

# シート状柔軟物体の位置合わせのためのビジュアルサーボ

## Visual servo for alignment of flexible sheets

○小見耕太郎\*, 鏡慎吾\*, 橋本浩一\*

○Kotaro Omi\*, Shingo Kagami\*, Koichi Hashimoto\*

\*東北大学 大学院情報科学研究科

\*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University.

**キーワード** : 柔軟物 (flexible object), 位置合わせ (alignment), 形状推定 (shape estimation), ビジュアルサーボ (visual servo), リアルタイム制御 (real-time control)

**連絡先** : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01  
東北大学大学院情報科学研究科 橋本・荒井研究室 / 鏡研究室

小見耕太郎, Tel.: (022)795-7021, Fax.: (022)795-7019, E-mail: omi(at)ic.is.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

近年, 工場の生産現場では産業用ロボットの導入が進められ, 生産工程のうち剛体を対象とする一部の作業の自動化が実現している. 一方で, 柔軟物を対象とする作業は人手か, あるいは対象の作業に特化した専用装置で行われている. しかし, 生産ラインや工程の変更に柔軟に対応するために汎用マニピュレータによる自動化が望まれている. 柔軟物の操作における最大の問題は, 個体差や操作中の変形による形状の不定性である. そのため一連の工程を自動化するには, 柔軟物の形状の不定性を克服して高い作業精度を維持することが必要となる.

この問題には, 作業精度を左右する柔軟物の特定部位を直接把持して変形を拘束する戦略が考えられる. しかし, ハンドよりも小さい穴に柔軟物の部位を通す操作などは, 把持したハンドが物理的な障害になる. こうした状況では, 把持によって変形を拘束するのではなく, 変形に

応じた特定部位の位置合わせ技術が要求される. 柔軟物の位置合わせに関する研究事例として, Kataoka らはフレキシブルケーブル先端の動的な差込操作を対象としている<sup>1)</sup>. ケーブルの個体差を含めた力学特性を事前に推定することで, 動的変形モデルを用いたフィードフォワード制御による端部の位置合わせを2次元で実現している. また, Morita らはハーネス部品のシャーシ穴への通過操作を対象としている<sup>2)</sup>. カメラ画像による簡易な教示で3次元の軌道を生成し, 大きく振動しないハーネス端部のコネクタの位置合わせを実現している.

これらに対して, 本研究では紙に代表されるシート状柔軟物体の位置合わせ操作に注目する. この操作は, Fig. 1 に示すように紙の変形を拘束するのではなく, 変形に応じてマニピュレータの運動を制御することを想定する. 操作の適用例としては, 製品へのラベルシールの貼り付けや, トレイへの用紙の収納が考えられる. いずれも, 3次元空間中の目標となる線分に紙の

端辺 (edge) を合わせる問題に一般化できる。このとき、ハンドは端辺から離れた任意の位置を把持することを想定する。また、作業の自動化における課題は、紙の個体差や操作中の変形に対して一定の位置合わせ精度を維持することである。そこで、カメラ画像からリアルタイムに紙の変形を観測して制御に利用するビジュアルサーボを提案する。

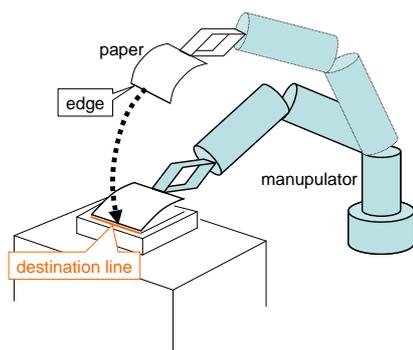


Fig. 1 操作イメージ

一般にビジュアルサーボは、画像から推定した対象物の位置姿勢を制御量とする位置ベース法と、画像特徴量を制御量とする画像ベース法に大別される<sup>5)</sup>。本研究においては、まず大域的な安定性が保証される位置ベース法に基づいて紙の変形に応じて端辺の位置姿勢を制御する方針をとる。そのために、カメラ画像からリアルタイムに紙の形状と端辺の位置姿勢を推定して、端辺とハンドの相対速度関係を計算することで変形に対応してハンドを制御する。さらに、最終的な位置合わせ精度の向上のために、位置姿勢推定誤差の影響を受けない画像ベース法を組み合わせる。ただし、画像ベース法では紙全体が写る領域を目標画像とすると、操作中に紙の3次元形状が変化しているため現在画像が目標画像に一致することはない。そこで、目標画像を端辺周辺に限定することで紙の変形による影響を抑えて端辺を高精度に合わせることを考える。また、画像領域を小さくすることによる安定性の低下も位置ベース法と組み合わせるこ

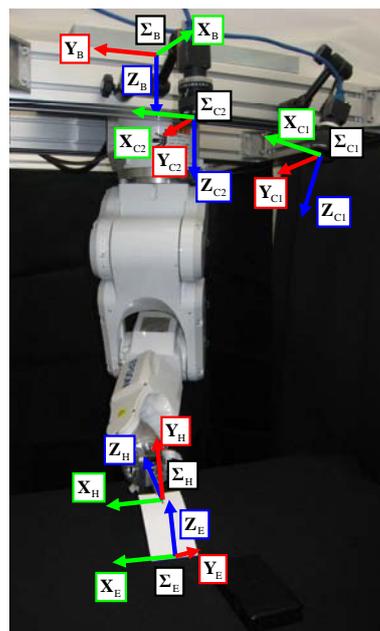


Fig. 2 システム座標系.

とで克服されることを期待する。

## 2. 紙の位置合わせのための制御則

### 2.1 座標系

ここでは本システムで扱う座標系を定義する。Fig. 2 にシステムの実環境と座標系を示す。座標系は全て右手座標系とし、以降ではロボットのベース座標系  $\Sigma_B$  をシステムの基準座標系とする。6 軸マニピュレータの各リンク座標系の定義は DH 記法に従う<sup>4)</sup>。ハンド座標系  $\Sigma_H$  は、第 6 関節座標系  $\Sigma_6$  を紙の把持位置  $O_H$  に並進した座標系とする。また、システムにはカメラを 2 台設置し、カメラ 1 の座標系を  $\Sigma_{C1}$ 、カメラ 2 の座標系を  $\Sigma_{C2}$  とする。

位置を合わせる紙の端辺は線分に近似して考え、端辺座標系  $\Sigma_E$  の原点  $O_E$  は近似線分の中点とし、 $X_E$  は近似線分の端点のうち、 $\Sigma_H$  から見て  $x > 0$  にある端点に向けて軸をとる。 $Y_E$  は紙表面の法線方向に向けて軸をとり、 $Z_E$  は  $X_E$  と  $Y_E$  に直交する軸を右手座標系に従ってとる。定義した端辺座標系を Fig. 3 に示す。

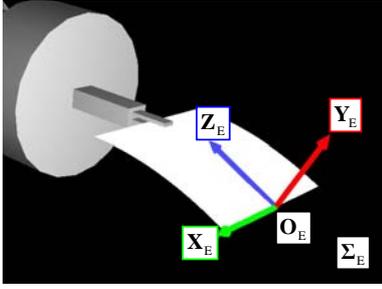


Fig. 3 端辺座標系.

## 2.2 制御則

まず、端辺の位置姿勢を制御量とする制御則は、

$$\dot{\mathbf{p}}_H^\theta(t) = -\lambda \frac{\partial \mathbf{p}_H^\theta}{\partial \mathbf{p}_E^\theta} (\mathbf{p}_E^\theta(t) - \mathbf{p}_E^{\theta*}) \quad (1)$$

で与えられる<sup>6)</sup>. ここで、 $\mathbf{p}_E^{\theta*}$  は目標の端辺位置姿勢、 $\mathbf{p}_E^\theta(t)$  は現在の端辺位置姿勢、 $\frac{\partial \mathbf{p}_H^\theta}{\partial \mathbf{p}_E^\theta}$  はハンドの速度と端辺の速度の関係を表すヤコビアンである. ここで、操作中に変形する紙を微小時間において剛体に近似できると仮定した場合、剛体上にある端辺座標系  $\Sigma_E$  とハンド座標系  $\Sigma_H$  間の回転速度と並進速度の関係は、

$$\boldsymbol{\omega}_H = \boldsymbol{\omega}_E \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{t}}_H &= \dot{\mathbf{t}}_E + \boldsymbol{\omega}_E \times (\mathbf{t}_H - \mathbf{t}_E) \\ &= \dot{\mathbf{t}}_E - (\mathbf{t}_H - \mathbf{t}_E) \times \boldsymbol{\omega}_E \end{aligned} \quad (3)$$

と表される<sup>3)</sup>. これを行列で表すことで、

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{t}}_H \\ \boldsymbol{\omega}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -[\mathbf{t}_H - \mathbf{t}_E]_\times \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{t}}_E \\ \boldsymbol{\omega}_E \end{bmatrix} \quad (4)$$

が得られ、

$$\frac{\partial \mathbf{p}_H^\theta}{\partial \mathbf{p}_E^\theta} = \mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\theta}_H)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -[\mathbf{t}_H - \mathbf{t}_E]_\times \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\theta}_E) \quad (5)$$

のように表される. ここで、 $\mathbf{I} \in (R^{3 \times 3})$  は単位行列、 $[\mathbf{t}_H - \mathbf{t}_E]_\times \in (R^{3 \times 3})$  は外積と同じ作用をする行列である. また、 $\mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\theta}_H)$  は任意の姿勢表現で記述されたハンドの位置姿勢  $\mathbf{p}_H^\theta$  を回転ベクトル表記に変換する行列である.  $\mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\theta}_E)$  も同

様に端辺の位置姿勢を回転ベクトル表記に変換する行列である.

次に、端辺周辺の画像特徴量を制御量とする画像ベースビジュアルサーボの制御則は、

$$\dot{\mathbf{p}}_H(t)^\theta = -\lambda \frac{\partial \mathbf{p}_H^\theta}{\partial \mathbf{p}_E^\theta} \mathbf{J}_{img}^\dagger (\mathbf{s}(t) - \mathbf{s}^*) \quad (6)$$

で与えられる. ここで、 $k$  を画像特徴量ベクトルの次元数とすると、 $\mathbf{J}_{img}^\dagger \in (R^{6 \times k})$  は画像ヤコビアン  $\mathbf{J}_{img} \in (R^{k \times 6})$  の擬似逆行列、 $\mathbf{s}^* \in (R^k)$  は目標の画像特徴量、 $\mathbf{s} \in (R^k)$  は現在の画像特徴量である. 画像ヤコビアン  $\mathbf{J}_{img}$  は、

$$\mathbf{J}_{img} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{p}_E^\theta} \quad (7)$$

で定義される<sup>7)</sup>. すなわち、端辺の位置姿勢の変化に対する画像の見え方の変化の関係を表す行列である. この画像ヤコビアンは、端辺の位置姿勢の変化による画像の見え方の変化を解析的に導出することが困難であるため、実装上は数値微分による近似計算を行う. また、画像特徴量には画素の輝度値を並べたものを用いる.

最後に、(1)式、(6)式を組み合わせた提案手法の制御則は、

$$\dot{\mathbf{p}}_H(t)^\theta = -\lambda \frac{\partial \mathbf{p}_H^\theta}{\partial \mathbf{p}_E^\theta} \begin{bmatrix} \alpha \mathbf{I} \\ \beta \mathbf{J}_{img} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} \alpha (\mathbf{p}_E^\theta(t) - \mathbf{p}_E^{\theta*}) \\ \beta (\mathbf{s}(t) - \mathbf{s}^*) \end{bmatrix} \quad (8)$$

のように与えられる. ここで、 $\mathbf{I} \in (R^{6 \times 6})$  は単位行列、 $\alpha (\geq 0)$  は2つの制御量における位置姿勢成分の重み、 $\beta (\geq 0)$  は画像特徴量成分の重みである.  $\alpha = 0$  では画像ベースの制御則(6)式と、 $\beta = 0$  では位置ベースの制御則(6)式と等価になる.

この制御則は、3次元空間における位置姿勢を表すベクトルと、画素の輝度を表すベクトルを等価に扱う非線形最小二乗問題である. そのため、それぞれの成分の次元と単位の違いを考慮して適切に重みを決定する必要がある.

### 3. 端辺の位置姿勢推定

目標に合わせる紙の端辺の位置姿勢をリアルタイムに推定するための処理を説明する。端辺の姿勢を推定するためには、端辺周辺の紙面の法線方向を計算する必要がある。そのため、小さい計算コストで端辺周辺の形状を推定する方針をとる。

#### 3.1 形状推定

形状モデルには紙の力学特性を考慮して変形を予測する動的モデルが考えられるが、風などの外乱がある場合は紙に加わる力の予測が困難であるため、観測情報を用いて形状を補正する必要がある。そこで、フレームレートが十分に高いことを仮定して、カメラ画像の観測情報から推定する静的な形状モデルを考える。そして、計算コストの小さい簡易的な静的形状モデルとして、以下の多項式モデルを考える。

$$z = f(x, y) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x, y) \quad (9)$$

ただし、 $m(\geq 1)$  は多項式の項数、 $a_i$  は各項の係数、 $f_i(x, y)$  は任意の2変数関数とする。

紙形状の推定は、紙面上の点群を3次元復元し、この形状モデルをフィッティングすることで行う。すなわち、以下のように誤差関数  $E(\mathbf{a})$  を最小化する係数  $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_m]$  を求める問題となる。

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} E(\mathbf{a}) \quad (10)$$

$E(\mathbf{a})$  は、 $n(\geq 1)$  点の3次元点群  $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]$  と近似関数との  $z$  成分の差の二乗和とすると、

$$E(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \left( z_i - \sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i, y_i) \right)^2 \quad (11)$$

で表される。 $E(\mathbf{a})$  が最小となるとき、各係数  $a_k, (k = 1, 2, \dots, m)$  に関する微分が0となる

ので、

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_k} &= -2 \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) \left( z_i - \sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i, y_i) \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

すなわち、

$$\sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) \sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) z_i \quad (13)$$

と変形でき、 $a_j$  について整理すると、

$$\sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) f_j(x_i, y_i) \right) a_j = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) z_i \quad (14)$$

を得る。ここで、

$$\sum f_k f_j = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) f_j(x_i, y_i) \quad (15)$$

とおくと、 $k = 1, 2, \dots, m$  に対する(15)式を行列にまとめると、(10)式は、

$$\begin{bmatrix} \sum f_1 f_1 & \cdots & \sum f_1 f_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum f_m f_1 & \cdots & \sum f_m f_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \sum z_i \\ \vdots \\ f_m \sum z_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

で表される線形連立方程式に帰着される。したがって、この形状モデルを用いた形状推定は反復計算がないため高速性が期待できる。

また、以降では形状モデルの具体的な多項式として

$$z = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 y^2 + a_5 xy \quad (17)$$

を用いる。これは、 $x$  軸方向の傾き、 $y$  軸方向の傾きと曲面、 $xy$  軸方向のねじれをおおまかに再現でき、定数項によって形状が並進する自由度を与えている。そのため、この形状モデルの座標系は、ハンドの把持位置などの紙の特定位置に厳密に固定する必要はない。したがって、操作中にハンドに対して紙がある程度ずれる場合

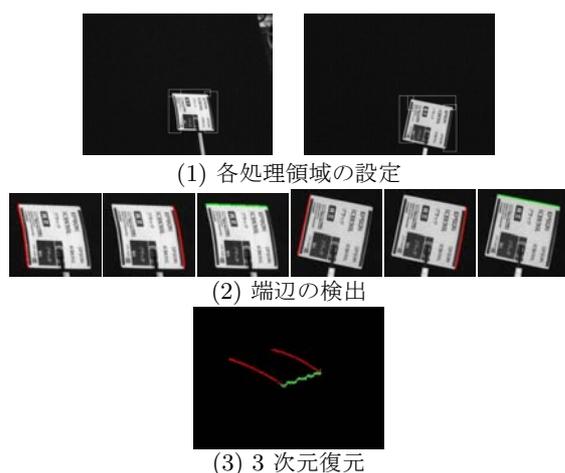


Fig. 4 端辺の3次元復元処理

にも推定される形状の精度に大きな影響はないと考えられる。

次に、この形状モデルをフィッティングする点群の3次元復元方法を述べる。ここでは、紙面上のテクスチャを密に復元する必要はなく、端辺周辺のみを3次元復元する方が望ましい。端辺の3次元復元処理の手順を以下にまとめ、各工程における画像処理結果を Fig. 5 に示す。

- 1) 対象端辺に応じた処理領域の設定
- 2) 画像上の端辺の検出
  - (a) 画像のエッジの検出
  - (b) 紙に対して外側のエッジの抽出
  - (c) ランダム抽出による対象端辺上にない点の除去
- 3) 3次元復元
  - (a) エピポーラ拘束による画像座標の対応付け
  - (b) ステレオ計測

この処理を位置を合わせるべき端辺と、その両隣の計3辺に対して行い、形状モデルをフィッティングするための3次元点群を得る。

はじめに、計算コストを削減するために処理領域を端辺周辺に限定する。具体的には、前フレームに検出された画像上の端辺の座標を基準

に、一定の画素数分拡大した矩形領域とする。ただし、初期フレームにおいては対象となる紙のテクスチャを再現した簡易的なCADモデルを用いておおまかな紙の位置を探索し、各端辺の位置を認識して処理領域を設定する。

次に、画像上の端辺を検出するために、Cannyエッジ法によって2値化したエッジを検出する。次に、紙に対して外側のエッジを抽出する。そして、直線を仮定したRANSACを用いて、対端の端辺上にはない外れ点を取り除く。最後に、エピポーラ拘束を用いて検出した端辺の画像座標の対応付けを行い、ステレオ計測により端辺を3次元に復元する。

### 3.2 端辺の位置姿勢推定

端辺の位置姿勢は第2章で述べた端辺座標系  $\Sigma_E$  の定義に従って、推定した形状を用いて計算する。まず、端辺座標の原点  $O_E$  を位置を合わせる端辺の3次元点群の重心から求める。次に、3次元点群の近似直線を求め、 $\Sigma_H$  から見て  $x$  座標が最大の点から近似直線に降ろした垂線の交点に向けて  $X_E$  をとる。 $Y_E$  は、推定した形状モデル関数を微分して法線方向を計算する。 $Z_E$  は、 $X_E$  と  $Y_E$  の外積から計算する。

そして、端辺座標系  $\Sigma_E$  を任意の姿勢表現  $p_E^0$  に変換する。ここでは、ZYXオイラー角表現を用いた。さらに、照明や画像ノイズの影響で推定値には一定の誤差が含まれているため、カルマンフィルタを適用して平滑化した値を制御に用いる。

この処理過程を Fig. 5 に示す。

## 4. 実験

### 4.1 システム構成

本実験システムは天吊単腕マニピュレーター、ハンド、カメラ2台、操作用紙、位置合わせ対象物からなる。マニピュレータは、セイコーエ

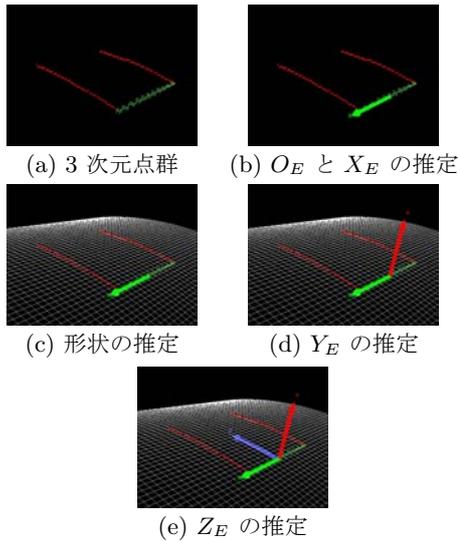


Fig. 5 端辺の位置姿勢の計算

プソン株式会社製の6軸マニピュレータC3を使用した。カメラはPoint Grey Research Inc.製Flea3 FL3-U3-13Y3M-C 2台を、解像度  $640 \times 480$  [pixels], カラー8 [bit], フレームレート300 [fps] で使用した。位置合わせを行う紙は、普通コピー用紙を  $62 \times 120$  [mm] に切り出して使用した。

## 4.2 実験内容

提案手法の制御則(8)式において以下に示す2つの条件で実験を行う。

- 1)  $\alpha = 1, \beta = 0$  とした位置ベース法と等価な制御則を用いる
- 2) 端辺の位置が目標と5 [mm] 以内に近づくまで  $\alpha = 1, \beta = 0$  とし、5 [mm] 以内に近づいてから  $\alpha = 1, \beta = 0.004$  に変更して端辺周辺の画像特徴量を加えた制御則を用いる

いずれも、目標の端辺の位置姿勢は、Fig. 6に示す目標画像から推定した値を設定する。また、紙の変形に対する応答性を確認するために、制御中にランダムな風を当てて紙を変形させる。最終的な位置合わせ精度の評価のために Fig. 6

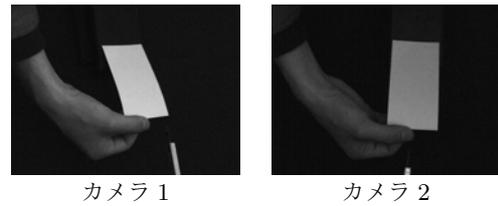


Fig. 6 目標画像

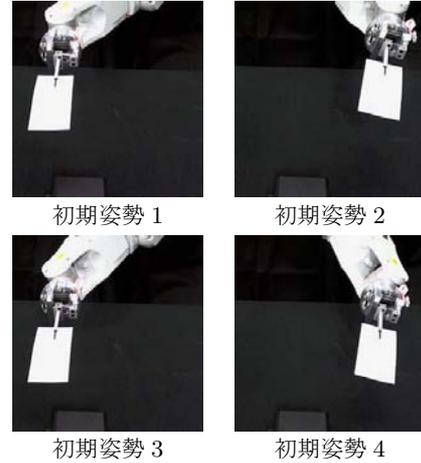


Fig. 7 初期姿勢

に示す4つの初期姿勢から制御を開始し、端辺の目標位置姿勢への収束性を確認する。

また、最終的な位置合わせ精度がロボットカメラ間のキャリブレーション誤差の影響を受けないビジュアルサーボの利点を考慮して、ロボットカメラ間のキャリブレーションは厳密に行わない。一方で、3次元復元に用いるステレオカメラのキャリブレーションは厳密に行う。

制御は、端辺の位置姿勢が目視でおおまかに収束したことを確認して終了させる。

## 4.3 実験結果

システムの制御周期はおよそ4 [ms], 250 [Hz] で動作した。

端辺の推定に用いたステレオカメラとは別に設置した観測用のカメラで撮影したマニピュレータの動作の様子を、条件1, 条件2についていずれも初期姿勢1の場合を Fig. 8と Fig. 10に示す。また、条件2において初期姿勢1の場合の制御中の画像偏差を Fig. 12に示す。

制御中のシステムの状態の一部を描画したCG

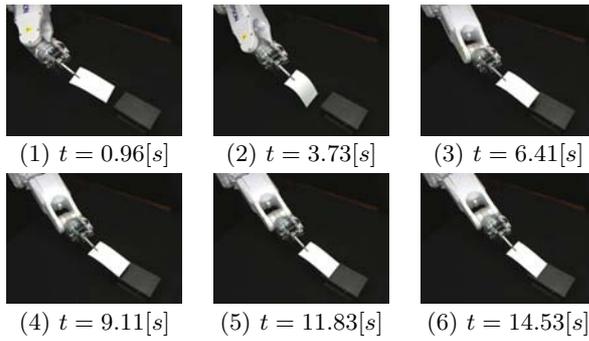


Fig. 8 条件1における観測画像

画像を条件1, 条件2についていずれも初期姿勢1の場合を Fig. 9 と Fig. 11 に示す. CG 画像に描画されているマニピュレータは, 各関節角度をエンコーダからリアルタイムに読み取り, 位置姿勢を再現している. ただし, 前述のようにロボットカメラ間のキャリブレーションを厳密に行っていないため, 描画されているハンドと実空間のハンドの位置姿勢にはずれが存在する. また, 赤と緑で描画されている点群が, ステレオカメラで3次元復元した3辺である. このうち緑の点群は, 位置を合わせるべき端辺であり, この上にある Edge 座標が現在の端辺の位置姿勢の推定値である. これに対して, Target 座標は最終的な目標の端辺位置姿勢である.

操作中に推定した端辺位置の軌跡を各初期姿勢の結果を条件1, 条件2について Fig. 13 と Fig. 14 に示す.

端辺の位置合わせ精度は, 位置を合わせる端辺の左右の端点をステレオカメラで3次元復元して評価する. 具体的には, Fig. 6 の目標画像からコーナー検出を用いてサブピクセル精度で左右の端点を検出して目標の端点の位置を3次元復元する. これに対して, 各初期姿勢の制御終了時におけるステレオ画像から同様に左右の端点を検出して3次元復元し, これらの位置と目標の端点位置との距離を位置合わせ誤差とする. 各初期姿勢についての端点の位置合わせ誤差を条件1, 条件2について Table 1 と Table 2 に示す.

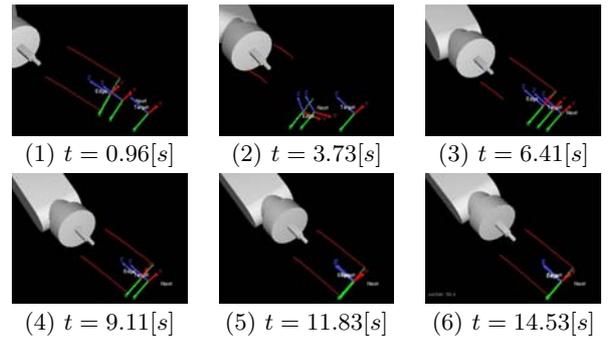


Fig. 9 条件1におけるCG画像

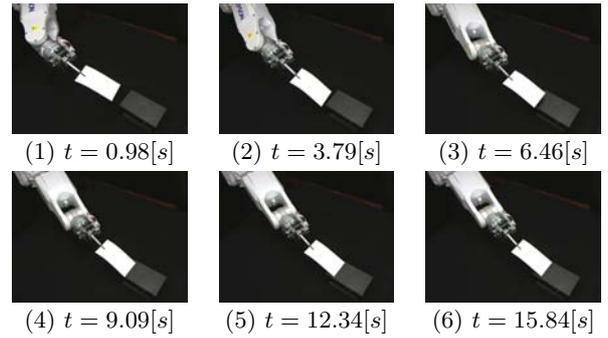


Fig. 10 条件2における観測画像

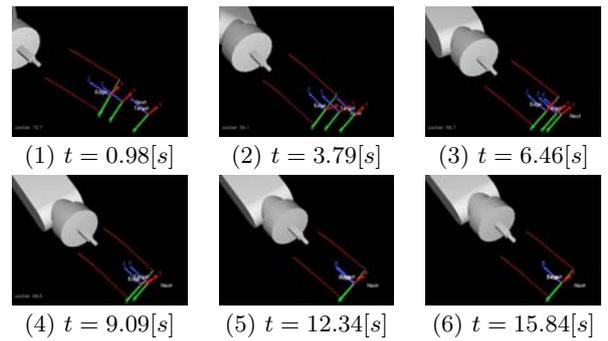


Fig. 11 条件2におけるCG画像

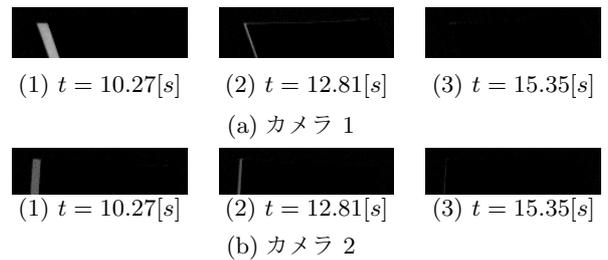


Fig. 12 条件2における画像偏差

#### 4.4 考察

Fig.13 と Fig.14 から, いずれの条件においても制御中の風による紙の変形で端辺が振動しているものの, 最終的には複数の初期姿勢から同一の位置に収束していることがわかる. 制御中

Table 1 条件 1 における端点の位置合わせ誤差 [mm]

	右端点	左端点	左右平均
初期姿勢 1	0.48	0.63	0.56
初期姿勢 2	0.32	0.43	0.38
初期姿勢 3	0.31	0.48	0.40
初期姿勢 4	0.37	0.73	0.56
平均	0.37	0.57	0.47
標準偏差	0.08	0.14	0.10

のハンドの動作から、紙の変形に時間遅れで対応してハンドの運動に反映される動作を確認した。したがって、今後制御周期を速くし同じ変形に対してハンドが早く反応することで端辺の振動を小さく抑えることが期待できる。

また、Table 1 と Table 2 から、制御量に端辺周辺の画像特徴量を加えることで最終的な位置合わせ精度が向上したことがわかる。これは制御量における画像特徴量の重みを大きくしたことで、端辺の位置姿勢の推定に含まれる偶然誤差による影響を抑えることができたためである。

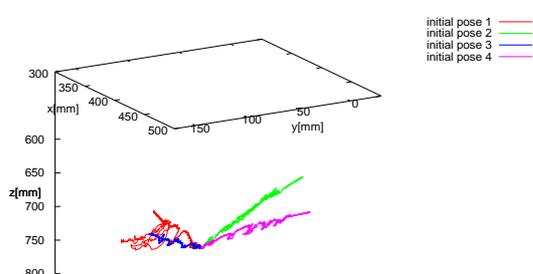


Fig. 13 条件 1 における端辺の軌跡

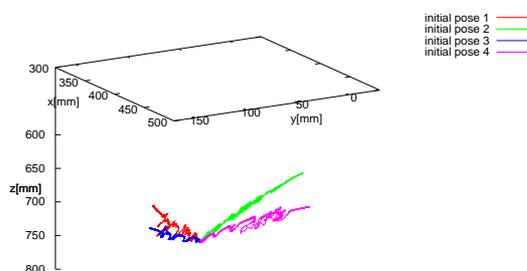


Fig. 14 条件 2 における端辺の軌跡

Table 2 条件 2 における端点の位置合わせ誤差 [mm]

	右端点	左端点	左右平均
初期姿勢 1	0.33	0.36	0.35
初期姿勢 2	0.40	0.38	0.39
初期姿勢 3	0.40	0.32	0.36
初期姿勢 4	0.37	0.48	0.43
平均	0.38	0.38	0.38
標準偏差	0.04	0.07	0.04

## 5. 結言

本研究では生産現場での自動化が実現されていない柔軟物を扱う作業の中で、紙のようなシート状の柔軟物体の位置合わせ操作に注目した。この操作を紙の端辺を 3 次元空間にある目標の線分に合わせる問題に一般化し、紙の変形に応じてハンドを制御して端辺の位置を高精度に合わせることを目標とした。

操作を実現するための制御として、端辺の位置姿勢を制御量とする位置ベース法と、端辺周辺領域の画像特徴量を制御量とする画像ベース法を組み合わせたビジュアルサーボを提案した。そのために、端辺位置姿勢の推定および形状の推定をリアルタイムに行う処理を実装した。

実験は、提案手法の制御則において画像特徴量の重みを変えて 2 種類行った。1 つは端辺の位置姿勢のみを制御量として位置合わせを行った。もう 1 つは、端辺の位置が目標に近づいてから、制御量に端辺周辺の画像特徴量を加えて位置合わせを行った。目標の位置姿勢と画像は、いずれも目標となるカメラ画像を与えて設定した。いずれの実験結果からも、操作中に変形する紙の端辺を最終的に目標の位置姿勢に合わせる動作を確認した。また、2 つの実験結果の比較から制御量に画像特徴量を加えることで位置合わせ精度が向上することを示した。今後は、システムの制御周期を速くして紙の変形に対する応答性についての検証を進める。

## 参考文献

- 1) Y. Kataoka and S. Hirai : Dynamic Insertion of Bendable Flat Cables with Variation Based on Shape Returning Points, 4th International Conference Intelligent Robotics and Applications(ICIRA2011), **1**, 496/508 (2011)
- 2) M. Morita, S. Kagami, K. Hashimoto and K. Kosuge : Marker-less 6-DoF Pose Estimation of Industrial Wire-Harness Components from Shapes in 2-D Images, 43rd International Symposium on Robotics (ISR2012)
- 3) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社(1988)
- 4) 米田完, 大隈久, 坪内孝司: ここが知りたいロボット創造設計, 講談社(2005)
- 5) 橋本浩一: ビジュアルサーボ I ビジュアルサーボとは, システム/制御/情報, **53-9**, 411/416 (2009)
- 6) 橋本浩一: ビジュアルサーボ IV 位置ベースビジュアルサーボ, システム/制御/情報, **54-3**, 117/123 (2010)
- 7) 橋本浩一: ビジュアルサーボ V 特徴ベースビジュアルサーボ, システム/制御/情報, **54-5**, 206/213 (2010)