

◆특집◆ 지능형 Machine Vision 응용

칩의 정밀 실장을 위한 비주얼 서보잉

이덕영*, 장경남*, 김종형**, 조형석*

A Visual Servoing For High Precision Chip Mounting Technology

Duk-Young Lee*, Kyung Nam Jang*, Jong Hyeong Kim** and Hyungsuck Cho*

Key Words : Visual Servoing(비주얼 서보잉), Chip Mounting Technology (칩 실장 기술), Feature Tracking(특징치 추종), Occlusion(가림현상).

1. 서 론

마이크로 프로세서의 성능 향상과 더불어 개인용 컴퓨터가 많이 보급되었고, 휴대폰도 사회 생활에 있어서 아주 중요한 정보교환 수단으로 사용되고 있다. 휴대폰에는 카메라 폰 기능이나 게임, 그리고 수첩과 같은 여러 가지 기능이 첨가되었고, 그 크기도 점점 작아지고 있다. 더욱이 인터넷과 같은 여러 컴퓨터간의 통신 네트워크 서비스도 증가하면서 데이터 통신의 대역폭을 증가 시키기 위한 광 통신 기술 시장도 급속도로 성장해 왔다. 광 통신 네트워크는 기존의 구리선을 이용한 통신 네트워크 보다 훨씬 고용량의 통신을 할 수 있으며, 가격적인 면에 있어서도 훨씬 효율적이다. 이러한 통신 네트워크의 성장으로 인해 광 부품(optical components) 시장도 높은 성장률을 보이고 있다. 최근에 마이크로 시스템을 구현할 수 있는 기능성과 에너지 효율, 그리고 높은 신뢰도를 실현할 수 있는 마이크로 부품이 다양하게 등장하고 있다.[1]

전자, 기계, 유체 그리고 광학 등의 다양한 방

면의 기술이 집약된 마이크로 부품의 수요가 증가되고 있으며, 전자 패키징(packaging)에서도 베어칩(bare chip)과 같은 미세 전자 부품들이 사용되고 있다[1]. 이러한 미세 부품에는 자동 조립(automatic assembly)과 같은 조작 시스템이 필요하다. 마이크로 정밀도의 조작을 요구되는 시스템은 현재 산업현장에서 쓰이는 개루프(open loop)의 정밀 조립장비의 보정 오차 범위를 대부분 넘어선다. 따라서 정밀한 광학 장치가 결합된 피드백 루프(feedback loop)의 비전 센서를 사용하면 부정확한 센서와 기구적 오차를 보상해 줌으로써 원하는 정밀도를 만족시킬 수 있다[2-4]. 비주얼 서보잉(visual servoing)은 카메라를 사용함으로써 엔드이펙터(end-effector)를 페루프(close-loop)로 제어할 수 있게 해준다[2-6].

전자 부품을 실장하는 기존의 칩 실장 시스템은 칩을 확인하기 위한 카메라와 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)의 위치를 확인하기 위해 fiducial 마크를 인식하는 카메라를 갖추고 있으며 카메라 보정 정보를 이용하여 칩과 PCB 사이의 상대 위치를 계산하여 더 이상의 카메라의 피드백 없이 정렬한다. 미세 부품 실장에서는 카메라 보정오차와 기구적인 오차에 의해 점차 누적오차가 발생하여 칩과 PCB 가 정확하게 정렬되지 않는다. 따라서 이 연구에서는 카메라로 칩과 PCB 위에 있는 마크를 실시간으로 확인할 수 있는 카메라의 피드백을 이용하여 비주얼 서보잉 알고리즘을 적용하고자 한다. 본 논문에서는 실험을

* 한국과학기술원 기계공학과
Tel. 042-869-3253, Fax. 032-869-3210
Email: ducky2@lca.kaist.ac.kr

** 서울 산업대학교 기계설계자동화공학부
Tel. 02-970-6357, Fax. 02-974-8270

Email : johnkim@snut.ac.kr
비전 및 로봇 광학, 특히 마이크로 조립과 비주얼 서보잉, 힘 제어 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

위해서 크기가 2.0 x 1.2mm 인 TR 칩을 사용하였다.

2. 칩 실장 시스템

전자 부품을 실장(mounting)하는 과정에서, 각각의 부품들은 납이 붙은 PCB 위에 놓여진다. 그림 1은 여러대의 실장 헤드(mounting head)가 작업을 하는 공정을 보여준다. 전자부품의 표면실장작업은 크게 네가지 과정으로 분류할 수 있다. 먼저 실장 헤드가 부품공급장치(feeder)로부터 전자 부품을 공급받고, 대상 전자부품을 카메라로 가져와 검사하여 인식을 한다. 그리고 또 다른 카메라로 fiducial 마크를 검사함으로써 PCB의 자세를 측정한다. 마지막으로 원하는 위치에 칩을 올려 놓는다.

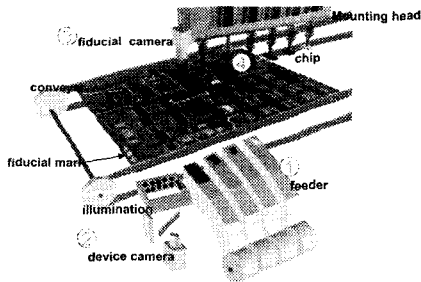


Fig. 1 Conventional chip mounting System

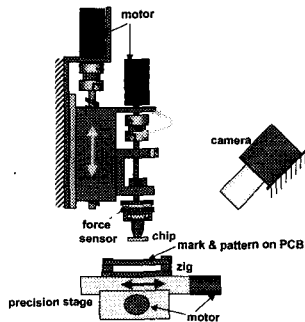


Fig. 2 The proposed visual servoing system

그림 2는 카메라가 장치되어 있는 제안된 시스템을 보여준다. 전체 시스템은 구동부와 영상 피드백 부분으로 구성되어 있다. 구동부는 실장 헤드부와 수평방향으로 정렬을 하기위한 스테이지로 구성되어 있고, 헤드부는 상하로 이동을 위한 볼 스크류 장치와 칩의 방향을 정렬하기위한 회전

모터로 구성되어 있다. 헤드의 끝단에는 전자 부품을 탈장착하기 위한 진공 흡입 장치가 있고, 접촉력을 측정하기 위한 로드 셀(load cell)이 장착되어 있다.[7]

카메라의 영상을 영상처리하여 칩과 마크의 특징치를 동시에 추출해 내고, 추출된 특징치를 이용하여 제어기에 운동 신호를 주어 칩과 마크를 정렬하게 된다. 이 때 카메라의 초점은 PCB 위의 패턴과 마크에 고정되어 있다. 칩과 마크가 접근함에 따라서 칩이 목표 위치에 표시된 마크를 가리게 되는 가림현상(occlusion)이 발생하게 된다. 따라서 고배율에서의 비주얼 서보잉 과정에서 가림현상은 아주 중요한 문제가 된다. 제어 시스템 구조는 그림 3에 나타나있다. 카메라에서 얻은 영상을 통해 칩과 PCB에 표시된 마크의 특징치를 추출하고 영상 추종 알고리즘을 통해 특징치를 추종하게 된다. 칩의 특징치와 그에 맞는 마크의 특징치를 각각 선정하게 되면 특징치사이의 오차가 있어서 비주얼 서보잉 알고리즘은 오차신호를 운동 신호로 전환하게 된다.

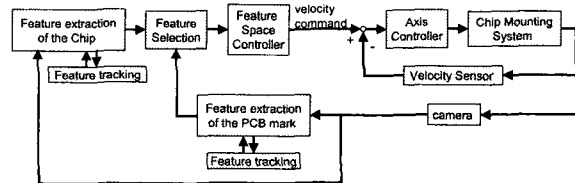


Fig. 3 Schematic of the servoing system

3. 특징치 추출

그림 4(b)와 같이 칩을 실장하기 위해서는 실장할 사각의 TR 칩을 PCB 보드 위에 표시된 사각의 마크안에 넣어서 정렬해야 한다. 이 과정에서 칩과 마크의 각각에 대응하는 특징치를 추출해야 한다. 먼저 어떤 특징치를 사용할 것인가를 정하고, 얻어진 영상에서 영상처리 알고리즘을 통해 해당하는 특징치를 추출해야 한다. TR 칩에서는 칩의 하단 에지(edge)가 PCB에 있는 마크의 안쪽 경계 부분이 대응되며 현재 시스템의 구성에서 측정할 수 있다. 칩의 특징치와 마크의 특징치의 방향은 칩의 리드(lead)와 마크의 모양을 통해 알 수 있다.

TR 칩의 특징치와 그에 맞는 PCB 위에 표시된

마크의 특징치를 추출해 내는 영상처리 알고리즘은 그림 4(a)와 같으며, 그림 4(b)-(f)에는 특징치를 추출하는 각각의 과정에서 얻어지는 결과 이미지를 보여준다. 먼저 그림 4(b)에서 보이는 바와 같이 마크와 칩의 리드(lead)를 추출하게 위해 얻은 영상으로부터 이진화 하였다. 이진화를 통해 얻어진 영상은 밝은 부분과 어두운 부분으로 분류가 되는데, 이 영상에서는 칩의 리드(lead)부분과 마크 부분이 밝게 나타나게 된다.

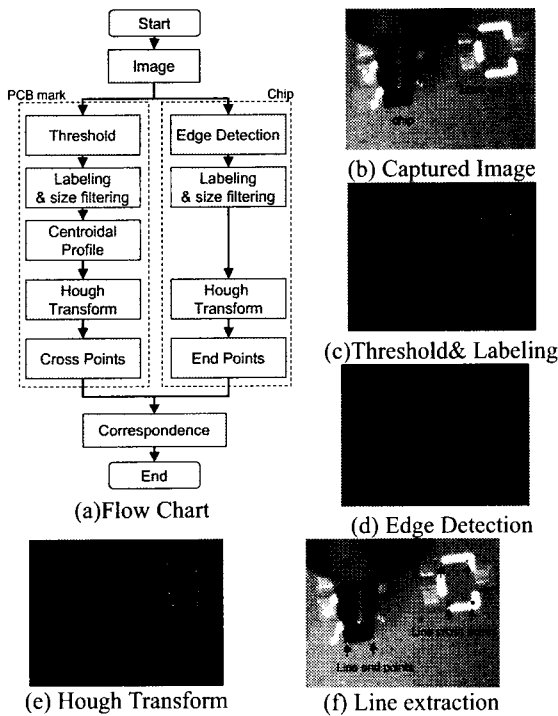


Fig. 4 Feature Extraction

그림 4(c)는 이진화된 영상을 라벨링(labeling)한 결과 영상이다. 라벨(label)중에서 세개를 선택하여 세 라벨의 중심점 C에 대하여 그림 5(a)와 같이 각도 ϕ 에 따라 라벨된 픽셀까지의 거리 r 를 도식화하면 그림 5(b)와 같다. 거리 r 의 한계는 그림 5(a)와 같이 100 픽셀 떨어진 사각 윈도우로 정의하였다. 그림 5(b)에서의 a와 b, c와 d, e와 f사이의 점들은 그림 5(a)에서의 중심점 C와 ϕ 방향으로 각각 a와 b, c와 d, e와 f 점과의 거리를 나타내고, 이 점들이 특징치를 찾는데 아주 중요한 정보가 된다. 그림 5(b)에서 보이는 세 구간 중 가장

짧은 구간인 c-d 구간이 마크의 방향을 알아내는데 중요한 실마리가 된다. 그림 5(b)와 같이 세개의 영역으로 분류되지 않는 경우 선택된 세 라벨들은 마크가 아니다.

픽셀 좌표 $u-v$ 좌표를 호프 좌표 $\rho-\theta$ 좌표로 변환시키는 호프 변환(Hough Transform)을 사용하면, 중심점 C로부터 라벨과 만나는 경계점들로부터 직선 정보를 구할 수 있다.

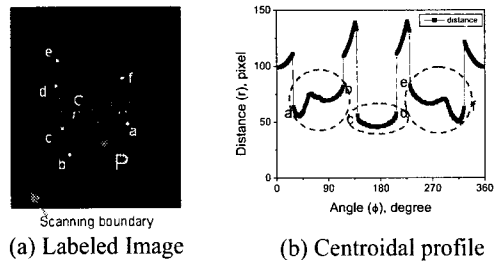


Fig. 5 Centroidal Profile

칩의 하단 에지(edge) 부분은 밝기가 어두웠다가 밝아지는 부분이다. 이러한 특징을 알고 있을 때, 종 방향 소벨 연산자(Sobel operator)만을 사용하고 이진화 기술을 사용하면 칩의 하단 에지(edge)를 구할 수 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$I(u-1,v+1) + 2I(u,v+1) + I(u+1,v+1) - [I(u-1,v-1) + 2I(u,v-1) + I(u+1,v-1)] > T_{sobel} \quad (3-1)$$

$$I(u,v) < T_{chip}$$

여기서 T_{sobel} 와 T_{chip} 은 문턱값(threshold value)이다. 그림 4(d)와 같이 구해진 에지점들을 호프 변환(Hough transform)시킴으로써 칩의 하단 에지(edge)에 대한 직선 정보를 구할 수 있고, 칩의 방향은 칩의 리드(lead)의 위치와 개수로 알아낼 수 있다. 그림 4(e), (f)는 구해진 직선정보를 보여주고 있다. 칩과 마크의 방향으로 알아낸 정보로 각각에 대응되는 특징치를 찾을 수 있다.

4. 특징치 추종

특징치 추출 알고리즘은 복잡하므로 실시간으로 매 샘플링시간마다 적용하기는 적합하지 않으므로 간단한 방법이 필요하다. 영상에서의 추종 방법은 이전 시간에 추출된 특징치 정보를 이용하

여 현재 시간의 특징치를 전체영역에서 찾지 않고 보다 빠르게 특징치를 찾게 된다.

4.1 특징치 추종과 가림현상

본 논문에서 적용한 방법은 차제곱의 합(Sum-of-square-difference, SSD) 추종 방법은 처리 시간이 짧으므로 여러 특징치를 실시간으로 추종할 수 있게 한다. 이 방법은 SSD 평가함수를 최소인 특징치의 이동 거리 $\mathbf{d} = (\Delta u, \Delta v)^T$ 를 찾게 된다.

$$e(\mathbf{d}) = \sum_{m,n \in N} [I(u(t_{i-1}) + m, v(t_{i-1}) + n, t_{i-1}) - I(u(t_{i-1}) + m + \Delta u, v(t_{i-1}) + n + \Delta v, t_i)]^2 \quad (4-1)$$

여기서 N 은 관심영역의 범위를 나타내며, $I(\cdot, t_i)$ 와 $I(\cdot, t_{i-1})$ 는 각각 시간 t_i 와 t_{i-1} 일 때 영상에서의 밝기 값 함수이다. 평가함수는 두 순간의 특징치의 영상 밝기 값이 정확히 일치할 경우 영이 된다.

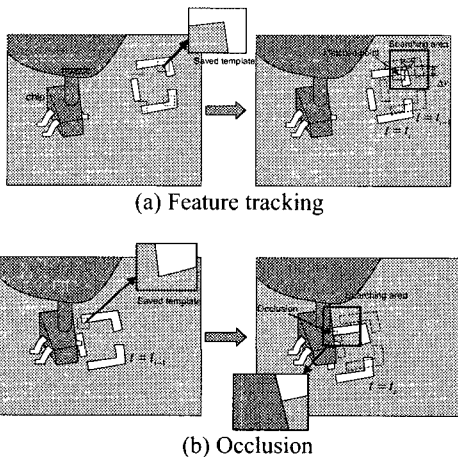


Fig. 6 Tracking and occlusion

그림 6 은 특징점 추종과 가림현상의 예를 보여주고 있다. SSD 방법은 이전 시간 t_{i-1} 에서 특징점을 기준으로 일정 크기의 영상을 저장하고 그림 6(a)와 같이 관심영역에서 저장된 템플릿(Template)과 밝기값 분포가 일치하는 위치를 찾게 된다. 가림현상이 발생하게 되면, 관심영역에서 저장된 템플릿과 일치하는 분포가 없으므로 SSD 의 최소값은 큰 값을 갖게 된다. 칩의 특징점은 이전시간의 템플릿과 비교하고 마크의 특징점은 수평이동만

있으므로 초기에 저장된 템플릿을 사용하여 일치하는 특징점이 없을 경우 SSD 의 최소값은 더 큰 값을 갖게 되며, 판별식은 다음과 같다.

$$\min[e(\mathbf{d})] > T_{oc} \quad (4-2)$$

여기서 T_{oc} 는 가림현상을 판별하기 위한 문턱값이다.

4.2 가려진 특징치의 위치 추정

비주얼 서보잉을 위한 특징치 추종에서 가림현상이 발생할 때, 가려진 특징치를 추정하여야 한다. 이러한 추정에는 두 가지 정보를 이용할 수 있다. 한 가지는 특징치들간의 기하학적인 정보이며, 또 다른 한가지는 스테이지의 이동 정보이다.

본 응용에서는 네개의 라인이 마크의 기하학적인 모양을 나타내고 각 라인은 회전하지 않으므로 가려진 특징점의 위치는 시간 이웃하는 특징점 j 의 위치 $(u_{nj}(t_i), v_{nj}(t_i))$ 와 시간 t_{i-1} 일 때 두 점의 잇는 직선의 방향각 $\theta_{cm}(t_{i-1})$ 에 의해서 예측할 수 있다. 이웃점과 가려진 특징점을 지나는 직선의 방정식은 다음과 같다.

$$u \cos \theta_{nj}(t_{i-1}) + v \sin \theta_{nj}(t_{i-1}) = \rho \quad (4-3)$$

$$\text{여기서 } \rho = u_{nj}(t_i) \cos \theta_{nj}(t_{i-1}) + v_{nj}(t_i) \sin \theta_{nj}(t_{i-1}).$$

이동정보를 이용하는 방법은 다음과 같다. 이전 영상에서의 특징점의 위치는 깊이 정보는 없으나 스테이지는 수평방향으로 이동하고 상하방향은 항상 일정하므로 카메라 보정 정보를 이용하여 이전 위치에서 특징점을 구할 수 있으며, 스테이지의 이동 정보를 알고 있으므로 현재 특징점의 위치를 계산할 수 있다. 그런 다음 카메라 보정 정보를 이용함으로써 영상 평면에서 현재 특징치의 위치를 계산할 수 있다. 이 방법은 카메라의 보정 오차에 큰 영향을 받게 된다.

5. 비주얼 서보잉 실험

그림 7 은 칩 실장을 위한 순서도를 보여주고 있다. 특징점과 각각의 상응점은 처음에 획득된 영상으로부터 추출되고, 그 다음 획득된 영상에서는 SSD 추종 방법을 이용하여 추종하게 된다.

제안된 서보잉 알고리즘에서는 칩과 PCB 상에 있는 마크를 x 방향, y 방향, 그리고 방향각을 정렬하고자 한다. 마지막으로 실장헤드가 아래쪽으로 이동함에 따라서 칩의 아래 에지(edge)와 마크의 정렬을 유지시키게 된다.

5.1 직선성분의 비주얼 서보잉

칩과 PCB 의 마크를 정렬하기 위해서 각각의 특징점에 의해 정의되는 선분들의 중심점과 방향을 비주얼 서보잉을 위한 특징치로 정의한다. 스테이지의 x 와 y 방향의 속도를 각각 v_x 와 v_y 라 하고 실장헤드의 회전 속도를 ω 할 때 각각의 속도와 특징치의 상관관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_x = k_x \frac{\sum_i^n (f_{u,ci} - f_{u,mi})}{n}$$

$$v_y = k_y \frac{\sum_i^n (f_{v,ci} - f_{v,mi})}{n} \quad (5-1)$$

$$\omega = k_\omega \frac{\sum_i^n (f_{\theta,mi} - f_{\theta,ci})}{n}$$

여기서 k_x , k_y 와 k_ω 는 제어기의 게인을 나타내며, f_u 와 f_v 는 선분의 중심점의 영상 픽셀 좌표값을 나타낸다. 그리고 f_θ 는 선분의 방향각을 나타낸다. n 은 칩의 에지 선분중에서는 보이는 개수이다. 아래 첨자 i 는 선분의 순번이고, m 과 c 는 각각 마크와 칩의 특징치를 의미한다.

5.2 가려진 면적을 이용한 비주얼 서보잉

수평방향의 정렬을 마치게 되면 예로써 그림 8(a)와 같은 영상을 얻을 수 있다. 그러나 수평방향으로 정렬이 된 것 같지만 카메라는 옆에서 비스듬하게 보고 있으므로 위에서 보게 되면 칩과 마크는 정렬이 되지 않은 상태이다. 따라서 칩이 점차 아래쪽으로 이동하게 되면 칩의 에지부분과 마크의 안쪽 경계부분이 정렬에서 벗어나게 되어 그림 8(c)와 같이 일치하지 않게 된다.

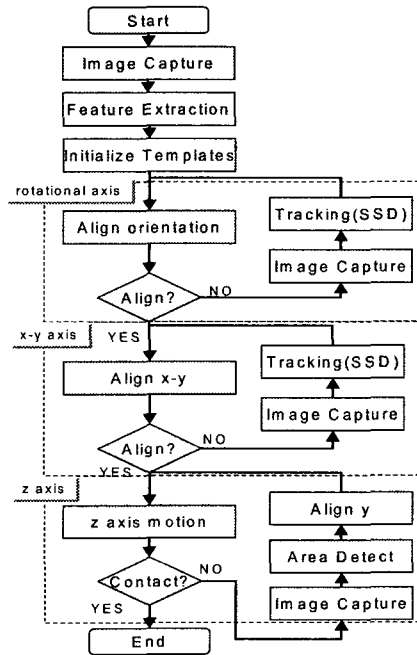


Fig.7 Flow Chart for Visual Servoing

칩이 점차 아래쪽으로 이동할 때 마크는 정렬을 유지하기 위해 수평방향으로 이동해야 한다. 본 시스템에서는 영상 평면의 v 방향과 y 방향이 일치하므로 스테이지가 y 방향으로 정렬을 유지하기 위해 움직여야 한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서 새로운 특징치를 정의한다. 칩이 마크를 가림에 따라 영상에서 보이는 마크의 면적은 줄어들게 된다. 이러한 면적을 특징치로 정의하여, 초기에 마크의 면적 σ_a 을 저장하고 실장헤드가 아래쪽으로 움직임에 따라서 칩에 의해서 가려지므로 마크의 면적은 줄어들게 된다. 제안된 방법은 y 방향으로 움직이므로 각 순간에 마크의 면적 σ 을 처음과 같이 유지함으로써 정렬을 유지할 수 있다. 따라서 다음과 같이 y 방향방향의 속도를 정의한다.

$$v_y = k_a (\sigma_a - \sigma) \quad (5-2)$$

여기서 k_a 는 제어기의 게인이며, σ 는 현재의 면적을 나타낸다. 현재 면적이 초기에 저장된 면적보다 줄어들게 되며, 스테이지는 $+y$ 방향으로 이동하게 된다.

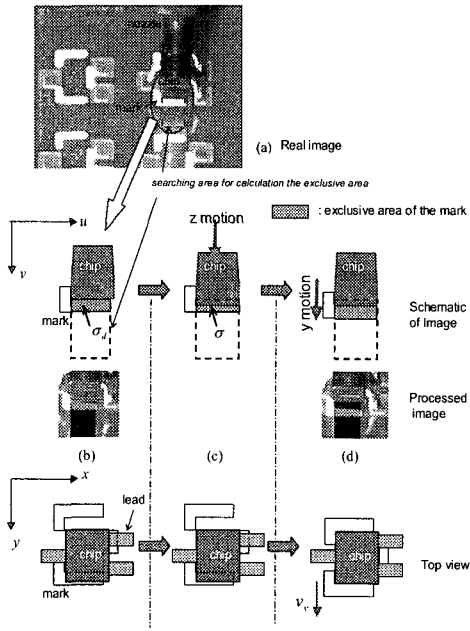


Fig. 8 Servoing using Exclusive Area

5.3 실험 결과

그림 9 은 제안된 그림 8 의 방법을 적용했을 때 과정을 순차적으로 획득한 영상들이다. 우선 그림 9(a)와 같이 특징치를 추출하고 나서 특징치를 추종하기 위해서 템플릿을 초기화한다. 실장해드의 회전에 의해 그림 9(b)와 같이 칩과 마크의 방향을 정렬시키고 그림 9(c)-(f)와 같이 마크는 점차 칩방향으로 수평이동한다. 그림 9(e)에서 칩은 특징치중의 하나를 가리게 되고 이때 가림현상을 판별하여 그 위치를 예측하게 된다. 그림 9(g)-(h)에서 회색 부분은 관심영역에서의 마크를 나타내며, 검정부분은 나머지 부분으로 관심영역을 이진화 된 것이다. 마크를 나타내는 회색 부분의 픽셀 수를 현재의 면적 σ 로 정의한다. 칩이 점차 아래쪽으로 움직임에 따라서 마크는 가려지게 되고 면적이 줄어들게 되어 제안된 서보잉 방법에 의해 스테이지의 마크는 y 방향으로 움직이게 되고 면적 σ 는 초기의 면적 σ_d 를 유지함으로써 정렬을 유지하게 된다. 최종순간에 칩은 PCB와 접촉하게 되고 칩의 아래쪽 에지부분과 마크의 안쪽 경계부분은 칩이 아래쪽으로 움직임에도 불구하고 일치하게 된다.

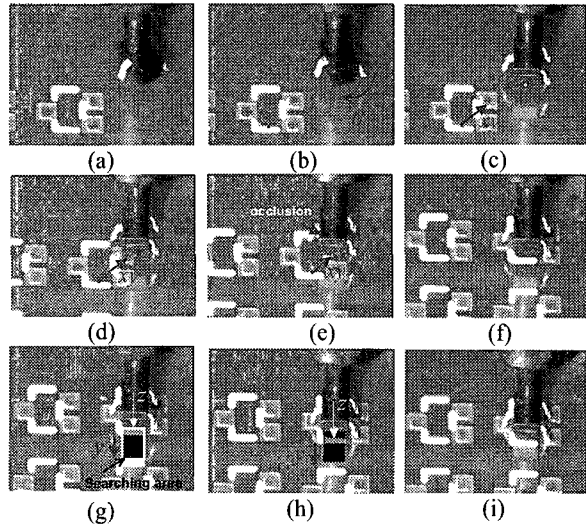


Fig. 9 Experimental Result

6. 결론

본 논문은 카메라에 의해 피드백을 갖는 칩실장 시스템을 제안하였다. 마이크로 조립시스템에서의 가림현상을 소개하였다. 영상 추종에서 가림현상이 발생하게 되면 가려진 특징치의 위치는 기하학적인 정보와 이동 정보를 이용하여 예측할 수 있다. 선분의 중심점과 방향각을 이용한 비주얼 서보잉과 가림에 의한 면적의 변화를 이용한 비주얼 서보잉 방법을 이용하여 소형 칩을 실장하는 작업을 수행하였다.

칩과 마크가 서로 접근함에 따라 가림현상이 점차 많이 발생하게 되고 보이는 특징치의 수는 줄어들게 된다. 따라서 접근 방향에 따라서 최종적인 순간까지의 보이는 특징치가 많도록 작업의 접근 방향을 유도해야 한다. 본 논문에서는 한 예로 방향각을 정렬한 후 접근하는 방법을 사용하였다. 제안된 순차적인 알고리즘은 실제 시스템에 적용하였다. 향후에는 제안된 방법을 보다 일반화하고 마이크로 부품의 조립에 적용하고 한다.

참고문헌

1. H. Yamamoto, A. Fujisatki and S. Kikuchi, "MCM and Bare Chip Technology For A Wide Range of Computers", Electronic Components and Technology Conference, pp. 133-138, Orlando, USA, 1996.
2. J. T. Feddenma and R. W. Simon, "CAD-Driven

- Microassembly and Visual Servoing”, Pro. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 1212-1219, Leuven, Belgium, May, 1998.
3. S. J. Rais, B. Vikramaditya, and B. J. Nelson, “Micropositioning of a Weakly Calibrated Microassembly System Using Coarse-to-Fine Servoing Strategies”, IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 23, No. 2, pp. 123-131, April, 2000.
 4. Y. Zhou, B. J. Nelson and B. Vikramaditya, “Integrating Optical Force Sensing with Visual Servoing for Microassembly”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, No. 28, pp. 259-276, 2000.
 5. N.R. Gans, P.I. Corke and S.A. Hutchinson, “Performance Test of Partitioned Approaches to Visual Servo Control”, IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1616-1623, USA, 2002.
 6. E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet, “2-1/2-D Visual Servoing”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 2, pp. 238-250, 1999.
 7. D.Y. Lee and H.S. Cho, "Precision Force Control via Macro/Micro Actuator for Surface Mounting System," IROS, Vol. 3, pp.2227-2232, EPFL Lausanne, Switzerland, 2002.