

展 望

柔軟物操作

Deformable Object Manipulation

平井慎一* *立命館大学ロボティクス学科

Shinichi Hirai* *Dept. of Robotics, Ritsumeikan University

1. はじめに

世界は柔軟物であふれている。

われわれの日常生活を思い出してみよう。朝、起床するときには、毛布をたたみ枕を整える。顔を洗いタオルで顔を拭く。パンをトーストしバターを塗る。服を着替えて靴下を履く。新聞を広げて読み始める。毛布、枕、タオル、衣服、靴下、パン、バター、新聞紙、いずれも柔らかく変形しやすい物である。近くのスーパーを見てみよう。キャベツ、トマトを始めとする種々の野菜類、みかん、ぶどうなどの果物類、様々な肉類や魚介類、その他こんにゃく、ちくわ、かまぼこなど、数多くの食品が並んでいる。これらはすべて柔らかく変形しやすい物である。工場の中を見てみよう。自動車工場ではチューブやホースを配管し、革製シートを取り付ける。家電製品の工場ではコードやケーブルを配線する。食品工場では様々な食材をハンドリングし、包装紙やラミネートフィルムで包装する。衣服の縫製工場では、布地をハンドリングする。チューブ、ホース、革製シート、コード、ケーブル、包装紙、ラミネートフィルム、布地、いずれも柔らかく変形しやすい物である。病院を見てみよう。手術のときには適切な治療を行うために、皮膚組織や筋肉組織、内蔵をハンドリングする。生体もまた柔らかく変形しやすい物から構成されている。

以上のように、日常生活環境、生産現場、医療現場など様々な所に柔らかく変形しやすい物体が存在し、それを対象とする作業を見出すことができる。柔軟物操作の目標は、これら柔らかく変形しやすい物体を扱う作業の理解と機械システムによる実現であり、従来より様々な分野で研究が進められている [1][2]。柔軟物操作においては、1) 柔軟物の性質を調べること、2) 柔軟物を扱うための作業方を導くこと、3) 柔軟物操作を実現する機械システムを構築することが要求される。本解説では、著者の私見を交えながら

柔軟物操作に関する展望を試みる。

2. 柔軟物操作の特徴

2.1 力学的性質の多様性

一言で柔軟物と総称しているが、その力学的性質は多岐に渡る。たとえば板金は、長さや幅と比較すると厚さが小さいため、全体として弾性的な曲げ変形を生じる。アルミフィルムも同様の変形をするが、長さや幅と厚さの比が板金より小さいため、折れ曲がりすなわち塑性変形が生じやすい。ゴムは材質そのものが柔らかく、弾性変形を生じ、極めて高い伸び率を示す。布地においては、糸の曲げ変形と糸の絡み部の着脱により、全体としての伸縮性を示す。一方、紙においては曲げ変形が主であり、伸縮変形は一般に小さい。肉類や生体は、粘性が高く非線形の粘弾性特性を示す。このように柔軟物の力学的性質は多様であり、一般的な作業方策を見出すことは困難である。したがって、柔軟物ならびに柔軟物操作作業の適切な体系化が望まれる。

2.2 変形を利用する作業方策

物体の変形を利用することにより、遂行が可能になる、あるいは遂行が容易になるような作業が数多く見出される。たとえば紙をめくる作業に関しては、図1に示すように紙の両端を近付け、曲げ変形を生じさせて隙間を作り、そこに指を差し入れることにより遂行することができる。ホースやゴム管の挿入作業においては、図2に示すように往復運動やねじり運動を与えることにより、中心軸に沿って直線運動を与えるより少ない力で遂行することが可能になる。柔軟物の把持においては、対象物が持つコンプライアンスを利用することにより、把持が容易になる場合がある。また、タッパーのふたや電気機器のカバーなど、多くの製品で採用されている締めりばめによる締結は、変形を利用して組立を容易にする例である。このように、変形を押さえて剛体化するのではなく、物体の変形を巧く利用する作業方策は多く見受けられる。このような物体の変形を利用する作業方策を導くことは、柔軟物操作における重要な課題である。

原稿受付 1997年11月30日

キーワード：柔軟物、物体操作、変形

*〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1

*Noji-higashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga 525-77

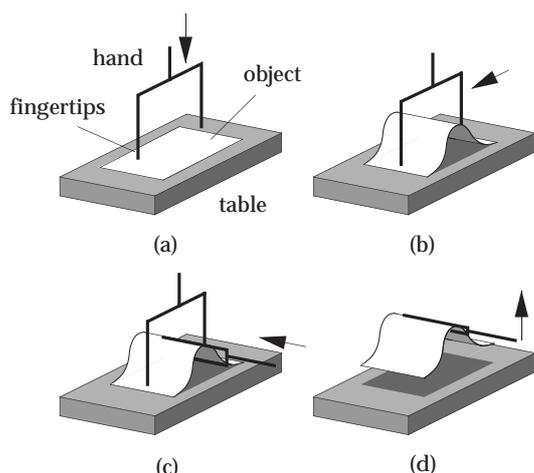


図1 紙の摘み上げ

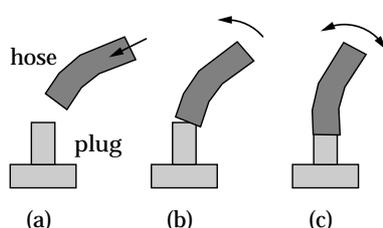


図2 ホースの挿入作業

3. 柔軟物のモデリング

硬い物体の操作では、モデルベースト手法が提唱され、多くの研究が成されてきた[3]。モデルベースト手法の発展には、CADの分野で発展してきたソリッドモデリングの技法に依るところが大きい。CSG, B-reps, Octreeに代表されるソリッドモデリングの技法を基礎にして、ハンドアイシステム、把持計画、障害物回避などの研究が進められた。柔軟物操作の研究においても柔軟物のモデリングは、作業方策を導出したり評価する上で基盤となる技術である。

柔軟物操作において対象物は、変位や力を受けて、また他物体との接触により変形する。物体の変形を扱う技術として、離散要素法、有限要素法、境界要素法が挙げられる。特に有限要素法は、CAEの基本的なツールとして広く用いられている。近年のパッケージソフトウェアでは、大変形をモデリングすることや他物体との接触を解析することが可能である。したがって有限要素法は、柔軟物操作作業をモデリングし、解析するための基本的なツールとして期待できる。

有限要素法は広いクラスの柔軟物に適用可能であるが、モデルの構築が容易とは限らない。したがって、あるクラスの柔軟物に特化したモデリング技法も重要である。例えば、布地のモデリング技法として、Leaffは編物幾何学に基づく

手法[4]を、川端らは二軸伸長変形理論[5][6]を提唱した。コードやロープなどの線状柔軟物のモデリング技法として、微分幾何に基づく手法が提案されている[7][8]。Villarrealらは、物体が有する分布的なコンプライアンスを表現する手法として、buffer zoneを提案した[9]。また、コンピュータグラフィックスにおける布のモデリング技術[10]や柔軟体のモデリング技術[11][12]が利用できる可能性もある。一方、Wolterらは、ひもの変形過程を定性的に記述する手法を提案した[13]。これらの技法は、モデルの構築やモデルパラメータの同定が比較的容易であり、対象とする操作作業によっては十分であろう。

4. 柔軟物操作における作業方策の導出

柔軟物操作においては、物体の変形によって作業がたびたび失敗する。一方では、物体の変形を利用して作業を遂行することが多い。したがって、対象物体の変形を考慮しつつ物体にどのような運動や力を与えるかを導くことが、作業を遂行する上で重要である。

柔軟物操作における作業方策を導く一つの手法は、作業モデルの解析を通して作業方策を導くアプローチである。例えば、図3に示す変形しやすい軸を穴に挿入する作業(beam-in-hole)に対して、作業の解析と作業方策の導出が成されている。特に、クリアランスが小さく軸が穴から大きな抗力を受け、軸に座屈が生じた場合の方策が問題である。Zhenらは、軸の先端を変形形状の伸開線に沿って動かして抗力を減少させ、その後軸の変形形状に沿って軸を挿入する方策を提案した[14]。中垣らは、把持端における軸の角度を制御し、座屈形状を変化させる方策を提案した[15]。Krauhaらは、作業の力学的解析からハイブリッド制御系を設計した[16]。また、紙のハンドリングにおける紙葉類の力学的挙動が解析されている。西村は、紙のめくり動作の力学的解析からめくり動作が実現できる条件を導き、ページめくりを実現する機械を試作した[17]。吉田らは、折れぐせやカールのある紙のモデリング手法を提案し、プリンタ紙の搬送における紙の挙動を解析している[18]。以上のような解析的手法においては、対象物体と操作作業過程のモデリングが必要である。作業方策を導く別の手法として、作業の実演から作業方策を導くアプローチが試みられている。平井らは、ホースの蛇口への挿入作業における人間の運動を計測し、力情報から作業状態遷移を識別する関数を導いた[19][20]。解析的な方法と作業の実演を基にする手法には、それぞれ一長一短がある。解析的手法においては、比較的一般的な作業方策を導くことができるが、作業過程のモデリングや解析には困難な点が多い。実演を基にする手法においては、作業方策を比較的容易に導くことができるが、得られた作業方策は一般性に欠ける。

作業方策の別の側面としてセンシングがある。紐や布地

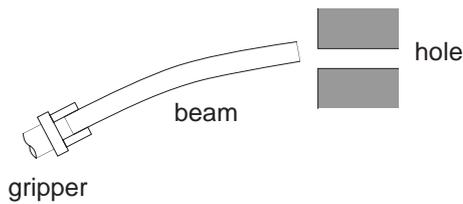


図3 柔軟軸の挿入

など変形が大きく、変形の予測が容易でない柔軟物の操作においては、変形を計測するセンサ、特に視覚センサが有効である。視覚センサを用いるときには、センサ信号を処理する手法や視覚情報から運動を決定する手法に関する考察が必要である。稲葉らは、視覚をもとに操作量を修正し、さらに視覚により動作を確認することで、マニピュレータによる紐のハンドリングを行った[21]。Hopcroftらは、紐の結び目を記述する言語を提案するとともに、視覚を用いて記述した結び目を実現するマニピュレータシステムを構築した[22]。濱島らは、洗濯物の展開作業を対象に、視覚を用いて洗濯物の把持点を決定し、洗濯物を分離することを試みた[23]。小野らは、布地の展開作業において視覚と触覚の協調が必要であることを指摘し、布地形状を計測する視覚センサと布地を一枚把持したか否かを検出する触覚センサを用いて、布地展開作業をマニピュレータシステムに実行させた[24]。変形が大きい柔軟物の操作においては、変形を計測する視覚センサと対象物に作用する力や圧力を計測する力覚センサや圧力センサを融合して用いる技術は、今後ますます必要になる。

5. 柔軟物を操作する機械システム

柔軟物を扱う機械システムの開発は、従来、紙パルプ、製糸、織物など素材や素材に近い対象物を扱う作業が主な対象であった。近年では、対象とする作業の範囲が広がっている。たとえば、プリンタやキャッシュディスペンサーなど、紙葉類を扱う機械が日常生活で用いられている。また、生産現場では、柔軟部品を扱う工程の自動化が試みられている。食品工場では、食材のハンドリングや包装用に様々な機械システムが開発されている。以上のように様々な分野で、柔軟物操作作業を実現する機械システムの開発研究が進められている。たとえば、藤村らは、長尺紙の紙送り精度を向上させる機構を提案し、その運動特性を解析している[25]。高橋らは、ゴムベルトの分離を実現するフィーダの機構を提案し、ゴムベルト自動組付機を開発した[26]。森光らは、長尺の光ファイバを布設するために、分散的に光ファイバを索引する装置と制御則を提案した[27]。小野らは、積み重ねられた布地から一枚を分離し持ち上げるハンド機構を試作した[28]。

機械システムの機構は、対象とする作業に強く影響され

る。剛体の操作においては、剛体上の一点の位置と姿勢を制御すれば十分であるが、柔軟物の操作で全体の変形を制御するためには、一点の制御では不十分であり多点における制御が必要になることが多い。個々の柔軟物操作作業に対して機械システムを設計する際には、対象柔軟物の性質や作業の方策を概念設計の段階から明確に意識する必要がある。

6. 課題

6.1 モデリング

われわれが扱う柔軟物の力学的特性は多様である。柔軟物の計算機モデルを構築するためには、与えられた柔軟物の力学的特性を分析し、モデルパラメータを推定する必要があるが、現状では多くの手間と時間を要する。また、多くの柔軟物は、温度や湿度など環境の条件によってその力学的特性が変化する。したがって、リアルタイムあるいはそれに近い時間で柔軟物のモデルを構築する技術、適応的に柔軟物のモデルを更新する技術が有用であると考えられる。物体形状をリアルタイムで計測する装置に関しては研究開発が進められているので、力学的特性をリアルタイムで同定する技術がキーである。

柔軟物操作において、物体どうしの接触は重要な役割を果たす。したがって、柔軟物と柔軟物とが接触するときの物体の挙動を解析することは、柔軟物操作において重要である。しかしながら現状では不十分な部分が多く、今後の研究が期待される。

6.2 センシング

硬い物体の把持においては、十分な力を物体に加えることにより安定な把握を実現することが多い。一方、人間が柔軟物を把持するときには、指先の感覚を用い、指と物体との接触界面を適切に制御する。このような機能を実現するためには、分布的な圧力センサや滑り覚センサが必要である。さらに、どのような信号処理や情報処理を行うかを考察する必要がある。

実演に基づく手法では、人間の運動と感覚とを計測する。人間の運動に関しては、多点位置計測を通して手指の詳細な運動を計測することが可能である。一方、感覚に関しては、分布的な圧覚や滑り覚を作業中に計測することは容易ではない。この観点からも、分布的な圧力センサや滑り覚センサへの希求は高い。

6.3 作業方策の導出

解析的手法の対象作業は、現在、beam-in-hole に代表される基本的な作業に限定されている。一方、実演に基づく手法では、一般性を得ることが困難である。二つのアプローチを相補うように適用し、柔軟物操作における作業方策を導くことが一つの課題であると考えられる。

柔軟物の力学的特性は、温度や湿度などの環境によって変化する。また、柔軟物の力学的特性の多くはヒステリシスを有する。これらは柔軟物操作が失敗に終わる要因である[29]。したがって、対象柔軟物の力学的特性を推定し、作業方策を適応的に補正する技術が有効と考える。

様々な力学的特性を有する柔軟物を、人間は巧みに操作することができる。したがって、人間の柔軟物操作においては、手先の技量が発現していると考えられる。手先技量を理解する基本概念として、インピーダンスマッチングが提唱されている[30]。柔軟物における多様な力学的特性のある側面は、インピーダンスの概念により統一的に理解できる。今後、インピーダンスマッチングの概念を適用して、柔軟物操作における作業方策を解析し理解することが一つの課題になろう。

7. おわりに

本稿では柔軟物操作に対する展望を試みた。柔軟物操作は多様であり、幅広い分野で見受けられる。しかしながら本稿で取り上げた分野は、著者の知っている範囲に限られている。様々な分野における柔軟物操作に関しては、解説記事を参照していただきたい。

柔軟物操作は、実世界で物体を操作する上で必要性が高く、また対象領域が広い。したがって柔軟物操作に関する研究は、ロボティクスの分野に新たな領域を開く原動力の一つになると期待している。

参考文献

- [1] Taylor, P. M. eds., *Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials* pp. 3-138, Springer-Verlag, 1990
- [2] 山本 他, 柔らかい物の計測と制御調査研究分科会成果報告書, 日本機械学会, P-SC145, No. 437, 1992
- [3] 白井, 井上, 知能ロボット研究の展望 - モデルベースト・ロボティクス -, 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 6, pp. 462-469, 1987
- [4] Leaf, G. A. V., *Model of the Plain-Knit Loop*, Journal of the Textile Institute Vol. 51, No. 2, pp. 49-58, 1960
- [5] 川端, 丹羽, 七島, 河合, 平編布(平編地)の二軸伸長特性に関する理論的研究(第1報) 理論, 繊維機械学会論文集, Vol. 23, No. 5, pp. 95-108, 1970
- [6] 丹羽, 川端, 七島, 河合, 平編布(平編地)の二軸伸長特性に関する理論的研究(第2報) 理論計算値と実測値との比較, 繊維機械学会論文集, Vol. 23, No. 6, pp. 120-133, 1970
- [7] 若松, 平井, 岩田, 薄板状物体のマニピュレーションにおける曲げ変形操作の静力学的解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 608, pp. 1102-1109, 1997
- [8] Wada, T., Hirai S., Hirano, T., and Kawamura, S., *Modeling of Plain Knitted Fabrics for Their Deformation Control*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. , pp. 1960-1965, Albuquerque, April, 1997
- [9] Villarreal A and Asada, H., *A Geometric Representation of Disturbance Compensation for the Assembly of Flexible Parts*, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2708-2715, 1991
- [10] Weil J., *The Synthesis of Cloth Objects* Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, pp. 49-54, 1986
- [11] Terzopoulos, D. et al., *Elastically Deformable Models* Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 205-214, 1987
- [12] Terzopoulos, D. and Fleischer, K., *Modeling Elastic Deformation: Viscoelasticity, Fracture*, Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 269-278, 1988
- [13] Wolter, J. and Kroll, E., *Toward Assembly Sequence Planning with Flexible Parts*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1517-1524, 1996
- [14] Zheng, Y. F., Pei, R., and Chen, C., *Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2598-2603, 1991
- [15] 中垣, 北垣, 筑根, 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
- [16] Kraus Jr., W. and McCarragher, B. J., *Force Fields in the Manipulation of Flexible Materials*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2352-2357, 1996
- [17] 西村, 紙のハンドリング技術, 精密工学会誌, Vol. 55, No. 7, pp. 1169-1172, 1989
- [18] 吉田, 荻原, 相田, 折れぐせやカールのあるシートの滞留と搬送ジャムの検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 61, No. 590, pp. 3945-3951, 1995
- [19] Hirai, S., Noguchi, H., and Iwata, K., *Transplantation of Human Skillful Motion to Manipulators in Insertion of Deformable Tubes*, Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1900-1905, Nagoya, May, 1995
- [20] 平井, 野口, 変形しやすい管状物体の挿入作業における人間の運動と作業状態識別則のロボットマニピュレータへの移植, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 8, pp. 1172-1179, 1997
- [21] 稲葉, 井上, ロボットによる紐のハンドリング, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 6, pp. 538-547, 1985
- [22] Hopcroft, J. E., Kearney, J. K., and Kraftt, D. B., *A Case Study of Flexible Object Manipulation* Int. J. of Robotics Research, Vol. 10, No. 1, pp. 41-50, 1991
- [23] 濱島, 柿倉, 布地物体展開手順のプランニング(塊状洗濯物の分離), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 607, pp. 967-974, 1997
- [24] 小野, 喜多, 坂根, 視覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地の展開, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 275-283, 1997
- [25] 藤村, 小野, スキューロール紙送り機構における紙の運動解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 596, pp. 1354-1360, 1996
- [26] 高橋, 宮川, 青木, VIR・テ-プレコ-ダ用ゴム部品のハンドリング, 精密工学会誌, Vol. 55, No. 7, pp. 1173-1176, 1989
- [27] 森光, 寺澤, 光ファイバケーブルの長尺布設技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 594, pp. 548-553, 1996
- [28] Ono, E., Okabe, H., Ichiyo, H., and Asaka, N., *Robot Hand with Sensor for Cloth Handling* Proc. 1990 Japan-U.S. ASymp. on Flexible Automation, pp. 1363-1366, 1990
- [29] Taylor, P. M. and Pollet, D. M., *Why is automatic garment manufacture so difficult?* Proc. Int. Conf. Advanced Robotics Man. pp. 39-44, 1997
- [30] 有本, 非線形回路理論に基づく先端的メカトロニクス系の制御の研究, 科学研究補助金研究成果報告書(課題番号 08455188), 1997

平井慎一

1963年3月19日生。1990年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995年同助教授。1996年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授となり、現在に至る。1990年度計測自動制御学会論文賞。1996年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。
(日本ロボット学会正会員)