

柔軟な帯状物体の動的モデルパラメータの逐次推定

Sequential estimation of dynamic model parameter of a flexible cable

○高垣 祐介 (立命館大学) 平井 慎一 (立命館大学)

Yusuke TAKAGAKI, Ritsumeikan University

Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

This paper presents the modeling of flexible cable. Recently, the application of automatic industrial robots in line production gives advantages in high speed and high precision of operation. However, the deformable objects such as flexible cable are done manually by human. There are problems to automate the operation of the flexible cable. Firstly, it has the unique deformation in every parts of the cable. Secondly, the tip of flexible cable draws different orbit compared to the motion of rigid body. In this paper, the mathematical model of flexible cable based on Voigt Model is explained. Next, the method of parameters identification is described. Finally, the comparison between the actual deformation and simulation were carried out for the verification of the proposed method.

Key Words: Flexible cable, Flexible Parts Conveyance, Flexible

1. 緒言

従来、産業用ロボットが広く使われており、様々な分野の製造工程における省人化、自動化が進んでいる。しかしながら、ケーブルなどの柔軟物を取り扱う工程は依然として手作業で行われているのが現状である。産業用ロボットでは様々な物体操作を行うが、これらの多くは剛体物を取り扱うものであった。なぜならば、剛体の場合は対象物が把持機構の運動と同様の運動を行うため、対象物の形状を考慮するだけで、頂点位置などの情報を指定するのが容易なので、ロボットの制御のみで操作が可能だからである。一方、柔軟物の場合、材質特性、形状や個体差により、対象物の先端が把持機構の運動とは異なった軌道を描いたり、全体の形状が変化するという事象が発生し、対象物操作を困難にしている。柔軟物をロボットで扱う場合は、操作中における柔軟物の形状変化を把握する必要がある。連続で形状変化を把握する手段として、高速カメラなどの視覚センサによるフィードバックをリアルタイムで行う方法がある。しかし、これらの形状変化を動作処理に反映させるためには、生産ライン毎にカメラと情報処理用のPCを必要とする。一方で、柔軟物を任意の位置に誘導するためのレーンや型を設けることによって、柔軟物の特性である粘弾性を考慮せずに操作する方法が実際の製造工程で採用されている。しかし、このような設備は非常に大型であり、費用が膨大になる。また、現在の主流になりつつあるセル生産方式とは異なり、工程が1箇所集中することによるリスクが高くなる。さらに、設備自体がレーンや型に合致する種類の柔軟物のみに限られてしまう。その結果、産業用ロボットの多くが操作が容易な剛体物を取り扱う限定的な工程で配備され、柔軟物を取り扱う工程を手作業で行うという負担がなされてきた。そこで、本研究では、小規模な作業現場で柔軟物を取り扱うロボットのために、操作の前段階で視覚センサによる静的な形状情報から柔軟物の弾性を算出する手法を採用する。さらに物体を運動させ、そこから柔軟物を受ける固有の粘性を算出することで高コストの技術を使用することなくフラットケーブルの自動化を実現することを目指す。

本報告では、フラットケーブルを対象とし、フラットケーブルのモデリングとその変形パラメータの推定について述べる。

2. フラットケーブルモデリング

2.1 フラットケーブル

本研究では、線密度 0.00744 g/mm、幅 17 mm、厚さ 0.1 mm のケーブルを用いる。図 1 にケーブルを示す。

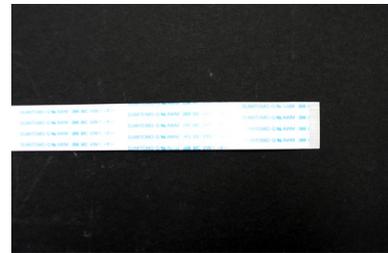


Fig. 1 Flat cable

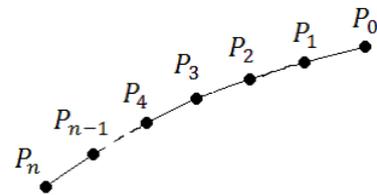


Fig. 2 Cable model

2.2 ケーブルモデル

本報告では、静止形状と動的な形状変化のシミュレーションについて述べる。質量 M 、長さ L のケーブルを、 n 個の質点と質点を結ぶ稜線で構成するパーティクル法でケーブルをモデリングする。ケーブルの変形形状を再現するために質点にフォークトモデルがあると仮定する。図 2 にケーブルのモデル概要を示す。ケーブルの各質点の位置を $P_i = [x_i, y_i]^T$ 、弾性係数を K_i 、質点の質量を $m = M/n$ 、重力加速度を g とする。運動エネルギー T ならびに弾性エネルギー U_k 、位置エネルギー U_p は

$$T = \frac{1}{2} m \sum_{i=0}^n (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2), \quad (1)$$

$$U_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} K_i \phi_i^2, \quad (2)$$

$$U_p = mg \sum_{i=0}^n y_i \quad (3)$$

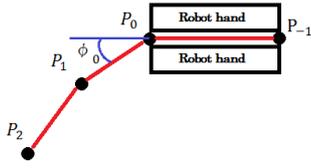


Fig. 3 Robot hand

と表すことができる。角度 ϕ_i は把持位置から i 番目の区間稜線と $i-1$ 番目の区間の稜線の延長線がなす角度であり、

$$\phi_i = \text{ATAN2}(X_i, Y_i) - \text{ATAN2}(X_{i-1}, Y_{i-1}), \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, n-1)$

と表すことができる。ただし、

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

とする。フラットケーブルは伸びにくいいため稜線の長さ L が一定であると仮定する。そのため位置ベクトルの成分 x_i ならびに y_i は、ホロノミックな幾何制約

$$R_i(x_i, x_{i+1}, y_i, y_{i+1}) \triangleq \{X_i^2 + Y_i^2\}^{\frac{1}{2}} - L = 0 \quad (6)$$

を満たさなければならない。ホロノミック制約を有する系のラグランジアンは

$$\mathcal{L} = T - U_k - U_p + \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i R_i(x_i, x_{i+1}, y_i, y_{i+1}) \quad (7)$$

と表される。ここで λ_i はラグランジュの未定乗数である。

次に図3にロボットハンドとケーブルを示す。ロボット位置を $P_{-1} = [x_{-1}, y_{-1}]^T$ とすると

$$\phi_0 = \text{ATAN2}(X_0, Y_0) - \text{ATAN2}(X_{-1}, Y_{-1}) \quad (8)$$

となる。 P_0 の質点にケーブルと同じフォークトモデルがあると仮定する。フォークトモデル部分のみのラグランジアンは

$$\mathcal{L}_0 = -\frac{1}{2} K_0 \phi_0^2 \quad (9)$$

となる。式(1), 式(2), 式(3), 式(9)よりラグランジアンは

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2} m \sum_{i=0}^n (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} K_i \phi_i^2 - mg \sum_{i=0}^n y_i \quad (10) \\ & + \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i R_i(x_i, x_{i+1}, y_i, y_{i+1}) \end{aligned}$$

となる。よって、ラグランジュの運動方程式を導出し、粘性

係数 C_i で表されるダンパー項を加えると

$$m\ddot{x}_i = \begin{cases} -\lambda_0 X_0 P_0 - Y_0 P_0^2 (K_0 \phi_0 - K_1 \phi_1) + C_0 \dot{x}_0 & (i=0) \\ \lambda_{i-1} X_{i-1} P_{i-1} - \lambda_i X_i P_i \\ + Y_{i-1} P_{i-1}^2 (K_{i-1} \phi_{i-1} - K_i \phi_i) \\ - Y_i P_i^2 (K_i \phi_i - K_{i+1} \phi_{i+1}) + C_i \dot{x}_i & (i=1, 2, \dots, n-2) \\ \lambda_{n-2} X_{n-2} P_{n-2} - \lambda_{n-1} X_{n-1} P_{n-1} \\ + Y_{n-2} P_{n-2}^2 (K_{n-2} \phi_{n-2} - K_{n-1} \phi_{n-1}) \\ - Y_{n-1} P_{n-1}^2 K_{n-1} \phi_{n-1} + C_{n-1} \dot{x}_{n-1} & (i=n-1) \\ \lambda_{n-1} X_{n-1} P_{n-1} + Y_{n-1} P_{n-1}^2 K_{n-1} \phi_{n-1} & (i=n) \end{cases} \quad (11)$$

$$m\ddot{y}_i = \begin{cases} -\lambda_0 Y_0 P_0 + X_0 P_0^2 (K_0 \phi_0 - K_1 \phi_1) + mg + C_0 \dot{y}_0 & (i=0) \\ \lambda_{i-1} Y_{i-1} P_{i-1} - \lambda_i Y_i P_i \\ - X_{i-1} P_{i-1}^2 (K_{i-1} \phi_{i-1} - K_i \phi_i) \\ + X_i P_i^2 (K_i \phi_i - K_{i+1} \phi_{i+1}) + mg + C_i \dot{y}_i & (i=1, 2, \dots, n-2) \\ \lambda_{n-2} Y_{n-2} P_{n-2} - \lambda_{n-1} Y_{n-1} P_{n-1} \\ - X_{n-2} P_{n-2}^2 (K_{n-2} \phi_{n-2} - K_{n-1} \phi_{n-1}) \\ + X_{n-1} P_{n-1}^2 K_{n-1} \phi_{n-1} + mg + C_{n-1} \dot{y}_{n-1} & (i=n-1) \\ \lambda_{n-1} Y_{n-1} P_{n-1} - X_{n-1} P_{n-1}^2 K_{n-1} \phi_{n-1} + mg & (i=n) \end{cases} \quad (12)$$

が得られる。ただし、

$$P_i = \{X_i^2 + Y_i^2\}^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

である。

2.3 制約安定化法

制約安定化法 (constraint stabilization method) は、ホロノミックな幾何制約を有する常微分方程式の解を数値的に計算する方法である [1]。制約安定化法では幾何制約が 0 に収束するように、幾何制約の臨界減衰を表す微分方程式

$$\ddot{R}_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) + 2\nu \dot{R}_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) + \nu^2 R_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) = 0 \quad (14)$$

を導入する。ここでの ν は角周波数を表す正の定数である。上式は臨界減衰を与えるので、たとえ数値計算の過程で幾何制約 $R_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1})$ が破られても制約の値は再び 0 に収束し、結果的に制約式が保たれる。式(6)を式(14)に代入すると

$$\begin{aligned} & R_{jx_j} \ddot{x}_j + R_{jx_{j+1}} \ddot{x}_{j+1} + R_{jy_j} \ddot{y}_j + R_{jy_{j+1}} \ddot{y}_{j+1} \\ & + \{(v_{x_j} - v_{x_{j+1}})^2 + (v_{y_j} - v_{y_{j+1}})^2\} P_j \\ & - \{X_j (v_{x_j} - v_{x_{j+1}})^2 + Y_j (v_{y_j} - v_{y_{j+1}})^2\} P_j^3 \\ & + 2\nu \{X_j (v_{x_{j+1}} - v_{x_j}) + Y_j (v_{y_{j+1}} - v_{y_j})\} P_j + \nu^2 R_j \\ & = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。ただし R_{jx_j} と R_{jy_j} は制約式 R_j の x_j と y_j に関する偏微分を表す。以上より、式(11), 式(12), 式(15)にルンゲ・クッタ法を用いることで、状態変数 $x_i, y_i, v_{x_i}, v_{y_i}$ の値を数値的に求めることができる。

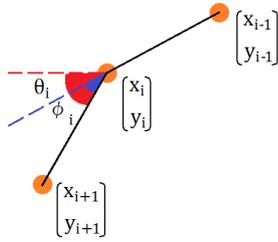


Fig. 4 Cable angle

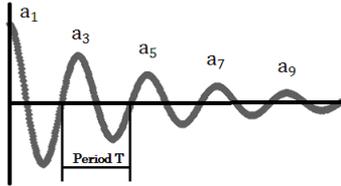


Fig. 5 Free vibration

3. パラメータの同定

3.1 弾性係数の同定

弾性係数は、モデリングにあるフォークトモデルのバネ部分の弾性を表す。このパラメータを同定することによりケーブルの静止形状や減衰振動時の先端の振動数を実測値に近づけることができる。同定には、図4に示す、静止形状におけるケーブルを n 等分する稜線間角度から釣り合いの式

$$K_i = \frac{mgL}{\phi_i} \sum_{i=1}^n (n-i) \cos \theta_j \quad (16)$$

を用いて算出する。

3.2 粘性係数の逐次推定

次に粘性係数の同定方法について説明する。ケーブルを先端から 100 mm の位置で把持し、水平方向に 30 mm 動かした後の把持位置から i 番目の質点から見た $i+1$ 番目の質点の自由振動を測定することで粘性係数を同定する。図5より振動の山に着目して隣り合う振幅の大きさを $a_1, a_3, \dots, a_i, a_{i+2}$ で表す。周期を T 、粘性減衰係数を c_j 、単位質量あたりの粘性減衰係数を ϵ_j とする。各振幅の間には

$$e_j^{\epsilon T} = \frac{a_i}{a_{i+2}} \quad (17)$$

なる関係があり

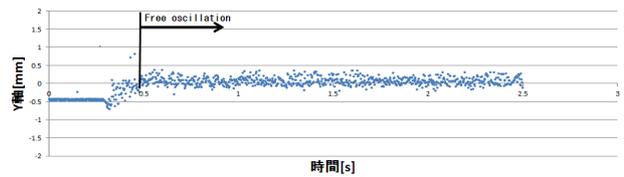
$$\epsilon_j = \frac{\ln e_j^{\epsilon T}}{T} \quad (18)$$

と

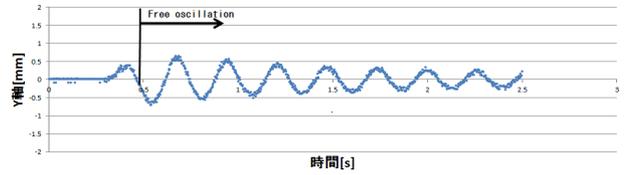
$$c_j = 2m\epsilon_j \quad (19)$$

から粘性係数 c_j が計算できる。実際のケーブルの把持位置から i 番目の質点から見た $i+1$ 番目の質点の自由振動を図6に示す。

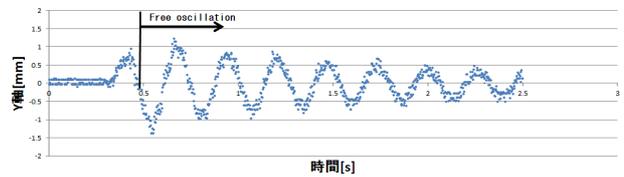
把持位置から i 番目の質点から見た $i+1$ 番目の質点の自由振動を測定することでそれぞれの質点ごとの減衰振動を算出することができた。図6(a)の先端から2番目の質点に関しては振動が微小であるため粘性係数を算出が困難である。そのため本研究では2番目の質点の粘性係数は3質点目の粘性係数と同じにしている。



(a) 2nd free oscillation



(b) 6th free oscillation



(c) 11th free oscillation

Fig. 6 Free vibration result

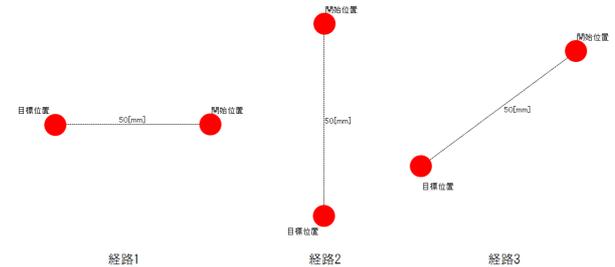


Fig. 7 Path

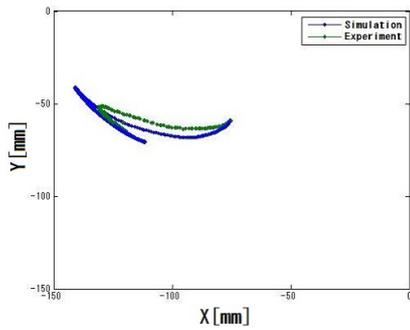
4. 検証実験

4.1 実験概要

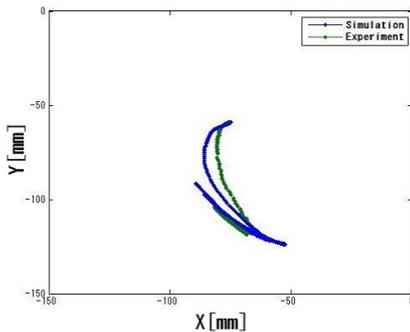
検証実験では、ケーブル4本に対し、パラメータ同定後に三種類の経路の操作をシミュレーションして実際のケーブルとの軌跡を比較、検証する。まずケーブル先端から 100 mm の位置をロボットハンドで把持し、粘弾性パラメータの同定シミュレーションをする。最後に撮影画像とシミュレーションとを比較する。経路1、経路2はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向に -50 mm 移動する経路であり、経路3は根元と先端を結ぶ直線方向に 50 mm 移動する経路である。

4.2 実験結果

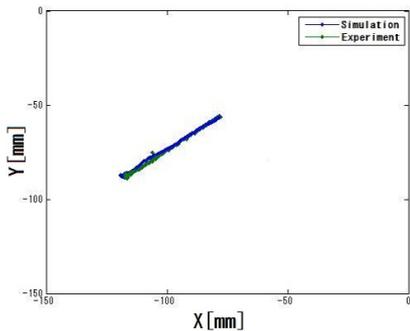
図8にそれぞれ経路1、経路2、経路3の先端軌跡を示す。



(a) Path 1



(b) Path 2

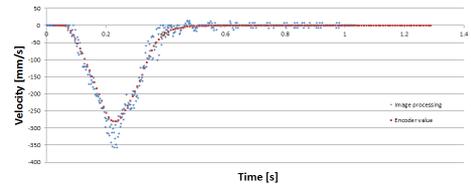


(c) Path 3

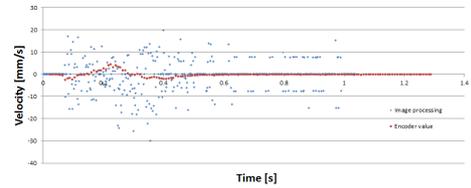
Fig. 8 Simulation result

4.3 実験考察

図 8(a), 図 8(b) に示すとおり, 水平方向に 50 mm, 垂直方向に 50 mm の場合の軌跡では, シミュレーションと実際との先端軌跡の誤差が大きい. これはエンコーダ値の速度と画像処理で算出した速度との誤差が原因と考えられる. 水平方向に移動時のロボットのエンコーダ値から算出した速度と画像処理から算出した速度を図 9 に示す. また, 図 10 に水平方向に 50 mm 移動時のロボットのエンコーダ値から算出したロボットの動作経路と今回のシミュレーションに使用している画像処理から算出した動作経路を示す. 図 10 からわかるとおりエンコーダ値と画像処理との誤差が x 軸方向に -2.70 mm, y 軸方向に -0.59 mm の誤差が出ている. 図 10, 図 9 より実際の経路, 速度と大きな差があることがわかる. このためシミュレーションと実際の動きに誤差が出ていると考えられる. 図 8(c) では振動が少ない経路でシミュレーションを行ったため大きな誤差が生まれなかったと考えられる.



(a) X velocity



(b) Y velocity

Fig. 9 Velocity

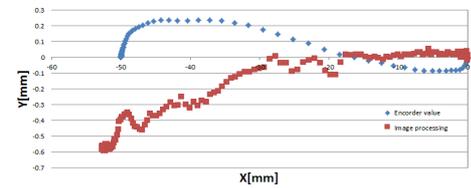


Fig. 10 Robot path

5. 結言

本研究では柔軟帯状物体のモデリングおよび, 粘弾性係数の同定方法を提案し, 同定した粘弾性係数を用いてシミュレーションを行い, シミュレーションと撮影した実際のケーブルを比較した. 今回は, 長さ 100 mm のケーブルを分割数 10 でシミュレーションした. ケーブルの分割数を増やすことでシミュレーションがどうなるかは分かっていない. そのため, ケーブルの様々な分割数でシミュレーションをし, 分割数を明確にする必要がある. また, ロボットハンドの速度を画像処理プログラムで算出していることで誤差が生じている. これを解決するためにはロボットのエンコーダ値から速度を算出することで速度の誤差を減らす必要がある.

文献

- [1] 平井 慎一 著: "機械システム学のための数値計算法", コロナ社
- [2] 青山 貴伸 著: "使える! MATLAB/Simulink プログラミング", 講談社サイエンティフィク
- [3] William.H.Press, Saul.A.Teukolsky, William.T.Vetterling, Brian.P.Flannery 著: "Numerical Recipes in C [日本語版] (丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠訳)", 株式会社技術評論社