

## 布地のモデリングと変形形状制御

平井 慎一 (立命館大学 ロボティクス学科) 和田 隆広 (立命館大学 ロボティクス学科)

### 1 はじめに

実世界には、柔らかく変形しやすい物体を対象とするさまざまなマニピュレーション作業がある。たとえば、生産現場では、板金、コード、皮革などを扱う工程が多く存在している。食品作業や農業では、生地や食品、肉類など、医療分野では、筋肉や血管などの軟組織を扱う作業が見受けられる。また、人間の生活環境においても、紙や衣料など、柔らかく変形しやすい物体を扱うことは少なくない。このようなマニピュレーション作業は、人間の巧みさに頼っているところが多く、柔らかい物体のマニピュレーション作業をロボットに実行させるためには、作業における技法を解明することが重要である。

布地を扱う作業の多くは、現在でも人手に頼るところが多く、自動化が望まれている。布地を対象とする作業においては、布上の編み目点の位置決めが基本的な作業の一つである。昨年の報告では、ホースの挿入作業を扱った<sup>1), 2)</sup>。この作業では物体をある一点で操作する。しかしながら、布地の操作では一般に、複数の点で物体を操作する必要がある。また、多くの位置決め作業においては、位置決めしたい点を直接操作することができず、Fig.1 に示すように、布地の端など他の点を操作することにより、間接的に位置決めを実現しなければならない。作業を実現するためには、実行すべき変形制御に対して、作用点をどのように配置し、どのような変位や力を与えるのかを求める必要がある。

そこで本報告では、布地に代表される伸縮柔軟物体における間接的な位置決めについて考察する。特に、平面内変形を対象とし、与えられた操作する点の変位を求めめる方法を提案するとともに、位置決めが可能であるための条件について考察する。まず、布地のモデリングについて述べる。次に、作用点の配置と実行可能な変形制御との関係を解析する。最後に、作用点の位置を更新することで、より正確な編み目の位置決めを行う手法を提案する。

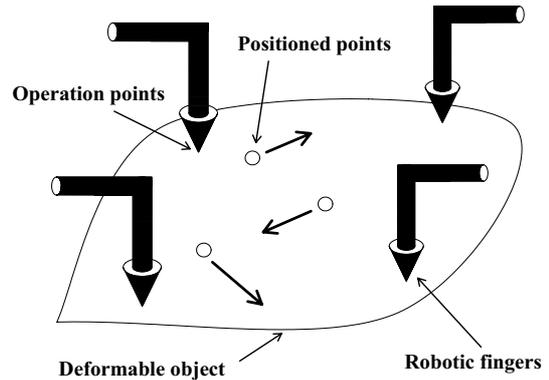


Fig.1: Indirect positioning operation of deformable object

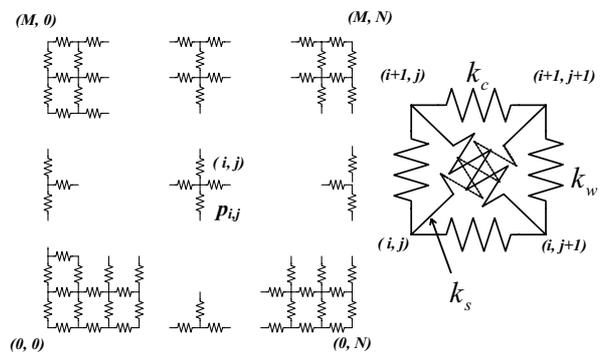


Fig.2: Spring model of two-dimensional deformable object

### 2 布地のモデル化

本報告では、布地などの面状伸縮柔軟物体を、Fig.1に示すような格子状のパネでモデル化する。格子の単位要素は、縦横のパネと、対角線を結ぶ斜め方向のパ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  $p_{i,j} \triangleq [x_{i,j}, y_{i,j}]^T$  ( $i = 0, \dots, M; j = 0, \dots, N$ ) により、物体の変形と移動を表す。

ここで、柔軟物体の安定形状において、ポテンシャルエネルギーが最小になると仮定する。本稿の場合、布地全体のポテンシャルエネルギーは、パネの弾性エネルギーの和で表される。すべての格子点の  $x, y$  座標を一列に並べた  $2(M+1)(N+1)$  次元ベクトルを  $r$  で表す。物体のポテンシャルエネルギーは  $r$  によって決まる。そこで、ポテンシャルエネルギーを  $U(r)$  と

表す。ポテンシャルエネルギー  $U(r)$  を与えられた拘束の下で最小化することにより、変形後の位置ベクトル  $r$  を求めることができる。すなわち、ポテンシャルエネルギーの最小化を通して、布地の変形形状を決定することができる<sup>3), 4)</sup>。

### 3 布地の間接同時位置決め制御

#### 3.1 間接位置決め制御の定式化

本節では、布地上の多点の間接的同時位置決め制御の定式化を行い、制御手法を提案する。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.1に示すように、以下の3種類に分類する。

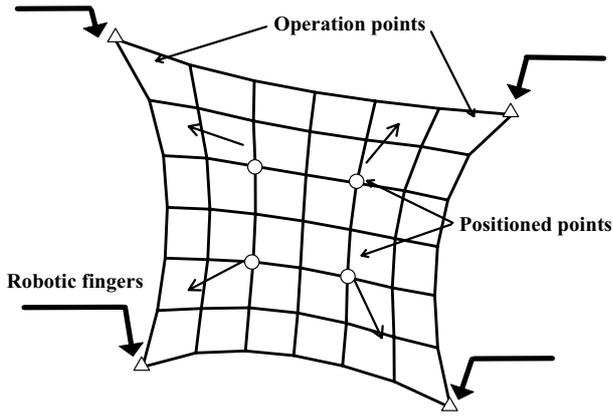


Fig. 3: Classification of mesh point

- 操作点 ロボットフィンガなどで直接拘束を与える点．(Fig.3中の△)
- 位置決め点 位置決め機構などで直接拘束できないが，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.3中の○)
- 非位置決め点 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それぞれ  $l, m$  とする．格子点の数は  $(M + 1)(N + 1)$  で与えられるので，非位置決め点の数は  $(M + 1)(N + 1) - l - m$  である．また，すべての操作点の  $x, y$  座標を並べた  $2l$  次元ベクトルを  $r_m$  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  $r_p$  および非位置決め点パラメータ  $r_n$  を定義する．

ここで，以下のような問題を考える．

操作点，位置決め点および非位置決め点の，布上での配置は，はじめから与えられているとする．目標となる位置決め点の位置  $r_p = r_p^d$  が与えられた場合に，それを実現するような操作点の位置  $r_m$  を求める．

本稿では，簡単のため  $r_p = r_p^d$  なる等式条件で表現できる位置決め作業を対象とする．また，ロボットフィンガは点接触で操作点を把持していると仮定する．

### 3.2 操作点の変位の計算方法

前節で提案した布地のモデルを用いて，上記問題を解く手法を提案する．格子点の集合  $r$  は，操作点  $r_m$ ，位置決め点  $r_p$ ，非位置決め点  $r_n$  に分類できることに注意すると，ポテンシャルエネルギーは， $U(r_m, r_p, r_n)$  と表せることがわかる．ポテンシャルエネルギーの概念より，布地全体のポテンシャルエネルギー  $U(r_m, r_p, r_n)$  は変形形状において，以下の釣合の方程式を満足する必要がある．

$$\frac{\partial U}{\partial r_m} - \lambda = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r_p} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial r_n} = 0, \quad (3)$$

ただし，ベクトル  $\lambda$  は，ロボットフィンガが操作点におよぼす力を表す．ここで，外力  $\lambda$  は，式 (1) 中にもみ存在し，式

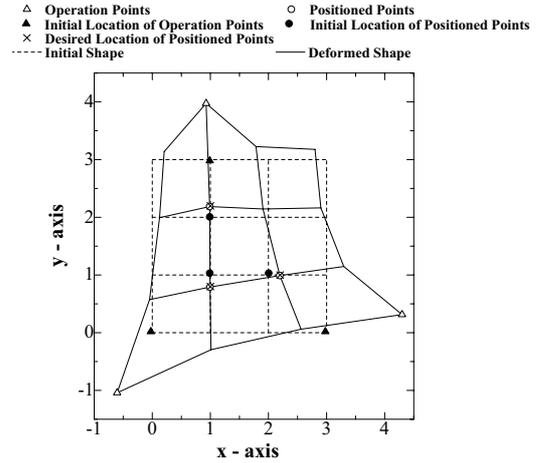


Fig. 4: Computational result

(2)(3) には表れないことに注意する．これは，位置決め点や非位置決め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．

位置決め点の目標位置  $r_p = r_p^d$  が与えられた場合，まず  $r_p = r_p^d$  を，式 (1)(2)(3) に代入する．次に，式 (2)(3) を用いて， $r_m, r_n$  を求める．最後に式 (1) から  $\lambda$  を求める．以上のように，式 (1)(2)(3) を  $r_p = r_p^d$  の下で， $r_m, r_n, \lambda$  について解くことにより，与えられた位置決め作業を実現するための操作点  $r_m$  の位置および操作力  $\lambda$  を求めることができる．

以下，計算例を示す．操作点は3点，位置決め点は3点であり，対応する操作点パラメータ，および位置決め点パラメータをそれぞれ以下で与える．

$$r_m = [x_{0,0}, y_{0,0}, x_{0,3}, y_{0,3}, x_{3,1}, y_{3,1}]^T$$

$$r_p = [x_{1,1}, y_{1,1}, x_{1,2}, y_{1,2}, x_{2,1}, y_{2,1}]^T$$

初期状態では，すべての格子は辺の長さが1の正方形であるとする．いま，位置決め点パラメータの目標値を

$$r_p = [1.0, 0.8, 2.2, 1.0, 1.0, 2.2]^T$$

とおき，これを実現するための操作点パラメータ  $r_m$  を求める．上式を連立方程式 (2) および (3) に代入し， $r_m, r_n$  について解いて  $r_m$  を求めると，

$$r_m = [-0.605, -1.04, 4.30, 0.314, 0.926, 3.97]^T$$

を得る．この  $r_m$  を布地のモデルに与えて計算した変形形状を Fig. 4 に示す．この図を見てわかるように，逆問題を解いて求めた操作点パラメータ  $r_m$  をモデルに代入して得た結果  $r_p$  と，その目標値は，ほぼ一致している．これにより，本報告で提案した手法が有効であることが確認された．

### 3.3 実験結果

ここで，前小節で提案した手法の有効性を検証するため，実際の布地を用いた実験結果を示す．ここでは布地の例として， $90[\text{mm}] \times 90[\text{mm}]$  のスポーツサポータ生地 (ポリ塩化ビニル 85%，レーヨン 15%) を用いた．ここでは，4点の操作点を用いて4点の位置決め点を制御することを考える．両点の配置は以下の通りである．

$$r_m = [x_{0,0}, y_{0,0}, x_{0,3}, y_{0,3}, x_{3,0}, y_{3,0}, x_{3,3}, y_{3,3}]^T$$

$$r_p = [x_{1,1}, y_{1,1}, x_{1,2}, y_{1,2}, x_{2,1}, y_{2,1}, x_{2,2}, y_{2,2}]^T$$

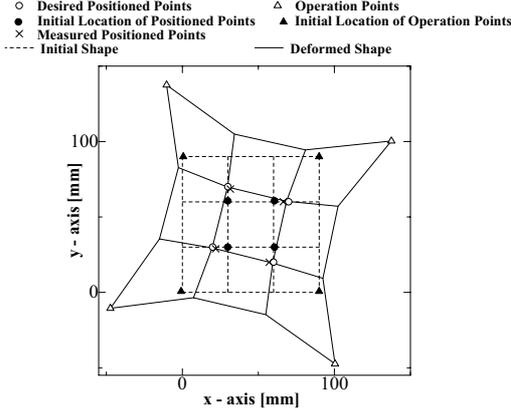


Fig. 5: Experimental result

位置決め点の目標位置を,

$$r_p^d = \begin{bmatrix} 20.0, 30.0, 60.0, 20.0, \\ 20.0, 70.0, 70.0, 60.0 \end{bmatrix}^T \text{ [mm]}$$

とする．提案する手法を用いることにより，操作点の位置  $r_m$  は，次の通り求めることができる．

$$r_m = \begin{bmatrix} -47.3, -10.6, 100, -47.4, \\ -10.3, 138, 137, 100 \end{bmatrix}^T \text{ [mm]}$$

実験結果を計算結果に重ね合わせた図を，Fig. 5 に示す．この図を見てわかるとおり，制御後の位置決め点の位置は，計算結果と実験結果でほぼ一致していることがわかる．

### 3.4 位置決め作業の可能性

前節の例では，与えられた位置決め点の目標に対して，それを実現する操作点パラメータ  $r_m$  が存在した．しかしながら，操作点や位置決め点の数や，それらの布地上で配置によっては，位置決めが不可能な場合も存在すると考えられる．本節では，ある点近傍での操作点パラメータの存在について考察する．

ある安定形状  $r_m = r_{m0}$ ,  $r_p = r_{p0}$ ,  $r_n = r_{n0}$  の近傍を考え，その点まわりで式 (2) および (3) を線形化すると，次式が得られる．

$$A \begin{bmatrix} \delta r_m \\ \delta r_n \end{bmatrix} = -B \delta r_p \quad (4)$$

ただし，

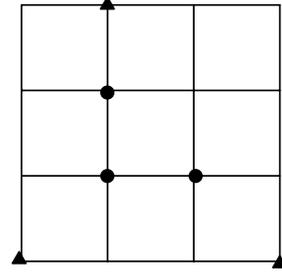
$$A \triangleq \begin{bmatrix} H_{p,m} & H_{p,n} \\ H_{n,m} & H_{n,n} \end{bmatrix} \in R^{2(M+1)(N+1) - 2l \times 2(M+1)(N+1) - 2m}$$

$$B \triangleq \begin{bmatrix} H_{p,p} \\ H_{n,p} \end{bmatrix} \in R^{2(M+1)(N+1) - 2l \times 2m}$$

$$H_{p, \frac{mn}{i}} \triangleq \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial r_m^j \partial r_p^i} \right]_{r_{m0}, r_{p0}, r_{n0}} \Big|_{i,j}$$

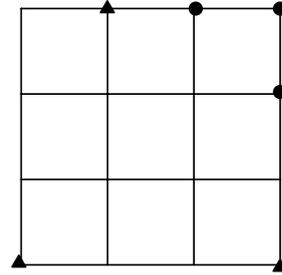
である．ベクトル  $\delta r_m$  などは，操作点などの平衡点近傍での微小変化分を表している．式 (4) を満たす  $\delta r_m$ ,  $\delta r_n$  が存在するときに限り，与えられた目標を実現する操作点パラメータ

### ▲ Operation points ● Positioned points



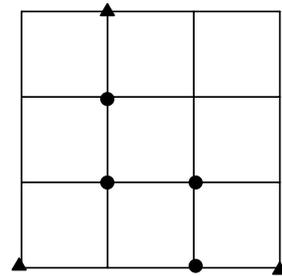
(a)  $l = 3, m = 3$

### ▲ Operation points ● Positioned points



(b)  $l = 3, m = 3$

### ▲ Operation points ● Positioned points



(c)  $l = 3, m = 4$

Fig. 6: Feasibility of positioning operation

タが存在する．そこで，式 (4) の解  $\delta r_m$ ,  $\delta r_n$  が存在するかどうかについて検討する．式 (4) の解の存在は，以下の通り判定できる．

$\text{rank} A = \text{rank} [A B]$  の場合

任意の微小位置決め  $\delta r_p$  を実現するような操作点の変位  $\delta r_m$  が存在する．さらに，行列  $A$  の階数が  $2(M+1)(N+1) - 2l$  であり，かつ  $l = m$  ならば， $\delta r_m$  は，与えられた任意の位置決め  $\delta r_p$  に対して一意に決定されることがわかる．

$\text{rank} A < \text{rank} [A B]$  の場合

一般には位置決めが不可能である．しかしながら， $\text{rank} A = \text{rank} [A B \delta r_p]$  を満足するような  $\delta r_p$  に対しては， $\delta r_m$  が存在する．したがって， $\text{rank} A = \text{rank} [A B \delta r_p]$  を満たすような特定の作業のみ実現可能である．

以上より，行列  $A$ ,  $[A B]$ , および  $[A B \delta r_p]$  の階数を調べることにより，位置決め作業の実現可能性が判別できる．

例 上記の条件を用いて, Fig.6に示すような, 操作点および位置決め点の配置での, 自然状態近傍での位置決め作業の可能性を判別する.

Fig. 6-(a)および(b)は, 3点の操作点によって3点を位置決めする場合を示している. 行列  $A$  と  $[A B]$  の階数を比較すると, Fig. 6-(a)の場合, 両者が等しいことが確認できる. これにより, 任意の位置決め作業が実現可能であることがわかる. また, Fig. 6-(b)の場合,  $\text{rank} A < \text{rank}[A B]$  となることがわかり, 任意の位置決めは実現できないことが示された. 最後に, Fig. 6-(c)は, 3点の操作点を用いて, 4点を位置決めしようとする場合を表しており,  $\text{rank} A < \text{rank}[A B]$  が得られ, 任意の位置決めは不可能である. これらの3つの例の結果は, 直感と一致する.

#### 4 位置決め点のフィードバックを用いた位置決め制御

前節で提案した, 操作点の変位の計算方法は, 布地の数理モデルが正確ならば, 望みの位置決め作業が正確に実現できる. しかしながら, 現実の数理モデルには誤差が存在していると考えるのが妥当である. そこで, モデルに多少の誤差が存在しても位置決め可能な, 何らかのフィードバック制御則が必要である. フィードバック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. ここでは, カメラを用いて, 位置決め点の位置を計測することにする. 本節では, 前節において導出した, ある安定形状近傍での, 操作点および位置決め点の微小変化分の関係を表す線形化した方程式(4)に基づき, フィードバック制御則を導く.

各時刻  $t_k$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) でのロボットフィンガの目標値  $r_m^k$ , 1つ前の時刻における値  $r_m^{k-1}$ ,  $r_n^{k-1}$ , および  $r_p^{k-1}$  を用いて, 次式のように決定する.

$$r_m(t_k) = r_m(t_{k-1}) - \overline{A_{k-1}^+} B_{k-1} [r_p^d - r_p(t_{k-1})] \quad (5)$$

ここで,

$$A_k \triangleq A(r_m^k, r_p^k, r_n^k)$$

$$A_k \triangleq \begin{bmatrix} \overline{A_k^+} \\ \underline{A_k^+} \end{bmatrix}$$

$$\overline{A_k^+} \in R^{2l(M+1)(N+1)-2l}$$

$$\underline{A_k^+} \in R^{2(M+1)(N+1)-2l-2m \times 2(M+1)(N+1)-2l}$$

$$B_k \triangleq B(r_m^k, r_p^k, r_n^k)$$

ロボットフィンガの位置  $r_m^k$  は, ロボットが布地をしっかりと把持して相対位置がずれない限り, ロボットの関節変位の計測値から求めることができる. 位置決め点  $r_p^k$  は, カメラの画像より計測できると仮定する. ただし, 非位置決め点  $r_n^k$  はその数が多いため, 計測が不可能なことが多いと考えられるため, 次式で推定する.

$$r_n^k = \underline{A_{k-1}^+} B_{k-1} (r_p^{k-1} - r_p^{k-2}) \quad (6)$$

この手法は, 時間間隔  $t_k - t_{k-1}$  が小さいときには有効であると考えられる. 式(5)において, 解が存在しない場合, ある種の近似解を求めることによって, 位置決め作業を実行できると考えられる. また, 解に任意性がある場合には, 適切な処理によって特殊解を特定する必要がある. 具体的には, 変形量を最小にするような評価基準を設定することが有効であると考えられる. 解の任意性などに関しては, 前節で述べた解の存在性の判別方法を用いることができる.

#### 5 おわりに

本報告では, 布地などの間接的なマニピュレーションの定式化を行い, 制御法を提案した. また, ある点近傍での位置決め操作の可能性について考察を行った.

今後の課題としては, 目標となる位置決め作業が与えられた場合に, それを実現するための, 操作点の個数およびその配置を決定する手法の確立することが挙げられる. また, 本報告と異なる条件の下での, 位置決め作業に関する作業手法の決定方法も必要である.

#### 参考文献

- 1) 平井, 柔らかい管状物体の挿入作業の分析と実現, 第2回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp. 39-42, 1997
- 2) 平井, 野口, 変形しやすい管状物体の挿入作業における人間の運動と作業状態識別別のロボットマニピュレータへの移植, 日本ロボット学会誌, Vol. 15 No. 8 pp. 1172-1179, 1997
- 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. 6 No. 608 pp. 1102-1109, 1997
- 4) Wada, T., Hirabayashi, H., Hirano, T., and Kawamura, S., *Modeling of Planar Knitted Fabrics for Their Deformation Control*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1960-1965, Albuquerque, April 1997