柔軟帯状物体の最適化手法を用いた力学パラメータ同定

○高垣祐介 (立命館大) 大庫辰哉 (立命館大) 平井慎一 (立命館大)

1. 緒言

近年，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，生産自動化が進んでいる．しかしながら，生産自動化における課題の一つとしてフラットケーブルをはじめとする柔軟に変形する帯状部品を取り扱う組み立て工程の自動化が挙げられる．柔軟帯状物体に関してはこれまでに，微分幾何学に基づく帯状柔軟物体の変形モデリングと結び動作のマニピュレーション [4] や準静的状態下でのケーブルのハンドリング [5]，センサ情報に基づいた位相モデルを用いた柔軟な紐の操作 [6] などの研究が行われている．また，製造業指向の研究では，ケーブルの特性を用いた自動車生産ラインにおけるワイヤーハーネスの自動取り付け [7] や，3 次元計測システムと産業用ロボットを用いたコネクタケーブルを取り扱う生産用ロボットシステムの開発 [8] などの研究が行われており，これらは柔軟帯状物体を扱う組み立て工程の自動化を目的としている．

そこで，我々は小規模な作業現場で柔軟物を操作するロボットとして，操作の前段階で視覚センサによる静的形状情報から柔軟物の弾性を算出，さらに物体の動的変形情報から粘性を算出することでフラットケーブルの自動化を目指してきた．しかし，この手法はある限られた経路やケーブルにおいてのみ有効であり，汎用性に乏しく，複雑なフラットケーブルの変形がどのような要素がどのように影響しているかを指し示すことには至っていない．フラットケーブルの汎用的な操作手法実現のために，変形に関する基礎研究を進めることでより汎用的なシュミレーションを開発する．本報告では，フラットケーブルの変形を表す数式モデルを提案するとともに，数式モデルに含まれる力学パラメータを同定する方法を述べる．

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 にフラットケーブルを示す．

図 1 フラットケーブル

2.2 ケーブルモデル

本研究では質点･バネ･ダンパを用いた力学要素によるモデリングを行う．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 にケーブルモデルの概要を示す.

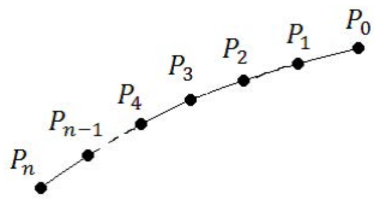


図 2 ケーブルモデル

また，ケーブルは理論上，外力が与えられない場合，垂直下方向に真直ぐになる．しかしながら図 3 に示すようにケーブルは反り返った形状で静止している．このことからケーブル自体がたわみ量を持っていることが推定される．そこで，初期たわみ θ_i とし，パラメータを導入することでケーブル変形の定式化を行った．初期たわみはケーブルのパラメータ同定以前の屈曲などで生じた塑性変形を定量化したものであると考えられる．

図 3 垂直下向き方向時のフラットケーブル

ケーブルの各質点の位置を $P_i = [x_i, y_i]^{\mathrm{T}}$，弾性係数を K，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

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

$$U_k = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} K(\phi_i - \theta_i)^2 \tag{2}$$

$$U_p = mg \sum_{i=0}^{n} y_i \tag{3}$$

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，

$$\phi_i = ATAN2(X_i, Y_i) - ATAN2(X_{i-1}, Y_{i-1}) \quad (i = 1, 2, \cdots, n-1) \tag{4}$$

と表すことができる．ただし，

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

とする．フラットケーブルは伸びにくいため稜線の長さ 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

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

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

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

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．

式 (1)，式 (2)，式 (3)，よりラグラジアンは

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\, m \sum_{i=0}^{n} (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} K(\phi_i - \theta_i)^2 - mg \sum_{i=0}^{n} y_i + \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i R_i(x_i, x_{i+1}, y_i, y_{i+1}) \tag{8}$$

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 で表されるダンパー項を加えると

$$m\ddot{x}_i = \begin{cases} -\lambda_0 X_0 P_0 - Y_0 P_0^2 K \left\{(\phi_0 - \theta_0) - (\phi_1 - \theta_1)\right\} \\ +C\dot{x}_0 \qquad (i = 0) \\[2ex] \lambda_{i-1} X_{i-1} P_{i-1} - \lambda_i X_i P_i \\ +Y_{i-1} P_{i-1}^2 K \left\{(\phi_{i-1} - \theta_{i-1}) - (\phi_i - \theta_i)\right\} \\ -Y_i P_i^2 K \left\{(\phi_i - \theta_i) - (\phi_{i+1} - \theta_{i+1})\right\} + C\dot{x}_i \\ \qquad (i = 1, 2, \cdots, n-2) \\[2ex] \lambda_{n-2} X_{n-2} P_{n-2} - \lambda_{n-1} X_{n-1} P_{n-1} \\ +Y_{n-2} P_{n-2}^2 K \left\{(\phi_{n-2} - \theta_{n-2}) - (\phi_{n-1} - \theta_{n-1})\right\} = 0 \\ -Y_{n-1} P_{n-1}^2 K(\phi_{n-1} - \theta_{n-1}) + C\dot{x}_{n-1} \\ \qquad (i = n-1) \\[2ex] \lambda_{n-1} X_{n-1} P_{n-1} + Y_{n-1} P_{n-1}^2 K(\phi_{n-1} - \theta_{n-1}) \\ \qquad (i = n) \end{cases} \tag{9}$$

$$m\ddot{y}_i = \begin{cases} -\lambda_0 Y_0 P_0 + X_0 P_0^2 K \left\{(\phi_0 - \theta_0) - (\phi_1 - \theta_1)\right\} \\ +mg + C\dot{y}_0 \qquad (i = 0) \\[2ex] \lambda_{i-1} Y_{i-1} P_{i-1} - \lambda_i Y_i P_i \\ -X_{i-1} P_{i-1}^2 K \left\{(\phi_{i-1} - \theta_{i-1})) - (\phi_i - \theta_i)\right\} \\ +X_i P_i^2 K \left\{(\phi_i - \theta_i) - (\phi_{i+1} - \theta_{i+1})\right\} \\ +mg + C\dot{y}_i \\ \qquad (i = 1, 2, \cdots, n-2) \\[2ex] \lambda_{n-2} Y_{n-2} P_{n-2} - \lambda_{n-1} Y_{n-1} P_{n-1} \\ -X_{n-2} P_{n-2}^2 K \left\{(\phi_{n-2} - \theta_{n-2}) - (\phi_{n-1} - \theta_{n-1})\right\} \\ +X_{n-1} P_{n-1}^2 K(\phi_{n-1} - \theta_{n-1}) \\ +mg + C\dot{y}_{n-1} \\ \qquad (i = n-1) \\[2ex] \lambda_{n-1} Y_{n-1} P_{n-1} \\ -X_{n-1} P_{n-1}^2 K(\phi_{n-1} - \theta_{n-1}) + mg \\ \qquad (i = n) \end{cases} \tag{10}$$

が得られる．ただし，

$$P_i = \left\{X_i^2 + Y_i^2\right\}^{-\frac{1}{2}} \tag{11}$$

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

$$\ddot{R}_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) + 2\nu \dot{R}_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) + \nu^2 R_j(x_j, x_{j+1}, y_j, y_{j+1}) = 0 \tag{12}$$

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 (12) に代入すると

$$\begin{aligned} & R_{j_{x_j}} \ddot{x}_j + R_{j_{x_{j+1}}} \ddot{x}_{j+1} + R_{j_{y_j}} \ddot{y}_j + R_{j_{y_{j+1}}} \ddot{y}_{j+1} \\ & + \left\{(v_{x_j} - v_{x_{j+1}})^2 + (v_{y_j} - v_{y_{j+1}})^2\right\} P_j \\ & - \left\{X_j(v_{x_j} - v_{x_{j+1}})^2 + Y_j(v_{y_j} - v_{y_{j+1}})^2\right\} P_j^3 \\ & + 2\nu \left\{X_j(v_{x_{j+1}} - v_{x_j}) + Y_j(v_{y_{j+1}} - v_{y_j}) P_j\right\} + \nu^2 R_j \end{aligned} \tag{13}$$

が得られる．ただし $R_{j_{x_j}}$ と $R_{j_{y_j}}$ 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 (9)，式 (10)，式 (13) 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．

3. パラメータ同定

3.1 粘性係数の同定

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，ケーブル先端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 4 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，$\cdots$，a_i，a_{i+2} で表す．周期を T，粘性減衰係数を C，単位質量あたりの粘性減衰係数を ϵ とする．各振幅の間には

$$e^{\epsilon T} = \frac{a_i}{a_{i+2}} \tag{14}$$

なる関係があり

$$\epsilon = \frac{lne^{\epsilon T}}{T} \tag{15}$$

と

$$C = 2m\epsilon \tag{16}$$

から粘性係数 C が計算できる．

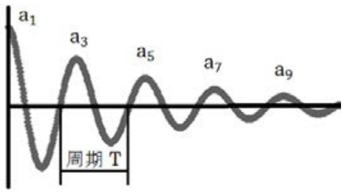


図 4 自由振動

3.2 弾性・塑性変形量の同定

本節では，フラットケーブルのモデルに含まれる弾性係数と初期ひずみ量を推定する手法を示す．推定手法のアーキテクチャを図 5 に示す．

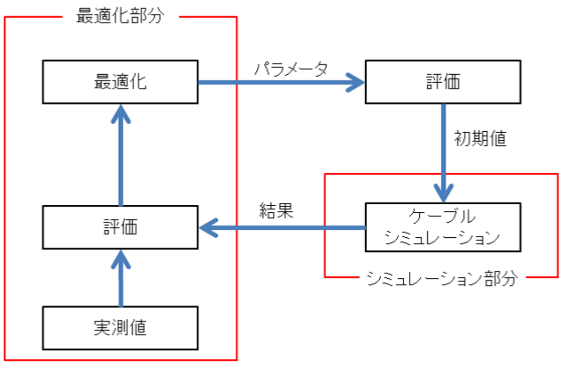


図 5 最適化手法

本手法では最適化計算にシミュレーションを用いているため，勾配関数を用いた非線形最適化の一般的な解法である最急降下法や共役勾配法などのアルゴリズムが利用困難である．シミュレーションを構成する個々の計算過程に対してその微分係数を計算する必要があり，評価関数の微分値が利用しにくいためである．そこで，微分値を利用せずに最適解を直接探索できる手法出る黄金分割法と滑降シンプレックス法を利用することによりパラメータ同定を行う．最適化の前処理としてケーブルの端点をロボットハンドに把持させた状態でケーブルを操作している間，または静止している状態に関するケーブルを 10 等分割する 11 点の位置座標とシミュレーション値の誤差の二乗和 $error$ を用いる．

$$error = \sum_{i=1}^{k} (x_i - X_i)^2 \tag{17}$$

ただし，k は観測値のサンプリング数，X_i は実測値，x_i はシミュレーション値である．

以下に最適化手法の手順を示す．

1. 垂直下方向に垂らした時のケーブルから初期たわみ量を推定する．
2. 自由振動中のケーブル先端座標を実測値として，式 (17) で定式化される評価関数に関する関数最小化を行うことでケーブルの弾性係数を同定する．最適化アルゴリズムは黄金分割法を用いる．実測データサンプリング数は 150 個で，サンプリングレートは $8msec$ である．
3. 静止しているケーブルの注目する 11 点の座標を実測値として，式 (17) で定式化される評価関数を 1〜11 の位置座標に関して定式化する．これらの単純和に関する関数最小化を行うことでケーブルの初期たわみを同定する．最適化アルゴリズムは滑降シンプレックス法を用いる．実測データサンプリング数は 100 個で，サンプリングレートは 8sec である．

4. 検証実験

4.1 実験概要

検証実験では，ケーブル 2 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・塑性変形量パラメータの同定し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 移動する経路である．

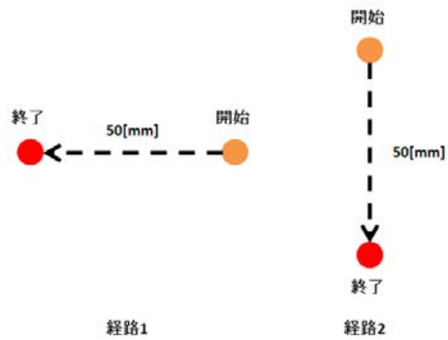
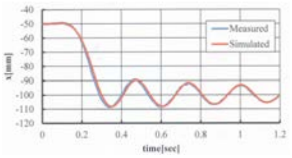


図 6 経路

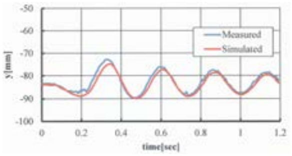
4.2 実験結果

図 7，図 8 にケーブル 2 本に関して，それぞれ 2 つの経路の時の実測値とシミュレーション値を比較した

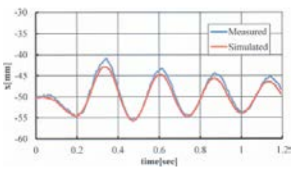
ものを図に示す．表 1 に最大誤差成分を示す．



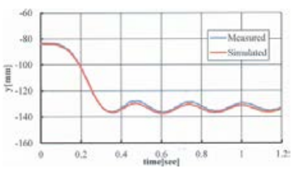
(a) 経路 1 x 座標



(b) 経路 1 y 座標

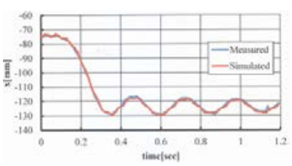


(c) 経路 2 x 座標

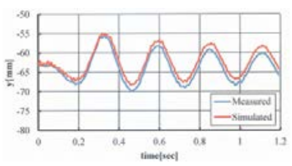


(d) 経路 2 y 座標

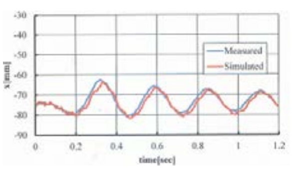
図 7 ケーブル 1 シミュレーション結果



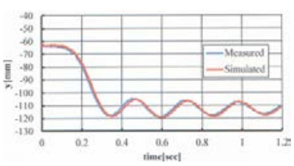
(a) 経路 1 x 座標



(b) 経路 1 y 座標



(c) 経路 2 x 座標



(d) 経路 2 y 座標

図 8 ケーブル 2 シミュレーション結果

表 1 シミュレーション結果

ケーブル番号	水平成分誤差 [mm]	垂直成分誤差 [mm]	誤差距離 [mm]
ケーブル 1	3.44	1.55	3.76
ケーブル 2	3.31	2.01	3.87

4.3　考察

実験結果より発生した最大誤差距離はケーブル 2 の先端で発生している 3.87 mm であった．この誤差はケーブル先端振動の極値においてケーブル 1， 2 の両方で発生している．誤差の原因として考えられるのは画像処理おける観測ノイズと最適化時の収束条件が緩いことが考えられる．以前のモデル [9] で同様の実験を行った結果の 11 % 以下に各成分の最大誤差距離を収束させることができた．

5.　結言

本研究では柔軟帯状物体のモデリングと弾性・粘性・塑性変形の同定方法を提案し，同定したパラメータを用いてシミュレーションを行い，実測値と比較した結果，同定方法が有効であることが示した．しかし，現状は最適化手法にかかる時間を考慮していない．塑性変形量は同種のケーブルであっても異なる値を有するため，シミュレーションを行うためには一本一本最適化を行わなければならない．そのため，産業応用を考える際には最適化を高速で計算できるようにする必要がある．

参考文献

[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 : ”Numarical 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

[4] H.Wakamatsu and S. Hirai，”Static Modeling of Linear Object Deformation Based on Differencal Geometry”，International journal of Robotics Reasearch Vol.23,2012

[5] D.Matthews and T.Bretl，”Experiments in Quasi-Static Manipulation of Planer Elastic Rod”，IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems,2012

[6] T.Matsuno,T.Fukuda，”Manipulation of Flexible Rope Using Topological Model Based on Senor Information”，IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems,2006

[7] X.Jiang,K-m.Koo,K.Kikuchi,A.Kondo,M.Uchiyama，”自動車生産ラインにおけるワイヤーハーネス自動取り付け実験”，第 27 回日本ロボット学会学術講演会,pp1086,2009

[8] H,Okuda,Y.Domae,Y.Kitaaki,K.Sumi,Y.Kimura and H.Takuji，”Flexible Cable Handling Robot utilizing 3-D Vision Sensing”，第 28 回日本ロボット学会学術講演会,pp1086,2009

[9] 高垣 祐介 : ”柔軟な帯状物体の動的モデルパラメータの逐次推定”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012