

交差列を用いた線状物体の定性的ほどもき操作計画

若松 栄史 (大阪大学) 十河 陽平 (大阪大学) 妻屋 彰 (大阪大学)
荒井 栄司 (大阪大学) 平井 慎一 (立命館大学)

Unraveling of Deformable Linear Objects Based on Their Crossing Sequences

*Hidefumi WAKAMATSU (Osaka Univ.), Youhei TOGAWA (Osaka Univ.), Akira TSUMAYA (Osaka Univ.), Eiji ARAI (Osaka Univ.), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

Abstract— A planning method for unraveling deformable linear objects based on 2D information about their crossing states is proposed. In manipulation of a linear object, its raveling must be avoided because it takes much time to unravel it once it is raveled. So, it is important to generate efficient unraveling plans. First, the crossing sequence of a linear object, which corresponds to its 2D information, is categorized into two types: unravelable and not-unravelable. An object with an unravelable crossing sequence can be unraveled at once by pulling its both ends. Next, a procedure to generate efficient unraveling processes based on unravelability of the crossing sequence is explained. Finally, examples of unraveling process generation with our developed system are demonstrated.

Key Words: Manipulation, Planning, Deformable Linear Object, Raveling, Unraveling

1. 緒論

コードやケーブル等の線状物体は、生産現場のみならず、我々の日常生活において広く用いられている。特に、紐やロープ等を対象とする場合、結びという線状物体特有の操作が求められる。一方で、線状物体の操作中には予期しない絡まりを防ぐ必要がある。物体が一度絡まってしまうと、それをほどくために多大な時間と労力を要する可能性があるためである。したがって、線状物体を対象とする作業の自動化を考えた場合、結び操作と同様に、ほどもき操作についても考慮する必要がある。

ロボットによる線状物体の結び操作に関しては、いくつかの研究が行われている [1][2][3][4]。我々は、線状物体の結び / ほどもき操作、さらには締め操作を計算機処理できる形で定性的に表現し、実現可能性のある作業計画を計算機により自動生成する手法を提案した [5][6]。Saha らは、線状物体の定性的状態表現および定性的結び操作表現から、確率的ロードマップ法を用いて、マニピュレータ先端の具体的な軌道までを導出している [7]。

一方、ほどもき操作は、基本的には結び操作の逆操作であると考えられることができる。しかし、絡まった線状物体の状態は、一定の規則にしたがって結ばれた状態に比較して複雑であり、物体が自分自身に巻きついて、状態の認識が困難である場合も多い。そこで本研究では、線状物体の交差列、すなわち交差の並び方は完全に分かっているものと仮定し、各交差での上下関係の情報を用いずに、効率の良いほどもき操作を導出する手法について提案する。まず、交差列の非締結性について考察する。非締結な交差列は、各交差での上下関係に関わらず、物体両端を引っ張ることにより一気にほどもきすることができる。これを利用して、効率の良いほどもき操作の計画手法を提案

する。最後に、試作システムによる操作計画の導出例を示す。

2. 交差列と非締結性

線状物体の状態は、交差列と、各交差における上下関係および交差の向きによって表すことができる。線状物体の交差状態が完全に与えられれば、我々が提案した手法によりほどもき操作計画を立てることができる [5]。物体の交差状態を特定するためには、交差列と共に、各交差における物体の上下関係を判定する必要がある。森田らはステレオカメラを用いて交差における上下判別を行っている [3]。松野らは画像の輝度分布の不偏分散を利用している [4]。しかし、線状物体が絡まっている場合には、交差において物体が自身と接触していることが多く、上記のような手法ではロバスト性に問題がある場合も考えられる。そこで、線状物体の各交差における上下関係の情報を用いることなく、物体をほどもきできないか考察する。解離操作 U_{O_I} と $U_{O_{IV}}$ は、解離対象となる交差での上下関係に関わらず適用することができる。また、任意のほどもき操作は、解離操作 $U_{O_{IV}}$ のみの繰り返しによって実現できることが分かっている [5]。したがって、交差での上下関係が分からなくとも、解離操作 $U_{O_{IV}}$ を繰り返し適用することにより、線状物体を完全にほどもきすることができる。しかし、線状物体が複雑に絡まっている場合には、適用すべき解離操作 $U_{O_{IV}}$ の回数も膨大となる。そこで本研究では、より効率の良いほどもき操作について考える。

Fig.1-(a-1) のような 2 次元画像が得られた場合、交差列は

$$E_I-C_1-C_2-C_3-C_3-C_2-C_1-E_r \quad (1)$$

となり、物体の交差状態としては、Fig.1-(a-2) から Fig.

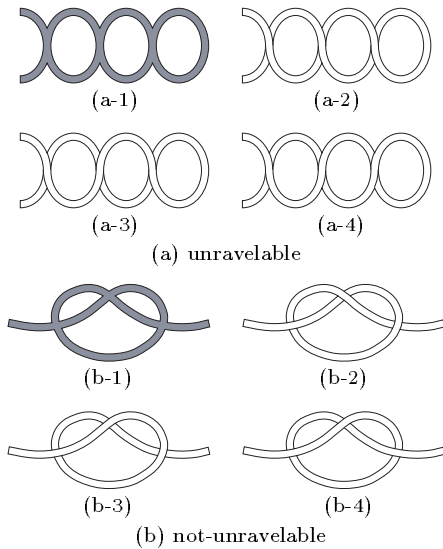


Fig.1 Crossing sequences

1-(a-4) のようなものが考えられる．しかし，いずれの場合も締結不可能 [6] な結び目であるため，両端を引っ張るとほどくことができる．このように，各交差での上下関係に関わらず，両端を引っ張るとほどけるような交差列を非締結な交差列と定義する．

一方，Fig.1-(b-1) のような 2 次元画像が得られた場合，交差列は

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_1-C_2-C_3-E_r \quad (2)$$

となり，考えられる状態として，Fig.1-(b-2) のような完全締結可能な結び目である場合が考えられる．したがって，各交差での上下関係が分からないまま両端を引っ張ると，結ばれてしまう可能性がある．このように，上下関係によっては締結されてしまうような交差列を，非締結でない交差列と定義する．以下では，交差列の非締結性について考察する．

Fig.2 に，結び目理論における素な結び目を示す．素な結び目とは，基本操作 I から III に対応するライデマイスター移動 I から III をどれだけ適用しても，それ以上交差を減らすことのできない結び目である．素な結び目は，完全締結可能な結び目と密接な関係がある．例えば，交差を 3 つ有する素な結び目を Fig.2-(a) に示すような部分で切断した場合，交差状態は以下のように表される．

$$E_l-C_1^{l+}-C_2^{u+}-C_3^{l+}-C_1^{u+}-C_2^{l+}-C_3^{u+}-E_r \quad (3)$$

これは，完全締結可能な結び目であるひとえ結びの交差状態に等しい．交差を 3 個有する素な結び目は，Fig.2-(a) に示す以外には存在しないことが分かっているため，交差が 3 つあったとしても，(3) 式，すなわち (2) 式とは異なる交差列を持つ場合には，操作 U_{O_I} ， $U_{O_{II}}$ および $U_{O_{IV}}$ を適用することによりほどくことができる．線状物体が (2) 式のような交差列を持っている場合のみ，物体は非締結ではない．

Fig.2-(b) に交差を 4 個有する素な結び目を示す．交差を 4 つ有する素な結び目も 1 つしか存在しないことが

分かっている．結び目を Fig. 2-(b-1) に示すような位置で切断し，反時計回りに交差を辿った場合，交差列は以下ようになる．

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_1-C_4-C_3-C_2-C_4-E_r \quad (4)$$

Fig.2-(b-2) および Fig.2-(b-3) に示すような位置で切断した場合には，交差列は以下ようになる．

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_2-C_1-C_4-C_3-E_r \quad (5)$$

完全締結可能な 8 の字結びはこの交差列を有している．(4) 式あるいは (5) 式のような交差列は非締結ではない．よって，上記 2 式以外の交差列を持つ場合には，両端を引っ張ることによりほどくことができる．

Fig.2-(c) に交差を 5 個有する素な結び目を示す．交差を 5 個有する素な結び目は 2 つ存在する．一方は Fig.2-(c-1) のようなものであり，交差列は

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-E_r \quad (6)$$

となる．これは完全締結可能である二重ひとえ結びの交差列に等しい．もう一方は，Fig.2-(c-2) から Fig.2-(c-4) に示すもので，対応する交差列はそれぞれ以下になる．

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_3-C_2-C_1-C_4-C_5-E_r \quad (7)$$

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_1-C_2-C_5-C_4-C_3-E_r \quad (8)$$

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_2-C_1-C_5-C_3-C_4-C_5-E_r \quad (9)$$

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_1-C_4-C_5-C_2-C_3-C_5-C_4-E_r \quad (10)$$

よって，上記 5 式以外は，全て非締結な交差列となる．

交差が 6 個以上の場合にも，同様に，素な結び目から非締結ではない交差列を導出することができる．そして， n 個の交差を有する線状物体が与えられた時，その中に，3 個から n 個までの非締結ではない交差列をいずれも含まない場合には，解離操作 $U_{O_{IV}}$ を n 回適用しなくても，両端を引っ張ることで完全にほどくことができる．

3. ほどき操作計画手法

前章より，線状物体の交差列が非締結である場合には，各交差での上下関係に関わらず，しかも一気にほどくことができることが分かった．そこで，これを利用して，効率のよいほどき操作について考える．

Fig.3-(a-1) のような 2 次元画像が得られた場合，交差列は

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_3-C_2-C_1-C_4-C_5-E_r \quad (11)$$

となり，これは (7) 式の交差を 5 個有する非締結ではない結び目の交差列に等しい．すなわち，この物体は両端を引っ張ると結ばれてしまう可能性を持っている．そこで，解離操作 $U_{O_{IV}}$ を適用してほどくことを考える．Fig.3-(a-2) および Fig.3-(a-3) のように解離操作 $U_{O_{IV}}$ を 2 回適用すると，交差列は次のように変化する．

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_1-C_2-C_3-E_r \quad (12)$$

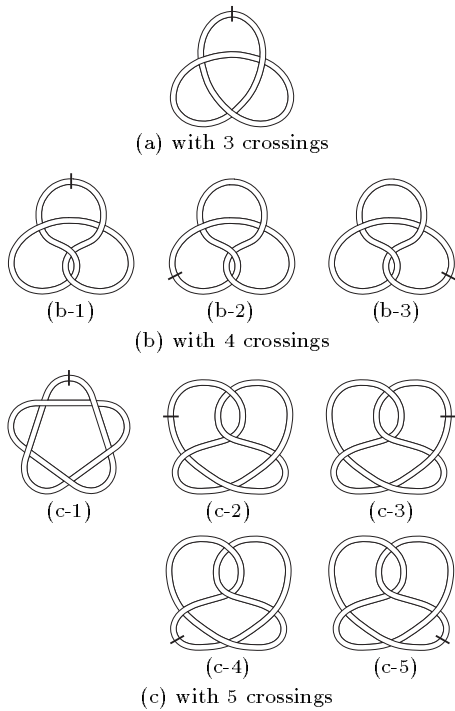


Fig.2 Looped prime knots

これは、(2) 式の交差を 3 個有する非締結でない交差列に等しいので、物体は依然として結ばれてしまう可能性を持っている。したがって、更に解離操作を加える必要がある。結局、Fig. 3-(a) の場合は、4 回の解離操作 U_{OIV} と 1 回の解離操作 U_{OI} あるいは U_{OIV} が必要となる。一方、Fig. 3-(b-2) および Fig.3-(b-3) のように解離操作 U_{OIV} を 2 回適用すると、交差列は

$$E_l-C_1-C_2-C_3-C_3-C_2-C_1-E_r. \quad (13)$$

となり、これは非締結な交差列となる。したがって、Fig. 3-(b-3) の状態で両端を引っ張ればほくことができる。すなわち、Fig.3-(b) に示すほどき操作の方が、Fig. 3-(a) より効率がよいといえる。ここで、交差を 3 個有する非締結でない部分交差列を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \dots-C_i-\dots-C_j-\dots-C_k- \\ \dots-C_i-\dots-C_j-\dots-C_k-\dots \quad (i < j < k). \end{aligned} \quad (14)$$

もし、物体の交差列が上記のような部分交差列を持てば、物体は Fig. 1-(b-2) のようなひとえ結びに相当する部分を持っている可能性があり、両端を引っ張ると結ばれてしまう可能性がある。Fig. 3-(a-1) の場合、以下のように、交点を 3 個有する部分交差列を 3 つ含んでいる。

$$\dots-C_1-\dots-C_4-C_5-\dots-C_1-C_4-C_5-\dots, \quad (15)$$

$$\dots-C_2-\dots-C_4-C_5-\dots-C_2-\dots-C_4-C_5-\dots, \quad (16)$$

$$\dots-C_3-C_4-C_5-C_3-\dots-C_4-C_5-\dots. \quad (17)$$

ここで、一回の解離操作 U_{OIV} によって消去できる交差は、交差 C_1 と交差 C_5 である。交差 C_5 を消去すれ

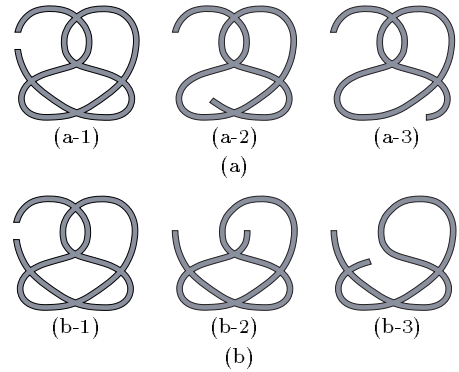


Fig.3 Examples of unraveling processes

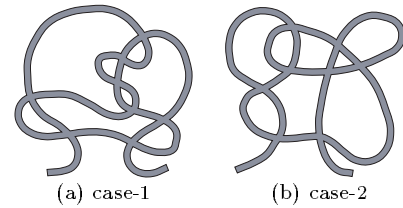


Fig.4 Examples of unraveled objects

ば、上記 3 つの部分交差列はいずれも消去される。したがって、両端を引っ張れば一気にほくことができる。一方、交差 C_1 を消去すれば、(15) 式の部分交差列は消去されるが、物体は依然として (16) 式および (17) 式で表される部分交差列を含んでいることになる。したがって、更に交差 C_2 か交差 C_5 を消去する必要がある。このように、非締結でない部分交差列により多く含まれる交差のうち、端点に近いものから順に、解離操作 U_{OIV} を適用して消去していき、交差列が非締結でない部分交差列を含まなくなったら、両端を引っ張ることにより、残った交差を一気に消去することができる。このように、線状物体の 2 次元情報、すなわち交差列だけから、効率のよいほどき操作を得ることができる。

4. ケーススタディ

これまでの議論をもとに、定性的ほどき操作計画システムを試作した。Fig.4に、交差を 8 個有する絡まった線状物体の例を示す。case-1 および case-2 の交差列はそれぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_6-C_2-C_1- \\ -C_7-C_8-C_6-C_5-C_4-C_3-C_8-C_7-E_r. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_2-C_1-C_5-C_6- \\ -C_7-C_3-C_4-C_8-C_6-C_7-C_8-C_5-E_r. \end{aligned} \quad (19)$$

試作システムにより、case-1 および case-2 の交差列は、49 パターンおよび 19 パターンの非締結でない部分交差列を含んでいることが分かる。ここで、左端点から初めて現れる交差を数えた時の i 番目の交差を C_{li} 、右端点から初めて現れる交差を数えた時の j 番目の交差を C_{rj} とする。例えば、case-1 において $C_{l1}=C_1$ 、

Table 1 Unraveling process for case-1

deleted crossings	remaining not-unravelable subsequences
none	49
C_1	21
C_7	21
C_1, C_2	7
C_1, C_7	7
C_7, C_8	7
C_1, C_2, C_3	3
C_1, C_2, C_7	0
C_1, C_7, C_8	0
C_3, C_7, C_8	3

$C_{r2}=C_8$ である．今，解離操作 UO_{IV} のみを用いて m 個 ($m = 1, \dots, 8$) の交差を消去するものとする．交差 C_{i_i} ($i = m, m-1, \dots, 1, 0$) と C_{r_j} ($j = m-i$) を消去した時に，消去後の物体の交差列に含まれる非締結でない部分交差列の数を Table 1 および Table 2 に示す．

case-1 の場合，Table 1 に示すように，3 個の交差 C_1, C_2, C_7 ，あるいは C_1, C_7, C_8 を消去すると，物体は非締結でない部分交差列を全く含まなくなる．したがって，この状態で物体の両端を引っ張れば，残った交差を一気に消去し，物体を完全にほどこことができる．これは，8 個全ての交差を解離操作 UO_{IV} を用いて消去する場合に比較して，より少ない操作数でほどこ操作を遂行できることを意味する．case-2 の場合，Table 2 に示すように，非締結でない部分交差列を完全に含まないようにするためには，5 個の交差 C_4, C_5, C_6, C_7, C_8 を消去する必要がある．この場合も，全ての交差を解離操作 UO_{IV} で消去する場合に比較すれば，より少ない操作数でほどこ操作を遂行できるが，case-1 に比較すると，非締結でない部分交差列が含まれないようにするために，より多くの交差を消去する必要がある．

このように，線状物体の 2 次元情報である交差列から，効率の良いほどこ操作を計画することができた．ただし，効率の良いほどこ操作が得られるかどうかは物体の交差列に依存しており，交差列からだけでは効率の良い操作が得られない場合には，部分的に交差の上下関係を判定する必要があると思われる．

5. 結論

本研究では，線状物体の各交差における上下関係を用いることなく，2 次元情報である交差列から，非締結性を利用して，効率の良いほどこ操作を計画する手法を提案した．なお，本研究での操作計画は定性的なものであり，線状物体の両端を引っ張ってほどこした際に生じる可能性のある物体のねじれについては考慮していない．これについては，具体的な把持位置や軌道を含めて，定量的な計画手法が必要となる．

Table 2 Unraveling process for case-2

deleted crossings	remaining not-unravelable subsequences
none	19
C_1	11
C_5	11
C_1, C_2	7
C_1, C_5	7
C_5, C_8	8
C_1, C_2, C_3	2
C_1, C_2, C_5	5
C_1, C_5, C_8	5
C_5, C_7, C_8	4
C_1, C_2, C_3, C_4	1
C_1, C_2, C_3, C_5	2
C_1, C_2, C_5, C_8	4
C_1, C_5, C_7, C_8	2
C_5, C_6, C_7, C_8	2
C_1, C_2, C_3, C_4, C_5	1
C_1, C_2, C_3, C_5, C_8	1
C_1, C_2, C_5, C_7, C_8	1
C_1, C_5, C_6, C_7, C_8	1
C_4, C_5, C_6, C_7, C_8	0

参考文献

- [1] 稲葉雅幸, 井上博允, “ロボットによる紐のハンドリング”, 日本ロボット学会誌, 3, 6, pp.32-41, 1985.
- [2] J. E. Hopcroft, J. K. Kearney, and D. B. Kraftt, “A Case Study of Flexible Object Manipulation”, Int. J. Robotics Research, 10, 1, pp.41-50, 1991.
- [3] T. Morita, J. Takamatsu, K. Ogawara, H. Kimura, and K. Ikeuchi, “Knot Planning from Observation”, Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.3887-3892, 2003.
- [4] 松野隆幸, 玉置大地, 新井史人, 福田敏男, “トポロジカルモデルと結び目不変量を用いたマニピュレーションのためのロープの形状認識”, 計測自動制御学会論文集, 41, 4, pp.366-372, 2005.
- [5] 若松栄史, 妻屋彰, 荒井栄司, 平井慎一, “結び/解き操作を含めた線状物体のマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, 23, 3, pp.344-351, 2005.
- [6] 若松栄史, 妻屋彰, 荒井栄司, 平井慎一, “結び目理論に基づく線状物体の結び/締め操作の定性計画”, 日本ロボット学会誌, 24, 4, pp.523-532, 2006.
- [7] M. Saha and P. Isto, “Motion Planning for Robotic Manipulation of Deformable Linear Objects”, Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2478-2484, 2006.