

# ロボットによる未知な紐の動的マニピュレーション

金沢大学 津張 博之, 関 啓明, 神谷 好承, 足津 正利

Dynamic Manipulation of Unknown String by Robot Arm

Kanazawa University Hiroyuki TSUHARI, Hiroaki SEKI, Yoshitsugu KAMIYA, Masatoshi HIKIZU

It is difficult for a robot to manipulate flexible objects, because the deformations of their shapes make motion planning difficult. In this paper, we propose a concept to manipulate unknown string dexterously by robot arm. A string is described as the two-dimensional model that is composed a number of masses, springs, dampers, hinge springs, and hinge dampers. After parameters of this model are estimated by the comparison between actual string motion and motion simulation using the model with various parameters, robot motion to manipulate the string for realizing a task, for example throwing an edge of a string, is planned using the model with estimated parameters.

## 1. 緒言

近年, ロボットは工業用だけではなく, オフィスや家庭にも進出している. このような場所では形が変化しない対象物だけではなく, 柔軟物を扱う場合が多い. しかし, ロボットは形の変化しない対象物の操りは得意であるが, 柔軟物の操りは不得意であるため, 作業内容は限られているのが現状である. ロボットを用いて柔軟物を操る研究もされているが, 特定の運動しか実現していない. また, コンピュータグラフィックスの世界で柔軟物を表現するという研究がされているが, 実際の柔軟物の操りに応用する研究はあまりされていない. 本研究では, 柔軟物の1つである紐を対象として, 未知の紐の器用な動的マニピュレーションを実現するための方法を提案する.

## 2. 紐の一般的なマニピュレーションの構想

まず, コンピュータ上で一般的な紐のモデルを表現する. そして, ロボットアームで掴んだ未知の紐の特徴を知るために, 実際の紐を適当に動かしてみる. そのときの運動と紐のモデルを用いてシミュレーションした運動を比較し, 同じ動きをするような紐のモデルのパラメータを推定する. その後, 推定した紐のモデルを用いて動作目的に合うような操り方を生成する. その結果から実際に紐をロボットでマニピュレーションする (Fig.1).

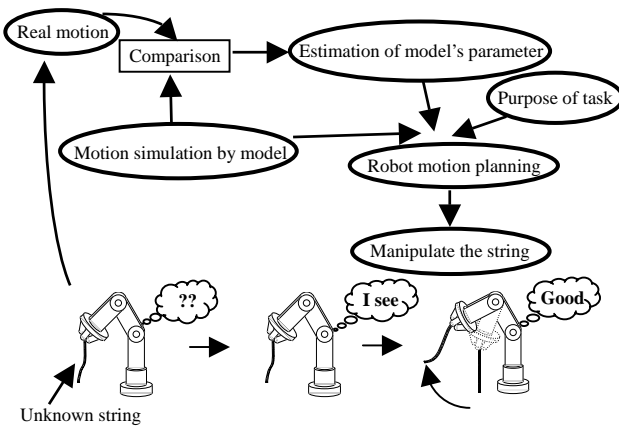


Fig.1 Concept of general string manipulation

## 3. 紐のモデルと運動方程式

紐のモデルはコンピュータグラフィックスの世界でよく用いられている質量, バネ, ダンパ, ヒンジバネ, ヒンジダンパで構成されたものを使用した. 質点は紐の重さ, バネ力, 減衰

力は紐の伸び特性, ヒンジバネ力, ヒンジ減衰力は紐の曲げ特性を表すものである. また, ロボットアームで掴むことで生じる紐の先端部分の抵抗力はそこにヒンジバネを追加することで対応した. 紐のモデルに加わる外力は, 重力と空気抵抗に相当する粘性抵抗力を考慮した. 紐の運動は2次元で行い, 運動方程式をオイラー法で解いて質点*i*の位置ベクトル  $\vec{x}_i$  を求めた. この際, 各力ベクトルを質量で割って各パラメータを単位質量化して推定を行った. よって, 未知なパラメータは  $(k_s, C_s, k_h, C_h, C_{c1}, C_{c2}, k_{ph})$  の7つであり, 質量自体は推定の必要がない. また, 紐は均一であると仮定し, 各質点に繋がれている  $(k_s, C_s, k_h, C_h)$  の値は全て同じとした. 以下, 式(1)~(5)に各力ベクトルの定義式, 式(6)に運動方程式を示す. なお, 各記号は  $n$ : 質点の数,  $i$ : 質点番号,  $L$ : バネの自然長[m],  $m$ : 質量[kg],  $g$ : 重力加速度ベクトル[m/s<sup>2</sup>],  $\ell_i$ : 質点間の距離[m],  $\vec{d}_i$ : 質点間の単位方向ベクトル,  $\vec{\dot{x}}_i$ : 質点*i*の速度ベクトル[m/s],  $\theta_i, \dot{\theta}_i$ : 3 質点間の角度[rad], 角速度[rad/s],  $R(-\frac{\pi}{2})$ :  $-\frac{\pi}{2}$  [rad]回転させる回転行列,  $k_s$ : バネ定数[N/m/kg],  $C_s$ : 減衰係数[Ns/m/kg],  $k_h$ : ヒンジバネ定数[Nm/rad/kg],  $C_h$ : ヒンジ減衰係数[Nms/rad/kg],  $C_{c1}, C_{c2}$ : 粘性抵抗係数[Ns/m/kg],  $k_{ph}$ : 固定部分のヒンジバネ定数[Nm/rad/kg],  $\vec{F}_{si} (\vec{F}_{di})$ : バネ力(減衰力)ベクトル[N],  $\vec{F}_{bi}^l (\vec{F}_{bi}^r)$ : 3 質点間の左(右)ヒンジバネ力ベクトル[N],  $\vec{F}_{hi}^l (\vec{F}_{hi}^r)$ : 3 質点間の左(右)ヒンジ減衰力ベクトル[N],  $\vec{F}_g$ : 重力ベクトル[N],  $\vec{F}_{ci}^1 (\vec{F}_{ci}^2)$ : 速度比例(速度2乗比例)粘性抵抗力ベクトル[N],  $\vec{F}_{pb}^l$ : 固定部分のヒンジバネ力ベクトル[N]を表す.

$$\frac{\vec{F}_{si}}{m} = k_s(\ell_i - L) \cdot \vec{d}_i, \quad \frac{\vec{F}_{di}}{m} = C_s \left\{ (\vec{\dot{x}}_i - \vec{\dot{x}}_{i-1}) \cdot \vec{d}_i \right\} \vec{d}_i \quad (1)$$

$$\frac{\vec{F}_{bi}^l}{m} = \frac{k_h \cdot \theta_i \cdot R(-\pi/2) \cdot \vec{d}_{i-1}}{\ell_{i-1}}, \quad \frac{\vec{F}_{bi}^r}{m} = \frac{k_h \cdot \theta_i \cdot R(-\pi/2) \cdot \vec{d}_i}{\ell_i} \quad (2)$$

$$\frac{\vec{F}_{hi}^l}{m} = \frac{C_h \cdot \dot{\theta}_i \cdot R(-\pi/2) \cdot \vec{d}_{i-1}}{\ell_{i-1}}, \quad \frac{\vec{F}_{hi}^r}{m} = \frac{C_h \cdot \dot{\theta}_i \cdot R(-\pi/2) \cdot \vec{d}_i}{\ell_i} \quad (3)$$

$$\frac{\vec{F}_{pb}^l}{m} = \frac{k_{ph} \cdot \theta_i \cdot R(-\pi/2) \cdot \vec{d}_1}{\ell_1} \quad (i=1), \quad \frac{\vec{F}_{pb}^l}{m} = 0 \quad (i \neq 1) \quad (4)$$

$$\frac{\vec{F}_g}{m} = g, \quad \frac{\vec{F}_{ci}^1}{m} = -C_{c1} \cdot \vec{\dot{x}}_i, \quad \frac{\vec{F}_{ci}^2}{m} = -C_{c2} \cdot \vec{\dot{x}}_i \cdot |\vec{\dot{x}}_i| \quad (5)$$

$$m \ddot{\vec{x}}_i = \vec{F}_{si} - \vec{F}_{si-1} + \vec{F}_{di} - \vec{F}_{di-1} + \vec{F}_{bi-1}^r - \vec{F}_{bi-1}^l - \vec{F}_{bi}^l + \vec{F}_{bi+1}^l + \vec{F}_{hi-1}^r - \vec{F}_{hi-1}^l - \vec{F}_{hi}^l + \vec{F}_{hi+1}^l + \vec{F}_{pb}^l + \vec{F}_g + \vec{F}_{ci}^1 + \vec{F}_{ci}^2 \quad (i=1, \dots, n) \quad (6)$$

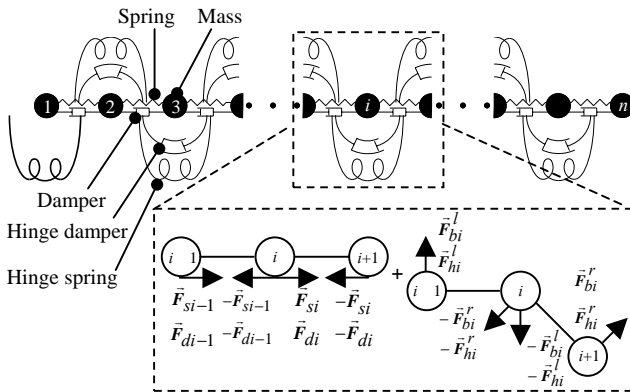


Fig.2 Model of string and definition of force vector

#### 4. 紐のモデルのパラメータの推定

紐のモデルのパラメータを推定するための動きとしてロボットアームの手先に紐の一端を付けて直線移動させ、元に戻す運動を選んだ(Fig.4)。まず、カメラを用いて実際の紐の動きの画像を取得し、画像処理して Fig.3 の点 A~G の位置変化を測定した。そして、7つのパラメータ( $k_s, C_s, k_h, C_h, C_{c1}, C_{c2}, k_{ph}$ )をランダムに変化させながら、オイラー法で運動方程式を解き紐のモデルの質点の位置を求めるシミュレーションをし、画像計測結果と比較した。パラメータを変化させる方法をバネ定数の例で示す。最小値  $k_{min}$ 、最大値  $k_{max}$  を予め設定しておき式(7)のように対数的に6等分した。このように7つのパラメータをそれぞれ6等分し、その組合せをランダムに選んだ。比較は計測された紐の位置(点 B~G の6点)と、それに対応する紐のモデルの質点位置とし、対応する点の距離6つの合計が最小になるパラメータを探した(Fig.5)。Fig.3 に示すような紐で推定を行い、変化させたパラメータの範囲、推定したパラメータを Table.1、比較結果を Fig.6 に示す。今回はロボットアームの先端の移動距離を 0.20[m]、速度を 0.20[m/s]で行った。結果から、推定したパラメータを利用したモデルの動きは実際の紐の動きと良く一致していることがいえる。つまり、提案した紐のモデル、推定方法を行うことで、実際の紐の動きを表現できることが確認できた。

$$k_s = k_{min} \times \left( \frac{k_{max}}{k_{min}} \right)^x \quad (x = 0.0, 0.2, \dots, 1.0) \quad (7)$$

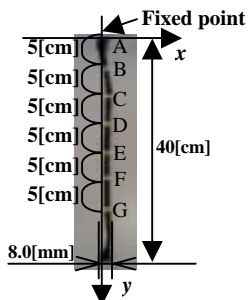


Fig.3 String for experiment

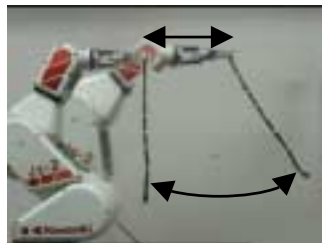


Fig.4 Moving string by a robot arm

Table.1 Parameter range and estimated

	Range	Estimated
$k_s$ [N/m/kg]	$3.6 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^6$	$6.9 \times 10^5$
$C_s$ [Ns/m/kg]	$3.1 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^2$	2.9
$k_h$ [Nm/rad/kg]	$6.3 \times 10^{-2} \sim 1.9 \times 10^3$	3.9
$C_h$ [Nms/rad/kg]	$1.6 \times 10^{-6} \sim 0.54$	$1.2 \times 10^{-5}$
$C_{c1}$ [Ns/m/kg]	$9.00 \times 10^{-2} \sim 9.00 \times 10^2$	0.23
$C_{c2}$ [Ns/m/kg]	$9.00 \times 10^{-2} \sim 9.00 \times 10^2$	0.09
$k_{ph}$ [Nm/rad/kg]	$9.00 \times 10^{-2} \sim 9.00 \times 10^3$	5.7

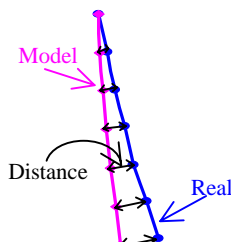


Fig.5 Evaluation function

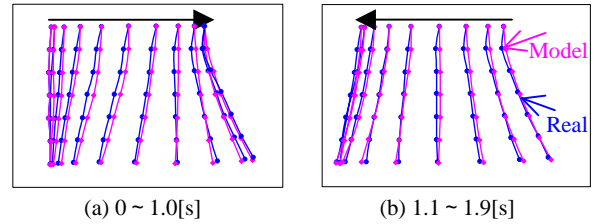


Fig.6 Comparison of real and simulated motion

#### 5. ロボットアームによる紐の操り

動作目的としてロボットアームの手先に紐の一端を付けて直線運動させ、元の位置に戻すことで紐の他端をより遠くへ飛ばすという動作を選んだ。動作計画は、そのときのアーム先端の移動距離、速度を求めることとした(Fig.7)。評価関数は、紐の先端とロボットアームの先端の差が最大となったときの距離とし、これを飛距離と呼ぶことにした。まず、推定したパラメータを用いた紐のモデルで紐の一端を様々な移動距離、速度で直線運動させるシミュレーションを行った。移動距離は 0.05[m] ~ 0.30[m] を 0.05[m] 間隔で 6 通り、移動速度は 0.03[m/s] ~ 0.43[m/s] の範囲で 9 通りの合計 54 通り行った。その結果、移動距離 0.2[m]、移動速度 0.33[m/s] のとき最大飛距離 0.22[m] という動作を生成した。この結果が正しいことを確認するために、実際の紐で 54 通りの動作をし、カメラを用いて画像計測した結果とシミュレーション結果を比較した。移動速度 0.23[m/s]、0.33[m/s] での比較結果を Fig.8 に示す。最大飛距離となる点を含めほとんどの条件で紐のモデルと同じ結果が得られた。つまり、1 回目の動作でパラメータを推定し、2 回目の動作で目的の動作を得られることが確認できた。

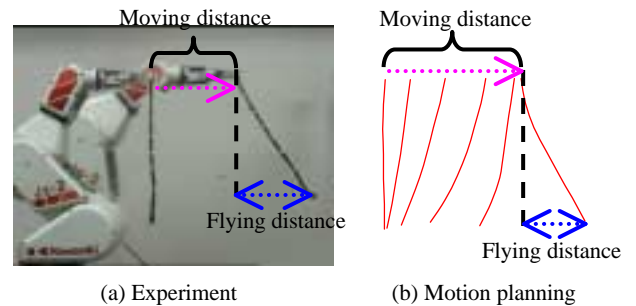


Fig.7 Experiment and motion planning of string

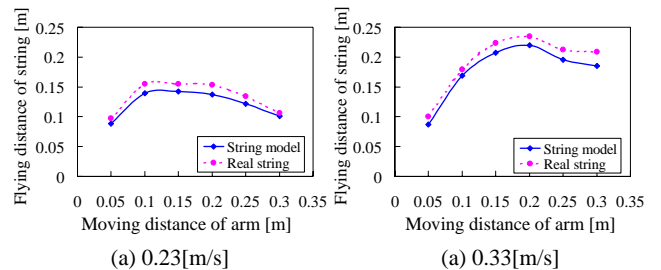


Fig.8 Comparison of flying distance

#### 6. 結言

本研究で提案した紐のモデル、パラメータの推定、動作計画を用いることで、紐を器用に操ることができる可能性を見出すことができた。今後の課題は色々な紐の種類や運動、動作目的に対して紐の器用な操りが実現できることを確かめることである。