

物体の柔らかさが機械知能にどのように貢献するか

How Object Softness Contributes to Machine Intelligence

平井 慎一 (立命館大学ロボティクス学科)
Shinichi Hirai (Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.)

OS「柔軟物の力学的機能の活用と理解」の狙いは、柔軟物体の機械構造から発現される合理的な機能例を概観するとともに、そこに内在する力学原理を探るための理論的アプローチの可能性を示すことにある。本キーノート講演では、柔軟指操作、間接同時位置決め、変形による移動と跳躍等の例を通して、物理的な柔らかさが機械知能にどのように貢献しているかを述べ、今後の研究の方向性を探る。

1 はじめに

ロボティクスは伝統的に硬い物体から構成される系をその対象としており、系の柔らかさは望ましくなく避けるべき性質であるという見方が主流であった。一方、柔軟物操作や柔軟指操作の研究を通して、物体の柔らかさが制御系を単純化したり、従来の手法では困難な動作を実現できることが徐々に理解されつつある。すなわち、物体の物理的な柔らかさは望ましくない性質ではなく、むしろそれを積極的に用いることにより、機械システムの知能化に大きな役割を果たすのではないかと考えている。本キーノート講演では、物体の柔らかさが機械知能の実現にどのように貢献しているか、その方向性を探る。

2 柔軟指操作

”器用な物体操作”に関する研究は、これまで数多く成されているが、実験的な研究が多く、理論的なアプローチは少ない。有本は、この”器用さ”に関して、世界で初めて動学的に考察し、ある操作を実現するために最低限必要となる自由度により、物体操作の器用さを表す指標とすることを提案した。さらに有本らは、多様体上の安定論を駆使し、平面運動をする剛体を把持するためには二自由度が必要になること、平面運動をする剛体を把持し、任意の姿勢に物体を案内するためには三自由度が必要になることを証明した。ここで問題になるのは、自由度をこれ以上減らすことが可能か否かである。井上と平井は、各指が一自由度を有する二指ハンドにより、物体の把持と姿勢制御が可能であることを実験的に確認した。これは、物体の把持と姿勢制御には三自由度が必要であるという有本の主張に反する。この違いは、指のモデルの違いによることが判明している。有本らは Fig. 1-(a) に示す放射モデルを用いた。このモデルでは、半球指の中心から放射状に仮想バネが配置されている。すべてのバネは同じ長さを有し、結果としてすべての仮想バネ係数は等しくなる。指先の最大変形量を d で表す。半球指と物体が接

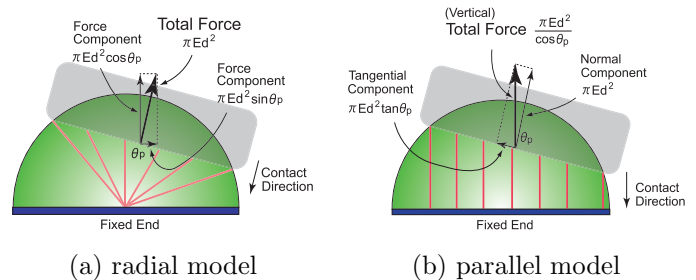


Fig.1: Fingertip models

触したときの把持力の大きさは、

$$F_{\text{radial}}(d) = \pi E d^2$$

と表される。ここで E はヤング率を表す。このモデルでは、把持力は半球指の中心を通る。把持力の大きさは、指先の最大変形量のみ依存し、指先と物体との相対角度には依存しない。

一方、井上らは Fig. 1-(b) に示す平行モデルを提案した [1]。指の底面から平行に仮想バネが配置されている。仮想バネのバネ係数は、仮想バネの長さに反比例するので、仮想バネ係数は一定ではない。指先と物体の相対角度を θ_p で表す。このとき、半球指と物体が接触したときの把持力の大きさは、

$$F_{\text{perp}}(d, \theta_p) = \frac{\pi E d^2}{\cos \theta_p}$$

と表される。このモデルでは、把持力は把持力は指の底面に垂直である。把持力の大きさは、指先の最大変形量と指先と物体との相対角度の両方に依存する。放射モデルでは、二本の指が完全に対向しない限り、物体に把持力によるモーメントが作用し、物体の回転が止まらない。したがって、二本の指を対向させ物体の回転を止めるために、自由度が必要である。一方、平行モデルでは、物体が対向しなくても、二つの把持力のモーメントが打ち消しあうことがあり、結果的に物体の回転が止める。すなわち、平行モデルにおけるポテンシャルエネルギーは、指

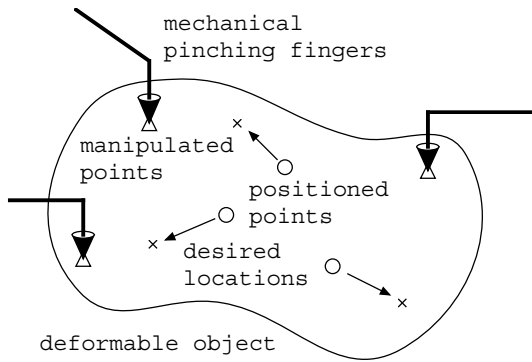


Fig.2: Indirect simultaneous positioning of multiple points

先の最大変形量 d と指先と物体との相対角度 θ_p の関数であり、ポテンシャルエネルギーが最小になるような最大変形量と相対角度において物体が静止する。

以上のように指先の柔らかさは、物体の回転を安定化させる重要な役割を果たしている。上述の議論は、接触面積が増えて滑りにくくなる、把持物体の形状になじむという定性的な議論ではなく、力学モデルに基づいた定量的な議論である。これまで定性的に議論されてきた現象を力学モデルを導入することにより、定量的な議論が可能になると考える。

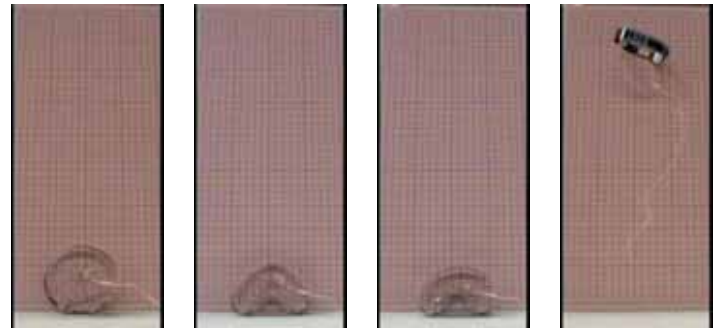
3 間接同時位置決め

Fig. 2 に示すように布地の縫製工程には、布地上の複数の点を同時に位置決めする作業が多く存在する。さらに、このような点を直接操作することができず、離れた点を操作することにより位置決めを達成しなければならない。このような作業を、間接同時位置決めとよぶ。間接同時位置決めを達成する制御則として、各々の位置決め点に対して最も近い操作点を対応させ、位置決め点の位置決め誤差を対応する操作点のみにフィードバックする方法が提案され、シミュレーションによりその有効性が検証されている。この制御則は、複数の位置決め点と複数の操作点の間の干渉を無視し、距離が最も近いという関係のみに着目する方法である。すなわち、制御則には位置決め点の集合と操作点の集合との間の写像のみが表れ、力学的な情報は必要としない点に特徴がある。位置決め点と操作点が一致しないのは、布地の縫製工程の要請であるが、制御の観点からは non-colocation という性質を有する系である。すなわち、間接同時位置決めは、複数の non-colocation という性質を有する系が、全体として制御可能な系になっている点に特徴がある。これは柔軟物を介した制御系に幅広く見つけることができる特徴であり、柔軟物のハンドリングのみならず、柔軟な筋肉で駆動される生体の関節等、いくつかの例が挙げられる。このような系の制御において、写像のみに基づく制御が有効であることを理論的に示すことができれば、機械的なインターフェースとしての柔軟物を介した系の制御の有効な手法になると考える [2]。



(a) 0s (b) 8s (c) 16s

Fig.3: Circular soft robot climbing a slope



(a) 0s (b) 7s (c) 34s (d) 35s

Fig.4: Circular soft robot jumping

4 変形による移動と跳躍

Fig. 3 や Fig. 4 に示すように、ボディの変形を用いて移動や跳躍を実現することができる [3]。このような移動や跳躍は、円状物体の動的な変形によるエネルギーの蓄積と放出が引き起こす。微分幾何法に基づいて円状物体のダイナミクスを定式化でき、それを解析することで移動や跳躍の力学が明確になると考える。

5 おわりに

物体の柔らかさが発現する機械知能の例として、1) 空間的に配置された弾性や粘性が制御系を単純化する、2) エネルギーの蓄積と放出が新たな機能を生成するという例を挙げた。物理的な柔らかさは、人工物のみならず生物においても知能の発現に貢献している可能性があり、その方向の発展が期待できる。

参考文献

- [1] Inoue and Hirai, *Study on Hemispherical Soft-Fingered Handling for Fine Manipulation by Minimum D.O.F. Robotic Hand*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2454-2459, Orlando, May, 2006.
- [2] Shibata and Hirai, *Modeling and Stability Analysis of Dynamic Control through A Soft Interface*, J. of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.3, pp.242-248, June, 2006.
- [3] Sugiyama and Hirai, *Crawling and Jumping by a Deformable Robot*, Int. J. Robotics Research, Vol.25, No.5-6, pp.603-620, May-June, 2006.