

ソフトフィンガー型最小自由度ハンドを用いた 把持・操り動作における安定把持効果

井上 貴浩 平井 慎一 (立命館大学)

Secure Grasping Effect of Soft-fingered Manipulating Motions with 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.ritsumeikai.ac.jp

Abstract— This paper shows that a secure grasping of an object using a soft-fingered robotic hand is easily achieved by adopting a two-dimensional soft finger model. We present a constraint stabilization method (CSM) dealing with holonomic and nonholonomic constraints, which is an effective tool to conduct the numerical simulation of a mechanical system with constraints. Finally, we validate the numerical algorithm and show the effect of secure grasping by evaluating the simulation results.

Key Words: Grasping, Manipulation, Soft finger, Elastic force, Dynamic, Stable grasping

1. はじめに

本稿では、ソフトフィンガの2次元モデルを確立し、ソフトフィンガによる対象物の安定な把持と操りが容易に実現できることを示す。まず、ハンドリング動作中に現れるホロノミック拘束（法線方向）とノンホロノミック拘束（接線方向）を同時に取り扱える数値解析手法を提案すると共に、指先変位量を変数として加えたハンドシステムの9元連立非線形運動方程式を導出する。また、本稿ではより少ない自由度による器用さの獲得という観点から、把持と操りを実現できる最小自由度（両指1自由度）を持つロボットハンドによるハンドリングをとりあげ、数値解析によりシステム方程式を解き、把持対象物の動的挙動を解析する。最後に、ある動作例で得たシミュレーション結果を比較検証することで、ハンドシステムに制御ループを構成することなくソフトフィンガが対象物を安定的に把持できることを示す。

2. 柔軟指2次元モデル

半径 a の半球形状柔軟指の簡潔かつ合理的な1次元弾性力モデル、ならびに弾性エネルギーモデルとして、以下の式を得ている^{1,2,3}。

$$F = \frac{\pi E d_n^2}{\cos \theta_p}, \quad (1)$$

$$P = \frac{\pi E d_n^3}{3 \cos^2 \theta_p}. \quad (2)$$

ここで、 E は指先材料のヤング率、 d_n は Fig.1-(a) に示したように指先と対象物間の接触面に対する法線方向の最大変位量、 θ_p は対象物との接触における相対姿勢角を意味し、第1象限を正、第2象限を負とする。1次元モデルにおいては、指先内縦方向に微小断面積を持つ仮想ばね PQ を配置し、平面接触面を持つ剛体対象物との接触において生じる弾性力と弾性エネルギーを定式化している。(1)式、(2)式において d_n を固定すると、 F と P は $\theta_p = 0$ のときに極小値を持つ。特に、弾性エネルギー P の極小値を本研究では、1次元モデルにおける LMEE と呼んでいる。

本稿では、従来モデルで採用された指先下部面に対して垂直方向の仮想ばねに加えて新たに横方向への仮想ばねを配置

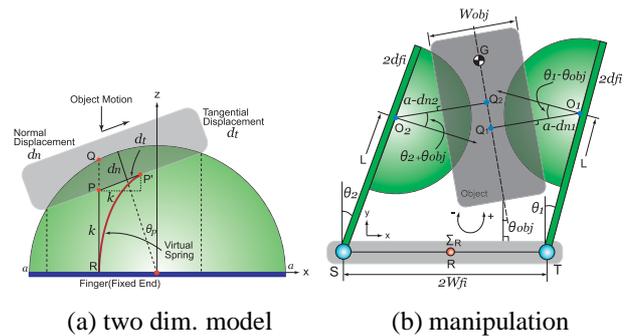


Fig.1 Soft-fingered manipulation

することで、2次元モデルへと拡張する。

Fig.1-(a) はその概略図である。本稿で取り扱うハンドシステムにおいて把持・操り中の指先対象物間の滑りはないものと仮定する。Fig.1 に示したように、微小断面積 dS を持つ仮想ばね QR が圧縮することでその上端点 Q が点 P まで移動し、さらに接触面の移動により Q が P' の位置まで移動し、さらにばねが変形したとする。ここで、 PP' 間の移動距離を d_t とし、 d_t は P' が P より右に位置しているときを正、左に位置しているときを負とする。また、 dS に対する仮想ばねの縦横方向へのばね定数を k とする。このとき、指先の変形により蓄えられる弾性ポテンシャルエネルギー P は、仮想ばねの縮み PQ を用いて2重積分形式で以下のように表現できる。

$$P = \frac{1}{2} \iint_{ell} k \left\{ (PQ + d_t \sin \theta_p)^2 + d_t^2 \cos^2 \theta_p \right\}. \quad (3)$$

ここで、 ell は接触面を xy 平面に正射影した積分領域を示す。また、 k は dS に対するばね定数であるため¹⁾、 xy 座標系に変換された、上式の2重積分のそれぞれに対応した微小変位 dx, dy を k 内に含んでいる。(3)式の積分を計算すると、以下の式を得る。

$$P = \pi E \left\{ \frac{d_n^3}{3 \cos^2 \theta_p} + d_n^2 d_t \tan \theta_p + d_n d_t^2 \right\}. \quad (4)$$

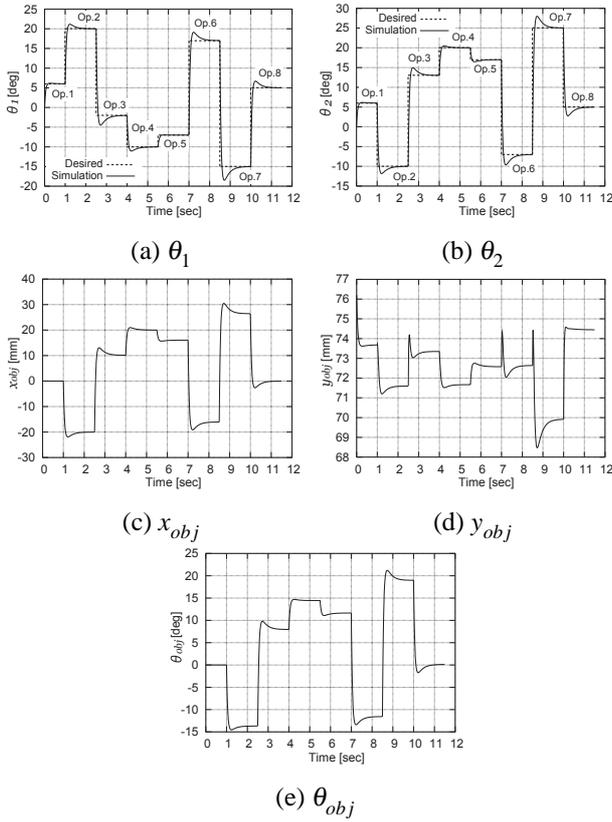


Fig.2 Simulation results

上式は1次元モデルとは異なり3変数関数であり $d_n > 0$ であることから、 d_n に対しては単調増加関数である。したがって、 d_t と θ_p に対して展開し解析を行うと、それぞれに対して LMEE を持つことが分かる。

3. 動的操りシミュレーション

本シミュレーションでは、動作1で1sec間、動作2以降で1.5sec間の把持対象物の挙動を解析し図示している。Fig.2-(a), (b) にハンド両指の関節目標角と結果を示し、Fig.2-(c), (d), (e) に対象物の位置と姿勢をそれぞれプロットしている。

Fig.2 に示したように、ハンドリング中のどの動作過程においても対象物に加わる合力や合モーメントが対象物を不安定にすることはなく、その位置と姿勢が一気に収束していることが分かる。

4. 外乱に対するロバスト性

本節では、種々の外乱が対象物に加わったときのシステムの応答について記述する。ここでは、動作1終了後に対象物にインパルス入力とステップ入力加わる場合を考え、それぞれ以下の具体値とする。

$$F_x^{dst} = 0.9 \cdot \delta(t) \text{ N}, \quad (\dot{x}_{obj}^{dst} = 3 \text{ m/sec}) \quad (5)$$

$$F_y^{dst} = 0 \cdot \delta(t) \text{ N}, \quad (\dot{y}_{obj}^{dst} = 0 \text{ m/sec}) \quad (6)$$

$$M^{dst} = 0.327 \cdot \delta(t) \text{ Nm}, \quad (\dot{\theta}_{obj}^{dst} = 150 \times 10^3 \text{ deg/sec}) \quad (7)$$

$$(F_x^{dst}, F_y^{dst}, M^{dst}) = (130 \text{ N}, 130 \text{ N}, 5 \text{ Nm}). \quad (8)$$

結果を Fig.3 に示す。図内 (i), (ii) はそれぞれ、目標関節角 ($\theta_1^d = \theta_2^d = 6 \text{ deg}$) を維持したままの、(8) 式のステップ入力に対する応答波形と (5) ~ (7) 式のインパルス入力に対する応答波形である。

また、把持の強弱に対する把持性能を調べるために、目標関節角を $\theta_1^d = \theta_2^d = 3 \text{ deg}$ と $\theta_1^d = \theta_2^d = 2 \text{ deg}$ に変更し上記インパルス外乱に対する応答波形を求める。それらのシミュ

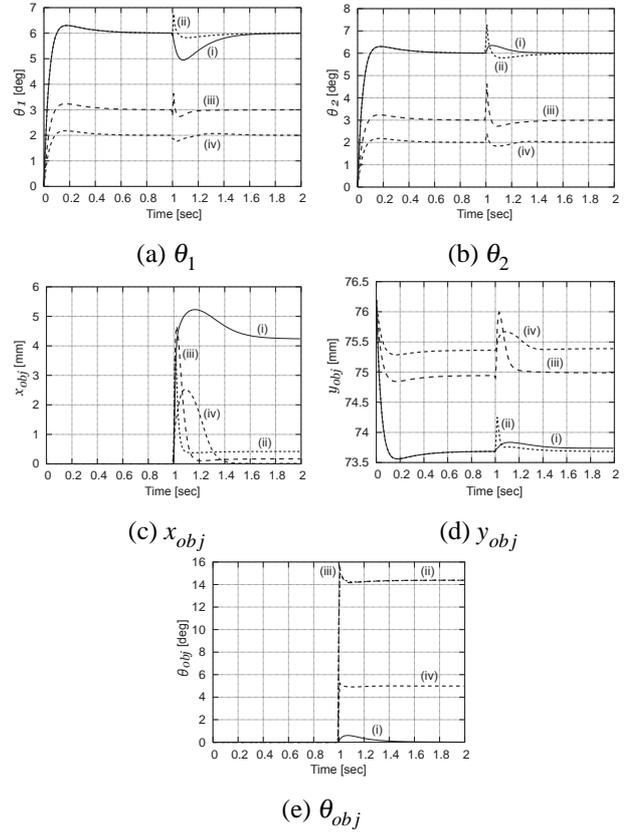


Fig.3 Responses for disturbances

レーション結果を図内 (iii), (iv) に示す。ただし、結果 (iv) では上記インパルス入力では収束しなかったため、上式の3分の1の数値を外乱として入力している。また、本節のシミュレーションにおいて、比例ゲインと積分ゲインをそれぞれ $K_p = 400$, $K_i = 0.2$ としている。

Fig.3-(a), (b) に示したように、関節角に対する PID 制御により両関節角は、時刻 1 sec で加わる各種外乱に対して、それぞれの目標角に収束している。また、Fig.3-(c), (d), (e) に示したように、両関節角の収束に伴い、対象物の位置・姿勢も同様にある値に収束していることが分かる。ここで、 $(x_{obj}, y_{obj}, \theta_{obj})$ の応答が、 (θ_1, θ_2) の収束時刻に比べて、わずかに遅れていることが見て取れる。これは、両指が収束し静止状態であっても、ソフトフィンガーの柔軟性による振動が続いているためである。

5. おわりに

提案した解析手法を利用してハンドシステムの運動方程式を導き把持対象物の動的挙動を解析することで、ソフトフィンガーを使ったハンドリングにおいては容易に対象物を把持し操ることができることを示し、ソフトフィンガーの柔軟性が安定把持・操りに大きく貢献していることを明らかにした。

参考文献

- 井上, 平井: ロボットハンドによる物体操作のための半球型柔軟指の静的弾性モデル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.715, pp.872-878, 2006.
- 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.
- T.Inoue and S.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, 2006.