마이크로 BGA 패키지의 볼 형상 시각검사를 위한 모아레 간섭계 기반 3차원 머신 비전 시스템

김민영[†]

경북대학교 IT대학 전자공학부

Three-dimensional Machine Vision System based on moire Interferometry for the Ball Shape Inspection of Micro BGA Packages

Min Young Kim[†]

School of Electronics Engineering, IT College, Kyungpook National University 1370 Sankyuk-dong,
Buk-gu, Daegu-si 702-701, Korea

(2012년 2월 26일 접수: 2012년 3월 20일 수정: 2012년 3월 30일 게재확정)

초 록: 본 논문에서는 마이크로 BGA 패키지 내외부의 마이크로 볼의 3차원 형상을 측정하는 광학 측정 시스템을 제안하고 이를 구현한다. 대부분의 시각 검사 시스템은 마이크로 볼의 복잡한 반사 특성 때문에 검사에 어려움을 겪고 있다. 정확한 형상의 측정을 위해서, 특별히 설계된 시각 센서 시스템을 제안하고, 위상이송 모아레 간섭계의 측정원리에 기반한 형상측정 알고리즘을 제안한다. 센서 시스템은 4개의 서브시스템을 보유한 패턴 투사 시스템과 영상획득 시스템으로 구성된다. 패턴 투사용 서브시스템은 공간상으로 서로 상이한 투사 방향을 가지며, 이는 측정 물체에 각기 다른 입사 방향을 가지는 패턴 조명이 투사될 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다. 위상이송 모아레 간섭계의 구현을 위한 정밀 위상이송을 위해서, 각 서브시스템의 패턴 격자는 PZT 구동기를 이용하여 일정 간격으로 이송한다. 최종적으로 측정되는 마이크로 볼의 경면반사와 그림자 영역을 효과적으로 제거하기 위해서, 다중 패턴 투사 시스템과 영상획득 시스템을 구현하고, 이를 테스트한다. 특히, 다중 프로젝션을 이용하여 획득되는 다중 높이 정보를 효과적으로 융합하기 위하여, 베이즈 센서 융합 이론을 기반으로한 센서 융합 알고리즘이 제안된다. 제안되는 시스템의 원리검증과 성능확인 위해, 마이크로 BGA볼과 기판 범프의 측정대상물에 대해서, 측정 반복성을 중심으로 실험이 수행되었으며, 획득된 실험 결과를 분석하고 논의한다.

Abstract: This paper focuses on three-dimensional measurement system of micro balls on micro Ball-Grid-Array(BGA) packages in-line. Most of visual inspection system still suffers from sophisticate reflection characteristics of micro balls. For accurate shape measurement of them, a specially designed visual sensor system is proposed under the sensing principle of phase shifting moire interferometry. The system consists of a pattern projection system with four projection subsystems and an imaging system. In the projection system, four subsystems have spatially different projection directions to make target objects experience the pattern illuminations with different incident directions. For the phase shifting, each grating pattern of subsystem is regularly moved by PZT actuator. To remove specular noise and shadow area of BGA balls efficiently, a compact multiple-pattern projection and imaging system is implemented and tested. Especially, a sensor fusion algorithm to integrate four information sets, acquired from multiple projections, into one is proposed with the basis of Bayesian sensor fusion theory. To see how the proposed system works, a series of experiments is performed and the results are analyzed in detail.

Keywords: BGA ball inspection, Ball Grid Array, Semiconductor package inspection, Moire interferometry, Multiple projection

1. 서 론

현재의 IC 조립을 위한 반도체 패키징 동향은 플립칩 패키징과 웨이퍼 레벨 패키징으로 대변될 수 있다. 이러한 반도체 패키징은 원형의 볼 형상을 가지는 솔더볼 혹은 범프를 패키지의 전기적 접속을 위하여 활용하고 있

는데, 이는 실장되는 PCB보드, 대응되는 플립칩, 혹은 다른 System-In-Package(SIP) 패키징 부품으로의 전기적 접점 역할뿐 아니라, 균형화된 열 방출 역할을 수행한다.¹⁻³⁾

이러한 반도체 패키지의 생산 품질을 제어하기 위해서, 패키지의 앞면 혹은 뒷면에 정렬되는 Ball-Grid-Array(BGA) 혹은 범프의 형상을 측정하고 검사하는 것은 매

[†]Corresponding author

E-mail: mykim@ee.knu.ac.kr

Fig. 1. Inside bumps and outside BGA of flipchip-BGA packages⁴⁾.

우 중요한 반도체 패키지 공정 중 하나이다.

Fig. 1은 상용 플립칩 BGA의 내부 구조 예를 보여준다.⁴⁾ 웨이퍼 다이 아래에 장착된 범프 배열이 전체 BGA 패키징으로 접점을 만들고, BGA 패키지의 최종 하단에는 다시 BGA가 전체 패키지의 접점을 형성한다. 이러한 접점 배열의 형성에 있어서, 범프 배열 및 BGA의 개별 높이 및 체적의 균일도, 그리고 옵션의 정확도가 중요한 공정 검사항목이 된다.

많은 연구자들의 노력에도 불구하고, 범프 혹은 BGA의 광학식 3차원 검사 문제는 쉽게 풀리지 않고 있다.⁵⁻⁸⁾ 이는 측정대상이 갖고 있는 복잡한 반사효과와 그림자 영향으로 대변되는 재료의 광학적 특징 그리고 형상의 기하학적 특징에 기인한다. 이 논문에서는, 엔지니어링적 개념을 활용하여, 간섭계에 기반한 센서 시스템이 제안되며, 제안되는 시스템의 특징은 다중 입사각을 갖는 패턴 투사 시스템을 구비한다는 것이다. 본 논문에서는 제안하는 센서 시스템에 대하여 기술하고자 하며, 또한 이를 이용한 3차원 형상 측정 방법에 대해서 제안하고 기술한다. 최종적으로, 제안된 시스템과 측정 알고리즘을 이용한 실제 시스템 구현과 실험 및 결과에 대해서 논한다.

2. 제안하는 위상천이 모아레 센서 시스템

다양한 3차원 측정 방법이 반도체 패키징의 검사를 위해 연구되어 왔으나, 본 논문의 응용사례를 위해서는, 세밀한 높이 분해능과 외부 노이즈 강인성 때문에 모아레

간섭 방법을 사용한다.

Fig. 2에는 제안된 시스템의 전체 구조가 나타나 있다.⁹⁾ 영상을 촬영하기 위한 영상획득부와 패턴 투사부로 구성되어 있으며, 패턴 투사부는 4개의 방향에서 각각의 패턴이 투사되는 서브시스템을 가지고 있다. 각 서브 시스템에는 삼각함수 형태의 패턴을 가지는 격자가 배치되어 있으며, 격자상의 패턴이 투사광학계를 거쳐 측정 물체에 주사되도록 구성된다. 90도 간격으로 각기 다른 방향으로 배치되어 있는 패턴 투사부는 측정 물체의 관점에서, 서로 다른 방향의 조명이 물체에 조사되도록 하는 효과를 도출하기 위해서 사용된다. Fig. 3은 패턴 투사부의 내부 구조를 보여준다. 각 패턴 투사부의 서브 시스템에는 LED 광원이 배치되어 있으며, 유리 위에 일정간격으로 생성되어 있는 격자 패턴이 조명의 전면부에 장착된다.

Fig. 3. Inside structure of each pattern projector.

Fig. 2. The proposed sensor system based on multi-directional projection type moire interferometer.

Table 1. Sensor system specification.

Item	Specification	Note
Camera	2M resolution (1600×1200 pixels) Interline CCD with 7.4 μm square pixels	Adimec 2M 1600m
Pixel resolution in FOV	6um/pixel in case of bumps 20um/pixel in case of BGA	dependent to target object size
Grating	Ronchi grating : 40lp/mm, 80lp/mm	dependent to target object size (Edmund optics)
PZT	Single axis PZT : 45 um traveling	(PhysikInstrumente)
Imaging lens	Macro lens series : 0.37x ~ 1.2x	dependent to target object size (Schneider optics)

패턴 투사 렌즈는 격자 영상을 측정 물체로 정확하게 투사하도록 정렬되고, 격자가 장착되는 격자 이송 스테이지는 PZT 구동기에 의해서, 이송될 수 있도록 구성된다.

제작된 센서 시스템의 사양은 Table 1에 정리하였다.

3. 형상 측정 방법 및 센서 융합 알고리즘

3.1. 형상 측정 원리

측정을 위한 기본원리는 위상천이 모아레 간섭법이다.¹⁰⁾ 특히, 반도체 패키지의 불형상 측정 대상물체와 투사되는 패턴의 기하학적 요인과 광학적 요인에 의해 생기는 그림자 효과 및 측정 물체의 경면 반사를 제거하기 위해서, 이 논문에서는 4개 이상의 다중 패턴 투사 시스템이 제안된다. 4개 이상의 다중 패턴 투사 시스템을 사용함으로써, 일반적인 패턴 투사 기반 측정 시스템이 측정할 수 없는, 불형상 측정 대상물의 가림영역 및 경면반사 영역에 대해서, 이 영역을 효과적으로 제거한 3차원 형상 측정이 가능해 진다.

3.2. 측정 알고리즘 및 센서 융합 알고리즘

다른 방향에서 주사되는 패턴을 생성시키기 위해, 각 LED조명이 순차적으로 점등되면, 해당되는 격자는 패턴의 위상천이를 발생시키기 위해, 물리적으로 PZT 구동기에 의해서 일정한 간격으로 매번 이송된다. 사용되는 격자는 4개의 패턴 투사부에서 모두 동일하며, 동일한 패턴이 각기 입사 방향만 다르게 투사된다. 각 격자가 PZT에 의해 이송할 때마다, 측정 물체에 투사되는 격자 패턴은 물체상에서 물체의 기하학적 형상에 따라 변형되고, 변형된 패턴이 영상획득부의 카메라에 의해 촬상된다. 영상획득 장치에 의해 획득된 영상은 모두 컴퓨터로 전달되어, 이후의 높이 정보 추출을 위한 알고리즘의 입력으로 사용된다.

각 방향의 패턴 투사에 대해서, 4장의 영상이 3번의 PZT 이송에 의해 획득된다. 즉, 패턴 투사부가 모두 4방향의 입사각을 가지므로, 카메라가 획득하는 전체 16장의 영상이 획득되며, 시야범위(FOV)내의 위상 정보 추출, 즉 높이 정보 추출을 위해서 모든 영상이 사용된다. 추후 영상의 각 화소별로 획득되는 위상 정보는 해당 화소가 나타내는 측

정물체 영역의 높이 정보 계산을 위해 사용된다. 4장의 영상 밝기 정보를 이용하여, 위상 정보를 추출하는 것은 4 bucketing 방법¹¹⁾을 사용하며, 식(1)에 정의된 위상 추출 방법에 의해서 카메라 시야범위내의 해당 화소마다 위상 정보가 결정된다.

결정된 위상 정보에 기반하여, i 번째 조명을 이용하여, 측정되는 물체의 측정 높이, $H_i(x,y)$,는 식(2)에 의해 계산될 수 있다. i 는 i 번째 조명을 의미하는 첨자이다.

$$\phi_i(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{4i}(x, y) - I_{2i}(x, y)}{I_{1i}(x, y) - I_{3i}(x, y)} \right) \text{ for } i = 1, \dots, 4 \quad (1)$$

$$H_i(x, y) = k_i(x, y) \cdot (\phi_i(x, y) - \phi_{i\_ref}(x - y)) \text{ for } i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

식(1)에서는 위상천이에 따른 4장의 영상 밝기값 ($I_{1i}(x, y) \sim I_{4i}(x, y)$)과 4 bucket 알고리즘을 이용하여 영상 좌표(x, y)의 위상정보를 계산하고 있다. 획득된 위상 정보 $\phi_i(x, y)$ 은 센서 시스템 교정 단계에서 저장되어 있는 기준 위상 정보 $\phi_{i\_ref}(x, y)$ 과 비교되어지며, 식(2)에 의해 영상 좌표(x, y)마다 정의된 비례 상수값 k 에 의해서, 높이 정보로 변환된다. 기준 위상 정보는 센서시스템의 교정단계에서, 규정한 기준 평면 측정을 이용하여 이를 영상 관측하고, 획득된 영상정보를 이용하여 해당 기준 평면의 위상 정보를 계산하는 방식으로 획득이 가능하다. 여기서, $k_i(x, y)$ 는 위상정보를 높이 정보로 변환시켜주는 역할을 하는 변환 비례상수이며, 이 또한 센서 시스템의 교정 단계에서, 미리 알고 있는 시편 높이를 모든 시야범위에서 한번 측정하여, 보정 값을 획득할 수 있다.

식(2)로부터, 영상 좌표(x, y)에 대해서, 4가지 방향의 투사 조명에 따른, 4개의 각기 다른 높이 정보를 얻을 수 있다. 획득되는 서로 다른 높이 정보로부터, 앞서 언급한 가림영역과 경면반사 영역을 효과적으로 제거할 수 있는 정보 융합방법이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위해, 베이 지안 기법 기반 정보 융합 방법을 이용한다.¹²⁾ 기법에 사용되는 가중치는 각 신호에서 관측되는 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio)에 의해서 평가가 가능하며, 제안하는 방법에서는 위상 천이 동안 관측되는 신호의 가시도 (visibility)를 지표로 이용한다.¹³⁾

식(3)은 제안하는 방법의 pseudo code를 나타내며, 알

Fig. 4. Algorithmic flowchart for multi-directional projection type moire interferometer.

고리즘 흐름도는 Fig. 4에 도시된다.

For $(x, y) \in ROI$
 check whether (x, y) of $H_i(x, y)$ is shadow area or specular noise point
 If $(x, y) \in \text{shadow area or specular noise point}$
 search $H_j(x, y)$ is not shadow area or specular noise point

$$H(x, y) = \sum_j W_j(x, y) \cdot H_j(x, y) \text{ where } (x, y) \notin \text{shadow area or specular noise point} \quad (3)$$

 If $(x, y) \notin \text{shadow area or specular noise point}$

$$H(x, y) = \sum_i W_i(x, y) \cdot H_i(x, y)$$

 end

$W_i(x, y)$ 는 $H_i(x, y)$ 의 데이터 신뢰도를 나타내는 지수이다. 제안되는 방법은 베이지안 센서 융합 기법에 기반하여, 위상 천이 동안 관측되는 신호의 가시도를 이용하여 $W_i(x, y)$ 가 결정된다. 식(3)에서 ROI는 영상 FOV내에서 측정 관심영역을 의미한다.

식(4)는 $W_i(x, y)$ 를 결정하기 위한, 신호의 가시도 계산식을 나타낸다. 그리고, 식(5)는 식(4)의 가시도를 이용한 최종 신뢰도 지수 산출식을 나타낸다.

$$V_i(x, y) = \frac{\sqrt{(I_{1i}(x, y) - I_{3i}(x, y))^2 + (I_{2i}(x, y) - I_{4i}(x, y))^2}}{\sum_j I_{ji}(x, y)} \quad (4)$$

$$W_i(x, y) = \frac{V_i(x, y)}{\sum_j V_j(x, y)} \quad (5)$$

4. 센서시스템 실험 및 결과

4.1. 기판 범프(Substrate bump)

제안하는 센서 시스템의 동작 성능을 보기 위해서, 첫 번째로 Fig. 5에 보여지는 바와 같이, 배열 형태의 범프를

가지고 있는 기판 범프 스트립(substrate bump stripe)에 형성되어 있는 범프에 대한 형상 측정을 테스트한다. 각 범프의 크기는 약 $125 \mu\text{m}$ 이며, 해당하는 범프의 높이는 규정은 약 $50 \mu\text{m}$ 이다. 범프 측정의 예는 Fig. 6에 도시되어 있다. 측정된 높이 수치는 최고 높이를 나타낸다. 범프의 광학 노이즈 특성 때문에, 측정 반복성은 검사 장비의 성능을 점검하기 위한 중요한 요소이다. 일반적으로 측정 높이의 정확도는 센서 시스템의 교정에 의하여 교정이 가능하지만, 측정 반복성은 교정이 불가능한 센서 시스템의 신뢰도를 나타내므로 고정도의 측정 시스템에서 측정 정확도보다 중요한 의미를 갖는다. Fig. 7은 측정된 3차원 정보를 기반으로 검사된 해당 범프의 높이, 면적, 부피, 옵션 값에 대한 3σ 값을 보여준다. 상기 데이터의 계산은 해당 범프의 30번 측정에 의해서 산출된 결과이다.

추출된 부피와 높이 값은 3σ 의 관점에서 각각 2.1% 및 $1.8 \mu\text{m}$ 의 편차를 보인다. 부피 반복성 측정 그래프에 나와 있는 것과 같이, 몇 개의 범프는 좋지 않은 반복성을

Fig. 5. Micro bumps on substrate (grey area: bumped area).

Fig. 6. Shape measurement examples of reflowed bumps.

Fig. 7. Measurement repeatability test on reflowed bumps and an example of contaminated bump with a low repeatability.

나타낸다. 하지만, 나머지 범프들은 최대 2.1%이내의 반복성을 보인다. 반복성이 나쁜 범프를 육안으로 재검한 결과, 해당하는 범프는 외부물질에 의해 오염된 범프임을 알 수 있었다. 면적과 읍셋은 각기 2.1% 및 $6.9\mu\text{m}$ 의 반복성을 보인다. 측정결과, 어레이 타입으로 배열되어 있는 경우의 범프는 상호 반사에 의한 효과가 관측됨을 알 수 있었고, 범프의 외곽에 불확실한 낮은 높이의 노이즈를 만드는 것을 확인할 수 있었다. 상호반사에 의한 효과를 감쇄하기 위해, 다양한 정보 융합 방법을 이용하여, 해당 노이즈를 줄이기 위한 방법의 고안이 필요함을 알 수 있다.

4.2. Ball Grid Array

두 번째 응용사례를 위하여, Fig. 8에 보여지는 $300\mu\text{m}$ 크기의 볼을 가지는 BGA가 테스트되었다. 첫째로, 두 개의 패턴 투사부를 이용하였을 때를 테스트하였고, 측정결과는 4개의 패턴 투사부를 이용하였을 때와 비교 검사하였다. Fig. 9는 BGA측정의 대표적인 경우를 보여주고 있다. 볼의 형상이 반구에 가까운 형상임에도 불구하고,

Fig. 8. Micro balls on BGA package.

측정된 결과는 박쥐날개 형상에 가까운 상이한 결과를 보여준다. 두 개의 꼭지점의 위치는 두 개의 조명각도에 기인하는 측정대상물의 경면반사 영역과 일치하는 것으로 보인다. 만약 하나의 패턴 투사부가 사용된다면, 결과는 그림자 영역과 경면 반사 영역에 의해 관측되는 정보가 거의 소실될 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 결과적으로 두 개의 패턴 투사부를 이용한다고 하더라도, 볼 형상의 복원을 위해서 경면반사 영역과 그림자 영역이 효율적으로 제거되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9. Shape measurement of BGA balls using two projections.

Fig. 10. Shape measurement of BGA balls using four projections.

Table 2. Experimental results by using the proposed sensor system.

Measurement Repeatability (3σ)	Bump	BGA
Volume (%)	2.1	2.5
Height (μm)	1.8	2.1
Area (%)	2.1	2.7

최종적으로 적용된 4개의 패턴 투사부를 가지는 센서 시스템은 Fig. 10에 보여지듯이 효과적으로 볼 형상을 복원할 수 있다는 것을 보여준다. 구의 아래면에 해당하는 부분은 카메라에서 관측이 물리적으로 불가능하므로, 높이 방향으로의 정보는 두 개의 패턴 투사부를 사용한 경우와 비교하여 이상 형상의 오류 없이 복원됨을 볼 수 있다.

기관 범프 및 BGA를 측정한 최종 결과는 Table 2에 정리하였다.

5. 결 론

본 논문에서는, 플립칩 패키징 및 웨이퍼레벨 패키징의 반도체 패키징에 사용되는 범프와 BGA의 구형상 솔더 볼을 측정 검사하기 위한 3차원 시각 센서 시스템을 제안하였다.

그림자 문제와 경면반사 문제를 풀기 위해서, 다중 패턴 투사부를 가지는 센서 시스템이 제안되었다. 제안하는 시스템은 각기 다른 입사방향을 가지는 4개의 패턴 투사부를 사용하여 검증하였으며, 시스템은 카메라, 4개의 패턴 투사부 서브시스템, 격자 이송 메커니즘 그리고, PZT 구동기로 구성된다.

제안하는 시스템을 이용하여, 측정된 높이값은 본 논문에서 제안하는 베이지안 기법을 이용하여 정보 융합되었

다. 정보융합을 위한 가중치는 관측된 신호의 신호 대 잡음비를 기준으로 정의된다. 해당 시스템을 구현하여 테스트한 결과, 크기 $125\ \mu\text{m}$ 높이 $50\ \mu\text{m}$ 의 범프에 대해 부피, 높이, 넓이의 검사항목에 대해 각각 2.1%, 1.8 μm , 2.1% 내의 3σ 반복성을 얻을 수 있었다. 그리고, BGA의 형상측정을 검증한 결과 2개의 프로젝션에 비교하여, 4개의 프로젝션 측정결과가 보다 실물에 가까운 형상 복원이 가능함을 보였다. 크기 $300\ \mu\text{m}$ 의 BGA에 대해 부피, 높이, 넓이의 검사항목에 대해 각각 2.5%, 2.1 μm , 2.7% 내의 3σ 반복성을 얻을 수 있었다.

결과적으로, 수행된 실험결과를 통하여, 제안된 센서 시스템과 센서 융합 알고리즘을 이용하여, 측정된 대상물의 반복성과 측정 형상면에서 신뢰할 수 있는 측정 결과를 확보할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 우수제조기술연구센터(ATC) 기술개발사업(고속 3차원 표면실장 검사 로봇 시스템 개발)으로 지원된 연구결과임 (No. 10032833)

참고문헌

1. T. Hamano, "Flip Chip Technology and Market Trend", in MEPTec (Micro-Electronics Packaging & Test Engineering Council) Report, pp.25-28, November/December (2000).
2. R. Lanzone, "How Flip-Chip Package Interactions Affect the Manufacture of High-Performance ICs", Chip Scale Review, Jan-Feb (2006).
3. G. Caswell and J. Partridge, "BGA to CSP to Flip Chip-Manufacturing Issues", J. Microelectron. Packag. Soc., 8(2), 37 (2001).
4. Amkor Technology, Amkor Technology Inc. March (2012) from <http://www.amkor.com/go/packaging/all-packages/fcm-bga-flip-chip-molded-ball-grid-array>
5. P. Kim and S. Rhee, "Three-Dimensional Inspection of Ball Grid Array Using Laser Vision System", IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, 22(2), 151 (1999).
6. H. Yen, D. Tsai and S. Feng, "Full-Field 3-D Flip-Chip Solder Bumps Measurement Using DLP-Based Phase Shifting Technique", IEEE Trans. on Advanced Packaging, 31(4), 830 (2008).
7. A. Teramoto, T. Murakoshi, M. Tsuzaka and H. Fujita, "Automated Solder Inspection Technique for BGA-Mounted Substrates by Means of Oblique Computed Tomography", IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, 30(4), 285 (2007).
8. J. W. Park, J. S. Yang, and T. Y. Choi, "On the Development of an Inspection Algorithm for Micro Ball Grid Array Solder Balls", J. Microelectron. Packag. Soc., 8(3), 1 (2001).
9. M. Y. Kim, "Multi-Directional Projection Type Moire Interferometer and Inspection Method Using the Same", US Patent 7894077 (2011).
10. K. J. Gasvik, "Optical Metrology", 3rd Ed., pp.173-192, John Wiley & Sons, Ltd (2003).

11. J. E. Greivenkamp and J. H. Bruning, "Phase shifting interferometry", in *Optical Shop Testing*, D. Malacara, ed., pp.547-666, Wiley, New York (1992).
12. L. A. Klein, "Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making", pp.127-147, SPIE Press, Washington (2004).
13. M. Y. Kim and K. Koh, "Shadow Free Moire Interferometer With Dual Projection For In-Line Inspection of Light Emitting Diodes", *Int. J. Optomechatronics*, 1(4), 404 (2007).