多指ハンドアームシステムを用いた センソリーフィードバックによる任意多面体の姿勢制御

河村 晃 宏* 田原 健 二* 倉 爪 亮* 長谷川 勉*

Sensory Feedback Attitude Control for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-Fingered Hand-Arm System

Akihiro Kawamura*, Kenji Tahara*, Ryo Kurazume* and Tsutomu Hasegawa*

This paper proposes a novel control method for stable grasping and attitude regulation of an object using a multi-fingered hand-arm system. This method is based on a task space sensory-feedback control using real time information of an object attitude. A unified control signal is designed for a whole hand-arm system. Firstly, nonholonomic rolling constraints between a multi-fingered hand-arm system and a grasped object are formulated. Secondly, a novel control signal to accomplish stable grasping and attitude regulation of the grasped object is proposed. To design the control signal, it is assumed that sensory information of the attitude of the grasped object is available in real time through some external sensors, such as vision, force, tactile sensors, and so on. Next, stability of the overall closed-loop dynamics and convergence of the object attitude to a desired attitude are given based on the passivity theory. Finally, several numerical simulations are conducted, and it is demonstrated that an arbitrary polyhedral object can be grasped, and its attitude converges to the desired one stably using proposed method.

Key Words: Multi-fingered Hand-arm System, Attitude Control, Unified Control, Soft Finger, Dynamic Stability

1. は じ め に

これまでに、多指ロボットハンドを用いた物体把持・操作に関する研究が数多く行われている [1]~[4]。例えば Arimoto ら [5] は、物体の詳細な形状や質量中心位置、指先接触点位置などの情報を必要とせず、また指先と物体との間の転がり拘束を考慮した、動的な物体把持手法を提案している。本手法は現在の指先位置の情報のみで未知物体の安定把持を実現しており、システム全体の収束性も理論的に保証されているが、把持物体は平行な 2 平面を有した形状に限定されていた。

一方、多関節アームの先端にロボットハンドを取り付けたハンドアームシステムは、手先部分と腕部分の協調動作により、人の手・腕と同様な器用な物体操作が実現できる [6]~[8]。大西らはハンド部とアーム部を独立した系と見なし、それぞれに応じた制御系を与えることで、全体として協調動作を実現しているが [6]、ハンド部とアーム部の役割決定に明確な指針はなく、設計者の主観によって決定されている。一方、Nagai らや Bae らは、ハンドアームシステムを統一的な系と捉えた制御系を構築している [7] [8]。Nagai ら [7] は、把持物体およびアーム先端

部分にそれぞれ独立した望みの機械インピーダンス特性を設定し、それらを実現する制御入力をシステム全体に対して与えることで、結果としてハンド部の可動範囲をアーム部が補完する手法を提案している。また Bae ら [8] は、Nagai らと同様にハンド部とアーム部を一つのシステムと見なし、全システムに対する統一的なセンソリーフィードバック制御入力を与えることで、制御設計の煩雑さを抑え、システム全体を有効利用した効率的な物体操作を実現している。しかし、Nagai ら [7] の手法では、把持物体の形状や質量などのパラメータが既知であり、かつ物体と指先との接触点位置情報を実時間で計測する必要がある。Bae ら [8] の手法では、物体のパラメータや接触点位置情報を必要とせず、力学構造を利用して動的把持を実現しているが、二次元平面運動のみに留まっており、また制御入力まで含めた閉ループシステムの安定性については議論されていない。

これに対し、筆者らはこれまでに、Arimoto らの多指ハンドによる動的物体把持手法 [5] をハンドアームシステムに適用し、かつ把持対象を平行 2 平面物体から任意多面体に拡張した動的把持手法を提案している [9]。本手法は物体の形状や質量中心位置、指先接触点位置などの情報を必要とせず、また、外界センサを一切用いることなく、物体の動的安定把持が実現可能である。さらに、システム全体の閉ループダイナミクスの収束性を示し、動的安定把持となる平衡状態が実現されることを保証している。しかし、Arimoto らの手法 [5] および筆者らの手法 [9] とともに、

原 2011 年 1 月 5 日

*九州大学

*Kyushu University

■ 本論文は学術性で評価されました。

Fig. 1 Multi-fingered hand-arm system

物体の外界センサレス安定把持のみに着目したものであり、物体把持後の位置、姿勢の操作に関しては未解決であった。

把持物体の位置・姿勢を操作するには、把持物体の位置・姿勢情報を何らかのセンサで計測する、もしくは正確に推定するなどが必要である。これまで、視覚や触覚センサを用いて把持物体の位置・姿勢をオンラインで計測し、その情報を用いて物体操作を行う手法がいくつか提案されている。例えば、視覚センサによる遅れを予測を用いて保証する手法[10]や、視覚センサと関節角度センサから得られる情報を融合して用いる手法[11]、1[kHz]で物体位置情報が計測可能な高速視覚システムを用いた手法[12]などがある。しかし、これらはいずれも系全体の動力学を考慮しておらず、動的な物体把持・操作の安定性・収束性については検討されていない。

本論文では、文献[9]で提案した任意多面体の安定把持手法を拡張し、外界センサにより正確な物体姿勢情報がオンラインで得られる場合に対する多関節多指ハンドアームシステムを用いた把持物体の動的な姿勢制御手法を提案する。提案手法は、文献[9]で実現した動的安定把持を維持しながら、オンラインで計測された物体の姿勢情報を基にフィードバック姿勢制御を行う。さらに、受動性を基にした安定解析により、制御入力を含む全システムの安定性と目標姿勢への収束性を保証する。

以下、第2章において指先-物体間の転がり接触拘束を考慮したシステム全体のモデル化を行う。三次元転がり接触拘束は、非ホロノミック拘束になることが知られており、本研究では、Arimoto [5]らにより提案されている転がりモデルを任意多面体・任意の指の本数に対応可能な形へ拡張する。その後、第3章においてハンドアームシステムと対象物の運動方程式を導出し、第4章で安定把持と物体の姿勢制御を実現する新しい制御入力を構築する。そして第5章で制御入力を含んだ閉ループシステムの安定性および目標姿勢への収束性について明らかにし、最後に第6章において、提案手法の有効性を数値シミュレーションによって検証する。

2. 多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムおよび把持物体のモデル

本論文で扱うハンドアームシステムの一例を Fig. 1 に示す。

Fig. 2 Contact model at the center of the contact area

本モデルは、それぞれ物体姿勢の操作に十分な自由度を持つ多指ハンド部とアーム部によって構成されている。以下、モデル化における仮定として、1) 把持対象物は、指先と物体との接触面が平面で構成されていること以外は任意の多角形状物体とする。2) すべての指先は柔軟で半球形状とし、物体表面上で滑ることなく面接触を伴った回転接触を行う。3) 物体と指との力学的な相互作用およびシステムの安定性についての議論を見通しやすくするため、重力の影響については考慮しない。

Fig. 1において、 O は慣性座標系の原点を表す。以後、式に含まれるすべての変数は、特段の指示がない限り慣性座標系で表されているとし、各式および変数に含まれる添え字 i は、 i 番めの指を表すとする。アーム部および i 番めの指は、それぞれ N_a 、 N_i の自由度を持つとし、また、アーム部の関節角ベクトルを $\mathbf{q}_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ 、 i 番めの指の関節角ベクトルを $\mathbf{q}_{0i} \in \mathbb{R}^{N_i}$ と表す。ハンドアームシステム全体の関節角ベクトルである $\mathbf{q}$ は、ハンド部が N 本の指を持つとき、 $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_a^T, \mathbf{q}_{01}^T, \mathbf{q}_{02}^T, \dots, \mathbf{q}_{0N}^T)^T$ と表される。Fig. 2 に把持対象物と指先との関係を示す。図において、 $O_{c.m.}$ は物体の質量中心位置に置かれた局所座標系（物体座標系）の原点を表しており、その位置は $\mathbf{x} = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$ と表される。また、 $\mathbf{x}_{0i} \in \mathbb{R}^3$ は指先半球中心位置、 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3$ は接触面中心位置を表しており、 $\boldsymbol{\omega}$ は $O_{c.m.}$ における物体の瞬時回転軸ベクトルを表す。

2.1 回転接触拘束

三次元空間における滑りのない回転接触拘束をモデル化する。物体の姿勢は以下に示す回転行列 $\mathbf{R}$ で表される。

$$\mathbf{R} = (\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z) \in SO(3), \quad (1)$$

ここで $\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ、慣性座標系から見た物体座標系の x 軸、 y 軸、 z 軸を表す正規直交ベクトルである。回転行列 $\mathbf{R}$ は三次元回転群 $SO(3)$ の元であり、以下の関係式を満たすことが知られている。

$$\dot{\mathbf{R}} = [\boldsymbol{\omega} \times] \mathbf{R}, \quad [\boldsymbol{\omega} \times] = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に、各指の接触面中心 $\mathbf{x}_i$ における局所座標系（接触面中心

座標系) を以下のように定義する.

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{Ci} = (\mathbf{C}_{iX}, \mathbf{C}_{iY}, \mathbf{C}_{iZ}), \quad (3)$$

$\mathbf{R}_{Ci}$ は物体座標系で表された接触面中心の姿勢を表す回転行列であり, $\mathbf{C}_{iY}$ を接触面に対して垂直に取る. このとき, 指先表面上で表される接触面中心の速度 $\mathbf{v}_i$ は以下のように表される.

$$\mathbf{v}_i = \Delta r_i (\dot{\mathbf{C}}_{iY} - \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{C}_{iY}), \quad (4)$$

ただし,

$$\Delta r_i = \mathbf{C}_{iY}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) - Y_i \quad (5)$$

である. $\boldsymbol{\omega}_i \in \mathbb{R}^3$ は, 各接触面中心座標系の姿勢角速度ベクトルであり, r_i は指先半球の半径, Δr_i は指先半球中心と接触面との距離, Y_i は物体の質量中心 $O_{c.m.}$ から i 番目の指先が接触している物体表面までの距離を表す (Fig. 2 参照).

指先-把持物体間の滑りを許容しない回転接触条件は, 指先表面上で表される接触面中心の速度のうち接触面に対して平行な成分が, 物体表面上で表された接触面中心の速度と等しいとして以下のように表される.

$$\Delta r_i \mathbf{C}_{iX}^T (\dot{\mathbf{C}}_{iY} - \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{C}_{iY}) = \dot{X}_i \quad (6)$$

$$\Delta r_i \mathbf{C}_{iZ}^T (\dot{\mathbf{C}}_{iY} - \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{C}_{iY}) = \dot{Z}_i, \quad (7)$$

ただし, X_i , Z_i は接触面に写像した物体の質量中心と指先半球中心との距離であり,

$$X_i = -\mathbf{C}_{iX}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \quad (8)$$

$$Z_i = -\mathbf{C}_{iZ}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \quad (9)$$

と表される.

式 (6), (7) は非ホロノミックな回転拘束条件であるが, 全システムの速度に関する各ベクトル $\dot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{x}}$, $\boldsymbol{\omega}$ について線形となるため, Paffian 拘束として以下のように表すことができる.

$$\mathbf{X}_{iq} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{X}_{ix} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{X}_{i\omega} \boldsymbol{\omega} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}_{iq} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z}_{ix} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{Z}_{i\omega} \boldsymbol{\omega} = 0, \quad (11)$$

ただし,

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{iq} = \Delta r_i \mathbf{C}_{iZ}^T \mathbf{J}_{\Omega i} - \mathbf{C}_{iX}^T \mathbf{J}_{0i} \\ \mathbf{X}_{ix} = \mathbf{C}_{iX}^T \\ \mathbf{X}_{i\omega} = \{\mathbf{C}_{iX} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})\}^T - \Delta r_i \mathbf{C}_{iZ}^T \\ \mathbf{Z}_{iq} = -\Delta r_i \mathbf{C}_{iX}^T \mathbf{J}_{\Omega i} - \mathbf{C}_{iZ}^T \mathbf{J}_{0i} \\ \mathbf{Z}_{ix} = \mathbf{C}_{iZ}^T \\ \mathbf{Z}_{i\omega} = \{\mathbf{C}_{iZ} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})\}^T + \Delta r_i \mathbf{C}_{iX}^T \end{cases} \quad (12)$$

である. また, $\mathbf{J}_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$, $\mathbf{J}_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ はどちらも, 指先中心の移動速度の関節角速度 $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列であり, 以下の関係式を満たす.

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{0i} \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{0i} \\ \mathbf{J}_{\Omega i} \end{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \quad (13)$$

2.2 柔軟指の接触モデル

柔軟指先の変位と復元力の関係を表す接触モデルとして, Arimoto らによって定式化された集中定数モデルを導入する [13].

指先接触面中心位置における最大変位量 $r_i - \Delta r_i$ によって発生する復元力を f_i とすると, f_i は以下のように表される.

$$\begin{cases} f_i = \bar{f}_i + \xi_i \frac{d}{dt}(r_i - \Delta r_i) \\ \bar{f}_i = k(r_i - \Delta r_i)^2, \end{cases} \quad (14)$$

ここで k は正のスカラー値, ξ_i は指先の最大変位量 $r_i - \Delta r_i$ に依存して変化する正定値スカラー関数であり, これらは指先の物性に依存して決定される値である. 接触面法線方向における非線形粘弾性モデルに加えて, 本論文では指先の面接触によるねじり方向の粘性摩擦を以下のようなエネルギー消散関数として定式化する [14].

$$T_i = \frac{b_i}{2} \|\mathbf{C}_{iY}^T (\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_i)\|^2, \quad (15)$$

ここで b_i は ξ_i と同様に最大変位量 $r_i - \Delta r_i$ に関する正定値スカラー関数であり, 本論文では接触面積に比例する関数とする.

3. ダイナミクス

システム全体の運動エネルギーは以下のように表される.

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}, \quad (16)$$

$\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ はハンドおよびアームの慣性行列, $\mathbf{M} (= \text{diag}(m, m, m))$ は把持物体の質量, $\mathbf{I} (= \mathbf{R} \bar{\mathbf{I}} \mathbf{R}^T)$ は慣性座標系で表された把持物体の慣性テンソルであり, $\bar{\mathbf{I}}$ は慣性主軸で表された慣性テンソルである. 一方, 全ポテンシャルエネルギー P_{sum} は以下のように表される.

$$P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N \int_0^{r_i - \Delta r_i} \bar{f}_i d\zeta, \quad (17)$$

ここで P_i は各指先の変位量 $r_i - \Delta r_i$ に関する弾性ポテンシャルエネルギーである. また, 式 (10), (11) で表された拘束条件と柔軟指の接触モデルを考慮すると, 全システムの運動を表すラグランジュの運動方程式は以下のように表される.

For the multi-fingered hand-arm system:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) + \mathbf{S}_q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right\} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}}^T \\ + \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{C}_{iY} f_i + \mathbf{X}_{iq}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{iq}^T \lambda_{iZ} \right) = \mathbf{u} \end{aligned} \quad (18)$$

For the object:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^N \left(-f_i \mathbf{C}_{iY} + \mathbf{X}_{ix}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{ix}^T \lambda_{iZ} \right) = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I} \ddot{\boldsymbol{\omega}} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{I}} + \mathbf{S}_\omega \right\} \boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \boldsymbol{\omega}}^T \\ - \sum_{i=1}^N \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} f_i \\ + \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{X}_{i\omega}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{i\omega}^T \lambda_{iZ} \right) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (20)$$

ただし, $\mathbf{S}_q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{S}_\omega$ はコリオリ力, 遠心力などを含む歪対称行列, $\mathbf{u}$ は入力トルクベクトル, λ_{iX} と λ_{iZ} はラグランジュ乗数であり, 物理的な意味として転がりによって発生する拘束力を表している.

このとき, 全システムの入力ベクトルを $\mathbf{U} = (\mathbf{u}^T, \mathbf{0}_{1 \times 6})^T$, 出力ベクトルを $\dot{\mathbf{A}} = (\dot{\mathbf{q}}^T, \dot{\mathbf{x}}^T, \dot{\omega}^T)^T$ とすると, 式 (18), (19), (20) は以下のように表すことができる.

$$\mathbf{G}\ddot{\mathbf{A}} + \left(\frac{1}{2}\dot{\mathbf{G}} + \mathbf{S} + \mathbf{T}\right)\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{P}^T\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{Q}^T\mathbf{f} = \mathbf{U} \quad (21)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \text{diag}(\mathbf{H}, \mathbf{M}, \mathbf{I}) \\ \mathbf{S} &= \text{diag}(\mathbf{S}_q, \mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{S}_\omega) \\ \mathbf{T} &= \text{diag}\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{C}_{T_i}, \mathbf{0}_{3 \times 3}, 2\mathbf{J}_{C\omega i} \sum_{i=1}^N \mathbf{C}_{T_i} \mathbf{J}_{C\omega i}^T\right) \\ \mathbf{C}_{T_i} &= b_i \left\{ \mathbf{C}_{iY}^T (\mathbf{J}_{C\omega i} - \mathbf{J}_{\Omega i}) \right\}^T \left\{ \mathbf{C}_{iY}^T (\mathbf{J}_{C\omega i} - \mathbf{J}_{\Omega i}) \right\} \\ \mathbf{J}_{C\omega i} &= \frac{1}{d_3^2 - d_1 d_2} \left\{ (d_2 \mathbf{X}_{i\omega}^T - d_3 \mathbf{Z}_{i\omega}^T) \mathbf{X}_{iq} \right. \\ &\quad \left. + (d_1 \mathbf{Z}_{i\omega}^T - d_3 \mathbf{X}_{i\omega}^T) \mathbf{Z}_{iq} \right\} \\ d_1 &= 1 + \mathbf{X}_{i\omega}^2 \\ d_2 &= 1 + \mathbf{Z}_{i\omega}^2 \\ d_3 &= \mathbf{X}_{i\omega} \mathbf{Z}_{i\omega}^T \\ \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{1q} & \mathbf{X}_{1x} & \mathbf{X}_{1\omega} \\ \mathbf{X}_{2q} & \mathbf{X}_{2x} & \mathbf{X}_{2\omega} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{X}_{Nq} & \mathbf{X}_{Nx} & \mathbf{X}_{N\omega} \\ \mathbf{Z}_{1q} & \mathbf{Z}_{1x} & \mathbf{Z}_{1\omega} \\ \mathbf{Z}_{2q} & \mathbf{Z}_{2x} & \mathbf{Z}_{2\omega} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{Nq} & \mathbf{Z}_{Nx} & \mathbf{Z}_{N\omega} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\lambda} &= (\lambda_{1X}, \lambda_{2X}, \dots, \lambda_{NX}, \lambda_{1Z}, \lambda_{2Z}, \dots, \lambda_{NZ})^T \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{1Y}^T \mathbf{J}_{01} & -\mathbf{C}_{1Y}^T & (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{01})^T [\mathbf{C}_{1Y} \times] \\ \mathbf{C}_{2Y}^T \mathbf{J}_{02} & -\mathbf{C}_{2Y}^T & (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{02})^T [\mathbf{C}_{2Y} \times] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{C}_{NY}^T \mathbf{J}_{0N} & -\mathbf{C}_{NY}^T & (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0N})^T [\mathbf{C}_{NY} \times] \end{bmatrix} \\ \mathbf{f} &= (f_1, f_2, \dots, f_N)^T \end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) より, $\mathbf{G}$ は正定対称行列であるので逆行列が存在する. よって, $\mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}$ を式 (21) の左からかけると以下の式を得る.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\ddot{\mathbf{A}} + \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1} \left(\frac{1}{2}\dot{\mathbf{G}} + \mathbf{S} + \mathbf{T}\right)\dot{\mathbf{A}} \\ + \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{P}^T\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{f} = \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{U} \end{aligned} \quad (23)$$

ここで, 拘束条件 (10), (11) より

$$\mathbf{P}\ddot{\mathbf{A}} = -\dot{\mathbf{P}}\dot{\mathbf{A}} \quad (24)$$

が言える. これを式 (23) に代入すると以下のように表される.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{P}^T\boldsymbol{\lambda} = \left\{ \dot{\mathbf{P}} - \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1} \left(\frac{1}{2}\dot{\mathbf{G}} + \mathbf{S} + \mathbf{T}\right) \right\} \dot{\mathbf{A}} \\ - \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{f} + \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{U} \end{aligned} \quad (25)$$

このうち, $\mathbf{P}$ は回転接触拘束が満たされている限り非退化であるので $\mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{P}^T$ の逆行列が存在し,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda} = \left(\mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{P}^T\right)^{-1} \left[\left\{ \dot{\mathbf{P}} - \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1} \left(\frac{1}{2}\dot{\mathbf{G}} + \mathbf{S} + \mathbf{T}\right) \right\} \dot{\mathbf{A}} \right. \\ \left. - \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{f} + \mathbf{P}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{U} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

となる. ここで式 (5), (14) より $\mathbf{f}$ は $(\mathbf{A}, \dot{\mathbf{A}})$ の関数として表されるので, 入力 $\mathbf{U}$ を $(\mathbf{A}, \dot{\mathbf{A}})$ で構成した場合, $\boldsymbol{\lambda}$ も同様に $(\mathbf{A}, \dot{\mathbf{A}})$ の関数として表される. したがって, $(\mathbf{A}, \dot{\mathbf{A}})$ が有界であるとき, $\mathbf{f}$ と $\boldsymbol{\lambda}$ も同様に有界となる.

このとき, 入力ベクトル $\mathbf{U} (= \mathbf{0})$ と出力ベクトル $\dot{\mathbf{A}}$ について入出力の内積和をとると, 以下の式を得る.

$$\frac{d}{dt} (K + P_{\text{sum}}) = - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0 \quad (27)$$

式 (27) は, 入出力対が受動性を満たすことを表している [5].

4. 制 御 入 力

Tahara らはこれまでに 3 本指ロボットを用いた立方体の姿勢制御手法 [15] を, Wimböck らは多指ハンドアームシステムを用いた任意形状物体に対する姿勢制御手法 [16] を提案している. しかしこれらの手法では, 指先位置によって作られたフレームを仮想的な物体姿勢として外界センサーレス姿勢制御を行っており, 真の物体姿勢の目標姿勢への収束性は保証されていない. これに対し本論文では, 外界センサにより計測された物体姿勢情報を用いた新たな物体の姿勢制御手法を提案する. 本制御手法はオンラインで得られる物体姿勢情報を用いたフィードバック制御手法であり, 物体の安定把持と物体の高精度な姿勢制御を同時に実現する.

提案手法では, 安定把持の制御入力を $\mathbf{u}_s$, 物体姿勢制御の制御入力を $\mathbf{u}_o$ とし, 入力トルクベクトル $\mathbf{u}$ を以下のように与える.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_o \quad (28)$$

安定把持の制御入力を以下に示す.

$$\mathbf{u}_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0j}) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} \quad (29)$$

$$\mathbf{x}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{0i}, \quad (30)$$

ただし, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)} > 0$ は関節粘性係数を表す正定対角行列であり, f_d はノミナルな目標把持力である. 本制御入力は Fig. 3 に示すように, それぞれの指先がすべての指先位置の幾何中心 $\mathbf{x}_c$ に向かうような制御を行う.

一方, 把持物体の姿勢制御入力を以下のように構築する.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_o = \mathbf{K}_o \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{\Omega j}^T \{ (\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) \\ + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd}) \} \end{aligned} \quad (31)$$

式 (31) 中の $\mathbf{K}_o$ は正のスカラー量であり, $\mathbf{R}_d = (\mathbf{r}_{xd}, \mathbf{r}_{yd}, \mathbf{r}_{zd})$

Fig. 3 Each center of fingertip approaches each other

Fig. 4 $\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}$ is an instantaneous rotational axis for angular velocity vector to reduce an error between $\mathbf{r}_x$ and $\mathbf{r}_{xd}$, and those about y and z axes can be generated in the similar way

は物体の目標姿勢を表す。本論文では、目標姿勢は時間に依存しない一定値であるとする。 $\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}$ は、現在姿勢の x -軸ベクトル $\mathbf{r}_x$ と目標姿勢の x -軸ベクトル $\mathbf{r}_{xd}$ の誤差を表すベクトルであり、このベクトルに従って物体に回転モーメントを与えることにより、姿勢誤差は減少する。 y 成分と z 成分についても同様である (Fig. 4 参照)。ただし、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ をそれぞれ $\mathbf{r}_x$ と $\mathbf{r}_{xd}$, $\mathbf{r}_y$ と $\mathbf{r}_{yd}$, $\mathbf{r}_z$ と $\mathbf{r}_{zd}$ のなす角とすると、目標姿勢を以下の範囲とする。

$$-\pi < (\theta_x, \theta_y, \theta_z) < \pi \quad (32)$$

5. 閉ループダイナミクス

ラグランジュの運動方程式 (18)~(20) および提案する制御入力 (29), (31) より、ハンドアームシステムと把持物体の閉ループダイナミクスは以下のように表される。

For the multi-fingered hand-arm system:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \left\{ \frac{1}{2}\dot{\mathbf{H}} + \mathbf{S}_q + \mathbf{C} \right\} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \\ + \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{R} \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i1} + \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{R} \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i2} = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (33)$$

For the object:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} - \sum_{i=1}^N \mathbf{R} \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i1} = \mathbf{0} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \left\{ \frac{1}{2}\dot{\mathbf{I}} + \mathbf{S}_\omega \right\} \boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \boldsymbol{\omega}} \\ - \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x}) \times (\mathbf{R} \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i1}) \\ - \sum_{i=1}^N (\mathbf{R} \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i2} + K_o \mathbf{B}) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (35)$$

ただし,

$$\begin{aligned} A &= \frac{f_d}{\sum_{j=1}^N r_j} \\ \mathbf{B} &= (\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd}) \\ \Delta \lambda_{i1} &= (\Delta \lambda_{iX1}, \Delta f_{i1}, \Delta \lambda_{iZ1})^T \\ \Delta \lambda_{i2} &= (\Delta \lambda_{iX2}, \Delta \lambda_{iY2}, \Delta \lambda_{iZ2})^T \\ \Delta \lambda_{iX1} &= -\lambda_{iX} - \mathbf{A} \mathbf{C}_{iX}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \\ \Delta f_{i1} &= f_i - \mathbf{A} \mathbf{C}_{iY}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \\ \Delta \lambda_{iZ1} &= -\lambda_{iZ} - \mathbf{A} \mathbf{C}_{iZ}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \\ \Delta \lambda_{iX2} &= -\Delta r_i \lambda_{iZ} - K_o \mathbf{C}_{iX}^T \mathbf{B} \\ \Delta \lambda_{iY2} &= -K_o \mathbf{C}_{iY}^T \mathbf{B} \\ \Delta \lambda_{iZ2} &= \Delta r_i \lambda_{iX} - K_o \mathbf{C}_{iZ}^T \mathbf{B} \end{aligned} \quad (36)$$

である。

ここで、出力ベクトル $\dot{\mathbf{A}}$ と閉ループダイナミクス (33)~(35) の内積和を取ると、以下の式を得る。

$$\frac{d}{dt} E = -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - D \quad (37)$$

$$E = K + V + \Delta P \geq 0 \quad (38)$$

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} \quad (39)$$

$$V = V_s + V_o \quad (40)$$

$$V_s = \frac{A}{4N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x}_{0j})^2 \quad (41)$$

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{NK_o}{2} \{ (\mathbf{r}_x - \mathbf{r}_{xd})^2 + (\mathbf{r}_y - \mathbf{r}_{yd})^2 \\ &\quad + (\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_{zd})^2 \} \end{aligned} \quad (42)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta r_i} \{ \bar{f}_i (\Delta r_{di} + \phi) - \bar{f}_i (\Delta r_{di}) \} d\phi, \quad (43)$$

ただし,

$$\delta r_i = \Delta r_{di} - \Delta r_i \quad (44)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[\frac{d}{dt} \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} \right]^T \mathbf{B} \quad (45)$$

である。

Δr_{di} は $f_i = f_d$ を満たすときの Δr_i の値であり、 ΔP は柔軟指の変形によって生じる弾性ポテンシャルエネルギーを示す。このとき、 $0 \leq \Delta r_{di} - \delta r_i < r_i$ が満たされる限り ΔP は正の値をとる。また、 V_s は安定把持の制御入力 $\mathbf{u}_s$ によって生じる人工ポテンシャル (付録 A 参照)、 V_o は姿勢制御の制御入力 $\mathbf{u}_o$ によって生じる人工ポテンシャルを表している (付録 B

参照). このとき, $K \geq 0$ および $V \geq 0$ であるので, 式 (38) に表すように, $E \geq 0$ となる. また, 式 (37) 中の D は以下のように変形できる (付録 C 参照).

$$D = \sum_{i=1}^N 2K_o \cos \alpha \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \quad (46)$$

ここで, $-1 \leq \cos \alpha \leq 1$ であるので式 (37) より,

$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| &\leq \frac{d}{dt} E \\ &\leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) + \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| \end{aligned} \quad (47)$$

である. ここで, 以下のように場合分けを行う.

1. $\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i < 0$
2. $\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0$

1. $\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i < 0 \right)$ の場合
 $\frac{\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i}{\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i < 0}$ であるので,

$$\left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| = - \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \quad (48)$$

となる. これを式 (47) に代入すると,

$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) + \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i &\leq \frac{d}{dt} E \\ &\leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \end{aligned} \quad (49)$$

となり, 以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) + \sum_{i=1}^N 4K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \\ \leq \frac{d}{dt} E + \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i = \frac{d}{dt} \left(E + \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \right) \\ \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0 \end{aligned} \quad (50)$$

ここで

$$W = E + \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \quad (51)$$

とすると, 式 (50) より以下が得られる.

$$\frac{d}{dt} W \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0 \quad (52)$$

さらに, 以下のような場合分けを行う.

- 1-1. $0 \leq \Delta r_i < 1$

- 1-2. $1 \leq \Delta r_i$

1-1. $\left(\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i < 0 \right) \wedge (0 \leq \Delta r_i < 1) \right)$ の場合
 $\sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i < 0$ となり, 以下の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} V_s + \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i &\geq 0 \\ \Leftrightarrow K_o &\leq - \frac{V_s}{2 \sum_{i=1}^N \log \Delta r_i} \end{aligned} \quad (53)$$

すなわち, 式 (53) を満たすように姿勢制御入力ゲイン K_o を設定すれば, $W \geq 0$ となることを示している.

1-2. $\left(\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i < 0 \right) \wedge (1 \leq \Delta r_i) \right)$ の場合
 $\sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \geq 0$, かつ $E \geq 0$ であるので $W \geq 0$ となる.

すなわち, 1 の場合, K_o が式 (53) を満たす範囲において, 以下の関係が成り立つ.

$$W \geq 0 \quad (54)$$

このとき, 式 (52) と (54) から以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \left\{ \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \right\} dt \\ \leq W(0) - W(\infty) \leq W(0), \end{aligned} \quad (55)$$

2. $\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0 \right)$ の場合
 $\frac{\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i}{\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0}$ であるので,

$$\left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| = \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \quad (56)$$

となる. 式 (47) より,

$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i &\leq \frac{d}{dt} E \\ &\leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) + \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \end{aligned} \quad (57)$$

となり, 以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - \sum_{i=1}^N 4K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \\ \leq \frac{d}{dt} E - \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i = \frac{d}{dt} \left(E - \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \right) \\ \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0 \end{aligned} \quad (58)$$

このとき,

$$W' = E - \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \quad (59)$$

とすると,

$$\frac{d}{dt}W' \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0 \quad (60)$$

となる。ここで **1** の場合と同様に以下のように場合分けを行う。

2-1. $0 \leq \Delta r_i < 1$

2-2. $1 \leq \Delta r_i$

2-1. $\left(\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0 \right) \wedge (0 \leq \Delta r_i < 1) \right)$ の場合
 $\sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i < 0$, かつ $E \geq 0$ であるので $W \geq 0$ である。

2-2. $\left(\left(\sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0 \right) \wedge (1 \leq \Delta r_i) \right)$ の場合
 $\sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \geq 0$ となり、以下のことがいえる。

$$\begin{aligned} V_s - \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i &\geq 0 \\ \Leftrightarrow K_o &\leq \frac{V_s}{2 \sum_{i=1}^N \log \Delta r_i} \end{aligned} \quad (61)$$

これは K_o が式 (61) を満たす範囲であれば、 $W' \geq 0$ となることを示している。

つまり、**2** の場合、式 (61) を満たす K_o を用いて把持物体の姿勢制御を行うことで、常に以下の関係が成り立つ。

$$W' \geq 0 \quad (62)$$

このとき、式 (60) と (62) から以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \left\{ \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \right\} dt \\ \leq W'(0) - W'(\infty) \leq W'(0), \end{aligned} \quad (63)$$

式 (55), (63) はともに、各関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ が時間 $t \in (0, \infty)$ において 2 乗可積分となることを示しており、これはすなわち $\dot{\mathbf{q}}(t) \in L^2(0, \infty)$ であることを表している。また、式 (10) と (11) で表された拘束条件を考慮することにより、物体の並進速度および姿勢速度についても、 $\dot{\mathbf{x}} \in L^2(0, \infty)$, $\dot{\boldsymbol{\omega}} \in L^2(0, \infty)$ となることがいえる。結果、全システムの出力ベクトル $\dot{\mathbf{A}}(t)$ は時間 t について一様連続となる。このとき、文献[5]LEMMA C1 より、 $t \rightarrow \infty$ のとき $\dot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$ となる。さらに、同文献 LEMMA C3 より、 $t \rightarrow \infty$ のとき $\ddot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$ となることがいえる。よって、式 (33) より以下の式が成り立つ。

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i1} \rightarrow 0 \\ \mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{Ci} \Delta \lambda_{i2} \rightarrow 0 \end{cases} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (64)$$

したがって、式 (33) および (64) から、それぞれの指にかかる見かけ上の外力がゼロに収束することが保証される。このとき、式 (34) および (35) から、ハンドアームシステムと同様に把持物体の並進・回転速度および把持物体にかかる見かけ上の外力もゼロに収束することが保証される。また、式 (64) 中の $\mathbf{J}_{0i}$ は指先中心の並進速度 $\mathbf{v}_i$ に関するヤコビアンであり、 $\mathbf{J}_{\Omega i}$ は指先中心の回転角速度 $\boldsymbol{\omega}_i$ に関するヤコビアンであるので、ロ

ボットが特異姿勢でない限り、 $\mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{Ci}$ と $\mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{Ci}$ 中の各列ベクトルはそれぞれ一次独立となり、以下の式を満たす。

$$\begin{cases} \Delta \lambda_{i1} \rightarrow 0 \\ \Delta \lambda_{i2} \rightarrow 0 \end{cases} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (65)$$

このとき、式 (36) より以下の式が得られる。

$$\Delta \lambda_{iY2} = -K_o \mathbf{C}_{iY}^T \mathbf{B} \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (66)$$

$K_o > 0$, $\mathbf{C}_{iY} \neq \mathbf{0}$ であるので、すべての $\mathbf{C}_{iY}$ と $\mathbf{B}$ が直交しない限り、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{0} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (67)$$

これは物体姿勢が目標姿勢に収束することを表している。一方、すべての $\mathbf{C}_{iY}$ と $\mathbf{B}$ が同時に直交する場合、回転拘束条件による指先から物体への運動伝達構造における特異点となる。これは、回転拘束条件によって物体側へ伝達される指先の運動成分のうち、 $\mathbf{C}_{iY}$ 周りのスピニングによる運動では目標とする瞬時回転軸周りの運動を誘発することが不可能であることを意味している。しかし本研究では、指先から物体への運動の伝達構造として、回転拘束条件のみではなく、指先の捻り粘性成分による運動伝達構造を有しており、これによって指先の捻りトルクが物体側へ伝わるため、結果として特異点は存在せず、常に目標姿勢への収束性を満足する。

さらに式 (36) 中の $\Delta \lambda_{iX2}, \Delta \lambda_{iZ2}$ および式 (67), から

$$\boldsymbol{\lambda} \rightarrow \mathbf{0} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (68)$$

となる。これは物体表面上における指先の転がり運動が収束することを示す。同様に式 (36) 中の Δf_{i1} から、物体姿勢が目標姿勢となるとき、把持力 f_i は以下の式を満たす値をとる。

$$f_i \rightarrow \tilde{f}_{id} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (69)$$

ただし、

$$\tilde{f}_{id} = \frac{f_d}{\sum_{j=1}^N r_j} \mathbf{C}_{iY}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \quad (70)$$

である。

結果として、本手法を適用したシステムの平衡多様体は以下のように表される。

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{R}_d, & f_i = \tilde{f}_{id}, & \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}, & \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, & \dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{0} \end{cases} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (71)$$

これにより、システム全体の運動が収束し、さらに平衡点において物体姿勢は目標姿勢に収束することが保証される。

6. 数値シミュレーション

Fig. 1 に示す 5 自由度の指 1 本と 4 自由度の指 2 本を持つハンドと 5 自由度のアームを持つハンドアームシステムを用いた三角柱の把持と姿勢制御の数値シミュレーションを行った。ハンドアームシステムおよび対象物体である三角柱のパラメータを Table 1 に示す。ただし、 θ_{ti} は底面と平行な断面における外角を表している。Table 2 には目標把持力および各ゲイン、把持物体の目標姿勢を表す回転行列 $\mathbf{R}_d$ を示す。また、システム

Table 1 Physical parameters

Triple-fingered hand-arm system	
1 st link length l_{a1}	1.300[m]
2 nd link length l_{a2}	1.000[m]
3 rd link length l_{a3}	0.175[m]
1 st link length l_{i1}	0.300[m]
2 nd link length l_{i2}	0.200[m]
3 rd link length l_{i3}	0.140[m]
1 st mass center l_{ga1}	0.650[m]
2 nd mass center l_{ga2}	0.500[m]
3 rd mass center l_{ga3}	0.0875[m]
1 st mass center l_{gi1}	0.150[m]
2 nd mass center l_{gi2}	0.100[m]
3 rd mass center l_{gi3}	0.070[m]
1 st mass m_{a1}	1.300[kg]
2 nd mass m_{a2}	1.000[kg]
3 rd mass m_{a3}	0.400[kg]
1 st mass m_{i1}	0.250[kg]
2 nd mass m_{i2}	0.150[kg]
3 rd mass m_{i3}	0.100[kg]
1 st Inertia I_{a1}	diag(7.453, 7.453, 0.260) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]
2 nd Inertia I_{a2}	diag(3.397, 3.397, 0.128) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]
3 rd Inertia I_{a3}	diag(0.291, 0.291, 0.500) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]
1 st Inertia I_{i1}	diag(7.725, 7.725, 0.450) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]
2 nd Inertia I_{i2}	diag(2.060, 2.060, 0.120) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]
3 rd Inertia I_{i3}	diag(0.538, 0.538, 0.031) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]
Radius of fingertip r_i	0.070[m]
k_i	1.000×10^5 [N/m ²]
ξ_i	$1.000 \times (r_i^2 - \Delta r_i^2) \pi$ [Ns/m ²]
b_i	$1.000 \times (r_i^2 - \Delta r_i^2) \pi \times 10^4$ [Ns/m ²]

Object

Mass m	0.037[kg]
Y_1	0.092[m]
Y_2	0.048[m]
Y_3	0.048[m]
θ_{t1}	1.833[rad]
θ_{t2}	1.833[rad]
θ_{t3}	2.618[rad]
Height	0.140[m]
Inertia I	diag(1.273, 0.193, 1.148) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]

Table 2 Desired grasping force and gains

f_d	10.0 [N]
C_a	diag(1.673, 1.085, 1.225, 0.463, 0.295) $\times 10^{-1}$ [Ns·m/rad]
C_1	diag(1.010, 1.095, 1.310, 0.535, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_2	diag(0.780, 1.300, 0.530, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_3	diag(1.065, 1.300, 0.530, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
K_o	0.24
R_d	$\begin{bmatrix} 0.97 & 0.17 & 0.17 \\ -0.17 & 0.98 & 0.0 \\ -0.17 & -0.03 & 0.98 \end{bmatrix}$

の初期状態を **Table 3** に示す。本シミュレーションでは、まず物体把持の制御入力式 (29) のみを用いて三角柱の把持を行い、システム全体の運動が収束したあ、式 (31) に基づき三角柱の姿勢制御を行った。このときのシステム全体の様子を **Fig. 5** に示す。また、把持物体の姿勢制御を行ったときの物体姿勢の時系列データを **Fig. 6** に示す。ただし、Fig. 6 中の 0[s] を把持物体の姿勢制御を開始した時刻とし、 $\mathbf{r}_x = (\mathbf{r}_x[0], \mathbf{r}_x[1], \mathbf{r}_x[2])$ とする。一方、目標姿勢を表す回転行列 $\mathbf{R}_d$ は、以下のように設定する。

Table 3 Initial condition

$\dot{\mathbf{q}}$	$\mathbf{0}$ [rad/s]
$\mathbf{q}_a$	$(-0.262, -1.571, 2.094, 0.785, 0.000)^T$ [rad]
$\mathbf{q}_{01}$	$(0.000, -0.663, 1.934)^T \times 10^{-2}$ [rad]
$\mathbf{q}_{02}$	$(-0.262, -0.705, 2.185)^T \times 10^{-2}$ [rad]
$\mathbf{q}_{03}$	$(0.262, -0.705, 2.185)^T \times 10^{-2}$ [rad]
$\dot{\mathbf{x}}$	$\mathbf{0}$ [m/s]
$\mathbf{x}$	$(0.000, 0.600, 0.800)^T$ [m]
$\boldsymbol{\omega}$	$\mathbf{0}$ [rad/s]
$\mathbf{R}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Fig. 5 Snapshots of the simulation

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{R}_{ini} \mathbf{R}_{rd} \quad (72)$$

ただし、 $\mathbf{R}_{ini}$ は仮想フレームの初期姿勢を示しており、 $\mathbf{R}_{rd}$ は以下の式を満たす。

$$\mathbf{R}_{rd} = (\phi_d, \theta_d, \psi_d) = \left(0, \frac{1}{18}\pi, -\frac{1}{18}\pi\right) \quad (73)$$

式 (73) 中の ϕ_d, θ_d, ψ_d は、 $\mathbf{R}_{rd}$ をオイラー角によって表した場合の各変数を表している。Fig. 6 から物体の姿勢を表す各単位ベクトル ($\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z$) が目標姿勢の値に収束していることが分かる。次に、 λ_{iX} および λ_{iZ} を **Fig. 7** に、すべての速度 $\dot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{x}}$ と $\boldsymbol{\omega}$ の時系列データを **Fig. 8** および **Fig. 9** に示す。これらの図より、ハンドアームシステムおよび対象物体に関するすべての見かけ上の外力および速度がゼロに収束していることが確認できる。さらに Δf_{i1} を **Fig. 10** に示す。この図より、把持力 f_i が $\bar{f}_{id}$ に収束していることが確認できる。柔軟指を用いているため姿勢制御開始直後に振動が起こっているが、式 (14) の指先の粘性成分により振動が吸収され収束していることが分かる。同様の数値シミュレーションを物体形状や初期条件を変

Fig. 6 Transient responses of the object frame $R = (r_x, r_y, r_z)$

Fig. 7 Transient responses of λ_{iX} and λ_{iZ}

えて行った結果、物体平面の境界近傍に初期の指先接触位置が存在する場合など、安定把持状態に至る過程で指先が初期接触面上に留まることができない数例[9]を除いて、すべての場合で目標姿勢に安定に収束した。以上より、数値シミュレーションにおいて、提案手法を用いることで、物体の安定把持・姿勢制御が実現可能であることが確認された。

7. おわりに

多指ハンドを有するハンドアームシステムを用いたセンソリーフィードバックによる任意多面体形状物体の動的安定把持・姿勢制御手法を提案した。はじめに、指先-物体間の拘束条件を陽に表したシステム全体の運動方程式の導出を行い、ハンド部と

Fig. 8 Transient responses of angular velocity of the hand-arm system

Fig. 9 Transient responses of translational and rotational velocities of the grasped object

Fig. 10 Transient responses of Δf_{i1}

アーム部を区別しない動的な安定把持制御入力および把持物体のオンライン姿勢情報に基づいたフィードバック姿勢制御入力をそれぞれ構築した。その後、システム全体の安定性について受動性を基にした解析を行い、目標姿勢を実現する平衡多様体へ収束することを明らかにした。最後に数値シミュレーションにより、提案手法の有用性について示した。

本論文では、把持物体の安定把持および姿勢制御について報

告したが、把持物体の位置制御についても同様の議論が必要である。しかし、位置制御も加えた場合、システム全体の安定性および目標値への収束性に関しては、個々の制御系の干渉を考慮した注意深い議論が必要となる。本論文では、個別の問題を一つずつ議論するために、まず「把持制御」と「物体の姿勢制御」に注目して解析を行った。また、本論文で扱うシステムは冗長自由度を有しているが、これによる不良設定問題については、関節粘性を適切に設定することにより、動力学的な意味で解消されることがすでに Arimoto ら [5] によって示されており、本研究においても同様に適用可能である。ただし、具体的なシステム全体の必要自由度やハンドとアームの自由度配分については、さらに詳細な議論が必要であるため、非ホロノミック拘束と必要自由度との関係性を明らかにした上で、位置制御に関する議論と併せて次報で報告する予定である。

また、本手法では把持物体の姿勢情報がオンラインで獲得可能であると仮定している。強い仮定ではあるが、近年、視覚や触覚センサを利用した物体認識技術の進歩により、例えば視触覚センサなどを用いた物体姿勢のセンシング手法 [17] など、実現されつつある。しかし、その際に情報の遅れや、隠蔽・ノイズによる情報欠損が問題となる。情報の遅れに対しては、柔軟指の力学特性が有効に働くことが井上ら [18] によって示唆されており、提案手法においても一般的なビデオフレームレートによる物体姿勢のセンシング手法が適用可能であると予測される。また、隠蔽・ノイズによる情報欠損については、仮想フレームによる把持物体の姿勢制御手法 [15] [19] とのシームレスな連携により、安定把持を維持しながら、目標姿勢を漸近的に実現できる可能性がある。これらの有効性については、今後、試作機を用いた実験により検証を行う予定である。

謝 辞 本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費の助成および次世代研究スーパスター養成プログラム（九州大学総長裁量経費）の支援を受けました。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] M.R. Cutkosky: Grasping and Fine Manipulation. Kluwer Academic, 1985.
- [2] R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry: Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994.
- [3] K.B. Shimoga: "Robot grasp synthesis algorithms: A survey," Int. J. Robotics Research, vol.15, no.3, pp.230-266, 1996.
- [4] A. Bicchi: "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road towards simplicity," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.16, no.6, pp.652-662, 2000.
- [5] S. Arimoto: Control Theory of Multi-fingered Hands. A Modelling and Analytical-Mechanics Approach for Dexterity and Intelligence. Springer, 2008.
- [6] K. Ohnishi, T. Tajima and Y. Saito: "Anthropomorphic hand control for robotic hand-arm system," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.2, pp.1255-1259, 2000.
- [7] K. Nagai and T. Yoshikawa: "Grasping and manipulation by arm/multifingered-hand mechanisms," Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1040-1047, 1995.
- [8] J.-H. Bae, S. Arimoto, R. Ozawa, M. Sekimoto and M. Yoshida: "A unified control scheme for a whole robotic arm-fingers system in grasping and manipulation," Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.2131-2136, 2006.

- [9] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa: "Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-fingered Hand-Arm System," Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2264-2270, 2009.
- [10] A.J. Kovio and N. Houshang: "Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller," IEEE Trans. of Syst., Man, and Cybern., vol.21, no.1, pp.134-142, 1992.
- [11] Y. Yokokohji, M. Sakamoto and T. Yoshikawa: "Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.3202-3208, 1999.
- [12] A. Namiki, Y. Nakabo, I. Ishii and M. Ishikawa: "1ms sensory-motor fusion system," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol.5, no.3, pp.244-252, 2000.
- [13] 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.
- [14] 吉田, 有本, 田原, 羅: "順序関係が無い関節と柔軟な指先を有する 2 本指ロボットを用いた安定把持制御", 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1E2-08, 2009.
- [15] K. Tahara, S. Arimoto and M. Yoshida: "Dynamic object manipulation using a virtual frame by a triple soft-fingered robotic hand," Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.4322-4327, 2010.
- [16] T. Wimböck, C. Ott and G. Hirzinger: "Passivity-based Object-Level Impedance Control for a Multifingered Hand," Proc. of the 2006 IEEE/RSJ on Intelligent Robots and Systems, pp.4621-4627, 2006.
- [17] 亀崎, 小川原, 倉爪, 長谷川: "ロボットハンドによって操作される物体の視触覚情報に基づく位置姿勢計測", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1A3-07, 2009.
- [18] 井上, 松井, 平井: "視覚情報遅れを考慮した 2 指 1 自由度対ロボットハンドによる対向操り動作", 計測自動制御学会論文集, vol.43, no.12, pp.1-10, 2008.
- [19] 河村, 田原, 倉爪, 長谷川: "把持物体のオンライン位置姿勢情報の欠損にロバストな動的物体操作", 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 3H1-2, 2010.

付録 A. V_s の 導 出

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}V_s &= -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{u}_s \\
 &= -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ A \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \right\} \\
 &= -A \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{x}}_{0i}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) \\
 &= \frac{A}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{x}}_{0i}^T \left(N \mathbf{x}_{0i} - \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_{0j} \right) \\
 &= \frac{A}{N} \left(N \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{x}}_{0i}^T \mathbf{x}_{0i} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \dot{\mathbf{x}}_{0i}^T \mathbf{x}_{0j} \right) \\
 &= \frac{A}{2N} \frac{d}{dt} \left(N \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{0i}^T \mathbf{x}_{0i} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_{0i}^T \mathbf{x}_{0j} \right) \\
 &= \frac{A}{4N} \frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x}_{0j})^2 \right\} \quad (\text{A.1})
 \end{aligned}$$

付録 B. V_o および D の導出

拘束条件より以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
\Delta r_i & \begin{bmatrix} -C_{iZ}^T \\ C_{iX}^T \end{bmatrix} (\omega_i - \omega) \\
&= \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} (\dot{x} - \dot{x}_{0i}) - (x - x_{0i})^T \begin{bmatrix} C_{iX} \times \\ C_{iZ} \times \end{bmatrix} \omega \\
&= \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} (\dot{x} - \dot{x}_{0i}) + \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} (x - x_{0i}) \times \omega \\
&= \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} \{(\dot{x} - \dot{x}_{0i}) + (x - x_{0i}) \times \omega\} \quad (B.2)
\end{aligned}$$

よって, $\Gamma = \begin{bmatrix} -C_{iZ}^T \\ C_{iX}^T \end{bmatrix}$ とおくと,

$$\begin{aligned}
\omega_i - \omega &= \frac{1}{\Delta r_i} \Gamma^+ \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} \{(\dot{x} - \dot{x}_{0i}) + (x - x_{0i}) \times \omega\} \\
&\quad + (I_{\text{unit}} - \Gamma^+ \Gamma) \zeta_i \quad (B.3)
\end{aligned}$$

となる。ただし,

$$\Gamma^+ = \Gamma^T (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \quad (B.4)$$

であり, ζ_i は任意ベクトルである。ここで, 式 (B.3) 中の冗長成分 $(I_{\text{unit}} - \Gamma^+ \Gamma) \zeta_i$ は接触面に対して垂直な C_{iY} 方向の指先の回転運動に関する成分であり, 回転拘束条件には無関係である。そこで本成分を省略し, さらに

$$\Gamma^+ \begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} = [C_{iY} \times] \quad (B.5)$$

であるので, 以下の式が成り立つ。

$$\omega_i = \omega + \frac{1}{\Delta r_i} \frac{d}{dt} \{C_{iY} \times (x - x_{0i})\} \quad (B.6)$$

よって, V_o および D は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} V_o + D &= -\dot{q}^T u_o \\
&= -\dot{q}^T \left(K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}^T B \right) \\
&= -K_o \sum_{i=1}^N \omega_i^T B \\
&= -NK_o \omega^T B \\
&\quad + \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[\frac{d}{dt} \{C_{iY} \times (x - x_{0i})\} \right]^T B \quad (B.7)
\end{aligned}$$

このとき,

$$\begin{aligned}
-NK_o \omega^T B &= -NK_o \left\{ r_{xd}^T (\omega \times r_x) \right. \\
&\quad \left. + r_{yd}^T (\omega \times r_y) + r_{zd}^T (\omega \times r_z) \right\} \\
&= NK_o \left(-r_{xd}^T \dot{r}_x - r_{yd}^T \dot{r}_y - r_{zd}^T \dot{r}_z \right) \quad (B.8)
\end{aligned}$$

となる。また,

$$\begin{aligned}
r_x^T \dot{r}_x + r_y^T \dot{r}_y + r_z^T \dot{r}_z &= r_x^T (\omega \times r_x) + r_y^T (\omega \times r_y) \\
&\quad + r_z^T (\omega \times r_z) \\
&= 0 \quad (B.9)
\end{aligned}$$

を用いることで, 以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
NK_o \left(-r_{xd}^T \dot{r}_x - r_{yd}^T \dot{r}_y - r_{zd}^T \dot{r}_z \right) \\
= \frac{NK_o}{2} \frac{d}{dt} \left\{ (r_x - r_{xd})^2 + (r_y - r_{yd})^2 \right. \\
\left. + (r_z - r_{zd})^2 \right\} \quad (B.10)
\end{aligned}$$

よって,

$$V_o = \frac{NK_o}{2} \left\{ (r_x - r_{xd})^2 + (r_y - r_{yd})^2 \right. \\
\left. + (r_z - r_{zd})^2 \right\} \quad (B.11)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[\frac{d}{dt} \{C_{iY} \times (x - x_{0i})\} \right]^T B \quad (B.12)$$

付録 C. 式 (46) の導出

式 (45) より,

$$\begin{aligned}
D &= \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[\frac{d}{dt} \{C_{iY} \times (x - x_{0i})\} \right]^T B \\
&= \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left\{ (x - x_{0i})^T (RR_d^T - R_d R^T) \dot{C}_{iY} \right. \\
&\quad \left. + (\dot{x} - \dot{x}_{0i})^T (RR_d^T - R_d R^T) C_{iY} \right\} \quad (C.13)
\end{aligned}$$

となる。

式 (C.13) における D の各変数の関係を **Table 4** のように定める。 A , B はともに列ベクトルであり, θ は A と B のなす角を示す。このとき, A と B の内積は $|A||B|\cos\theta$ であり,

$$\Delta r_i = C_{iY}^T (x - x_{0i}) - Y_i \quad (C.14)$$

であるので, $\Delta \dot{r}_i$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{r}_i &= \dot{C}_{iY}^T (x - x_{0i}) + C_{iY}^T (\dot{x} - \dot{x}_{0i}) \\
&= |x - x_{0i}| |\dot{C}_{iY}| \cos \theta_1 + |\dot{x} - \dot{x}_{0i}| |C_{iY}| \cos \theta_2 \quad (C.15)
\end{aligned}$$

同様に D は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
D &= \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left\{ |x - x_{0i}| \left(|RR_d^T \dot{C}_{iY}| \cos \theta_3 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + |-R_d R^T \dot{C}_{iY}| \cos \theta_4 \right) \right. \\
&\quad \left. + |\dot{x} - \dot{x}_{0i}| \left(|RR_d^T C_{iY}| \cos \theta_5 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + |-R_d R^T C_{iY}| \cos \theta_6 \right) \right\} \\
&= \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left\{ |x - x_{0i}| |\dot{C}_{iY}| (\cos \theta_3 - \cos \theta_4) \right. \\
&\quad \left. + |\dot{x} - \dot{x}_{0i}| |C_{iY}| (\cos \theta_5 - \cos \theta_6) \right\} \quad (C.16)
\end{aligned}$$

Table 4 θ is an angle between A and B

A	B	θ
$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})$	$\dot{C}_{iY}$	θ_1
$(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{0i})$	C_{iY}	θ_2
$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})$	$RR_d^T \dot{C}_{iY}$	θ_3
$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})$	$-R_d R^T C_{iY}$	θ_4
$(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{0i})$	$RR_d^T C_{iY}$	θ_5
$(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{0i})$	$-R_d R^T C_{iY}$	θ_6

Fig. 11 Positions of vectors in Table 4

ここで以下に表す二つの単位ベクトル $\mathbf{e}_a = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i})/|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}|$, $\mathbf{e}_b = \dot{C}_{iY}/|\dot{C}_{iY}|$ を用いるとそれぞれのベクトル同士の関係は Fig. 11 のようになる. α は $\mathbf{e}_b$ と $RR_d^T \mathbf{e}_b$ のなす角を示し, β は xy 平面における x 軸と $RR_d^T \mathbf{e}_b$ とのなす角を示す.

このとき, 各ベクトルの成分は $\mathbf{e}_a = (\sin \theta_1, 0, \cos \theta_1)$, $\mathbf{e}_b = (0, 0, 1)$, $RR_d^T \mathbf{e}_b = (-\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha)$, $-R_d R^T \mathbf{e}_b = (-\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, -\cos \alpha)$ となる. Table 4 から $\mathbf{e}_a$ と $RR_d^T \mathbf{e}_b$ のなす角は θ_3 であるので,

$$\begin{aligned} \cos \theta_3 &= \frac{\mathbf{e}_a \cdot RR_d^T \mathbf{e}_b}{|\mathbf{e}_a| |RR_d^T \mathbf{e}_b|} = \mathbf{e}_a \cdot RR_d^T \mathbf{e}_b \\ &= -\sin \theta_1 \sin \alpha \cos \beta + \cos \theta_1 \cos \alpha \end{aligned} \quad (C.17)$$

となる. 同様にして以下の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} \cos \theta_4 &= \frac{\mathbf{e}_a \cdot (-R_d R^T \mathbf{e}_b)}{|\mathbf{e}_a| |-R_d R^T \mathbf{e}_b|} = \mathbf{e}_a \cdot (-R_d R^T \mathbf{e}_b) \\ &= -\sin \theta_1 \sin \alpha \cos \beta - \cos \theta_1 \cos \alpha \end{aligned} \quad (C.18)$$

式 (C.17), (C.18) より

$$\cos \theta_3 - \cos \theta_4 = 2 \cos \theta_1 \cos \alpha \quad (C.19)$$

となる. $\theta_2, \theta_5, \theta_6$ についても同様に以下の関係式が成り立つ.

$$\cos \theta_5 - \cos \theta_6 = 2 \cos \theta_2 \cos \alpha \quad (C.20)$$

式 (C.19), (C.20) を式 (C.16) に代入すると以下の関係式を得る.

$$\begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^N \frac{2K_o \cos \alpha}{\Delta r_i} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}| |\dot{C}_{iY}| \cos \theta_1 \right. \\ &\quad \left. + |\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{0i}| |C_{iY}| \cos \theta_2 \right) \end{aligned} \quad (C.21)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{2K_o \cos \alpha}{\Delta r_i} \Delta \dot{r}_i \quad (C.22)$$

$$= \sum_{i=1}^N 2K_o \cos \alpha \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \quad (C.23)$$

河村晃宏 (Akihiro Kawamura)

2010 年九州大学大学院システム情報科学府情報知能工学専攻修士課程修了. 現在同博士課程に在学中. 同年より日本学術振興会特別研究員. 多指ハンドアームシステムを用いた動的物体把持・操作の研究に従事. IEEE, 計測自動制御学会等の会員.

(日本ロボット学会学生会員)

倉爪 亮 (Ryo Kurazume)

1991 年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了. 同年 (株) 富士通研究所入社. 1995 年東京工業大学工学部機械宇宙学科助手. 2000 年スタンフォード大客員研究員. 同年東京大学生産技術研究所博士研究員. 2002 年九州大学大学院システム情報科学研究院情報知能工学部門助教授を経て, 2007 年より同教授. 現在に至る. 群ロボット, 歩行機械, レーザ計測などに関する研究に従事. IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 電子情報通信学会等の会員. 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任准教授を経て, 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 年より理化学研究所 RTC 客員研究員を併任. 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)

長谷川勉 (Tsutomu Hasegawa)

1973 年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業. 同年通産省工業技術院電子技術総合研究所研究員を経て, 1992 年より九州大学工学部情報工学科教授. 改組により同大学大学院システム情報科学研究院情報知能工学部門教授. 現在に至る. 知能ロボットに関する研究に従事. IEEE, 計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会, 電子情報通信学会等の会員. 工学博士.

(日本ロボット学会正会員)