

허프 변환과 초점정보를 이용한 경계면 깊이 추정

Boundary Depth Estimation Using Hough Transform and Focus Measure

권대순*, 이대종*, 전명근*

Dae-Sun Kwon*, Dae-Jong Lee*, and Myung-Geun Chun*

*충북대학교 전자정보대학 전자공학부 컴퓨터정보통신연구소

† College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University

요 약

로봇 비전, 3차원 형상 모델링 그리고 모션 제어를 하기 위해 3차원 깊이 추정이 필요하다. 기존에 제안되었던 깊이 추정 방법은 렌즈와 물체사이의 거리를 변화시켜 가면서 취득된, 일련의 전체영상에 대해서 초점값을 계산하는 방법에 기초하고 있다. 그러나 이러한 방법은 전체 영상에 대해서 초점값 계산을 위한 마스크 연산을 하기에 수행 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 반해서 본 논문에서 제안하는 방법은 물체간의 깊이를 추정하는 시간을 개선하기 위하여 전체 영상을 고려하지 않고, 물체간의 경계면과 경계면 부근의 영상 정보만을 이용하여 깊이를 추정한다. 특히 직선과 원으로 구성된 물체의 경계면을 검출하기 위해서 허프 변환을 이용하였으며, 깊이 추정은 초점 정보를 이용하였다. PCB 영상을 이용하여 실험을 수행한 결과, 이전에 비해서 더욱 효과적인 깊이 추정이 가능함을 알 수 있었다.

키워드 : 깊이 추정, 초점 척도, 허프 변환, 디지털 영상처리

Abstract

Depth estimation is often required for robot vision, 3D modeling, and motion control. Previous method is based on the focus measures which are calculated for a series of image by a single camera at different distance between and object. This method, however, has disadvantage of taking a long time for calculating the focus measure since the mask operation is performed for every pixel in the image. In this paper, we estimates the depth by using the focus measure of the boundary pixels located between the objects in order to minimize the depth estimate time. To detect the boundary of an object consisting of a straight line and a circle, we use the Hough transform and estimate the depth by using the focus measure. We performed various experiments for PCB images and obtained more effective depth estimation results than previous ones.

Key Word : Depth estimation, Focus measures, Hough transform, Digital Image processing

1. 서 론

PCB의 제조공정에서 중요한 요소는 외형적인 불량을 분석하는 외형검사이다. 최근에는 반도체 분야의 극소형 IC 검사나, 자동차 차체 및 휠 형상 검사, 철강 분야에서 철판 표면 검사 등 여러 분야에서 3차원 형상의 측정이 필수적인

것으로 이미 산업 현장에서 이용되고 있다[1]. 물체의 깊이(depth) 정보는 로봇 비전, 3차원 영상, 모션 등을 위해 사용되는 매우 중요한 인자이다. 영상의 깊이를 계산하는 방법은 적외선, 초음파, 레이저, 빛의 산란 특성 등의 신호를 이용하는 방법과 영상 정보를 분석하여 초점 거리를 측정하는 방식이 있다[2]. 정밀한 측정을 하기 위해서는 레이저 등의 신호를 이용하는데, 이 방식을 사용하기 위해서는 고가의 부가장치를 사용해야 하는 단점이 있다. 비용 문제를 해결하기 위해 렌즈와 물체 사이의 거리를 변화시켜가면서 영상을 취득한 후, 영상에 대한 초점값을 계산하여 상대적 깊이를 추정한다[3]. 하지만 이러한 방법은 전체 영상에 대한 상대적 깊이 추정 연산을 해야 하므로 계산량이 많아서 수행시간이 길어지는 단점이 있다.

영상을 이용하여 상대적 깊이를 추정하도록 하기 위한 다양한 초점 계산 방법들이 제안되고 있으며, 대표적인 방법을 살펴보면, 커널 회귀법을 이용하는 방법[4], 뉴로-퍼지 모델과 초점 정보를 융합한 방법 [5], 유전자 알고리즘과 초점 정보를 융합한 방법[6], 이산 커블렛 변환을 이용하는 방법[7], 적응적 윈도우 선택 방법[8] 등이 있다. 이러한 대부

Received: Sep. 23, 2014

Revised : Nov. 13, 2014

Accepted: Feb. 12, 2015

† Corresponding author(mgchun@cbnu.ac.kr)

감사의 글 : 본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력 기술개발사업(No. C0218998)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

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.

본의 연구는 3차원 영상의 모델링에 초점을 맞추고 있다. 즉, 기존의 초점기반 3차원 형상복원방법은 공간 정의역에서 연속적으로 존재하는 전체 영상에 각각의 화소들에 대해 초점연산자를 적용하여, 상대적 깊이를 측정함으로써 계산 시간이 오래 걸리는 단점을 지니고 있다.

본 논문에서는 물체간의 깊이를 추정하는 시간을 개선하기 위하여 전체 영상을 고려하지 않고, 물체간의 경계면과 경계면 부근의 영상 정보만을 이용하여 깊이를 추정한다. 제안된 방법을 적용하기 위하여 우선 초점 거리별로 CCD 카메라를 이용하여 영상을 취득하고, 취득된 영상을 그레이 영상으로 변환한 후 변환된 각 영상들을 합산한다. 합산된 영상에서 에지를 찾아 경계면을 찾는다. 경계면을 찾기 위한 방법으로 허프 변환을 사용하였다. 허프 변환으로 경계면의 직선과 원을 검출하고, 끊어진 경계면은 최소자승법을 사용하여 연결한다. 연결된 직선에 있는 좌표 값을 찾아 해당 부분만 초점 계산해 준다. 본 논문에서 제안된 방법으로 기존의 3차원 모델링의 작업보다 계산량과 계산 시간이 단축되는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 속도 개선 알고리즘을 설명하고, 3장에서는 실험 방법 및 결과를 분석한다. 마지막 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 제안된 깊이 추정 알고리즘

2.1 깊이 추정을 위한 시스템 구성도

그림 1에서는 깊이 추정을 위한 시스템 구성도를 나타냈다. 그림 1에서 보는 바와 같이 CCD 카메라를 z축으로 이동시키면서 영상을 취득한 후, 전체 영상을 고려하지 않고 물체간의 경계면이 있는 ROI(region of interest) 영역을 검출한 후 각각의 ROI 영역에 대한 초점값을 계산한다. z축에 따른 영상을 모두 취득한 후에는 z축에 따른 초점값 정보를 이용하여 깊이를 추정하게 된다. 본 논문에서는 취득된 영상내에 깊이 차이가 있는 두 패턴간의 상대적 차이를 구하는데 목적이 있다. 따라서 초점값의 변곡점은 두 곳으로 나타날 수 있다. 초점이 하단에 위치에 있는 패턴에 맞추어져 있을 때와 초점이 상단에 위치에 있는 패턴에 맞추어져 있을 때 초점값의 변곡 특성이 나타날 수 있다.

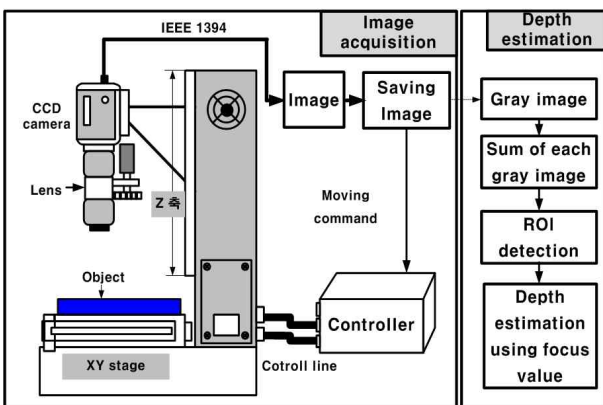


그림 1. 깊이 추정 시스템 구성도

Fig. 1. Configuration of the depth estimation control system

이에 본 논문에서는 관심 영역의 영상을 모두 취득한 후 취득된 영상의 변곡 특성을 고려하여 상대적 깊이를 추정하였다. 즉, 현재 초점값과 이전 초점값의 차이를 계산하고, 그 차이값이 양에서 음으로 변화는 시점을 정초점으로 판단하였다. 본 논문에서는 두 개의 패턴이 존재함으로써 이러한 정초점은 계산된 두 개의 정초점의 차이를 이용하여 상대적 깊이를 추정한다.

기존의 초점 계산 방법은 전체 영상에 대하여 초점값을 계산하여야 하므로 계산 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 물체간의 깊이를 추정하는 시간을 개선하기 위하여 전체 영상을 고려하지 않고, 그림 2에 나타낸 바와 같이 물체간의 경계면과 경계면 부근의 영상 정보만을 이용하여 깊이를 추정한다. 에지를 검출하기 위해 Canny와 Sobel연산자를 사용하였다. 특히 대각선 검출에서는 Canny보다 Sobel 연산자가 경계선 검출시 더 정확한 결과를 보였다. 따라서 허프 변환으로 원을 검출할 때는 Canny연산자를 사용하였고, 직선을 검출할 때는 Sobel연산자를 사용하였다.

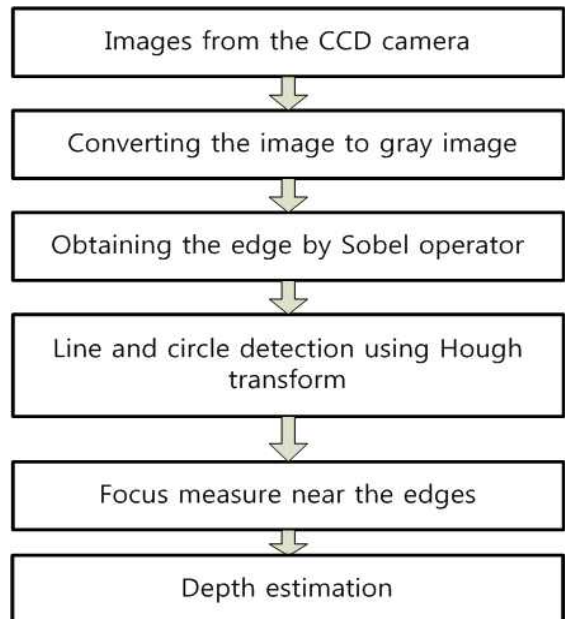


그림 2. 허프 변환과 초점정보를 이용한 깊이 추정 알고리즘

Fig. 2. Depth estimation using Hough transform and focus measure

2.2 허프 변환을 이용한 직선 및 원 검출

에지 검출 방법에 의해 검출한 에지가 희박하면 개개의 점들로 구성되는데, 이 점들을 연결하여 경계선의 직선을 만들 필요가 있다. 이 때 너무 많은 점들이 존재한다면 계산량이 많고 시간이 많이 소요되므로 비효율적이다. 이러한 경계선을 구하는 유용한 방법이 허프 변환을 사용하는 것이다. 이러한 허프 변환 방법으로는 디지털 이미지에서 인식하는 허프 변환을 위한 방법이 있다[9]. 이것은 직선의 인식에 적용되고[10][11] 이후로 원[12]과 타원[13]으로 확장되었다.

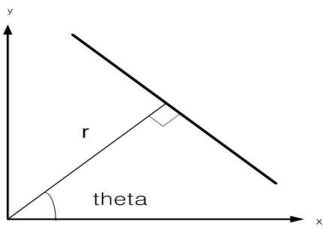


그림 3. 직선과 해당 파라미터
Fig. 3. Line and parameters

$$y\sin\theta + x\cos\theta = r \tag{1}$$

그림 3과 식 (1)에서, r 은 원점에서 그 직선까지 직교하는 거리를 말하며, θ 는 직선의 직교축과 x 축이 이루는 각도이다. 어떠한 점을 지나는 직선은 식 (1)과 같이 정의한다. 직선 검출을 위한 허프 변환은 식(1)에서 x 와 y 는 상수로 놓고 θ 와 r 은 변수로 놓는다. 식(1)은 직선 한 개에 해당하는 식이다. 따라서 상수인 어떤 점 (x,y) 를 지나면서 변수 θ 와 r 을 지나는 수많은 직선을 만든다. 여기서 모든 (x,y) 에 대하여 θ 와 r 이 같은 좌표의 횡수를 누산기 배열로 생성하고, 가장 큰 값을 찾아 그에 해당하는 (x,y) 좌표를 이어주면 그림 3에서 보는 바와 같이 직선이 검출된다.

또한, 허프 변환은 원을 검출하기 위해 식 (2)에서 보이는 원의 방정식에서 유도할 수 있다.

$$R^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2 \tag{2}$$

각 파라미터에 대한 점들의 수를 알 경우 반지름 R 과 중심값 (a,b) 인 원은 다음의 방정식과 같이 정의된다.

$$x = a + R\cos(\theta) \tag{3}$$

$$y = b + R\sin(\theta) \tag{4}$$

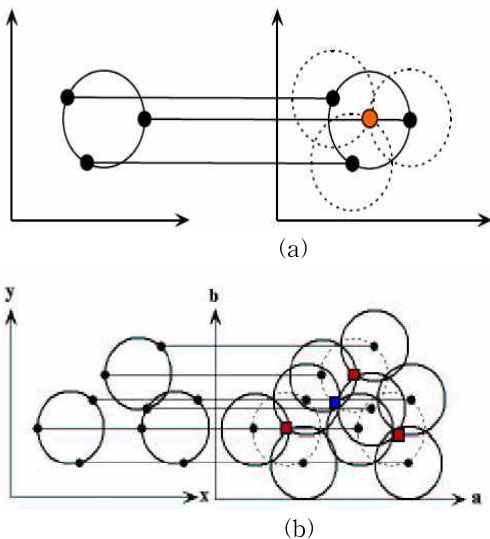


그림4. 원 검출을 위한 허프 변환
Fig. 4. Hough transform for circles detection

그림 4(a)의 오른쪽 그림에서 보듯이 원의 반지름을 알고 있는 경우라면, 원 위의 점들을 중심으로 하는 주어진 반경을 갖는 원을 그리고, 이 원들이 중첩되는 한 점이 검출하고자 하는 실제 원의 중심이 된다. 이러한 방법으로 허프 축적 배열을 이용하여 원의 파라미터 (a,b,R) 를 찾아 낼 수 있다[14].

그림 4(b)는 허프 변환을 이용하여 다수의 원을 검출하는 방법을 나타내었다. 같은 반지름이 있는 다수의 원들은 그림4(a)에서 언급한 같은 방법을 사용하여 찾을 수 있다. 실제 원들의 각 중심점들은 흐린 사각형으로 표시하였다. 다수의 원을 검출할 때 원들이 겹쳐진 부분에서 가상원이 발생 할 수 있는데 그 가상원의 중심은 진한 사각형으로 표시하였다. 이 때 가상원은 본래 영상의 원과 매칭시킴으로 제거할 수 있다.

허프 변환 후 불연속적인 직선이 여러 개 존재한다. 그러므로 이를 이어주기 위해 불연속적인 직선의 좌표 값과 최소자승법을 이용하여, 끊어진 직선을 연결한다. 최소자승법은 식 (5)에서 보는 바와 같이 모든 점에서의 잔여오차의 제곱의 합이 최소화되도록 다항식의 계수들을 정한다. 또한, 주어진 좌표 값들을 모두 통과하지 않고 전체적으로 데이터를 근사적으로 잘 나타내는 최상의 커브 피팅을 찾기 위한 가장 일반적인 방법이 최소자승법이다.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \tag{5}$$

여기서, $f(x_i)$ 는 직선에 있는 x 축 좌표 값에 대한 결과이고, y_i 는 본래 좌표 값의 y 축 값이다.

2.3 초점값을 이용한 깊이 추정

상대적 깊이를 추정하기 위해서는 취득한 영상의 초점 계산 방법을 사용한다. 본 논문에서는 대표적인 초점값 알고리즘을 적용해 보고, 고려 대상의 PCB 패턴에 효과적이고 속도개선에 좋은 방법을 적용하여 깊이 추정을 하고자 한다.

(1) SMD(Sum-module difference) 알고리즘

소벨 연산자를 이용한 기울기 크기를 초점 값으로 사용하는 Tenengrad와 달리, Jarvis가 제안한 SMD는 아래의 식과 같이 영상의 수평 방향과 수직 방향에 대한 픽셀의 차를 각각 계산하고, 그 두 값의 합을 초점 값으로 이용하는 방법이다. 이 방법은 Tenengrad와 기본 개념은 같지만 2차원 마스크를 사용하지 않는다는 점이 다르다. Tenengrad는 초점 값을 구하기 위해 2차원 마스크 영역 내에서 에지의 방향성을 구별하지 않고 기울기 크기를 합하여 계산한다. 하지만 SMD는 초점 값을 구하기 위하여 식 (6)와 식 (7)과 같이 영상의 수평, 수직 방향에서의 기울기 크기를 각각 따로 계산하여 식 (8)와 같이 합하게 된다.

$$SMD_x = \sum_x \sum_y |f(x,y) - f(x+1,y)| \tag{6}$$

$$SMD_y = \sum_x \sum_y |f(x,y) - f(x,y+1)| \tag{7}$$

$$F_{SMD} = SMD_x + SMD_y \tag{8}$$

(2) GRAE(Energy of the image gradient) 알고리즘

아래 식과 같이 x 축과 y 축의 gradient의 제곱을 통하여 에너지를 구한다.

$$GRAE = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} (f_x^2 + f_y^2) \quad (9)$$

(3) LAPE(Energy of laplacian of the image) 알고리즘

아래 식과 같이 x 와 y 에 대한 Laplacian의 에너지를 구한다.

$$LAPE = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} (f_{xx} + f_{yy})^2 \quad (10)$$

여기서

$$f_{xx} + f_{yy} = -I(x-1, y-1) - 4I(x-1, y) - I(x-1, y+1) - 4I(x, y-1) + 20I(x, y) - 4I(x, y+1) - I(x+1, y-1) - 4I(x+1, y) - I(x+1, y+1)$$

Laplacian의 경우 연산속도가 타 알고리즘에 비해 느린 단점이 있으나, 2차 미분 연산자로서 모든 방향의 에지를 검출해 내며, 다른 연산자와 비교하여 날카로운 에지를 검출한다.

(4) TENV(Tenengrad variance) 알고리즘

아래 식과 같이 영상 기울기의 분산정보를 이용한다.

$$E_{Tenev} = \sum_x \sum_y [G(x, y) - \bar{G}] \quad (11)$$

여기서 \bar{G} 는 평균값을 의미한다.

3. 깊이추정 실험 및 결과

3.1 시스템 구성

초점에 따른 영상을 취득하기 위하여 그림 5에서 나타낸 실험 장치를 이용하였으며, 위의 그림에서 보는 바와 같이 피사체를 x, y 스테이지에 위치시킨 후 z 축을 이동하여 거리별로 영상을 측정하였다.

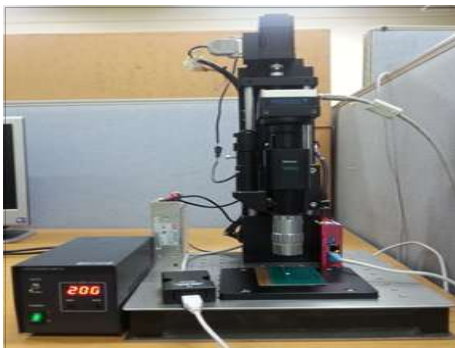


그림 5. 시스템 구성
Fig. 5. System configuration

본 논문에 사용된 z 축 제어 모터는 Fastech사의 Ezi-Sevo Plus-R을 이용하였다. 이 제품은 페루프 제어 시스템으로 모터에 장착된 엔코더에 의해 항상 현재 위치를 파악하고 있기 때문에 탈조가 발생하지 않는 서보 시스템이다. 그리고 영상처리에 있어 원하는 영상을 얻기 위해 중요한 요소가 바로 조명인데 최근에는 영상 조건에 맞는 조명 설계, 조명 세기의 제어 등에 편의상으로 LED가 많이 사용되고 있으며 이 시스템에서도 LED 측광 조명을 이용하였으며, 조명 컨트롤러를 이용해서 LED조명의 밝기를 조절할 수 있다. 영상 취득을 위해 사용된 CCD 카메라는 BASLER A101FC CCD CAMERA로 해상도는 최대 1300×1030 이며, 본 논문에서는 640×480의 해상도를 갖는 영상을 취득하였다. CCD 카메라와 컴퓨터간에는 IEEE 1394 방식을 이용하여 연결하였다. 광학계는 Mitutoyo사의 M Plan Apo Series중 10배율 광학계를 사용하였다. 마지막으로 깊이추정 연산 및 속도계산을 위해 Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU 3.20GHz, RAM 4GB 인 환경에서 MATLAB R2010a 프로그램을 사용하였다.

3.2 PCB에서의 깊이 추정

그림 6에서는 동일한 PCB내에 있는 4개의 샘플에 대한 영상을 나타냈다. 각 영상마다 상단 패턴과 하단 패턴이 존재한다. 특히 D샘플은 1개의 상단 패턴과 원과 직선으로 2개의 하단패턴이 존재한다. 상단 패턴과 하단 패턴간의 상대적 깊이는 상용의 고정밀도를 갖는 3차원 측정기를 이용하여 측정하였으며, A 샘플은 28 μ m, B 샘플은 25 μ m, C 샘플은 28 μ m, D샘플은 직선 부분은 25 μ m이고 원 부분은 28 μ m로 측정되었다.

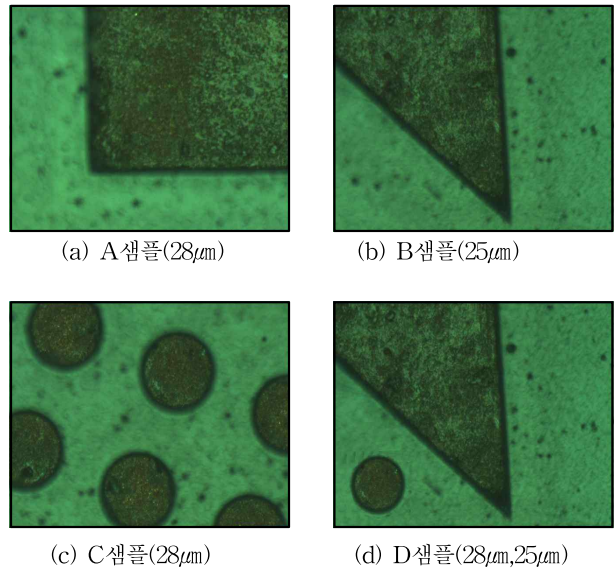


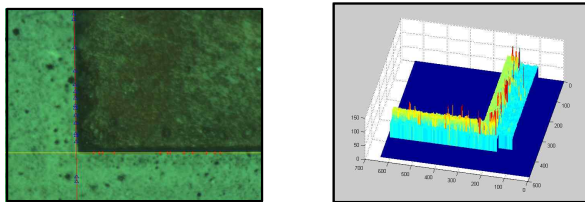
그림 6. 샘플 영상
Fig. 6. Sample images

3.3 실험 결과

영상 취득은 하부 패턴의 정초점을 기준으로 Z축을 -50 μ m에서 80 μ m까지 1 μ m씩 이동하면서 초점값을 계산하였다. 상부 패턴이 정초점이 되었을 때와 하부 패턴이 정초점이 되었을 때를 계산한다. 그리고 두 점 간의 차이를 상대적

깊이로 보고 두 패턴간의 거리정보를 추정한다. 실험 방법은 크게 4단계로 볼 수 있는데, 1단계는 CCD 카메라를 이용하여 PCB의 영상을 $1\mu\text{m}$ 의 단위로 취득한다. 2단계는 PCB 영상의 경계면 부분을 허프 변환으로 찾아 좌표값을 읽어온다. 3단계는 얻어진 좌표값 부근의 상단 패턴과 하단 패턴의 정초점을 찾고 초점 값 계산 알고리즘을 적용하여 상대적 깊이를 추정한다. 4단계로는 추정된 깊이 값으로 3차원 영상 복원을 한다. 본 논문에서는 초점 값을 이용한 PCB 3차원 영상 복원 시 계산 시간을 줄이기 위해 Canny 연산자와 Sobel 연산자, 직선과 원 검출을 위한 허프 변환, 최소 자승법을 사용하였다.

그림 7은 A 샘플의 경계선 검출과 3차원 복원을 나타내었다. 표 1은 A 샘플에 대한 상대적 깊이를 측정하여 실제 깊이와의 오차를 나타내고, 검출된 경계선 부근에서의 마스크 작업 시 처리속도와 전체 영상에 대한 처리속도를 비교하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 A 샘플은 SMD, GRAE, LAPE, TENV 방법 모두 측정 오차에서 비슷한 성능을 보였으나, 처리 시간에서는 SMD가 가장 빠르고 TENV가 다른 척도에 비해 훨씬 느렸다. 기존의 전체 화면에 대하여 마스크 작업을 진행하는 것보다 제안된 방법으로 경계선 부근에서 마스크 작업을 진행하는 것이 처리 속도에서 약 3배 이상 빠르다는 것을 알 수 있다. 경계선을 검출하기 위해 허프 변환과 최소 자승법을 이용하므로 마스크 작업을 하기에 경계선 검출을 위한 연산 시간이 필요하나 2초에서 3초 사이므로 전체 연산시간에 크게 영향을 미치지 않는다. 한편 측정 오차는 기존의 방법[3]과 거의 동일하게 나옴을 알 수 있었다.



(a) 경계선 검출 (b) 3차원 복원
그림 7. A 샘플의 경계선 검출 및 3차원 복원
Fig. 7. A sample of edge detection and 3D reconstruction

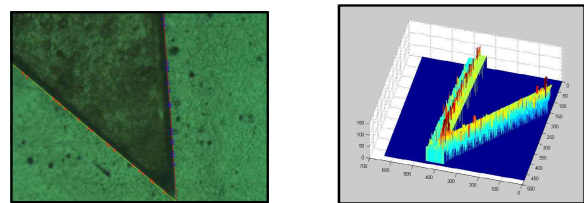
표 1. A 샘플의 측정 오차 및 처리속도 비교
Table 1. Measurement error and Speed comparison for A sample

Method	Speed		Measurement error	
	Previous method[3]	Proposed method	Previous method [3]	Proposed method
SMD	6.32 sec	1.52 sec	$5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$
GRAE	9.43 sec	2.33 sec	$5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$
LAPE	79.06 sec	19.19 sec	$5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$
TENV	148.56 sec	37.03 sec	$6\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$

그림 8은 B 샘플로 그림 8에서 보는 바와 같이 두 경계선이 직각이 아닌 대각선 방향으로 있는 경계선 검출을 나타내었다. 표 2를 보면 제안된 방법이 각 연산 방법에서 3

배이상 빠르다는 것을 알 수 있다. SMD가 처리속도가 가장 빠르고 TENV가 가장 느렸다. 하지만 SMD는 측정오차가 가장 컸고, 3차원 복원시에도 잡음이 가장 많이 나왔다. 측정 오차로 보면 GRAE와 LAPE가 우수하나 처리 속도에서 GRAE가 LAPE보다 약 9배정도 빠르다. 따라서 GRAE가 처리속도와 측정 오차 면에서 다른 척도에 비해 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

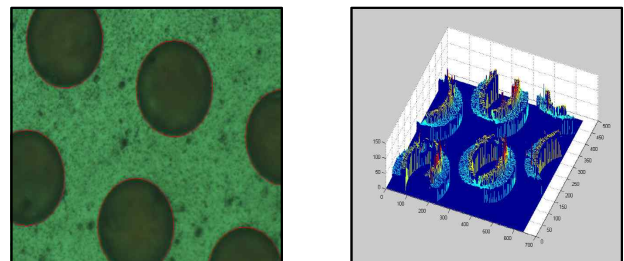
그림 9(a)는 허프 변환을 이용하여 영상에서 원의 경계선을 검출한 것을 나타낸다. 그림 9(b)는 원 경계선 부근에서의 3차원 복원을 나타낸다. 표 3을 보면 다른 샘플들에 비해 처리속도가 2배이상 빨라진 것을 알 수 있는데 이는 다른 샘플에서는 직선의 경계선이 2개 이상 있고 수직인지 수평인지에 대한 마스크 작업을 하는 방향이 달라진다. 이에 대한 연산은 원 검출만 하는 것에 비해 처리속도가 느리므로 다수의 원이더라도 원만 검출하는 것이 처리 속도가 빨랐다. 표 3에서 보듯이 처리 속도와 측정 오차를 종합하여 보면 GRAE가 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.



(a) 경계선 검출 (b) 3차원 복원
그림 8. B 샘플의 경계선 검출 및 3차원 복원
Fig. 8. B sample of edge detection and 3D reconstruction

표 2. B 샘플의 측정 오차 및 처리속도 비교
Table 2. Measurement error and Speed comparison for B sample

Method	Speed		Measurement error	
	Previous method[3]	Proposed method	Previous method [3]	Proposed method
SMD	6.30 sec	1.52 sec	$13\mu\text{m}$	$12\mu\text{m}$
GRAE	9.43 sec	2.33 sec	$11\mu\text{m}$	$11\mu\text{m}$
LAPE	79.10 sec	18.81 sec	$8\mu\text{m}$	$8\mu\text{m}$
TENV	148.32 sec	38.23 sec	$12\mu\text{m}$	$11\mu\text{m}$



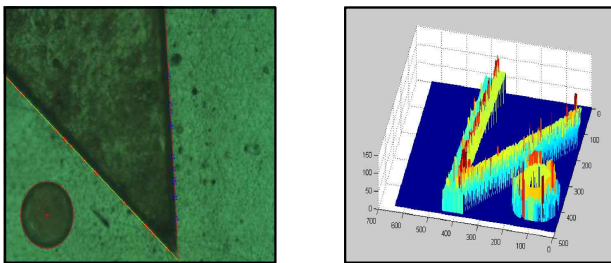
(a) 경계선 검출 (b) 3차원 복원

그림 9. C 샘플의 경계선 검출 및 3차원 복원
Fig. 9. C sample of edge detection and 3D reconstruction

표 3. C 샘플의 측정 오차 및 처리속도 비교
Table 3. Measurement error and Speed comparison for C sample

Method	Speed		Measurement error	
	Previous method[3]	Proposed method	Previous method [3]	Proposed method
SMD	6.28 sec	0.7 sec	3 μ m	3 μ m
GRAE	9.43 sec	0.97 sec	3 μ m	3 μ m
LAPE	79.20 sec	8.05 sec	3 μ m	3 μ m
TENV	148.50 sec	14.30 sec	측정 불가	측정 불가

그림 10을 보면 원과 직선이 함께 나온 영상에 대한 경계선 검출과 경계선 부근에서의 3차원 복원을 나타냈다. 표 4를 보면 원과 직선의 경계선에 관한 각각의 측정 오차를 나타내었다. 측정 오차만 보면 LAPE가 가장 우수하지만 처리 시간이 GRAE나 SMD에 비해 처리 시간이 길다. 처리 속도만 본다면 SMD가 가장 빠르다. GRAE는 처리 속도는 SMD에 가깝고, 측정 오차는 SMD보다 작다는 것을 알 수 있다.



(a) 경계선 검출 (b) 3차원 복원
그림 10. D 샘플의 경계선 검출 및 3차원 복원
Fig. 10. D sample of edge detection and 3D reconstruction

표 4. D 샘플의 측정 오차 및 처리속도 비교
Table 4. Measurement error and Speed comparison for D sample

Method	Speed		Measurement error for lines	Measurement error for circle
	Previous method[3]	Proposed method		
SMD	6.33 sec	1.60 sec	11 μ m	5 μ m
GRAE	9.45 sec	2.5 sec	8 μ m	4 μ m
LAPE	80.03 sec	19.05 sec	5 μ m	3 μ m
TENV	147.25 sec	34.90 sec	11 μ m	3 μ m

5. 결 론

본 논문에서는 허프 변환으로 직선의 경계선과 원의 경계선을 각각 검출하고 그 경계선 부근에서 SMD, GRAE, LAPE, TENV 등의 다양한 초점 측정 알고리즘을 이용하

여 상대적 깊이를 측정하고 3차원 복원을 하였다. 상대적 깊이 측정시 계산 속도를 개선하기 위해 경계선 부근에서 다양한 초점 척도 방법으로 초점값을 측정하였다. 각 샘플의 실험에서 알 수 있듯이 LAPE가 측정 오차가 가장 우수하고 그 다음이 GRAE 순으로 나타났다. 그러나 처리 속도와 측정 오차를 종합적으로 고려해보면 GRAE가 우수한 성능을 보였다는 것을 알 수 있다.

원의 경계선을 검출 할 때와 직선의 경계선을 검출할 때에 두 샘플 간의 속도 차이를 보였다. 직선의 경계선을 구할 때 수직 방향이나 수평 방향이나에 따라 마스크를 해주는 방향이 다르기 때문에 그에 따른 연산 시간이 소요된다. 따라서 원만 있는 경계선을 검출 할 때와 직선만 있는 경계선을 검출할 때 두 샘플 간의 속도 차이를 보였다. 기존의 방법으로는 전체 영상에 대한 깊이 추정 알고리즘으로 마스크 작업 시 많은 시간이 소요되었으나, 제안된 방법으로는 검출된 경계선 부근에서만 마스크 작업을 하여 3배 이상 속도를 개선하였다. 또한 기존 연구에서 직선만 검출하던 것에서 원과 직선이 함께 있더라도 경계선을 검출할 수 있어 다양한 패턴에 대하여 적용이 가능해 졌다. 향후 곡선에 대하여 검출하고 오차 성능을 개선시키기 위한 방법 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] Joon Jae Lee, "3-D Solder Paste Inspection Based on B-spline Surface Approximation," *KSIAM IT series*, Vol.10, No.1, pp 31-45, 2006.
- [2] Jong Hwan Yoon, "Development of an Autofocusing System for LCD Defect Detection," *Master thesis*, Chungbuk National University, 2011.
- [3] Ji Seok Jeong, "A Relative Depth Estimation Algorithm Using Focus Measure," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 23, No. 6, pp 527-532, 2013.
- [4] Muhammad Tariq Mahmood, Tae-Sun Choi, "3D shape recovery from image focus using kernel regression in eigenspace," *Image and Vision Computing*, Vol. 28, No 4, pp 634-643, 2010.
- [5] Aamir Saeed Malik, Humaira Nisar, Tae-Sun Choi, "A Fuzzy-Neural approach for estimation of depth map using focus," *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 2, pp 1837-1850, 2011.
- [6] Muhammad Tariq Mahmood, Abdul Majid, Tae-Sun Choi, "Optimal depth estimation by combining focus measures using genetic programming," *Information Science*, Vol. 181, No. 7, pp 1249-1263, 2011.
- [7] Rashid Minhas, Abdul Adeel Mohammed, Q.M. Jonathan Wu, "Shape from focus using fast discrete curvelet transform," *Pattern Recognition*, Vol. 44, No. 4, pp 839-853, 2011.
- [8] Ikhyun Lee, Muhammad Tariq Mahmood, Tae-Sun Choi, "Adaptive window selection for 3D shape recovery from image focus,"

Optics&Laser Technology, Vol. 45, pp 21-31, 2013.

[9] J. Illingworth, J. Kittler, "A survey of the Hough Transform," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol 44, pp 87-116, 1988.

[10] A. Rosenfeld, *Picture Processing by Computer*, Academic Press, New York, 1969.

[11] R.O. Duda, P.E. Hart, "Use of the Hough Transformation to detect lines and curves in pictures," *Communications of the Association of Computing Machinery*, Vol 15, pp 11 - 15, 1972.

[12] E.R. Davies, "A modified Hough scheme for general circle location," *Pattern Recognition Letters*, Vol 7, pp 37 - 43, 1987.

[13] R.K.K. Yip, P.K.S. Tam, D.N.K. Leung, "Modification of Hough transform for circles and ellipses detection using a 2-dimensional array," *Pattern Recognition*, Vol 25, pp 1007-1022, 1992.

[14] Chester F. Carlson, Hough circle transform, Rochester Institute of Technology: *Lecture notes*, 2004.

[15] Junheong Park, Seung-Min Park, Kwee-Bo Sim, "Occluded Object Motion Tracking Method based on Combination of 3D Reconstruction and Optical Flow Estimation," *Journal of The Korean Institute of Intelligent System*, Vol. 21, pp 537-542, 2011.

[16] Gyeongyong Heo, Young Woon Woo, Kwang-Baek Kim, "Optimal Parameter Selection in Edge Strength Hough Transform," *Journal of The Korean Institute of Intelligent System*, Vol. 17, pp 575-581, 2007.



이대종(Dae-Jong Lee)
 1995년 : 충북대학교 전기공학과 공학사
 1997년 : 충북대학교 전기공학과
 공학석사
 2002년 : 충북대학교 전기공학과
 공학박사
 2006년~2008년 : 충북대학교 충북정보기술
 사업단 초빙 조교수

관심분야 : Biometrics, Recognition, Intelligent system
 Phone : +82-43-261-2388
 E-mail : bigbell@cbnu.ac.kr



전명근(Myung-Geun Chun)
 1987년 : 부산대학교 전자공학과 공학사
 1989년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과
 공학석사
 1993년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과
 공학박사
 1993년~1996년 : 삼성전자 자동차 연구소
 선임연구원

2000년~2001년 : University of Alberta 방문 교수
 1996년~현재 : 충북대학교 전자공학부 교수
 2008년~현재 : TTA PG505 표준위원회 의장

관심분야 : Biometrics, Recognition, Soft Computing
 Phone : +82-43-261-2388
 E-mail : mgchun@cbnu.ac.kr

저 자 소 개



권대순(Dae-Sun Kwon)
 2008년 : 청주대학교 전자공학과 공학사
 2013년~ 현재 : 충북대학교 제어로봇공학과 석사과정

관심분야 : Recognition, Image Processing
 Phone : +82-43-261-2388
 E-mail : santa2358@naver.com