物体情報および外界センサを用いない重力下の安定ピンチング法の検証

吉田 守夫* 有本 卓* 小澤 隆太*

Validation of Secure Pinching under the Gravity Effect without Using Object Information and External Sensing

Morio Yoshida*, Suguru Arimoto* and Ryuta Ozawa*

This paper shows that secure pinching under the gravity effect can be realized by a pair of robot fingers with hemispherical ends using a coordinated sensory-feedback signal constructed without any information of an object (e.g., center of mass, mass, length, object angle). The proposed control signals which can be easily calculated from only encoder data of the finger angles and the finger physical parameters are adaptable to rigid objects with parallel or non-parallel flat surfaces. Numerical simulations and experimental results show that the closed-loop finger-object system finally falls into some stable state satisfying the force/torque balance, that is, into a force/torque equilibrium point. In other words, the results show that stable “blind grasping” under the situation of closing eyes and neither using any tactile sensor nor force-sensing can be actualized even by a pair of robot fingers like human pinching an object by means of the thumb and index finger, provided that preshaping of finger postures is fulfilled adequately.

Key Words: Secure Pinching, Robot Finger, Blind Grasping, Sensory Feedback, Non-parallel Object

1. はじめに

人は、手を用いていろいろな道具を作り出してきた。道具を作る過程において、手先の器用さが重要な役割を果たしていることは人類学の教えるところでもある。そのため指の器用さについての研究は従来から数多く、むしろ人類学や発達心理学、運動生理学の方面から詳細な観察や、実験結果が報告されている [1] [2]。他方、実際にロボットハンドを製作し、人間に近い器用さの実現を目指した研究はロボット工学や義手の研究分野でも数多く、実際、過去の研究内容に関して Shimoga [3] や Bicchi [4] による詳細な調査報告書がある。それらによると、従来の研究では、フォームクロージャ [5] あるいは不動化 [6] の研究や、フォースクロージャおよび運動学に基づく静的把持の研究 [7] が主体となる一方、制御法に関する研究ではほとんどの場合、安定把持を行うための軌道生成に基づくオープンループ制御が仮定されている。実際、運動が二次元平面に制限されときの 2D 物体の不動化では、平行面を持つ物体では 4 本の指が必要とされ [6]、フォームクロージャを満たすためには 4 本の指が必要とされている [5]。しかしながら、最近になって有本ら [8]~[11] の研究により、人間が 2 本の指で物体を操作できるのと同様に、ロボットにおいても適当な感覚フィードバック制御入力が見つかり、指

先が半球形状の 2 本指ロボットを用いると、指先の転がり接触を積極的に用いることによって安定把持が 2 本指で可能であることが示された。

従来の感覚フィードバックに基づく研究では、把持物体が平行および非平行な側面を持つ場合の安定把持と姿勢制御が重力下において同時に実現できる制御則は提案されていたが、安定把持のみの制御則についても、把持物体の傾き情報を外界センサから取得する必要性があった [11]。しかし最近、重力が無視できる水平面内のピンチングの場合について、平行な側面を持つ物体に対して把持物体情報を全く用いない制御則が、小澤ら [12] によって報告されている。そこでは、人間のピンチング動作の基本が、拇指と対抗する指（人差指か中指）との間の対抗力であるという発達心理学の観測事実が重要な役割を果たした。しかし、物体と指の運動が重力の影響を受けると、対抗力は指と物体との間の転がりをも誘導することから、特に非平行な側面を持つ物体に対しては、物体が両方の指先上を転がり落ちる可能性があり、明らかにこの微妙な動きを静止させる補正制御入力が必要である。そこで、本稿では小澤ら [12] によって提案された制御則を基本に、側面が非平行な物体に対しても物体情報や外界センサを用いずにどのような制御入力を加えれば安定把持が可能になるか検証する。人は目を閉じて、2 本指が物体の近くであって pre-shaping できれば、安定的に物体把持できるが、このことが一対のロボット指によるピンチングでも可能になることをシミュレーションと実機実験によって確認する。本

原稿受付 2005 年 2 月 17 日

*立命館大学理工学部ロボティクス学科

*Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

稿において、シミュレーションおよび実機に用いた指ロボットの自由度を左 3 自由度、右 2 自由度とした。これは人が人差し指と親指でピンチング動作を平面で行うと考えた場合、人差し指の DIP 関節（指先より 1 番目の関節）と PIP 関節（指先より 2 番目の関節）は連動してると考えればこの指の自由度は 2 自由度、親指の自由度は 3 自由度と仮定できるので、指ロボットの自由度を同じように設定した。

2. 動力学

左側 3 自由度、右側 2 自由度である 2 本指ロボットと把持物体のダイナミクスを導出する。ここでは、システム全体の運動は二次元平面に限定し、 y 方向に重力が働いているとする。システム全体の座標系を **Fig. 1** に示す。ベクトル $\mathbf{q}_1 = (q_{11}, q_{12}, q_{13})^T$ は左側の指の関節座標とし、同様に右側を $\mathbf{q}_2 = (q_{21}, q_{22})^T$ とし関節角度 α を一定値とする。指ロボットの指先は剛体とし、形状は半径 $r_i (i, j = 1, 2)$ の半球とする。 $O_{c.m.}$ は、把持物体の重心位置とする。座標 $\mathbf{z} = (x, y, \theta)^T$ のうち (x, y) は把持物体の重心位置、 θ は把持物体の回転角度を示している。 l_i は物体の重心位置から指先が接している物体面へ垂線を引く場合の長さであり、 θ_0 は物体の傾斜角度であり、重心位置を通過する線を引く場合に左右の θ_0 が等しくなるように引き、それを Y 軸とする。そのため物体形状が非対称の場合も含まれることに注意する。 $l_{1j}, m_{1j}, I_{1j} (j = 1, 3)$ は、左側の指ロボットのリンク j の長さ、質量、慣性モーメントを示す。右側の指ロボットについては関節角度を α に固定しているリンクの長さ、質量、慣性モーメントを $l_\alpha, m_\alpha, I_\alpha$ とし、残りのリンクについては左側と同様に関節角度 $q_{2j} (j = 1, 2)$ に対して $l_{2j}, m_{2j}, I_{2j} (j = 1, 2)$ とする。また、 M, I は把持物体の質量、慣性モーメントを表し、 L は左側の指の原点“O”と右側の指の原点“O'”の距離を示す。指先と把持物体との接点、重心位置から接点のある辺に垂線を引いたときの垂線と接点のある辺との交点との間の距離を Y_i とすると、次のような関係を示すことができる。

$$\begin{aligned} Y_1 &= (x_{01} - x) \sin(\theta - \theta_0) + (y_{01} - y) \cos(\theta - \theta_0) \\ Y_2 &= (x_{02} - x) \sin(\theta + \theta_0) + (y_{02} - y) \cos(\theta + \theta_0) \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 1 A pair of robot fingers pinching a rigid object with non-parallel surfaces

また、 $Y_i (i = 1, 2)$ は、指先と把持物体との間に滑りが生じない場合、 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \theta$ を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} Y_1 &= c_{01} - r_1 \{\pi + \theta - \theta_0 - q_{11} - q_{12} - q_{13}\} \\ Y_2 &= c_{02} - r_2 \{\pi - \theta - \theta_0 - q_{21} - q_{22} - \alpha\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 c_{01}, c_{02} は定数である。この関係を用いて指先と把持物体とが滑らないという関係式 R_1 と R_2 を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} R_1 &= (x_{01} - x) \sin(\theta - \theta_0) + (y_{01} - y) \cos(\theta - \theta_0) \\ &\quad - c_{01} + r_1 \{\pi + \theta - \theta_0 - q_{11} - q_{12} - q_{13}\} = 0 \\ R_2 &= (x_{02} - x) \sin(\theta + \theta_0) + (y_{02} - y) \cos(\theta + \theta_0) \\ &\quad - c_{02} + r_2 \{\pi - \theta - \theta_0 - q_{21} - q_{22} - \alpha\} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

これらの拘束条件から、ラグランジュ乗数 λ_1, λ_2 （接線力）を使って次のようなスカラーを導入する。

$$R = \lambda_1 R_1 + \lambda_2 R_2 \quad (4)$$

$R_i (i = 1, 2)$ を $\mathbf{q}_i (i = 1, 2)$ で偏微分すると以下ようになる。

$$\left(\frac{\partial R_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T = \mathbf{J}_{0i}^T \begin{pmatrix} \sin(\theta + (-1)^i \theta_0) \\ \cos(\theta + (-1)^i \theta_0) \end{pmatrix} - r_i \mathbf{e}_i \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{e}_1 = (1, 1, 1)^T, \mathbf{e}_2 = (1, 1)^T$ とし $\mathbf{J}_{0i}$ は以下に示す指ロボットのヤコビアン行列である。

$$\mathbf{J}_{0i}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} & \frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \end{pmatrix} \quad (6)$$

また、指先と把持物体が離れないという幾何学的条件は以下のように示せる。

$$\begin{aligned} Q_1 &= -(l_1 + r_1) + (x - x_{01}) \cos(\theta - \theta_0) \\ &\quad - (y - y_{01}) \sin(\theta - \theta_0) = 0 \\ Q_2 &= -(l_2 + r_2) + (x - x_{02}) \cos(\theta + \theta_0) \\ &\quad + (y - y_{02}) \sin(\theta + \theta_0) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$R_i (i = 1, 2)$ の場合と同様に、 $Q_i (i = 1, 2)$ を $\mathbf{q}_i (i = 1, 2)$ で偏微分すると以下ようになる。

$$\left(\frac{\partial Q_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T = (-1)^i \mathbf{J}_{0i}^T \begin{pmatrix} \cos(\theta + (-1)^i \theta_0) \\ -\sin(\theta + (-1)^i \theta_0) \end{pmatrix} \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

これらの拘束式に対してラグランジュ乗数 f_1, f_2 （法線力）を用いて、以下のようなスカラーを導入する。

$$Q = f_1 Q_1 + f_2 Q_2 \quad (9)$$

ここで、文献 [13] [14] を参考にしてシステム全体のダイナミクスを導出すると以下ようになる。

$$\left\{ \mathbf{H}_i(\mathbf{q}_i) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{H}}_i(\mathbf{q}_i) \right\} \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{S}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i)$$

$$-f_i \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T - \lambda_i \left(\frac{\partial R_i}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T = \mathbf{v}_i \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

$$\begin{cases} M\ddot{x} - \{f_1 \cos(\theta - \theta_0) - f_2 \cos(\theta + \theta_0)\} \\ \quad + \{\lambda_1 \sin(\theta - \theta_0) + \lambda_2 \sin(\theta + \theta_0)\} = 0 \\ M\ddot{y} + \{f_1 \sin(\theta - \theta_0) - f_2 \sin(\theta + \theta_0)\} \\ \quad + \{\lambda_1 \cos(\theta - \theta_0) + \lambda_2 \cos(\theta + \theta_0)\} - Mg = 0 \\ I\ddot{\theta} - f_1 Y_1 + f_2 Y_2 + \lambda_1 l_1 - \lambda_2 l_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式 (10) はロボットハンドのダイナミクスであり、式 (11) は把持物体のダイナミクスである。

3. 制御入力と安定把持成立条件

重力下において、物体情報を全く用いることなく平行あるいは非平行な側面を持つ把持物体を安定把持する制御則は、小澤ら [12] の提案した重力を考慮しない二次元平面内において、物体情報を全く用いることなく平行な側面を持つ物体を把持する安定把持制御入力と、有本ら [11] [15] による把持物体の重力を補償する入力を組み合わせ、さらに r_1 と r_2 の差、および重力の影響により把持物体に発生するモーメントを直接補償する項を設けるのではなく $Y'_1 - Y'_2$, $y_{01} - y_{02}$ の項がそれらのモーメントを吸収する制御則を提案する。ここで、従来の有本らの制御則では把持物体のモーメントを直接補償していたため、そのためには把持物体の角度制御も同時に行う必要があった（システム全体が収束したときの物体角度 θ_d をあらかじめ知る必要があった）[15]。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{si} = & -c_i \dot{\mathbf{q}}_i + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} \mathbf{J}_{0i}^T \begin{pmatrix} x_{01} - x_{02} \\ y_{01} - y_{02} \end{pmatrix} \\ & + \frac{r_i}{r_1 + r_2} f_d \{l'_w \sin \theta_0 - (-1)^i d' \cos \theta_0\} \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{gi} = & \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) + (-1)^i \nu \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T (y_{01} - y_{02}) - \frac{Mg}{2} \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ & + r_i \left\{ \left(\frac{Mg}{2} - (-1)^i \nu (y_{01} - y_{02}) \right) \cos(\theta + (-1)^i \theta_0) \right\} \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 l'_w , d' は以下となる。

$$l'_w = \tilde{l} \cos \theta_0 + (Y_1 + Y_2) \sin \theta_0 \quad (14)$$

$$= -(x_{01} - x_{02}) \cos \theta + (y_{01} - y_{02}) \sin \theta \quad (15)$$

$$\tilde{l} = l_1 + l_2 + r_1 + r_2 \quad (16)$$

$$d' = (Y'_1 - Y'_2) - (r_1 - r_2) \sin \theta_0 \quad (17)$$

$$Y'_1 - Y'_2 = (Y_1 - Y_2) \cos \theta_0 - (l_1 - l_2) \sin \theta_0 \quad (18)$$

ここで、 $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{si} + \mathbf{v}_{gi}$ を制御入力とする。 $\mathbf{v}_{si}$ は安定把持を実現する制御則であり、 $\mathbf{v}_{gi}$ は重力による影響を補償する制御則である。その中で、式 (12) の第三項は物体の非平行性から来るドリフト項の補償を行うために導入した。式 (13) の右辺の第二項は物体の傾きを押さえ、第三項は重力を直接補償し、第四項は非平行から来るドリフト項を補償する項である。指の重

力項 $\mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i)$ は内界センサ情報から容易に計算できるので、直接補償できると仮定した。物体情報を用いないことを前提にするとき、質量 M の代わりに推定量 $\hat{M}$ を想定し、また、式 (13) の右辺の最後の項と式 (12) の右辺の最後の項を合わせた全体を推定量で置き換え、 $\mathbf{v}_i$ の代わりに次の制御則 $\mathbf{v}'_i$ を提案する。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'_i = & -c_i \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} \mathbf{J}_{0i}^T \begin{pmatrix} x_{01} - x_{02} \\ y_{01} - y_{02} \end{pmatrix} \\ & - \frac{\hat{M}g}{2} \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T + (-1)^i \nu \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T (y_{01} - y_{02}) - r_i \hat{N}_i \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (19)$$

$\hat{M}$ は物体質量の推定量であり、 $\hat{N}_i$ ($i = 1, 2$) は以下の値の推定量である。

$$\begin{aligned} N_i = & - \left\{ \frac{Mg}{2} - (-1)^i \nu (y_{01} - y_{02}) \right\} \cos(\theta + (-1)^i \theta_0) \\ & - \frac{f_d}{(r_1 + r_2)} \{l'_w \sin \theta_0 - (-1)^i d' \cos \theta_0\} \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (20)$$

そのときの $\hat{M}$, $\hat{N}_i$ ($i = 1, 2$) の更新則を次のようにする。

$$\hat{M}(t) = \hat{M}(0) + \int_0^t \frac{g\gamma_M^{-1}}{2} \sum_{i=1,2} \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right) \dot{\mathbf{q}}_i d\tau \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \hat{N}_i = & \gamma_{N_i}^{-1} \int_0^t (r_i \mathbf{e}_i^T \dot{\mathbf{q}}_i) d\tau = \gamma_{N_i}^{-1} r_i \mathbf{e}_i^T (\mathbf{q}_i(t) - \mathbf{q}_i(0)) \\ & (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 γ_M , γ_{N_1} , γ_{N_2} はそれぞれ正の定数であり $\hat{M}(0)$ は物体質量を推定する場合の初期値であり、 $\mathbf{q}_i(0)$ ($i = 1, 2$) はロボットにおける関節角度の初期値である。

以下では、制御入力を含めたシステム全体の系が平衡状態になる条件を論じる。 $f_d > 0$ が適当な大きさであるとして、次の条件が満たされている場合を考える。

$$\dot{\mathbf{q}}_i = 0, \dot{\mathbf{z}} = 0, f'_i - f'_{di} = 0, \lambda'_i - \lambda'_{di} = 0 \quad (23)$$

$$\hat{M} - M = 0, -r_i (\hat{N}_i - N_i) = 0, S' = 0, (i = 1, 2) \quad (24)$$

このとき、全体系は把持の平衡状態にあると呼び、このとき安定把持が実現できることが証明されている [17]。ここで、式 (23), (24) に現れる S' , f'_i , f'_{di} , λ'_i , λ'_{di} について以下で説明する。 S' は把持物体に加わる総モーメントを示しており、以下となる。

$$\begin{aligned} S' = & -\nu (y_{01} - y_{02}) \{ (x_{01} - x_{02}) \\ & + r_1 \cos(\theta - \theta_0) + r_2 \cos(\theta + \theta_0) \} \\ & - \frac{f_d}{r_1 + r_2} \{ l'_w (r_1 - r_2) \sin \theta_0 + d' (r_1 + r_2) \cos \theta_0 \} \\ & - \frac{Mg}{2} \{ Y_1 \sin(\theta - \theta_0) + Y_2 \sin(\theta + \theta_0) \\ & - l_1 \cos(\theta - \theta_0) + l_2 \cos(\theta + \theta_0) \} \end{aligned} \quad (25)$$

f'_i , λ'_i ($i = 1, 2$) は、内力が目標力に収束しているかどうかを確認するために、 f_i および λ_i ($i = 1, 2$) から重力の影響によって生

じる力を取り除いた力であり、次のようになる。

$$\begin{cases} f'_i = f_i + (-1)^i \frac{Mg}{2} \sin(\theta + (-1)^{-1} \theta_0) \\ \lambda'_i = \lambda_i - \frac{Mg}{2} \cos(\theta + (-1)^{-1} \theta_0) \end{cases} \quad (26)$$

$f'_{di}, \lambda'_{di} (i=1, 2)$ は、以下になる。

$$\begin{aligned} f'_{di} = & \frac{f_d}{r_1 + r_2} \{ l'_w \cos \theta_0 + (-1)^i d' \sin \theta_0 \} \\ & + \nu (y_{01} - y_{02}) \{ \sin \theta \cos \theta_0 + (-1)^i \cos \theta \sin \theta_0 \} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \lambda'_{di} = & \frac{f_d}{r_1 + r_2} \{ l'_w \sin \theta_0 + (-1)^i d' \cos \theta_0 \} \\ & + \nu (y_{01} - y_{02}) \{ \sin \theta \sin \theta_0 - (-1)^i \cos \theta \cos \theta_0 \} \end{aligned} \quad (28)$$

4. シミュレーション

4.1 平行な側面を持つ物体

上で導出したダイナミクス (式 (10), (11)) に従う左 3 自由度, 右 2 自由度を持つ 2 本指ロボットに制御則 $\mathbf{v}_i$ を使用した場合の数値シミュレーション結果を示す。把持物体は密度不均一な直方体 ($\theta_0 = 0$) とした。すると, 重心位置は図心とは異なるので l_1, l_2 は等しくならない。また, 物体と指先の間の拘束力を組み込むために, Constraint Stabilization Method [16] を用いる。今回のシミュレーションに用いた物理パラメータおよび制御パラメータを **Tables 1, 2** に示す。ここで, 指先半径を $r_1 = r_2 = 0.01$ [m] とした。

把持物体が対称かつ $l_1 = l_2$ の場合, $Y'_1 - Y'_2 = 0$ [mm] かつ $\theta = 0$ [deg] に収束し, この場合は重力によるモーメントは発生しないが, $l_1 \neq l_2$ の場合は **Fig. 2** から分かるように $Y'_1 - Y'_2$ は 0 [mm] に収束しないことが確認でき, 同様に物体の傾きに関しても **Fig. 3** から分かるように $\theta = 0$ [deg] に収束しないことが

確認できる。よって重力によるモーメントは発生しているので, それを確認するために S' のグラフ **Fig. 9** を確認すると $S' = 0$ に収束していることから, このとき物体に加わる総モーメントは 0 であることが分かる。また, **Fig. 6** より把持物体の質量推定値が真値に収束していることが確認できる。内力が目標力に収束しているかどうかを確認すると, f'_i および λ'_i は, $t \rightarrow \infty$ のとき, それぞれ f'_{di} および λ'_{di} に収束することが **Fig. 4, 5** より確認できる。式 (27) より $\theta_0 = 0$ の場合は特に $f'_{d1} = f'_{d2}$ となることに注意する。また, グラフは掲載していないが, $\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{0}$ および $\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{0}$ に収束していることを確認している。したがって, この特別な場合には安定把持条件 (式 (23), (24)) を満足することを確認した。

Fig. 2 $Y'_1 - Y'_2$

Fig. 3 θ

Fig. 4 f'

Fig. 5 λ'

Table 1 Physical parameters of two fingers robot

$l_{11} = l_{21}$	length	0.039 [m]
$m_{11} = m_{21}$	weight	0.045 [kg]
$l_{12} = l_\alpha$	length	0.039 [m]
$m_{12} = m_\alpha$	weight	0.025 [kg]
$l_{13} = l_{22}$	length	0.033 [m]
$m_{13} = m_{22}$	weight	0.015 [kg]
α	constant angle	50.00 [deg]
L	base length	0.063 [m]
r_i	radius ($i = 1, 2$)	0.010, 0.020 [m]

Table 2 Physical parameters and control signals

Pinched Object	M	object weight	0.060 [kg]
	l_1	object width	0.175×10^{-1} [m]
	l_2	object width	0.125×10^{-1} [m]
	θ_0	inclination angle	0.000 [deg]
Control Signals	f_d	internal force	2.000 [N]
	c_i ($i = 1, 2$)	damping coefficient	0.006 [msN]
	γ_M	regressor gain	0.001 [m ² /kgs ²]
	γ_{N_1}	regressor gain	0.001×10^{-2} [s ² /kg]
	γ_{N_2}	regressor gain	0.001×10^{-2} [s ² /kg]
	ν	p gain	50.00 [N/m]
	$M(0)$	initial value	0.010 [kg]

Fig. 6 $\hat{M}$

Fig. 7 $\hat{N}_1$

Fig. 8 $\hat{N}_2$

Fig. 9 S'

Table 3 Physical parameters and control signals

Pinched Object	M	object (weight)	0.040 [kg]
	l_1	object (width)	0.132×10^{-1} [m]
	l_2	object (width)	0.231×10^{-1} [m]
	θ_0	Object inclination angle	-15.00 [deg]
Control Signals	f_d	internal force	2.000 [N]
	$c_i, i = 1, 2$	damping coefficient	0.006 [msN]
	γ_M	regressor gain	$0.010 [\text{m}^2/\text{kg s}^2]$
	γ_{N_1}	regressor gain	$0.001 \times 10^{-1} [\text{s}^2/\text{kg}]$
	γ_{N_2}	regressor gain	$0.001 \times 10^{-1} [\text{s}^2/\text{kg}]$
	ν	p gain	50.00 [N/m]
	$M(0)$	initial value	0.010 [kg]

4.2 非平行な側面を持つ物体

制御則 $\mathbf{v}_i'$ を用いて左 3 自由度, 右 2 自由度の指ロボットによる非平行な側面を持つ非対称な物体に対して行ったシミュレーション結果を示す。用いた物理パラメータおよび制御パラメータを Table 1, **Table 3** に示す。ここで指先半径を $r_1 = 0.01$ [m], $r_2 = 0.02$ [m] と設定した。この理由として非平行な側面を持つ物体 ($\theta_0 \neq 0$ [deg]) の場合, $r_1 \neq r_2$ であると把持物体にモーメントが発生してしまう。そのモーメントが発生しても安定把持が成立することを確かめるため $r_1 \neq r_2$ とした。

ここで, $Y'_1 - Y'_2$ は式 (18) で表されるので平行な側面を持つ物体と同様に非平行な場合についても, $l_1 \neq l_2$ の場合, **Fig. 10** より $Y'_1 - Y'_2$ は 0 [mm] に収束せず, 物体角度 θ も **Fig. 11** より 0 [deg] に収束しないことが分かる。よって, 先ほどの平行な側面を持つ場合と同様に, 重力の影響などによりモーメントが発生するので, S' の値を調べる必要があり, この場合 **Fig. 17** より 0 に収束していることが確認できる。また, 三つの推定量 $\hat{M}$, $\hat{N}_1$, $\hat{N}_2$ についても **Fig. 14~16** より真値に推定できていることが確認できる。以上により非平行な側面を持つ物体についても平行な場合と同様に安定把持条件 (式 (23), (24)) を満足することを確認した。

5. 実験

実験は, 重力を考慮した垂直二次元平面で行った。実験システムの概要図を **Fig. 18** に, 実験装置の詳細を **Table 4** に示す。ここで, **Fig. 18** において把持されている物体の下に細長い棒が見えるが, これは把持物体の回転角度 θ をレーザ変位計を用いて計測するのに必要である。この値 θ は制御入力にはまったく用いておらず, 安定把持が成立したかを判別するために計測していることに注意する。

5.1 把持物体が平行な側面を持つ場合

実験で用いた左 3 自由度, 右 2 自由度の指ロボットの物理パラメータを Table 4 に, 平行な側面を持つ物体の物理パラメータおよび制御パラメータを **Table 5** に示す。提案した制御則 $\mathbf{v}_i'$ を用いて実験を行った。このとき, 把持物体は対称物体で密度均一なものを使用し, このような物体を用いた場合は理論的に $Y'_1 - Y'_2 = 0$ [mm] および $\theta = 0$ [deg] に収束することが分かっている。このとき, f_d の値を数値シミュレーションよりも小さく設定した理由は数値シミュレーションでは摩擦を考慮していないが, 実機実験では摩擦の影響を受けることが原因に挙

Fig. 10 $Y'_1 - Y'_2$ **Fig. 11** θ **Fig. 12** f' **Fig. 13** λ' **Fig. 14** $\hat{M}$ **Fig. 15** $\hat{N}_1$ **Fig. 16** $\hat{N}_2$ **Fig. 17** S'

げられる。具体的には, 把持物体の接線方向に働く摩擦力は法線方向の力に比例し, 把持物体が重力の影響により発生する力の向きと反対方向にその摩擦力は発生するので, 実機実験において把持力 f_d の値が大きくなるにつれ, 把持物体の接線方向における摩擦力も大きくなり重力方向に落ちようとする把持物体を支える力としても働く。その結果, 把持物体の持つ質量を正確に推定できなくなるので f_d の値を小さく設定した。

実験結果 **Fig. 19** より $Y'_1 - Y'_2$ は 0 [mm] 近辺に, 物体角度 θ も **Fig. 20** より 0 [deg] 近辺に収束している。把持物体に加わる総モーメントを表す S' について **Fig. 24** より 0 近辺に収束し, 把持物体質量 $\hat{M}$ の推定に関しても **Fig. 21** よりほぼ真値に推定できている。推定値 $\hat{N}_1$, $\hat{N}_2$ に関しては **Fig. 22, 23** より

Fig. 18 Experimental setup

Table 4 Details of physical parameters of the setup

Actuator (by Maxon)	Power	4.55 [W]
	Encoder	512 [p/r]
	Gear ratio	23:1
$l_{11} = l_{21}$	length	0.039 [m]
$m_{11} = m_{21}$	weight	0.040 [kg]
$l_{12} = l_{\alpha}$	length	0.039 [m]
$m_{12} = m_{\alpha}$	weight	0.030 [kg]
$l_{13} = l_{22}$	length	0.033 [m]
$m_{13} = m_{22}$	weight	0.020 [kg]
L	base length	0.053 [m]
α	constant joint angle	50.00 [deg]
r_i	radius	0.001 [m]

Table 5 Physical parameters and control signals

Pinched Object	M	object mass	0.0516×10^{-1} [kg]
	l	object width	0.030 [m]
	h	object height	0.050 [m]
	l_i	object length ($i = 1, 2$)	0.015 [m]
	θ_0	inclination angle	0.000 [deg]
Control Signals	f_d	internal force	0.080 [N]
	$c_1 = c_2$	damping coefficient	0.001 [msN]
	ν	p gain	200.0 [N/m]
	γ_M	regressor gain	$0.300 [\text{m}^2/\text{kg}\text{s}^2]$
	γ_{N1}	regressor gain	$0.001 [\text{s}^2/\text{kg}]$
	γ_{N2}	regressor gain	$0.001 [\text{s}^2/\text{kg}]$
	$M(0)$	initial object mass	0.009 [kg]

真値に収束していない。この原因としてこれらの項はPID制御のI動作のように働くためシミュレーションと実機とのモデル化誤差，指ロボット自体の重力を補償する項の誤差，および指ロボット自体が持つ粘性，把持物体と指先の間に生じるクーロン摩擦などの影響を吸収しているため真値に収束しないと考えられ，理論上の真値に収束しなくても制御自体には問題ない。以上により，実機を用いた場合についてもシミュレーションと同様に平行な側面を持つ物体について安定把持が実現していることが確認できた。

5.2 把持物体が非平行な側面を持つ場合

同様に，提案された制御則 $\mathbf{v}_i^*$ に制御パラメータ (Table 4) を用いて，左3自由度，右2自由度の指ロボット (Table 4) に非平行な側面を持つ物体 (Table 6) を把持する実験を行った。

この場合も，平行な側面を持つ場合と同様に，把持物体が対称物体であり密度均一である物を使用したため， $Y_1' - Y_2' = 0$ [mm] および $\theta = 0$ [deg] に収束することが理論的に分かっている。実験結果 Fig. 25 より $Y_1' - Y_2'$ は 0 [mm] 近辺に，物体角度 θ も Fig. 26 より 0 [deg] 近辺に収束している。把持物体に加わる総モーメントを表す S' は Fig. 30 より 0 近辺に収束し，把持物

Fig. 19 $Y_1' - Y_2'$ Fig. 20 θ Fig. 21 $\hat{M}$ Fig. 22 $\hat{N}_1$ Fig. 23 $\hat{N}_2$ Fig. 24 S'

Table 6 Physical parameters and control signals

Pinched Object	M	object mass	0.464×10^{-1} [kg]
	h	object height	0.050 [m]
	l_i	object length ($i = 1, 2$)	0.010 [m]
	θ_0	inclination angle	-10.00 [deg]
Control Signals	f_d	internal force	0.080 [N]
	$c_1 = c_2$	damping coefficient	0.001 [msN]
	ν	p gain	250.0 [N/m]
	γ_M	regressor gain	$0.440 [\text{m}^2/\text{kg}\text{s}^2]$
	γ_{N1}	regressor gain	$0.001 [\text{s}^2/\text{kg}]$
	γ_{N2}	regressor gain	$0.001 [\text{s}^2/\text{kg}]$
	$M(0)$	initial object mass	0.009 [kg]

体質量 $\hat{M}$ の推定に関しても Fig. 27 よりほぼ真値に推定できている。推定量 $\hat{N}_1$, $\hat{N}_2$ に関しては Fig. 28, 29 より真値に収束せず偏差が残っているが，この原因は平行な側面を持つ物体と同じ理由と考えられる。以上により非平行な側面を持つ物体についても安定把持が実現できることが確認された。

6. おわりに

重力下において把持物体に関するセンシングおよび情報を一切用いずに安定把持を実現する制御則を提案し，その有効性を平行な側面を持つ物体および非平行な側面を持つ物体に対して数値シミュレーションおよび実機実験にて確認した。人は目を

Fig. 25 $Y_1' - Y_2'$ Fig. 26 θ Fig. 27 $\hat{M}$ Fig. 28 $\hat{N}_1$ Fig. 29 $\hat{N}_2$ Fig. 30 S'

閉しても物体をピンチングできる。同等な動作が、物体情報を全く使用することなく、内界センサからの感覚フィードバックのみを用いてロボット指で実現できることを数値シミュレーションおよび実機実験により示した。ここでは指ロボットの自由度を左3自由度、右2自由度と限定した。この場合の安定性の理論的証明は、概略的に、学会講演論文[17]の付録で与えられている。また、指ロボットの自由度を1自由度増やした左3自由度、右3自由度においても今回提案した制御則を用いて安定把持が数値シミュレーションおよび実機実験において実現可能なことを確認している。これらの結果については改めて発表する。

参考文献

- [1] J. Napier: Hands. PRINCETON UNIVERSITY PRESS, 1993.
- [2] C.L. Mackenzie and T. Iberall: The Grasping Hand, Advances In Psychology 104. Elsevier Science Ltd, 1994.
- [3] K.B. Shimoga: "Robot grasp synthesis algorithms," Int. J. of Robotics Research, vol.15, no.3, pp.230-266, 1996.
- [4] A. Bicchi: "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.16, pp.652-662, 2000.
- [5] B. Mishra, J.T. Schwartz and M. Sharin: "On the existence and synthesis of multifinger positive grips," Algorithmica, vol.2, pp.541-548, 1987.
- [6] J. Czyzowicz, I. Stojenovic and J. Urrutia: "Immobilizing a polytope," Lecture Note in Computer Science, no.519, pp.214-227, 1991.
- [7] R.S. Fearing: "Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands," IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-2, no.4, pp.188-195, 1986.
- [8] S. Arimoto, P.T.A. Nguyen, H. Y. Han and Z. Doulgeri: "Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips," Robotica, vol.18, no.1, pp.71-80, 2000.
- [9] S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi, P.T.A. Nguyen and H.Y. Han: "Principle of superposition for controlling pinch motions by means of robot fingers with soft tips," Robotica, vol.19, no.1, pp.21-28, 2001.
- [10] H.Y. Han, S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi and P.T.A. Nguyen: "Robotic pinching by means of a pair of robot fingers with sensory feedback," Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.97-102, 2001.
- [11] S. Arimoto, K. Tahara, J.H. Bae and M. Yoshida: "A stability theory on a manifold: Concurrent realization of grasp and orientation control of an object by a pair of robot fingers," Robotica, vol.21, no.2, pp.163-178, 2003.
- [12] R. Ozawa, S. Arimoto, M. Yoshida and S. Nakamura: "Stable grasping and relative angle control of an object by dual finger robots without object sensing," Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1694-1699, 2004.
- [13] 有本卓: 新版 ロボットの力学と制御, システム制御情報ライブラリー 1. 朝倉書店, 2002.
- [14] 有本卓: 数学は工学の期待に応えられるのか, 岩波書店, 2004.
- [15] S. Arimoto, M. Yoshida, J.H. Bae and K. Tahara: "Dynamic force/torque balance of 2d polygonal objects by a pair of rolling contacts and sensory-motor coordination," Journal of Robotic Systems, vol.20, no.9, pp.517-537, 2003.
- [16] J. Baumgarte: "Stabilization of constraint and integrals of motion in dynamical systems," Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng., vol.1, no.1, pp.1-16, 1972.
- [17] S. Arimoto, R. Ozawa and M. Yoshida: "Two-dimensional stable blind grasping under the gravity effect," Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1208-1214, 2005.

吉田守夫 (Morio Yoshida)

1973 年 7 月 24 日生。2004 年 3 月立命館大学大学院理工学研究科情報システム学専攻博士前期課程修了，同年 4 月立命館大学大学院博士後期課程入学，現在に至る。物体把持の研究などに従事。IEEE, SICE, ISCIE の学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)

小澤隆太 (Ryuta Ozawa)

1974 年 3 月 22 日生。2001 年明治大学理工学研究科博士後期課程修了 (博士 (工学))。同年明治大学理工学部助手，2002 年日本学術振興会特別研究員を経て，2003 年立命館大学理工学部講師。腿駆動機構，ロボットハンド，冗長ロボット，インピーダンス制御の研究に従事。IEEE, ISCIE の会員。

(日本ロボット学会正会員)

有本 卓 (Suguru Arimoto)

1936 年 8 月 3 日生。1959 年京都大学理学部数学科卒業，同年 4 月沖電気工業 (株)，東京大学工学部助手，講師を経て，1968 年 4 月大阪大学基礎工学部助教授，1973 年 3 月同教授，1988 年東京大学工学部教授，1997 年 3 月同停年退職，同年 4 月より立命館大学理工学部教授，現在に至る。この間，制御

理論，情報理論，ロボティクス，マシーンインテリジェンスの研究に従事。工学博士。1995～1997 年日本ロボット学会会長，1983 年 IEEE Fellow，2000 年 IEICE Fellow。2000 年 IEEE Third Millennium Medal 受賞。2000 年 4 月紫綬褒章受章。(日本ロボット学会正会員)