

스테레오 영상 기반 3 차원 반도체 동일평면성 측정 알고리즘

박성현, 곽노준

서울대학교 융합과학기술대학원

sungheonpark@snu.ac.kr, nojunk@snu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 스테레오 카메라를 통해 반도체 패키지의 솔더볼 (Solder ball) 의 실장면 (Reference plane) 으로부터의 높이를 계산하고 실장면에서 멀리 떨어져 있는 볼을 검출하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 위하여 카메라 캘리브레이션, 동일평면성 측정, 반도체 평면의 휨 정도를 측정하는 알고리즘을 함께 제시한다.

1. 서론

동일평면성 측정 알고리즘은 반도체 생산공정에 있어서 불량 검출과정을 자동화하는데 필수적인 알고리즘이다. 본 연구에서는 공정 자동화에 적용할 수 있는 스테레오 카메라 기반의 3 차원 반도체 동일평면성 측정 알고리즘을 제시하고 이를 위한 카메라 캘리브레이션 방법과 부수적으로 반도체 평면의 뒤틀림 정도를 측정하는 방법을 제시한다.

2. 측정 환경

영상을 촬영하는 카메라는 두 대이며, 하나는 영상 평면이 반도체와 평행하게 위치하며 다른 하나는 비스듬하게 위치한다 (그림 1)..

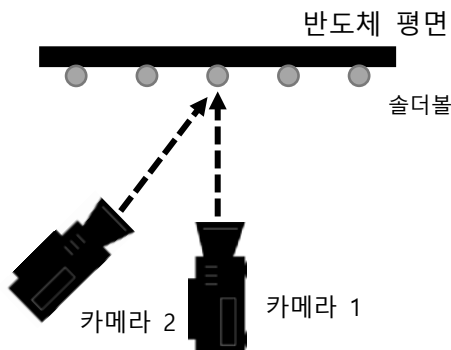


그림 1. 반도체 동일평면성 측정 환경

솔더볼의 경우 그 크기가 조금씩 달라서 오차가 생기게 되는데 이때 가장 큰 솔더볼의 아랫부분을 지나는 평면을 실장면이라고 하고 이 면과 가장 작은 솔더볼의 가장 낮은 부분과의 거리를 동일평면

성 값으로 정의한다 (그림 2).

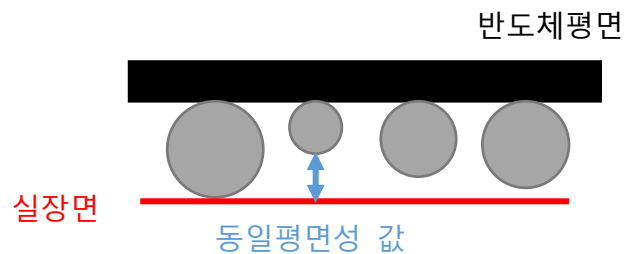


그림 1. 동일평면성 값 정의

빛은 실장면에 평행하게 들어오며 실장면과 평행한 카메라에는 도넛 모양의 영상이, 실장면과 비스듬한 카메라에는 초승달 모양의 영상이 맺히게 된다 (그림 2). 본 논문에서는 실장면과 평행한 카메라를 카메라 1, 비스듬한 카메라를 카메라 2 로 통칭한다.

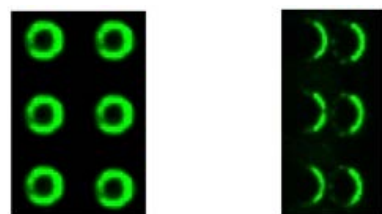


그림 2. 카메라 1 영상 (왼쪽), 카메라 2 영상 (오른쪽) 예시

3. 측정 알고리즘

3.1 카메라 캘리브레이션

캘리브레이션 과정은 기본적으로 실제 3D 좌표와 카메라 이미지(2D)에서의 좌표의 측정을 통해서 카메라 행렬을 통해 재투영 오차를 최소화 하는 과정으로 볼 수 있다. 즉 3 차원 좌표 \mathbf{X} 와 2 차원 좌표 \mathbf{x} 가 주어져 있을 때 카메라 행렬 \mathbf{P} 를 구하는 과정은

$$\min_p \sum (\mathbf{x} - \mathbf{P}\mathbf{X})^2$$

로 나타낼 수 있다. 본 논문에서 사용된 시스템에서는 두 대의 카메라가 사용되므로 첫번째, 두번째 카메라 행렬을 각각 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ 라고 하면 최소화 비용 함수는

$$\min_p \sum (\mathbf{x}_1 - \mathbf{P}_1\mathbf{X}_1)^2 + \sum (\mathbf{x}_2 - \mathbf{P}_2\mathbf{X}_2)^2$$

가 된다. 카메라 행렬은 pinhole camera model [1]을 사용하였으며 일반적으로 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{P} = [\mathbf{K}\mathbf{R}|\mathbf{C}]$$

여기서 \mathbf{R} 는 3 차원 회전행렬, \mathbf{C} 는 카메라 센터의 3 차원 좌표, \mathbf{K} 는 카메라의 intrinsic matrix로 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 f 는 focal length, α 는 가로, 세로 픽셀이 직사각형이 아닐 때의 scale parameter, (u_0, v_0) 는 이미지 중심의 좌표이다.

시스템에 사용된 두 카메라는 동일한 카메라이므로 두 카메라의 초점 거리가 같다는 가정을 사용하였다. BFGS 알고리즘[2]을 이용해 최적화를 진행했다.

3.2 동일평면성 측정

주어진 영상에서 ball의 2 차원 좌표가 검출되었다고 가정하였을 때 카메라 1 과 카메라 2 의 영상 간에 대응점이 생기게 된다. 또한 카메라 캘리브레이션이 완료된 상황에서 2 차원 좌표의 한 점과 카메라 센터를 잇는 직선의 식을 구할 수 있다. 카메라 1의 3차원 센터 좌표를 \mathbf{C}_1 , 카메라 1 영상의 볼 좌표의 homogenous coordinate 이 \mathbf{u}_1 로 주어지고, 카메라 2의 3차원 센터 좌표가 \mathbf{C}_2 , 영상의 볼 좌표를 \mathbf{u}_2 라고 하면 직선식은 각각 $\mathbf{C}_1 + s\mathbf{u}_1$, $\mathbf{C}_2 + t\mathbf{u}_2$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 s, t 는 변수로 두 직선이 만나는 점을 구하면 3 차원 상의 볼 좌표를 구할 수 있다. 실제로는 측정상의 오차로 인해 직선이 만나지 않게 되므로 두 직선 위의 점간의 거리가 최소가 되는 s, t 를 찾아야 한다. 따라서 다음과 같은 최소화 함수를 디자인 할 수 있다.

$$\min_{s,t} \|(\mathbf{C}_1 + s\mathbf{u}_1) - (\mathbf{C}_2 + t\mathbf{u}_2)\|_2^2$$

위 식은 3차원 벡터의 2-norm을 minimize 하는 문제인데, s, t 는 scalar 이므로 위 식을 풀어서 정리해보면 s, t 에 대한 이차식으로 정리가 가능하다. 이차식이

$f(x, y) = Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + Exy + F$ 와 같은 형태로 표현이 될 때 $4AB - E^2 > 0$ 가 성립하게 될 경우 f 를 최소화하는 (x, y) 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = -\frac{2BC - DE}{4AB - E^2}, y = -\frac{2AD - CE}{4AB - E^2}$$

위에서 구한 최소화 식을 s, t 에 대해 정리해보면 $4AB - E^2 > 0$ 의 관계가 항상 성립하게 되는 것을 알 수 있고 따라서 (x, y) 의 해는 항상 존재하게 된다. 따라서 캘리브레이션 후에는 볼좌표가 주어지게 되면 간단한 사칙연산 만으로 3 차원 좌표를 구하는 것이 가능하다.

볼의 3 차원 좌표들을 모두 구한 뒤, 이를 바탕으로 동일평면성 측정을 위해 선형 회귀법으로 평균 평면을 먼저 계산한다. 3차원 좌표를 (x_i, y_i, z_i) 라고 하고 볼 개수가 n 개라 하면, 행렬 \mathbf{X} 를 각 행이 $(x_i, y_i, 1)^T$ 인 $n \times 3$ 행렬이라 하고, 벡터 \mathbf{Y} 를 z_i 를 늘어놓은 $n \times 1$ 벡터라고 하면 선형 회귀식 $z = ax + by + c$ 에서 $\beta = (a, b, c)^T$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Y}$$

최종적으로 해당 파라미터를 가지고 구한 평면 위의 z 좌표와 실제 측정한 z 좌표의 차이를 통해서 동일평면성을 측정하게 된다. 가장 아래에 위치한 볼의 z 좌표로 regression 한 평면을 z 축으로 평행이동시켜 실장면의 식을 구한 뒤, 실장면의 평면과 계산한 볼좌표 간의 수직거리를 계산하여 최대값이 최종 값으로 정해진다.

3.3 휨 정도 측정

평면의 휨 정도는 이차곡선 위의 z 좌표값을 구해 계산할 수 있다. 이차곡선은 실장면을 결정할 때와 마찬가지로 최소자승법을 이용해서 fitting 하게 된다. 다른 점은 3.2 절에서 설명했던 행렬 \mathbf{X} 의 형태가 각 행이 $(x_i^2, y_i^2, x_i, y_i, 1)^T$ 인 $n \times 5$ 행렬이 된다는 것이다. 이후 같은 방법으로 행렬식을 구하면 $z = ax^2 + by^2 + cx + dy + e$ 형태의 이차곡선 식을 얻을 수 있다. 그리고 반도체 패키지의 가장자리에 있는 볼들에 대해서 (x, y) 좌표를 이차곡선 식에 대입해 가장 위에 있는 z 좌표를 찾는다. 해당 z 값과 이차곡선의 극값(꼭지점)의 z 좌표 차이가 휨 정도 값이 된다.

4. 실험 결과 및 분석

실험의 경우 서로 다른 8 개의 반도체 패키지에 대해 본 알고리즘을 적용하고 기존 상용화 알고리즘[3,4]과 비교해 정확도를 측정하였다. 각 패키지는 10 번의 촬영을 통해 각각의 영상에서 동일평면성 값이 가장 큰 볼의 위치와 동일평면성 값을 각각 측정하였다 (표 1). 패키지의 경우 3 차원 ground truth 값이 주어지지 않아 두 알고리즘 간의

비교가 얼마나 일치하는지로 성능을 평가하였다.

평가는 불검출 정확도와 동일평면성 값의 오차로 평가하였다. 불검출 정확도는 동일평면성 값이 가장 높은 불의 좌표를 검출했을 때 그 불의 좌표가 기존 알고리즘과 제안된 방법간에 일치하는지 평가하였다. 같은 패키지라도 영상에 따라서 불의 좌표가 다르게 나오기 때문에 검출 정확도의 경우에는 성능평가 지표로는 다소 부적절하다. 본 평가에서는 평균 56%로 두 알고리즘의 불 좌표가 일치함을 볼 수 있다.

두번째 평가로 동일평면성 값의 경우 두 알고리즘이 대체로 비슷한 것을 볼 수 있다. 평균 2.91 μm 의 적은 오차로 기존 시스템과 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다.

	불 검출 정확도 (%)	동일평면성 값 (상용화 알고리즘) (μm)	동일평면성 값 (제안된 방법) (μm)	오차 (μm)
패키지 1	60	45.49	43.77	1.72
패키지 2	20	52.71	50.86	1.84
패키지 3	60	62.33	57.50	4.84
패키지 4	90	79.88	79.42	0.46
패키지 5	80	87.58	93.67	6.09
패키지 6	30	98.83	91.81	7.02
패키지 7	10	107.26	106.51	0.76
패키지 8	100	112.32	112.87	0.55
평균	56.25	-	-	2.91

표 1. 반도체 동일평면성 측정 성능 비교

5. 결론

본 연구에서는 스테레오 영상 시스템 하에서 작동하는 3 차원 반도체 동일평면성 측정을 위한 알고리즘을 개발하였다. 상용화 알고리즘과 비교하여 큰 차이가 없이 정밀한 측정이 가능함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 차세대정보컴퓨팅기술개발사업에 의해 진행되었음 (2017M3C4A7077582).

참고문헌

- [1] Hartley, Richard, and Andrew Zisserman. "Multiple view geometry in computer vision," Cambridge university press, 2003.
- [2] Fletcher, Roger. "Practical methods of optimization," John Wiley & Sons, 2013.
- [3] Jedec standard, "Coplanarity Test for Surface-Mount Semiconductor Devices," JEDEC Solid state technology association, Jan. 2003.
- [4] Jedec standard, "Package Warpage Measurement of Surface-Mount Integrated Circuits at Elevated Temperature," JEDEC Solid state technology association, Oct. 2009.