駆動の順序がない鞍関節をもつ柔軟指ロボット — 対のモデル化と制御

吉田 守夫^{*1} 有本 卓^{*1} 田原 健二^{*1*2} 杉山 博之^{*3}

Modeling and Control of a Pair of Robot Fingers with Soft Tips and Orderless Saddle-joint Actuations

Morio Yoshida^{*1}, Suguru Arimoto^{*1}, Kenji Tahara^{*1*2} and Hiroyuki Sugiyama^{*3}

A new robot hand dynamics model is proposed, in which rolling constraints are incorporated and orderless relation between two actuations of a saddle joint is taken into account. For realizing a dexterous robot hand, it is necessary to imitate the orderless actuations because a saddle joint of human being plays a vital role to perform thumb opposition. Arising around the opposition axis connecting the two contact points of each finger-tip with an object, spinning motion is treated in a faithful manner by introducing a physical model of viscous force around the spinning axis of the object. A class of control signals without object kinematics or external sensing is used. It is shown that the two trajectories of the models with ordered joint actuations and the proposed model with the orderless ones are different through numerical simulations. The difference demands to consider the orderless joint model as a saddle joint model. Any solution of the closed-loop dynamics converges to an equilibrium state establishing force/torque balance through numerical simulations based on the derived model.

Key Words: Grasping, Robot Finger, Rolling Constraints, Saddle Joint, Numerical Simulation

1. はじめに

人は手を使って道具を創り、使用してきたことで脳に刺激を与え、進化を加速させてきたといわれる [1]. 特に、道具を創るのに決定的に重要な役割を果たしているのが拇指と人差し指（または中指）との対向性（opposability）であり、人類の進化に大いに貢献したと霊長類学者 Napier は述べている [2]. このような鋭い洞察があるにもかかわらず、ロボティクス分野において、拇指対向性に基づく多指ハンドの制御を正面から考察することは近年までなかった。

一方、人の手と同等な器用な動作を実現するために、多くのロボット研究者が、ハンドの研究に努力を積み重ねてきた [3]~[6]. 特に、人の手の構造を模倣し、同等の自由度を持つロボットハンドが研究・開発されてきた [7]~[9]. 手は、人の他の部分と比べ小さく、軽く、動きも比較的速いためダイナミクスを無視できない状況がある。物体を操作する際には、転がりや滑り

Fig. 1 Pinch motion between a thumb and an index finger

運動、把持する指の変更などを伴う。これらの事柄は、ロボットハンドによる把持の解析を複雑で困難なものにしている。

転がり運動を考慮したロボットハンドの研究は、Montana [10] と Cai ら [11] により 2 物体間の転がりの速度関係が明らかになって以来、数多く報告されている [12]~[15]. Sarkar らは、転がり拘束を考慮した指ロボットと把持物体を含むダイナミクスを導出している [15]. その論文では、制御入力が入出力を線形化し、ロボットの慣性モーメントやコリオリ力を直接補償しているが、実際の実験においては、モデル化誤差などの影響によ

原 2011 年 4 月 13 日

^{*1}理化学研究所理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター

^{*2}九州大学大学院工学研究院機械工学部門

^{*3}東京理科大学工学部機械工学科

^{*1}RIKEN-TRI Collaboration Center for Human-Interactive Robot Research, RIKEN

^{*2}Dept. of Mechanical Eng. Fac. of Eng., Kyushu Univ.

^{*3}Dept. of Mechanical Eng., Tokyo Univ. of Science

■ 本論文は学術性で評価されました。

り、これらの値を正確に補償することは難しい。転がり運動を伴う非ホロノミック系の運動計画の研究はLiらによって提案され[16]、その方法をロボットハンドに応用した研究がHanらによって報告されている[12]。Hanらのモデルは、ロボットの指先形状を平面とし、物体を球とした場合を取り扱っているが、我々の指先は平面というより球に近いので、この方法を手の構造を模倣したロボットハンドに直接適用するのには困難が生じる。そこで、より簡便な方法で安定把持を実現する制御方法の提案が期待されている。

近年になり、Arimotoらにより2本指ロボットによる把持の研究が行われ[17]、物体情報や外界センシングを必要とすることなく、物体を安定に把持することが可能な簡便な“blind grasping”法が提案された。筆者らは“blind grasping”法の適用でできるモデルの拡張を行ってきた[18]~[20]。

一方、物を掴むときに決定的な役割を果たす拇指対向性の実現には、拇指の鞍関節が最も重要な役割を果たしているとChalonらは指摘している[21]。このような指摘にもかかわらず、ロボットハンドのモデル化の研究では、人の手の拇指の構造に似せた鞍関節を積極的に取り入れる試みは注目を集めてこなかった。

本論文では、器用なロボットハンドの実現のため、拇指の鞍関節の2軸の回りに関節駆動の順序がないモデルを用いて、人の把持モデルにより近いモデルを提案し、このモデルに対しても安定把持を実現する“blind grasping”法が有効であることを示す。この鞍関節構造を用いる理由として、我々の親指にある鞍関節は2軸の回りに関節駆動の順序に関係なく作動していると考えるのが自然であること（Fig. 2）[22]、親指の鞍関節の手術では鞍関節の代わりに人工関節として球関節が用いられることがあること[21]が挙げられる。また、把持物体と指先との間に生じるスピニングによる運動を従来の慣性座標の x 軸回りに生じるとしたモデル[19]から、より物理現象に忠実な指と物体との接触点の法線方向の軸回りに生じるとするモデルに拡張する。関節の駆動に順序関係のない鞍関節を持つロボット指と、順序関係のあるモデルとを数値シミュレーションにより比較を行うことで、ダイナミクスの構造の違いから拇指ロボットの指先軌道が異なることを明らかにする。この軌道の違いは、拇指の鞍関節のモデルとして鞍関節が本来有する駆動に順序関係のない特徴を考慮する必要があることを示している。より人の手の自由度に近づける目的と、Chalonらの拇指ロボットに持たせ

るべき機能に関する研究[21]から適切な物体把持を行うには拇指に最低でも3自由度必要だとの指摘から、人差し指に3自由度、拇指に3自由度を持つロボット指に数学モデルを拡張する。このより複雑なモデルに対しても“blind grasping”法が有効であることを示すために、閉ループダイナミクスを導出し、その閉ループダイナミクスの任意解が力/トルク平衡状態を表す平衡状態に収束することを数値シミュレーションにより明らかにする。

2. 指と物体の動力学

Fig. 3 に示される、左指が1自由度、右指が2自由度からなる2本指ロボットを用いて平行な側面を持つ物体把持を表すダイナミクスを導出する。この場合、指と物体とからなるシステム全体の運動は三次元であり、重力の影響を受けるとする。左の指ロボット ($i = 1$) は、慣性座標 $O-xyz$ の z 軸回りに回転する一つの回転アクチュエータにより平面運動する。このアクチュエータの回転角度を q_{11} とする。中心 O' にある右指ロボット ($i = 2$) は、Fig. 4 に示す右指のリンク座標系

Fig. 3 A pair of the robot fingers with soft finger ends pinch an object with flat surfaces

Fig. 2 A detailed saddle joint model of a thumb

Fig. 4 Zoom of the right robot finger with the saddle joint

$O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ を L だけ O' 点に平行移動した座標系 $O'-X'_{21}Y'_{21}Z'_{21}$ の X'_{21} 軸回りに回転するアクチュエータと Z'_{21} 軸回り回転するアクチュエータの二つによってトルクを発揮できる鞍関節を有していると仮定する。 Y'_{21} 軸回りには回転しないと仮定する。ここで、人の拇指にある鞍関節の詳細なモデルを Fig. 2 [22] に示す。筆者らが以前提案したモデル [19] では、二つの関節駆動の間に順序関係がある近似的な鞍関節モデルを提案していた。しなしながら、Fig. 2 に示される鞍関節モデル [22] は、二つの回転駆動の順序がない。そこで、筆者らの以前提案したモデルに代わり、二つの回転駆動の間に順序関係がない新しい鞍関節モデルを提案する。また、その以前のモデル [19] では、対向軸回りのスピニング運動は生じるが、 x 軸回りの物体の回転運動に粘性が生じるモデルを取り扱っていた。この粘性モデルはスピニング運動を止めるのに効果的だが、実際の物理モデルとしては粗かった。そこで、物体と指先との左右それぞれの接触点において、物体の姿勢ベクトルを表す $\mathbf{r}_X$ を軸とした回転方向に生じる (Fig. 5)、より物理現象に忠実な粘性モデルを導入する。Fig. 5 に示されるように把持される物体に固定された直交座標系 $O_{c.m.}-XYZ$ を導入し、この物体座標系の X, Y, Z 軸方向に対応する、慣性座標系から見た互いに独立な三つの直交単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_X = (r_{Xx}, r_{Xy}, r_{Xz})^T$, $\mathbf{r}_Y = (r_{Yx}, r_{Yy}, r_{Yz})^T$, $\mathbf{r}_Z = (r_{Zx}, r_{Zy}, r_{Zz})^T$ と定義する。慣性座標系 $O-xyz$ から見た、把持される物体の重心位置 $O_{c.m.}$ を $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ とする。物体座標に固定された三つの互いに直交するベクトルから構成される物体の 3×3 の回転行列は

$$R(t) = (\mathbf{r}_X, \mathbf{r}_Y, \mathbf{r}_Z) \in SO(3) \quad (1)$$

と表される。よく知られているように、 $R(t)$ は物体の回転角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_X$ に従属して回転する以下の 1 階微分方程式を満足する。

$$\frac{d}{dt}R(t) = R(t)\Omega(t) \quad (2)$$

ここで、

Fig. 5 $\mathbf{r}_X, \mathbf{r}_Y$, and $\mathbf{r}_Z$ vectors represent rotational movement of the object. Viscosity works around the $\mathbf{r}_X$ vector at the contact point between the finger tip and object surface

$$\Omega(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

とする。 ω_X は物体座標 $O_{c.m.}-XYZ$ の X 軸回りに、 ω_Y は Y 軸回りに、 ω_Z は Z 軸回りに回転する物体の瞬間的な回転を表す角速度を表す。

同様に、提案する鞍関節モデルに上述した方法を適用する。Fig. 4 に示すように、ロボットのリンク座標 $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ から見た右指ロボットの回転ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_{21} = (\dot{q}_{21X}, 0, \dot{q}_{21Z})^T$ とする。このロボットハンド座標系の X_{21}, Y_{21}, Z_{21} 軸方向に対応する慣性座標系から見た互いに独立な三つの直交単位ベクトルを Fig. 4 に示されるようにそれぞれ $\mathbf{r}_{X21} = (r_{Xx21}, r_{Xy21}, r_{Xz21})^T$, $\mathbf{r}_{Y21} = (r_{Yx21}, r_{Yy21}, r_{Yz21})^T$, $\mathbf{r}_{Z21} = (r_{Zx21}, r_{Zy21}, r_{Zz21})^T$ とする。右指ロボットの質量中心位置 $O_{c.m.21}$ は、慣性座標系 $O-xyz$ から見ると $\mathbf{x}_{21} = s_{21}\mathbf{r}_{Y21} + (L, 0, 0)^T$ と表される。ここで、 s_{21} はリンク 21 の根本 O' からリンク 21 の重心位置 $O_{c.m.21}$ までの長さとする。把持される物体の場合と同様に、 3×3 の回転行列は

$$R_{21}(t) = (\mathbf{r}_{X21}, \mathbf{r}_{Y21}, \mathbf{r}_{Z21}) \in SO(3) \quad (4)$$

と表され、同様に以下の微分方程式を満足する。

$$\frac{d}{dt}R_{21}(t) = R_{21}(t)\Omega_{21}(t) \quad (5)$$

ここで

$$\Omega_{21}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{q}_{21Z} & 0 \\ \dot{q}_{21Z} & 0 & -\dot{q}_{21X} \\ 0 & \dot{q}_{21X} & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

とする。

半球形状を有する指先中心位置を $\mathbf{x}_{0i} = (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})^T$ と定義する。指先と把持される物体との接触点 O_i との関係式は、Fig. 3 に示される幾何学関係から

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{0i} - (-1)^i(r_i - \Delta x_i)\mathbf{r}_X \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{0i} - (-1)^i(r_i - \Delta x_i + l_i)\mathbf{r}_X - Y_i\mathbf{r}_Y - Z_i\mathbf{r}_Z \quad (8)$$

と表すことができる。左右それぞれの接触点 O_i は、物体座標系 $O_{c.m.}-XYZ$ から見た座標 $((-1)^i l_i, Y_i, Z_i)$ によって表すことができる。式 (8) と $\mathbf{r}_Y$ とで内積を取ると

$$Y_i = (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x})^T \mathbf{r}_Y, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

となり、同様に式 (8) と $\mathbf{r}_Z$ とで内積を取ると

$$Z_i = (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x})^T \mathbf{r}_Z, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

となる。指ロボットの指先と接触している物体の表面に生じる転がり拘束は、指先の半球面が物体表面を転がる速度と、これに対応する接平面上（これは把持される物体の平行な側面の一つと一致する）での速度が等しいことから以下のように導出することができる [23]。

$$\begin{cases} (r_1 - \Delta x_1) \{\omega_Z - r_{Zz} \dot{q}_{11}\} = \dot{Y}_1 \\ (r_1 - \Delta x_1) \{-\omega_Y + r_{Yz} \dot{q}_{11}\} = \dot{Z}_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} (r_2 - \Delta x_2) \{-\omega_Z + \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Z \dot{q}_{21z} + \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Z \dot{q}_{21x}\} = \dot{Y}_2 \\ (r_2 - \Delta x_2) \{\omega_Y - \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Y \dot{q}_{21z} - \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Y \dot{q}_{21x}\} = \dot{Z}_2 \end{cases} \quad (12)$$

式 (11), (12) により示された転がり拘束は, 非ホロノミックであるが速度変数に対して線形で同次である. したがって, 式 (11), (12) は Pfaffian 拘束として取り扱うことができるので, 式 (11) に対してラグランジュ乗数 $\{\lambda_{Y1}, \lambda_{Z1}\}$, 式 (12) に対してラグランジュ乗数 $\{\lambda_{Y2}, \lambda_{Z2}\}$ を添えて以下のように表すことができる.

$$\begin{cases} \lambda_{Yi} \left\{ \mathbf{Y}_{\mathbf{q}_i}^T \mathbf{q}_i + \mathbf{Y}_{\mathbf{x}_i}^T \dot{\mathbf{x}} + Y_{\varphi i} \dot{\varphi} + Y_{\psi i} \dot{\psi} + Y_{\theta i} \dot{\theta} \right\} = 0 \\ \lambda_{Zi} \left\{ \mathbf{Z}_{\mathbf{q}_i}^T \mathbf{q}_i + \mathbf{Z}_{\mathbf{x}_i}^T \dot{\mathbf{x}} + Z_{\varphi i} \dot{\varphi} + Z_{\psi i} \dot{\psi} + Z_{\theta i} \dot{\theta} \right\} = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

ここで

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{\mathbf{q}_i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \mathbf{q}_i} - (r_i - \Delta x_i) \{ r_{Zz} \mathbf{e}_{iz} + \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Z \mathbf{e}_{iX21} \\ \quad + \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Z \mathbf{e}_{iZ21} \} \\ \mathbf{Y}_{\mathbf{x}_i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \mathbf{x}}, Y_{\varphi i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \varphi}, Y_{\psi i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \psi} \\ Y_{\theta i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \theta} + (-1)^i (r_i - \Delta x_i), i = 1, 2 \end{cases} \quad (14)$$

とし

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{\mathbf{q}_i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \mathbf{q}_i} - (r_i - \Delta x_i) \{ r_{Yz} \mathbf{e}_{iz} + \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Y \mathbf{e}_{iX21} \\ \quad + \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Y \mathbf{e}_{iZ21} \} \\ \mathbf{Z}_{\mathbf{x}_i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \mathbf{x}}, Z_{\varphi i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \varphi}, \\ \mathbf{Z}_{\psi i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \psi} - (-1)^i (r_i - \Delta x_i), Z_{\theta i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \theta}, i = 1, 2 \end{cases} \quad (15)$$

とする. また, $\mathbf{q}_1 = q_{11}$, $\mathbf{q}_2 = (q_{21X}, q_{21Z})^T$, $\mathbf{e}_{1z} = 1$, $\mathbf{e}_{2z} = 0$, $\mathbf{e}_{1X21} = 0$, $\mathbf{e}_{2X21} = (1, 0)^T$, $\mathbf{e}_{1Z21} = 0$, $\mathbf{e}_{2Z21} = (0, 1)^T$ とする. 表記を見やすくするために, 式 (13) を

$$\begin{cases} \lambda_{Yi} \mathbf{Y}_i^T (d\mathbf{X}/dt) = 0 \\ \lambda_{Zi} \mathbf{Z}_i^T (d\mathbf{X}/dt) = 0 \end{cases}, \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

と表す. ここで, $\mathbf{X} = (\mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \mathbf{x}^T, \varphi, \psi, \theta)^T$,

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_1 = (\mathbf{Y}_{\mathbf{q}_1}^T, 0_2, \mathbf{Y}_{\mathbf{x}_1}^T, Y_{\varphi 1}, Y_{\psi 1}, Y_{\theta 1})^T \\ \mathbf{Y}_2 = (0, \mathbf{Y}_{\mathbf{q}_2}^T, \mathbf{Y}_{\mathbf{x}_2}^T, Y_{\varphi 2}, Y_{\psi 2}, Y_{\theta 2})^T \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_1 = (\mathbf{Z}_{\mathbf{q}_1}^T, 0_2, \mathbf{Z}_{\mathbf{x}_1}^T, Z_{\varphi 1}, Z_{\psi 1}, Z_{\theta 1})^T \\ \mathbf{Z}_2 = (0, \mathbf{Z}_{\mathbf{q}_2}^T, \mathbf{Z}_{\mathbf{x}_2}^T, Z_{\varphi 2}, Z_{\psi 2}, Z_{\theta 2})^T \end{cases} \quad (18)$$

とする. ここで, $\dot{\varphi} = \omega_X$, $\dot{\psi} = \omega_Y$, $\dot{\theta} = \omega_Z$ とした.

一方, 指先の凹みにより生じる復元力は,

$$f_i(\Delta x_i, \Delta \dot{x}_i) = \bar{f}_i(\Delta x_i) + \xi_i(\Delta x_i) \Delta \dot{x}_i \quad (19)$$

と表される [23]. ここで

$$\bar{f}_i(\Delta x_i) = k_i \Delta x_i^2, \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

とし, 指先の柔軟材料の単位面積当たりの弾性係数を $k_i >$

0 [N/m²], 指先の粘性係数 $\xi_i(\Delta x_i)$ を Δx_i に関する正のスカラ関数とする. 本論文では $\xi_i(\Delta x_i) = c_{\Delta i} \pi (r_i^2 - (r_i - \Delta x_i)^2)$ とし, Δx_i 凹んだ際の指先の接触面積に比例する量とした. $c_{\Delta i} (i = 1, 2)$ は正の定数とする. 対向軸回りのスピニング運動によって $\mathbf{r}_X$ 軸回りの左右の接触点で生じる粘性は, 以下に示すレイリーの散逸関数として表される.

$$R_{t1} = \frac{c_{t1}}{2} \| (R\omega_X - \dot{q}_{11} \mathbf{e}_z)^T \mathbf{r}_X \|^2 \quad (21)$$

$$R_{t2} = \frac{c_{t2}}{2} \| (R\omega_X - \dot{q}_{21X} \mathbf{r}_{X21} - \dot{q}_{21Z} \mathbf{r}_{Z21})^T (-\mathbf{r}_X) \|^2 \quad (22)$$

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} \quad (23)$$

ここで, R_{t1} は左の, R_{t2} は右の接触点におけるレイリーの散逸関数を表し, $c_{ti} (i = 1, 2) > 0$, $\mathbf{e}_z = (0, 0, 1)^T$ とする. また, 物体座標系 $O_{c.m.}-XYZ$ から見た物体の回転速度ベクトルを $\omega_X = (\omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T$ とする. 散逸関数 R_t は, 指口ボットの接触点における回転速度ベクトルと把持される物体の回転速度ベクトルを $\mathbf{r}_X$ ベクトルに射影した成分 (右の接触点では $-\mathbf{r}_X$ ベクトルに射影する) の差により粘性が生じ, それぞれの $\mathbf{r}_X$ ベクトルへの射影した成分がゼロの場合には粘性を生じないことを考慮することにより導いた. 指口ボットと物体からなるシステム全体のラグランジアン L は, スカラー量 $L = K - P$ によって表される. ここで, K はシステム全体の運動エネルギーを表し

$$\begin{aligned} K = & \frac{1}{2} H_1 \dot{q}_{11}^2 + \frac{1}{2} \omega_{21}^T H_2 \omega_{21} + \frac{1}{2} m_{21} \dot{\mathbf{x}}_{21}^T \dot{\mathbf{x}}_{21} \\ & + \frac{1}{2} M (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} \omega_X^T H \omega_X \end{aligned} \quad (24)$$

となる. P はシステム全体のポテンシャルエネルギーを表し

$$P = P_1 + P_2 - Mgy + \sum_{i=1,2} P_{\Delta xi} \quad (25)$$

となる. ここで, H_1 は左側の指の慣性行列, m_{21} は右側の指の質量, M は把持物体の質量, P_i は i 番目の指の重力に関するポテンシャルエネルギー, g は重力加速度, $P_{\Delta xi} (= \int_0^{\Delta xi} \bar{f}_i(\xi) d\xi)$ は i 番目の指の復元力によるポテンシャルエネルギー, H は把持される物体に固定された座標 $O_{c.m.}-XYZ$ を基準にして求められた一定値の物体の慣性行列を表し

$$H = \begin{pmatrix} I_{XX} & I_{XY} & I_{XZ} \\ I_{YX} & I_{YY} & I_{YZ} \\ I_{ZX} & I_{ZY} & I_{ZZ} \end{pmatrix} \quad (26)$$

とする. 同様に, H_2 はリンクに固定された座標 $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ を基準にして求められた一定値の右指口ボットの慣性行列を表し,

$$H_2 = \begin{pmatrix} I_{X X 21} & I_{X Y 21} & I_{X Z 21} \\ I_{Y X 21} & I_{Y Y 21} & I_{Y Z 21} \\ I_{Z X 21} & I_{Z Y 21} & I_{Z Z 21} \end{pmatrix} \quad (27)$$

とする. したがって, 変分原理を適用すると

Table 1 Partial derivatives of constraints in (φ, ψ, θ)

$\frac{\partial P_{\Delta x1}}{\partial \varphi} = \frac{\partial P_{\Delta x2}}{\partial \varphi} = 0$
$\frac{\partial Y_i}{\partial \varphi} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Y}{\partial \varphi} = (x_{0i} - x)^T r_Z = Z_i$
$\frac{\partial Y_i}{\partial \psi} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Y}{\partial \psi} = 0$
$\frac{\partial Y_i}{\partial \theta} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Y}{\partial \theta} = -(x_{0i} - x)^T r_X = -(-1)^i (r_i - \Delta x_i + l_i)$
$\frac{\partial Z_i}{\partial \varphi} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Z}{\partial \varphi} = (x_{0i} - x)^T r_Y = -Y_i$
$\frac{\partial Z_i}{\partial \psi} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Z}{\partial \psi} = -(x_{0i} - x)^T r_X = -(-1)^i (r_i - \Delta x_i + l_i)$
$\frac{\partial Z_i}{\partial \theta} = (x_{0i} - x)^T \frac{\partial r_Z}{\partial \theta} = 0$
$Y_{\varphi i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \varphi} = Z_i, Z_{\varphi i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \varphi} = -Y_i$
$Y_{\psi i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \psi} = 0, Z_{\psi i} = \frac{\partial Z_i}{\partial \psi} = -(-1)^i (r_i - \Delta x_i) = (-1)^i l_i$
$Y_{\theta i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \theta} + (-1)^i (r_i - \Delta x_i) = -(-1)^i l_i, Z_{\theta i} = 0$

$$-\int_{t_0}^{t_1} \delta L dt = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1,2} \left\{ \mathbf{u}_i^T \delta \mathbf{q}_i - \left(\lambda_{Yi} \mathbf{Y}_i^T + \lambda_{Zi} \mathbf{Z}_i^T \right) \delta \mathbf{X} \right\} dt$$

$$- \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \frac{\partial R_t}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \delta \mathbf{X} + \sum_{i=1,2} \xi_i (\Delta x_i) \Delta \dot{x}_i \frac{\partial \Delta x_i}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \delta \mathbf{X} \right\} dt \quad (28)$$

となり、以下の指と物体からなるシステム全体のダイナミクスを得る。

$$H_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \frac{\partial R_t}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} - (-1)^i f_i J_{0i}^T \mathbf{r}_X$$

$$- \lambda_{Yi} \mathbf{Y} \mathbf{q}_i - \lambda_{Zi} \mathbf{Z} \mathbf{q}_i + \mathbf{g}_i = \mathbf{u}_i, \quad i = 1, 2 \quad (29)$$

$$M \ddot{\mathbf{x}} - (f_1 - f_2) \mathbf{r}_X + (\lambda_{Y1} + \lambda_{Y2}) \mathbf{r}_Y$$

$$+ (\lambda_{Z1} + \lambda_{Z2}) \mathbf{r}_Z - Mg(0, 1, 0)^T = 0 \quad (30)$$

$$H \dot{\boldsymbol{\omega}}_X + \boldsymbol{\omega}_X \times H \boldsymbol{\omega}_X + \frac{\partial R_t}{\partial \boldsymbol{\omega}_X} + f_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -Z_1 \\ Y_1 \end{pmatrix}$$

$$+ f_2 \begin{pmatrix} 0 \\ Z_2 \\ -Y_2 \end{pmatrix} - \lambda_{Y1} \begin{pmatrix} Z_1 \\ 0 \\ l_1 \end{pmatrix} - \lambda_{Y2} \begin{pmatrix} Z_2 \\ 0 \\ -l_2 \end{pmatrix}$$

$$- \lambda_{Z1} \begin{pmatrix} -Y_1 \\ -l_1 \\ 0 \end{pmatrix} - \lambda_{Z2} \begin{pmatrix} -Y_2 \\ l_2 \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \quad (31)$$

ここで Y_i, Z_i をそれぞれ φ, ψ, θ により偏微分した計算結果を **Table 1** に示す（導出法は文献[23]を参考）。さらに $P_{\Delta x i} (i = 1, 2)$ と式 (9), (10) から

$$\begin{cases} \frac{\partial (P_{\Delta x1} + P_{\Delta x2})}{\partial \mathbf{q}_i} = -(-1)^i f_i J_i^T \mathbf{r}_X, \quad i = 1, 2 \\ \frac{\partial (P_{\Delta x1} + P_{\Delta x2})}{\partial \mathbf{x}} = -(f_1 - f_2) \mathbf{r}_X \\ \frac{\partial (P_{\Delta x1} + P_{\Delta x2})}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial (P_{\Delta x1} + P_{\Delta x2})}{\partial \psi} = -f_1 Z_1 + f_2 Z_2 \\ \frac{\partial (P_{\Delta x1} + P_{\Delta x2})}{\partial \theta} = f_1 Y_1 - f_2 Y_2 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Y} \mathbf{x}_i = \partial Y_i / \partial \mathbf{x} = -\mathbf{r}_Y \\ \mathbf{Z} \mathbf{x}_i = \partial Z_i / \partial \mathbf{x} = -\mathbf{r}_Z \end{cases} \quad (33)$$

となる。式 (29) と $\dot{\mathbf{q}}_i$, 式 (30) と $\dot{\mathbf{x}}$, 式 (31) と $\boldsymbol{\omega}$ とで内

積をそれぞれに対して取ると

$$\sum_{i=1,2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{u}_i = \frac{d}{dt} (K + P) + 2R_t + \sum_{i=1,2} \xi_i (\Delta x_i) \Delta \dot{x}_i^2 \quad (34)$$

となる関係式を得る。

最後に、式 (30), (31) に表れる $f_1, f_2, \lambda_{Y1}, \lambda_{Y2}, \lambda_{Z1}, \lambda_{Z2}$ で表されるラグランジュ乗数に添えられた部分により構成される六つのレンチベクトルと式 (30) の最後の項により構成される重力の影響によるレンチベクトルが三次元の物体に働く。

3. 制 御 入 力

把持する物体の運動学や外界センシングをまったく用いることなく安定把持を実現する“blind grasping”と筆者らが呼ぶ制御入力 [18] [19] [23] を以下のように用いる。

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{g}_i - C_i \dot{\mathbf{q}}_i + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} J_{0i}^T (\mathbf{x}_{01} - \mathbf{x}_{02}) - \frac{\hat{M}g}{2} \frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i}$$

$$- r_1 \hat{N}_1 \mathbf{e}_{iz} - r_2 \hat{N}_{2X} \mathbf{e}_{iX21} - r_2 \hat{N}_{2Z} \mathbf{e}_{iZ21}, \quad i = 1, 2 \quad (35)$$

ここで、

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

$$= \hat{M}(0) + \frac{g \gamma_M^{-1}}{2} (y_{01}(t) + y_{02}(t) - y_{01}(0) - y_{02}(0)) \quad (36)$$

$$\hat{N}_1 = \gamma_{N1}^{-1} \int_0^t (r_1 \dot{q}_{11}) d\tau \quad (37)$$

$$\hat{N}_{2X} = \gamma_{N2X}^{-1} \int_0^t (r_2 \dot{q}_{21X}) d\tau \quad (38)$$

$$\hat{N}_{2Z} = \gamma_{N2Z}^{-1} \int_0^t (r_2 \dot{q}_{21Z}) d\tau \quad (39)$$

とし、 $\gamma_M, \gamma_{N1}, \gamma_{N2X}, \gamma_{N2Z}$ をそれぞれ正のある定数とする。式 (35) の右辺第 3 項は O_{01} と O_{02} を結ぶ対向力に基づく制御信号を示す。第 1 項は、指の重力項を補償する項を示す。第 2 項は粘性項を示す。第 4 項は、把持する物体質量を補償する信号である。第 5 項は、指ロボットの初期角度から指の関節が過度に動かなくするために導入された。

4. 数値シミュレーションによる鞍関節モデルの比較

第 2 章で提案した順序関係を持たない鞍関節を有する拇指ロボットの評価を行うために、順序関係を有する鞍関節モデル (**Fig. 6**) と本論文で提案するモデルとの比較を数値シミュレーションにより行う。数値シミュレーションには、**Table 2** で与えられる指ロボットと物体の物理パラメータと **Table 3** で与えられる初期値と制御ゲインを用いた。ダンピングゲイン行列 C_i を $C_1 = c_1, C_2 = \text{diag}(c_{21X}, c_{21Z})$ とした。一方、**Fig. 6** の鞍関節の構造は慣性座標 $O-xyz$ の x 軸回りに角度 q_{21x} 回転し、その後、 z 軸回りに角度 q_{21z} 回転する順序関係があるモデルとした。その際、 x 軸回りの関節と z 軸回りの関節の関節間の距離をゼロとした。**Fig. 6** に示すモデルと本論文で提案す

Fig. 6 Motion of pinching a 3-D object by two robot fingers with ordered joint actuations

Table 2 Physical parameters of the fingers and object

$l_{11} = l_{21}$	length	0.040 [m]
$m_{11} = m_{21}$	weight	0.043 [kg]
I_{YY11}	inertia moment	5.375×10^{-7} [kgm ²]
$I_{XX11} = I_{ZZ11}$	inertia moment	6.002×10^{-6} [kgm ²]
I_{YY21}	inertia moment	5.375×10^{-7} [kgm ²]
$I_{XX21} = I_{ZZ21}$	inertia moment	6.002×10^{-6} [kgm ²]
$I_{XX} = I_{ZZ}$	inertia moment(object)	1.133×10^{-5} [kgm ²]
I_{YY}	inertia moment(object)	6.000×10^{-6} [kgm ²]
r_0	link radius	0.005 [m]
$r_i (i = 1, 2)$	radius	0.010 [m]
L	base length	0.063 [m]
M	object weight	0.040 [kg]
$l_i (i = 1, 2)$	object width	0.015 [m]
h	object height	0.050 [m]
$k_i (i = 1, 2)$	stiffness	3.000×10^5 [N/m ²]
$c_{\Delta i} (i = 1, 2)$	viscosity	1000.0 [Ns/m ²]
$c_{t1} = c_{t2}$	viscosity	0.001 [Nms]

Table 3 Parameters of control signals and initial values

f_d	internal force	1.000 [N]
c_1	damping coefficient	0.001 [Nms]
$c_{21X} = c_{21Z}$	damping coefficient	0.001 [Nms]
γ_M	regressor gain	0.050 [m ² /kgs ²]
γ_{N1}	regressor gain	5.000×10^{-4} [s ² /kg]
$\gamma_{N2X} = \gamma_{N2Z}$	regressor gain	5.000×10^{-4} [s ² /kg]
$\hat{M}(0)$	initial estimate value	0.020 [kg]
$\hat{N}_1(0)$	initial estimate value	0.000 [N]
$\hat{N}_{2X}(0) = \hat{N}_{2Z}$	initial estimate value	0.000 [N]

るモデルに対して同じ初期値を用いて数値シミュレーションを行った。どちらの場合も制御入力(式(35))を用いて安定把持を実現することを確認した。その際の鞍関節を持つロボットと物体とが接触する点での接平面上(把持される直方体が拇指ロボットと接触する面)での軌跡をFig. 7に示す。また、Fig. 8, 9に Y_2 と Z_2 の値の変化を示す。Fig. 10に、鞍関節を持つロボットと物体との接触する点での接平面上の移動距離 s を

$$s = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{dY_2}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dZ_2}{dt}\right)^2} dt \quad (40)$$

により計算した結果を示す。Fig. 8から、順序関係のあるモデルと提案する順序関係のないモデルでは Y_2 方向にはほとんど違いは見られなかった。一方Fig. 9から、 Z_2 方向は、順序関

Fig. 7 Trajectories of a contact point on a tangent plane

Fig. 8 Trajectories of Y_2

Fig. 9 Trajectories of Z_2

Fig. 10 Trajectories of s

係のないモデルのほうがあるモデルよりも振動していることが確認できる。Fig. 7より順序関係のないモデルのほうが順序関係があるモデルよりも、接平面上を渦を巻くように平衡点に収束していることが確認できる。その結果、移動距離も順序関係のないモデルのほうが長くなっていることがFig. 10より確認できる。これらのことから、順序関係のあるモデルと、ないモデルとはダイナミクスの構造の違いにより、動きが異なることが明らかになった。このダイナミクスの違いは、順序関係のあるモデルでは鞍関節の関節角度を有限回転として取り扱っているのに対し、順序関係のないモデルでは無限小回転として取り扱っていることから起因する。この軌道の違いは、拇指の鞍関節モデルとして、鞍関節が本来持つ順序関係のない関節構造を考慮する必要があることを示している。

5. 鞍関節を有する親指ロボットの幾何学

Fig. 11に示す順序関係のない鞍関節を持つ3自由度からなる拇指ロボット(Fig. 11の右指ロボット)の幾何学関係を明らかにする。Fig. 11に示す拇指を模した2リンクからなるロボットの幾何学関係は、根元関節に順序関係がないため、ロボットの運動学の導出法としてよく知られたDH記法を用いることができない。Fig. 12に示す拇指ロボットの根元関節 J_{21} は、2自由度を持つFig. 4で提案したモデルと同じとする。したがって、リンク21の回転速度は第2章で定義した ω_{21} と同じ記号を使って表すことにする。Fig. 12に示すようにリンク21、リンク22に固定された右手直交座標系 $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ 、 $O_{c.m.22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$ をそれぞれに導入する。座標系 $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ の X_{21} 、 Y_{21} 、 Z_{21} 軸方向に対応する慣性座標系から見た三つの独立な単位ベクトルを第2章と同様に r_{X21} 、 r_{Y21} 、 r_{Z21} と定義し、同様な考え方により、リンク22の座標系 $O_{c.m.22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$ に対して r_{X22} 、 r_{Y22} 、 r_{Z22} を定義する。リンク

Fig. 11 Two robot fingers with soft finger ends pinch an object with flat surfaces

Fig. 12 Kinematics relation of a thumb robot with orderless joint actuations

22 の関節 J_{22} は, Fig. 11 よりリンク 21 の先端から Z_{21} 軸回りに角度 q_{22} 回転することから $\mathbf{r}_{Z21} = \mathbf{r}_{Z22}$ となるので, $\mathbf{r}_{X22}$, $\mathbf{r}_{Y22}$, $\mathbf{r}_{Z22}$ は q_{22} , $\mathbf{r}_{X21}$, $\mathbf{r}_{Y21}$, $\mathbf{r}_{Z21}$ を使って

$$\mathbf{r}_{X22} = \cos q_{22} \mathbf{r}_{X21} + \sin q_{22} \mathbf{r}_{Y21} \quad (41)$$

$$\mathbf{r}_{Y22} = -\sin q_{22} \mathbf{r}_{X21} + \cos q_{22} \mathbf{r}_{Y21} \quad (42)$$

$$\mathbf{r}_{Z22} = \mathbf{r}_{Z21} \quad (43)$$

と表すことができる。また, リンク 22 の物体座標系 $O_{c.m.22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$ から見たリンク 22 の角速度 $\boldsymbol{\omega}_{22}$ は, $\mathbf{r}_{Z21}$ 軸回りに q_{22} が回転することと, リンク 21 の速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{21}$ を $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$ 座標系から $O_{c.m.22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$ 座標系に変換して加えることにより

$$\boldsymbol{\omega}_{22} = (\cos q_{22} \dot{q}_{21X}, -\sin q_{22} \dot{q}_{21X}, \dot{q}_{21Z} + \dot{q}_{22})^T \quad (44)$$

と表すことができる。したがって, リンク 22 の重心位置 $O_{c.m.22}$ は $\mathbf{x}_{22} = l_{21} \mathbf{r}_{Y21} + s_{22} \mathbf{r}_{Y22}$ と表すことができる。ここで l_{21} はリンク 21 のリンクの長さ, s_{22} は関節 J_{22} からリンク 22 の重心位置までの長さを表す (Fig. 12)。

6. 多自由度を持つ指と物体の動力学

Fig. 11 に示される, 人差し指を模した左指が 3 自由度, 拇指を模した右指が 3 自由度からなる指先が柔軟な 2 本指ロボットが直方体を把持するダイナミクスを導出する。左指ロボット ($i = 1$) のすべての関節は, 慣性座標系 $O-xyz$ の z 軸回りに回転する二次元運動を行う (Fig. 11)。中心 O' を根元につく拇指ロボット ($i = 2$) は, 提案する順序関係のない鞍関節モデルを持つ。また, Fig. 11 に示される座標系はすべて右手系を採用する。指ロボットの指先と接触している把持される物体の表面に生じる転がり拘束, 指ロボットの柔軟な指先モデル, 対向軸回りのスピニング運動により生じる粘性を表す散逸関数などを第 2 章と同様に用いる。その際の導出方は, 第 2 章で提案された方法により同様に導出することができるのでここでは割愛する。指ロボットと物体からなるシステム全体のラグランジアン L は, スカラー量 $L = K - P$ によって表される。ここで, K はシステム全体の運動エネルギーを表し

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_1^T H_1 \dot{\mathbf{q}}_1 + \frac{1}{2} m_{21} \dot{\mathbf{x}}_{21}^T \dot{\mathbf{x}}_{21} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{21}^T H_{21} \boldsymbol{\omega}_{21} + \frac{1}{2} m_{22} \dot{\mathbf{x}}_{22}^T \dot{\mathbf{x}}_{22} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{22}^T H_{22} \boldsymbol{\omega}_{22} + \frac{1}{2} M (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_X^T H \boldsymbol{\omega}_X \quad (45)$$

となる。ここで $\dot{\mathbf{q}}_1 = (\dot{q}_{11}, \dot{q}_{12}, \dot{q}_{13})^T$ とし, H_{21} , H_{22} はそれぞれリンク座標系 $O_{c.m.21}-X_{21}Y_{21}Z_{21}$, $O_{c.m.22}-X_{22}Y_{22}Z_{22}$ から見た右指の 21, 22 リンクの慣性行列を表している。特に H_{21} は式 (27) の H_2 と同じ形である。 H は物体座標系 $O_{c.m.}-XYZ$ 座標系から見た把持物体の慣性行列を表しており, 式 (26) で定義された H と同じ形である。 P はシステム全体のポテンシャルエネルギーを表し, P_1 と P_2 を Fig. 11 の場合の指ロボットの重力によるポテンシャルエネルギーに置き換えた以外は式 (25) と同じになる。式 (28) と同様に変分原理を適用することにより, 指と物体からなる以下のシステム全体を表すダイナミクスを得る。

$$H_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}_i + S_i \right\} \dot{\mathbf{q}}_i + \frac{\partial R_t}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} - (-1)^i f_i J_{0i}^T \mathbf{r}_X - \lambda_{Yi} \mathbf{Y} \mathbf{q}_i - \lambda_{Zi} \mathbf{Z} \mathbf{q}_i + \mathbf{g}_i = \mathbf{u}_i, \quad i = 1, 2 \quad (46)$$

$$M \ddot{\mathbf{x}} - (f_1 - f_2) \mathbf{r}_X + (\lambda_{Y1} + \lambda_{Y2}) \mathbf{r}_Y + (\lambda_{Z1} + \lambda_{Z2}) \mathbf{r}_Z - Mg(0, 1, 0)^T = 0 \quad (47)$$

$$H \dot{\boldsymbol{\omega}}_X + \boldsymbol{\omega}_X \times H \boldsymbol{\omega}_X + \frac{\partial R_t}{\partial \boldsymbol{\omega}_X} + f_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -Z_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} + f_2 \begin{pmatrix} 0 \\ Z_2 \\ -Y_2 \end{pmatrix} - \lambda_{Y1} \begin{pmatrix} Z_1 \\ 0 \\ l_1 \end{pmatrix} - \lambda_{Y2} \begin{pmatrix} Z_2 \\ 0 \\ -l_2 \end{pmatrix} - \lambda_{Z1} \begin{pmatrix} -Y_1 \\ -l_1 \\ 0 \end{pmatrix} - \lambda_{Z2} \begin{pmatrix} -Y_2 \\ l_2 \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \quad (48)$$

ここで $\mathbf{g}_i$ は指ロボットの重力項, J_{0i} は各指ロボットのヤコビ

行列を示し, $H_2 = \text{diag}(H_{21}, H_{22})$ とする. また, 転がり拘束から導出される $\mathbf{Y}_{qi}$, $\mathbf{Z}_{qi}$ は第 2 章を参考にすることにより導出可能である. ここで導出が複雑になるリンク 22 の回転に関する運動エネルギー

$$K_{22r} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{22}^T H_{22} \boldsymbol{\omega}_{22} \quad (49)$$

から運動方程式の導出法を付録 A に示す.

7. 閉ループダイナミクス

第 6 章で導出したダイナミクスに対して安定把持を実現する入力として第 3 章で提案した制御入力 (式 (35)) を用いる. 把持モデルのロボット指の自由度の変更に伴い式 (37), (39) は

$$\hat{N}_1 = \gamma_{N1}^{-1} \int_0^t (r_1 \dot{\mathbf{q}}_1^T \mathbf{e}_1) d\tau \quad (50)$$

$$\hat{N}_{2Z} = \gamma_{N2Z}^{-1} \int_0^t r_2 (\dot{q}_{21Z} + \dot{q}_{22}) d\tau \quad (51)$$

と変更する. ここで, $\mathbf{e}_1 = (1, 1, 1)^T$ とする. 次に

$$f_0 = f_d \left(1 + \frac{l_1 + l_2 - \Delta x_1 - \Delta x_2}{r_1 + r_2} \right) \quad (52)$$

と定義する. 制御入力 (式 (35)) を指-物体からなるシステム全体のダイナミクス (式 (46)~(48)) に代入すると

$$\begin{aligned} H_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}_i + S_i + C_i \right\} \dot{\mathbf{q}}_i + \frac{\partial R_t}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} - (-1)^i J_{0i}^T \Delta f_i \mathbf{r}_X \\ - \Delta \lambda_{Yi} \mathbf{Y}_{qi} - \Delta \lambda_{Zi} \mathbf{Z}_{qi} + \frac{\Delta M g}{2} \left(\frac{\partial y_{0i}}{\partial \mathbf{q}_i} \right) + r_1 \Delta N_1 \mathbf{e}_{iz} \\ + r_2 \Delta N_{2X} \mathbf{e}_{iX21} + r_2 \Delta N_{2Z} \mathbf{e}_{iZ21} = 0, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{\mathbf{x}} - (\Delta f_1 - \Delta f_2) \mathbf{r}_X + (\Delta \lambda_{Y1} + \Delta \lambda_{Y2}) \mathbf{r}_Y \\ + (\Delta \lambda_{Z1} + \Delta \lambda_{Z2}) \mathbf{r}_Z = 0 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} H \dot{\boldsymbol{\omega}}_X + \boldsymbol{\omega}_X \times H \boldsymbol{\omega}_X + \frac{\partial R_t}{\partial \boldsymbol{\omega}_X} + \Delta f_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -Z_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} \\ + \Delta f_2 \begin{pmatrix} 0 \\ Z_2 \\ -Y_2 \end{pmatrix} - \Delta \lambda_{Y1} \begin{pmatrix} Z_1 \\ 0 \\ l_1 \end{pmatrix} - \Delta \lambda_{Y2} \begin{pmatrix} Z_2 \\ 0 \\ -l_2 \end{pmatrix} \\ - \Delta \lambda_{Z1} \begin{pmatrix} -Y_1 \\ -l_1 \\ 0 \end{pmatrix} - \Delta \lambda_{Z2} \begin{pmatrix} -Y_2 \\ l_2 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} S_X \\ S_Y \\ S_Z \end{pmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (55)$$

となる閉ループダイナミクスが獲得できる. ここで

$$\Delta f_i = \bar{f}_i - f_0 - (-1)^i \frac{M g}{2} r_{Xy} \quad (56)$$

$$\Delta \lambda_{Yi} = \lambda_{Yi} + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) - \frac{M g}{2} r_{Yy} \quad (57)$$

$$\Delta \lambda_{Zi} = \lambda_{Zi} + (-1)^i \frac{f_d}{r_1 + r_2} (Z_1 - Z_2) - \frac{M g}{2} r_{Zy} \quad (58)$$

$$\begin{cases} \Delta M = \hat{M} - M, \quad \Delta N_1 = \hat{N}_1 - N_1 \\ \Delta N_{2X} = \hat{N}_{2X} - N_{2X}, \quad \Delta N_{2Z} = \hat{N}_{2Z} - N_{2Z} \end{cases} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} N_1 = \frac{f_d}{r_1 + r_2} \frac{(r_1 - \Delta x_1)}{r_1} \left\{ (Y_1 - Y_2) r_{Zz} \right. \\ \left. - (Z_1 - Z_2) r_{Yz} \right\} + \frac{(r_1 - \Delta x_1)}{r_1} \\ \times \frac{M g}{2} \left\{ r_{Yy} r_{Zz} - r_{Zy} r_{Yz} \right\} \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} N_{2X} = \frac{f_d}{r_1 + r_2} \frac{(r_2 - \Delta x_2)}{r_2} \left\{ (Y_1 - Y_2) \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Z \right. \\ \left. - (Z_1 - Z_2) \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Y \right\} - \frac{(r_2 - \Delta x_i)}{r_2} \\ \times \frac{M g}{2} \left\{ \mathbf{r}_{21}^T \mathbf{r}_Z r_{Yy} - \mathbf{r}_{X21}^T \mathbf{r}_Y r_{Zy} \right\} \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} N_{2Z} = \frac{f_d}{r_1 + r_2} \frac{(r_2 - \Delta x_2)}{r_2} \left\{ (Y_1 - Y_2) \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Z \right. \\ \left. - (Z_1 - Z_2) \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Y \right\} - \frac{(r_2 - \Delta x_i)}{r_2} \\ \times \frac{M g}{2} \left\{ \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Z r_{Yy} - \mathbf{r}_{Z21}^T \mathbf{r}_Y r_{Zy} \right\} \end{aligned} \quad (62)$$

$$S_X = \frac{M g}{2} \{ (Z_1 + Z_2) r_{Yy} - (Y_1 + Y_2) r_{Zy} \} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} S_Y = \frac{f_d}{r_1 + r_2} (r_1 - \Delta x_1 + r_2 - \Delta x_2) (Z_1 - Z_2) \\ - \frac{M g}{2} \{ r_{Xy} (Z_1 + Z_2) + r_{Zy} (l_1 - l_2) \} \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} S_Z = -\frac{f_d}{r_1 + r_2} (r_1 - \Delta x_1 + r_2 - \Delta x_2) (Y_1 - Y_2) \\ + \frac{M g}{2} \{ r_{Xy} (Y_1 + Y_2) + r_{Yy} (l_1 - l_2) \} \end{aligned} \quad (65)$$

とする.

8. 数値シミュレーション

提案するピンチングモデル (式 (46)~(48)) (Fig. 11) に第 7 章で用いた制御信号を加え, 提案するモデルの妥当性と安定把持が実現したかを確認するために数値シミュレーションを行った. その際の物理パラメータを **Table 4** に, 制御パラメータと物体質量およびその他の推定器に用いる初期値を **Table 5** に示す. 安定把持が実現したと仮定すれば, 状態変数の加速度と速度は $\ddot{\mathbf{q}}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \dot{\boldsymbol{\omega}}_X, \boldsymbol{\omega}_X \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ に収束し, 定常項は式 (53)~(55) から加速度と速度ベクトルを消去した残りの部分を変形した

$$\Delta \boldsymbol{\lambda}'_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \left((A', B')^T (A', B') \right)^{-1} (A', B')^T \mathbf{d}' \quad (66)$$

に収束することが文献 [23] より推測できる. ここで, $\mathbf{d}' = (\mathbf{0}_6, S_X, S_Y, S_Z)^T$, $\Delta \boldsymbol{\lambda}'_\infty = (\Delta f_\infty, \Delta \lambda_{Y\infty}, \Delta \lambda_{Z\infty}, \Delta M_\infty,$

Table 4 Physical paramaters

$l_{11} = l_{12}$ (length)	0.040 [m]
l_{13} (length)	0.030 [m]
l_{21} (length)	0.060 [m]
l_{22} (length)	0.040 [m]
m_{11} (weight)	0.043 [kg]
m_{12} (weight)	0.031 [kg]
m_{13} (weight)	0.020 [kg]
m_{21} (weight)	0.060 [kg]
m_{22} (weight)	0.040 [kg]
r_0 (link radius)	0.005 [m]
r_i (i=1,2) (radius)	0.010 [m]
L base (length)	0.063 [m]
M object (weight)	0.040 [kg]
l_i (i=1,2) (object width)	0.015 [m]
h (object height)	0.050 [m]
k_i (i=1,2) (stiffness coefficient)	3.000×10^5 [N/m ²]
$c_{\Delta i}$ (viscosity coefficient)	1000.0 [Ns/m ²]
$c_{t1} = c_{t2}$ (viscosity coefficient)	0.001 [Nms]

Table 5 Parameters of control signals and initial values

f_d	internal force	1.000 [N]
C_i (i = 1, 2)	damping coefficient	diag(0.001, 0.001, 0.001) [Nms]
γ_M	regressor gain	0.050 [m ² /kg ²]
γ_{N1}	regressor gain	5.000×10^{-4} [s ² /kg]
$\gamma_{N2X} = \gamma_{N2Z}$	regressor gain	5.000×10^{-4} [s ² /kg]
$M(0)$	initial estimate value	0.020 [kg]
$\dot{N}_1(0)$	initial estimate value	0.000 [N]
$\dot{N}_{2X}(0) = \dot{N}_{2Z}(0)$	initial estimate value	0.000 [N]

$\Delta N_{1\infty}, \Delta N_{2X\infty}, \Delta N_{2Z\infty})^T$ とし,

$$A' = \begin{pmatrix} -\frac{\partial \Delta x_1}{\partial \mathbf{q}_1} & \mathbf{Y} \mathbf{q}_1 & \mathbf{Z} \mathbf{q}_1 \\ -\frac{\partial \Delta x_2}{\partial \mathbf{q}_2} & -\mathbf{Y} \mathbf{q}_2 & -\mathbf{Z} \mathbf{q}_2 \\ 0 & \mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 & -\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 & 0 & -l_1 - l_2 \\ -(\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2) & l_1 + l_2 & 0 \end{pmatrix} \quad (67)$$

$$B' = \begin{pmatrix} \frac{g}{2} \frac{\partial y_{01}}{\partial \mathbf{q}_1} & r_1 \mathbf{e}_{1z} & 0 & 0 \\ \frac{g}{2} \frac{\partial y_{02}}{\partial \mathbf{q}_2} & 0 & r_2 \mathbf{e}_{2X21} & r_2 \mathbf{e}_{2Z21} \\ & \mathbf{0}_{3 \times 4} & & \end{pmatrix} \quad (68)$$

とする。また、式 (53)～(55) の Δ が添えられた変数の $t \rightarrow \infty$ での収束先を Δ を添えた変数の添え字に ∞ を付け加えた記号とすると、この変数と $\Delta \lambda'_\infty$ の関係は $\Delta f_\infty = \Delta f_{i\infty}$, $\Delta \lambda_{Y\infty} = (-1)^i \Delta \lambda_{Yi\infty}$, $\Delta \lambda_{Z\infty} = (-1)^i \Delta \lambda_{Zi\infty}$ (i = 1, 2) となる (他の変数は同じになるので割愛する)。ここで、式 (54) より $\Delta f_1 = \Delta f_2$, $\Delta \lambda_{Y1} = -\Delta \lambda_{Y2}$, $\Delta \lambda_{Z1} = -\Delta \lambda_{Z2}$ になることを利用した。実際に数値シミュレーションを行うと物体のスピニング回りの回転を鈍らせる散逸関数 R_t がうまく働き、Fig. 13 から $\Delta \lambda'_\infty$ に収束することが確認できる。また、各状態変数の加速度と速度がゼロに収束したことを確認した。散逸関数 R_t の効果を確認するために、粘性パラメータ c_{t1} と c_{t2} をゼロに設定し数値シミュレーションを実行するとスピニング運動が減衰することなく生じ続けた。以上の考察より、提案するモデルの妥当性と安定把持が実現したことを数値シミュレーションの観点から確認した。

Fig. 13 Transient responses of physical variables

9. お わ り に

人の拇指の鞍関節と同等な関節駆動の順序を持たない鞍関節モデルと転がり拘束を考慮した、指ロボット-物体からなるシステム全体のダイナミクスを導出した。提案する順序関係のない鞍関節モデルと順序関係のある鞍関節モデルとを数値シミュレーションにより比較することで、ダイナミクスの構造の違いから拇指の軌道が異なることを明らかにした。この軌道の違いは、鞍関節のモデルとして鞍関節が本来有する駆動に順序関係がない特徴を考慮する必要があることを示している。指ロボットと物体の左右の接触点を結ぶ対向軸回りのスピニング運動は、数値シミュレーション開始時には生じるが、左右の接触点において $\mathbf{r}_X$ 軸回りに生じ把持物体の回転運動に働く粘性力のおかげで、最終的に静止することを数値シミュレーション結果から確認した。Fig. 1に示すより人のピンチングモデルに近い、3自由度を有する拇指ロボット、3自由度を有する人差し指ロボット、把持物体から構成されるシステムのダイナミクスを導出した。この数学モデルに“blind grasping”法に基づく制御入力を代入して閉ループダイナミクスを導出し、その閉ループダイナミクスの任意の解が、力/トルク平衡を実現する、ある平衡状態に収束することを数値シミュレーション結果から明らかにした。今後の課題として、提案するモデルに対し“blind grasping”法を用いた場合の安定性を証明する必要がある。また、順序関係を持たない関節を2軸同時に動かせる球面超音波モータ [24] などにより駆動することで実験機を作成し、提案手法の有効性を検証する必要がある。

参 考 文 献

- [1] NHK 取材班: 驚異の小宇宙・人体 脳と心 1 心が生まれた惑星 [進化]. 日本放送出版協会, 1993.
- [2] J. Napier: Hands. Princeton Univ. Press, 1993.
- [3] A. Bicchi and V. Kumar: "Robotic Grasping and Contact: A Review," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.348–353, 2000.
- [4] A. Bicchi: "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.652–662, 2000.
- [5] A. Okamura, N. Smaby and M. Cutkosky: "An Overview of Dexterous Manipulation," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.255–262, 2000.
- [6] K. Shimoga: "Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey," Int. J. of Robotics Research, vol.15, no.3, pp.230–266, 1996.
- [7] H. Kawasaki, T. Komatsu and K. Uchiyama: "Dexterous Anthropomorphic Robot Hand with Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.7, no.3, pp.296–303, 2002.
- [8] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson and K. Biggers: "Design of the UTAH/M.I.T. Dexterous Hand," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1520–1532, 1986.
- [9] S. Dalley, T. Wiste, T. Withrow and M. Goldfarb: "Design of a Multifunctional Anthropomorphic Prosthetic Hand with Extrinsic Actuation," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.14, no.6, pp.699–706, 2009.
- [10] D.J. Montana: "The kinematics of contact and grasp," Int. J. of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.17–32, 1988.
- [11] C. Cai and B. Roth: "On the Spatial Motion of a Rigid Body with Point Contact," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.686–695, 1987.
- [12] L. Han, Y. Guan, Z. Li, Q. Shi and J. Trinkle: "Dextrous Manipulation with Rolling Contacts," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.992–997, 1997.
- [13] A. Bicchi and R. Sorrentino: "Dexterous Manipulation through Rolling," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.452–457, 1995.
- [14] K. Harada and M. Kaneko: "Enveloping Grasp for Multiple Objects," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2409–2415, 1998.
- [15] N. Sarkar, X. Yun and V. Kumar: "Dynamic Control of 3-D Rolling Contacts in Two-Arm Manipulation," IEEE Trans on Robotics and Automation, vol.13, no.3, pp.364–376, 1997.
- [16] Z. Li and J. Canny: "Motion of Two Rigid Bodies with Rolling Constraint," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.6, no.1, 1990.
- [17] 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.
- [18] 吉田守夫, 有本卓, 小澤隆太: "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", 日本ロボット学会誌, vol.24, no.1, pp.104–111, 2006.
- [19] S. Arimoto and M. Yoshida: "Modeling and Control of Three-Dimensional Grasping by a Pair of Robot Fingers," SICE J. of Control, Measurement, and System Integration, vol.1, no.1, pp.2–11, 2008.
- [20] M. Yoshida, S. Arimoto and K. Tahara: "Pinching 2D Object with Arbitrary Shape by Two Robot Fingers under Rolling Constraints," Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1805–1810, 2009.
- [21] M. Chalon, M. Grebenstein, T. Wimbock and G. Hirzinger: "The thumb: Guidelines for a Robotic Design," Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5886–5893, 2010.
- [22] G.J. Tortora and S.R. Grabowski: Introduction to the Human Body: The Essentials of Anatomy & Physiology. Wiley, 2004.
- [23] S. Arimoto: Control Theory of Multi-fingered Hands: A Modelling and Analytical-Mechanics Approach for Dexterity and Intelligence. Springer-Verlag, 2008.
- [24] 遠山茂樹: "磁化球を用いた球面超音波モータの制御", 第2回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp.121–124, 2002.

付録 A. リンク 22 の回転に関するダイナミクスの導出

リンク 22 の回転に関する運動エネルギー K_{22r} (式 (48)) から, $\dot{q}_{21X}$ に関するダイナミクスは以下のように連鎖律を使うことにより導出できる.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_{22r}}{\partial \dot{q}_{21X}} \right) &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_{22r}}{\partial \omega_{22}} \frac{\partial \omega_{22}}{\partial \dot{q}_{21X}} \right) \\
 &= \frac{d}{dt} \left((H_{22} \omega_{22})^T \frac{\partial \omega_{22}}{\partial \dot{q}_{21X}} \right) \\
 &= \frac{d}{dt} (H_{22} \omega_{22})^T \frac{\partial \omega_{22}}{\partial \dot{q}_{21X}} + (H_{22} \omega_{22})^T \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \omega_{22}}{\partial \dot{q}_{21X}} \right) \\
 &= (H_{22} \dot{\omega}_{22} + \omega_{22} \times H_{22} \omega_{22})^T \begin{pmatrix} \cos q_{22} \\ -\sin q_{22} \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &\quad + (H_{22} \omega_{22})^T \begin{pmatrix} -\sin q_{22} \dot{q}_{22} \\ -\cos q_{22} \dot{q}_{22} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (A.1)
 \end{aligned}$$

また,

$$\frac{\partial K_{22r}}{\partial q_{21X}} = 0 \quad (A.2)$$

より $\dot{q}_{21X}$ に関するダイナミクスは

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_{22r}}{\partial \dot{q}_{21X}} \right) - \frac{\partial K_{22r}}{\partial q_{21X}} = 0 \quad (A.3)$$

となる. 他の関節 $\dot{q}_{21Z}$, $\dot{q}_{22}$ に関するダイナミクスも同じ方法を用いることにより導出できるので省略する.

吉田守夫 (Morio Yoshida)

2007 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所 BMC 研究センター研究員、2008 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センターロボット制御研究チーム研究員、現在に至る。多指ハンドによる動的物体把持に関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会等の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

田原健二 (Kenji Tahara)

2003 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所 BMC 研究センター研究員、2007 年九州大学大学院システム情報科学研究院特任准教授、2009 年九州大学高等研究院特別准教授、2011 年より九州大学大学院工学研究院機械工学部門准教授、現在に至る。2009 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター客員研究員。多指ハンドによる動的物体操作や筋骨格系の解析など、冗長・劣駆動系の制御や解析に関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、システム制御情報学会等の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

有本 卓 (Suguru Arimoto)

1959 年京都大学理学部数学科卒業。同年沖電気工業 (株)、1962 年東京大学工学部助手、1967 年同講師、1968 年大阪大学基礎工学部助教授、1973 年同教授、1988 年東京大学工学部計数工学科教授、1997 年立命館大学理工学部ロボティクス学科教授、2007 年より立命館大学総合理工学研究機構客員教授。2008 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センターロボット制御研究チーム客員研究員を併任、現在に至る。大阪大学名誉教授。制御理論、情報理論、ロボティクス、機械知能の研究に従事。1983 年 IEEE Fellow、2000 年 IEICE Fellow、2002 年本学会フェロー、2005 年日本機械学会フェロー、2006 年計測自動制御学会フェロー、同年情報理論とその応用学会名誉会員、2000 年紫綬褒章受章、同年 IEEE Third Millennium Medal 受賞、2006 年 IEEE RAS Pioneer Award 受賞、2007 年 ASME Rufus Oldenburger Medal 受賞。1995~1997 年本学会会長、2008 年本学会名誉会長。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、電子情報通信学会、情報処理学会、システム制御情報学会等の会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

杉山博之 (Hiroyuki Sugiyama)

2005 年イリノイ大学工学研究科博士課程修了。2006 年東京大学国際・産学共同研究センター特任助手、2007 年大阪市立大学工学部特任准教授、2008 年東京理科大学工学部専任講師、現在に至る。マルチボディダイナミクス、鉄道車両の車輪/レール接触問題、タイヤの動特性に関する研究に従事。ASME、SAE、日本機械学会、自動車技術会等の会員。Ph.D.