

布状柔軟体の適応的変形特性を活用した In-Hand マニピュレーション

機械工学専攻 機械工学コース
東森研究室 市倉ひなの

1. In-Hand マニピュレーション

ロボットを用いた自動化技術として、単純な開閉グリップと汎用アームを組み合わせた自動化システムが産業分野で広く普及している。しかしながら、例えば、部品のはめ込みといったタスクにおいては、ハンドの姿勢調整や持ち替え動作が必要となり、操作計画が複雑になることが懸案となる。これに対処するために、ハンド内で対象物の位置や姿勢を制御する、In-Hand マニピュレーションと呼ばれる研究が注目されている（図1）。持ち替え動作などの手間を削減できるため、生産性の向上や、適用可能なタスクの増加が期待されている。ただし、In-Hand マニピュレーションは、対象物の形状や、変化しつづける位置姿勢にハンドの指姿勢を適応せねばならず、難易度は高い。例えば、ヒトのような多指多関節ハンドを用いる場合（図1）、各関節を制御することで、多様な接触形態を生成できるが、それらの操作計画は対象物の形状ごとに構築する必要がある。また、回転操作など連続的な操作を行う場合、適宜指の再配置など、複雑な制御が必要となる。

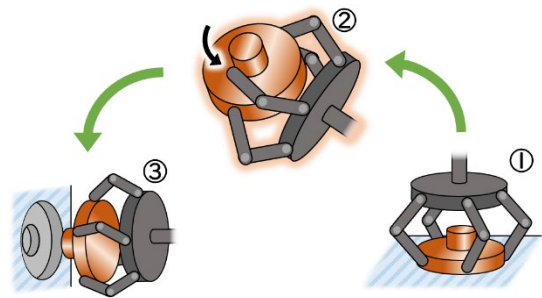
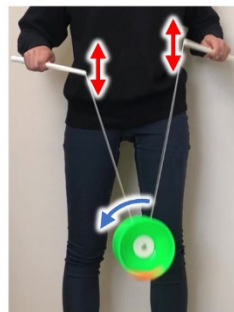


図1：In-Hand マニピュレーションで期待されるタスク例。

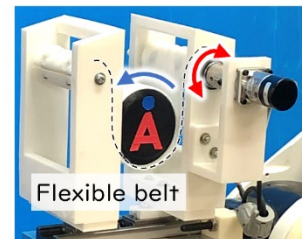
2. 布状柔軟体の活用

著者らは、ディアボロと呼ばれるコマを紐で操作するジャグリング（図2(a)）に着目し、この技術が In-Hand マニピュレーションにおいて要となる、対象物の安定保持と並進・回転運動の生成を同時に遂行していることを見出した。この技術は、紐の適応的変形によってコマを安定に保持しながら、紐端点への振動入力によってコマの回転運動を生成している。

この技術から着想を得て、著者らは、図2(b)に示すような、柔軟ベルトの高適応性を活用して柱状対象物の回転操作を行う2次元 In-Hand マニピュレーション手法[1]を提案した。この手法は、柔軟ベルトをグリップハンドの指先に取り付け、指先を振動させることで、ベルトとベルト上の対象物との間に滑りを生成し、対象物の回転運動を生成する。ベルトが適応的に変形して対象物を安定に保持することができるため、センサー等の複雑な機構を必要とせず、簡単な制御で回転運動を生成可能となる。また、本手法は、多様な形状・サイズ・質量をもった対象物に対し、同一の操作入力で回転運動を生成可能である。以上のように、布状柔軟体は、その高適応性により、In-Hand マニピュレーションにおいて優れた簡便性、高い汎用性を引き出すことができる。



(a)



(b)

図2：先行研究。

(a) ディアボロジャグリング。

(b) ベルトを用いた2次元 In-Hand マニピュレーション。

3. Ball-on-Cloth システム

操作性向上のため、前章で述べた操作手法を3次元問題へ拡張することを試みる。図3(a)に示すように、多指ハンドの指先に布を取り付け、布の上で対象物を操作することを考える。前章で述べた、柔軟ベルトを用いた回転操作手法は、安定保持と回転運動の生成は2次元平面内でのみ実現される。一方、本手法は、布が3次的に変形することで、対象物が布上で3次的に安定に保持される。なおかつ、指先への変位入力を適切に与えることで、布-対象物間に転がりや滑りを生じながら、多様な軸まわりの回転運動を生成することが期待される。

ここで、対象物を球とし、転がりを用いた回転操作手法に注目してみよう。転がりを用いた回転操作手法の例として、剛体プレートに挟まれた球の位置姿勢を、プレートの転がりによって制御する、Ball-Plate 問題が盛んに議論されている。この問題におけるアプローチの一つとして、転がり軌道を計画し、位置/姿勢を操作する手法が提案されている[2]。これに対し、布保持点への変位入力を与え、布上の球を転がり

によって操作する「Ball-on-Cloth 問題」について考えよう。Ball-on-Cloth 問題は、布の複雑な変形、および布-球の面状接触により、布への入力に対する球の姿勢変化の関係が複雑になる。しかしながら、Ball-Plate 問題における球の転がり軌道を布上で再現することができれば、Ball-Plate 問題におけるアプローチを適用することができる。このことから、Ball-on-Cloth 問題における主な問いは、「Ball-on-Cloth 問題における転がり軌道をどのように表すか?」「布保持点への変位入力と球の転がり軌道との間に発生する順/逆問題をどのように解くか?」といった問題に帰着する。

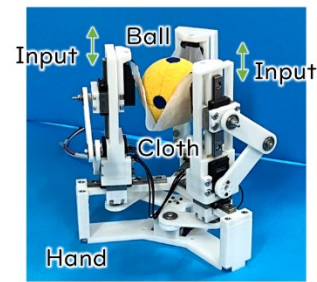
以上を踏まえ、著者らは、布の形状や転がりについての単純化モデルを定義したのち、転がり軌道を介して球の回転運動を生成する In-Hand マニピュレーション手法を提案した[3]。図3(b)に、転がり軌道として、円軌道を与えたときの実機実験の結果について示す。Ball-Plate 問題における経路計画法[2]において、円軌道上を球が転がると、球が見かけの鉛直軸まわりに回転することが確認されている。図3(b)より、Ball-on-Cloth システムにおいても、円軌道を描くような布保持点への入力を与えると、鉛直な軸まわりの回転運動が生成していることがわかる。このように、Ball-Plate 問題と Ball-on-Cloth 問題において球の姿勢変化に定性的な一致が見られ、転がり軌道を介した In-Hand マニピュレーションの実現性が確認される。

4. まとめ

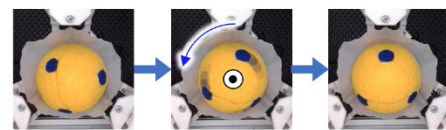
本研究では、柔軟布を用いた In-Hand マニピュレーション手法について提案した。今後、位置姿勢に対する操作手法の拡張だけでなく、非球状対象物などに対する一般化問題へと拡張していく予定である。布状柔軟体の高適応性を活用した、多様なマニピュレーション手法の構築を目指す。

参考文献

- [1] H. Ichikura and M. Higashimori: "In-hand manipulation inspired by diabolo juggling," IEEE Robot. Automat. Lett., vol. 7, no. 4, pp. 12227-12234, 2022.
- [2] M. Svinin and S. Hosoe: "Motion planning algorithms for a rolling sphere with limited contact area," IEEE Trans. Robot., vol. 24, issue 3, pp. 612-625, 2008.
- [3] H. Ichikura and M. Higashimori: "In-hand rolling manipulation based on ball-on-cloth system," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2024 (accepted).



(a)



(b)

図3: 柔軟布を用いた3次元In-Hand マニピュレーション。
(a) 3本指ロボットハンド。
(b) 鉛直な軸まわりの回転操作。