

柔軟物ハンドリング

平井慎一 (立命館大学ロボティクス学科)

1 はじめに

われわれの身の回りには、柔らかく変形しやすい物体のハンドリングが数多く存在する。たとえば、スーパーマーケットでは、キャベツ、トマトを始めとする野菜類、みかん、ぶどうなどの果物類、様々な肉類や魚介類、その他こんにゃく、ちくわ、かまぼこなど、数多くの食品が並んでいる。これらはすべて柔らかく変形しやすい物体であり、これらの配送や陳列は、多くのハンドリング作業から成り立つ。また、自動車工場ではチューブやホースを配管し、革製シートを取り付ける。家電製品の工場ではコードやケーブルを配線する。食品工場では様々な食材をハンドリングし、包装紙やラミネートフィルムで包装する。衣服の縫製工場では、布地をハンドリングし、縫製する。

紙パルプ、製糸、織物など素材や素材に近い柔軟対象物を大量に扱うハンドリングは、従来より機械システムの適用が進んでいる。また、プリンタやコピー機、自動改札機における紙葉類のハンドリング、食品産業における食材のハンドリングやラッピング等では、多種多様な機械システムが開発され、実用に供せられている。一方、機械システムの適用が困難な柔軟物ハンドリングも少なくない。柔軟物ハンドリングは、対象物の物理的性質、作業内容が多岐に渡り、機械システムの開発は様々な分野で個別に成されている。しかしながら、近年、柔軟物ハンドリングの基本的な原理が徐々に明らかにされており、従来困難であった柔軟物ハンドリングの実現可能性が高まっている。そこで本解説では、柔軟物ハンドリングの基本的な原理の一端を紹介する。

2 粗いモデルに基づくハンドリング制御

2.1 布地の間接同時位置決め

衣服や靴下等の縫製においては、図 1 に示すように、布地上の複数の点を位置決めする必要がある。縫製においては、位置決め点に糸と針を通すため、位置決め点を直接把持し、操作することができない。したがって、位置決め点より十分離れた点を操作することにより、位置決めを実行する必要がある。このような位置決めを、間接同時位置決め (indirect simultaneous positioning) とよぶ。間接同時位置決めでは、複数の操作点の運動と位置決

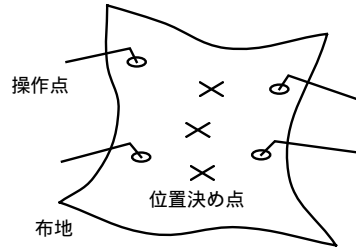


図 1: 縫製作業における布地の間接同時位置決め

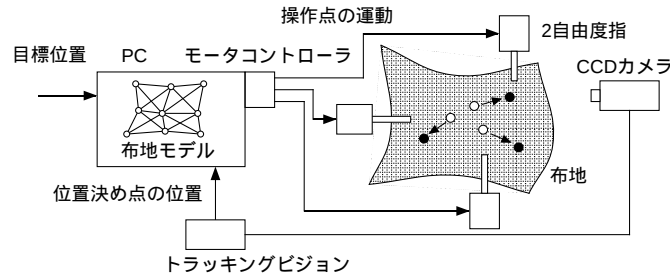


図 2: 間接同時位置決めの制御系

め点の運動が干渉しているため、位置決めを実行するためには物体の力学モデルが不可欠である。一方、布地は、非線形性、ヒステリシス、非一様性を含む複雑な力学特性を示す。したがって、精密なモデリングならびにモデル同定は、困難である。

以上のジレンマを解決する手法が、粗いモデル (coarse model) に基づくロバスト作業制御則である。この手法では、ハンドリングに必要な最小限の粗い物体モデルを構築する。物体モデルに含まれない特性は、モデルの不確定性とみなす。物体モデルをもとに、モデルの不確定性に対してロバストな制御則を導く。なお、本方式により、靴下縫製におけるかがり (linking) 作業の自動化が達成されていることを付記しておく。

布地の間接同時位置決めを実現するためには、位置決め点の位置を計測することが不可欠である。そこで、図 2 に示すように、位置決め点の位置を CCD カメラで計測する。また、操作点の位置を、布地に刺した針で制御する。布地の間接同時位置決めにおける物体モデルでは、操作点の位置と位置決め点の位置の関係を表すことが、最小限必要である。そこで、布地の動特性を無視し、図 3 に示すように、静特性を格子点を結ぶ線形弾性要素で表す。このとき、位置決め点と操作点が格子点上にあるように、格子構造を定める。次に、位置決め点の座標をすべて集めてベクトル r_p で表す。同様に、操作点の座標をベクトル r_m で表す。位置決め点、操作点以外の格子点を非対象点とよび、非対象点の座標すべてをベクトル r_n で表す。位置決め点の目標値を r_p^d とする。布地が機械指により引っ張られ、平衡状態にあるとし、平衡状態からの位置決め点、操作点、非対象点の微小変位をそれぞれ δr_p , δr_m , δr_n で表す。位置決め点と非対象点には、外力が作用しないので、こ

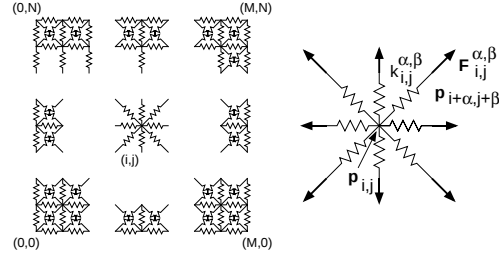


図 3: 布地の線形弾性モデル

これらの点における力の平衡式をまとめると，

$$A\delta\mathbf{r}_p + B\delta\mathbf{r}_m + C\delta\mathbf{r}_n = \mathbf{0} \quad (1)$$

と書くことができる．行列 A, B, C は，剛性行列に相当する．上式を変形すると

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{r}_m \\ \delta\mathbf{r}_n \end{bmatrix} = - \left[B \mid C \right]^{-1} A\delta\mathbf{r}_p \quad (2)$$

が得られる．上式より繰り返し制御則を導く．繰り返し回数 k における位置決め点，操作点，非対象点の値を，それぞれ $\mathbf{r}_p^k, \mathbf{r}_m^k, \mathbf{r}_n^k$ で表す．(2) 式における $\delta\mathbf{r}_p$ は，位置決め点の誤差 $\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k$ とみなす．また， $\delta\mathbf{r}_m$ は，次の操作点の位置と現在の位置との差 $\mathbf{r}_m^{k+1} - \mathbf{r}_m^k$ とみなす．同様に， $\delta\mathbf{r}_n$ を $\mathbf{r}_n^{k+1} - \mathbf{r}_n^k$ とみなす．このとき，次の繰り返し制御則が得られる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_m^{k+1} \\ \mathbf{r}_n^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_m^k \\ \mathbf{r}_n^k \end{bmatrix} - \alpha \left[B \mid C \right]^{-1} A(\mathbf{r}_p^d - \mathbf{r}_p^k) \quad (3)$$

ここで， α はゲインである．ベクトル $\mathbf{r}_p^k$ は，CCD カメラによる位置決め点の計測値とみなす．(3) 式上半部は，操作点の運動を制御する式であり，下半部は，非対象点の位置を推定する式である．(3) 式の右辺に表れる諸量はすべて，繰り返し回数 k において評価することができる．したがって，繰り返し制御則は (3) 式で与えられ，図 2 に示す制御系により，位置決めを実現することができる．

以上のような簡単な制御則で，特性の複雑な布地の位置決めを実現できるか否かは，当然の疑問である．この疑問に対する答えとして，モデル化誤差に対する制御則 (3) のロバスト性が，実験的かつ理論的に示されている．実験による検証においては，布地のバネ係数を推定し，推定値を用いて制御を行っている．物体モデルにおけるバネ係数が推定値に等しい場合のみならず，物体モデルのバネ係数が推定値の 10 倍，あるいは推定値の 1/10 倍程度にずれている場合においても，位置決めが実現できることが示された．ただし，バネ定数が推定値からずれるにつれて，位置決めが振動的になり，結果として位置決めが達成されるまでの繰り返し回数が 2 倍程度まで増加する．また，ロバスト性の理論的な証明も，一部成されている．

2.2 メカニカルフィンガーによる柔軟物の把持と操作

柔軟物をメカニカルフィンガーで把持し操作する場合、あるいは柔軟指により物体を把持し操作する場合、指または物体は接触領域において変形し、面接触を伴う。さらに、接触面において滑りや転がりが生じ、指と物体との相対的な位置関係が変化することも多い。柔軟物の把持や柔軟指による把持においては、指と物体との接触現象が複雑であり、これを精密にモデリングすることは困難である。したがって、粗いモデルに基づくロバストな作業制御則が有効である。

剛体の運動は、位置を表すパラメータと姿勢を表すパラメータで記述することができる。姿勢は、物体上の二点間の距離が不変である、剛体に適した概念である。したがって、柔軟物の挙動、すなわち柔軟物の運動と変形を記述するときには、姿勢という概念は有用ではない。柔軟物の挙動を統一的に記述する手法として、柔軟物体上にある複数の代表点の運動により、物体の運動ならびに変形を表現する手法が提案されている。図4に示す例のように、平面上の柔軟物体においては、三個の代表点の運動により、並進移動ならびに回転移動を表現できる。また、主要な変形も、代表点の運動により表現できる。点の個数を増やすと、変形をより詳細に記述することができる。

代表点による記述を導入することにより、前節で述べた制御則を適用することができる。このとき、モデルでは、指と物体との相対的な位置関係は変化しないと仮定し、滑りや転がりを不確定性とみなす。以上の粗いモデルに基づいて、柔軟物体の挙動を制御する。図4に示すように、三本のメカニカルフィンガーでスポンジを把持し、操作する。その結果、スポンジの並進移動、回転移動、変形を実現できる。ここで興味深いのは、実現すべき挙動によっては、指と物体との間に滑りや転がりが生じ、指と物体との相対的な位置関係がずれることである。このような場合においても、制御則が有するロバスト性のため、代表点を指定された目標点に案内することができる。すなわち、代表点の運動で記述された挙動を実現することができる。



図 4: メカニカルフィンガーによる柔軟物の把持と操作

3 柔軟指による物体の摘み操作

物体を二本の指で摘み操作する動作，いわゆる摘み操作は，人間の最も基本的な手先技量である．人間の指先は，柔軟な皮膚と筋組織から構成されており，この柔軟さが摘み操作の実現に重要な役割を果たすと考えられる．したがって，物体の摘み操作を実現するためには，柔軟指を含む機械システムの制御則を導く必要がある．

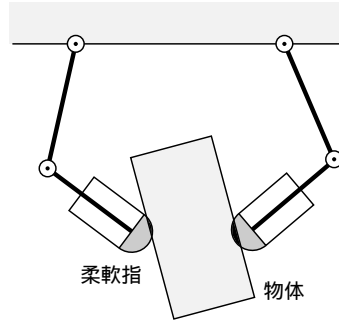


図 5: 柔軟指による物体の摘み操作

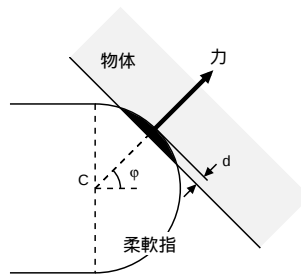


図 6: 柔軟指と物体との接触

柔軟指による物体の摘み操作では，図 5 に示すように，物体を摘むとともに物体の姿勢を制御する．柔軟指における変形と力の関係を，図 6 に示す．指先は，半径 r の半球であり，指先の単位面積当たりの弾性係数を k とする．図に示すように，指先と物体が角度 φ で接触し，深さ d だけ変形する．このとき，接触面は円であり，接触面に作用する指先力は，指先中心 C と接触面の中心を結ぶ直線上に作用すると仮定する．このとき，指先力の大きさ f は深さ d に依存し，

$$f(d) = \pi r k d^2 \quad (4)$$

と表すことができる．すなわち，変形量 d により，力の大きさが変化する．また，指先と物体の角度 φ により，力の方向が変化する．したがって，角度 φ と変形量 d を変化させることにより，指先力の向きと大きさを制御することができる．柔軟指と物体との相互作用を以上のように定式化し，各指の運動方程式ならびに幾何学的条件と組み合わせることにより，物体と柔軟指から成る系の運動方程式を導くことができる．

把持力制御では，把持力の大きさを与えられた値に一致させるとともに，物体にモーメントが作用しないように，指関節のトルクを制御する．また，姿勢制御では，物体の姿勢が与えられた角度に一致するように，指関節のトルクを制御する．これらの制御は，各指先における接触円の中心位置と物体の姿勢をフィードバックすることにより実現される．さらに，それぞれの制御を実現する指関節トルクの線形和により，把持力制御と姿勢制御を実現できることが示されている．興味深いのは，物体と指から成る系の運動方程式は非線形であり，重ね合わせの原理が成り立たないにも関わらず，制御入力 of 線形和により，把持力制御と姿勢制御が実現できる点である．その原理として，受動性 (passivity) の概念が導入され，制御入力の線形和により把持力制御と姿勢制御が実現できることが示されている．

4 柔軟物モデリング

4.1 格子法

物体あるいは指の変形を記述することは，ハンドリング制御則の導出や解析に必要である．物体の変形を記述する一般的な手法は，有限要素法 (FEM) である．有限要素法を用いると，物体の変形特性を精密に表現することができる．しかしながら，柔軟物ハンドリングにおいては，精密なモデルは不必要であり，ハンドリング制御に必要な最小限の特性が表現できれば十分である．

柔軟物ハンドリングの多くは，物体上の代表点の運動で記述できる．したがって，ハンドリング対象物を代表点の集合で表し，その物理特性を，代表点間の力学要素で記述する手法が有用である．このようなモデリング法を，格子法 (lattice method) とよぶ．格子法は，静的モデリングと動的モデリングに大別できる．静的モデリングにおいては，代表点は質量を持たず，代表点間は弾性要素で接続される．図 3 に示すモデルは，静的モデリングの一例である．一方，動的モデリングにおいては，代表点は質量を有し，代表点間は弾性要素，粘性要素等から構成される力学要素で接続される．

動的モデリングは，レオロジー物体のモデリングに適用されている．レオロジー物体とは，食品生地，ペースト，ゼリーなど，力を作用させた後に変位が残るという性質を持つ物体である．動的モデリングでは，代表点を接続する力学要素の選択がキーである．レオロジー物体のモデリングにおいては，残留変位を有するとともに，振動が減衰する力学要素を選択する必要がある．このような性質を有する最も簡単な力学要素は，図 7 に示す三要素モデルであることが証明されている．また，レオロジー物体に対して一定の力を加え続けると，一般に変位は飽和する．このような特性を表すためには，粘性要素 b_2 に力依存型ダンパーを導入する必要がある．粘性 b_2 は，粘性要素に作用する力 f に対して単

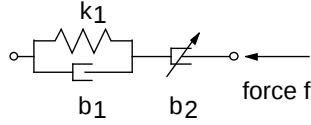


図 7: 力依存ダンパーを含む三要素モデル

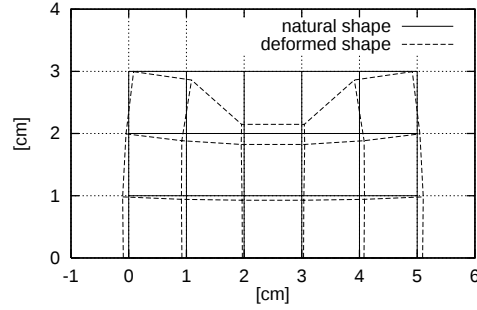


図 8: レオロジー物体の変形計算例

調減少であり，その特性はたとえば次式で与えられる．

$$b_2(f) = \begin{cases} b_{max} & (f < F_0) \\ ae^{-bf} & (F_0 \leq f \leq F_1) \\ b_{min} & (F_1 < f) \end{cases} \quad (5)$$

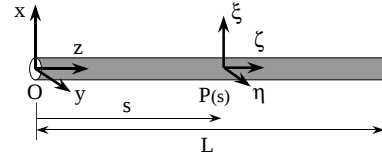
ここで， b_{min} , b_{max} は，粘性の最小値，最大値， F_0 , F_1 は，力の境界を表す．正の定数 a , b は，粘性 $b_2(f)$ の連続性より決定することができる．結局，図 7 に示す非線形三要素モデルは，パラメータ k_1 , b_1 , b_{min} , b_{max} , F_0 , F_1 により記述できる．さらに，これらのパラメータの値を，レオロジー物体のクリープ試験を通して推定する手法が提案されている．

レオロジー物体の変形形状を計算した例を，図 8 に示す．小麦粉と水を 3:1 の重量比で混ぜ合わせ練った生地の特性を，クリープ試験を通して推定する．推定値から，図に示す 5×3 の格子モデルを構築し，変形を計算する．変形計算においては，モデルの中央上部 2 点を，速度 1cm/s で 1 秒間強制的に下に押し下げ，30 秒間静止させた後，強制変位を解放する．図に示す変形形状は，60 秒後の定常状態形状である．中央上部が下に押されることによって，モデルの左右が広がっていること，上部側面が中央上部に引っ張られるように変形していることがわかる．また，強制変位を解放した後に，中央上部の点において，戻り変位が生じていることが示されている．これらは，生地の特性を表していると考えられる．変形は， 1msec 毎に計算する．60 秒間の変形を計算するために要した時間は，Celeron 300MHz において約 2 分であった．したがって，2 次元モデルにおいては，実時間の計算が可能であると考えられる．なお，本手法はそのまま，3 次元物体の変形に適用することができる．3 次元物体を $5 \times 5 \times 3$ の格子モデルでモデリングし，変形を計算する．変形を 1msec 毎に計算したところ，60 秒間の変形を計算するために約 12 時間要した．した

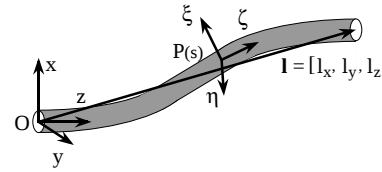
がって，3次元物体の変形計算を実時間で行うためには，現状では何らかの近似が必要である．

4.2 微分幾何法

ボリュームを持つ柔軟物の変形形状は，格子法により表現することができる．一方，線状物体や面状物体など，物体のある方向の寸法が他の方向の寸法より特に小さい物体においては，格子法による変形の記述が容易ではない．したがって，線状物体や面状物体に特化した変形の記述が有効である．



(a) 自然形状



(b) 変形形状

図 9: 線状物体の自然形状と変形形状を記述する座標系

線状物体のモデリング法として，微分幾何法が提案されている．線状物体の変形を記述するために，図 9-(a) に示すように，物体上の各点に局所座標系 $P - \xi\eta\zeta$ を設定する．このとき， ζ 軸が物体の軸方向に一致するように，座標系を定める．物体に曲げ変形やねじれ変形が生じると，図 9-(b) に示すように，局所座標系の方向が変化する．したがって，局所座標系における ξ 軸， η 軸， ζ 軸方向の単位ベクトルを，それぞれ ξ ， η ， ζ とすると，自然状態における局所座標の方向と変形状態における局所座標の方向との関係は，座標変換行列 $[\xi|\eta|\zeta]$ で表すことができる．左端から物体に沿った距離が s の点を $P(s)$ とする．点 $P(s)$ における空間座標 $x(s)$ は，

$$x(s) = \int_0^s \zeta(s) ds + x(0) \quad (6)$$

と表すことができる．ここで $x(0)$ は，左端点の空間座標である．点 $P(s)$ における曲げを $\kappa(s)$ ，ねじれを $\omega(s)$ とする．曲げ $\kappa(s)$ とねじれ $\omega(s)$ は，ベクトル ξ ， η ， ζ を用いて，それぞれ

$$\kappa^2 = \left\| \frac{d\zeta}{ds} \right\|^2, \quad \omega^2 = \left\| \frac{d\xi}{ds} \times \zeta \right\|^2 \quad (7)$$

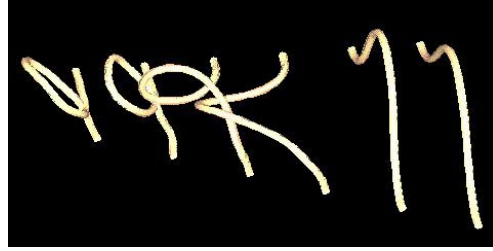


図 10: 曲げとねじれを伴う線状物体の変形



図 11: 線状物体の kinking

と書くことができる．座標変換行列 $[\xi|\eta|\zeta]$ は，独立な三個のパラメータ，たとえばオイラー角で表すことができる．したがって，空間座標 $x(s)$ ，曲げ $\kappa(s)$ ，ねじれ $\omega(s)$ は，距離 s に依存する独立な三個のパラメータで表すことができる．これは，線状物体の任意の曲げ変形とねじれ変形が，これら三個のパラメータで表現できることを意味する．線状物体の変形形状をこのように表現する手法を，微分幾何法 (differential geometry method) とよぶ．なお，線状物体に伸縮変形が生じる場合は，座標変換行列を与える三個のパラメータに加えて，伸縮を表すパラメータを導入することにより，三次元空間内の任意の変形を表現することができる．

微分幾何法による線状物体変形の計算例を示す．図 10は，線状物体の両端間の距離を短くする過程における変形である．距離が長いときには，ループなしの変形形状であり，距離を短くしていくと，変形形状にループが生じる様子が表現されている．図 11は，線状物体の両端間にねじれを加える過程における変形である．ねじれのみを加えているのにも関わらず，物体に曲げ変形が生じていることがわかる．このような現象を，kinking とよぶ．以上の例に示すように，微分幾何法を用いると，線状物体の三次元空間内の大変形を，安定に計算することができる．

4.3 変形推移グラフによる変形過程モデリング

食品の生産においては，食品生地を所定の形状に成形する作業が多く見受けられる．ピザ生地やパン生地の成形においては，ローラで押すことにより生地から不要なガスを抜く必要があるため，型枠に生地を入れて形状を作る方法では不十分である．したがって，ローラで押しながら，所定の形状への成形を実現することが望まれる．

生地の成形作業では，単一の動作で所定の形状を得ることは希であり，複数回の一連の動作により，所定の形状を得ることが一般的である．したがって，生地の成形作業においては，生地の形状を現在の形状から目標とする形状に導く，一連の動作を決定することが重要である．そのためには，成形作業における生地の変形過程全体を記述する必要がある．成形作業において，ある変形形状にある動作を適用すると，一つの変形形状が得られる．したがって，形状変形と動作との関係は，変形形状をノードとし，変形形状を結ぶ動作をノードを結ぶアークとするグラフで表すことができる．このグラフを，変形推移グラフ (deformation transition graph) とよぶ．変形推移グラフにおいては，変形形状を適当な評価規範で類別し，各類別群にノードを割り当てる．成形機械の動作を離散化し，各動作によりどのような変形が生じるかを実験あるいはシミュレーションにより求める．以上を繰り返すことにより，変形推移グラフを求めることができる．

5 おわりに

本解説では，立命館大学における研究開発を中心に，柔軟物ハンドリングの基本的な原理の一端を紹介した．そのポイントは，柔軟物の特性を精密にモデリングすることが困難であるにも関わらず，制御系を巧みに構成すると，柔軟物ハンドリングが単純な制御則で実現できるという点にある．従来，柔軟物をハンドリングする機械システムの開発は，センサを用いずにハンドリングを実現する機構の開発に重点があった．一方，近年の LSI 技術の進展により，センサや CPU を安価に使用できる環境が実現している．したがって，本解説で紹介した原理に基づき，センサフィードバックを実現することにより，より単純な機構と制御則でハンドリング作業を実現できる可能性が高い．靴下の縫製や食品パックの高速搬送など，実用化のめどがついている作業が少数ながら存在する．今後とも，様々な柔軟物ハンドリングの実用化に向けて，研究開発を進めていきたい．詳細は，<http://www.ritsumeai.ac.jp/se/~hirai/>を参照していただきたい．最後に，常日頃からハンドリングに関する議論に参加していただいている，立命館大学高速高機能ハンドリングコンソーシアムの会員企業の方々に謝意を表す．