線状物体のマニピュレーションにおける把持点決定手法

○丸山剛史(大阪大学)　若松栄史(大阪大学)　森永英二（大阪大学）
荒井栄司(大阪大学)　平井慎一(立命館大学)

Determination of Grasping Points for Linear Object Manipulation

*Takeshi MARUYAMA(Osaka Univ.), Hidefumi WAKAMATSU(Osaka Univ.),
Eiji MORINAGA(Osaka Univ.), Eiji ARAI(Osaka Univ.), Shinichi HIRAI(Ritsumeikan Univ.)

Abstract －A method to determine grasping points for linear object manipulation to realize its adequate deformation is proposed. First, a method to derive an adequate transition of the object shape from the initial to the final state, referred to as a deformation path, is proposed.　It can be derived by minimizing the maximum potential energy during deformation.　Next, a method to determine position of grasping points which realize the deformation path as much as possible is proposed.　They can be derived by averaging forces needed to maintain the deformed shape at each point.

***Key Words*:** Manipulation, Planning, Deformable linear object, Deformation path, Trajectory, Grasping point

1. 緒論

様々な生産現場において、ロボットは不可欠な存在となっている。しかし、電線等の線状物体を扱う作業に関しては人間が行っているものも多く、自動化が望まれている。線状物体の適切な変形形状の移り変わりを導出し、その通りにマニピュレーションを行うことが可能になれば、上記作業の自動化の助けとなると考えられる。

線状物体のマニピュレーション軌道導出に関する研究として、Zhengらは変形しやすい軸を穴に挿入する作業に対して、くいつき現象が生じないようなマニピュレーション軌道を導いている[1]。Mollらは、エネルギーが最小になる曲線の集合で、三次元の線状物体の初期形状から最終形状までの軌道を表現している[2]。

本研究では、まず、線状物体の適切な変形形状の移り変わりを導出する手法を提案する。次に、得られた変形形状の移り変わりを実現するために必要な把持点を導出する手法について提案する。

2. 線状物体の目標変形経路の導出

2.1 線状物体の表現方法

本研究では二次元平面内での線状物体について考える。線状物体の長さを L、物体に沿った長さを s、x 軸からの角度$\theta(s)$、曲げ剛性を R_f とする。このときの物体のポテンシャルエネルギーは次式で表される。

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

θ(s)を基底関数 $e_i(s)$の線形和を用い次式で表す。

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n} a_i e_i(s) = \boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{e}(s) \qquad (2)$$

ここで、$\boldsymbol{a}$ は係数ベクトルである。このときポテンシャルエネルギーU は係数ベクトル $\boldsymbol{a}$ の関数となる。ポテンシャルエネルギーU が最小となるような $\boldsymbol{a}$ を求めることにより、物体の安定な変形形状が得られる。

2.2 目標変形経路の導出

変形形状の移り変わり（本研究では変形経路と呼ぶ）は以下の $\boldsymbol{a}$ を用いて表すことができる。

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_0(1-k) + \boldsymbol{a}_1 k + \sum_{i=1}^{n} k^i (1-k)\mathbf{b}_i \qquad (3)$$

ここで、$\boldsymbol{a}_0$ は初期形状、$\boldsymbol{a}_1$ は目標形状を表す係数ベクトルであり、$k\,(0\leqq k\leqq 1)$は状態の移り変わりを表すパラメータである。また、$\boldsymbol{b}_i(i=1,\cdots,n)$を経路ベクトルと呼ぶ。本研究では、物体に過度な変形を与えないようにするために、変形中のポテンシャルエネルギーの最大値が最小となるような経路ベクトル $\boldsymbol{b}$ を最適化計算により求める。この手法により得られる $\boldsymbol{a}$ から適切な変形経路が得られる[3]。

3. 把持点の位置の決定方法

前章の手法により、ある初期形状から最終形状までの変形経路を導出することが可能である。しかし、これは把持点の位置を考慮していない。本章では適切な変形経路に近い形状を、できるだけ少ない把持点で得るための手法を提案する。

3.1 ある点での形状を維持するのに必要な力

把持点間の形状を維持するために把持点に必要な力を考える。Fig.1 において、ある点 $P_i(s)$に関してモーメントの釣り合いを考えると、以下の式が得られる。

$$R_f \frac{d}{ds}\theta_i - M_0 + F_{xi} y_i - F_{yi} x_i = 0 \qquad (4)$$

ここで、M_0 は物体左端でのモーメント、F_{xi}、F_{yi} は物体左端にかかる x および y 方向の力、θ_i、x_i、y_i は点 $P_i(s)$ での角度、および座標値であるとする。式(4)は以下のように表現できる。

$$\alpha_i F_{xi} + \beta_i F_{yi} + \gamma_i = 0 \qquad (5)$$

式(5)は点 $P_i(s)$ での変形を維持するために必要な力 F_{xi} と F_{yi} の関係を与えている。把持点間が安定形状なら、どの点でも同じ力が必要となり、各点から得られる式(5)によって表わされる直線（これを把持力直線と呼ぶ）を F_x-F_y 平面上にプロットすると、全ての直線は一点で交わる。不安定な形状の場合には、各点において必要な F_x、F_y が異なるため、把持力直線は一点では交わらないと考えられる。

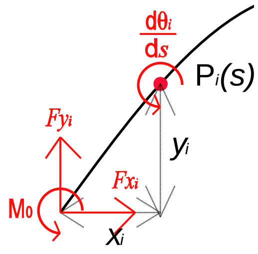

Fig.1 紐にかかる力とモーメント

3.2 把持すべき点

両端の間が不安定な形状な場合、与えられた形状になるべく近い安定形状を実現するためには、式(5)によって表わされるすべての把持力直線からの距離の二乗和が最小になる点での F_x、F_y で両端を把持すればよいと考えられる。しかし、両端しか持たない場合には形状の誤差が大きくなる場合もあるため、他に把持点が必要である場合も多いと考えられる。本節では、両端間に一点把持点を取る場合について考察する。

把持点を取る場合も、上記の点と直線の距離の考え方を導入する。まず、ある把持点で紐を 2 本に分割し、それぞれの紐に関して把持力直線からの距離の二乗和が最も小さくなる２点での F_{x1}、F_{y1}、F_{x2}、F_{y2} で左右側の紐を把持すればよいと考えられる。例えば、Fig.2 のように両端間の距離を 0.6L に、s=0.5L における角度θを 0.3rad に拘束した紐について考える。本手法により、様々な点を把持点とし、把持力直線からの距離の二乗和を計算した結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より、s=0.5L の位置を把持した時、二乗和が最小になることがわかる。紐の形状は、s=0.5L の位置を拘束して作成したものであるため、s=0.5L の位置で把持すべき、という結果は妥当であると考えられる。この時の把持力直線を Fig.4 にしめす。図からわかるように、紐の左側も、右側もそれぞれが 1 点の近くで交わっており、この結果からも s=0.5L で把持することが安定性が高いということがわかる。

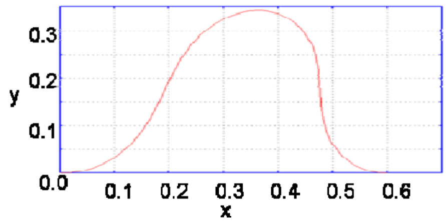

Fig.2 紐の形状

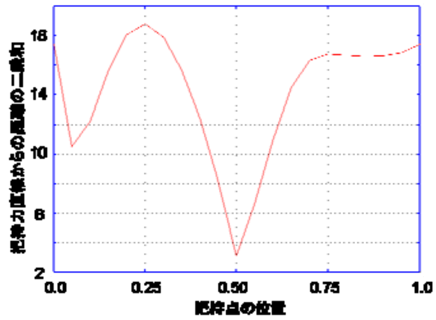

Fig.3 把持点の位置と、把持力直線からの距離の二乗和の関係

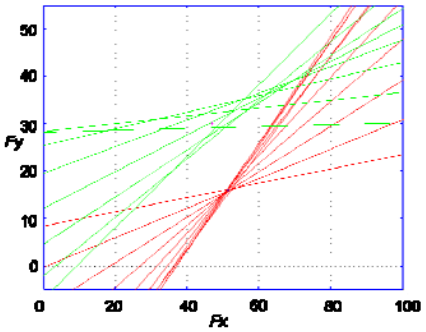

Fig.4 s=0.5L で把持した時の把持力直線

4. 結論

本研究では、ある形状が与えられた時に、もっとも誤差が少なくなると考えられる把持点を与える手法を提案した。このような手法を変形経路中の各形状に対して適用することで、変形経路を実現するために必要な把持点の位置および軌道を導出することができると考えられる。

参 考 文 献

[1] Y.F.Zheng, R.Pei and C.Chen, “Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects”, Proceedings IEEE International Conference Robotics and Automation ,2352-2357, 1996

[2] M.Moll L.E. Kavrake, “Path Plannning for Minimal Energy Curves of Constant Length”, Proceeding IEEE International Conference Robotics and Automation, 2826-2831, 2004

[3] 藤山次郎，若松栄史，妻屋　彰，荒井栄司，線状物体操作のためのマニピュレータ軌道導出手法，第 24 回日本ロボット学会学術講演会，1D11，2006