

接触を考慮した線状物体の動的変形形状シミュレーション

○山崎達也 (大阪大学) 若松栄史 (大阪大学) 妻屋彰 (大阪大学)

荒井栄司 (大阪大学) 平井慎一 (立命館大学)

Dynamic simulation of the linear objects considering contact

* Tatsuya YAMASAKI (Osaka Univ.), Hidefumi WAKAMATSU (Osaka Univ.),

Akira TSUMAYA (Osaka Univ.), Eiji ARAI (Osaka Univ.),

Shinichi Hirai (Ritsumeikan Univ.)

Abstract — This paper describes the dynamic modeling of linear object deformation considering contact with obstacles. Deformable linear objects such as cables and strings are widely used in our daily life, some industries, and medical operations. Modeling, control, and manipulation of deformable linear objects are keys to many applications. In this paper, we apply differential geometry coordinates to the dynamic modeling of linear objects. First, we formulate dynamic 2D deformation of an inextensible linear object based on a differential geometry coordinate system. Next, we model contact of a linear object with a circular obstacle. It can be applied to self-contact of the linear object. Finally, we show simulation results using the proposed modeling technique.

Key Words: Deformable Linear Object, Dynamic Deformation, Contact, Simulation

1. 緒論

生産現場では、ケーブル・コードなどの線状物体を対象とする作業も少なくないが、線状物体は変形特性が複雑で予測しにくいために操作が失敗しやすく、また線状物体を用いた生産物の設計も難しい。その例として Fig.1 に示すような意匠撚糸が挙げられる。意匠撚糸は、種類の異なる糸を2本以上使用し、これらの糸の給糸速度や、撚数などを変化させることにより糸の途中にループなどの飾りをつけた糸で、高級婦人服やインテリアなどに使用されている。しかし、撚糸条件と出来上がった糸の形状との関係は明らかでなく、経験に頼った製造が行われている。糸同士の自己干渉やそれによる摩擦、遠心力などを考慮した線状物体のシミュレーションが可能になれば、複雑な形状の意匠撚糸を思いどおりに製造することが可能になると考えられる。

弾性を前提としない柔軟物体のモデリング手法としては、蛭原らが線状物体を質量・慣性を有する非弾性受動関節リンクでつながれた多リンク系としてモデル化することを提案している。¹⁾

本研究では、線状物体を複数の円弧の連結で表し、円形障害物や線状物体自身との接触を考慮した二次元空間内での動的変形形状を予測する。



Fig.1 意匠撚糸の例

2. 線状物体の幾何形状表現と運動方程式の導出

2.1 線状物体の幾何形状表現

局所的な変形形状を表現するため線状物体を等間隔に分割し n 個の線分の集合体として表現し、各節点での水平面とのなす角度 ($i=0, \dots, n$) に着目して表現する。個々の線分は外力等により、一定の曲率を持つ円弧に変形すると仮定し、これらの集合として線状物体の変形を表す。

2.2 運動方程式の導出

前述の表現手法を用いて定式化されたポテンシャルエネルギーを U 、運動エネルギーを T 、接触などの外力による仕事を W とし、ラグランジアン $L = T - U - W$ を定めると、ラグランジュの運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_r} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_r} = 0 \quad (r=0, \dots, n) \quad (1)$$

この式を変形することによって、次の式のように $\ddot{\theta}$ を θ と $\dot{\theta}$ に関する式で表現することができる。

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(X\dot{\theta} + Y\dot{\theta} - K\theta) \quad (2)$$

ただし $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ である。ここで、 M, X, Y は物体の現在の形状に依存する行列であり、 K は物体の曲げ剛性によって一意に求まる。

上の式よりルンゲクッタ法等を用いて線状物体の動的変形形状を求めることができる。

3. 接触における相互作用のモデル化

3.1 円形障害物との接触

本章では線状物体と空間内に存在する円形障害物との接触のモデル化について述べる。

線状物体が障害物に接触した場合、Fig.2(a)のように、線状物体の障害物へのくいこみ量 \mathbf{a} を仮定し、 \mathbf{a} に対応した次のような反発力 \mathbf{f} が線状物体に働くものとする。

$$\mathbf{f} = -\mathbf{k}\mathbf{a} - \mathbf{b}\dot{\mathbf{a}} \quad (3)$$

ここで \mathbf{k}, \mathbf{b} は、それぞれ線状物体と障害物との相互作用をばね・ダンパ系にモデル化したときのばね定数、減衰定数と見ることができる。

このとき反発力 \mathbf{f} によって物体に働く仕事 \mathbf{W} を考慮したラグランジュの運動方程式を解くことによって動的変形形状を導出する。Fig.3 に計算例を示す。

3.2 線状物体自身との接触

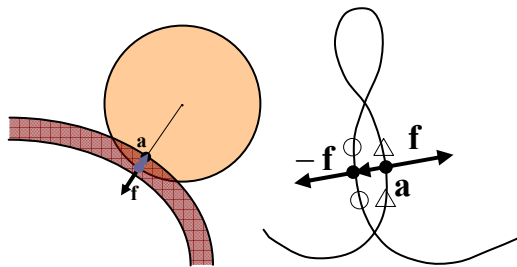
障害物との接触における相互作用の考え方と同じように、線状物体同士が接触した場合、Fig.2(b)のように、線状物体のくいこみ量 \mathbf{a} を仮定し、 \mathbf{a} に対応した(3)式のような反発力 \mathbf{f} が線状物体に働くものとする。ただし、自己干渉の場合には、線状物体の干渉部分の双方に相反する力が作用するものとする。Fig.4 に計算例を示す。

6. 結論

本研究では、線状物体が円形障害物や線状物体自身と接触したときの相互作用をばね・ダンパ系でモデル化し、それに関する項を加えたラグランジュの運動方程式を解くことにより、線状物体の動的変形形状を導出する手法を提案した。

参考文献

- 1) 蛭原裕治, 鈴木崇裕, 鈴木高宏, “超柔軟マニピュレータの投射駆動法の解析”, 第23回ロボット学会学術講演会 (2005).



(a)障害物との干渉 (b)自己干渉

Fig.2 接触における相互作用

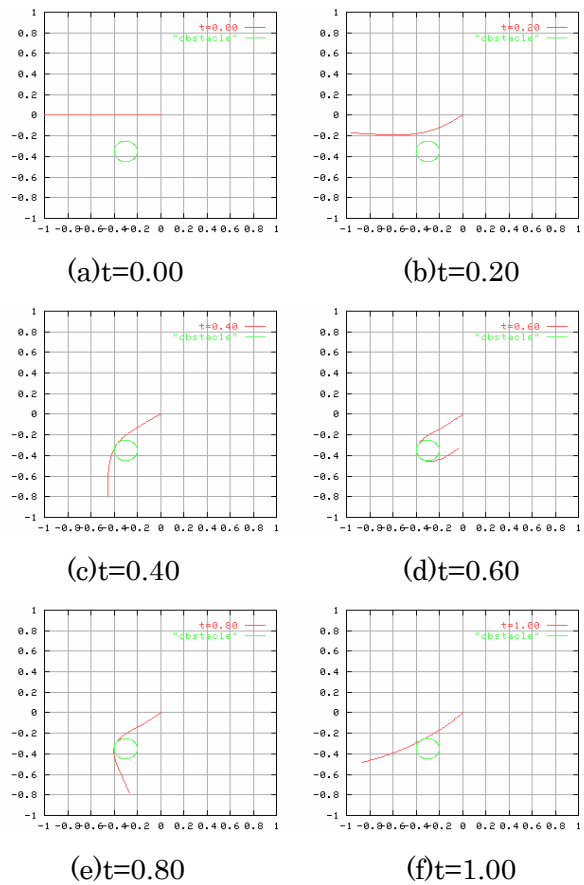


Fig.3 障害物との接触のシミュレーション

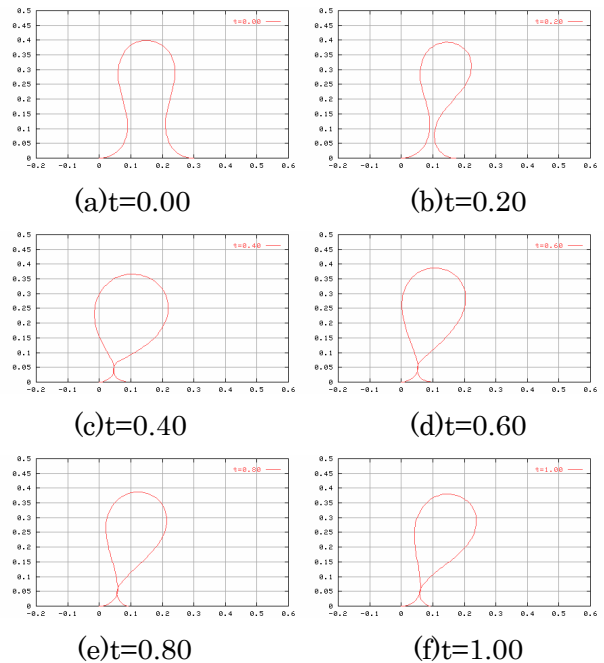


Fig.4 線状物体自身との接触のシミュレーション