반도체디스플레이기술학회지 제13권 제3호(2014년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 3. September 2014.

자동외관검사를 위한 검출위치 클러스터링 알고리즘

유 선 중†
†동양미래대학교 기계과

Detected Point Clustering Algorithm For Automatic Visual Inspection

Sun Joong Ryu†
†Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

ABSTRACT

Visual defect inspection for electronics parts manufacturing processes is comprised of 2 steps – automatic visual inspection by machine and inspection by human inspectors. It is necessary that spatial points which were detected by the machine should be adequately clustered for subsequent human inspection. This research deals with the spatial clustering algorithm for the purpose of process productivity improvement. Distribution based clustering is newly developed and experimentally confirmed to show better clustering efficiency than existing algorithm – area based clustering.

Key Words : automatic visual inspection, human inspectors, clustering

1. 서 론

반도체, 평판디스플레이, 태양전지 등 최첨단 전자부품 생산 공정의 최종 단계에서는 생산된 제품의 표면에 존재하는 오염, 변색, 상처, 이물 등 소위 외관불량(visual defects)을 검출하는 것이 반드시 필요하다. 외관불량은 전자부품의 전기적인 특성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 패키징 공정과 같은 다른 전자부품과의 결합 과정에서 신뢰성의 문제를 발생시킬 수 있다.

외관불량의 검사는 인간의 육안 관찰에 그 기준을 두고 있는데, 보통은 검사 공정 엔지니어의 누적된 경험 지식에 의해서 기준이 정해진다. 즉, 엔지니어는 전자부품의 전기적 특성 및 신뢰성에 영향을 줄 것으로 경험적으로 판단되는 외관 상의 특징을 검사기준(inspection standards)으로 명문화 한다. 일반적으로 특징적인 외관의 모양, 크기, 위치, 색깔 등을 규정하는 방법으로 검사기준이

정해진다. 일단 외관불량에 대한 검사기준이 결정되면 다수의 검사원(human inspectors)이 그 기준에 의거하여 검사 작업을 진행하게 된다. 많은 전자부품 생산에 있어서 수십 ~수백명의 검사원으로 구성된 별도의 외관검사 공정을 운영하는 것이 보통이다.[3]

그런데 최근 들어 검사원에 의해 이루어지던 외관불량 검사가 자동외관검사 장비(automatic visual inspection machine)를 사용하는 방법으로 급격히 대체되고 있다. 자동외관검사 장비는 제품의 외관을 특화된 카메라 및 조명으로 구성된 광학 모듈로 촬영한 후 그 영상을 비젼 알고리즘의 소프트웨어 모듈로 처리하여 불량을 자동 검출하는 장비이다. 자동외관검사 장비를 사용할 경우 육안 검사로는 검출이 불가능한 미세한 크기의 외관불량을 검출할 수 있을 뿐만 아니라 검사 속도도 매우 빨라서 많은 수의 검사원을 한대의 장비로 대체하는 것이 가능하다.

그러나, 외관불량의 검사기준은 기본적으로 엔지니어의 경험에 의해 정해지는 것이기 때문에 자동외관검사 장비로 불량을 검출할 경우 반드시 미검출(missing detection) 및 과검출(over detection)의 문제가 발생하게 된다. 미검출이란 엔지니어는 불량으로 판정하는 외관의 특징을 장비가 검출하지 못하는 경우이며, 반대로 과검출은 장비는 불량으로 검출하나 엔지니어는 불량이 아닌 것으로 판정하는 경우이다. 자동외관검사 장비를 개발 시 최대한 엔지니어의 검사기준에 일치하여

†E-mail : sjryu70@dongyang.ac.kr

불량이 검출되도록 광학 모듈 및 소프트웨어 모듈을 구성을 하고 있으나 미검출 및 과검출을 동시에 완전히 제거하는 것은 불가능 하다. 일반적으로 미검출을 최소화 하기 위해서는 과검출이 증가하며 그 반대도 마찬가지다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 현실적으로 외관검사 공정은 2단계로 구성하여 운영된다. 1단계로 자동외관검사 장비를 이용하여 외관불량을 검출한다. 이때 미검출이 최소화 되도록 가능하면 엄격한 조건에서 불량으로 의심되는 위치(이하 검출위치, detected point)를 모두 검출한다. 따라서 1단계의 검출위치에는 실재 불량이 아닌 과검출이 다수 포함되어 있게 된다. 다음으로 2단계에서는 1단계에의 검출위치만을 대상으로 검사원이 확인검사 (verification inspection) 함으로써 검출위치에 포함된 과검출을 제외한 실재 불량(genuine defects)만을 골라내게 된다. 이렇게 2단계로 검사하는 경우 검사원만으로 검사를 하는 경부에 비해서 검사원의 수를 줄일 수 있으며, 또한 자동외관검사 장비만으로 검사하는 경우에 비해서 미검출 및 과검출 문제를 동시에 해결할 수가 있다.

Fig. 1와 같은 2단계 외관검사에 있어서는 1단계에서 자동외관검사 장비로 검출된 검출위치 영상을 2단계 확인검사의 검사원에게 영상으로 다시 보여주는 것이 필요하다. 흔히 단일 제품 표면에는 1단계에서 여러 개의 위치가 검출되는 경우가 많이 있으며 2단계 확인검사에서는 검사자가 1단계의 검출위치를 한꺼번에 확인검사 하는 것이 어렵다. 따라서 1단계의 검출위치 중 공간상으로 인접한 위치를 몇 개씩 클러스터링 하여 그 단위로 2단계에서 확인검사하는 방법을 사용하게 된다.

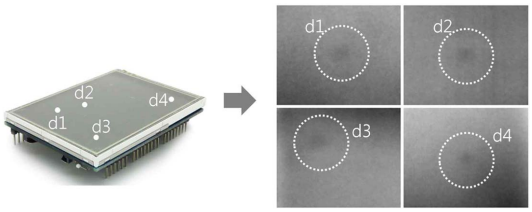

Fig. 1. Visual defects of TFT LCD panel.

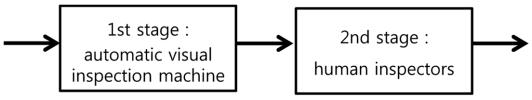

Fig. 2. 2 Step Visual Inspection.

본 연구에서는 1단계에서 검출되어 제품 표면 상에 공간적으로 위치가 분포되어 있는 검출위치들을 어떤 방법으로 클러스터링 함으로써 2단계에서 검사원이 최소의 횟수로 확인검사를 완료할 수 있는지를 연구하고자 하였다. 기존에는 제품 표면을 일정 영역으로 구획한 후 이를 기준으로 클러스터링 하는 방법 (area based clustering)을 사용하여 왔다.[1,2] 그러나 연구 결과 제품 표면의 검출위치의 공간 상 분포를 기준으로 클러스터링 하는 방법(distribution based clustering)을 사용할 경우 2단계 확인검사에서 검사원의 검사 횟수를 크게 감소 시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 검출위치 클러스터링 알고리즘

2장에서는 자동외관검사에 있어서 기존에 널리 사용되는 영역 기반 클러스터링 및 본 연구에서 새로이 제안하고자 하는 분포 기반 클러스터링의 개념과 그 알고리즘을 비교하고자 한다.

Fig. 3 은 두 방법을 비교하기 위해서 길이 가로 세로 각각 u_x, u_y 인 검사 대상 제품의 표면 이미지(product surface image) 및 1단계 자동외관검사 장비가 검출한 검출위치를 나타낸 그림이다.

각 알고리즘의 계산 상 필요에 의해서 제품의 표면 이미지는 $(n_x \times n_y)$ 개의 그리드(grid)로 분할되어 있다.

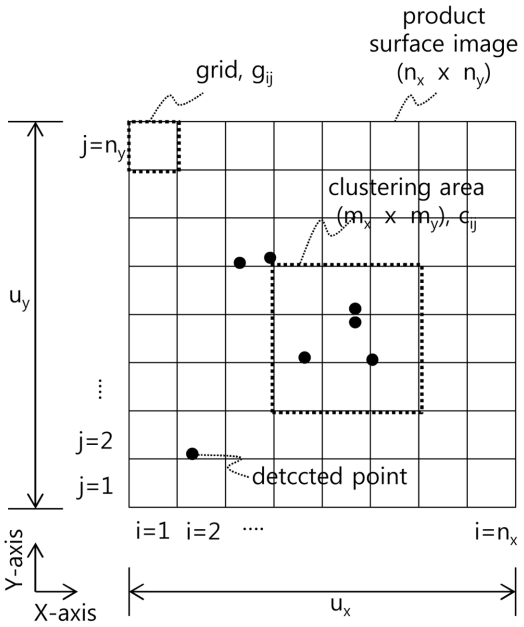

Fig. 3. Product surface and detected points.

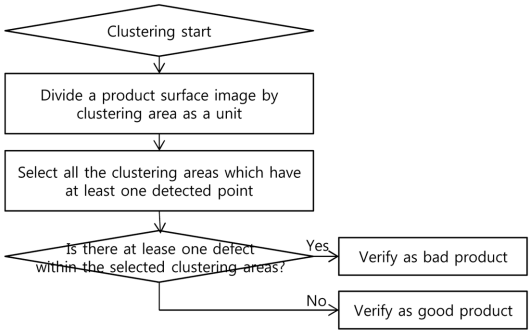

Fig. 4. Flow chart of area based clustering algorithm.

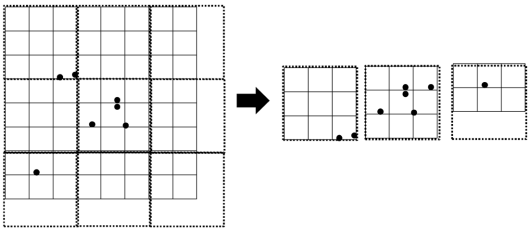

Fig. 5. Concept of area based clustering.

또한 2단계에서 검사원이 한번에 확인검사를 하는 클러스터링 영역은 ($m_x \times m_y$) 개의 인접한 그리드로 이루어져 있음이 표기되어 있다.

2.1. 영역 기반 클러스터링 (area based clustering)

Fig. 4은 영역 기반 클러스터링 알고리즘의 흐름도이다. 영역 기반 클러스터링 방법은 1단계 자동외관검사 결과 검출된 제품 표면 이미지를 클러스터링 영역의 단위로 일정하게 구획을 한 후, 검출위치가 포함된 클러스터링 영역만을 2단계의 검사원이 순차적으로 확인검사 하도록 하는 방법이다.

Fig. 5의 그림에서 제품 표면 이미지는 모두 9개의 클러스터링 영역으로 구분된다. 이때 9개의 클러스터링 영역 중 3곳에서 검출위치가 존재하므로 2단계 검사원은 최소 3회의 확인검사를 하여야 이 제품에 불량이 있는지를 판별할 수 있다.

2.2. 분포 기반 클러스터링 (distribution based clustering)

Fig. 6은 분포 기반 클러스터링 알고리즘의 흐름도이다. 분포 기반 클러스터링은 제품 표면 이미지 상에서 검출위치의 공간 분포 특히 밀집도(compactness)를 고려하는 방법이다. 즉 검출위치의 밀집도가 가장 높은 영역을 우선적으로 클러스터링하여 2단계의 검사원이

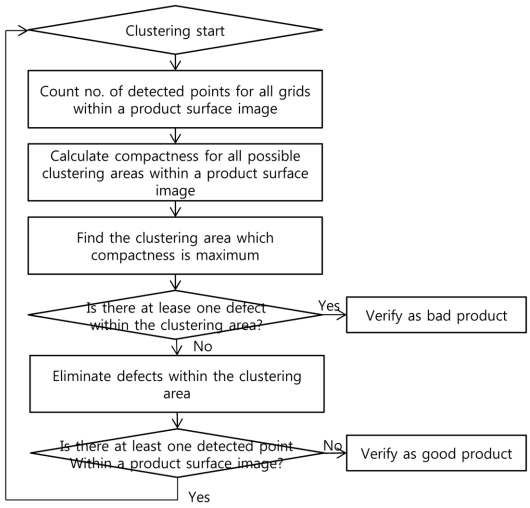

Fig. 6. Flow chart of distribution based clustering.

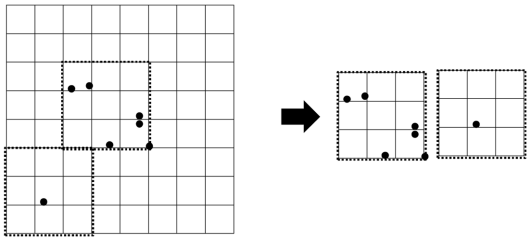

Fig. 7. Concept of distribution based clustering.

먼저 검사할 수 있도록 한다. 이때 이 클러스터링 영역에 불량이 있는 것으로 2단계 확인검사에서 판정이 되면 대상 제품을 불량품으로 분류한 후 검사를 끝마친다. 만일 첫번째 클러스터링 영영 내에 불량이 없는 것으로 확인검사에서 판정이 되면 다시 제품 표면 이미지에서 두번째로 검출위치의 밀집도가 높은 영역을 찾아 클러스터링을 한 후 이 영역에서 불량이 있는지 확인검사를 하게 된다.

이와 같은 과정은 제품 표면의 모든 검출위치에 대한 클러스터링이 끝날 때 까지 계속된다.

Fig. 7은 Fig. 5와 동일한 검출위치에 대해서 분표 기반 클러스터링을 하는 경우에 대한 그림이다. 이 경우는 검출위치의 밀집도 가장 높은 중앙 영역을 먼저 클러스터링 함으로써 2단계에서 최소 2번 만의 확인검사로 제품에 불량이 있는지를 판별할 수 있음을 보여 준다.

이하에서는 Fig. 3를 이용하여 분포 기반 클러스터링 알고리즘의 구현을 상세히 설명한다.

2단계 확인검사에서 불량 유무를 확정하게 될 이미지는 ($m_x \times m_y$) 크기의 클러스터링 영역으로 표현된다.

이 경우 제품 표면 이미지 내에서 가능한 클러스터링 영역의 개수는 $(n_x-m_x+1 \times n_y-m_y+1)$가 된다. 본 연구에서는 특정 클러스터링 영역의 검출위치의 개수를 c_{ij}로 정의할 때 c_{ij}가 최대로 되는 클러스터링 영역을 우선적으로 2단계에서 확인검사 하고자 한다. Fig. 6은 이와 같은 알고리즘의의 흐름도이다. c_{ij}를 계산하기 위하여 먼저 각 그리드 내부의 검출위치의 개수인 g_{ij}를 계산한다.

$$g_{ij} = \text{number of detected points within} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{u_x}{n_x}(i-1) \le x \le \frac{u_x}{n_x} i \\ \frac{u_y}{n_y}(y-1) \le y \le \frac{u_y}{n_y} i \end{Bmatrix}, \text{ where } \begin{Bmatrix} 1 \le i \le 1 \\ 1 \le j \le 1 \end{Bmatrix}$$

g_{ij}로부터 c_{ij}를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c_{ij} = \sum_{i-\frac{m_x-1}{2}}^{i+\frac{m_x-1}{2}} \sum_{j-\frac{m_y-1}{2}}^{j+\frac{m_y-1}{2}} g_{kl} \quad (2)$$

다음으로 c_{ij}를 최대로 하는 (i_m, j_m)을 찾아낸 후 이에 해당하는 클러스터링 영역을 2단계에서 먼저 확인검사 하도록 한다.

$$\text{find } (i_m, j_m) \text{ that maximize } c_{ij} \quad (3)$$

$$,\text{where} \begin{Bmatrix} \frac{m_x-1}{2} \le i \le n_x - \frac{m_x-1}{2} \\ \frac{m_y-1}{2} \le j \le n_y - \frac{m_y-1}{2} \end{Bmatrix}$$

2단계 검사원의 확인 결과 (i_m, j_m)에 해당하는 클러스터링 내에 불량이 있는 경우 해당 제품은 불량으로 판정되며 더 이상의 클러스터링을 중지 하고 확인검사를 종료하게 된다. 그러나, 클러스터링 영역 내에 불량이 없는 것으로 2단계 확인검사에서 판정된 경우는 두 번째로 밀집도가 높은 클러스터링 영역을 찾아야 한다. 이를 위해서는 이미 2단계에 의하여 확인이 끝난 검출위치들은 클러스터링 시 제외 되어야 한다. 따라서 다음과 같은 영역 내의 g_{ij}는 0으로 설정된다.

$$\text{setting } g_{ij} \text{ as zero} \quad (4)$$

$$,\text{where} \begin{Bmatrix} i_m - \frac{m_x-1}{2} \le i \le i_m + \frac{m_x-1}{2} \\ j_m - \frac{m_y-1}{2} \le j \le j_m + \frac{m_y-1}{2} \end{Bmatrix}$$

이제 다시 식(2), (3)을 반복함으로써 두번째로 검출위치의 밀집도가 높은 클러스터링 영역을 찾을 수 있다. 이와 같은 과정은 모든 g_{ij}가 0이 될 때까지 반복하여 계속된다.

3. 실 험

새로이 제시된 분포기반 클러스터링 알고리즘의 성능을 기존의 영역 기반 클러스터링 알고리즘과 비교하기 위하여 실제 제품을 대상으로 실험을 수행하였다. 대상 제품은 스마트폰용 카메라모듈에 사용되는 자외선 필터로서 제품의 크기는 가로-세로 5~8mm 정도 크기이다.

Table 1은 실제 제품에 대한 1단계 자동외관검사 및 2단계 인간 검사원의 확인검사를 진행한 결과를 요약한 것이다. 대상 제품은 종류에 따라 서로 다른 A ~ E의 5가지로 구분된다. Table 1의 칼럼②는 각 제품의 검사 수량이다. 각 제품 당 수백~수천개 수량에 대해서 실험을 수행하였다. Table 1의 칼럼③은 각 제품에 대해서 1단계 자동외관검사 장비를 이용한 검사 결과 확인된 검출위치(detected point)의 개수 이다. 이를 칼럼②의 숫자와 비교해 보면 1단계 자동외관검사에서 제품 1개당 수개~수십개의 검출위치가 확인된 것을 알 수 있다. 한편 Table 1의 칼럼④는 칼럼③의 검출위치

Table 1. Summary of Inspection Results

Product No. ①	No. of Products ②	No. of Detected Points by 1st Stage ③	No. of Genuine Defects by 2nd Stage ④	Hit Ratio (%) ⑤	Product Yield (%) ⑥
A	252	2030	105	5.2	58
B	1200	5172	142	2.8	88
C	216	4351	5	0.1	98
D	432	1646	50	3.0	88
E	1600	4433	168	4.2	89

Table 2. Comparisions of two clustering methods

Product No. ①	No. of Average Detected Points within Single Product ⑦	No. of Average Clusters within Single Product		Improvements (%) ⑩
		Area based clustering ⑧	Distribution based clustering⑨	
A	8.1	3.6	3.1	13.9
B	4.3	4.1	2.6	37.8
C	20.1	5.0	2.9	42.0
D	3.8	3.1	2.9	4.9
E	2.8	2.2	2.1	4.7

에 대해서 2단계 인간 검사원이 확인검사를 한 결과 실재 불량(genuine defect)으로 최종 확인된 개수이다. Table 1의 칼럼⑤ Hit Ratio는 아래 식(5)와 같이 정의되며 1단계에서 확인된 검출위치의 개수에 대해 2단계에서 최종 확인된 실재 불량의 개수 비율이다. 이 결과로부터 1단계 검출위치에 대해서 2단계에서 실재 불량으로 최종 판정되는 비율이 0.1~5.2% 에 불과함을 알 수 있다.

Hit Ratio (⑤) =
No. of Genuine Defects by 2nd Stage (④) /
No. of Detected Points by 1st Stage (③) (5)

또한 Table 1의 칼럼 ⑥은 제품 수율 (product yield)로서 아래 식 (6)과 같이 정의된다. 이로부터 실험 대상 제품의 수율이 58~89% 정도임을 알 수 있다.

Product Yield (⑥) =
No. of Genuine Defects by 2nd Stage (④) /
No. of Products (②) (6)

Table 2는 5가지 제품에 대하여 영역 기반 클러스터링 방법과 분포 기반 클러스터링 방법을 적용한 결과를 정리한 것이다. Table 2의 수치는 실험 결과를 한 개의 제품에 대한 평균 수치로 계산하여 표현된 것이다. 먼저, 칼럼⑦은 제품 1개 당 1단계 자동외관검사 결과 확인된 검출위치의 개수이다. 제품별로 평균 2.8~20.1 개의 검출위치가 확인된 것을 알 수 있다. 제품별로 검출위치의 개수에 큰 차이가 나는 주된 이유는 공정상의 이유로 제품별로 1단계 자동외관검사 장비의 검사기준을 다르게 가져가기 때문이다. 즉 중요 제품의 경우 상대적으로 일반 제품에 비하여 검사기준을 강화하여 조금이라도 불량 의심되는 경우 모두 검출되도록 하고 있다.

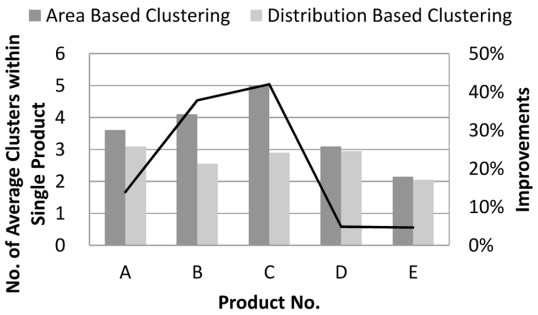

Fig. 8. No. ave. clusters within single product.

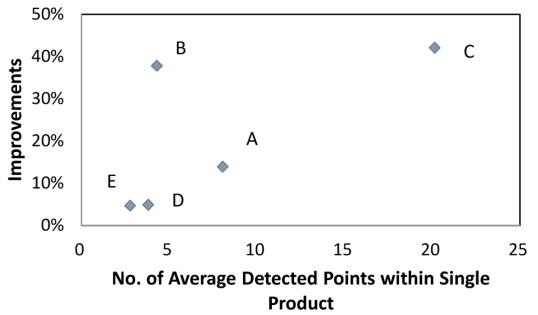

Fig. 9. Improvements.

칼럼⑧, ⑨ 는 각각 영역 기반 클러스터링 방법과 분포 기반 클러스터링 방법을 적용한 경우의 제품당 평균 클러스터링 개수의 수치이다. 또한 칼럼 ⑩은 영역 기반 클러스터링 기준과 비교하여 분포 기반 클러스터링을 했을 경우의 클러스터링 개수 감소 비율을 계산한 것이다. Fig. 8 은 칼럼⑧, ⑨, ⑩의 내용을 그래프로 표현한 것이다. 이 결과로부터 분포 기반 클러스터링을 적용할 경우 클러스터링 개수가 기존의 영영 기반 클러스터링 대비 4.7 ~ 42.0% 까지 감소함을 확인할 수 있다. 인간 검사원에 의해 수행되는2단계 확인검사의 검사 시간은 클러스터링 개수에 비례한다. 따라서

이상과 같은 클러스터링 개수의 감소는 2단계 확인검사 공정에서 필요한 인간 검사원수의 감소를 의미하게 되며 이는 곳 제조 생산성의 향상 또는 제조원가의 감소를 의미하게 되는 것이다.

한편, Fig. 8로부터 제품 종류별로 클러스터링 개수의 감소 비율이 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 제품 D, E의 경우 감소율이 5% 미만으로 미미한데 비하여 제품 B, C의 경우 감소율이 30% 이상이다. Fig. 9은 1단계 자동외관검사에서 확인된 검출위치의 제품당 평균 개수와 2단계에서 클러스터링 개수의 감소율에 대한 상관도 그래프이다. 이로부터 검출위치의 개수가 많을수록 감소율이 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 상관관계는 1단계 자동외관검사 시 사용하는 검출 알고리즘의 특징에 의한 것이다. 자동외관검사 장비 내부에서는 여러 가지 다양한 종류의 불량을 검출하기 위하여 여러 개의 검출 알고리즘을 병렬적으로 사용해서 제품 표면 영상을 처리한다. 따라서 물리적으로는 단일한 표면 영상이라 하더라도 여러개의 검출 알고리즘에서 해당 위치가 종복되어 검출될 수 있다. 이 경우 일정한 영역 내에 여러 개의 검출위치가 확인될 수 있게 된다. 예를 들면 제품 C의 경우 제품 당 평균 20.1 개의 검출위치가 존재하는데 이는 다른 제품을 검사하는 경우에 비하여 제품 C를 검사할 때 더 많은 종류의 검출 알고리즘을 적용하였기 때문이다. 그 이유는 공정 운영상의 이유로 중요 제품인 C의 1단계 검사기준을 강화할 필요가 있었기 때문이다.

4. 결 론

전자부품 생산 공정 중 외관불량 검사 공정은 여타 공정과 다르게 자동화된 장비만으로 진행이 불가능하며, 1단계 자동외관검사 장비와 2단계 인간 검사원이 함께 제품을 검사하는 것이 필요하다. 이와 같은 공정 구성의 특징으로 인하여 1단계 자동외관검사에서 확인된 검출위치를 특정한 방법으로 2단계 인간 검사원이 확인검사 할 수 있도록 해주는 것이 필요하게 된다. 즉, 1단계에서 장비에 의해 확인된 검출위치들을 2단계 인간 검사원이 원활히 검사할 수 있도록 적당한 크기로 클러스터링 해야 한다.

기존의 클러스터링 방법으로는 인간의 시각이 한번에 인지할 수 있는 일정 크기의 공간상의 영역을 균일하게 순차적으로 분할 한 후 각 분할 영역에 존재하는 검출위치를 클러스터링 하여 2단계 인간 검사원이 확인검사를 하는 영역 기반 클러스터링 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 이러한 클러스터링 방법을 고찰하여 기존 방법 대신 분포 기반 클러스터링 방법을 적용함으로써 공정의 생산성을 크게 향상 시킬 수 있음을 확인 하였다. 즉 제품 표면 영상을 검출위치의 밀집도를 기준으로 구분하여 이를 기준으로 검출위치를 클러스터링 하는 분포 기반 클러스터링 방법을 개발하였다.

5가지 종류의 제품을 대상으로 실험한 결과 분포 기반 클러스터링 알고리즘을 적용하는 경우 기존에 비하여 수~수십% 의 공정 생산성 향상이 가능함을 확인하여 본 연구의 타당성을 검증 할 수 있었다. 또한, 개발된 알고리즘은 특히 단위 제품당 검출 위치의 개수가 많은 경우에 그 효과가 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 특정 제품을 대상으로 한 실험 결과에 의해 검증 하였으나, 대부분의 전자부품 제조 공정에 존재하는 외관불량검사에서 동일하게 적용될 수 있다는 점에서 그 의의가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. S. P. Cunningham and S. MacKinnon “Statistical Methods for Visual Defect Metrology,” IEEE Trans. On Semiconductor Manufacturing, Vol. 11, No. 1, pp. 48-53, 1998.
2. S. Banerjee and A. Rosenfeld, “Model-based cluster analysis,” Pattern Recognit., Vol. 26, pp. 963-974, 1993.
3. K. W. Ko, Y. J. Lee, B.-W. Choi and J.-H. Kim, “Development of Automatic Visual Inspection for the Defect of Compact Camera Module,” ICCAS2005, pp. 2414-2417, 2005.

접수일: 2014년 7월 3일, 심사일: 2014년 8월 1일,
게재확정일: 2014년 8월 29일