



視覚サーボによる高精度位置決め手法の開発

村田 敦*・韓
上野 啓人

敏・滝本周平

Precise Positioning Method by Utilizing Visual Servoing Technology — by Atsushi Murata, Bin Kan, Shuhei Takimoto and Hiroto Ueno — As sensing technology and robot performance advance, robots' application field has expanded; especially on assembly lines, robots are replacing manual operations. The wire harness, one of Sumitomo Electric Industries' core products, involves complicated processes such as the insertion of terminals into connector cavities and the placement of harness on assembly boards, requiring manual assembly. To determine the application possibility of robots for the wire harness assembly, we have focused on the robot arm maneuver of inserting terminals into connector cavities. We have examined the precise positioning method by robot arms, considering remaining problems for the robot application. The position of a connector, which is arbitrarily placed on an assembly board, is not specific as that required for the terminal insertion. Thus, absolute coordinates can not specify the precise position for the end of the robot arm, and therefore, a method which does not rely on absolute positioning of the robot arm needs to be developed. As one of the solutions, we have tested servoing system in which a six-axis robot is feedback-controlled based on visual information from a CCD camera. This paper reports the test results and evaluation of the precise positioning method of terminal insertion utilizing visual servoing.

Keywords: visual feedback, visual servoing, robot, wire harness

1. 緒言

近年のセンシング技術の進歩、ロボット性能の向上に伴い、ロボットの適用領域が拡大し、特に、人手作業に替わる組立工程では、ロボットは広く利用されている。当社の主力製品の一つであるワイヤーハーネスは、コネクタへの端子挿入、図板への布線など複雑な工程を経るため、組立のほとんどが人手で行われている。我々は、このようなハーネス組立工程へのロボットの適用可能性を評価するため、ロボットに把持させた端子をハウジングに挿入する作業を取り上げ、高精度の位置決め手法を適用した場合に、必要な精度が得られるかを確認すると共に、ロボット化の課題について検討を行った。図板上に任意に置かれたコネクタの位置精度は、端子挿入に必要な位置決め精度に比べて粗いので、ロボットアームの先端位置を絶対座標で精密に指示することはできない。そのため、ロボットアームの絶対精度に依存せず、対象物の位置や姿勢の変動に対して、動作を修正しながら実行する方法が必要となる。この手法の一つとして、CCDカメラから得た視覚情報をもとに6軸ロボットアームをフィードバック制御する視覚サーボの手法を使える可能性があるかどうか基礎的な検討をした。本報告では、視覚サーボを用いて端子を挿入する高精度位置決め手法の検討と実験結果について述べる。

2. 視覚サーボ

2-1 視覚サーボの概要 視覚サーボとして採用した画像ベース法（特徴ベース法）について説明する⁽¹⁾。画像ベース法は、目標とするゴールの位置を、そこではこのような画像が得られるはずだというゴール画像を特徴点の集合体として与え、現在位置での画像とゴール画像の特徴点座標を比較して、その差からとりあえずどちら方向へ移動するとよりゴール画像に近い画像が得られるか判断し、そちら方向へ移動する。この過程を繰り返すことで、ゴール位置へとロボットアームを導く。

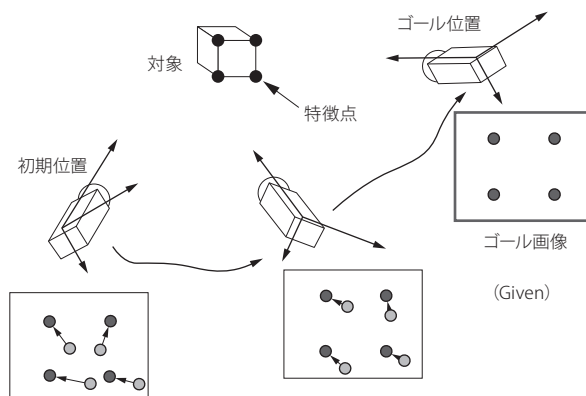


図1 画像ベース視覚サーボ

この手法のメリットは、①ロボットの絶対精度の影響を受けない、②カメラとロボット間のキャリブレーションの誤差の影響を受けにくい、などが挙げられる。

2-2 画像ベース視覚サーボの理論式 3次元空間中の点 \mathbf{x} が、回転、並進移動して点 \mathbf{x}' に移動する場合、回転行列 \mathbf{R} と並進移動ベクトル \mathbf{t} で表すと、

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}$$

座標軸を固定し、x軸、y軸、z軸回りの順にそれぞれ α 、 β 、 γ だけ回転する場合、各回転角 α 、 β 、 γ が微小であるとき、

$$\mathbf{R}\mathbf{x} \cong \begin{pmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \beta z - \gamma y \\ \gamma x - \alpha z \\ \alpha y - \beta x \end{pmatrix} = \mathbf{x} + \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{x}$$

ただし、 $\boldsymbol{\omega} = (\alpha, \beta, \gamma)^T$ 、 \wedge は外積演算を示す。

微小な回転移動 $\boldsymbol{\omega}$ と、微小な並進移動 $d\mathbf{t}$ によって、点 \mathbf{x} が、 $\mathbf{x}' (= \mathbf{x} + d\mathbf{x})$ に移動したとすると、

$$d\mathbf{x} = d\mathbf{t} + \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{x}$$

$$\mathbf{x} = (x, y, z)^T, \quad \mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$$

ここで、 $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ をカメラの並進移動の速度、 $\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T$ をカメラのカメラ座標x, y, z軸回りの回転の角速度とする。

カメラの移動によって、点 p のカメラ座標が、 \mathbf{x} から $\mathbf{x} + d\mathbf{x}$ へ移動したとする。これは、カメラが固定されるとみなして、そのカメラ座標で表した空間で、点 p が速度成分 $-\mathbf{V}$ の並進移動と回転角速度成分 $-\boldsymbol{\Omega}$ の回転運動をしたことと等価である。したがって、

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = -\mathbf{V} - \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{x} \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

画像面が $z=1$ にあるとしたとき、画像座標 \mathbf{X} と、カメラ座標で表した空間の座標 \mathbf{x} の関係は、

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{1}{z} \left(\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{x} \frac{\dot{z}}{z} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここで、 $\hat{\mathbf{z}}$ は、z軸(カメラの光軸)方向の単位ベクトルの意味。 $\mathbf{x} \cdot \hat{\mathbf{z}}$ は \mathbf{x} のz成分である。

式(1)と式(2)から、

$$\dot{\mathbf{X}} = -\frac{\mathbf{V}}{z} + \mathbf{X} \frac{(\mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{z}})}{z} - \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{X} + \mathbf{X} \{(\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{X}) \cdot \hat{\mathbf{z}}\}$$

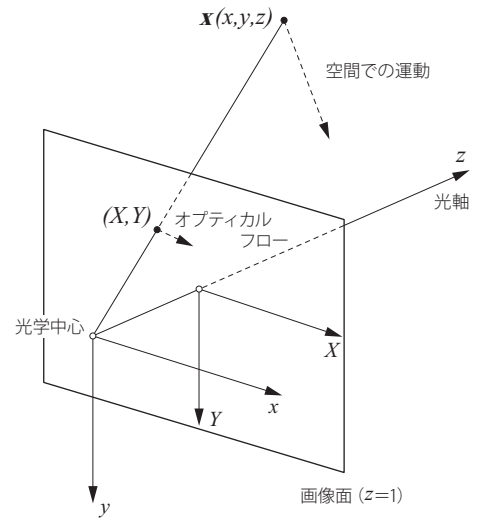


図2 カメラの動きによる画像の動きのモデル

各成分に分解すれば、

$$\dot{X} = \left(-\frac{V_x}{z} - \Omega_y + \Omega_z Y \right) + X \left(\frac{V_z}{z} + \Omega_x Y - \Omega_y X \right)$$

$$\dot{Y} = \left(-\frac{V_y}{z} - \Omega_z X + \Omega_x \right) + Y \left(\frac{V_z}{z} + \Omega_x Y - \Omega_y X \right)$$

カメラの並進、回転運動をひとまとめにして、 $\mathbf{T} = (V_x, V_y, V_z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T$ で表すと、

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{z} & 0 & \frac{X}{z} & XY & -1-X^2 & Y \\ 0 & -\frac{1}{z} & \frac{Y}{z} & 1+Y^2 & -XY & -X \end{pmatrix} \mathbf{T}$$

$$= (\mathbf{L}_{trans}^T(X, Y, z) | \mathbf{L}_{rot}^T(X, Y)) \mathbf{T} \quad \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

\mathbf{T} : カメラの運動/パラメーター

式(3)により、カメラの運動と画像上の点の動きが関連付けられる。

空間に多数の点、 $\mathbf{x}_n = (x_n, y_n, z_n)$ があり、それらの画像の座標が、 (X_n, Y_n) であるとする。これらをまとめて、 $\mathbf{f} = (X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots)^T$ とし、各点について、式(3)の係数行列を縦に並べた行列を \mathbf{L}^T とする。

$$\mathbf{L}^T = \begin{pmatrix} -\frac{1}{z_1} & 0 & \frac{X_1}{z_1} & X_1 Y_1 & -1-X_1^2 & Y_1 \\ 0 & -\frac{1}{z_1} & \frac{Y_1}{z_1} & 1+Y_1^2 & -X_1 Y_1 & -X_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{z_2} & 0 & \frac{X_2}{z_2} & X_2 Y_2 & -1-X_2^2 & Y_2 \\ 0 & -\frac{1}{z_2} & \frac{Y_2}{z_2} & 1+Y_2^2 & -X_2 Y_2 & -X_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

とすると、式 (3) より、

$$\frac{df}{dt} = L^T T \quad \dots\dots\dots \text{式 (4)}$$

L^T : 画像ヤコビアン

と表せる。

f_g をゴール位置での特徴点の座標を表す行列とすると、

$$\frac{df}{dt} = \lambda (f_g - f) = L^T T$$

$$T = -\lambda L^{T+} (f - f_g) \quad \dots\dots\dots \text{式 (5)}$$

ここで、 $0 < \lambda < 1$ の定数ゲイン、 L^{T+} は L^T の左擬似逆行列、すなわち $L^{T+} L^T = I$ を満たす。

したがって、現在のカメラ画像の特徴点座標 f から、 L^T を求め、式 (5) の f, f_g, L^{T+} に代入すると、カメラ座標系で表した運動パラメータ T を求めることができる。

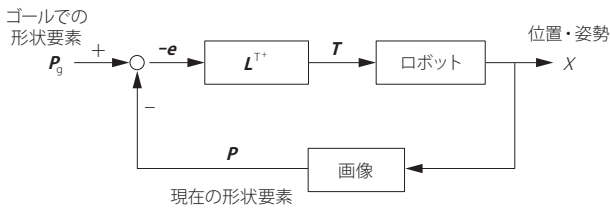


図3 視覚サーボ制御系ブロック図

3. 高精度位置決め必要性

ロボットに適したハーネス組立て形態として、図板上でコネクタに端子を挿入してハーネスを布線する方式 (図4) を考えた。図板上でなく別工程の専用機械で端子を挿入する場合は、コネクタ位置は不変で、ロボットを予めティーチングすることで対応可能であり、またロボットの繰り返し精度も高いので、高精度も達成できる。なお、コネクタに端子を挿入する時の、位置決め要求精度は、 ± 0.15

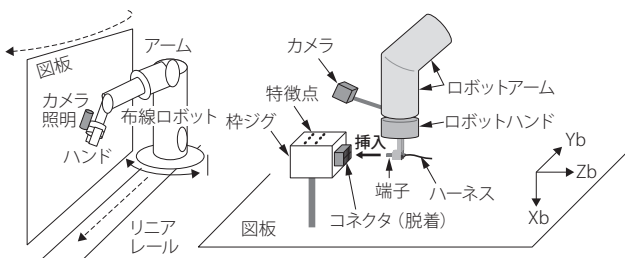


図4 図板上の端子挿入模式図

mm以内と高い。一方、図4の方式のように、図板の様な不安定な場所に設置されたコネクタにロボットで端子挿入する場合、ロボットと図板の相対位置が変化したり、図板のたわみで枠ジグの位置がばらつく等から、端子挿入のたびに高精度の位置決めが必要になる。

4. 検証実験

検証実験に使用したシステムの構成図を図5に示す。

ロボットアームには、単眼カメラを搭載した。まず、ロボット絶対座標に基づいて、アームを目標位置の近くまで移動させた後で、視覚サーボにより目標位置まで高精度に合わせこむ方法とした。

特徴点は、種類(大きさ、形状、色)が異なるコネクタに対応させる必要があるが、あらゆる色に合わせるのは困難である。そこで、コネクタそのものに特徴点を設けるのではなく、コネクタを装着する枠ジグの上面に複数の基準マークを設けて、このマークの中心位置を画像処理で抽出して特徴点とした。

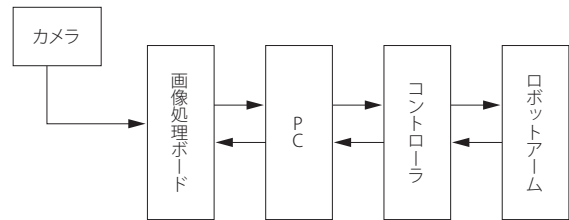


図5 システム構成

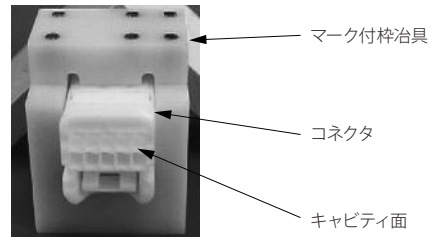


写真1 マーク付き枠ジグ (コネクタ装着時)

初期位置と最終目標位置が比較的離れている時に、視覚サーボの現在画像が目標画像に一致していく様子を図6に、4個のマークが初期位置から最終目標位置に収束するまでの移動軌跡の一例を、図7に示す。

ゲイン λ およびマーク画像の大きさについては、さらに実験を繰り返した結果、以下の様に設定した。

ゲイン λ については、 λ を大きくすると収束時における変動が大きい、一方、 λ を小さくすると収束までのステッ

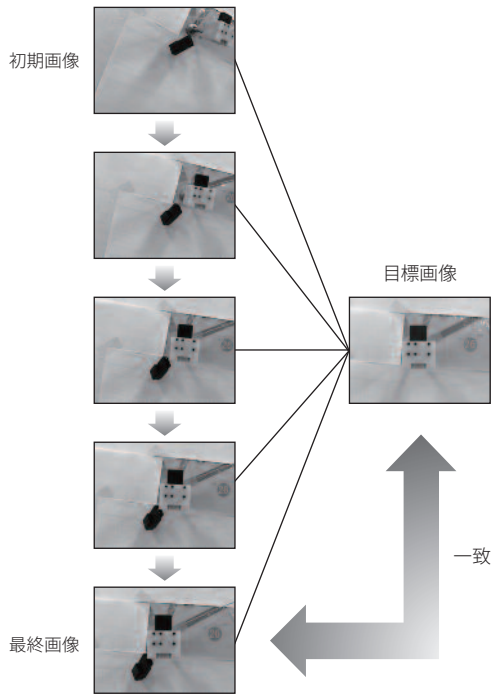


図6 現在画像が目標画像に一致していく様子

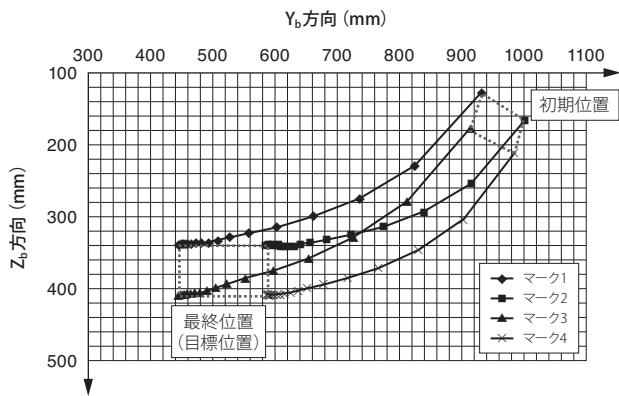


図7 初期位置から最終位置へ収束するまでの移動軌跡

プ数が増加する。両者のバランスを見て、最終的に、 $\lambda = 0.3$ に設定した。

マークの直径は2mmであり、カメラとマークの距離を近づけることで、マークの目標画像の1画素あたりの距離分解能を上げることができる。今回は、画像の大きさと分解能から、カメラとマークの距離Dを50mmに設定した。結果、マークの画素数(X,Y) (図8)は、(41,41)、1画素当りの分解能は、0.049 (mm/pix)にした。特徴点としては、上下左右の隅の4つのマークを使用した。(写真2)

また、初期位置は目標位置から7mm離れた位置に設定した。上記設定で実験した結果を、図9に示す。

図9のように、約10ステップで $\pm 0.15\text{mm}$ 以下に収束

した。収束までに要する時間の内訳を図10に示す。

1ステップ当たりの画像処理・移動量計算時間は、0.26秒であるが、1ステップ当たりの所要時間は、合計3.56秒と長い。収束する約10ステップで約36秒にもなる。これは、前掲図5のようなシステム構成上、PCでのファイル作成時間等が2.8秒と長いためである。もし、PCを介さずに画像処理上で視覚サーボ機能を設けることができれば、アーム移動時間を含めても、理想的には、1ステップ約0.8秒、収束する約10ステップで約8秒に近づく可能性がある。この時間であれば、人手作業時間に近づける。

最後に、実際に端子を挿入させて実験を実施した。目標画像を設定後に、①枠ジグ高さを6mm変えた場合と、②枠ジグを 5° 回転させた場合について、実験した。コネクタハウジングの全てのキャビティ(2段10列)に端子挿入ができることを確認した。(写真3)

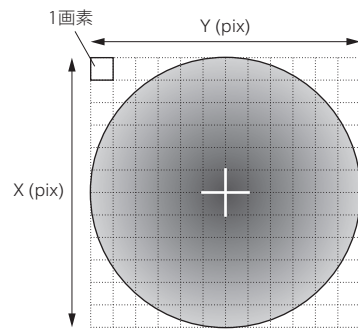


図8 マークの画素数

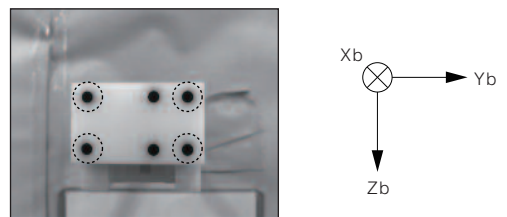


写真2 画像(カメラ・マーク間距離50mm)
○のマーク4個を特徴点として使用

1ステップあたりの所要時間

【内訳】

・カメラからの画像データの取り込みとファイル作成;	2,800[msec]
・画像処理時間;	200[msec]
・視覚サーボでの移動量計算;	60[msec]
・ロボットコントローラ作動とアームの移動;	500[msec]

計 3,560[msec]

1キャビティあたりの挿入に要する時間

$$3,560[\text{msec}/\text{ステップ}] \times 10[\text{ステップ}] = 35.6[\text{sec}]$$

図10 収束までに要する時間の内訳

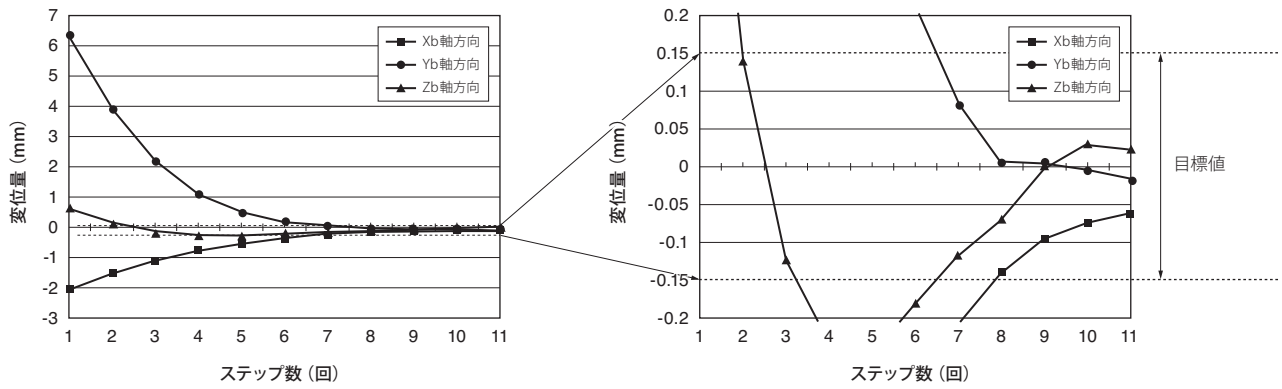
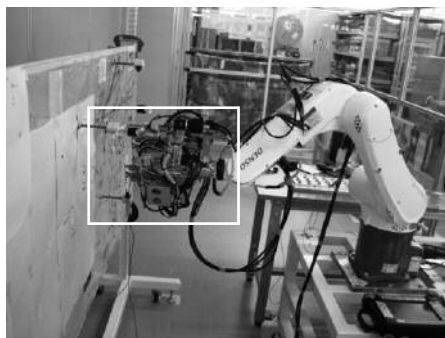


図9 視覚サーボ実験結果



写真で囲んだ部分を拡大

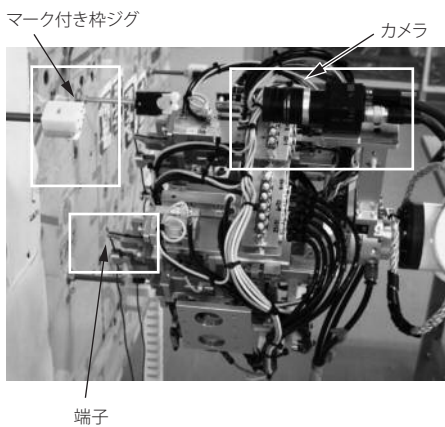


写真3 端子挿入実験状況

しかし、動作時間は36秒と人手に比べて非常に長いことがわかった。また、端子挿入は布線工程の一作業でしかなく、他の作業まで含めるとまだまだ大きな課題が残されており、多くの要素技術開発を待たなければならないと考える。

参考文献

- (1) 出口光一郎、「ロボットビジョンの基礎」、pp.80-107、コロナ社 (2000)

執筆者

- 村田 敦*：(株)オートネットワーク技術研究所
自動車用ワイヤーハーネスにおける工法開発に従事
韓 敏：(株)オートネットワーク技術研究所
滝本 周平：(株)オートネットワーク技術研究所 主任研究員
上野 啓人：(株)オートネットワーク技術研究所 部長

*主執筆者

5. 結 言

ワイヤーハーネス組立工程へのロボットの適用可能性を探索するため、視覚サーボを用いた高精度位置決め手法を一要素技術として検討し、端子挿入作業に必要な位置決め精度が実現可能かどうかを評価した。その結果、位置精度は必要な精度の0.15mm以下を実現できることがわかった。