

PCB 검사기를 위한 웨이블릿 변환 기반의 결함 검출 방법

Wavelet Transform Based Defect Detection for PCB Inspection Machines

연 승 근* · 김 영 규** · 박 태 형†
(Seung-Geun Youn · Young-Gyu Kim · Tae-Hyung Park)

Abstract - This paper proposes the defect detection method for automatic inspection machines in printed circuit boards (PCBs) manufacturing system. The defects of PCB such as open, short, pin hole and scratch can be detected by comparing the standard image and the target image. The standard image is obtained from CAD file such as ODB++ format, and the target image is obtained by arranging, filtering and binarization of captured PCB image. Since the PCB size is too large and image resolution is too high, the image processing requires a lot of memory and computational time. The wavelet transform is applied to compress the standard and target images, which results in reducing the memory and computational time. To increase the inspection accuracy, we utilize the HH-domain as well as LL-domain of the transformed images. Experimental results are finally presented to show the performance improvement of the proposed method.

Key Words : PCB inspection machine, Wavelet transform, Defect detection, Image compression.

1. 서 론

인쇄회로기판(PCB)은 컨덴서, 저항, 반도체 등 각종 전자부품을 끼워 부품 상호간을 연결시키는 역할을 하는 부품이다. PCB는 노광, 에칭, 드릴링 등 많은 공정을 거쳐 제조되는데, 각 공정마다 다양한 종류의 검사기가 사용된다. 특히 카메라를 사용한 광학 방식으로 불량률 검출하는 검사기를 자동광학검사기(AOI)라 한다.

전자기기의 확산에 따라 PCB시장이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 제조기술이 발전하면서 선풍이 작아지고, 부착되는 부품의 밀도가 증가하며, 레이아웃이 복잡해지는 등 기존 검사기로는 정확한 검사가 어려워지고 있다. 특히 고밀도 PCB는 수 μm 크기의 결함도 검출해야 하므로 높은 해상도를 가진 영상을 사용하여야 한다. 하지만 영상의 연산량은 해상도의 제곱에 비례하므로, 높은 해상도의 영상을 사용하면 검사 속도가 느려져 실시간 검사가 불가능하다는 문제가 있다.

이전까지의 PCB 결함검출 연구로는 먼저 차영상을 이용한 방법[1-3]이 제안되었다. 결함이 존재하지 않는 표준영상과 카메라로부터 입력된 검사영상간의 차이를 이용한 방법이다. 비교적 쉽

게 결함을 검출할 수 있으나, 영상의 해상도에 따라 소요시간이 급격히 증가한다는 문제가 있다. 또 형태 기반의 세그먼트로 분할하여 검사하는 방법[4]이 제안되었다. 영상을 사각형, 원형, 얇은 선, 굵은 선의 4가지 세그먼트로 분류하여 검사를 수행하는 방법이다.

웨이블릿 변환(Wavelet Transform) 후 저주파 성분을 이용한 방법[5]은 웨이블릿 공간으로 변환한 후 검사를 수행하는 방법이다. 고해상도 영상을 처리하기에 적합한 방법이나, 저주파 영역만 사용하여 미세한 결함은 검출하지 못하는 문제가 있다. 웨이블릿 변환은 원본영상을 손실없이 압축하는 방법 중 하나로, 변환된 영상은 원본영상에 비해 용량이 크게 줄어들게 된다. 이러한 특징을 이용하여 JPEG2000 등 정지영상에서 압축 표준으로 사용되고 있고, 다해상도 분석이 가능해 고속 영상정합[6], 디지털 워터마킹[7], 자동검사장비[8-11] 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다.

본 논문은 웨이블릿 변환 후 저주파 성분과 고주파 성분을 사용하여 미세한 결함까지 검출할 수 있는 방법을 제안한다. 고해상도 영상을 웨이블릿 영역으로 변환하여 저주파 성분과 고주파 성분으로 분할한다. 저주파 성분만으로는 미세한 결함은 검출하지 못하므로, 저주파 성분과 함께 고주파 성분을 부가적으로 사용하여 결함의 검출률을 높였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 전체적인 시스템의 구성을 제안한다. III장에서 웨이블릿 변환 과정을 설명하고, IV장에서 결함영역을 추출하는 과정을 제안한다. V장에서는 실제 ODB++ 데이터로부터 추출된 실험 샘플을 이용하여 실험을 진행, 제안하는 방법의 효율성을 입증하였다.

† Corresponding Author : School of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Korea.
E-mail: taehpark@cbnu.com

* Unieye Co., Korea.

** Young-Gyu Kim: Dept. of Control and Robot Engineering, Chungbuk National University, Korea.

Received : January 5, 2017; Accepted : September 26, 2017

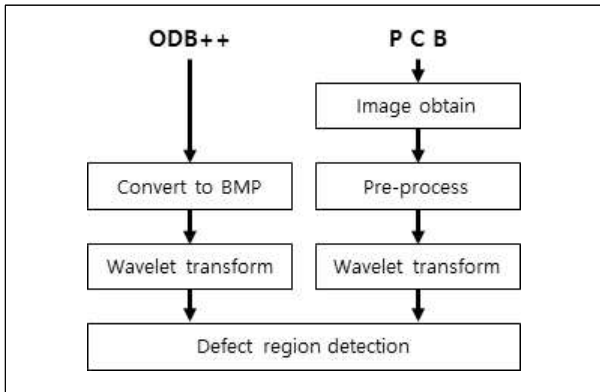


그림 1 결함 검출 시스템
Fig. 1 The defect detection system

2. 시스템 구성

표 1은 본 논문에서 검출하고자 하는 결함의 예이다. 잔동, 덧살, 쇼트 결함은 배경이어야 하는 위치에 물체가 존재하는 결함이고, 핀홀, 결손, 오픈 결함은 물체가 있어야 하는 위치에 존재하지 않는 결함이다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 결함 검출 시스템의 흐름도이다. 결함의 위치나 형태, 크기가 일정하지 않기 때문에, 결함영역 추출을 위해서 결함이 없는 표준영상과 카메라로부터 입력된 검사영상의 차영상을 이용하였다. 표준영상과 검사영상의 차영상은 두 영상의 차이가 강조되어 나타나므로, 특징이 명확하지 않은 결함을 검출할 때 많이 사용되는 방법이다. 그림 2은 표준영상과 검사영상, 차영상의 예를 보여준다. 회색 픽셀은 표준영상과 검사영상이 같으므로 결함이 존재하지 않음을 의미하고, 흰색 픽셀은 배경이어야 할 부분에 물체가 존재하는 결함을, 검은색 픽셀은 물체이어야 할 부분에 배경이 존재하는 결함을 의미한다.

표준영상은 PCB 설계파일인 ODB++에서 추출하였다. ODB++ 파일은 2008년 국제표준규격으로 등록된 PCB 설계 및 제작 파일로, 3D 데이터 등 기존의 거버 규격에서는 포함되지 않은 다수의 정보를 포함하고 있다. ODB++에 포함된 PCB 설계데이터는 벡터 형태로 저장되어 있어, 이를 비트맵으로 변환하는 과정이 필요하다. 검사영상은 PCB를 카메라로 촬영하여 얻을 수 있다. 촬영된 영상은 잡음과 왜곡이 포함되어 있으므로, 이를 제거하기

표 1 검출하고자 하는 결함의 종류

Table 1 The types of defect to be detected

Exceed copper	Spur	Short	Pinhole	Mouse bite	Open

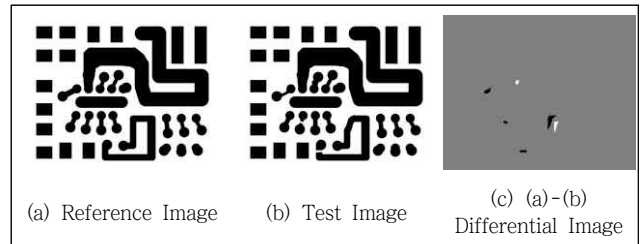


그림 2 결함영역 검출의 예.
Fig. 2 Example of defect region detection.

위해 정렬, 잡음제거, 이진화 등의 전처리를 수행한다.

고해상도 영상을 효율적으로 검사하기 위해 웨이블릿 변환을 수행하였다. 웨이블릿 변환된 영상은 수평 및 수직방향으로 저주파 성분과 고주파 성분이 분리된다. 각 영상의 크기는 원본의 1/4로 줄어들어 압축된 효과가 나타나게 되며, 연산속도가 빨라지게 된다. 비트맵으로 변환된 표준영상과, 전처리과정을 거친 검사영상을 각각 웨이블릿 변환하고, 웨이블릿 영역에서 차연산을 통해 결함을 검출한다.

3 웨이블릿 변환

고해상도 영상의 효율적인 검사를 위해 이산 웨이블릿 변환(DWT)[12]을 사용하였다. DWT는 인접한 픽셀간의 평균과 차분을 이용해 영상을 저주파 성분과 고주파 성분으로 분리하는 변환이다. 분리된 영상은 원 영상의 1/4 크기를 가지므로 영상 압축의 효과가 있고, 다해상도 분석이 가능하다는 장점이 있다. 영상 처리 분야에서 활용되는 2차원 DWT는 1차원 DWT의 확장으로, 1차원 DWT는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$y_L(k) = \sum_{n=0}^{L_n-1} x(2k-n)h(n) \tag{1}$$

$$y_H(k) = \sum_{n=0}^{L_H-1} x(2k-n)g(n)$$

여기서 $x(k)$ 는 변환할 1차원 신호의 k 번째 값을 나타내고, $y_L(k)$ 와 $y_H(k)$ 는 각각 평균성분과 차분성분, $h(n)$ 과 $g(n)$ 은

각각 평균필터와 차분필터, L_h 와 L_g 는 각 필터의 길이를 나타낸다. 사용된 필터의 종류에 따라 Haar변환[13], Daubechies변환[14] 등이 있으며, 본 논문에서는 Haar변환 필터를 이용한 DWT를 사용하였다.

2차원 DWT는 총 두 단계를 거쳐 수행된다. 첫 번째 단계에서는 수평 방향으로 1차원 DWT를 적용하여 평균성분과 차분성분을 분리하는 단계이고, 두 번째 단계는 수직 방향으로 평균성분과 차분성분을 분리하는 단계이다. 각 단계를 거칠 때마다 영상의 크기가 절반이 되므로, 웨이블릿 변환을 거친 영상은 원 영상보다 크기가 1/4로 줄어들게 된다. 웨이블릿 변환을 i 번 수행하면 수평평균-수직평균 영상 W_{LL}^i , 수평평균-수직차분 영상 W_{LH}^i , 수평차분-수직평균 영상 W_{HL}^i , 수평차분-수직차분 영상 W_{HH}^i 를 각각 얻을 수 있다. 변환 후 얻은 각 영상의 예를 그림 3에 나타내었다. 저주파영상인 W_{LL}^i 은 원본의 근사값을 가지고 있고, 고주파영상인 W_{LH}^i , W_{HL}^i , W_{HH}^i 는 원본의 오차값을 가지고 있다. 오차값은 상대적으로 작은 값을 가지고 있어, 적은 비트만으로도 저장이 가능하므로 영상 압축의 효과가 있다. 웨이블릿 변환 과정을 단계별로 표현하면 아래와 같다.

[Step 1] $M \times N$ 크기의 변환할 영상 $I(x, y)$ 와, 변환하고자 하는 웨이블릿 레벨 L 을 입력받는다.

[Step 2] $1 \leq x \leq M/2$, $1 \leq y \leq N/2$ 에 대해, 아래 식을 통해 평균 $m(x, y)$ 과 차분 $d(x, y)$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} m(x, y) &= \frac{I(2x, y) + I(2x + 1, y)}{2} \\ d(x, y) &= \frac{I(2x, y) - I(2x + 1, y)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

[Step 3] $1 \leq x \leq M/2$, $1 \leq y \leq N/2$ 에 대해, 아래 식을 통해 1레벨 웨이블릿 $W^1 = \{W_{LL}^1, W_{LH}^1, W_{HL}^1, W_{HH}^1\}$ 를 얻는다.

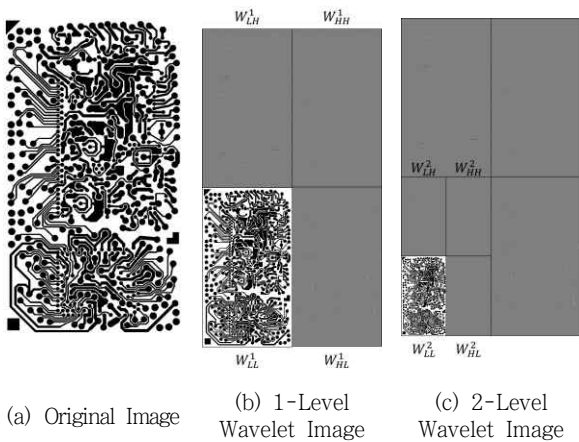


그림 3 웨이블릿 변환 결과 예

Fig. 3 Example of the result of wavelet transform

$$\begin{aligned} W_{LL}^1(x, y) &= \frac{m(x, 2y) + m(x, 2y + 1)}{2} \\ W_{LH}^1(x, y) &= \frac{m(x, 2y) - m(x, 2y + 1)}{2} \\ W_{HL}^1(x, y) &= \frac{d(x, 2y) + d(x, 2y + 1)}{2} \\ W_{HH}^1(x, y) &= \frac{d(x, 2y) - d(x, 2y + 1)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

[Step 4] W_{LL}^1 을 입력으로 해서, [Step 1~3]을 반복하여 W^2, W^3, \dots, W^L 을 차례로 얻는다.

4. 결합영역 추출

결합영역 추출을 위해, 먼저 표준영상 $I(x, y)$ 를 L 레벨 웨이블릿 변환하여 W^L 을 얻는다. 이후 카메라로부터 입력된 검사영상 $\bar{I}(x, y)$ 를 L 레벨 웨이블릿 변환하여 영상 $\overline{W^L}$ 을 얻는다. 얻은 두 웨이블릿 변환 영상을 이용해 결합영역을 추출하게 된다.

4.1 저주파 영역만 사용한 결합영역 추출

검출하고자 하는 결함은 위치와 형태, 크기가 매우 다양해서 특징을 정의하기 어렵지만, 표준영상과 검사영상의 차영상을 이용하면 결함을 쉽게 찾을 수 있다. 저주파 영역을 사용한 결합영역 추출은 아래 식과 같은 차영상을 사용하였다.

$$D_{LL}^i(x, y) = \begin{cases} +1 & \text{if } W_{LL}^i(x, y) - \overline{W_{LL}^i}(x, y) > 0 \\ -1 & \text{if } W_{LL}^i(x, y) - \overline{W_{LL}^i}(x, y) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$W_{LL}^i(x, y)$ 은 표준영상의 i 레벨 웨이블릿 변환의 저주파 영상, $\overline{W_{LL}^i}(x, y)$ 는 검사영상의 i 레벨 웨이블릿 변환의 저주파 영상이고, $D_{LL}^i(x, y)$ 는 두 영상간의 차영상이다. $D_{LL}^i(x, y) = 0$ 인 화소는 결함이 없음을 의미하고, 그 외의 경우는 결함이 존재함을 의미한다. 결합영역은 D_{LL}^i 에서 결함으로 판별된 픽셀의 집합으로 볼 수 있으며, 이때 결합영역 DR_{LL}^i 은 아래 식과 같이 정의된다.

$$DR_{LL}^i = \{(x, y) | D_{LL}^i(x, y) \neq 0\} \quad (5)$$

단, $1 \leq x \leq M/2^i$, $1 \leq y \leq N/2^i$ 이다. 저주파 영역을 사용한 결합영역 추출은 DR_{LL}^L 을 구하고, 이를 결합영역 검출 결과 DR 로 정의한다.

$$DR = DR_{LL}^L \quad (6)$$

4.2 저주파 영역과 고주파 영역을 사용한 결함영역 추출

수 픽셀 단위의 미세한 결함은 웨이블릿 변환 중 오차 신호로 분류되기 때문에, 저주파 영상에서는 이를 검출할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 저주파 영역에서 검출한 결함에 추가로 고주파 영역에서 결함을 검출한다. 그림 4은 이러한 문제의

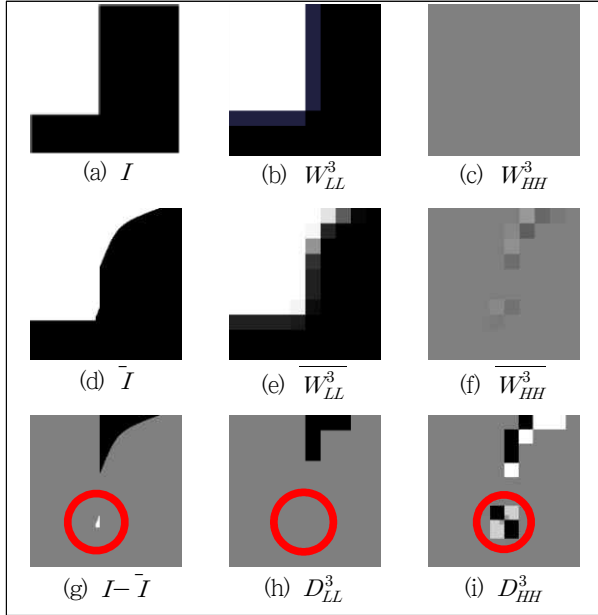


그림 4 W_{HH} 영상에서의 결함영역 추정 예
Fig. 4 Example of defect region detection in HH -image

예를 보여주고 있다. 그림 4.(a)~(c)는 표준영상인 I 와 웨이블릿 변환된 W_{LL}^3, W_{HH}^3 영상, 그림 4.(d)~(f)는 검사영상 \bar{I} 와 웨이블릿 변환된 $\bar{W}_{LL}^3, \bar{W}_{HH}^3$ 영상이고, 그림 4(g)~(i)는 각각의 차영상이다. 그림 4.(h)의 D_{LL}^3 에서는 큰 결함은 찾을 수 있지만, 작은 결함은 누락되었다. 그림 4.(i)의 D_{HH}^3 에서는 작은 결함도 찾을 수 있지만, 결함영역의 전부가 아닌 일부만 찾을 수 있다. 고주파 영역의 차는 아래 식과 같이 정의하였다.

$$D_{HH}^i(x,y) = \begin{cases} +1 & \text{if } W_{HH}^i(x,y) - \bar{W}_{HH}^i(x,y) > 0 \\ -1 & \text{if } W_{HH}^i(x,y) - \bar{W}_{HH}^i(x,y) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$W_{HH}^i(x,y)$ 은 표준영상의 i 레벨 웨이블릿 변환의 고주파 성분, $\bar{W}_{HH}^i(x,y)$ 는 검사영상의 i 레벨 웨이블릿 변환의 고주파 성분이고, $D_{HH}^i(x,y)$ 는 두 영상간의 차영상이다. HH 영역은 대각 경계에 대한 정보가 많이 포함되어 있어, 결함 판별의 문제에는 다른 영역보다 효과적이다.

고주파영역에서 검출된 결함은 실제 결함영역이 아닌 결함영역의 경계부분 이므로, 실제 결함영역을 검출하기 위해서는 추가적인 과정이 필요하다. 고주파영역에서 검출된 결함은 저주파영역에서는 이미 소멸되어 있으므로, 더 낮은 레벨의 영역에서 검출해야 한다. 또 다해상도 분석을 위해 그림 5는 LL 영역과 HH 영역을 사용한 결함영역 검출의 순서도를 나타낸다. 결함영역 검출은 아래와 같이 진행된다.

[Step 1] 웨이블릿 레벨 L 에서 DR_{LL}^L 을 구하고, 이를 식 (6)과 같이 결함영역 검출결과 DR 로 정의한다.

[Step 2] $i = L$ 에 대해 D_{HH}^i 을 구하고, 아래 식을 통해 고주파 영역에서 검출된 결함영역 DR_{HH}^i 를 얻는다.

$$DR_{HH}^i = \{(x,y) | D_{HH}^i(x,y) \neq 0\} \quad (8)$$

[Step 3] DR_{HH}^i 에서, 이미 DR 에 존재하는 영역을 제거하고, 아래 식과 같이 새로 검출된 결함영역 \widehat{DR} 으로 정의한다.

$$\widehat{DR} = \{(x,y) | (x,y) \in DR_{HH}^i \text{ and } (x,y) \notin DR\} \quad (9)$$

[Step 4-1] $\widehat{DR} \neq \emptyset$ 일 경우, $D_{LL}^{i-1}(x,y)$ 을 구하고 $(x,y) \in \widehat{DR}$ 에서 결함영역을 검출한다. HH 에서 검출된 결함은 실제 결함의 경계선 이므로, LL 영역에서 실제 결함영역을 검출해야 한다. 검출된 결함영역을 DR_{LL}^{i-1} 로 정의한다.

$$DR_{LL}^{i-1} = \{(x,y) | (x,y) \in \widehat{DR} \text{ and } D_{LL}^{i-1}(x,y) \neq 0\} \quad (10)$$

[Step 4-2] 아래 식과 같이, 검출된 모든 결함 DR 에 DR_{LL}^{i-1} 을 추가한다.

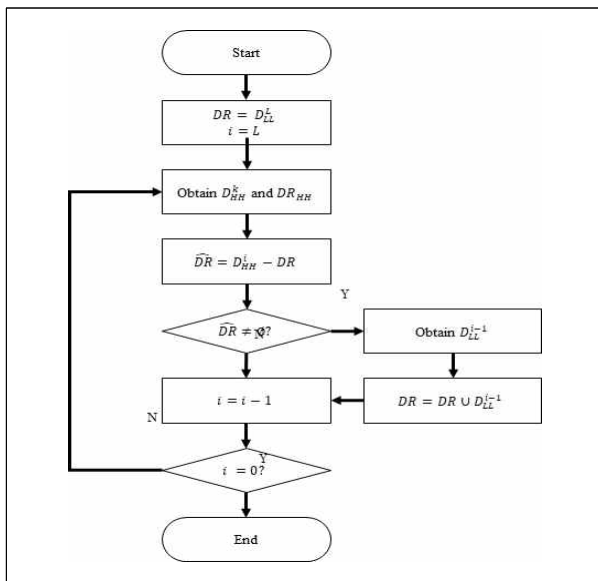


그림 5 LL 영역과 HH 영역을 사용한 결함영역 검출 순서도
Fig. 5 Flowchart of defect region detection using LL & HH domain

$$DR = DRU DR_{LL}^{i-1} \quad (11)$$

[Step 5] $i = L - 1, L - 2, \dots, 1$ 에 대해, [Step 2~4]를 반복한다.

5. 실험 결과

실험의 표준영상은 실제 PCB제작에 사용된 12개의 ODB++ 라이브러리에 포함된 총 23개 레이어 데이터를 추출하였고, 추출된 각 레이어 데이터를 비트맵 파일로 변환하여 사용하였다. 이때 비트맵 파일의 해상도는 $0.1\mu m/Pixel$ 로 하였다. 검사영상은 실제 공정에서 발생할 수 있는 불량률 고려하여 그래픽 편집 툴로 제작하여 사용하였다. 실험에 사용된 ODB++레이어의 크기와 비트맵 변환된 영상의 크기, 포함된 결함의 개수를 표 2에 나타내었다. 웨이블릿 변환을 하지 않고 원영상을 사용한 검출방법과, 웨이블릿 변환 후 LL영역만 사용한 검출방법, 웨이블릿 변환 후 LL영역과 HH영역을 모두 사용하는 제안방법을 비교 실험하였다. 검사기 사양은 Intel Core i5 3470 (3.2GHz) CPU와 8GB RAM을 가진 PC에서 Windows 7 64bit, Visual Studio 2013를 사용하였다. 웨이블릿 변환은 4레벨까지 적용하였다.

5.1 검사 소요시간

검사에 소요된 시간을 표 3에 나타내었다. 검사 소요시간 비교

표 2 PCB영상의 크기와 포함된 결함의 개수

Table 2 Image size and defects of PCB image

PCB No.	Width [mm]	Height [mm]	Image Size [MPixels]	Nnumber of Defects (N)
1	11.15	11.31	3154	50
2	11.00	11.00	3025	11
3	9.31	9.00	2095	14
4	9.00	9.00	2025	7
5	6.20	11.00	1705	7
6	6.20	11.00	1705	7
7	9.31	9.00	2095	33
8	9.00	9.00	2025	13
9	9.00	9.29	2091	37
10	9.00	9.00	2025	12
11	9.00	9.31	2095	24
12	15.27	15.27	5832	16
13	15.00	15.00	5625	13
14	6.60	6.00	990	11
15	6.90	6.30	1086	12
16	9.00	9.37	2108	19
17	9.00	9.00	2025	22
18	4.00	3.00	300	8
19	4.00	3.00	300	9
20	2.50	2.00	125	12
21	2.50	2.00	125	7
22	5.00	7.00	875	10
23	5.00	7.00	875	10

표 3 검출 방법별 소요시간

Table 3 Spent time of defect detection method

PCB No.	Original Image	Wavelet(LL)		Proposed	
	Times[s]	Times[s]	Ratio[%]	Times[s]	Ratio[%]
1	273.1	8.8	3.2	12.2	4.5
2	23.4	8.4	35.9	10.6	45.3
3	12.6	5.8	46.0	7.5	59.5
4	16.1	5.7	35.4	7.1	44.1
5	10.8	4.8	44.4	5.5	50.9
6	11.6	4.7	40.5	5.5	47.4
7	66.3	5.8	8.7	7.7	11.6
8	31.0	5.6	18.1	7.1	22.9
9	865.0	6.1	0.7	9.6	1.1
10	14.4	5.7	39.6	7.1	49.3
11	13.8	5.8	42.0	7.4	53.6
12	129.4	63.1	48.8	88.4	68.3
13	115.6	63.6	55.0	75.8	65.6
14	9.9	2.7	27.3	3.5	35.4
15	13.7	3.0	21.9	3.8	27.7
16	18.0	5.9	32.8	7.4	41.1
17	17.2	5.7	33.1	7.1	41.3
18	2.2	0.8	36.4	1.0	45.5
19	8.5	0.8	9.4	1.0	11.8
20	1.3	0.3	23.1	0.5	38.5
21	6.5	0.3	4.6	0.5	7.7
22	8.2	2.4	29.3	3.1	37.8
23	9.2	2.4	26.1	3.1	33.7
Average			28.80		36.72

표 4 검출 방법별 정확도

Table 4 Accuracy of defect detection method

PCB No.	Wavelet(LL)			Proposed		
	Number of Defects(M)	R	E	Number of Defects(M)	R	E
1	37	0.7	0.00	50	1.0	0.00
2	8	0.7	0.07	11	1.0	0.04
3	10	0.7	0.05	14	1.0	0.03
4	5	0.7	0.14	7	1.0	0.10
5	7	1.0	0.09	7	1.0	0.09
6	7	1.0	0.08	7	1.0	0.08
7	29	0.9	0.01	33	1.0	0.01
8	10	0.8	0.06	13	1.0	0.03
9	27	0.7	0.00	35	0.9	0.00
10	9	0.8	0.06	12	1.0	0.04
11	18	0.8	0.01	23	1.0	0.01
12	11	0.7	0.03	15	0.9	0.01
13	9	0.7	0.04	13	1	0.03
14	8	0.7	0.03	11	1.0	0.02
15	10	0.8	0.05	12	1.0	0.03
16	12	0.6	0.00	19	1.0	0.02
17	12	0.5	0.01	20	0.9	0.01
18	6	0.8	0.09	8	1.0	0.07
19	5	0.6	0.09	9	1.0	0.05
20	10	0.8	0.00	12	1.0	0.00
21	4	0.6	0.14	7	1.0	0.09
22	7	0.7	0.05	10	1.0	0.04
23	5	0.5	0.11	10	1.0	0.06
평균		0.73	0.053		0.99	0.037

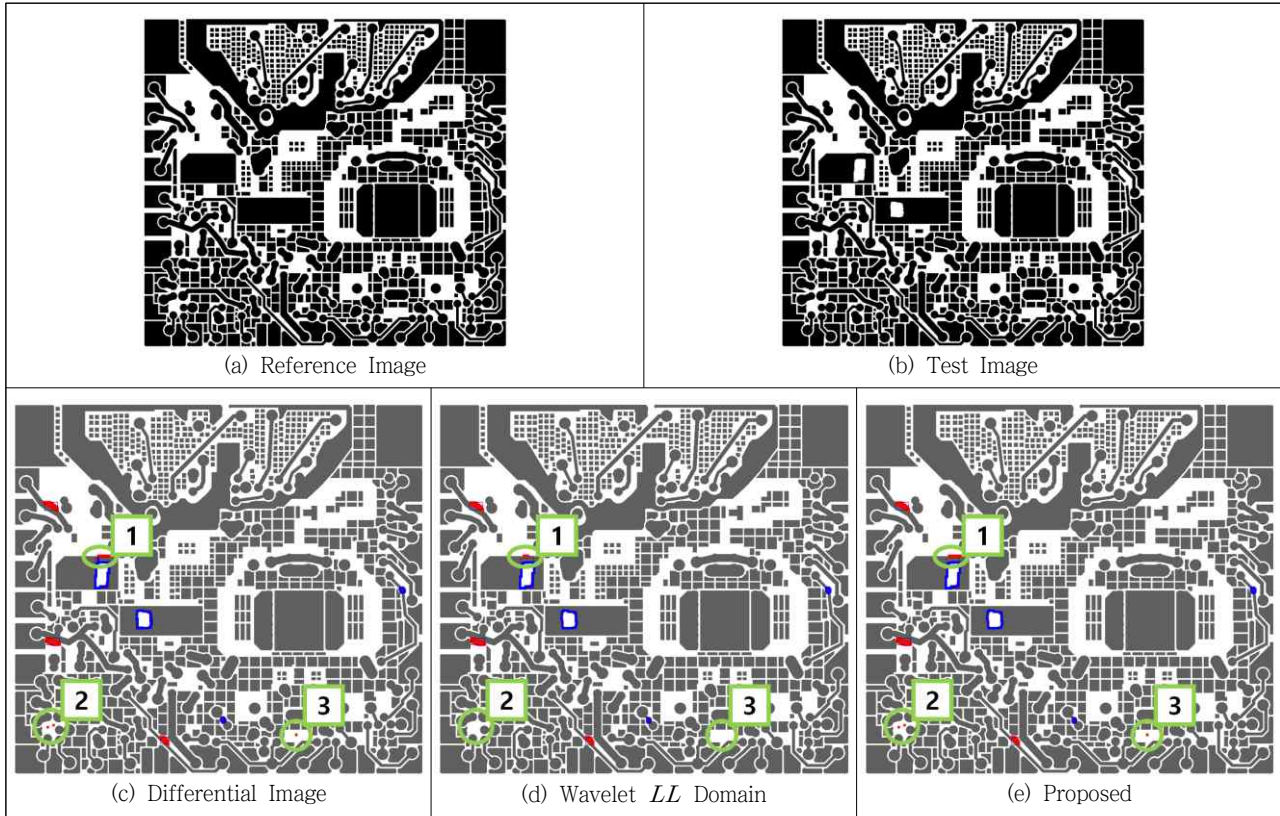


그림 6 검출 방법별 검출 결과
Fig. 6 Defect detection result of each method

는 비교방법과 제안방법을 각각 측정하였고, 원영상을 사용한 방법 대비 비율을 함께 기록하였다. 웨이블릿 변환 후 LL 영역만 사용한 방법은 평균 약 28.80%, 제안하는 방법은 평균 약 36.72%의 소요시간을 나타내었다. 제안하는 방법의 소요시간이 LL 영역만 사용하는 방법 대비 평균 약 7% 증가하였는데, 이는 누락된 결함영역을 검출하기 위해 HH 영역을 계산하는데 추가적인 시간이 소요되어 발생한 결과이다. 검사 시간은 라이브러리 크기가 클수록, 결함영역이 많을수록 오래 소요되며, 특히 결함영역이 넓을수록 시간 감소율이 큰 것으로 나타났다.

5.2 검사 정확도

검사의 정확도는 두 가지 기준으로 측정하였다. 첫 번째 기준은 검사영상에 실제 존재하는 결함의 개수 N 과, 각 방법별로 검출한 결함의 개수 M 의 비율로 정의하였으며, 결함을 누락하지 않고 검출하였음을 의미한다. 이를 수식으로 나타내면 아래 식과 같다.

$$R = \frac{M}{N} \quad (12)$$

두 번째 기준은 실제 존재하는 결함과 각 방법으로 검출한 결

함간의 유클리디안 거리로 정의하였으며, 이를 수식으로 나타내면 아래 식과 같다.

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{(x_i - x_{c_i})^2 + (y_i - y_{c_i})^2} \quad (13)$$

단, M 은 각 방법으로 검출된 결함의 개수, (x_i, y_i) 는 검출된 결함 중 i 번째 결함의 중심이고, (x_{c_i}, y_{c_i}) 는 실제 결함 중 i 번째 결함의 중심이다.

검사의 정확도를 역만 사용한 방법은 평균 $E=0.053$ 으로 나타났고, $R=0.73$ 로 약 27%의 결함을 검출하지 못하였는데, 주로 수~수십 픽셀 크기의 매우 작은 결함, 폭이나 너비가 긴 선 형태의 결함을 검출하지 못하였다. 제안하는 방법의 평균 $R=0.99$ 로 대부분의 결함을 찾았음을 알 수 있다. 평균 $E=0.037$ 로, 특히 기존 방법으로는 선 모양의 결함을 검출할 수 없었으나, 제안하는 방법으로는 검출이 가능하였다.

그림 6은 표준영상(a) 과 검사영상(b), 원영상을 이용한 방법의 결과(c), 웨이블릿 변환 후 LL 영역만 사용한 방법의 결과(d), 제안하는 방법의 결과(e)의 예를 각각 나타낸 그림이다. 검출된 결함 중 1~3번 결함부분을 확대한 영상을 표 5에 나타내었고, 결함으로 검출된 영역의 테두리를 진하게 표현하였다. 차연산을 이용한 방법에서는 모든 결함을 검출하였지만(1~3번), 웨이블릿 변

표 5 검출 방법별 결과의 차이

Table 5 Difference of result of each method

No	Differential Image	Wavelet LL Domain	Proposed
1			
2			
3			

환 후 LL영역만 사용한 방법에서는 선 모양의 결함 검출이 완전하지 않고(1번), 일부 결함은 검출에 실패 하였다(2, 3번). 반면 제안하는 방법으로는 결함의 위치와 크기를 정확하게 검출이 가능하였다.

6. 결 론

고밀도 PCB의 효율적인 검사를 위해 웨이블릿 변환을 사용하는 방법을 제안하였다. 고밀도 PCB는 수 μm 크기의 결함도 검출해야 하므로 높은 해상도의 영상을 사용해야 하지만, 기존의 방식으로는 검사시간이 오래 걸려 실시간 처리가 불가능하다. 웨이블릿 변환 영상의 LL영역만을 사용하면 고주파 성분을 고려하지 못해 결함검출능력이 크게 떨어지게 된다. 웨이블릿 변환 영상의 LL영역과 HH영역을 함께 고려하는 방법을 제안하였으며, 실험을 통하여 성능을 입증하였다.

본 연구에 사용된 검사영상은 실제 공정에서 발생할 수 있는 결함을 그래픽 편집 프로그램을 이용하여 제작한 영상으로, 실제 결함을 가진 PCB를 촬영하여 얻은 영상과는 다소 차이가 있을 수 있다. 후속 연구로 촬영된 영상의 잡음제거, 형태복원, 이진화 등의 전처리 과정 및 추출된 결함영역에서 결함의 종류를 분류하는 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2017년 스마트공장 운영설계 전문인력 양성사업, 과제번호 : N0002429)

References

- [1] H. Rau, and C. H. Wu, "Automatic optical inspection for detecting defects on printed circuit board inner layers," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, no. 9, pp. 940-946, May 2005.
- [2] B. Kaur, G. Kaur, and A. Kaur, "Detection and classification of printed circuit board defects using image subtraction method," Engineering and Computational Sciences, pp. 1-5, March 2014.
- [3] P. C. Chang, L. Y. Chen, and C. Y. Fan, "A case-based evolutionary model for defect classification of printed circuit board images," Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 19, no. 2, pp. 203-214, Apr 2008.
- [4] S. H. I. Putera, S. F. Dzafaruddin, and M. Mohamad, "MATLAB based defect detection and classification of printed circuit board," Proc. of Digital Information and Communication Technology and it's Applications, pp. 115-119, May 2012.
- [5] Z. Ibrahim, S. Al-Attas, and Z. Aspar, "Model-based PCB inspection technique using wavelet transform," Proc. of the 4th Asian Control Conference, 2002.
- [6] H. J. Cho, and T. H. Park, "Wavelet transform based image template matching for automatic component inspection," Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, vol. 50, no. 9, pp. 1033-1039, Oct 2010.
- [7] C.V. Serdean, M.K. Ibrahim, A. Moemeni, and M.M. Al-Akaidi, "Wavelet and multiwavelet watermarking," Image Processing, IET, vol. 1, no. 2, pp. 223-230, Jun 2007.
- [8] Z. Kang, C. Yuan, and Q. Yang, "The fabric defect detection technology based on wavelet transform and neural network convergence," Conf. on Information and Automation, pp. 597-601, 2013.
- [9] S. G. Kim, Y. J. Lee, J. H. Yoon, H. You, B. G. Lee, and J. J. Lee, "Defect Detection of Flat Panel Display Using Wavelet Transform," Journal of Korean Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 10, no. 1, pp. 47-60, Aug. 2006.
- [10] C. H. Yeh, F. C. Wu, W. L. Ji, and C. Y. Huang, "A Wavelet-Based Approach in Detecting Visual Defects on Semiconductor Wafer Dies," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 23, no. 2, pp. 284-292, Mar 2010.
- [11] X. Yang, G. Pang, and N. Yung, "Robust fabric defect detection and classification using multiple adaptive wavelets," Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings, vol. 152, no. 6, pp. 715-723, Dec 2005.
- [12] A. Graps, "An introduction to wavelets," IEEE Trans. of

Computational Science & Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 50-61, Aug 1995.

- [13] J. S. Cho, H. S. Kang, H. S. Kim, and S. D. Kim, Multimedia Signal Processing Fundamentals and Practice, Scitech Media, 1st Edition, pp. 156-179, 2006.
- [14] C. Vonesch, T. Blu, and M. Unser, "Generalized Daubechies Wavelet Families," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 55, no. 9, pp. 4415-4429, Sep 2007.
- [15] S. G. Yoon, and T. H. Park, "PCB Defects Inspection using Wavelet Transform", ICROS Annual Conference 2015, Daejeon, korea, pp. 101-104, May 2015.

저 자 소 개



연 승 근(Seung-Geun Youn)

2014년 충북대 전자공학부 졸업. 2016년 동 대학원 제어로봇공학과 석사. 2016년~현재 유니아이(주) 연구원, 관심분야는 로봇틱스 및 광학검사 시스템, 영상처리, 임베디드 시스템 등.



김 영 규(Young-Gyu Kim)

2015년 충북대학교 전자공학부 졸업. 2017년 동 대학원 제어로봇공학과 석사. 2017년~현재 동 대학원 제어로봇공학과 박사과정. 관심분야는 머신비전, 기계학습 등.



박 태 형(Tae-Hyung Park)

1988년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1992년 동 대학원 석사. 1994년 동 대학원 박사. 1994년~1997년 삼성테크윈(주) 정밀기기연구소 선임연구원. 1997년~현재 충북대 전자공학부 교수. 관심분야는 로봇틱스 및 자동화, 전자조립 및 검사시스템 등