

プリント基板の面実装作業に対する作業教育システムの開発

○小林 隆、藤野 秀則、石井 裕剛、下田 宏、吉川 榮和

(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

Wu Wei、寺下 尚孝

(三菱電機株式会社先端技術総合研究所)

Development of an education system for the surface mount work of a printed circuit board

T.Kobayashi, H.Fujino, H.Ishii, H.Shimoda and H.Yoshikawa

(Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

W.Wu, N.Terashita

(Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corp.)

Abstract: A part of the surface mount work of a printed circuit board is conducted by people's hand, and the human error resulting from hand working is an serious problem. So the education of the workers is important in order to prevent such human error, but the present education is not so efficient. In this study, we have been developing an education system for the surface mount work of a printed circuit board utilizing an information technology. In this paper, our progress situation of development is reported, especially focusing on recognition of a worker's situation.

1 はじめに

プリント基板上に抵抗やコンデンサ、IC等の電子部品を実装する面実装作業では、大きさや形が多様な電子部品を全て機械で自動的に実装することは技術的、コスト的に難しく、一部は人手により作業が行われている。以下では、人手による面実装作業を機械実装と区別するために手挿入作業と呼ぶ。

人は必ず間違いを犯すものであり、特に作業に慣れていない新規作業員は熟練作業員に比べて間違いを犯しやすい。さらに、手挿入作業の工場では、パートタイマーやアルバイトが多く、作業員の入れ替わりが非常に激しいために、熟練作業員の確保が困難である。これらの事情により手挿入作業では作業員への事前教育の仕方が製品の歩留まりに重要な影響を与えている。現状の作業員への事前教育では、ビデオや配布資料で作業の説明が行われているが、実際に行う作業と事前の説明のギャップがあり、作業が多岐にわたるので教育コストも無視できない。

そこで、近年発展している情報処理技術を適用したプリント基板の生産システムに関する研究が盛んに行われ、実用化されているシステム也多岐にわたる [1][2]。また、著者らは昨年度、手挿入作業を支援する目的でレーザ光と CCD カメラを用いた作業支援環境の開発を行った [3][4]。これは CCD カメラで撮影した画像を処理することにより、ベルトコンベア上を流れるプリント基板の位置等を認識し、レーザ光とモニタを用いて部品を実装する位置や種類、実装する際の注意事項を作業員に提示して作業支援を行うシステムである。以上のシステムは、作業支援もしくは自動

化を進めることを主眼にしたものが主で、作業員を教育する観点からつくられたシステムは見当たらない。しかし、作業支援ないし自動化のために開発したシステムを作業員の事前教育用に発展させれば、実作業の作業員とのギャップが少なくなり、開発コストも少ないという効果がある。

本研究では、以上の背景より、著者らの研究で開発した先行システム [3][4] の各種要素技術に改善や変更を加え、手挿入作業に対する作業教育システムを開発する。本稿では、作業教育システムを実現するために必要となる各種要素技術のうち、作業の進捗状況を認識する機能（作業状況認識機能）を中心に述べる。

2 プリント基板の手挿入作業

はじめに手挿入作業の内容と特徴、作業教育における問題点をまとめる。

2.1 手挿入作業の概要

プリント基板工場では、各作業員は指定の作業場所得手挿入作業を行う。作業対象のプリント基板の図面や部品の情報は全て作業指示書に記載される。また、プリント基板には部品を挿入するための穴や部品の形、名前等のシルク印刷が施される。作業員は作業指示書とシルク印刷の情報に従い、部品をプリント基板に実装する。作業現場の様子を Fig.1 に示す。作業者は、基板設置枠にプリント基板を設置し、作業指示書と必要な部品を入れた部品箱を基板の周囲に置いて作業を行う。部品箱には、一つの箱につき一種類の部品を入れる。

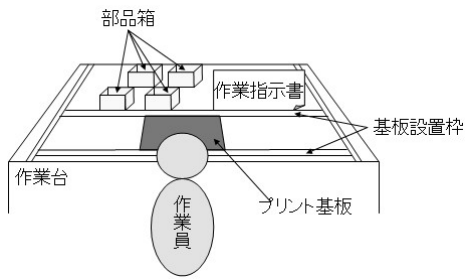


Fig. 1: Working site.

2.2 手挿入作業の特徴と作業教育における問題点

手挿入作業に関連する知識をまったく持たない新規作業員が2.1で述べた作業を行う場合、Table 1にまとめた事項を理解しなければならない。これらを作業員に指導する場合に、現状のビデオや資料を用いた説明だけでは、新規作業員がどの程度作業を理解したか、実際に現場に投入して間違いなく作業できるかの見極めが難しい。実際、新規作業員を部品の実装位置や種類、方向に対して作業することを理解していない状態で現場に投入して、新規作業員が間違いを犯すことが多い。そこで、熟練作業員が新規作業員に付き添って現場でマンツーマン教育を施すことも考えられるが、この間は熟練作業員は生産ラインに加わることができず生産工程に影響を与える。また、個々の基板の種類に応じてビデオや資料を作成することは面倒でありコストがかかる等の問題点がある。そこで、事前に作業に対する理解の度合いを見極めてから新規作業員を現場に投入するような作業教育を行うことのできる自動的なシステムを作成すれば、これらの問題に対処することができる。

Table 1: Points which a novice worker should understand

項目	内容
作業内容	電子部品をプリント基板上の正しい穴に挿入する作業
作業指示書	実装する部品の品略(例:抵抗→R)やキーワード(型番号)、個数等のリストや図面等が記載
シルク印刷	プリント基板上に部品の形や品略、極性のある部品の実装する方向等の情報が印刷されている
部品の特徴	プリント基板上の穴に挿入するための足がついている、形状の似た部品が多い、極性の有無がある
作業の注意点	部品を実装する位置や種類、方向に一つでも誤りがあってはならない、部品の足を折ってはならない

3 システムの開発指針と概略設計

本研究の目標を「作業に関連する知識を持たない新規作業員に対し、作業指示書を見て作業内容を理解し正しく作業を行えるようになるまで指導するシステムを開発すること」とする。2.2で述べた内容を考慮して、システムが実現する必要のある項目とその実現法をTable 2にまとめる。Table 2より、主に作業員に作業に関連する情報を提

示する機能(情報提示機能)と作業員の作業状況を認識する機能(作業状況認識機能)が必要である。これらを実装するために、作業員に特殊な機器を装着させないで現場作業時の服装のままで作業教育を行う、比較的入手しやすいデバイスを用いてシステム開発コストを抑える、等の点に配慮して、本研究ではFig.2に示すようなシステム構成とした。また、このシステムを用いて作業教育を行う場合の教育の流れをFig.3に示す。

作業教育の方針として、最初は与える全ての情報を作業員に提示し、作業員が作業に慣れるに従って、提示情報を減らし現場の環境に近づける。具体的には、まず、Fig.4のa).のように、作業員にモニターで作業概要や注意事項、作業指示書を提示し、レーザー光で部品の実装位置を指し示して、作業を実践してもらおう。次に、CCDカメラで撮影した画像の処理により作業状況を認識し、作業員の習熟度を推定する。本研究では、画像処理から得られる作業員の習熟度を推定する指標に部品の実装位置、種類、方向の正否があり、これらを判定して習熟度の推定に用いる。そして、習熟度の推定結果に応じてFig.4のb).のように作業員に提示する情報の量を減らす。以上を繰り返し、最終的にFig.4のc).のように作業指示書の表示だけで作業員が作業できるようになるまで指導する。

上記の作業教育を行うシステムに実装する必要のある機能の詳細をTable 3にまとめる。

Table 2: Requests and means of education

要求事項	実現手段
作業現場に対するギャップの解消	実際のプリント基板を用いて作業を実践してもらおう
作業概要や注意事項の理解	説明用テキストを作業員に見せる
作業指示書とシルク印刷の意味の理解	説明テキストを作業員に見せ、作業指示書の記載内容に対応する基板上の位置を指し示す等のヒントを与える
部品の位置、種類、方向の注意	作業員に作業を実践してもらい、間違いを常に指摘して、意識付けをする
作業員の習熟度に応じたレベルの教育	作業間違い等から習熟度を推定し、作業員に与える情報の量を調節する
管理者の負担の軽減	説明用テキストの変更等を容易にできるようにする

本研究では、著者らの先行システムを基盤として開発を進める。しかし、先行システムでは作業状況認識機能と作業指示機能を試作したが、作業状況の認識精度が低く、また作業指示機能は一定の作業情報を順番に提示するだけであった。そのために、上記の情報提示機能の仕様を満たさないで、1). 作業認識機能の改善、2). 情報提示方法の変更、を行う必要がある。以下では、特にその作業状況認識機能の改善について述べる。

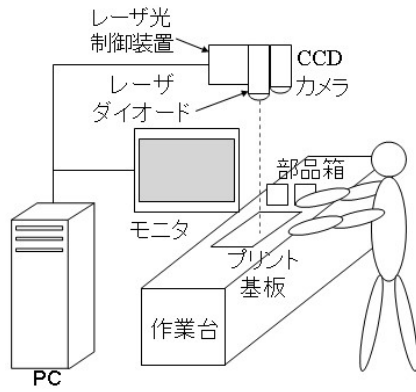


Fig. 2: System configuration.

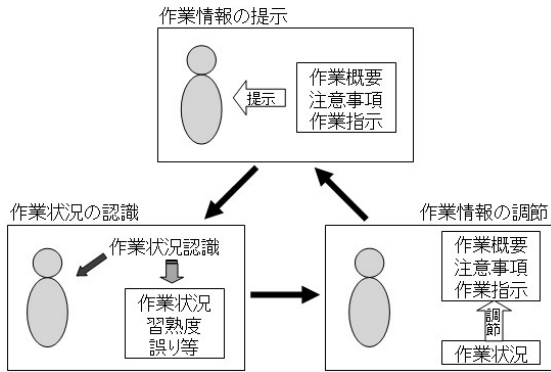


Fig. 3: The cycle of a course of guidance.

4 作業状況の認識

4.1 作業状況の認識手順

本研究では、作業員の習熟度を推定するために、部品の実装位置、種類、方向の正否を判定するとした。このためには、作業員が部品を実装した時点を認識し、その直後の基板を調べて、部品の実装位置、種類、方向が正しいかどうかを判定すればよい。

作業員が手挿入作業を行っている様子を上方から CCD カメラで撮影した場合に得られる一連の画像を模式的に Fig.5 に示す。これらの一連の画像は、基板上に作業員の手がある場合と無い場合の 2 種類に分類することができる。基板上に作業員の手がある場合では、1). 作業員が部品を基板上に実装している最中である、2). 実装位置の指差して確認を行っている、3). 偶然基板上に手がある等の状態があり得るが、これらを個別に認識することは困難である。従って、本研究では、基板上に作業員の手がある場合は、全て作業員が部品を実装する作業中であるとする。CCD カメラから得ることができる一連の画像では、基板上に作業員の手がある画像と、手が無い画像が交互に現れるが、本研究では、基板上に作業員の手がある画像の後に、手が無い画像が現れた時に、基板上に部品が実装された可能性が高いと判断し、部品の実装位置、方向、種類等を認

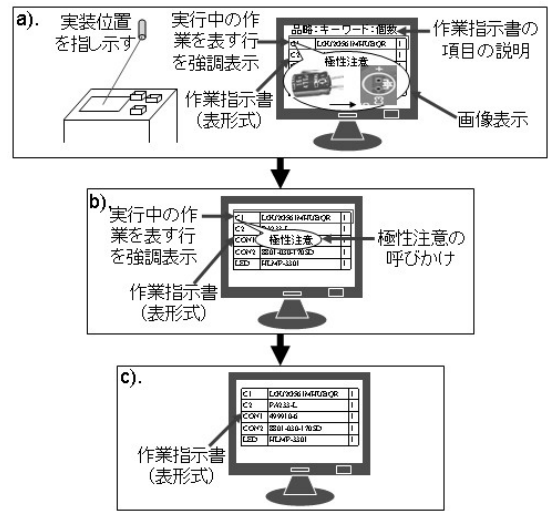


Fig. 4: Reducing step of information.

Table 3: Necessary functions for an education system

機能	内容
情報提示機能	・モニターへの作業概要や注意事項の説明テキストの表示 ・モニターへの作業指示書とその説明テキストの表示 ・レーザ光の制御 (部品の実装位置の指示) ・レーザ光のキャリブレーション ・習熟度推定による提示情報の調節 ・提示情報の編集機能の提供
作業状況認識機能	・作業の進捗状況の認識 ・部品の実装位置、種類、方向の判定

識する処理を行うものとする。

上記の方針に基づいて考案した作業状況の認識手順を Fig.6 に示す。以下では、ある瞬間に CCD カメラで撮影して得た一枚の画像をフレーム画像と呼ぶ。まず、常にフレーム画像から基板の位置と作業員の手の位置を調べ、手が基板上にあるか否かを調べる。次に、作業員の手が基板上から基板外に移ったときに部品実装位置、種類、方向の判定を行う。以下で、1). 基板位置の認識、2). 作業員の手の位置の認識、3). 部品の実装位置の判定、4). 部品の種類の判定、5). 部品の方向の判定の順にその手法を述べる。但し、現時点では 1).~3). までの開発が終了し、現在、4). 種類の判定と 5). 方向の判定については、その詳細な手法を検討中である。

4.2 基板位置の認識

基板位置の認識手順と実際の処理の様子を Fig.7 に示す。

まず、フレーム画像から基板の色情報を用いて閾値処理を行い、基板部分の画素のみを抽出する。このとき、通常の RGB 色空間ではなく HLS 色空間に変換して閾値処理を行う。HLS 色空間では、色合い (H)、明度 (L)、彩度 (S) を用いて色を表現する。色合いにより大まかな色を指定できるために、RGB 空間よりも数値と色との対応が分かり

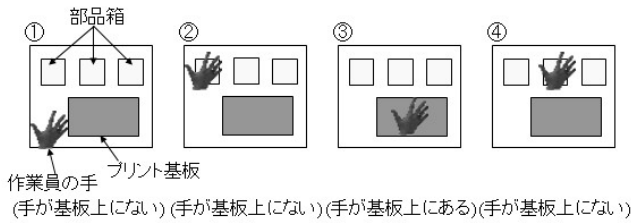


Fig. 5: A series of frame image.

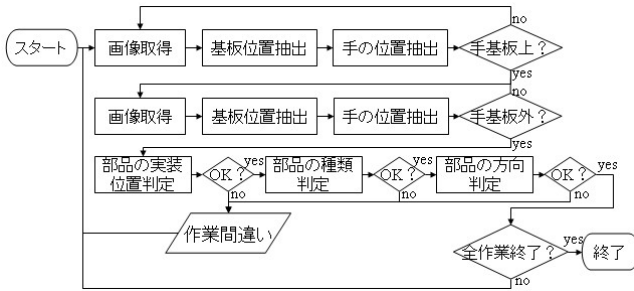


Fig. 6: Recognition flow.

やすく、閾値の設定が容易である。次に、閾値処理を行った画像を上下左右方向からスキャンして、基板部分の周囲の画素のみを抽出する。そして、ハフ変換を用いた直線検出により基板周囲の直線を検出し、基板の四隅の座標を算出する。

以上に述べた方法により、基板の方向や照明条件の大きな変化に関わらず、基板の位置を安定して認識することができる。

4.3 手の位置の認識

作業員の手の位置の認識についても、基板位置の認識と同様に、色情報を用いて行う。

まず、作業員の手の部分のみ(腕の部分を含まない)の抽出を簡単化するために、作業員に色手袋をはめてもらう。ここでは、基板の緑色と明確に区別するために青色の手袋を用いた。次に、基板位置の認識と同様に HLS 色空間による閾値処理を行い、フレーム画像から手袋の色の部分を抽出する。そして、抽出した部分の座標を調べる。ここでは処理を簡単化するために手を含む長方形の範囲を手の位置とする。すなわち、閾値処理により抽出した手の部分の上下左右端をスキャンし手の位置を認識する。

4.4 部品の実装位置の判定

部品の実装位置の判定については、4.2の基板位置の認識で抽出した基板範囲の画像と予め準備した基板の設計情報(基板のサイズ、部品の設置場所・種類・方向、部品のサイズ等の情報)を利用する。基板の設計情報には、XML[5]で記述したデータベースを利用し、システムにこのデータベースから基板の設計情報を読み込ませる。XMLで記述すると、ネットワーク上で一般に公開されているフリーの

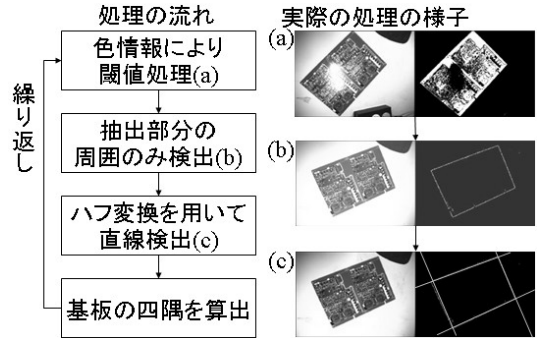


Fig. 7: Recognizing location of printed circuit board.

```
<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS" ?>
- <PCBs xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation="PCB.xsd">
- <PCB id="三菱基板1">
- <size width="260" height="180" />
- <layout>
- <p mark="FIN2" id="OSH1625SP" x="55" y="117" width="16" height="16" degree="90" />
- <p mark="HIC1" id="BKO-CB0034H01" x="50" y="35" width="7" height="27" />
```

Fig. 8: Sample of database described by XML.

編集ソフトを利用できる、標準ライブラリを用いてデータ操作が容易である、等の利点がある。Fig.8にXMLによる基板の設計情報の記述例を示す。しかし、CCDカメラと基板との位置関係によっては、Fig.9の上図に示すように、画像処理で求めた基板の形が設計情報と異なって見えて、設計情報における部品の実装位置情報をそのまま利用できない場合がある。従って、基板の設計情報における座標系とカメラ画像における座標系との間で補正を行う必要がある。本研究では、次の(1)式に示す射影変換式を用いて補正を行う。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + a_9} \\ \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + a_9} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1) 式中の (x, y) は補正元座標系における点を表し、 (x', y') に対応する補正先座標系の点が(1)式中の (X', Y') である。(1)式中の変換係数 $a_1 \sim a_9$ は変換する二つの座標系間で4つ以上の対応点があれば求めることができる。すなわち、カメラ画像中の基板の四隅と設計情報座標系での基板の四隅が対応点であり、これらから射影変換の変換係数を求めることができる。

部品の実装位置の判定手順を Fig.10 に示し、図中の 1). ~5). について以下に説明する。

まず、1). 上記の補正方法を用いて、4.2 及び 4.3 の結果の比較により、基板上に手があると認識された直前の基板範囲の画像(前画像)と基板上に手が無くなったと認識された直後の基板範囲の画像(後画像)を求める。

次に、2). 前画像と後画像の間で各画素毎に差分を取る。ここで、基板は緑色と仮定しているため、部品が実装された場合に RGB 空間の G 成分に値の変化が顕著に現れるた

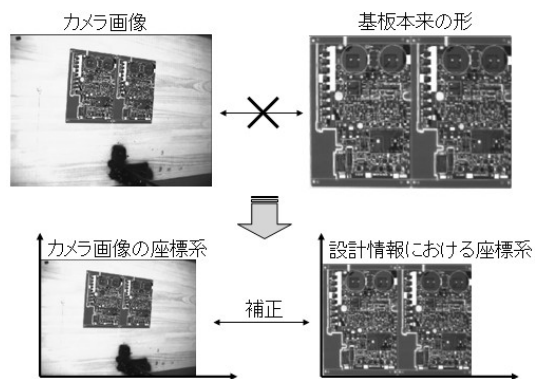


Fig. 9: Projective conversion.

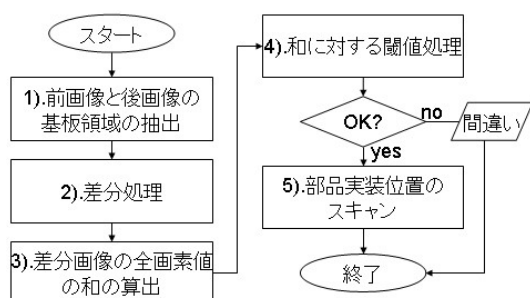


Fig. 10: The flow of judgement of location where parts was attached.

め、各画素毎に G 成分の差分を取る。そして、3). 差分を取った結果の全ての画素についての和を計算し、4). その結果が閾値を越える場合には、基板上に部品が実装されたと判断する。

次に、5). 基板の設計情報を基に、2). で求めた差分画像の部品が実装される可能性がある基板上の領域内で各画素の和を計算し、その結果が閾値を越える場合には、対応する箇所に部品が実装されたと判断する。

4.5 部品の種類の判定

部品の種類の判定については、作業員の手の動きを用いて判定することを検討している。具体的には実装する部品を部品箱から選択する前に、作業員の手は部品箱の上をさまよっているため、この部品箱上での手の動きをトレースすることにより、実装された部品の候補としていくつかの部品を推測できる。そして、それらの候補の中で部品箱上に手がある時間の一番長い部品箱に入っている部品の種類を実装された部品の種類として判定する。但し、この方法では 100% 正確に部品の種類を認識することができないために、詳細な判定手順については現在検討中である。

4.6 部品の方向の判定

部品の方向の判定については、典型的な方法として予め用意しておいた部品の画像とフレーム画像から得た部品画像との間でテンプレートマッチングを行い、方向を判定す

る方法がある。しかし、フレーム画像から得られる部品画像が非常に小さいことや、同じ種類の部品でも部品上の印刷にずれがあること、部品を実装した際に部品が傾いている場合があること等の要因により、高い精度のテンプレートマッチングが困難であり、ここでは適用できない。別の方法として、画像から部品の方向を判定しやすいように部品に色を塗ることも考えたが、この色情報が方向を示し現場でも部品にはこのような色が塗られていると作業員に誤解を与える可能性があるために適用できない。

そこで、部品の一部に目に見えない赤外線反射塗料をつけ、これを方向認識処理に利用することを検討している。部品の一部に赤外線反射塗料をつけ、塗料の位置と部品範囲との相対位置関係から部品の方向を認識する。基板上面から赤外線を照射し、赤外線フィルタをレンズ面に貼り付けた CCD カメラでこの基板を撮影する。取得した画像から赤外線の反射光位置を抽出し、この位置の部品範囲に対する偏りから部品の方向を判定する。但し、赤外線を用いることによりシステム構成に変更を加えること等を検討する必要がある、詳細な判定手順については現在検討中である。

5 作業状況認識機能の試作

4 で述べた作業状況認識機能のうち、基板位置の認識、作業員の手の位置の認識、部品の実装位置の判定機能の 3 つの機能を試作した。ここでは、これらの試作の結果と今後の課題を述べる。

5.1 試作環境

ソフトウェア 作業状況認識機能を試作する環境として、Windows2000 OS 上で C++ 言語のソフトウェアの統合開発環境である Microsoft 社製の Visual C++ を用いて試作した。また、画像処理に Intel 社が配布している画像処理ライブラリ IPL (Image Processing Library) 及び OpenCV (Open Computer Vision) [6] を使用した。これらのライブラリを用いることにより、画像処理の精度の向上とともに速い処理速度を期待できる。

ハードウェア 撮像素子が 1/3 インチ CCD、焦点距離が 4~8mm、解像度が 1024 × 768 ピクセルの CCD カメラを使用した。また、PC との接続に IEEE1394 仕様のインタフェースを使用した。

環境条件 CCD カメラをプリント基板から約 50cm 上方に設置した。照明環境は基板上及びその周囲で約 600~800Lux の照度であった。

5.2 試作結果

基板位置の認識、作業員の手の位置の認識、部品の実装位置の判定の 3 つの機能は著者らの開発した先行システムに既に実装されているが、それらは試作段階であり、精度等が十分ではなかった。本研究で試作した機能では、目標

とする作業教育を実現するために、4で述べた手法を用い、これらの機能の改善を図った。以下で、先行システムと比較して、その改善効果を述べる。

処理速度 本試作機能の処理速度は一回の処理につき約0.5秒である。新規作業員は作業速度が遅いことから、この処理速度は作業認識を行うのに十分である。

ハードウェアの変更による改善 先行システムでは、ベルトコンベア上を流れる基板を認識するために解像度が320×240ピクセル、焦点距離が3.4～10.2mmの1/4インチCCDカメラを基板から約1.5m上方に設置し広範囲を撮影していたが、今回の試作システムでは、基板が大きく動かないとしたために、このような広範囲を撮影する必要はなく、上記CCDカメラを基板から約50cm上方に設置した但し、上記の処理速度を保つために画像の解像度を処理段階で512×384ピクセルに落としている。これらの仕様変更により、1ピクセルあたりの誤差を約3mmから約0.75mmに縮めることができた。この誤差の縮小はレーザー光の指示精度の向上に寄与すると思われる。

基板位置の認識 先行システムでは、基板の四隅を検出していたが、簡略化された処理を行っており、約4mmの誤差範囲で精度が不十分としていた。本試作システムでは、4.2に述べた手法により、基板の傾きに依存しない向上を図った。また、基板認識の誤差範囲は4ピクセル程度であった(上記1ピクセルあたりの誤差から距離にして約3mm程度である)。従って、大きさが6mm程度以下の部品についてはレーザー光による指示があいまいになる可能性がある。また、本試作システムの問題点として、基板の周囲に緑色の画素が多く存在すると、それが基板であると誤認識する場合があった。

作業員の手の位置の認識 先行システムでは、手の位置を正確に認識せずに、基板上の肌色の画素数が閾値を超えるときに作業中であると認識していたが、手以外の基板上に存在する肌色成分の影響や腕の部分も手と同じく認識するという問題があった。本試作機能では、青色手袋を着用しその位置を正確に認識することにより、これらの問題を解消することができた。

部品の実装位置の判定 先行システムでは、フレーム画像中のプリント基板が長方形と仮定すれば、部品の実装位置の判定が可能であった。本試作システムでは、このような制約を解消し、プリント基板が四辺形であるならば部品の実装位置の判定を可能にすることができた。但し、大きな部品を実装した場合にその周囲に影が生じ、隣接する小さな部品の実装位置にまだ部品が実装されていないにも関わらず、実装したと誤認識する場合があった。

5.3 作業状況認識機能の今後の課題

5.2で述べた結果は、CCDカメラの基板から高さが約50cm、照度が約600～800Luxの条件の下で得た。より正

確な精度を得るためには、幾つかの条件の下で実験を繰り返す必要がある。

しかし、制約された条件の下ではあるが、その結果から基板の位置認識及び部品の実装位置の判定精度に改善の余地があることが分かった。基板位置認識の改善方法として、基板の周囲の緑色画素の影響による問題点を改善するために、予め基板のないフレーム画像を用意しておき、これと各フレーム画像との差分をとることにより、基板の背景を取り除くことが考えられる。また、処理をサブピクセル化することにより、さらに位置認識の精度の向上を期待できる。部品の実装位置の判定の改善方法として、できる限り基板の上方にCCDカメラを設置し、また影の発生を生じないような照明環境の改善が考えられる。

部品の種類の判定と方向の判定の詳細な手順を未だ検討中であり、この二つの機能の作成が残されている。今は、種類判定と方向判定の機能を実装し、被験者実験を行って作業状況認識機能の精度に関するさらに詳細なデータを収集し、認識手順を詳しく評価する必要がある。

6 まとめと今後の展望

本稿では、プリント基板の手挿入作業に対する作業教育システムについて述べ、これを実現するために必要な作業状況の認識について、その手法と進捗状況を報告した。その結果、基板位置の認識及び部品の実装位置の判定に改善の余地があることが分かった。

今後の課題として、まず部品の種類と方向を判定する手法を確立し、それらの機能を実装して、作業状況認識機能を完成させる必要がある。次に、情報提示機能を実装し作業状況認識機能と連携させ、教育システムを構築する。そして、被験者実験を行い、本システムの問題点を抽出し、その改善法等について考察する必要がある。現場への投入を目指して、教育効果が高くコストも小さい実用システムを構築したい。

参考文献

- [1] 目視検査の自動化調査委員会: 画像処理による目視検査の自動化事例集, 新技術コミュニケーション, 98 (1991)
- [2] 和田誠一郎, 伴好弘, 佐藤宏介, 千原國宏: 強調現実感による電子部品検査の作業支援環境, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, 217/218 (1998)
- [3] 松崎剛士, 新田和弘, 下田宏, 吉川榮和, Wu Wei, 中川隆志, 寺下尚孝: レーザ光とカメラを用いた作業支援環境の構築, システム・情報部門シンポジウム2001講演論文集, 343/348 (2001)
- [4] 藤野秀則, 松崎剛士, 新田和弘, 石井裕剛, 下田宏, 吉川榮和, Wu Wei, 寺下尚孝: 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, ヒューマンインタフェースシンポジウム2002論文集, 733/736 (2002)
- [5] <http://www.w3.org/XML/> (2002年9月25日現在)
- [6] <http://www.intel.com/> (2002年9月25日現在)