

# 人工能動触角

## —対象物の曲率の影響について—

日野 裕\* 金山尚樹\* 金子 真\* 辻 敏夫\*

### Artificial Active Antenna —Object's Curvature and its Influence on Accuracy—

Yutaka Hino\*, Naoki Kanayama\*, Makoto Kaneko\* and Toshio Tsuji\*

The Artificial Active Antenna is the sensor system motivated by the insect's antenna. It can detect the location between an insensitive flexible beam and an object through measurement of the rotational compliance on the beam in contact with the object. The goal of this paper is to consider the effects of the environment curvature on the sensing accuracy. We first introduce a set of basic equations representing force-deformation and geometrical relationships. Both numerical and approximate solutions are shown with experimental results. We show that the effect of the environment curvature on the sensing accuracy can be discussed by using one non-dimensional parameter consisting of the pushing angle, the contact distance, and the radius of curvature of the object. Finally, we show that the environment curvature makes little influence on the sensing accuracy.

**Key Words:** Tactile Based Active Sensing, Rotational Compliance, Object's Curvature, Sensing Accuracy

#### 1. はじめに

昆虫の目は複眼構造となっており、対象物の形状をぼんやりと認識することはできるが、正確な距離情報や詳細な形状認識を行うには適していない。しかし、この視覚能力を補うかのように昆虫には2本の触角が備わっていて、彼らはそれを巧みに動かすことによって正確な外界認識を行いながら行動している。

この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。例えば、Wang and Will [1] や Russell [2] 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極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 [3]。同様なセンサは、Sciebel らによっても報告されている [4]。Brooks は Behavior-Based Robot の一連の研究のなかで、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 [5]。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、接触点位置までは分からない。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 [6]。そして、Wilson and Chen [7] は Russell のモデルを三次元空間モデルに拡張している。

一方、金子らはセンシング機能を持たない弾性ワイヤに、アクチュエータ、位置センサ、トルクセンサを付加した人工能動触角によって、触角と対象物との接触点距離が、触角の回転コンプライアンスに比例することを導出している [8]~[11]。それによると、接触点距離は根元で感じる触角の回転コンプライアンスに比例するという、極めて簡単な原理によって接触点検出が行われている。したがって、人工能動触角において触角の回転コンプライアンスを求めることは、接触点距離を求めることと等価である。金山らはこの人工能動触角を三次元に拡張し、たかだか3回の押し込み動作によって理論的なセンシング精度が1%以内に収まるようなセンシングアルゴリズムを提案している [12]。また、上野らは接触点距離に応じて触角の固有振動数が変化することに着目して、根元に取り付けられたトルクセンサのみで接触点検出ができることを示している [13]。

しかし、これらの研究は十分曲率の大きい対象物に対するセンシングを仮定しており、対象物の曲率が小さい場合についての考察はなされていない。接触点において対象物が有限の曲率を有する場合、押し込むにつれて対象物と触角との接触点移動してしまうため、従来通りのセンシング方法によって正確な接触点検出を行えるという保証はまったくない。

そこで本論文では、はじめに接触点付近での曲率半径  $R$  の対象物に接触した場合について、対象物と触角の間に生じる摩擦まで考慮した、たわみ線方程式と幾何学的拘束式を導入する。

原稿受付 1995年10月15日

\*広島大学工学部

\*Hiroshima University

次に、これらの基礎式を数値的に解いて、触角が曲率半径  $R$  の対象物に接触した場合、エッジ状の対象物に接触した場合に比べてどの程度の差が現れるかについて考察する。さらに基礎式から近似解を導出し、数値解と実験結果を含め、総合的に比較考察を行う。最後に触角が曲率半径  $R$  の対象物と、エッジ状の対象物に接触した場合の差は、ただ一つの無次元パラメータで評価できることを示すとともに、曲率半径  $R$  がコンプライアンスに及ぼす影響が極めて小さいことを示す。

## 2. 曲面对象物に接触した場合

### 2.1 定式化

Fig. 1 は、金山らが提案した 3D 人工能動触角 [12] の構成図である。3D 人工能動触角では、触角と対象物との間の横滑り（触角の長手方向に対して直角方向の滑り）を許容しているが、たかだか 3 回程度の能動動作で横滑りがほとんど発生しない押し込み方向が得られる。したがって、最終的な押し込み動作中の触角の動きは押し込み平面内（Pushing Plane）に限定される。このことは、3D 対象物であっても結局は、運動平面で切断したときに現れる 2D 形状の対象物に対する接触点検出問題に置き換えられることを意味している。

以上の点を踏まえた上で、以下のような仮定を設定する。

仮定 1: 触角の運動および対象物形状は二次元に限定する。

仮定 2: 触角のたわみ曲線の曲率は、曲げモーメントにのみ影響され、せん断力には影響されないものとする。

ここで、以下の関数を定義する。ベクトル  $\mathbf{r}_1 = (r_{1x}, r_{1y})^t$ ,  $\mathbf{r}_2 = (r_{2x}, r_{2y})^t$  に対して、

$$\text{vpr}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \equiv r_{1x}r_{2y} - r_{1y}r_{2x} \quad (1)$$

$$\text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \equiv \tan^{-1} \frac{\text{vpr}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{\mathbf{r}_1^t \mathbf{r}_2} \quad (2)$$

$$\text{ただし } -\pi < \text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \leq \pi$$

とする。関数  $\text{vpr}$  は二つのベクトルの外積を符号付きでスカラ化したもので、関数  $\text{ang}$  は二つのベクトルのなす角を単位 [rad] で返すものである。どちらの関数も正負の値を持ち、その向きは右手座標系に基づく。この定義に伴い、以下のような公式を得る。

$$\text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) + \text{ang}(\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_2) \quad (3)$$

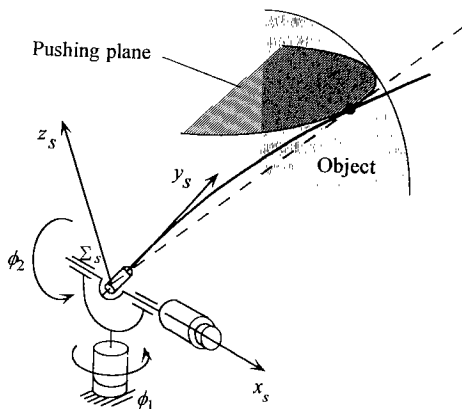


Fig. 1 Basic structure of 3D active antenna

$$\text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \text{ang}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) - \text{ang}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) \quad (4)$$

$$= -\{\text{ang}(\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_1) - \text{ang}(\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_2)\} \quad (5)$$

材料力学の梁のたわみの関係式より、Fig. 2 のように、弾性棒の固定端より距離  $S$  離れた点に力  $\mathbf{f} = (f_x, f_y)^t$  が加えられたとき、変形した弾性棒の形状を曲線  $y = w(x)$  とし、 $M(x)$  は弾性棒の各点におけるモーメントとすると、 $w(x)$  は、微分方程式

$$EI \frac{w''(x)}{\{1 + \{w'(x)\}^2\}^{\frac{3}{2}}} = -M(x) \quad (6)$$

および、境界条件

$$w(S) = w'(S) = 0 \quad (7)$$

で与えられる [14]。ここで、 $\Sigma^a$  を、力点から拘束を受けていないときの触角の姿勢における垂線の足を原点とし、触角と共に回転移動する触角座標系とする。また、 $\Sigma^w$  を絶対座標系とする。さらに  $\xi_x^a, \xi_y^a$  を  $\Sigma^a$  の単位ベクトルとし、 $\xi_x^w, \xi_y^w$  を  $\Sigma^w$  の単位ベクトルとする。このとき、 $M(x)$  は、

$$\begin{aligned} M(x) &= \text{vpr}(-x\xi_x^a + \{w(0) - w(x)\}\xi_y^a, \mathbf{f}) \\ &= -xf_y - \{w(0) - w(x)\}f_x \end{aligned} \quad (8)$$

である。また、 $E, I$  はそれぞれ、ヤング率、断面 2 次モーメントを表し、弾性棒の材質、および断面形状によって決まる定数である。微分方程式 (6) を  $S$  と  $f$  を用いて解くことによって、たわみ量  $w(0)$ 、およびたわみ角の正接  $-w'(0)$  が得られる。

Fig. 3 のように、回転中心から距離  $S_x$  の位置で対象物に接触した後、さらに  $\theta_{add}$  押し込んだ状態について考える。ただし、接触点における対象物の曲率は十分大きいとする従来の仮定を取り除くため、ここでは対象物は関数  $G(r^a) = 0$  で表される曲線であるとする。このように対象物の形状を曲面とすると、押し込む過程で対象物側の接触点が移動してしまう。この

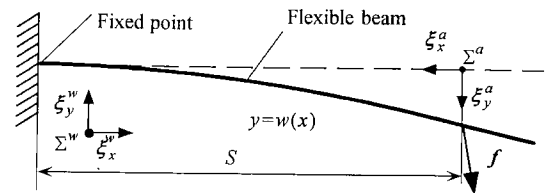


Fig. 2 Deflection curve

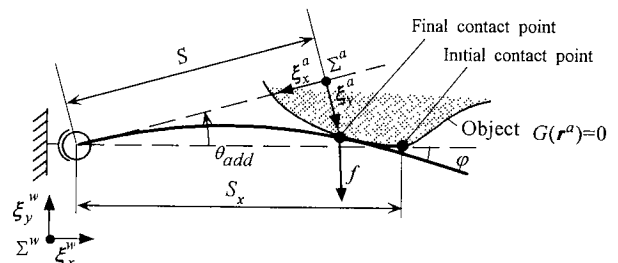


Fig. 3 Active antenna for a curved object

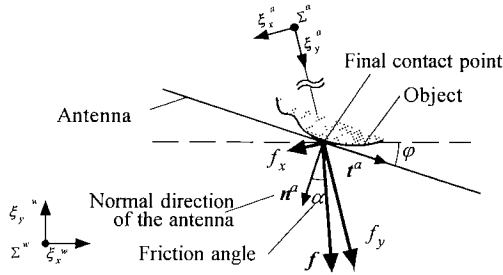


Fig. 4 Magnification of Fig.3

接触点の移動によって、従来通りのセンシング方法では正確な接触点検出を行うことは不可能となるため、これを考慮する必要がある。そこで、初期接触点距離を  $S_x$  とし、移動後の接触点距離を  $S$  とし、初期接触点距離とセンサによって得られる回転コンプライアンスとの関係について、以下に考察する。ここで、接触点での触角の接線ベクトルおよび、法線ベクトルを  $t^a$ ,  $n^a$  と定義し (Fig. 4),  $r_i^a$  を  $\Sigma^a$  の原点を始点とする初期接触点の位置ベクトル,  $r_f^a$  を移動後の接触点の位置ベクトル,  $r_{mo}^a$  を回転中心の位置ベクトルとする。

Fig. 3 のように

$$\varphi = \text{ang}(t^a, \xi_x^w) \quad (9)$$

を定義すると、たわみ角の定義式

$$\begin{aligned} \tan^{-1}\{-w'(0)\} &= \text{ang}(t^a, -\xi_x^a) \\ &= \text{ang}(n^a, \xi_y^a) \end{aligned} \quad (10)$$

および、

$$\theta_{add} = \text{ang}(\xi_x^w, -\xi_x^a) \quad (11)$$

より、たわみ角は

$$\begin{aligned} \tan^{-1}\{-w'(0)\} &= \text{ang}(t^a, -\xi_x^a) \\ &= \text{ang}(t^a, \xi_x^w) + \text{ang}(\xi_x^w, -\xi_x^a) \\ &= \varphi + \theta_{add} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。したがって式 (12) より、

$$-w'(0) = \tan(\varphi + \theta_{add}) \quad (13)$$

を得る。触角は長手方向には伸び縮みは生じないと仮定すると、押し込みを始めた瞬間から終了する瞬間まで、常に触角と対象物との間には滑りが生じている。したがって、ここでは動摩擦のみを考えればよいことになる。この動摩擦係数を  $\tan \alpha$  とすると、押し込み中、触角にかかる力  $f$  は常に接触点における摩擦円錐表面上に存在するので、触角の法線方向から摩擦角  $\alpha$  だけ離れた向きにしか存在し得ない。よって、

$$\text{ang}(n^a, f) = \alpha \quad (14)$$

を得る。また、式 (9), 式 (11) より、

$$\begin{aligned} \varphi + \theta_{add} &= \text{ang}(t^a, -\xi_x^a) \\ &= \text{ang}(n^a, \xi_y^a) \end{aligned} \quad (15)$$

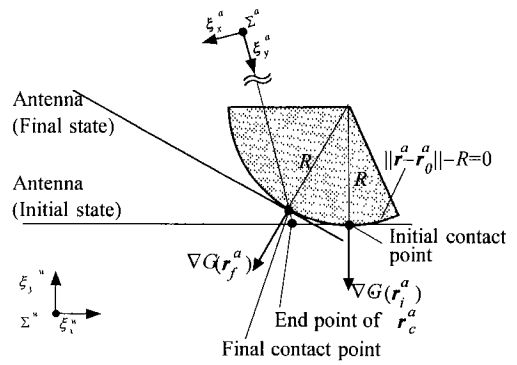


Fig. 5 Geometry of the curved object

である。よって、

$$\begin{aligned} \text{ang}(f, \xi_y^a) &= \text{ang}(n^a, \xi_y^a) - \text{ang}(n^a, f) \\ &= \varphi + \theta_{add} - \alpha \end{aligned} \quad (16)$$

となるので、 $f_x$ ,  $f_y$  の関係は、

$$\frac{f_x}{f_y} = \tan(\varphi + \theta_{add} - \alpha) \quad (17)$$

である。

接触点の移動量は微小であるので、接触点付近での対象物の形状は近似的に半径  $R$  の円の一部分であるとみなすことができ。よって、 $G(r^a)$  は次式で与えられる。

$$G(r^a) = \|r^a - r_0^a\| - R = 0 \quad (18)$$

ただし、 $r_0^a$  を曲率の中心点の位置ベクトルとし、 $\nabla G(r^a)$  は曲線上の点における法線ベクトルを示す (Fig. 5)。また、触角座標系  $\Sigma^a$  の  $y$  軸と初期状態の触角との交点の位置ベクトルを  $r_i^a$  とする。このとき、 $r^a$  を曲線上の点の位置ベクトルに限ると、

$$\nabla G(r^a) = \frac{r^a - r_0^a}{R} \quad (19)$$

$$\|\nabla G(r^a)\| = \frac{\|r^a - r_0^a\|}{R} = 1 \quad (20)$$

であるので、

$$r_f^a - r_i^a = R \{ \nabla G(r_f^a) - \nabla G(r_i^a) \} \quad (21)$$

と表せる。また、

$$\xi_y^w = -\frac{\nabla G(r_i^a)}{\|\nabla G(r_i^a)\|} = -\nabla G(r_i^a) \quad (22)$$

なので、 $\xi_y^w$  方向の接触点の移動量  $\Delta y$  は

$$\begin{aligned} \Delta y &= (r_f^a - r_i^a)^t \xi_y^w \\ &= R \{ \nabla G(r_f^a) - \nabla G(r_i^a) \}^t \{-\nabla G(r_i^a)\} \\ &= -R \|\nabla G(r_f^a)\| \|\nabla G(r_i^a)\| \cos \varphi \\ &\quad + R \|\nabla G(r_i^a)\|^2 \\ &= R(1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (23)$$

となり、 $-\xi_x^w$  方向の接触点の移動量  $\Delta x$  は

$$\begin{aligned}\Delta x &= -(\mathbf{r}_f^a - \mathbf{r}_i^a)^t \xi_x^w \\ &= -R \left\{ \nabla G(\mathbf{r}_f^a) - \nabla G(\mathbf{r}_i^a) \right\}^t \xi_x^w \\ &= -R \left\{ \nabla G(\mathbf{r}_f^a) + \xi_y^w \right\}^t \xi_x^w \\ &= -R \|\nabla G(\mathbf{r}_f^a)\| \|\xi_x^w\| \cos \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= R \sin \varphi\end{aligned}\quad (24)$$

となる.

初期接触点距離  $S_x$  は,

$$\begin{aligned}S_x &= (\mathbf{r}_i^a - \mathbf{r}_{mo}^a)^t \xi_x^w \\ &= (\mathbf{r}_i^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_x^w + (\mathbf{r}_f^a - \mathbf{r}_{mo}^a)^t \xi_x^w\end{aligned}\quad (25)$$

と変形できる. この右辺第一項は式 (24) より,

$$(\mathbf{r}_i^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_x^w = \Delta x = R \sin \varphi \quad (26)$$

である. ここで, 移動後の接触点から, 初期状態の触角の姿勢へおろした垂線の足の位置ベクトルを  $\mathbf{r}_b^a$  とすると, ベクトル  $\mathbf{r}_{mo}^a$ ,  $\mathbf{r}_b^a$ ,  $\mathbf{r}_c^a$  の終点はすべて初期状態の触角直線上に並び, 右辺第二項は

$$\begin{aligned}(\mathbf{r}_f^a - \mathbf{r}_{mo}^a)^t \xi_x^w &= \|\mathbf{r}_b^a - \mathbf{r}_{mo}^a\| \\ &= \|\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_{mo}^a\| - \|\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_b^a\| \\ &= \frac{S}{\cos \theta_{add}} - \Delta y \tan \theta_{add} \\ &= \frac{S}{\cos \theta_{add}} \\ &\quad - R(1 - \cos \varphi) \tan \theta_{add}\end{aligned}\quad (27)$$

となる. よって,

$$S_x = R \left\{ \sin \varphi - (1 - \cos \varphi) \tan \theta_{add} \right\} + \frac{S}{\cos \theta_{add}} \quad (28)$$

となり,  $S_x$  と  $S$  の関係式が得られる. 一方,  $\Delta y$  は,

$$\begin{aligned}\Delta y &= (\mathbf{r}_f^a - \mathbf{r}_i^a)^t \xi_y^w \\ &= -(\mathbf{r}_i^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^w \\ &= -(\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^w \\ &= - \left\{ (\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^a \right\} \xi_y^a \xi_y^w \\ &= (\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^a \cos \theta_{add}\end{aligned}\quad (29)$$

と変形できるので, 式 (23) より,

$$(\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^a = \frac{R(1 - \cos \varphi)}{\cos \theta_{add}} \quad (30)$$

を得る. したがって, たわみ量に関する式

$$\begin{aligned}w(0) &= (\mathbf{r}_f^a - \mathbf{r}_{mo}^a)^t \xi_y^a \\ &= (\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_{mo}^a)^t \xi_y^a - (\mathbf{r}_c^a - \mathbf{r}_f^a)^t \xi_y^a \\ &= S \tan \theta_{add} - \frac{R(1 - \cos \varphi)}{\cos \theta_{add}}\end{aligned}\quad (31)$$

が得られる.

トルクセンサが感じるトルク  $\tau$  は

$$\begin{aligned}\tau &= -\text{vpr}(S_x \xi_x^w, \mathbf{f}) \\ &= -\text{vpr}(-S \xi_x^a + w(0) \xi_y^a, f_x \xi_x^a + f_y \xi_y^a) \\ &= S f_y + w(0) f_x\end{aligned}\quad (32)$$

で表される. なお, 曲面接触時のコンプライアンスを

$$C_{\theta c} = \frac{\theta_{add}}{\tau} \quad (33)$$

と定義する.

たわみ線方程式 (6),  $f_x$  と  $f_y$  の関係式 (17),  $S_x$  と  $S$  の関係式 (28), たわみ角に関する式 (13), たわみ量に関する式 (31), トルクセンサが感じるトルクの式 (32), および, 曲面接触時のコンプライアンスの定義式 (33) が解析する上での基礎式となる. これらの式からも分かるように  $C_{\theta c}$  は単純に接触点距離だけの関数とはならず,  $R$ ,  $S_x$ ,  $\theta_{add}$ ,  $\alpha$  の関数となる.

次に, この定式化をエッジ接触時に適用する. この場合, 式 (28), (31) に対して  $R \rightarrow 0$  の極限をとればよい.  $R \rightarrow 0$  の極限状態においても  $\varphi$  は有限の値を持つので,  $S_x$  と  $S$  の関係式 (28) は,

$$S_x = \frac{S}{\cos \theta_{add}} \quad (34)$$

となり, たわみ量に関する式 (31) は,

$$w(0) = S \tan \theta_{add} \quad (35)$$

となる. また, たわみ角に関する式 (13) と,  $f_x$  と  $f_y$  の関係式 (17) より,  $\varphi$  を消去することができ,

$$\begin{aligned}\frac{f_x}{f_y} &= \tan \left\{ \tan^{-1} \{-w'(0)\} - \alpha \right\} \\ &= -\frac{w'(0) + \tan \alpha}{1 - w'(0) \tan \alpha}\end{aligned}\quad (36)$$

を得る. さらに, エッジ接触時のコンプライアンスを

$$C_{\theta e} = \frac{\theta_{add}}{\tau} \quad (37)$$

とする. そして残りのたわみ線方程式 (6) とトルクセンサが感じるトルクの式 (32) を合わせて, 合計六つの等式がこの場合の基礎式となる.

## 2.2 近似解の導出

本章では, 第 2.1 節で得られた基礎式に対して妥当性を失わない程度に近似を用いて式を簡略化し, 解析的な近似解を求める.

第 2.1 節での式を簡略化するため, 次の仮定を置く.

仮定 1: 対象物が触角に及ぼす力  $\mathbf{f}$  は  $\mathbf{f} = f \xi_y^a$  で表される方向しか考えない.

仮定 2:  $\theta_{add}$ ,  $\varphi$  およびたわみ量, たわみ角は微小である.

仮定 1 は摩擦の影響を無視することと等価である. この仮定 1 より前節での力ベクトル  $\mathbf{f} = (f_x, f_y)^t$  を,  $f_x = 0$ ,  $f_y = f$  と置き換えることができる. 二つの仮定より, たわみ線方程式 (6) は次のように簡略化できる.

$$EI w''(x) = f x \quad (38)$$

この等式の両辺を積分して、境界条件 (7) を組み込むことにより、たわみ角および、たわみ量はそれぞれ

$$\tan^{-1}\{-w'(0)\} = \frac{fS^2}{2EI} \quad (39)$$

$$w(0) = \frac{fS^3}{3EI} \quad (40)$$

となる。

さらに、 $\theta_{add}$ ,  $\varphi$  は微小であることから、三角関数の 1 次近似を用いて

$$\sin \theta_{add} \approx \theta_{add} \quad (41)$$

$$\cos \theta_{add} \approx 1 \quad (42)$$

とすると、式 (28) より、

$$S_x - S = R\varphi \quad (43)$$

が得られる。また、たわみ角に関する式 (12)、たわみ量に関する式 (31) より、

$$\frac{fS^2}{2EI} = \varphi + \theta_{add} \quad (44)$$

$$\frac{fS^3}{3EI} = S\theta_{add} \quad (45)$$

を得る。さらにトルクに関する式 (32) は

$$\tau = Sf \quad (46)$$

となる。これら四つの等式と、曲面接触時のコンプライアンスの定義式 (33) の、計五つの等式を整理すると、次式が得られる。

$$3EIC_{\theta c} = k(h)S_x \quad (47)$$

ただし

$$k(h) = 1 - \frac{1}{2h} \quad (48)$$

$$h = \frac{S_x}{R\theta_{add}} \quad (49)$$

とする。ここで、エッジ接触時のコンプライアンスを  $C_{\theta e}$  とすると、参考文献 [8] より、

$$S_x = 3EIC_{\theta e} \quad (50)$$

を得る。したがって、 $C_{\theta e}$  と  $C_{\theta c}$  の比をとると、

$$\frac{C_{\theta c}}{C_{\theta e}} = k(h) \quad (51)$$

となるので、係数  $k$  は曲率半径がコンプライアンスに及ぼす影響を示していることが分かる。

式 (48) より、パラメータ  $h$  が増加するに従って係数  $k$  は単調に増加しながら 1 に近づいていき、 $h \rightarrow \infty$  の極限において  $k \rightarrow 1$  となることが分かる。すなわち、パラメータ  $h$  が大きくなるにつれてコンプライアンス  $C_{\theta c}$  はエッジ接触の場合に近づいていくことになり、曲率半径  $R$  がコンプライアンスに及ぼす影響は小さくなる。

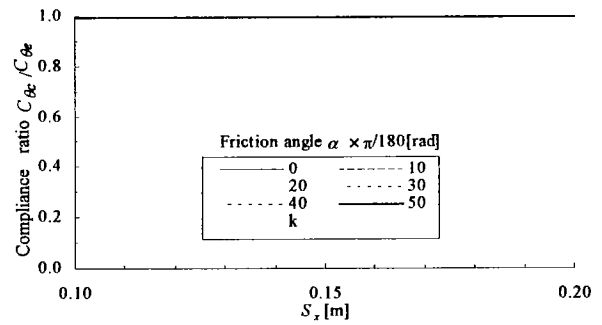


Fig. 6 Numerical solution and approximate solution

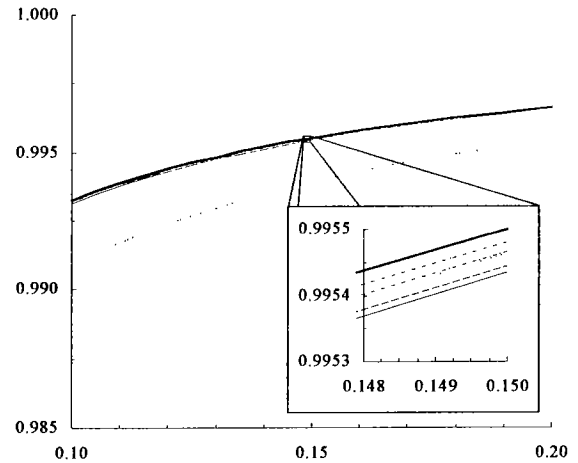


Fig. 7 Magnification of Fig. 6

### 2.3 数値解と近似解の比較

第 2.1 節の基礎式を数値的に解いて、コンプライアンス  $C_{\theta c}$  と  $C_{\theta e}$  との比 (以後これを数値解比と呼ぶ) と、第 2.2 節で求めた  $k$  を Fig. 6 に示す。なお、数値解比は同じ摩擦係数のもの同志の比を用いた。このグラフではほとんどすべての曲線が重なっており区別がつかないので、縦軸を拡大したグラフを Fig. 7 に示す。

この数値解比より、摩擦によるコンプライアンスへの影響はほとんどないことが分かる。また、1 次近似式を用いた  $k$  とほとんど差がなく、傾向も一致しているので、曲率半径の影響について考えるときに近似式を用いても実用的には十分であると言える。

## 3. 実 験

実験に使用した装置について、Fig. 8 に示す。この装置は、回転軸に触角を固定するためにアダプタを用いており、 $L_1 = 0.009$ [m]、 $L_2 = 0.017$ [m] のものを使用した。触角の固定端から接触点までの距離は、 $S_x$  のままであるが、このアダプタによって、トルクセンサが感じるモーメントアームの長さは  $S_x + L_2$  となり、回転中心から接触点までの距離は  $S_x + L_1 + L_2$  となるので、コンプライアンスの値は単純に接触点距離に比例しなくなる。このとき、コンプライアンスは

$$C_{\theta} = \frac{S_x^3}{3EI(S_x + L_2)(S_x + L_1 + L_2)} \quad (52)$$

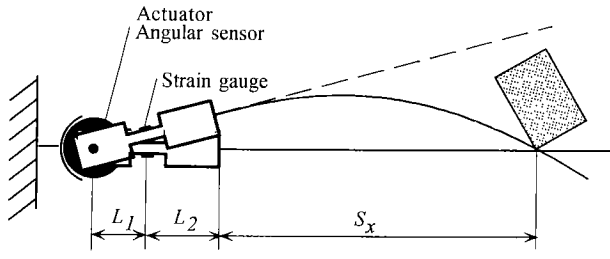


Fig. 8 Sensor geometry including the adaptor

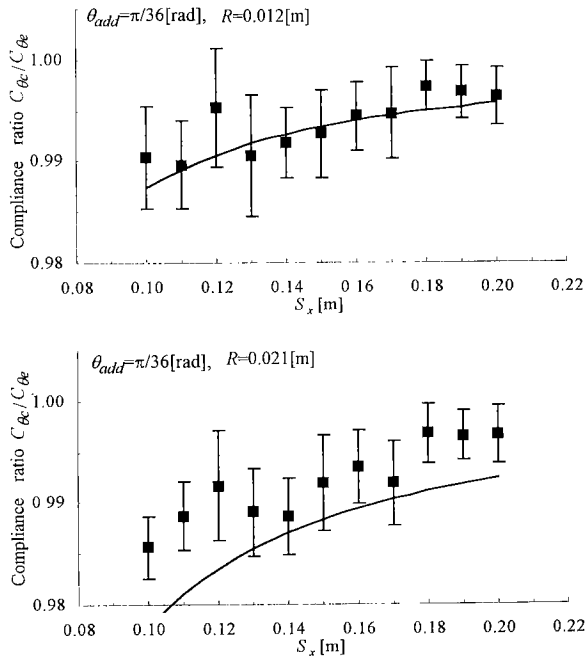


Fig. 9 Experimental results for a curved object

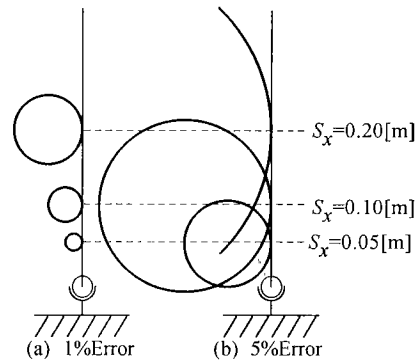
のような複雑な式になる。しかし、接触点距離  $S_x$  に比べてアダプタ部分が十分短いとき、すなわち、 $L_1 \rightarrow 0$ ,  $L_2 \rightarrow 0$  のとき、この式は基本式 (50) に帰着する。

Fig. 9 は、曲率半径を変えて 2 種類の対象物に対して行った実験結果である。図中の実線は  $k$  にアダプタ部の補正を行った理論値である。また、エッジ対象物と曲面对象物それぞれに行った実験結果の比をプロットした。なお、実験値は 15 回計測したときの平均値と標準偏差で示してある。このグラフでは実験値の標準偏差が大きく見えるが、縦軸が極めて狭い範囲を拡大していることに注意されたい。

この実験結果からも、コンプライアンスの比は極めて 1 に近い値を示しており、対象物の曲率半径の影響は極めて小さいことが確認できる。また、対象物の曲率半径と接触点距離に応じて、コンプライアンスの比がほぼ理論通りに変化していることも確認できる。

#### 4. 考 察

はじめに、パラメータ  $h$  が大きいときとはどのような場合かを考えてみよう。 $h$  の定義式 (49) より、 $R$  に比べて  $S_x$  が比

Fig. 10 Examples whose errors are 1% and 5% with respect to an edged object when pushing angle is  $\pi/36$ [rad]

較的大きいときや、 $\theta_{add}$  が比較的小さいときに  $h$  は大きくなるのが容易に分かる。すなわち、対象物の曲率半径に比べて接触点距離が比較的遠い場合や、押し込み角度を小さくしてセンシングを行ったときに、コンプライアンスはエッジ接触時に近づくことになる。 $h$  を構成する三つのパラメータのうち、 $R$  と  $S_x$  はセンシングを行う上で自動的に決まってしまう値で、制御可能なパラメータは  $\theta_{add}$  だけである。そこで、センシングを行う際は、押し込み角度はセンサの精度が許す限り小さく設定した方がよいといえる。

Fig. 10 は、 $\theta_{add} = \pi/36$ [rad] において、 $k = 0.99$  および  $k = 0.95$  となるとき、すなわちエッジ接触時との誤差が 1%、5% となるそれぞれに対して、 $S_x$  と  $R$  の組み合わせの具体例を示した図である。それぞれ接触点距離と誤差に対応する曲率半径の円を示している。Fig. 10 (a) の状態よりもパラメータ  $h$  が大きくなるような条件でセンシングを行えば誤差は 1% 以下に抑えられ、また、誤差を 5% まで許すなら Fig. 10 (b) の状態でセンシングを行っても許容範囲内に誤差を抑えられる。

このように、対象物の曲率半径が極端に大きかったり、極端に近い位置でセンシングを行わなければ、コンプライアンスの誤差は数%程度に抑えられるので、従来通りの手法によってセンシングを行っても実測上影響は極めて少ないといえる。また、もし対象物の曲率半径が分かっていたら、 $k$  を考慮することで、あらかじめ誤差の見積もりを行うこともできる。

本論文での議論はすべて、Fig. 11 (a) のように触角の腹の部分に対象物に接触した場合について考えてきた。ところが、Fig. 11 (b) のように触角の先端部分に対象物に接触する可能性もあり得る。このときも、押し込み過程で接触点位置が移動するので、単純にコンプライアンスが接触点距離だけの関数になるとはいえない。このとき、触角と対象物との間の摩擦力は接触点における対象物表面の接線方向を向くことになるが、このように触角の先端が対象物に接触した場合は、センシングを行う際に接線方向がどの方向に向いているかはまったく制限できないので、この向き次第では、摩擦力が触角をたわませるためのモーメントを発生する可能性がある。よって、触角の先端が対象物に接触した場合は、摩擦の影響が無視できない。

またこの場合、触角の長さが既知であるとする、触角の先端が対象物に触れたことさえ認識できれば、接触点距離を検出

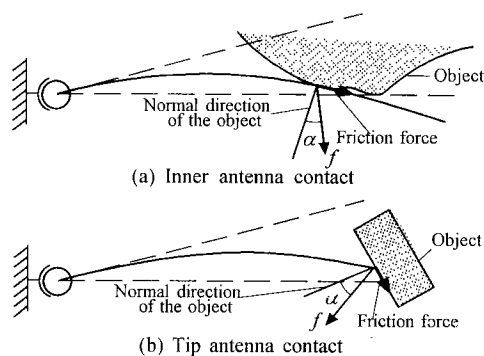


Fig. 11 Comparison between inner and tip contact

したと等価になる。触角の腹で曲面対象物に接触した場合は、接触点での触角の向きは対象物の接線方向に拘束されるという条件が存在したため、コンプライアンスの値は、実際の距離よりも近くに感じるような誤差が生じていた。しかし、触角の先端が接触した場合は、このような触角のたわみ方向を規定するような拘束条件は存在しないため、なるべく触角の曲げモーメントが小さくなるように先端位置が移動し、結果としてコンプライアンスの値は、実際の距離よりも遠くを感じるような誤差が生じるであろうと思われる。したがって、自身の触角の長さよりも遠く距離で接触したという、あり得ない状態が検出された場合、先端が接触したと断定できる。よって、接触点距離は実質的に検出できることになる。

## 5. 結 論

本論文では、対象物の曲率半径  $R$  がセンシング精度に及ぼす影響について考察するため、無次元パラメータ  $h$ ,  $k$  を定義して解析的な考察を行った。以下に得られた結果をまとめる。

1. コンプライアンスの値は、1次近似式を用いた近似解でも厳密解に極めて近い値を示すので、近似解を用いて対象物の曲率半径の影響を考慮することができる。
2. 対象物の曲率半径が極端に大きくなければ、従来通りの手法によってセンシングを行っても、誤差は極めて小さい。

3. あらかじめ対象物の曲率半径が分かっていたら、 $k$  を考慮することである程度誤差を予測できる。

先にも述べたが、3D人工能動触角は最終的には2D人工能動触角に帰着できるので、ここでの議論はそのまま3D人工能動触角に適応できる。3D人工能動触角の対象物には、触角に対して垂直な2本の直交ベクトルを直径方向とする2種類の曲率が仮定できるが、そのうちの押し込み方向を直径方向とする曲率は、ほとんどコンプライアンスに影響を及ぼさないと見える。

## 参 考 文 献

- [1] S.S.M. Wang and P.M. Will: "Sensors for computer controlled mechanical assembly," *The Industrial Robot*, March, pp.9-18, 1978.
- [2] R.A. Russell: "Closing the sensor-computer-robot control loop," *Robotics Age*, April, pp.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. Walkdron: "Design of a mechanical proximity sensor," *Robotica*, vol.4, pp.221-227, 1986.
- [5] R.A. Brooks: "A robot that walks; Emergent behaviors from a carefully evolved network," *Neural Computation*, vol.1, pp.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*, pp.1295-1300, 1992.
- [7] J.F. Wilson and Z. Chen: "A whisker probe system for shape perception of solids," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.117, March, pp.104-108, 1995.
- [8] M. Kaneko: "Active Antenna," *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. in Robotics and Automation*, pp.2665-2671, 1994.
- [9] 金子真: "Active Antenna (第2報)", 第10回日本ロボット学会学術講演会, no.2, pp.671-672, 1992.
- [10] M. Kaneko, N. Ueno and T. Tsuji: "Active Antenna (Basic consideration on the working principle)," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1744-1750, 1994.
- [11] 金子真, 上野直広: "能動触角 (Active Antenna) に関する基礎的研究", *日本ロボット学会誌*, vol.13, no.1, pp.149-156, 1995.
- [12] 金山尚樹, 金子真, 辻敏夫: "3D人工能動触角", *計測自動制御学会論文集*, vol.31, no.12, pp.1915-1923, 1995.
- [13] 上野直広, 金子真: "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*, vol.12, no.8, pp.137-143, 1994.
- [14] 例えば, 尾田十八, 鶴崎明, 木田外明, 山崎光悦: *材料力学*. pp.71-145, 森北出版, 1988.



日野 裕 (Yutaka Hino)

1972年4月20日生。1995年3月、広島大学工学部第二類(電気系)卒業。同年4月、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。人工能動触角、ロボットハンドなどの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1976年3月九州工業大学機械工学科卒業。1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。同年4月、通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990年4月、九州工業大学情報工学部助教授。1993年10月、広島大学教授、現在に至る。ロボットハンド、力覚センサ、触覚ベースアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



金山尚樹 (Naoki Kanayama)

1971年3月7日生。1994年3月、九州工業大学情報工学部機械システム工学科卒業。1996年3月、広島大学大学院工学研究科(博士課程前期)情報工学専攻修了。同年4月、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。1995年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。日本学術振興会特別研究員。(日本ロボット学会学生会員)



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手、1994年同助教授、現在に至る。工学博士。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。計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)