

다수 표면실장기계를 포함하는 PCB조립라인의 라인균형화 알고리즘 설계

Design of a Line Balancing Algorithm for the PCB Assembly Line Including Multiple Surface Mounters

김진철, 이성한, 김대원, 이범희
(Jin-Cheol Kim, Sung-Han Lee, Dae-Won Kim, Bum-Hee Lee)

Abstract : This paper proposes a heuristic algorithm to efficiently perform line balancing in the PCB assembly line including multiple surface mounters efficiently. Generally, the problems in line balancing are classified into two kinds. Firstly, is the determining of the minimum number of machines required for achieving the desired production rate. Secondly, is the assign of jobs to multiple machines in order to minimize the cycle time which is defined as a maximum among the working times of machines when the number of machines is fixed. In this paper, we deal with the latter. We consider a PCB assembly line, including the multiple surface mounters arranged serially as a target system. Also, the conveyor is assumed to move at a constant speed and have no buffer. Considering that the minimum number of machines required for the desired production rate is a discrete nonincreasing function which is inversely proportional to the cycle time, we propose an optimization algorithm for line balancing by using the binary search method. The algorithm is validated through computer simulation, the results of which show that their shapes coincide nearly with those of optimal line balancing efficiency graphs regardless of the number of components, the performance of surface mounters, and the structure of assembly line.

Keyword : line balancing(LB), cycle time, PCB assembly, surface mounter, binary search

I. 서론

라인균형화에 관한 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다[2][5][13]. 첫째, 생산률이 주어졌을 때 그것을 달성하기 위해 필요한 최소의 기계수를 구하는 문제가 있다. 둘째, 기계수가 주어졌을 때 각 기계에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간 - 주기시간(cycle time : C) - 이 최소가 되도록 각 작업을 분배하는 문제가 있다. 일반적으로 전자를 Type I 문제, 후자를 Type II 문제라고 한다.

라인균형화 문제는 NP-hard문제이므로 발견법적인 알고리즘을 찾는 연구가 많이 수행되었다[8]. Type I 문제의 해결을 위해 제시된 발견법적 라인균형화 알고리즘은 크게 단순 우선순위 결정규칙(single pass decision rule)을 적용한 알고리즘[6][14][10], 복합 우선순위 결정규칙(composite decision rule)을 적용한 알고리즘[1], 역추적 결정규칙(backtracking decision rule)을 적용한 알고리즘[3][7], 최적탐색 결정규칙(optimal seeking decision rule)을 적용한 알고리즘[4][8][11][12]의 네 가지로 분류된다. 한편 Type II 문제는 대부분 Type I 문제에 대한 알고리즘을 반복적으로(iteratively) 적용함으로써 해결할 수 있다[2][3][5][9][13].

인쇄회로기판(printed circuit board : PCB)을 필요로 하는 산업의 발전에 따라 표면실장부품(surface mounted device : SMD)의 제작에서부터 인쇄회로기판에 조립하는 과정에 이르기까지의 제반 관련 기술을 통칭하는 표면실장기술(surface mounting technology : SMT)의 개발 및 보급이 매우 활발하다. 인쇄회로기판 조립라인의 생산율을 높이기 위해서는 각 표면실장기계(surface mounter :

SM)의 작업 최적화와 조립라인상의 다수의 표면실장기계에 대한 라인균형화가 동시에 수행되어야 한다. 그러나 실제 산업현장에서 조립라인의 라인균형화는 대부분 수작업에 의존하고 있고 이로 인해 생산물의 감소를 초래하고 있다. 따라서 본 논문은 인쇄회로기판 조립라인이 주어졌을 때 모든 작업을 마치기 위해 필요한 주기시간이 최소가 되도록 하는 라인균형화 알고리즘을 제시한다.

PCB상의 부품들은 사용가능노즐에 따라 일반용 부품과 정밀용 부품으로 분류되고 일반용 헤드와 정밀용 헤드의 유무에 따라 각 부품을 처리할 수 있는 표면실장기계에 제약이 있다. 따라서 본 논문은 조립대상 PCB와 조립라인의 구성에 따라 세가지 라인균형화 알고리즘을 제시한다. 그리고 각 경우에 대해 주기시간과 필요한 기계수가 반비례한다는 사실을 근거로 하여 일반용 부품과 정밀용 부품에 대해 각각 주기시간에 대해 이분탐색법을 이용하여 $f(C)$ - 주기시간 C안에 모든 SMD를 PCB상에 실장하는데 필요한 최소의 SM수 - 를 순환적으로 구하는 발견법적 라인균형화 알고리즘을 제안한다. $f(C)$ 를 구하는 알고리즘은 한 개의 부품을 조립할 때 가장 큰 시간을 소요하는 자동노즐교환시간을 감소시키기 위해 사용노즐에 따라 부품을 연속적으로 분배하도록 구현한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문이 다루고자 하는 문제와 목적함수 및 성능지표를 정의한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 라인균형화 알고리즘에 대해 설명한다. IV장에서는 모의실험 결과를 제시한다. V장에서는 결론과 추후연구과제 등을 설명한다.

II. 문제의 설정

1. 문제의 정의

하나의 완성된 인쇄회로기판을 조립하기 위해서는 세 단계가 필요하다. 우선 스크린 프린터(screen printer)를 이용하여 인쇄회로기판상의 표면실장부품이 실장될 부분에 접착제를 묻힌다. 다음에는 다수 표면실장기계를 이용하여 인쇄회로기판상에 표면실장부품을 실장한다. 마지막으로 리플로우 퍼니스(reflow furnace)를 이용하여 표면실장부품이 인쇄회로기판상에 실장될 부분에 땀납을 묻힌 후 열을 가해 고정시킨다. 본 논문은 두번째 단계에서 사용되는 표면실장기계들의 라인균형화 문제만을 다룬다.

표면실장기계는 부품을 흡착하여 인쇄회로기판에 장착하는 헤드와 헤드에 부착되어 부품을 흡장착하는 기능을 가진 노즐을 가지고 있다. 노즐은 공압에 의해 작동되며 부품의 크기나 종류에 따라서 다른 종류를 사용해야 한다. 따라서 작업도중 필요한 경우에는 노즐을 교환해야 한다. 이런 경우를 대비해서 노즐을 자동으로 교환해 주는 자동노즐교환기(auto nozzle changer : ANC)가 설치되어 있다. 한 개의 피더는 한 종류의 표면실장부품만을 연속적으로 공급할 수 있는데 공급방식에 따라 테이프(tape), 스틱(stick), 트레이(tray) 피더로 나뉜다. 테이프 피더나 스틱 피더가 표면실장기계에 장착되어 사용되는 반면 트레이 피더는 표면실장기계와 독립되어 부품을 공급한다. 트레이 피더는 작은 충격에도 손실을 입을 수 있는 정교한 부품들을 공급한다. 트레이 피더에서 흡착한 부품은 인쇄회로기판에 장착되기 전에 카메라를 이용하여 손상된 리드가 없는지, 흡착된 부품의 회전 각도가 얼마인지를 검사한다. 표면실장기계에는 테이프 피더나 스틱 피더를 설치할 수 있도록 일렬로 구멍이 설치되어 있다. 본 논문이 대상으로 하는 표면실장기계에는 자동노즐교환기와 트레이 피더가 설치되어 있다고 가정한다 (그림 1).

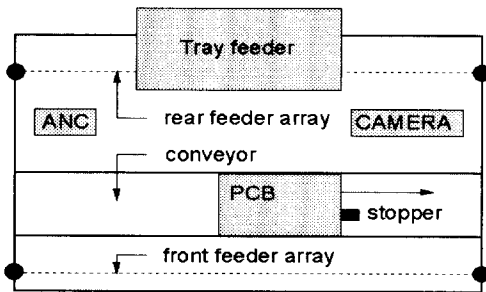


그림 1. 중소형 표면실장기계의 평면도.
Fig. 1. Planal structure of small/medium surface mounter.

본 논문이 대상으로 하는 조립라인은 조립라인상의 표면실장기계들이 그림 2와 같이 직렬로 배치되어 있고, 조립라인을 연결하는 컨베이어 벨트는 일시저장 기능이 없으며, 일정한 주기로 움직인다고 가정한다.

본 논문에서는 척(chuck)을 사용하여 흡착한 부품의 위치 및 방향을 기구적 방법으로 보정시키는 헤드를 일반용 헤드, 카메라를 사용하여 흡착한 부품을 보정시키는 헤드를 정밀용 헤드라 정의한다. 그리고 일반용 헤드를 사용하는 부품을 일반용 부품, 정밀용 헤드를 사용하는 부품을 정밀용 부품이라 정의한다. 따라서 일반용 부품은 PCB상에서 피더로 이동하여 부품을 흡착한 후 다시 PCB상의 위치로 돌아와 장착하는 데까지 걸리는 시간으로 작업시간을 추정하고 정밀용 부품은 PCB상에서

피더로 이동하여 부품을 흡착한 후 카메라로 이동하여 흡착한 부품을 보정시키고 다시 PCB상의 위치로 돌아와 장착하는 데까지 걸리는 시간으로 작업시간을 추정한다.

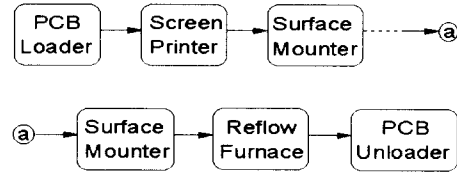


그림 2. 인쇄회로기판 조립라인의 구성도.
Fig. 2. Structure of PCB assembly line.

2. 목적함수

본 논문의 목적은 조립라인의 각 표면실장기계에 작업시간을 균등히 분배함으로써 생산률(production rate)을 최대화시키는 것이다. 본 논문이 대상으로 하는 조립라인은 컨베이어 벨트의 주기가 일정하고 일시저장 기능이 없으므로 생산률은 컨베이어 벨트의 주기와 반비례 관계에 있다. 그런데 컨베이어 벨트의 주기는 각 표면실장기계에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간, 즉 주기시간에 의해 결정되므로 목적함수는 주기시간(cycle time)이다[16].

$$\begin{aligned} & \text{minimize } C \\ & \text{subject to } f(C) \leq K \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, C는 주기시간, K는 조립라인상의 표면실장기계의 수, f(C)는 주기시간이 C일때 그 시간안에 모든 표면실장부품을 인쇄회로기판상에 실장하는데 필요한 최소의 표면실장기계의 수이다. 정의로부터 f(C)는 이산단조 감소함수이며 그래프의 형상은 그림 3과 같다. 그림 3에서 C*은 표면실장기계의 수 K가 주어졌을 때 라인균형화를 통해 얻을 수 있는 최적 주기시간이다.

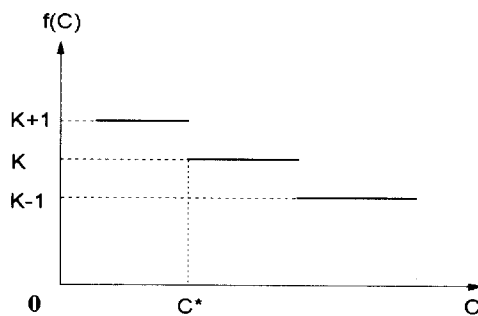


그림 3. 함수 f(C)의 형상.
Fig. 3. Shape of function f(C).

총 작업시간과 기계수가 고정되어 있을 경우 (2)와 같이 정의되는 라인균형화 효율은 주기시간과 반비례 관계이다. 따라서 본 논문에서는 효율적인 분배가 이루어졌는지의 여부를 판단하기 위한 성능지표로 주기시간과 함께 라인균형화 효율(line balancing efficiency : BE)을 사용한다.

$$BE = \frac{T}{C \times K} \quad (2)$$

(2)는 각 표면실장기계에 분배된 작업시간들의 평균값을 주기시간으로 나눈 값이다. 주기시간은 작업시간들 중 최대시간이므로 평균값과 최대시간이 같을 때 가장 효율적인 분배가 된 것이며, 이때의 라인균형화 효율은 1이다. 가장 비효율적인 분배가 이루어졌을 경우, 즉 한 기계에 모든 부품을 분배한 경우 라인균형화 효율의 값은 1/K이다. 따라서 라인균형화 효율은 (3)과 같은 범위내에 존재한다.

$$\frac{1}{K} \leq BE \leq 1 \quad (3)$$

III. 라인균형화 알고리즘

기호설명

- C : 주기시간(cycle time)
- C_L : 주기시간의 하한(lower bound)
- C_H : 주기시간의 상한(upper bound)
- T : 총 작업시간
- T_P : 정밀용 부품의 총 작업시간
- T_G : 일반용 부품의 총 작업시간
- K : 조립라인의 표면실장기계수
- K_P : 조립라인의 정밀용 헤드를 가진 표면실장기계수
- K_G : 조립라인의 일반용 헤드를 가진 표면실장기계수
- K_{OP} : 조립라인의 정밀용 헤드만 가진 표면실장기계수
- K_{OG} : 조립라인의 일반용 헤드만 가진 표면실장기계수
- BE : 라인균형화 효율(line balancing efficiency)

1. 기본 개념

조립라인이 표 1과 같이 구성되어 있다고 가정한다. PCB상의 부품들은 사용가능도출에 따라 일반용 부품과 정밀용 부품으로 분류되고 일반용 헤드와 정밀용 헤드의 유무에 따라 각 부품을 처리할 수 있는 표면실장기계에 제약이 있다. 따라서 본 논문에서는 조립대상 PCB에 따른 'T_P/T_G' 값과 조립라인의 구성에 따른 'K_{OP}/K_G', 'K_P/K_{OG}' 값의 관계에 따라 세 가지 라인균형화 알고리즘을 제시한다. 'T_P/T_G < K_{OP}/K_G'인 경우는 'T_P/K_{OP} < T_G/K_G'이므로 표 2와 같이 K_{OP}+1에서 K_P까지의 정밀용 헤드에는 정밀용 부품을 분배하지 않는다. 'T_P/T_G > K_P/K_{OG}'인

표 1. 조립라인의 구성(유 : ●).

Table 1. Structure of assembly line.

기계 번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 유무					●	●	●	●	●	●
일반용 헤드의 유무		●	●	●	●	●				

경우는 'T_P/K_P > T_G/K_{OG}'이므로 표 4와 같이 K_{OG}+1에서 K_G까지의 일반용 헤드에는 일반용 부품을 분배하지 않는다. 'K_{OP}/K_G ≤ T_P/T_G ≤ K_P/K_{OG}'인 경우는 'T_P/K_{OP} ≥ T_G/K_G'이고 T_P/K_P ≤ T_G/K_{OG}'이므로 표 3과 같이 1에서 K_{OP}까지는 표 2의 T_P/K_{OP}대신 (T_P-B)/K_{OP}, 1에서 K_{OG}까지는 표 4의 T_G/K_{OG}대신 (T_G-A)/K_{OG}, K_{OG}+1과 K_G사이에는 B/(K_G-K_{OG})와 A/(K_G-K_{OG})를 분배한다. 이때 라인균형화 효율이 1이므로 (4)가 유도되고 연립방정식의 해를 구하

면 (5)가 된다[15]. 여기서 A[B]는 정밀용 헤드와 일반용 헤드를 모두 가진 기계에 나누어진 일반용[정밀용]부품의 작업시간의 합이다. 표 2의 경우 C=T_G/K_G, T=T_P+T_G이

표 2. 'T_P/T_G < K_{OP}/K_G'인 경우의 최적 라인균형화.
Table 2. Optimal LB in case of 'T_P/T_G < K_{OP}/K_G'.

기계 번호	정방향	1	...	K _{OG}	K _{OG} +1	...	K _G	K _G +1	...	K
	역방향	K	...	K _P +1	K _P	...	K _{OP} +1	K _{OP}	...	1
정밀용 헤드의 작업시간					0	0	0	$\frac{T_P}{K_{OP}}$	$\frac{T_P}{K_{OP}}$	$\frac{T_P}{K_{OP}}$
일반용 헤드의 작업시간		$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$	$\frac{T_G}{K_G}$			

고 표 4의 경우 C=T_P/K_P, T=T_P+T_G이므로 (2)에 대입하면 T_P/T_G의 변화에 따른 최적 라인균형화 효율은 (6)과 같이 표현되며, 이를 그래프로 표현하면 그림 4와 같다. 이때 K_P > K_G라고 가정한다.

$$\frac{T_G - A}{K_{OG}} = \frac{A + B}{K_G - K_{OG}} = \frac{T_P - B}{K_{OP}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A = \frac{T_G K_P - T_P K_{OG}}{K} \\ B = \frac{T_P K_G - T_G K_{OP}}{K} \end{cases} \quad (5)$$

$$BE = \begin{cases} \frac{K_G}{K} \left(1 + \frac{T_P}{T_G}\right) & \text{if } \frac{T_P}{T_G} < \frac{K_{OP}}{K_G} \\ 1 & \text{if } \frac{K_{OP}}{K_G} \leq \frac{T_P}{T_G} \leq \frac{K_P}{K_{OG}} \\ \frac{K_P}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{T_P}{T_G}}\right) & \text{if } \frac{T_P}{T_G} > \frac{K_P}{K_{OG}} \end{cases} \quad (6)$$

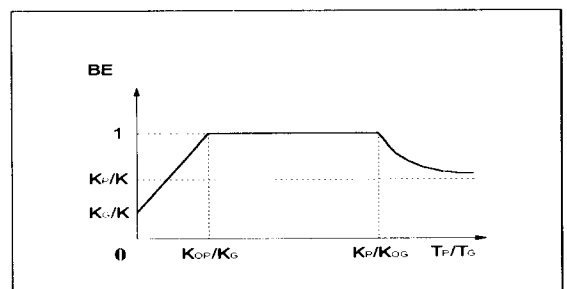


그림 4. 최적 라인균형화 효율(일반적인 경우).

Fig. 4. Optimal BE in general case.

특정한 두가지 경우의 조립라인을 생각한다. 먼저 모든 기계에 일반용 헤드가 하나 이상 있는 경우, 즉 표 1의 조립라인에서 K=K_G(즉, K_{OP}=0)인 경우를 가정한다.

이때 T_P/T_G의 값에 따라 두 가지 경우로 나눌 수 있으며 'T_P/T_G ≤ K_P/K_{OG}'인 경우는 표 3, 'T_P/T_G > K_P/K_{OG}'인 경우는 표 4와 같이 작업분배를 한다. (6)에서 K_{OP}=0인 경우 최적 작업분배 효율은 (7)과 같이 표현되며, 이를 그래프로 표현하면 그림 5와 같다. 모든 기계에 정밀용 헤드가 하나 이상 있는 경우, 즉 표 1의 조립라인에서 K=K_P(즉, K_{OG}=0)인 경우를 가정한다. 이때 T_P/T_G의 값에 따라 두 가지 경우로 나눌 수 있으며 'T_P/T_G < K_{OP}/K_G'인 경우는 표 2, 'K_{OP}/K_G ≤ T_P/T_G'인 경우는 표 3과 같이

작업분배를 한다. (6)에서 $K_{OG}=0$ 인 경우 최적 작업분배 효율은 (8)과 같이 표현되며, 이를 그래프로 표현하면 그림 6과 같다.

표 3. ' $K_{OP}/K_G \leq T_P/T_G \leq K_P/K_{OG}$ '인 경우의 최적 라인균형화.
Table 3. Optimal LB in case of ' $K_{OP}/K_G \leq T_P/T_G \leq K_P/K_{OG}$ '.

기계번호	정방향	1	...	KOG	KOG+1	...	KG	KG+1	...	K
	역방향	K	...	KP+1	KP	...	KOP+1	KOP	...	1
정밀용	헤드의 작업시간				$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{B}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$	$\frac{T_P - B}{K_{OP}}$
일반용	헤드의 작업시간	$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{T_G - A}{K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$	$\frac{A}{K_G - K_{OG}}$			

표 4. ' $T_P/T_G > K_P/K_{OG}$ '인 경우의 최적 라인균형화.
Table 4. Optimal LB in case of ' $T_P/T_G > K_P/K_{OG}$ '.

기계번호	정방향	1	...	KOG	KOG+1	...	KG	KG+1	...	K
	역방향	K	...	KP+1	KP	...	KOP+1	KOP	...	1
정밀용	헤드의 작업시간				$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$	$\frac{T_P}{K_P}$
일반용	헤드의 작업시간	$\frac{T_G}{K_{OG}}$	$\frac{T_G}{K_{OG}}$	$\frac{T_G}{K_{OG}}$	0	0	0			

$$BE = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{T_P}{T_G} \leq \frac{K_P}{K_{OG}} \\ \frac{K_P}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{T_P}{T_G}} \right) & \text{if } \frac{T_P}{T_G} > \frac{K_P}{K_{OG}} \end{cases} \quad (7)$$

$$BE = \begin{cases} \frac{K_G}{K} \left(1 + \frac{T_P}{T_G} \right) & \text{if } \frac{T_P}{T_G} < \frac{K_{OP}}{K_G} \\ 1 & \text{if } \frac{K_{OP}}{K_G} \leq \frac{T_P}{T_G} \end{cases} \quad (8)$$

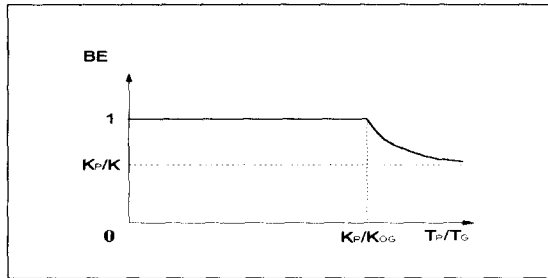


그림 5. 최적 라인균형화 효율($K=K_G$ 인 경우).
Fig. 5. Optimal BE in case of $K=K_G$.

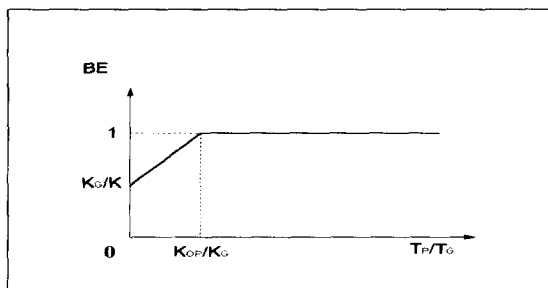


그림 6. 최적 라인균형화 효율($K=K_P$ 인 경우).
Fig. 6. Optimal BE in case of $K=K_P$.

2. f(C)를 구하는 알고리즘

일반적으로 부품 한 개의 작업소요시간은 “자동노즐교환 시간 > 흡장착시간 > 헤드의 이동시간”순이다. 따라서 자

동노즐 교환시간을 감소시키기 위해 사용노즐에 따라 부품을 연속적으로 분배한다. 또한 흡장착시간을 줄이기 위해 각 기계의 헤드에 “주기시간/각 기계의 헤드수”제한 내에서 부품을 분배함으로써 동시흡장착의 기회를 증가시킨다. 작업분배는 각 기계의 최대피더수 제한내에서 이루어진다. f(C)를 구하는 알고리즘을 개념적으로 설명하면 다음과 같다.

Step 0 : $m=h=n=p=1$

Step 1 : m_th 기계를 사용할 때의 작업시간을 추정한다.

Step 2 : m_th 기계의 h_th 헤드에 n_th 노즐을 사용하는 p_th 부품 한 개를 분배할 수 있으면(즉, “h_th 헤드에 분배된 부품의 작업시간의 합 ≤ 주기시간/m_th 기계의 헤드수”이면) Step 3, 아니면 Step 4로 간다.

Step 3 : p_th 부품이 더 존재하면 Step 2, 아니면 Step 6으로 간다.

Step 4 : m_th 기계에 헤드가 더 존재하면 $h=h+1$ 후 Step 2, 그렇지 않으면 $h=1$ 후 Step 5로 간다.

Step 5 : 기계가 더 존재하면 $m=m+1$ 후 Step 2, 그렇지 않으면 주기시간 C에서 분배 불가능하다. $f(C)=K+1$

Step 6 : m_th 기계에 피더가 더 존재하면 $p=p+1$ 후 Step 7, 그렇지 않으면 Step 5로 간다.

Step 7 : n_th 노즐에 분배할 부품이 더 존재하면 Step 2, 아니면 $n=n+1$ 후 Step 8로 간다

Step 8 : 부품이 더 존재하면 Step 9, 아니면 주기시간 C에서 분배 가능하다. $f(C) \leq K$

Step 9 : 노즐 교환이 가능하면 (즉, “주기시간/m_th 기계의 헤드수 ≥ h_th 헤드에 분배된 작업시간의 합 + 자동노즐교환시간 + 소요시간 + p_th 부품 한개의 작업시간”이면) Step 2, 아니면 Step 4로 간다.

3. 탐색 알고리즘

상세한 라인균형화 알고리즘은 다음과 같이 5단계로 설명되며, 이에 관한 내용을 흐름도 형태로 그리면 그림 7과 같다.

Step 1 : 조립라인에 대한 정보와 조립할 인쇄회로기판에 대한 정보가 주어지면 [16],[17]에서와 같이 입력정보 처리를 통해 표면실장부품을 정밀용 부품과 일반용 부품으로 분류하고 각 부품에 사용할 노즐을 선택한다. 또한 각 부품의 작업시간과 자동노즐교환시간을 계산한다. 하나의 부품을 실장하는 데 필요한 작업시간은 크게 자동노즐교환시간, 흡장착시간, 헤드의 이동시간으로 나눌 수 있다. 이동시간은 각 부품 및 피더의 위치에 따라 가변이나 노즐교환시간, 흡장착시간은 각 기계의 고유한 상수이다. 본 논문에서는 이동시간의 가변성을 고려하여 각 부품의 좌표를 모든 부품의 무게중심점으로 정하고 피더의 위치를 무게중심점에서 가장 가까운 피더의 위치로 정하여 헤드의 이동시간을 추정하였다. 이것은 일반적으로 부품이 분배되었을 때 해당 부품에 대한 피더를 해당 부품 근처에 배치하기 때문이다.

Step 2 : (9)를 이용하여 주기시간의 상한과 하한을 구한다[5]. 조립라인상의 각 표면실장기계에 분배된 작업시간이 균등할 경우를 하한으로 정한다. $K=1$ 일 경우 상한과 하한은 같은 값을 가진다.

$$C_L = \left\lceil \frac{T}{K} \right\rceil^+$$

$$C_H = \begin{cases} \left\lceil \frac{2T}{K+1} \right\rceil^+ & \text{if } K \text{ is odd} \\ \left\lceil \frac{2T}{K} \right\rceil^+ & \text{if } K \text{ is even} \end{cases} \quad (9)$$

여기서, $\lceil \cdot \rceil$ 는 실링(ceiling) 함수를 의미한다.

Step 3 : f(C)는 이산단조감소하는 특성을 가지므로 상한과 하한사이에서 이분탐색법을 적용한다. 주어진 주기

시간내에 분배가 가능할 경우 K 이하의 값을, 불가능할 경우 $K+1$ 을 $f(C)$ 의 출력값으로 가진다

Step 4 : $f(C) \leq K$ 라는 조건을 만족하며 주기시간과 갱신된 하한값의 차가 최소의 작업시간을 가지는 부품의 작업시간보다 작을 때 즉, $C - C_L < Min$ 일때 탐색을 종료한다. 여기서, Min 은 최소의 작업시간을 가지는 부품의 작업시간을 의미한다.

Step 5 : 각 표면실장기계의 피더배치 및 작업경로 최적화 알고리즘의 입력정보로 사용되는 파일을 각 표면실장기계별로 만든다.

라인균형화 알고리즘을 각각의 경우에 적용하는 방식은 다음과 같다. ' $T_p/T_G < K_{OP}/K_G$ '인 경우는 표 2와 같이 $K=K_G$, $T=T_G$ 로 놓고 C_L, C_H 를 구한 후 이분탐색법을 통해 1에서 K_G 까지 T_G/K_G 씩 일반용 부품을 분배한 후 $K=K_{OP}$, $T=T_p$ 로 놓고 C_L, C_H 를 구한 후 이분탐색법을 통해 1에서 K_{OP} 까지 T_p/K_{OP} 씩 정밀용 부품을 분배한다. ' $T_p/T_G > K_p/K_{OG}$ '인 경우는 표 4와 같이 $K=K_p$, $T=T_p$ 로 놓고 C_L, C_H 를 구한 후 이분탐색법을 통해 1에서 K_p 까지 T_p/K_p 씩 정밀용 부품을 분배한 후 $K=K_{OG}$, $T=T_G$ 로 놓고 C_L, C_H 를 구한 후 이분탐색법을 통해 1에서 K_{OG} 까지 T_G/K_{OG} 씩 일반용 부품을 분배한다. 표 3의 경우에도 유사한 방식으로 정밀용 부품과 일반용 부품에 대해 이분탐색법을 각각 적용한다. 표 3의 경우는 세 가지 경우로 나눌 수 있다. 첫째 $K=K_p$ 인 경우는 $K=K_G$, $T=T_G$ 로 놓고 일반용 부품을 분배한 후 $K=K_p$, $T=T_p$ 로 놓고 정밀용 부품을 분배한다. 정밀용 부품을 분배할 때 주기시간은 "(9)에 의해 계산된 주기시간-해당기계에 분배된 일반용 부품의 총작업시간"이다. 둘째 $K=K_G$ 인 경우는 $K=K_p$, $T=T_p$ 로 놓고 정밀용 부품을 분배한 후 $K=K_G$, $T=T_G$ 로 놓고 일반용 부품을 분배한다. 일반용 부품을 분배할 때 주기시간은 "(9)에 의해 계산된 주기시간-해당기계에 분배된 정밀용 부품의 총작업시간"이다. 셋째 $K \neq K_p$, $K \neq K_G$ 인 경우는 $K=K_{OP}$, $T=T_p - B$ 로 놓고 1에서 K_{OP} 까지 정밀용 부품의 일부를 분배한 후 $K=K_G - K_{OG}$, $T=B$ 로 놓고 나머지 정밀용 부품을 $K_{OG}+1$ 과 K_G 사이에 분배한다. 마지막으로 $K=K_G$, $T=T_G$ 로 놓고 일반용 부품을 분배한다. 일반용 부품을 분배할 때 주기시간은 "(9)에 의해 계산된 주기시간-해당기계에 분배된 정밀용 부품의 총작업시간"이다.

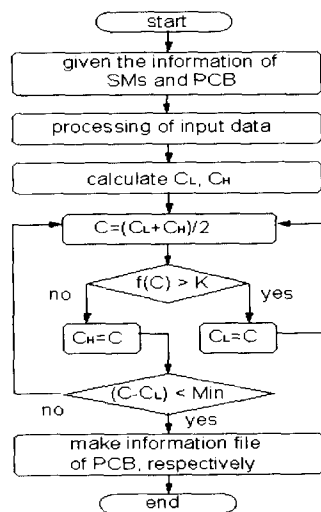


그림 7. 라인균형화 알고리즘의 흐름도.
Fig. 7. Flowchart of line balancing algorithm.

IV. 모의실험

1. 대상 조립라인

본 논문에서는 실제 사용되고 있는 모회사의 제품을 모의실험 대상으로 하였다. 기계의 수 및 기계당 헤드의 수는 각 모의실험에 따라 표 5, 6, 7과 같이 변화시키면서 사용하였다. 표면실장기계의 헤드의 최고속도는 각 모의실험에 따라 1m/sec 또는 2m/sec로 가정하였다.

표 5. 조립라인의 구성(일반적인 경우).

Table 5. Structure of assembly line in general case.

기계 번호	SM1	SM2	SM3	SM4
정밀용 헤드수	0	1	2	2
일반용 헤드수	2	2	1	0

표 6. 조립라인의 구성($K=K_G$ 인 경우).

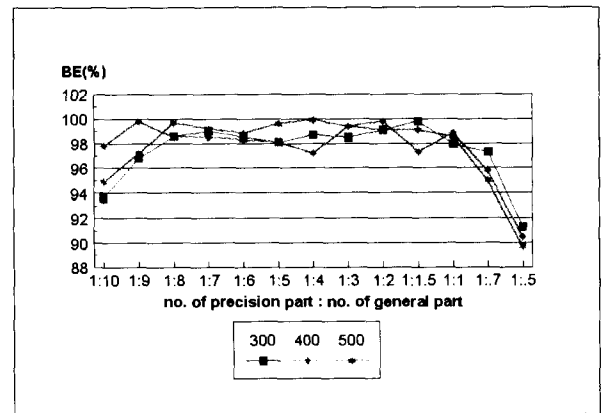
Table 6. Structure of assembly line in case of $K=K_G$.

기계 번호	SM1	SM2	SM3	SM4
정밀용 헤드수	0	0	1	2
일반용 헤드수	2	2	2	1

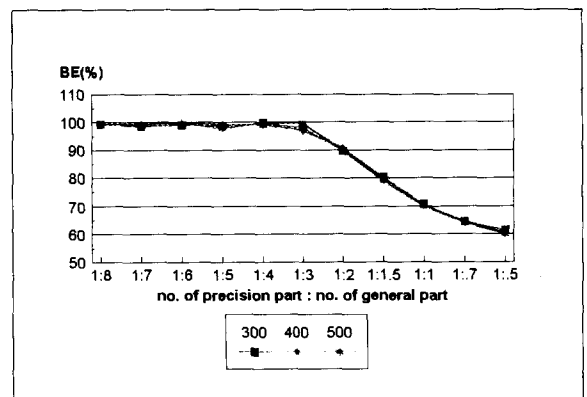
표 7. 조립라인의 구성($K=K_p$ 인 경우).

Table 7. Structure of assembly line in case of $K=K_p$.

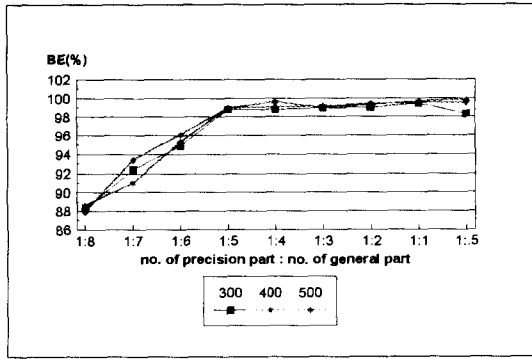
기계번호	SM1	SM2	SM3
정밀용 헤드수	1	2	2
일반용 헤드수	2	1	0



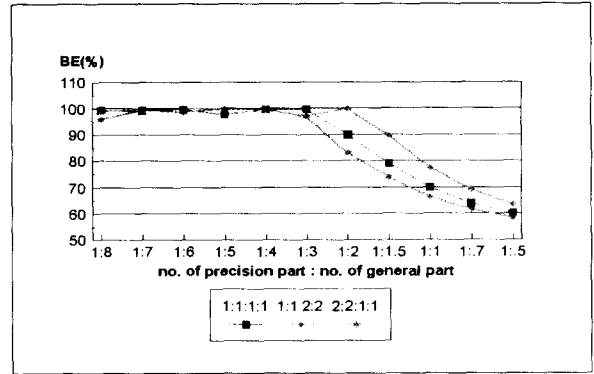
(a) 표 5의 경우



(b) 표 6의 경우



(c) 표 7의 경우



(b) 표 6의 경우

그림 8. 부품수를 변화시킨 경우의 라인균형화 효율.

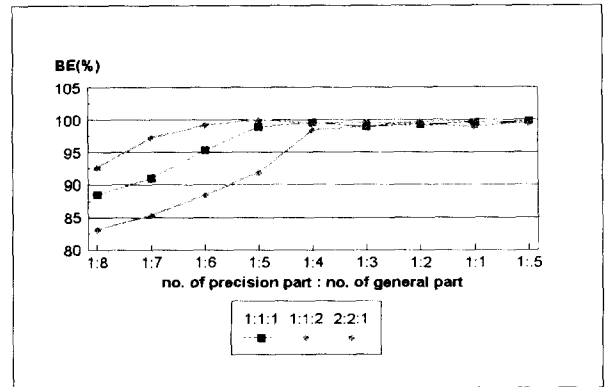
Fig. 8. BE in case of changing the number of components.

2. 부품수를 변화시킨 경우

부품수의 변화에 따른 라인균형화 효율의 변화를 살펴 보기 위해 부품수 300, 400, 500개의 세 경우에 대해 모의실험을 수행하였다. 각 표면실장기계의 최고속도는 1m/sec로 가정하였다. 각 부품수에 대해 정밀용 부품과 일반용 부품의 총 작업시간의 비의 변화에 따른 라인균형화 효율의 변화를 확인하기 위해 정밀용 부품 대 일반용 부품의 개수의 비를 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8로 변화시키면서 모의실험을 수행하였다. 모의실험에 따라 경계점에서의 변화를 살펴보기 위해 부품비 1:0.7, 1:1.5, 1:9, 1:10인 경우를 추가하였다. 부품수 300, 400, 500개에 대해 각각 부품비를 변화시켰을 경우 라인균형화 효율의 변화는 그림 8과 같다.

3. 최고속도비를 변화시킨 경우

조립라인의 각 표면실장기계의 성능변화에 따른 라인균형화 효율의 변화를 살펴보기 위해 각 표면실장기계의 최고속도를 변화시키면서 모의실험을 수행하였다. 조립대상 인쇄회로기판의 부품수는 500개로 통일하였다. 각 최고속도비에 대해 정밀용 부품과 일반용 부품의 총 작업시간의 비의 변화에 따른 라인균형화 효율의 변화를 확인하기 위해 정밀용 부품 대 일반용 부품의 개수의 비를 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8로 변화시키면서 모의실험을 수행하였다. 모의실험에 따라 경계점에서의 변화를 살펴보기 위해 부품비 1:0.7, 1:1.5, 1:9, 1:10인 경우를 추가하였다. 표 5와 6의 경우 기계별 최고속도비 1:1:1, 1:1:2, 2:2:1에 대해, 표 7의 경우 최고속도비 1:1:1, 1:1:2, 2:2:1에 대해 각각 부품비를 변화시켰을 경우 라인균형화 효율의 변화는 그림 9와 같다.



(c) 표 7의 경우

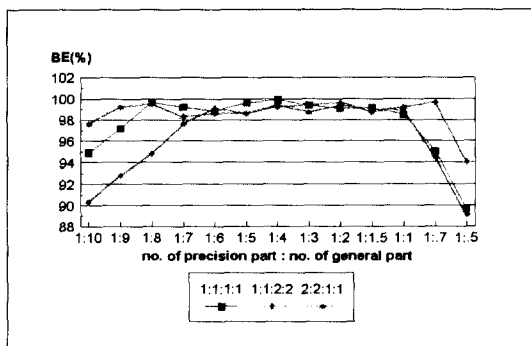
그림 9. 최고속도비를 변화시킨 경우 라인균형화효율.

Fig. 9. BE in case of changing the ratio of maximum speeds.

4. 모의실험 결과분석

각 부품수에 대해 부품비를 변화시켰을 경우 부품수에 관계없이 경계점이 일정하였다. 그러나 각 최고속도비에 대하여 부품비를 변화시켰을 경우 최고속도비 1:1:2, 1:1:1, 2:2:1의 순으로 경계점이 좌측으로 이동하였다 (단, 표 7의 경우 1:1:2, 1:1:1, 2:2:1의 순). 이것은 속도비에 의해 정밀용 부품의 총작업시간 및 일반용 부품의 총 작업시간이 증감되었기 때문이다. 예를 들어 부품수가 500개이고 부품비가 1:10일 경우 조립라인이 표 5와 같을 때 최고속도비에 따른 총 작업시간의 변화는 표 8과 같다. 표 8에서 정밀용과 일반용의 총 작업시간의 비율이 1:1:2, 1:1:1, 2:2:1의 순으로 감소함을 볼 수 있다.

표 5, 6, 7의 경우에 대한 이론적인 최적 라인균형화 효율 그래프의 경계점은 표 9와 같다. 정밀용 부품 한 개의 작업시간이 일반용 부품 한 개의 작업시간의 약 2-3배임을 가정할 때 모의실험 결과의 그래프는 이론적인 그래프의 개형과 유사한 형태를 가짐을 볼 수 있다. 또한 본 논문에서 제시한 라인균형화 알고리즘은 K_{OP}/K_G 와 K_P/K_{OG} 사이에서는 97%이상의 높은 분배효율을 가진다. 본 논문에서는 성능 지표로 라인균형화 효율을 사용하였다. 총 작업시간이 일정할 경우 라인균형화 효율과 주기시간은 반비례하기 때문이다. 그러나 노즐교환 횟수에 따라 총 작업시간이 가변이므로 라인균형화 효율과 주기시간이 다 같이 감소하거나 증가하는 경우도 발생한다. 예를 들어 부품수가 300개이고 부품비가 1:0.5일 경우 조립라인이 표 5와 같고 최고속도비가 1:1:1일 때 주기시간



(a) 표 5의 경우

을 최소화시킨 경우와 라인균형화 효율을 최대화시킨 경우의 결과는 표 10과 같다. 그러나 대부분의 경우 주기시

표 8. 최고속도비에 따른 총 작업시간의 변화.

Table 8. Change of total time according to ratio of maximum speed.

	1:1:2:2	1:1:1:1	2:2:1:1
정밀용 부품의 총 작업시간	95116	126172	126172
일반용 부품의 총 작업시간	435743	464846	407588
정밀용과 일반용의 총 작업시간 비율	1:4.58	1:3.68	1:3.23

표 9. 최적 라인균형화 효율의 경계점의 위치.

Table 9. Location of boundary point in optimal BE.

	주기시간	BE(%)
주기시간을 최소화시킨 경우	169749	91.3
라인균형화 효율을 최대화시킨 경우	170432	91.5

표 10. 주기시간과 라인균형화 효율의 비교.

Table 10. Comparison between cycle time and BE.

	K_{Op}/K_G	K_P/K_{OG}
표 4.1의 경우	1/3	1
표 4.2의 경우	0	1
표 4.3의 경우	1/2	∞

간과 라인균형화 효율은 반비례 관계임이 확인되었고 성능 지표로서 라인균형화 효율을 사용할 수 있음이 모의 실험을 통해 입증되었다.

V. 결론

본 논문에서는 실제 산업현장에서 대부분 전문가에 의한 수작업에 의존하고 있는 인쇄회로기판 조립라인의 라인균형화 문제를 다루었다. 특히 조립라인상의 각 표면실장기체들이 직렬로 연결되고, 각 표면실장기체를 연결하는 컨베이어 벨트는 일시저장 기능이 없으며, 주기가 일정하다는 가정하에 조립라인에 대한 정보와 조립대상 인쇄회로기판에 대한 정보가 주어졌을 때 각 표면실장기체에 분배된 작업시간의 합 중 최대시간 - 주기시간 - 이 최소가 되도록 각 표면실장기체에 작업을 분배하는 문제를 다루었다.

본 논문은 주기시간이 주어졌을 때 그 시간안에 모든 표면실장부품을 인쇄회로기판상에 실장하는 데 필요한 최소의 표면실장기체수를 찾는 함수가 주기시간에 대한 이산단조 감소함수라는 점을 이용하여 주기시간의 상한과 하한을 구하고 하한과 상한사이에서 이분탐색법을 적용하는 발견법적 알고리즘을 제시하였다. 또한 정밀용 부품 및 일반용 부품의 총 작업시간의 비의 변화에 따른 이론적 최적 라인균형화 효율의 그래프를 제시하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 입증하였다. 모의실험의 결과를 통해 본 논문에서 제시한 라인균형화 알고리즘이 조립할 인쇄회로기

판의 부품수, 조립라인에 설치된 표면실장기체의 성능, 조립라인의 구조에 관계없이 제시된 최적 라인균형화 효율의 그래프와 유사한 개형을 나타냄을 볼 수 있었다. 또한 본 논문에서 제시한 라인균형화 알고리즘은 K_{Op}/K_G 와 K_P/K_{OG} 사이에서 97%이상의 높은 라인균형화 효율을 보였다.

본 논문에서는 자동노즐교환기, 트레이 피더가 모든 표면실장기체에 있다는 가정하에 라인균형화 문제를 다루었으나 앞으로 이러한 가정을 배제한 일반적인 경우에 대한 연구가 필요할 것이며, 라인균형화 알고리즘과 각 표면실장기체의 피더배치 및 작업경로 최적화 알고리즘을 좀더 유기적으로 연관시키는 연구가 필요할 것이다. 또한 전문가에 의한 라인균형화와 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의한 라인균형화의 결과를 직접 생산현장에서 비교함으로써 실제적인 알고리즘의 성능평가 작업도 필요하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] A. L. Arcus, "An analysis of a computer method of sequencing assembly line operations," *Ph.D. dissertation*, University of California, 1963.
- [2] I. Baybars, "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problems," *Mgmt. Sci.* vol. 32, no. 8, pp. 909-932, 1986.
- [3] E. M. Dar-El, "MALB - A heuristic technique for balancing large single-model assembly lines," *AIIE Trans.* vol. 5, no. 4, pp. 343-356, 1973.
- [4] E. M. Dar-El and Y. Rubinovitch, "MUST - A multiple solutions technique for balancing single-model assembly lines," *Mgmt. Sci.* vol. 25, no. 11, pp. 1105-1115, 1979.
- [5] S. T. Hackman, M. J. Magazine and T. S. Lee, "Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problem," *Oper. Res.* vol. 37, no. 6, pp. 916-924, 1989.
- [6] W. P. Helgeson and D. P. Birnie, "Assembly line balancing using the ranked positional weight technique," *IE.* vol. 12, no. 6, pp. 394-398, 1961.
- [7] T. R. Hoffmann, "Assembly line balancing with a precedence matrix," *Mgmt. sci.* vol. 9, no. 4, pp. 551-562, 1963.
- [8] M. S. Magazine and T. S. Wee, "An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem - part I. minimize the number of work stations," *Working Paper 150*, University of Waterloo, Department of Mgmt. Sci., 1981b.
- [9] M. S. Magazine and T. S. Wee, "An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem - part II. maximize the production rate," *Working Paper 150*, University of Waterloo, Department of Mgmt. Sci., 1981c.
- [10] C. L. Moodie and H. H. Young, "A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work

- element times," *IE*. vol.16, no. 1, Jan.-Feb., 1965.
- [11] L. Schrage and K. R. Baker, "Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints," *Oper. Res.* vol. 26, May-June, pp. 444-449, 1978.
- [12] F. B. Talbot and J. H. Patterson, "An integer-programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem," *Mgmt. Sci.* vol. 30, no. 1, pp. 85-89, 1984.
- [13] F. B. Talbot and J. H. Patterson, "A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques," *Mgmt. Sci.* vol. 32, no. 4, pp. 430-454, 1986.
- [14] F. M. Tonge, "A heuristic program of assembly line balancing," *Prentice Hall*, 1961.
- [15] 김진철, "표면실장기용 인-라인 시스템의 최적화에 관한 연구," 서울대학교 공학석사 학위논문, 1996.
- [16] 김진철, 이성한, 홍지민, 김대원, 이범희, "표면실장기용 인-라인 시스템의 최적화에 관한 연구," 한국 자동 제어 학술회의 논문집 국내학술권, pp. 719-722, 1995.



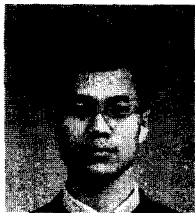
김진철

1994년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1996년 동대학원 석사. 1996년 ~ 현재 서울대 전기공학부 박사과정. 주연구 관심분야는 자율주행로봇, 다중로봇의 충돌회피, 라인균형화 알고리즘.



김대원

1983년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1985년 동대학원 석사. 1990년 동대학원 박사. 1990.9 ~ 1992.8 대우중공업 (주) 중앙연구소 선임연구원. 1992.9 ~ 현재 명지대학교 전기전자공학부 부교수. 주연구관심분야는 이족보행로봇, 필드버스, 실시간 시스템, 이산사건시스템.



이성한

1992년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1994년 동대학원 석사. 1994년 ~ 현재 서울대 전기공학부 박사과정. 주연구 관심분야는 표면실장기계의 최적화, 조립라인의 최적작업분배, PCB 조립라인의 스케줄링, 최적화기법.



이범희

1978년 서울대 전자공학과 졸업. 1980년 동대학원 석사. 1985년 미국 Univ. of Michigan, Dept. Computer, Information and Control Eng. 졸업(공학 박사). 1985년 ~ 1987년 미국 Purdue Univ. Assistant Professor. 1987년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 교수. 1995년 ~ 현재 서울특별시 중소기업 창업보육센터 소장. 주관심 분야는 다중 로봇의 힘 제어, 신경 회로망 및 퍼지 응용 제어, 유연 자동화 시스템, 산업용 로봇 제어기 개발, 다중 로봇의 충돌 회피, 로봇 제어용 전문가 시스템, 특수 작업용 로봇 시스템.