

半球型柔軟指を有する最小自由度ロボットハンドによる準静的操り動作解析

井上 貴浩 平井 慎一 (立命館大学)

Quasi-Static Manipulation Using Hemispherical Soft Fingertip by means of Minimum D.O.F. Robotic Hand

Takahiro Inoue and Shinichi Hirai

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.,

1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: gr018026@se.ritsumei.ac.jp

Abstract— We provide a new quasi-static manipulation theory based on the local minimum of elastic potential energy (LMEE) algorithm. We show that the position and orientation of a grasped object are uniquely determined such that the internal energy function converges to a local minimum point with the rolling constraints. Finally, we demonstrate the validity of our soft-fingered manipulation theory by performing handling experiments by means of minimum D.O.F. robotic hand.

Key Words: Soft fingertip, Grasping, Quasi-static, Manipulation, Rolling constraint

1. はじめに

ソフトフィンガ (柔軟指と同義とする) を用いた剛体物体のハンドリングに関する研究は近年増加しているが、ファインマニピュレーションを目的とした具体的な先駆的な議論は Arimoto ら^{1,2)} と Doulgeri ら³⁾ の研究のみである。ここでは、ハンドリングシステムの閉ループダイナミクスが受動性を満たすことで、その安定性を示し制御則を導いている。しかし、制御系設計に重きを置いているため、導出したソフトフィンガの弾性モデルはその物理的・力学的特徴を兼ね備えた数式モデルにはなっていない。そのため、剛体指ハンドリングには現れない柔軟指特有の、操り動作を記述することができない。またそれらの文献では、シミュレーション解析が主であり、実際の柔軟指による操り動作と比較していない。一方、Han ら⁴⁾ と田原⁵⁾ は、上記モデルによるハンドリングシミュレーションと比較するための実験を行い、容易に安定把持が可能であることを示した。しかし、柔軟指と把持対象物間の静止摩擦により、目標位置と姿勢への収束は困難であるとしている。

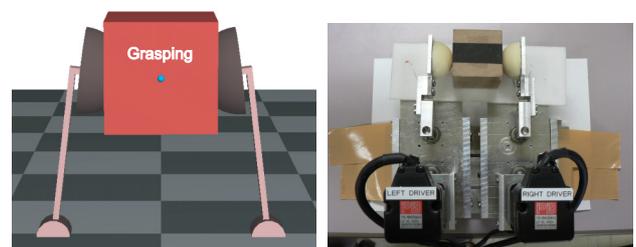
本論文では、筆者らが現在まで導いた半球型柔軟指の弾性モデル^{6,7)} による剛体対象物の準静的把持・操り理論^{8,9)} を提案する。また、本理論によるシミュレーション結果と実験結果を比較することで、本稿で提案する把持・操り理論が有効であることを示す。

2. 準静的把持・操り理論

筆者らは、剛体対象物が半球形状柔軟指上で接触する場合、接触により生じる弾性ポテンシャルエネルギーが極小値を持つことを示してきた⁷⁾。以下では、この極小値のことを略して、LMEE(Local Minimum of Elastic Potential Energy) と呼ぶ。本稿では、この LMEE を用いた準静的操りアルゴリズムを提案する。具体的には、Fig.1-(a) に示したように、最小自由度の 2 指ハンド先端に取り付けた半球型柔軟指の変形による弾性エネルギーの左右合計が、極小値を満たすような対象物の位置と姿勢を数値解析手法を用いて探索する。本稿で提案する弾性エネルギーは、以下の式で示される。

$$P = \frac{\pi E}{3} \left\{ \frac{d_r^3}{\cos^2(\theta_r - \theta_{obj})} + \frac{d_l^3}{\cos^2(\theta_l + \theta_{obj})} \right\}. \quad (1)$$

ここで、 E は指先材料のヤング率、 d_r, d_l はそれぞれ右左の指先の最大変位量、 θ_r, θ_l は両指の回転角、 θ_{obj} は把持対象物の姿勢角を示す。この結果、操り対象物の位置と姿勢が一意に決まることを以下のシミュレーションと実験で示す。また、Fig.1-(b) は本実験用に製作した最小自由度回転関節 2 指ハンドである。



(a) manipulation

(b) apparatus

Fig.1 Two-fingered handling

3. 準静的把持・操り実験

3.1 動作例

本論文では、シミュレーション結果と比較するための動作例として、以下のハンドリング手順を取り扱う。

1. 把持動作として両指を内側に任意の角度傾ける。ここでは、2.4 deg と 3.6 deg の 2 通りの把持を行う。
2. 操り動作として両指を反時計回りに 20 deg 回転させる。
3. 続けて両指を時計回りに 40 deg 回転させ、反時計回りに 40 deg 回転させる。
4. 動作 3 を 3 回繰り返す。

本稿では、(1) 式における LMEE を探索する数値解析手法として制約条件付きの Nelder-Mead Method を採用し、極小値を満たすような対象物の重心位置と姿勢を求め、以下で示す実験結果とともにプロットする。ここでは、2 次元平面に議論を限定している。

3.2 実験結果

Fig.2 に把持・操り中の対象物重心の位置の軌跡を示す。左図は把持角度が 2.4 deg の結果であり、右図は把持角度が 3.6

deg の結果になる．まず，両図ともシミュレーションと実験間でほぼ等しい軌跡を得た．また，Fig.3 に把持・操り中の対象物の姿勢をプロットした．ここでは，実験結果において明確に S 字曲線が現れている．これは，剛体指ハンドリングでは起こらない現象であり，柔軟指ハンドリングにおいて特徴的に見られる，この原因として，エラストマー材料の非圧縮性に起因する転がり変形時の転がり量の増減が考えられる．つまり，圧縮率が大きいほど体積一定変形効果によって柔軟材料はラテラルな方向へも容易に大きく変形する．これによって，Fig.4 に示したように，指先上での転がり半径が増大し，同時に実効的な円周長が伸びることになる^{10, 11)}．伸びた円周上で把持対象物が転がることにより，対象物姿勢角の変化が相対的に小さくなる．一方，シミュレーション結果においてもわずかに S 字曲線が見て取れる．

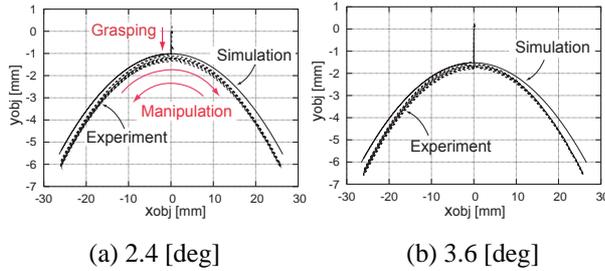


Fig.2 Object position

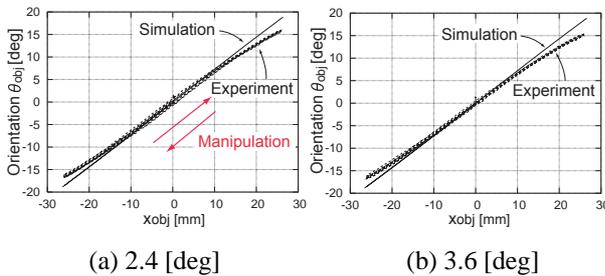


Fig.3 Object Orientation angle

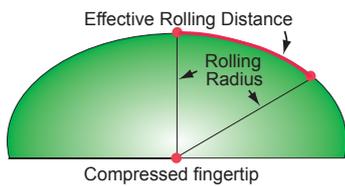


Fig.4 Effective rolling distance

次に，他の把持角度での実験も同時に行い，Fig.5 に結果を示す．ここでは，5 通りの実験結果をプロットしている．両指の操り角度は，動作例の 2, 3, 4 と等しい．注目すべき点は図から分かるように， $x_{obj} = \pm 28$ [mm] 付近で対象物重心位置がすべて一致している．本実験において，動作 2 や動作 3 直後の両指の絶対角 (θ_r, θ_l) は 5 通りの実験すべてで異なっている．それに関わらず x_{obj} が一致している事実は，柔軟指によるハンドリングでは対象物位置の x 座標は対象物を把持する力の強弱には依存しないことを示している．言い換えると，対象物をある決まった x 座標上の位置に持つためには，対象物を強く掴んでも軽く掴んでも両指を対象物の位置に一对一に対応した角度回転させるだけで実現できることを意味する．また，対象物の y 方向への移動は，把持力を変化させることで決定することができる．

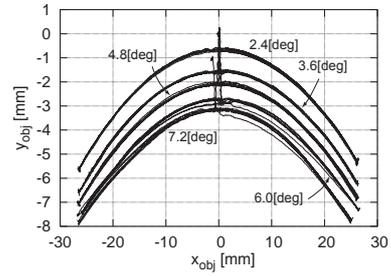


Fig.5 Comparison with all object positions

4. おわりに

本稿では，半球型柔軟指上での LMEE を用いた剛体対象物の準静的操り理論を提案し，把持・操り対象物の重心位置と姿勢がこのアルゴリズムによって一意に決まることを示し，実験においても同様の結果を得た．

本稿で提案した LMEE は，人指による把持・操り動作においても存在すると推測される．人は対象物を掴むとき，まずはじめにピンチング動作を行い，その後，対象物を左右に振るなどのマニピュレーション動作を行っている．このことから，人の把持と操り動作を解析する場合，それらを切り離して考えることができる．第一ステップでグラスピングを行い，第二ステップでマニピュレーションを行うので，Fig.5 の結果より，指先把持力と指関節角を独立に扱うことで，対象物を所望の位置に操ることができる．今後は，ダイナミクスや指先粘性を考慮することで，時系列での議論を行う．

参考文献

- 1) S.Arimoto, P.Nguyen, H.Y.Han, and Z.Doulgeri: "Dynamics and Control of a set of Dual Fingers with Soft Tips", *Robotica*, Vol.18, pp.71-80, 2000.
- 2) S.Arimoto, K.Tahara, M.Yamaguchi, P.Nguyen, and H.Y.Han: "Principle of Superposition for Controlling Pinch Motions by means of Robot Fingers with Soft Tips", *Robotica*, Vol.19, pp.21-28, 2001.
- 3) Z.Doulgeri, J.Fasoulas, and S.Arimoto: "Feedback Control for Object Manipulation by a pair of Soft Tip Fingers", *Robotica*, Vol.20, pp.1-11, 2002.
- 4) H.-Y.Han, S.Arimoto, K.Tahara, M.Yamaguchi, and P.Nguyen: "Robotic Pinching by Means of a Pair of Soft Fingers with Sensory Feedback", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.97-102, 2001.
- 5) 田原: "2 本指ロボットを用いた Sensory Feedback による対象物体の動的安定把持および姿勢制御"，博士論文，立命館大学，2002.
- 6) T.Inoue and S.Hirai: "Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using Tactile Sensing", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2654-2659, 2003.
- 7) T.Inoue and S.Hirai: "Local Minimum of Elastic Potential Energy on Hemispherical Soft Fingertip", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2319-2324, 2005.
- 8) T.Inoue and S.Hirai: "Quasi-Static Manipulation with Hemispherical Soft Fingertip via Two Rotational Fingers", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1947-1952, 2005.
- 9) 井上, 平井: "半球型柔軟指の変形に伴う弾性ポテンシャルエネルギーを用いた準静的操り"，日本ロボット学会講演会予稿集, 3C15, 2005.
- 10) D.Chang and M.Cutkosky: "Rolling with Deformable Fingertips", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.194-199, 1995.
- 11) J.Fasoulas and Z.Doulgeri: "Equilibrium Conditions of a Rigid Object Grasped by Elastic Rolling Contacts", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.789-794, 2004.