

線状物体のモデリングと操作手法

Modeling of Linear Object Deformation and Path Generation for Its Manipulation

寺本亮 (大阪大) 正 若松栄史 (大阪大) 正 白瀬敬一 (大阪大)
 正 荒井栄司 (大阪大) 正 平井慎一 (立命館大学)

Ryo TERAMOTO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Hidefumi WAKAMATSU, Osaka University

Eiji ARAI, Osaka University

Keiichi SHIRASE, Osaka University

Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University, 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

A systematic approach to modeling of linear object deformation and path generation for its manipulation is developed. First, the static deformation of a linear object in 2-dimension is formulated. Secondly, a path generation method for linear object manipulation is proposed. In this paper, it is assumed that the optimal path is derived by minimizing the maximum of the potential energy during its manipulation. Thirdly, the validity of the derived optimal path is demonstrated. Finally, an example of path generation is shown.

Key words: linear object, manipulation, path generation

1. 緒言

生産現場では、ケーブルやコード、ゴム製品、紙や布といった変形しやすい物体も多く存在し、それらを対象として扱う作業も多い。これらの作業は人間が行なっている場合が多く、ロボットによる自動化が望まれている。しかし、現在、そのような柔軟物の操作に対して、一般的な操作手法は確立されていない。そこで本研究では柔軟物として線状物体を扱い、それに対する操作手法を提案する。まず、幾何学的な制約を受ける線状物体の静的変形形状をポテンシャルエネルギーの観点から導出し、それをを用いてマニピュレーション軌道を導出する。次に得られた軌道の有効性を物体の操作性、安全性の観点から検証する。最後に簡単なケーススタディーを示す。

2. マニピュレーション軌道導出手法の提案

2.1 線状物体の静的変形形状解析

本研究では、物体は、静的な状態においてポテンシャルエネルギーが最小になる形状をとるという原理に基づいて、物体の変形形状を導出する。本研究では、作業を2次元に限定しているため、線状物体のねじれは考慮しない。また、重力、物体の塑性変形、物体とハンドなどの環境との摩擦も考慮しない。

以上の条件において、長さ L の線状物体のポテンシャルエネルギーは次式で表される。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L R_f \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds \quad (1)$$

ここで、 R_f は曲げ剛性、 s は物体の中心軸方向に沿った距離である。 (s) は作業空間における固定座標に対する物体座標の回転角である。与えられた制約条件の下で、式(1)で示されるポテンシャルエネルギーを最小とする \mathbf{a} を求めることによって、線状物体の変形形状を導出することが出来る。

(s) を係数ベクトル $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ と基底関数 $\phi = [\phi_0(s), \phi_1(s), \phi_2(s), \dots, \phi_n(s)]^T$ の内積で近似することで、物体の変形形状を求める問題は、ポテンシャルエネルギー $U(\mathbf{a})$ が最小となる係数ベクトル \mathbf{a} を求める問題に帰着される。

$$\begin{aligned} \text{minimize} & : U(\mathbf{a}) \\ \text{subject to} & : g_i(\mathbf{a}) = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m) \\ & h_j(\mathbf{a}) = 0 \quad (j = 0, 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで g_i , h_j は物体に与えられる幾何学的制約を表す。こ

れによって求められた係数ベクトル \mathbf{a} によって線状物体の形状状態を表現することができる。

2.2 マニピュレーション軌道導出手法の提案

次に、物体を操作する際の軌道を導出する。本研究では、物体の損傷、塑性変形や動的変形を回避するために、操作中において、物体の持つポテンシャルエネルギーが極端に大きくならないように物体を操作する。

前述したように、式(2)より係数ベクトル \mathbf{a} を求めることによって物体の形状を求めることができる。今、物体の初期状態と目標状態が既知である場合、前述の係数ベクトル \mathbf{a} を次式で置き換える。

$$\mathbf{a} = (1-k)\mathbf{a}_0 + k\mathbf{a}_1 + k(1-k)\mathbf{b} \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (3)$$

ここで \mathbf{a}_0 , \mathbf{a}_1 はそれぞれ初期状態、目標状態を表す係数ベクトルである。 k は0から1まで動くパラメータであり、 k が0および1の時、それぞれ初期状態、目標状態を表しており境界条件を満たしている。ベクトル \mathbf{b} は係数ベクトル空間内での二点間の道筋を決定するベクトルであると考えられる。つまり、ベクトル \mathbf{b} を様々に変化させることにより、物体の状態の遷移経路を様々に変化させることができる。本研究ではこのベクトル \mathbf{b} を遷移経路生成ベクトルと呼び、パラメータ k を状態遷移パラメータと呼ぶ。

ある \mathbf{b} を決定することによって、ある遷移経路が求められる。そこで本研究では、様々に存在する \mathbf{b} に対して、物体の状態遷移過程でのエネルギーの最大値 $U_{\max}(\mathbf{b})$ が、最も小さくなるような遷移経路生成ベクトル \mathbf{b} を選択する。つまり、以下のようなベクトル \mathbf{b} に関する最適化問題を解くことによって、物体の操作手法を導出する。

$$\begin{aligned} \text{minimize} & : U_{\max}(\mathbf{b}) \\ \text{subject to} & : g_i(\mathbf{b}) = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m) \\ & h_j(\mathbf{b}) = 0 \quad (j = 0, 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

よって、式(4)で求められた \mathbf{b} より、物体に大きなエネルギーを加えずに物体の状態を変化させることができる。

3. マニピュレーション軌道の有効性の検証

以上述べたマニピュレーション軌道についてその有効性を検証する。

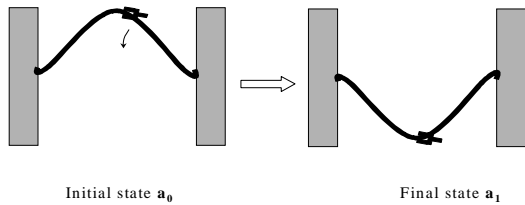
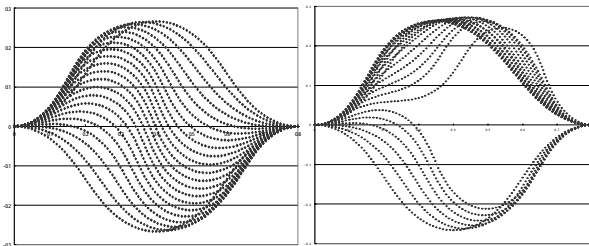


Fig.1 Example of required operation

Fig.1 に示すような両端が固定された長さ L の物体を操作する場合、式(4)より遷移経路生成ベクトル \mathbf{b} を計算機によって導出した。導出した \mathbf{b} を用いて式(3)に示される状態遷移パラメータ k を 0 から 1 まで変化させ、状態遷移過程での物体の形状の移り変わりを求めた(Fig.2(a))。図から明らかのように、初期状態から目標状態まで滑らかに遷移している。

次に、求められた形状の移り変わりにおいて、物体上のある点に注目して、その点が描く位置と姿勢角に従って物体を操作する。物体には両端での制約に加えて、新たな制約が加わり、式(2)によって物体の変形形状を求めることによって、物体の形状の移り変わりを求めることができる。Fig.2(b)にこの形状変化を示す。ここでは、制約を加えた点として物体の左端から $0.2L$ の点を選択した場合を示している。

制約点が $0.2L$ の場合、物体は途中で大きく形状を変化させており、その間では動的な形状変化が生じていると考えられる。



(a) Generated by vector \mathbf{b} (b)Generated by controlling point $P(0.2L)$

Fig.2 Shape transition

Fig.3 に、それぞれのエネルギー変化の様子を示す。ここでグラフの突出した部分が Fig.2(b)における、上に凸の状態から下に凸の状態に突然変化する時に加わるエネルギーである。このように、非常に大きなエネルギーが物体に加わっていることが分かる。

このように、ベクトル \mathbf{b} による滑らかな形状変化をする時は物体には大きなエネルギーが加わらず、この滑らかな形状変化と異なる場合には、物体には非常に大きなエネルギーが加わることが分かった。物体に大きなエネルギーが加わることによって物体を損傷させる可能性が高い。また、この時、物体は動的な変形を生じる可能性がある。動的な変形は、それがいつどのような条件になった時に生じるか予測しにくいいため、物体の操作が困難になる。

よって、遷移経路生成ベクトル \mathbf{b} で表されるような経路に従って物体を動かし、 \mathbf{b} で求められた形状に一致するように物体の形状を制御しながら物体を操作することが有効であると考えられる。 \mathbf{b} で求められた形状に一致するように物体を操作するためには、物体に加える拘束点の位置、つまり、手で把持する位置と把持数が問題となる。この例では把持位置を $0.5L$ の点にした場合、Fig.2(a)に示される形状と一致した。

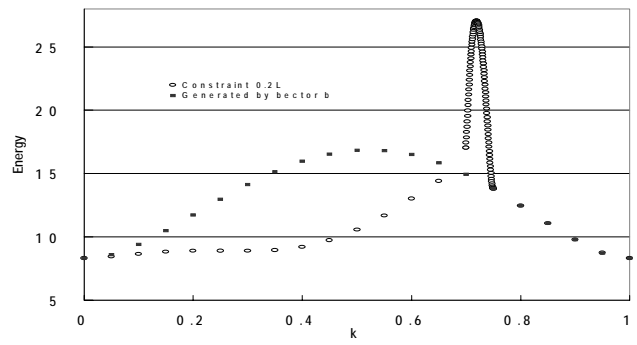
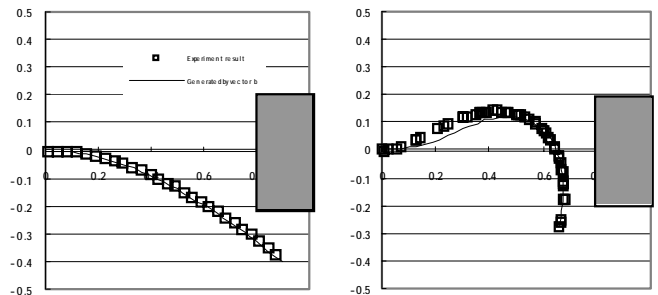


Fig.3 Relationship between shape transition and energy

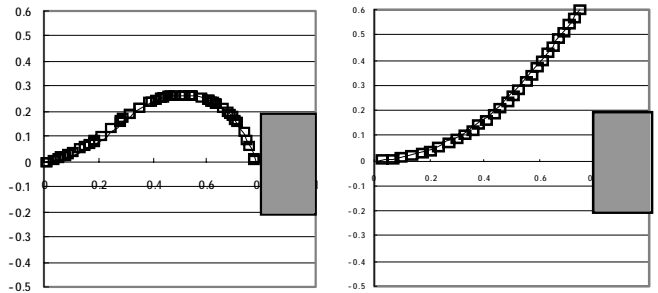
5. ケーススタディ

次に簡単なケーススタディとして、左端が固定端で右端が自由端の線状物体を、障害物が存在する環境で操作する場合を示す。Fig.4 に遷移経路生成ベクトル \mathbf{b} による形状変化と、右端を把持した場合の実験による変形形状の変化を示している。これによると、物体は滑らかな軌道を描きながら目標状態に達している。



(a) Initial state

(b) $k=0.5$



(c) $k=0.6$

(d) Final state

Fig.5 Shape variation comparison experiment result

4. まとめ

線状物体の 2 次元平面内での変形形状をモデル化し、マニピュレーション軌道の導出手法についての提案を行った。提案したマニピュレーション軌道の妥当性について、物体の操作性、安全性の観点から述べた。簡単なケーススタディを用いてマニピュレーション軌道を導出し、実験結果と比較した。

参考文献

1)若松栄史, 荒井栄司, 小林正樹, 平井慎一: 線状物体のマニピュレーションにおける動的変形の解析, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会(1996)