

卒業論文要旨

人指型触覚センサの開発（指荷重測定基礎）

システム工学群

医工先進検査システム研究室 1190104 豊吉 恒介

1. 諸言

人の触覚を代用する種々の触覚センサの開発が盛んに行われている。例えば、感圧導電ゴムの利用、電極間の容量変化の検知、音響共鳴触覚素子、透明なゴム製半球でのレーザー光の反射を利用するもの、そして、位相シフト式発振回路を用いた PZT 触覚センサ等多くのセンサが挙げられる。

本研究では、これまでに超音波センサを用いて測定される、モデル指の爪床や指腹部からの反射エコー h （図 1 参照）による、指荷重（爪床： h_1 ）や、相手面の表面性状の違い（指腹： h_2 ）を検討してきた。そして、指腹からの反射エコー h_2 の観測から、例えば図 2 に示すような規則粗さ面の表面性状の把握（エコー比 H の変動）が可能になったが、指の接触による爪床エコー高さ h_1 の違いは、図 1 右側に示すようにわずかであり、指荷重測定の精度の向上が課題であった。

ここでは、この指荷重測定の精度を高めるために、モデル指内の爪床と指腹の間に、指荷重検知用の音波の反射源を設けた構造を提案し、指上部に設置した 1 個の超音波センサだけで、指荷重、負荷の方向、そして図 2 のような表面性状の全てを検出可能な人指型触覚センサの可能性を検討する。

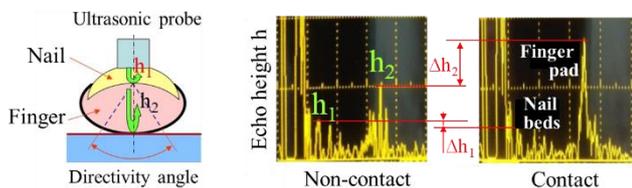


Fig.1 Characteristics (limit) of conventional human finger model

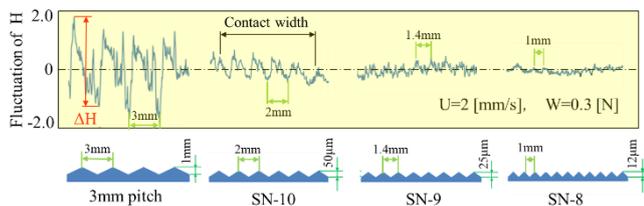


Fig.2 Measurement example of surface texture

2. 人指型触覚センサの基本構造（原理）

本人指型触覚センサの概念を図 3 に示す。指上部に設置された超音波探触子から入射された超音波は、スライム中を伝搬して指腹部に到達した後、反射して探触子に戻り、反射エコー（右図 h_1 ）を形成する。指腹部が相手面と接触すると、平坦な接触部からの反射強度が増すため、エコーは波形②の h_2 のように高くなる。この時の反射波は、探触子と指腹の距離が短くなる（図中では S に相当）ため、トリップタイムの変化 Δt が観測される。この Δt と指荷重の関係を予め求めておけば、指荷重の推定が可能になる。また、接触した状態で指を滑らすことにより、指腹の局所変形に応じて③や④のよ

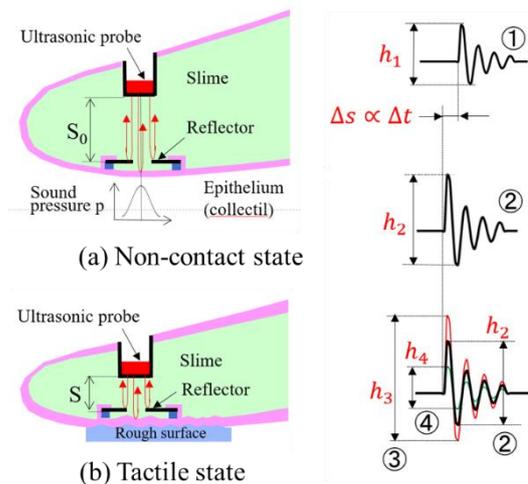


Fig.3 Basic structure of proposed model finger

うにエコーの高さが変化し、表面形状の把握が可能になる。

以上が本センサの原理であるが、 Δt には、指腹の局所変形の影響が含まれるため、正しい指荷重の測定には向かない。さて、モデル指中の反射板には超音波の音軸上に穴が開いており、上記の説明はその穴を通過した超音波を対象としている。一方、超音波は反射板表面でも反射し、エコーを形成する。このエコーは指腹のマクロな変形、したがって指荷重により決まると考えてよい。ただし、指荷重作用時には、反射板は超音波音軸に垂直な面を保ったまま上下に平行移動するとは限らず、傾斜した状態で上下すると考えなければならない。この傾き、すなわち負荷の方向を見定めたうえで、指荷重を推定する必要がある。そして、負荷方向の推定自体もまた、指センサにとって重要な課題となる。

ここでは、これらのことを可能にするための基礎実験として、反射板の穴の両脇に超音波反射用のピン（計 2 本）を設け、そこからの反射波のエコー高さ変化や、トリップタイムの変化 Δt （したがってピンの移動距離 ΔS ）の観測を行った。

3. 指荷重測定に向けた基礎的実験

超音波探触子（5MHz、振動子径 10mm）から入射された超音波は、媒体中（実験では水を使用）を拡散しながら伝搬する。反射源からのエコー高さは、超音波の音圧分布中の反射源の位置や角度の影響を受けるため、まずは、音圧分布の確認が必要になる。図 4 左に示すように、1 本の直径 1.5mm、高 5mm、の針状コロ（平坦な端面）を垂直（音軸に平行）設置したゴム板を、探触子音軸の左右に移動させた時の 2 次元エコー高さ分布を測定した。

その時の反射波の例を同図左下に示してある。探触子の取付板（アクリル製）内での多重反射波が減衰した後に、ピン端面からの反射波が現れる。この反射エコー高さ h を、音軸

からの距離 L や探触子取付板からの距離 S を変えて測定した結果が右図である。いずれの距離 S でも、音圧分布はガウス分布的ではあるが、 S が長いほど中心音圧は下がり、裾野は広がる傾向を示す。ただ、モデル指での S は 10mm 以内であり、この範囲では S の影響は無いとしてよいことが分かる。

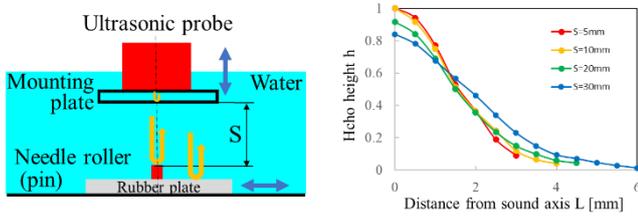


Fig.4 Measurement of sound pressure distribution

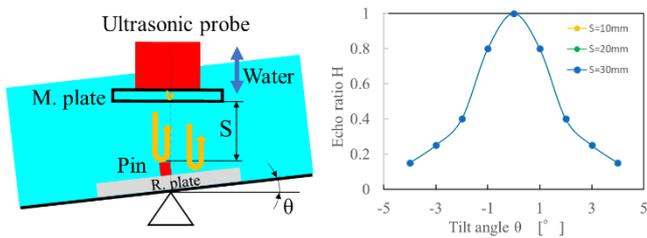


Fig.5 Effect of tilt angle θ of pin on echo ratio H

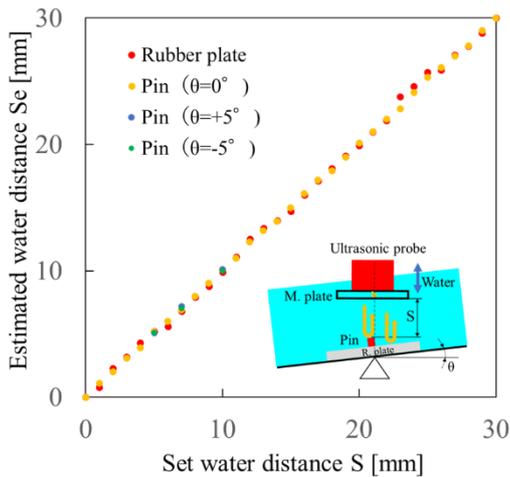


Fig.6 Effect of tilt angle θ on estimated water distance

図5には、図4と同じ試験片を角度 θ で傾けた際のエコー比 H (各 S における $\theta=0^\circ$ でのエコー高さ h_0 で規格化) の変化を示してある。傾斜に伴いピン先端が図4の低音圧側に移動すると共に、平坦なピン先端面が傾いて音波の反射方向が探触子中心方向から外れるため、エコー比 H は、 θ の増大と共に低下する。

一方図6には、探触子取付板裏面からの第一反射波とピン端面からの反射波までの時間差に音速(水: 1500m/s)をかけて求めた推定水距離 Se と、実際の設定距離 S の関係を示してある。ピンを垂直に立てたまま設定水距離 S を変更した場合の推定水距離 Se は、ゴム板(ピン端面に平行)をターゲットとした場合を含め、よく一致している。ピンを傾けた場合には、反射面が多少水距離を長くする方向に移動するため、推定水距離 Se はその影響を受けると予測されたが、この角度範囲での影響は認められず、推定水距離 Se での荷重測定が可能であることが分かる。

ところで、図3に示したように本センサでは、触覚情報の把握のために指腹部からの反射波の観測が必要であり、板中央に音波が通過する穴を設ける必要がある。ここでは、穴の両脇に長さの異なる計2本の反射源用ピン(高さ: 8.5mmと7.5mm, 設置間隔は10mm)を配置した構造(図7左)を考えており、これによる傾き(したがって荷荷の方向)の検知について検討した結果を図7右に示す。なお図では、ピンの傾きによりエコー比が $H=1.0$ を超えることがあるので、 $\theta=0^\circ$ でのエコー比をこれまでの半分の $H=0.5$ とし、各ピンの傾斜の時最大エコー比が1となるよう規格化したエコー比 H_n での挙動を示した。

2本のピン共に、ピン端面が音軸に近づき、かつピン端面からの反射波が探触子中心に向かう角度で、 H_n は最大値を示すようになる。また、図から明らかのように、左右のピンでの H の挙動は対照的であるため、1本ピンの図5とは異なり、傾きの方向(どちらに傾いたか)の判定が可能となる。

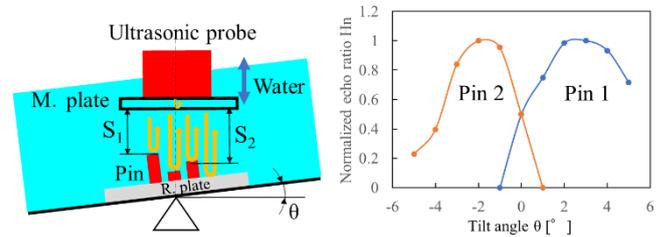


Fig.7 Judgment of tilt direction with 2 pins

最後に、2本のピン(間隔10mm)が配置される板(厚さ1mm)中央(音軸上)に設けられた穴(直径5mm)からの、指腹部反射波の観測の可能性について検討した。図中左の穴板より下にある、ピン3の端面からのエコー比 H に対する傾き角 θ の影響を図8右に示す。図には、穴板が無い場合の H の挙動(図5と同じ)も併せて示してあるが、両者はほぼ一致しており、穴を通しての観測であっても、指腹部での触覚情報の把握が可能であると判断できる。

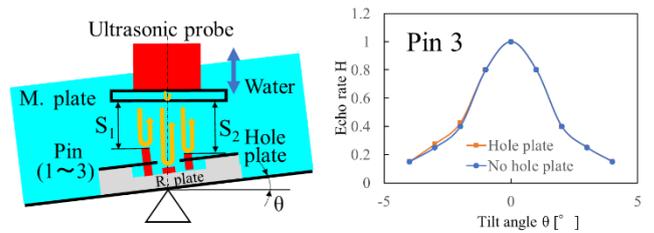


Fig.8 Tilt measurement by ultrasonic waves passing through hole

4. 結言

以上、指上部に取り付けた1個の探触子による指荷重測定の可能性について検討した結果、

- 1) 指腹に傾斜した荷重が作用した場合(ピンが傾いた場合)でも、音波が伝搬する推定水距離 Se の推定値から、指荷重の測定ができる可能性がある。
- 2) 音軸上に音波が通過する穴を設ける事で、指部反射波を観測できる可能性を確認した。

参考文献

- 1) 竹内彰敏, 超音波生体指センサによる指荷重と表面粗さ評価の試み, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 857, 2018, pp. 1-13.