



入門講座

計測・制御技術入門 計測技術-4

触覚の計測技術

Tactile Sensing

村岡茂信

Shigenobu Muraoka

大阪工業大学 工学部機械工学科
助教授

1 はじめに

ヒトは感覚 (sense) により外界 (環境) を認識してこれに適応している。ヒトの感覚は視覚 (Visual sense)、聴覚 (Auditory sense)、触覚 (Tactile sense)、味覚 (Gustatory sense)、嗅覚 (Olfactory sense) のいわゆる五感に分類されることが多いが、専門的には特殊感覚 (Specific sensation) と体性感覚 (Somatic sensation) に分けられている。特殊感覚とは視覚に対する眼、聴覚に対する耳、味覚に対する舌、嗅覚に対する鼻のように対応する集中した感覚器 (Sense organ) が存在する感覚のことである。体性感覚は固有受容感覚 (Proprioceptive sensibility) と皮膚感覚 (Cutaneous sensation) に分けられていて、固有受容感覚は内部の筋とか腱に由来する姿勢や運動の感覚で、対象からの反発力や水中での抵抗力などを知覚する感覚である。皮膚感覚は対象表面の細かい形状パターンなどを認識する感覚で、接触覚、手触り覚、圧覚、温冷覚、痛覚などから成る。触覚は狭義では“皮膚感覚のうちの接触覚と圧覚”を意味し、広義では“体性感覚の全体”を意味する¹⁾。

視覚や聴覚はそれぞれの受容器 (Receptor) によって非接触で大局的に直接外界を検出する感覚であり、得られる情報量は多いが情報の確実性はそれほど高くないといわれている。これに対して触覚は対象を直接検出するのではなく、表皮が対象に接触したときの皮膚内部の位置、速度、加速度のパターンを捉え、それらの情報を総合して対象の細かいパターンを認識する自己検出感覚であり²⁾、得られる情報はそれほど多くないが確実性の高い情報を得ることができるとされている。また、視覚や聴覚が対象に関する情報を受動的に検出する感覚であるのに対して、触覚は対象に関する情報を能動的に検出する感覚である。すなわち、指や掌と対象表面との間に相対運動を生じさせて柔らかさのような対象の材質や“つるつる感”とか“ざらざら感”といった表面状態を認識し

ている。これは触運動と呼ばれ、対象の方が動く受動触と指先の方が動く能動触がある。触運動は対象表面の凹凸 (空間分布) を振動パターン (変位の時系列) に置き換えて知覚していて、触覚受容器 (Tactile receptor) の空間分解能 (ヒトの指腹部では2点弁別閾値が2 mm程度³⁾) を時間分解能 (数100Hz程度³⁾) で補っていると考えられる。このように触覚は運動機能と一体となった感覚である。

触覚センサは触覚機能の一部を工学的に実現したもので、対象との接触情報 (接触力の大きさやその方向、接触位置、対象の形状、柔らかさ、表面状態など) を取得するためのものである。視覚センサや聴覚センサはCCDカメラやマイクロフォンのように汎用性の高いものが既に多く市販されているが、触覚センサは未だ研究・開発途上で、適用される場面に合わせて設計・製作されているのが実状である。この触覚センサはロボットによる対象の最適把持や操り、外界認識、障害物回避など多くの目的で使用されている。腹腔鏡下外科手術 (体表に開けた直径10 mm程度の穴から術具を腹腔内部に挿入して行う低侵襲外科治療) では、術者は術具と臓器との接触情報 (臓器からの反力や臓器の硬さなど) を常に把握しながら施術する必要がある。このため、術者にこの接触情報をフィードバックするための触覚センサの研究^{4,5)}が行われている。また、オンラインショッピングにおいて消費者が商品の購入に先立ってその手触りを体感できるようになる日がくるかもしれない。このような医療、IT分野の他に、ヒトとの共生をめざす介護や癒し系のロボットにおいても触覚センサはますます重要な役割を担うことになるであろう。

本稿では、ヒトの触覚、触覚機能の一部を工学的に実現した触覚センサ、運動機能を付加した触覚センサを用いて外界を認識するアクティブセンシングについて述べ、触覚センサの中の滑り覚センサとアクティブセンシングの章で著者の研究事例を紹介する。

2 ヒトの触覚

触覚が体性感覚の全体であること、体性感覚は固有受容感覚と皮膚感覚に分けられていて、固有受容感覚が内部の筋や腱に由来する姿勢や運動の感覚であることについては既に記したので、ここでは皮膚感覚について述べる。

図1⁶⁾に皮膚の断面を示す。皮膚は表皮 (Epidermis)、真皮 (Dermis)、皮下組織 (Hypodermis) から成る感覚器で、真皮や皮下組織には触覚受容器が分布している。触覚受容器には低周波刺激にตอบสนองして受容野が狭い (SA I型) メルケル触盤 (Merkel's disc)、高周波刺激にตอบสนองして受容野が狭い (FA I型) マイスネル小体 (Meissner's corpuscle)、高周波刺激にตอบสนองして受容野が広い (FA II型) パチニ小体 (Pacini corpuscle)、低周波刺激にตอบสนองして受容野が広い (SA II型) ルフィニ終末 (Ruffini corpuscle) がある。メルケル触盤は表皮と真皮の境界付近に分布し、マイスネル小体は指紋直下に2列に並んで分布している。パチニ小体は皮下組織内や真皮深層に、ルフィニ終末は真皮のやや深部に分布している⁷⁾。メルケル触盤とルフィニ終末は0.4~100Hz程度の機械的刺激に対して時間一階微分と変位に反応し、前者は空間パターンや皮膚の曲率を検出し、後者は皮膚の引張りを検出するとされている。マイスネル小体は10~200Hz程度の機械的刺激に対して時間一階微分に反応し、表面の凹凸や速度などを検出するとされている。パチニ小体は70~1000Hz程度の刺激に対して時間二階微分に反応し、加速度や振動などを検出するとされている^{2,3,8)}。これらの触覚受容器の反応が神経繊維を経由して大脳皮質の体性感覚野 (Somesthetic area) に伝達され、ここで触覚受容器の反応が処理されることにより、ヒトは外界を認識するのである。

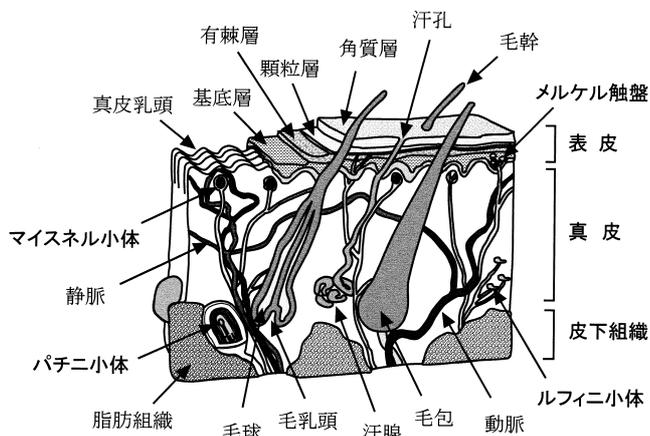


図1 皮膚の断面

3 触覚センサ

触覚センサの分類には入力側からみた分類と出力側からみた分類がある。前者は測定する感覚量 (入力) による分類で、接触覚センサ、力覚センサ、圧覚センサ、滑り覚センサ、硬さ覚センサ、温冷覚センサのようにヒトの感覚に基づく分類である。後者はセンサの信号形態 (出力) による分類で、センサの出力信号が機械的変位 (ばねの変形など)、抵抗値変化 (歪みゲージや感圧導電性ゴムなど)、静電容量の変化 (フレキシブルな誘電体を2枚の電極で挟んだコンデンサなど)、電荷量変化 (圧電素子など) のような分類である。ここでは感覚量による分類のうち、力学的な感覚である接触覚、圧覚、力覚、滑り覚の各センサについて例を挙げてその検出原理を示す。

3.1 接触覚センサ

接触覚センサは対象との接触状態 (接触の有無、接触位置、接触パターンなど) をオン・オフ情報として検出するものである。単純なものでは接触による電気的導通を利用したインターホンやリモコンのボタンなどのスイッチ類があり、接触の有無だけでなく接触位置も検出できるものとしてはPCのタッチパッドやタッチパネルなどがある。

タッチパッドは指との接触位置を検出してクリックやドラッグを行えるようにしたもので、一例を図2⁹⁾に示す。これは静電容量方式といわれるもので、多数の平行電極を設けた2枚の板で、それぞれの電極が直交するように絶縁体を挟み、電極の交点のひとつひとつにコンデンサの機能をもたせたものである。一方の板 (タッチパッド面) の電極と他方の板の電極間に電圧を加えておいて、タッチパッド面上に指が触れるとその部分の電荷量が増加するので、これを検出して接触位置を知るものである。

タッチパネルはディスプレイに接触位置の絶対座標を直接入力する入力デバイスで、一例を図3¹⁰⁾に示す。これは抵抗膜方式といわれるもので、(A)に示すように、表面に透明抵抗膜を有するフィルムと表面にドットスペーサを配した透明

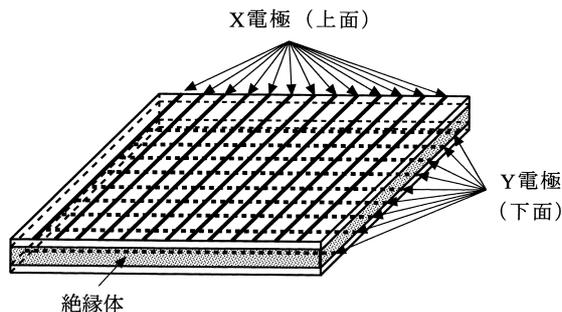


図2 タッチパッドの一例 (静電容量方式)

抵抗膜を有するガラス板を、(B)に示すように貼り合わせたものである。フィルム上の抵抗膜にX方向電界を、ガラス板上の抵抗膜にY方向電界を加えておき、フィルムを押しつけることにより上部と下部の抵抗膜を接触させ、この点のX-Y座標をX、Y方向電位から検出するものである。

3.2 圧覚センサ

圧覚センサは接触圧力の大きさ、圧力の中心位置、圧力分布パターンなどを検出するもので、1点の接触圧力を検出するものと接触圧力分布を検出するもの（分布型圧覚センサ）がある。このセンサは対象からロボットハンドなどに加わる圧力を検出するのに使用される。代表的な圧覚センサとしては感圧導電性ゴム（シリコンゴムに導電性粉末を混入したもので、圧力を加えるとその部分の導電性粉末の密度が高くなり電気抵抗が減少する）を用いる方法や容量変化を利用する方法¹¹⁾などがある。感圧導電性ゴムに加わる接触圧力がその抵抗値を変化させることを利用した分布型圧覚センサの一例¹²⁾を図4に示す。(a)は分布型圧覚センサの断面の一部を示したもので、カバーの上から接触力が加わると感圧導電性ゴムが圧縮されて電極間抵抗が減少する。(b)は1素子分

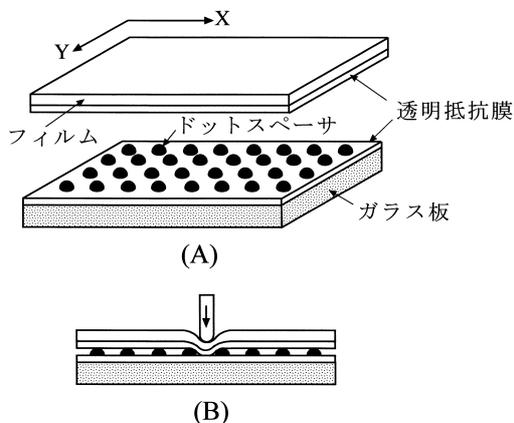


図3 タッチパネルの一例（抵抗膜方式）

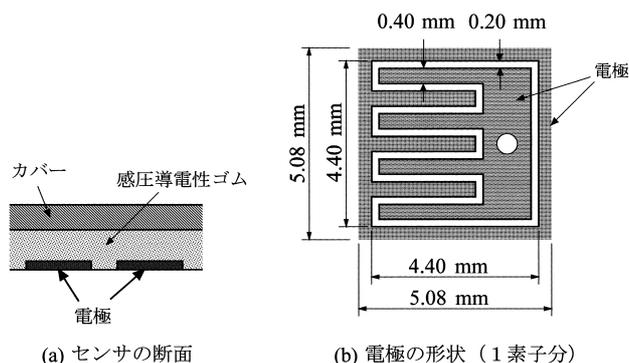


図4 分布形圧覚センサの一例

の電極形状で、感度は電極形状により調整できる。分布型圧覚センサとするため図4に示す素子を64×64個並べて325 mm×325 mmの範囲の接触圧力分布を測定できるようにしてある。

3.3 力覚センサ

圧覚センサが接触面での力学的関係を検出するのに対して、力覚センサは接触に伴う手先や指先全体の力学的関係すなわちハンドや指が対象から受ける力やトルクを検出するもので、6軸力覚センサが代表的である。図5はロボットの指に装着して指に加わる3軸方向の力と3軸まわりのモーメントを検出するセンサ¹³⁾で、周辺リング、中心部材、これらを連結する3つのビームから構成されている。図に示すZ軸方向が指の軸線方向になるように装着し、指の根本側を周辺リングと結合し、先端側を中心部材と結合して使用されている。指に加わる力やトルクがセンサの中心部材に作用すると中心部材を支えているビームに歪みが生じる。ビームは特定の力成分に対して歪みやすい構造をもつ起歪体と呼ばれる弾性体で、力成分が歪みに変換される部分である。この歪みが各ビームに2対ずつ貼付された合計6対の歪みゲージで測定され、指に加わっている力やトルクが検出される。

3.4 滑り覚センサ

対象を把持するとき、把持力が不足すると対象は滑って掌から離脱し、大きすぎると壊れてしまう。ヒトの場合は滑らないぎりぎりの力で対象を把持する（最小力把持）といわれていて、壊れやすい物体でも巧みに把持したり操ったりできる。ロボットも滑りを認識できればヒトと同様の器用な動作が可能になるので、滑り覚センサはロボットの把持や操りにとって重要なセンサである。

滑り覚センサとして、対象と接触しているボールやローラの回転から滑りを検出するもの、滑りに伴う接触力の重心移動を分布型圧覚センサにより検出するもの、スティックスリ

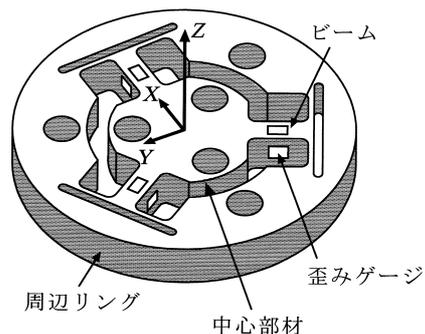


図5 6軸力覚センサの構造の一例

ップ振動を検出するものなど多くの方式¹⁴⁾が提案されている。ここでは水晶振動子式力センサによりスティックスリップ振動を検出する滑り覚センサを紹介する。

3.4.1 スティックスリップ振動

『2物体間の接触点が継続的に変化している状態』を“滑り”と呼び、『同じ点で接触が継続し(付着)接触面が接線方向に変形している状態』を“ずれ”と呼ぶ。図6 (A) に示すように、2つの物体IとIIが最初O点で接触している、物体Iが接線方向に移動すると接触点は同じ点で接触を継続(付着)したままO→b→aと移動し、その結果、接触面が接線方向に変形して復元力が増加する。付着点がa点に達したとき復元力と最大静摩擦力が釣り合うとすると、O点からa点までの状態が“ずれ”である。物体Iがさらに右方へ移動すると、物体の復元力が最大静摩擦力より大きくなり両物体間に滑りが発生し、摩擦力は静摩擦力から動摩擦力に変わる。今度は2物体の接触点が継続的に変化しながらb点まで戻り、ここで復元力と動摩擦力(最大静摩擦力より小さい)がつり合って両物体が再び付着する。このa点からb点までの状態が“滑り”である。さらに物体Iが接線方向に移動を続ければ、付着点がb→aと移動してずれを生じ、a点で滑りb点で付着する。以後これを繰り返す。このように付着と滑りを交互に繰り返す現象をスティックスリップ振動と呼ぶ。スティックスリップ振動に伴う両物体間の摩擦力の時間波形は(B)のようになる。

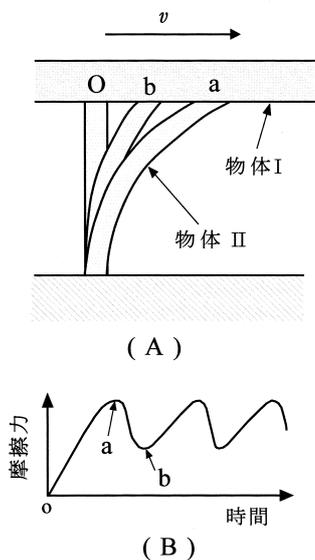


図6 スティックスリップ振動

すく、アンプ、フィルタ、A-D変換器などを要することが多い。これに対して、水晶振動子の発振周波数変化量が外力に比例することを利用した力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く信号処理が容易で高感度・高分解能・広帯域といった特長を有する。したがってこのセンサはアクチュエータと共存する場合などノイズの多い環境や広帯域を要するセンサとして有利である。ここでは、この水晶振動子式力センサを用いて滑りに伴うスティックスリップ振動による摩擦力変動を測定することにより、滑りとその方向を検出する方法¹⁵⁾を示す。図7は水晶振動子式力センサを用いた滑り覚センサで、2対の水晶振動子の主面が直交するように各水晶振動子の両端がフレームに接着されている。フレーム先端にはピアノ線を介して金属球が取付けられている。対象が球上のP点で接触力NのもとX-Y面内で滑ると、摩擦力Fが4個の水晶振動子に伝搬されそれぞれの発振周波数が変化する。ここでは環境ノイズ(同相ノイズ)を除去するため、水晶振動子を対にしてその差周波数を出力とする差動構造¹⁶⁾にしてある。摩擦力のX方向成分 F_x により水晶振動子 $Q_{T(1)}$ はZ方向に引っ張られてその周波数が減少し $Q_{C(1)}$ は圧縮されて増加する。また、Y方向成分 F_y により $Q_{T(2)}$ はZ方向に引っ張られてその周波数が減少し $Q_{C(2)}$ は圧縮されて周波数が増加する。下方の水晶振動子 $Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$ は F_x に対して感度を有するが F_y には応答せず、上方の水晶振動子 $Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$ は F_y に対して感度を有するが F_x には応答しない。摩擦力Fによる水晶振動子対 $Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$ の差周波数変化量を Out_1 、 $Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$ の差周波数変化量を Out_2 とし、 A_1 、 A_2

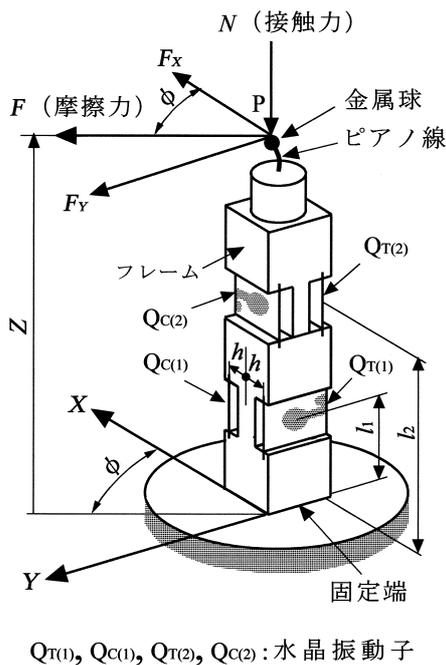


図7 水晶振動子式滑り覚センサ

を各対の2個の水晶振動子の和周波数、 Z をセンサ固定端から接触点Pまでの距離、 l_1 、 l_2 をセンサ固定端からそれぞれの水晶振動子対までの距離、 γ を定数とすると、摩擦力の2方向成分 F_x 、 F_y 、摩擦力の大きさ F およびその方向 ϕ は材料力学的計算により次のように表せる。

$$F_x = F \cos \phi = \frac{Out_1}{A_{1\gamma}(Z-l_1)} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_y = F \sin \phi = \frac{Out_2}{A_{2\gamma}(Z-l_2)} \dots\dots\dots (2)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = \arctan \frac{F_y}{F_x} \dots\dots\dots (4)$$

3.4.3 滑りの測定結果¹⁵⁾

図8は前項で示した滑り覚センサによるスティックスリップ振動の検出例で、4種類の対象を接触力が1.47N、滑り速度が10、20、30 mm/sの下で滑らせたときの摩擦力の時間波形を示している。図9は摩擦力の2方向成分 F_x と F_y から検出した滑り方向 ϕ の値と対象を引っ張った方向の関係を示したもので、滑り方向が $\pm 2^\circ$ 程度の精度で測定できる。

4 アクティブセンシング

ヒトが対象の硬さや表面状態などを検出するとき、指や掌を単に対象に触れるだけでなく、押しつけたり接触を保ちながら表面に沿って動かしたりする動作を行っている。また、対象を撫で回すことによりその全体像を認識している。触覚センサにも運動機能を付加すれば対象の性状や全体像を認識

することが可能になる。触覚センシングの分野でのアクティブセンシングとは運動機能を付加した触覚センサにより接触情報を取得することを意味する。一例として、感圧センサ付の触子で乳房を押しつけ、押しつける力と位置を変化させることにより腫瘍の深さや大きさなどを検出する乳ガン診断法¹⁷⁾や、線状の触子で対象に触れて触子の根本付近に装着された角度センサとトルクセンサの出力から接触位置を検出する外界認識法¹⁸⁾などがある。ここでは、接触位置と接触力を独立に測定できる水晶振動子式力センサを触子の根本付近に装着した能動触角¹⁹⁾とこれを用いた外界形状の認識結果²⁰⁾を示す。

能動触角は、昆虫の触角にヒントを得たもので、ここで示すものは触子と力センサおよびその駆動装置から構成されている。これは空間内を動き回る触子と外界との接触情報を力センサにより取得して外界を認識するものである。能動触角は運動機能を有するためアクチュエータなどのノイズ源を有すること、動的な力測定を必要とすることから、能動触角用センサには耐ノイズ性や高帯域が要求される。これらのことからここでも水晶振動子式力センサを使用している。図10は触角部の概略で、フレームに装着した4対の水晶振動子とフレーム先端に取り付けた触子からなり、触子が外界と接触したときの接触力の2方向成分 F_y 、 F_z と接触位置 X を独立に検出できるようになっている。 $Out_1 \sim Out_4$ を接触力が加わったことによる各振動子対の差周波数変化量、 $k_1 \sim k_{10}$ を定数とすると、8個の振動子の周波数がほぼ等しく(約10 MHz)、各振動子対が等間隔で装着されているので、 F_y 、 F_z 、 X および接触力 F とその方向 ϕ は材料力学的計算からつぎのようになる。

$$F_y = k_1(Out_{(1)} - Out_{(3)}) \dots\dots\dots (5)$$

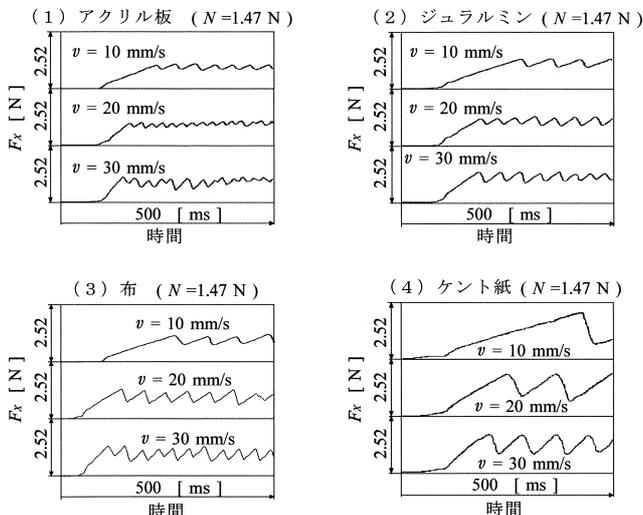


図8 滑りに伴うスティックスリップ振動による摩擦力の時間波形

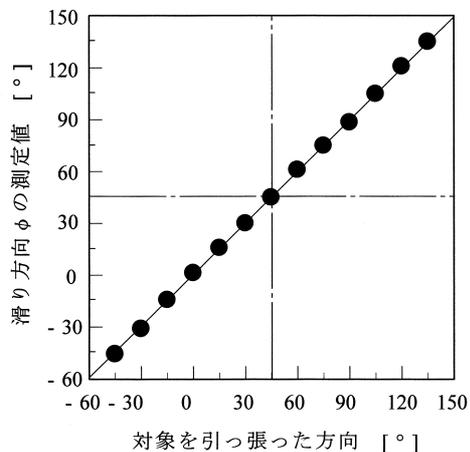


図9 滑り方向の検出例

$$= k_2 \left\{ \frac{Out_{(3)}(Out_{(2)} - Out_{(4)})}{Out_{(2)} + Out_{(4)}} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$= k_3 \left\{ \frac{Out_{(1)}(Out_{(4)} - Out_{(2)})}{Out_{(4)} - 3Out_{(2)}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$F_z = k_4 (Out_{(2)} - Out_{(4)}) \dots\dots\dots (8)$$

$$= k_5 \left\{ \frac{Out_{(2)}(Out_{(1)} - Out_{(3)})}{Out_{(1)} + Out_{(3)}} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$= k_6 \left\{ \frac{Out_{(4)}(Out_{(1)} - Out_{(3)})}{3Out_{(3)} - Out_{(1)}} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$X = k_7 + k_8 \left\{ \frac{Out_{(1)}}{Out_{(1)} - Out_{(3)}} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$= k_9 + k_{10} \left\{ \frac{Out_{(2)}}{Out_{(2)} - Out_{(4)}} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$F = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \dots\dots\dots (13)$$

$$\phi = \arctan \frac{F_z}{F_y} \dots\dots\dots (14)$$

この触角の特長は接触力と触子に沿った接触位置を独立に測定できることにある。また、 F_y と F_z がそれぞれ3通りの方法で、 X が2通りの方法で求められるため、これらの値の相互比較により水晶振動子の異常検出も可能となる。図11は能動触角で、右側に写真を左側にその説明図を示す。このシステムには図10に示した触角が外界探索用の台車に搭載されていて、この触角は上下方向の並進運動と一端を回転中心とした水平面内での往復回転運動ができるようになっている。台車の床面内での移動と触角の並進および往復回転運動

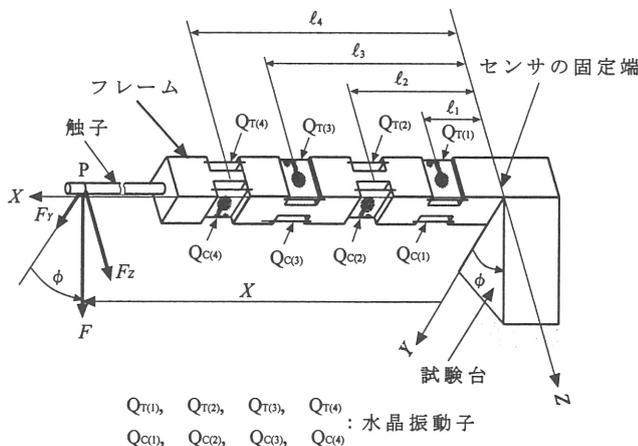


図10 水晶振動子式力センサを装着した触角の概略図

の結果、触子が外界と接触し、このときの接触力の2方向成分 F_y 、 F_z と触子に沿った接触点の座標 X が水晶振動子式力センサにより検出される。外界との接触点座標はこの X とエンコーダで測定した触子の上下方向位置と回転角および台車の床面内での位置から決定される。台車を床面内で移動させて同様の認識動作を繰り返し、得られた一連の接触点座標を連ねることにより外界の3次元形状が得られる。なお、 F_y と F_z の測定値は接触力を制御するために使用している。図12は上下を逆さにした植木鉢の側面を認識した結果で、(A)は認識対象の写真、(B)は測定値を立体的に描いた図、(C)、(D)は対象側面の測定値を(A)に示した(C)と(D)の方向に垂直な面に投影して描いた図である。各図の×、●、▲、◆は測定結果を、実線は実際の形状を示している。

今回は離散的な接触点の検出例を示したが、対象をなぞることにより形状認識の効率化を図ったり、触子の対象への押し込み量とそのときの接触力を検出して柔らかさのような機械インピーダンス²¹⁾を測定したりすることも可能である。

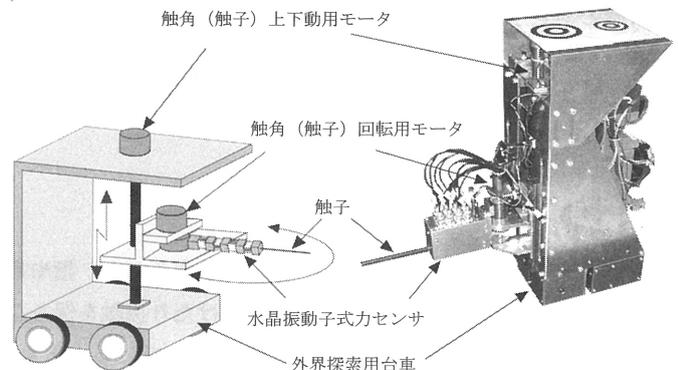


図11 能動触角の概略図

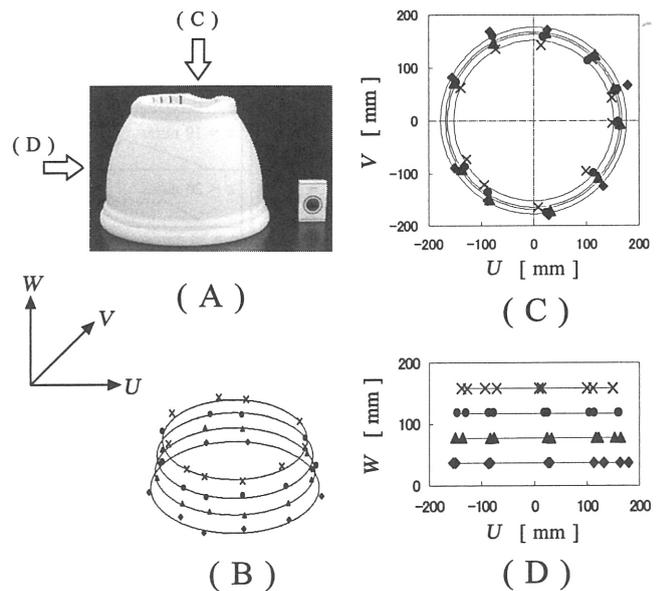


図12 植木鉢の認識結果

5 おわりに

ヒトの触覚、触覚機能の一部を工学的に実現した触覚センサ、アクティブセンシングについて記した。このほか、ロボットの全身を覆う圧覚や滑り覚を有する柔軟皮膚（触覚センサスーツ）の研究がある。これは現在注目を集めているヒトとの共生を目指す介護ロボットや癒し系ロボットなどがヒトと接触するとき、ヒトに危害を加えることのないよう、またヒトとの接触に反応できるようにするためのものである。これらについては、例えば文献²²⁻²⁴⁾などを参照して頂きたい。

参考文献

- 1) 舘暲：バーチャルリアリティにおける触覚の役割，電学論E，122 (2002) 10，461.
- 2) 前野隆司：ヒトの触覚受容機構—力学・アナロジー・錯覚という視点から—，電学論E，122 (2002) 10，469.
- 3) 下条誠：触覚のセンシングとディスプレイ，電学論E，122 (2002) 10，465.
- 4) 山内康司，持丸正明，山下樹里，橋本亮一，森川治，福井幸男，宇野廣，横山和則：内視鏡下手術トレーニングシステム（第3報）6軸力センサを用いた手術操作力の計測，第10回日本コンピュータ外科学会大会論文集，(2001)，71.
- 5) 生田幸士，福山純也，中西彰，堀田耕志：ポータブル力覚付バーチャル内視鏡システムの研究（第8報）挿入手技の記録再現システムと手技の定量評価法の開発，日本ロボット学会第21回学術講演会予稿集（CD-ROM），1H27 (2003)
- 6) 岩坂彰，小森厚一 訳：人体，(株)同朋出版，(1993)，31.
- 7) 前野隆司：ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能，日本ロボット学会誌，18 (2000) 6，772.
- 8) 川村拓也，谷和男，大岡昌博，宮岡徹，三谷保永：ヒトの表面粗さ弁別機構の解明と微小段差提示装置の開発，日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予行CD，1E31 (2002)
- 9) <http://review.ascii24.com/db/review/pc/a4note/2002/09/14/638629-001.html>：ノート PC 裏技術情報 前編IBM ThinkPad，ASCII 24 Review
- 10) <http://www.technoveins.co.jp/technical/explain/touchpanel.htm>：タッチパネルの概要，富士通コンポネント製品カタログ，30.
- 11) M. Hakozaki, K. Matsumoto and H. Shinoda : A Sensitive Skin with Conductive Communication Layers, Proc. Of the 19th Sensor symposium, (2002), 437.
- 12) 石川正俊，下条誠：ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理，計測自動制御学会論文集，24 (1988) 7，662.
- 13) 永田和之，津村稔，小俣透：指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価，日本ロボット学会誌，14 (1996) 8，1221.
- 14) 山田陽滋：把持までのセンシング戦略 その2：滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得，日本ロボット学会誌，11 (1993) 7，959.
- 15) 村岡茂信：水晶振動子による滑りとその方向のセンシング，SICE論文集，36 (2000) 8，639.
- 16) 村岡茂信：差動法を用いた水晶振動子による力センサ，SICE論文集，33 (1997) 12，1117.
- 17) 尾股定夫：硬さ測定用触覚センサ，電学論E，117 (1997) 7，335.
- 18) 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，13 (1995) 1，149.
- 19) 村岡茂信：4対の水晶振動子を用いた接触力・接触位置センサとこれによる外界センシング，電気学会論文誌E，120-3，(2000)，99.
- 20) 村岡茂信，貴田恭旭，岡田吉広，野田宗宏：水晶振動子式力センサを用いた能動触角とこれによる外界センシング，電気学会論文誌E，123-11，(2003)，493.
- 21) 江村暁，舘暲：形状とインピーダンスの同時測定法，日本ロボット学会誌，15 (1997) 7，997.
- 22) 稲葉雅幸，星野由紀子，井上博允：導電性ファブリックを用いた全身被覆型触覚センサスーツ，日本ロボット学会誌，16 (1998) 1，80.
- 23) M. Hakozaki, K. Matsumoto and H. Shinoda : A Sensitive Skin with Conductive Communication Layers, Proc. of the 19th sensor symposium, (2002), 437.
- 24) 下条誠，金森克彦，明愛国，金森哉史，石川正俊：液状感圧ゴムを用いた自由曲面型触覚センサの開発，日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会1G24 (2002)

(2003年11月4日受付)