

触覚センサの研究開発

下条 誠 (Shimojo Makoto)
製品科学研究所

要旨

工業製品の評価を行うため、物と人間との接触状態を計測するセンサ開発を目的として、経常研究として始まった研究開発について述べた。研究開発の展開は、本件とは無関係な計測装置誤差の原因追求から始まった。これをきっかけに CoP 触覚センサが誕生した。そして研究開発は、製品評価を行うための分布圧センサ開発と、新たに触覚情報処理の研究への展開となった。前者は、触覚画像システムとして体圧分布計測、把持状態計測評価の研究へと発展した。後者は、並列情報処理用専用 LSI によるパターン処理機能を内蔵したインテリジェント触覚センサの研究と発展した。当時はロボティクス分野で触覚センサの黎明期に当たり、感圧導電ゴムを用いた触覚センサ関連では、先駆けとして基本検出・走査回路の開発、そして各種基本特性の解明などを行い、論文の被引用件数では最多となる成果をあげている。また開発したセンサは、体圧分布センサシステムとして製品化されたものもある。そして並列情報処理の研究は、後年の高速ビジョン研究へと発展していった。これらの成果は、ロボット分野での触覚センサとして各種の展開が進み、現在も利用されている。

1. はじめに

私は 1976 年 4 月に製品科学研究所に入所し、製品性能部製品性能課に配置された。製品科学研究所の前身は、工芸、意匠などの試験研究を主な業務とする産業工芸試験所である。それが時代の変化に伴い、消費者の立場に立った工業製品の性能評価に関する研究所に改組されたのは、私の入所 6 年ほど前のことである。私は、医療福祉関連、大型プロジェクト関連の研究も行っていたが、今回は経常研究テーマとして始まった、触覚関係の研究について述べることにする。ちなみに経常研究とは、各研究者が基礎研究として行う研究テーマのことである。

なぜ触覚関係の研究を始めたのか、あまり明確には覚えていない。当時の研究所には人間工学部があり、人間機械系に関わる情報・制御特性、生理的特性、心理特性などの研究が、若い研究者を中心に活発に行われていた。特に、人間の視覚、聴覚、味覚、触覚などの感覚についても研究が盛んで、その中で触覚に興味を抱いたのが始めである。なぜ興味を抱いたかという、触覚センサが開発できれば、物と人間との接触状態を計測できるようになる、と思ったことがその理由であるかと思う。製品性能部は工業製品の評価を行うところであり、そのような計測装置ができれば、椅子やベッドなどの各種家具の評価、また各種把持を伴う製品の評価、そして医療福祉への応用も可能ではないか、と考えたこと

による。

以降では、研究開発の進展に合わせ、CoP 触覚センサ、触覚画像システムそして把持計測システム、触覚情報処理用専用 LSI の開発などについて述べる。なお、この触覚関連の研究は、私の大学への移籍後もロボット分野での触覚センサの開発と応用とに発展し、私のライフワークとして現在も続いている。

2. CoP 触覚センサの研究開発

当時製品性能課は、工芸関係の研究者が多かった。工学系の研究者は、課長と私だけだったように思う。まず目標として、すでに述べたように、物と人間との接触状態を計測するセンサ開発と決めた。そして、センサ素材として注目したのは、当時新たに開発された感圧導電性ゴムであった。これはシリコンゴムの中に導電性素材を分散させたもので、荷重を加えると電気抵抗が低下する特性があった。まず、最初に開発したのが感温液晶を用いた圧力分布センサである。原理は簡単で、荷重分布を感圧導電ゴムにより抵抗値分布に変換する。そこに電圧を加えると抵抗部分で発熱が起こり、温度分布へと変化する。この温度分布を感温液晶で表示することで、圧力分布を観測するセンサであった²⁾。センサは薄く軽量で大面積化も容易であったが、如何せん温度変化を計測するため時々刻々の変化を計測することは困難であった。その時、偶然にも次のステップに繋がるきっかけがあった。

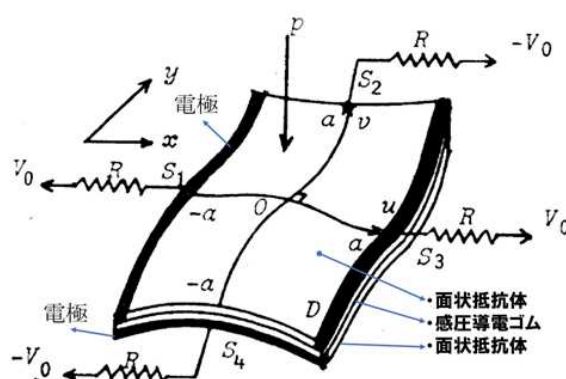


図1 CoP 触覚センサの構造

三層のシート状構造で、荷重分布の中心位置と荷重総和が検出できる。



図2 各種形状&座標系の CoP 触覚センサ

各種寸法の平面状、曲面状、そして扇形座標系の CoP 触覚センサ。

私の入所翌々年に新人が当課に配属された。石川正俊氏である。彼は製品の安全性評価研究プロジェクトで、人体の三次元計測を担当していた。計測装置は人体に取り付けた LED からの赤外線を二台のカメラで検出し、手足の関節など人体の三次元位置を計測する。彼は、独自のソフトウェアを開発して動きの三次元計測、および各種の動作解析が行

えるようにしていた。計測システムを構築し実験を行ったところ、測定結果に計測装置特有の誤差があることに気がついた。計測精度向上のためには、この問題を解決する必要がある、誤差発生の原因を熱心に追及していた。その原因は、どうも計測原理そのものを掘り下げる必要があったようで、難しい数式と日々格闘していたのを覚えている。しばらくしてやっと解決したようで解説してくれた。よほど嬉しかったとみえ、熱心に話してくれたのを覚えている。その説明は数学的に難しかったが、聞く内に、非常に興味深いことに、現在利用していた感圧導電ゴムを用いて、新たな荷重センサの開発へ展開できることが分かった。

その時の考えを、センサとして実現した構造を図1に示す¹⁾。センサは三層構造で、面状抵抗体で感圧導電ゴムを挟み、電極を図のように面状抵抗体に取り付けた簡単な構造である。動作原理は、ポアソン方程式の境界値問題に帰着できる。ポアソン方程式は電磁気学、流体力学において、基礎方程式として現れる有名な方程式である。今回のケースでは、微小部分での電流の流れがポアソン方程式で記述できるのである。電流の流れは、面状抵抗体で位置情報が、感圧導電ゴムで荷重情報が、それぞれ電流分布情報に反映される。また図の電極（黒部分）で電圧の境界条件を表すことになっている。彼の解法結果から、荷重分布の総和とその中心位置が、電極間電圧（ S_1 - S_3 , S_2 - S_4 ）から計測出来ることが明らかになった。

この結果を用いて私は、各種の形状、および扇形座標系など変わった座標系のセンサを試作した。図2はそのセンサを示す。このセンサは、全てがアナログ回路方式であり、応答速度が非常に早く（1ms以下）、配線数が4本と省配線型であり、また薄く軽量で各種形状も可能で、また電気ノイズにも強い特徴があった。これらの特性は、特にロボットへの応用に適していた。図3には、ロボットハンドへの応用として、スタンフォード JPL ハンドに実装して物体のハンドリングをしている様子を示す。ロボットハンド近辺の電気モータによる、大きな電気ノイズにも負けず、時々刻々の接触状態を正確に計測できることが明らかとなった。まさにロボットハンドに実装した場合、省配線とノイズに強い点が大きなメリットになった。

幸運にも、この CoP 触覚センサに関する論文¹⁾は計測自動制御学会から論文賞を1984年に頂いた。まだ若い二人にとって非常に嬉しい出来事であった。実はこの CoP 触覚センサをポアソン方程式としてキチンと定式化できたことが、後々さまざまな展開を生むことになる。言うなれ

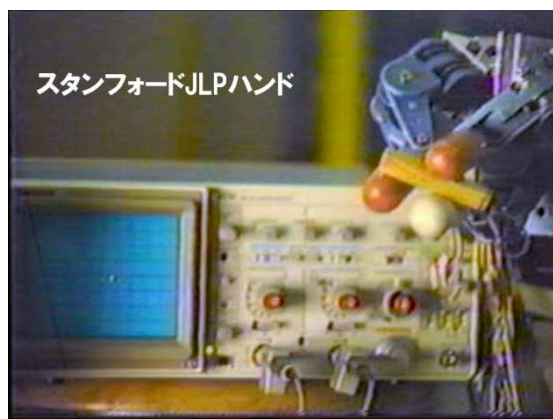


図3 COP 触覚センサをスタンフォード JPL ハンドに取り付けての把持操作実験

白い指が開発したセンサ、時々刻々の接触位置がオシロスコープの光点で表示される。

ば、このセンサの研究開発は、我々の研究人生のスタートとなった研究であった。

3. 触覚画像システム

CoP 触覚センサは素性が良く、いろいろな展開が現在も続いている。しかし、当初の目標である圧力分布が計測できない欠点があった。圧力分布を計測するには、荷重センサをアレイ状に並べて計測する必要がある。しかし、そのためには検出素子への多数の配線、多数のアンプなどが必要で、センサは重厚長大となる難点があった。特に、製品の握り心地評価を圧力分布から評価しようとするなど、とてもできない相談であった。

そこで、我々は、感圧ゴムを使い、薄く柔軟で高空間分解能で使い易い、圧力分布センサを開発することにした。感圧ゴムを用いて圧力分布を計測するには簡単に思える。例え

ば、図4に示すように、縦電極と横電極で感圧導電ゴムを挟み、縦横電極の交点の抵抗値 (r_s) を測り荷重を計測する方法である。すなわち、横電極 A2 と縦電極 B1 とに電圧 V_0 を加え、流れる電流から電気抵抗を測る方法である。しかし、この方法では、図のように、目的とする縦横電極の交点以外を電流が通過する、誤電流パスが無数に発生する問題があった。この誤電流は、 $A2 \rightarrow B2 \rightarrow A3 \rightarrow B1$ のように、下面

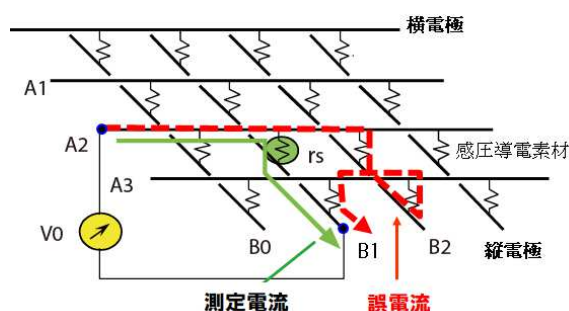


図4 検出素子の走査での誤電流パスの存在

抵抗 r_s 測定のため、A2 と B1 間に電圧 V_0 を加えると、測定電流（緑）以外に多くの誤電流（赤）が発生する。

に流れた電流が再び上面に流れる経路が無数に存在することが原因である。我々は、この問題に二つの解決法を用いた。一つは、一度下面に流れた電流が、再び上面に戻らないようにダイオード素子を各検出点毎に入れる方法である。もう一つは、ゼロ電位法を用いるもので、下面の縦電極をゼロ電位、すなわち一番低い電圧とすることで、下面から上面に再び電流が戻らないようにする回路を考案したことであった。

これらの結果、ダイオードを用いて開発したセンサは横浜ゴム（株）から1987年ごろ触覚画像システムとして製品化・販売された⁴⁾。図5にその写真を示す。このシステムは、人間が椅子やベットなどを利用した時の体圧分布を計測するものである。図5上部には計測した体圧分布を示す。図5右下にはセンサ素子を示す。この装置はセンサからの信号をビデオ信号として出力することで、実時間で接触状態が観測できること、また安価な画像ボードを使うことで、輪郭処理、荷重分布変化など様々な画像処理が簡単に行えること、また録画装置を使うことで長時間の記録計測が可能など様々な特徴があった。今でこそ、ベット、椅子などの体圧分布計測をCMなどでよく見かけるが、今から30年余り前ではこのようなセンサは珍しく、先駆けであったのではと思う。



図5 横浜ゴム(株)から製品化された触覚画像システム

寝た状態での体圧分布計測を行っている様子を示す。測定結果はビデオ画像として計測され、内蔵の画像処理ボードにより等圧線、輪郭処理など各種情報処理が可能である。

次に、図6にはゼロ電位法を用いて試作したセンサシステムを示す⁷⁾。この方法はダイオードを挿入する必要が無いため、センサを薄いシート状に作れる。図6(a)にはセンサ検出部と計測例を示す。センサ検出部は、フレキシブル基板上に1mmピッチの縦方向と横方向のストライプ電極をそれぞれ作り、感圧導電ゴムシートをそのシート2枚の間に挟んで作成した。検出点は、縦方向電極と横方向電極の交点4096点(64×64)となる。計測例としてセンサ検出部に猫の前足を載せたときの足圧分布計測結果を示す。実験結果に圧力分布の等高線処理を行い、擬似カラーで表示している。意外と高感度に計測出来ていることが分かる。なお、図6右上の写真では、センサから延びている配線が見て取れる。今回のケースでは、配線数は128本になり、その配線の取り回しは困難である。またロボットなど可動部分で繰り返し動作が多い機器への実装では、配線数の増加とともに断線、接触不良などの不具合も増加するため、コード問題と言われている。図6(b)にはセンサシステムのブロックダイアグラムを示す。センサ検出部と走査回路、ビデオ信号への変換回路、画像処理回路などから構成されている。このセンサは、ビデオ信号に変換する必要があるため、1/30秒毎に計測点である4096点をゼロ電位法を満たすように走査している(一点当たり8μ秒)。実際に回路を試作して試験を行ったところ、走査速度が速くてゼロ電位とすることが間に合わないため、発振などが生じ苦労した覚えがある。結局、当時としては最新の高速・高電流型のICを多数利用し、かつ回路に工夫を加え設計・試作して、動作することができた。当時として珍しい、かつ高価なICを多量に購入したため、IC製造メーカーの興味を引いたようで、その利用法に関して問い合わせが来たのを覚えている。

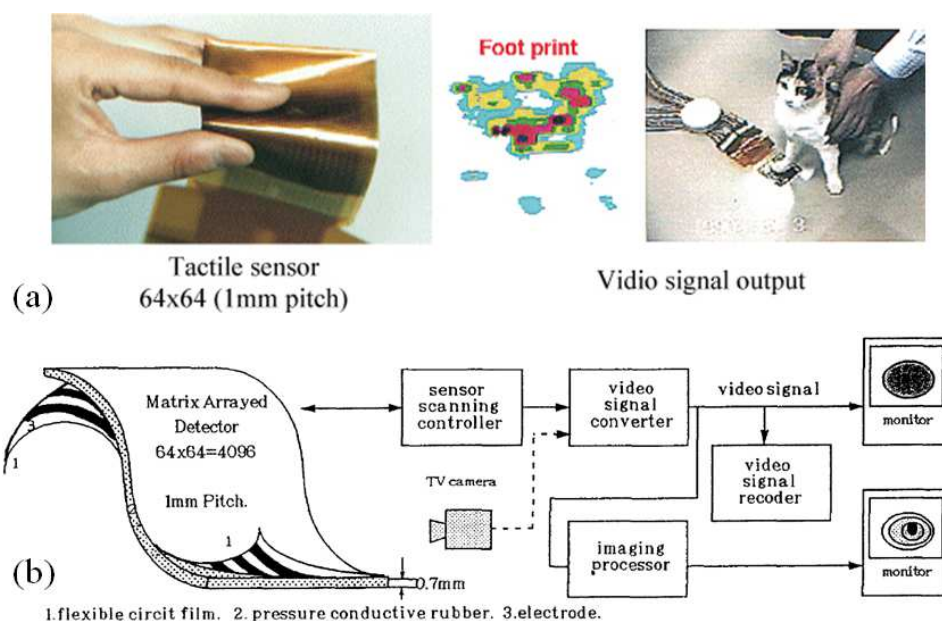


図 6 高密度・薄型フレキシブルな触覚画像システム

検出部はフレキシブル基板に縦横のストライプ電極を用い電極とした。検出部の厚みは 0.7mm と薄い。計測結果は画像処理ボードを使い等圧線処理後の疑似カラー表示である。

4. 触覚 LSI の開発

CoP 触覚センサは、分布量の中心位置と総和を、検出するユニークなセンサであった。その基本原理はポアソン方程式の境界値問題である。これまでは、面状抵抗体と感圧導電ゴムという連続体で実現していたが、新たな展開として、方程式を離散系で表現することで、分布系センサが実現できると石川氏は考えた。そこでマトリクス状に検出素子を配置して、走査方式を取らず、完全並列処理を行い、分布量の中心位置と総和を検出するセンサを開発した⁵⁾。

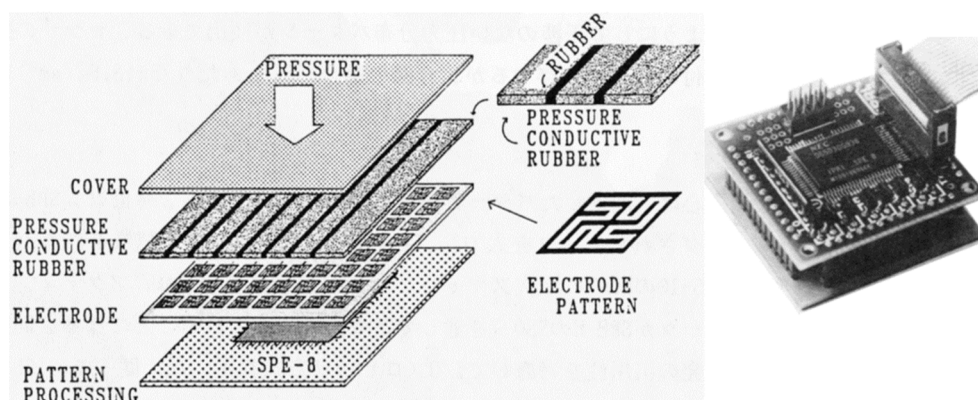


図 7 パターン処理機能を内蔵したインテリジェント触覚センサ

感圧導電ゴムと電極を組合わせた検出部と並列情報処理を行う専用 LSI (SPE-8)

検出素子として圧力センサも考えられるが、試作機では光センサ（photoTr.）を用い、局所情報処理用の演算増幅器と組合わせたセンサを開発した。実験では物体中心の追跡やエッジトレースなどを高速に実行可能なこと実証した。これが後に、彼の研究分野となる高速ビジョンへの始まりかなと思う。

これらの研究を行いながら彼は、触覚情報処理を行う並列処理の研究開発を推し進め、パターン処理機能を内蔵したインテリジェント触覚センサを開発した⁶⁾。これは感圧導電ゴムの検出部と、検出情報を並列処理により高速に処理を行う専用 LSI を、コンパクトに一体化したものである。石川氏によると、「三ヶ月間、寝る時間を惜しんで作った」という苦労作である。開発した LSI は、マトリクス状に配置されたセンサに対応して並列に 8 個のプロセッシングエレメントを持つことから SPE-8(Sensory Processing Element-8)とした。SPE-8 は CMOS ゲートアレイを用いて作成した。これによりこれまで問題となっていた触覚センサでの配線数を劇的に低減することができた。試作したセンサは 46mm 角に縦横 8 列ずつ 64 個の検出部がある。触覚情報処理の特徴として、①処理の局所性が高く、分散処理の効果が高い、②触覚センサはロボットに実装することが多く、配線コードを含め小型軽量化の必要性が高いなどがあげられる。開発したセンサの構造とその外観を図 7 に示す。検出素子は感圧導電ゴムを用いている。

5. センサグローブの開発(手袋型圧力分布計測センサ)

触覚画像システムは上手く動作し製品化もできたため、当初の目指していた製品の握り心地を評価できるような、手袋型のセンサシステム（センサグローブ）の開発を行った。これまでの研究開発を通して、検出・走査回路、ビデオ信号変換などノウハウも蓄積できたため、「人間感覚計測応用技術」大プロの中でもその技術を発展させ、開発を進めることができた。今回のセンサが、これまでと大きく異なるのは検出部の構造である。手袋で把持を行うため、大きな力でも壊れないように、またすべり方向の力にも耐えられるように、検出部は丈夫に作る必要があった。このため、感圧ゴムに金メッキ線を縦方向と横方向に縫込み、その交点（212 点）を感圧部とすることにした。こうすることで電極と感圧ゴムとが一体となり、接線方向力にも強い検出部ができた⁸⁾⁹⁾。

図 8 (a)にセンサグローブを示す。ゴルフ用の薄皮製手袋に、金メッキ線を縫い込んだ感圧ゴムを糸で縫いつけてある。図 8 (b)には電動工具握り部分の評価実験用の作業をしている様子を示す。図 8 (c)はこの時の把持圧力分布の様子を示している。作業動作と把持圧力の時々刻々の変化は、両方ともビデオ信号画像であるため、2 画面同時画像として情報処理および記録ができる。この計測システムは、把持状態に対して多数点の時系列情報のため多量データとなり解析に苦労した。現在ならば、このようなビッグデータでの握り心地評価には、深層機械学習などが効果的かもしれない。しかし 1990 年代半ばでは解析評価が難しかったのを覚えている。なお、これまでの感圧素材を用いたセンサシステム研究開発をまとめた論文は、その引用件数が歴代 IEEE Sensor Journal の Top10 内に入ることにな

った¹⁰⁾。

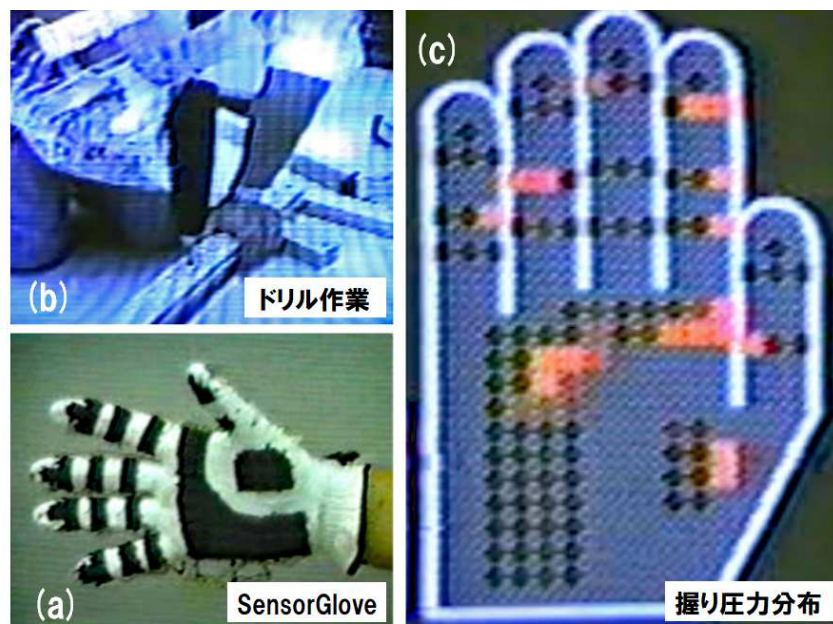


図8 センサグローブの開発

開発したセンサグローブシステムを示す。手袋状に配置した圧力分布センサを用いて把持製品の評価を行う。図では電動工具の握り心地の評価を行っている様子を示す。計測結果は全てビデオ信号として処理、記録できる。

6. その後の展開

1993年に機構改革があり、製品科学研究所は生命工学工業技術研究所となった。また残念なことに、センサグローブの完成とほぼ同じころ、私は大学に移籍することになった。大学ではロボット分野の教育研究を行い、特に触覚センサの開発およびハンドへの応用を進めた。その原点となったのが CoP 触覚センサであった。大学では、離散化したポアソン方程式を実現した離散型 CoP 触覚センサ、検出素子を感圧ゴムから光学素子に変更し視覚と触覚情報を補完する近接覚センサ、これらのセンサとアクチュエータを直接接続してリアクティブ制御を行うハンド等を開発して行った。また、インタラクティブ型触覚ディスプレイの開発など主に触覚関係の研究開発を行った。

また、一緒に研究を進めた石川正俊氏は1989年に東京大学に移り、CoP 触覚センサで研究した局所的情報処理技術を並列演算処理へと発展させ、視覚情報処理に応用し、高速ビジョンシステムを開発して、高速知能ロボットシステム、ダイナミックビジョン、超並列・超高速ビジョンなど各種の素晴らしいシステムを開発して行った。

また私は、2016年に電気通信大学を定年退職後も、2019年現在、東大の特任研究員として触覚・近接覚そしてロボットハンドへの応用を進めている。思うに20代後半に良き上司、良き共同研究者そして面白い研究テーマに出会えたのは幸運であった。

最後に、当時の製品科学研究所は職員間の交流が活発で知的刺激に富み、楽しく研究ができた。改めて職員の皆様に感謝したい。特に、アイデアに溢れ、エネルギーをくれた石川正俊氏に心から感謝したい。また、いかなる時も我々を励ましてくれ、なにかとご助力を頂いた伴菊夫氏（元製品性能課課長）に深く深く感謝したい。我々の研究が続けられたのは同氏によるところが大きい。

■参考文献

1. 石川正俊, 下条誠: 感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心位置の測定方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.7, pp.730-735, 1982
2. 下条誠, 石川正俊: 感圧導電性ゴムと液晶を用いた圧力分布の表示方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.2, pp.177-182, 1985
3. 下条誠, 石川正俊, 薄型フレキシブル位置覚センサとその応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11, pp.1250-1252, 1985
4. 石川正俊, 下条誠, ビデオ信号出力を持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, Vol.24, No.7, pp.662-669, 1988
5. 石川正俊, マトリクス状センサからの出力分布の中心の位置と総和の検出方法, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.5, pp.381-386, 1983.
6. 石川正俊, 並列処理を用いた局所パターン処理用 LSI とその触覚センサへの応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.3, pp.228-235, 1988.
7. M. Shimojo, M. Ishikawa, K. Kanaya: A Flexible High Resolution Tactile Imager with Video Signal Output, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA), pp.384-391, 1991.
8. 関喜一, 下条誠, 佐藤滋, 高橋昭彦: 高柔軟性をもつ把持圧力分布センサの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.9, pp.1528-1530, 1995.
9. M. Shimojo, S. Sato, Y. Seki, A. Takahashi: A System for Simultaneous Measuring Grasping Posture and Pressure Distribution, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.831-836, 1995.
10. M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino and K. Mabuchi: A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, IEEE Sensors Journal, Vol.4, No.5, pp.589-596, 2004. (Most Cited Articles in IEEE Sensors Journal from all times by April 2014 (Top8))

■新聞記事

- 「触覚センサー開発」, 日経産業新聞, 1982.5.13
- 「平面の端を自動追跡」, 日経産業新聞, 1983.3.23
- 「進化するロボット<感じる>布の端を探し出し大きさ判別」, 日経産業新聞, 1983.8.10
- 「センサーここまで進化触覚, 柔らかく自由に動く, 暗やみで全体像わかる」, 日本経済新聞, 1983, 12.28 (夕刊)

- 「触圧を即時に判断する重心センサー」, 毎日新聞, 1984.8.27
- 「触覚センサー用 LSI」, 日本工業新聞, 1986.2.21
- 「センサーに情報分析機能－高速処理を可能に－」, 日刊工業新聞, 1986.3.5
- 「工技院, 知能触覚センサーを開発」, 日本経済新聞, 1986.4.22
- 「皮膚より敏感`機械の手`」, 読売新聞, 1986.5.2 (夕刊)
- 「横浜ゴム, 武器は感圧導電ゴム」, 日経産業新聞, 1986.10.17
- 「パソコンで画像処理, 横浜ゴム触覚センサーシステムを開発」, 日刊工業新聞, 1986.10.17
- 「パソコンで力の分布表示, 横浜ゴムが画像システム」, 日本経済新聞, 1986.10.17
- 「パソコン触覚センサー画像システム, 横浜ゴムが実用化」, 日刊工業新聞, 1986.10.17
- 「世界初パソコン利用, 横浜ゴム触覚センサー画像化システム」, 日刊自動車, 1986.10.23
- 「触覚画像システム, 横浜ゴムが東大に納入」, 日経産業新聞, 1987.11.19
- 「横浜ゴム, 触覚画像システムを実用化」, 日刊工業新聞, 1987.11.19
- 「専用 LSI で形判断」, 日経産業新聞, 1988.1.18
- 「横浜ゴム, 触覚画像システム実用化」, 日本工業新聞, 1987.11.20
- 「触覚センサー, 製科研インテリジェント化に成功」, 日本工業新聞, 1988.1.19
- 「人間と同じに触れて感じる触覚センサー」, 読売新聞, 1988.6.7 (夕刊)

■経歴

1976 年東京工業大学大学院総合理工学研究科修了。同年工業技術院製品科学研究所入所。1993 年生命工学工業技術研究所人間環境システム部情報伝達機能研究室室長。1997 年茨城大学工学部情報工学科教授。2001 年電気通信大学知能機械工学科教授。2016 年同定年退職, 同特命教授。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科特任研究員, 現在に至る。電気通信大学名誉教授 <https://researchmap.jp/read0072509/>

■受賞

2016 年	日本ロボット学会 論文賞
2015 年	IEEE sensors council Most Cited from All Time by April 2014(TOP8)
2013 年	F A財団「論文賞」
2010 年	計測自動制御学会論文賞
2010 年	ファナック F Aロボット財団 論文賞
2009 年	IEEE/RSJ KAZUO TANIE AWARD
2009 年	日本バーチャルリアリティ学会論文賞
2003 年	日本機械学会 ROBOMECH 表彰
1996 年	機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 業績賞
1984 年	計測自動制御学会論文賞受賞

受理日：2019年4月16日