

ビジョンベースト人工能動触角[†]

—基本原理と実験的検証—

金山尚樹*・金子真*・辻敏夫*

Vision Based Artificial Active Antenna
—Basic Principle and Experimental Verification—

Naoki KANAYAMA*, Makoto KANEKO* and Toshio TSUJI*

This paper proposes the Vision Based Active Antenna (VBAA) that can detect the contact force, the stiffness of the environment, and the contact location between an insensitive elastic antenna and an environment, through the observation of the antenna's shape by a camera. We show that both the contact location and the contact force can be estimated by measuring two arbitrary points on the antenna after a pushing motion, even though the exact contact point is hidden by occlusion. By considering the geometrical relationship between the virtual (without environment) and the real (with environment) displacements of the contact point, the stiffness of the environment can also be estimated, while our conventional Active Antenna can not do. We present the basic working principle of the VBAA and give experimental verification.

Key Words: tactile based active sensing, vision sensor, position sensing, force sensing, stiffness sensing

1. はじめに

作業空間における物体の位置をセンシングする手段として、視覚を用いたシステムが数多く提案されている。視覚を用いれば大域的な情報が得られる反面、環境の影響の除去、対象物の抽出および形状判断を行うため、複雑な画像処理が必要になる。また、オクルージョン（注視点が環境などによって隠されてしまうこと）のため正確な接触点検出が困難になったり、非接触のため対象物の剛性は測定できないという欠点を有する。位置のセンシングシステムとしては接触覚を用いたものも考えられる。筆者らは人工能動触角の一連の研究^{1), 2)}の中で、根元で測定される触角の見掛けの回転コンプライアンスが接触点までの距離に比例することを用いて、位置のセンシングを行ってきた。しかし人工能動触角はトルクセンサや回転角度センサといった局所的な情報しか取り扱っ

ていないため、対象物が柔らかい場合に、触角の柔らかさと対象物の柔らかさが分離できないといった大きな欠点を有している。

本論文では、これらの問題点を解決する一つのアプローチとして、ビジョンベースト人工能動触角 (Vision Based Artificial Active Antenna, 以下 VBAA と略) を提案する。VBAA は、対象物に押し当てられた触角の変形を CCD カメラから取り込み、触角と対象物との接触点および、対象物の剛性を同時に求めるシステムである。VBAA では、CCD カメラによって大域的な情報を把握することができるため、従来の人工能動触角では本質的に不可能であった対象物の剛性センシングも可能となる。また、VBAA における視覚センサは、対象物そのものを見るのではなく、触角だけを見れば良いので、カメラにとって最も都合の良い触角を用いれば、通常の視覚を用いた位置センシングシステムに比べて、画像処理の負担を大幅に軽減できる。本論文では、触角の力-変形関係が既知の場合に、触角の位置が最低 2 点観察できれば、触角の全形状が推定できることを示す。これにより、VBAA がオクルージョンに対してロバストなセンシ

[†] 第 13 回日本ロボット学会学術講演会で発表 (1995・11)

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

(Received October 4, 1995)

(Revised June 3, 1996)

ングシステムであることを裏付けた上で、触角形状から接触点位置、接触力および、対象物の剛性を算出する方法について述べる。さらに検証実験を行い、VBAAの有効性を示す。

2. 従来研究

昆虫の触角に似たセンサは、これまでもいくつか提案されている。たとえば、Wang and Will³⁾や Russell⁴⁾は、ピアノ線のような弾性ワイヤが対象物に接触した際に生じるワイヤの変形を、根元部分のON-OFF接触スイッチで検出する簡単な機構の触覚センサを考案している。歩行ロボットの足周りにウイスカセンサを取り付けて障害物検出に用いた研究は、広瀬ら⁵⁾、Sciebelら⁶⁾、Brooks⁷⁾などによって報告されている。これらの研究は、いずれもセンサと環境との接触の有無をON-OFF情報としてとらえようとしているもので、対象物と弾性ワイヤとの接触情報しか得られない。これに対し、Russell⁸⁾はワイヤの先端が絶えず対象物と接触するという仮定のもとで、アレイ状のウイスカセンサシステムによる対象物形状の再構築に成功している。

これに対して金子ら⁹⁾は、センシング機構をもたない弾性ワイヤに1自由度のアクチュエータと位置センサ、一軸のトルクセンサを付加した2D能動触角によって、触角と2次元物体との接触点までの距離が、触角の回転コンプライアンスに比例することを導出した。この原理は金山ら²⁾によって、3次元の位置検出に拡張されている。一方、上野ら⁹⁾は接触点位置に応じてフレキシブルワイヤの固有振動数に変化することに着目して、根元に配置されたトルクセンサのみの信号から接触点を見つける方法について提案している。これらの研究ではワイヤのもつ柔らかさとアクチュエータによる能動動作が接触点距離の検出に必要不可欠であることが示されている。ただし、触角の柔らかさを通して測定するこれらの能動触角では、対象物そのものが柔らかい場合に、触角と対象物の柔らかさが分離できないという問題点があった。

3. VBAAの基本構成

3.1 仮定

本論文では以下の仮定を設ける。

- [仮定1] 触角の運動は平面内に限定する。
- [仮定2] 触角の変形は、たわみ方程式が成り立つ程度の微小とする。
- [仮定3] 対象物は、触角の押し込み動作によって移動しない。

本論文は、VBAAの基本原理について考察することを目的としている。したがって、問題を簡単化するため

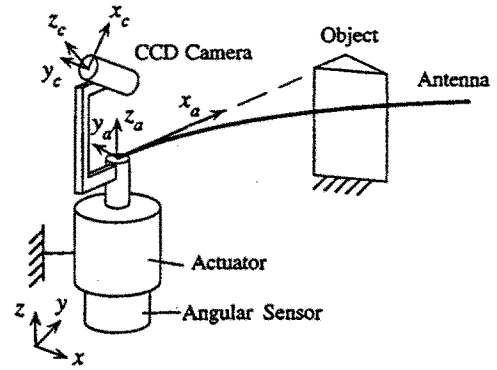


Fig. 1 An overview of VBAA.

に仮定1により平面問題に限定して考える。VBAAは片持ち真直梁のカーたわみ関係式から対象物との接触位置および、接触力を求めるので、たわみ方程式の有効性を保証するために仮定2が必要である。仮定3は、触角の接触点における移動量が、アクチュエータによる押し込み角度から求まることを保証する。ただし、接触位置と接触力だけを求める場合には、対象物の局所的な弾性変形だけではなく、対象物そのものの移動があっても構わない。

直線の弾性棒を用いた場合、摩擦力がどんなに大きくても、回転軸周りにモーメントを生成しないため、実質的に摩擦力は弾性棒の変形に寄与しない。ただし、曲線形状の弾性棒に対しては、この限りではない。本研究では、問題の取り扱いを簡単にするため、触角を直線形状の弾性棒に限定するので、摩擦の大きさはセンシングにほとんど影響を与えない。

3.2 基本構成

VBAAの構造をFig. 1に示す。VBAAは弾性棒を触角として用い、1軸のモータと角度センサおよびCCDカメラを構成要素としている。触角の1端はモータの回転軸上で固定されている。

VBAAにおいて、カメラは絶対系に固定する場合と、触角系に固定する場合の2通りが考えられる。カメラを絶対系に固定した場合、触角の回転角度もビジョンから測定するので、モータに角度センサが必要ないという利点がある反面、触角のセンシング領域をすべて画角内に収めなければならないので、相対的に解像度が落ちてしまう。カメラを触角系に固定すれば、カメラと触角が相対的に静止するので、モータ側に回転角度センサが必要になるものの、カメラの視野は必要最小限ですむ。センシング精度に解像度が大きくかわってくることで、モータに角度センサを取り付けることが非常に容易であることを考えて、本論文ではカメラを触角系に固定した場合のVBAAを取り扱う。

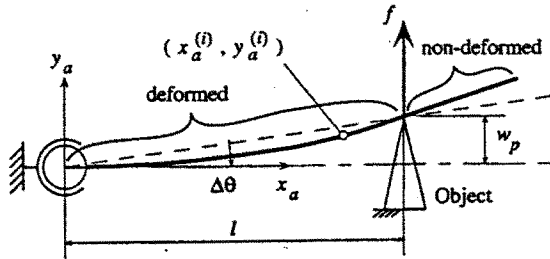


Fig. 2 Top view of the VBAA.

3.3 座標系

絶対座標系を Σ_0 , 触角座標系を Σ_a とする。触角座標系は、初期状態で触角と x_a 軸が重なるように設定し、原点を回転中心として z_a 軸周りに回転する。また、絶対座標系と触角座標系の x 軸は平行で、触角の回転量 θ は角度センサによって測定できる。なお、仮定1より触角の変形は触角座標系の $x_a y_a$ 平面上に限定するので、本論文では $x_a y_a$ 平面上での接触位置を求める。

Fig. 1の構成では、カメラには触角、対象物、周辺環境が映ることになる。その中から触角だけを抽出して処理を行う。カメラと触角座標の相対関係が決まれば、キャリブレーション実験により画像から触角座標への変換ができるので、以降ではカメラから触角上の点群の $x_a y_a$ 平面での座標値が得られるものとする。

4. VBAAの基本原理

仮定1より、触角の変形は $x_a y_a$ 平面に限定されているので、本章では $x_a y_a$ 平面における触角と対象物との接触点、触角の変形に作用する接触力、および対象物の剛性を求める方法について考察する。

4.1 触角変形の基礎式

Fig. 2に示すように、固定端から距離 l の点に外力 f を受ける触角のたわみ形状は、ヤング率と断面2次モーメントをそれぞれ E, I とすれば、以下の式で表せる¹⁰⁾。曲線形状部分 ($0 < x_a \leq l$)

$$y_a = \frac{f}{6EI}(3l - x_a)x_a^2 \quad (1)$$

直線形状部分 ($0 < l \leq x_a$)

$$y_a = \frac{f}{6EI}(3x_a - l)l^2 \quad (2)$$

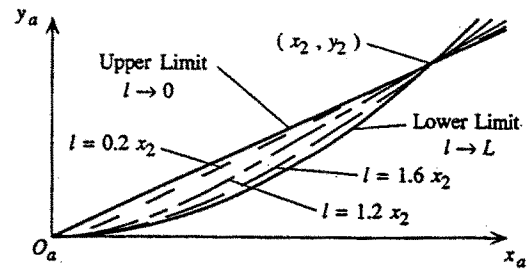
ここで、 (x_a, y_a) は触角座標から見た点であり、 l は触角座標系における接触点位置の x_a 軸成分である。

(1), (2) 式における未知数は、 f と l だけである。

4.2 接触位置と接触力が求まるための条件

《定理1》 全長が L の触角上の2点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ($0 < x_1 < x_2$, $0 < y_1, y_2$) が観測されたとき、触角と対象物との間の接触点および接触力が一意に求まる条件は、

$$\frac{y_2(3L - x_1)x_1^2}{(3L - x_2)x_2^2} \leq y_1 \leq \frac{y_2}{x_2} x_1 \quad (3)$$

Fig. 3 Upper and lower limit of Antenna shape depending on l .

を満たすことである。

ビジョンによって観測された触角上の1点 (x_2, y_2) に着目すると、この点を通る触角形状は、未知量である接触点距離 l の変化により、Fig. 3のように(3)式の範囲で単調に変化する。もう1つの点 (x_1, y_1) がその範囲内にあれば、2点を同時に通る触角形状が一意に定まり、結果として接触力および接触点が決まる。なお、定理1の証明を付録Aに付記したので参照されたい。誤差を含まない理想的な触角上の2点を用いれば、それらの点は必ず(3)式を満たし、正しい接触点と接触力が求まる。実際の画像では、観測された触角上の点は誤差を含んでいるものの、(3)式を満たす限り、必ず唯一の接触点と接触力が求まることに留意されたい。

4.3 2点検出法

(3)式を満たす触角上の2点を選んだ場合に得られる具体的な接触点位置および接触力は、(1), (2)式を連立方程式として解くことにより、解析的に求まる。以下に具体的な解の形を示す。

(i) 曲線上の2点をとった場合

曲線部分の2点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ($0 < x_1 < x_2 \leq l$) を仮定する。共に曲線上の点なので、(1)式からなる2元連立1次方程式が得られる。この連立方程式は、 $f = 0$ および、 $x_a = 3l$ のとき解けないが、触角がたわんでいることから $f \neq 0$ であり、また曲線部から2点を選んだので必ず $x_a < l$ である。したがって、以下に示すただ1組の f, l が求まる。

$$\begin{cases} f = 6EI \frac{x_2^2 y_1 - x_1^2 y_2}{x_1^2 x_2^2 (x_2 - x_1)} \\ l = \frac{x_1^3 y_2 - x_2^3 y_1}{3(x_1^2 y_2 - x_2^2 y_1)} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、曲線上の2点を選んだことから $0 < x_1 < x_2 \leq l$ が成り立っているので、 $x_2 - x_1 \neq 0$ 。また、式(1)を用いて y を消去すると $x_1^2 y_2 - x_2^2 y_1 = f x_1^2 (x_1 - x_2) x_2^2 \neq 0$ である。

(ii) 直線上の2点をとった場合

直線部分の2点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ($0 < l \leq x_1 < x_2$)

を使った場合を考える。共に直線上の点なので、式(2)からなる2元連立3次方程式が得られる。ここでも、曲線上の2点をとった場合と同様に解が求まらない場合が存在する。 $x_a = l/3$ の時に解けないが、直線部分から点をとっているので、 $l < x_a$ より、その場合は除外できる。このように条件を考慮すると以下の解が求まる。

$$\begin{cases} f = 2EI \frac{-(y_1 - y_2)^3}{9(x_2 - x_1)(x_1 y_2 - x_2 y_1)^2} \\ l = \frac{3(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{y_2 - y_1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f = +\infty \\ l = 0 \text{ (重根)} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、直線上の2点を選んだことから $0 < l \leq x_1 < x_2$ が成り立っているので、 $x_2 - x_1 \neq 0$ 。また、(2)式を用いて変形すると $x_1 y_2 - x_2 y_1 = fl^3(x_2 - x_1) \neq 0$ である。さらに、 $l = 0$ の重根では、 $f = +\infty$ なので、解としては不適当であり、最終的に条件を満たす解は(5)式だけである。

(iii) 曲線、直線からそれぞれ1点づつとった場合
曲線上の点 (x_1, y_1) と、直線上の点 (x_2, y_2) ($0 < x_1 \leq l \leq x_2$, $x_1 \neq x_2$) の場合は、(1), (2)式から求まるが、解の形が複雑なため、一意に解が求まることのみを示す。(1), (2)式から f を消去すると

$$g(l) = y_1 l^3 - 3x_2 y_1 l^2 + 3x_1^2 y_2 l - x_1^3 y_2 = 0 \quad (7)$$

という l に関する3次方程式が求まる。(7)式は、 $l \leq x_1$, $x_1 \leq l \leq x_2$, $x_2 \leq l$ の3つの実根を持つ。このことは、 $0 < f$ のときに

$$\lim_{l \rightarrow -\infty} g(l) = -\infty \quad (8)$$

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} g(l) = +\infty \quad (9)$$

$$g(x_1) \geq 0 \quad (10)$$

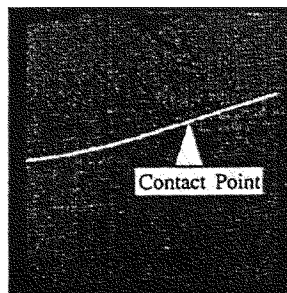
$$g(x_2) \leq 0 \quad (11)$$

であることから明らかである。ただし、(10), (11)式は、(7)式に x_1, x_2 を代入し、 y_1, y_2 を消去した式が

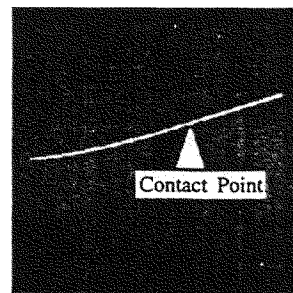
$$g(x_1) = \frac{f}{6EI} x_1^3 (l - x_1) \{ (3x_2 - x_1)(l - x_1) + l(x_2 - x_1) + 2l(x_2 - l) \} \quad (12)$$

$$g(x_2) = -\frac{f}{6EI} x_1^2 (x_2 - l) \{ l(2x_2 + l)(x_2 - x_1) + 2lx_2(x_2 - l) + 2x_2^2(l - x_1) \} \quad (13)$$

となることから示せる。以上の結果より、曲線部分から (x_1, y_1) 、直線部分から (x_2, y_2) を選んだ場合でも、 $x_1 \leq l \leq x_2$ なる l が解として必ず1つ(重根の場合を含む)存在する。そのときの l を用いて f も一意に求めることができる。



(a) Digitized image



(b) Binary image

Fig. 4 Captured picture.

これらの解析解を適用する場合、観測された点が曲線部分か直線部分かによって用いる式が異なるが、ビジョンによって観測された点が曲線部分なのか直線部分なのかをあらかじめ知ることはできない。したがって、曲線部分からと直線部分からと観測された点の組み合わせ3通りに対して、解を求める式がそれぞれ3通り存在する。ただし、定理1は任意の一組の解で条件を満たすれば、他の二組の解は条件を満たしなくなることを意味している。たとえば、曲線部分の式2つを連立させて求めた(4)式からは、 $0 < x_1 < x_2 \leq l$ を満たす l が求まらなければならないが、このような拘束条件を満たす解が、どのような2点を選んだ場合にも1つしか存在しないので、観測された任意の2点の座標を3通りの式すべてに代入し、その結果得られた解の中で条件を満たす解だけを選べば、ただ1つの接触位置と接触力が得られる。この方法を、以後2点検出法と呼ぶ。

4.4 フィッティング法

原理的には、触角上の任意の2点の座標が求まれば触角の形状は一意に決まるが、解析解を実際の画像データに適用すると、画素が離散化されているため計算結果に誤差を生ずる。この誤差を小さくするために画像中の触角上の点群と(1), (2)式とのフィッティングから、最適な \hat{f} と \hat{l} を推定する方法が実質的には有効である。

画像から n 個の触角上の点^①が得られたとき、 i 番目の点の座標を $(x_a^{(i)}, y_a^{(i)})$ とする。触角形状関数を

$$h^{(i)}(f, l, x_a^{(i)}) = \begin{cases} \frac{f}{6EI} (3l - x_a^{(i)}) x_a^{(i)2} & (0 < x_a^{(i)} \leq l) \\ \frac{f}{6EI} (3x_a^{(i)} - l) l^2 & (0 < l \leq x_a^{(i)}) \end{cases} \quad (14)$$

と定義して、触角形状と画像データとの差の2乗和を誤差関数 $e(f, l)$ とする。

$$e(f, l) = \sum_{i=1}^n \|h^{(i)} - y_a^{(i)}\|^2 \quad (15)$$

この誤差関数を最少化する f と l の組を、推定するこ

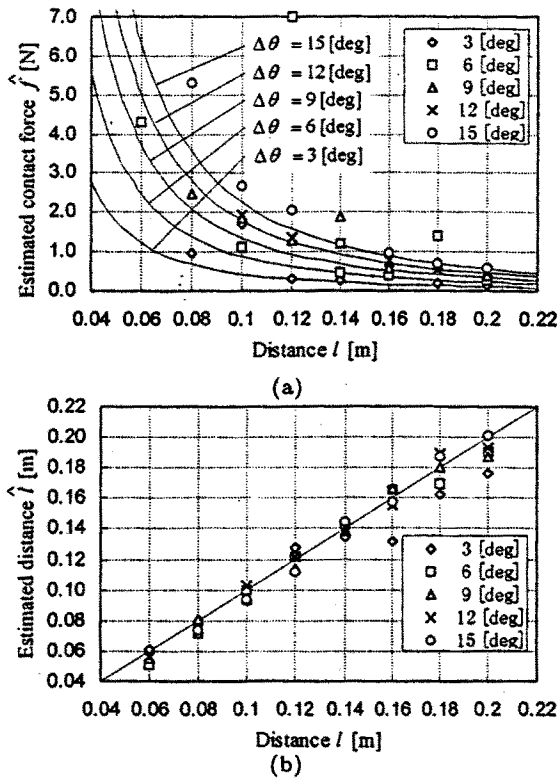


Fig. 5 Experimental results using two-points detecting method (stiff environment).

とで接触力と接触位置を求めることができる。なお、接触位置 l だけを求めたいのであれば、触角の剛性 E と I 、押し込み量および対象物の剛性は未知であっても構わない。 E 、 I が既知であればさらに、接触力まで求まる。以下、関数フィッティングによって接触位置および接触力を推定する方法をフィッティング法と呼ぶ。

5. 検証実験

今回使用した実験装置は、カメラと触角を絶対系に固定し、対象物を動かすことで擬似的に能動触角の動作を実現するようにした。CCDカメラからの画像は 256×256 ドット、各点 8bit グレースケールでコンピュータに取り込まれる。この画像から触角上の点だけを取り出し、各点の触角座標における座標値をデータとして使用した。取り込んだ画像の一例を Fig. 4 に示す。(a) は 8bit グレースケールの原画像、(b) はそこから触角だけを抽出した画像である。なお、触角には直径 1.4mm、長さ 22cm のステンレス丸棒を使用した。このような実験装置から得られる触角上の座標データを元に、接触力と接触位置および、対象物の剛性を求めた。

5.1 2点検出法を用いた場合

4.3節で示した解析解を、実データに対して適用する。Fig. 5 は、硬い対象物に押し込んだ場合のデータに対して、接触位置 l を求める解析解を適用したものである。1つの触角画像には多くの点が含まれているため、2点

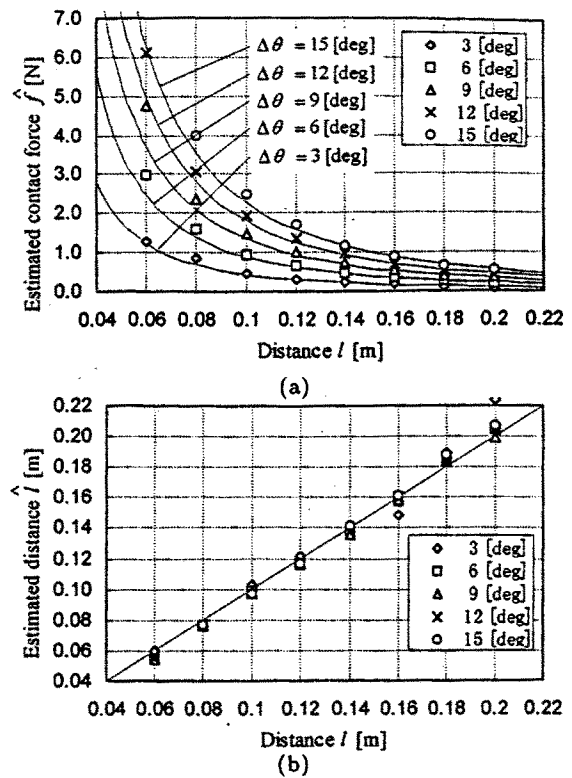


Fig. 6 Experimental results using function fitting method (stiff environment).

しか使わない 2 点検出法を用いれば多くの結果が同時に得られるので、これらをすべて平均したものを、1つの触角画像から得られる結果とする。接触位置および押し込み量を変えたデータに対して、接触力を求めたグラフが Fig. 5 (a)、接触位置を求めたグラフが (b) である。2 点検出法では、画素の量子化誤差の影響を受けやすいため、接触力の検出において、大きな誤差が出ている。一方接触位置のグラフでは、一部誤差が大きいものもあるが、おおむね良い結果が得られた。

5.2 フィッティング法を用いた場合

硬い対象物に対して、対象物の位置と押し込み角度を変化させた場合の実験結果を Fig. 6 に示す。実線が理論値、 \cdot が実験値を表している。Fig. 6 (a)、(b) はそれぞれ接触力と接触位置の推定結果であるが、共に良好な結果が得られている。この結果は、2 点検出法で求めた結果よりも全体的に誤差が小さい。

フィッティング法は収束計算を伴うため、計算時間が非常に長くなってしまふ。2 点検出法では計算時間が短いものの、フィッティング法に比べて画素の量子化誤差の影響を受けやすい。したがって、要求する測定精度に応じて、どちらの方法を用いるか選択すべきであろう。

5.3 剛性推定実験

VBAA では、対象物の形状および柔らかさによらず、接触点の位置と触角にかかる力が求まるので、対象物の弾性係数を求めることができる。触角が対象物に接触してか

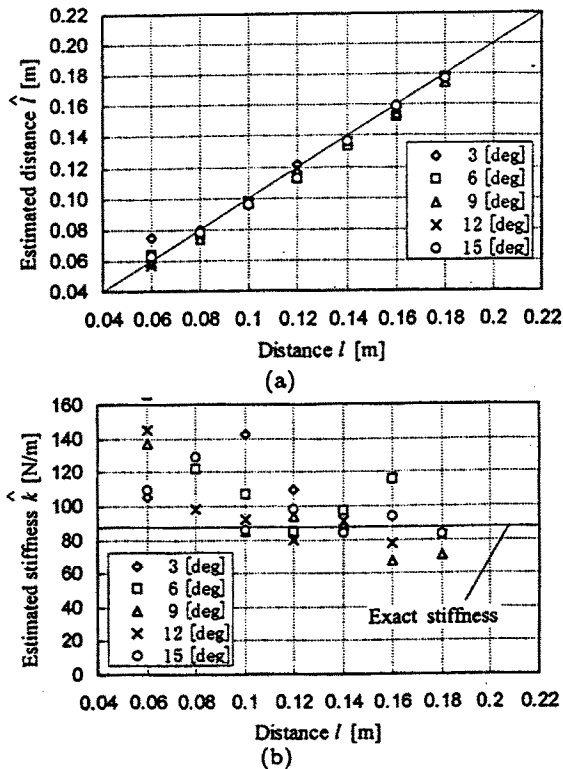


Fig. 7 Experimental results using function fitting method (compliant environment).

ら押し込んだ角度 $\Delta\theta$ は、角度センサによって測定できるので、接触点における触角の移動量は、 $w_p = l \tan \Delta\theta$ として測定できる。触角をばねに押し込んだ場合、触角は力 f を受けて $y_a(l)$ たわみ、ばねは触角と同じ大きさの力を受けて、ある長さ w_s 縮む。対象物のばね定数を k_s とすれば、 f の力を受けて触角は $y_a(l)$ 、対象物は w_s 変形しているので、 $f = k_s w_s = k_s (w_p - y_a(l))$ の関係が成り立っている。したがって、画像から推定した \hat{f} と \hat{l} より、対象物のばね定数は

$$\hat{k}_s = \frac{\hat{f}}{\hat{w}_s} = \frac{\hat{f}}{w_p - y_a(\hat{l})} \quad (16)$$

として求まる。

対象物のばね定数 \hat{k}_s は、 \hat{f} および \hat{l} の推定には全く影響を及ぼさないので、接触点の位置と接触力を推定した上で、対象物の変形 \hat{w}_s を調べて有意な大きさを持っているならば対象物が柔らかいと判断し、(16) 式より対象物の弾性係数を求めればよい。

Fig. 7 は、対象物にコイルばねを用いた場合の実験結果である。(a) は対象物との接触位置、(b) は推定した対象物の弾性係数である。なお、ここで接触位置と接触力の推定には、フィッティング法を用いた。(16) 式を用いて推定した対象物の弾性係数は、接触位置が近いとき、押し込み量が小さい場合に誤差が大きいものの、対象物の弾性係数がほぼ推定できているものと思われる。

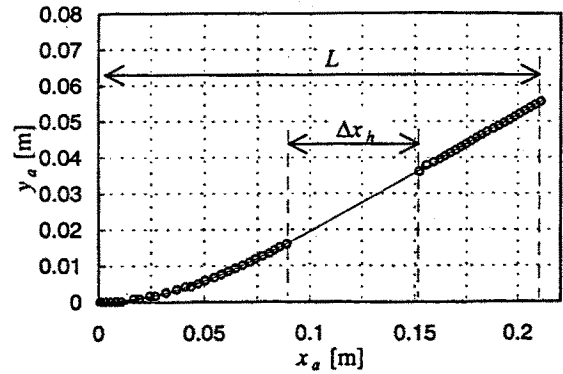


Fig. 8 An example of vision data having the occlusion.

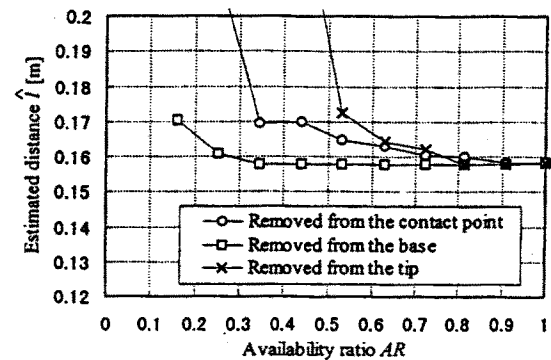


Fig. 9 The effect of occlusion on the sensing error.

6. 考 察

6.1 触角の一部が隠れたときの影響

ビジョンセンサシステムとして用いる場合、必ずしも見たいものがすべて見えない場合があることを考慮する必要がある。VBAA では、カメラと触角との間に障害物がある場合、柔らかい対象物に対して押し込みを行って、触角が対象物にめり込んでしまった場合に、触角の一部または全部が見えなくなってしまう場合がありうる。4章で触角上の2点の座標が分かれば接触力と接触位置が求まることを既に示したが、同時に画像の量子化誤差のため、できるだけ多くの点を使ったフィッティング法がより良い結果を示すことも述べた。フィッティング法では、触角の全体が見えている必要がないことは予想できるが、それでは全体のうちのどのくらいの部分が見えていれば良いのであろうか。Fig. 8 は、ビジョンによって得られたデータの例であるが、触角の一部が隠れている場合である。○印は量子化された触角上の点、実線は推定によって得られた触角形状である。ビジョンによって得られた点の座標を触角座標に変換した時点で、変形前の触角は x_a 軸上にあるため、変形が小さい範囲であれば、触角の元々の長さの変形後の触角先端の x_a 座標は、ほぼ一致するはずである。この点を踏まえて、以下触角にそって座標を考える代わりに、 x_a 軸座標を基準に考えることにする。 x_a 軸上での触角全体の長さを L として、触

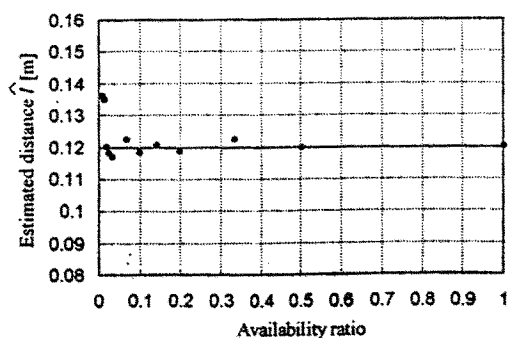


Fig. 10 The effect of data removal on the sensing error.

角の一部が長さ Δx_h 隠れているとしたときの、使用可能データ率を $AR = (L - \Delta x_h)/L$ と定義する。Fig. 9 は Δx_h をそれぞれ、接触点周り、回転中心から、先端からとった場合に現れる接触位置の推定結果を示したグラフである。使用可能データ率 AR が 1 に近い範囲では、いずれの場合も誤差は小さいが、 AR が小さくなるにしたがって、特に先端から隠れていった場合と、接触点周りを基準に隠れていった場合で誤差の増大が顕著である。フィッティング法における評価関数 $e(f, l)$ が、触角の y_a 方向移動量を元としているため、もともと変化の小さい回転中心付近が隠れても検出精度への影響は小さいが、逆に変化の大きい先端部が隠れたときに誤差が大きくなっていくためと推察する。

6.2 データの間引き

フィッティング法によって解を求める場合、データ数が多い程よい結果が得られるものの、逆に収束時間が長くなるという問題点もある。そこで、結果に影響が出ない程度にデータ点数を減らすことを考えてみる。前節では、触角の一部が隠れてしまった場合の影響について調べたが、本節では触角上の点を均等に間引いていった場合について調べる。Fig. 10 は x_a 軸に関して、触角点のデータを等間隔に間引いたときに得られる接触位置の推定結果を示したグラフである。横軸は、推定に使用したデータ数の全体に対する比率である。Fig. 10 では、5% (11点) までデータを間引いても推定誤差があまり大きくならない。この結果から、触角上の点を均等に使うのであれば、推定に用いる点の数は非常に少なくてもよいことがわかる。前節の結果より、回転中心近傍の情報は重要ではないことが分かっているので、さらに使用する点の数を減らすことが可能であろう。

VBAA では、ビジョンで観察すべきものは触覚だけであり、触角はセンシングシステムの一部としてあらかじめ望ましいものを用いることができる。したがって、触角側に模様などを付けることで「見える」点を制限し、ビジョンによるデータ取り込みの段階から、推定処理の負担を軽減する方法が考えられる。このように最初から

ビジョンで処理すべき対象が分かっており、自由に設定可能であることも、VBAA の特徴である。

7. 結 言

本論文で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) アクチュエータ、角度センサ、触角および、カメラからなる、ビジョンベース人工能動触角 (VBAA) を提案した。
- (2) 触角上の 2 点の座標が分かれば、触角と対象物との接触位置、触角にかかる接触力および、対象物の剛性が求まることを示した。
- (3) 2 点検出法を用いれば計算時間が短縮でき、フィッティング法を用いれば推定精度が向上できることを示した。
- (4) 触角の一部が隠れた場合にも、利用可能であることを示した。

VBAA は、対象物に接触する触角部にセンシング機能が必要ないため、配線等が省略できる。このような特徴から、顕微鏡下で観察されるようなマイクロマシンにおける力センサとしても、応用が可能であろう。今後は実用的なコンパクトサイズの VBAA を設計していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 金子, 上野: 能動触角 (Active Antenna) に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 13-1, 149/156(1995)
- 2) 金山, 金子, 辻: 3D 人工能動触角, 計測自動制御学会論文集, 31-12, (1995)
- 3) S. S. M. Wang and Will. P. M.: Sensors for Computer Controlled Mechanical Assembly, The Industrial Robot, March, 9/18(1978)
- 4) R. A. Russell: Closing the Sensor-computer-robot Control Loop, Robotics Age, April, 15/20(1984)
- 5) S. Hirose, et al.: Titan III: A Quadruped Walking Vehicle, Proc. of the Second Int. Symp. on Robotics Research, MIT Press, Cambridge, Massachusetts(1985)
- 6) E. N. Schiebel, H. R. Busby and K. J. Waldron: Design of a Mechanical Proximity Sensor, Robotica, 4, 221/227(1986)
- 7) R. A. Brooks: A Robot that Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network, Neural Computation, 1, 253/262(1989)
- 8) R. A. Russell: Using Tactile Whiskers to Measure Surface Contours, Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1295/1300(1992)
- 9) 上野, 金子, Dynamic Active Antenna (動的能動触角) に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 12-8, 137/143(1994)
- 10) たとえば, 尾田, ほか: 材料力学—基礎編, 森北出版株式会社

〈付 録〉

A. 定理1の証明

(証明) 触角上の2点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ($0 < x_1 < x_2$, $0 < l$, $0 < y_1, y_2$) が観測されたとする。

直線部が (x_2, y_2) を通る場合の触角形状は

$$y_{lc} = \frac{y_2(3l - x_a)x_a^2}{(3x_2 - l)l^2} \quad (0 \leq x_a \leq l \leq x_2) \quad (\text{A.1})$$

$$y_{ll} = \frac{y_2(3x_a - l)}{3x_2 - l} \quad (0 < l \leq x_a \leq x_2) \quad (\text{A.2})$$

であり、曲線部が (x_2, y_2) を通る場合には、以下のようになる。

$$y_{cc} = \frac{y_2(3l - x_a)x_a^2}{(3l - x_2)x_2^2} \quad (0 \leq x_a \leq x_2 \leq l) \quad (\text{A.3})$$

直線部が (x_2, y_2) を通る場合、すなわち接触点 l が x_2 よりも小さい場合は、 $0 \leq x_a \leq l$ の範囲で (A.1) 式の曲線、 $0 < l \leq x_a$ の範囲で (A.2) 式の直線形状である。 l に対する関数の変化を調べるため、それぞれ l で偏微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial l} y_{lc} = \frac{3y_2 x_a^2}{(3x_2 - l)^2 l^3} \{ (2l - x_a)(l - x_2) + (x_a - l)x_2 \} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial}{\partial l} y_{ll} = \frac{3y_2(x_a - x_2)}{(3x_2 - l)^2} \quad (\text{A.5})$$

である。(A.4) 式は $0 \leq x_a \leq l \leq x_2$ の範囲で、(A.5) 式は $0 < l \leq x_a \leq x_2$ の範囲で共に負なので、それぞれ l に対して単調減少である。ただし、 $0 < l_1 < l_2 \leq x_2$ なる2つの接触点によって定まる2つの触角形状を比較した場合、 $l_1 \leq x_a \leq l_2$ の範囲では直線部分と曲線部分の比較が必要である。この範囲では、 l_1 で規定される触角形状 $y_1(x_a)$ は直線、 l_2 で規定される触角形状 $y_2(x_a)$ は曲線である。曲線部分同士および直線部分同士は単調減少なので、 $y_1(l_1) > y_2(l_1)$ かつ $y_1(l_2) > y_2(l_2)$ である。さらに、 $y_2(x_a)$ が下に凸の曲線形状であるから、 $l_1 \leq x_a \leq l_2$ の範囲では常に $y_1(x_a) > y_2(x_a)$ である。したがって、最終的に $0 < l \leq x_2$ における触角形状は l に対して単調減少である。

また、このときの触角形状の上限と下限はそれぞれ

$$\lim_{l \rightarrow 0} y_{ll} = \frac{y_2}{x_2} x_a \quad (\text{A.6})$$

$$\lim_{l \rightarrow x_2} y_{lc} = \frac{y_2}{2x_2^3} (3x_2 - x_a)x_a^2 \quad (\text{A.7})$$

である。

曲線部が (x_2, y_2) を通る場合、すなわち接触点 l が x_2 よりも大きい場合は、 $x_a \leq x_2$ の全領域において (A.3) 式の曲線形状である。 l で偏微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial l} y_{cc} = \frac{3y_2(x_a - x_2)}{(3l - x_2)^2} x_a^2 \quad (\text{A.8})$$

となり、 $0 \leq x_a \leq x_2 \leq l$ のときに必ず負なので、(A.3) 式は l に対して単調減少である。また、(A.3) 式の l の変化による上限と下限を調べると、

$$\lim_{l \rightarrow x_2} y_{cc} = \frac{y_2}{2x_2^3} (3x_2 - x_a)x_a^2 \quad (\text{A.9})$$

$$\lim_{l \rightarrow L} y_{cc} = \frac{y_2(3L - x_a)x_a^2}{(3L - x_2)x_2^2} \quad (\text{A.10})$$

である。

$l \leq x_2$ における下限の (A.7) 式と、 $x_2 \leq l$ における上限の (A.9) 式は同じであることから、ある点 (x_2, y_2) を通る触角形状は、 $0 \leq x_a \leq x_2$ の範囲で l の変化に対して単調減少であり、その範囲は上限が (A.6) 式、下限が (A.10) 式で与えられる。したがってその単調性より、もう1つの観測された点 (x_1, y_1) がその範囲にあれば必ず唯一の触角形状が定まり、その範囲になればそのような触角形状は存在しない。触角形状が決まることは、(1), (2) 式における l と f が既知なることを意味しているので、結果的に接触点位置と接触力は一意に求まる。□

[著者紹介]

金山尚樹 (学生会員)



1994年、九州工業大学情報工学部機械システム工学科卒業。同年広島大学大学院工学研究科(博士課程前期)情報工学専攻入学。96年同博士課程後期進学、現在に至る。メカトロニクス、アクティブセンシングの研究に従事。日本学術振興会特別研究員。

金子真 (正会員)



1981年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。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機械システム工学科助教授。93年広島大学工学部第二類(電気系)教授。ロボティクスやセンサの研究に従事(工学博士)

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)