

不定形状物体のバイディングにおける 弾性系の変形計算と把持計画方法の提案

○三森友貴 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

1. 緒言

ロボットの正確な運動学情報に依存しない把持計画手法はソフトロボットグリッパに有用である。しかし、これらの手法は一般に計算コストが高く実用的な時間での課題の達成が難しい。これに対して、弾性系側部を対象物に接触させることで緩やかに対象物を拘束するバイディング機構 [1] は、把持物体の位置や姿勢、柔軟性、形状に対してロバストに把持を実現でき、把持計画および把持の安定化制御が単純化される。そのため、自律的な把持計画、把持制御に対する計算コストを緩和することが期待される。

そこで本稿では、バイディングのための、計算コストが比較的低い把持計画手法を提案する。また、提案手法に必要な弾性系の弾性エネルギーの推定を、1次元バネ連接モデルにより実現した。このエネルギー推定方法とシミュレーション結果について報告する。

2. 把持計画法のコンセプト

図1は不定形状の3次元物体を層状に離散化している。各層で2次元のバイディングが成立すると仮定する。このとき、各層においてそれぞれ、バイディング糸を物体に押し付ける際の弾性エネルギーを調べる。さらにバイディング高さによるエネルギーの変化率を調べることで糸の変形を準静的に推定し、適切な初期把持高さを人間の直感を排し力学的に定義する。図2に対象物体の側面形状の例をいくつか示す。実験でバイディングが成功している両側凸な形状や下すばみの逆斜円錐台形状ではエネルギーの極小点が物体側面上、もしくは物体最下点に存在していると仮説を立てた。仮説に基づき、糸が物体側面に留まるような弾性エネルギーの極小値点の位置から把持しやすさの推定、適切な初期把持点の計画を行う。

本稿では、3次元的なバイディング糸のエネルギーの計算方法を考案する前段階として、各層における不定形状な物体断面にさえぎられる形で伸展した弾性糸の弾性エネルギーを推定する方法を提案する。

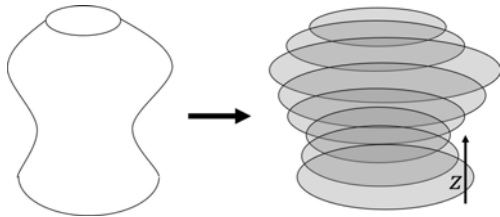


図1 層状に離散化したランダム形状を持つ把持対象物



図2 把持対象物の側面輪郭図の例

3. 不定形状物体断面の2次元 準静的バイディングモデル

不定形状物体の輪郭形状を、回転度1の自己交差の無い閉曲線に限定する。これは、弾性糸の伸びが物体内部の穴や窪みに依存せず、最外部の輪郭形状のみに依存して決定する特性から決定した。

まずは弾性糸が持つ弾性エネルギーについて考える。図3は不定形状物体に対して弾性糸側部を押し付けている図である。弾性糸は固定した $\mathbf{x}_{fi}, \mathbf{x}_{f(i+1)}$ 指の間に張る。このとき弾性糸は物体側部に沿って伸びることによって弾性エネルギーを有している。数値計算により糸の変形をシミュレーションするために、弾性糸を図4のような線形ばねの連接モデルとみなす。糸の元の長さを l_0 、糸の分割数を N 、バネ間の糸の離散点座標を i 番目の指座標 $\mathbf{x}_{fi}$ から $\mathbf{x}_{f(i+1)}$ に向かって $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_{N+1}$ と置くと、弾性エネルギー E_{el} は、

$$E_{el} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} k_d \left(\|\mathbf{q}_{i+1} - \mathbf{q}_i\| - l_0 \right)^2 \quad (1)$$

と表せる。ただし k_d は各離散点間のバネの弾性係数である。

次に糸が物体に接触する際の単方向の拘束を考える。図5は、最小化問題を用いて糸の変形を計算する際の評価関数の拘束を表現する項を説明する図である。最終的に解く最小化問題は、

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & V(\mathbf{q}) = E_{el} + E_c \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{x}_{f(2i-1)} = \mathbf{q}_1, \quad \mathbf{x}_{f(2i)} = \mathbf{q}_{N+1} \end{aligned} \quad (2)$$

である。このとき E_c 項は、接触を考慮した線状物体の動変形モデル [2] における接触拘束と同値な表現方法であるが準静的モデルを対象としたことで最小化問題として書き直されている。評価関数を最小化したときに糸を物体に干渉させないために、物体と糸の離散点座標が重なる場合に値が大きくなるように設計した。物体内部に入るほど評価関数の値が大きくなるようにす

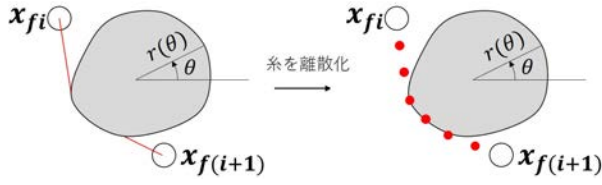


図3 不定形状な物体切断面のための2次元バイディングモデルと糸を離散化した場合

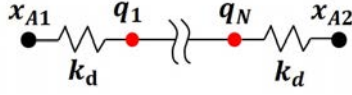


図4 弾性糸のパネ接続モデル

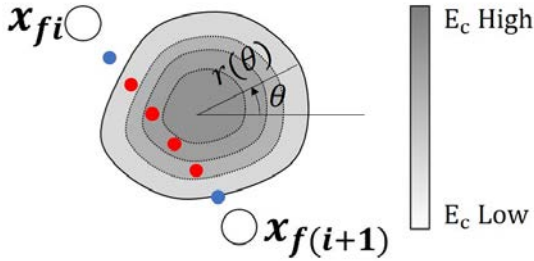


図5 弾性糸の離散点の位置に対するペナルティ項 E_c の値の勾配

るため, α を適当な正値定数として,

$$E_c = \begin{cases} \alpha(\log(1 + e^d) - \log 2) & (r_{th} \leq r_{obj}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$d = r_{th} - r_{obj} \quad (4)$$

と定義する. ただし, 糸の離散点と物体の外形状を極座標で表示したときの動径のうち, 観察したい糸の離散点の偏角に対応した物体外形状の動径 r_{obj} と, 糸の離散点の極座標表示における動径 r_{th} を比較することで, 対象とする糸の離散点が物体の内部にあるかどうかを判定している. このとき, 定数 α に乗じている項は活性化関数の一種であるソフトプラスを $r_{th} = r_{obj}$ 上で $E_c = 0$ となるように平行移動した関数である. これにより物体内外で E_c の値が不連続に変化することを防いだ. また, 式 (2) の等式制約は, 糸の両端点と指の位置を一致させる条件である.

4. シミュレーション

表1は適当な閉曲線で物体形状を与えた場合の糸の変形シミュレーションの結果である.(a) $\mathbf{x}_{f1} = [-2.0, -0.5]$, $\mathbf{x}_{f2} = [2.0, -0.5]$, 物体形状が凸, $N = 10$ を基準に, (b) は指の位置を $\mathbf{x}_{f1} = [-1.5, -0.1]$, $\mathbf{x}_{f2} = [1.5, -0.1]$, (c) は物体形状を凸ではない関数に, (d) は糸の分割数を $N = 50$ に変化させた時のそれぞれの結果を示している.

表1 シミュレーション結果: $k_d = 10[\text{N/m}]$, $\alpha = 1[\text{Nm}]$

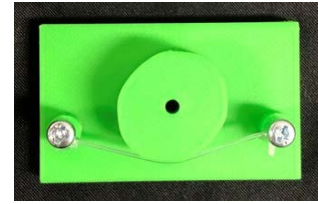
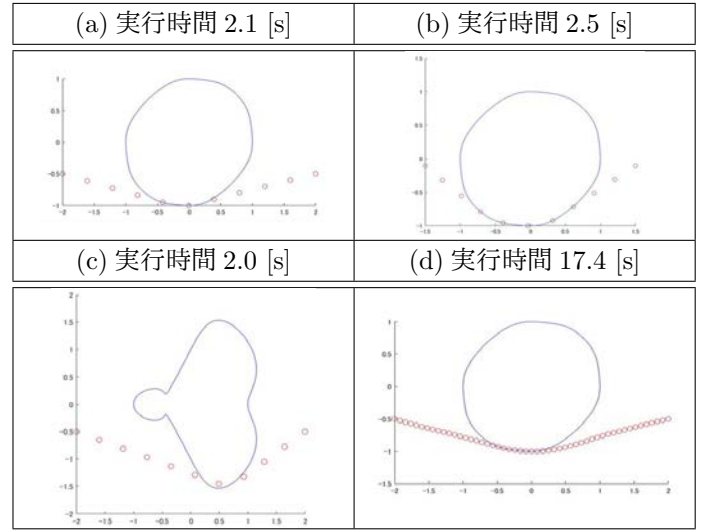


図6 シミュレーションパターン (a) に合わせた指配置と物体形状の場合のシリコン糸の変形

シミュレーション結果より, 提案するシミュレーション方法は様々な指の位置, 複数種類の物体形状に対してあらゆる糸の分割数で弾性糸の変形の準静的な予測とエネルギー値の計算が実現できることが確かめられた.

また, シミュレーションのパターン (a) に合わせた条件でシリコン糸が物体に沿って変形する様子を図6に示す. 観察レベルではシミュレーションと実験で同様の変形を示すことが確かめられた.

5. 結言

本稿では, バイディングの把持計画のための, 把持物体断面上における弾性糸の2次元変形シミュレーションによる弾性エネルギー値推定方法を提案した. また提案手法を用いてシミュレーション実験を行い, 不定形状物体に対して任意の位置に固定された2本の指の間に張った弾性糸の変形を計算できることを確かめた. 今後は, 提案手法で推定した物体断面に対するエネルギー値を用いて初期把持位置を画像情報から計画させることを目指す.

参考文献

- [1] Hisashi Iwamasa, and Shinichi Hirai, "Binding of Food Materials with a TensionSensitive Elastic Thread", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2015, pp. 4298-4303.
- [2] 山崎達也, 若松栄史, 妻屋彰, 荒井栄司, 平井慎一, "接触を考慮した線状物体の動的変形状シミュレーション", 第24回日本ロボット学会学術講演会, 2016年9月14日-16日, 2C22.