

BGA 소자의 볼 정점 높이 측정을 위한 스테레오 비전 알고리즘 개발

(The Development of a Stereo vision algorithm for Height Measurement of Ball Peak Point of BGA Device)

이상신* · 박영순* · 김준식* · 주효남**

(Sang-Sin LEE* · Young-Soon Park* · Joon-Seek Kim* · Hyo Nam Joo**)

Abstract

In this paper, We proposed the stereo image modeling using 2-dimensional images captured by the high resolution cameras to inspect the ball defects of BGA(Ball Grid Array) device. The proposed algorithm consists of the package/ball area extraction part, the FOV(Field of View) calibration part, the top point matching part, and ball height measurement part, In the package/ ball area extraction part, the package and ball areas are separately extracted in a left and right image by the extraction algorithm. Through the experiment, we draw out the result.

1. 서론

최근 반도체 칩과 완제품의 크기가 거의 같을 정도로 얇고 작게 패키징하는 이른바 CSP(Chip Scale Packaging) 기술이 반도체의 경박 단소화 추세에 힘입어 빠르게 확대 도입되고 있다. 이런 가운데 현재까지 개발된 각종 CSP 패키지 기술 가운데 가장 주목받고 있는 것이 마이크로 BGA 패키지이다.

마이크로 BGA 패키지는 기존의 리드프레임 대신 박막필름 위에 칩을 얹은 후 실리콘 소재로 이를 덮어 씌우고 그 밑에 미세 구멍의 원형다리(ball)를 접착시키는 매우 간단한 형태다. BGA 같은 반도체 부품은 거의 모든 전자제품을 비롯하여 의료장비, 통신위성, 각종 무기 등과 같은 최첨단 장비에 필수적으로 사용되고 있다.

80년대 이후 여러 기술선진국을 중심으로 반도체 부품의 2D(표면)결함을 자동적으로 인식하고 판단할 수 있는 검사 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 이미 상용화되었다. 또한, CCD 카메라에 조명, 레이저 등과 같은 보조 시스템을 추가하여 PGA(Pin Grid Array)나 BGA와 같은 반도체 부품의 리드 간격이나 ball 크기 등의 2D(표면) 결함을 검사하는 시스템이 개발되었다. 그러나 반도체 소자 기술과 컴퓨터 기술의 눈부신 발전에 따라 반도체 부품이 점점 더 집적화, 경량화, 소형화됨으로써 PGA나 BGA보다 더 정밀한 마이크로 BGA와 같은 반도체 부품이 이미 여러 첨단 장비에 사용되고 있는 실정이다. 그러나 기존의 방식으로는 이러한 마이크로 BGA와 같은 초정밀 부품의 결함을 효과적으로 검사하는 데에는 한계가 있

다. 따라서 본 논문에서는 3D 스테레오 비전을 이용하여 2D 검사로는 측정 불가능한 BGA 소자의 볼 높이를 측정할 수 있는 알고리즘을 개발한 후 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 스테레오 비전

스테레오 비전은 인간의 시각구조와 유사하게 만든 환경에서 취득된 좌, 우 영상으로부터 일치점의 변위를 구하여 간단한 삼각측량을 이용하여 깊이 정보를 검출하는 방법이다. 일반적으로 스테레오 비전 시스템은 카메라의 공간적 모형설정, 스테레오 영상 정합, 깊이 정보의 보간 등의 과정들로 구성된다. 일반적으로 스테레오 시각 문제에서는 탐색 공간을 줄이고, 문제를 단순화시키기 위하여 다음의 몇 가지 가정을 적용한다.

첫째 각 영상의 epipolar 라인은 동일한 위치에 존재한다. 둘째, occlusion 영역을 제외한 나머지 영역에서는 연속적인 3차원 정보를 가져야 한다. 셋째, 정합을 위한 특징들은 두 영상에 독립적으로 위치하고, 한 영상의 특징이나 화소들은 다른 영상의 특징이나 화소들에 하나이상 정합 될 수 없다.

위의 세가지 조건을 가지고 두 장의 영상에서 일치점을 찾아 정합하게 되는데 일반적으로 특징 기반 정합 방법과 영역 기반 정합 방법 두 가지로 나눌 수 있다[1-5].

2.2 스테레오 카메라 모델링

카메라 모델링은 스테레오 비전에서 3차원 공간의 한 점에 대한 각 카메라의 화면상에서 사영점간의 거리(disparity, parallax)에 관한 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 일반적인 카메라의 배치에 의해서는 복잡한 비선형 관계식이 되나 두 카메라 수평 스캔 라인이 베이스 라인과 평행하다 가정하여 계산을 단순화 할 수 있다. 이렇게 되면 수직방향의 양안차(disparity)는 고려하지 않고 단지 수평방향의 양안차 만을 생각하면 되므로 계산이 단순하게 된다.

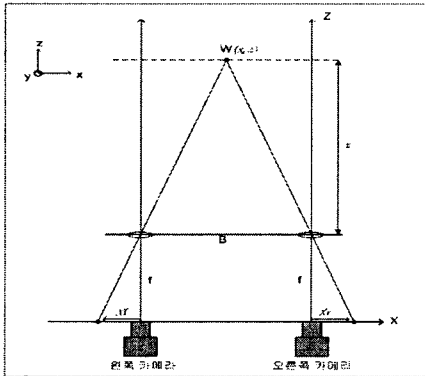


그림 1. 양안차와 깊이의 상관관계
Fig. 1. Correlation of disparity and depth

그림 1에서 삼각형의 비례관계식을 이용하여 양안차를 구할 수 있는데 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$z = \frac{fx}{-X_l} \quad (1)$$

$$z = \frac{f(B-x)}{X_r} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 z를 구하면 다음과 같다.

$$z = \frac{fB}{D} \quad (3)$$

여기에서 D는 $|X_r + X_l|$ 이다. B는 두 카메라 사이의 거리, f는 카메라의 초점거리를 나타낸다[1,6-8].

2.3 BGA 3차원 검사 알고리즘

그림 2는 BGA 3차원 검사 알고리즘의 흐름도이다. 캡처 보드에서 입력된 영상에 전처리 과정을 적용하고, 패키지 영역을 검출한다. 그 다음 검출된 패키지 영역에서 볼 영역을 찾게 되고 그렇게 찾아진 볼에서 정점을 찾아내어 정합과정을 거쳐 양안차와 볼의 높이를 구하게 된다.

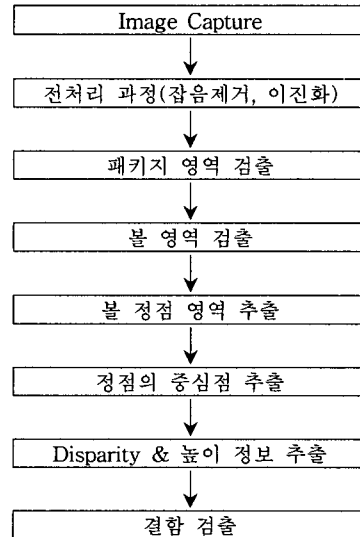


그림 2. 3차원 검사 알고리즘 흐름도
Fig. 2. Flowchart of algorithm for 3D inspection

2.4 전처리 과정

이진영상 처리는 두 종류의 방법으로 구분 되는데 영상의 각 부분에 적당한 서로 다른 임계값을 사용하여 이진화 하는 지역적 이진화 방법과 전체영상에 대해 동일한 임계값을 적용하여 이진화하는 전역적 이진화 방법이 있다. 전역적 이진화 방법의 경우, 빠른 계산 시간과 간단한 구현 등의 장점이 있으나, 지역적으로 정보의 분실이 일어나게 되는 단점이 있다. 반면 지역적 방법은 비교적 많은 계산 시간이 걸리는 알고리즘을 사용하지만 영상 전체가 균일한 이진 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 히스토그램을 이용하여 영상의 평균값과 분산, 표준편차를 구해 평균값+표준편차의 값을 임계값으로 적용하여 보다 나은 이진영상을 얻을 수 있었다.[9-11].

잡음제거 기법을 적용하는 이유는 카메라를 통해 얻어진 영상에서 불필요한 잡음을 제거하고, 볼의 정점을 구할 때나 볼의 윤곽선을 구할 때도 좀 더 정확한 값을 얻기 위함이다. 일반적으로 평균값 필터와 중간값 필터가 있는데, 본 논문에서는 좀 더 빠른 검사 속도를 위해 연산 양이 적은 평균값 필터를 적용하였다[9-11].

2.5 영역 검출

입력 영상을 가로·세로로 스캔하여 패키지 모서리의 특징을 찾는 방법으로 패키지 영역을 검출한다. 검출된 패키지 영역 내에서 BGA 소자 사양을 참조하여 볼 하나 정도의 크기에 해당하는 검색 윈도우를 만들어 모든 볼의 위치를 찾게 된다. 추출된 볼 영역의 무게 중심을 구해 볼의 중심 좌표로 사용한다.

2.6 Calibration

영상내에서 계산된 좌표로는 정확한 FOV를 구하기 어렵다. 따라서 FOV calibration 방법을 적용하여 보다 정확한 FOV를 구해야 오차를 줄일 수 있다.



그림 3 버니어 캘리퍼스를 이용한 FOV calibration
Fig. 3 FOV calibration using vernier calipers

그림 3에서와 같이 먼저 영상을 취득할 때 영상 내에 버니어캘리퍼스를 놓고 영상을 보면서 캘리퍼스를 조절해 영상 외곽의 크기를 구하게 되고 보편적으로 그 값이 FOV가 된다. 본 논문의 실험에서는 위의 FOV가 14.50mm로 측정되었다. 정확한 calibration이 이루어지도록 하려면 영상 좌표를 실제 좌표로 변환해야 하며, 변환하는 수식은 다음과 같다.

$$\text{픽셀 당 거리} = \frac{\text{FOV}}{\text{전체 pixel 수}} \times \text{해당 pixel 수} \quad (4)$$

식 (4)에서 FOV(Field of View)는 카메라의 sensor에 촬상 되는 범위를 나타낸다. FOV는 영상 촬영 시 나노자를 이용하여 구하며, 이 값을 영상의 해상도(가로 픽셀 수)로 나누게 되면 한 픽셀이 차지하는 실제의 거리를 계산 할 수 있다. 본 논문에서 계산된 픽셀 당 거리는 0.0104mm 이다. 그림 4에서 버니어 캘리퍼스 사이의 거리(픽셀수)는 964픽셀이고 두 홀 사이의 거리(픽셀수)는 245픽셀이다. 각각의 실제 거리를 구하면, 10.0256mm, 2.548mm 가 된다. 이 값과 그림에서의 실제 값과 비교해 보면 오차가 8um~25um가 된다. 버니어 캘리퍼스 정보를 이용하여 한 픽셀 당 거리를 구하면 다음과 같다.

$$10 / 964 = 0.01037 [\text{mm/pixel}]$$

정밀한 PCB의 두 홀 사이의 거리에 의한 한 픽셀 당 거리는 다음과 같다.

$$2.54 / 245 = 0.01036[\text{mm/pixel}]$$

오차 값을 줄이기 위해 두 값의 평균을 취하면 0.010365가 된다. 이 값을 이용하여 버니어 캘리퍼스와 정밀 PCB 영상의 FOV를 calibration하여 영상내의 거

리를 계산하면, 다음과 같은 값을 갖는다.

$$964 \times 0.010365 = 9.99186\text{mm}$$

$$245 \times 0.010365 = 2.53942\text{mm}$$

실제의 값과 비교해 보면 오차가 0.58um~7.14um로 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 여기까지는 영상의 가로 길이에 대한 FOV calibration이었고, 같은 방법으로 영상의 세로 길이에 대한 한 픽셀 당 거리는 0.0104098를 구할 수 있다.

2.7 양안차 계산

일반적인 스테레오 비전을 바로 적용하기 힘들기 때문에 심플 스테레오로 변환하여 양안차를 구하게 된다.

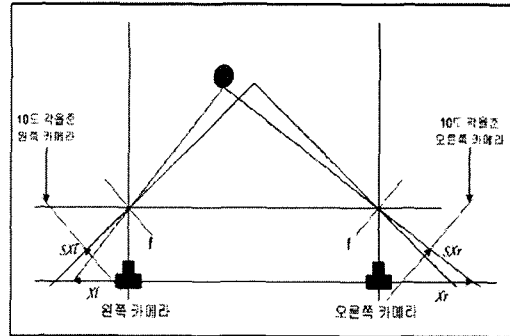


그림 4. 심플 스테레오 카메라 모델링 영상
Fig. 4. Modeling image of simple stereo camera

그림 4에는 일반적인 스테레오 비전에서의 카메라의 위치를 각도를 주어 심플 스테레오로 구성하는 모델을 나타내었다. 그림 4에서 X_l 과 X_r 은 수직 스테레오 알고리즘에 의해 발생하는 epipolar 라인상의 좌·우 변위이고, SX_l , SX_r 은 카메라에 각도를 주어 심플 스테레오 알고리즘에 의해 발생하는 좌·우 변위이다. 이렇게 측정된 SX_l 과 SX_r 을 이용한 양안차 $|SX_l + SX_r|$ 를 그대로 적용할 수 없기 때문에 다음의 변환식을 이용하여 수직 스테레오 비전에 의한 새로운 양안차를 구하게 된다.

$$X_l = \tan\left(\text{카메라각도} - \left(\tan^{-1}\left(\frac{(\text{center} - X)\text{픽셀당거리}}{f}\right)\right)\right)f \quad (5)$$

식(5)에서 center는 영상의 중심 포인트, X 는 영상에서의 해당 물체의 중심 포인트이다. 수식에서 $(\text{center} - X)$ 값은 SX 값이 된다. 오른쪽 영상의 변위 SX_r 은 식(5)에서 카메라 각도를 더해지면 구할 수 있다. 이렇게 변환된 X_l 과 X_r 을 이용하면 카메라의 렌즈부터 촬영 물체까지의 거리 정보를 얻을 수 있다.

2.8 실험 결과

위에서 제안한 전처리 단계와 패키지 영역 검출, 불 영역 검출에 대해서 실험을 하였다. 시스템은 P-4 3GHz이고, Basler 사의 A102k 디지털 카메라 두 대, Euresys의 grablink expert2 보드와 CCS사의 링 조명을 사용하였으며, 프로그램 구현은 visual C++ 6.0을 사용하였고, 실험 대상은 볼 수가 62인 마이크로 BGA 패키지(12mm × 10.2mm)를 사용 하였다.

1. 실험에 사용된 사전정보
 - a. 픽셀 당 거리
 - 왼쪽 영상 : 0.0105074mm
 - 오른쪽 영상 : 0.0105932mm
 - b. Base line
 - 48.6075mm
 - c. Focus
 - 100m
 - d. 카메라 각도
 - 9°

그림 5는 두 대의 카메라에서 입력되는 영상을 보여주고 있다. 양쪽의 카메라가 각각 9°의 각을 가지고 있어 왼쪽 영상의 마이크로 BGA 패키지가 왼쪽으로 치우쳐져 있고, 오른쪽 영상은 오른쪽으로 치우쳐져 있는 것을 확인 할 수 있다.

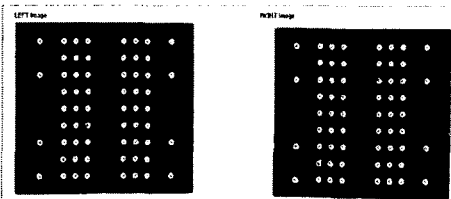


그림 5 좌·우 카메라 입력 영상
Fig. 5. Input image of left · right camera

그림 6은 그림 5의 영상에 대한 이진화 영상이다.

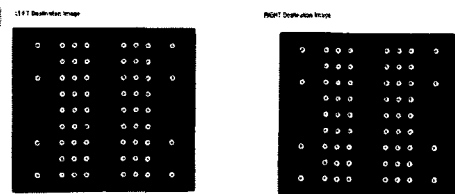


그림 6. 그림 5 영상에 대한 이진화 영상
Fig. 6. Binary image of Fig. 5

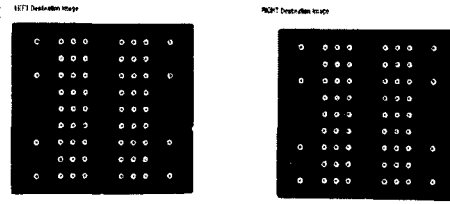


그림 7 그림 6에 대한 잡음 제거 영상
Fig. 7. Noise removed image of Fig. 6

그림 7은 그림 6의 결과 영상에 대해 평균 필터 알고리즘을 적용하여 잡음을 제거한 영상이다.

다음과정으로 패키지 영역검출은 불 영역을 검출하기 위한 전 단계이다. 위에서 설명한 바와 같이 패키지의 왼쪽 끝점만을 검출하게 되는데 그 이유는 패키지 왼쪽 끝점의 좌표를 이용하여 불 영역을 검출하기 위한 윈도우를 만들 때, 그 윈도우의 시작 좌표를 구하기 위함이다. 불 탐색 윈도우의 시작점은 BGA 패키지 제조회사에서 제공하는 패키지 사양(부록 참조)을 참고하여 얻을 수 있다. 그 방법은 제공되는 사양에 의하면 패키지 왼쪽 끝점에서부터 첫 번째 불의 중심점까지의 거리는 1.6mm로 나와 있다. 이 수치는 패키지의 가로의 길이 이고, 세로의 길이는 1.1mm이다. 이는 가로축의 불 간격 0.8mm, 세로축의 불 간격이 1.0mm로 틀리고 각각의 픽셀 당 거리가 틀리기 때문에 다른 값이 나온 것이다. 이 값들을 각각의 픽셀 당 거리로 나누어 주면 영상에서의 왼쪽 끝점부터 첫 번째 불의 중심점까지의 픽셀수를 알 수 있다. 왼쪽 영상과 오른쪽 영상에서의 값은 다음과 같다.

- ① 왼쪽 영상 가로 픽셀 수

$$\frac{1.6mm}{0.0105074} = 152.273635 \approx 152 \text{ pixel}$$

- ② 왼쪽 영상 세로 픽셀 수

$$\frac{1.1mm}{0.0103252} = 106.535466 \approx 106 \text{ pixel}$$

- ③ 오른쪽 영상 가로 픽셀 수

$$\frac{1.6mm}{0.0105932} = 151.040289 \approx 151 \text{ pixel}$$

- ④ 오른쪽 영상 세로 픽셀 수

$$\frac{1.1mm}{0.0103527} = 106.252475 \approx 106 \text{ pixel}$$

만약, 왼쪽 영상의 패키지 왼쪽 끝점의 좌표가 (100, 100)이었다면, 왼쪽 끝의 첫 번째 불의 중심좌표는 (152, 106)으로 예상할 수 있다. 한 개의 불이 차지하는 가로, 세로 픽셀 수가 40개 이내이므로 가로, 세로로 70픽셀 인 탐색 윈도우를 설정해주면 되고, 이 탐색 윈도우를 좌에서 우로, 위에서 아래로 이동하면서

볼을 찾게 된다. 다음의 표 1과 표 2는 위의 과정을 통해 얻어진 좌, 우 영상에서의 볼 좌표값을 나타낸다.

표 1. 왼쪽 영상의 볼 좌표 값

Table 1. Coordinate value of balls in left image

왼쪽 영상의 좌표 값							
number	볼의 중심	경계영역의 중심	number	볼의 중심	경계영역의 중심	number	볼의 중심
1	176	177	22	1032	1032	43	463
2	326	326	23	327	323	44	478
3	424	426	24	403	405	45	703
4	476	480	25	478	478	46	778
5	704	706	26	703	705	47	854
6	778	780	27	778	780	48	1002
7	853	855	28	854	853	49	327
8	1032	1004	28	329	329	50	463
9	327	330	30	423	424	51	478
10	405	403	31	478	480	52	703
11	478	478	32	703	703	53	778
12	705	705	38	778	779	54	853
13	778	781	34	854	854	55	176
14	854	855	35	328	329	56	327
15	177	178	36	423	426	57	422
16	327	326	37	478	478	58	478
17	404	404	38	703	703	59	704
18	478	475	39	778	780	60	778
19	703	705	40	854	855	61	853
20	778	778	41	176	177	62	1001
21	854	854	42	327	329		

표 2. 오른쪽 영상의 볼 좌표 값

Table 2. Coordinate value of balls in right image

오른쪽 영상의 좌표 값							
number	볼의 중심	경계영역의 중심	number	볼의 중심	경계영역의 중심	number	볼의 중심
1	303	301	22	1135	1133	43	524
2	454	452	23	450	450	44	600
3	526	526	24	526	525	45	826
4	604	603	25	603	600	46	902
5	631	630	26	629	628	47	978
6	636	635	27	905	883	48	1131
7	934	932	28	381	378	49	449
8	1137	1135	29	450	450	50	524
9	453	452	30	526	526	51	600
10	526	526	31	602	599	52	826
11	604	601	32	628	627	53	902
12	630	630	33	904	892	54	978
13	907	925	34	980	977	55	259
14	984	982	35	450	450	56	448
15	302	301	36	525	524	57	523
16	452	451	37	601	597	58	600
17	526	525	38	627	625	59	826
18	603	601	39	903	900	60	900
19	630	628	40	978	978	61	977
20	906	904	41	280	280	62	1128
21	983	975	42	449	449		

위의 표 1과 표 2의 정점 영역의 중심 값을 가지고 식(5)에 대입하여 좌, 우 영상의 X축 변위 값과 양안차를 구하고 그 값을 식(3)에 적용하여 카메라에서 볼까지의 거리를 얻는다. 마찬가지로 볼 중심 좌표 값도 식(5)과 식(3)에 적용하여 카메라에서 BGA 패키지의 바닥 면까지의 거리를 얻어 위에서 구해진 볼까지의 거리와의 차를 구하면 BGA 볼의 높이를 얻을 수 있다.

표 3. 볼의 높이

Table 3. Height of balls

각 볼의 높이 단위(um)					
number(ball)	Height	number(ball)	Height	number(ball)	Height
1	235	22	224	43	225
2	227	23	233	44	228
3	226	24	233	45	232
4	226	25	234	46	233
5	235	26	235	47	231
6	242	27	233	48	233
7	243	28	223	49	242
8	242	29	77	50	233
9	241	30	77	51	242
10	236	31	320	52	234
11	234	32	77	53	222
12	227	33	234	54	221
13	242	34	231	55	243
14	234	35	37	56	242
15	226	36	241	57	241
16	235	37	232	58	233
17	233	38	225	59	233
18	226	39	310	60	233
19	242	40	226	61	221
20	225	41	242	62	225
21	236	42	225		

위 결과에서 보면 볼의 높이가 77 ~ 0319 로 측정된 것을 알 수 있다. 영상에서 볼의 좌표를 구할 때, 실험 오차를 ±3픽셀로 하였다. 이는 영상에서 약 30um가 되므로 높이 정보는 약 90um의 오차를 가지게 된다. BGA 제조사에서 제공하는 사양에 보면 볼의 높이는 200um에서 300um의 값을 가진다고 나와 있다.(부록 참조) 그리고 SEM으로 찍은 볼의 실제 높이는 평균적으로 233.505um로 측정되었다. 그림 8는 SEM으로 볼의 높이를 측정된 영상을 나타내었다.

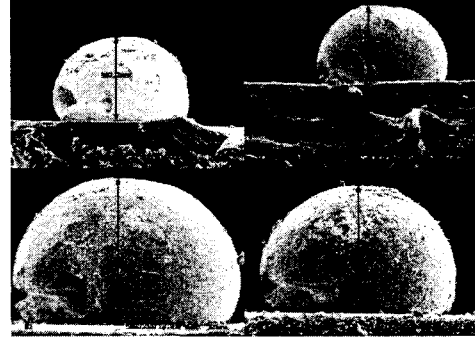
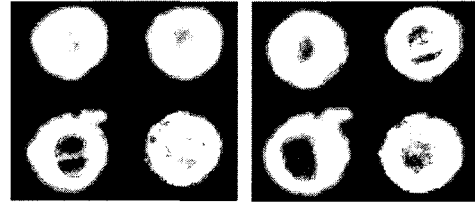


그림 8. SEM 영상
Fig. 8. SEM image

여기에 실험 오차를 더해주면 실질적인 양호한 볼의 높이는 110um에서 390um의 범위 안에 들어간다고 할 수 있다. 따라서 그림 9에서 불량으로 판정할 수 있는 볼을 확인 할 수 있다. 불량으로 판정된 볼의 모습을 보면 그림 9과 같다.



(a) 왼쪽 영상 (b) 오른쪽 영상
그림 9. SEM 영상에 나타난 불량 볼
Fig. 9. Defective balls in SEM image

그림 9의 불량으로 판정된 볼을 보면 정점을 나타내는 볼 중간에 검은색 영역이 뚜렷하지 않거나 비정상적으로 크고, 중간에 끊어진 모습을 볼 수가 있다. 이렇게 나타나는 원인은 조명의 위치와 측정 소자의 표면에 이물질이 묻어 있을 경우 일 수도 있고, 원래 볼 자체의 결함 일 수도 있다. 조명과 이물질일 경우를 고려하여 같은 소자에 대해 다른 조명위치를 다르게 해보았더니 위치에 따라 정점의 위치가 변하므로

결함의 원인이 될 수 있었다. 조명은 패키지를 중심으로 좌우 대칭으로 하고 소자를 깨끗이 세척한 다음 재차 촬영을 해 보았더니 소자의 표면에 묻은 이물질 때문에 결함으로 판정 되는 것도 확인할 수 있었다. 따라서 외부요인은 최적의 환경을 만들어 주고 실험한 결과 순수한 불의 결함만을 측정할 수 있었다.

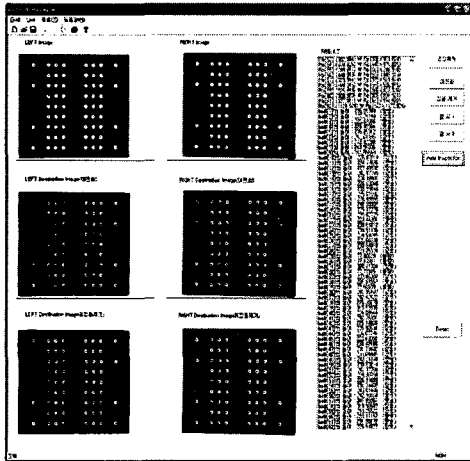


그림 10. 결함 검사 결과 윈도우 영상
Fig. 10. Window image for inspection result

그림 10에 전체 검사 프로그램을 나타내었다. 위의 과정을 20개의 샘플을 이용하여 반복 실험 하였다. 실험 결과 불의 높이 값은 정상적인 불로 판정 되었을 때, 각각의 값은 220um ~ 320um로 측정되었다. 패키지 사양과 비교해 보았을 때 약 20um의 오차를 보였다. 평균값을 구해보면 210um로 SEM으로 찍은 실제의 불의 높이와 비교 했을 때 약 25um 정도의 오차를 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 요즘 전자 장비 분야에서 널리 사용되고 있는 마이크로 BGA 소자의 불 결함 검출을 위한 스테레오 비전 정밀 검사 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 고 해상도의 CCD 카메라를 통하여 입력된 영상에서 BGA 패키지 영역을 분리해 내고 다시 그 BGA 패키지 영역 안에서 불 영역을 추출하였다. 이렇게 추출된 불 영역에서 정점 영역을 분리해 정합 할 실제의 불 정점영역 중심 좌표를 구하였다. 이렇게 얻어진 불의 정점 영역 중심 좌표를 본 논문에서 제안한 심플 스테레오 방법에 적용하여 불의 높이 정보를 얻을 수 있었다.

스테레오 비전의 가장 큰 문제점인 정합 할 포인트

의 일치성 문제점은 영상 전체에 대하여 정합 포인트를 찾게 되면 그만큼 처리 속도가 길어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 미리 알고 있는 사전 정보를 이용하여 찾고자 하는 불의 정점만을 찾아내어 정합 하는 방법을 사용해 검사 처리 속도를 줄일 수 있었다. 또한 일반적인 스테레오 비전을 심플 스테레오 비전으로 변형하여 보다 정확한 3차원 정보를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 실험시의 오차를 ± 3 픽셀로 하여 실험 결과 값에 적용하였는데 측정 소자의 크기나 영상의 해상도에 비하면 비교적 큰 오차 이므로 차후 연구과제로는 이 오차를 줄이는 작업이 필요 하겠다. 또한 5um이하의 측정 정밀도를 위해서는 subpixel 기법의 연구도 필요하다.

참고 문헌

- [1] Linda C. Shapiro, George C. Stockman, Computer Vision, Prentice Hall, pp. 388-407, 2001.
- [2] 박래홍, "3차원 물체인식을 위한 Vision 시스템", 전자공학회지, 제10호 12B, p.57-58, 1985.
- [3] 최우영, 박래홍, "Stereo Vision 및 응용", 전자공학회지, 제10호 12B, p.36-38, 1994.
- [4] 우문택, 정홍, "스테레오 비전 및 영상복원 과정의 통합을 위한 확률 모형", 전자공학회논문지, 제9호 29B, p.37-38, 1992.
- [5] 임혁진, "Stereo Vision에서의 Correspondence problem 해결을 위한 알고리즘의 개발", 한국과학기술원 석사학위논문, p.1-9, 1992.
- [6] The MIT Press, Three-Dimensional Computer Vision, Olivier Faugeras, pp. 165-206, 2001.
- [7] Emanuele Trucco, Alessandro Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, pp. 187-210, 1999.
- [8] SMei Yu, Gang-Yi Jiang, Sai-Long He, Bo-Kang Yu, Ran-Di Fu, "New approach to Vision-Based BGA package inspection", Proceeding of the first international conference on machine learning and cybernetics, Beijing, Vol. 4-5, pp. 1107-1110, November, 2002.
- [9] 장동혁, 디지털 영상처리의 구현, 정보게이트, p.95- 102, 2001.
- [10] 김기순, "지도영상에서 도로정보의 자동 추출에 관한 연구", 호서대학교 석사학위논문, p.11-12, 1998.
- [11] 김윤수, USB 카메라를 이용한 실시간 이동물체 추적 알고리즘에 관한 연구, 호서대학교 석사학위논문, p.9-15, 2001.