解 説

平板や電線のような柔軟物体の挿入作業

Insertion Task of a Flexible Beam or a Flexible Wire

中 垣 博 文* *九州電力(株)

Hirofumi Nakagaki* *Kyushu Electric Power Co., Inc.

1. は じ め に

紐、布、紙、電線など柔らかな性質を持つ物体(柔軟物体)は数多く存在しており、そのような物体をロボットでハンドリングする技術は大変に重要である。柔軟物体と一口に言っても、物体の種類によってその特徴や性質は千差万別であり、ハンドリング方法も非常に異なる。ここでは、柔軟物体のなかでも弾性変形のみを生じる平板や電線のような物体の作業を取り上げる。

弾性変形のみを生じる平板や電線のような物体は、他の柔軟物体と比較してこれまで多くの研究が行われている[1]~[18]。これは、物体のモデル化が他の柔軟物体より比較的行いやすいためと考えられる。このような物体は、重力や外力により変形が生じるため、挿入作業を例にとっても、剛体と異なった問題が発生し、剛体の場合よりも複雑な手法を用いる必要がある。

本解説では、挿入作業に着目し、まず剛体と異なる問題点を示しながら挿入過程を説明する。次に、挿入過程のなかの段階ごとに研究状況を紹介するとともに、九州電力で開発している配電作業用ロボット車での実作業例についても紹介する。最後に平板や電線のような柔軟物体の作業についてまとめる。

2. 平板や電線の挿入過程

平板や電線のような柔軟物体をロボットアームを用いて穴の空いた物体に挿入する場合について挿入過程を分類すると、図1に示すとおり次の三つの段階に分けられる。

- (1) 穴に向かって物体を移動(移動段階)
- (2) 穴を物体の先端で探索(探索段階)
- (3) 穴へ物体を挿入(挿入段階)

これら三つの段階については、剛体においても同様な分類が可能であるが、剛体と比較するといろいろな課題がある。まず(1)の段階では、重力により物体が変形するた

め、ロボットハンドからの物体先端の相対位置を正確に算定する必要がある。この算定には、物体モデルを用いて、物体の弾性係数や長さなどから算定する方法や視覚センサで計測する方法などが用いられる。また、物体移動時に物体が振動するため、場合によっては物体振動を抑制する方法が必要となる。この振動抑制については、従来から多くの研究(例えば,[2]~[6])がなされている。

次に(2)の段階では、物体先端で穴の位置を探索する必要がある。物体先端の位置を正確に把握すると同時に物体先端の接触状態や移動状況などを認識する必要がある。認識する方法は探索手法に深く関係している。この認識方法としては、物体にセンサ類を取り付けることができないため、視覚センサやロボットアームに取り付けた力覚センサなどで得られた情報から推定する方法が取られる。

最後に(3)の段階では、重力以外に穴の摩擦などから受ける力により物体が変形(特に座屈)するため、物体を変形させないようなロボットハンドの移動方法や物体が変形したときの対処方法が必要となる。

以下では、特に今後の研究が期待される(2)と(3)の段階について詳細に説明する。

図1 Process of insertion task

原稿受付 1998年1月19日

キーワード: Flexible Beam, Flexible Wire, Bend, Hot-Line Work Robot

*〒810-8720 福岡市中央区渡辺通2丁目1-82

*Chuo-Ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

3. 穴の探索手法

物体の先端により対象物の穴を探索する方法は、試行錯誤的な要素が大きく、最適な手法は柔軟物体や対象物の材質などにより異なる。ここでは、探索手法の例として、対象物の表面を滑らせて探索する方法[7]と対象物に押し当てて探索する方法[8]の二つの手法について紹介する。

3.1 対象物表面を滑らせる方法

穴探索の一番簡単な方法としては、物体が対象物に接触した後、穴の位置まで対象物の表面を滑らせるという方法である。この手順としては、まず、物体先端が対象物に接触後、接触を維持しながら物体先端を穴の方向に移動させ、穴に入ったことを認識する。このとき、物体が対象物に接触したときと物体が対象物の上を滑っているときでは形状が異なる。これは、移動時に物体先端へ対象物からの反力と摩擦力の二つの力が加わるためである。したがって、物体先端を移動させるときには、物体先端が滑りだすまでのロボットハンドの移動を考慮する必要がある。

物体が穴に入ったときの認識の一手法としては、物体の先端に加わる力の方向の変化で認識することができる。つまり、図2で示すように、物体先端に加わる力が物体側面に加わる力へと変化する、ロボットアームの力覚センサで計測される力の方向が変化する。つまり、穴を発見する直前に物体の先端にかかる力を f_1 とし、穴に入ったときの力を f_2 とすると、以下の条件で認識することができる。

$$\frac{f_1 \cdot f_2}{\|f_1\| \|f_2\|} \neq 1 \quad (1)$$

この探索方法は、剛体でもよく用いられる方法であるが、柔軟物体においては物体が平板でかつ対象物の表面が滑らかな場合に適している。それは、物体が平板の場合、物体の曲げ変形が一方に限定されるため、滑らせている間の形状変形の想定が簡単である上、物体をある一定方向に滑らせている間の形状はほとんど一定である。電線の場合には、滑らせている間にねじれが生じやすく、移動中に形状が変化することがある。そのため、穴の位置に物体先端を移動させるために移動中の形状を詳細に計測することが必要となり、手順が複雑になる。また、物体が穴に入ったことを認識する方法として物体から伝わる力覚情報を利用する場合、対象物表面が粗いときには雑音が発生し、誤認識

図2 Search for a hole along a wall

をする恐れがある。

3.2 対象物に押し当てる方法

穴探索のために柔軟物体を移動するとき、前述のように、物体先端を対象物表面で滑らせる方法ではなく、対象物から離して移動する方法がある。この手順としては、対象物に物体を押し当て、穴に入ったかどうかを判定する。入ってなければ、対象物からいったん物体先端を離し、ロボットハンドの位置を移動して、再度挿入を試行することを繰り返す。このとき、穴に入ったことを認識する手段としては、物体を対象物に押し当てたときに反力がないことを利用する。この方法は、人間が糸の先端を針の穴に通す作業と同じような手法である。

この場合、対象物に物体が接触するまでは重力のみが加わるため、ロボットハンドに対する物体先端の相対位置変化をほとんど考慮する必要はない。また、対象物表面の状態に影響されないため、電線や表面の粗い対象物にも適用できる。

剛体の場合、探索後に穴の縁と物体との接触状態を判断しながら穴の形状に物体姿勢をあわせることが多い[9]。ところが、柔軟物体で特に電線の場合、物体先端が穴の縁に当たったとき、押しつけた力に対して穴から受ける反力により物体自体が変形し、物体先端が穴へ滑り込みやすく、剛体と比較して挿入手順を簡単にできる利点もある。

4. 穴への挿入手法

平板や電線のような柔軟物体を穴へ挿入する場合の問題としては、これまで述べたように重力によって物体自体が挿入前から曲がっていることおよび先端に力が加わると物体が変形（座屈）することである。このような座屈を避けて挿入するためには、物体を穴に挿入するときのロボットハンドの移動方法がまず課題となる。これまでの研究では、移動経路として図3に示すとおり次の二つの方法が提案されている。

(1) 物体の先端が穴とまっすぐになるようにロボットハン

図3 Inserting method

ドで把持したとき、その形状に沿って移動させる方法[11]

(2) 穴の下側面に物体先端を押し付けながら、その形状に沿って移動させる方法[13]～[16]

(1) の方法では、物体の移動、探索、挿入までの物体形状が類似しているため、力制御などは不要で、単純移動のみで簡単に実現可能である。しかし、物体先端を穴と平行にするために、物体の長さや弾性係数などが求まっている必要がある。また、物体移動時に穴内部で物体先端が穴の側面に引っかかったり、穴側面の摩擦を受けたりすることにより物体が座屈しやすい。このような座屈を発生しないように移動経路を物体形状よりは上方（重力方向を下としたとき）の位置となるように変更する手法も提案されている[11]。そして、どうしても物体が座屈した場合については、ロボットハンドで把持する物体の端の角度を変え、物体の座屈形状を上にも凸の形状と下にも凸の形状を交互に変化させて挿入する手法が提案されている[18]。

(2) の方法では、物体の先端を穴側面に押しつけて物体が座屈しないよう挿入するため、力制御を行う必要がある。また、(1) のように挿入時の物体形状に制限がないため、弾性係数や長さが求まっている必要はない。そのうえ、物体を穴の側面に押し付けるよう力を加えるため、先端の側面が穴の側面にあたり、先端が穴側面に引っかかることは少ない。しかしながら、移動時には重力のみが加わっているが、挿入時は穴側面に押しつける力が加わるため、移動時と挿入時の物体形状が極端に異なる。したがって、物体を挿入するために物体形状を上側に凸の形状（移動時）から下側に凸の形状（挿入時）へ変形する作業[17]が必要となる。

挿入するための経路として以上の二つの方法が提案されているが、経路だけでは座屈等が発生し挿入できない場合もある。例えば、穴のなかにバリがある場合、挿入方法と無関係に物体先端が穴の側面のバリに引っかかる。このとき、把持しているロボットハンドを振動させ、物体に振動を与えることでバリへ引っかからないで挿入する方法が提案されている[12]。

5. 実 作 業 例

九州電力では、電柱上の高圧架空配電線の作業を安全に実施するために遠隔操作型配電作業用ロボット車の開発[19]～[21]を行っている。このロボットの作業のなかで電線を接続するために電線をスリーブと呼ばれる円筒形のアルミ管に挿入する作業がある。ここでは、この挿入作業の実現方法について紹介する。

図 4 は、スリーブ挿入作業の例である。すべての作業は、専用の言語で記述されており、あらかじめティーチングされたデータを実際の計測値で補正しながらプレイバック

図 4 Insertion task of a sleeve into a wire

クする方式を取っている。まず、電線の挿入作業としては、ティーチング時に電線のロボットに対する相対位置を計測しておき、その電線に対する最適なスリーブ位置を教示する。このときの電線上の距離測定点が点 a, b, ロボットハンドの教示点が c である。プレイバック時は、電線上の 2 点 A, B の位置を測定し、ティーチング時の点 a, b, c の相対的な位置関係からロボットハンドの目標位置 C と姿勢を計算している。計算された位置・姿勢にロボットハンドを移動させることにより、電線とスリーブは作業者にとって最適な位置関係となり、作業者はジョイスティックを使用してロボットアームを遠隔操作しながら挿入作業を実現する。

これらの作業を 2 章で述べた挿入段階で考えると、(1) の段階についてのみ自動化を実施している。ただし、電線やスリーブの位置が正確に計測されておりかつ電線が比較的固く形状変形をほとんど考慮する必要がないため、(2) や (3) の段階について 3, 4 章で述べた手法を使用しなくとも作業が実施可能である。しかしながら、作業全体を高速化するためには、(2) や (3) の段階まで自動化する必要があり、現在検討中である。

6. ま と め

本解説では、平板や電線のような柔軟物体を穴に挿入する作業について研究状況を述べるとともに実際の配電線作業の実現方法について紹介した。挿入作業においては、剛体と異なった問題があり、挿入手法や考え方もかなり異なっている。

柔軟物体で実現しなければならない作業としては、このような挿入作業ばかりではなく、曲げ作業や巻き付け作業などたくさん考えられる。前述した配電作業用ロボット車を例にとると、柔らかい銅電線をアルミ電線の周りに巻き付けるという作業が検討されている（図 5）。しかし、対象物を自動的に測定しながら 2 本のロボットアームを自在に動かすということは、まだ実現できていないため、このような複雑な作業については、専用工具を使用した作業を

図5 Wind task of a copper wire round an aluminium wire

検討しているのが現状である。ところが、各作業ごとに専用工具を数多く搭載することはロボットの大きさの観点からも無理があるため、工具を使用しないで2本のロボットアームのみで実現する方法の確立が望まれている。

今後、柔軟物体のいろいろな作業について自動化のための研究が進むことを望みます。

参 考 文 献

- [1] 松野：“柔軟物体のハンドリングにおけるタスク理解”，システム/制御/情報，vol.37，no.10，pp.599-606，1993.
- [2] 新井，福田，細貝：“柔軟材ハンドリングロボットの研究（第3報）”，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，no.3，pp.945-946，1990.
- [3] F. Arai, L. Rong and T. Fukuda: “Trajectory Control of Flexible Plate Using Neural Network,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.155-159, 1993.
- [4] 松野，坂部，池田：“Nリンク・マニピュレータによる柔軟材の最適ハンドリング戦略”，計測自動制御学会論文集，vol.30，no.12，pp.1521-1528，1994.
- [5] F. Matsuno, T. Murachi and Y. Sakawa: “Feedback Control of Decoupled Bending and Torsional Vibrations of Flexible Beams,” Journal of Robotics Systems 11(5), pp.341-353, 1994.
- [6] B.J. Petterson and R.D. Robonett: “Model-Based Damping of Coupled Horizontal and Vertical Oscillations in a Flexible Rod,” Journal of Intelligent and Robotic Systems, no.4, pp.285-299, 1991.
- [7] 中垣，北垣，築根：“線状柔軟物体の挿入作業における接触動作に関する研究”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'95講演論文集，vol.A，pp.175-178，1995.
- [8] 中垣，北垣，小笠原，築根：“画像トラッキングを用いた線状柔軟物体の先端力推定と挿入作業の適用”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.3，pp.422-430，1997.
- [9] 日本ロボット学会誌特集：“組立作業計画”，vol.11，no.2，1993.
- [10] M.Z. Chen and Y.F. Zheng: “Vibration-Free Movement of Deformable Beams by Robot Manipulator,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.456-461, 1993.
- [11] Y.F. Zheng, R. Pei and C. Chen: “Strategies for Automation Assembly of Deformable Objects,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2598-2603, 1991.
- [12] S. Lee and H. Asada: “Assembly of Parts with Irregular Surface Using Active Force Sensing,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2639-2644, 1994.
- [13] 競，松野：“柔軟部品の組立作業のためのタスク理解”，第12回ロボット学会学術講演会予稿集，no.1，pp.247-248，1994.
- [14] 松野，競：“Beam-in-Holeにおけるタスク理解”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'95講演論文集，vol.A，pp.165-168，1995.
- [15] W. Kraus Jr. and B.J. McCarragher: “Force Fields in the Manipulation of Flexible Materials,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2352-2357, 1996.
- [16] W. Kraus Jr. and B.J. McCarragher: “Case Studies in the Manipulation of Flexible Parts using a Hybrid Position/Force Approach,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.367-372, 1997.
- [17] Y.F. Zheng and M.Z. Chen: “Trajectory planning for two manipulators to deform flexible beams,” Robotics and Autonomous Systems 12, pp.55-67, 1994.
- [18] 中垣，北垣，築根：“平板状柔軟物体の挿入作業に関する研究”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.3，pp.398-405，1996.
- [19] M. Nakashima, H. Yakabe, M. Maruyama, K. Yano, K. Morita and H. Nakagaki: “Application of Semi-Automatic Robot Technology on Hot-Line Maintenance Work,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.843-850, 1995.
- [20] S. Tanaka, Y. Maruyama, K. Yano, H. Inokuchi, T. Tomiyama and S. murai: “Work Automation with the Hot-Line Work Robot System “Phase II,”,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1261-1267, 1996.
- [21] 脇迫，白石，村井，橋口，石川，鶴田，丸山，矢野，中島：“遠隔操作型配電作業ロボットの距離センサシステム”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.3，pp.468-473，1997.

中垣博文 (Hirofumi Nakagaki)

1964年11月30日生。1989年横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻修士課程修了。同年、九州電力(株)入社。配電部配電課に勤務。工学博士。電気学会、計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)