

制御盤配線ロボットのための位置検出と検査機能

笠原 竹博[†] 三吉 建尊^{††} 上田 芳弘[†] 米沢 裕司[†] 越野 亮^{†††}

[†] 石川県工業試験場 〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2-1

^{††} 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 石川県金沢市角間町

^{†††} 石川工業高等専門学校 〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条タ 1

E-mail: [†] {kasaharat, ueda, yoneyuji}@irrii.jp ^{††} miyoshi@blitz.ec.t.kanazawa-u.ac.jp,

^{†††} koshino@ishikawa-nct.ac.jp

あらまし 制御盤は多様な装置に使用されている。制御盤配線ロボットの開発では、制御盤製造におけるハーネス結線と配線工程を自動化することを目指している。この開発において必要とされた電気部品的位置検出と検査機能について報告する。これらの機能は主にテンプレートマッチングおよび、一般物体認識が可能で照明変化に頑健な HOG と AdaBoost を用いて実現した。開発した各機能について目標精度を設定し、それぞれに評価を行った結果、ダクト穴位置検出とネジ位置検出では目標精度を達成し、結線検査では識別率をさらに向上する必要があることがわかった。

キーワード HOG, AdaBoost, 位置検出, 一般物体認識, 制御盤, 配線ロボット

1. はじめに

工作機械や医療機器などの多様な装置には Fig.1(a) のような制御盤が使用されている。制御盤の製造工程は、電気設計に始まり、電気部品とダクトの設置、ハーネス加工、ネジ締め等による結線、ハーネス配線、検査の順序で行われている。このうち、設計とハーネス加工の自動化は進んでいるが、ハーネスの結線および配線工程の自動化は達成されていない。そこで、ハーネスの結線と配線機能を有する制御盤配線ロボットの開発を行っている。

本報では、この開発に必要とされた部品等の位置検出機能と検査機能の概要を述べる。位置検出では、エッジ抽出などを組み合わせたダクト穴位置検出、テンプレートマッチング（以下、TM）および一般物体認識が可能な HOG(Histograms of Oriented Gradients)[1]を用いたネジ位置検出について述べる。検査機能では、同様に HOG を用いた結線検査と、TM を用いた把持検査について述べる。

2. 位置検出機能

2.1. ダクト穴位置検出

ダクトは Fig.1(b), (c) のように配線されたハーネスを収容し、側面に幅 20mm 程度のダクト穴と呼ばれる開口部がある。このダクト穴にハーネスを通して Fig.1(d) のようなハーネス端子を電気部品に結線する。設計長に合わせたダクトの切断は手作業で行うため、ダクト穴の横方向の位置は決

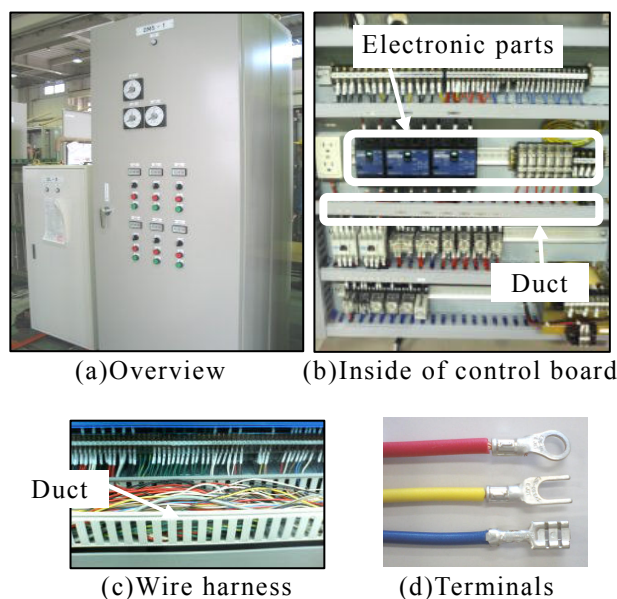


図 1 制御盤の概観と構成

Fig.1 Overview and constructure of control board.

まっておらず、配線前にそれぞれのダクト穴位置を検出する必要がある。なお、目標精度は穴通しの際のハーネスとダクト穴端との接触によるハーネス損傷を防ぐため、ハーネス径や変形特性を考慮して $\pm 1.00\text{mm}$ とした。

開発しているロボットには、そのハンド先端に CCD カメラを装着しており、必要に応じて制御盤内を撮像できる。ダクト穴位置検出では、ロボットハンドと電気部品の干渉を避けるために Fig.2(a) に示す条件でダクトを撮像することとし

た．このような条件で得られた画像によりダクト穴位置を検出するため，以下のような手法を考案した[2]．なお，Fig.2(b)のようにダクト穴に対して開口部でない樹脂面をダクト壁と呼び，ダクト穴の間隔をダクト穴ピッチと呼ぶ．

①エッジ抽出・収縮処理・粒子解析

撮像した画像 (Fig.2(c)) に対してエッジ抽出を行い 2 値化した後，エッジの膨張処理を行う (Fig.2(d))．ダクト穴と壁が映る中央を残して上下左右をマスクした画像の非エッジ部 (白色領域) に対して個数と面積，重心位置を算出した後，微小面積粒子を削除する (Fig.2(e))．ここで，残った粒子はダクト穴あるいはダクト壁である可能性が高く，かつダクト壁の粒子の方が一般に面積が大きい．

②スコア計算

残った n 個の粒子のうち， i 番目の粒子の面積を s_i ，重心の x 座標を x_i とする．また，ダクト穴のピッチを P_{pixel} とする．粒子の中で，大きな面積を持ち， x_i が P_{pixel} 程度の間隔で並んだ粒子群が存在するはずである．この粒子群を抽出するため， j 番目の重心 x_j が x_i から P の整数倍の mP だけ離れているときは 1 となり，そこからずれると正規分布で低下する重み $W_{im}(x_j)$ を式(1)で与える．ここで， σ は P の $1/8$ とし， m は $x_i + mP$ が画像の左右を超えない範囲の整数とする．この重み $W_{im}(x_j)$ を m がとり得る範囲において全ての粒子面積 s_i に掛けたものの和をスコアとし式(2)により算出する．このスコアが最大の粒子を含む粒子群がダクト壁に相当する．

$$W_{im}(x_j) = \exp\left(-\frac{(x_i + mP - x_j)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$\text{Score}_i = \sum_{j=1}^n \sum_{m=m_{\text{Min}}}^{m_{\text{Max}}} W_{im}(x_j) \cdot s_j \quad (2)$$

③ダクト穴位置検出

算出した Score_i が最大の粒子の重心を 1 つのダクト壁の重心とする．また，そのダクト壁から P だけ左右にずれた位置もダクト壁とする．最後に，近接する 2 つのダクト壁の重心の中点をダクト穴の重心とする (Fig.2(f))．

以上のようなダクト穴位置検出機能の精度評価を行った．ステージ上 (精度 $20 \mu\text{m}$) にダクトを置き， 1.00mm のステージ移動量に対するダクト穴位置検出の差分の測定を 60 回試行した．その結果を Fig.3 に示す．なお検出位置の差分とは，ステージ移動量に対する検出位置の差のことを

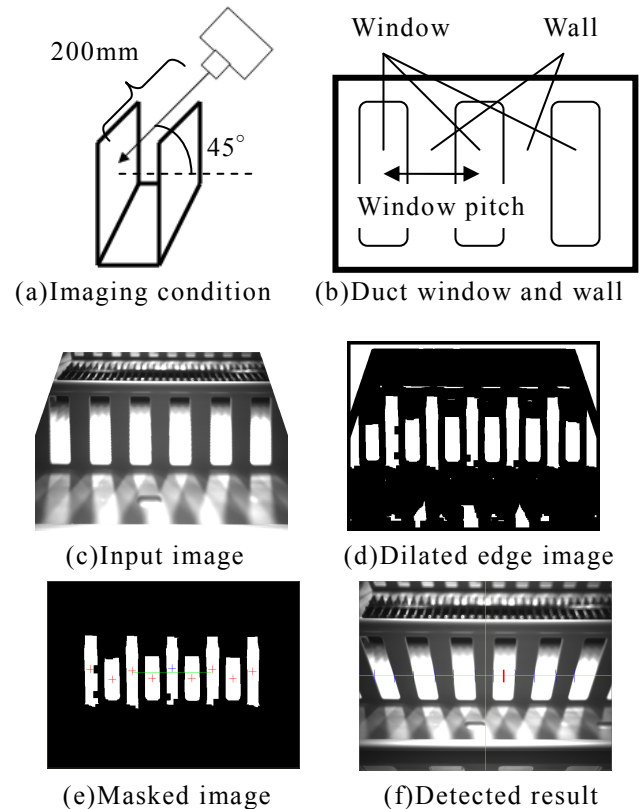


図 2 ダクト穴位置の検出手法

Fig.2 Detection of duct window position.

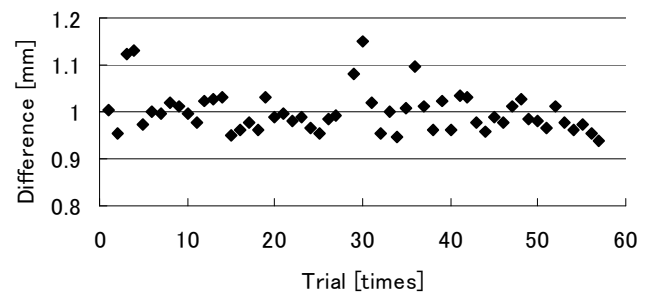


図 3 ダクト位置の検出結果

Fig.3 Evaluation result of detection of duct window position.

いう．評価結果として， $\pm 0.14\text{mm}$ (3σ) を得ることができ，目標精度 $\pm 1.00\text{mm}$ を達成した．

2.2. ネジ位置検出

各電気部品は一般には，制御盤の基板上のレーンに人手によって設置されている．このとき，左右方向に 50mm の位置ズレが許容されているので，自動でネジ締めを行うためには，ネジ位置を正確に検出しなければならない．そこで，まず TM を用いてネジ位置を検出した．ここでは，波長域が赤色の LED 照明 (イマック社 IDR-66/36R) と赤色パスフィルター (ミュートロン社 R270) を用いることで外乱光影響の低減を図った．なお，以

降の節での撮像条件は全て、Fig.2(a)と同様に距離は 200mm であるが、方向は 90° 真上とした。

ネジとドライバの形状を実測し、ネジ締めに必要なとされる精度を算出した。その結果、許容誤差は $\pm 0.39\text{mm}$ であることがわかり、ロボットの位置決め精度を考慮して、目標精度を $\pm 0.1\text{mm}$ と決定した。

2.2.1. TM を用いた検出手法

Fig.4 のように部品画像からネジ部分の画像を取り出し、円形フィルターをかけた画像を、テンプレートとした。このテンプレートと得られた画像をマッチングすることで、ネジ位置を検出することとした。

以上の TM を用いたネジ位置検出手法を評価した。ネジ表面は金属メッキ処理がされているので、外乱光によって位置精度が劣化する恐れがある。そこで、ロバスト性を評価するため、白色光を外乱光として与えてネジ位置の検出実験を行った。その結果、Fig.5 のように外乱光強度を上げると検出位置のズレ量は大きくなるが、外乱光強度が 168lx までは目標精度を達成できることがわかった。以上、ハレーションを起こしやすい金属製のネジ位置検出では、168lx の外乱光による平均ズレ量は最大 $83\mu\text{m}$ で、検出精度(3σ)は平均 $\pm 10\mu\text{m}$ であり、目標精度 $\pm 0.1\text{mm}$ を達成した。

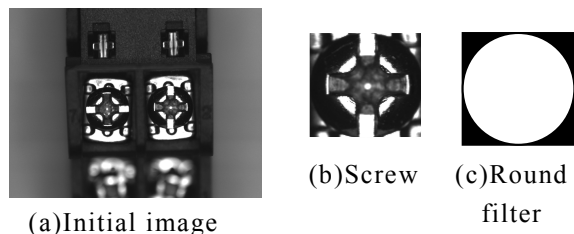


図 4 テンプレートの作成

Fig.4 Matching template.

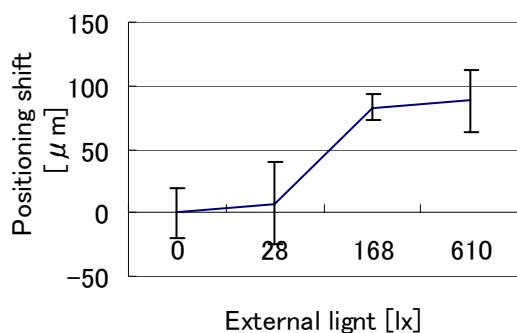


図 5 外乱光強度に対する検出位置ズレ
Fig.5 Positioning shift result
affected by external light.

2.2.2. HOG を用いた検出手法

ネジ位置検出では、TM を用いた手法により $\pm 0.1\text{mm}$ の精度を達成したが、この手法では、ネジごとにテンプレートを用意する必要がある。制御盤には多種多様な電気部品が用いられており、その種類は数十万にも上るといわれている。また、ネジの形状は規格化されていないため、部品メーカー毎に様々な形状のネジが用いられている。よって、一般物体認識によってネジ位置を検出することは非常に有効な手法であり、HOG を用いることとした。また、HOG は照明変化に頑健であり、金属製のネジの検出には有利である。一方、HOG はスケール変化と回転には対応していない。このうち、スケール変化については、ネジのサイズが $\phi 3\text{mm} \sim 5\text{mm}$ に限定できるので、このサイズを 4 段階で学習することで対応した。また、回転については、任意に回転させたネジ画像を学習することで対応した。なお、学習法として AdaBoost[3] を用いた。

HOG を用いて Fig.6(a), (b) のようなネジ画像と背景画像の特徴量を算出し、AdaBoost を用いて、2 クラスについて学習を行った。ネジは 7200 画像と背景は 1350 画像を用いた。検出の際は処理時間の短縮のため、エッジ抽出した画像(Fig.6(c))を Hough 変換し、まず円形を探索して(Fig.6(d))、その周辺からネジ検出を行うこととした。

評価実験として、照明の明るさを変化させて撮像した画像に対して円形探索を行った後、ネジ検出を行った。適切な照明下での円形探索の結果で

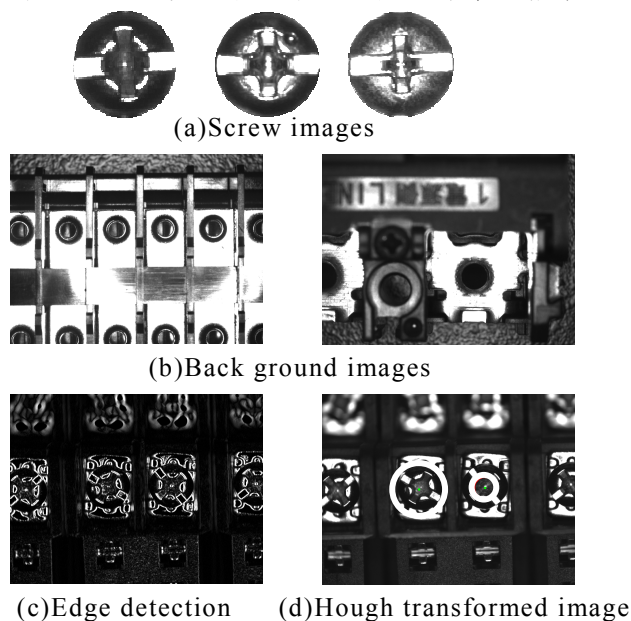


図 6 HOG を用いたネジ位置検出

Fig.6 Detection of screw position using HOG.

は、再現率 99%, 誤検出率 13%が得られた。また、ネジ検出の結果では、再現率 87%, 誤検出率 7%が得られた。これらの結果から、電気部品の CAD データから位置関係のわかっている 4 つのネジを 1 つの剛体として検出対象にできれば 98.7%の検出率で特定できることがわかった。しかし、位置精度が目標精度を満足していないため、今後検出率と精度の向上を目指す。

3. 検査機能

3.1. HOG を用いた結線検査

結線検査を行うため、ネジ位置検出と同様に HOG と AdaBoost を用いて、結線の成功と失敗の識別を行った。結線を終えた部品のネジ位置を撮像すると Fig.7(a)の画像が得られる。ここから既知のネジ位置にハーネスが結線されているかを識別する。学習には、Fig.7(b)のような結線状態の 540 画像と非結線状態の 54 画像を用いた。

以上の検査手法を評価するために、上記の学習用画像とは別の画像において、ネジ位置を与えて

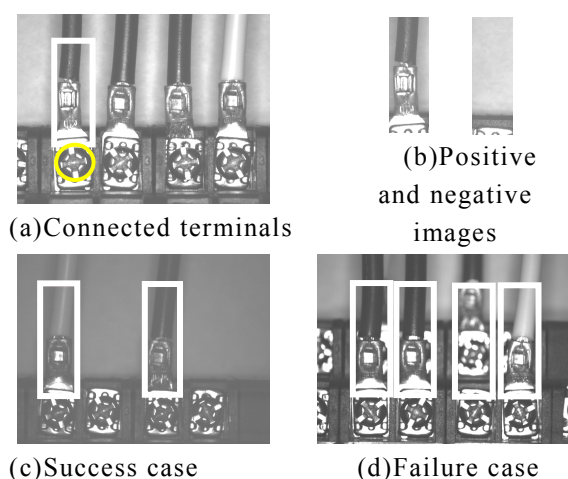


図 7 HOG を用いた結線検査

Fig.7 Inspection of wiring harness connection using HOG.

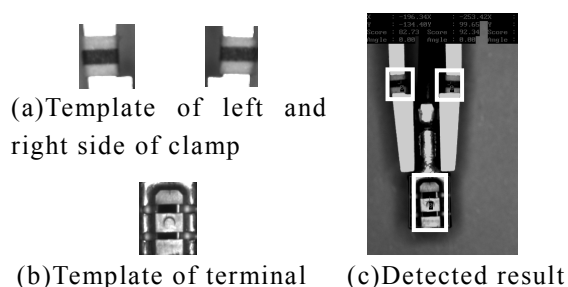


図 8 端子把持検査

Fig.8 Inspection of clamp nipping using TM.

Fig.7(b)と同様に画像を切出して、その識別率を求めた。なお、識別率は、結線状態と非結線状態をそれぞれに正しく識別した平均の率である。その結果、91.4%の識別率を得た。Fig.7(c)のように多くは正しく識別できたが、Fig.7(d)のように上下 2 段のネジをもつ部品では、下の段の結線を間違っ

3.2. TM を用いた端子把持検査

ハーネス結線には、上述のネジ締め結線の他に鉄道用制御盤などではファストン端子を用いた差し込み式の結線が行われている。差し込み結線では、ロボットハンド先端のクランプで端子を把持して、結線先のコネクタに差し込む。この差し込み結線の失敗を防ぐためには、クランプによる端子把持が適切に行われたかを検査することが重要である。

そこで、把持状態の画像から Fig.8(a)のクランプ左右の一部と Fig.8(b)の端子画像を取り出し、テンプレートとした。次に端子を把持した状態の画像に対してマッチングした座標結果を得る (Fig.8(c))。クランプ左右の距離と端子の距離により、把持の成功と失敗の識別を行うこととした。

以上のような TM を用いた 3 点間距離からの端子把持検査機能は、非常に簡易なものであるが、鉄道用ハーネスの場合は端子を 1 種に限定できるので、実用上識別率に問題はないと判断できた。

4. まとめ

制御盤配線ロボットに必要な部品の検出と検査機能の開発を行った。開発には、主にテンプレートマッチングと一般物体認識に用いられる HOG を応用した。開発した各機能毎に評価実験を行い、目標精度との比較を行った。

文 献

- [1] N. Dalal, B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection", Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 886-893, 2005.
- [2] 笠原竹博, 上田芳弘, 米沢裕司, 南川俊治, 北森英明, 山戸博一, "制御盤ハーネス自動配線装置における位置検出システムの開発"2009 信学会総合大会講演論文集,D-11-47.
- [3] Y.Freud and R.E.Schapire, "A Decision-theoretic Generalization of On-line Learning and an Application to Boosting", Journal of Computer and System Sciences, vol.55, no.1, pp.119-139, 1997.