

剛体半球と柔軟半球による挟み込みを用いた 平行側面を持つ把持物体の回転操作の定式化

○三森 友貴 (立命館大学), 平井 慎一 (立命館大学)

Formulation of object manipulation of pinched object with parallel sides using rigid hemisphere and elastic hemisphere fingertips

○ Yuki Mimori (Ritsumeikan University), and Shinichi Hirai (Ritsumeikan University)

Abstract : This manuscript describes a formulation of attitude manipulation of pinched object using rigid hemisphere and flexible hemisphere fingertips. We also propose a control input which based on virtual spring-damper hypothesis for this system.

1. 緒言

人間の指先には、材料的に硬い部分と柔らかい部分が存在している。爪や末節骨と表皮が近い部分では比較の硬い材料性質、指の腹周辺では比較の柔らかい材料性質が見られる。人間の精密把持操作を観察すると、Fig.1 のように比較の硬い指の先端部を物体側面に接触させたり、Fig.2 のように示指は硬い指先、拇指は指腹を物体に接触させたりすることで物体を精密把持、操作する様子が見られる。特に把持物体姿勢を変えたいとき、Fig.2 のように物体を把持すると物体側面や角が指腹に支えられてより安定した物体姿勢操作を行える。ロボットハンドにおいても指先の材質によって運動に変化が起こる。硬い半球指先を有する多指ハンドによる物体操作では、静的な意味で不安定状態であっても最終的に力、トルク平衡に遷移可能な制御入力を加えることで、動的な意味での物体の安定把持が実現されている [1]。一方で、柔軟な半球指先を有する多指ハンドによる物体操作では、柔軟指先の変形エネルギーが拘束面上で極小値に向かうような指先変形を起こす性質を用いて、物体を安定に把持する研究が行われた [3]。各例では動的な物体操作と物体把持の安定性がそれぞれ特徴づけられている。静的な安定性を保証するために把持物体の運動が過度に制約された場合、器用さを阻害する原因となることが示唆されている [2]。したがって、柔軟指にみられるようなロバスタな把持の静的安定性と器用さの両立は難しい。以上の条件を踏まえた上で、剛体半球指先と柔軟半球指先を併用することで、物体把持の安定性と人間の物体姿勢操作の器用さを両立できることを仮説として立てた。そこで、柔軟指先と剛体指先を用いた物体操作に現れる特徴を明らかにする初段階として、すでに解析が行われている半球指先による物体操作モデル [3], [4] を用いて物体操作システムを定式化する。

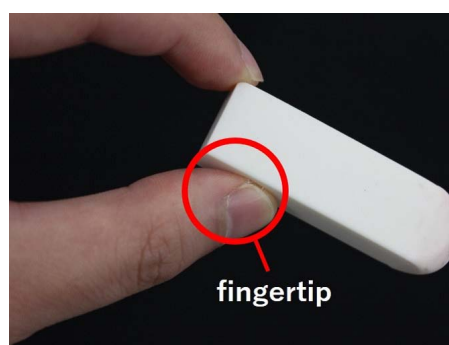


Fig. 1: Pinching with fingertip tip of index finger and thumb

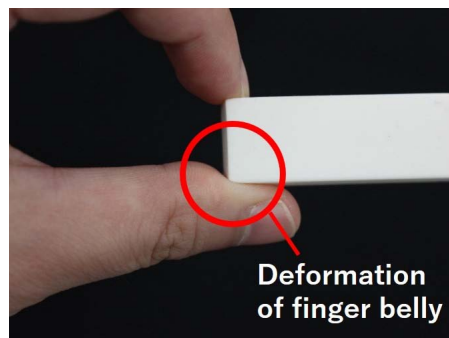


Fig. 2: Deformation of finger belly with object's surface while pinching

2. システムのモデル化

本章では定式化するロボットシステムについて全体構造を説明する。ロボットシステムは、剛体半球指先を有する3自由度指ロボット、ロボット指と対向させる方向に取り付けた柔軟半球、柔軟半球と剛体半球指先で姿勢操作を行う平衡側面を持つ把持物体の3つで構成する。これらの要素

は Fig.3 のように水平面上にそれぞれ配置した。

2.1 運動エネルギーと位置エネルギー

指ロボットの関節角ベクトルを $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]$ とし、指ロボットの運動エネルギー T_{fing} を

$$T_{fing} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M \dot{\mathbf{q}} \quad (1)$$

と表す。ただし M は指ロボットの慣性行列である。 $\vec{OP}_{obj} \triangleq \mathbf{p}_{obj} = [x_{obj}, y_{obj}]^T$ 、把持物体の質量を m 、慣性モーメントを I_{obj} と置くと、把持物体の運動エネルギーは、

$$T_{obj} = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{p}}_{obj}^T \mathbf{p}_{obj} + \frac{1}{2} I_{obj} \dot{\theta}_{obj}^2 \quad (2)$$

となる。

指ロボットを水平面上で駆動させるため重量の位置エネルギーは考慮しない。そのため、システム全体の位置エネルギーは柔軟半球の弾性力によるもののみとなる。柔軟半球の位置エネルギーを U_{obj} 、柔軟半球のヤング率を E と置く。柔軟指のモデルとして平行分布モデル [3] を採用する。このとき、

$$\begin{aligned} U_{obj} &= U_n + U_t \\ U_n &= \frac{\pi E d_n^3}{3 \cos^2 \theta_{obj}} \\ U_t &= \pi E (d_n^2 d_t \tan \theta_{obj} + d_n d_t^2) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

2.2 剛体半球指先と把持物体の接触の拘束式

剛体半球を有する指ロボットモデルとして、[4] の指ロボットモデルを採用する。このとき把持物体側面の接触に関する拘束式は半球接触面接線方向の拘束と半球接触面の法線方向の拘束の2つが存在する。

Fig.3 より $\vec{OP}_E = \mathbf{p}_E$ とする。Fig.4 の剛体半球面上の点 P_c が、把持物体側面を転がるように接触するときの半球接触面接線方向の拘束は

$$C_Q \triangleq \|\mathbf{p}_E - \mathbf{p}_{obj}\| - (r_H + W_1) = 0 \quad (4)$$

と表される。

ここで、 Σ_i 座標系における \mathbf{x}_{obj} ベクトルを ${}^i\mathbf{x}_{obj}$ 、 Σ_0 から Σ_{obj} へ姿勢を変換する回転行列を ${}^0R_{obj}$ と置き、

$$Y = \|{}^0\mathbf{x}_{obj}^T (\mathbf{p}_E - \mathbf{p}_{obj})\| \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{e} = [1, 1, 1]^T \quad (7)$$

$${}^0\mathbf{x}_{obj} = {}^0R_{obj} {}^{obj}\mathbf{x}_{obj} \quad (8)$$

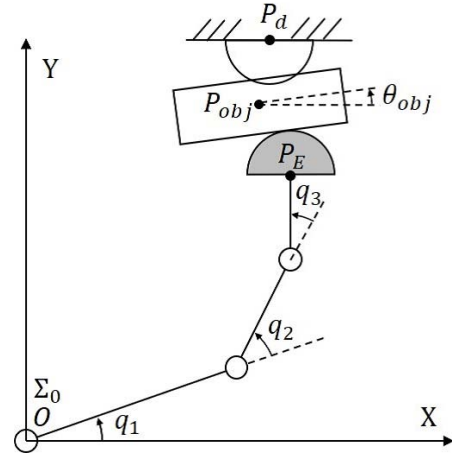


Fig. 3: Total robot system for object attitude manipulation

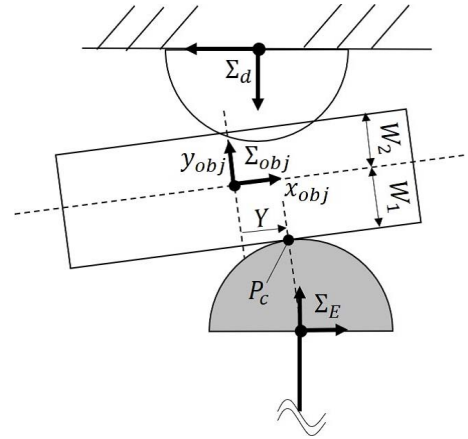


Fig. 4: Contacts of two fingertips, soft fingertip and hard fingertip.

とする。本論においては、把持対象物体の初期姿勢角を $\theta_{obj} = 0$ に限定する。このとき、半球の半径を r_H 、物体に接触したときの初期関節角度を q_0 とするとき、剛体半球面と物体側面の接触点における半球法線方向の拘束は

$$C_R \triangleq Y - r_H \{ \pi - \mathbf{q}^T \mathbf{e} + \theta_{obj} + (\mathbf{q} - \mathbf{q}_0)^T \mathbf{e} \} = 0 \quad (9)$$

と表される。

2.3 柔軟半球指先と把持物体の接触の拘束式

柔軟半球と把持物体側面の接触に関する2つの拘束式を、[3]と同様に定義する。 \mathbf{V}_{obj}^{tip} を柔軟半球接触点における \mathbf{x}_{obj} 方向の物体の並進速度、 \mathbf{V}_{fin}^{tip} を柔軟半球接触点における \mathbf{x}_{obj} 方向の柔軟半球の並進速度とする。 $[\omega_{obj} \times] \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ を物体姿勢の角速度に関する歪対称行列、 r_S を柔軟半球の

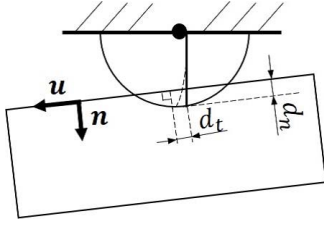


Fig. 5: Contact of soft fingertip and pinched object.

半径, \mathbf{n} を物体側面の法線ベクトルとすると,

$$\mathbf{V}_{obj}^{tip} = [\omega_{obj} \times](\mathbf{p}_d + r_S \mathbf{n} - \mathbf{p}_{obj}) \quad (10)$$

$$\mathbf{V}_{fin}^{tip} = \dot{\mathbf{p}}_{obj} - \dot{\mathbf{p}}_d \quad (11)$$

となる. また, 指接触面の接線方向の変位を d_t とおく. このとき, 変形した柔軟半球の接触面の接線方向の拘束は Fig. 5 に矢印で示した物体接触面の単位接線ベクトル \mathbf{u} , 単位法線ベクトル \mathbf{n} を用いて

$$\begin{aligned} \dot{C}_u &\triangleq \mathbf{u}^T \Delta^{tip} - \dot{d}_t = 0 \\ \Delta^{tip} &= \mathbf{V}_{obj}^{tip} - \mathbf{V}_{fin}^{tip} \end{aligned} \quad (12)$$

と表される.

さらに, $O\vec{P}_d \triangleq \mathbf{p}_d$, 柔軟半球指の接触面に対して法線方向の変化量を d_n と置くと, 柔軟半球と把持物体側面の接触面の法線方向の拘束式は

$$\begin{aligned} C_n &\triangleq \|\mathbf{p}_{obj} - \mathbf{p}_d\| - (r_S - d_n + W_1) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

と表される.

3. 動力学の定式化

指関節のトルク入力を $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ とするとき, 指ロボットの仕事 W を定義する.

$$W = \mathbf{q}^T \boldsymbol{\tau} \quad (14)$$

システム全体のラグランジアン L は, 未定乗数 $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ を用いて,

$$\begin{aligned} L &\triangleq T_{fin} + T_{obj} - U_{obj} + W \\ &\quad + \lambda_1 C_Q + \lambda_2 C_R + \mu_1 C_n + \mu_2 \dot{C}_u \end{aligned} \quad (15)$$

となる. このとき運動方程式は,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{z}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{z}} = 0 \quad (16)$$

となる. ただし一般化座標変数 \mathbf{z} は,

$$\mathbf{z} \triangleq [\mathbf{q}^T, \mathbf{p}_{obj}^T, \theta_{obj}, d_n, d_t]^T \quad (17)$$

とした.

4. 制御方法

まず, 前述のシステムで把持物体の姿勢制御を実現する前段階として, 物体姿勢を任意の回転方向に変化させる方法を提案する. 物体を把持しながら指先リンク姿勢を変化させることで剛体半球面が把持物体側面を転がり, 同時に物体の姿勢角を変化させる方法である. また, 指ロボットの指先位置制御と指先リンクの姿勢制御を, それぞれ物体把持制御と物体姿勢制御のために分割する方法を提案する.

4.1 物体把持制御

本節では物体把持制御の方法について説明する. 3 自由度指ロボットの指先を柔軟半球の中心に近づけるような指の関節トルクを入力とすることで, 常時半球間の物体を挟み込む制御を行う. このとき, 指の関節トルク入力には仮想バネ・ダンパー仮説に基づく冗長多関節ロボットアームのリーチング手法を用いて算出する [5]. 指ロボットの関節の仮想的な粘性を表す行列を C , ヤコビ行列を J , 作業座標系における仮想バネ係数を k_0 とするとき, 関節トルク入力 $\boldsymbol{\tau}$ は [5] より,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= -C\dot{\mathbf{q}} - J^T k_0 \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{x} &= \mathbf{p}_E - \mathbf{p}_d \end{aligned} \quad (18)$$

となる.

4.2 物体姿勢制御

物体姿勢制御時は, 指先リンクを任意の目標姿勢に近づけた状態で前節の物体把持制御を行う. 物体の把持を行いながら指先リンクの姿勢角を制御することで, 把持物体側面で剛体半球を転がすような操作を実現するためである.

まず, 指先リンク姿勢を目標姿勢に制御する. この姿勢を保ったまま, Fig. 6 の \mathbf{p}'_E を \mathbf{p}'_d に近づける制御を行うことで, 任意の指先リンク姿勢で, 指先位置を対向する柔軟半球の中心に近づけるような物体挟み込み制御を行う. 指ロボットの入力トルクを $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ とするとき, $\boldsymbol{\tau}_{12} = [\tau_1, \tau_2]^T$, τ_3 はそれぞれ (18) を基にして,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{12} &= -C_{12} \mathbf{q}_{12} - J_{12}^T k_0 \Delta \mathbf{x}' \\ \tau_3 &= -c_3 \dot{q}_3 - k_3 (q_{d3} - q_3) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta \mathbf{x}' = \mathbf{p}'_E - \mathbf{p}'_d$$

とおく. ただし, C_{12} は指ロボットの第 1, 2 関節の仮想的な粘性係数行列, c_3 は第 3 関節の仮想的な粘性係数, J_{12} は第 3 関節成分を含まない指ロボットのヤコビ行列, k_3 は指先リンクの姿勢制御のための仮想的な弾性係数, q_{total} は指ロボットの各関節角の総和, $q_{d3} = q_{total} - (q_1 + q_2)$ は指先

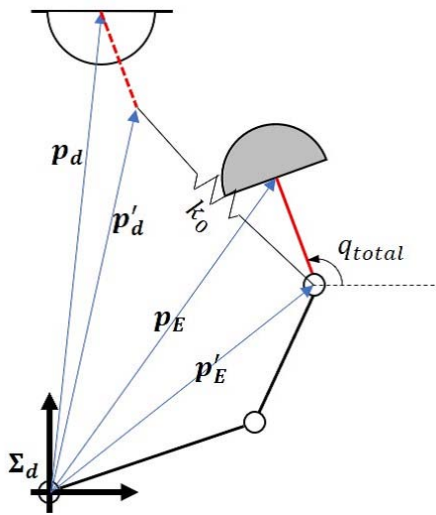


Fig. 6: Controlling object orientation.

リンクの目標姿勢角 q_{total} 時の第3関節目標角を表す。以上の方法により、物体姿勢を任意の方向に大まかに変化させる操作の実現を狙う。

5. 結言

剛体半球指先を持つ3自由度指ロボットと水平面に固定された柔軟半球の挟み込みにより把持物体の姿勢角を変化させるロボットシステムの定式化を行った。今後はシミュレータを実装し、物体把持および物体姿勢角の変化時の挙動を観察する。

参考文献

- [1] 田原 健二, 有本 卓, 吉田 守夫 “柔軟3指ハンドによる仮想フレームを用いた把持物体の外界センサレス位置・姿勢制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No1, pp.89-98, 2011.
- [2] 田原 健二 “動的安定把持に基づくマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No4, pp.364-369, 2013.
- [3] 井上 貴浩, 平井 慎一, “柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No6, pp.951-959, 2007.
- [4] Ryuta Ozawa, Suguru Arimoto, Shinsuke Nakamura, and Ji-Hun Bae, “Control of an Object With Parallel Surfaces by a Pair of Finger Robots Without Object Sensing”, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, Vol.21, No5, pp.965-976, 2005.
- [5] 関本 昌紘, 有本 卓, “仮想バネ・ダンパー仮説に基づいた冗長関節ロボットアーム制御法の実験的検証”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No5, pp.785-791, 2007.