

柔軟指による三次元把持と操作

平井 慎一 (立命館大学 ロボティクス学科)
井上 貴浩 (岡山県立大学 スポーツシステム工学科)

Three-dimensional Grasping and Manipulation via Soft-fingered Hand

*Shinichi Hirai (Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.) and
Takaniro Inoue (Dept. Systems Engineering for Sports, Okayama Pref. Univ.)

Abstract— This paper focuses on three-dimensional grasping and manipulation by robotic fingers with soft tips. The difficulty in three-dimensional grasping and manipulation lies in non-holonomic nature of the contact between a fingertip and an object surface. We will formulate geometric constraints between a hemispherical soft fingertip and an object planar surface; one normal constraint, which is holonomic, and two tangential constraints, both of which are nonholonomic Pfaffian. We will then formulate the elastic potential energy stored in a soft fingertip due to the contact with the planar surface. Finally, we will sketch the Lagrangean of the system consisting of a rigid prism grasped by three fingers with soft fingertips.

Key Words: Manipulation, Grasping, Soft-fingertips, Dynamics, Modeling.

1. 緒言

本報告では，柔軟指による三次元空間内の物体把持と操作を定式化する．三次元把持と操作においては，指先と対象物体との制約が非ホロノミックである点が，平面内の把持や操作とは異なる．本報告では，指先と対象物体との接触による制約を指先の変形を考慮して定式化するとともに，三次元変形を行う指先のポテンシャルエネルギーを定式化する．本報告は二次元平面内の把持における平行分布モデル [1] の拡張である．吉田ら [2] は三次元把持を定式化しているが，二つの指先と物体との接点を結ぶ直線回りの回転を考慮していない．本報告では，二指のみならず三指以上の把持に適用可能な一般的な定式化を目指す．

2. 三本の柔軟指による空間把持の観察

一対の一自由度柔軟指により，鉛直平面内を運動する物体を把持し，その姿勢を制御できることが知られている．三本の一自由度柔軟指による物体の把持と操作を観察しよう．図 1 は，半球柔軟指先を有する三本の指による円筒物体の把持を表す．図 1-(a) は初期状態であり，三つの関節角はすべて 71° である．円筒物体の軸は鉛直方向に沿っている．図 1-(b) では，関節角はそれぞれ 67° , 71° , 74° である．円筒は傾いていることがわかる．図 1-(c) では，関節角はそれぞれ 71° , 71° , 69° である．円筒物体は，関節角度 69° の指の方向に傾いている．これらの実験から，円柱物体に作用する把持力と円柱物体の姿勢の二自由度が制御可能であることがわかる．すなわち，三本の一自由度柔軟指により三つの変数を制御できる．

3. 物体と柔軟指先の空間制約

3.1 法線方向制約

図 2 に示すように，半径 a の半球形状の指先が物体表面の平面 S に接触している．物体に固定された座標

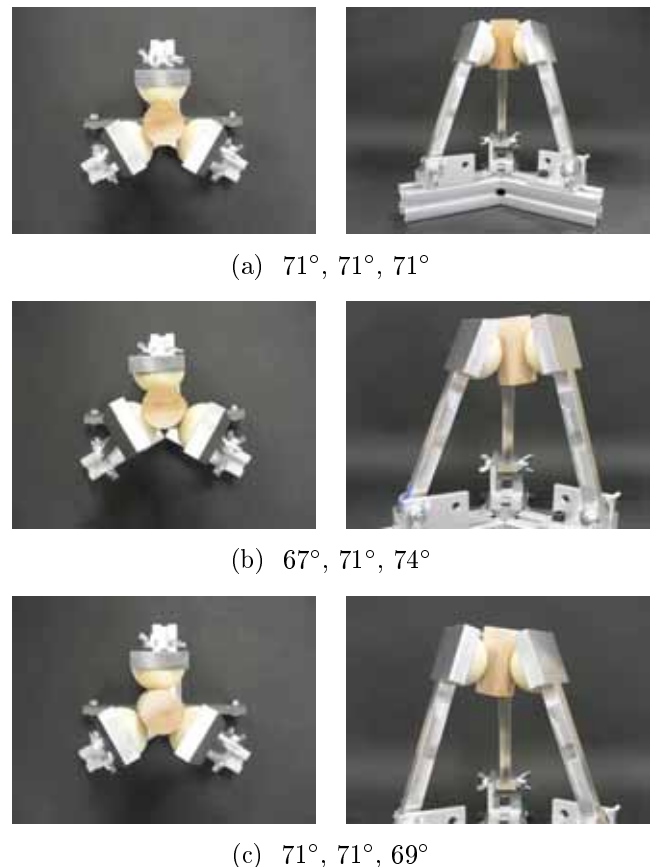


Fig.1 Grasping by three 1-DOF fingers with soft fingertips.

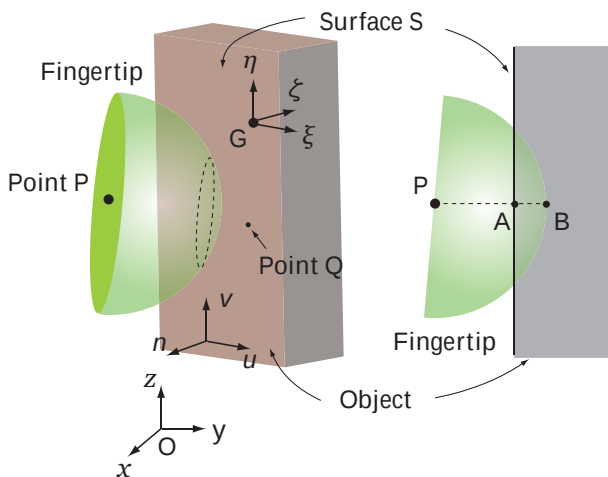


Fig.2 Contact between fingertip and planar surface in 3D space.

を Σ^{obj} , 指に固定された座標系を Σ^{fin} , 空間に固定された座標を Σ^{spc} で表す . 空間座標系 Σ^{spc} の原点を O , 物体座標系 Σ^{obj} の原点を G で表す . 物体の位置ベクトルを x_{obj} , 姿勢を表す回転行列を R_{obj} とする . 回転行列を四元数 q_0, q_1, q_2, q_3 で表す .

$$R_{\text{obj}} = \begin{bmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{bmatrix}.$$

物体座標系で表した S の法線ベクトル n^{obj} を空間座標で表すと $n = R_{\text{obj}} n^{\text{obj}}$ である．物体座標系で表した面の接線ベクトル u^{obj} ならびに v^{obj} を空間座標系で表すと $u = R_{\text{obj}} u^{\text{obj}}$ ならびに $v = R_{\text{obj}} v^{\text{obj}}$ である．面 S 上の任意の点を Q で表し，物体座標系を表したその位置を ξ_Q とする．点 Q の空間座標は $x_Q = R_{\text{obj}} \xi_Q + x_{\text{obj}}$ と表される．面上の任意の点は

$$n^{\text{T}}(x - x_{\text{O}}) = 0$$

を満たす．指先半球の中心を P ，中心から面 S に降ろした垂線の足を A ，中心 P の位置を x_{fin} で表す．半球柔軟指先の最大変形を d_n で表すと，点 A の位置ベクトルは $x_{\text{fin}} + (a - d_n)(-n)$ で与えられる．この点は面 S 上にあるので

$$\mathbf{n}^T \{ \mathbf{x}_{\text{fin}} + (a - d_n)(-\mathbf{n}) - (R_{\text{obj}} \boldsymbol{\xi}_Q + \mathbf{x}_{\text{obj}}) \} = 0$$

を得る．これより，柔軟指先と物体面との法線方向の制約

$$\begin{aligned} C_n &\triangleq \mathbf{n}^T(\mathbf{x}_{\text{obj}} - \mathbf{x}_{\text{fin}}) - d_n + a + (\mathbf{n}^{\text{obj}})^T \boldsymbol{\xi}_Q \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

を得る．これはホロノミック制約である．右辺第 4 項 $(n^{\text{obj}})^T \xi_Q$ は定数であり，原点 Σ^{obj} と面 S との符号付き距離を表す．

3.2 接線方向制約

指先の変形は点 B で最大と仮定する．点 B の位置は， $x_{\text{fin}} - an$ で与えられる．物体上の点 B の速度を $V_{\text{obj}}^{\text{tip}}$ で表す．物体の姿勢は回転行列 R_{obj} で表されるので，物体の角速度 ω_{obj} は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{\text{obj}} \times \end{bmatrix} = \dot{R}_{\text{obj}} R_{\text{obj}}^T$$

で定められる．ここで $\overrightarrow{GB} = (x_{\text{fin}} - an) - x_{\text{obj}}$ に注意し，物体の並進速度を $\dot{x}_{\text{obj}}$ で表すと，速度 $V_{\text{obj}}^{\text{tip}}$ は

$$\mathbf{V}_{\text{obj}}^{\text{tip}} = \left[\begin{array}{c} \boldsymbol{\omega}_{\text{obj}} \times \end{array} \right] \{ (\mathbf{x}_{\text{fin}} - a\mathbf{n}) - \mathbf{x}_{\text{obj}} \} + \dot{\mathbf{x}}_{\text{obj}} \quad (2)$$

と表される．面 S に沿う接線速度 $V_{\text{obj}}^{\text{tip}}$ は，上記ベクトルの面への射影で表される．射影行列は $uu^T + vv^T$ で与えられるので，接線速度は

$$(uu^T + vv^T) V_{\text{obj}}^{\text{tip}} = (u^T V_{\text{obj}}^{\text{tip}}) u + (v^T V_{\text{obj}}^{\text{tip}}) v$$

と表される．すなわち， u と v 方向の速度成分は， $u^T V_{\text{obj}}^{\text{tip}}$ ならびに $v^T V_{\text{obj}}^{\text{tip}}$ で与えられる．指先の姿勢を回転行列 R_{fin} で表す．指上の点 B における速度を $V_{\text{fin}}^{\text{tip}}$ とする．指先の角速度 ω_{fin} は

$$\left[\boldsymbol{\omega}_{\text{fin}} \times \right] = \dot{R}_{\text{fin}} R_{\text{fin}}^{\text{T}}$$

で定められる．ここで $\overrightarrow{PB} = -an$ に注意し，指先の並進速度を $\dot{x}_{\text{fin}}$ で表すと，速度 $V_{\text{fin}}^{\text{tip}}$ は

$$\mathbf{V}_{\text{fin}}^{\text{tip}} = \left[\boldsymbol{\omega}_{\text{fin}} \times \right] (-a\mathbf{n}) + \dot{\mathbf{x}}_{\text{fin}} \quad (3)$$

と表される．面 S に沿う接線速度は，上記ベクトルの面への射影で表され，

$$(uu^T + vv^T) V_{\text{fin}}^{\text{tip}} = (u^T V_{\text{fin}}^{\text{tip}}) u + (v^T V_{\text{fin}}^{\text{tip}}) v$$

を得る．すなわち， u と v 方向の速度成分は， $u^T \mathbf{V}_{\text{fin}}^{\text{tip}}$ ならびに $v^T \mathbf{V}_{\text{fin}}^{\text{tip}}$ で与えられる．接線ベクトル u と v 方向の変形を d_u ならびに d_v で表す．これまでの議論より，接線方向の速度の時間微分は，

$$\dot{d}_{\text{u}} = \mathbf{u}^{\text{T}} \boldsymbol{\Delta}^{\text{tip}}, \quad (4)$$

$$\dot{d}_{\text{v}} = \mathbf{v}^{\text{T}} \boldsymbol{\Delta}^{\text{tip}} \quad (5)$$

と表される．ここで

$$\begin{aligned}\Delta^{\text{tip}} &\triangleq \mathbf{V}_{\text{obj}}^{\text{tip}} - \mathbf{V}_{\text{fin}}^{\text{tip}} \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{\text{obj}} \times \end{bmatrix} (\mathbf{x}_{\text{fin}} - \mathbf{x}_{\text{obj}} - a\mathbf{n}) \\ &\quad + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{\text{fin}} \times \end{bmatrix} a\mathbf{n} + \dot{\mathbf{x}}_{\text{obj}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{fin}}\end{aligned}$$

は，点 B における相対速度を表す．以上より，柔軟指先と物体面との接線方向の制約を得る．

$$\dot{C}_n \stackrel{\Delta}{=} \mathbf{u}^T \boldsymbol{\Delta}^{\text{tip}} - \dot{d}_n = 0, \quad (6)$$

$$\dot{C}_v \triangleq \mathbf{v}^T \mathbf{\Delta}^{\text{tip}} - \dot{d}_v = 0. \quad (7)$$

これらは非ホロノームなパフィアン制約である。

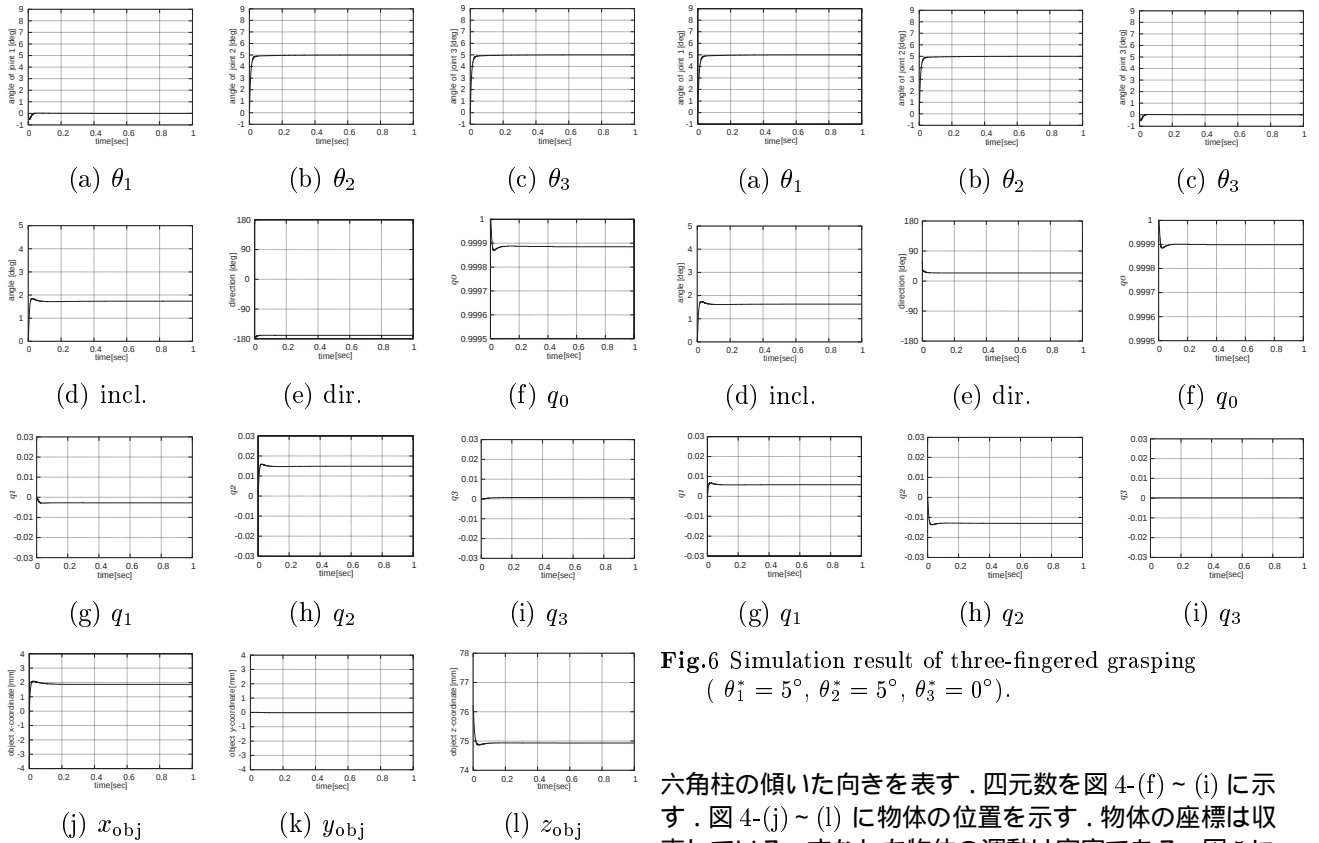


Fig.4 Simulation result of three-fingered grasping
($\theta_1^* = 0^\circ$, $\theta_2^* = 5^\circ$, $\theta_3^* = 5^\circ$).

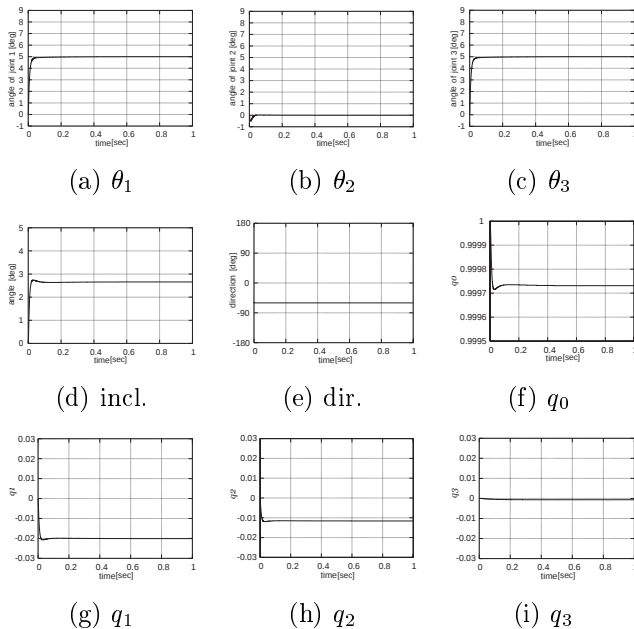


Fig.5 Simulation result of three-fingered grasping
($\theta_1^* = 5^\circ$, $\theta_2^* = 0^\circ$, $\theta_3^* = 5^\circ$).

で与えられる．これは物体の姿勢を表す回転行列の第3列に一致する．図4-(d)に， ζ 軸と z 軸との間の成す角 $\cos^{-1}(2(q_0^2 + q_3^2) - 1)$ を示す．この角が六角柱の傾きを表す．図4-(e)に， ζ 軸の $x-y$ 平面への射影の向き $\text{atan2}(2(q_2q_3 + q_0q_1), 2(q_1q_3 - q_0q_2))$ を示す．この角が

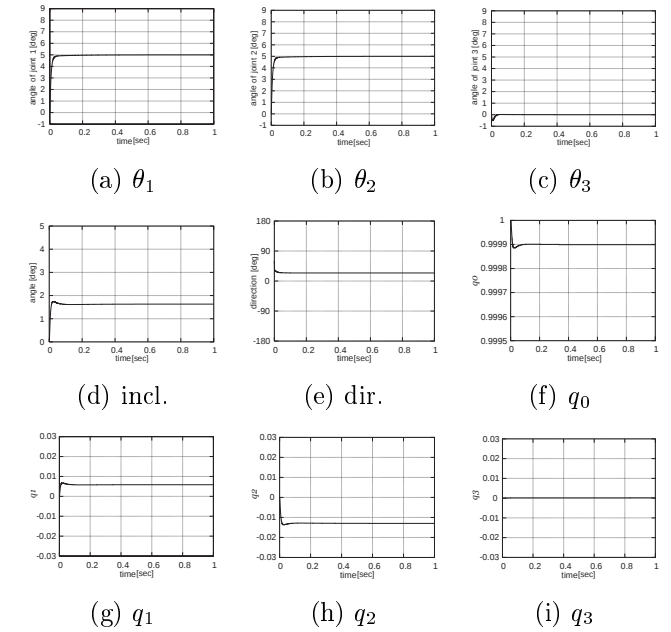


Fig.6 Simulation result of three-fingered grasping
($\theta_1^* = 5^\circ$, $\theta_2^* = 5^\circ$, $\theta_3^* = 0^\circ$).

六角柱の傾いた向きを表す．四元数を図4-(f)～(i)に示す．図4-(j)～(l)に物体の位置を示す．物体の座標は収束している．すなわち物体の運動は安定である．図5において目標角度は， $\theta_1^* = 5^\circ$, $\theta_2^* = 0^\circ$, $\theta_3^* = 5^\circ$ である．図4において目標角度は， $\theta_1^* = 5^\circ$, $\theta_2^* = 5^\circ$, $\theta_3^* = 0^\circ$ である．図4において目標角度は， $\theta_1^* = 5^\circ$, $\theta_2^* = 5^\circ$, $\theta_3^* = 0^\circ$ である．図4-(d)，5-(d)，6-(d)は，任意の向きに六角柱を傾けることが可能であることを示唆する．すなわち，柔軟指先を有する三本の一自由度指により，物体の傾きと傾きの方向を制御できることが予想される．

6. 結言

本報告では柔軟指による三次元空間内の把持・操作に焦点を当て，そのダイナミクスを定式化した．指先と物体との接触を，一つの法線方向の制約と二つの接線方向制約で定式化した．前者はホロノミック制約であり，後者は非ホロノミックなパフィアン制約であった．次に指先の弾性ポテンシャルエネルギーを定式化し，それが三つの項 U_{normal} , U_{tangent} , U_{side} で表されることを示した．最後に，三本の一自由度指による六角柱の把持・操作のシミュレーション結果を示した．

参考文献

- [1] Takahiro Inoue and Shinichi Hirai, *Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-fingered Manipulation*, IEEE Trans. on Robotics, Vol. 22, No. 6, pp.1273–1279, 2006.
- [2] 吉田, 有本, Bae, 非ホロノミック拘束下における三次元物体把持のシミュレータ構築, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 2, pp.280–288, 2007.