

# 動的物体操作における 指間相対姿勢拘束を用いた把持領域の拡張\*

河村 晃宏<sup>\*1</sup>, 田原 健二<sup>\*2</sup>, 倉爪 亮<sup>\*2</sup>, 長谷川 勉<sup>\*2</sup>

## Dynamic Grasping and Manipulation Method for Various Shaped Objects using Relative Attitude Constraints between Fingers

Akihiro KAWAMURA<sup>\*3</sup>, Kenji TAHARA<sup>\*4</sup>, Ryo KURAZUME<sup>\*4</sup> and Tsutomu HASEGAWA<sup>\*4</sup>

<sup>\*3</sup> Kyushu University, Dept. of Intelligent Systems, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 819-0395 Japan

<sup>\*4</sup> Kyushu University, Graduate Faculty of Information Science and Electrical Engineering  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 819-0395 Japan

This paper proposes a novel dynamic object grasping and manipulation method for a various shaped object using relative attitude constraints between fingers. The relative attitude constraints play a role of generating reaction forces against rolling constraint forces arising between each fingertip and object surface. Eventually, the reaction forces prevent the overall system getting out of a force/torque equilibrium condition in a final state. Firstly, the Lagrange's equation of motion for the overall system is derived. Next, a control signal which accomplishes stable grasping and manipulation of the object with a new additional term to constraint the attitude of each fingertip is designed. After that, the stability of the overall system is verified through the analysis of the closed-loop dynamics. Finally, it is demonstrated through numerical simulations that the proposed method enables to grasp arbitrary shaped objects and regulate the position and attitude of the object simultaneously.

**Key Words** : Multi-fingered Hand-arm System, Manipulation

### 1. 緒 言

多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムは、人の腕・手と似た構造から人の様な多様な物体に対する巧みな把持・操作が期待できるため、それらに関する研究が数多く行われてきた [1, 2]。筆者らはこれまで、多指ハンドアームシステムを用いて、任意多面体形状の動的な安定把持および姿勢制御手法を提案している [3, 4]。しかし、本手法では、物体の形状によって物体を安定に把持するための力・トルク平衡条件が満たされない場合が存在し、例えば、3本指を持つハンドアームシステムを用いて物体把持を行う場合、三角柱は把持可能であるが、三角錐は安定に把持することが不可能であった。これは、三角錐の各々の面が互いに平行では無く、三つの指のみでは接触面に対する法線方向の力だけでそれらの合力をゼロにすることができず、指先が接触面上を転がり続けてしまい、結果的に力・トルク平衡条件を満たす領域から逸脱してしま

うためである。一方 Arimoto らは、関節速度の時間積分を用いて転がりに対する抑制力を発生させることで、接触面法線方向力だけでは安定把持が不可能な物体に対しても、把持を実現させている [5]。しかし、本手法は安定把持のみに特化した手法であり、把持物体の位置・姿勢制御を行う場合、関節速度の時間積分項から出る力と位置・姿勢の制御入力から出る力とが干渉し合い、目標点以外の点で平衡状態に陥るため、正確な位置・姿勢制御を行うことができない。また、Tahara らは、仮想フレームを用いた物体の位置・姿勢手法を提案している [6]。本手法は、特に転がりの抑止を考慮してはいないが、結果として位置・姿勢制御入力がそれらを抑止するため、安定把持および位置・姿勢制御が実現されている。しかし、本手法で操作しているのは、ロボットの指先位置によって決定された仮想的な物体の位置・姿勢であり、実際の物体位置・姿勢の目標への収束を保証する物ではなく、正確な操作には不向きである。

本稿では、これまで筆者らが提案してきた動的物体把持手法に新たな入力を加えることにより、より多様な形状の物体に対する安定把持・操作を可能とする手

<sup>\*1</sup> 九州大学大学院システム情報科学府情報知能工学専攻  
〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

<sup>\*2</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院  
〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地  
Email: kawamura@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

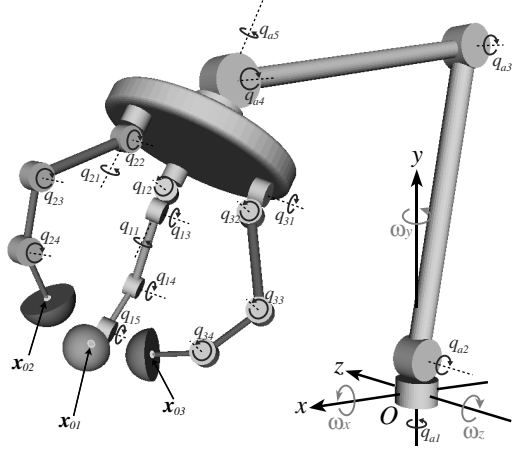


Fig. 1 Multi-fingered hand-arm system

法を提案する．本手法は，各指先の相対姿勢に対して仮想的な拘束力を発生させることにより，結果として指先の転がりを抑制する反力を発生させる．まず，指先-物体間の転がりを考慮したシステム全体のダイナミクスを導出する．次に，これまで提案してきた物体の動的な把持および位置・姿勢制御入力に加え，転がり反力を発生させる指間の仮想姿勢拘束入力を提案する．そして，全ての制御入力を含んだシステム全体の閉ループダイナミクスの収束性解析を行い，最後に数値シミュレーションによって提案手法の有効性を示す．

## 2. 多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムのモデルとダイナミクス

本論文で扱うハンドアームシステムの一つの例を Fig.1 に示す．このモデルは多指ハンド部とアーム部によって構成されており，それぞれ任意の自由度を持つ．ただし，物体操作に必要な自由度は有しているものとする．また，把持対象物は指先と物体の接触面が平面で構成されている任意形状の物体とする．全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．本論文では，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易くするため，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示し， $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$  は指先半球中心位置を示す．以降， $i$  は  $i$  番目の指を意味し，全て慣性座標系で表された値とする．また，腕部と  $i$  番目の指はそれぞれ  $N_a$  と  $N_i$  の自由度を持つ．腕部の関節角は  $q_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ ， $i$  番目の指の関節角は  $q_{0i} \in \mathbb{R}^{N_i}$  と表し，ハンドアームシステム全体の関節角ベクトルである  $q$  は  $N$  本の指を持つ

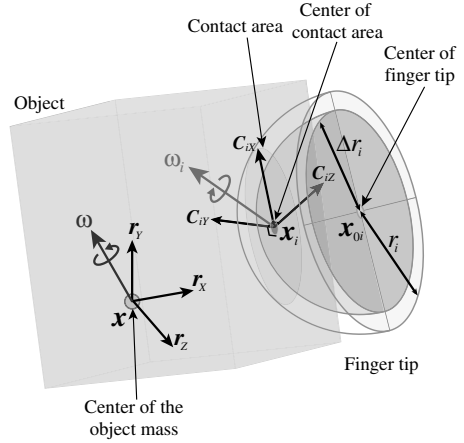


Fig. 2 Contact model at the center of the contact area

時， $(q = (q_a^T, q_{01}^T, q_{02}^T, \dots, q_{0N}^T)^T)$  のように表す．Fig.2 は把持対象物と指先との関係を示しており， $O_{c.m.}$  は物体の質量中心を示す． $x_i \in \mathbb{R}^3$  は接触面中心の位置を示し， $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$  は質量中心  $O_{c.m.}$  の位置を， $\omega$  は  $O_{c.m.}$  における物体の姿勢角速度ベクトルを示す．更に物体姿勢を回転行列  $R = (r_x, r_y, r_z) \in SO(3)$  で表し，慣性座標系からみた接触面中心における座標系を， $RR_{Ci} = (C_{iX}, C_{iY}, C_{iZ})$  で表す．ただし， $R_{Ci}$  は接触面中心の姿勢を表す回転行列であり， $C_{iY}$  は接触面に対して垂直な単位ベクトルである．

2.1 拘束条件 まず，3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．指先-把持物体間の滑りの起こらない回転接触の条件は非ホロノミックな拘束条件であり，全システムの数に関する各ベクトル  $\dot{q}, \dot{x}, \omega$  について線形となるため，Pfaffian 拘束として以下の様に表すことができる．

$$\begin{bmatrix} X_{iq} \\ Z_{iq} \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} X_{ix} \\ Z_{ix} \end{bmatrix} \dot{x} + \begin{bmatrix} X_{i\omega} \\ Z_{i\omega} \end{bmatrix} \omega = \mathbf{0}, \quad (1)$$

ただし，

$$\begin{cases} X_{iq} = \Delta r_i C_{iZ}^T J_{\Omega i} - C_{iX}^T J_{0i}, & X_{ix} = C_{iX}^T \\ X_{i\omega} = \{C_{iX} \times (x - x_{0i})\}^T - \Delta r_i C_{iZ}^T \\ Z_{iq} = -\Delta r_i C_{iX}^T J_{\Omega i} - C_{iZ}^T J_{0i}, & Z_{ix} = C_{iZ}^T \\ Z_{i\omega} = \{C_{iZ} \times (x - x_{0i})\}^T + \Delta r_i C_{iX}^T, \end{cases} \quad (2)$$

$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in \mathbb{R}^3$  は物体の瞬間回転軸ベクトルである．また， $\Delta r_i$  は指先半球中心と接触面との距離を示し(図2)， $J_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心における姿勢角速度ベクトルの各関節角  $\dot{q} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列， $J_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心の位置  $x_{0i}$  の各関節角  $q \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列である．

2.2 ダイナミクス 式(1)に示した拘束条件を考慮した、ロボットと把持対象物についてのLagrangeの運動方程式は以下のように表される。

For the multi-fingered hand-arm system:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left\{ \frac{1}{2}\dot{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) + \mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right\} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}}^T + \sum_{i=1}^N (\mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{C}_{iY} \mathbf{f}_i + \mathbf{X}_{iq}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{iq}^T \lambda_{iZ}) = \mathbf{u}, \quad (3)$$

For the object:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^N (-\mathbf{f}_i \mathbf{C}_{iY} + \mathbf{X}_{ix}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{ix}^T \lambda_{iZ}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \boldsymbol{\omega}}^T \\ - \sum_{i=1}^N \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} \mathbf{f}_i \\ + \sum_{i=1}^N (\mathbf{X}_{i\omega}^T \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{i\omega}^T \lambda_{iZ}) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  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、 $\mathbf{I}$  は把持物体の慣性テンソル、 $\mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  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、 $\lambda_{iX}$  と  $\lambda_{iZ}$  はラグランジュ乗数である。また、 $\mathbf{f}_i$  は指先接触面中心位置における最大変位量  $r_i - \Delta r_i$  によって発生する反力であり、 $T_i$  は指先の面接触による捻り方向の粘性摩擦を示すエネルギー消散関数である。これらのラグランジュ乗数を含む項によって、ロボットと把持物体間で回転接触拘束を満足する動作を実現することが出来る。

### 3. 制 御 入 力

本章では、物体の安定把持、位置姿勢制御のための制御入力に加えてより多様な対象物体形状に適用するための新たな制御入力を示す。まず、物体の安定把持の制御入力  $\mathbf{u}_s$  を以下に示す。

$$\mathbf{u}_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0j}) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{0i}, \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)} > \mathbf{0}$  は関節粘性係数を表す正定対角行列、 $f_d$  は目標把持力である。この制御入力はそれぞれの指先が全ての指先の中心の平均位置に向かうような制御を行う。

次に、物体の位置制御のための制御入力を示す。一般的に物体の位置とは物体の質量中心位置  $\mathbf{x}$  を指すこ

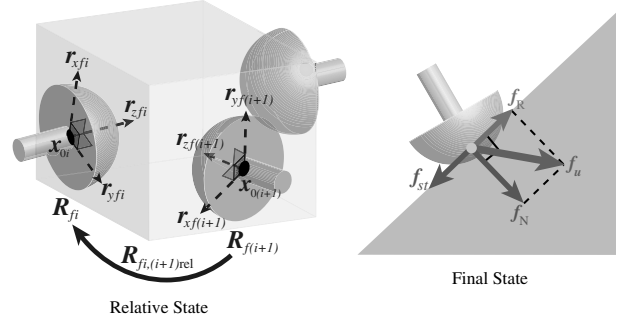


Fig. 3 Relative state and final state

とが多い。しかし、この質量中心位置は物体の形状や材質、密度などによって決まるため、事前知識なしに外界センサからこの位置情報を獲得することは困難である。そこで本手法では、各指先位置によって決まる仮想的な物体の位置  $\mathbf{x}_c$  を制御対象とし、位置制御を行う。位置制御のための制御入力  $\mathbf{u}_p$  を以下に示す。

$$\mathbf{u}_p = K_p \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_c). \quad (8)$$

ただし、 $K_p$  は正のスカラー量であり、 $\mathbf{x}_d$  は目標位置である。更に物体の姿勢制御のための制御入力を示す。本姿勢制御手法はオンライン型フィードバック制御手法であり、以下のような制御入力  $\mathbf{u}_o$  によって実現される。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_o = K_o \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{\Omega j}^T \{ (\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) \\ + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd}) \} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $K_o$  は正のスカラー量であり、物体の目標姿勢は  $\mathbf{R}_d = (\mathbf{r}_{xd}, \mathbf{r}_{yd}, \mathbf{r}_{zd})$  である。このとき、 $\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}$  は  $\mathbf{r}_x$  が  $\mathbf{r}_{xd}$  に向かうような回転モーメントを発生させる瞬時回転軸ベクトルであり、y成分とz成分についても同様である。

最後に制御対象をより多様な形状をもつ物体へ拡張するための新たな制御入力を提案する。この制御入力は各指先の相対姿勢を維持するための拘束力  $\mathbf{f}_{st}$  を発生させる。把持領域外へ向かう各指先の転がりの回転軸は指先ごとに異なるため、指先間の相対姿勢を拘束することで、結果的にこの回転軸の異なる転がる力  $\mathbf{f}_R$  に対する反力  $\mathbf{f}_{st}$  を発生させることができる(図3参照)。つまり、この制御入力は物体表面上における指先位置が力/トルク平衡条件を満足する領域に留まらせ、従来手法では平衡条件を満足できないケースについても把持および位置姿勢操作を実現する。また、この制

御入力是指先の相対姿勢は拘束するが、システムの全関節に関する拘束ではない。このため、拘束される自由度の他の部位が十分な自由度を有していれば、他の制御入力に影響を与えず、正確な把持物体の位置姿勢制御が可能である。この制御入力  $\mathbf{u}_{st}$  を以下に示す。

$$\mathbf{u}_{st} = K_{st} \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T \left\{ (\mathbf{r}_{xfi} \times \mathbf{r}_{xfid}) + (\mathbf{r}_{yfi} \times \mathbf{r}_{yfid}) + (\mathbf{r}_{zfi} \times \mathbf{r}_{zfid}) \right\}, \quad (10)$$

ただし、

$$\mathbf{R}_{fi} = (\mathbf{r}_{xfi}, \mathbf{r}_{yfi}, \mathbf{r}_{zfi}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{fid} &= (\mathbf{r}_{xfid}, \mathbf{r}_{yfid}, \mathbf{r}_{zfid}) \\ &= \mathbf{R}_{f(i-1)} \mathbf{R}_{fi,(i-1)rel} + \mathbf{R}_{f(i+1)} \mathbf{R}_{fi,(i+1)rel} \end{aligned} \quad (12)$$

であり、 $K_{st} > 0$  は正のスカラー量、 $\mathbf{R}_{fi}$  と  $\mathbf{R}_{fid}$  はそれぞれ指  $i$  の指先姿勢を表す回転行列とその目標姿勢を表す回転行列である。また、 $\mathbf{R}_{fi,jrel}$  は指  $i$  と指  $j$  の姿勢間の相対関係を表す回転行列である。Fig.3 の右の Fig. 中の  $f_u$  は他の制御入力  $\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_p, \mathbf{u}_o$  によって出力される力を示す。

これら4つの制御入力を線形結合することで本手法の制御入力  $\mathbf{u}$  は以下のように得られる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_o + \mathbf{u}_{st} \quad (13)$$

#### 4. 閉ループダイナミクス

Lagrange の運動方程式および提案する制御入力から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せる。

For the multi-fingered hand-arm system:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \left\{ \frac{1}{2}\dot{\mathbf{H}} + \mathbf{S} + \mathbf{C} \right\} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{C}_{iY} \Delta f_i \\ + \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{iq}^T \Delta \lambda_{iX} + \sum_{i=1}^N \mathbf{Z}_{iq}^T \Delta \lambda_{iZ} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \\ + \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{0i}) \times \mathbf{x}_{tr} + \sum_{i=1}^N \mathbf{C}_{iY}^T \mathbf{B} \mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{C}_{iY} \\ + \sum_{i=1}^N \left\{ -\frac{1}{\Delta r_i} \mathbf{J}_{0i}^T (\mathbf{B} \times \mathbf{C}_{iY}) \right\} = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (14)$$

For the object:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^N (-\Delta f_i \mathbf{C}_{iY} + \mathbf{X}_{ix}^T \Delta \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{ix}^T \Delta \lambda_{iZ}) \\ - \sum_{i=1}^N \left\{ \mathbf{x}_{tr} - \frac{1}{\Delta r_i} (\mathbf{B} \times \mathbf{C}_{iY}) \right\} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} - \sum_{i=1}^N \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} \Delta f_i \\ + \sum_{i=1}^N (\mathbf{X}_{i\omega}^T \Delta \lambda_{iX} + \mathbf{Z}_{i\omega}^T \Delta \lambda_{iZ}) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \boldsymbol{\omega}} \\ + \sum_{i=1}^N (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \times \left( \mathbf{x}_{tr} - \frac{1}{\Delta r_i} \mathbf{B} \times \mathbf{C}_{iY} \right) \\ = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= \frac{f_d}{\sum_{j=1}^N \Delta r_j} \\ \mathbf{x}_{tr} &= A (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0i}) + K_p (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_c) \\ \mathbf{B} &= K_{st} \mathbf{B}_{st} + K_o \mathbf{B}_o \\ \mathbf{B}_{st} &= (\mathbf{r}_{xfj} \times \mathbf{r}_{xfjd}) + (\mathbf{r}_{y fj} \times \mathbf{r}_{y fjd}) \\ &\quad + (\mathbf{r}_{z fj} \times \mathbf{r}_{z fjd}) \\ \mathbf{B}_o &= (\mathbf{r}_{xd} \times \mathbf{r}_x) + (\mathbf{r}_{yd} \times \mathbf{r}_y) + (\mathbf{r}_{zd} \times \mathbf{r}_z) \\ \Delta f_i &= f_i - \mathbf{C}_{iY}^T \mathbf{x}_{tr} \\ \Delta \lambda_{iX} &= \lambda_{iX} + \mathbf{C}_{iX}^T \mathbf{x}_{tr} + \frac{1}{\Delta r_i} \mathbf{C}_{iZ}^T \mathbf{B} \\ \Delta \lambda_{iZ} &= \lambda_{iZ} + \mathbf{C}_{iZ}^T \mathbf{x}_{tr} - \frac{1}{\Delta r_i} \mathbf{C}_{iX}^T \mathbf{B} \end{aligned} \quad (17)$$

である。

ここで、出力ベクトルを以下のように表す。

$$\dot{\boldsymbol{\Lambda}} = (\dot{\mathbf{q}}^T, \dot{\mathbf{x}}^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}^T)^T. \quad (18)$$

この出力ベクトル (18) と閉ループダイナミクス (14)–(16) の内積和を取ると、以下の式を得る。

$$\frac{d}{dt} E = -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta r_i^2) - D \leq 0 \quad (19)$$

$$E = K + V + \Delta P \geq 0 \quad (20)$$

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} \quad (21)$$

$$V = V_s + V_p + V_o \quad (22)$$

$$V_s = \frac{A}{4N} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x}_{0j})^2 \right\} \quad (23)$$

$$V_p = \frac{NK_p}{2} (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_c)^2 \quad (24)$$

$$V_o = \frac{NK_o}{2} \left\{ (\mathbf{r}_x - \mathbf{r}_{xd})^2 + (\mathbf{r}_y - \mathbf{r}_{yd})^2 + (\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_{zd})^2 \right\} \quad (25)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta r_i} \{ \bar{f}_i (\Delta r_{di} + \phi) - \bar{f}_i (\Delta r_{di}) \} d\phi, \quad (26)$$

ただし、

$$\delta r_i = \Delta r_{di} - \Delta r_i \quad (27)$$

$$D = D_{st} + D_o \quad (28)$$

$$D_{st} = \frac{d}{dt} \left\{ K_{st} \sum_{i=1}^N (1 + 2 \cos \alpha_i) \right\} \quad (29)$$

$$D_o = \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[ \frac{d}{dt} \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} \right]^T \mathbf{B} \quad (30)$$

である。

式 (27) 中の  $\Delta r_{di}$  は  $f_i = f_d$  を満たす時の  $\Delta r_i$  の値であり, 式 (29) 中の  $\alpha_i$  は回転行列  $\mathbf{R}_{f_i}^T \mathbf{R}_{f_{(i+1)}} \mathbf{R}_{f_{(i+1)rel}}^T \mathbf{R}_{f_{i+1}rel}$  の回転角,  $\Delta P$  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  $\Delta P$  は正の値をとる. また,  $V_s, V_p, V_o$  はそれぞれ, 安定把持の制御入力  $u_s$ , 位置制御の制御入力  $u_p$ , 姿勢制御の制御入力  $u_o$  によって生じるポテンシャルエネルギーを表す. このとき,  $K$  と  $V$  は正なので,  $E$  は常に正の値となる (20). また, 式 (30) は以下のように変形できる [4]:

$$D_o = \sum_{i=1}^N 2K_o \cos \beta \frac{d}{dt} \log \Delta r_i, \quad (31)$$

ただし,  $\beta$  は把持物体の初期姿勢と目標姿勢間の回転角を示す.  $|\cos \beta| \leq 1$  であることから式 (19) より以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E + D_{st} - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| \\ \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2). \end{aligned} \quad (32)$$

ここで, 以下のような  $a$  を定義する.

$$\begin{cases} a = 1 & \text{if } \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0 \\ a = -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (33)$$

このとき, 式 (32) は  $a$  を用いて以下のように書き換えられる.

$$\frac{d}{dt} W \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0, \quad (34)$$

ただし,

$$W = E + K_{st} \sum_{i=1}^N (1 + 2 \cos \alpha_i) - a \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \quad (35)$$

である. 式 (35) から以下のことがいえる.

$$\begin{aligned} W &\geq E + K_{st} \sum_{i=1}^N (1 + 2 \cos \alpha_i) - a \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \\ &\geq E - NK_{st} - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \right|. \end{aligned} \quad (36)$$

この式の右辺が正であれば以下の式が成り立つ.

$$W \geq 0. \quad (37)$$

つまり, 以下の式が満たされるとき, 常に式 (37) が成り立つ.

$$E - NK_{st} - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \right| \geq 0. \quad (38)$$

このとき, 式 (34) と (37) から以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \left\{ \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \right\} dt \\ \leq W(0) - W(\infty) \leq W(0), \end{aligned} \quad (39)$$

式 (39) は, 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  $\dot{\mathbf{q}}(t) \in L^2(0, \infty)$  となることを表している. また, 式 (1) 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もそれぞれ,  $\dot{\mathbf{x}} \in L^2(0, \infty)$ ,  $\omega \in L^2(0, \infty)$  となる. よって, 全システムの入力ベクトル  $\dot{\mathbf{A}}(t)$  は時間  $t$  について一様連続となり,  $t \rightarrow \infty$  の時  $\dot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$  および  $\ddot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$  となることがいえる [7]. したがって, それぞれの指にかかる力の合力と把持物体にかかる力の合力がゼロに収束することが保証される.

$$\Delta \lambda_\infty = (\Delta \lambda_q, \Delta \lambda_x, \Delta \lambda_\omega) \rightarrow \mathbf{0} \quad (40)$$

ただし,  $\Delta \lambda_q, \Delta \lambda_x, \Delta \lambda_\omega$  はそれぞれ, ハンドアームシステムの各関節および物体の並進・回転方向にかかる見かけの外力である.

式 (40) より, 全ての外力とそれぞれの速度が, 十分な時間が経過した後にゼロに収束することから, 把持物体の位置姿勢制御が安定に実現されることが保証できる.

## 5. 数値シミュレーション

まず, Fig.1 のような 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で六面体の位置・姿勢操作を行う数値シミュレーションを行った. このとき, 式 (12) 中の  $\mathbf{R}_{f_i, jrel}$  を初期指先姿勢より以下のように設定する.

$$\mathbf{R}_{f_i, (i+1)rel} = \mathbf{R}_{f_i, (i+1)ini}^T \mathbf{R}_{f_i ini}, \quad (41)$$

ただし,  $\mathbf{R}_{f_i, (i+1)ini}$  は  $i$  番目の初期指先姿勢と  $(i+1)$  番目の初期指先姿勢間の回転行列である. ハンドアームシステムおよび把持物体のパラメータを Table 1 に示す. Table 2 には目標把持力および各ゲイン, 把持物体の目標位置・姿勢を示す. 更にシステムの初期状態を Table 3 に示す. このときの物体の位置・姿勢の時系列データを Fig.4 と Fig.5 に示す. これらの図から物体の位置・姿勢が目標の位置・姿勢に収束していることがわかる. 次に,  $\Delta \lambda_\infty$  の各要素を Fig.6 と Fig.7 に示す. これらの図からハンドアームシステムおよび対象物体に関する全ての見かけの外力がゼロに収束することが確認できる. 同様に, ハンドアームシステムおよび対象物体に関する全ての速度がゼロに収束するこ

Table 1 Physical parameters

Triple-fingered hand-arm system

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

Object

Mass $m$	0.061[kg]
Length of each side	0.42[m]
Inertia $I$	diag(4.589, 2.592, 4.589) $\times 10^{-2}$ [kg · m <sup>2</sup> ]

Table 2 Desired grasping force and gains

$f_d$	10.0[N]
$K_p$	3.333
$K_o$	0.119
$K_{st}$	4.286
$C_a$	diag(1.003, 0.651, 0.735, 0.278, 0.177) $\times 10^{-1}$ [Ns · m/rad]
$C_1$	diag(0.606, 0.687, 0.786, 0.642, 0.198) $\times 10^{-2}$ [Ns · m/rad]
$C_2$	diag(0.468, 0.780, 0.318, 0.099) $\times 10^{-2}$ [Ns · m/rad]
$C_3$	diag(0.648, 0.780, 0.318, 0.099) $\times 10^{-2}$ [Ns · m/rad]
$x_d$	(0.000, 0.450, 0.900) <sup>T</sup> [m]
$R_d$	$\begin{bmatrix} 0.82 & 0.21 & -0.54 \\ -0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.53 & 0.08 & 0.84 \end{bmatrix}$

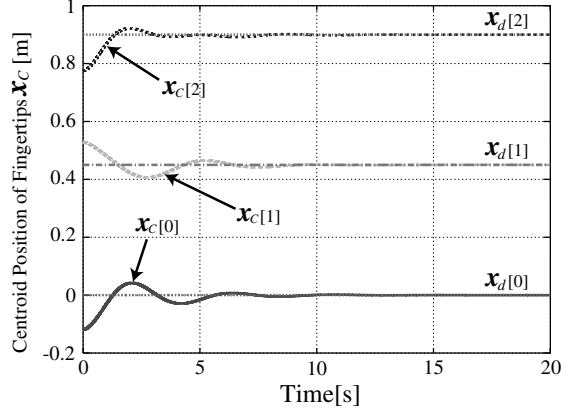
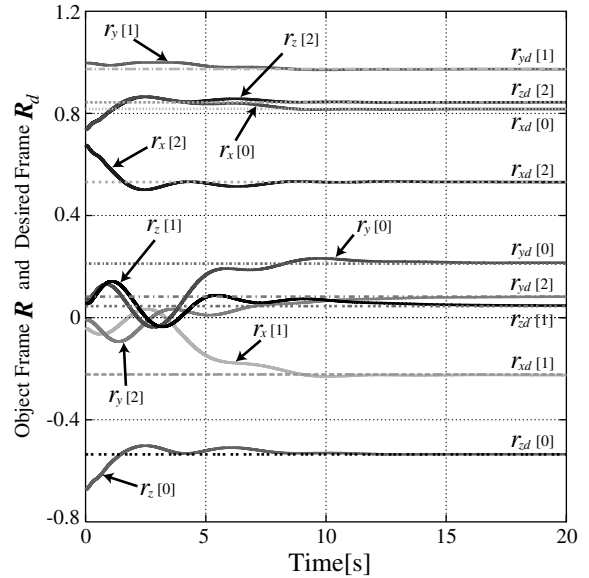
とを確認した．これらの結果より，本論文で提案した手法を用いることで，従来の提案手法では把持出来なかった物体に対して，把持物体の目標位置姿勢を実現し，更に力/トルク平衡条件を満足することが可能であることがわかった．また，指間の相対姿勢拘束のための制御入力  $u_{st}$  を用いない場合についても同様に数値シミュレーションを行った．Fig.8 にその様子を示す．Fig.8 の上の図は初期状態，左下の図と右下の図にはそれぞれ  $u_{st}$  無しの場合と有りの場合の開始から 5s 後の状態を示す．これらの図より，指間相対姿勢拘束を用いることで物体表面上における指先の転がりを抑制できていることがわかる．

## 6. 結 言

本稿ではより多様な形状の物体に対して把持・操作を行うための新機能を備えた把持物体の位置姿勢制御手法を提案した．まず，ハンドアームシステムおよび

Table 3 Initial condition

$\dot{q}$	$\mathbf{0}$ [rad/s]
$q_a$	(-0.176, -1.700, 1.903, 1.360, 0.519) <sup>T</sup> [rad]
$q_{01}$	(0.014, 0.042, -0.997, 1.590, 0.306) <sup>T</sup> [rad]
$q_{02}$	(0.011, -0.921, 1.218, 1.010) <sup>T</sup> [rad]
$q_{03}$	(-0.056, -0.806, 1.074, 1.075) <sup>T</sup> [rad]
$\dot{x}$	$\mathbf{0}$ [m/s]
$x$	(-0.120, 0.529, 0.775) <sup>T</sup> [m]
$\omega$	$\mathbf{0}$ [rad/s]
$R$	$\begin{bmatrix} 0.77 & 0.07 & -0.67 \\ -0.04 & 1.00 & 0.05 \\ 0.67 & -0.01 & 0.74 \end{bmatrix}$

Fig. 4 Transient responses of the centroid position of fingertips  $x_c$ Fig. 5 Transient responses of the object frame  $R = (r_x, r_y, r_z)$ 

対象物体のモデルおよびダイナミクスを示し，本手法で提案する制御入力によって，より多様な形状をもつ物体に対して安定に把持および位置姿勢制御が実現できることを，収束性の解析および数値シミュレーションによって示した．

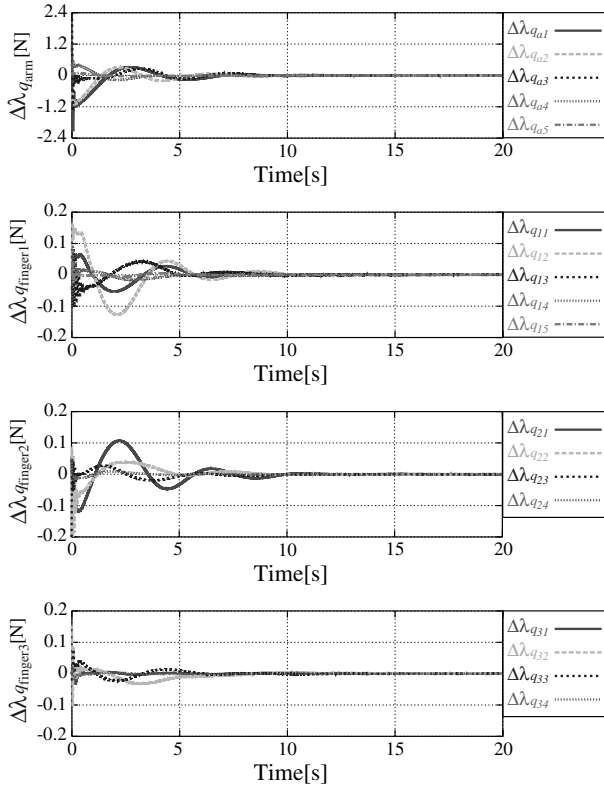


Fig. 6 Transient responses of  $\Delta\lambda_q$

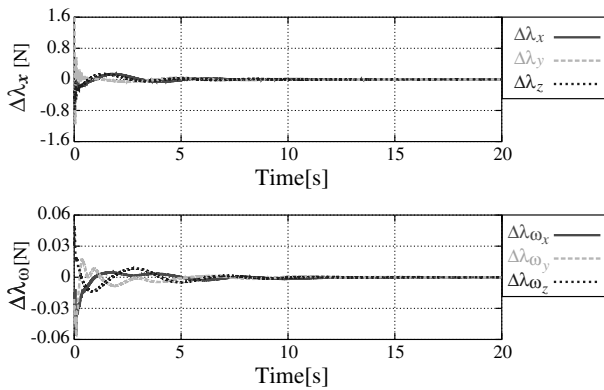


Fig. 7 Transient responses of  $\Delta\lambda_x$  and  $\Delta\lambda_\omega$

今後は、実環境下での本手法の有効性を確認するため、視覚センサや姿勢センサなどを用いて物体の姿勢を獲得し、実機による実験を行う予定である。また、筆者らの動的物体把持手法は初期物体把持姿勢誤差に頑健な手法であるが、本研究では、素性の良い初期物体把持姿勢を仮定している。把持可能領域内の素性の良い初期物体把持姿勢を導出する方法については別途検討する必要がある。

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ー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

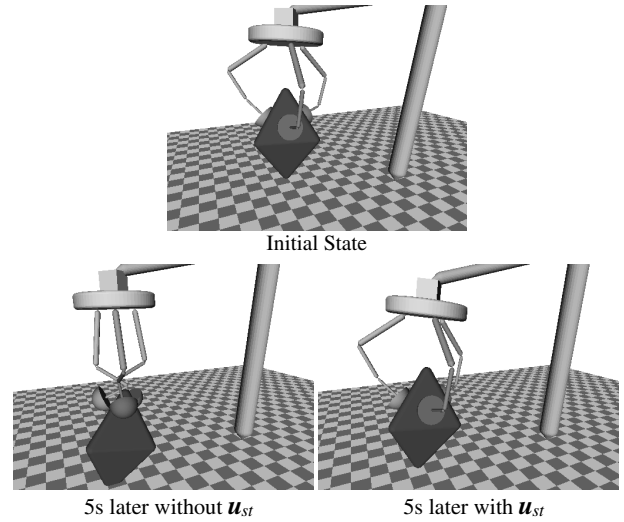


Fig. 8 Simulation for position and attitude control of the grasped object

ます。

## 文 献

- (1) K. B. Shimoga, "Robot grasp synthesis algorithms: A survey," *Int. J. Robotics Research*, vol. 15, no. 3, pp. 230–266, 1996.
- (2) 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.
- (3) A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-fingered Hand-Arm System," *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2264–2270, St. Louis, Missouri, 2009.
- (4) A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dexterous Object Manipulation by a Human-Like Hand-Arm System with Unified Controller," *1st Int. Conf. on Applied Bionics and Biomechanics*, Venice, Italy, 2010 (to appear).
- (5) S. Arimoto and M. Yoshida, "Modeling and control of three-dimensional grasping by a pair of robot fingers," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.1, No.1, pp.2-11, 2008.
- (6) 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, Anchorage, AK, 2010.
- (7) S. Arimoto, "A differential-geometric approach for 2-D and 3-D object grasping and manipulation," *Annual Review in Control*, Vol. 31, pp. 189–209, 2007.