

結び・結ぶ・結べ



者

若松 栄 史*

knot, knot, knot

Key Words : manipulation, linear object, deformation, knotting

1. はじめに

この度、この「若者」のコラムを書く機会を戴いたのだが、これまで特にドラマチックな人生を送ってきた訳でもないのに、万人への教訓になるような内容は書けそうにない。そこで、最近の自分の研究について触れてみたい。

私の研究テーマを一言で言うなら、「ロボットによる蝶々結びの実現」ということになるだろうか。従来、ロボットによる作業の自動化を目的とした研究は、剛体、つまりは硬くて変形しないものを対象として進められてきた。しかしながら、生産現場に存在するのは必ずしも剛体ばかりではない。ケーブルやワイヤー、ゴム、皮革、紙、板金など、柔軟物体を扱う作業は数多く存在する。このような柔軟物体を扱う作業は、ロボットによる自動化が困難となっている。もちろん専用機が開発されている場合もあるが、「どんな対象物でも」「どんな作業でも」できるという汎用機械はそうはない。特に、ケーブルやチューブ等に代表される線状物体は、電気信号の伝送や流体の搬送のための媒体として工業製品に広く用いられている。これらの物体は製品中のすき間に押し込まれることが多く、変形していないことはないと言ってよい。また、ワイヤーやロープのような線状物体は、他の物体の固定や締結、梱包にも利用されている。このような場合、特定の形状に変形することで要求される機能を発揮することになる。更

に、これらの線状物体を輸送あるいは保管する場合、巻いたり束ねたりしてコンパクトなサイズにすることが殆んどである。このように、線状物体を対象とする作業には、物体の変形を積極的に利用するものが多く、このような作業の自動化のためには、変形をうまく制御する必要がある。特に、固定や締結作業においては「結ぶ」という操作を考慮しなくてはならない。一方で、線状物体を操作する際には、物体の絡まりを防ぐ必要もある。したがって、線状物体のハンドリングにおいて、結び/絡まりを解析することは重要である。そして、生産現場だけではなく、医療や介護福祉、災害救助の分野においても結び操作は存在し、この分野へのロボットの進出が始まっている今日、結び操作解析の重要性はますます高まってくるものと思われる。

そもそも、日本では結びと文化とが密接に関連している。まずは、何とんでも帯の結びであろう。着物文化である日本には帯は欠かせない。特に女性の場合、未婚か既婚か、年齢や冠婚葬祭等のTPOによっても帯の結び方は変わってくる。他には水引なども思い浮かぶのではないだろうか。水引も、吉事の場合には「再びあるように」という意から、凶事の場合には「二度とないように」という意から結び方が違うという。なお、婚礼の場合は凶事と同じ結びというのが面白い。また、茶道では、紐を解かれて茶壺の中に毒等が混入されないよう、管理者だけが覚えた茶壺の封印結び、香道では、道具袋の口を閉じるのに、一年十二ヶ月に対応した十二種類の花結びと呼ばれる装飾結びがあるという。さらには、犯罪者の身分や性別によって縛り方が決まっている捕縄術というものまであるというから驚きである。いや、少々脱線してしまった。これ以上書くと付焼刃の知識もボロが出そうなので、話をもとに戻そう。上でも述べたように、線状物体の結び操作はさまざまな場面において見られ、結び/絡まりという作



* Hideofumi WAKAMATSU
1969年7月生
現在、大阪大学大学院・工学研究科・
生産科学専攻・荒井研究室、助手、
博士(工学)、ロボティクス
TEL 06-6879-7557
FAX 06-6879-7570
E-Mail wakamatu@mapse.eng.
osaka-u.ac.jp

業あるいは現象の解析, 更にはその自動化に対する要求もある. そこで, 機械システムによる結び作業計画の自動生成と自動操作の実現を目指して, 現在研究を進めている. つまり, 究極の目標は「さまざまな結び目に対して, 結ぶ手順を自ら導き出し実行するロボットの実現」ということになるだろう. そのためには「線状物体のモデリング」と「線状物体操作のプランニング」が必要となる. 以降ではそれぞれについて概説する.

2. 線状物体のモデリング

さて, 線状物体の結び操作のためには, まずは物体がどのように変形するのかを予測する必要がある. そのための線状物体のモデリング手法を紹介する.

線状物体の端点から部品に沿った距離を s で表し, その点に物体座標系を設定する. 物体が無変形状態であれば, 物体座標系と空間に固定された空間座標系の各軸方向は一致するが, 物体が変形すれば当然軸の向きは変化する. しかも, 変化量は距離 s に依存する. そこで, 物体座標系の姿勢の変化をオイラー角で表す. オイラー角は s の関数となる. 変形によって物体に蓄えられるエネルギーは, 曲率等の変形状態の特徴量と関係しており, オイラー角の関数として表すことができる. また, 物体を操作する際は, ハンドにより変形後の把持点の位置/姿勢が決定されるが, このような幾何学的制約もオイラー角の関数として表される. 今, 物体の持つエネルギーは, 静的な安定形状において最小になると仮定すると, 幾何学的制約を満足しつつエネルギーが最小となるようなオイラー角を求めることによって, 物体の変形状態を求めることができる.

特に, 結び目形状は, 後で示すように, 物体自身との交点の数とその並び方によって特徴づけられるので, そのような幾何学的制約を与えることで, さ

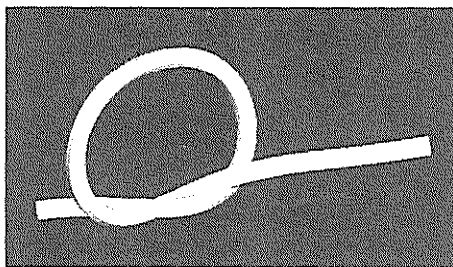


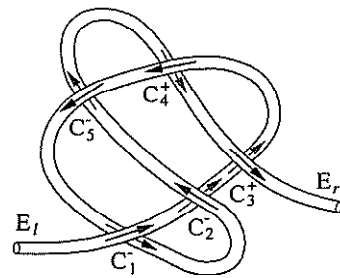
図1 止め結びの変形状態計算例

さまざまな結び目形状が求められる. 図1に, 止め結びにした線状物体の変形状態の計算例を示す.

3. 線状物体操作のプランニング

前述の手法で, 線状物体の変形は予測できたとしよう. しかし, 物体のどこを持ってどのように動かせばいいのかが分からなければ, 結び操作を実現することはできない. そこで, 線状物体を目的通りに操作するためのプランニングが必要となる.

一般的に, 物体操作の過程は, 対象とする物体とそれ以外の物体との接触状態と, その状態遷移によって表現することができる. そこで線状物体についても同様に考える. 三次元空間内で変形している線状物体の形状を, ある平面上に射影する. この時, 射影された物体は, 物体自身と複数の点で交差しているように見える. そこで, 物体の一端から中心軸に沿って物体を辿り, 出会った交点に番号をつけていく. 更に, 各交点での交差の仕方に着目することで, 図2のような線状物体の状態は, 計算機で処理可能な形で表現することができる. 次に, 以上のようにして表現された状態間の遷移について考察する. 状態遷移は, 交点数を増減させる, あるいは交点を並べ替える操作に相当するので, 図3に示す4つの基



$$E_r - C_1 - C_2 - C_3^+ - C_4^+ - C_5 - C_1^- - C_2^- - C_3^- - C_4^- - C_3^+ - E_r$$

図2 線状物体の交差状態の表現

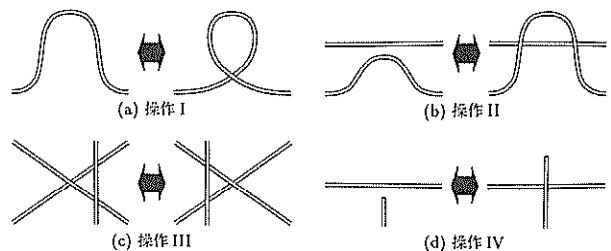


図3 線状物体の基本操作の定義

本操作を用意した。以上より、線状物体の操作過程は、有限個の交差状態とその間の遷移に相当する4つの基本操作によって表現することができる。そして、物体の初期状態と目標状態が与えられれば、その間の可能性のある状態遷移経路を計算機により導出することができる。図4は、計算機による状態遷移経路生成の一例である。

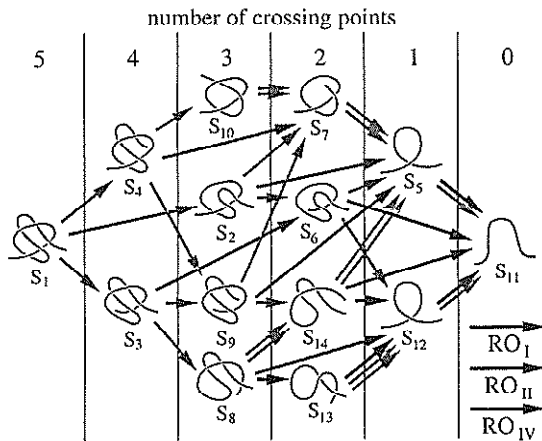


図4 状態遷移経路の生成例

続いて、あるルールに基づいて、導出された状態遷移経路中のそれぞれの操作を実現するためのハンドの把持位置と移動方向を決定する。更に、状態遷移の回数や、同時に必要なハンド数、ハンドの持ち替え回数等から各遷移経路を評価し、適切な操作計画を導出することができる。図5に、実際にロボットシステムを用いて止め結びの解き操作を行なった結果を示す。このシステムでは、カメラを用いて物

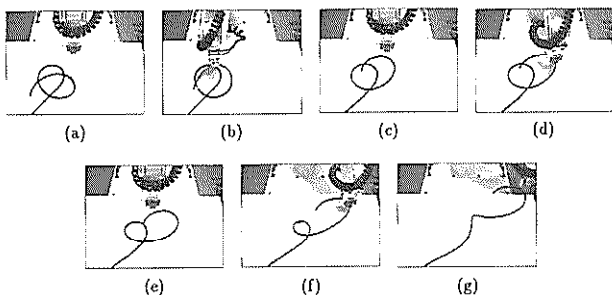


図5 ロボットによる止め結びの解き操作

体の形状を計測し、交差状態を認識すると共に、具体的な把持位置と移動方向を決定して操作を実行している。図に示すように、ロボットによって無事止め結びを解くことができた。次の課題は、結び操作の実現である。

このように、「線状物体のモデリング」と「線状物体操作のプランニング」により、「物体はどのように変形するのか」として「どのように変形させればよいのか」を知ることができる。より正確には、それを機械システムに知らしめることができる——はずである。「結び」形状が分かり、「結ぶ」操作が分かれば、「結べ」——つまりは、ロボットに蝶々結びをさせるといっても、それほど突拍子もない目標ではないように思うのだが、いかがだろうか？

4. おわりに

皆さんは、溜った新聞紙や雑誌をまとめる際に、紐でしっかりと縛ったつもりなのに、十字に組んだ真ん中を持ち上げるとゆるゆる／ぐずぐずになってしまった経験はないだろうか？新聞紙をまとめるには、図6のような結び方がいいらしい。一端を8の字結びにし、端Bを持って端Aを矢印の方向に引っ張っていくと、しっかりと縛ることができる。早速試してみた。確かに、端Aを引っ張るほど、新聞紙はしっかりとまとまり、持ち上げても緩むことがない。調子に乗って引っ張っていると、突然、紐が結び目の根元からちぎれてしまった。この縛り方は非常に大きな摩擦が生じるので、紐の種類によっては切れてしまうことがあるらしい。なるほど。ちなみに、ちぎれて短くなってしまった紐では、もはや新聞紙を束ね直すことはできなかった…。いやはや、結びとは奥の深いものである。

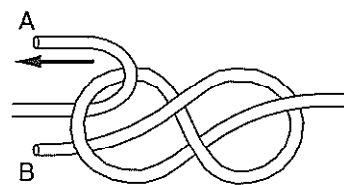


図6 新聞紙を束ねるための結び