

B-spline 표면 근사화 기반의 3차원 솔더 페이스트 검사 (3-D Solder Paste Inspection Based on B-spline Surface Approximation)

이준재, 이병국, 류재철
(Joon Jae Lee, Byoung Gook Lee, Jaechil Yoo)

요 약

최근 고집적화, 고밀도화 되어가는 첨단 디바이스와 섬세한 공정들은 SMT(surface mounting technology)에서의 더욱 까다로운 검사 항목들을 요구하고 있다. 특히, 어셈블리 생산품의 불량률의 60% 이상을 차지하는 솔더 프린팅의 검사는 이러한 추세에 대응책으로 3차원적인 검사 방식이 기존의 2차원적인 검사방식을 빠르게 대체해나가고 있다. 따라서 본 논문에서는 SMT 어셈블리 라인에서 PCB(printed circuit board)에 프린팅된 솔더 페이스트에 대한 3차원적인 검사를 자동으로 수행하는 인라인형의 고속 3차원 검사 장비 및 측정 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 3차원 데이터를 B-스플라인으로 표면을 구성한 다음 이를 기반으로 패드를 추출하고, 검사하는 알고리즘이다.

Abstract

Recently advanced device and sophisticated manufacture process by high-density, high-integration require critical inspection criteria in SMT(surface mounting technologies). Especially for solder paste which come out over 60% of inferior goods of all product, 3-dimensional inspection replaces 2-D inspection as a effectiveness substitute of this trend. Therefore this paper proposes a fast 3-D inspection system and measurement algorithm automatically inspecting 3-D solder paste of PCB in SMT assembly line. The proposed method generates 3-D surface of data using B-spline algorithm and then extracts to inspect the pad.

1. 서 론

최근 생산제품 측정의 목표가 2차원 검사에서 3차원 형상에 대한 정밀 측정을 요구되면

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2004-000-10851-0)지원으로 수행되었음.

Key words : Solder Paste, Surface Mounting Technology, Printed Circuit Board, B-spline

© THE KOREAN SOCIETY FOR INDUSTRIAL AND APPLIED MATHEMATICS, 2006

서 반도체분야에서 극소형의 IC 검사나, 자동차 차체 및 휠 형상 검사, 철강 분야에서 철판의 표면 형상 검사 등 여러 분야에서 3차원 형상의 측정이 필수적인 것으로 이미 산업현장에서 이용되고 있거나 점차 이용되고 있는 추세이다. 특히, 반도체 분야의 BGA(ball grid array), CSP(chip scale package), QFP(quad flat package)등의 IC와 같이 칩이 소형화 고집적화 됨에 따라 IC 형상의 측정과 이에 따른 공정관리가 매우 중요한 문제가 되고 있다. IC의 높이나 면적, 체적, 형상이 그 칩의 질을 결정하는 주요한 요소이기 때문에 이에 대한 검사가 필수적이다.

이러한 검사항목의 변화 추세는 최종 PCB 어셈블리 제품의 소형화, 경량화에 대한 요구를 만족시키기 위한 최선의 방안으로 인식되어 더욱 가속화되고 있다. 리드(lead) 밀도가 높은 SMD(surface mounting device)는 반도체 FAB 공정은 물론 패키징 공정 및 PCB 어셈블리 공정에서 한 차원 높은 공정 정밀도를 요구한다. Die와 기판층(substrate) 간의 연결, 패키징된 SMD 와 PCB 사이의 접합 공정에서는 미세 접합의 정확성과 신뢰성이 매우 중요한 요소로 자리잡고 있으며, 이에 따라 접합점인 웨이퍼 범프(wafer bump), 리드, 기판층 범프나 휨, PCB 솔더 패드에 대한 들뜸현상(coplanarity), 휨 등의 3D 측정이 매우 필요하게 되었다. 업계에서는 이런 검사 장비를 도입하여 도포된 솔더 페이스트의 불량률을 검출함으로써 제품의 품질에 영향을 미치는 결함을 가진 불량 PCB 를 선별하고, 측정 데이터를 데이터 베이스화하고 내장된 SPC 틀로 프린터의 공정 상태와 공정능력을 분석하며 분석 결과를 다양한 형태의 차트로 가시화하여 공정 현황에 대한 직관적인 파악과 더불어 스크린 프린터의 세팅을 위한 지침을 제시하는 것이다.

특히, SMT(Surface mounting technology) 제조공정에서 발생하는 불량률의 세 공정, 즉, 납(solder)의 프린팅, 부품의 정위치 장착, 그리고 납을 녹여서 접합하는 과정(reflowing)에서 일어난다. 검출된 납땀의 50%이상이 납의 프린팅시 일어난다고 알려져 있다. 이것은 납땀이 서로 갈라지거나, 우뚝 솟은 형태, 그리고 연결부분이 끊어지거나 서로 붙은 것들에 해당한다. 이러한 결점을 프린팅 과정에서 많은 변수와 어떻게 관련되었나를 이해하는 것이 모든 제조업자들이 맞고 있는 문제이다.

지금까지 많은 제조업자들은 납의 프린트 과정에서 문제를 해결하기 위해 두가지 방법에 의존하고 있다. 하나는 납을 녹이기 전에 납의 형상(solder paste)을 검사하는 사전검사 방법과 납을 녹여서 접합한 후에 검사하는 사후검사 방법이다. 사전검사에서 납 형상의 높이 및 체적을 측정하는 것은 결함의 수를 최소로 줄일 수 있는 중요한 부분이다. 만일 납량이 너무 많다면 두 라인이 서로 연결되며, 너무 적다면 open joints의 수가 증가한다. 더구나 BGA 같이 비교적 값이 비싼 부품이 증가함에 따라 사전검사의 중요성이 더욱 커지고 있다. 따라서 본 연구에서는 SMT 어셈블리 라인에서 스크린 프린터에 의해 PCB 에 도포된 솔더페이스트에 대한 3차원적인 검사를 자동으로 수행하는 인라인형의 고속 3차원 검사 장비를 개발을 제시한다. 여기에는 시스템의 하드웨어 구성, 3차원 비전 센서, 측정 알고리즘 및 운영 소프트웨어가 포함되며, 주요 측정항목으로는 위치 어긋남(positional offset), 솔더 페이스트간의 브릿지(bridge), 페이스트 면적, 페이스트 높이, 체적, 들뜸현상과 PCB의 휨의 3차원 검사항목이다.

납의 높이, 체적은 물론 3차원적인 형상 정보를 추출하기 위한 방법으로 점형의 레이저 빔을 2차원적으로 스캐닝하는 방법[1], 선형의 빔을 1차원적으로 주사하는 방법[2], 위상

차등을 이용하는 방법 등이[3],[4] 사용되고 있으나 현장 적용성, 속도 및 경제성을 고려하여 본 연구에서는 선형의 레이저빔을 이용하는 방법으로 개발하였다. 본 시스템은 SMT 어셈블리 라인에서 스크린 프린터에 의해 PCB(printed circuit board)에 도포(printing)된 솔더 페이스트에 대한 2차원 및 3차원적인 검사를 자동으로 수행하는 인라인형의 고속 3차원 검사 장비이다. 2차원적 검사 항목은 도포된 솔더 페이스트의 위치 어긋남(positional offset), 페이스트간의 브릿지(bridge), 페이스트 면적이며, 3차원적 검사항목은 페이스트 높이(height), 체적(volume), 들뜸(coplanarity), 기판의 휨(warpage)이다.

이러한 시스템의 사용 목적은 다음의 두 가지로 요약된다. 첫째, 도포된 솔더 페이스트의 불량률 검출함으로써 제품의 품질에 영향을 미치는 결함을 가진 불량 PCB를 선별하는 것이다. 둘째, 측정 데이터를 데이터 베이스화하고 내장된 SPC(statistical process control) 툴로 프린터의 공정 상태와 공정능력을 분석하며 분석 결과를 다양한 형태의 차트로 가시화하여 공정 현황에 대한 직관적인 파악과 더불어 스크린 프린터의 설정을 위한 지침을 제시하는 것이다.

장비의 하드웨어 및 소프트웨어는 상기 목적을 효과적으로 달성할 수 있도록 사용이 편리하면서도 다양한 기능을 제공한다. 센서로부터의 2차원 영상에서 3차원 정보를 추출하기 위한 프로그램은 영상을 획득하고 획득된 영상에서 조사된 레이저 선이 정확한 중심선을 찾는 영상처리 알고리즘과 구해진 레이저 중심선으로부터 3차원 데이터를 추출하고 다수의 레이저 빔으로부터 3차원 형상을 재구성하는 전처리 과정이 있다

다음, 얻어진 3차원 데이터로부터 부품영역에 대한 각 납 형상의 높이, 면적, 체적을 계산하는 알고리즘을 기준면으로부터 구한다. 여기서 부품의 회전, 이동, 기울어짐에 무관한 값을 얻기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하며 특히 베이스 기준면을 계산하고 이로부터 직교 거리를 구하는 과정이 매우 중요하다. 또한 이런 데이터들이 공정능력 분석을 위해 실시간으로 처리되어 구조화되고, 공정관리 프로그램으로 연결된다.

따라서 본 논문에서는 3차원 솔더페이스트 검사장치의 외형, 그리고 측정 항목 및 제안한 알고리즘에 대한 개괄적인 소개 및 기능에 대해 제시한다.

2. 시스템 구성

3차원 솔더 페이스트 검사 장치는 크게 3차원 레이저 센서부와 X-Y 이송장치를 포함한 검사용 작업대, 그리고 컴퓨터로 구성된다. 동작은 레이저 빔 발생부에서 선형 레이저 빔을 검사용 작업대 위에 있는 PCB 기판위의 SMD(surface mounting device) 납에 주사하고, 이송장치를 이동시키면서 3차원 센서로부터 영상을 획득하여 컴퓨터로 보내면 이를 컴퓨터에서 처리하여 3차원 데이터를 구한후 화면으로 표시해 준다.

3. 3차원 측정원리 및 데이터 수집

2차원 및 3차원의 모든 측정 값은 초당 14M 바이트로 출력하는 3차원 센서에서 수집된

3차원 데이터로부터 추출된다(그림 1). 검사기에 장착된 3차원 센서는 레이저 쉬트빔(sheet beam)과 고속 카메라로 구성되는 광삼각 측정 방식을 기초로 하고 있다(그림 2). 본 장비의 레이저 광삼각 측정 방식의 센서는 다양한 형태의 PCB 표면 상태 및 색상에 대하여 일관된 측정 정밀도를 보장한다.

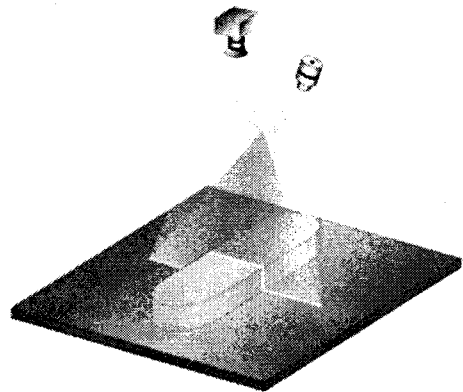
라인 스캔 카메라 사용과 동일한 방법으로 PCB 전체를 스캔하여 데이터를 획득한다. 스캔 폭은 16mm이고 X 방향 $12\mu\text{m}$, Y방향(스캔 방향) $24\mu\text{m}$ 간격으로 높이 데이터를 추출하며 초당 36cm^2 의 영역을 스캔한다.

3.1. 3차원 거리 계산

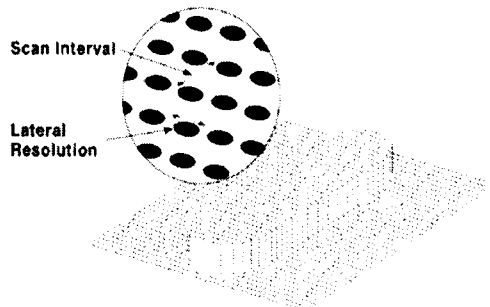
캘리브레이션(calibration) 모델 M이 영상의 좌표(i,j)를 실 좌표(y,z)으로 변환하는데 사용된다. 여기서 영상좌표(i,j)에 해당하는 실좌표 $z = f(i, j)$ 는 캘리브레이션 막대를 정밀하게 이송시키면서 실험 데이터를 일정한 간격에서 획득하고, 이에 대한 최소 오차법에 의해 캘리브레이션 변수를 얻는다. 여기서 사용된 f는 여러 가지 함수들 중에서 광학렌즈의 왜곡과 레이저 빔의 특성을 고려하여 2차함수를 선택하여 식(1)처럼 모델화 하였고, 가우스 소거법을 통해 M을 얻는다.



(그림 1) 고속 레이저 센서 외형



(그림 2) 광 삼각 측정 원리



(그림 3) 3차원 센서 공간 분해능

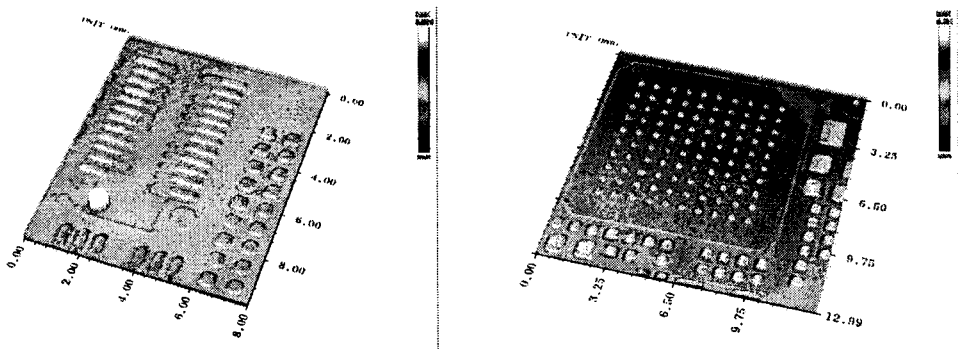
$$[x^2 \ y^2 \ xy \ x \ y \ 1] M = z \quad (1)$$

3.2. 잡음제거

전 절에서 얻은 3차원 데이터는 가로축으로는 잡음제거 필터링을 수행하였으나 역시 세로축으로 발생하는 임펄스 잡음을 제거하기 위해 y축 모폴로지 필터링을 한다.

3.3. 재샘플링에 의한 거리 영상 획득

이런 3차원 데이터는 x,y,z가 규칙적인 배열로 구성되어 있지 않다. 즉, dx, dy 가 다 같지 않으므로 이를 3차원 상에서 직접처리 하면 데이터 량의 증가와 처리 시간이 증가 된다. 따라서 이를 B-spline으로 근사화 해서 재샘플링을 거치면 규칙적인 배열의 거리 영상이 된다. 그림 4는 이렇게 해서 얻은 거리 영상을 OpenGL로 보여준 화면이다.



(a) SOP 부품 Solder Paste

(b) BGA 부품 Solder Paste

(그림 4) 부품의 3차원 스캔 영상

4. 3차원 측정항목 및 검사

측정 항목에 있어 가장 가장 중요한 높이 및 체적은 특정 기준면을 갖는 측정량이다. 대부분의 PCB는 휨을 가지고 있기 때문에 모든 PCB에 동일하게 적용되는 측정 기준면을 가져서는 안된다. 또한 PCB 상에는 실크 인쇄, 구멍, 트레이스 등의 복잡한 패턴들이 있으므로 이들을 포함하지 않은 지점들을 기준으로 하여야 한다. 이러한 요인들을 고려하여 본 장비에서는 기준면을 형성하는데 있어 적합한 지점(실크인쇄, 구멍, 트레이스 등이 배제된)으로 판단되는 곳을 미리 티칭하고 실제 측정시 이 지점들의 데이터들로부터 다층 B-Spline 선들로 구성되는 부드러운 곡면을 구하여 이를 측정 기준면으로 함으로써 PCB의 휨를 고려한 정확한 높이, 체적 값을 계산하게 된다.

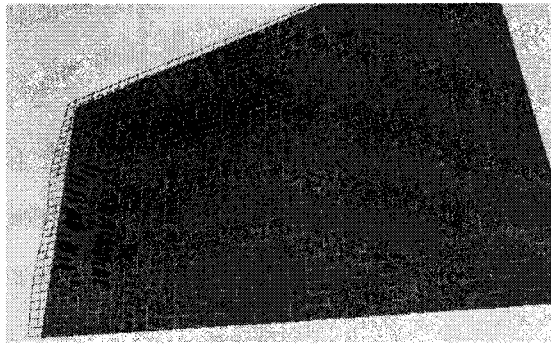
4.1. B-스플라인 함수를 이용한 측정 기준의 설정

본 연구는 1997년에 Lee, Wolberg 그리고 Shin[4]에 의해서 제안된 다층 B-스플라인

근사화(Multilevel B-spline Approximation)를 기본으로 한다. 이 방법은 기존의 균일 데이터 보간과 근사 방법에 비해 매우 빠르다. 이 빠른 알고리즘은 임의의 균일 데이터로부터 C^2 연속 조건을 만족하고 계산적으로 안정적인 매우 방대한 양의 데이터를 처리할 수 있다.

본 연구에서 사용한 스플라인 근사 기술은 de Boor와 Fix에 의해 처음으로 개발된 유사 보간법(quasi-interpolation)이다. 유사 보간 연산자는 이후에 Lyche와 Schumaker에 의해 일반화 되었다. 그것은 사용자가 필요한 정확성과 연속성을 만족하는 스플라인 근사를 생성해 내고, 이를 계층적 또는 다해상도에 해석 알고리즘에 사용된다. 본 연구에서는, 다층 B-스플라인은 균일한 데이터에서 제어 격자를 계층으로 구성하여 적용한다.

베이스 면은 학습시 부품이 장착되지 않는 평면 영역을 미리 설정한다. 다음에 3차원 영상으로부터 불규칙적인 이런 영역에 있는 데이터로부터 B-spline 곡선을 이용하여 이 데이터의 모든 점을 연결하는 부드러운 면을 얻는다[5,6]. 아래의 그림 5는 실제 3차원 영상에 임의의 일정 영역에서 데이터 점으로부터 표면을 구한 것으로 PCB의 면이 휘어져 있음을 알 수 있다.



(그림 5) PCB의 3차원 영상 및 베이스 표면

(1) B-스플라인 곡선

차수가 d 인 i -번째 B-스플라인 기저 함수는 $B_{i,d}(t)$ 로 쓰고, 그것은 다음과 같이 재귀적(recursion formula)으로 정의되어 진다:

$$B_{i,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{식 1})$$

$$B_{i,d}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k} - t_i} B_{i,d-1}(t) + \frac{t_{i+d+1} - t}{t_{i+d+1} - t_{i+1}} B_{i+1,d-1}(t)$$

B-spline 곡선 $f(t)$ 는 순차적인 $n+1$ 개의 제어 점 $\{\Phi\}_{i=0}^n$, 노트 벡터(knot vector) $\tau = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$, 그리고 B-spline 기저 함수 $\{B_{i,d}(t)\}_{i=0}^n$ 에 의해 piecewise

polynomial로 다음과 같이 정의 된다:

$$f(t) = \sum_{i=0}^n \phi_i B_{i,d}(t) \quad (\text{식 2})$$

(2) 다층 B-스플라인 근사화

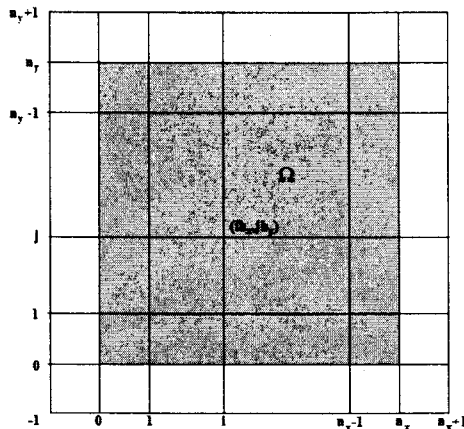
데이터의 집합 $P = \{P_i\}_{i=1}^n$, $P_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3$ 그리고 $\Omega = \{(x,y) | 0 \leq i \leq n_x, 0 \leq j \leq n_y\}$ 라 하고 도메인 Ω 안의 점 (x_i, y_i) 와 같이 xy -plane에서 사각형의 영역이 되게 한다. Φ 는 도메인 Ω 위의 제어 격자라 하자. 제어 격자 Φ 는 Ω 위의 tensor product grid이다. 데이터 점의 집합 P 를 근사하기 위하여, 여기에서 균일한 B-스플라인 함수로 구성하고 이는 제어 격자로 정의한다. 제어 격자에서의 제어 점들의 개수를 x 축에서 $m_x = n_x/h_x$ 개, y 축에서 $m_y = n_y/h_y$ 개를 사용한다. 여기서 x 축과 y 축의 제어 점들의 개수는 같다고 가정한다, $m = m_x = m_y$. 넷(knot) 간격들은 x 축에서는 h_x , y 축에서는 h_y 균일한 간격으로 정의한다. 균일한 3차 B-스플라인의 경우, 차수 $d=3$ 이고 넷 벡터들은 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_x = -\{dh_x, \dots, 0, h_x, \dots, m_x h_x, \dots, (m_x + d)h_x\}$$

$$\tau_y = -\{dh_y, \dots, 0, h_y, \dots, m_y h_y, \dots, (m_y + d)h_y\}$$

Φ_{ij} 를 제어 격자 Φ 에서 (i, j) 위치에서의 ij -번째 제어 점이라 하자. 여기에서 $i = -1, 0, 1, \dots, m_x + 1$, $j = -1, 0, 1, \dots, m_y + 1$ 이다. 근사 함수 f 는 $(x, y) \in Z$ 에서 다음과 같이 양면 삼차(bicubic) B-스플라인 곡면으로 정의한다.

$$f(x, y) = \sum_{i=-1}^{m_x+1} \sum_{j=-1}^{m_y+1} \phi_{ij} B_{i,d}(x) B_{j,d}(y) \quad (\text{식 3})$$



[그림 6] 제어격자 Ω

$B_{i,d}$ 와 $B_{j,d}$ 는 uniform cubic B-스플라인 기저 함수이고, $d=3$ 이고 삼차 B-스플라인 기저 함수의 넷 벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$B_{i,3} = \{(i-2)h_x, (i-1)h_x, (i)h_x, (i+1)h_x, (i+2)h_x\}$$

$$B_{j,3} = \{(j-2)h_y, (j-1)h_y, (j)h_y, (j+1)h_y, (j+2)h_y\}$$

선형 시스템의 수식은 각각의 제어 점들을 위한 부분 행렬의 형식으로 다음과 같이 파생되어진다:

$$\begin{bmatrix} B_{i-3,d}(0)B_{i-3,d}(0) & B_{i-3,d}(0)B_{i-2,d}(0) & \cdots & B_{i+3,d}(0)B_{i+3,d}(0) \\ B_{i-3,d}(0)B_{i-3,d}(1) & B_{i-3,d}(0)B_{i-2,d}(1) & \cdots & B_{i+3,d}(0)B_{i+3,d}(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{i-3,d}(4)B_{i-3,d}(4) & B_{i-3,d}(4)B_{i-2,d}(4) & \cdots & B_{i+3,d}(4)B_{i+3,d}(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{i-3,j-3} \\ \Phi_{i-3,j-2} \\ \vdots \\ \Phi_{i+3,j+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{00} \\ z_{01} \\ \vdots \\ z_{44} \end{bmatrix}$$

제어 점 Φ_{ij} 의 계수를 계산하기 위해서, minimum norm least-squares solution을 위한 Moore-Penrose inverse $\Phi_i = (B_i' B_i)^{-1} B_i' Z$ 가 사용되었다. 이것은 특정한 제어 점들을 위한 부분 행렬을 어떻게 파생시키는 가에 대한 예를 보여준다. 그러면 우리는 제어 점들의 목록을 얻고 Φ_{ij} 값을 위해 목록에서 가운데 것을 선택한다.

(3) 다층 B-스플라인 근사화

B-스플라인 근사화 알고리즘은 근사 함수의 모양의 부드러움(변이, variation)과 정확도 사이에 tradeoff를 발생시킨다. 이러한 tradeoff를 극복하기 위해, 다층 B-스플라인 근사화 알고리즘이 제안되었다[4]. 이 알고리즘은 제어 격자들을 계층적으로 구성하여 f_i 를 정의하고 최종 근사함수 f 를 이들 함수 f_i 의 합으로 다음과 같이 정의한다.

$$f = f_0 + f_1 + \dots + f_k = \sum_{i=0}^k f_i$$

B-스플라인 근사화 알고리즘은 먼저 주어진 데이터 Z 를, 주어진 제어 격자 Φ_0 에서 B-스플라인 근사화를 다음 장에서 설명하는 유사 보간으로 f_0 함수를 결정하고, 다음을 계산한다.

$$\Delta^1 z_c = z_c - f_0(x_c, y_c), (x_c, y_c) \in Z$$

이를 이용하여 $\Delta^1 z_c = z_c - f_0(x_c, y_c)$ 를 구성한다. 이는 초기 근사 함수 f 와 데이터의 오차에 해당하는 부분이다. 다음에는 더 세밀한 제어 격자 Φ_1 에서 B-스플라인 근사를 유사 보간법으로 f_1 함수를 결정하고, 다시 각 점 $(x_c, y_c, z_c) \in Z$ 에서 다음을 구성

한다.

$$\Delta^2 z_c = z_c - f_0(x_c, y_c) - f_1(x_c, y_c)$$

다시 이를 이용하여 $z_k = \{(x_c, y_c, \Delta^1 z_k)\}$ 을 구성하고 계속하여 f_k 함수를 결정한다.

$$\Delta^k z_c = z_c - \sum_{i=0}^{k-1} f_i(x_c, y_c) = \Delta^{k-1} z_c - f_{k-1}(x_c, y_c), \quad \Delta^0 z_c = z_c.$$

이 과정에서 개략적인 격자 Φ_0 로부터 시작해서 아래에 정의되는 넷 벡터의 집합으로 세 부적인 격자 Φ_k 까지 증가해서 계속 한다:

$$\tau_x^k = \left\{ -d \frac{h_x}{2^k}, \dots, 0, \dots, \frac{h_x}{2^k}, \dots, 2^k m_x \frac{h_x}{2^k}, \dots, (2^k m_x + d) \frac{h_x}{2^k} \right\}$$

최종 근사 함수 f 는 함수들의 합으로 정의된다. 그것은 제어 격자를 다른 것으로 refinement하는 방법으로 그것은 같은 B-스플라인 함수를 생성해 낸다. 본 연구에서는 B-스플라인 리파인먼트는 처음에는 $(n_x + 3) \times (n_y + 3)$ 개의 제어 격자 $\Phi_0 = \Phi$ 는 항상 제어 점 공간이 반인 $(2^k n_x + 3) \times (2^k n_y + 3)$ 개의 격자 Φ_k 로 refinement 되는 것을 보여준다.

(4) 유사 보간(Quasi-Interpolants)

주어진 불연속 데이터로부터 스플라인 함수를 생성하기 위한 일반적인 방법은 least square 근사이다 이는 주어진 데이터의 개수와 근사함수의 계수에 해당하는 선형 시스템의 해를 구해야만 하다. 그래서 큰 양의 데이터 스트림의 실시간 처리에 적합하지 않다. 이를 위해 이보다 더 적합하고 오직 국소적인 정보만을 사용하는 스플라인 계수를 결정하는 국소적 방법을 제안한다. 좋은 근사 속성을 보증하기 위해서 다항식을 줄이고 주어진 스플라인 공간 내에서 좀 더 바람직한 함수를 사용하는 방법이 중요하다. 본 연구에서는 제약을 줄이고 2차 및 3차 스플라인을 위한 어떠한 특정 근사 방법에 대해 논하겠다.

우리는 스플라인을 위한 베이스로 B-스플라인을 사용하고 넷 τ 와 함께 차수 d 의 i^{th} B-스플라인을 $B_{i,d} = B_{i,d,\tau}$ 라 표시하고 선형 공간에 의해 걸쳐지는 $S_{d,\tau}$ 의 이러한 B-스플라인을 $S_{d,\tau}$ 라 하겠다.

(5) Quasi-interpolants의 전반적인 구성

주어진 함수 f 에 대한 스플라인 근사의 기본적 문제는 B-스플라인 계수 $(c_i)_{i=1}^n$ 을 f 에 논리적으로 근사하는 다음과 같은 함수의 계수 c_i 를 결정하는 것이다.

$$Pf = \sum_{i=1}^n c_i B_{i,d}$$

기본적인 시도는 B-스플라인 계수들을 결정하기 위한 프로시저를 고안하는 것이다. f 가 $[a, b]$ 의 구간에서 정의되고 스플라인 공간 $S_{d,\tau}$ 가 $[a, b]$ 의 구간에서 선택된다고 가정하자(다시 말하면, $\tau = (t_j)_{j=1}^{n+d+1}$ 에서 $t_{d+1} = a$ 이고 $t_{n+1} = b$ 일 때 감소가 없다.). 우리는 k 를 고정시키고 c_k 결정을 위한 다음의 프로시저를 제안 한다:

- 1) I 가 $B_{k,d}$ 의 support와 겹치는 구간을 갖는 로컬 구간 $I = (t_\mu, t_\nu)$ 를 선택 한다 :
 $I \cap (t_k, t_{k+d+1}) \neq \emptyset$
- 2) 다음과 같은 로컬 근사 방법 P_I 를 선택 한다 : $P_I g = g$, for all $g \in S_{d,\tau,I}$.
- 3) 구간 I 에서의 함수 f 를 f_I 라 하자. $P_I f_I = \sum_{i=\mu-d}^{\nu-1} b_i B_{i,d}$ 와 같이 B-스플라인 계수 $(b_i)_{i=\mu-d}^{\nu-1}$ 가 존재하게 한다. I 가 $\text{supp } B_{k,d}$ 를 겹치는 구간이 있으므로 $\nu - d \geq k \geq \mu - 1$ 이다.
- 4) $c_k = b_k$ 로 설정한다.

c_k 를 결정할 때, 본 알고리즘은 로컬 부분구간 $I = [t_\mu, t_\nu]$ 를 자유롭게 선택할 수 있다. 근사 방법들의 보편적인 클래스는 $m_k = \nu - \mu + d$ 이고 주어진 데이터를 $x_{k,1}, \dots, x_{k,m_k}$ 를 만족하는 P_I 를 구할 수 있다.

$$\lambda_{k,j} f = f(x_{k,j}), \quad j = 1, \dots, m_k$$

여기에서, 만약

$$B_{\mu-d-1+j,d}(x_{k,j}) > 0, \quad j = 1, \dots, m_k$$

라면 우리는 어떠한 벡터 $w_k = (w_{k,j})$ 를 위한 폼

$$c_k = \lambda_{k,j} f = \sum_{j=1}^{m_k} w_{k,j} f(x_{k,j})$$

에서의 c_k 를 구할 수 있다. 동등하게, 우리는 평소와 같이, 만약 $i = k$ 이면 $\delta_{i,k} = 1$ 이고 아니면 0인 곳에서 $i = \mu - d, \dots, \nu - 1$ 인 선형 시스템

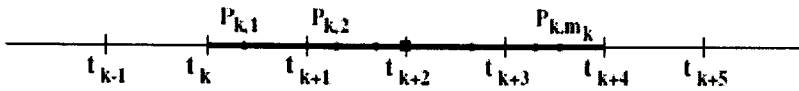
$$\delta_{i,k} = \lambda_k(B_{i,d}) = \sum_{j=1}^{m_k} w_{k,j} B_{i,d}(x_{k,j})$$

를 푸는 것에 의해서도 w_k 를 구할 수 있다. 이러한 종류의 quasi-interpolant는 [3]에서 연구되었다. 그러나, 데이터 점들 $\{x_{k,j}\}_{j=1}^{m_k}$ 는 $[t_k, t_{k+d+1}]$ 중의 하나인 부분간격 $[t_l, t_{l+1}]$ 에서 모두를 놓는 것에 제약이 있었다.

Example 1. cubic 스플라인의 경우($d=3$). 계수 c_k 를 결정하기 위해, 우리는 7개의 공간(dimension)을 가지는 로컬 스플라인을 뜻하는 간격 $I=[t_k, t_{k+4}]$ 을 선택한다,

$$S_{d,\tau,I} = \text{span}\{B_{k-3,d}, B_{k-2,d}, \dots, B_{k+3,d}\}.$$

여기에서, 데이터 점들 $\{P_{k,i}\}_{i=1}^{m_k}$, $P_{k,i} = (x_{k,i}, y_{k,i}) \in R^2$ 은 간격 $I=[t_k, t_{k+4}]$ 내에서 제한적으로 위치한다.



(그림 7) cubic 스플라인, $I=[t_\mu, t_\nu]=[t_k, t_{k+4}]$

계수 행렬:

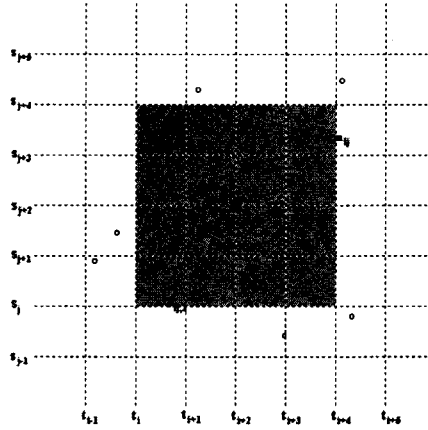
$$\begin{bmatrix} B_{k-3,3}(x_{k,1}) & B_{k-3,3}(x_{k,2}) & \dots & B_{k-3,3}(x_{k,m_k}) \\ B_{k-2,3}(x_{k,1}) & B_{k-2,3}(x_{k,2}) & \dots & B_{k-2,3}(x_{k,m_k}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{k+3,3}(x_{k,1}) & B_{k+3,3}(x_{k,2}) & \dots & B_{k+3,3}(x_{k,m_k}) \end{bmatrix}$$

두 개의 스플라인 공간의 텐서 프로덕트는 $B_{i,d}$ 와 $B_{j,d}$ 가 반복적으로 $\tau_x = (t_j)_{j=1}^{n_x+d+1}$ 과 $\tau_y = (t_j)_{j=1}^{n_y+d+1}$ 위에서 B-스플라인인 곳에서 폼의 모든 함수의 가족이 되게끔 다음과 같이 정의된다.

$$(Pf)(x, y) = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} c_{ij} B_{i,d}(x) B_{j,d}(y) \quad (\text{식 4})$$

Example 2. 텐서 프로덕트 cubic 스플라인의 경우($d=3$). 계수 c_{ij} 를 결정하기 위해, 우리는 49개의 공간을 가지는 로컬 스플라인 공간을 뜻하는 간격 $I=[t_\mu, t_\nu] \times [s_\mu, s_\nu] = [t_i, t_{i+4}] \times [s_j, s_{j+4}]$ 를 선택한다.

$$S_{d,\tau,I} = \text{span}\{B_{i-3,d} B_{j-3,d}, \dots, B_{i+3,d} B_{j+3,d}\}.$$



(그림 8) A tensor product cubic spline

여기에서, 데이터 점들 $\{P_{ij,k}\}_{k=1}^{m_{ij}}$, $P_{ij,k} = (x_{ij,k}, y_{ij,k}, z_{ij,k}) \in R^3$ 는 간격 $I = [t_i, t_{i+4}] \times [s_j, s_{j+4}]$ 내에서 제한적으로 위치한다.

$$I = [t_u, t_v] \times [s_u, s_v] = [t_i, t_{i+4}] \times [s_j, s_{j+4}]$$

계수 행렬:

$$\begin{bmatrix} B_{i-3,3}(x_{ij,1})B_{j-3,3}(y_{ij,2}) & \dots & B_{i-3,3}(x_{ij,m_{ij}})B_{j-3,3}(y_{ij,m_{ij}}) \\ B_{i-3,3}(x_{ij,1})B_{j-2,3}(y_{ij,2}) & \dots & B_{i-3,3}(x_{ij,m_{ij}})B_{j-2,3}(y_{ij,m_{ij}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{i+3,3}(x_{ij,1})B_{j+3,3}(y_{ij,1}) & \dots & B_{i+3,3}(x_{ij,m_{ij}})B_{j+3,3}(y_{ij,m_{ij}}) \end{bmatrix}$$

4.2. 이동 및 회전 구하기

구해진 각 패드의 중심 좌표로부터 원 패드의 중심 좌표와의 이동 및 회전정보를 구한다.

4.3. 높이, 면적, 체적 구하기

3차원 거리영상으로부터 부품영역에 대한 각 슬더의 높이, 면적, 체적을 계산하는 알고리즘을 기준면으로부터 구한다. 여기서 부품의 회전, 이동, 기울어짐에 무관한 값을 얻기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하며 특히 베이스 기준면을 계산하고 이로부터 직교 거리를 구한다.

높이 및 체적은 각 패드 영역에 대해 이 기준면에 수직 방향의 거리를 계산한다. 면적은 잡음에 강건한 값을 구하기 위해 베이스 면보다 어느 정도 큰 값에 대한 영역을 계산한다.

4.4. 브릿지(bridge) 구하기

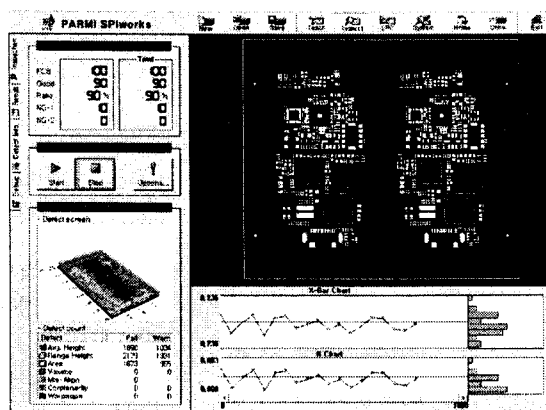
각 부품의 패드를 영역채색(blob coloring)을 하고 이웃 패드가 같은 번호로 coloring 된 경우에 두 패드가 브릿지가 있는 것으로 판정한다.

4.5. 들뜸(coplanarity) 구하기

각 부품의 패드에 장착되는 칩의 다리는 무게중심을 기준으로 세 점만이 한 평면을 형성하고 다른 패드는 다 평면 위에 존재한다. 각 패드가 이 평면 위에서 떨어진 직교거리 중 가장 긴 거리에 해당하는 값을 들뜸(coplanarity)라 정의하면 이것이 크면 칩을 장착한 후에 용착 과정에서 도포된 납의 부착부분이 적어서 불량 발생할 경우가 많으므로 이의 측정값이 매우 중요하다. 이 값을 구하는 방법은 부품의 패드가 n 일 때 $nC3$ 개의 패드를 택하고, 이 세점이 이루는 삼각형 내에 부품의 무게 중심이 존재하는지를 결정하고, 그 내에 존재한다면 이 세 점이 이루는 평면 방정식을 구하고, 이 평면위에 각 패드의 데이터가 전혀 존재하지 않을 때, 이 평면으로부터 가장 먼 거리에 있는 패드 값 사이의 차를 구한다. 이것은 패드의 수가 많아질수록 시간이 많이 걸리므로, 부품의 종류에 따라, QFP, BGA 등에 따라 기하학적인 형태를 고려하여 최단 시간에 이를 계산하는 알고리즘을 적용한다.

4.6. 기판의 휨(warpage) 구하기

기판의 휨은 LMS(least mean square) 방법으로 평면 방정식을 구하여 이 평면 위의 가장 먼 거리와 평면 아래의 가장 먼거리의 차로써 구한다. 아래는 검사 창의 화면을 보여준다.



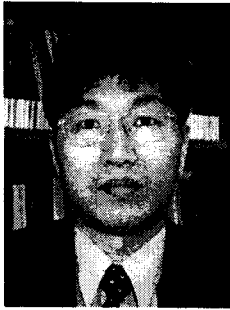
(그림 9) PCB 3차원 스캔 및 검사 창

5. 결 론

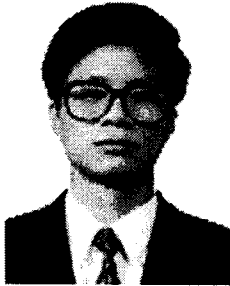
본 논문에서는 SMD 기판에 도포된 납의 형상을 인라인으로 고속 검사하는 시스템과 획득된 영상으로부터 3차원 데이터를 추출하여 PCB 검사의 중요요소인 솔더 페이스트의 높이, 넓이, 체적, 휨 및 들뜸을 측정하는 알고리즘을 제시하였다. 특히, 부품의 소형화와 경량화에 따른 플렉시블 PCB에 대처하기 위해 미리 정의된 여러 위치에 해당하는 데이터로부터 PCB의 휨을 고려한 표면함수를 B-스플라인을 이용하여 생성하고 이를 기반으로 납의 면적 및 체적 등을 계산하는 방법을 제시하였다. 여기서 개발한 시스템은 센서의 측정 정밀도가 매우 높을 뿐 아니라, 고속으로 정도가 높으면서 신뢰성 있게 처리되기 때문에, SMD 조립 라인에서 문제가 되고 있는 납량 및 납 형상의 검사 장치에 효율적으로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. Tan Huimming, Geng Yuzhi, "Laser non contacting displacement measuring", Proc. of SPIE, vol.1230, pp.427-428, 1990.
2. D. W. Wanthey, K.N.KnappII, D.Y.Lee, "Calibration of a laser range finding coordinate measuring machine", Optical Engineering, vol.33, no.10, pp. 3372-2280, October 1994.
3. L. D. Stefano, F Boland, "Three-dimensional inspection of printed circuit board using phase profilometry", Proc. of EUSIPCO-96, September 10-13, 1996.
4. S.W. Kim, Y. B. Choi and T.J.Oh, "Projection moire for 3D inspection of printed circuit board", SPIE, vol. 3023, pp.129-138, 1997.
5. Yvind Hjelle, "Approximation of scattered data with multilevel B-splines", Technical Report STF42 A01011, SINTEF 2001.
6. S. Y. Lee, G. Wolberg, and S. Y. Shin. "Scattered data Interpolation with multilevel B-splines", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 3, no. 3, pp. 229-244, 1997.

**이 준 재(Joon Jae Lee)**

- e-mail : jjlee@dongseo.ac.kr
- 1986년 경북대학교 전자공학과 학사졸업
- 1991년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1994년 경북대학교 전자공학과 박사졸업
- 1998년~1999년 조지아 테크 연구교수
- 2000년~2001년 (주) 파미 연구소장
- 1995년~현재 동서대학교 인터넷공학부 부교수
- 관심분야 : 3차원 비전, 영상처리, 지문인식

**이 병 국(Byoung Gook Lee)**

- e-mail : lbg@dongseo.ac.kr
- 1987년 연세대학교 수학과 졸업(학사)
- 1989년 KAIST 응용수학과 졸업(석사)
- 1993년 KAIST 수학과 졸업(박사)
- 1993년~1995년 데이콤 종합연구소 선임연구원
- 1995년~현재 동서대학교 인터넷공학부 부교수
- 관심분야 : Computer Graphics, CAGD

**류 재 철(Jaechil Yoo)**

- e-mail : yoo@deu.ac.kr
- 1985년 성균관대학교 수학교육과 졸업(학사)
- 1987년 KAIST 응용수학과 졸업(석사)
- 1996년 Univ. of Wisconsin-Madison 수학과 졸업(박사)
- 1987년~1990년 삼성 SDS CAD/CAM/CAE팀
- 1997년~현재 동의대학교 수학과 부교수
- 관심분야 : 수치해석