

클러스터링 알고리즘을 이용한 SMT 검사기의 검사시간 단축 방법

김 화중*, 박 태형**

(*)충북대학교 대학원 제어계측공학과, (**)충북대학교 전기전자컴퓨터공학부

The Reduction Methods of Inspection Time for SMT Inspection Machines Using Clustering Algorithms

Hwa-Jung Kim*, Tae-Hyoung Park**

(*)Dept. of Control & Instrumentation Eng., Chungbuk National University

(**)School of Electrical & Computer Eng., Chungbuk National University

Abstract - We propose a path planning method to reduce the inspection time of AOI (automatic optical inspection) machines in SMT (surface mount technology) in-line system. Inspection windows of board should be clustered to consider the FOV (field-of-view) of camera. The number of clusters is desirable to be minimized in order to reduce the overall inspection time. We newly propose a genetic algorithm to minimize the number of clusters for a given board. Comparative simulation results are presented to verify the usefulness of proposed algorithm.

1. 서론

최근 컴퓨터, 휴대폰, PDA 등 전자제품 수요의 급증으로, 표면실장기술(SMT; surface mount technology)을 이용한 인쇄회로기판(PCB; printed circuit board) 전자조립시스템의 중요성이 증대되고 있다. SMT 인라인 시스템은 표면실장부품을 인쇄회로기판에 조립하는 전자조립시스템으로서, 표면실장 전자부품의 소형화, 고밀도화 등 부품제작기술의 발전과 조립라인 자동화 추세에 의해 현재 대부분의 전자제품 제조라인에서 채택되고 있다. [1]

SMT 인라인 시스템을 구성하는 장비 중 검사기는 부품 장착 이상, 납땜 불량, 회로 단락 등 인쇄회로기판 조립시 발생하는 이상을 자동으로 검출하는 전용 로봇 시스템이다. 영상처리기술의 발달로 최근 많이 보급되고 있으며, 조립라인의 생산성 및 품질 신뢰성 향상에 크게 기여하고 있다. SMT 검사기의 대부분은 적외선표형 로봇에 설치된 카메라가 기판 위를 수평 이동하며 영상을 획득하는 AOI (automatic optical inspection) 형으로, 본 논문은 AOI 형 SMT 검사기의 검사시간 단축을 위한 방법을 제안한다.

그림 1 은 AOI 형 SMT 검사기의 평면도이다. FOV (field-of-view) 는 정상적인 처리가 가능한 카메라의 영상획득영역으로서, 가로 세로 각 수십 mm 의 크기로 제한된다. 따라서 전체 기판의 검사에 여러 번의 영상획득

이 필요하며, 이를 위하여 기판에 분포된 검사 대상 윈도우들을 여러 개의 묶음, 즉 클러스터로 만들어야 한다. 전체 클러스터의 수는 검사기의 영상획득 횟수와 동일하므로 클러스터의 수를 단축하면 전체 영상획득에 소요되는 시간을 단축할 수 있으며, 카메라의 이동시간도 단축된다. 본 논문은 전체 클러스터의 수를 최소화하기 위한 유전자 알고리즘을 제안한다. 검사기 문제의 해결에 적절한 염색체를 새로이 정의하며, 교배 및 돌연변이 방법을 제시한다. 또한 단일 연결 알고리즘 및 ISODATA 알고리즘을 검사기 클러스터링 문제에 적용하는 방법과 새로이 S자형 알고리즘을 제시한다. 상용 검사기를 대상으로, 여러 가지 알고리즘을 적용하여 비교평가를 수행하며, 본 논문에서 새로이 제시한 유전자 알고리즘의 유용성을 검증한다.

2. 검사기 경로계획 문제

그림 2 는 AOI 형 SMT 검사기의 기판과 윈도우, FOV 및 클러스터를 보여준다. 검사기가 기판에서 검사하고자 하는 영역을 윈도우라 정의하며 부품, 납땜 및 브릿지로 구분된다. 부품 윈도우는 부품 장착의 이상, 납땜 윈도우는 납땜 불량, 브릿지 윈도우는 리드 간 단락을 검출하는 영역을 뜻한다. 하나의 부품에 대하여 여러 개의 윈도우가 설정될 수 있으며, 하나의 기판에 수백에서 수천 개의 윈도우가 존재한다. 모든 윈도우는 클러스터에 포함되어야 하며, 각 윈도우는 여러 개의 클러스터에 중복되어 소속될 수 없다. 검사기는 카메라를 이동시켜 모든 윈도우에 대한 영상을 획득하고 처리하여 검사한다.

일반적인 검사기의 경로계획은 다음의 두 단계로 이루어진다. 우선 주어진 윈도우에 대하여 최소의 수를 갖는 클러스터들을 생성한다. 다음 단계로서, 생성된 클러스터로부터 최소시간의 방문경로를 생성한다. 첫 단계의 문제는 클러스터링 문제의 범주에 해당하며, 두 번째 단계의 문제는 전형적인 외판원 문제(TSP; traveling salesman problem)[2]의 범주에 해당한다.

그러나 첫 번째 단계의 경우, 전형적 클러스터링 문제는 클러스터의 중심과 윈도우 사이의 총 거리를 최소화하도록 하는 클러스터의 생성 문제로서, 전체 클러스터의 수는 주어진 값이지만, 검사기 클러스터링 문제는 각 클러스

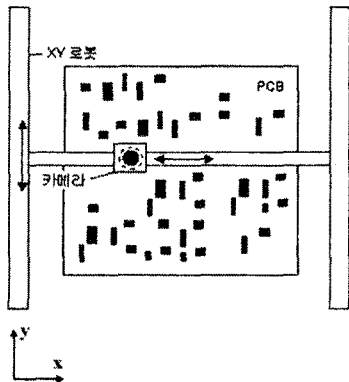


그림 1. SMT 검사기의 평면도

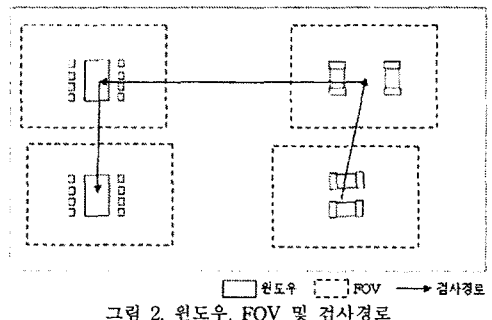


그림 2. 윈도우, FOV 및 검사경로

터의 크기 제한 (FOV 제한조건)을 고려하여 전체 클러스터의 수를 최소화하는 문제이므로 전형적 클러스터링 방법을 문제에 직접 적용하는 것은 매우 어렵다.

3. 검사 클러스터링 알고리즘

전형적인 클러스터링 알고리즘인 단일연결 알고리즘과 ISODATA 알고리즘을 본 문제에 적용하며, 새로이 S자형 알고리즘을 제시한다. 또한 유전자 알고리즘을 검사기 클러스터링 문제에 적용하는 방법을 제안한다.

3.1 단일연결 알고리즘

단일연결 (single link) 알고리즘[3]은 전형적 클러스터링 알고리즘의 하나로서, 초기에 많은 클러스터를 생성시키고, 이를 병합하며 진행하는 방법이다. 매우 간단한 구현을 특징으로 하나, 국지적 해법을 사용함으로 인하여, 윈도우 분포에 따라 좋지 않은 해가 생성될 수 있다. 다음은 검사기 클러스터링을 위한 단일연결 알고리즘이다.

- S1. 각 윈도우를 클러스터로서 생성.
- S2. 각 클러스터에 대하여, 병합 후 크기가 가장 작아지는 이웃의 클러스터를 찾는다. 병합 후 크기가 FOV 크기를 초과하지 않는 경우 병합.
- S3. 더 이상의 병합이 이루어지지 않을 때까지 S2를 반복.

3.2 ISODATA 알고리즘

ISODATA (iterative self-organizing data analysis) 알고리즘은 k-means 알고리즘[3]을 보완한 방법으로서, 클러스터의 병합 및 분리 과정을 포함한다. 초기에 모든 클러스터를 생성하고 이를 개선하며 진행하는 방식으로서, 초기 해에 따라서 해의 성능이 달라질 수 있다. 다음은 검사기 클러스터링을 위한 ISODATA 알고리즘이다.

- S1. 기관을 가로 세로 일정한 간격으로 분할하여, 각 구역을 클러스터로서 생성.
- S2. 만약 클러스터에 윈도우가 포함되지 않았다면 제거.
- S3. 남아있는 클러스터 중 윈도우가 경계선에 있다면 클러스터의 중심점을 이동해서 윈도우를 포함.
- S4. 클러스터를 이동하여 더 많은 윈도우를 포함할 수 있다면, 클러스터의 중심점을 이동.
- S5. 이동을 한 뒤 클러스터에서 속하지 않는 윈도우가 있다면, 이 윈도우에 대한 클러스터를 생성.
- S6. 각 클러스터에 대하여, 이웃한 클러스터와 병합했을 때 크기가 FOV를 초과하지 않는다면, 두 클러스터를 병합.
- S7. 더 이상 개선이 없을 때까지 S4-S6과정을 반복.

3.3 S자형 알고리즘

새롭게 제안된 S자형 알고리즘은 클러스터를 하나 씩 생성시키며 진행하는 방법을 사용한다. 기관의 모서리에서 최초 클러스터를 생성하며, S자형으로 클러스터의 중심을 이동하면서 다음 클러스터를 생성시킨다. 이 방법은 비교적 간단히 구현되며, 기관 검사에 적절한 해를 얻을 수 있다. 그러나 직관적 경험에 의존한 방법으로서, 윈도우 분포에 따라 해의 성능이 크게 달라질 수 있다. 다음은 검사기 클러스터링을 위한 S자형 알고리즘이다.

- S1. 기관의 우 하단의 윈도우를 중심점으로 클러스터를 생성.
- S2. 생성된 클러스터의 중심점을 FOV가 허용하는 범위 내에서 움직이며 주변 윈도우를 포함.
- S3. 생성된 클러스터를 기준으로 최 근접의 윈도우를 중심점으로 새로운 클러스터를 생성.
- S4. S2-S3의 과정을 윈도우가 클러스터에 모두 포함될 때까지 기관을 S자형으로 움직이며 반복.

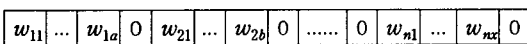


그림 3. 염색체의 정의

3.4 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 국지적 해에 머물 수 있는 최적화 알고리즘을 보완하기 위하여 널리 사용되며, 전형적 클러스터링 문제에도 적용되고 있다.[4] 여러 개의 염색체 (chromosome)가 하나의 세대를 이루고, 세대를 거듭하며 복제, 교배 및 돌연변이를 통하여 우수한 적합도를 갖는 염색체를 선택하여 진화시키는 방법으로 해를 구한다. 본 논문은 유전자 알고리즘을 검사기 클러스터링 문제에 적용하기 위하여 염색체, 적합도 함수 및 연산자들을 새로이 정의한다.

3.4.1 염색체 및 적합도

유전자 알고리즘의 기본 단위인 염색체를 그림 3과 같이 정의한다. 염색체를 구성하는 유전자 (gene)는 윈도우 번호 $w_{ij} \in W_i$ 또는 0의 값을 갖는다. 이때 0은 클러스터 사이의 구분을 위하여 사용하는 기호이며, w_{ij} 는 0보다 큰 정수로서, 클러스터 i 에 속한 윈도우 번호이다. 염색체는 모든 윈도우를 유전자로서 포함하며, 염색체에 의하여 전체 윈도우 및 클러스터를 한 번에 표현할 수 있다.

한 세대에 대하여 p 개의 염색체를 생성시킨다. 처음 세대의 염색체는 S자형 알고리즘을 사용하여 생성하며, 시작 윈도우를 무작위로 선택하여 여러 개의 염색체를 만든다. 어떤 세대의 k 번째 염색체 V_k ($k=1, \dots, p$)의 길이를 l_k , 클러스터 수를 n_k , 윈도우의 수를 m 이라 하면, 다음의 관계가 성립된다.

$$n_k = l_k - m \quad (1)$$

즉, 클러스터의 수는 염색체 길이와 윈도우 수의 차로 구할 수 있다. 한 세대에 대한 클러스터수의 최대값을 n_{max} 라 하면,

$$n_{max} = \max_{k=1, \dots, p} n_k \quad (2)$$

염색체 V_k 의 적합도 e_k 를 다음과 같이 정의한다.

$$e_k = (n_{max} - n_k) \times \frac{p}{\sum_{i=1}^p (n_{max} - n_i)} \quad (3)$$

최대의 클러스터 수를 갖는 염색체의 적합도는 0이며, 클러스터의 수가 감소할수록 적합도는 증가하고, 평균값을 갖는 경우의 적합도는 1이다. 여기서 적합도는 유전자 알고리즘의 복제 또는 선택과정에서 사용된다.

3.4.2 교배 연산자

교배는 염색체에 변화를 주어 우수한 적합도를 갖는 염색체로 진화시키기 위한 과정이다. 임의의 두 염색체 V_1, V_2 를 선택하고, 다음의 교배 연산을 수행한다.

- S1. 염색체 V_1 에서 하나의 클러스터를 임의로 선택.
- S2. 염색체 V_1 에서 선택된 클러스터의 윈도우들을 염색체 V_2 에서 모두 찾고, 이들을 포함하는 클러스터를 모두 선택.
- S3. V_2 의 선택된 클러스터가 포함하는 윈도우들을 염색체 V_1 에서 모두 찾고, 이들을 포함하는 클러스터를 모두 선택.
- S4. V_1 과 V_2 의 선택된 클러스터가 포함하는 윈도우들이 동일할 때까지 S2-S3를 반복.
- S5. V_2 의 선택된 클러스터들을 V_1 으로 이동시켜 V_1 을 생성하고, V_1 의 선택된 클러스터들을 V_2 로 이동시켜 V_2 를 생성.

3.4.3 돌연변이 연산자

돌연변이는 교배와 달리 하나의 염색체를 임의로 선택하고 이를 변이시키는 것이다. 임의의 염색체 V_1 을 선택하고 다음의 돌연변이 연산을 수행한다.

- S1. 염색체 V_1 에서 하나의 클러스터를 임의로 선택.

S2. 선택된 클러스터의 모든 윈도우에 대하여, 검색체 내의 다른 클러스터로 이동이 가능하다면, 이들 윈도우를 모두 이동시켜 새로운 검색체 V_i 를 생성.

4. 시뮬레이션

삼성테크윈(주)의 SMT 검사기 AI400 [5]을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 카메라 FOV 크기는 16×12 (mm)이고, 영상획득시간은 0.25(sec/FOV)로 설정하였다. 또한 XY 축은 사다리꼴 가속속을 갖는다고 가정하였으며, 최고속도는 700(mm/sec), 가속시간은 0.2(mm/sec²)로 설정하였다. 기판의 최대 크기는 256×245(mm)로 하였으며, 검사 윈도우의 크기는 최소 0.9×0.25(mm)에서 최대 5.7×3.9(mm)로 하였다.

유전자 알고리즘의 경우 한 세대의 검색체 수는 100개, 교배 확률은 50%, 돌연변이 확률은 80%로 하였으며, 세대수는 200개로 제한하였다. 또한 클러스터를 모두 방문하는 카메라의 이동경로는, 전형적 TSP 알고리즘인 최근접 탐색법(nearest neighbor)으로 초기 경로를 생성하고 2-opt 방법으로 경로를 개선시켰다.

그림 4는 기판 1을 대상으로 각 알고리즘을 적용하여 생성한 전체 클러스터의 모습을 보여준다. 알고리즘에 따라 생성된 클러스터의 수가 상이하며, 분포된 모습은 현저한 차이를 보였다. 즉 같은 수의 클러스터 수를 갖는 경우에도 이동시간에 차이가 발생할 수 있음을 보여준다.

표 1은 알고리즘 별 클러스터 수 및 검사시간을 비교하여 보여준다. 다양한 윈도우 수 및 분포를 갖는 10개의 기판에 대하여 4가지 알고리즘을 적용하였으며, 검사시간은 영상획득시간과 이동시간의 총합으로 계산하였다.

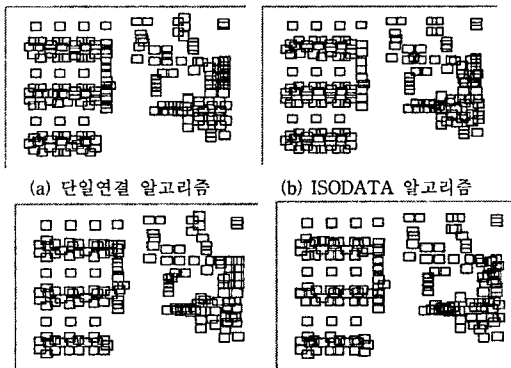


그림 4. 알고리즘 별 클러스터 생성 예

표 1. 알고리즘 별 클러스터 수 및 검사시간

기판번호	윈도우 수	단일연결 알고리즘		ISODATA 알고리즘		S자형 알고리즘		유전자 알고리즘	
		클러스터 수	검사 시간 (sec)	클러스터 수	검사 시간 (sec)	클러스터 수	검사 시간 (sec)	클러스터 수	검사 시간 (sec)
1	3029	184	67.48	175	65.09	169	62.92	164	60.45
2	3029	181	66.56	180	65.84	165	61.73	162	59.75
3	2885	172	63.38	164	60.73	155	57.76	151	56.58
4	2441	154	58.05	150	56.02	145	54.54	139	52.01
5	2049	121	46.13	119	45.11	116	44.39	110	41.99
6	3029	177	65.05	173	63.99	170	63.68	161	59.52
7	3029	182	68.04	181	67.85	170	63.78	166	62.60
8	1350	84	32.81	85	33.35	81	31.79	77	30.30
9	1428	83	32.04	82	31.30	80	30.98	76	29.19
10	1133	72	27.81	69	26.85	68	26.46	64	24.87

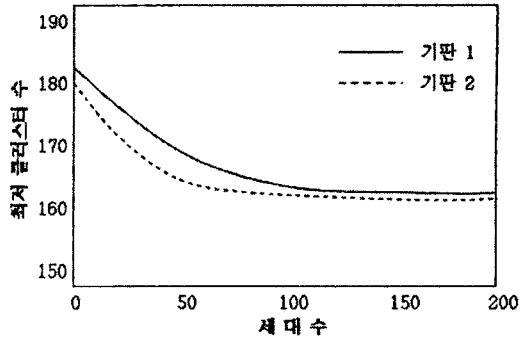


그림 5. 검색체 진화과정(세대별 최저 클러스터 수)

평균적으로 유전자 알고리즘, S자형, ISODATA, 단일연결의 순서로 좋은 해를 얻을 수 있었으며, 유전자 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 4 ~ 10 (%)의 성능 개선 효과가 있음을 확인하였다.

그림 5는 기판 1과 기판 2에 대한 유전자 알고리즘 적용 시 검색체의 진화과정으로, 세대 별 최저 클러스터 수의 변화를 보여준다. 클러스터 수가 지수 함수적으로 감소하고, 일정 세대 이후는 변화가 없음을 확인하였다.

5. 결론

인쇄회로기판 조립라인에서 그 중요성이 증가하고 있는 SMT 검사기를 대상으로, 검사시간 단축을 위한 경로 계획방법을 제시하였다. 검사 클러스터 생성 단계와 카메라 이동순서 결정 단계의 계층적 경로계획 방법을 채택하였고, 이 중 검사 클러스터 생성의 최적화를 위한 알고리즘들을 제시하였다. 검사기 클러스터링 문제는 전형적 클러스터링 문제와 목적함수 및 제한조건에 있어서 차별화된다. 전형적 알고리즘으로부터 유도한 단일연결, ISODATA 알고리즘을 구현하였고, 새로이 S자형 알고리즘을 제안하였다. 국지적 해법의 한계를 극복하기 위하여 유전자알고리즘을 검사기 클러스터링 문제에 응용하였으며, 이를 위하여 검색체, 적합도 및 연산자들을 새로이 정의하였다.

시뮬레이션 결과, 전형적 클러스터링 문제에 좋은 성능을 갖는 단일연결, ISODATA에 비하여 S자형 및 유전자 알고리즘이 더 좋은 해를 생성시킴을 확인하였다. 특히 유전자알고리즘은 여러 가지 경우의 문제에 안정적으로 수렴되는 결과를 볼 수 있었다.

본 연구에서는 전형적 검사기 경로계획문제를 클러스터 생성 문제와 이동순서 결정문제로 분리하여 접근하였다. 이는 문제의 복잡도를 완화하여 용이하게 해를 구하고자 함이나, 결과적으로 해의 최적성이 저하될 수 있다. 추후 두 개의 문제를 하나로 통합하여 검사기 경로계획을 수행하는 연구를 진행할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] 박대형, "전자조립용 CAM 시스템의 기술동향", 전자공학회지, 제26권 제3호, pp. 48-61, 1999.
- [2] M. Bellmore, G. Nemhauser, "The Traveling-Salesman Problem: A Survey", Operation Research, vol. 16, pp. 538-558, 1968.
- [3] A. K. Jain, M. N. Murty, P. J. Flynn, "Data Clustering: A Review", ACM Computing Surveys, vol. 31, no. 3, pp. 264-323, 1999.
- [4] Lin Yu Tseng, Shiueng Bien Yang, "A genetic approach to the automatic clustering problem" Pattern Recognition vol. 34, pp. 415-424, 2001.
- [5] 삼성 테크윈(주), "SMT 검사장비 AI400", <http://www.samsungtechwin.com>.