

# 視触覚フィードバックを用いた最適把握行動

並木 明夫\* 石川 正俊\*

## Optimal Grasping Using Visual and Tactile Feedback

Akio Namiki\* and Masatoshi Ishikawa\*

A grasping algorithm that takes into account both visual and tactile feedback has been developed for a system consists of a multifingered hand and a vision. The grasping process consists of two phases: the non-contact phase, i.e. the approach of the robot hand on the object, is realized using visual information while the contact phase, i.e. the touch of the object by the robot fingers is made using both visual and tactile information. To achieve these two processes we present an original algorithm that allows a multifingered hand to grasp an object using visual and tactile feedback. In this algorithm two types of motion are taken into account: the grasping motion for bringing fingers to the object surface, and the preshaping motion for changing the shape of the hand to the optimal position. Because these two types of motion are controlled based on sensory feedback, adaptiveness to changes of the environment is realized. The effectiveness of the proposed algorithm has been verified experimentally.

**Key Words:** Multifingered Hand, Optimal Grasping, Preshaping, Visual and Tactile Feedback

### 1. はじめに

多指ハンドシステムにおいて、適切な把握位置姿勢や把握形状を決定するアルゴリズムについて、従来より多くの研究が行われてきた。代表的なものとして、多面体の対象に対して解析的に指先配置を決定するアルゴリズム [1]~[4] や、把握の行動過程を解析することで把握の位置姿勢を定める手法 [5] [6]、人間を模倣することで把握形状を決定する研究 [7] [8]、などが挙げられる。しかし、これらの研究のほとんどでは、把握形状の計算と把握制御の処理を分離して実行することが前提となっており、あらかじめ把握形状の計算が既知の対象モデルに対して行われ、その結果に対して把握制御が実行されていた。このような方法では、把握形状の計算アルゴリズムに視覚や触覚などのセンサフィードバックの結果が含まれないために、把握環境の時間的な変化によって生じるモデル化誤差や観測誤差が補償されず、実環境のようにパラメータの変動する環境のもとの使用には適さなかった。

この問題は、把握形状の計算アルゴリズムに視覚や触覚などの外界センサのフィードバックを含めることで解決される [9]。しかし、従来では、このようなアプローチで行われた研究は少なかった。これに該当するものとして、接触点の位置や法線ベクトルの情報を用いてオンラインで把握位置の計算を行う把握

アルゴリズムの研究 [10] が挙げられるが、逐次的な計算アルゴリズムを提案した段階に止まり、センサフィードバックを明示的に計算アルゴリズムに内在させたものではなかった。

このような背景のもとに、本論文では、センサフィードバックに基づく把握形状の決定を行うことを目的として、視触覚フィードバックを用いた把握行動アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、把握対象を視覚によって認識してから、触覚によって握るまでの把握過程を、視触覚の統合に基づいた一つのセンサフィードバック構造で実現している。また、把握の行動計画を評価関数の逐次最適化として定式化しているため、把握環境の変化に応じて最適な把握行動が実現される。本論文では、提案する把握アルゴリズムについて議論し、実際に多指ハンドシステム上に実装して把握実験を行うことで、その有効性を示す。

### 2. センサフィードバックを用いた把握行動

本節では、把握行動の途中でセンサフィードバックがどのように用いられているかを調べるために、人間の把握行動を手本として把握行動の動作解析を行う。人間の把握行動は、非接触相（手が対象から離れている状態）と接触相（触っている状態）に大きく分けることができる [7]。

まず、非接触相では、手を対象に近づけて触るまでの行動と、把握形状を対象に合わせて変える行動が並行して実行される。これらのうち後者の行動はプリシェーピングと呼ばれ、誤差や外乱に強い把握運動を行うために役立つことが知られてい

原稿受付 1999年1月8日

\* 東京大学大学院工学系研究科

\* Graduate School of Engineering, University of Tokyo

る [11]. これらの行動を実現するためには, 把握対象の位置や形状を知る必要があり, Fig. 1 (a) に示すように, 視覚フィードバックが主体となって実現されると考えられる.

一方, 接触相では, 指先を対象の表面に沿ってなぞらせたり, 持ち替えたりすることによって, 把握形状の修正が行われる. この動作を実現するためには, 対象の位置や形状の情報に加えて接触情報が必要とされる. そのため, Fig. 1 (b) に示すように, 視覚と触覚を融合したセンサフィードバックに基づいて実現されると考えられる. なお, 最も目的に適した把握形状が実現された後には操り行動が行われるが, 本論文では把握が完了するまでの動作を対象にし, 操り行動については議論しない.

このように, 把握行動は非接触相と接触相において, それぞれ異なったセンサフィードバック構造を持つ. これを多指ハンド上で実現するための方法の一つとして, 非接触相と接触相で別々のセンサフィードバック構造を用意し, 相が変化するたびに交換する方法が考えられる. しかし, 実際には相の変化を明確に区別することは困難であり, 例えば, 指が 1 本だけ接触している状態のように, どちらの相にも属さない把握状態が存在する. また, 両相の間での移行が動的に行われる場合には, 把握動作や入力されるセンサ情報に不連続性が生じることになる.

この問題を解決するために, 本論文では, Fig. 1 (c) に示すようなアーキテクチャを採用する. これは (1) 非接触相と接触相を統合して記述する把握モデルと (2) 把握の行動要素に対応した並列センサフィードバックシステムからなる. このような構造をとることによって, 把握環境の変化に影響されない不変のセンサフィードバックを構成することができ, 把握動作が不連続になることを防ぐことができる. また, 把握モデルが統一した形式で記述されているために, それに最適な形でセンサフュージョン手法を定めることが可能となる.

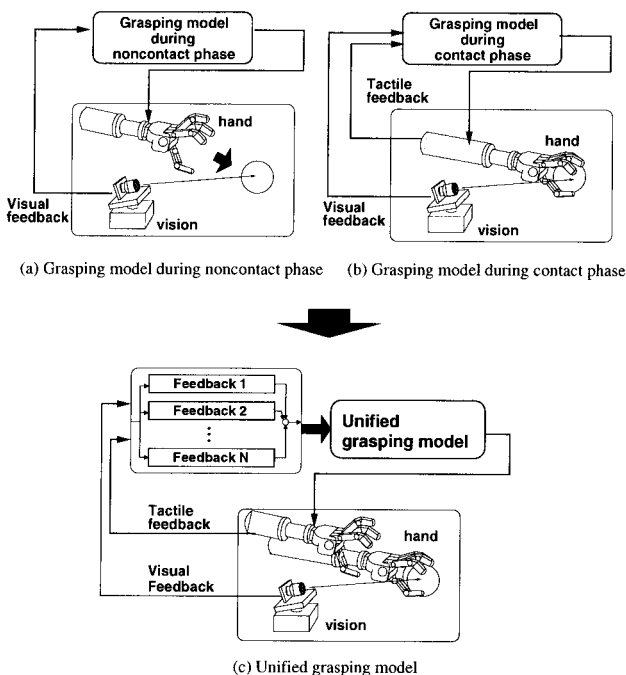


Fig. 1 Grasping model based on sensory feedback

このように複数のセンサフィードバック構造に基づく階層並列処理アーキテクチャは, 多様な環境に対応したセンサ情報処理機構を構築するのに有効であることが言われており [12], センサフュージョン [13] や, アクティブセンシング [14] の実現のために用いられている構造でもある.

また, これに関連する研究として, 反射行動を統合することで複雑な行動を実現するサブサンクションアーキテクチャ [15] や, 非線型関数に基づいた重ね合わせアルゴリズムに基づいた把握行動の研究 [16] が挙げられる. これらの研究では, 単純な行動要素の重ね合わせによる複雑なタスクの実現に主眼を置いているのに対して, 本研究では, 多様な把握環境の変化に対応することができるセンサフィードバック構造の構築が主眼である.

以下の章では, まず第 3 章において, 非接触相と接触相を統合する把握モデルである仮想接触点モデルの概念を述べ, 第 4 章において, 仮想接触点をもとにした把握行動のためのセンサフィードバックアルゴリズムを提案する. 最後に, 第 5 章において, これらの手法に基づく把握システムを構築し, 把握実験を行う.

### 3. 仮想接触点を用いた把握モデル

把握行動を運動学的に見た場合, 非接触相では自由空間での運動であるのに対して, 接触相では接触点に関して拘束された運動となっている. この運動学的な拘束条件の違いによって, 二つの相を同じ構造のセンサフィードバックで実現することが困難になっていた.

本論文では, この問題を解決するために「仮想接触点」の概念を導入する. これは, ハンドの指が把握対象から離れた位置に存在する場合においても, その指に接触する仮想的な対象面を考えることで, その仮想対象を把握しているとみなすものである. この概念図を Fig. 2 に示す.

この仮想接触点の概念を用いることで, 非接触相においても接触相と同様に, 接触点回りの演算を擬似的に計算することができる. このような仮想的な接触を考える手法はほかにも存在するが [17] [18], ここでは, 把握行動への応用を目的とし, その運動計画を行うために適した形で定式化を行う.

また, 仮想接触点には, 実質的な力学的作用は存在しないが, 擬似的に接触力を計算することができる. これを非接触相における把握形状の評価に用いることにより, 把握計画に役立ても可能である.

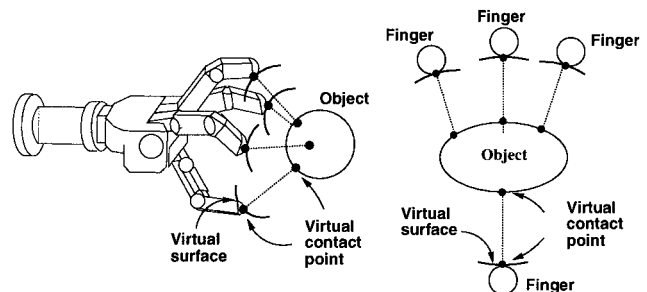


Fig. 2 Virtual contact point

### 3.1 接触距離の最小化に基づく仮想接触点の定義

仮想接触点の定義は一意には決まらず、複数の定義が考えられるが、ここでは、指と対象の距離が最小になる点を仮想接触点として定義する。

以下では、基準座標系  $C_p$  をハンド重心位置に固定し、 $C_o$  を対象重心に固定された座標系、 $C_{ij}$  をハンド上の  $i$  番目のリンクの  $j$  番目の関節に固定された座標系とする。

このとき、対象物体と各指が隣接し、それらの上で以下の条件が成立することを仮定する。

仮定 3.1 指リンクと対象表面は、ともに凸面であり、滑らかな表面を持つ。

このような仮定は、円柱形の指腹や球状の指先を持つハンドを用いて、凸面からなる対象を把握する場合には、一般に成立する。今、隣接する対象とリンクの組を通し番号  $k$  で表し、各面上に存在する点をそれぞれ  $p_k^{obj} \in \mathbf{R}^3$ 、 $p_k^{link} \in \mathbf{R}^3$  として、その点上での外向き法線ベクトルをそれぞれ  $n_k^{obj} \in \mathbf{R}^3$ 、 $n_k^{link} \in \mathbf{R}^3$  と表す。このもとで、仮想接触点を次のように定義する。

定義 3.1 次式が満たされる場合に、点  $p_k^{obj}$  を対象側の仮想接触点、点  $p_k^{link}$  を指側の仮想接触点、 $d_k \in \mathbf{R}$  を接触距離と定義する。

$$p_k^{obj} - p_k^{link} = n_k^{link} d_k \quad (1)$$

$$n_k^{obj} = -n_k^{link} \quad (2)$$

この定義のもとでは、 $d_k$  はハンドと対象の最短距離に等しくなる(付録 6 参照)。また、 $d_k = 0$  のときには、 $p_k^{obj} = p_k^{link}$  となり、通常の接触点と等しくなる。これより、従来から把握の解析で用いられている点接触モデル [19] の自然な拡張になっていることが分かる。

### 3.2 仮想接触点上での微小変化

ハンドや対象の運動による仮想接触点の微小変化について調べる。式 (1) は次のように書き換えられる。

$$x^o + R^o r_k^o - (x^{ij} + R^{ij} r_k^{ij}) = n_k d_k \quad (3)$$

ここで、 $x^o \in \mathbf{R}^3$  と  $x^{ij} \in \mathbf{R}^3$  は、それぞれ、座標系  $C_o$  と座標系  $C_{ij}$  の位置ベクトルを表し、 $R^o \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  と  $R^{ij} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  は、それぞれ、座標系  $C_o$  と  $C_{ij}$  の姿勢を表す回転行列である。 $r_k^o \in \mathbf{R}^3$  は  $C_o$  からみた  $p_k^{obj}$  の位置、 $r_k^{ij} \in \mathbf{R}^3$  は  $C_{ij}$  からみた  $p_k^{link}$  の位置を表す。また、 $n_k = n_k^{link} = -n_k^{obj}$  である。

式 (3) の両辺を微分することにより、

$$\begin{aligned} \dot{x}^o + \omega^o \times R^o r_k^o - (\dot{x}^{ij} + \omega^{ij} \times R^{ij} r_k^{ij}) \\ = -R^o \dot{r}_k^o + R^{ij} \dot{r}_k^{ij} + \dot{n}_k d_k + n_k \dot{d}_k \end{aligned} \quad (4)$$

が得られる。ここで、 $\omega^o \in \mathbf{R}^3$  は  $C_o$  周りの角速度、 $\omega^{ij} \in \mathbf{R}^3$  は  $C_{ij}$  周りの角速度を表す。

一方、関節  $C_{ij}$  の速度と角速度は、一般に次の関係式を満たす。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^{ij} \\ \omega^{ij} \end{bmatrix} = J^{ij} \dot{\theta} \quad (5)$$

ここで、 $\theta \in \mathbf{R}^{m_\theta}$  はすべての関節角を並べたベクトルであり、 $J^{ij} \in \mathbf{R}^{6 \times m_\theta}$  は関節角ヤコビアンを表している。また、 $m_\theta$  は関節の総数を表している。

式 (4) と式 (5) をまとめることにより、

$$\begin{aligned} W_k^o v^o - W_k^{ij} J^{ij} \dot{\theta} \\ = -R^o \dot{r}_k^o + R^{ij} \dot{r}_k^{ij} + \dot{n}_k d_k + n_k \dot{d}_k \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ただし、各変数は次で表されるものである。

$$\begin{aligned} W_k^o &\equiv [I_3 \quad -(R^o r_k^o \times)] \in \mathbf{R}^{3 \times 6} \\ W_k^{ij} &\equiv [I_3 \quad -(R^{ij} r_k^{ij} \times)] \in \mathbf{R}^{3 \times 6} \\ v^o &\equiv [\dot{x}^{oT}, \omega^{oT}]^T \in \mathbf{R}^6 \end{aligned}$$

ここで、 $R^o r_k^o \times$  と  $R^{ij} r_k^{ij} \times$  はともに外積演算と等価な  $3 \times 3$  の歪対称行列を表している。また、 $I_n \in \mathbf{R}^{n \times n}$  は  $n \times n$  の単位行列を表しており、これ以降でも同じ表記を用いることにする。Fig. 3 にこれらのパラメータの関係図を示す。この図は、1 本指で球形の表面を触る場合の仮想接触点の変化の様子を表しており、実線が初期状態の指と対象の様子を表し、破線が時間  $\Delta t$  後の様子を表している。

次に、式 (6) より法線方向の成分を抽出する。

ベクトル  $R^o \dot{r}_k^o$  は仮想接触点対象表面上を沿って移動するときの速度ベクトルを表し、同様に  $R^{ij} \dot{r}_k^{ij}$  は仮想接触点指リンク表面上を沿って移動するときの速度ベクトルを表している。仮定 3.1 より  $n_k^T R^{ij} \dot{r}_k^{ij} = n_k^T R^o \dot{r}_k^o = 0$  が成立する。また、面が滑らかであれば、 $n_k^T \dot{n}_k = 0$  が成立するので、式 (6) と  $n_k$  の内積を計算すると、

$$n_k^T (W_k^o v^o - W_k^{ij} J^{ij} \dot{\theta}) = \dot{d}_k \quad (7)$$

となる。式 (7) をすべての仮想接触点についてまとめることにより、仮想接触点に関する拘束条件式が求まり、

$$G v^{all} = \dot{d} \quad (8)$$

となる。ただし、各変数は次で表されるものである。

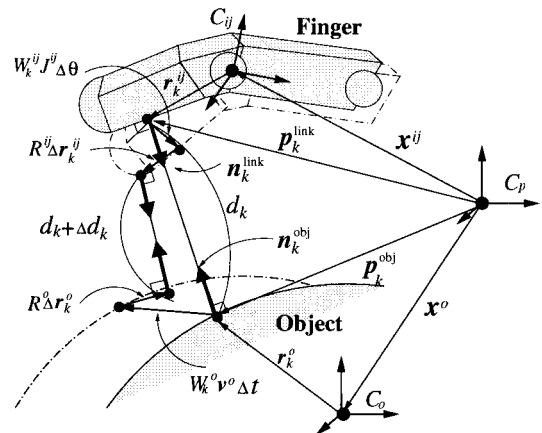


Fig. 3 Trajectory of a virtual contact point

$$G \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1^T W_1^o & -\mathbf{n}_1^T W_1^{i_1 j_1} J^{i_1 j_1} \\ \mathbf{n}_2^T W_2^o & -\mathbf{n}_2^T W_2^{i_2 j_2} J^{i_2 j_2} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{n}_{m_c}^T W_{m_c}^o & -\mathbf{n}_{m_c}^T W_{m_c}^{i_{m_c} j_{m_c}} J^{i_{m_c} j_{m_c}} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{m_c \times m_a}$$

$$\mathbf{v}^{\text{all}} \equiv [\mathbf{v}^{oT}, \dot{\boldsymbol{\theta}}^T]^T \in \mathbf{R}^{m_a}$$

$$\mathbf{d} \equiv [d_1, d_2, \dots, d_{m_c}]^T \in \mathbf{R}^{m_c}$$

ここで、 $m_c$  は仮想接触点の総数、 $m_a = m_\theta + 6$  はハンドの全自由度数である。また、 $i_k, j_k$  は仮想接触点の番号  $k$  に対応した指番号と関節番号を表している。

### 3.3 仮想接触点に関する制約条件

接触時には指は対象表面より中にめり込むことはない。よって、式(7)と式(8)には、

$$\dot{d}_k \leq 0 \quad \text{if } d_k = 0 \quad (9)$$

という拘束条件が課せられる。

また、本論文では、式(9)に関して、

$$m_c < m_a \quad (10)$$

を仮定する。これは、接触を保持しながら指を対象上にのぞらせて把握形状を変形するための自由度が、 $m_a - m_c$  であることを示している。一般に多指ハンドでは関節の数が多いため、多くの場合でこの仮定は成立する。

## 4. センサフィードバックに基づく把握行動アルゴリズム

本節では、仮想接触点モデルと非線型逐次最適化手法を組み合わせることにより、把握行動のためのセンサフィードバックアルゴリズムを構築する。

### 4.1 センサフィードバックに基づく把握行動

式(8)を条件(10)のもとで、速度  $\mathbf{v}^{\text{all}}$  に関して解くと、

$$\mathbf{v}^{\text{all}} = G^+ \dot{\mathbf{d}} + (I_{m_a} - G^+ G) \mathbf{v}^{\text{all}'} \quad (11)$$

となる。ここで、演算子  $+$  は一般逆行列[20]を表しており、 $\mathbf{v}^{\text{all}'} \in \mathbf{R}^{m_a}$  は任意のベクトルを表している。

式(11)の右辺第1項は、接触距離  $\mathbf{d}$  の関数であるのに対して、第2項はまったく依存しない。これより、前者が仮想表面に直交する行動であるのに対して、後者が仮想表面上をなぞる行動を表しており、お互いに直交した行動を表していることが分かる。この様子を Fig. 4(a) に示す。この図のうち左側部分は、2本指で楕円形の対象を把握した場合の断面図を表しており、右側部分は、1本の指の接触に関する拡大図を示している。

以上の分析より、式(11)の右辺第1項  $G^+ \dot{\mathbf{d}}$  は、対象を握る、または離すという対象の固定にかかわる運動要素とみなすことができる。本論文では、この行動をグラスピングと定義する。この場合、グラスピングは接触距離  $\mathbf{d}$  に依存した1自由度の運動になる。一方、右辺第2項  $(I_{m_a} - G^+ G) \mathbf{v}^{\text{all}'}$  は、対象の形状によってハンドの把握形状を変える運動要素とみなすことができる。そこで、本論文では、この行動をプリシェーピングと定義する。この場合、プリシェーピングは対象表面から接

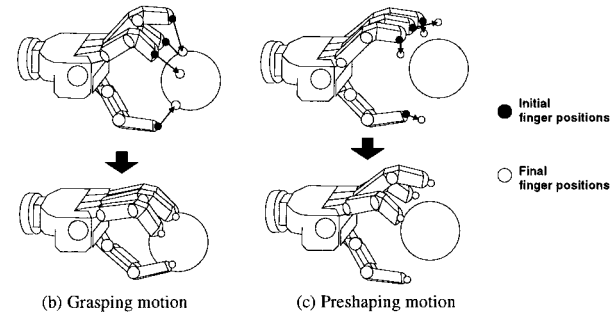
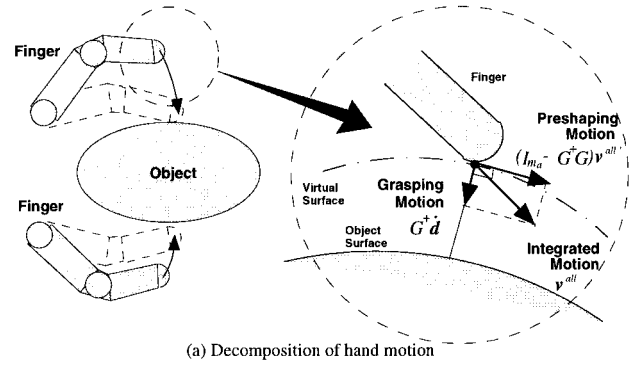


Fig. 4 Decomposition of hand motion

触距離の分だけ離れた仮想的な曲面上に沿った2自由度の運動となる。ここで、球を4本指ハンドで把握した場合の、グラスピング行動の例を Fig. 4(b) に、プリシェーピング行動の例を Fig. 4(c) に示す。前者が、球の中心方向へ向う行動を示しているのに対して、後者は、球面に沿った曲面上での指の運動を表している。

これより、両者を独立に制御することで、接触距離の変化と独立して、把握形状の変形を制御することが可能となる。このことは、非接触相と接触相を通して、同じ制御方法で把握形状を制御できることを意味している。この考えに基づいて、次のように把握行動を速度制御する。

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{v}_d^a \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_d \end{bmatrix} = G^+ K^d (\mathbf{d}_d - \mathbf{d}) + (I_{m_a} - G^+ G) K^{\text{all}} \mathbf{e}^{\text{all}} + K^\tau \boldsymbol{\tau} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{v}_d^a \in \mathbf{R}^6$  と  $\dot{\boldsymbol{\theta}}_d \in \mathbf{R}^{m_\theta}$  は、それぞれハンドの位置姿勢と関節角の速度サーボへの制御指令値である。また、 $\mathbf{d}_d \in \mathbf{R}^{m_c}$  は接触距離の目標値を表す。一方、 $\mathbf{e}^{\text{all}} \in \mathbf{R}^{m_a}$  はプリシェーピング行動の制御誤差を表しており、

$$\mathbf{e}^{\text{all}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_d^o - \mathbf{x}^o \\ \frac{1}{2}(\mathbf{n}^o \times \mathbf{n}_d^o + \mathbf{o}^o \times \mathbf{o}_d^o + \mathbf{a}^o \times \mathbf{a}_d^o) \\ \boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

と計算される。ただし、 $\mathbf{x}_d^o \in \mathbf{R}^3$  は対象の目標位置を表し、 $\boldsymbol{\theta}_d \in \mathbf{R}^m$  は目標関節角を表す。また、姿勢成分に関する制御誤差に関しては、対象の姿勢行列の目標値  $R_d^o = [\mathbf{n}_d^o, \mathbf{o}_d^o, \mathbf{a}_d^o] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  と、姿勢行列  $R^o = [\mathbf{n}^o, \mathbf{o}^o, \mathbf{a}^o]$  の各要素を用いて計算している[21]。また、式(12)の右辺第3項はコンプライア

ンス制御のための力フィードバックの項であり、 $\tau \in \mathbf{R}^{m_a}$  は関節トルクを表す。行列  $K^d \in \mathbf{R}^{m_c \times m_c}$ 、 $K^{all} \in \mathbf{R}^{m_a \times m_a}$ 、 $K^\tau \in \mathbf{R}^{m_a \times m_a}$  は適当な正定対角行列である。

式(12)における  $v_d^a$  は、ハンドの位置姿勢の指令値であり、ハンドの位置姿勢を変化させて、ハンドと対象の相対的な位置姿勢を変える役割を持つ。符号が負であるのは、式(8)を導出する過程で、基準座標系  $C_p$  をハンドの重心においたためである。

4.2 最適化手法に基づくプリシェーピング行動

式(12)では、プリシェーピング行動は仮想曲面上の任意の2自由度の運動を表しており、一意には定まらない。そこで、把握形状をある評価値で表し、その評価値を最適化することでプリシェーピング行動を一意に決定する。

簡単のために次の二つの仮定を置く。

仮定 4.1 対象上の各接触面は滑らかな曲面からなる。ハンドのどのリンクが対象上のどの面に接触するかは把握行動前に決定されており、把握行動中にその対応関係が変化することはない。

仮定 4.2 把握形状の評価を表す非負値  $\varepsilon \in \mathbf{R}$  が存在する。 $\varepsilon$  はハンドと対象の状態を表す変数群  $\{x^o, R^o, \theta\}$  によって一意に決定される単峰性の関数であり、それらの変数について連続かつ微分可能である。

仮定 4.1 は把握行動の途中で仮想接触点が一連続面を横断しないことを保証するものであり、仮定 4.2 は仮想接触点の変化に対して、評価値  $\varepsilon$  が連続性と微分可能性を持つことを保証している。

これらの仮定を満たすような評価値  $\varepsilon$  の微小変化  $d\varepsilon \in \mathbf{R}$  は次のように記述できる。

$$d\varepsilon = \xi^T v^{all} dt \tag{14}$$

ここで、ベクトル  $\xi \in \mathbf{R}^{m_a}$  は、評価値  $\varepsilon$  の速度  $v^{all}$  に対する勾配ベクトルを表している。

式(14)を用いて、評価値  $\varepsilon$  を最小化することで、プリシェーピング行動を実現する。評価値  $\varepsilon$  が最小となる点が最適な把握形状を表しているものとし、最適化手法として最急降下法を用いると、プリシェーピングの制御誤差は  $e^{all} = -\xi$  と表される。このため、式(12)は次のように書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} -v_d^a \\ \dot{\theta}_d \end{bmatrix} = G^+ K^d (d_d - d) - (I_{m_a} - G^+ G) K^{all} \xi + K^\tau \tau \tag{15}$$

評価値  $\varepsilon$  に関しては、安定性、ロバスト性、操り性能などの要素ごとに適切な評価値を定めることで、それぞれに対応した最適な把握行動を実現できる。これらの評価値としては、従来の研究で提案された評価値を用いても良いが、仮定 4.2 で述べたように連続性と微分可能性を満たす必要がある。次節で述べる把握実験においては、これに適合する評価値の一例として、Form Closure の評価関数を用いている。また、実際に応用する際には、これら要素ごとの評価値を組み合わせ、総合的な

把握評価を行う必要があるが、汎用的な把握タスクに対応した評価値を決定方法は、今後の課題である。

なお、式(15)では、最適化手法として最急降下法を用いているが、これは最適化を実現するための一つの手段であり、他の非線形最適化手法を使っても同様の結果が得られる。

また、この手法では、仮定 4.1 より、把握行動の途中で仮想接触点が一連続面を横断してしまう場合には対応していない。このような場合には、従来から提案されている手法、例えば [1] ~ [4] らと併用して、あらかじめ指と対象面の組み合わせを定めておく必要がある。

4.3 視覚フィードバックを用いた把握行動アルゴリズム

式(15)に基づくセンサフィードバック制御に、視覚情報処理を加えることで、把握行動アルゴリズムを構成する。この処理手順は以下ようになる。

Step 1 [センシング]

Step 1.1 (視覚情報処理) 画像より、対象の位置姿勢  $x^o$ 、 $R^o$  とその速度  $v^o$  を計測する。非接触相では、式(1)と式(2)に従って、仮想接触点  $p_k^{obj}$ 、 $p_k^{link}$  と接触距離  $d_k$  を計算する

Step 1.2 (触覚情報処理) 接触相では、触覚情報から接触点の位置座標  $p_k \in \mathbf{R}^3$  を計測する。

Step 1.3 (対象形状の更新) 接触相では、接触点の位置座標  $p_k$  を用いて、対象の形状パラメータを更新する。

Step 2 (パラメータ計算) 仮想接触点  $p_k^{obj}$ 、 $p_k^{link}$  (接触相では  $p_k$ ) から、評価値  $\varepsilon$  とその勾配ベクトル  $\xi$ 、拘束行列  $G$  を計算する。

Step 3 (把握制御) 式(15)から目標速度指令値  $v_d^a$  と  $\dot{\theta}_d$  を計算する。

このアルゴリズムの流れ図を Fig. 5 に示す。なお、Step 1.3 では、視覚情報の観測誤差を補償するために、接触後に触覚から得た接触点の位置座標  $p_k$  を用いることで、対象の形状を更

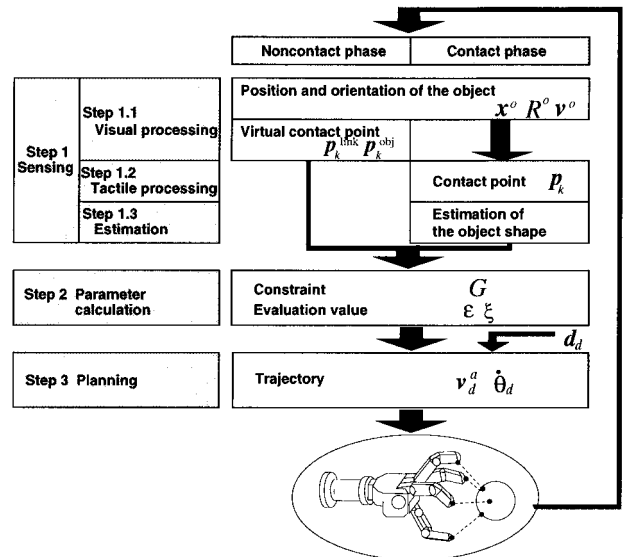


Fig. 5 Grasping algorithm

新している．パラメータ更新の方法としては，最小 2 乗法を用いることが考えられる．

このアルゴリズムは，把握行動計画がセンサフィードバックに基づいて実現されるために，対象の移動や変形による把握環境の変化，対象パラメータの不確か性等の問題に対応できる．また，非接触相と接触相を統合した把握モデルに基づいているために，両相の間で把握行動の不連続性は生じない．

## 5. 実験

### 5.1 実験システム

Fig. 6 と Fig. 7 に，今回の実験で使用したシステムの構成図と写真を示す．

ハンドとしては，4 本の指と合計 14 自由度の関節を持つ多指ハンド（三菱重工製）を用意した．このハンドには，各関節ごとにポテンシオメータと力覚センサが装備されている．

触覚情報に関しては，現状ではハンド上に触覚センサが装備されていないので，関節角より計算した指先位置を触覚情報の代用とした．このために，把握形態は指先を用いた把握に限定し，指先自体を広がりを持たない点として近似することで，接触位置  $p_k$  の計算を行った．また，実験を簡略化するために，ハンドの位置姿勢は固定とし，指関節のみを可動とした．

視覚センサとしては CCD カメラを用いることにし，対象上に 5 [cm] 間隔でマークされた 6 点を計測し，その画像座標と対

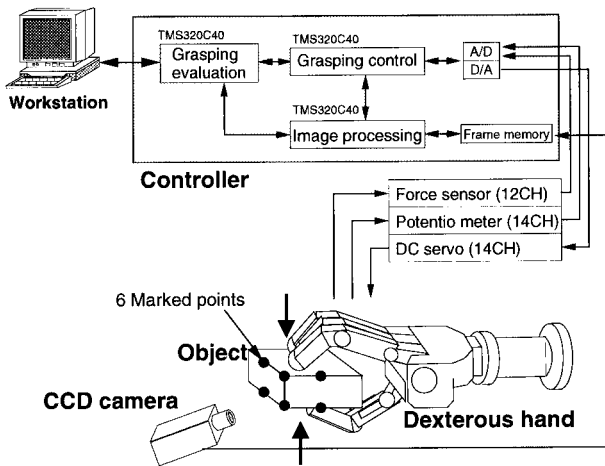


Fig. 6 Experimental system

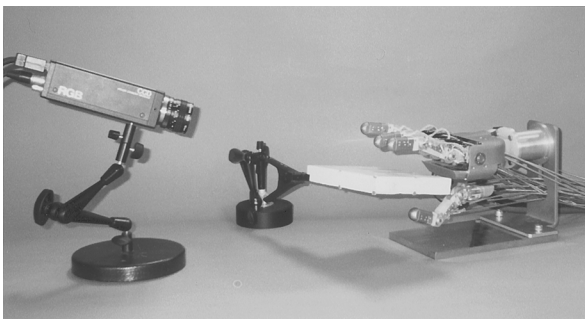


Fig. 7 Photograph of the experimental system

象モデルから最小 2 乗法を用いて，対象の位置  $x^o$  と姿勢  $R^o$  を求めた．

対象物体としては，あらかじめ近似モデルが与えられている直方体を用いた．把握形態としては，指 3 本を直方体の上面に，親指をそれと対向する下面に配置し，それぞれの組み合わせを変えることなく把握形状を変化させた．把握面は上下両面ともに平面としてモデル化し，指先の接触情報から最小 2 乗法を用いてパラメータを更新した．

ハンドと CCD は，I/O を通して DSP ( TMS320C40 Texas Instruments 社 ) によって構成された実時間並列計算システムに接続されている．今回の実験では，Fig. 6 に示すように，画像処理とフィードバック制御，把握評価をそれぞれ別の DSP 上で並列に計算することで，実時間での演算を可能とした．

また，フィードバックレートに関しては，把握制御を 1 [ms] で，視覚による対象推定を 600 [ms]，触覚による対象推定を 300 [ms] のサイクルタイムで行った．

### 5.2 評価関数

本実験では，次式を評価関数として採用した．

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \left\| \sum_{k=1}^{m_c} W_k^o T n_k \right\|^2 \\ &= \left\| \sum_{k=1}^{m_c} n_k \right\|^2 + \left\| \sum_{k=1}^{m_c} (n_k \times R^o r_k^o) \right\|^2 \quad (16) \end{aligned}$$

これは，把握対象の位置姿勢が微小変化したときの接触距離の変化の大きさを表しており，Form Closure [22] に対応している（付録 6 参照）．この場合には， $\varepsilon = 0$  のときに，最も堅固に拘束された把握が実現されるものとして解釈される．

一般には，式 (16) の最適解を求めるのは困難であるが，本実験のように，直方体対象の場合には比較的容易に求まる（付録 6 参照）．ただし，式 (16) は運動パラメータ  $\{x^o, R^o, \theta\}$  に関して単峰性ではないので，最適解は一意には決定されず，結果として把握行動は現在のハンドの状態から最も近い局所解に収束する．

### 5.3 実験結果

Fig. 8 にハンドの把握形状の変化の様子を示す．ここでは，(1) 非接触相 ( $t = 0$  [ms]) (2) 接触相 (対象移動前:  $t = 400$  [ms])，(3) 接触相 (対象移動後:  $t = 1100$  [ms]) の三つの状態の把握形状と (a) 対象移動前:  $t = 300$  [ms] (b) 対象移動後:  $t = 900$  [ms]，の二つの状態における対象の形状が，視覚による推定結果に基づいて表示されている．

これを見ると，プリシェーピングによって，対象の形状に応じた把握形状が実現されている様子が示されている．また，対象が移動した後は，それに対応して，別の把握形状に変化している様子も示されている．

次に，Fig. 9 と Fig. 10 に，対象中心座標系  $C_o$  からみた把握行動前と把握行動後の指先配置を示す．

これらの図をみると，把握行動前には，指先が対象の位置とは関係なく無秩序に配置されているのに対し，把握行動後の指先配置では，上面に接する 3 指の中心位置と下面に接する親指位置が，視角  $(0, 0)$  [deg] から見てほぼ一直線上に並んでおり，

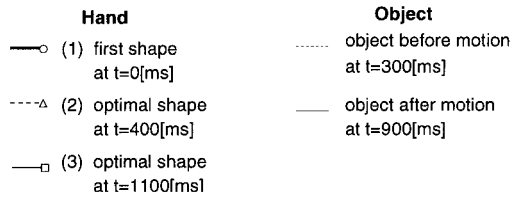
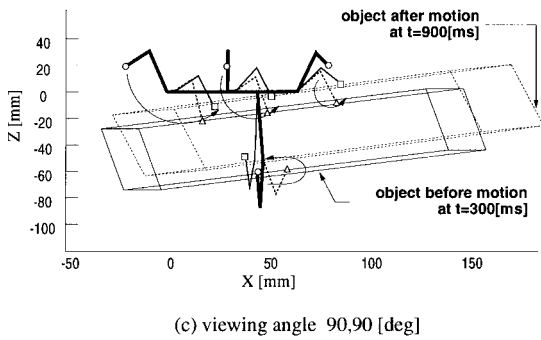
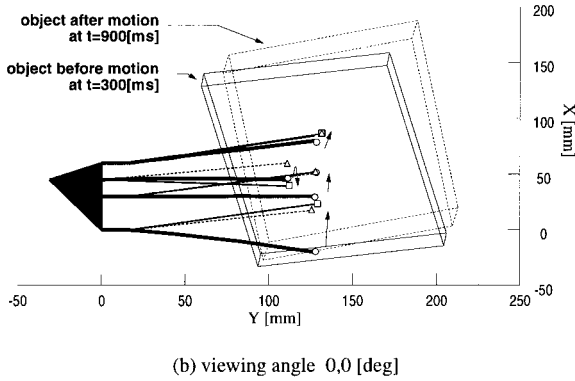
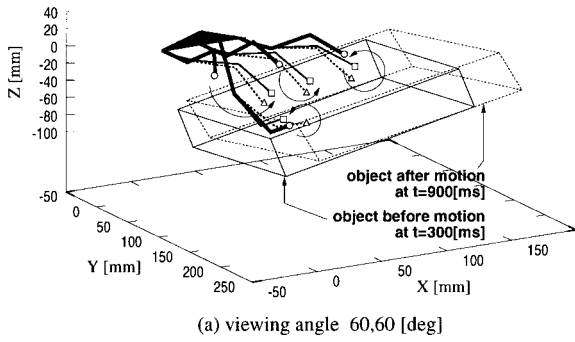


Fig. 8 Finger tip trajectory

また、それぞれの点に関して、対象中心からの長さの比がほぼ 1 : 3 であることが分かる。このことから、付録 6 で求めた評価関数の式 (16) の最適解が実現されていることが分かる。

最後に、Fig. 11 に評価値  $\varepsilon$  と接触距離の 2 乗和  $\varepsilon^d = \sum_{k=1}^4 d_k^2$  の時間変化を示す。

これを見ると、 $\varepsilon$  と  $\varepsilon^d$  が同時に 0 に収束する様子が示されている。また、 $\varepsilon^d > 0$  である非接触相でも、 $\varepsilon^d \approx 0$  である接触相においても、 $\varepsilon = 0$  が保たれるように制御されている様子が示されている。これらの結果は、本アルゴリズムが非接触相と接触相の両方で有効に動作していることを示している。

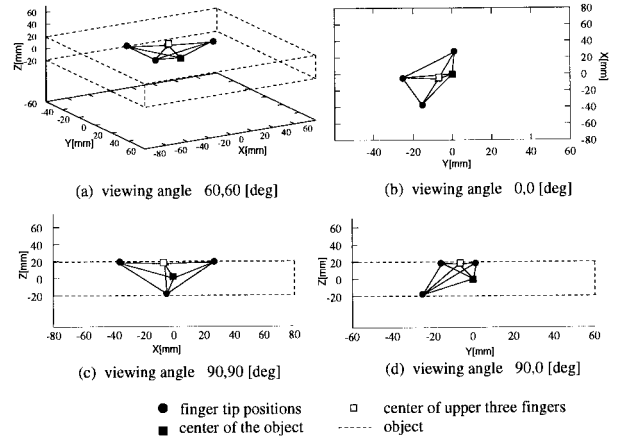


Fig. 9 Finger tip position (before preshaping and grasping)

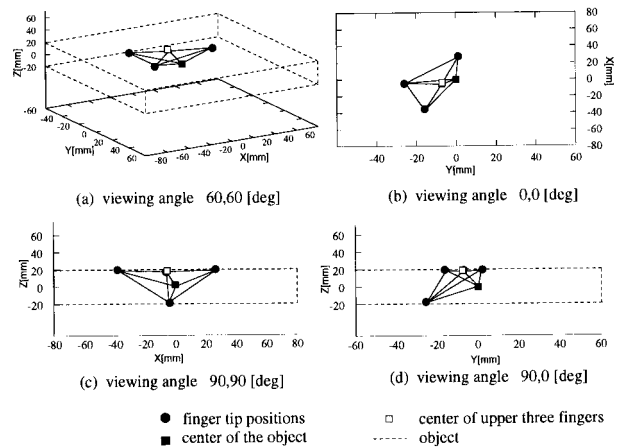


Fig. 10 Finger tip position (after preshaping and grasping)

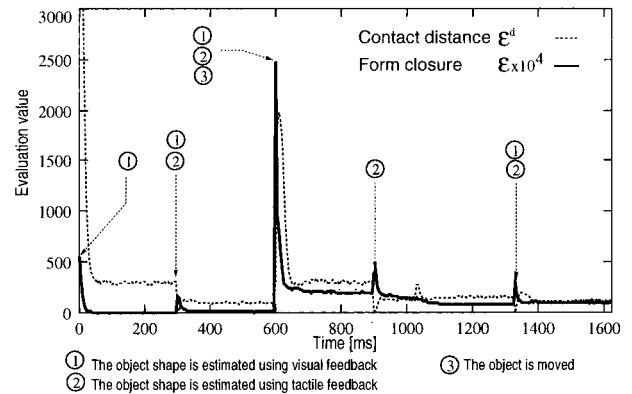


Fig. 11 Evaluation value

把握行動の途中では、視覚と触覚による対象推定 (Fig. 11 ① ②) が行われている。各推定の後には一時的に評価値  $\varepsilon$  が大きくなっているが、これは推定誤差のためであると考えられる。この場合においても、新しい推定パラメータに基づいた最適化が行われ、再び評価値は 0 に収束している。これは、本アルゴリズムが把握パラメータの不確実性に対応していることを示している。

また、把握途中で対象が動いた場合 (Fig. 11 ③) には、一時的に把握形状が不適当になり、評価値  $\varepsilon$  は大きくなるが、視触覚により新しいパラメータが計算された後に再び 0 に収束している。この結果は、本アルゴリズムが環境変化や外乱に対して適応性を持つことを示している。

## 6. 結 論

従来より行われてきた把握行動の研究では、把握形状の計算にセンサフィードバックが含まれていないために、把握環境の時間的な変化や観測誤差、モデル誤差が補償されず、パラメータの変動する環境のもとでは用いることができなかった。

本論文では、この問題を解決するために、センサフィードバックを中心とした把握行動計画を行うことを目的として、視触覚フィードバックを用いた把握行動アルゴリズムを提案した。これは次の3点からなるものである。

- 仮想接触点モデルを提案した。これは従来の点接触モデルを、非接触相においても適用できるように拡張したものであり、これを用いることで、非接触相と接触相を統一して扱えるようになった。
- センサフィードバックを用いた把握行動アルゴリズムを提案した。これは、把握形状を最適化するプリシェーピング行動と、把握の度合いを制御するグラスピング行動を、視触覚フィードバックによって、それぞれ独立に制御することで実現される。
- 提案したアルゴリズムを多指ハンドシステム上に実装することで把握実験を行った。その結果、非接触相から接触相への移行への対応、環境変化への適応性、把握環境のパラメータの不確実性への対応能力の3点に関して、有効性を確認できた。

この実験では、視覚センサが CCD であることと、触覚が未装備であることから、視触覚のフィードバックを低いレートで実現している。そのため、環境変化への応答性能が低くなり、急な環境の変化には対応できていない。しかし、現在、特に視覚を中心に高速なセンサデバイスが開発されつつあり [23] [24]、高速なセンサフィードバックを実現するための基盤が整えられつつある。これらのことから、今後、本論文で提案したような、センサフィードバックに基づく把握アルゴリズムの重要性は高まっていくものと考えられる。

## 参 考 文 献

- [1] V. Nguyen: "Constructing force-closure grasps," Int. J. of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3-16, 1988.
- [2] X. Markenscoff and C.H. Papadimitriou: "Optimum grip of a polygon," Int. J. of Robotics Research, vol.8, no.2, pp.17-29, 1989.
- [3] Y.C. Park and G.P. Starr: "Grasp synthesis of polygonal objects," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1574-1590, 1990.
- [4] 小俣: "多指ハンドによる三次元つりあい把持のための指先位置計算アルゴリズム", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.10, pp.1152-1158, 1991.
- [5] J.C. Trinkle, J.M. Abel and R.P. Paul: "Enveloping, frictionless, planar grasping," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.246-251, 1987.

- [6] R.S. Fearing: "Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands," IEEE J. of Robotics and Automation, vol.2, no.4, pp.188-195, 1986.
- [7] R. Tomovic, G.A. Bekey and W.J. Karplus: "A strategy for grasp synthesis with multifingered robot hands," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.83-89, 1987.
- [8] S.A. Stansfield: "Robotic grasping of unknown objects: A knowledge-based approach," Int. J. of Robotic Research, vol.10, no.4, pp.314-326, 1991.
- [9] A. Namiki and M. Ishikawa: "Optimal grasping using visual and tactile feedback," Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.584-596, 1996.
- [10] J.A. Coelho Jr. and R.A. Grupen: "Effective multifingered grasp synthesis," UMass Computer Science technical report, pp.1-46, 12 1994.
- [11] J. Ewert and M.A. Arbib, editors: Visuomotor Coordination: Neural Models and Perceptual Robotics. Plenum, 1989.
- [12] 石川: "アクティブセンシングとロボットハンド", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.938-942, 1993.
- [13] 山崎, 石川: センサフュージョン: 実世界の能動的理解と知的再構成. コロナ社, 1992.
- [14] 石川: "並列処理を用いた能動的センサシステム", 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.8, pp.860-866, 1988.
- [15] R.A. Brooks: "Intelligence without representation," Artificial Intelligence, vol.47, pp.139-159, 1991.
- [16] 中村, 山崎: "反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.3, pp.448-459, 1997.
- [17] Y. Nakabo and M. Ishikawa, "Visual impedance using 1 ms visual feedback system," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2333-2338, 1998.
- [18] 大脇, 中坊, 並木, 石井, 石川: "視触覚モダリティ変換を用いたリアルタイム実環境仮想接触システム", 電子情報通信学会論文誌, vol.J81-D-II, no.5, pp.918-924, 1998.
- [19] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of multifingered hands," Int. J. of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.
- [20] 柳井: 射影行列・一般逆行列・特異値分解. 東京大学出版会, 1983.
- [21] 小林他: ロボット制御の実際, 第4章. コロナ社, 1997.
- [22] 中村: "把持とあやつり", 計測と制御, vol.29, no.3, pp.206-212, 1990.
- [23] 中坊, 石井, 石川: "超並列・超高速ビジョンを用いた 1 ms ターゲットトラッキングシステム", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.3, pp.417-421, 1997.
- [24] 小室, 鈴木, 石井, 石川: "汎用プロセッシングエレメントを用いた超並列・超高速ビジョンチップの設計", 電子情報通信学会論文誌, vol.J81-D-I, no.2, pp.70-76, 1998.

## 付録 A. 接触距離 $d_k$ の最小性の証明

ここでは、式 (1) と式 (2) を満たす接触距離  $d_k$  が、対象と指リンク間の最短距離に等しいことを証明する。

仮定 3.1 より、指リンク表面と対象表面がともに仮想接触点近傍で滑らかであるので、それぞれ面上の点をパラメトリックに表示して、 $\mathbf{p}_k^{\text{obj}} = \mathbf{p}_k^{\text{obj}}(s_k^{\text{obj}})$ 、 $\mathbf{p}_k^{\text{link}} = \mathbf{p}_k^{\text{link}}(s_k^{\text{link}})$  と表すことができる。ここで、 $\mathbf{s}_k^{\text{obj}} = [s_{k1}^{\text{obj}}, s_{k2}^{\text{obj}}]^T \in \mathbf{R}^2$ 、 $\mathbf{s}_k^{\text{link}} = [s_{k1}^{\text{link}}, s_{k2}^{\text{link}}]^T \in \mathbf{R}^2$  は、各面上でのパラメータを表している。このとき、それぞれの面の間の距離は

$$d = \|\mathbf{p}_k^{\text{obj}}(s_k^{\text{obj}}) - \mathbf{p}_k^{\text{link}}(s_k^{\text{link}})\| \quad (17)$$

として表される。

ここで、面間の距離が最小となる点が存在すると仮定すると、

$$\frac{\partial (d^2)}{\partial \mathbf{s}_k^{\text{obj}}} = -(\mathbf{p}_k^{\text{link}} - \mathbf{p}_k^{\text{obj}})^T \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{obj}}}{\partial \mathbf{s}_k^{\text{obj}}} = \mathbf{0} \quad (18)$$



$$\frac{\partial(d^2)}{\partial \mathbf{s}_k^{\text{link}}} = (\mathbf{p}_k^{\text{link}} - \mathbf{p}_k^{\text{obj}})^T \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{link}}}{\partial \mathbf{s}_k^{\text{link}}} = \mathbf{0} \quad (19)$$

が距離最小の点で満たされねばならない。これより、

$$\mathbf{p}_k^{\text{link}} - \mathbf{p}_k^{\text{obj}} \perp \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{obj}}}{\partial s_{ki}^{\text{obj}}}, \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

$$\mathbf{p}_k^{\text{link}} - \mathbf{p}_k^{\text{obj}} \perp \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{link}}}{\partial s_{ki}^{\text{link}}}, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

が成立する。一方、各面の外向き法線ベクトルに関しても、定義より、 $\mathbf{n}_k^{\text{obj}} \perp \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{obj}}}{\partial s_{ki}^{\text{obj}}}$ ,  $\mathbf{n}_k^{\text{link}} \perp \frac{\partial \mathbf{p}_k^{\text{link}}}{\partial s_{ki}^{\text{link}}}$ ,  $i = 1, 2$  が成立するので、

$$\mathbf{p}_k^{\text{link}} - \mathbf{p}_k^{\text{obj}} \parallel \mathbf{n}_k^{\text{link}} \parallel \mathbf{n}_k^{\text{obj}} \quad (22)$$

が成立する。これは、式(1)、式(2)と等しい。また、逆に式(22)が成立すれば、明らかに式(18)(19)も成立する。これより、接触距離  $d_k$  が指リンクと対象間の最短距離に等しいことが証明された。

### 付録 B. Form Closure 評価関数

評価関数の式(16)について  $\varepsilon = 0$  のときの解析を行うと、

$$\begin{aligned} \varepsilon = 0 &\Leftrightarrow \sum_{k=1}^{m_c} W_k^{\circ T} \mathbf{n}_k = \mathbf{0} \\ &\Leftrightarrow \sum_{k=1}^{m_c} \mathbf{n}_k^T W_k^{\circ} \mathbf{v}^{\circ} = 0, \quad \forall \mathbf{v}^{\circ} \end{aligned} \quad (23)$$

となる。これは、「 $\mathbf{n}_k^T W_k^{\circ} \mathbf{v}^{\circ} > 0$ ,  $k = 1, \dots, m_c$  を満たす  $\mathbf{v}^{\circ}$  が存在しない」と解釈することができる。

これに対して、物体の拘束に関する性質としては Form Closure が知られている[22]。これは摩擦なしに対象が完全に拘束された状態のことであり、本論文中で定義済の変数を用いると、「 $\mathbf{n}_k^T W_k^{\circ} \mathbf{v}^{\circ} \geq 0$ ,  $k = 1, \dots, m_c$  を満たす  $\mathbf{v}^{\circ}$  が存在しない」として表される。これより、評価関数  $\varepsilon$  は、Form Closure の概念に対応していることが分かる。 $\varepsilon = 0$  のときに最も拘束性の高い Form Closure が実現される。ただし、Form Closure

の条件式で等号が満たされる場合、すなわち、すべての接触点で同時に滑りが生じる状態については考慮されていない。

### 付録 C. Form Closure 評価関数の最適解

ここでは、式(16)に関して、第5節の実験設定で採用したように、直方体対象に対して、下面に親指1指を配置し、上面に残り3指を配置して把握する場合の最適解を求める。

下面から上面に直交する方向に  $Z$  軸を持つように対象中心座標系  $C_o$  をおき、親指と人指し指、中指、薬指の各接触点番号を、それぞれ  $k = 1, 2, 3, 4$  とする。このとき、各指における接触法線ベクトルは、

$$\mathbf{n}_1 = R^o[0, 0, -1]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_3 = \mathbf{n}_4 = R^o[0, 0, 1]^T \quad (25)$$

となる。ただし、 $R^o$  は  $C_o$  の姿勢を表す回転行列である。これより、各指先座標の要素を  $\mathbf{r}_k^o = [r_{kx}^o, r_{ky}^o, r_{kz}^o]^T$  と表した場合に、評価値は、

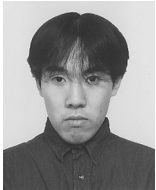
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \left\| \sum_{k=1}^4 \mathbf{n}_k \right\|^2 + \left\| \sum_{k=1}^4 (\mathbf{n}_k \times R^o \mathbf{r}_k^o) \right\|^2 \\ &= 4 + \left\| \sum_{k=1}^4 (R^{oT} \mathbf{n}_k \times \mathbf{r}_k^o) \right\|^2 \\ &= 4 + (r_{1x}^o - r_{2x}^o - r_{3x}^o - r_{4x}^o)^2 \\ &\quad + (r_{1y}^o - r_{2y}^o - r_{3y}^o - r_{4y}^o)^2 \end{aligned} \quad (26)$$

となる。よって、 $\varepsilon$  が最小となるための必要十分条件は、

$$\frac{r_{1x}^o}{3} = \frac{r_{2x}^o + r_{3x}^o + r_{4x}^o}{3} \quad (27)$$

$$\frac{r_{1y}^o}{3} = \frac{r_{2y}^o + r_{3y}^o + r_{4y}^o}{3} \quad (28)$$

である。これは、親指の位置と残り3本指の重心位置の  $X, Y$  座標値が、対象中心からみて 3:1 の比率で、一直線に配置されることを意味する。



並木明夫 (Akio Namiki)

1971年10月11日生。1996年、東京大学大学院修士課程修了。1999年、東京大学大学院博士課程修了。現在、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクトのリサーチアソシエイトとして、生体における感覚計測、感覚制御技術の開発に従事。工学博士。センサフュージョン、多指ハンド制御に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)



石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1954年8月22日生。1979年、東京大学大学院修士課程修了。同年工業技術院製品科学研究所、1989年、東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻助教授、1999年同教授。生体計測、触覚センサ、超並列・超高速ビジョン、光コンピューティング、センサフュージョンの研究に従事。工学博士。1984年計測自動制御学会論文賞。1988年度工業技術院長賞、1989年応用物理学学会光学論文賞受賞。(日本ロボット学会正会員)