

## 3 D 人工能動触角<sup>†</sup>

金山尚樹\*・金子真\*・辻敏夫\*

### 3 D Artificial Active Antenna

Naoki KANAYAMA\*, Makoto KANEKO\* and Toshio TSUJI\*

Artificial Active Antenna is a new family of sensing system that can detect the contact location between an insensitive flexible beam and an environment through the measurement of the rotational compliance of the beam in contact with the environment. This paper discusses the 3 D Active Antenna composed of an insensitive flexible beam, two actuators to move the beam in 3 D space, two position sensors to measure the actuator position, and a two-axis moment sensor to evaluate the contact force. The lateral slip, which is the inherent characteristic for 3 D Active Antenna, strongly depends on the pushing direction, the friction at the point of contact, and the normal surface of environment where the antenna makes contact. Generally, such a lateral slip overestimates the rotational compliance, deteriorates the sensing accuracy directly. In this paper, we discuss how to detect the lateral slip by using the sensors implemented and how to determine the next pushing direction for avoiding the lateral slip. We show that the two-axis moment sensor is effectively utilized for detecting the lateral slip. We propose a sensing algorithm which eventually lead to the pushing direction providing the exact contact distance. We also show a practical approach enabling us to detect the contact distance with permissible sensing accuracy, by at most three active motions.

**Key Words:** tactile based active sensing, 3 D active antenna, contact sensing, compliance

### 1. はじめに

昆虫の触覚は複眼構造になっていて、対象物の有無を判定できる程度で、対象物の距離情報や詳細な形状を認識するのには適さない。一方、このような視覚能力を補うかのように、昆虫は2本の発達した触角を有していて、この触角を使って、特に近くの対象物に対して、反射的回避行動を実現しているように思われる。

昆虫の触角に似たセンサは、これまでにもいくつか提案されている。たとえば、Wang and Will<sup>1)</sup> や Russell<sup>2)</sup>らは、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というきわめて簡単な機構の触覚センサを考案している。その後、広瀬らはワイヤに形状記

憶合金を使ったウィスカセンサを歩行ロボットの足回りに取り付け、障害物や路面の近接覚センサとして利用している<sup>3)</sup>。同様なセンサは、Sciebelらによっても報告されている<sup>4)</sup>。BrooksはBehavior-Based Robotの一連の研究の中で、6足歩行ロボットの先端部に昆虫の触角に似たセンサを取り付け、障害物検出用として利用している<sup>5)</sup>。これらの研究で対象にしているセンサは、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は得られるものの、接触点位置まではわからない。これに対し、Russellはアレイ状のウィスカセンサシステムを開発し、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、対象物形状を再構築することに成功している<sup>6)</sup>。

これに対して金子らは、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1つの位置センサ、1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<sup>7)</sup>。一

† 第12回日本ロボット学会学術講演会で発表(1994.11)

\* 広島大学工学部 東広島市鏡山1-4-1

\* Faculty of Engineering, Hiroshima University,  
Higashihiroshima

(Received March 1, 1995)

(Revised July 13, 1995)

方、上野ら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が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<sup>9)</sup>。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。能動触角は対象物に直接接触させてセンシングを行うので、視覚、超音波などの非接触センサとは異なる特徴として、対象物の位置だけではなく柔らかさの情報が得られる可能性がある。能動触角を用いた柔らかさのセンシングについては、現在研究中である。また、実際に対象物に接触する部分が弾性ワイヤであることから、センサの破損に対してあまり神経質になる必要がないことも、ほかの触覚センサと比べて、その有効性が主張できる点である。能動触角では機械的動作が必要なので、センシングに必要な時間はどうしても長くなってしまうが、対象物の位置情報だけではなく接触しないと得られない情報(たとえば、対象物のコンプライアンス)も同時に得られる可能性を秘めている。また能動触角は原理が非常に単純なので、移動ロボットの外部環境認識センサとして有効であろう。ただし、2D能動触角では触角の運動は平面内に限定されていた。

本論文では、3D能動触角を用いた接触点検出原理について考察することを目的としている。2D能動触角では触角の運動は同一平面内に限定されていたが、3D能動触角ではその拘束条件を取り払う。したがって、3D能動触角の場合、触角が長手方向だけではなく、長手方向以外の方向にも滑る可能性があるため、2D能動触角とは異なったセンシング戦略を用意する必要がある。本論文では、押込み方向と2軸のモーメントセンサ出力から、押込み方向を逐一更新し、極限的に長手方向以外の滑りが発生しないような押込み方向(法線方向)および接触位置を見つけるセンシングアルゴリズムを提案する。さらに、たかだか3回の押込み動作で接触位置が、法線方向に押込み動作を行った場合に対して1%以内の検出精度でセンシングできることを示す。

## 2. 仮定と定義

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。

- [仮定1] 触角の変形は線形近似が成り立つ程度の微小とする。
- [仮定2] 触角の曲げモーメントによるたわみに対し、触角の長手方向の伸びや縮みは無視できるほど小さいものとする。
- [仮定3] 触角は一様な材質からなり、その形状は丸棒

とする。

[仮定4] 対象物は凸形状とし、また触角に比べて十分硬いものとする。

[仮定5] 接触点での対象物の曲率は、その影響が無視できる程度に大きいものとする。

[仮定6] 触角のダイナミクスは考えない。

[仮定7] 対象物との摩擦係数は、接触点近傍で均一である。

[仮定8] 押込み動作の前後で接触点までの距離の変化は、接触点までの距離に比べて十分小さいものとする。

仮定1、2によりたわみ線方程式の妥当性が保証される。また仮定3により、触角の長さ方向に直交する断面内での力と変位の方向が一致することが保証される。これらはいずれも、センシングアルゴリズムを構築するうえでの重要な性質を提供する。

以下に、本研究で頻繁に使用する用語を定義しておく。

センサ平面：2軸のモーメントセンサで測定可能なモーメントベクトルが張る平面。

縦滑り：触角の長手方向への滑り。

横滑り：触角の長手方向に対して直交する方向の滑り。

摩擦角：押込みによってたわんだ触角は、対象物に力を及ぼす。対象物は垂直抗力と摩擦力の合力を反力として触角に及ぼす。仮定2において触角そのものの伸びは無視できるほど小さいとしているので、押込みによって生じる触角のたわみ分、接触点で滑りが発生することになる。押込みによってたわみ量は増えていくので、押込みを行っている間、縦滑りは常に発生する。したがって接触点に作用している摩擦力は動摩擦力として取り扱う必要がある。動摩擦力は必ず動摩擦円錐上に現れ、その方向は滑り方向と反対側である。

## 3. 3D能動触角の構造

金子らが提案した2D能動触角システム<sup>10)</sup>では、触角

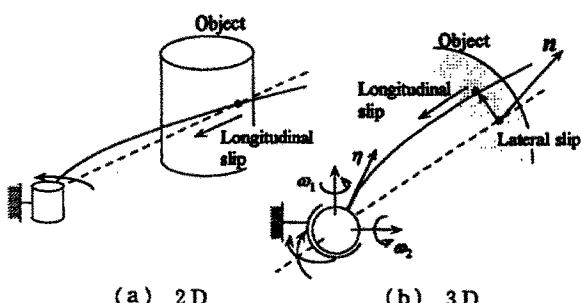


Fig. 1 Comparison between 2D and 3D Active Antennae

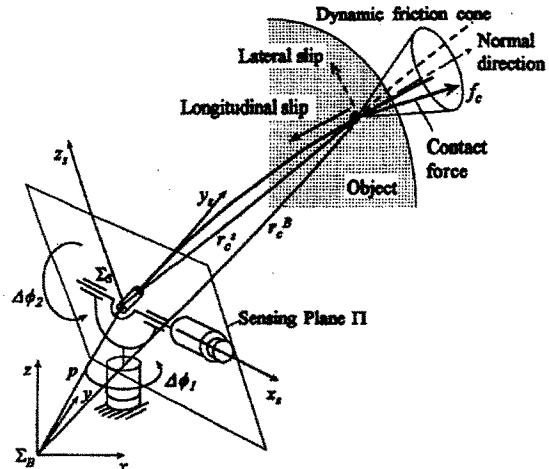


Fig. 2 Basic structure and its coordinate system of 3D Active Antenna

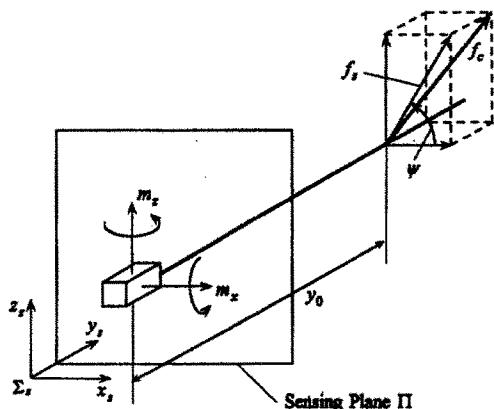


Fig. 3 Sensing of the force direction using 2-Axis moment sensor

の運動を平面内に限定しているので、Fig. 1(a)のように「対象物は触角が運動する平面に直交するように置かれていて、触角の縦滑り以外の滑りは発生しない」という暗黙の仮定を置いていた。3D能動触角センシングではFig. 1(b)のように横滑りが発生しうるので、少なくとも横滑りが発生したかどうかを判定できること、および3次元空間をセンシング可能であることが最低条件である。

任意形状の3次元対象物にセンシングを行うためには、アクチュエータは少なくとも2つ必要である。また、各アクチュエータの回転角度を測るセンサがそれぞれのアクチュエータについて必要であることはいうまでもない。

以上の点を踏まえて、本研究ではFig. 2に示される3D能動触角を考える。 $\Sigma_s$ ,  $\Sigma_o$ はそれぞれ基準座標系とセンサ座標系を表わす。2つのアクチュエータにより触

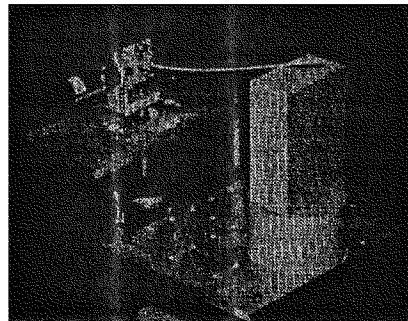


Fig. 4 An overview of the developed 3D Active Antenna

角を空間内の任意の方向に位置決めすることができ、その回転軸の交点上には $x_s$ 軸,  $z_s$ 軸回りのモーメントが測れる2軸のモーメントセンサが設置されている。

同一のセンサ中心をもつ2軸のモーメントセンサを使用した場合、センサが測っているモーメントはFig. 3のように、

$$m_x = y_0 f_s \sin \phi \quad (1)$$

$$m_z = -y_0 f_s \cos \phi \quad (2)$$

である。ただし $f_s$ は触角にかかる反力 $f_c$ をセンサ平面に射影した成分、 $y_0$ はモーメントアームの長さである。これらの式の比をとれば、

$$\tan \phi = \frac{m_x}{-m_z} \quad (3)$$

となる。すなわち、同一のセンサ中心をもつ2軸のモーメントセンサを使用すれば、センサ平面に射影した力のセンサ平面での角度 $\phi$ が測れることに注意されたい。

Fig. 4に試作した3D能動触角の概観を示す。触角はステンレス製ビーム( $\phi=1.0\text{ mm}$ )で、アクチュエータとしてはハーモニック・ドライブ・システムズ社製RH-5AおよびRH-14を用いている。また2軸モーメントセンサとしては、Emplus社製の3軸モーメントセンサの2軸分を使用している。

#### 4. 横滑りが発生しないための条件

対象物が未知の3次元形状の場合、あらかじめ対象物の法線方向を知ることができないため、Fig. 1(b)のように法線方向以外の方向に押込み動作を実行する可能性がある。触角の長手方向ベクトルを $\eta$ 、接触点における対象物の法線ベクトルを $n$ 、各軸周りの回転角速度を $\omega_1$ ,  $\omega_2$ とすれば、押込みによって横滑りが発生しない条件は、

$$n' \cdot (\omega_1 + \omega_2) \times \eta = \|(\omega_1 + \omega_2) \times \eta\| \quad (4)$$

で与えられる。すなわち、触角の速度ベクトルが対象物の法線ベクトルと平行であることが横滑りが起こらないための条件となる。

なお、能動触角は触角のたわみが、梁のたわみ方程式が成り立つ程度に小さい場合についてのみ考えているので、(4)式も同様に押込み量があまり大きくな範囲だけを考える。

### 5. 横滑りが起こらない場合

センサ座標系  $\Sigma_s$  における接触点の位置ベクトルを  $r_c^s = [0 \ y_0 \ 0]^t$  とする。その状態からアクチュエータをそれぞれ  $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$  微小回転させる。対象物がなければ、位置ベクトル  $r_c^s$  の点は、

$$\Delta r_c^{s+d} = \Delta R^s r_c^s \quad (5)$$

に移動する。ただし、 $\Delta R$  は以下の式で表わされる回転行列である。

$$\Delta R = \begin{bmatrix} \cos \Delta\phi_1 & -\sin \Delta\phi_1 & 0 \\ \cos \Delta\phi_2 \sin \Delta\phi_1 & \cos \Delta\phi_2 \cos \Delta\phi_1 & -\sin \Delta\phi_2 \\ \sin \Delta\phi_2 \sin \Delta\phi_1 & \sin \Delta\phi_2 \cos \Delta\phi_1 & 2 \cos \Delta\phi_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

また添字  $s+d$  は、 $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$  回転後のセンサ座標系での値であることを表わしている。実際には、触角は対象物によって  $r_c^s$  に拘束されるため、触角にはたわみが発生する。そのたわみによって触角は対象物からモーメントを受ける。モーメント  $\Delta m_c^{s+d}$  は仮想変位ベクトル  $\Delta r_c^{s+d}$  と反力ベクトル  $\Delta f_c^{s+d} = [\Delta f_x^{s+d}, \Delta f_y^{s+d}, \Delta f_z^{s+d}]^t$  より

$$\Delta m_c^{s+d} = \Delta r_c^{s+d} \times \Delta f_c^{s+d} \quad (7)$$

である。 $\Delta\phi_1$  と  $\Delta\phi_2$  が微小だとすれば、

$$\Delta m_c^{s+d} = \begin{bmatrix} \Delta m_x^{s+d} \\ \Delta m_y^{s+d} \\ \Delta m_z^{s+d} \end{bmatrix} \approx y_0 \begin{bmatrix} \Delta f_x^{s+d} \\ \Delta f_y^{s+d} \\ -\Delta f_z^{s+d} \end{bmatrix} \quad (8)$$

と近似できる。ただし  $\Delta f_a^{s+d} = -\Delta\phi_2 \Delta f_x^{s+d} + \Delta\phi_1 \Delta f_z^{s+d}$  であり、 $\Delta\phi_2$  という微小係数を含んでいる分、他の 2 つの成分に比べて極端に小さくなる。また、仮想変位ベクトルと反力ベクトルの関係は、コンプライアンス行列  $C = \text{diag}[c_1, \epsilon, c_1]$  を用いて

$$\Delta r_c^{s+d} = C \Delta f_c^{s+d} \quad (9)$$

と表わせる。ただし  $\epsilon$  は微少量を意味している。触角の変形では、長手方向が引張りになるのに対し、横方向は曲げになるので、コンプライアンス行列の  $y_s$  成分  $\epsilon$  は  $x_s, z_s$  成分  $c_1$  に比べて非常に小さい。一方、 $\Delta\phi_1$  と  $\Delta\phi_2$  が共に微小であることを考慮して、(9)式からモーメントセンサが対応する軸成分のみを取り出すと

$$\Delta\phi_1 y_0 \approx c_1 \frac{\Delta m_x^{s+d}}{y_0}, \quad \Delta\phi_2 y_0 \approx c_1 \frac{\Delta m_z^{s+d}}{y_0} \quad (10)$$

と、近似できる。触角の変形が梁の曲げによってもたらされることを考慮すると、次式を得る。

$$y_0 \approx 3EI \frac{\Delta\phi_1}{\Delta m_x^{s+d}}, \quad y_0 \approx 3EI \frac{\Delta\phi_2}{\Delta m_z^{s+d}} \quad (11)$$

ただし、 $\Delta m_x^{s+d}, \Delta m_z^{s+d}$  は Fig. 3 の 2 個のモーメントセンサで測ることができる。センシング動作によって接触点に横方向滑りが発生しなければ、この(11)式を用いて触角の押込み角度とトルクセンサの出力から接触点までの距離がわかる。この場合、どちらの式を用いてもよいが、一方だけの式に頼ると、センシングできない方向(特異方向)が現れてしまう。そこで、(11)式から(12)式のように変形する。

$$y_0 \approx 3EI \frac{\sqrt{(\Delta\phi_1)^2 + (\Delta\phi_2)^2}}{\sqrt{(\Delta m_x^{s+d})^2 + (\Delta m_z^{s+d})^2}} \quad (12)$$

(12)式は、角度センサとモーメントセンサから得られる値をベクトルの成分としたときの、ベクトルのノルムをつかった関係式になる。ここで、 $\|\Delta r_c^{s+d}\| = y_0 \sqrt{(\Delta\phi_1)^2 + (\Delta\phi_2)^2}$  なので、押込み量  $\Delta\theta$  を  $\Delta\theta = \|\Delta r_c^{s+d}\| / y_0 = \sqrt{(\Delta\phi_1)^2 + (\Delta\phi_2)^2}$  とおき、2 軸のモーメントセンサで測定できるモーメントを  $\Delta M = [\Delta m_x^{s+d} \ \Delta m_z^{s+d}]^t$  と定義すると、回転コンプライアンス  $c$  は(12)式において、回転角度とそれによって得られるモーメントの比から、(13)式のように表わすことができる。

$$c = \frac{\sqrt{(\Delta\phi_1)^2 + (\Delta\phi_2)^2}}{\sqrt{(\Delta m_x^{s+d})^2 + (\Delta m_z^{s+d})^2}} = \frac{\Delta\theta}{\|\Delta M\|} \quad (13)$$

よって接触距離  $y_0$  は以下のようになる。

$$y_0 \approx 3EIc \quad (14)$$

(14)式は、接触距離が触角の回転コンプライアンスに比例することを示すもので、2D 能動触角の基礎式とまったく同じになる<sup>7)</sup>。

### 6. 横滑りが起こる場合

接触点に横滑りが発生したときのコンプライアンスは、横滑りなしの場合と異なるため、横滑りの発生は接触点位置をセンシングするうえでの誤差要因となる。したがって、本研究では横滑りの発生が確認された場合、複数回の押込み動作を通じて最終的に横滑りが発生しない押込み方向を見つけるというセンシング戦略をとる。いったん横滑りの発生しない方向を見つけてしまえば、接触位置の検出原理は 5 章の方法に帰着する。

#### 6.1 横滑りの判定

センシングによって横滑りが発生した場合を Fig. 5 に示す。Fig. 6 は、Fig. 5 をセンサ平面上に射影した図である。以下の議論は、位置ベクトルおよび反力ベクトルをセンサ平面上に射影して考える。対象物がなければ初期接触点はアクチュエータによって仮想変位点まで移される。この初期接触点と仮想変位点を結ぶベクトルを仮想変位ベクトル  $\Delta r_{rs}$  とする。さらに  $\Delta r_{rs}$  のセンサ平面における角度を押込み方向  $\varphi = \angle(\Delta r_{rs})$  とする。横滑りによって接触点は移動するので、触角の実質変位ベクト

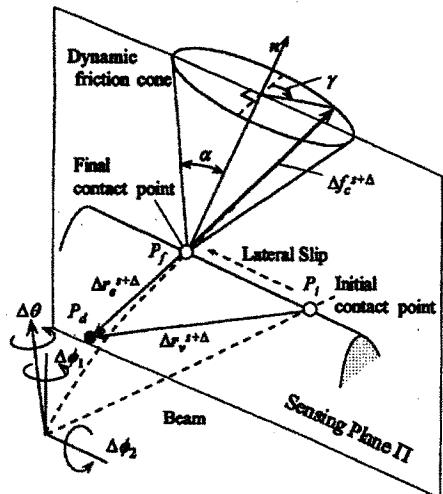


Fig. 5 Definition of notations in case that the antenna makes a lateral slip

ルは最終接触点から仮想変位点までを結んだ  $\Delta r_{es}$  となる。センサ平面上に射影した反力の方向は、モーメントベクトル  $\Delta M$  の水平方向からの方向  $\psi \equiv \angle(\Delta M)$  から算出できる点に留意されたい。つぎに、押込み方向と反力ベクトルの間の角度を  $\delta = \phi - \psi$  とする。また、対象物の法線ベクトルを Fig. 6 のように  $n$  として、その外向き法線方向を  $v^+ \equiv \angle(n)$ 、内向き法線方向を  $v^- \equiv v^+ + \pi$  とおく。以下では、センサ平面上で定義されるこれらの角度を用いて議論する。

触角は円断面を仮定しているため、断面内のどの方向から力が作用しようと、作用した力と同一直線上に必ず変位が現れる。したがって、実質変位ベクトル  $\Delta r_{es}$  と反力ベクトル  $\Delta f_{ca}$  は同一直線上に存在するはずである。4章の説明により、押込み方向が(4)式を満たす場合、すなわち対象物の法線方向であれば横滑りは発生しない。この場合、反力ベクトルと仮想変位ベクトルとの角度は  $\delta = \pi$  となる。それ以外の場合には必ず横滑りが発生し、Fig. 6 のように  $\delta \neq \pi$  になる。なお、反力ベクトルの方向は(3)式により算出できるため、この  $\delta = \pi$ (または  $\delta \neq \pi$ )の条件は容易に確認できる。ただし、この場合でも、実質変位ベクトルと反力ベクトルは同一直線上に位置することに注意されたい。

## 6.2 接触点を見つけるアルゴリズム

外向き法線方向  $v^+$ 、摩擦角  $\alpha$  の対象物に対して、押込み方向  $\phi$ 、押込み量  $\Delta\theta$  のセンシングを行えば、結果として反力の方向  $\psi$  が得られる。この  $\psi$  は、触角が受ける接觸力ベクトルをセンサ平面上に射影したときの水平方向からの角度である。ここで、 $v^+$  と  $\alpha$  は対象物が決まれば一定であり、 $\Delta\theta$  はセンシングのときに定めることができる定数である。したがって、

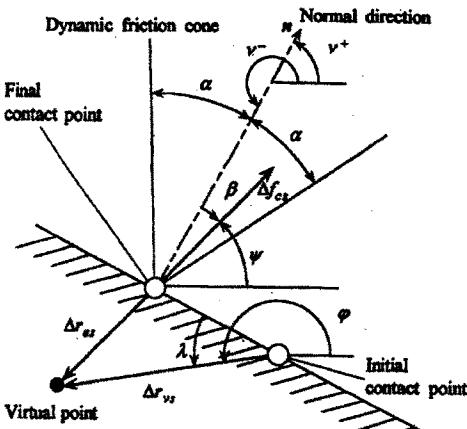


Fig. 6 Several parameters projected on the sensing plane II

$$\phi = g_3(\phi) \quad (15)$$

という、押込み方向を入力、反力の方向を出力とする関数で表現することができる(詳細については付録参照)。

(15)式に  $\delta = \phi - \psi$  を代入すれば、

$$\delta = \phi - g_3(\phi) \quad (16)$$

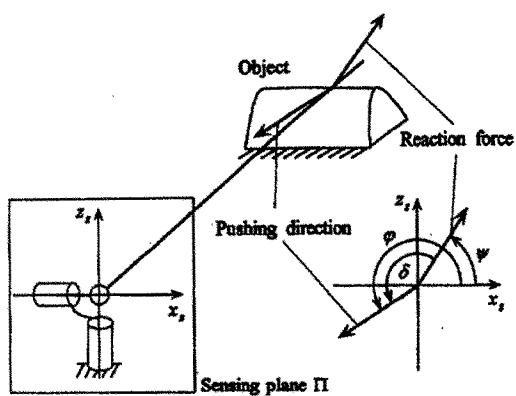
となる。横滑りが起こっていないければ  $\delta = \pi$  になるので、

$$\delta = \phi - g_3(\phi) = \pi \quad (17)$$

を満たす押込み方向  $\phi = v^-$  を求めることができ、横滑りを起こさないセンシング方向を見つけることに対応する。

具体的に説明するため、たとえば Fig. 7(a)のように、外向き法線方向  $v^+ = \pi/2[\text{rad}]$ 、摩擦角  $\alpha = \pi/18[\text{rad}]$  の対象物に対してセンシングを行う場合を想定してみる。この場合の押込み方向  $\phi$  と反力ベクトルの方向  $\psi$  の関係を示したグラフが Fig. 7(b) である。実線は数値解法で求めた理論値、○は実験値である。押込み方向が内向き法線方向  $\phi = v^- = 3\pi/2$  のときに  $\psi = v^+ = \pi/2$  となり、横滑りが発生しないことがわかるが、それ以外の方向では  $\psi \neq \pi/2$  となり、横滑りの発生を示唆している。また、実験値ではノイズの影響で多少の変動があるものの、反力が常に動摩擦円錐上に現れることから、 $\psi$  は  $v^+ \pm \alpha$  の範囲内に入っている点に注意されたい。同様に、押込み方向  $\phi$  と  $\delta$  の関係を示した Fig. 7(c)において、 $\phi = v^- = 3\pi/2$  のときに  $\delta = \pi$  となり、横滑りが発生しないことを示しているが、それ以外の方向では  $\delta \neq \pi$  であることから、横滑りが発生していることがこのグラフからも読み取れる。ただし、押込み方向  $\phi$  が摩擦角の内部( $-\pi/18 < (\phi - v^-) < \pi/18$ )にあるときは  $\delta$  はきわめて  $\pi$  に近い点に留意されたい。6.3 節で説明する実用的方法は、この特徴をうまく利用するものである。

反力の方向が必ず法線方向から  $\pm \alpha$  の範囲内に現れること、および  $\psi = g_3(\phi)$  と  $\delta = \phi - g_3(\phi)$  が単調増加であるという性質(詳細は付録参照)を用いて、2分法の考



(a) Experimental environment

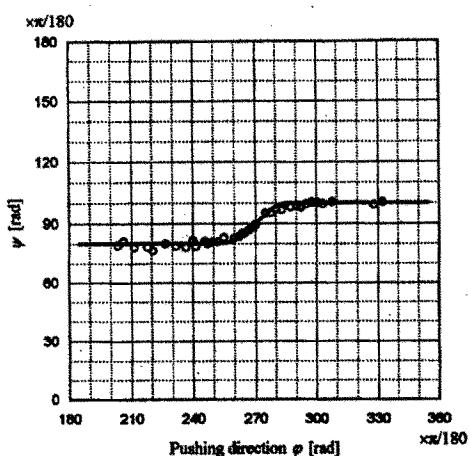
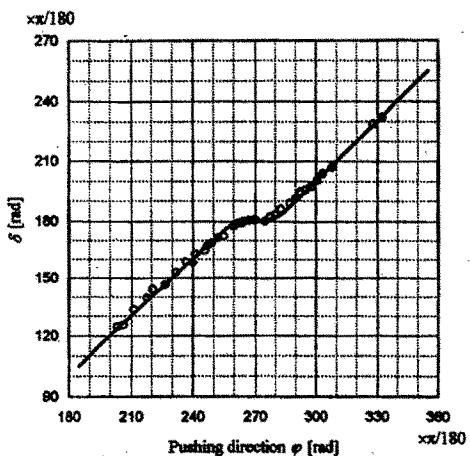
(b) The relationship between  $\phi$  and  $\varphi$  with experimental results  
( $\alpha = \pi/18[\text{rad}]$ ,  $\Delta\theta = \pi/36[\text{rad}]$ )(c) The relationship between  $\delta$  and  $\varphi$  with experimental results  
( $\alpha = \pi/18[\text{rad}]$ ,  $\Delta\theta = \pi/36[\text{rad}]$ )

Fig. 7 The relationship between output and input

え方で対象物の法線方向を求めるアルゴリズムを示す。なお上付きの数字は、何回目のセンシングによるものかを示す。

1回目：任意の方向  $\varphi^{(1)}$  に押込みを行う。  
このとき得られる反力の方向を  $\psi^{(1)}$  とする。 $\delta^{(1)} = \varphi^{(1)} - \psi^{(1)}$  として、2回目の押込み方向  $\varphi^{(2)}$  を

$$\varphi^{(2)} = \varphi^{(1)} - \text{sign}(\delta^{(1)} - \pi) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

と定める。 $\varphi^{(2)}$  を(18)式で決めれば、1回目と2回目の滑り方向は必ず逆になり、 $\psi^{(1)}$  と  $\psi^{(2)}$  は外向き法線ベクトル  $n$  の両側に分かれ。 (15)式の単調性より、1回目と2回目の横滑り方向を変えなければ、 $\varphi^{(1)}$  と  $\varphi^{(2)}$  が内向き法線方向  $\nu^+$  を挟んだ両側に分かれるようにすればよい。したがって、1回目の押込み方向に  $\pi/2$  を加える(または引く)ことで、容易にそのような方向が求まる。

2回目： $\varphi^{(2)}$  の方向に押込みを行う。

1回目と同様にこのとき得られる反力の方向を  $\psi^{(2)}$  とする。(18)式で方向を決めれば、2回目の横滑り方向は必ず1回目とは逆になり、 $\psi^{(1)}, \psi^{(2)}$  とともに、対象物の法線方向  $\nu^+$  からのずれは、最大  $\alpha$  である。したがって、 $\nu^+ - \alpha < \psi^{(i)} < \nu^+ + \alpha$  ( $i=1, 2$ ) より

$$\nu^+ - \frac{\alpha}{2} < \frac{\psi^{(1)} + \psi^{(2)}}{2} < \nu^+ + \frac{\alpha}{2} \quad (19)$$

が成り立つ。

3回目： $\varphi^{(3)} = (\psi^{(1)} + \psi^{(2)})/2 + \pi$  の方向に押込みを行う。

横滑りは反力がより法線方向に近づく向きに起こるので、 $|\varphi^{(3)} - \nu^-| > |\psi^{(3)} - \nu^+|$  の関係が成り立つ。(19)式より、押込み方向  $\varphi^{(3)}$  は対象物の内向き法線方向  $\nu^-$  から最大でも  $\alpha/2$  しかずれていないので、反力の方向  $\psi^{(3)}$  は外向き法線方向  $\nu^+$  から最大でも  $\alpha/2$  しかずれない。

1回目と2回目の押込みのうち横滑り方向が3回目の反力の方向と反対のものと、3回目の反力の方向を用いて

$$\varphi^{(4)} = (\psi^{(3)} + \psi^{(12)})/2 + \pi \quad (20)$$

として、4回目の押込み方向を決める。 $\psi^{(12)}$ において  $(a|b)$  は、 $(a|b) = \{x \mid \min\{|\delta^{(x)} - \pi|\}, x = a, b\}$  で定義される関数とする。この関数を導入することにより、 $a$ 回目と  $b$ 回目の押込みで、横滑りが小さいほうを選択することが可能となる。

$n$ 回目：このとき得られる反力の方向  $\psi^{(n)}$  の法線方向からのずれは、(21)式を満たすことが容易に証明できる。

$$|\psi^{(n)} - \nu^+| < \frac{\alpha}{2^{n-3}}, \quad n \geq 4 \quad (21)$$

したがって、無限回のセンシングを行えば反力方向と法線方向のずれは 0 になる。そのとき、 $\delta^{(n)} = \pi$ ,  $\psi^{(n)} = \nu^+$ ,  $\varphi^{(n)} = \nu^-$  なので、対象物の法線方向がわかつることになる。

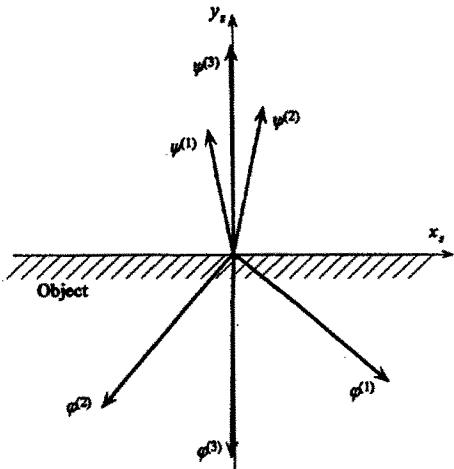
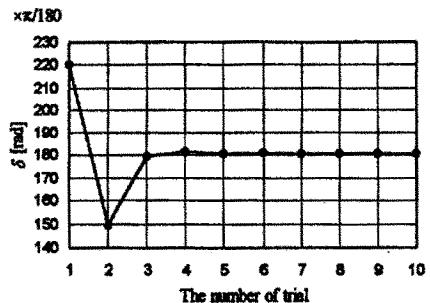
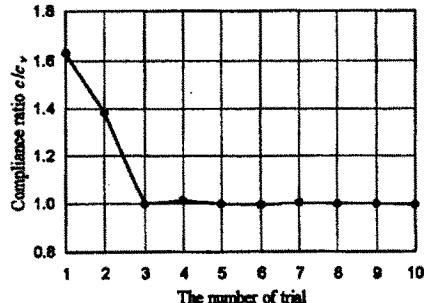
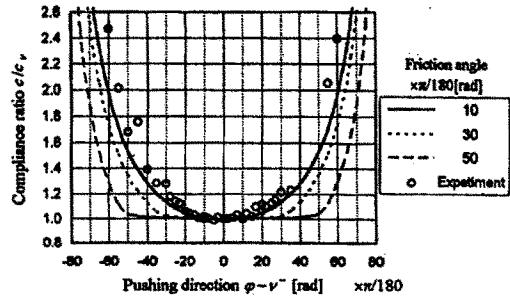
(a) Conversion process of  $\phi$  and  $\psi$ (b) Conversion process of  $\delta$ (c) Conversion process of compliance ratio  $c/c_v$ 

Fig. 8 Conversion process during an experiment

このように対象物の法線方向を求めたうえで最後にその方向に押込み動作を実行すれば、5章の(12)式を用いて対象物までの距離を求めることができる。

Fig. 8は、このアルゴリズムを用いて実際の対象物に対するセンシングを行った実験結果である。実験は、Fig. 7と同じ条件で行った。Fig. 8(a)は、3回目までの押込みによる仮想変位ベクトルと反力ベクトルを示している。1回目、2回目ともに対象物の法線方向から大きく離れた方向に押込みを行っているが、反力はそれよりも小さな範囲に現れている。Fig. 8(b)は、各押込みによつ

Fig. 9 Compliance ratio between  $c/c_v$  ( $\Delta\theta = \pi/36$  [rad])

て得られる $\delta$ の値をプロットしたグラフ、Fig. 8(c)はそのときに得られるコンプライアンス $c$ と、法線方向に押し込んだ場合のコンプライアンス $c_v$ との比をとったグラフである。(b)より、3回目以降の押込みでは $\delta$ が $\pi$ に近くなり、横滑りがほとんど起こっていないことがわかる。また押込み回数が増えるにしたがって、(c)に示すとおりコンプライアンスの比は、1に収束していることがわかる。

### 6.3 考察

6.2節の方法を使えば3次元対象物の接触点が検出可能であるが、無限回のセンシング動作を行うのは現実的ではない。またFig. 7(c)より、押込み方向が法線方向に十分近ければ横滑りの影響も小さいと考えられるので、本節では押込み方向 $\phi$ が摩擦角内部にあるとき、 $\delta$ がきわめて $\pi$ に近いことに着目して、どのくらいのセンシング回数で接触点が精度よく検出できるかといった点について考察する。

接触点距離に比例するコンプライアンスは(13)式によって求まるが、横滑りが発生すれば仮想変位ベクトルと実質変位ベクトルは一致せず、 $\|\Delta r_{vc}\| > \|\Delta r_{re}\|$ となる。押込みによって得られるモーメントは触角の実質変位ベクトル $\Delta r_{re}$ の大きさに比例するので、横滑りが発生した場合(13)式の分母が小さくなり、センサの値から求めたコンプライアンスおよび距離は横滑りが発生しない場合に比べて大きな値となる。つまり、見かけ上触角は横滑りがない場合のそれよりも、柔らかく感じてしまう。

Fig. 9は、対象物の法線方向にセンシングしたときのコンプライアンス $c_v$ と、押込み方向を変えた場合に現れる見かけコンプライアンス $c$ との比をとったグラフである。ただし、破線および実線は理論値、○は $\alpha = \pi/18$ の場合の実験値である。法線方向近傍である $\phi - \nu^- = 0$ の近くでは、コンプライアンスの比が1に近いが、押込み方向が摩擦角の範囲を超えると、 $c/c_v$ は急激に大きくなっている。このグラフから、法線方向に近い範囲でセンシングを行えば、そのときに得られる見かけコンプライアンスの誤差は、十分小さい範囲に収まることが予想

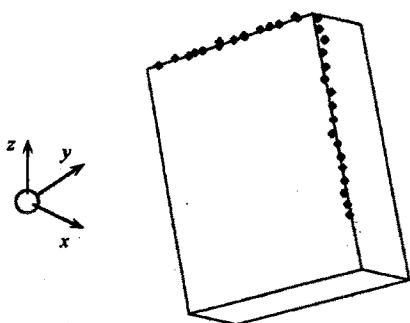


Fig. 10 An experimental result of object shape sensing

できる。

6.2節のアルゴリズムでは、3回目の押込み方向  $\phi^{(3)}$  と内向き法線方向  $\nu^-$ とのずれは  $a/2$ 以下であった。押込み方向が  $\nu^- + a/2$  のときに得られるコンプライアンスの誤差を理論式から求めると、押込み量が  $\pi/18[\text{rad}]$  以下の場合、摩擦角がどのような値であっても誤差は 1%以下に抑えられる。Fig. 8(c)に示した実験結果でも、3回目以降の押込みでは、 $c/c_\nu \approx 1$  となっており、実用的には3回の押込み動作で距離のセンシングには十分であることがわかる。

Fig. 10 は、直方体の対象物に対してセンシングを行った結果である。左側の○印が回転中心、右側の直方体が対象物の形状である。触角が最初に接触した点の角度と距離を測定して、3次元グラフとしてプロットしてある。モーメントセンサのノイズによる誤差があるものの、対象物の3次元形状を再現できている。

Fig. 10 の形状検出実験において、1点あたりのセンシングに必要な時間は約5秒であった。押込み動作の速度は、理論的には触角の動特性が無視できる範囲で任意に設定できるが、実際の装置で実験を行う場合には、センサの特性を考慮する必要がある。今回作成した実験装置では、モーメントセンサ出力のノイズおよび応答性の関係から、センシング動作の速度を決定した。

## 7. 結 言

本研究では、3次元対象物に対する位置のセンシングシステムとして3D能動触角システムを提案した。3次元対象物に対してセンシングを行う場合に発生する横滑りの現象を理論的に明らかにしたうえで、無限回のセンシングを行えば対象物までの接触点距離を求められることを示した。さらに横滑りによる誤差を考慮すれば、実用的には3回の押込み動作で、十分接触点距離が求まることを示した。

最後に、実験に使用した能動触角は(株)ハーモニック・ドライブ・システムズにおいて試作していただいた

ものである。千葉次朗常務をはじめとして、設計試作に直接的に関与していただいたイワン・ゴドレール氏に心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) S. S. M. Wang and Will. P. M.: Sensors for Computer Controlled Mechanical Assembly, The Industrial Robot, March, 9/18(1978)
- 2) R. A. Russell: Closing the Sensor-computer-robot Control Loop, Robotics Age, April, 15/20(1984)
- 3) S. Hirose, et al.: Titan III: A Quadruped Walking Vehicle, Proc. of the Second Int. Symp. on Robotics Research, MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1985)
- 4) E. N. Schiebel, H. R. Busby and K. J. Waldron: Design of a Mechanical Proximity Sensor, Robotica, 4, 221/227(1986)
- 5) R. A. Brooks: A Robot that Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network, Neural Computation, 1, 253/262(1989)
- 6) R. A. Russell: Using Tactile Whiskers to Measure Surface Contours, Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1295/1300(1992)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 金山, 金子, 辻:3D能動触角(Active Antenna)に関する研究, 第12回日本ロボット学会学術講演会, 657/658(1994) -

## 〈A 横滑りメカニズムの解析〉

横滑りが起こっている場合の挙動について、詳しく調べてみる。触角が対象物に接触した状態から微小角度  $\Delta\theta$ だけ押込みを行った場合、接触点における力は Fig. 5 のようになっている。また、Fig. 5 をセンサ平面に射影すると Fig. 6 のようになる。押込みによって、発生した縦滑り量を  $s_{lon}$ 、横滑り量を  $s_{lat}$  とする。対象物の表面と押込み方向の間の角度を  $\lambda = \phi - (\nu^+ + \pi/2)$ 、法線方向とセンサ平面に射影した反力の間の角度を  $\beta = \nu^+ - \phi$ 、また動摩擦円錐内の反力の方向を  $\gamma$  とする。ただし、 $\gamma$  は変形前の触角の長手方向を基準としている。

幾何学的関係より横滑り量は、

$$\begin{aligned} s_{lat} &= \|\Delta r_{ee} - \Delta r_{es}\| \\ &= y_0 \sin \Delta\theta (\cos \lambda - \sin \lambda \tan \beta) \end{aligned} \quad (22)$$

である。この式を押込み量  $\Delta\theta$  で微分すると横滑り量の変化率が求まる。

Fig. 6において、実質変位ベクトル  $\Delta r_e^{tot}$  の大きさが、触角の真のたわみ量なので幾何学的関係から求めると

$$\|\Delta r_{ee}\| = y_0 \sin \Delta\theta \frac{\sin \lambda}{\cos \beta} \quad (23)$$

である。縦滑り量はたわみ線方程式を長さ方向に積分して求めることができ

$$s_{\text{tan}} = g_1(\|\Delta r_{\text{es}}\|) \quad (24)$$

という実質たわみ量の関数になる。対象物から見て触角の接触点は、縦横各方向の滑り量変化率がなす角  $\gamma$  の方向に滑っていることになる(Fig. 5 参照)。したがって

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{d}{d\Delta\theta} s_{\text{lat}} / \frac{d}{d\Delta\theta} s_{\text{tan}} \right) \quad (25)$$

である。ここで得られる  $\gamma$  をセンサ平面に射影した角度が  $\beta$  である。

$$\tan \beta = \tan \alpha \sin \gamma \quad (26)$$

これら4つの(22), (24), (25), (26)式から  $\gamma$  を消去すれば、押込みによって発生する反力の関係式が得られる。

ここで、簡単化のためいくつかの近似と置換えを行う。押込み量  $\Delta\theta$  は微小なので、 $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$  とする。縦滑り量の押込み量変化率は

$$\frac{d}{d\Delta\theta} s_{\text{lat}} \approx k y_0 \Delta\theta \frac{\sin \lambda}{\cos \beta} \quad (27)$$

として、実質たわみ量に比例する関数に置く。ただし、 $k$  は触角の材料および形状によって決まる正の比例定数である。(27)式の値は、常に厳密解より大きくなり、縦滑りの影響を大きく見積もることになるが、その場合(25), (26)式より  $\gamma, \beta$  ともに小さくなり、結果として横滑りの影響が大きくなる。本論文では、横滑りが接触点距離のセンシングに与える影響を考慮するので、(27)式の置換えにより誤差を大きめに評価しても、誤差の上限を評価するものとして有効である。

最終的に、押込みによって発生する反力の関係式は、 $g_2(\beta, \lambda, \Delta\theta, \alpha) = 0$  の形で

$$\begin{aligned} & \tan \beta - \tan \alpha \cdot \sin \left( \tan^{-1} \left( \frac{\cos \lambda - \sin \lambda \cdot \tan \beta}{k \Delta\theta \sin \lambda / \cos \beta} \right) \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

と表わせる。(28)式を  $\beta$  について解けば、接触点における滑りの状態がわかる。 $\beta, \lambda$  の定義より、法線方向  $\nu^+$ 、摩擦角  $\alpha$  の対象物に対して、押込み方向  $\varphi$ 、押込み量  $\Delta\theta$  のセンシングを行ったときに現れる反力の方向  $\psi$  が得られる。

$$\psi = g_3(\varphi, \Delta\theta, \nu^+, \alpha) \quad (29)$$

また、押込み方向と反力の間の角度  $\delta = \varphi - \psi$  を用いて

$$\delta = \varphi - g_3(\varphi, \Delta\theta, \nu^+, \alpha) \quad (30)$$

と表わすこともできる。ただし、(29), (30)式は三角関数を含んだ陰関数の形になるので、解析的に解を求ることは難しい。

対象物を定めれば  $\nu^+, \alpha$  が決まり、さらに押込み量を一定にすれば  $\Delta\theta = \text{const.}$  となり、(29), (30)式は押込み方向  $\varphi$  だけの関数になる。ここで、(29), (30)式が単調な関数であれば、 $\psi$  および  $\delta$  は  $\varphi$  について1対1対応なので、 $\psi = \nu^+, \delta = \pi$  を満たす  $\varphi$  はただ1つ存在する。それぞれの式を  $\varphi$  で全微分して、 $\varphi = \nu^-$  のときの微係数を調べると

$$\min \left\{ \frac{d\psi}{d\varphi} \right\} = \left. \frac{d\psi}{d\varphi} \right|_{\varphi=\nu^-} = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + k\theta} > 0 \quad (31)$$

$$\min \left\{ \frac{d\delta}{d\varphi} \right\} = \left. \frac{d\delta}{d\varphi} \right|_{\varphi=\nu^-} = \frac{k\theta}{\tan \alpha + k\theta} > 0 \quad (32)$$

である。したがって、(29), (30)式は  $\varphi$  に対して単調増加である。

### [著者紹介]

#### 金山 尚樹



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、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。

#### 金子 真(正会員)

(Vol. 31, No. 8 参照)

#### 辻 敏夫(正会員)

(Vol. 31, No. 8 参照)