

帯状物体のマニピュレーションに関する研究

Manipulation of Belt Objects

2011015



研究代表者

立命館大学 理工学部
ロボティクス学科

教授 平井 慎一

[研究の目的]

帯状物体の操作は、電子機器産業や自動車産業をはじめとする産業で多く見受けられる。現在、帯状物体の操作は人手に頼る部分が多く、その自動化が求められている。また、人間の生活空間の中には、多くの帯状物体が存在している。人間の生活空間を支えるために、リネンサプライ産業やリサイクル産業では、多くの帯状物体を扱っている。これらの操作は人手に頼る部分が多く、衛生面から自動化が望まれている。本研究では、帯状物体の操作における力学を明らかにし、機械システムによる帯状物体の操作を目指す。

[研究の内容・成果]

1. 帯状物体の操作

本研究では、帯状物体としてフラットケーブルの挿入を対象とする。フラットケーブルの挿入では、ケーブルの一端を把持し、他端の位置と姿勢を操作する。図1にフラットケーブルの例と、フラットケーブルの先端の操作を示す。本節では、ケーブルは鉛直面内で曲げ変形すると仮定する。

帯状物体の操作が困難である原因の一つは、帯状物体の形状のばらつきである。図2に、6本のフラットケーブルの静的な変形形状を示す。ケーブルの厚みは0.1 mm、幅は16.0 mm、線

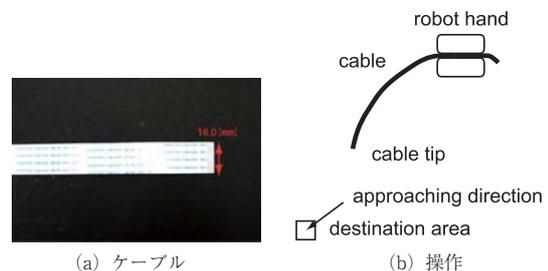


図1 フラットケーブル先端の位置と姿勢の操作

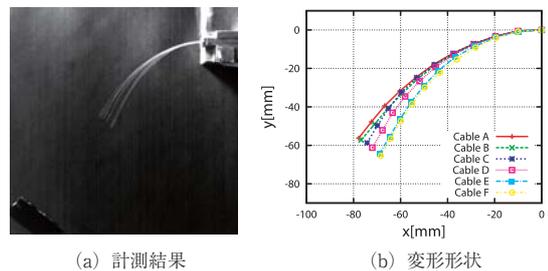


図2 フラットケーブルの変形形状のばらつき

密度は7.4 g/mである。先端から100 mmの箇所を把持し、変形形状を計測した結果、先端のばらつきは13.1 mmに達した。フラットケーブルの挿入では、このばらつきが穴のサイズより大きいことが多く、挿入が困難となっている。

二つめの原因は、操作中における帯状物体の変形である。図3-(a)に、把持部の姿勢を変えたときの静的な変形形状を示す。把持部の姿勢を変えると、静的な変形形状が異なり、結果として先端の位置や姿勢が異なる。把持部を動かすと、帯状物体は動的に変形する。把持部の位置をある軌道に沿って動かしたときの先端の軌跡を、図3-(a)に示す。図に示すように、先端の運動軌跡は把持部の姿勢に依存する。

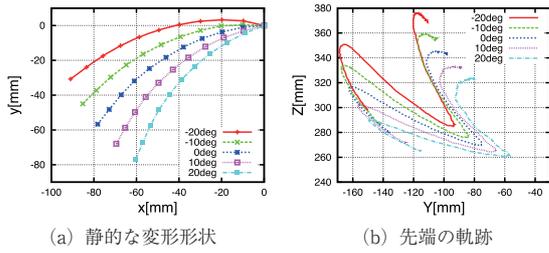


図3 把持姿勢による変形形状の変化

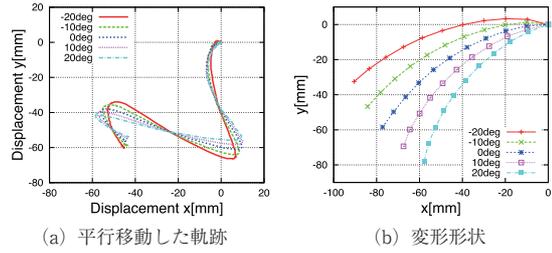


図5 平行移動した先端軌跡の交点

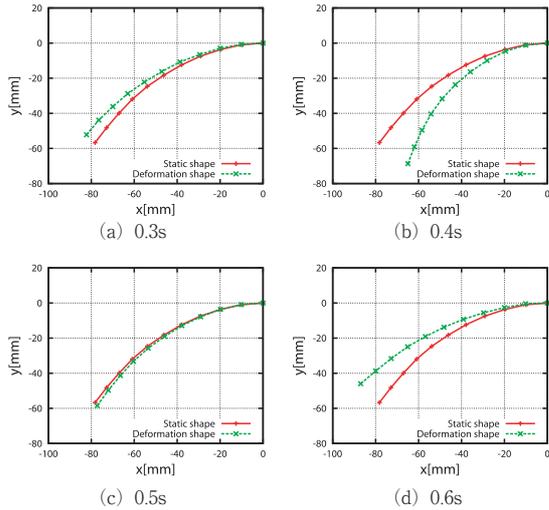


図4 フラットケーブルの動的な変形

図4に、フラットケーブルの動的な変形を示す。把持部の姿勢は 0° である。図4-(c)に示すように、ある時刻において動的な変形形状が静的な変形形状に近い。

以上に示すように、帯状物体の操作では、変形のばらつきと動的な変形の双方に対応する必要がある。また、フラットケーブルの動的な変形形状が、静的な変形形状に戻ることが示唆される。

2. 形状復帰点

図4に示すように、帯状物体の操作の際に、ある時刻の動的な変形形状が静的な変形形状に一致する。この現象を調べるために、様々な把持姿勢に対してフラットケーブルを操作し、ケーブル先端の軌跡を計測する。先端の軌跡を平行移動し、操作開始時の先端の位置を原点に揃える。平行移動した軌跡を、図5-(a)に示す。このとき、すべての軌跡は、点 $(x, y) = (-23.3, -51.3)$ mmで交わる。この点にお

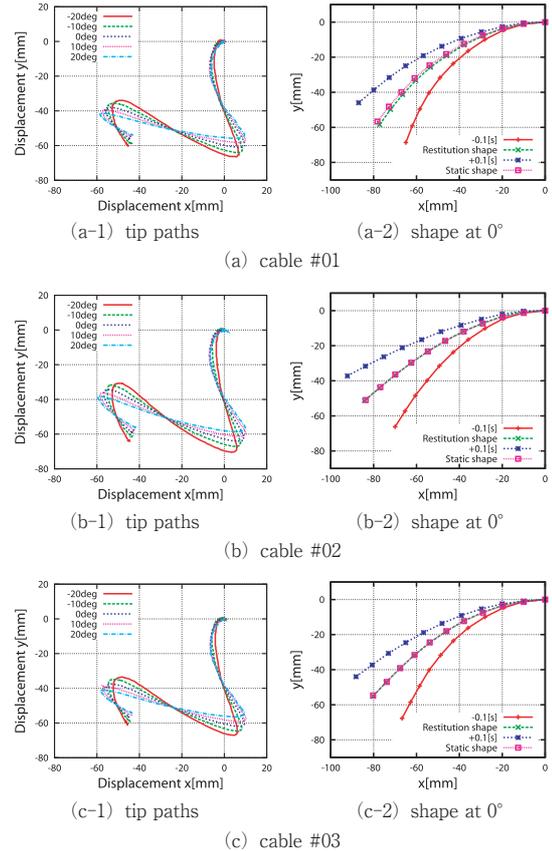


図6 形状復帰現象

る動的な変形形状を、図5-(b)に示す。この図と図3-(a)を比較すると、交点における動的な変形形状が静的な変形形状に一致することがわかる。この交点を形状復帰点とよぶ。

図6に、別のフラットケーブルで形状復帰現象を検証した結果を示す。いずれのケーブルにおいても、軌跡の交点における変形形状が、静的な変形形状に一致することがわかった。

形状復帰点の概念を基にして、フラットケーブル先端の位置と姿勢を目標の位置と姿勢に案内する手続きを構築する。基本的な考えは、形状復帰点を目標の位置に一致させるとともに、

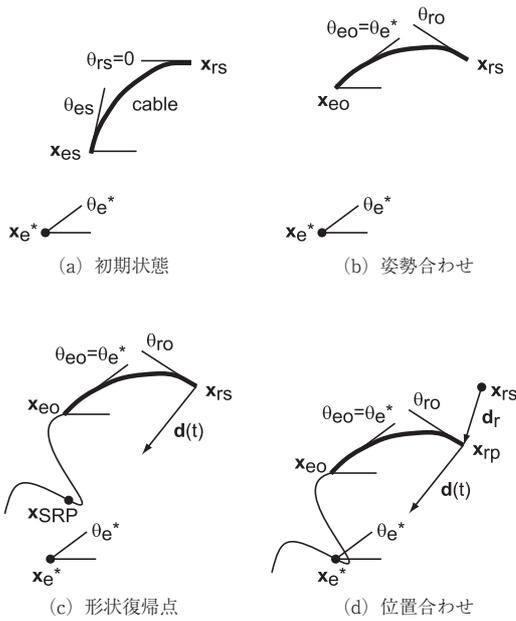


図7 ケーブル先端の案内

先端の姿勢が目標の姿勢に一致するように把持部の姿勢を制御することである。図7-(a)に初期状態におけるケーブル先端の位置・姿勢と目標の位置・姿勢を示す。まず、フラットケーブルを撮影し、ケーブルの静的な変形形状を計測する。次に、図7-(b)に示すように、把持部の姿勢を変化させ、先端の姿勢を目標の姿勢に一致させる。さらに、図7-(c)に示すように、ケーブルの静的な変形形状から形状復帰点を推定し、図7-(d)に示すように、把持部の位置を変化させ、形状復帰点を目標の位置に一致させる。ここでケーブルに運動を与えると、形状復帰点でケーブル先端の位置・姿勢は目標の位置・姿勢に一致する。

静的な安定形状から形状復帰点を推定するために、あらかじめ複数のフラットケーブルの静的な形状と形状復帰点を求め、データベースを構築する。データベース内の形状を補間することにより撮影した形状を近似する。同じ補間を用いて撮影した形状の形状復帰点を推定する。

3. 実験結果

提案した手法を実験的に検証した。図8-(a)に示す3本のケーブルから静的な変形形状と形

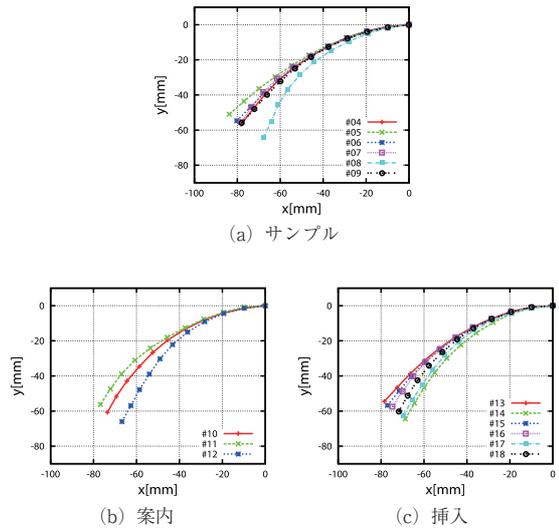


図8 実験で用いたケーブルの静的な形状

状復帰点のデータベースを構築した。図8-(b)に示す別の3本のケーブルに対して、ケーブル先端を目標の位置・姿勢に案内し、位置と姿勢の誤差を評価した。目標位置を $P_1 = (-140, 310)$ mm, $P_2 = (-140, 300)$ mm, $P_3 = (-130, 310)$ mm の3通り、目標姿勢を 55° , 65° , 75° の3通りに設定した。すなわち、9通りの位置・姿勢に対して案内を評価した。その結果、最大位置誤差は2.1mm, 最大姿勢誤差は 4° であった。

図8-(c)に示す別の6本のケーブルに対して、スリットへの挿入実験を行った。図9に示すように、左下部にケーブルを挿入するスリットを設置した。ケーブル先端位置のばらつきは14.0mmであり、これはスリットの高さ5mmより大きい。このような状況で、すべてのケーブルをスリットに挿入することに成功した。図10に挿入時の動的な変形形状を示す。図10-(d)に示すように、スリットに挿入する時刻において、ケーブルの動的な変形形状は静的な変形形状に一致する。

4. 帯状物体の変形シミュレーション

帯状物体の操作過程を解析するために、帯状物体の変形シミュレーションを試みた。帯状物体は伸縮しないと仮定し、変形としては曲げと

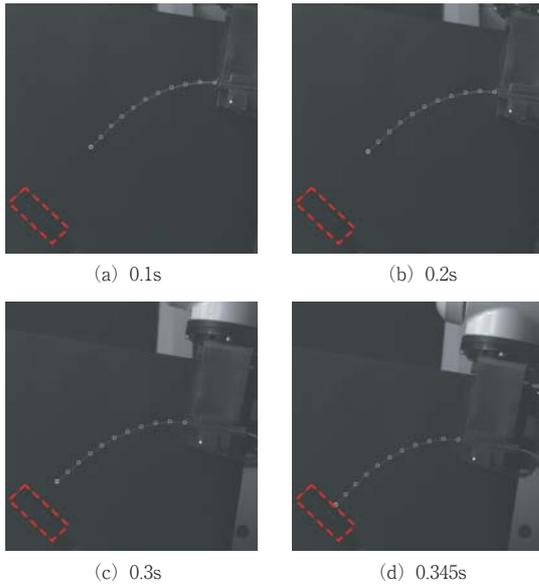


図9 挿入実験

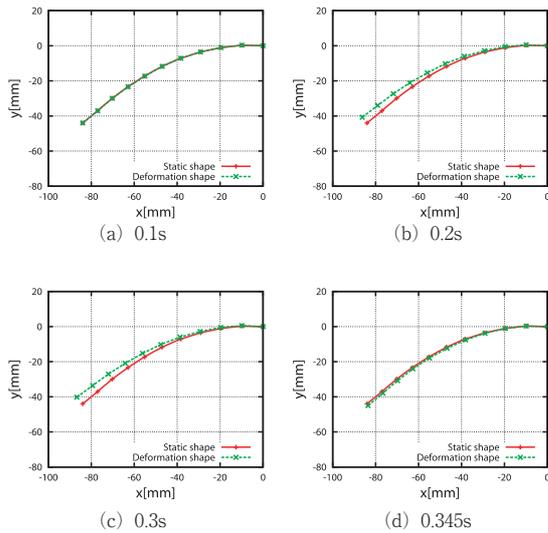


図10 挿入時の変形形状

ねじれのみを考える。物体は、長さに対して十分に小さい幅を持つものとし、幅方向には一様に変形するものと仮定する。帯状物体の長さを L 、幅を b 、厚さを h とし、物体の一端から長手方向中心軸に沿った距離を u とし、物体中心軸上の点を $P(u)$ と表す。

物体中心軸上の点 $P(u)$ に物体座標系 $P(u)$ $-\xi\eta\zeta$ を設定する。物体座標系の各軸方向単位ベクトル $\xi(u)$ 、 $\eta(u)$ 、 $\zeta(u)$ の微分は

$$\frac{d}{du} [\xi(u) \eta(u) \zeta(u)] =$$

$$[\xi(u) \eta(u) \zeta(u)] \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\zeta & \omega_\eta \\ \omega_\zeta & 0 & -\omega_\xi \\ -\omega_\eta & \omega_\xi & 0 \end{bmatrix}$$

と表される。ここで、 $\omega_\xi(u)$ は物体中心軸の $\eta\zeta$ 平面内での曲率、 $\omega_\eta(u)$ は物体中心軸の $\xi\zeta$ 平面内での曲率、 $\omega_\zeta(u)$ は物体中心軸回りのねじれ率に相当する。帯状物体が伸縮しないという仮定から、 $\eta\zeta$ 平面内での変形は許容されないため、上式は

$$\frac{d}{du} [\xi(u) \eta(u) \zeta(u)] = [\xi(u) \eta(u) \zeta(u)] \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\zeta & \omega_\eta \\ \omega_\zeta & 0 & 0 \\ -\omega_\eta & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

となる。物体中心軸上の各点の空間座標は

$$x(u) = x(0) + \int_0^u \eta du$$

で求めることができる。

帯状物体のヤング率を E とすると、帯状物体のポテンシャルエネルギー U は

$$U = \frac{Ebh^3}{24} \int_0^L \frac{(\omega_\eta^2 + \omega_\zeta^2)}{\omega_\xi^2} du$$

と表わされる。

帯状物体の変形形状は二つの変数 $\omega_\eta(u)$ および $\omega_\zeta(u)$ によって表わされ、幾何学的な制約条件の下でポテンシャルエネルギー U が最小となる二つの変数を求めることにより、静的な変形形状を導出できる。

長さ $L=200$ mm、幅 $b=20.0$ mm、厚さ $h=0.14$ mm のポリスチレン製帯状物体の変形形状を計算する。左端を固定し、右端の位置ベクトルと姿勢行列をそれぞれ

$$\begin{bmatrix} 0.0L \\ 0.7L \\ 0.0L \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -1/2 \\ 0 & 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

で与えたときの計算結果を図11に示す。帯状物体を実際に変形させた時の形状を計測した結果を図12に示す。計算結果と計測結果はよく一致しており、提案したモデリング手法により、

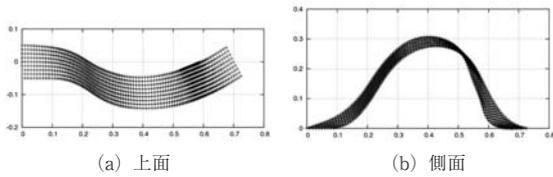


図 11 計算結果

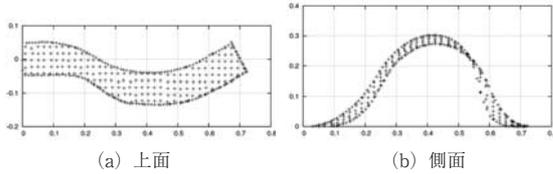


図 12 計測結果

带状物体の三次元変形形状の予測が可能であると考える。

[今後の研究の方向・課題]

本報告では、形状復帰点の概念に基づく带状物体のマニピュレーション手法を述べるとともに、带状物体の変形をモデリングする手法を示した。形状復帰点は带状物体のダイナミクスに基づく概念である。提案手法は、带状物体の形

状のばらつきに対応して带状物体を案内することができる。変形モデリングでは、带状物体の変形形状を表現する手法を提案し、ポテンシャルエネルギーの最小化により変形形状を求めた。提案手法は、带状物体の三次元形状を計算することができる。

形状復帰点がどのような場合に生じるかは、現状では不明の点が多い。今後はシミュレーション手法を用いて解析を進め、形状復帰点が生じる条件を明らかにするとともに、効率的にデータベースを構築する手法を見出したい。

[成果の発表、論文等]

- [1] Yuuki Kataoka and Shinichi Hirai, *Dynamic Insertion of Bendable Flat Cables with Variation based on Shape Returning Points*, 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2011), Lecture Note in Computer Science, pp. 496-508, Aachen, Germany, Dec. 6-8, 2011.
- [2] Hidefumi Wakamatsu, Eiji Morinaga, Eiji Arai, and Shinichi Hirai, *Path Planning for Belt Object Manipulation*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4334-4339, St. Paul, U. S. A., May 14-18, 2012.