제시되었고, 또한 현재 OpenCV 라이브러리 함수로 제공되고 있다[1, 6].

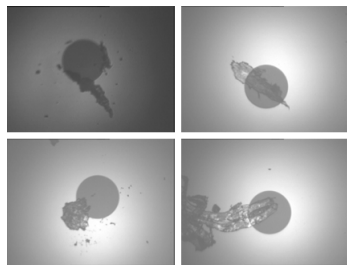
2.2. 광 접속 소자 종단면 검사의 필요성

그림 2에 나타난 광섬유 단면 영상은 코어 직경이 매우 작으며, 광대역 및 장거리 전송에 흔히 사용되는 싱글모드를 나타내고 있다. (a)에 나타난 깨끗한 단면은 통신에 문제가 없으나 (b)와 같은 다양한 크기의 이물질들을 갖는 경우에는 광통신의 효율성을 저하시키는 원인이 된다. 이와 같이 광섬유의 통신 품질을 간접적으로 진단하기 위해 IEC 61300-3-35에서는 단면 검사 및 측정 장치에 대한 제한조건을 제시하고 있다[7]. 그림 2에 나타난 광섬유 단면은 직경이 $125\mu\text{m}$ 를 차지하며, 원 중심에 가까울수록 매우 엄격한 측정을 필요로 한다. 즉, IEC 61300-3-35에서 제시한 기준에 따르면, 그림 3에 나타난 것과 같이 중심에서 $12.5\mu\text{m}$ 의 반지름 범위(A zone)에서는 $3\mu\text{m}$ 이하의 이물과 스크래치는 2개까지만 허용하고 $3\mu\text{m}$ 초과는 허용하지 않을 정도로 매우 까다롭다. 반면에 중심에서 $60\mu\text{m}$ 의 반지름 범위(B zone)에서는 스크래치는 $3\mu\text{m}$ 초과까지는 3개 허용하고 이물은 $2\mu\text{m}$ 에서

5 μ m까지는 5개까지 허용한다. 이와 더불어 더 확장된 반지름 범위에 따라 C zone과 D zone을 두고 이물과 스크래치의 개수를 제약하고 있다. IEC 61300-3-35기준에 따라 광섬유 단면 검사를 수행하기 위해서는 원의 중심을 정확하게 찾아내고, 또한 찾아낸 원의 중심에서 반지름을 정확하게 측정 및 표현하는 기술이 반드시 필요하다. 이러한 용도를 위해 본 논문에서는 카메라 입력 영상을 통하여 원의 중심과 반지름을 정확히 추출하고 최적으로 근사화 하는 기법을 제시한다.



(a)



(b)

그림 2. 광섬유 연결 종단면의 예 (a) 정상단면 (b) 결함단면
Fig. 2 Examples of fiber optic connector endfaces (a) Normal endfaces (b) Endfaces with defects

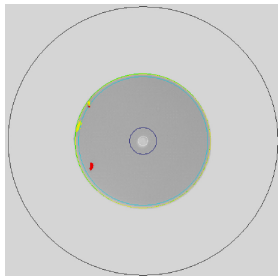


그림 3. 종단면의 측정영역[7]
Fig. 3 Measurement regions for endface[7]

III. 제안된 원 검출 및 근사화 방법

그림 4는 본 논문에서 제안된 원 검출 및 근사화에 대한 제어 흐름도를 나타낸다. 제안된 방식은 K-means 알고리즘을 간단하게 변형하여 최적의 원의 중심과 반지름을 얻기 위해 6단계로 구성된다.

먼저 1단계에서는 Otsu[8]가 제안한 방식에 의해 입력영상에 대해 적응적 이진화(binairization)를 수행한다 [6]. 이 방법은 화소들의 밝기 분포로부터 클래스간 가중 분산(weighted between-class variation)을 최대화하도록 임계치를 결정하는 방법이다. 그림 5는 입력영상과 Otsu[8]방식에 의해 적응적 이진화의 실험 결과 예를 나타낸다. 적응적 이진화 결과를 통해 각각 검은 영역과 흰색 영역으로 나뉘며, 영역 구분을 위해 검은 영역을 B라고 하여 다음과 같이 영역을 나뉜다.

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x,y) \in B \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

2단계에서는 1단계에서 얻어진 $g(x, y)$ 를 이용하여 에지를 추출한다. 에지는 라플라시안 필터링을 수행함으로써 얻어진다[6].

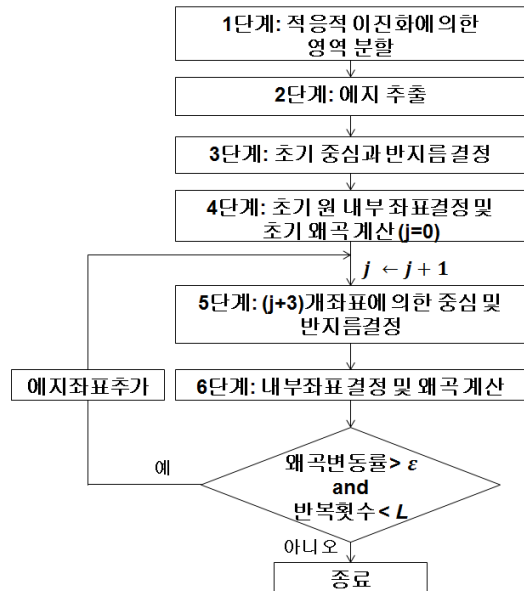


그림 4. 제안된 방식의 흐름도
Fig. 4 Flow chart of the proposed algorithm

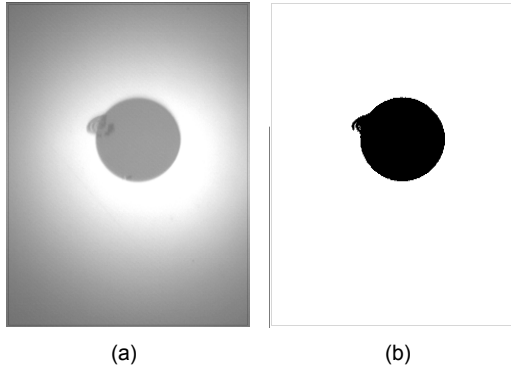


그림 5. 적응적 이진화 결과 (a) 입력영상 (b) 이진화영상
 Fig. 5 Example of adaptive binarization (a) input image (b) binary image

3단계에서는 주어진 에지 좌표를 이용하여 초기 원의 중심좌표($x_c^{(0)}, y_c^{(0)}$)와 반지름($r^{(0)}$)을 정의한다. 즉, 세 개의 에지 좌표를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$x_c^{(0)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i, \quad y_c^{(0)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 y_i \quad (3)$$

$$r^{(0)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_i - x_c^{(0)})^2 + (y_i - y_c^{(0)})^2} \quad (4)$$

4단계에서는 초기 원의 내부 좌표 집합($F^{(0)}$)과 범위 내 좌표를 이용한 영상($f^{(0)}(x, y)$)을 각각 다음과 같이 정의한다.

$$F^{(0)} = \{(x, y) | \sqrt{(x - x_c^{(0)})^2 + (y - y_c^{(0)})^2} \leq r^{(0)}\} \quad (5)$$

$$f^{(0)}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x, y) \in F^{(0)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

이상의 정의된 식들을 이용하여 초기 왜곡($D^{(0)}$)을 다음과 같이 측정한다.

$$D^{(0)} = \sum_{(x, y) \in \{F^{(0)} \cup B\}} |g(x, y) - f^{(0)}(x, y)| \quad (7)$$

5단계에서는 초기의 3개 에지 좌표 외에 추가적으로 j개의 좌표를 이용하여 원의 중심좌표($x_c^{(j)}, y_c^{(j)}$)와 반지름($r^{(j)}$)을 정의한다. 추가적으로 j개의 에지 좌표를 이

용함으로써 중심 좌표와 반지름은 다음과 같이 구한다.

$$x_c^{(j)} = \frac{1}{j+3} \sum_{i=1}^{j+3} x_i, \quad y_c^{(j)} = \frac{1}{j+3} \sum_{i=1}^{j+3} y_i \quad (8)$$

$$r^{(j)} = \frac{1}{j+3} \sum_{i=1}^{j+3} \sqrt{(x_i - x_c^{(j)})^2 + (y_i - y_c^{(j)})^2} \quad (9)$$

6단계에서는 4단계와 유사하게 j개의 추가된 에지 좌표를 기초하여 원의 내부 좌표 집합($F^{(j)}$)과 범위내 좌표를 이용한 영상($f^{(j)}(x, y)$)을 각각 다음과 같이 구한다.

$$F^{(j)} = \{(x, y) | \sqrt{(x - x_c^{(j)})^2 + (y - y_c^{(j)})^2} \leq r^{(j)}\} \quad (10)$$

$$f^{(j)}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x, y) \in F^{(j)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

이상의 정의된 식들을 이용하여 (j+3)개의 에지 좌표를 이용한 원 근사화의 왜곡($D^{(j)}$)을 다음과 같이 측정한다.

$$D^{(j)} = \sum_{(x, y) \in \{F^{(j)} \cup B\}} |g(x, y) - f^{(j)}(x, y)| \quad (12)$$

이렇게 측정된 왜곡을 이용하여 원형 근사화의 종료 여부를 판단하기 위해 왜곡의 변동률은 이전 왜곡량 대비 개선된 왜곡 비율로서 다음과 같이 비교한다.

$$\left| \frac{D^{(j-1)} - D^{(j)}}{D^{(j-1)}} \right| \leq \varepsilon \quad (13)$$

즉, 미리 정의해둔 한계치(ε)이하이거나 추가된 에지 좌표의 개수가 L개 이상이 되면 원근사화를 종료한다. 만일, 이런 경우가 아니면, 5단계로 이동하고, 이때 에지 좌표의 개수를 추가하여 원 근사화 과정을 반복한다.

그림 6은 이상에서 설명한 원 근사화 과정에 단계별 설명을 위해 3단계(j=0)와 5단계(j=2)에 대한 그 결과의 예를 나타내고 있다. 에지 좌표 샘플의 개수를 원 검출과 근사화에 많이 도입할수록 실제 원에 최적화된 형태로 표현된다.

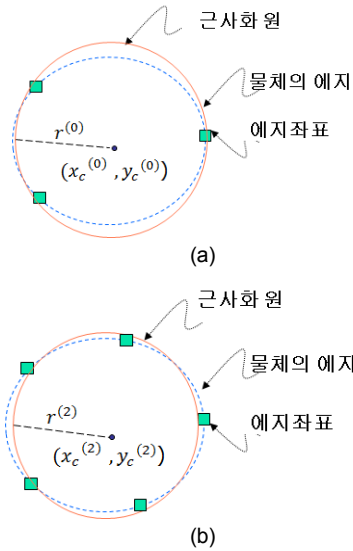


그림 6. 원 근사화의 예 (a) j=0 (b) j=2
 Fig. 6 Illustration of circle approximation (a) j=0 (b) j=2

IV. 실험결과 및 검토

4.1. OpenCV방식과의 성능 비교

제안된 방식의 유효성을 검증하기 위해 광 접속 소자 단면 영상 샘플 공간해상도 480 x 640영상 382개를 사용하여 실험을 수행하였다. 제안된 방식과 성능 비교를 위해 기존의 원 근사화 방법으로 OpenCV 라이브러리 함수인 cvHoughCircles()을 사용하여 성능을 비교하였다. 이때 CV_HOUGH_GRADIENT방법으로 원 검출 파라미터를 설정하였고, 제안방식과 OpenCV방식은 모두 정수단위 화소로 반지름과 중심을 탐색하였다. 먼저 그림 5의 이물이 있는 영상에 대해 원형 근사화한 결과를 그림 7에 나타내었다. OpenCV에 의한 결과는 광 접속 단면의 중심에서 다소 좌측으로 중심이 이동된 결과를 보이는 반면에 제안된 방식은 거의 정확하게 원형으로 근사화한 결과를 보이고 있다.

제안된 방식의 원형 정합도를 정량적으로 평가하기 위해 식(2)와 식(10)에 의해 차집합으로 이루어지는 화소의 개수(M)를 평가적으로 도입하였다. 즉, 식 (10)에 의해 이루어지는 화소 집합과 식 (2)에 의한 검은 영역 사이(B)에 차집합에 포함되는 화소의 개수를 다음 식과 같이 측정한다.

$$M = n\{(x,y) | (x,y) \in ((F^{(j)} - B) \cup (B - F^{(j)}))\} \quad (14)$$

동일한 비교를 위해 OpenCV실험 결과에서는 근사화된 원의 내부 좌표로 구성되는 집합을 식 (14)에서 $F^{(j)}$ 대신에 사용하였다.

그림 8은 그림 2(a)에서와 같이 이물이 없는 경우에 대하여 원형 근사화를 수행하고 식 (14)에 의한 차영상에 포함되는 화소의 개수를 각각 측정한 결과를 나타낸다. OpenCV방식에서는 837개의 화소가 차영상 집합에 포함되는 반면에 제안 방식은 275개의 화소만이 차영상 집합에 포함된 결과이다. 따라서 본 실험에서는 제안 방식이 원형 근사화에 따른 정합특성이 OpenCV방식의 약 3배 정도 효율적이라 볼 수 있다.

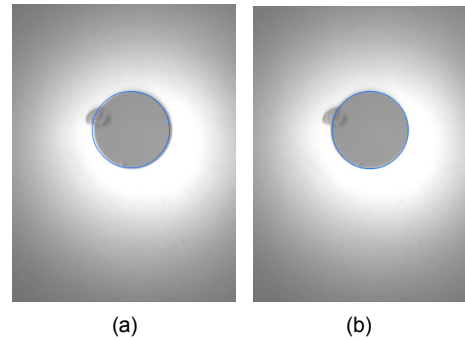


그림 7. 원 근사화에 대한 실험 결과 (a) OpenCV결과 (b) 제안방식

Fig. 7 Experimental results of circle approximation (a) OpenCV (b) proposed method

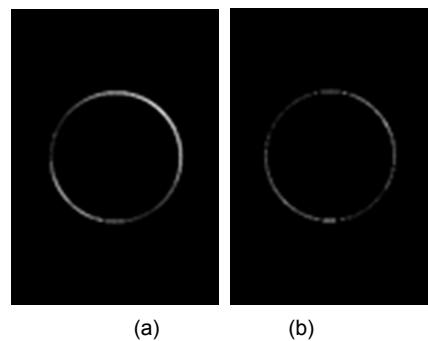


그림 8. 정상 단면에 대한 성능 비교 (a) OpenCV (M=837) (b) 제안방식 (M=275)

Fig. 8 Performance comparison of normal endfaces (a) OpenCV (M=837) (b) proposed method (M=275)

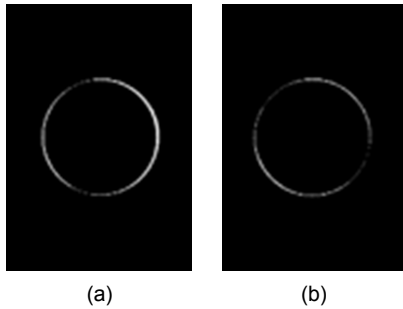


그림 9. 이물 단면에 대한 성능 비교 (a) OpenCV (M=958) (b) 제안방식 (M=326)
Fig. 9 Performance comparison of endfaces with defects (a) OpenCV (M=958) (b) proposed method (M=326)

그림 9는 그림 2(b)에서와 같이 이물이 있는 경우에 대하여 원형 근사화를 수행하고 식 (14)에 의한 차영상에 포함되는 화소의 개수를 각각 측정한 결과를 나타낸다. OpenCV방식에서는 858개의 화소가 차, compared to the Hough transform provided by the OpenCV library 영상 집합에 포함되는 반면에 제안 방식은 326개의 화소만이 차영상 집합에 포함된 결과를 보이고 있다. 이물이 있는 경우에도 OpenCV방식과 제안방식 모두 이물이 없는 정상단면에 비해 성능이 다소 저하되었으나, 두 방식간의 성능 비교에서도 제안 방식이 원형 근사화에 따른 정합특성의 효율성이 OpenCV방식의 약 3배 정도를 보이고 있다.

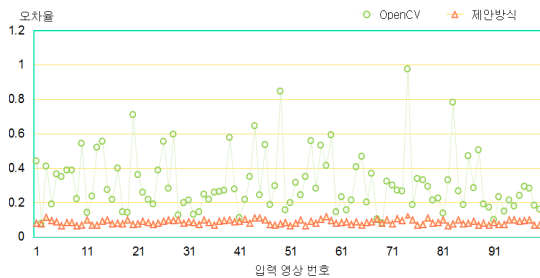


그림 10. 오차율에 따른 성능 비교
Fig. 10 Performance comparison for error rates

원의 넓이에 따른 식 (14)의 비율을 측정하기 위해 오차율을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{오차율} = \frac{M}{n\{(x,y) | (x,y) \in B\}} \quad (15)$$

즉 전체 원 내부 좌표로 표현되는 원의 넓이에 대한 차영상의 넓이로서 영상의 해상도에 상관없이 정합되는 특성을 나타낸다. 그림 10은 테스트 영상 100개에 대해 임의로 선택된 영상에 대해 OpenCV방식과 제안 방식의 오차율을 비교하고 있다. 거의 모든 영상에서 제안 방식은 OpenCV방식에 비해 우수한 성능을 보인다. 특히, OpenCV 방식은 영상의 종류에 매우 의존적이며, 성능 변화가 매우 심하게 나타나는 반면에 제안 방식은 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있음을 보인다.

그림 11은 그림 10의 결과에 대한 실험에 소요된 시간을 측정하는 것이다. 실험에 사용된 컴퓨터는 intel i7-2600 CPU @3.4 GHz, 4.0GB메모리 사양의 Windows 7 환경에서 측정되었다. 모든 입력 영상에 대해 OpenCV 라이브러리 함수에 비해 제안된 방식이 원 탐색에 소요된 시간이 짧은 것으로 알 수 있다. 즉, 제안 방식에서 에지 탐색, 원 탐색, 그리고 원 근사화에 소요되는 시간은 OpenCV 라이브러리 함수에 비해 약 1/5 정도의 시간에 구현됨을 알 수 있다.

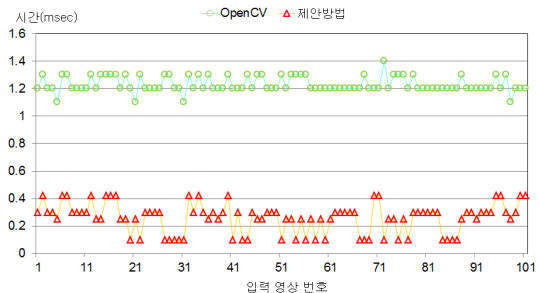


그림 11. 원 근사화 시간 비교
Fig. 11 Comparison of the time required for circle approximation

4.2. 제안 방식의 성능 특성

앞서 실행된 실험에서 식 (13)의 제어 파라미터 ϵ 값은 10^{-3} 을 사용하였고, L 의 값은 50으로 제약하였다. 실제 사용한 480 x 640 영상에서 광 접속 단면에 대한 원의 반지름은 대략 75 ~ 90 사이의 값을 가지고 있어, 실제 원의 에지 좌표의 개수가 470 ~ 560개에 다다르게 된다. 따라서 원 탐색 및 근사화 성능은 그림 6에 나타난 것과 같이 선택된 에지 좌표의 개수에 따라 변화하게 되므로 에지 좌표에 따른 식 (14)에 의한 오차율의 성능 변화를 조사하였다. 또한, 제안 방식이 사용된 에

지 좌표의 개수에 대한 오차율을 조사한 실험에서 382개의 영상 샘플에 대해 에지 좌표의 개수가 증가할수록 평균적으로 오차율이 감소하며, 그 감소되는 형태는 지수함수로 감소한다. 또한, 최소 3개의 좌표일 때보다 15개 이상이 되면 오차율의 변화도는 거의 없음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 광 접속 소자 단면 검사에 적합한 원형 탐색 및 근사화 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 광 접속 소자 단면이 원형이라는 특성을 고려하여 먼저, 단면 영상의 에지 좌표를 구하고, 구해진 에지 좌표를 이용하여 원의 중심 좌표와 반지름 값을 근사화 원의 오차율이 최소가 되도록 설계되었다. 다양한 광 접속 소자 단면 영상에 기초한 실험에서 제안한 방식은 기존의 OpenCV 라이브러리 함수에 비해 오차율을 1/3 수준으로 줄일 수 있음을 확인하였고, 또한, 원 탐색 및 근사화에 소요되는 시간은 오차율의 개선 정도에 제약을 두도록 설계함으로써 약 1/5 정도로 줄일 수 있음을 보였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 방식은 광 접속 소자 단면과 같이 단일 원형으로 되어 있는 물체의 탐색과 근사화에 매우 효율적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 방식은 실제 광 접속 소자 단면의 이물과 스크래치의 크기와 위치를 검사하는데 활용할 수 있을 것이다. 앞으로 이물의 위치와 크기를 평가함으로써 IEC 61300-3-35에서 성능 만족 기준을 만족 여부에 대한 종합적인 평가가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연공동기술개발사업(No.C0149436)과 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(No.2012H1B8A2025982)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] J. Illingworth, J. Kittler, "A Survey of the Hough Transform," *Computer Vision Graphics and Image Process*, Vol.44, pp.87-116, 1988.
- [2] P. Shetty, "Circle Detection in Images," Master Degree Thesis, San Diego State Univ., 2011.
- [3] M. Khamees, M.Al-karawi, "A Proposed Algorithm for Circle Detection Using Prewitt Edge Detection Technique," *IJDR*, Vol.4, Issue 2, pp.310-312, Feb. 2014
- [4] A. A. Rad, K. Faez and N. Qaragozlu, "Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors," *Proc. 7th Digital Image Computing: Tech. and App.*, Dec. 10-12, 2003, pp. 879-887.
- [5] L. Pan, W-S. Chu, J. M. Saragih and F. D. Torre, "Fast and Robust Circular Object Detection with Probabilistic Pairwise Voting(PPV)," *IEEE Signal Processing Letters* 18: 639-642. doi: 10.1109/lsp.2011.2166956.
- [6] <http://www.opencv.org/> opencv ver.2.4.9
- [7] IEC 61300-3-35, "Fibre Optic Interconnecting Devices and Passive Components - Basic Test and Measurement Procedures", Edition 1.0 2009-11.
- [8] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histogram," *IEEE Trans. SMC*, Vol. 9, No.1, pp. 62-66, 1979.



김진수(Jin-soo Kim)

1998년 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
1995년 ~ 2000년 : 삼성전자 선임연구원
2000년 ~ 현재 : 한밭대학교 정보통신공학과 교수
2003년 ~ 2006년 : ETRI 초빙연구원
2008년 ~ 2009년 : 텍사스 주립대학교(UTA) 교환교수
* 관심분야 : 영상인식, 디지털방송, DVC, 영상부호화, 영상통신