

別 刷

計測自動制御学会 論文集

年 第 卷 第 号

(P. ~P.)



社団法人 計測自動制御学会

Pulling Motion に準拠した凹形状触覚センシング†

金子 真*・東 森 充*・辻 敏 夫*

Pulling Motion Based Tactile Sensing for Concave Surface

Makoto KANEKO*, Mitsuru HIGASHIMORI* and Toshio TSUJI*

An algorithm for detecting the shape of 2D concave surface by utilizing a tactile probe is proposed. Pulling a tactile probe whose tip lies on an object's surface can be easily achieved, while pushing it is more difficult due to stick-slip or blocking up with irregular surface. To cope with the difficulty of pushing motion on a frictional surface, the proposed sensing algorithm is based on the pulling motion of tactile probe from a local concave point to an outer direction. The algorithm is composed of three phases, local concave point search, tracing motion planning, and infinite loop escape. We show that the proposed algorithm runs until the tactile probe detects every surface where it can reach and touch. We also show some computer simulation and experimental results obtained along the proposed algorithm.

Key Words: tactile sensing, concave surface, compliant motion, pulling-motion based sensing

1. はじめに

ロボットによって未知対象物の形状をセンシングする方法としては、ビジョンシステムによる方法と触覚センサによる方法がある。前者の方法は、広範囲の情報を瞬時に獲得できるが、照明条件が適切でないと十分な情報を得ることができない。一方、後者の方法は、局所的な情報しか獲得できないが、前者に比べ一般に低コストである。さらに、直接対象物と接触するという性質上、対象物の持つインピーダンス特性の検出も期待できる。

本研究では、環境との接触点センシング機能を持つプローブを用いて二次元平面における凹物体の形状検出を行うセンシングアルゴリズムについて考察する。プローブを対象物表面に押し当てたまま移動させる際、プローブを押し込み状態でなぞらせる場合と引きずる状態でなぞらせる場合が考えられる。押し込む場合、対象物表面にローカルな凹凸が存在するとプローブ先端で引っ掛けやスティックスリップが起こってしまう可能性があるが、引きずる場合においては同様の条件下でもプローブ駆動系にコンプライアント要素を付加することによって、このような問題を容易に回避することができる。以上の点を踏まえ、本研究ではプローブを引きずる状態で対象物表面がセンシングできるようなアルゴリズムを提案する。一般に、対象物形状が未知である場合、引きずり、押

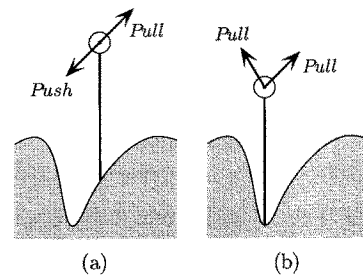


Fig. 1 Pulling and pushing motions.

し込みのいずれの状態でもなぞり動作が起りうるかは、主にプローブの移動方向と対象物形状との間の幾何学的条件に依存する。未知対象物表面の任意の点よりプローブをなぞらせる場合、Fig. 1 (a) に示すように、凹部分の内部へ移動させる場合と外部へ移動させる場合に、それぞれ押し込み動作と引きずり動作が起こることが予想される。ここで、Fig. 1 (b) のように、なぞり動作開始地点として局所的な最凹部点を選択できれば、いずれの方向に移動しても引きずる状態を保つことができる。本論文では、この最凹部をどのようにして検出するか、また引きずり動作をどのように実行するかといった問題を考え、最終的に提案するアルゴリズムが未知対象物の全ての接触可能な領域に対して形状検出が可能であることを示し、あわせてシミュレーション及び実験結果によりその有効性を確認する。

2. 従来研究

触覚センシングの研究は、多指ハンドによる環境認識の研究と関連づけられたものが多い^{1)~10)}。Dario and But-

† 第 35 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1996・7)

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-hiroshima

(Received September 6, 1996)

tazzo¹⁾, Fearing²⁾, Maekawa ら³⁾は、指先触覚センサを用いて凸対象物の形状を再構築することに成功している。一方、力・トルクセンサ情報による接触位置推定法⁴⁾に基づき、Brock and Chui⁵⁾は小型指先触覚センサを考案し、半球形状対象物に対するセンシング結果を示している。Kaneko and Honkawa⁶⁾は、リンクの運動軌跡から凸対象物の形状が浮き彫りにできることを示している。Bays¹⁰⁾は、力センサ出力から対象物の法線方向を推定し、これをもとに対象物の形状パラメータを推定する方法を提案している。Caselli ら¹¹⁾は、未知対象物の形状をパラメトリックに表現し、矛盾した形状を早期削除することを基本方針とした対象物認識戦略を構築している。一方、触覚センシングを行うためのアルゴリズムも提案されている。Gaston and Lozano-Perez¹²⁾及び Grimson and Lozano-Perez¹³⁾は、ロボットが対象物形状モデルを有しているという条件下で触覚情報から対象物を認識する方法について論じている。Cole and Yap¹⁴⁾は、“Shape from probing”問題を取り上げ、 n 角形の形状と位置を決定するためには、 $3n-1$ 回のプロービングが必要で、 $3n$ 回で十分であることを示している。以上のうち、ほとんどの研究^{1)~9), 11)~14)}においては対象物を凸形状に限定しており、凹形状に関する議論は行われていない。

我々の知る限り、凹形状を対象とした触覚センシングについて述べられた研究はあまり知見しない。Russell¹⁵⁾は、センシング機能を持たない柔軟棒を用いた Wisker sensor を考案し、スプーンのくぼんだ部分のセンシングを実現している。力・トルクセンサ情報に基づいた接触点センシング⁴⁾を利用して、Tsujimura and Yabuta¹⁶⁾は、凹形状を持つ電話受話器の形状の再現に成功している。Roberts¹⁷⁾は、与えられた凹部分を含む多面体に対してアクティブセンシング動作を生成するための基本戦略について論じている。Chen, Rink and Zhang¹⁸⁾は、接触点基準座標の決定法と局所的な形状を表現するためのパラメータ決定法について示している。この戦略は、二次的多項式により記述可能な凹形状にも適用される可能性があるが、実際には凸物体を対象とした実験しか行われていない。これらの研究では、例題として極端に単純な凹形状が挙げられているが、一般的な凹物体に対するセンシングアルゴリズムに関しての厳密な議論は行われていない。

3. 問題の設定

3.1 記号の定義

Fig. 2 (a) に示すように、対象物表面に沿ってパラメータ s を定義し、 s における点を例えば $P(s)$ (または単に P) と表す。 $Dist(P(s_1), P(s_2))$, $C_{P_1}^{P_2}$, $L_{P_1}^{P_2}$ をそれぞれ、 $P(s_1)P(s_2)$ 間の距離、 $P(s_1)P(s_2)$ 間の形状、 $P(s_1)P(s_2)$ を結んだ直線で近似した形状とする。 $C_{P_1}^{P_2}$, $L_{P_1}^{P_2}$ は、具体的には絶対系 Σ_0 において形状を表現する点の集合とする。センシング動作により、 $P(s_1)P(s_2)$ 間の形状が検出されれば $C_{P_1}^{P_2} \in W_1$, 3.2 節で仮定される微小有限値 $\varepsilon(>0)$ に対し $Dist(P(s_1), P(s_2)) < \varepsilon$ を満たすとき $P(s_1)P(s_2)$ 間を直

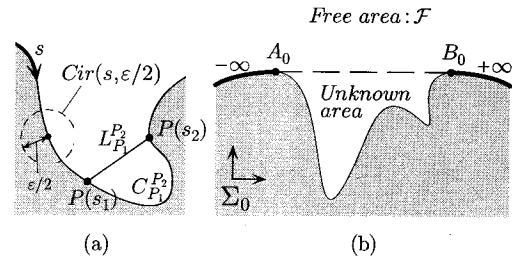


Fig. 2 Definition of symbols and problem notation.

線形状とみなし $C_{P_1}^{P_2} \cong L_{P_1}^{P_2} \in W_2$, $P(s_1)P(s_2)$ 間においてプローブの進入が不可能と判定された場合、 $C_{P_1}^{P_2} \in W_3$ とする。ただし、 W_1, W_2, W_3 をそれぞれ、なぞり動作により検出された領域の集合、直線近似により近似的に検出された領域の集合、プローブの接触が不可能であると認識された領域の集合とする。また、対象物の凹部を共通接線で結ぶことによってできる等価凸形状の外側には対象物は存在しないものとし、その領域を $\mathcal{F}$ とする。 $Area(G)$ を領域 G の面積と定義する。また、 $Cir(s, \varepsilon/2)$ は位置 s における半径 $\varepsilon/2$ の円を表すものとする。

3.2 仮定

本研究では、本質を見失わない程度で問題を簡単化するため、以下のような仮定を設ける。

〈プローブ〉 プローブは、関節にトルクセンサを備えたロボットの先端に装着されており、二次元平面内で自由な位置・姿勢が取れる。プローブは十分に長く未知の領域に関節は侵入しないものとし、幅は無限に細く無視でき、かつ、全ての点で環境との接触点センシング機能を有する。また、プローブは十分硬く、センシング動作中に曲がらないものとする。

〈未知対象物〉 対象物は、二次元平面内に単独で存在する剛体であり絶対系に固定されているものとする。また、Fig. 2 (a) に示すような円 $Cir(s, \varepsilon/2)$ を考え、 $s = [-\infty, +\infty]$ において $Cir(s, \varepsilon/2)$ と対象物の形状線との交点は常に二つであると仮定する。これにより、 $P(s)P(s+\varepsilon)$ 間に ε を越えるような極端な凹凸が存在しないことが言え、十分小さな ε に対して $P(s)P(s+\varepsilon)$ 間の形状が直線近似可能となる。

3.3 問題の設定

$C_{P(-\infty)}^{A_0} \in W$, $C_{B_0}^{P(+\infty)} \in W$ とし、前述の定義・仮定の下、 $C_{A_0}^{B_0} \in W$ を達成するセンシングアルゴリズムを構築する。ただし、 $W = \bigcup_{i=1}^3 W_i$ とする (Fig. 2 (b) 参照)。

4. Pulling Motion に基づくセンシング戦略

4.1 アルゴリズムの概要

本研究で提案するアルゴリズムは、局所最凹部点検出動作、対象物表面なぞり動作、無限ループ回避処理の三つの相から構成されている。アルゴリズムの概要を示すために、Fig. 3 の実行例に沿って各相について簡単に説明する。

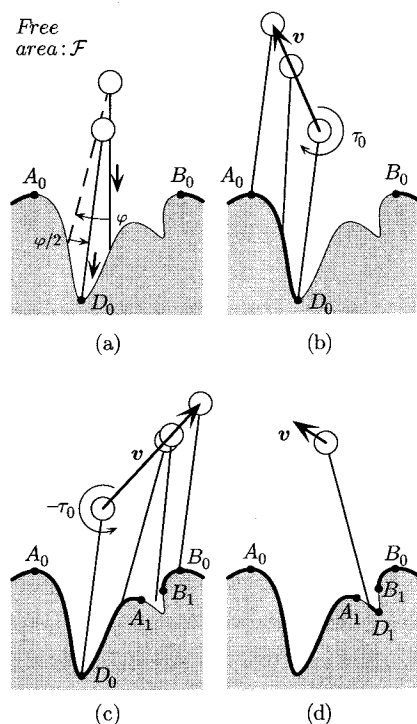


Fig. 3 Outline of the algorithm.

まず, Fig. 3 (a) のように, プローブを $\mathcal{F}$ より未知領域 A_0B_0 間に向かって対象物表面と接触するまで前進させる. 接触したら関節のトルクセンサ出力により, 時計回り, または反時計回り方向に関節が回転可能であるかを判定し, 可能な方向に再びプローブが接触するまで関節を回転させる. このときの回転角を φ とし, 次に $\varphi/2$ だけプローブを振り戻した後, 再びプローブを前進させる. 以上のような二分法を繰り返すことにより最終的に, D_0 のような左右どちらにも関節が回転できない点, すなわち局所的な最凹部点を検出することができる (局所最凹部点検出動作). 続いて, 関節を一定トルク制御に設定してプローブを対象物表面に押し当てたまま A_0, B_0 側へ移動させ, 局所最凹部点より凹部分の外部へ向かって対象物表面をなぞる. この際, Fig. 3 (b) のように左上に向かってプローブを移動させる場合には関節には時計回りのトルクを発生させ, Fig. 3 (c) のように右上に向かって移動させる場合には反時計回りのトルクを発生させる. 対象物表面が十分に滑らかなものであれば, Fig. 3 (b) のように未知領域がなぞられ形状センシングが実現できる (対象物表面なぞり動作). このように対象物表面のなぞり動作を計画すれば, プローブは引きずり動作 (Pulling Motion) でセンシングを行うことになり, スティックスリップ等を防止する上で威力を発揮する. この動作が Pulling Motion に基づく触覚センシングの基本になっている. 一方, 対象物形状がより複雑になると Fig. 3 (c) のように, なぞり動作中に接触点ジャンプが起こり未知領域が残存する場合があるが, そのような場合は未知領域の両端の点を A_1B_1 として確保し, Fig. 3 (d) のように未知領域に対してセンシング動作を再起

的に繰り返していけば, 最終的に $C_{A_0}^{B_0} \in W$ を実現することができる. 一方, このようなセンシング動作中, 未知領域に対して新たな接触点を検出できず無限ループに陥る可能性がある. このような場合の対処法として, 本アルゴリズムでは未知領域内に必ず新たな検出点を決定し, その点を境界として未知領域を分断する処理を設けている (無限ループ回避処理). この無限ループ回避処理は規則的に呼ばれるわけではなく必要に応じて呼び出される. 以下の節において, 各相についての詳しい議論を行う.

4.2 局所最凹部点検出動作

4.2.1 初期進入経路の決定

プローブを未知領域 A_0B_0 において対象物表面と接触させるための進入経路は, 容易に決定することができる. 例えば, $L_{A_0}^{B_0}$ の垂直線に沿ってプローブを進入させれば, 必ず A_0B_0 において対象物表面に到達できる. ところが, 未知領域 A_iB_i ($i \neq 0$) に関しては, プローブの移動が拘束されない自由領域が A_0B_0 に対してのように明白に与えられないため, 進入経路が必ずしも自明ではない. 本節では, 未知領域 A_iB_i に対するプローブの初期進入経路の決定法について議論し, 探索したい未知領域 A_iB_i 内に必ずプローブ先端を到達させるための十分条件を示す. その準備として, 領域 G_i を以下のように定義する.

【定義 1】

未知領域 A_iB_i に対して, A_i, B_i 及びそれぞれの点を検出したときの関節中心を結んだ直線により囲まれる領域を G_i とする (Fig. 4 参照). 単一プローブ姿勢により未知領域 A_iB_i が検出された場合, プローブを先端を中心として対象物と接触するまで回転させることにより G_i を生成する (Fig. 5 (a) 参照).

G_i として可能性のある形状は, 単一多角形 (三角形または四角形), 二つの三角形 (Fig. 4 (c), (d)), 線分 (Fig. 5 (b)) の三通りに分類できる. Fig. 4 (c) と (d) の相違点は, $L_{A_0}^{B_0}$ が $G_i^{(1)}$ または $G_i^{(2)}$ のどちらを通過しているかという点である. Fig. 4 (a), (b) の四角形は, 線分 A_iB_i が二つのプローブ姿勢のどちらかの延長線上に重なって存在する場合, 三角形となる. 単一プローブ姿勢により未知領域 A_iB_i が同時に検出された場合 (単一プローブ検出と呼ぶ), G_i は三角形または線分 ($\text{Area}(G_i) = 0$) を形成する. Fig. 5 (b) に示すように, $\text{Area}(G_i) = 0$ は, プローブの先端回りの回転自由度がもはや存在しないことを意味する. すなわち, 未知領域 A_iB_i に対して検出時の姿勢以外に他のプローブ進入経路が存在しないことになる. したがって, $\text{Area}(G_i) = 0$ が検出されればアルゴリズムは局所最凹部点検出動作を中絶し, $C_{A_i}^{B_i} \in W_3$ を決定する. 本節においては, ひとまず $\text{Area}(G_i) \neq 0$ と仮定し, 線分以外の二種類の G_i について議論する. 3.2 節の仮定 (プローブは十分に長く未知の領域に関節は侵入しないものとする) により, G_i は必ず自由領域 $\mathcal{F}$ と連結状態にある. したがって, G_i 内に対象物が存在する場合, その根元は必ず A_iB_i 間に結合されている. これが

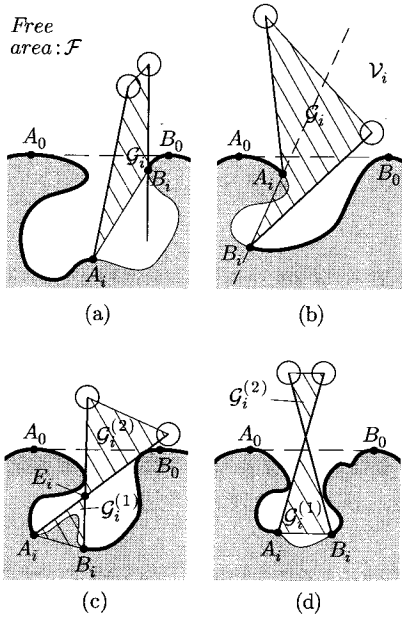
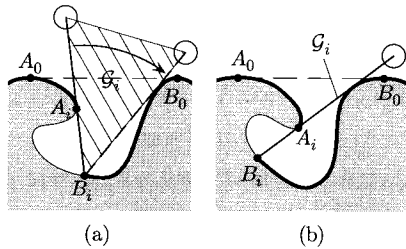
Fig. 4 Two probe postures when $A_i B_i$ is detected.

Fig. 5 An example of single probe detection.

真でないとするば、 G_i 内に孤島のような対象物が存在することになるが、対象物は唯一であることが仮定されているため、このような状況は起こり得ない。次に、対象物の領域分けのために以下のような定義を設ける。

【定義 2】

二点 A_i, B_i に対して内部領域、外部領域を以下のように定義する。

$Int(A_i B_i)$: $s = [s_{A_i}, s_{B_i}]$ における対象物表面

$Ext(A_i B_i)$: $s = [-\infty, s_{A_i}]$, $s = [s_{B_i}, +\infty]$ における対象物表面

【定義 3】

絶対系 Σ_0 に対する A_i, B_i , 平面上の任意の点 Q の位置ベクトルをそれぞれ a_i, b_i, q とし、

$$V_i(q) = \text{sgn}\{(a_i - q), (b_i - q)\} > 0 \quad (1)$$

を満たす q の集合領域を V_i とする。ただし、 $\otimes$ を二次元ベクトル $x = (x_1, x_2)^T$, $y = (y_1, y_2)^T$ に対し $x \otimes y = x_1 y_2 - x_2 y_1$ を算出する外積に相当する演算子とし、符号判定関数 $\text{sgn}(x, y)$ を

$$\text{sgn}(x, y) = \frac{x \otimes y}{\|x \otimes y\|} \quad (2)$$

と定義する。

A_i, B_i を結んだ直線を境界とする二つの領域を考えよう。 V_i は、 B_i から A_i へ向かっていく際に右手に位置する領域である。今、 $s_{A_i} < s_{B_i}$ であると仮定すると、プローブが直線的に前進する場合、 $L_{A_i}^{B_i}$ を通過するためには必ず V_i 内より進入しなければならない。本節では、ひとまず $s_{A_i} < s_{B_i}$ と仮定するが、 A_i, B_i を具体的に確保する方法については後に示すことにする。Fig. 4 (a), (c), (d), Fig. 5 (b) においては、 $G_i \cap V_i = G_i$ であるが、Fig. 4 (b) においては、 $G_i \cap V_i \neq G_i$ である。さらに注意すべき点は、凹四角形を形成する G_i (Fig. 4 (b)) が、 $G_i \cap V_i$ によって三角形、すなわち凸多角形に変換されることである。一方、 G_i が Fig. 4 (c) のような二つの三角形を形成する場合は、 $G_i \cap V_i$ においても凹形状を維持したままとする。プローブを長手方向に沿って進入させると仮定し、 $Int(A_i B_i)$ 内に必ずプローブ先端を接触させるための十分条件は以下の通りである。

【定理 1】

$Int(A_i B_i)$ 内にプローブ先端を接触させるための十分条件は、 $L_{A_0}^{B_0} \cap G_i \cap V_i$ 上の任意の点と $L_{A_i}^{B_i}$ 上の任意の点を結ぶ直線に沿ってプローブを進入させることである。ただし、 $G_i \cap V_i$ が二つの三角形を形成する場合、 $L_{A_i}^{B_i}$ 上の点の代わりに共通の頂点 E_i を選択する。

(証明) $L_{A_0}^{B_0} \cap G_i$ は、領域 G_i 内における線分 $L_{A_0}^{B_0}$ を表している。同様に、 $L_{A_0}^{B_0} \cap G_i \cap V_i$ は、領域 $G_i \cap V_i$ 内における線分 $L_{A_0}^{B_0}$ を表している。 $G_i \cap V_i \cap \bar{F}$ によって構成される形状として、凸多角形 (Fig. 4 (a), (b), (d), Fig. 5 (b)) と凹多角形 (Fig. 5 (b)) の二通りが存在し得ることに注目する。

(i) $G_i \cap V_i \cap \bar{F}$ が凸多角形の場合: $L_{A_0}^{B_0} \cap G_i \cap V_i$ 上の任意の点から $L_{A_i}^{B_i}$ に向かって伸びる半直線を考える。 $G_i \cap V_i \cap \bar{F}$ は凸多角形だから、この半直線は、 $L_{A_i}^{B_i}$ 上を通過してのみ凸多角形外に伸びていき、他の線分を通過することはあり得ない。したがって、プローブ先端は $L_{A_i}^{B_i}$ を通過するか、 $Int(A_i B_i)$ の存在により $L_{A_i}^{B_i}$ に到達する前に停止する。一度、 $L_{A_i}^{B_i}$ を通過してしまえば、 $Int(A_i B_i)$ 内での接触しか起こり得ない。いずれの場合もプローブ先端は最終的に $Int(A_i B_i)$ 内で接触する。

(ii) $G_i \cap V_i \cap \bar{F}$ が凹多角形の場合: Fig. 4 (b) が、唯一、この場合の例である。 $G_i \cap V_i \cap \bar{F}$ で構成される二つの三角形は、二本の直線の交点として共有頂点 E_i が生成されているので、 $L_{A_0}^{B_0} \cap G_i \cap V_i$ 上の任意の点から E_i に向かって伸びる半直線を考えれば、(i) の場合と同様の議論が成り立つ。■

定理 1 に基づいたアプローチ戦略により、探索する未知領域内に新たな接触点を検出するための進入経路が保証される。定理 1 は、後に述べる無限ループの回避にも利用される。

4.2.2 二分法の適用

プローブが初期接触点を検出後、続いて、局所最凹部点を検出するために二分法を適用する。二分法は以下の手順を追って実行される。ただし、初期進入動作により、すでにプローブ先端は $Int(A_i B_i)$ 上にあるものとする。

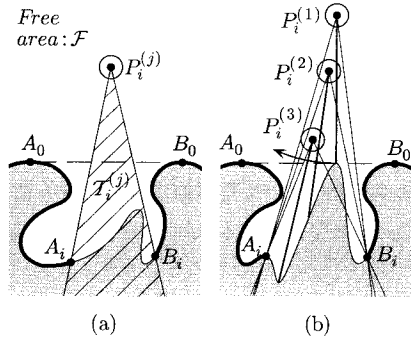


Fig. 6 Bisection method by utilizing $T_i^{(j)}$.

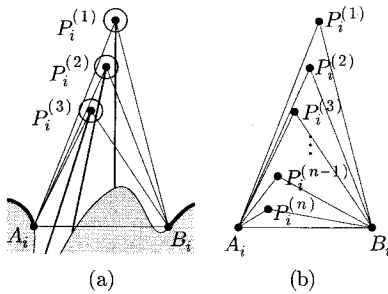


Fig. 7 Relationship between $P_i^{(j)}$ and $T_i^{(j)} \cap V_i$.

- (i) 横振り動作：プローブを関節回りに回転可能な方向に、対象物と接触するか拘束条件による境界に達するまで回転させる。
- (ii) 二分法：(i)の回転により得られた角度を二分する角度まで関節を逆回転させる。
- (iii) 進入動作：プローブを(ii)によって決定された方向に従って、対象物に接触するまでプローブ長手方向に前進させる。
- (iv) 終了条件：(i)～(iii)の動作を(a)プローブが関節回りの回転自由度を失うかまたは(b)プローブ先端が対象物表面と拘束条件の境界との交差点に到達するかのいずれかの状態になるまで繰り返す。

(a)の状態は、プローブが局所最凹部に到達するか対象物と多点接触する場合に起こる。二分法終了時に、プローブが先端の一点のみで対象物と接触し、かつ関節回りの回転自由度を失った場合、その点は局所最凹点となる。次に、プローブの回転動作に関連した拘束条件について考える。

【定義 4】

関節位置を P_i とする。 T_i を、 P_i から A_i , B_i へ向かう二本の半直線で挟まれた領域とする。ただし、 j 回目の進入動作後の状態を上付きの添字 (j) で表すことにする。

$T_i^{(j)}$ は、Fig. 6 (a) の斜線部で示される領域である。ここで、極端な例として Fig. 6 (b) に示すような、初期接触が $A_i B_i$ 間の最凸部の頂点で起こった場合を考える。このような状態でプローブの右(左)方向の横振り動作を開始すると、プローブは必ず領域 $\mathcal{F}$ 内に入ってしまうことになり、プロ

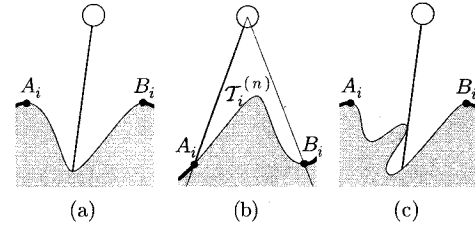


Fig. 8 Final state after bisection method: (a) Local concave point; (b) Intersection between the environment's surface and $T_i^{(n)}$; (c) Multiple contacts.

ブが一回転するまで対象物と接触することはない。したがって、横振り動作を停止するための境界が必要となり、 $T_i^{(j)}$ により、 $Int(A_i B_i)$ 内に合理的な境界を設ける。

《定理 2》

初期接触が $Int(A_i B_i)$ 内で起こっているものとする。 $T_i^{(1)} \cap V_i$ 内に $Ext(A_i B_i)$ が存在しないとすれば、最大横振り角度を $T_i^{(j)}$ の境界よりプローブがはみ出さないように設定することにより、二分法終了時にプローブ先端を必ず $Int(A_i B_i)$ 内で接触させることができる。

(証明) Fig. 7 (a) に示されるように、最大横振り角度の設定によりプローブは $P_i^{(j)} A_i$ 及び $P_i^{(j)} B_i$ を通過することはない。Fig. 7 (b) により、 $(T_i^{(1)} \cap V_i) \cap (T_i^{(2)} \cap V_i) \cap \dots \cap (T_i^{(n)} \cap V_i)$ であることは明らかであり、同時に $T_i^{(1)} \cap V_i$ 内に $Ext(A_i B_i)$ が存在しなければ、 $T_i^{(j)} \cap V_i$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 内にも $Ext(A_i B_i)$ が存在しないことが言える。したがって、プローブ先端は $L_{A_i}^{B_i}$ を通過するか、 $Int(A_i B_i)$ の存在により $L_{A_i}^{B_i}$ に到達する前に停止する。いずれの場合もプローブ先端は最終的に $Int(A_i B_i)$ 内で接触する。 ■

定理 2 を有効利用するためには、 $T_i^{(1)} \cap V_i$ 内に $Ext(A_i B_i)$ が存在しないことを保証しなければならない。そこで、 $Ext(A_i B_i)$ が存在しないことが保証された領域 $\mathcal{G}_i$ を用いて、定理 2 を定理 3 のように拡張する。

《定理 3》

初期接触が $Int(A_i B_i)$ 内で起こっているものとする。二分法終了時のプローブ先端と対象物の接触点が $Int(A_i B_i)$ 内に存在するための十分条件は、二分法実行中にプローブ先端が、 $L_{A_i}^{B_i}$ 以外で $T_i^{(j)} \cap \mathcal{G}_i \cap V_i$ の境界線を通過しないことである。

(証明) 略。 ■

4.3 対象物表面なぞり動作

4.3.1 Pulling Motion の生成

局所最凹部検出動作終了時には、基本的に以下の三通りの状態が考えられる。プローブ先端が、Fig. 8 (a) のように局所最凹部に到達している場合と Fig. 8 (b), (c) のように局所最凹部点以外の点で接触している場合である。Fig. 8 (b), (c) はそれぞれ拘束条件、多点接触により二分法が終了する場合である。このように、二分法により必ずしも局所最凹部点を検出されるとは限らない点に留意されたい。

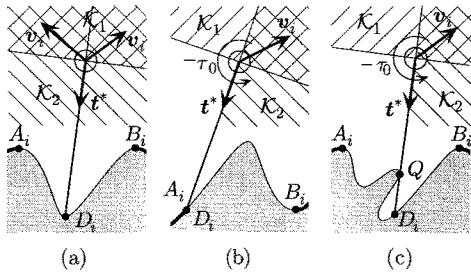


Fig. 9 Tracing motion planning.

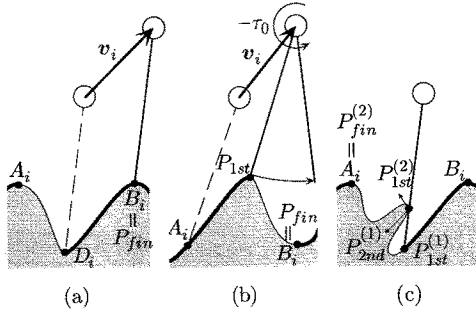


Fig. 10 Realization of tracing motion.

【定義5】

Y_1 をプローブの接触状態を表す変数とする。プローブが対象物と先端のみで接触している場合 $Y_1 = 1$ 、プローブが先端とその他の点による多点接触をしている場合 $Y_1 = 2$ とする。 Y_2 をプローブの関節回り回転自由度を表す変数とする。プローブが関節を中心として、両方向の回転自由度を失っている場合 $Y_2 = 0$ 、時計回り方向のみを失っている場合 $Y_2 = 1$ 、反時計回り方向のみを失っている場合 $Y_2 = -1$ とする。

【定義6】

$Face(right) = ON$ (または $Face(left) = ON$) は、プローブの右側面 (または左側面) において対象物との接触が起こっていることを表す。

定義5により, Fig. 8 (a), (b), (c) はそれぞれ $(Y_1, Y_2) = (1, 0)$, $(Y_1, Y_2) = (1, -1 \text{ or } 1)$, $(Y_1, Y_2) = (2, 0)$ と分類される。(b) には $Y_2 = -1 \text{ or } 1$ の二通りが存在し, 定義6により, (c) には $Face(right) = ON$, $Face(left) = ON$ の二通りが存在する。

【定義7】

K_1 を $v^T t^* < 0$ を満たす v の集合とする。 K_2 を $sgn(v, t^*) < 0$ を満たす v の集合とする。ただし, v, t をそれぞれ関節の移動方向, 関節から見たプローブ長手方向を表すベクトルとし, 二分法終了時の状態を上付き * で表すことにする。

Fig. 9 において, K_1 は関節より斜線部 (/) の領域内に向かうベクトルの集合である。また, K_2 は, 関節より斜線部 (\) の領域内に向かうベクトルの集合である。

【定理4】

引きずる状態でなぞり動作を開始するための十分条件は,

$v_i \in K$ を満たす関節の移動方向ベクトル v_i を選択し, 目標トルク τ を

$$\tau = \tau_0 \operatorname{sgn}(v_i, t^*) \quad (3)$$

に決定する一定トルク制御に関節を設定することである。ただし, K は以下の場合分けにより決定されるベクトル集合であり, 時計回り方向をトルクの正方向, τ_0 を目標トルクの絶対値とする。(Fig. 9 参照)。

(A): $(Y_1, Y_2) = (1, 0)$ の場合, $K = K_1$ 。

(B): $(Y_1, Y_2) = (1, -1)$ の場合, $K = K_1 \cap K_2$ 。

(C): $(Y_1, Y_2) = (1, 1)$ の場合, $K = K_1 \cap \overline{K_2}$ 。

(D): $(Y_1, Y_2) = (2, 0)$ かつ $Face(left) = ON$ の場合, $K = K_1 \cap K_2$ 。

(E): $(Y_1, Y_2) = (2, 0)$ かつ $Face(right) = ON$ の場合, $K = K_1 \cap \overline{K_2}$ 。

(証明) 略。

ただし, (A) の場合には $K = K_1 \cap K_2$ で一度右側のなぞり動作を実行した後, $K = K_1 \cap \overline{K_2}$ で左側のなぞり動作を実行するようにすれば効率良く $A_i B_i$ 間を検出することができる。

4.3.2 なぞり動作中に起こり得る状況

本節では, なぞり動作実行中に起こり得る全ての状況を取り上げ分類し, それぞれの状況に応じた適切な処理について考察する。

【定義8】

なぞり動作の目的地 P_{fin} を, $sgn(v_i, t^*) > 0$ の場合 $P_{fin} = A_i$, $sgn(v_i, t^*) < 0$ の場合 $P_{fin} = B_i$ とする。

【定義9】

接触点ジャンプ前, 後の接触点をそれぞれ P_{1st} , P_{2nd} とする。ただし, 単一プローブ検出の場合には, 先端に近い点, 関節に近い点をそれぞれ P_{1st} , P_{2nd} とする。

なぞり動作は原則として, Fig. 10 (a) のように, プローブが P_{fin} に到達するまで実行される。ただし, なぞり動作実行中には様々な状況が考えられ, 起こり得る全ての状況は以下のように分類できる。

〈Case 1〉接触点ジャンプ (P_{2nd} は $Int(A_i B_i)$ 上)。

〈Case 2〉接触点ジャンプ (P_{2nd} は $Ext(A_i B_i)$ 上)。

〈Case 3〉接触点消滅 (P_{2nd} は存在しない)。

〈Case 4〉 $v_i^T t > 0$ が検出される (Pushing Motion)。

〈Case 5〉関節が v_i 方向への移動自由度を失う。

〈Case 1〉は, なぞり動作中に接触点ジャンプが起こり, P_{1st} 検出後に $P_{2nd} \in \mathcal{G}_i \cup (\overline{\mathcal{I}_i} \cap \overline{\mathcal{V}_i})$ が検出された場合である。この場合, $P_{1st} P_{2nd}$ 間を未知領域として確保し, なぞり動作を続行する (Fig. 11 (a) 参照)。〈Case 2〉は, P_{1st} 検出後に $P_{2nd} \in \overline{\mathcal{G}_i} \cap (\overline{\mathcal{I}_i} \cup \mathcal{V}_i)$ が検出された場合である。この場合に〈Case 1〉と同様な処理を行うと, $Ext(A_i B_i)$ 内において冗長な未知領域の確保を行ってしまう可能性がある。そこで, なぞり動作を中断し, $P_{1st} P_{fin}$ 間を未知領域として確保する

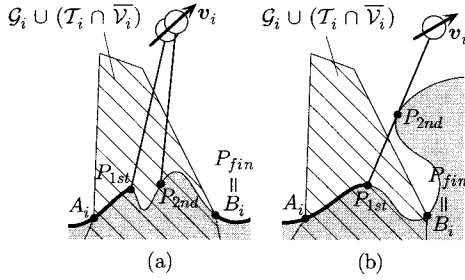
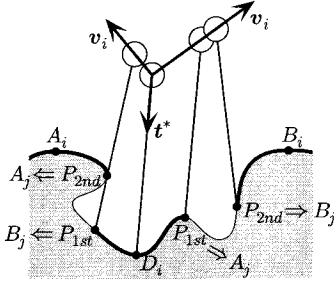
Fig. 11 P_{2nd} detected on $Int(A_i B_i)$ or $Ext(A_i B_i)$.

Fig. 12 How to store non-detected area.

(Fig. 11 (b) 参照). <Case 3> は, P_{1st} 検出後にプローブ先端が領域 $\mathcal{F}$ 内に入った場合である. この場合, プローブは $\mathcal{F}$ を通過し終わるまで対象物と再び接触することはないので, プローブ先端が $\mathcal{F}$ 内に入った時点でなぞり動作を中断し, $P_{1st}P_{fin}$ 間を未知領域として確保する (Fig. 10 (b) 参照). <Case 4> は, なぞり動作実行中にプローブを押し込む状態が検出される場合である. このような場合は, なぞり動作を中断し, 中断直前の検出点を P_{1st} として $P_{1st}P_{fin}$ 間を未知領域として確保する. <Case 5> は, なぞり動作実行中にプローブが左右から拘束され, 関節が v_i 方向への移動自由度を失ってしまう場合である. このような場合は, ロボット関節のトルクセンサに異常に大きな出力が現れるので, その情報をもとになぞり動作を中断し, 中断直前の検出点を P_{1st} として $P_{1st}P_{fin}$ 間を未知領域として確保する. また, Fig. 9 (c) のような場合には, A_i 方向へは定理 4 によりはじめてなぞり動作が実行されないが, 定義 9 及び上述の処理により, Fig. 10 (c) のように $(D_i, Q) = (P_{1st}^{(1)}, P_{2nd}^{(1)})$, $(Q, A_i) = (P_{1st}^{(2)}, P_{fin}^{(2)})$ と解釈でき, それぞれを未知領域として確保する.

4.3.3 新たな未知領域の確保

なぞり動作実行中に新たに j 番目の未知領域を確保する場合, 以下のルールに従って A_j, B_j を決定する.

< A_j, B_j の決定ルール> (Fig. 12 参照)

(i) $P_{fin} = A_i$ の場合: $(A_j, B_j) = (P_{2nd} \text{ or } P_{fin}, P_{1st})$.

(ii) $P_{fin} = B_i$ の場合: $(A_j, B_j) = (P_{1st}, P_{2nd} \text{ or } P_{fin})$.

上述のルールに従って未知領域 $A_j B_j$ を確保すれば, A_j, B_j のパラメータ s_{A_j}, s_{B_j} に対し $s_{A_j} < s_{B_j}$ が成立し, 定義 3 における V_i が有効に利用できる.

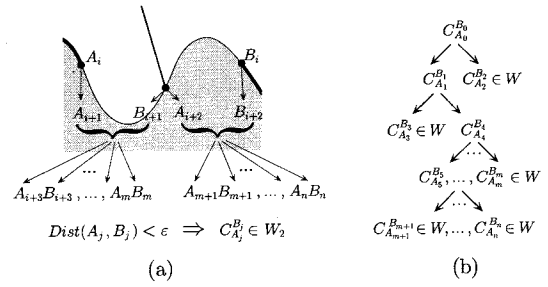


Fig. 13 Infinite loop escape.

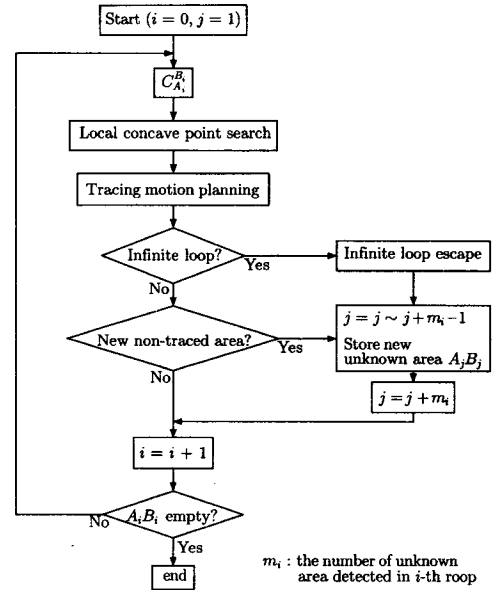


Fig. 14 Flowchart.

4.4 無限ループ回避処理

局所最凹部点検出動作及び対象物表面なぞり動作を実行中に, プローブが同じ点を繰り返し検出し続け, アルゴリズムが無限ループに陥る可能性がある. このような無限ループに入ってしまった場合には, 初期進入時と同様な方法を利用してプローブ先端が必ず新たな接触点を検出する, 無限ループ回避処理を設ける. 初期進入において, 領域 $A_i B_i$ 内に必ず新たな接触点が検出できることが定理 1 によって保証されているので, Fig. 13 (a) に示すように, 領域 $A_i B_i$ を新たな領域 $A_{i+1} B_{i+1}$ と領域 $A_{i+2} B_{i+2}$ に分断することができる. 分断後, 無限ループ回避処理を終了し再び局所最凹部点検出動作及び対象物表面なぞり動作を実行していく. ここで, 無限ループがセンシング動作中に連続的に起こったと仮定する. このような極端な場合でも, Fig. 13 (b) に示すように, $A_{i+1} B_{i+1}$ ($A_{i+2} B_{i+2}$) を次々と新たな領域に分断していくことができる. したがって, いずれ全ての新たに分断された領域に対し, $Dist(A_j, B_j) < \epsilon$ が成立するようになり $C_{A_j}^{B_j} \in W_2$ とすることができる. したがって, 無限ループが連続的に起こる極限的な場合にもセンシング動作により対象物形状を浮き彫りにすることが可能である.

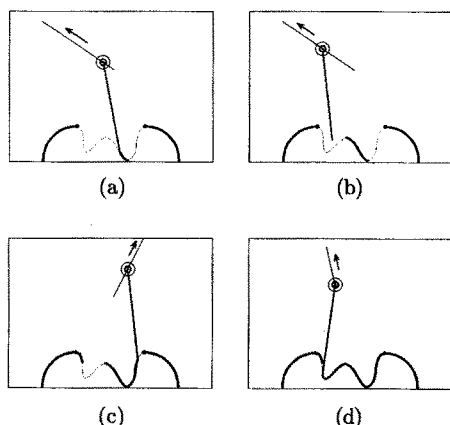


Fig. 15 Simulation result (example 1).

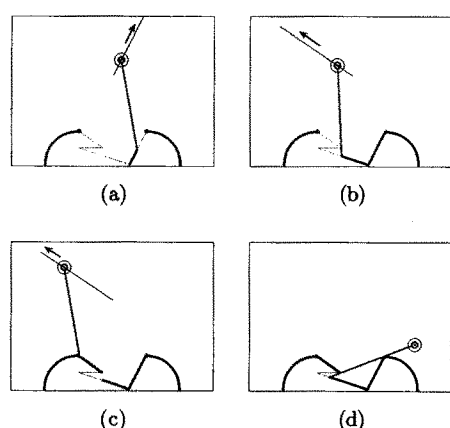


Fig. 16 Simulation result (example 2).

4.5 アルゴリズムのフローチャート

Fig. 14 に提案するアルゴリズムのフローチャートを示す。センシング動作中に新たな m_i 個の未知領域が検出された場合、領域 $A_j B_j (j = j \sim j + m_i - 1)$ として確保する。センシング動作は、全ての未知領域が $W = \bigcup_{i=1}^3 W_i$ に属するまで実行し続けられ、終了時には $C_{A_0}^{B_0} \in W$ を達成する。

5. シミュレーション

Fig. 15 と Fig. 16 にシミュレーション結果を示す。点線部及び太線部はそれぞれ未知領域、検出された領域を示し、関節を通過している線分は定理 4 の十分条件に基づいた関節の移動経路を表している。ただし、シミュレーションでは $D_i A_i$ (あるいは $D_i B_i$) と平行な線分を選んでいく。Fig. 15 では全ての未知領域が検出されているのに対し、Fig. 16 ではプローブの接触不可能な領域が存在している。これらのシミュレーション結果より、センシング動作を通じて未知領域が段階的に減少していき、最終的には接触不可能な領域を除く全ての領域が検出されることがわかる。

6. 実験

プローブを末端に装着した 3 関節ワイヤ駆動型ロボット²⁰⁾

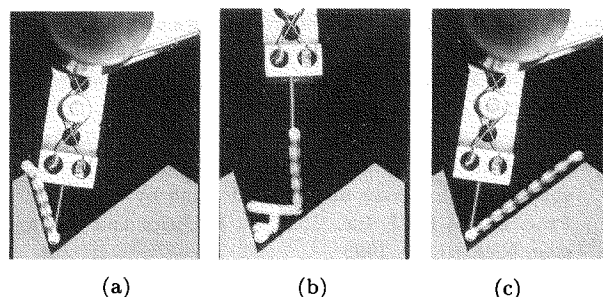


Fig. 17 An example of experiment: (a) Bisection method; (b) Left tracing motion; (c) Right tracing motion.

を用いて実験を行った。ロボットの各関節にはトルクセンサ²¹⁾と角度センサが搭載されている。プローブ自身はセンシング機能を持たないが、多点接触でない限りトルクセンサ及び角度センサ出力により環境との接触点が検出可能となっている。一点接触を保証するために、対象物として単純な凹形状を用意した。Fig. 17 はセンシング動作中の連続写真であり、(a), (b), (c) はそれぞれ二分法、左方向なぞり動作、右方向なぞり動作に対応している。プローブ先端には 5Hz で点灯する LED が備え付けられており、センシング動作実行中のプローブ先端の軌跡が白い点として現れるようになっている。

7. 結論

本研究では、触覚による凹形状センシングアルゴリズムを提案した。はじめに局所最凹部点を検出し、続いて凹部分の外部へ向かってプローブを移動させることにより、プローブを引きずる状態で対象物表面をなぞる動作を実現している。そのために、プローブ先端を探索領域内に接触させる十分条件、二分法終了時にプローブ先端を探索領域内に収束させる十分条件、引きずる状態のなぞり動作を生成する十分条件を示した。また、シミュレーション及び実験により提案するアルゴリズムの有効性を示した。

現段階では、プローブは十分に長く関節は凹部分内に侵入しないと仮定している。今後は、この仮定を取り払いプローブ先端が未知凹部分のより奥地まで到達可能な場合を考慮していく予定である。一方、二次元の場合と異なり、三次元対象物の全ての表面をなぞることは現実的には不可能である。その場合、パラメータ化によるローカル形状関数¹⁸⁾が、三次元対象物の局所的な形状を表現するのに有効であると考えられるが、いずれにしても、本研究で提案した引きずり状態でのなぞりという基本概念が、三次元対象物に対するセンシング戦略においても有効であると確信している。

最後に実験に協力していただいた、N. Thaiprasert 君に心から謝意を表す。

参考文献

- 1) Dario P, and G. Buttazzo: An anthropomorphic robot finger for investigating artificial tactile perception, Int J.

- Robotics Research, vol.6, no.3, pp25-48, 1987.
- 2) Fearing, R. S. and T. O. Binford: Using a cylindrical tactile sensor for determining curvature, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, pp765-771, 1988.
 - 3) Maekawa, H., K. Tanie, K. Komoriya, M. Kaneko, C. Horiguchi, and T. Sugawara: Development of a finger-shaped tactile sensor and its evaluation by active touch, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, p1327, 1992.
 - 4) Salisbury, J. K.: Interpretation of contact geometries from force measurements, Proc. of the 1st Int. Symp. on Robotics Research, 1984.
 - 5) Brock, D.L. and S.Chui: Environment perception of an articulated robot hand using contact sensors, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, pp89-96, 1987.
 - 6) Kaneko, M., and K. Honkawa: Compliant motion based active sensing by robotic fingers, Preprints of the 4th IFAC Symp. on Robot Control, Capri, pp137-142, 1994.
 - 7) Allen, P. and K. S. Roberts: Haptic object recognition using a multi-fingered dexterous hand, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp342-347, 1989.
 - 8) Bajcsy, R.: "What can we learn from one finger experiments?", Proc. of the 1st Int. Symp on Robotics Research, pp509-527, 1984.
 - 9) Bicchi, A., Salisbury J. K. and D. J. Brock: Contact sensing from force measurements, Int. J. of Robotics Research, vol.12, no.3, 1993
 - 10) Bays, J. S. : Tactile shape sensing via single- and multi-fingered hands, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, PP 290-295, 1989.
 - 11) Caselli, S., C. Magnanini, F. Zanichelli, and E. Caraffi: Efficient exploration and recognition of convex objects based on haptic perception, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, PP 3508-3513, 1996.
 - 12) Gaston, P. C., and T. Lozano-Perez: Tactile recognition and localization using object models, The case of polyhedra on a plane, MIT Artificial Intelligence Lab. Memo, no.705, 1983.
 - 13) Grimson, W. E. L. and T. Lozano-Perez: Model based recognition and localization from sparse three dimensional sensory data, AI Memo 738, MIT, AI Laboratory, Cambridge, MA, 1983.
 - 14) Cole, R., and C. K. Yap: Shape from probing, J. of Algorithms 8, pp19-38, 1987.
 - 15) Russell, R. A. : Using tactile whiskers to measure surface contours, Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp1295-1300, 1992.
 - 16) Tsujimura, T. and T. Yabuta: Object detection by tactile sensing method employing force/moment information, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.4, pp444-450, 1988.
 - 17) Roberts, K. S. : Robot active touch exploration, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, PP 980-985, 1990.
 - 18) Chen, N., R. Rink, and H. Zhang: Local object shape from tactile sensing, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, PP 3496-3501, 1996.
 - 19) Boissonnat, J. D. and M. Yvinec: Probing a scene of non-convex polyhedra, Algorithmica, vol.8, pp321-342, 1992
 - 20) Kaneko, M. and N. Imamura: Development of a tendon-driven finger with single pulley-type TDT sensor, Proc. of the IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems, pp 752-757, 1991.

- 21) Kaneko, M., K. Yokoi, and K. Tanie: On a new torque sensor for tendon drive fingers, IEEE Trans. on Robotics and Automaton, vol.6, no.3, pp501-507, 1990.

[著者紹介]

金子 真 (正会員)



1976年九州工業大学機械工学科卒業。81年東京大学工学系研究科機械工学専門課程博士課程卒業。工学博士。同年、通産省工業技術院機械技術研究所入所。90年九州工業大学情報工学部助教授。93年広島大学工学部教授、現在に至る。ロボットハンドやアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE Trans. on Robotics and Automation, Associate Editor (90-94). IEEE Robotics Magazine, Editorial Member (97-). 日本機械学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員。

東 森 充



1996年広島大学工学部第2類(電気系)卒業, 同年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期入学, 現在に至る。アクティブセンシング, ロボットハンドなどの研究に従事。日本ロボット学会の会員。

辻 敏 夫 (正会員)



1985年, 広島大学大学院工学研究科博士前期修了。同年同大学工学部助手。94年同大学助教授。92年ジェノバ大学(イタリア)客員研究員。人間とロボットの運動制御, ニューラルネット, マン・マシンシステムなどの研究に従事。電気学会, 日本ロボット学会, IEEE等の会員(工学博士)。