

高密度フレキシブル圧力分布イメージャ*

下条 誠^{*1}, 石川 正俊^{*2}, 金谷 喜久雄^{*3}A Flexible High Resolution Tactile Imager
with Video Signal Output

Makoto SHIMOJO, Masatoshi ISHIKAWA and Kikuo KANAYA

A high resolution and sheetlike form imaging tactile sensor with video signal output has been developed. The sensor has a 64×64 array of sensing elements on a flexible PC board with 1mm spatial resolution. Since the sensor outputs pressure distribution as a video signal, real time tactile image can be observed by using TV monitor. Moreover the same hardware and software of a vision system can be used for measured data handlings, tactile image processing and recording are very simple. As the sensor is made up of a sheet of pressure conductive rubber and stripe electrodes, there are undesirable current passes between sensing elements. Thus these undesirable current passes must be cut within a short scanning period (500 ns for each element). We used a ground potential method and proved it useful under such a high speed scanning condition. The properties of pressure conductive rubber, including hysteresis and creep effects, are presented. A spatial filtering effect of an elastic cover for a tactile sensor is also analyzed. And it is proved this effect is very important. The final section shows measured data and image processing examples.

Key Words: Tactile Sensor, Pressure Distribution, Video Signal, Robotics, Human Engineering, Spatial Filtering

1. 緒 言

人間の触覚に相当するような圧力分布センサは、ロボットの触覚センサとして、また生体計測分野における体圧分布計測用センサとして、その実現が望まれている。しかし、この圧力分布センサについては主にロボットの触覚センサ^{(1)~(3)}として数多くの研究開発が行われているが、いずれも十分な性能を持つとはいえない。その理由としての理想的な圧力分布センサの条件として次の点が挙げられる。まずセンサの形状は、薄く柔軟なシート状で指・腕などの曲面に取付けられしかも高密度に感圧素子が配置されており、かつ軽量であることが必要である。また、センサの情報処理機能として多数の検出点からの情報をスマートに処理できることが望ましい。

例えばこれまでに開発されたセンサとして Hillis⁽⁴⁾は、検出素子 256 個 (16×16) を 1 cm^2 の面積に納めた触覚センサを試作している。これは異方性の導電ゴムを用いた方法で、高分解能のセンサが実現できるが、

構造上検出面は小さく、また柔軟性も期待できない。また高密度高分解能の圧力センサとしては、杉山ら⁽⁵⁾が検出素子 1 024 個 (32×32) を 1 cm^2 のチップ上に集積化したものがある。集積化技術を用いることで小形・軽量化をはかれる利点がある。また Raibert ら⁽⁶⁾は、検出部の高密度化とスマートな情報処理を意図して集積化技術を用いて 18 個 (6×3) の検出部と情報処理部を 1 mm^2 のチップ上に一体化した触覚センサを試作した。しかし、これらの方式ではシリコンチップ上にセンサを形成しているためセンサに柔軟性がないこと、耐環境性などの点で問題がある。このほか、圧力・光変換を利用する方法もある。谷江ら⁽⁷⁾は、光導波板と白色弾性体を用い、圧力による弾性体と導波板の接触面積の変化を CCD カメラ等で観測し⁽⁸⁾、圧力分布を検出する圧力分布センサを試作した。また下条・石川⁽⁹⁾は、液晶と感圧導電性ゴムを組合せた薄くて柔軟性のあるセンサを開発した。しかし、これらの方法は計測面の裏になんらかの光学系を配置する必要があり、センサが厚くなる欠点がある。センサ情報処理にビデオ信号出力を採用した例として石川・下条⁽¹⁰⁾は、感圧導電性ゴムを用いて 4 096 点 (64×64) の感圧点を有する高密度形の圧力分布センサを開発した。多数の検出点からの信号処理に対してセンサ出力をビデオ信

* 平成 2 年 1 月 30 日 第 2 回ロボットセンサシンポジウムにおいて講演。原稿受付 平成 2 年 8 月 15 日。

^{*1} 正員、工業技術院製品科学研究所 (〒305 つくば市東 1-1-4)。

^{*2} 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

^{*3} 横浜ゴム(株) (〒254 平塚市追分 2-1)。

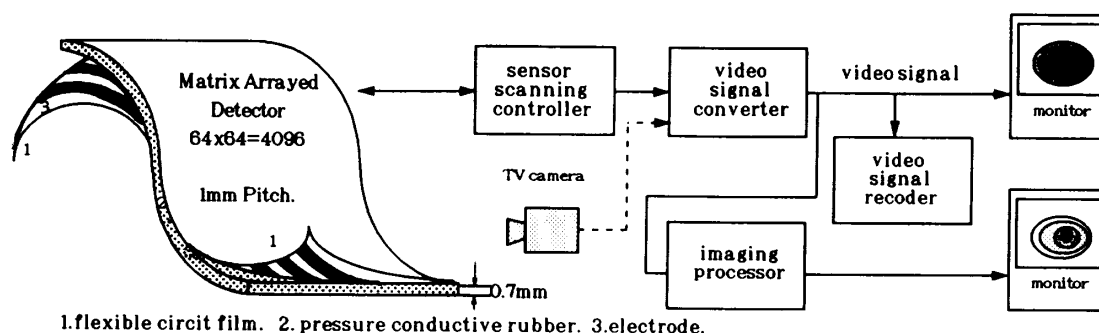


図1 圧力分布イメージングシステム構成図

号とする手法を提案し、測定データの処理に対して有用であることを実証した。しかし、検出点間の電気的な相互干渉があるため、各検出点すべてから独立に配線を引き出し電気的に独立させ走査する方式を採用した。このため、検出点を5mm角より小さくすることが困難であり、また多数の配線を必要とするため、開発機では厚さが100mm程度となり薄いシート状にすること、柔軟性を持たせることなどは不可能であった。

本論文で報告するセンサは、新たな走査回路によって以上の欠点を克服し、より理想的な圧力分布センサを実現したものである。センサは圧力検出素子が高密度に配置された薄いシート状で柔軟性があり、しかもセンサからの出力はビデオ信号としている。本センサの具体的特徴は、(1)感圧部が0.7mmの薄いシート状で柔軟性がある、(2)圧力検出素子を4096個、1mmピッチでマトリックス状(64×64)に高密度で配置してある、(3)画像情報処理用のハードウェアおよびソフトウェアが利用でき画像センサと圧力分布センサが信号レベルで統一的に処理可能となる、(4)圧力分布状態が実時間でテレビモニタで観測できる、などが上げられる。

本論文では、まずシステム構成、センサの構造および感圧素材の特性について説明する。次にセンサ検出部を保護するために用いる弾性体カバーが、空間分解能に及ぼす影響を解析した結果を示す。従来、この弾性体カバーの影響についてはほとんど議論されていない。しかし、その空間分解能に与える影響は大きく、圧力分布センサを設計する上で重要な因子であることが今回の解析結果から明らかになった。そして最後に測定の実験例とその情報処理例を示す。

2. センサの構成

2.1 システム構成 図1にシステム構成を示す。システムの構成要素としては、フレキシブル基板を用

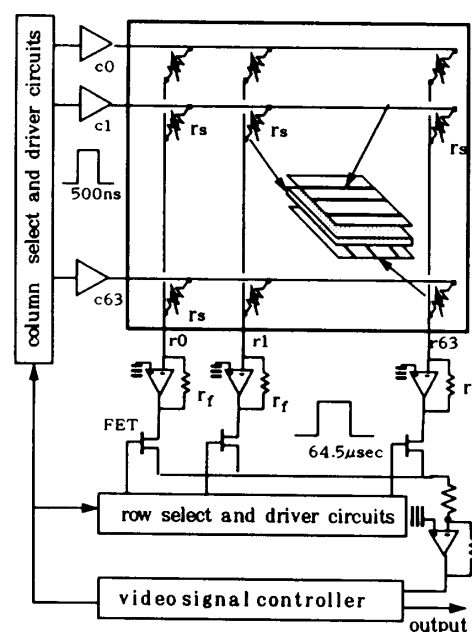


図2 センサの構造と零電位法を用いた走査回路

いた圧力検出部、検出素子間の非干渉化と高速走査を行う走査部、検出値をビデオ信号に変換する画像制御部、そして圧力分布状態を表示するビデオモニタから構成される。このほか、画像処理装置と組合せることで圧力分布データのエッジ処理、等圧線処理等さまざまな処理が簡単に実現できる。本実験では画像処理装置としてパーソナルコンピュータに画像処理基板を取付けたものを用いた。また本システムは、TVカメラからの画像信号を圧力分布画像にスーパーインポーズすることも可能で、TVカメラで映した動作とその時の圧力分布の状態が同時に観察・記録することができる。

2.2 圧力検出方式 図2にセンサの構造を示す。圧力検出部分は縦と横に直交するストライプ電極で感圧導電性ゴムをはさんだごく普通のサンドイッチ構造である。ストライプ電極はフレキシブル基板上に1mmピッチで64本の電極を印刷したもので、縦横のストライプ電極が組合せることで4096個のセンシ

グエレメントがマトリックス状に形成できる。ストライプ電極は印刷技術を用いて形成できるため、そのピッチおよび形状等はかなり自由に選べる利点がある。圧力の検出方法としては、圧力が加わると感圧導電性ゴムの抵抗が下がり、この抵抗値変化を縦と横のストライプ電極を順次走査することで全体の抵抗値分布を検出する。しかし、このような検出方式では図3に示すように目的とする測定点以外からの電流のパスが存在し正確な測定ができない。この不要な電流パスをいかに取り除くかが問題となる。特に本センサでは、出力をビデオ信号としたため高速な走査が必要となり、各圧力検出素子当たり 500 ns 程度の時間で不要な電流パスの排除を行う必要がある。本センサではこれを回路的に排除する方式を用いてこの問題を解決した。

2.3 走査方式

2.3.1 従来の方式 このような回り込みを防ぐ方法として、(1)石川・下条⁽¹⁰⁾は、各測定点を完全に独立させこの電流パスを防ぎ、かつセンサ出力をビデオ信号とした圧力分布センサを製作した。しかし、この方法では各測定点ごとにFFTスイッチングを行うため、測定部の薄形化、柔軟性の実現は困難であった。(2)Snyderら⁽¹¹⁾、金谷・石川⁽¹²⁾は測定点すべてにダイオード入れこの電流の回り込みを防ぐ方法を提案している。しかし、図4に示す電極間の漏えい抵抗(r_r , r_c)が存在する条件下ではやはり電流パスがあり測定値に誤差が生じる。このため金谷・石川は感圧導電性ゴムに切れ目を入れ絶縁体をはさみ、感圧導電性ゴムに異方性を持たせこの電流の回り込みを防いでいる。このほか、(3)Pubrick⁽¹³⁾によって提案された電圧ミラー法がある。この方法は目的とする測定点に関与しないドライバラインを出力電圧と等電位にして、不要な電流パスをなくすものである。この方式と同様な考え方として(4)Hillis⁽⁴⁾が提案した零電位法がある。図4にその回路図を示す。この方法は電圧ミラー法の出

力回路を変えて、走査用の電極にかかる電圧を零電位となるようにした点にある。こうすると各電極に等電位を発生させる代わりに、零電位とすればよく回路が簡単になる。しかし、Hillisの零電位法は異方性の導電ゴムを用いた方式であり、今回用いた感圧導電性ゴムのストライプ電極を用いた方式では電極間に漏えい抵抗(r_r , r_c)が存在するため、列方向をマルチプレクサで選択する方式では、図4に示すような不要な電流パスが存在しこれを防止する必要がある。また石川、下条⁽¹⁰⁾は、電圧ミラー法および零電位法では等電位を発生させる外部回路を必要とするため、応答速度が遅くなる問題点を指摘している。

2.3.2 本走査方式 今回の走査方式は以上の点を考慮して設計を行った。原理的には零電位法を利用している。図2にその走査回路の概念図を示す。行方向は、従来と同様に選択する行に電圧を加え、その他の行を零電位とする。列方向は、図4と異なり各列すべてに反転型演算増幅器を接続し、演算増幅器の入力電圧が仮想的に零電位なることを利用して各列すべてを零電位としている。このようにすることで電極間の漏電抵抗による測定誤差も排除できる。そして反転型演算増幅器の後にマルチプレクサを配し、各列の選択を行っている。ビデオ信号への変換は、上記の走査をビデオ信号と同期を取り、検出した圧力値で画像信号を輝度変調すればよい。今回各圧力検出エレメント当たりの走査時間は 500 ns 程度、マルチプレクサの切り替えは 64.5 μ s となる。また、192 $\times$ 192 程度のマトリックス形センサに対しても本走査方式が有効であることは、実験的にほぼ確認されている。

2.4 回路による誤差

2.4.1 行電極駆動素子の出力抵抗の影響 行電極には感圧導電性ゴムの抵抗 r_s と行電極間の漏えい抵抗 r_c が並列に接続される。この行電極の合成抵抗値

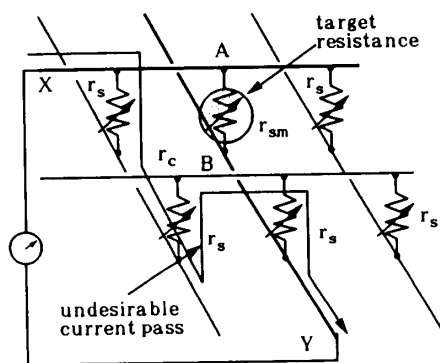


図3 ストライプ状電極の場合

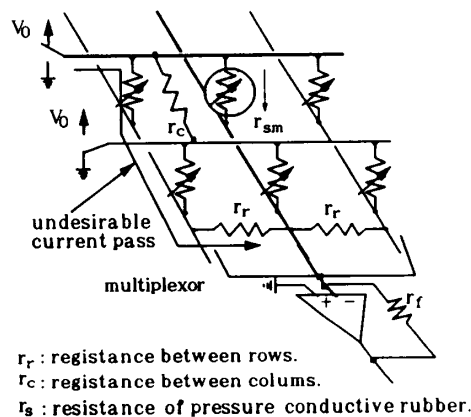


図4 Hillis⁽⁴⁾が提案した零電位法とその走査回路

を r_{cs} とすると、電極駆動素子の出力抵抗 r_o とそこに流れる駆動電流によって行電極の電圧低下が起こり、駆動点の電圧 V_d は式(1)のように低下する。

$$V_d = \frac{r_{cs}}{r_o + r_{cs}} V_o \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$1/r_{cs} = \sum_{j=0}^{N-1} 1/r_{sj} + 1/r_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 N は列の個数、 r_{sj} は駆動行電極の j 列めの感圧導電性ゴムの抵抗値とする。よって、 r_{cs} が出力抵抗 r_o に近づくと、測定値に対する影響が現れる。その影響は、電極駆動電圧の低下が原因のため、見かけ上測定値の低下として現れる。

2・4・2 演算増幅器のループゲインの低下による影響 1列の演算増幅器についてみるとその等価回路は図5のように表せる。 r_j は列電極につながる感圧導電性ゴムの抵抗 r_{si} と列電極間の漏えい抵抗 r_r の合成抵抗を表す。この回路は加算回路であるから、 r_j の値が極端に低くなければ出力 V_o からの測定点の抵抗 r_{sm} の値が求まる。しかしながら、 r_j の値が極端に低くなると式(3)に示すループゲイン A_L の低下をもたらす。演算増幅器入力端子の仮想零電位からのずれ、リニアリティの低下等の問題が出てくる。 β は帰還率を表し、式(4)のように表せる。

$$A_L = A \cdot \beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta = \frac{r_{sm} r_j}{r_f (r_{sm} + r_j) + r_{sm} r_j} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$1/r_j = \sum_{i=1}^m 1/r_{si} + 1/r_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 A は演算増幅器の開ループゲイン、 r_{si} は演算増幅器の列につながる i 行めの感圧導電性ゴムの抵抗値とする。今回のような β が変動する条件下で仮想零電位を保つためには、広い周波数域において高い開ループゲインの演算増幅器を選択する必要がある。

3. 感圧導電性ゴムの特性

感圧導電性ゴムは、ゴム特有の柔軟性、加工性、薄膜化、大面積化が容易であるだけでなく、衝撃、座屈等によっても破損しないなどの数多くの優れた特徴を持っている。また、電極と感圧導電性ゴムとを組合せ

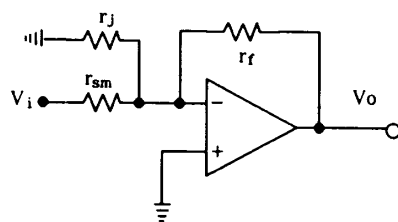


図5 1列の等価回路

るだけで簡単に検出器が構成でき、薄く柔軟な圧力センサが構成しやすい。しかし、感圧導電性ゴムには圧力と抵抗値の間に履歴特性があり、測定値の定量的取扱いには注意が必要である。以下にこの感圧素材の感圧特性を履歴効果も含め報告する。

3・1 感圧導電性ゴムの構造 感圧導電性ゴム(横浜ゴム社製品)はシリコンゴムの中に導電体である炭素粒子を均一に分散させたものであり、多孔質のシリコンゴムの母材の中に独立した塊状の炭素粒子が分散している。一般に導電体として金属を用いた感圧導電性ゴムは耐久性に難点があるとされているが、今回利用した感圧導電性ゴムは、百万回の繰返し荷重後でもその特性に変化がないとされている。

感圧導電性ゴムの感圧導電機構は次の原理によるものと思われる。無加圧状態では導電体である炭素粒子は互いに離れておりそのため抵抗値は無限大だが、圧力が加わると感圧導電性ゴムの体積が減少し、これまで離れていた炭素粒子が相互接触の連鎖を形成し電気抵抗値の減少をもたらすためと考えられる⁽¹⁴⁾。

3・2 感圧特性 感圧導電性ゴムが感圧素材として用いられる場合、応力・抵抗値の関係が加圧時と減圧時でループを描くいわゆる履歴効果が問題となる。このため、測定抵抗値から圧力値を求める場合には、これまでの履歴を考慮した補正を行うか、またはその変動範囲を明確にする必要がある。本報では後者を取り、図6に示すように感圧導電性ゴムの応力・抵抗値の関係を帯状の範囲で示した。以下に図の成立ちについて記す。

感圧導電性ゴムはその導電機構からわかるようにひずみ量と抵抗値の関係が本質的であり、応力はひずみ量を介して抵抗値と関係付けられる。履歴効果は、このゴム体の応力・ひずみ特性が履歴特性を持つことが原因である。このことは著者ら⁽¹⁵⁾によって実験的に明らかにされている。この履歴効果の程度を示す指標と

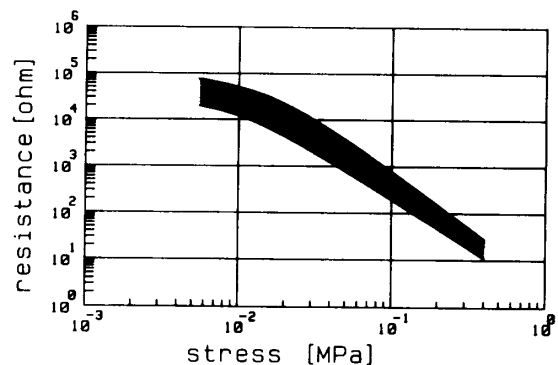


図6 感圧導電性ゴムの圧力・抵抗値特性

して著者らは1サイクル当たりの仕事量(W)に対する散逸仕事量(H)の比(H/W)を取り、周波数および加えるひずみ量に対してその変化を実験により求めた。その結果、散逸仕事量比(H/W)は、周波数としては10 Hz程度まで変化しないこと、ひずみ量としては40%程度(感圧導電性ゴムのほぼ最大圧力値)まで加え実験を行ったが変化がないことを確認した。すなわち履歴効果は、加える圧力によらないこと、周波数では10 Hz程度まではほぼ一定であることを実験的に確認した。またゴム体のような粘弾性体には応力緩和がある。ゴム体の応力緩和は、素材内部のゴム分子鎖等がエネルギー的に安定に成るように再配列して行く過程であり、それが繰返し荷重によって加速されることが考えられる。このような想定のもと、試料にひずみ量(圧力)を残す範囲で繰返し荷重を加える実験を行った。その結果、各サイクル当たりの履歴ループの形状は変化しないこと、加圧時の経路が回を重ねるごとに、初期の減圧時の経路に漸近することが確認された⁽¹⁵⁾。図6は、以上の履歴効果および応力緩和効果を含めたものを示している。

3.3 時間応答特性 時間応答特性は、衝撃荷重入力に対する抵抗出力の時間変化を計測した。図7にその実験結果を示す。衝撃荷重は、ロードセルを取付けた衝撃ハンマで試料片を打つことで与えた。応答の時間遅れは、衝撃荷重出力と抵抗出力の両ピーク値を比較し、約0.2 msの遅れが観測された。また、両出力波形の相違は感圧導電性ゴムの圧力・抵抗値特性が指数関係にあることによる。

4. 弾性体カバーによる フィルタリング効果

圧力分布センサの検出部は、柔らかな弾性体でカバーすることが一般的である。これは衝撃などの物理的破壊および油などの化学的汚染からセンサを保護する

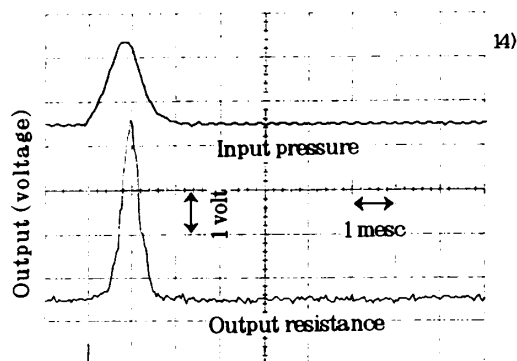


図7 感圧導電性ゴムの衝撃応答特性

ために必要とする。この結果、圧力検出素子上での圧力分布の様子が、弾性体カバーにより変化を受ける。ここではこの弾性体カバーが、空間分解能に及ぼす影響を理論的に解析した。

4.1 理論解析 図8に示すように表面上に集中荷重 $P \cdot \delta(x, y)$ を受けている弾性体の深さ h における応力分布を $g(x, y)$ とする。すると深さ h における応力分布 $f(x, y)$ は、弾性体表面上における応力分布 $P(x, y)$ と $g(x, y)$ のコンボリューションとして式(6)のように表現できる。ここで式(6)をフーリエ変換すると式(7)が得られる。

$$f(x, y) = \iint g(\xi, \eta) p(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad \cdots (6)$$

$$F(u, v) = G(u, v) \cdot P(u, v) \quad \cdots (7)$$

これは集中荷重による応力分布 $g(x, y)$ の二次元フーリエ変換結果 $G(u, v)$ が空間周波数のフィルタリング関数に対応することを示している。すなわち弾性体表面上の圧力分布の空間周波数成分 $P(u, v)$ に $G(u, v)$ を掛けた結果が、検出素子上の空間周波数成分 $F(u, v)$ に対応することを示している。これは集中荷重 $P \cdot \delta(x, y)$ による応力分布関数 $g(x, y)$ を求め $G(u, v)$ を計算することによって、弾性体カバーによる空間周波数フィルタリング効果が解析できることを示している。

4.2 計算結果 今回図8に示すように弾性体カバーは半無限と仮定し、またカバーの厚さを h としたとき、集中荷重 $P \cdot \delta(x, y)$ によるカバー下における応力分布を $g(x, y)$ と仮定した、すると集中荷重 $P \cdot \delta(x, y)$ による応力分布 $g(x, y)$ は、弾性力学⁽¹⁶⁾から式(8)のように求められる。

$$g(r, h) = \frac{3P}{2\pi} \frac{h^3}{(r^2 + h^2)^{5/2}} \quad \cdots (8)$$

図9には $g(x, y)$ を深さ h をパラメータとして計算した結果を示す。横軸は z 軸からの半径 r を示し、縦軸

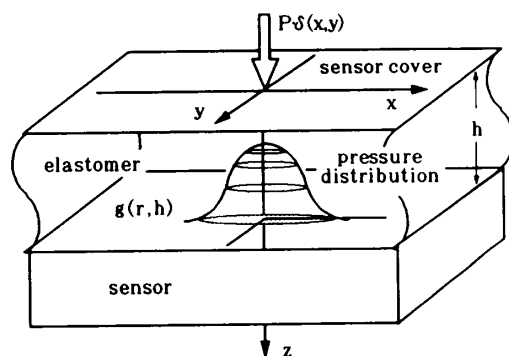


図8 一点荷重による弾性体カバー下での応力分布

はその点での応力を表す。ほぼ、深さの二乗に反比例して応力が減少する。フィルタリング関数 $G(q)$ は $g(x, y)$ のフーリエ変換であり、 $g(x, y)$ は軸対称関数であるから、その二次元フーリエ変換はヘンケル変換となり式(9)のように表せる。

$$G(g) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i2\pi(xu+yv)} dx dy \quad \dots (9)$$

$$= 2\pi \int_0^{\infty} g(r) J_0(2\pi r q) r dr \quad \dots (10)$$

$$J_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-iz \cos \beta} d\beta \quad \dots (11)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad q^2 = u^2 + v^2 \quad \dots (12)$$

ここで J_0 は式(11)で示される第1種ベッセル関数を表わす。図10にはフーリエ変換結果 $G(q)$ を示す。横軸は波数を示し、縦軸はフィルタのゲインを表している。この結果から弾性体カバーの厚みが0.2 mmでも波数1.5において弾性体カバーによるゲインは半分以下にさがり、弾性体カバーによるフィルタリング効果は無視し得ないことがわかる。また逆フィルタリングを施して元の分布を推定する方法も考えられるが、センサの最小感度による測定値の切捨て、ノイズの混入等を考慮すると逆フィルタリング結果の有効性には疑

問が残る。弾性体カバーの場合と比べ条件がやや異なるが、本センサでは感圧導電性ゴムの厚みが0.5 mmあり、図9に示すように圧力分布 $g(x, y)$ が1 mm程度離れた位置まで広がりを持つため、感圧導電性ゴムを薄くしない限りストライプ電極の間隔をこれ以上狭めても空間分解能が高くなることはあまり期待できない。

5. 実 験

開発したセンサを用いて行った測定および基本的な情報処理の例を以下に示す。一般に視覚は他の感覚に対して情報量等で相対的に優位であると言われている。しかしながら、視覚は、圧力、温度など目に見えないものは検知できない。その一例として図11には、洋服のポケット(50 mm×45 mm)のTV画像を示す。生地が同系統の色・柄であるため、生地の重なった部分の識別が視覚ではほとんど区別がつかない。図12には本センサで測定した圧力分布像を示す。接触による圧力分布の変化として、生地の重なり部分の位置形状、およびポケットの中に入っている紙クリップの様子までが検知できる。このように各種自動化装置で対象物

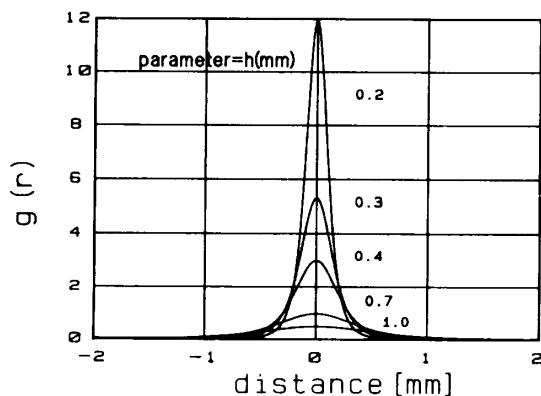


図9 弾性体カバーの厚さ方向の点広がり応力関数

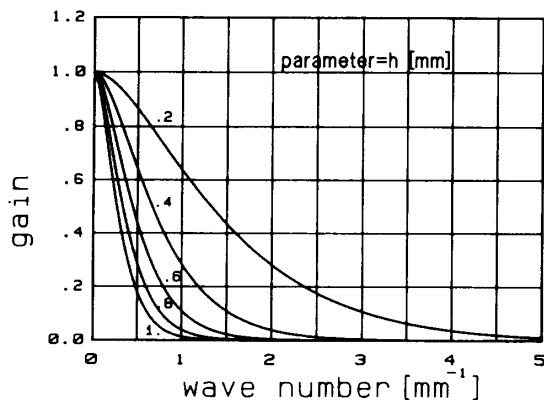


図10 弾性体カバーの厚さによる空間周波数フィルタ特性の変化

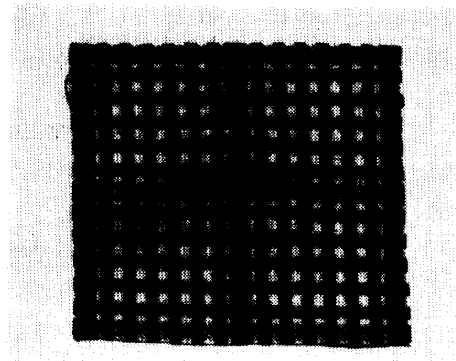


図11 洋服のポケット(50 mm×45 mm)のTVカメラによる画像

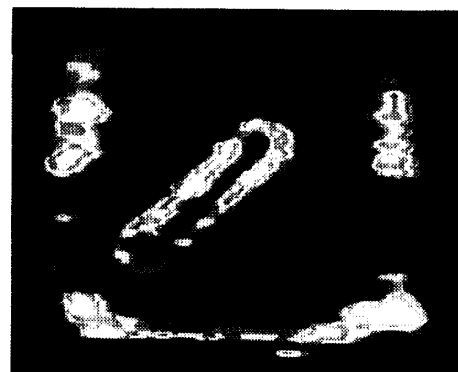


図12 モニタで観測した圧力分布出力(RGB)ポケットの輪郭およびその内部にある紙クリップ像

の認識を行う際に、視覚では困難でも触覚を用いると容易に識別できる場合がある。図13には画像処理装置を用いた処理の例として、測定データに 3×3 の平滑化フィルタをかけた後、等高線表示を行った例を示す。このほか、独立した対象物に番号付けを行うラベリング処理や物体の個数、重心、面積、周囲長等の各種特徴量の抽出も容易に行える。

6. 結 論

(1) 圧力分布センサを作る上で重要なことは、軽量・薄形・柔軟性といった制約条件の中でいかに検出素子を高密度に配置するか、そして多数の検出素子からの情報をいかに処理するかにある。

前者に対しては、感圧部を感圧導電性ゴムとストライプ電極を組合せた単純な構造を採用したことで達成し、その時間問題になる不要な電流パスについては高速で排除する回路を用いて解決した。後者に関しては、多数の圧力検出素子からの出力をビデオ信号として出力することにより、現在開発が進んでいる画像処理システムのハードウェア並びにソフトウェアを利用することで解決をはかった。

(2) 従来行われていなかった感圧導電性ゴムの履歴効果を含めた感圧特性の評価を行い、圧力・抵抗特性の変動範囲を明らかにした。またその時間応答特性を示した。

(3) 圧力分布センサは、外界からの物理的破壊および油等の化学的汚染からセンサを保護するため弾性体でカバーすることが通常の利用形態である。この弾性体カバーの空間分解能に及ぼす効果について理論的解析を行った。その結果、弾性体カバーの厚みが空間分解能に与える影響は大きく、圧力分布センサを設計する上で重要な因子であることが明らかになった。

本研究を行うに当たり各種のご支援をいただいた伴

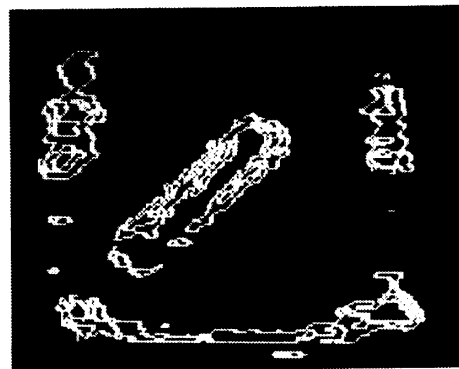


図13 圧力分布像の等圧線表示

菊夫前製品科学研究所所長(現労災リハビリテーション工学センター所長)に心から感謝する。

文 献

- (1) Harmon, L. D., *Int. J. Robotics Res.*, 1-2(1982), 3.
- (2) 木下, 日本ロボット学会誌, 2-5(1984), 46.
- (3) 石川, 精密工学会誌, 55-9(1989), 1583.
- (4) Hillis W. E., *Int. J. Robotics Res.*, 1-2(1982), 33.
- (5) Sugiyama, S., ほか4名, *Proc. Transducer's87*, (1987), 444.
- (6) Raibert, M. H. and Tanner, J. E., *Int. J. Robotics Res.*, 1-3(1982), 3.
- (7) Tanie, K., ほか4名, *Proc. 4th Int. Conf. Robot Vision and Sensory controls*, (1984), 251.
- (8) 平住・鈴木・金子・谷江, 機論, 55-516, C(1989), 2091.
- (9) 下条・石川, 計測自動制御学会論文集, 21-2(1985), 177.
- (10) 石川・下条, 計測自動制御学会論文集, 24-7(1988), 662.
- (11) Snyder W. E. and Clair J. ST, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, IM-27-1(1978), 94.
- (12) 金谷・石川, バイオメカニズム学会誌, 13-1(1989), 45.
- (13) Pubrick J. A., *Proc. 1st Int. Conf. Robot Vision and Sensory Controls*, (1981), 73.
- (14) 金森, 工業技術, 30-6(1982), 67.
- (15) 下条・石川, 第6回日本ロボット学会学術講演会, (1988), 485.
- (16) 中原, 応用弾性学, (1978), 152, 実教出版.