

## 触 覚 微 分 器\*

金子 真<sup>\*1</sup>, 佐嶋 俊彦<sup>\*2</sup>  
原田 研介<sup>\*1</sup>, 辻 敏夫<sup>\*1</sup>

### Tactile Differentiator

Makoto KANEKO<sup>\*3</sup>, Toshihiko SAJIMA,  
Kensuke HARADA and Toshio TSUJI

<sup>\*3</sup> Faculty of Engineering, Hiroshima University,  
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

This paper proposes the Tactile Differentiator that can enhance the edge of polygonal surface through tracing motion. It is composed of a flexible beam anchored at the base with a moment sensor, and an actuator for moving the whole system. When the beam tip passes over the edge where two different planes are intersected with an arbitrary angle, the Tactile Differentiator provides a step change of output, as if it were just like a differentiator. The edge enhancement factor of sensor is introduced with the shape of beam, the intersection angle of environment, and the contact friction. By using the factor, the design orientation of the sensor is discussed. Experimental results are also shown to verify the basic idea.

**Key Words:** Tactile Differentiator, Whisker Sensor, Edge Detection, Tactile Sensor

### 1. 結 言

ヒトの指先には1mm<sup>2</sup>あたり50個の感覚受容器が備わっているといわれている。そこで得られた刺激信号は神経ユニットと呼ばれる情報伝達路を介して上位神経系へと伝達される。興味深い点は、机上に置いたコピー用紙のエッジを検出する際、指先を単にエッジ部にあてがうより、エッジに垂直方向に動かしたほうが圧倒的に感度があがることである。これは指の運動速度と刺激信号の情報伝達路に存在する時間遅れが等価的に空間分解能を向上させる空間フィルタを作り出すからだといわれている<sup>(1)</sup>。Shimojo and Ishikawaは、弾性体表面下に沿って適当なピッチで感圧センサ素子を配置し、人工的な遅れ要素を導入して信号処理することにより、空間分解能が変えられる水平サンプリング方式の触覚センサを提案している<sup>(2)</sup>。またShinodaらは弾性体内の深さ方向に対して二つの感圧センサ素子を配置し、弾性体内の伝達特性を考慮した信号処理を施すことにより、滑り速度や接触深さ等

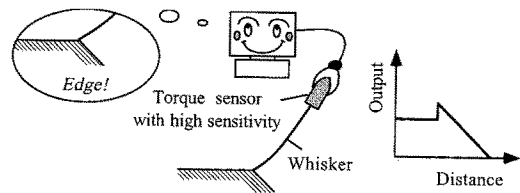


Fig.1 Conceptual image of Tactile Differentiator

の情報を引き出すことができる垂直サンプリング方式の触覚センサ<sup>(3)</sup>を提案している。一方、著者らは、これまでにウイスカ(ひげ)、ウイスカを固定するためのひずみゲージ付アダプタ、それを動かすためのアクチュエータから構成されたTracing形人工能動触角<sup>(4)</sup>を提案し、ねじの有効長計測への応用研究へと発展させてきた。この研究を進める過程で、ウイスカ先端がエッジ部を通過する際、あたかも形状を微分したかのようなスパイク信号が観測される。このスパイク信号は動的な拳動によってもたらされるのではなく、どんなにゆっくり動かしても現れる。この現象は、ねじ形状を正確に計測するという観点からは好ましくないが、例えば刻印文字の認識のようなエッジだけがわかればよいというようなニーズに対しては、センサのハードウェア自体が有する微分効果を逆に有効利用できる

\* 原稿受付 2001年8月10日。

<sup>\*1</sup> 正員、広島大学工学部(〒739-8527 広島市鏡山1-4-1)。

<sup>\*2</sup> 広島大学大学院。

E-mail: kaneko@huis.hiroshima-u.ac.jp

るという利点をもつ。

本研究では、エッジ強調のニーズがあることを踏まえた上で、交差角  $\alpha$  の 2 表面をなぞる際、特別な処理を施さなくてもあたかもエッジ部を微分したかのような信号が得られる触覚センサ(本研究では特に触覚微分器と呼ぶことにする)を新たに提案する。提案する触覚微分器は、図 1 のように高感度センサ素子とセンサ機能をもたないウィスカの組合せによって構成され、しかもセンサのロバスト性を確保する観点からセンサ素子は直接環境には接触しない間接触方式を前提としている。本論文では、はじめにエッジ部を通過した瞬間にセンサ出力がどのくらい増幅されるかを表す指標としてエッジ強調係数  $F$  を導入する。さらにどのようなセンサ設計に対して微分効果が増幅されるかについて、設計指針を導出する。この設計指針に基づいてセンサシステムを試作し、アイデアの実験的検証を行う。

## 2. 関連研究

一般に、ヒトの触覚受容器は表面の形状、滑らかさ、柔らかさ、温度などを感じ取ることができる。ヒトはそれらの触覚器から感知情報を得て、対象物を器用に操ったり、有害な物を警戒したりすることができる。これまでも、このようなヒトの感覚器にヒントを得た触覚センサが数多く開発されている。

### 形状把握と接触点検出

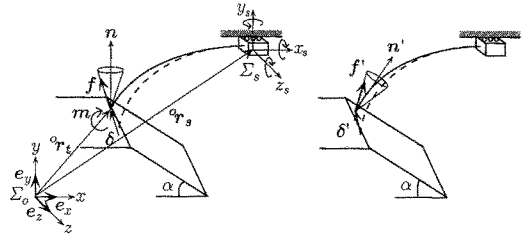
Shimojo らは伝導ゴムを用いた触覚シートを開発し、多指ロボットハンドの指先に取付けて対象物の操りを行っている<sup>(5)</sup>。同様のセンサが Son and Howe によっても考案されている<sup>(6)</sup>。Maekawa らは半球ガラス、シリコンゴム、光源、光-電気変換装置などを用いた指先形状の触覚センサを提案している<sup>(7)</sup>。

### 滑りを用いたセンシング

Ueda らはローラを回転させることで、根元に取付けたばねを用いて滑りが検出できるようなセンシング機構を考案している<sup>(8)</sup>。Howe and Cutkosky は多くのピンで覆われたゴム製の指先触覚センサを設計している<sup>(9)(10)</sup>。指先が接触面で滑ると、押付けられたゴム製の突起が徐々にはじかれ、指先内部に取付けられた加速度センサがこの突起の動きによって発生する加速度を感じ取っている。

### 弾性棒を用いたセンサ

Wang and Will<sup>(11)</sup> や Russel<sup>(12)</sup> らは、弾性棒が対象物に接触した際に生じる棒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単純な機構の触覚センサを考案している。広瀬らは弾性棒に形



(a) On the horizontal surface (b) On the inclined surface

Fig. 2 Coordinate system of whisker sensor

状記憶合金を使った Whisker Sensor を歩行ロボット TITAN III の足先まわりに取付け、障害物検出センサや路面の近接覚センサとして利用している<sup>(13)</sup>。同様のセンサが Brooks<sup>(14)</sup> や Schiebel ら<sup>(15)</sup> によっても報告されている。一方、著者らは、1 軸のトルクセンサと直線の弾性棒を用いて、弾性棒と環境との間の接触位置を検出する人工能動触角<sup>(17)(18)</sup> や、摩擦にかかわらず二次元の表面形状を検出することができる Tracing 形人工能動触角<sup>(4)</sup> を提案している。

このように触覚センサに関する研究は数多くあるものの、触覚センシングにおいてエッジ部が強調された信号が直接得られるようなセンシングシステムについては報告例がない。

## 3. 検出原理

**3.1 解析モデル** 提案する触覚微分器は、図 2 に示すように、弾性棒と根元に取付けたトルクセンサ、センサ系を動かすアクチュエータから構成される。ただし、 $\Sigma_o$ ,  $\Sigma_s$ ,  $f=(f_x, f_y, f_z)^t \in R^{3 \times 1}$ ,  $m=(m_x, m_y, m_z)^t \in R^{3 \times 1}$ ,  $\delta=(\delta_x, \delta_y, \delta_z)^t \in R^{3 \times 1}$ ,  $n, a$  は、それぞれ、絶対座標系、センサ座標系、棒先端にかかる接触力、接触モーメント、弾性棒先端変位、環境に対する法線ベクトル、水平面に対する交差角を表す。また  $e_x, e_y, e_z$  は、絶対座標系  $\Sigma_o$  における各軸方向の単位ベクトルである。図 2(a) は弾性棒先端が水平面に接触している状態、図 2(b) は斜面側に接触している状態である。

**3.2 基本原理** 弾性棒先端がエッジ部を通過する瞬間に環境に対する法線ベクトルの向きは急激に変化する。接触力は摩擦円すい内に拘束されるため、摩擦円すいの中心軸が法線ベクトルとともに変化すると、必然的に接触力の大きさと方向が変化する。その結果、弾性棒の形状に応じてトルクセンサ出力にも急激な変化が現れる場合がある。Tracing 形人工能動触角<sup>(4)</sup> では、このような状況下においてもセンサの出

力はジャンプせず、正確に形状検出を行うことができるが、これが保証されるのは触角が直線の場合に限定された。本研究では、触角形状を直線から意図的にずらすことによって、エッジ通過後の出力ジャンプを期待している。以上が提案する触覚微分器の基本原理である。この現象は弾性棒先端がエッジ部を通過する際にダイナミックにはじけて起こるのではなく、準静的な状況下でも起こる現象であることを付記しておく。

**3・3 仮定** ここで問題の単純化のため、以下の仮定を設定する。

**仮定 1:** 弾性棒の変形は、古典はり理論が適用できる程度に微小とする。

**仮定 2:** 弾性棒先端は、水平面に接触した状態からなぞり始め、エッジ部を通過し、斜面を下るものとする。

**仮定 3:** 弾性棒先端(あるいはその近傍)はいつも環境と接触しているものとする。

**仮定 4:** 静摩擦係数と動摩擦係数は同じとする。

**仮定 5:** 準静的動作とする。

**仮定 6:** トルクセンサは  $z_s$  軸まわりのトルクが測定できるものとする。

仮定 2 より、弾性棒先端の接触力は常に摩擦円すいの稜線に張り付いているものと考えることができる。

**3・4 エッジ強調効果** はじめに、図 2 のような弾性棒モデルにおいてエッジ強調係数  $F$  を導入する。仮定 1 より力(モーメント)  $w = (f^t, m^t)^t$  と変位  $d = (\delta^t, \theta^t)^t$  の間には式(1)のような関係が成立する。

$$d = Dw \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \in R^{6 \times 6} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\delta = [d\delta_x, d\delta_y, d\delta_z]^t \in R^{3 \times 1}$ 、 $\theta = [d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z]^t \in R^{3 \times 1}$ 、 $D_{ij} \in R^{3 \times 3} (i=1, 2; j=1, 2)$  はそれぞれ、棒先端の変位ベクトル、変位角ベクトル、ブロック剛性行列である。弾性棒先端に発生する力(モーメント)  $w$  と根元にかかる力(トルク)  $w_s = (f_s^t, m_s^t)^t$  には、以下のような関係が成り立つ。

$$w_s = Tw \dots\dots\dots (3)$$

$$T = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ T_1 & I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \in R^{6 \times 6} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $I_{3 \times 3} = \text{diag}[1, 1, 1]$ 、 $O_{3 \times 3} = \text{diag}[0, 0, 0]$ 、 $T_1 = (({}^o r_s - {}^o r_t) \times)$ 、添字“s”はセンサ座標系を表す。また  $r = (x, y, z)^t$  とするとき、 $(r \times)$  は

$$(r \times) = \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

を表す。一般に接触点におけるモーメント  $m$  は無視できるので、 $\delta$  と  $f$  の関係だけに着目し、次式を得る。

$$\delta = D_{11} f \dots\dots\dots (6)$$

また、弾性棒がエッジ部を通過する直前直後で、先端の変位は変わらない。この拘束条件は以下のように与えられる。

$$e_y^t \delta = e_y^t \delta' \dots\dots\dots (7)$$

ただし、“'”はエッジ通過直後の状態を表す。またセンサ根元部が  $x_s$  軸方向に動くため、弾性棒先端も  $x$  軸方向に動くものとする。

一方、先端における接触力は以下のように表すことができる。

$$f = R \begin{pmatrix} f_{t1} \\ f_n \\ f_{t2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

であり、 $f_{t1}$ 、 $f_{t2}$  は接線方向力成分、 $f_n$  は法線方向力成分である。 $t_1$ 、 $t_2$  はそれぞれ、 $x$  軸( $x_s$  軸)、 $z$  軸( $z_s$  軸)に平行な軸とする。ここでは便宜上、接触力の  $z$  軸( $z_s$  軸)成分は零( $f_{t2}=0$ )として話を進める。仮定 2 より、棒先端の接触力は摩擦円すいの稜線の上に張り付いているため、式(8)は以下のように表せる。

$$f = R \begin{pmatrix} -\mu f_n \\ f_n \\ 0 \end{pmatrix} = f_n Ra \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $\mu$  は摩擦係数で、 $a = [-\mu, 1, 0]^t$  である。弾性棒がエッジ部を通過した瞬間、接触力は必然的に変化するため、新たな摩擦の拘束を受けることになる。式(6)、式(10)より、式(7)の拘束条件は以下のように書き換えられる。

$$f_n e_y^t D_{11} Ra = f_n e_y^t D_{11} R' a \dots\dots\dots (11)$$

この拘束条件のもとで、 $z_s$  軸まわりのトルクセンサ出力を考える。当然、1軸以上のトルクセンサを用いた方が表面形状の輪郭を知る上で有利ではあるが、ここでは経済的かつシンプルなセンシングシステムの実現を目指し、最小軸数である一軸トルクセンサのみでエッジを強調することを試みる。 $z_s$  軸まわりのトルク成分  $m_{zs}$  は、棒先端のモーメント  $m=0$  として  $s_6 = [0, 0, 0, 0, 0, 1]^t$  を式(3)に左側から操作すること

により描出することができる。すなわち、

$$m_{zs} = s_3^t w_s = s_3^t T w \dots\dots\dots(12)$$

となる。式(12)の  $m_{zs}$  は  $f$  を用いて以下のように表すことができる。

$$m_{zs} = s_3^t T_1 f \dots\dots\dots(13)$$

ただし、 $s_3 = [0, 0, 1]^t$  である。式(13)に式(10)を代入し、次式を得る。

$$m_{zs} = f_n s_3^t T_1 R a \dots\dots\dots(14)$$

以上の準備のもと、エッジ強調係数  $F$  を以下のように定義する。

$$F = \frac{m_{zs}|_{\alpha=a}}{m_{zs}|_{\alpha=0}} = \frac{f_n s_3^t T_1 R' a}{f_n s_3^t T_1 R a} \dots\dots\dots(15)$$

つまり、 $F$  は水平面( $\alpha=0$ )をなぞる際に発生するトルクセンサ出力と比較して、エッジ部を通過した瞬間( $\alpha=a$ )にどのくらいセンサ出力が増減するかを示している。式(11)の拘束条件より、式(15)はさらに以下のように書き換えられる。

$$F = \frac{e_y^t D_{11} R a}{e_y^t D_{11} R' a} \cdot \frac{s_3^t T_1 R' a}{s_3^t T_1 R a} \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 $F$  は  $e_y^t D_{11} R' a \neq 0$ 、 $s_3^t T_1 R' a \neq 0$  の条件のもとで有意となる。 $e_y^t D_{11} R' a = 0$  は、斜面上の摩擦円すいによって制限される接触力が  $y$  軸方向の先端変位を発生できないことを意味し、 $s_3^t T_1 R' a = 0$  は、水平面上の接触力が根元のセンサにトルクを発生できないことを意味している。 $F \neq 1$  であるときエッジ通過後にトルクセンサ信号がジャンプする。実環境では  $e_y$ 、 $s_3$ 、 $R$  は既知であるが、 $a$  は摩擦係数  $\mu$  という未知のパラメータを含む。一方、 $D_{11}$  は弾性棒の形状に対応しており、 $T_1$  は弾性棒の基準高さによって決まるパラメータであり、それぞれ設計により自在に決定できる。

**3.5 Case study : part 1** はじめに、最も単純な形状である直線弾性棒を取上げる。直線弾性棒の場合、 $D_{11}$ 、 $T_1$  はそれぞれ次式のようになる。

$$D_{11} = \frac{l^3}{3EI} \begin{pmatrix} s^2 & -sc & 0 \\ -sc & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(17)$$

$$T_1 = l \begin{pmatrix} 0 & 0 & -s \\ 0 & 0 & c \\ s & -c & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(18)$$

ただし、 $E$ 、 $I$ 、 $l$ 、 $\beta$ 、 $c$ 、 $s$  はそれぞれ、ヤング率、断面二次モーメント、弾性棒の長さ、水平面( $x_s - z_s$  平面)から見た弾性棒の設置角度、 $\cos \beta$ 、 $\sin \beta$  を表す。式(10)に  $e_y = (0, 1, 0)^t$ 、 $a = (-\mu, 1, 0)^t$ 、 $s_3 = (0, 0, 1)^t$ 、および前述の  $D_{11}$ 、 $T_1$  を代入すると、交差角  $\alpha$ 、

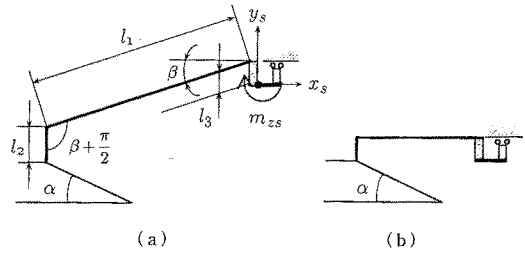


Fig. 3 L-shaped whisker

弾性棒の設置角度  $\beta$ 、摩擦係数  $\mu$  にかかわらず、 $F=1$  となることが確認できる。著者らは、これまでに接触摩擦に依らず直線弾性棒であれば1軸のトルクセンサを用いて、表面形状が正確に再構築できることを示している<sup>(4)</sup>。 $F=1$  はこれを別の角度から表現したことになる。すなわち、直線弾性棒の場合、エッジ部を通過する前後で  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\mu$  に関わらずトルクセンサ出力が変化しないことを意味している。ただし、エッジ強調という観点で考えれば、直線弾性棒を用いることは意味をなさない。

**3.6 Case study : part 2** 次に直線棒に近い図3(a)のようなL型弾性棒を考える。長さ  $l_1$ 、 $l_2$  から成るこの弾性棒の  $D_{11}$ 、 $T_1$  は以下のようになる。

$$D_{11} = \frac{l^3}{3EI} A \dots\dots\dots(19)$$

$$A = \begin{pmatrix} s^2 + \frac{3}{2}ks + k^3 - sc - \frac{3}{2}kc & 0 \\ -sc - \frac{3}{2}kc & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & (1+k^3)+B \end{pmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -l_1s - l_2 + l_3 \\ 0 & 0 & l_1c \\ l_1s + l_2 - l_3 & -l_1c & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(21)$$

ただし、 $G$ 、 $J$ 、 $k$ 、 $B$  はそれぞれ、剛性係数、棒の中心軸に対するねじり断面二次モーメント、 $k=l_2/l_1$ 、 $3k^2EIc^2/(GJ)$  である。式(19)に  $k=0$  を代入すると式(17)に帰着するのは明らかである。式(15)より、以下の  $F$  を得る。

$$F = \frac{c - \left(s + \frac{l_2 - l_3}{l_1}\right)g(\alpha, \mu)}{c - \left(s + \frac{l_2 - l_3}{l_1}\right)g(0, \mu)} \times \frac{c - \left(s + \frac{3}{2}k\right)g(0, \mu)}{c - \left(s + \frac{3}{2}k\right)g(\alpha, \mu)} \dots\dots\dots(22)$$

ただし,

$$g(\alpha, \mu) = \frac{-\mu + \tan \alpha}{\mu \tan \alpha + 1} \dots\dots\dots (23)$$

である。\$l\_2=l\_3=0\$ の場合、3・5 節で述べた直線弾性棒と同様、\$F=1\$ になる。簡単化のため、\$l\_2=l\_3(\neq 0)\$、\$\beta=0\$、すなわち図 3(b) のような形状を考えてみよう。この場合、式(22)は次式のようになる。

$$F = \frac{1 - \frac{3}{2}kg(0, \mu)}{1 - \frac{3}{2}kg(\alpha, \mu)} \dots\dots\dots (24)$$

$$= \frac{1 + \frac{3}{2}k\mu}{1 + \frac{3}{2}kh(\alpha, \mu)} \dots\dots\dots (25)$$

ただし,

$$h(\alpha, \mu) = \frac{1}{\tan \alpha} \frac{\tan \alpha + 1}{\mu \tan \alpha + 1} \dots\dots\dots (26)$$

さらに \$\mu=0\$ で考えると、式(24)は以下のように整理される。

$$F = \frac{1}{1 - \frac{3}{2}k \tan \alpha} \dots\dots\dots (27)$$

ここで、\$0 < \alpha < \alpha\_1\$ の範囲で \$F > 1\$ となることが容易に示せる。ただし、\$\alpha\_1 = \tan^{-1}(2/3k)\$ rad である。3・4 節で指摘したように、交差角が \$\alpha\_1\$ のとき、棒先端の接触力は \$y\$ 方向に発生できなくなる。しかし、弾性棒の形状が \$l\_2 \ll l\_1\$ (\$k \ll 1\$) を満たすように設計すると、\$\alpha\_1\$ はほぼ \$\pi/2\$ rad であると見なせる。つまり、\$l\_2 \ll l\_1\$ では \$0 < \alpha < \pi/2\$ で \$F > 1\$ となり、現実的に考えられる任意の交差角 \$\alpha\$ に対してエッジ強調効果が現れることになる。一般に、刻印で生成される交差角 \$\alpha\$ は \$\pi/2\$ rad 以下であり、\$F > 1\$ を満たす範囲内であると考えることができる。ここでは、\$\mu=0\$ で議論しているが、エッジ強調効果はもちろん \$\mu \neq 0\$ の場合でも発生する。以上より、図 3(b) のような L 形弾性棒は触覚微分器として十分利用することができ、そのエッジ強調度合いは摩擦係数 \$\mu\$ と交差角 \$\alpha\$ に依存することがわかる。

**3・7 シミュレーション** 図 3(b) の L 形弾性棒のエッジ強調係数 \$F\$ をさまざまな \$\alpha, \mu\$ に対して算出した結果を図 4 に示す。図 4(a), (b) はそれぞれ、\$l\_2/l\_1=0.033, l\_2/l\_1=0.117\$ として導出された \$F\$ である。この変数 \$l\_2/l\_1\$ は、後述の実験で用いるものと同値にしている。図 4(a), (b) を比較すると、図 4(b) のグラフのほうが(a)よりも全体的に \$F\$ が大きいことがわかる。つまり、\$l\_2/l\_1\$ が大きくなるとよりエッジ強調効果が現れやすいことがわかる。また、図 4(a), (b) とともに \$\alpha\$ の影響が支配的に現れており、交差角が

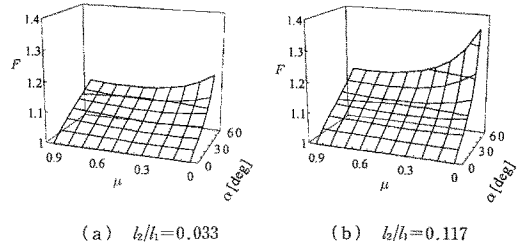
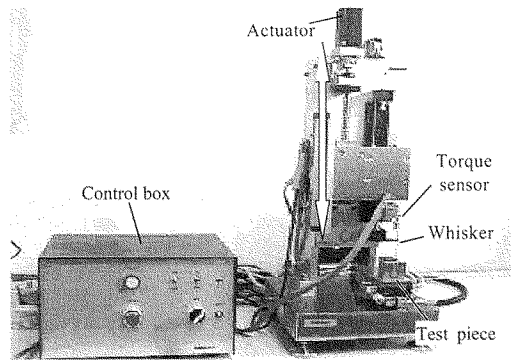
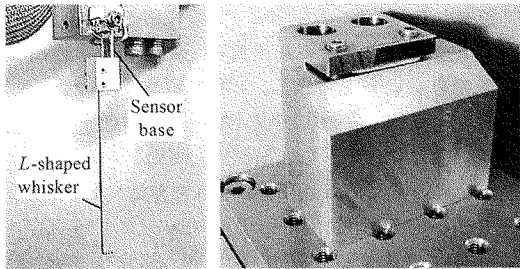


Fig. 4 Simulation results



(a) Overview



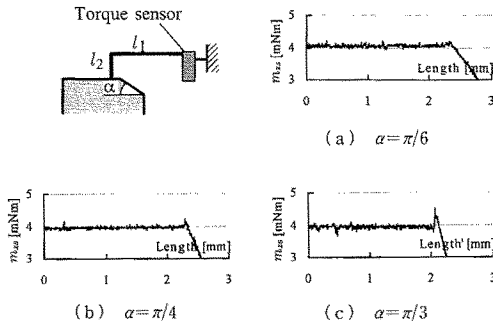
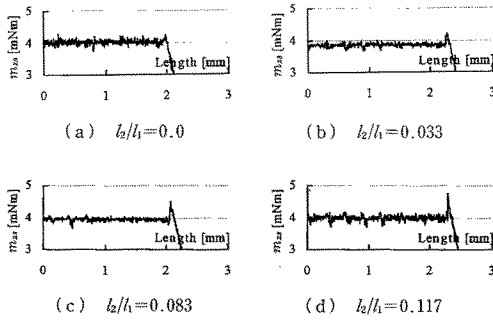
(b) Sensing part (c) Test piece (\$\alpha = \pi/3\$)

Fig. 5 Experimental system

大きくなるほどエッジ強調効果が大きく現れていることがわかる。さらに、摩擦の有無にかかわらず、エッジ強調効果が期待できる点にも注意されたい。

4. 実 験

**4・1 実験装置** 試作した実験装置を図 5 に示す。図 5(a), (b), (c) はそれぞれ、装置概要、センシング部、対象物として用いたテストピースである。図 5(a) のように、センシング部は上部に取付けた DC サーボモータによって上下方向に動かすことができる。図 5(b) のようにひずみゲージをセンサ部根元に取付けることで、弾性棒先端に加わった接触力によ

Fig. 6 Experimental results ( $l_2/l_1=0.083$ )Fig. 7 Experimental results ( $\alpha = \pi/3$ )

で発生するトルクが測定できるようになっている。刻印によって生成される交差角は、通常  $\pi/6 \sim \pi/2$  rad 程度であることを考慮し、実験では交差角  $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$  rad の 3 種類のテストピースを用意した。

**4.2 実験結果** (a)  $l_2/l_1 = 0.083$ :  $\beta = 0$  のとき、エッジ強調係数  $F$  は式(24)のように非常に簡単に表すことができ、理論上三つのパラメータ  $k (= l_2/l_1)$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  だけで決まる。 $\beta = 0$ ,  $l_2/l_1 = 0.083$  に固定し、3 種類 ( $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$  rad) のテストピースで実験を行った結果を図 6 に示す。図 6 より、 $\alpha = \pi/4, \pi/3$  rad では、 $\alpha = \pi/6$  rad に比べてエッジ強調効果をはっきりと確認でき、 $\alpha$  が大きくなるほどエッジ部がより強調されていることがわかる。

(b)  $\alpha = \pi/3$  rad: 次に  $\alpha = \pi/3$  rad に固定し、異なる 4 種類 ( $l_2/l_1 = 0, 0.033, 0.083, 0.117$ ) の弾性棒を用いて実験を行った結果を図 7 に示す。 $l_2/l_1 = 0$  の場合のみ  $\beta = \pi/10$  rad, その他の場合については  $\beta = 0$  rad で実験を行っている。 $l_2/l_1 = 0$  の場合、理論上  $F = 1$  となり、エッジ強調効果は現れない。図 7(a) の実験結果もこれを裏づけていることがわかる。 $l_2/l_1 \neq 0$  の弾性棒に対しては、エッジ強調効果はすべてに現れているが、その度合いは  $l_2/l_1$  が大きくなるほど明確に確認できるようになる。

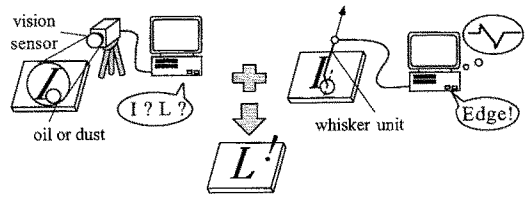


Fig. 8 Cooperative recognition with vision sensor

このようにフィルタ処理を行わなくてもエッジ部が強調された信号を直接得ることができるので、エッジの所在を知る上で極めて有効に利用できるものと考えられる。

## 5. 応 用

ここでは触覚微分器の有効な利用法について考察してみよう。例えば、エンジン部品には一般に刻印が打たれ、組立て時に刻印を視覚センサで識別し、それぞれの部品をどう組合せるかが決められる。ところが図 8 のように刻印の文字の一部が油等のよごれで隠れてしまうと、視覚センサだけではもはや識別できなくなってしまいます。このように視覚センサだけでは、識別があいまいとなる部分に対して、図 7(c) や (d) のように高いエッジ強調効果を有する触覚微分器を用いると、形状を忠実に再現しようとするはん用的な触覚センサを用いる場合に比べ、エッジの開始地点で瞬時にエッジの存在を確認することができるため、より素早いセンシングが可能となる。センシングの高速化は生産性の向上という観点からきわめて重要であることはいうまでもない。このように、触覚微分器は応用面でも今後の発展が期待できる新しいタイプの触覚センサである。

## 6. 結 言

本研究では能動触角先端のなぞり動作を用いてエッジ部の信号を強調するような手法として触覚微分器を提案した。また、エッジ強調係数  $F$  を導入し、触覚微分器として L 形の単純な弾性棒を用いて実験的にエッジ強調効果を検証した。

なお、本研究は財団法人三豊科学技術振興協会の助成によって行われたものであることを付記しておく。また装置の試作においては株式会社ミツトヨの沢田氏、吉岡氏らの協力を得た。ここに感謝の意を表したい。

## 文 献

- (1) Harmon, L.D., Tactile Sensing for Robot, *Recent*

- Advances Robotics*, (1985), 389-424, John Wiley & Sons.
- (2) Shimojo, M. and Ishikawa, M., An Active Touch Sensing Method Using a Spatial Filtering Tactile Sensor, *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotic Autom.*, **1** (1993), 948-954.
- (3) Shinoda, H., Ueda, M. and Ando, S., A Tactile Sensor Using Three-dimensional Structure, *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1993), 435-441.
- (4) 金子真・別所良治・辻敏夫, Tracing 型人工能動触角, 日本ロボット学会誌, 18-8 (2000), 1773-1179.
- (5) Shimojo, M., Shinohara, M. and Fukui, Y., Human Shape Recognition Performance for 3-D Tactile Display, *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics*, Part A, **29-6** (1999), 637-644.
- (6) Son, J.S. and Howe, R.D., Tactile Sensing and Stiffness Control with Multifingered Hands, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, **4** (1996), 3228-3233.
- (7) Maekawa, H., Tanie, K., Komoriya, K. and Kaneko, M., Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch, *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, **2** (1992), 1327-1334.
- (8) Ueda, M., et al., Tactile Sensors for Industrial Robot to Detect Slip, *Proc. of the 2nd ISIR*, (1972), 63-76, IIT Research Institute, Chicago.
- (9) Howe, R. D. and Cutkosky, M. R., Sensing skin acceleration for slip and texture perception, *Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1989), 145-150.
- (10) Howe, R. D. and Cutkosky, M. R. (Khatib, O., Crang, J. J. and Lozano-Perez, T. 編), Touch Sensing for Robotic Manipulation and Recognition, *The Robotics Review 2*, (1992), 55-112, MIT Press.
- (11) Wang, S. S. M. and Will, P. M., Sensors for computer controlled mechanical assembly, *Int. Robot.*, (1978), 9-18.
- (12) Russel, R. A., Closing the sensor-computer-robot control loop, *Robot Age*, (1984), 15-20.
- (13) Hirose, S., Masui, T., Kikuchi, H., Fukuda, Y. and Umetani, Y., Titan III, A quadruped walking vehicle, *Proc. 2nd Int. Symp. Robot Res.*, (1985), 325-331, Cambridge, MA.
- (14) Brooks, R. A., A robot that walks; Emergent behaviors from a carefully evolved network, *Neural Computat.*, **1** (1989), 253-262.
- (15) Schiebel, E. N., Busby, H. R. and Waldron, K. J., Design of a mechanical proximity sensor, *Robotica*, **4** (1986), 221-227.
- (16) Russel, R. A., Using tactile whiskers to measure surface contours, *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1992), 1295-1300.
- (17) Ueno, N. and Kaneko, M., Dynamic Active Antenna — A Principle of Dynamic Sensing —, *Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, **2** (1994), 1784-1790.
- (18) Kaneko, M., Kanayama, N. and Tsuji, T., Active Antenna for contact sensing, *IEEE Trans. Robotics Autom.*, **14-2** (1998), 278-291.