

〔短期在外研究〕

研 究 者	千葉大学 大学院融合理工学府基幹工学専攻医工学コース 博士後期課程 Tortos Vinocour Pablo Enrique	2256102
研 究 課 題 名	手の物体操作支援のソフトロボットのシミュレーションモデルと制御	
共同研究者／ 所 属、職 名	(I) Bram Vanderborght/ Brubotics, Vrije Universiteit Brussels and IMEC, Belgium, 教授 (II) Pasquale Ferrentino/ Brubotics, Vrije Universiteit Brussels and IMEC, Belgium, ポスドク 研究者 (III) Wenwei Yu/Center for Frontier Medical Engineering, Chiba university, 教授	
在 留 地 域	ベルギー / ブリュッセル	
渡 航 期 間	2025 年 10 月 1 日～ 2025 年 12 月 7 日 (66 日間)	

世界的な高齢化に伴い増加する脳卒中患者の多くは、手の巧緻性低下や可動域制限といった上肢機能障害を抱えており [WSO, 2025], 日常生活動作やリハビリテーションにおける物体操作能力の低下が生活の質に大きく影響している [Mollà-Cassanova et al, 2021]。これに対し、柔軟かつ安全なソフトアクチュエータを用いた手動作・物体操作支援ソフトロボットが有望な支援技術として注目されている。[Chu et al, 2018]

しかし、既存の多くのソフトロボットは大きな物体の把持を主対象としており、日常生活で頻繁に求められる小型かつ変形性の高い物体の安定把持は依然として困難である。これは、ソフトアクチュエータと人の指との間に生じる関節剛性、装着位置ずれ、皮膚摩擦などの相互作用が出力特性に大きく影響し、精密な制御を難しくするためである。これらの相互作用を扱う手法として有限要素法 (FEM) は有効であり、申請者はダミーフィンガーに装着されたソフトアクチュエータの FEM を構築し、その相互作用を定量的に解析してきたが、従来の FEM は計算負荷が高く、制御への応用には課題が残されていた [Tortos-Vinocour et al, 2025]。

近年, Simulation Open Framework Architecture (SOFA) に代表されるリアルタイム FEM 環境および逆 FEM 技術の発展により、目標動作に対する空気圧入力を実時間で算出する制御手法が可能となりつつある [Goury et al, 2020]。本在外研究では、小型かつ変形性の高い物体操作を対象として、実験と高い一致度 ($R^2 \geq 80\%$) を有し、30 Hz を超える計算速度で動作するリアルタイムモデルの構築を目的とする。本研究では、順モデルの構築を起点とし、モデル縮約、誤差補正を経て、最終的に逆 FEM 構成へと展開する段階的手法により、実時間制御モデルの確立を目指す。

順 FEM モデルの妥当性検証として、3つの駆動モードにおけるアクチュエータ軌道を実験結果と比較した。全モードにおいて R^2 は 85% 以上、平均 RMSE は約 4.5 mm となり、シミュレーション結果は実験結果と良好に一致した。各モードにおける軌道を図 1 に示す。両アクチュエータを同時に駆動するモード 3 において、作成誤差に起因すると考えら

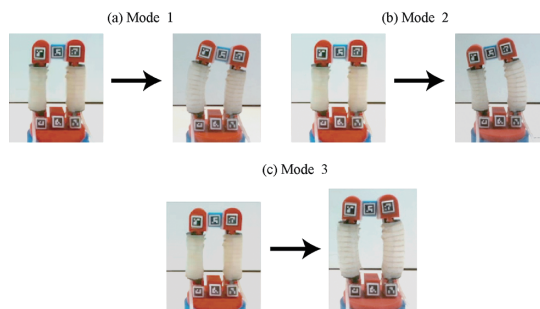


図 1 (a) モード 1 (b) モード 2 (c) モード 3

れるわずかな非対称挙動が観測された。

次にモデル縮約 (MOR) を適用した結果、全モード平均で 60FPS の計算速度を達成した一方、順モデルと比較して変形量を過大評価する傾向が見られ、平均約 37% のオーバーシュートが確認された。また、アクチュエータを個別に縮約した影響により、特にモード 3 において x 軸方向への偏りが生じた。これに対し、ユークリッドノルム最小化による補正を導入した結果、RMSE はモード 1～3 でそれぞれ 1.34 mm, 0.90 mm, 0.80 mm となり、平均 77% 以上の誤差低減を達成するとともに、計算速度は 60FPS を維持した。さらに、補正後モデルを逆 FEM 構成に拡張したところ、順モデルが生成した目標軌道に対して平均 $R^2 = 92.56\%$ 、平均 RMSE = 0.489 mm を示し、平均 50FPS の実時間性能を達成した。図 2 (a)–(c) に順モデル、MOR モデルおよび逆モデルの軌道結果を、図 2 (d) に順モデルおよび逆モデルを示す。

加えて現在、ダミーフィンガーに装着されたソフトアクチュエータを対象とした実時間モデルの構築を進めており、平均 60 Hz で動作するモデルを既に実装している。今後、逆 FEM 構成への適用の比較検証を行う予定である。図 3 ではダミージョイントの実機、準と MOR モデルを示す。

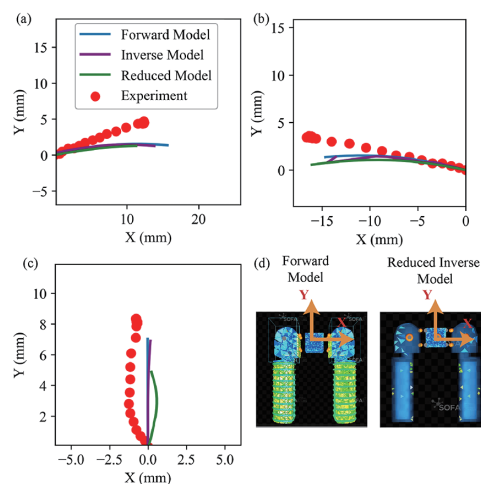


図 2 (a) モード 1 (b) モード 2 (c) モード 3 (d) 順モデルと逆モデル

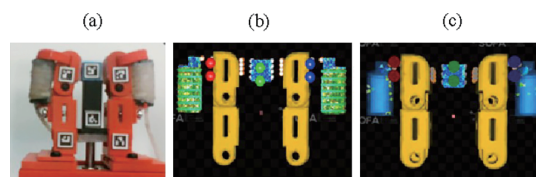


図 3 ダミージョイントソフトアクチュエータ: (a) 実機 1 (b) 順モデル (c) MOR モデル