

レーザ光とカメラを用いたプリント基板作成のための 作業支援環境の構築

藤野 秀則^{*1} 松崎 剛士^{*1} 新田 和弘^{*1} 石井 裕剛^{*1} 下田 宏^{*1} 吉川 榮和^{*1}
Wu Wei^{*2} 寺下 尚孝^{*2}

Construction of a Supporting System for Inserting Electronic Parts on Printed Circuit Board Using LASER and a Video Camera

Hidenori Fujino^{*1}, Takeshi Matsuzaki^{*1}, Kazuhiro Nitta^{*1}, Hirotake Ishii^{*1}, Hiroshi Shimoda^{*1},
Hidekazu Yoshikawa^{*1}, Wei Wu^{*2} and Naotaka Terashita^{*2}

Abstract – Nowadays, a large item small volume production method comes to be important. However such production method has some problems; the high cost of education to human workers, the difficulty of improving efficiency of production and so on. In this study, we took up the work of inserting electronic parts on printed circuit boards as such production, and to solve such problems of that work we developed a supporting system for human workers by a video camera, a TV monitor, and a laser beam. In this paper, we explain the detail of the system and report about the investigation of the performance and usability of this system.

Keywords: Large item small volume production method, Human work, and Supporting system for human workers

1. はじめに

近年の工業製品の生産形態は従来の少品種大量生産だけでなく、消費者の嗜好・ニーズの多様化を反映して、多品種少量生産も各々重要となってきた^[1]。多品種少量生産は一般に機械による自動化が難しく、人の手によって作業が進められることが多い。しかし、手作業による製造ではヒューマンエラーにより歩留まりが低下する^[2]、生産性が低い、多品種の製品生産に対処するため高レベルの作業教育が必要となる^[3]といった問題がある。

本研究では、このような多品種少量生産に特有の人的要因に対処して、ヒューマンエラー防止と生産性向上のために情報技術の新たな適用法を実験研究する。なお、具体的な手作業の対象はベルトコンベア上を流れるプリント基板（以下、基板）に人の手によって電子部品を取り付ける作業（以下、プリント基板作成作業）である。実際の現場では未熟練作業員のヒューマンエラーが、生産性低下の原因となっているが、熟練作業員は作業の反復過程で自ずとヒューマンエラーの発生を抑えて効率よく作業できる様々な「ノウハウ」を体得して実践している。本研究では、ヒューマンエラーの低減と生産性の向上を図るため、このような熟練作業員の持つ「ノウハウ」を獲得して未熟練作業員の手作業支援に効果的に反映するシステムの生成を目標としている。

本研究ではそのような未熟練作業員の手作業支援環境

として、まずビデオカメラを用いて熟練作業員の作業の様子を撮影し、画像処理によってその内容を自動認識することによりノウハウをデータベース化することのできるシステムを構成し、次いで作成したデータベースを基にレーザ光とビデオカメラ、テレビモニタを用いて未熟練作業員の作業を支援するシステムを開発した。本報告では、開発したシステムの概要と、その性能を評価した結果について述べる。

2. システム設計の基本方針

既報[4]では熟練作業員と未熟練作業員の差を明らかにするため、実際にプリント基板作成作業を行っている現場で作業の分析を行って、その結果、熟練作業員は、特に「どの手順で行うのが効率が良いか」「各部品は、どこに、どのように取り付けるべきか」という2つを熟知している点で未熟練作業員と差があることが分かった。

そこで本研究で開発する作業支援環境では、熟練作業員が独自に見つけ出し実践している「効率の良い手順」を抽出するため、作業員の実際の手作業の連続過程を分節して、意味のある作業手順として認識しデータベース化するシステム（以下、手順認識システム）と、次いでデータベース化した手順に従って、作業員に「どの部品を」「どこに」「どのように」取り付けるのかを直感的にわかりやすく、かつ誤りなく指示するシステム（以下、作業指示システム）によって構成するものとした。また、これらの2つのシステムの構成では全体のコスト削減を目標に両者間でできるだけハードウェアを共有し、かつ、海外での使用を考えて言語による指示を用いないシステ

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*2: 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

*2: Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corp.

ムを検討した。

3. 手順認識システム

熟練作業員の「効率の良い手順」を自動認識しデータベース化する手順認識システムの設計・実装、およびその性能評価実験について述べる。

3.1 設計・実装

構成した手順認識システムは、部品取り付け作業の状況を上方のビデオカメラで連続撮影し、その動画像の認識処理により作業手順を抽出して、データベース化するものである。

なお、このような手順認識では、全ての部品の取り付けが完了するまで、基板を載せたベルトコンベアは静止しているものとし、また基板は長方形のもののみを扱うこととした。

実装した手順認識システムは以下の順に処理を行う。

- (1) 作業台上に基板を設置する前の画像と基板を設置した後の画像との差分画像に対して、ハフ変換によりエッジ検出を行い画像中の基板位置を検出する。次いで、基板の設計図情報をもとに画像中の基板内の部品取り付け位置を算出しておく。
- (2) 画像中の基板上の人の手の動きを肌色画素の検出で判別し、画素数がある閾値を下回ると、一つの部品の取り付けが完了して基板上から手が離れたと見なす（部品取り付け完了認識）。なお、閾値の設定では基板または部品に肌色の部分が存在する場合でも部品取り付け完了を誤りなく認識できるように調節する。
- (3) 一つの部品の取り付け完了の認識ごとに、取り付け前の画像と取り付け後の画像について、全ての画像中の部品取り付け位置（(1)で算出）の画素の濃淡値を調べ、最も違いが大きい位置に部品が取り付けられたと認識する（部品取り付け位置認識）。
- (4) 以上の処理を全ての部品の取り付けを認識するまで繰り返し、部品の取り付け順序を認識する。
- (5) 予め作成しておいたデータベースの書式の雛型に、基板の種類を示す識別コードと認識した順に並べた部品の識別コードを自動的に書き込む。

3.2 性能評価実験

3.2.1 実験目的

画像中の部品取り付け位置の算出精度、及び提案した部品取り付け完了認識の手法と部品取り付け位置認識の手法のロバスト性を評価する。

3.2.2 実験方法・条件

撮影する動画像の解像度を変化させ、さらに各解像度で照明の明るさを変化させる条件下で部品取り付け作業を行わせ、その全ての過程の手順認識システムの動作精度を評価する実験を行った。評価は各条件下で部品の取り付けを正しく認識した回数、各部品取り付けの完了を

表 1 正しく全ての部品を認識した場合の例

Fig.1 Examples of the cases of correct recognitions

カメラの高さ	1.5m	1600Luxの明るさ、1つめの作業手順
	1.4m	1200Luxの明るさ、1つめの作業手順
	1.3m	800Luxの明るさ、1つめの作業手順
	1.2m	1600Luxの明るさ、1つめの作業手順

表 2 認識回数

Fig.2 The number of recognition

		明るさ (Lux)				
		1600	1200	800	400	200
カメラの高さ (m)	1.5	45/48	47/48	46/48	47/48	0/0
	1.4	40/48	44/48	45/48	45/48	0/0
	1.3	44/48	43/48	44/48	44/48	0/0
	1.2	44/48	45/48	45/48	44/48	0/0

認識した回数により行った。実験に用いた基板は 2 種類で、各基板に取り付ける部品は 6 個ずつである。被験者にはこの評価実験のために異なった取り付け手順を 4 通り予め指示している。撮影する動画像の解像度の調節はビデオカメラ自体の解像度は固定し、被写体からビデオカメラまでの距離を 1.5m から 1.2m まで 0.1m ずつ短くする 4 通りに変化させた。最も解像度が高い 1.2m の高さから撮影した画像は最も解像度が低い 1.5m の高さから撮影した画像の解像度の 1.2 倍の解像度であった。照明の明るさは、視覚作業を行う現場の照度の範囲内で、約 200Lux、400Lux、800Lux、1200Lux、1600Lux の 5 通りとした。なお、3.1 節で述べた手順認識システムの処理のうち(1)の処理はビデオカメラの高さを変化させ、画像中の基板の位置・大きさが変化したときにのみ行った。

3.2.3 実験結果・考察

算出した画像中の部品取り付け位置の精度の評価

表 1 に各ビデオカメラの高さで 2 枚の基板の両方で全ての部品取り付けを正確に認識した場合の明るさと作業手順の例を示す。表 1 の通り、どのビデオカメラの高さでも全ての部品取り付けを正確に認識した場合があった。これは提案した手法が画像中の部品取り付け位置を正確に算出できていることを意味する。よって、今回の画像中の部品取り付け位置の算出手法は、部品取り付け認識に十分な精度を有することが分かった。

部品取り付け完了認識の手法の評価

各ビデオカメラの高さ、明るさで、(部品の取り付けを正確に認識した回数)/(各部品の取り付け完了を認識した回数)を表 2 に示す。なお、各ビデオカメラの高さ、明るさでの実際の部品取り付け回数は 48 回であった。

照度が 200Lux 程度のときは、ビデオカメラの高さに関わらず部品取り付け完了を認識した回数が 0 となっている。これは照度が足らず、手を全く認識しなかったためと考えられる。その他のビデオカメラの高さ、明るさでは各部品の取り付け完了を認識した回数は実際の部品を取り付けた回数と一致するので、今回の手法による部品取り付け完了認識には 400Lux 程度以上の明るさが必要なが分かった。

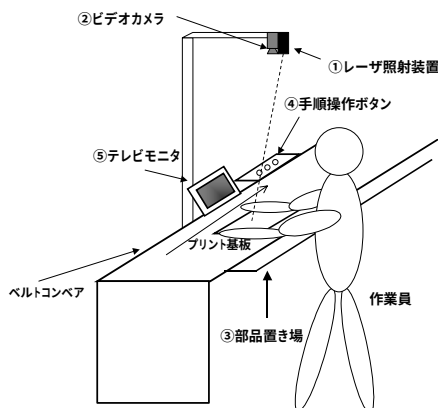


図1 作業指示システムの概観

Fig.1 Appearance of the Instruction System

部品取り付け位置認識の手法の評価

明るさが400Lux以上の場合では、表2より正しく部品の取り付けを認識した回数は、各ビデオカメラの高さ、明るさで大差は無いが、ビデオカメラの高さを1.5mに設定した時が最も良い。この理由としては、ビデオカメラの高さが1.4m以下の場合では、ビデオカメラが部品を取り付ける手による画像の色合い変化を検出して露光を自動調節したためと思われる。すなわち、用いた手法では手が基板から離れた直後の画像で部品取り付け位置を認識することから、ビデオカメラの露光変化のため、部品取り付けの前後で部品を取り付けた位置以外の部分でも見かけ上、色が大きく変化した位置があったことが原因と考えられる。その他、全体的な認識失敗の原因には、隣接する大きな部品と小さな部品の取り付けで、先に大きな部品を取り付ける手順のときに、先に取り付けた大きな部品の影が小さな部品の取り付け位置に重なるため、小さな部品の取り付けの正確な認識に影響を与えていた。

3.3 まとめ

今回提案した手法による部品取り付け位置認識の精度は400Lux以上の明るさで全てのビデオカメラの高さを考えた場合93%、高さを1.5mとすると96%であった

4. 作業指示システム

本システムの詳細は既報[4]に譲り、以下では試作した作業指示システムの概要と、そのシステムを用いて行ったユーザビリティ評価実験について述べる。

4.1 システムの概要

作業指示システムの全体構成の概観を図1に示し、そのシステム動作概要を以下に示す。

- (1) 作業手順に従い、テレビモニタ(図1中⑤)により取り付ける部品の種類と向きを示す画像を表示する。作業員は画像を見て、取り付ける部品の種類と向きを理解し、部品置き場(図1中③)から取り付けるべき部品を探す。
- (2) レーザ照射装置(図1中①)はレーザ光でベルトコンベア上を流れる基板上に円を描いて、部品を取り

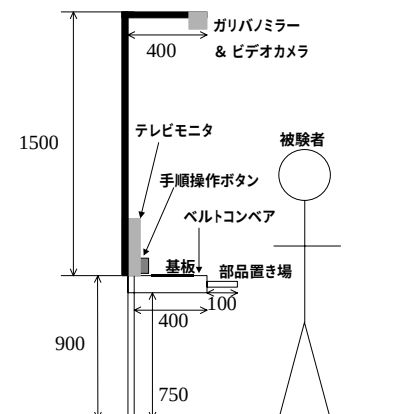


図2 実験環境 (単位: cm)

Fig.2 Experiment environment (Unit: cm)

付ける位置を指示する。作業員はレーザ光の指示する位置に(1)で指示された部品を取り付ける。

- (3) レーザ光の指示位置に、予め設定した時間より長く手が留まっていると、指示した部品が取り付けられたとして(作業状況認識)、次の手順の指示を行う。

(3)ではビデオカメラ(図1中②)で撮影する画像中の肌色素の抽出により手の認識を行う。なお、作業指示システムの作業状況の誤認識で次の部品の指示がモニタに表れる場合や、作業員が自分の誤挿入に気づいて作業のやり直しをできるように、手順操作ボタン(図1中④)を配置し、作業員がボタンを操作することで、部品の指示順序を進めたり戻ったりできる機能も実装した。

4.2 ユーザビリティ評価実験

4.2.1 実験の目的

作業員が作業指示システムの出す指示をどの程度正確に理解できるかを評価する。また、同時にシステムが行う作業状況認識の精度も評価する。

4.2.2 実験方法・条件・環境

実験用の作業場を用意し、作業指示システムを利用する方法と、従来用いている紙に書かれた作業指示書を利用する方法の2通りの作業指示法で基板への部品取り付け作業を行い、その状況を撮影したビデオ映像の解析と、被験者へのアンケートによってシステムのユーザビリティを評価した。

実験条件を以下に示す。

- 被験者は電子部品の知識がほとんどない全くの未熟練者である。
- 被験者にはあらかじめ、作業指示システムないし作業指示書の指示に従って部品を取り付ける作業を行ってほしいと伝えるのみで、作業指示書の見方や作業指示システムが出す指示の意味や見方等は前もって説明しない。

実験時の図1に対応するの各機器の配置を図2に示す。基板がベルトコンベア上を流れる速さは7.69cm/分、実験時の基板上での照度は1450Luxであった。実験で使用し

表3 各指示法における間違い発生回数

Table 3 The number of mistakes on each instruction

	部品の間違い	位置の間違い	向きの間違い	合計
作業指示システム	0	11	7	18
作業指示書	0	36	6	42

た基板は縦横が 180mm×260mm のもの（以下、基板 1）と、240mm×325mm のもの（以下、基板 2）の 2 枚で、それぞれの基板に取り付ける部品の数はともに 6 つずつであった。取り付ける向きが決まっている部品は基板 1 では 5 つ、基板 2 では 4 つ含まれていた。

なお、被験者は基板 1 への作業に作業指示システムを用い、基板 2 への作業に作業指示書を用いる組に 2 名と、基板 1 への作業に作業指示書を用い、基板 2 への作業に作業指示システムを用いる組に 2 名の計 4 名とした。また、各基板で 5 回の部品取り付け作業を行った。

4.2.3 結果と考察

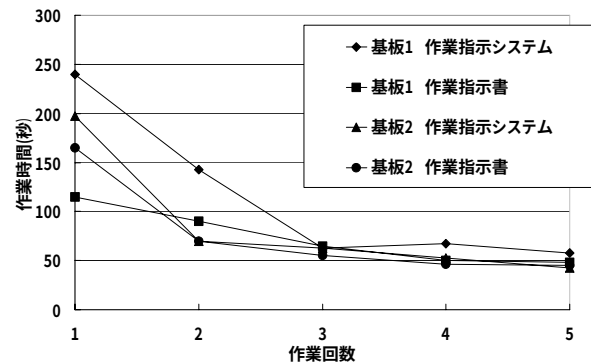
表 3 に各指示法での部品の種類の間違い、取り付け位置の間違い、取り付けの向きの間違いの発生回数と、その合計を示す。なお、それぞれ指示法で合計 120 回の部品取り付けを行った。作業指示システムと作業指示書の双方を比較すると作業指示システムを用いた場合は作業指示書を用いた場合に比べ、ヒューマンエラーを低減させることができることがわかった。以下では作業指示システムの設計向上の観点から作業指示システムを用いた場合の間違いについて考察する。

取り付け位置の間違いは、指示した取り付け位置の周辺に同じ部品を取り付ける位置がある場合に発生していた。これは人のミスというより作業指示システムの不備のためといえる。基板の位置認識の精度が低いことが原因で、レーザー光による指示精度が悪くなり、取り付け位置の判別が難しかったことが原因と考えられる。システムの基板位置認識精度の向上が今後課題となる。一方、取り付けの向きの間違いは、被験者へのアンケートから「向きがあることに気づかなかった」や「写真の見方を間違えていた」という回答があった。このことはモニターでの部品取り付け向きを示す画像表示に改善すべき点が見出せる。

図 3 は、基板 1、基板 2 の部品取り付け作業について、作業指示システムを用いた場合と作業指示書を用いた場合の、1 回目から 5 回目までの作業ごとの各被験者の作業時間の平均を表したものである。この結果から、1 回目の作業では、作業指示システムを用いた場合は作業指示書を用いた場合に比べて時間がかかっている。作業指示システムについての説明を行わなかったため、1 回目の作業では、レーザー光で基板上に描れた円が部品取り付け位置を指示していると理解するのに時間がかかったためと思われる。これは、予めレーザー光の円の意味を教示すれば解決できる問題である。ただ、被験者へのアンケートで「レーザー光が見えにくかった」という回答もあった。レーザー光による指示の視認性が悪く、レーザー光の円

図 3 作業時間の変化

Fig.3 Working time of each work



を認識するのに時間がかかったことも原因として考えられる。これにはレーザー光の視認性向上が必要となる。なお、図 3 で明らかなように 3 回目以降では、作業指示システムを用いた場合と作業指示書を用いた場合とで作業時間に違いはない。ある程度作業を反復すると指示法による作業時間の違いは生じないことがわかった。

作業状況認識機能について

今回用いた自動状況認識機能の手法では、手以外の部分を手と誤認識することが多く、正確な状況認識が行われたとは言えない。これは肌色画素の抽出の際、肌色と認識する色の範囲に問題があったためと考えられる

4.3 まとめ

以上の実験評価により今回試作した作業指示システムは従来用いられている作業指示書と比較して、ヒューマンエラーの低減では有効なことが示された。また作業指示システムの設計改善上の課題も抽出できた。

5. 最後に

今回提案した作業支援環境の方法は手順認識システムを用いて熟練作業員の作業を自動認識し、熟練作業員が持つ手順を抽出してデータベース化し、次いでその手順に従って作業指示システムが手順を自動指示することにより熟練作業員が持つノウハウを未熟練作業員が自然に習得していくことを目標としている。今回の研究では、実際にこの支援環境によって未熟練作業員が熟練作業員のノウハウを習得できるのかまでは実験を行っていないが、そのための手順指示システムの基本機能の検証と今後の改善課題の抽出をユーザビリティテストにより達成できたと考えている。

参考文献

- [1] Piore, M.J., Sabe, C.F.: 第二の産業分水嶺, 筑摩書房, (1993)
- [2] 池田: エルゴノミックス, 日刊工業新聞社, (1996)
- [3] 倉持: 工程管理の知識, 日経文庫, (1982)
- [4] 松崎, 新田, 他: レーザ光とカメラを用いた作業支援環境の構築; 計測自動制御学会, システム・情報部門シンポジウム 2001 講演論文集, pp.343-348 (2001)