

伸縮柔軟性を有する物体の位置決め作業

Indirect Simultaneous Positioning Operations of Multiple Points on A Extensionally Deformable Object

和田 隆広 正 平井 慎一 正 川村 貞夫 (立命館大学)

Takahiro Wada, Shinichi Hirai and Sadao Kawamura

Ritsumeikan University, Noji-higashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga 525-8577

A novel control method for the indirect positioning operation of deformable objects will be proposed. First, a simplified physical model of extensionally deformable objects 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 a visual sensor. A condition to examine whether a given operation is feasible or not will be considered based on the linearized model.

Key Words: indirect simultaneous positioning operation, deformation control, deformable objects, textile fabrics

1. はじめに

伸縮柔軟性を有する、布地やゴムシートなどの物体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⁽¹⁾。これらの作業においては、柔軟対象物体上の複数点の位置決めが基本的な作業の一つである。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、物体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。本報告では、このような作業を、伸縮柔軟物体上の複数点の間接同時位置決め作業と名付け、考察を行う。特に、平面内変形を対象とし、対象物体のモデルに基づいた、新しい制御則を提案する。さらに、位置決めが可能であるための条件について考察する

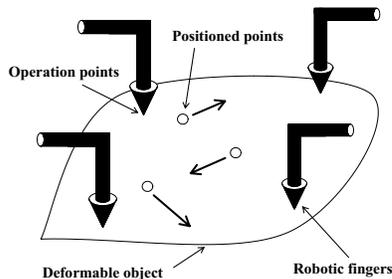


Fig.1 Indirect simultaneous positioning operation of deformable object

2. 布地のモデル化

本節では、布地などの面状伸縮柔軟物体のモデル化を行う。対象物体の変形には、摩擦やヒステリシスなどの影響が無視できるような、弾性変形域が存在すると仮定し、その弾性変形域内の変形を扱う。そのとき、面状伸縮柔軟物体を、Fig.2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、縦横の線形パネと、対角線を結ぶ斜め方向の線形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、対象物体の静的な変形のみを扱うと仮定する。このとき、柔軟物体の形状は、各パネの釣合の方程式によって決定される。それぞれの点で釣合の方程式を求め、その方程式を与えられた拘束の下で解くことにより、対象物体の変形形状が決定できる。

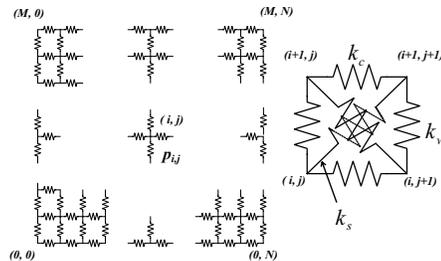


Fig.2 Spring model of two dimensional deformable object

3. 間接同時位置決め作業の定式化

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.3に示すように、以下の3種類に分類する。

- 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 Δ)
- 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 \circ)
- 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 m, p とする。このとき、格子点の数より、非位置決め点の数 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 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。

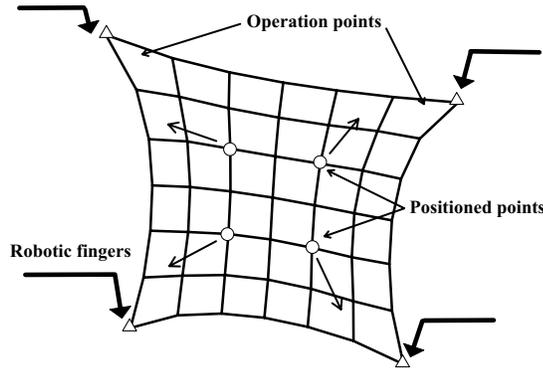


Fig.3 Classification of mesh point

ここで、以下のような問題を考える。

操作点ならびに位置決め点の、布上での配置があらかじめ与えられているとする。位置決め点の目標値を r_p^d とする。操作点にどのような変位を与えれば、位置決め点の目標値を実現できるか。

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。ここで、上記問題の定式化を行う。釣合を表す方程式は、系全体のポテンシャルエネルギー U を用いて、次式で表すことができる。

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

$$\frac{\partial U}{\partial r_p} = \mathbf{o}, \quad \frac{\partial U}{\partial r_n} = \mathbf{o}, \quad (2)$$

ただし、ベクトル λ 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 λ は、式 (1) 中のみ存在し、式 (2) 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。 r_m を適切に制御することで、 $r_p = r_p^d$ を実現することが、本論文の目的である。

4. 間接位置決め作業のための繰り返し制御則

前節で導出した、ある平衡点近傍での、位置決め点と操作点の微小変位の関係 (4) 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。本手法では、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、操作点の位置を、繰り返し試行的に修正することによって、位置決め点を目標値へ収束させる (Fig4)。ただし、以下では、操作点と位置決め点の数は、同じである場合のみを扱う。

まず、制御則で用いる、位置決め点と操作点の微小変位関係を導出する。ある安定形状 $r_0 = [r_{m0}^T, r_{p0}^T, r_{n0}^T]$ の近傍を考え、その点まわりで式 (2) を線形化し、次式を得る。

$$A\delta r_m + B\delta r_n + C\delta r_p = 0 \quad (3)$$

ここで、行列 A, B, C は、安定形状における剛性行列に相当し、その要素はポテンシャルエネルギー U から求めることができる。また、ベクトル δr_m などは、操作点など

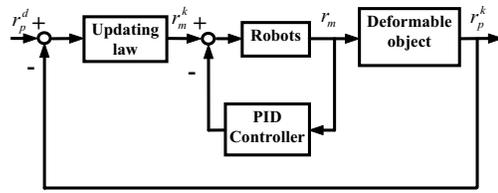


Fig.4 Block diagram of proposed iterative control method

の平衡点 r_{m0} 近傍での微小変化分を表している。式 (3) を変形し、次式を得る。

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

ここで、 $F = [A, B]$ である。行列 F が正則であると仮定すると、次式が成り立つ。

$$\delta r_m = -S_U F^{-1} C \delta r_p \quad (5)$$

$$\delta r_n = -S_D F^{-1} C \delta r_p \quad (6)$$

ただし、 $S_U = [I|0]$, $S_D = [0|I]$ である。ここで、誤差 $r_p^d - r_p^{k-1}$ を減少させるために、操作点の位置を修正する。 k 回目の試行における修正法は、式 (5) に基づき、次式で表される。

$$r_m^k = r_m^{k-1} - k_p S_U F_{k-1}^{-1} C_{k-1} (r_p^d - r_p^{k-1}) \quad (7)$$

添え字 k は、 k 回目の試行を表す。行列 F_k, C_k は、 r_m^k, r_p^k および r_n^k の関数である。また、 F_k は正則であると仮定する。 k 回目の試行によるロボットフィンガの位置 r_m^k は、ロボットが対象物体を、相対位置がずれないように把持している限り、計測可能である。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。非位置決め点 r_n^k に関しては、計測が不可能なことが多いと考えられるため、式 (6) に基づき、次式で推定する。

$$r_n^k = r_n^{k-1} - k_p S_D F_{k-1}^{-1} C_{k-1} (r_p^{k-1} - r_p^{k-2}) \quad (8)$$

操作点を把持しているフィンガに対して、適切な位置制御を行い、 $r_m = r_m^k$ を実現する。 $r_m = r_m^k$ を実現した際、カメラによって、 r_p^k を計測する。この r_p^k に対して、目標値との誤差を計算し、再び、式 (7) に基づき、 r_m^{k+1} を求める。以下、これを繰り返す。

目標値への収束性の解析

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。ここで、本手法が、基本的には非線形方程式の数値解法である、準ニュートン法⁽²⁾と等価であることを示し、収束性の条件について考察する。

制御則 (7) 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。

$$r_m^k = r_m^{k-1} - \tilde{Q}_{k-1} (r_p^d - r_p^{k-1}), \quad (9)$$

$$\tilde{Q}_k = k_p S_U \tilde{F}_k^{-1} \tilde{C}_k, \quad (10)$$

ここに、 \tilde{F}_k および \tilde{C}_k は、それぞれ F_k と C_k の推定値であり、誤差を含む。これらの誤差は、バネ定数の同定誤差や、非位置決め点の位置の推定誤差などから成る。

ここで、 $r_m^k - r_m^{k-1}$ と $r_p^k - r_p^{k-1}$ が十分小さい場合を考える。このとき、

$$\mathbf{r}_p^k - \mathbf{r}_p^{k-1} = -Q_{k-1}^{-1}(\mathbf{r}_m^k - \mathbf{r}_m^{k-1}), \quad (11)$$

$$Q_{k-1} = S_U F_{k-1} C_{k-1}, \quad (12)$$

が成り立つ。ただし、 $\det F_{k-1} \neq 0$ を仮定しているため、 Q_{k-1}^{-1} は必ず存在する。式 (9) を (11) に代入して、

$$\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k = (I - Q_{k-1}^{-1} \tilde{Q}_{k-1})(\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}) \quad (13)$$

を得る。これより、次式が得られる。

$$\|\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k\| \leq \|I - Q_{k-1}^{-1} \tilde{Q}_{k-1}\| \|\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^{k-1}\| \quad (14)$$

したがって、 $\|I - Q_{k-1}^{-1} \tilde{Q}_{k-1}\| < 1$ を満たすような、 \tilde{Q}_{k-1} を選ぶことによって、

$$\mathbf{r}_p^k \rightarrow \mathbf{r}_p^d \text{ as } k \rightarrow \infty \quad (15)$$

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、 k_p を小さくするなどして、 \tilde{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、 k_p を小さくすると、収束の速度が遅くなる。

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って表現できる場合でも、局所的な線形化によって得た微小関係を表す式を用いて制御則を導いたと考えれば、行列 \tilde{Q} は、ある種の近似誤差を含んだ推定値である。これにより、線形バネの連結で表現できないような、非線形弾性を有する物体に対して、本繰り返し制御が有効であると考えられる。ただし、本報告では、物体の弾性変形領域を対象としているため、ヒステリシスなどの影響がある場合に、本手法が有効であるかは、保証できない。

シミュレーション結果

本手法の有効性を、シミュレーションによって検討する。ここで、Fig.5に示すような、初期状態での操作点および、位置決め点の配置をもつ、 $M = 3$ 、 $N = 3$ の格子でモデル化された対象物を考える。この図を見てわかるとおり、

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

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

である。各格子は、初期長が、50[mm]の正方形である。シミュレーションでは、位置決め点の目標値を、次式で与える。

$$\mathbf{r}_p^d = [50, 55, 120, 50, 50, 110, 120, 110]^T$$

Fig.7とFig.8に、本論文で提案した繰り返し制御手法を用いた、シミュレーション結果を示す。Fig.7では、正確なモデルがわかっていると仮定している。Fig.7は、ゲイン k_p の効果を示す。ゲイン k_p が大きい場合 ($k_p = 1$)、収束の速度は大きくなるが、誤差が比較的大きい場所で、振動的になることがわかる。Fig.6は、 $k_p = 0.1$ の場合の、位置決め点および操作点の挙動を示している。Fig.8に、バネ定数に推定誤差がある場合の、シミュレーション結果を示す。ここでは、実際の対象物体のバネ定数 $(k_c, k_w, k_s) = (1, 1, 0.5)$ に対し、推定値 $(k_c, k_w, k_s) = (1, 0.1, 0.1)$ を用いている。この結果より、 k_p を適当に小さく選ぶことによって、モデルにある範囲の誤差があった場合でも、位置決め点を目標値へ収束させることができることがわかる。

実験結果

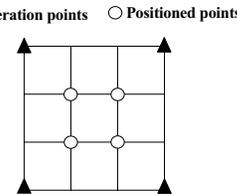


Fig.5 Configuration of positioned and operation points

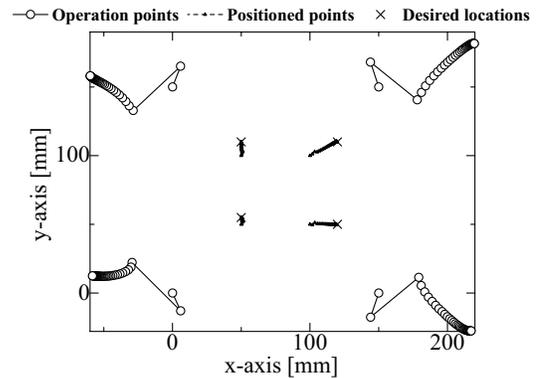


Fig.6 Behavior of positioned and operation points

提案する制御手法の有効性を示すために、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[%] のセタ生地を切り取って使用した。サイズは、300[mm] × 300[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.9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(7)に基づいて、布地の操作点を把持したフィンガの位置を制御する。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。これを、Fig.4に基づいて繰り返す。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。

$$\mathbf{r}_p^d = [101, 90.0, 210.0, 90.0, 170, 205]^T$$

また、本実験では、式(7)で用いるゲインとして、 $k_p = 0.1$ を用いた。また、バネ定数の推定値は、 $k_s = k_w = 1, k_c = 0.5$ を用いた。Fig.10は、位置決め点誤差のノルムを表す。この結果より、試行を重ねることにより、誤差が減少し、位置決め点が目標値へ収束することが確認できた。また、Fig.11に、その際の位置決め点、および操作点の挙動を示す。

これら結果を見てわかるとおり、実際の布地において、バネ定数の正確な同定をすることなく、位置決め点を目

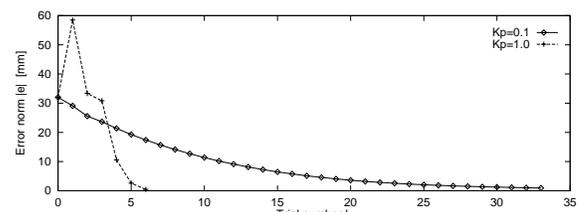


Fig.7 Simulation results with exact model

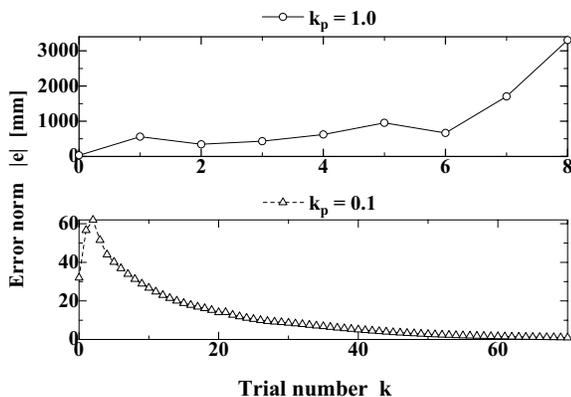


Fig.8 Simulation results with estimated model

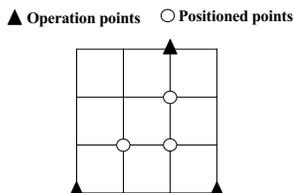


Fig.9 Configuration of points in experiments

標位置へ収束させることができた．これにより，提案する制御手法が有効であることがわかる．

5. 位置決め作業の可能性

ここでは，操作点，位置決め点，および非位置決め点の微小変位関係に基づき，ある安定形状近傍での位置決め作業の実現可能性について考える．任意の δr_p に対して，式(4)を満たす $\delta r_m, \delta r_n$ が存在するときにかぎり，任意の方向への微小位置決めが可能となる．線形化方程式(3)の性質を考察し，位置決め可能な条件を導出する．必要なフィンガについても言及する．

ここで，任意の δr_m に対して， $\delta r_p, \delta r_n$ が一意に決まると仮定すると，式(3)より，次式が成り立つ．

$$\text{rank}[B \ C] = 2p + 2n, \quad \forall m, \quad \forall r_m \quad (16)$$

このとき，

$$S(B) \cap S(C) = \{0\} \quad (17)$$

が成り立つ．ただし， $S(\cdot)$ は，行列の張る空間を表す．

任意の微小変位 δr_p に対して，それを実現する操作点の微小変位 δr_m が存在するための，必要十分条件は，式(4)より， $S([A \ B]) \supseteq S(C)$ を満たすことである．これは，式(17)が成り立つことより， $S(A) \supseteq S(C)$ と書き換えられる．これと，Result 16をあわせ考えることにより，次を得る．

Result 1 任意の位置決め点の微小変位 δr_p を実現するための，操作点の微小変位 δr_m が存在するための必要十分条件は， $\text{rank}[A \ B] = 2p + 2n$ を満たすことである．

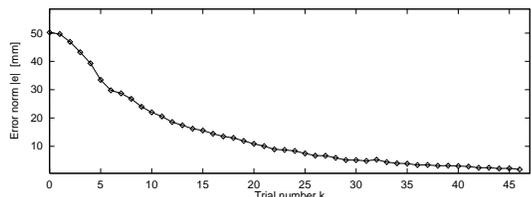


Fig.10 Experimental results

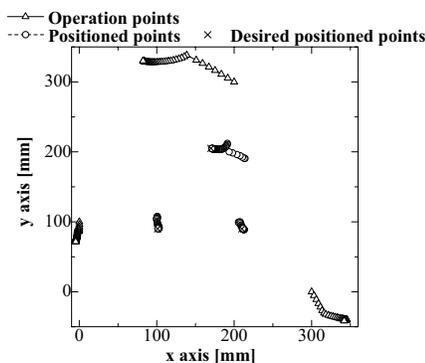


Fig.11 Behavior of positioned and operation points in experiments

さらに，Result 1 を満たすためには， $m \geq p$ が必要となる．つまり，

Result 2 任意の方向への位置決めが必要な場合，位置決め点の数以上のロボットフィンガが必要である．

以上より，行列 F の階数を計算することによって，ある点近傍での微小位置決め可能性が判別できる．次に，いくつかの例を与え，具体的に位置決め可能性の判別を行う．

【例】

上記の条件を用いて，Fig.12-(a) および (b) 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．操作点および位置決め点の数は，それぞれ3である．Fig.12-(a)の場合， $\det[A \ B] = 26 (= 2p + 2n)$ であることがわかる．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，(b)の場合， $\text{rank}[A \ B] = 25 < 2p + 2n$ 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．これらの例の結果は，直感と一致する．

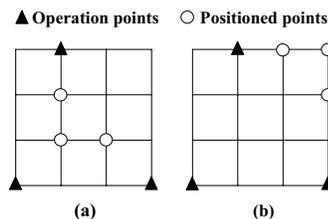


Fig.12 Feasibility of positioning operation

6. おわりに

本報告では，伸縮柔軟性を有する物体上の複数点の間接的同時位置決め作業のための，新しい制御手法を提案した．収束性の解析を行い，対象物のモデルに，多少の誤差が存在しても，目標値への収束が可能であることが示された．さらに，シミュレーションおよび実験により，本手法の有効性を確認した．

今後の課題として，対象物体上での，把持位置の計画法と，対象物体内の摩擦，ヒステリシスの考慮が挙げられる．

【参考文献】

- (1) Taylor, P.M. et al.: "Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials", Springer-Verlag, 1990
- (2) 今野, 山下: "非線形計画法", 日科技連, 1978