伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の実現

和田 隆 広* 平 井 慎 一* 川 村 貞 夫*

Indirect Simultaneous Positioning Operations of Multiple Points on Extensionally Deformable Objects

Takahiro Wada *, Shinichi Hirai* and Sadao Kawamura*

A novel control method for the indirect positioning operation of soft deformable objects will be proposed. In some operations, multiple points on a deformable object should be positioned to the desired ones simultaneously. In addition, there exist some operations where these positioned points cannot operate directly and we have to perform these operations indirectly by controlling other points. We call these operations *indirect simultaneous positioning operations*. First, a simplified physical model of deformable textile fabrics is developed for their positioning operations. Second, the indirect positioning operations are formulated using the proposed model. Based on the linearized model of the deformable objects, we will propose a novel control method for the indirect positioning operations with visual sensors. In this method, positioned points can be guided to the desired locations by controlling the positions of operation points. It should be noted that our control method works well even if the exact physical properties of fabrics cannot be given. Experimental results will show the validity of the proposed method.

Key Words: Indirect Simultaneous Positioning Operation, Deformation Control, Deformable Objects, Elastic Objects

1. は じ め に

製造現場をはじめ、医療・福祉や家庭など幅広い分野において、柔らかく変形しやすい物体を扱うことは多い。組立作業におけるゴム製品や針金、繊維産業における布地などがその例である。それら柔軟物体を扱う工程の自動化は対象物のもつ変形特性の多様さのために困難である。このような分野では、機械システムの開発は設計者の経験に依るところが大きいため、与えられた作業ごとに独立に開発されているのが現状である[1]。さらに、いまだ熟練作業者の手によって行われている作業も多く存在する。また、柔軟物体を扱う際には、対象物体の変形を何らかの形で制御する必要がある。それゆえ、作業が緻密になりやすく、労働条件が良くない場合が多い。したがって、生産性向上および労働条件の改善の観点より、柔らかく変形しやすい物体を扱う作業の自動化および、そのために用いる機械システムの設計の方法論の確立が重要な課題となっている。

本研究では、布地やゴムシートなどの、面状の伸縮柔軟物体を対象とする。実際の作業においては、空中で対象物体をハンドリングすることは困難であり、テーブルの上に置くなど、剛体に沿わせた状態で機械的拘束を与え、作業を行うことが多い。

そこで、本論文では、対象物体の平面内での変形のみを扱う。具体的な作業の例としては、ニット地の縫合作業が挙げられる。第2節に詳しく述べるように、この作業では、縫合用のミシンなど他の機器の制約から複数個の編み目を、同時に、目標となる位置へ正確に位置決めする必要がある。さらに、直接編み目を操作できず、物体の端点などの、他の点を適切に操作することにより、間接的に位置決めを遂行しなければならない場合が多い。本論文では、このような位置決め作業を、柔軟対象物体上の複数点の間接的同時位置決め作業と呼ぶことにする。

これまで、柔軟物体のマニピュレーションに関して、いくつか研究成果が報告されている。Ono et al. [2] は、布地の展開作業手法を示した。若松ら [3] は、薄板状物体の曲げ変形のマニピュレーションに関して、その物体のモデルを提案し、作業の解析を行っている。そして、文献 [4] では、柔軟物体をマニピュレータなどで把持する際に、把持が保たれる状態を、Bounded force closure と定義し、その解析を行っている。さらに、Sun et al. [5] は、一般的な形状をもつ弾性体の位置決め制御手法を示している。対象物体の剛体変位による位置姿勢の制御のみを対象とし、目標となる位置姿勢では、対象物が無変形状態にある場合を扱っている。Howard et al. [6] は、弾性物体をバネ系でモデル化する手法について言及している。また、弾性体を把持する際の情報として用いるために、繰り返し試行的な把持により、対象物のバネ定数を推定する手法を提案している。しか

原稿受付 1998 年 4 月 16 日

*立命館大学ロボティクス学科

*Department of Robotics, Ritsumeikan University

し、これらの研究では、柔軟物体の複数点の間接的位置決め作業に言及していない。その制御問題にも触れられていない。

面状物体の複数点を同時に位置決めするときには、各点の移動方向を求める必要がある。そのためには、面状物体のモデルと、それをういた位置決め制御則が有効と考えられる。モデリングにおいては、対象物体内の摩擦やヒステリシスなどの非線形性を細かく考慮したモデルを考えることも可能である。しかしながら、実際には摩擦現象などの正確なモデリングは難しく、現実と一致しない。また、モデル化に要する労力が、必ずしも成果を上げない。そこで本論文では、線形のモデルによって伸縮柔軟材料の変形特性をおおまかに表現し、パラメータの概略値を同定する。次に、このモデルに基づいて伸縮柔軟物体の複数点の間接的同時位置決め問題を定式化し、実現のための条件を明らかにする。さらに、この定式化から導かれる繰り返し制御法を提案する。実際の制御のときには、モデルの不正確さに起因する位置決め誤差を試行の繰り返しによって修正する。特に、モデル化による物理パラメータの誤差に対して、目標値への収束性を議論する。この方式は、本質的には準ニュートン法と同じである。ただし、伸縮柔軟物体の簡略化モデルを提案し、そのモデルに基づいて正確な位置決めが可能となる制御則を導出し、収束の条件を定量的に議論した点に意義がある。最後に、提案する制御手法の有効性を、実験によって検証する。

2. 問題設定

2.1 編み地の縫合作業

リンキング縫製と呼ばれる編み地の縫合作業では、Fig. 1 に示すように、2枚の編み地の対応する編み目の位置を合致させ、それぞれの編み目へ針を挿入する必要がある[7]。この作業では、すべての編み目を、ある定められたピッチのある許容範囲内に位置決めし、それぞれの編み目に針を挿入する必要がある。また、編み目を直接操作すれば、編み地の変形を考慮せず位置決めが実現できると考えられるが、実際には位置決め装置とミシン部の干渉が起こるなどの機構上の問題より、困難な場合が多い。したがって、布地上の他の点を適切に操作することによって、間接的に位置決めを実現しなければならない。さらに、すべての編み目を同時に位置決めすることが望まれる。一つの編み目を位置決めしてから、次の編み目を位置決めすると、干渉のためにそれ以前に位置決めした編み目の位置が乱れる。したがって、一つ一つの編み目を順次位置決めする方法は、実現が困難であり、効果的でもない。以上より、編み目への針挿入作業は、ニット地上にある複数点の間接的同時位置決め制御問題と見なすことができる。この作業は、これまでに機械システムによって実現が困難とされており、その自動化が切望されている。次節でも示すように、柔軟物体上の多点の間接的同時位置決め作業が実現できれば、柔軟物体を扱う多くの作業へ適用できると考えられる。

2.2 その他の一般的作業

本節では、布地のような面状物体上の、複数点の間接的同時位置決め作業について説明する。Fig. 2 では、対象物上の○で表される3点を、黒丸の位置へ移動させる作業の例を表している。このような作業は、今後様々な分野で必要となると思わ

Fig. 1 Positioning operation of knitted loops

Fig. 2 Indirect simultaneous positioning operation of fabric

れる。例えば、家電製品などの一般的な製造工程においても、ゴムシートなどの面状柔軟物体の組立作業を扱うことがあり、柔軟物体の変形を制御して他の物体へ接合する場合が多い。このような柔軟物体を扱う作業では、本論文で扱う間接的同時位置決め作業が必要と考えられる。さらに、医療・福祉やスポーツの分野において、装具[8]など人間と機械的接触を伴うような機器の必要性が高まっている。これらの機器では、スポーツサポータなどの伸縮物体を積極的に利用することが効果的である。これら、伸縮材を用いた機器の製造の際には、柔軟物上の複数点の間接的同時位置決め作業が必要になると考えられる。

3. 対象物のモデル化とパラメータ概推定

3.1 面状伸縮物体のモデル化

ここでは、柔軟物体の間接的同時位置決め作業を記述するための、対象物体の変形モデル化手法を提案する。実際の布地などを変形させた場合、一般に、力・変位特性は非線形である。さらに、材質によっては、ヒステリシスが存在すると考えられる。しかしながら、本研究では、簡便なモデルとするために、単純な線形バネの結合によって対象物体の静的な変形特性をモデル化する。非線形弾性要素および、ヒステリシスの影響などは、モデル化誤差と考え、準ニュートン法に基づく繰り返し法で吸収する手法を採る。布地などの面状伸縮柔軟物体を、Fig. 3 に示すような格子状のバネでモデル化する。格子

Fig. 3 Spring model of two dimensional deformable object

の単位要素は、縦横の線形バネと、対角線を結ぶ斜め方向の線形バネより構成されている。このモデルでは、物体は平面内で変形、移動すると仮定し、その平面内に空間座標系 $o-xy$ を固定する。また、格子点の位置ベクトル $\mathbf{p}_{i,j} \triangleq [x_{i,j}, y_{i,j}]^T$ ($i = 0, \dots, M; j = 0, \dots, N$) により、物体の変形と並進・回転の移動を表す。具体的には、格子点 $\mathbf{p}_{i,j}$ にかかる力 $\mathbf{F}_{i,j}$ は、次式で表される (Fig. 3)。

$$\mathbf{F}_{i,j} = \sum_{k=1}^8 \mathbf{F}_{i,j}^k = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{p}_{i,j}} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^1 = k_c(|\mathbf{p}_{i,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_c) \frac{\mathbf{p}_{i,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^2 = k_s(|\mathbf{p}_{i+1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_s) \frac{\mathbf{p}_{i+1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i+1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^3 = k_w(|\mathbf{p}_{i+1,j} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_w) \frac{\mathbf{p}_{i+1,j} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i+1,j} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^4 = k_s(|\mathbf{p}_{i+1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_s) \frac{\mathbf{p}_{i+1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i+1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^5 = k_c(|\mathbf{p}_{i,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_c) \frac{\mathbf{p}_{i,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^6 = k_s(|\mathbf{p}_{i-1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_s) \frac{\mathbf{p}_{i-1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i-1,j-1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^7 = k_w(|\mathbf{p}_{i-1,j} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_w) \frac{\mathbf{p}_{i-1,j} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i-1,j} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{i,j}^8 = k_s(|\mathbf{p}_{i-1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}| - l_s) \frac{\mathbf{p}_{i-1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}}{|\mathbf{p}_{i-1,j+1} - \mathbf{p}_{i,j}|} \quad (9)$$

ここで、 l_c , l_w , l_s は、それぞれ横、縦および斜めのバネの自然長を表す。 k_c , k_w および k_s は、それぞれ横、縦、斜めのバネ定数である。このバネは、場所に依らず均質であると仮定する。さらに、物体が変形して格子点の位置が移動してもバネ定数は変化しないと仮定する。また、物体の端部においては、バネが存在しない方向があるため、その部分の力は、0 としている。 U は、系全体のポテンシャルエネルギーである。ただし、このモデルでは、格子点にモーメントは発生しないと仮定している。

ここで、柔軟物体の形状は、各バネの釣合の方程式によって支配されていると仮定する。このとき、式 (1) をすべての格子点に対して計算し、それぞれの点での釣合の方程式を求める。その釣合の方程式を、与えられた拘束の下で解くことにより、

Fig. 4 Experimental results (walewise)

Fig. 5 Experimental results (coursewise)

対象物体の変形形状が決定できる。具体的には、物体が安定形状にある場合、ポテンシャルエネルギーが最小になる。これにより、いくつかの格子点 $\mathbf{p}_{i,j}$ をある場所へ移動させるなどの位置拘束が与えられた場合、その拘束条件の下で、ポテンシャルエネルギー U を最小化することにより、変形形状を求めることができる。これは拘束条件付きの最適化問題であり、適当な非線形計画法を用いることで数値的に解くことができる。また、拘束が与えられている部分にかかる力も計算することができる。対象物体が三次元の任意の形状である場合も、同様にバネ系でモデル化でき、以下の議論が同様に成り立つ。

3.2 布地パラメータの概推定

このモデルの有効性を確かめるため、布地に対して引っ張り実験を行い、シミュレーション結果と比較する。

実験に用いた布地は、アクリル 85%、毛 15%のセーター生地であり、100 [mm]×100 [mm] のサイズに切り取って使用した。ヒステリシスの影響も見られるため、ある一定値まで変位を与えた後、初期状態へ戻す実験を、数種類の変位パターンについて行った。Fig. 4, 5, 6 は、それぞれ、縦、横、斜め方向への引っ張り実験の結果を表している。実験結果より、小さな変位に対しても、比較的大きなヒステリシスが存在する。ここで取り扱う作業は基本的に引っ張り動作を中心とすると考えられるので、往路の力変位曲線に合致するように、布地の各バネ定数を同定する。引っ張り変形から圧縮変形へ切り替わる場合には、ヒステリシスの影響を受けるが、微小変位ではバネ定数が変化したと考えれば、パラメータの推定誤差と扱うことができる。

さて、この 100 [mm]×100 [mm] の布地を 3×3 のメッシュに分割し、バネ定数 k_c , k_w , k_s を同定する。ここでの目的は、大まかなバネ定数の推定であるので、簡単な手法を採用する。具体的には、縦方向ならば、縦方向のバネのみによって力が発

Fig. 6 Experimental results (45 [deg])

生していると仮定し、縦方向のバネ定数の概略を推定する。横方向、斜め方向についても同様に概略を推定する。求められたバネ定数の概略値は、独立に動作させたときの値である。しかし、推定されたバネ定数をモデル式 (1) に代入し、力-変位の関係を求めても、実験結果と合わない。その理由は、実際には縦に引っ張る際にも、横、斜めのバネが影響するためである。そこで、先に求めた三つのバネ定数の比は正しいと仮定し、すべてのバネ定数を定数倍し、力-変位線図の計算結果が実験結果とほぼ合うように、バネ定数を決定する。このようにして、大まかなバネ定数を推定することを、概推定と呼ぶ。本論文では、概推定によって、 $(k_c, k_w, k_s) = (4.17, 13.2, 3.32)$ [gf/mm]を得た。この概推定したバネ定数の値を、 3×3 のメッシュ分割したバネモデル式 (1) に代入し、実験と同様、縦、横、斜め方向への変形を与え、力-変位線図を計算により求めた。その結果を、それぞれ、Fig. 4, 5, 6 の実験結果と重ねてプロットした。

4. 間接的位置決め作業の定式化

本節では、前節で提案した対象物体のモデルを用いて、物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の定式化を行い、作業手法を提案する。

いま、布上の格子点のみを位置決めの対象とし、格子点を Fig. 7 に示すように、以下の 3 種類に分類する。

操作点 ロボット指などで直接拘束を与える点。(Fig. 7 中の Δ)

位置決め点 操作点を適切に制御することにより位置決めすべき点。(Fig. 7 中の $\bigcirc$)

非対象点 操作点でも、位置決め点でもない点。

操作点および位置決め点の数を m, p とする。このとき、格子点の数より、非対象点の数 n は、 $n = (M+1)(N+1) - m - p$ と定まる。また、すべての操作点の x, y 座標を並べた $2m$ 次元ベクトルを $\mathbf{r}_m$ とし、操作点パラメータと呼ぶ。同様に、位置決め点パラメータ $\mathbf{r}_p$ および非対象点パラメータ $\mathbf{r}_n$ を定義する。

ここで、以下のような問題を考える。

目標となる位置決め点の位置 $\mathbf{r}_p^d$ が与えられた場合に、操作点 $\mathbf{r}_m$ を適切に変位させることにより、 $\mathbf{r}_p$ を $\mathbf{r}_p^d$ に一致させる。

Fig. 7 Classification of mesh point

ただし、ロボット指は点接触で操作点を把持していると仮定する。

ここで、上記問題の定式化を行う。式 (1) を書き直して、式 (10), (11) とする。

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_m} - \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_p} \\ \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_n} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (11)$$

ただし、ベクトル $\boldsymbol{\lambda}$ は、ロボット指が操作点に及ぼす力を表す。ここで、外力 $\boldsymbol{\lambda}$ は、式 (10) 中にもみ存在し、式 (11) には表れないことに注意する。これは、位置決め点や非対象点には外力が与えられていない状態を表しており、柔軟物体の間接的位置決め制御の特徴である。

ここで、与えられた位置決め点の目標値を、操作点の位置 $\mathbf{r}_m$ を適切に操作することによって実現したい。しかしながら、一般に、柔軟物体の特性を表すバネ定数などの物理パラメータは正確に同定することが難しく、さらに変動もあると考えられる。したがって、上記釣合の方程式をそのまま制御に用いることはできない。それゆえ、モデルのパラメータ誤差に対してロバストな制御戦略が重要となる。次節では、上記釣合の方程式に基づき、誤差に対してロバストな、新しい制御手法を提案する。

5. 視覚センサを用いた繰り返し制御則

5.1 釣合方程式の線形化

本節では、モデルに多少の誤差が存在しても位置決め可能な制御手法を提案する。この手法は、ある平衡点近傍の、位置決め点と操作点の微小変位の関係に基づき、操作点の位置を繰り返し修正することによって、目標点の位置決めを実現すると要約できる。制御に用いるセンサとしては、対象物体が変形するため、視覚センサであることが望ましい。

変形特性を表す方程式 (10), (11) において、式 (10) は $\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_p, \boldsymbol{\lambda}$ の関数である。また、式 (11) は、 $\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_p$ の関数である。したがって、位置決め点の位置 $\mathbf{r}_p$ が与えられているとき、これら連立方程式を解くためには、まず式 (11) を $\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n$ について解き、その後力 $\boldsymbol{\lambda}$ を式 (10) より求める。

よって、位置の微小変位関係のみが重要な場合は、式 (11) のみを考えればよい。ある安定形状 $\mathbf{r}_0 = [\mathbf{r}_{m0}^T, \mathbf{r}_{p0}^T, \mathbf{r}_{n0}^T]^T$ の近傍を考え、式 (11) をその点まわりでテイラー展開して線形化し、式 (12) を得る。

$$A\delta\mathbf{r}_m + B\delta\mathbf{r}_n + C\delta\mathbf{r}_p = 0 \quad (12)$$

$$A \triangleq \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{r}_m \partial \mathbf{r}_p} \right]_{\mathbf{r}_0} \in R^{(2p+2n) \times 2m} \quad (13)$$

$$B \triangleq \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{r}_n \partial \mathbf{r}_p} \right]_{\mathbf{r}_0} \in R^{(2p+2n) \times 2n} \quad (14)$$

$$C \triangleq \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{r}_p \partial \mathbf{r}_n} \right]_{\mathbf{r}_0} \in R^{(2p+2n) \times 2p} \quad (15)$$

ここで、ベクトル $\delta\mathbf{r}_m$, $\delta\mathbf{r}_p$, $\delta\mathbf{r}_n$ はそれぞれ、平衡点 $\mathbf{r}_{m0}$, $\mathbf{r}_{p0}$, $\mathbf{r}_{n0}$ の近傍における、操作点、位置決め点、非対象点の微小変位を表す。なお、例として、Fig. 8 に示すとおり操作点および位置決め点を配置した場合の行列 A , B , C を付録に示す。

ただし、行列の各要素には、バネ定数が線形で入っているため、バネ定数のすべてを定数倍しても、この微小関係は変化しないことに注意する。これにより、後に導出される制御則にバネ定数を用いる場合も、その比のみが重要であることが分かる。式 (12) を変形し、式 (16) を得る。

$$F \begin{bmatrix} \delta\mathbf{r}_m \\ \delta\mathbf{r}_n \end{bmatrix} = -C\delta\mathbf{r}_p \quad (16)$$

ただし

$$F = [A \ B] \quad (17)$$

である。ここで、ロボット指と位置決め点の数が等しい場合を考える。このとき、 F^{-1} が存在すれば、式 (16) は、次のように書くことができる。

$$\delta\mathbf{r}_m = -S_U F^{-1} C \delta\mathbf{r}_p \quad (18)$$

$$\delta\mathbf{r}_n = -S_D F^{-1} C \delta\mathbf{r}_p \quad (19)$$

$$S_U = [I \ 0], \quad S_D = [0 \ I] \quad (20)$$

この微小変位の関係式を、位置決め点の制御に用いる。ロボット指の数と位置決め点の数が一致しない場合、行列 F は逆行列をもたないため、式 (18), (19) を作ることができない。

▲ Operation points ● Positioned points

Fig. 8 Configuration of points in experiments

$\text{rank} F = 2p + 2n$ ならば、一般的に疑似逆行列 F^+ を用いることによって、式 (18), (19) を書き換えることができる。その際、微小関係には任意性が現れる。逆に、位置決め点の数がロボット指の数より多い場合は、 $\text{rank} F \leq 2m + 2n < 2p + 2n$ となり、一般的な場合には同様の式を得ることができなくなる。ただし、 F^{-1} や F^+ が存在しなくても、式 (16) の解が存在する可能性も残されている。これらの詳細については、紙面の都合上ここでは省略し、別の機会に議論を行うことにする。さらに、布上のどこに操作点を配置するかなどの、作業のプランニング問題とも密接に関係しており、この点については今後の研究課題とする。したがって以下では、 F^{-1} が存在するように操作点が配置されていると仮定する。

5.2 間接的位置決め作業のための繰り返し制御則

本節では、式 (16) に基づき、モデル化誤差にロバストな制御手法を提案する。

前節で導出した、位置決め点と操作点の局所的な微小変位関係に基づき、位置決め点の誤差を減少させるための、操作点変位の修正量を決定する。そして、その修正量を目標変位として、操作点を把持するロボット指に対して、位置制御を行う。具体的には、作業座標系に基づく線形の PID 制御則を用いることが考えられる。目標値への収束後、再度カメラによって位置決め点の誤差を計測する。これを繰り返すことによって、位置決め点を目標値へ収束させる。

まず、 $k-1$ 回目の試行によって、誤差 $\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}$ を計測する。次の k 回目の誤差を減少させるために、操作点位置の修正量を、式 (18) に基づき、次式で更新する。

$$d\mathbf{r}_m^k = d\mathbf{r}_m^{k-1} - k_p S_U F_{k-1}^{-1} C_{k-1} (\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}) \quad (21)$$

ただし、添え字 k は、 k 回目の試行を表し、 $d\mathbf{r}_m^k$ は k 回目試行の $\mathbf{r}_m$ の目標値とする。行列 F_k , C_k は、 $\mathbf{r}_m^k$, $\mathbf{r}_p^k$, および $\mathbf{r}_n^k$ の関数となる。 k 回目の試行によるロボット指の位置 $\mathbf{r}_m^k$ は、ロボット指が対象物体をしっかりと把持して相対位置がずれない限り、計測可能である。位置決め点 $\mathbf{r}_p^k$ は、カメラの画像より計測できると仮定する。ただし、非対象点 $\mathbf{r}_n^k$ に関しては、点数の多さゆえに視覚センサによる計測が効果的でない場合が多いので、次式で推定することにする。

$$\mathbf{r}_n^k = \mathbf{r}_n^{k-1} - k_p S_D F_{k-1}^{-1} C_{k-1} (\mathbf{r}_p^{k-1} - \mathbf{r}_p^{k-2}) \quad (22)$$

その後、操作点を把持しているロボット指に対して、PID 制御を行い、 $\mathbf{r}_m^k = d\mathbf{r}_m^k$ を実現する。ただし、Fig. 3 に示すようなモデルで考えるのは、摩擦やヒステリシスなどの影響を無視したものであり、この場合は、線形の PID 制御により、 $\mathbf{r}_m^k = d\mathbf{r}_m^k$ への収束が期待できる。現実的には、摩擦などの影響が存在するので、位置決め点の位置が目標値のある範囲に収束したときに、次のステップへ移ることにする。PID 制御によって $\mathbf{r}_m^k = d\mathbf{r}_m^k$ を実現した際、カメラによって、 $\mathbf{r}_p^k$ を計測する。この $\mathbf{r}_p^k$ に対して、目標値との誤差を計測、再び、式 (21) に基づき、 $d\mathbf{r}_m^{k+1}$ を求める。以下、これを繰り返す。

5.3 目標値への収束性の解析

ここでは、提案した繰り返し制御手法の、目標値への収束性の解析を行う。

制御則 (21) で用いられる行列などに誤差が含まれているため、実際にはその式の代わりに、次式を用いる。

$$\mathbf{r}_m^k = \mathbf{r}_m^{k-1} - \tilde{\mathbf{Q}}_{k-1}(\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}), \quad (23)$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_k = k_p S_U \tilde{\mathbf{F}}_k^{-1} \tilde{\mathbf{C}}_k, \quad (24)$$

ここに、 $\tilde{\mathbf{F}}_k$ および $\tilde{\mathbf{C}}_k$ は、それぞれ $\mathbf{F}_k$ や $\mathbf{C}_k$ の推定値であり、幾分かの誤差を含んでいる。これらの誤差は、バネ定数の同定誤差や、非対象点の位置の推定誤差などが原因である。

ここで、 $\mathbf{r}_m^k - \mathbf{r}_m^{k-1}$ と $\mathbf{r}_p^k - \mathbf{r}_p^{k-1}$ が十分小さい場合を考える。このとき、

$$\mathbf{r}_p^k - \mathbf{r}_p^{k-1} = -\mathbf{Q}_{k-1}^{-1}(\mathbf{r}_m^k - \mathbf{r}_m^{k-1}), \quad (25)$$

$$\mathbf{Q}_{k-1} = S_U \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{C}_{k-1}, \quad (26)$$

が成り立つ。ただし、 $\det \mathbf{F}_{k-1} \neq 0$ を仮定しているため、 $\mathbf{Q}_{k-1}^{-1}$ は必ず存在する。式 (23) を (25) に代入して、

$$\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k = (\mathbf{I} - \mathbf{Q}_{k-1}^{-1} \tilde{\mathbf{Q}}_{k-1})(\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}) \quad (27)$$

を得る。これより、次式が得られる。

$$\|\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k\| \leq \|\mathbf{I} - \mathbf{Q}_{k-1}^{-1} \tilde{\mathbf{Q}}_{k-1}\| \|\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}\| \quad (28)$$

したがって、推定値 $\tilde{\mathbf{Q}}_{k-1}$ が、

$$\|\mathbf{I} - \mathbf{Q}_{k-1}^{-1} \tilde{\mathbf{Q}}_{k-1}\| < 1 \quad (29)$$

を満たすならば、

$$\mathbf{r}_p^k \rightarrow \mathbf{r}_p^d \quad (30)$$

が保証できる。このことは、モデル化誤差が比較的大きくなった場合、ゲイン k_p を小さくするなどして、 $\tilde{\mathbf{Q}}_{k-1}$ の各要素を小さくすれば、目標値への収束性が保証できることを意味する。ただし、実際には行列 $\mathbf{Q}_{k-1}$ は未知であるため、式 (29) が成り立っているかどうかを確認することはできない。なお、 k_p を小さくすると、収束の速度が遅くなる。

さらに、実際の対象物体の変形特性が、線形バネの連結では表現できず、非線形なバネ要素による場合でも、行列 $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ を局所的な線形化によって得た微小関係を表す行列とみれば、上述の手法が適用できる。したがって、本制御手法は、ある程度非線形弾性を有する物体に対しても、有効である。さらに、ヒステリシスに関しては、引っ張り方向と圧縮方向の切り替わり時にバネ定数が変化すると考えられる。したがって、この場合も提案するフィードバック制御則のロバスト性によって、収束が可能であると予想できる。ただし、どの程度の非線形弾性特性やヒステリシスまで吸収できるかについて定量的に議論するには至っていない。

6. 実験結果

提案する制御手法の有効性を示し、実際の布地が有するモデル化誤差の大きさに対して本手法が効果的であるかを実験によって確認する。以下に、実際のニット地を用いた実験を行った結果を示す。本実験では、対象物体として、アクリル

85%, 毛 15% のセーター生地を切り取って使用した。サイズは、100 [mm] × 100 [mm] である。布地を 3 × 3 に格子化し、位置決め点と操作点をそれぞれ 3 点にした。それらの初期状態における物体上での配置を、Fig. 8 に示す。位置決め点にはマークを付し、この平面内での位置を、画像計測装置で計測する。その計測値はパーソナルコンピュータ内に取り込まれ、式 (21) に基づいて、布地の操作点を把持したロボット指の位置を制御する。ここでは、直動型のステッピングモータを用いた 2 自由度ロボットを 3 台使用している。また、操作点、位置決め点の配置は、次式の通りである。

$$\mathbf{r}_m \triangleq [x_{0,3}, y_{0,3}, x_{1,0}, y_{1,0}, x_{3,2}, y_{3,2}]^T$$

$$\mathbf{r}_p \triangleq [x_{1,1}, y_{1,1}, x_{1,2}, y_{1,2}, x_{2,2}, y_{2,2}]^T$$

位置決め点の目標位置は、次式を用いた。

$$\mathbf{r}_p^d = [30, 40, 65, 50, 53.57, 90]^T$$

ここで、第 3 節で概推定した、バネ定数 $(k_c, k_w, k_s) = (4.17, 13.2, 3.32)$ [gf/mm] の比のみが、重要であることに着目し、 $\alpha = k_c/k_s$ と $\beta = k_w/k_s$ を定義し、 $k_c : k_w : k_s = \alpha : \beta : 1$ について考える。概推定したバネ定数より、 $\alpha = 1.256$ 、 $\beta = 3.976$ が求められる。実際の実験では、 α と β をいろいろと変化させて、その影響を確認する。さらに、式 (21) で用いるゲインの効果を見るため、 $k_p = 0.1$ と 0.5 の 2 通りについて実験を行った。Fig. 9 は、 $k_p = 0.1$ であり、 α を一定値に固定し、 β を変化させた結果である。Fig. 10 は、 $k_p = 0.1$ で、 $\beta = 3.976$ に固定した場合の実験結果を示す。同様に、Fig. 11、

Fig. 9 Experimental results ($k_p = 0.1$, $\alpha = 1.256$)

Fig. 10 Experimental results ($k_p = 0.1$, $\beta = 3.976$)

Fig. 11 Experimental results ($k_p = 0.5$, $\alpha = 1.256$)

Fig. 12 Experimental results ($k_p = 0.5$, $\beta = 3.976$)

Fig. 13 Behavior of positioned and operation points in experiments

12 は, $k_p = 0.5$ であり, それぞれ, $\alpha = 1.256$ と, $\beta = 3.976$ に固定して実験を行った結果である. すべての図について, 制御に用いるバネ定数の推定値が, $(\alpha, \beta) = (1.256, 3.976)$ に近い場合は収束するが, 離れるにつれて, 振動的になったり, 発散したりしている. また, $k_p = 0.1$ と $k_p = 0.5$ の結果を比較すると, $k_p = 0.1$ の場合は, どちらのグラフも, 推定値が 2 桁ほど異なっても収束しているが, $k_p = 0.5$ の場合は, 1 桁程度しか許容されない. 逆に, $k_p = 0.5$ の方が, 収束が早い.

また, Fig. 13 に, 一例として, $k_p = 0.5$, $(\alpha, \beta) = (1.256, 3.976)$ のときの, 位置決め点, および操作点の挙動を示す. 目標点への収束精度は, センサの分解能レベル (約

1 [mm] 以下) まで実現されている.

以上より, 実際の布地において, バネ定数の推定値は, 非常におおざっぱで良いことが分かる. 一方, ゲイン k_p の値は, 適切に選ぶ必要がある.

7. おわりに

本論文では, 柔軟物体のハンドリングの例として, 伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業を対象として, その制御手法を提案した. まず, 位置決め作業記述のための, 柔軟物体のモデル化を行い, そのモデルを用いることで, 対象物体上の複数点の間接的同時位置決め作業を定式化した. 次いで, 定式化した釣合の方程式を線形化することにより, 対象物体上の各点の微小変位関係を導出した. この関係に基づき, モデル化誤差に対してロバストな, 間接的同時位置決め作業のための, 新しい制御則を提案した. 制御則の収束性の解析を行い, 繰り返しに用いるゲインを小さく取ることで, 比較的大きなモデル化誤差に対しても, 収束性が保証できることが明らかとなった. なお, ここで扱ったのは微小変位に対する, 定性的な議論であるため, 有限変位に対する定量的な議論は今後の課題とする. ただし, 本制御則の有効性は, 実験によって確認できた.

また, 本論文で明らかとなった内容は, すべて式 (16) の行列 F が逆行列をもつ場合に限定されている. したがって, 繰り返し法のロバスト性なども, 行列 F の特異点近傍で成立するか不明である. この問題は, ロボット指配置などのプランニングとも関連してくる興味深い問題である. さらに, モデル化の際にどのようにメッシュを設定するかについての議論も, プランニングと共に今後の課題としたい. また, 実際には対象物体に極端に大きな力を加えることは望ましくないため, 操作力を考慮した制御法も検討されるべきである. これらの問題は今後の課題としたい.

参考文献

- [1] P.M. Taylor et al: Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials. Springer-Verlag, 1990.
- [2] E. Ono et al: "Strategy for Unfolding a Fabric Piece by Cooperative Sensing of Touch and Vision," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.441-445, 1995.
- [3] 若松, 平井, 岩田: "薄板状物体のマニピュレーションにおける曲げ変形操作の静力学的解析", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.63, no.608, pp.1102-1109, 1997.
- [4] H. Wakamatsu, S. Hirai and K. Iwata: "Static Analysis of Deformable Object Grasping Based on Bounded Force Closure," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.4, pp.3324-3329, 1996.
- [5] D. Sun, Y. Liu and J.K. Mills: "Cooperative Control of a Two-Manipulator System Handling a General Flexible Object," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5-10, 1997.
- [6] M.M. Howard and G.A. Bekey: "Recursive Learning for Deformable Object Manipulation," Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.939-944, 1997.
- [7] センイ・ジヤナル編: ニット素材・縫製ブック. センイ・ジヤナル, pp.53-61, 1994.
- [8] 加倉井, 初山: 補装具. リハビリテーション医学講座第 8 巻, 医歯薬出版株式会社, 1991.

付録行列 A, B, C の内容

ここでは、式 (12) の係数行列 A, B, C の具体的な内容を示す。まず、簡単のために、6 節の実験に対応する係数行列について記す。このとき、操作点、位置決め点、非対象点パラメータは以下の通り与えられているとする。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_m &= [\mathbf{p}_{0,3}^T, \mathbf{p}_{1,0}^T, \mathbf{p}_{3,2}^T]^T & \mathbf{r}_p &= [\mathbf{p}_{1,1}^T, \mathbf{p}_{1,2}^T, \mathbf{p}_{2,2}^T]^T \\ \mathbf{r}_n &= [\mathbf{p}_{0,0}^T, \mathbf{p}_{0,1}^T, \mathbf{p}_{0,2}^T, \mathbf{p}_{1,3}^T, \mathbf{p}_{2,0}^T, \mathbf{p}_{2,1}^T, \mathbf{p}_{2,3}^T, \mathbf{p}_{3,0}^T, \mathbf{p}_{3,1}^T, \mathbf{p}_{3,3}^T]^T \end{aligned}$$

このときの行列 A, B, C は次式のようにになる。

$$A \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -^c H_{10}^{11} & 0 \\ -^s H_{03}^{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -^w H_{22}^{3,2} \\ 0 & -^w H_{00}^{10} & 0 \\ 0 & -^s H_{01}^{10,0} & 0 \\ -^c H_{02}^{03} & 0 & 0 \\ -^w H_{03}^{13} & 0 & 0 \\ 0 & -^w H_{10}^{20} & 0 \\ 0 & -^s H_{10}^{21} & -^s H_{23}^{3,2} \\ 0 & 0 & -^s H_{23}^{3,2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -^c H_{3,1}^{3,2} \\ 0 & 0 & -^c H_{3,2}^{3,3} \end{bmatrix} \quad C \triangleq \begin{bmatrix} D_{11} & -^c H_{12}^{11} & -^s H_{22}^{11} \\ -^c H_{12}^{12} & D_{12} & -^w H_{22}^{12} \\ -^s H_{12}^{22} & -^w H_{12}^{22} & D_{22} \\ -^s H_{00}^{11} & 0 & 0 \\ -^w H_{01}^{11} & -^s H_{01}^{12} & 0 \\ -^s H_{02}^{11} & -^w H_{02}^{12} & 0 \\ 0 & -^w H_{12}^{13} & -^s H_{13}^{22} \\ -^s H_{20}^{11} & 0 & 0 \\ -^w H_{21}^{11} & -^s H_{12}^{21} & -^c H_{21}^{22} \\ 0 & -^s H_{12}^{23} & -^c H_{22}^{23} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -^s H_{22}^{31} \\ 0 & 0 & -^w H_{22}^{32} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$B \triangleq \begin{bmatrix} -^s H_{00}^{11} & -^w H_{01}^{11} & -^s H_{02}^{11} & 0 & -^s H_{11}^{20} & -^w H_{21}^{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -^s H_{01}^{12} & -^w H_{02}^{12} & -^c H_{12}^{13} & 0 & -^s H_{12}^{21} & -^s H_{12}^{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -^s H_{13}^{22} & 0 & -^c H_{21}^{22} & -^c H_{22}^{23} & 0 & -^s H_{22}^{31} & -^s H_{22}^{33} \\ D_{00} & -^c H_{00}^{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -^c H_{00}^{01} & D_{01} & -^c H_{01}^{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -^c H_{01}^{02} & D_{02} & -^s H_{02}^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -^s H_{02}^{13} & D_{13} & 0 & 0 & -^w H_{13}^{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{20} & -^c H_{20}^{21} & 0 & -^w H_{20}^{30} & -^s H_{31}^{20} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -^c H_{20}^{21} & D_{21} & 0 & -^s H_{21}^{30} & -^w H_{31}^{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -^w H_{13}^{23} & 0 & 0 & D_{23} & 0 & 0 & -^w H_{23}^{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -^w H_{20}^{30} & -^s H_{21}^{30} & 0 & D_{30} & -^c H_{31}^{30} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -^s H_{20}^{31} & -^w H_{21}^{31} & 0 & -^c H_{30}^{31} & D_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -^w H_{23}^{33} & 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \quad (32)$$

ここで、 0 は 2×2 の零行列であり、 ${}^q H_{i,j}^{k,l}$ は次式で定義される 2 次の正方行列である。

$${}^q H_{i,j}^{k,l} \triangleq \begin{bmatrix} h^{xx}(i,j,k,l,q) & h^{xy}(i,j,k,l,q) \\ h^{xy}(i,j,k,l,q) & h^{yy}(i,j,k,l,q) \end{bmatrix} \quad (33)$$

ただし、 $(i,j), (k,l)$ は格子点の番号を表し、 q はバネの縦横斜めを表す添え字 w, c, s のいずれかを表す。各要素を以下に示す。

$$h^{xx}(i,j,k,l,q) \triangleq k_q \frac{l_q^0 (p_{i,j}^x - p_{k,l}^x)^2}{|p_{i,j} - p_{k,l}|^3} + k_q \left(1 - \frac{l_q^0}{|p_{i,j} - p_{k,l}|} \right) \quad (34)$$

$$h^{xy}(i,j,k,l,q) \triangleq k_q \frac{l_q^0 (p_{i,j}^x - p_{k,l}^x)(p_{i,j}^y - p_{k,l}^y)}{|p_{i,j} - p_{k,l}|^3} \quad (35)$$

$$h^{yy}(i,j,k,l,q) \triangleq k_q \frac{l_q^0 (p_{i,j}^y - p_{k,l}^y)^2}{|p_{i,j} - p_{k,l}|^3} + k_q \left(1 - \frac{l_q^0}{|p_{i,j} - p_{k,l}|} \right) \quad (36)$$

また、行列 $D_{i,j}$ は次式で定義される。

$$D_{i,j} \triangleq {}^c H_{i,j}^{i,j-1} + {}^c H_{i,j}^{i,j+1} + {}^w H_{i,j}^{i-1,j} + {}^w H_{i,j}^{i+1,j} + {}^s H_{i,j}^{i-1,j-1} + {}^s H_{i,j}^{i+1,j+1} + {}^s H_{i,j}^{i-1,j+1} + {}^s H_{i,j}^{i+1,j-1} \quad (37)$$

和田隆広 (Takahiro Wada)

1971年8月3日生。1994年立命館大学理工学部機械工学科卒業。1996年同大学大学院理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了。同年同大学理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期課程に入学。現在に至る。ニット製品の自動生産など、柔軟物体のマニピュレーションに関する研究に従事。計測自動制御学会、日本繊維機械学会、繊維学会、IEEEの学生会員、(日本ロボット学会学生会員)

川村貞夫 (Sadao Kawamura)

1956年7月10日生。1981年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。1986年同大学院博士課程修了。工学博士。同年大阪大学基礎工学部助手。1987年立命館大学理工学部機械工学科助教授。1995年同教授。1996年立命館大学理工学部ロボティクス学科教授。学習制御、ロボットの運動制御、空気圧駆動システム、ワイヤ駆動システム、人間運動特性の計測・解析などの研究に従事。IEEE、システム制御情報学会、日本機械学会、計測自動制御学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

平井慎一 (Shinichi Hirai)

1963年3月19日生。1990年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995年同助教授。1996年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授となり、現在に至る。1990年度計測自動制御学会論文賞。1996年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)