

Tracing 型人工能動触角

金子 真* 別所 良治* 辻 敏夫*

Tracing Type Artificial Active Antenna

Makoto Kaneko*, Yoshiharu Bessho* and Toshio Tsuji*

This paper discusses a new sensing system termed as Tracing Type Artificial Active Antenna composed of a flexible beam anchored at the base with moment sensor, and an actuator for moving it. We consider a sufficient condition for detecting the surface shape by using the sensing system. We show that a straight-lined beam with one-axis moment sensor can achieve the requirement irrespective of contact friction, while a curved beam can not do it. We experimentally show that a straight-lined beam can detect the surface irregularity with pretty high sensitivity ($\leq 5 [\mu\text{m}]$), even under different contact frictions. Knowing of such excellent sensitivity of the sensing system, we apply it for detecting the effective length of threads of mechanical parts after tapping.

Key Words: Active Sensing, Artificial Active Antenna, High Sensitivity, Surface Irregularity, Surface Tracing

1. はじめに

ヒトの指先には、大きく 4 種類の感覚受容器が備わっており、それぞれ固有の役目を担っている。例えば、パシニアン小体は高感度触感、マイスナー小体は高速応答触感、ルフィニ器官やメルケル触覚盤はじわっとした圧力感をそれぞれ取り出す感覚器官であることが知られている。特に興味深い点は、動きによって触感が劇的に変化することである。例えば、Fig. 1 (a) のようにテーブル上に 1 枚のコピー用紙をおき、指先をエッジ部に押し当てることを想定してみよう。この場合、指を置いた瞬間、エッジに触れたことが分かるが、その感覚はすぐ消え去ってしまう。これに対し、Fig. 1 (b) のように指先をエッジに垂直な方向に連続的に動かすと、エッジの段差がたとえ数 $[\mu\text{m}]$ であったとしてもエッジに触っていることをクリアに認識し続けることができる。これは指を動かすことによって、マイスナー小体のように高速応答触感を担当している受容器が活性化されるためである。次に Fig. 1 (c) のように鉛筆を指先で摘んでエッジに対して垂直方向になぞることを想定してみよう。この場合も指先の感覚受容器は鉛筆先端部がエッジに触れた瞬間をクリアに捕えることができる。これはエッジ部を通過する際に発生するわずかな機械的振動を指先の受容器が敏感に察知しているからである。

本研究では、Fig. 1 (c) のようなヒトによるアクティブセンシングを人工的に実現することを目的としている。Fig. 2 は提案

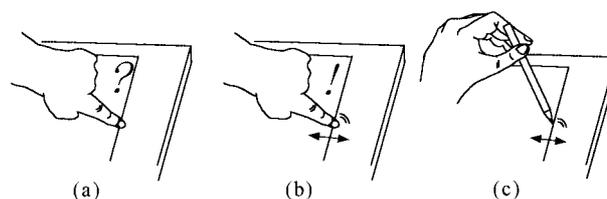


Fig. 1 Micro-step detection by human

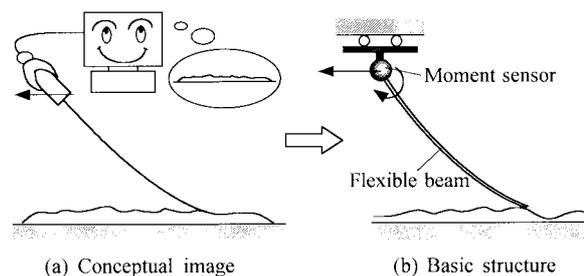


Fig. 2 Tracing Type Artificial Active Antenna

するセンシングシステムのプロトタイプを示したものである。このセンシングシステムは、センシング機能を持たない弾性棒、モーメントセンサ、センサ全体を動かす（または被検査面を動かす）アクチュエータの 3 要素によって構成されている。本センシングシステムは、センシング機能を持たない弾性棒でなぞり動作を行った際、被検査面の凹凸によって発生する弾性棒の変形に起因した力をモーメントセンサ部（ヒトの場合感覚器官）で計測することによって、等価的に被検査面の形状を推定するもの

である．このようなセンシングシステムを以下 Tracing 型人工能動触角と呼ぶことにする [1]．

本論文では，はじめに Tracing 型人工能動触角がセンサとして動作するための十分性について吟味し，直線の弾性棒を用いれば，一軸のモーメントセンサで一次元的な形状が計測できることを示す．次に弾性棒のダイナミクスを考慮し，エッジ部の立ち上がりを再現する方法についても考察する．さらに，5 [μm] 程度の分解能で表面の凹凸が検出できることを実験的に検証するとともに，応用例として，めねじ部の有効めねじ長さの検出に本センサを応用することを試みる．

2. 関連研究

弾性棒を用いたセンシング機構はこれまでもいくつか提案されている．例えば，Wang and Will [2] や Russel [3] らは，ピアノ線のような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簡単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 の足先まわりに取り付け，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 [4]．同様のセンサが Brooks [5] や Schiebel ら [6] によっても報告されている．これらの研究で対象にしているセンサは環境との接触の有無を ON-OFF 情報として捉えようとしているもので，対象物と弾性棒の接触点位置までは分からない．一方，Kaneko らは弾性棒が環境に接触した状態での系の回転コンプライアンスが接触距離に比例することに着目した人工能動触角を提案している [7]．また Ueno らは弾性棒が環境に接触した状態での系の固有振動数が接触位置の関数になることに着目した動的人工能動触角について論じている [8]．

本研究では基本的なハードウェア構成は文献 [7] に近いが，センサ系全体（または被検査面）を動かすことによって弾性棒先端が被検査面をなぞり，それによって得られるモーメントセンサ出力から逆に入力形状を推定しようとする点で従来研究と検出原理が異なる．

3. 検出原理

3.1 弾性棒の力学特性

Fig. 3 (a) のような一般的な弾性棒モデルを考える．ただし， $\tau = (\tau_x, \tau_y, \tau_z)^t \in R^{3 \times 1}$ ， $M = (m_x, m_y, m_z)^t \in R^{3 \times 1}$ ， $f = (f_x, f_y, f_z)^t \in R^{3 \times 1}$ はそれぞれ弾性棒根元のモーメント，弾性棒先端のモーメント，弾性棒先端に加わる接触力を表す．ここで問題の簡単化のため，以下のような仮定を設定する．

仮定 1: 弾性棒の変形は，はり理論が適用できる程度に微小とする．

仮定 2: 弾性棒の曲げモーメントによるたわみに対し，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: 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 1 より力（モーメント）と変位の間には式 (1) のような線形性が成立する．

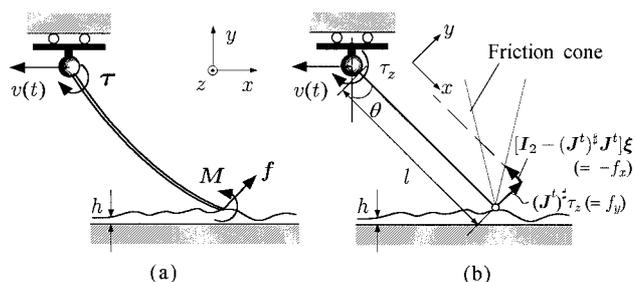


Fig. 3 Analytical model of tracing type artificial active antenna

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ d\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし， $d\delta = [\delta_x, \delta_y, \delta_z]^t \in R^{3 \times 1}$ ， $d\theta = [d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z]^t \in R^{3 \times 1}$ ， $D_{ij} \in R^{3 \times 3}$ ($i = 1, 2; j = 1, 2$) はそれぞれ，変位ベクトル，変位角ベクトル，ブロック剛性行列である．一般に接触点におけるモーメント M は無視できるので， $d\delta$ と f の関係だけに着目し，次式を得る．

$$d\delta = D_{11} f \quad (2)$$

さらに，弾性棒根元でのモーメント τ と接触力 f には次のような関係がある．

$$\tau = J^t f \quad (3)$$

ただし， J^t は f から τ への変換を表すヤコビ行列である． τ から $d\delta$ が推定できるかどうかについて次に考察する．

3.2 3軸モーメントセンサを用いる場合

はじめに 3 軸モーメントセンサを用いる場合を想定する． $J^t \in R^{3 \times 3}$ なので， $\det |J^t| \neq 0$ ならば J^t の逆行列が存在する．この場合，式 (2)，(3) より次式が得られる．

$$d\delta = D_{11} [J^t]^{-1} \tau \quad (4)$$

したがって， τ が測定できれば $d\delta$ を逆に推定することができる．

3.3 1軸モーメントセンサを用いる場合

モーメントセンサの数を減らした場合にも変位を一意に推定することができるかどうかについて考える．弾性棒の根元に z 軸モーメントセンサだけがあると想定する．この z 軸まわりのモーメント成分は $s = (0, 0, 1)^t$ 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，

$$s^t \tau = s^t J^t f \quad (5)$$

となる．ただし τ_z は z 軸まわりのモーメント成分であり， $\tau_z = s^t \tau$ である．式 (5) より，次式を得ることができる．

$$f = (J_1^t)^\# \tau_z + [I_3 - (J_1^t)^\# J_1^t] \xi \quad (6)$$

ただし， $J_1^t = s^t J^t$ ， $I_3 \in R^{3 \times 3}$ ， $\xi \in R^{3 \times 1}$ ， $(*)^\#$ はそれぞれ f から τ_z へのヤコビ行列，単位行列，任意ベクトル，および擬似逆行列を表す．式 (6) の右辺第 1 項は z 軸モーメントセンサによって計測可能な力の成分であり，第 2 項はモーメントセンサでは計測することができない成分である．よって，接触力 f はモーメント τ_z だけの計測では一意に決まらない．つまり， $(J_1^t)^\# \tau_z$ に垂直な力成分 $[I_3 - (J_1^t)^\# J_1^t] \xi$ は接触点における摩

擦に応じて変化する．式(6)を式(2)に代入し，次式を得る．

$$d\delta = D_{11}(J_1^t)^{\#}\tau_z + D_{11}[I_3 - (J_1^t)^{\#}J_1^t]\xi \quad (7)$$

一般的に式(7)のようにゼロ空間が存在すると， τ_z を測定しただけでは $d\delta$ を一意に決定することはできない．ここで，Fig. 3(b)のような直線の棒を想定する．ただし，弾性棒は環境表面にわずかに押し付けられているものとする．弾性棒の長さ $l = 100$ [mm]として， $h = 200$ [μm]程度までの微小な表面段差を想定する場合， $h/l = 0.002$ となり，表面段差に対して弾性棒は十分長いため，押し付けている状態でも棒の硬さに関係なく弾性棒はほぼ直線の形状を保っているとみなすことができる．簡単のため，Fig. 3(b)のような二次元モデルで考えてみよう． D_{11} ， J_1^t は次のように与えられる．

$$D_{11} = \begin{pmatrix} \frac{l}{EA} & 0 \\ 0 & \frac{l^3}{3EI} \end{pmatrix}, J_1^t = (0, l) \quad (8)$$

ただし l ， E ， A ， I はそれぞれ弾性棒の長さ，ヤング率，棒の断面積，および断面二次モーメントである．式(8)より $D_{11}(J_1^t)^{\#}\tau_z$ ， $D_{11}[I_2 - (J_1^t)^{\#}J_1^t]\xi$ は次のように得られる．

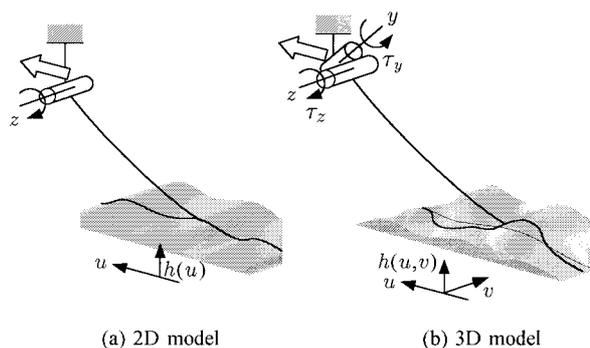
$$\begin{aligned} D_{11}(J_1^t)^{\#}\tau_z &= \begin{bmatrix} \frac{l}{EI} & 0 \\ 0 & \frac{l^3}{3EI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ l \end{bmatrix} \tau_z \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\tau_z l^2}{3EI} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D_{11}[I_2 - (J_1^t)^{\#}J_1^t]\xi &= \begin{bmatrix} \frac{l}{EA} & 0 \\ 0 & \frac{l^3}{3EI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{l\xi_1}{EA} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

引きずり動作中に，弾性棒先端の接触力はFig. 3(b)のように摩擦円錐の稜線上に張り付く．仮定2よりゼロ空間成分によって発生する長手方向の伸び(縮み)変位 $l\xi_1/EA$ は垂直方向の曲げ変位 $\tau_z l^2/3EI$ に比べて無視できるほど小さい．したがって，Fig. 3(b)のように弾性棒として直線棒を用いると， τ_z を計測することにより弾性棒先端における環境の高さ h は次式のように一意に求めることができる．

$$h = \delta_y \sin \theta = \frac{\tau_z l^2}{3EI} \sin \theta \quad (11)$$

以上より，接触点でどのような摩擦力が働くか分からないような場合においても，直線の弾性棒を用いれば h と τ_z は互いに1対1に対応する．これはFig. 4(a)のように被検査面の高さ h がセンサの進行方向の変数 $h = h(u)$ として記述できる二次元モデルの場合であるが，一般にはFig. 4(b)のように高さ $h(u, v)$ を表現するのに2変数必要となる．このような一般的な三次元モデルの場合，弾性棒先端はポテンシャルエネルギーが最小になるような点を自動的に選択するため，センサを一次的に動かしても先端は必ずしも同一直線状を動く訳ではなく，Fig. 4(b)のように z 軸方向にも変位する．したがってこの弾性棒先端の軌跡までトラッキングすることが要求される場合には



(a) 2D model (b) 3D model

Fig. 4 2D model and 3D models

τ_z の測定だけでは十分ではなく，少なくとも y 軸回りのモーメントも計測する必要がある．ただし，回転軸表面形状の計測や後述するめねじの有効長計測など産業応用を考えた場合，二次元モデルで十分対応できる場合が多い．

3.4 ダイナミクスの影響

弾性棒を非常にゆっくり動かす場合には弾性棒の振動等を無視できるが，高速測定を目指す場合，これらを考慮に入れる必要がある．そこで，ここでは系のダイナミクスの影響について考察する．Fig. 3(b)のような二次元モデルにおいてセンサ全体が水平方向に動く速度を $v(t)$ ，入力変位を $h(t)$ ，弾性棒の伝達関数を $G(s)$ ，根元のモーメントセンサで検出されるモーメントを $\tau(t)$ とする．一般にFig. 3のシステムでの入出力関係は式(12)のように表される．

$$T(s) = G(s)H(s) + W(s) \quad (12)$$

$T(s)$ ， $H(s)$ ， $W(s)$ はそれぞれモーメントセンサ出力 $\tau(t)$ ，入力変位 $H(t)$ ，ノイズ $w(t)$ をそれぞれラプラス変換したものである．式(12)より次式が得られる．

$$H(s) = G^{-1}(s)T(s) - G^{-1}(s)W(s) \quad (13)$$

式(13)を逆ラプラス変換すると，

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G^{-1}(s)T(s) - G^{-1}(s)W(s)\} \quad (14)$$

となる．すなわち，出力されたモーメント波形がノイズ $w(t)$ を含まない理想的な状態では，式(14)より

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G^{-1}(s)T(s)\} \quad (15)$$

となり， $T(s)$ を測定すれば弾性棒の伝達関数 $G(s)$ を用いて，未知の $h(t)$ を推定することができる．実際にはノイズ $w(t)$ が必ず含まれてしまうため，出力されたモーメント波形にノイズ成分をカットするデジタルローパスフィルタ(以下LPF)をかける必要がある．一方，先端が被検査面に接触した状態での弾性棒の伝達関数を解析的に導出することは一般に極めて困難であるため，Fig. 5のようにモデル化して近似的な伝達関数を導出する．ここで，Fig. 5(a)，(b)，(c)はそれぞればねモデル，一次の固有振動数まで考慮したばね質量モデル(以下，一次モデル)および二次の固有振動数まで考慮したばね質量モデル(以下，二次モデル)であり，それぞれの伝達関数 $G_{m_0}(s)$ ， $G_{m_1}(s)$ ，

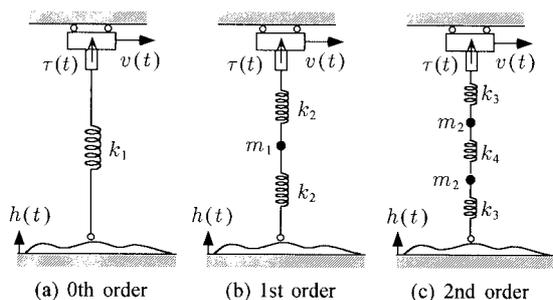


Fig. 5 Mass-spring model

$G_{m_2}(s)$ は次のように表すことができる．

$$G_{m_0}(s) = k_1 \quad (16)$$

$$G_{m_1}(s) = \frac{k_2^2}{2k_2 + m_1 s^2} \quad (17)$$

$$G_{m_2}(s) = \frac{k_3^2 k_4}{(k_3 + m_2 s^2)(k_3 + 2k_4 + m_2 s^2)} \quad (18)$$

ただし, $k_i (i = 1 \sim 4)$, $m_i (i = 1, 2)$ はそれぞればね定数, 質量を表す．実際のシステムにおいては弾性棒を環境に押し付けた状態で固有振動数を測定し, 式(17), (18)の $k_i (i = 2 \sim 4)$ を決定する．

3.5 信号処理

Fig. 6 に入力形状の導出に至るまでの信号処理過程を示す．弾性棒 $G(s)$ を有する弾性棒の固定端のモーメントセンサからの出力には, ノイズや弾性棒の固有振動が重畳している．入力形状を推定する前にかけるLPFの遮断周波数を低くすればするほど, エッジ部がクリアに再現できず推定入力形状は滑らかになってしまう．そのため, LPFの遮断周波数をできるだけ高く設定することが望ましい．ただし, 遮断周波数を高く設定しすぎると, トルクセンサ特有のノイズが現れ, $G_{m_i}^{-1}(s)$ を施す際に支障が出てくるため, この辺のバランスを考慮する必要がある．ばねモデルでは弾性棒の固有振動数を考慮していないため, ノイズと弾性棒の固有振動を, LPFですべてカットする必要がある．一方, 一次モデル, 二次モデルでは, それぞれ弾性棒の第一次, 第二次固有振動数まで考慮している．それらを有用な情報として残し, それら以外の高周波成分をカットするようにLPFの遮断周波数を選ぶことができる．したがって, ばねモデルに比べて遮断周波数を高く設定することができる．このとき, LPFの次数 n を弾性棒逆システムの分子の次数よりも高くしておく．これは, 微分計算である逆システムを操作する前に, より高次のLPFをかけることでトータルとして積分形にするためである．最後に, $G_{m_i}^{-1}(s)$ をかけて元の入力形状を推定する．

4. 実 験

4.1 実験装置

試作した実験装置を Fig. 7 に示す．直径 $\phi 1.4$ [mm], 長さ 100 [mm] のステンレス製弾性棒をスライダに固定し, その根元に歪みゲージセンサを取り付け, モーメント信号を検出する．

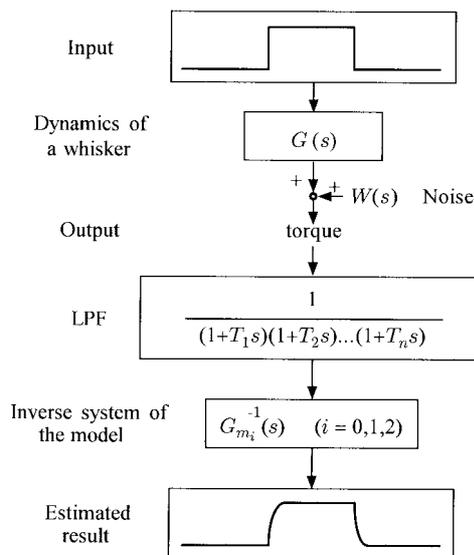


Fig. 6 Data processing flow

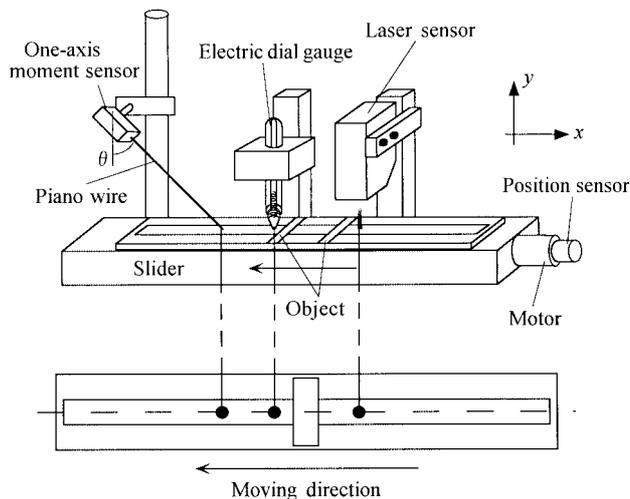


Fig. 7 Experimental setup

本実験装置では, 対象物を取り付けた金属テーブル(被検査面)をスライダで水平に動かすことで Fig. 2 と等価のシステムを実現している．スライダには金属テーブルの位置を測定する位置センサが取り付けられている．また, 比較のため差動トランス式電子ダイヤルゲージ AT3-010 (KEYENCE), CCD レーザ式変位センサ LK-030 (KEYENCE) を本センサと同一直線上に配置した．なお, Fig. 7 の θ を小さくした方が, センサ系が硬くなり, シャープなエッジを再現する上では好都合であるが, 被検査表面に傷をつける原因にもなりかねないため, 実際には $\theta = 45$ [deg] に設定した．また, 弾性棒を金属テーブルに接触させた状態での弾性棒の第一次, 第二次固有振動数はそれぞれ, 374 [Hz], 1,210 [Hz] であった．

4.2 実験結果

ここでは対象物として半透明テープ(厚さ 60 [μm]), 不透明テープ(厚さ 120 [μm]), コピー用紙(両面テープで金属テ

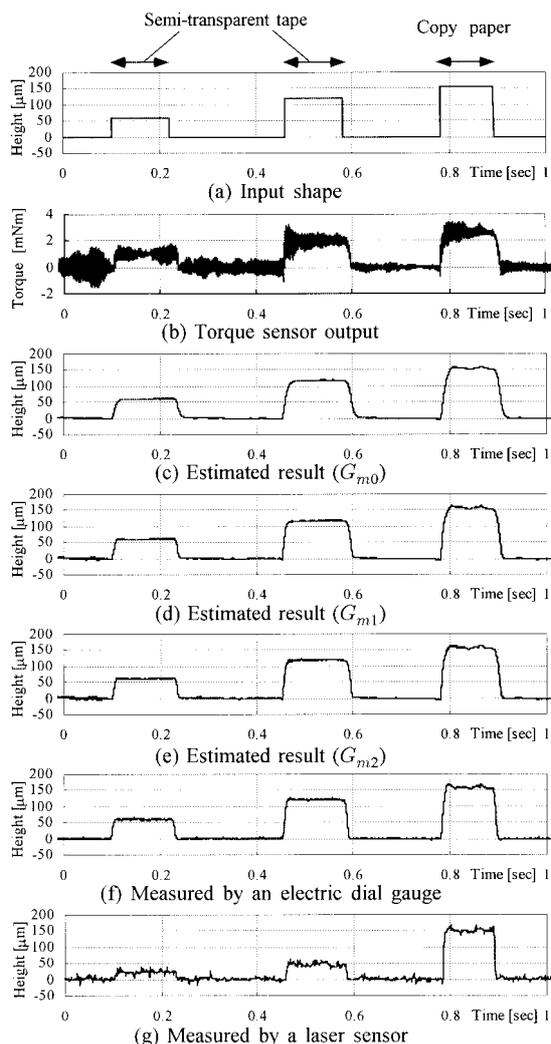


Fig. 8 An experimental result

ブルに接着，総厚さ $150 [\mu\text{m}]$ ），薄ゴム（厚さ $300 [\mu\text{m}]$ ）の 4 種類を用いた．材料によって摩擦係数が異なり，2 種類のテープは摩擦が小さく，コピー用紙，薄ゴムは比較的摩擦が大きい．

まず，半透明テープ，コピー用紙を対象物に用いて実験を行った．Fig. 8 にその実験結果を示す．Fig. 8 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) はそれぞれ入力形状 $h(t)$ ，モーメントセンサ出力 $\tau(t)$ ，ばねモデル，一次モデル，二次モデルでの推定形状，電子ダイヤルゲージ，レーザセンサにより検出された測定形状である．推定した対象物は Fig. 8 (a) の上部に記載されている．Fig. 8 (b) を見ると，弾性棒の固有振動が出力モーメント波形に重畳していることが分かる．Fig. 8 (c) ~ (f) を見比べると，対象物の水平部分の波形はほぼ同じであるが，対象物のエッジ部における推定形状が異なっている．つまり，推定過程に高次の固有振動数を考慮した伝達関数を用いるにつれて，シャープなエッジが再現できていることが分かる．また，これらを既存の変位センサと比べてみると，公称分解能 $2 [\mu\text{m}]$ の電子ダイヤルゲージとほぼ同じくらいの推定精度が得られていることが分かる．控えめに評価しても $5 [\mu\text{m}]$ 程度の分解能は十分実現できて

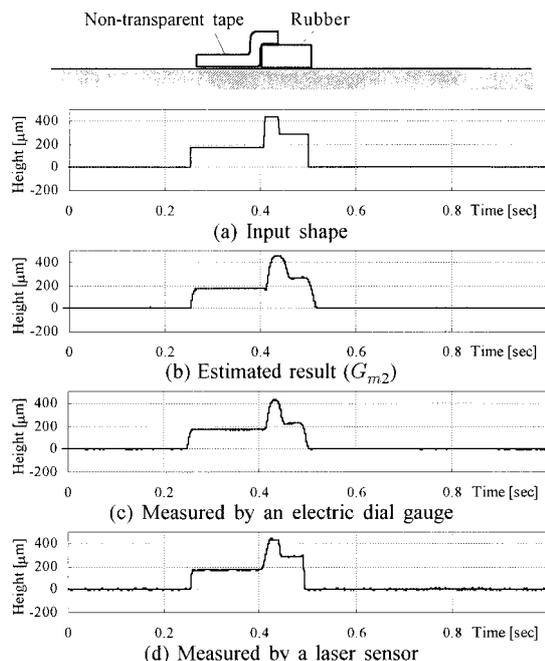


Fig. 9 An experimental result

いると思われる．また公称分解能 $1 [\mu\text{m}]$ のレーザセンサ出力を見た場合，半透明テープ部ではテープ表面で反射する光とテープ内部に入って反射した光とが混在することによって検出精度が著しく低下していることが分かる．ただしコピー用紙部では二次モデルでの推定結果とほぼ同レベルの結果が得られていることが分かる．

次に対象物を替え，不透明テープ，薄ゴムによる実験を行った．実験結果を Fig. 9 に示す．Fig. 9 (a), (b), (c), (d) はそれぞれ，入力形状 $h(t)$ ，二次モデルによる推定結果，電子ダイヤルゲージ，レーザセンサによる測定結果である．それぞれの対象物を Fig. 9 の上部に示されているように配置した．Fig. 9 (b) ~ (d) を比べると，不透明テープのところでは 3 センサとも同じ高さを示しているが，薄ゴムのところでは高さに相違が見られる．これは，薄ゴムが柔らかく接触型である本センサや電子ダイヤルゲージが測定の際に対象物を押し込むことで対象物を変形させてしまうことが考えられる．これに対し，レーザセンサは非接触の変位センサであるため，対象物を変形させることなく測定できている．このように柔らかい対象物を検出する場合，接触型センサでは対象物に対するセンサヘッドの押し付け力に応じて推定形状が変化してしまう可能性がある．以上の実験により，本センサは表面摩擦に関係なく既存の電子ダイヤルゲージとほぼ同等の性能を発揮できていることが分かる．

5. 応 用

本研究で提案している Tracing 型人工能動触角には二つの大きな特徴がある．一つはセンサ検出部が従来センサ（例えば電子ダイヤルゲージやレーザ式変位センサ）に比べて極めて細いという点である．これにより従来のセンサでは挿入できないような細部にまでセンサ検出部を入れて計測ができる．もう一点は，

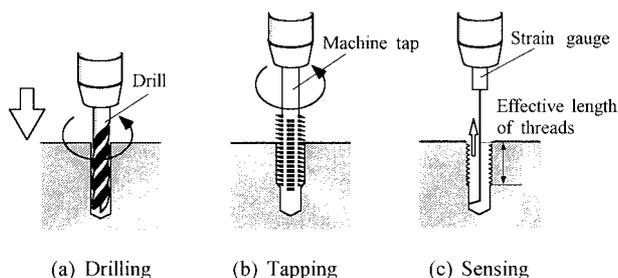


Fig. 10 Sensing of effective threads length after drilling and tapping

センサ検出部が柔らかいため機械部品を傷つけないで済む。これらの特徴を生かした応用環境がいくつか考えられる。ここでは、Tracing 型人工能動触角の特徴が最も生かせる応用例として、めねじ部の有効ねじ長検出を取り上げてみる。機械部品にめねじを切る過程は、Fig. 10 にあるようにまずドリルによる穴開け作業、次にタップによるねじ切り作業が行われる。貫通穴に対してねじ切りする場合には特に問題にならないが、Fig. 10 のように途中で止まっているような穴に対してねじ切りする場合、製品の一定品質を保持するため、実際に規定量のタッピングが行われたかどうかをチェックする必要がある。従来、ヒトが簡易スケールを持って手作業で計測するケースが多く、最も自動化が求められていた作業であった。筆者らは(株)ミツヨの協力によって、Fig. 11 (a) のような Tracing 型センサを設計した。このセンサは、細長い穴へ弾性棒を挿入してセンサ先端を穴表面に押し付けた状態で引き抜いていき、センサ先端がネジ部に到達して規定量変位したところで、ねじ有効長をセンシングするという単純な動作原理に基づいている。試作したセンサは、Fig. 11 (b) のようにひずみゲージを貼る位置をねじ表面部に合わせている。これにより、摩擦力はゲージ部にモーメントを生成せず、凹凸情報のみを描出することができる。Fig. 12 に実験結果を示す。Fig. 12 (a) は公称分解能 X 軸 $0.05 [\mu\text{m}]$ 、Z 軸 $0.05 [\mu\text{m}]$ を有する(株)ミツヨ製の二次元輪郭形状測定装置 (CV-624) を使った測定結果で、Fig. 12 (b) は Fig. 11 のシステムを使って測定した結果である。この実験結果を見ると、本装置でも有効長に対応するめねじ部の形状がほぼ $50 [\mu\text{m}]$ 程度の分解能で再現できていることが分かる。この場合、本来の分解能 ($5 [\mu\text{m}]$) が実現できていない理由は、弾性棒先端の厚さにより、先端部がめねじの最深部まで到達しないためである。有効ねじ長を調べる際には次のような操作を行う。はじめにセンサヘッドがねじの入り口端面に到達した時のスケールの値 a_1 を読み込む。次に、センサヘッドをねじ穴に入れて内面に押し付けながらセンサを引き出し、センサ変位が規定値以上変化したときのスケールの値 a_2 を読み込む。このとき有効ねじ長は $|a_1 - a_2|$ により算出することができる。今回の応用実験では、 $1 [\text{mm}]$ 高さ換算の押し付け力しか与えられていないため、ねじ入り口部では $-1 [\text{mm}]$ でセンサがねじ部から離れているものの、本実験の目的である有効ねじ長さの測定が、Fig. 12 (b) に示すように、一つ手前のねじ谷までは長さ方向に換算してほぼ $100 [\mu\text{m}]$ 程度の精度で実現できている。

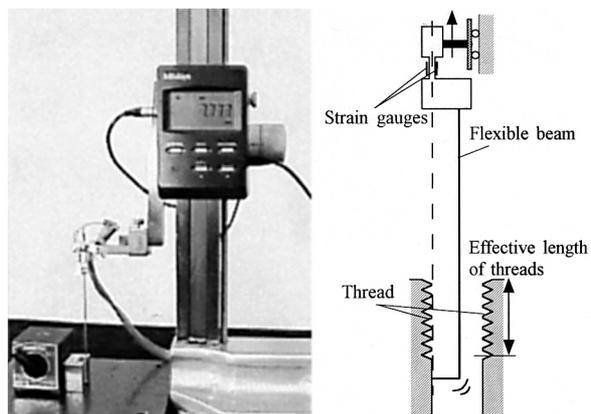


Fig. 11 An experimental setup and the ear-pick sensor

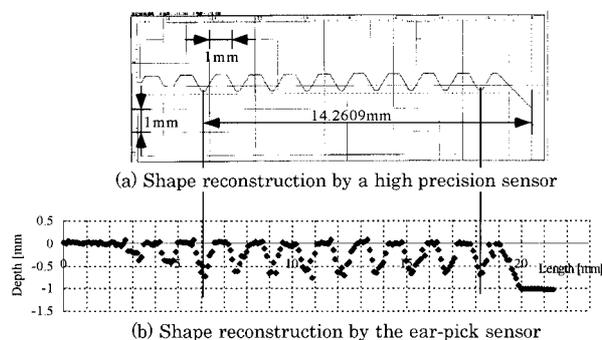


Fig. 12 Shape reconstruction by the two sensors

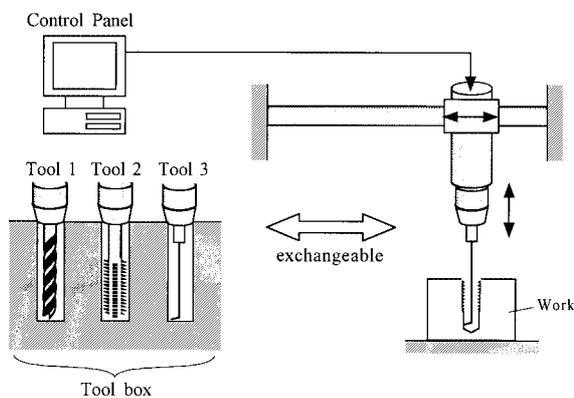


Fig. 13 Process machine with tool exchanger

この応用装置を例えば Fig. 13 のように NC 工作機械にねじ穴検査用ツールとして組み込み、穴開け → ねじ切り → センシングという一連の作業工程にすることで、従来の手作業での検査に比べて作業効率が飛躍的に向上すると考えられる。

6. 結 論

本研究では能動触角先端のなぞり動作を用いて微小段差を検出する方法を提案した。推定過程において 3 種類の解析モデルを構築し、それぞれの推定精度について考察を行った。また市販の変位センサとの比較実験より、本手法の有益性を検証し、応

用例としてめねじ部の有効ねじ長さの検出を試みた．以下に得られたことを要約する．

- (1) 力学的な考察の結果，弾性棒を直線でモデル化すると弾性棒先端で摩擦が働く場合においても根元で検出されるモーメントから弾性棒先端の変位 h を一意に求めることができる．
- (2) 弾性棒の固有振動数を考慮に入れた解析モデルで伝達関数 $G(s)$ の構築を行うと，考慮する固有振動数が高次になるにつれて推定形状のエッジ部分がシャープに再現できる．
- (3) 本センサは，公称 $2[\mu\text{m}]$ のセンサと同程度で，控えめに見積もったとしても $5[\mu\text{m}]$ 以上の推定分解能を有する．
- (4) 本センサは接触型センサであるため，柔らかい対象物を検出する場合，弾性棒先端で対象物を押し込むことで対象物を変形させてしまい，非接触型センサとは異なった形状を推定する可能性がある．
- (5) 本センサのセンサヘッドは従来の変位センサと比較しても $\phi 1[\text{mm}]$ 程度と細く，細部におけるセンシングが要求されるような場合に威力を発揮することができる．Tracing 型人工能動触角を応用した耳かきセンサの実験により，めねじ部の有効ねじ長が測定できることを示した．

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)ミツトヨの沢田氏，吉岡氏，高橋氏らの協力を得た．ここに感謝の意を表したい．

参 考 文 献

- [1] 金子，別所，原田，辻：“Tracing 型人工能動触角による $10\mu\text{m}$ 分解能の実現”，第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.579-580，1999.
- [2] S.S.M. Wang and P.M. Will: “Sensors for computer controlled mechanical assembly,” Ind. Robot, pp.9-18, Mar. 1978.
- [3] R.A. Russel: “Closing the sensor-computer-robot control loop,” Robot Age, pp.15-20, Apr. 1984.
- [4] S. Hirose et al.: “Titan III, A quadruped walking vehicle,” Proc. 2nd Int. Symp. Robot Res., Cambridge, MA, 1985.
- [5] R.A. Brooks: “A robot that walks; Emergent behaviors from a carefully evolved network,” Neural Computat., vol.1, pp.253-262, 1989.
- [6] E.N. Schiebel, H.R. Busby and K.J. Waldron: “Design of a mechanical proximity sensor,” Robotica, vol.4, pp.221-227, 1986.
- [7] N. Kaneko, N. Kanayama and T. Tsuji: “Active Antenna for contact sensing,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.14, no.2, pp.278-291, 1998.
- [8] N. Ueno and M. Kaneko: “Dynamic Active Antenna -A Principle of Dynamic Sensing,” Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1784-1790, 1994.



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生．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)



別所良治 (Yoshiharu Bessho)

1977年1月30日生．1999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(博士前期課程)情報工学専攻入学，現在に至る．人工能動触角に関する研究に従事．



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)