

# 変圧器型圧力センサーアレイとその応用について

田畑 力 早野 誠治 齋藤 兆古  
法政大学大学院工学研究科

近年、人工知能(AI)技術やロボット工学の研究・開発に伴い、外界情報を感知するセンサーは極めて重要な要素となりつつある。中でも機械量を検知する圧力センサーは、車のドアの開閉部や計算機のキーボードなどのセンシングデバイスとしてすでに我々の身近に多岐に渡って存在している。しかし、開発されている全てのものが薄型を目指した2次元平面に対する応力測定であり、3次元ベクトル量を測れるセンサーは存在していない。

本報告で提案する圧力センサーは、高さを持つスプリングを一次コイルとした変圧器型センサーであり、これをアレイ状に配置したセンサーアレイを製作し、人間臀部の圧力分布とその応用に関する測定結果を報告する。

## 1. はじめに

近年、福祉環境を向上させるための一方途として、人間が日常的に使用するベッドや椅子などの道具類に圧力センサーを装着した医療介護システムの需要が高まっている。例えば、無意識状態の時に症状が見られる睡眠時無呼吸症候群(Sleep Apnea Syndrome)は、患者に対し長期間の負担を掛けない無拘束な観察が必要であり、これを医療機関が行うことは比較的困難である。圧力センサーをアレイ状に配置した医療ベッドであれば、呼吸により生ずる横隔膜の振動からこれを感じることが可能である。さらに、体動から寝相、新陳代謝による冷え性など、現代社会において蔓延している症状に対し、人間の就寝状態や着座状態の荷重分布を測定することで、様々な有用な情報抽出が期待できる。このような社会的背景を前提として、筆者らは、医療及び介護を受けている患者に対し、プライバシーを侵害すること無く監視可能であり、かつ、患者の動作から患者の状態を把握する動圧力分布自動認識・モニターシステム開発を行っている。

本論文では、動圧力分布自動認識システム開発の初期実験として、耐久性に優れ、クッション性の良い材料であるスプリングを、一次コイルとして用いた変圧器型圧力センサーを開発し、その特性を理論的・実験的に評価する。この試作した変圧器型圧力センサーをアレイ状に配置した感圧マットを椅子へ装着し、椅子座面に対する人間の臀部による圧力を測定し、静的、準動的状態における圧力分布の可視化を行い、椅子上の人間の動作に伴う圧力分布の相違に関して考察する。また、実際に測定し可視化された準動的圧力分布画像から画像の固有パターンを抽出する動画認識手法を適用し、椅子に着座した人間の幾つかの動作の相違を、臀部の圧力分布動画画像からある程度把握可能であることを報告する。

## 2. 変圧器型荷重センサー

### 2.1. 動作原理

図1(a)は筆者らが提案する変圧器型スプリング圧力センサーの概略図を示す。ソレノイド状に巻かれたスプリングを変圧器の一次コイルとし、一次コイルの同軸上に二次コイルとなるサーチコイルを配置する。これは主磁束が軸方向に平行して通るためである。一次コイルを形成するスプリングの可動方向であるZ軸方向から圧力を加えると $\Delta l$ の変位が生じ一次コイルの自己インダクタンス及び二次センサーコイル間の相互インダクタンスが変化する。圧力による変位 $\Delta l$ は一次励磁コイルによる磁界

分布の変化を促し、二次センサーコイルの鎖交磁束数を変化させ、結果として圧力を電圧として感知する。これが変圧器型スプリング圧力センサーの基本動作原理であり、図1(b)はこの基本動作原理の概略を示す。

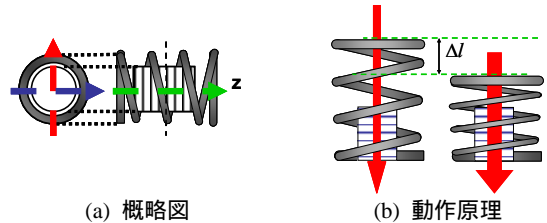


図1. 変圧器型スプリング圧力センサーの動作原理

### 2.2. 供試センサーの圧力-出力電圧特性

表1は供試センサーの仕様を示す。通常の変圧器は主磁路を磁性体で構成するが、変圧器型スプリング圧力センサーはクッション性を維持するため、磁気抵抗の大きい空気を主磁路とする点が特徴である。

表1 供試センサーの形状

	半径 [mm]	全長 [mm]	巻数 [turn]	線 [mm]
Spring	14	68	12	2.3
coil	8.8	28	300	0.4

供試変圧器型スプリング圧力センサーの一次電流は周波数10kHz、最大振幅1Aの正弦波である。図1(b)に示すZ軸方向へ圧力を0.33N/mm刻みで加えた場合の一次コイルの自己インダクタンス $L$ の変化を、弾性係数を用いたフックの法則より計算した近似値と実測値としてそれぞれ図2(a)、(b)に示す。また、実際にセンサー信号とされる二次コイルの圧力対出力電圧特性を図3(a)、(b)に示す。

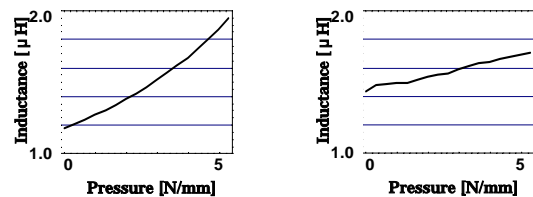


図2. 1次コイルのインダクタンス対圧力特性

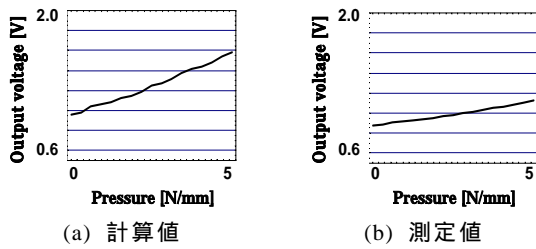


図 3. 2 次コイルのセンサー出力電圧対圧力特性

図 2 から、理論値と実験値は共に比例関係を示し、圧力に対する傾向もほぼ一致することが判る。以上の結果から、従来の変圧器型圧力センサーは必ずしも変圧器型としなくても、一次コイルの自己インダクタンス測定のみで圧力が感知可能であり、単純なインダクター型圧力センサーも実現可能であることを示唆している。

### 3. 圧力分布測定とその可視化

#### 3.1. 圧力分布測定システムの概要

変圧器型スプリング圧力センサーを 34cm×34cm の正方形平面に 4×4 個アレイ状に配置した感圧椅子を試作し、圧力分布測定システムを構築した。その概要を図 4 に示す。人間の臀部の圧力分布を測定するため、16 個のスプリングコイルを直列接続した 1 次側回路に、周波数 1kHz、振幅 0.5A の交流電流を通电し被験者が椅子に着座する。二次コイルの出力信号は、サンプリング周波数が 10kHz である AD コンバータを介し、逐次にデータを計算機へ取り込み画像化する。

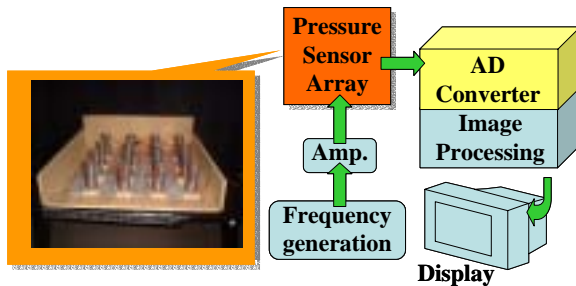


図 4. 圧力分布可視化システムの概要

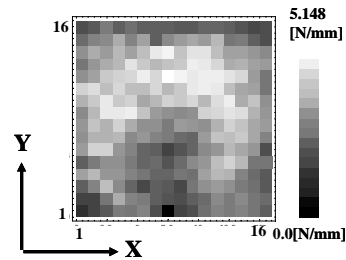
#### 3.2. 静的圧力分布測定

前節に示すシステムを用いて 20 代男性が着座した場合で、ほぼ安定している環境での圧力分布測定例を図 5 に示す。図 5(a)はセンサーアレイによる圧力分布図であり、白い部分は圧力が大きく黒い部分は圧力が小さいことを示す。また、図 5(b)は図 5(a)の圧力分布を 3 次元的に表示している。高さが高いほど圧力が大きいことを示す。図 5(a)、(b)からこの男性は、図 5(c)に示すように安定に準静的に座った場合、被験者から見て右側に重心を置く傾向があることが観察される。

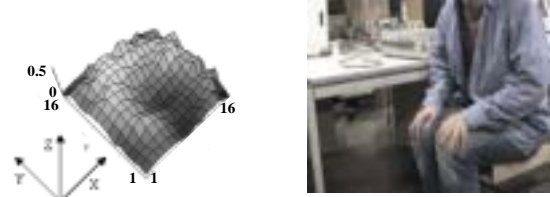
同様の実験を他の 4 人の成人男性に対して行った結果を図 6 に示す。図 5、及び図 6 から 5 人の着座状態が個々の対象によって異なることが観察される。

以上の結果から、変圧器型スプリングセンサーアレイを配した椅子はクッション性を損なうことなく圧力分布を直接電気信号として可視化可能であることを検証し、さらに個々の人間に対する静的圧力分布を測定すること

で、臀部の形状・体重により固有の静的圧力分布特性を持つことを示した。



(a) 圧力分布

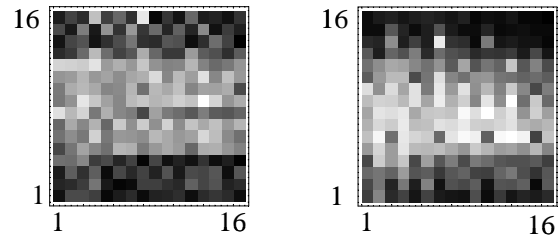


(b) 3D 圧力分布



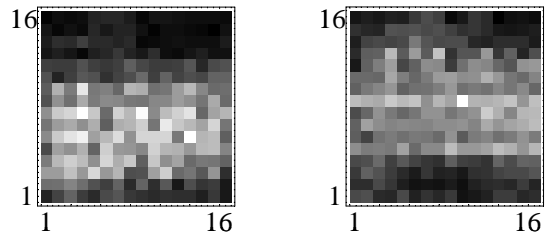
(c) 測定状況

図 5. 着座時における被験者の感圧椅子に加わる圧力分布



(a)

(b)



(c)

(d)

図 6. 4 人の異なる人間が着座した時の圧力分布

#### 3.3. 準動的圧力分布測定

前節では、ほぼ安定して着座している人間の臀部における準静的圧力分布を測定した。しかし、人間は常に新陳代謝や呼吸を伴い、常時同一の着座状態では無い。このため、本節では、人間の直立状態から着座するまでの感圧椅子に加わる圧力を、準動的圧力分布として可視化することを考える。

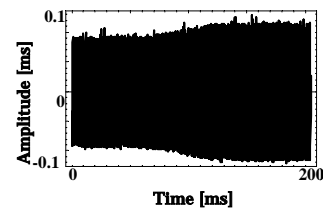


図 7. 変圧器型圧力センサーの時間領域出力信号

図 7 に、20 代男性が着座するまでの 0.2s 間における、変圧器型スプリング圧力センサーの出力電圧信号の 1 例を示す。図 7 に示す波形を時間軸に対し 0.005s 毎に区切り、0.005s 毎の実効値を加算平均して算出したセンサー出力を、各点の圧力分布測定値とする。全てのセンサーに対して、同様な信号処理を行い生成された圧力分布図を 1 フレームとし、40 フレーム生成し、動画化として可視化する。具体例として、図 7 で時間軸の中間部にあたる 8 フレームを図 8 に示す。図 8 から、人間の直立状態から着座までの一連の動作に伴う準動的圧力分布が動画として可視化され、この男性が左側から着座する傾向が窺える。

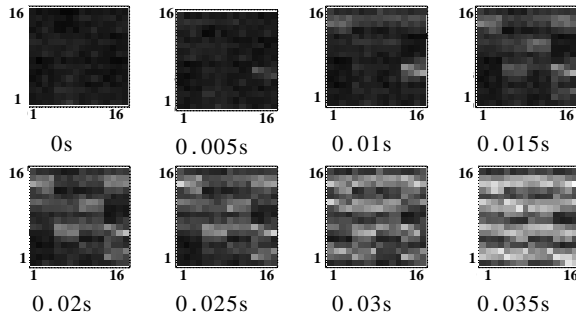


図 8. 被験者が直立状態から着座するまでの準動的圧力分布

#### 4. 感圧椅子を用いた被験者の動作認識

##### 4.1. モノクロ画像の固有パターン

前節で電子的に計算機スクリーン上に可視化された圧力分布画像から、画素数、配置、変形などに無関係となる映像の普遍量を抽出する概念を導入し、計算機自身によって映像を認識させることを試みる。

モノクロームで可視化された圧力分布画像は、スクリーンの  $x, y$  直交座標上のスカラー量の分布で表される。すなわち、 $m, n$  をそれぞれ、 $x, y$  方向の画素数とすれば、モノクロ画像は次式で表される。

$$pixel_{i,j} \in f_m(x_i, y_j) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

(1)式で、モノクロ画像はスカラー画素値の集合で表現され、画素は  $x, y$  直交座標の関数で表現される。モノクロ固有ベクトルは、モノクロ画像の画素値をヒストグラム化して得られる。モノクロ画像を構成するモノクロ画素分布  $I_{Mono}$  は

$$I_{Mono} \in M_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

で与えられる。このモノクロ画素分布  $I_{Mono}$  をダイナミックレンジ  $D$  の分布に正規化した正規化モノクロ分布  $I_{Mono}^D$  に変形する。

$$I_{Mono}^D \in \text{Round} \left[ D \times M_i / \text{Max} [I_{Mono}] \right] \quad (3)$$

(2)式から得られた正規化モノクロ成分分布  $I_{Mono}^D$  において、0 から  $D$  までのそれぞれのモノクロ画素値を取る画素数を計数して出現頻度を求め、ベクトル形式の配列データにしてモノクロ成分固有ベクトル  $E_{Mono}$  とする。こ

れはスクリーンを構成する画素数や基準座標依存性などを削除した対象映像固有の特徴量となる。

##### 4.2. システム方程式

図 8 に示す各フレーム画像からモノクロ画像の普遍量を固有パターンとして抽出し、 $n$  個の固有パターン  $E_i, i=1, 2, \dots, n$ , を得る。システム行列  $C$  は  $n$  個の固有パターンを列ベクトルとして次式で与えられる。

$$C = [E_1, E_2, \dots, E_n] \quad (4)$$

入力画像から得られる固有パターンを  $E_x$  とすれば次式の線形システム方程式が得られる。

$$E_x = CX \quad (5)$$

(5)式の解ベクトル  $X$  は、画像の各固有パターンの重みを要素とする  $n$  次のベクトルである。固有パターンベクトルの次数  $m$  が固有パターンの個数  $n$  よりも大きいと仮定すれば、システム行列  $C$  は  $m$  行  $n$  列の長方形列となり、解ベクトル  $X$  の導出に(6)式の最小自乗法を適用することができる。

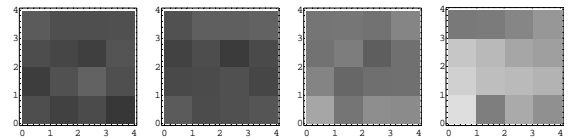
$$X = [C^T C]^{-1} C^T E_x \quad (6)$$

ここで、(6)式を満たすベクトル  $X$  が第  $j$  番目の要素が 1、他の要素をすべて 0 であれば、固有パターン  $E_x$  が画像の固有パターン  $E_j$  に等しいことになり、対象画像を固有パターン  $E_j$  の画像と同定できる。

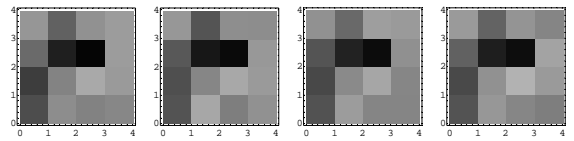
現実には、(6)式の解ベクトル  $X$  で、特定の要素が 1、残りはゼロとなり得ることが無い。このような場合、最大値を取る要素を認識された画像の固有パターンとする。

##### 4.3. 動作認識

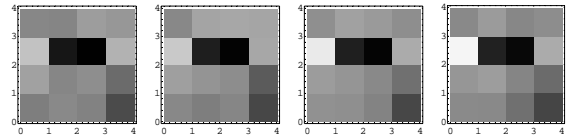
筆者らは対象被験者の無呼吸症候群や血栓などの病状を、呼吸や新陳代謝から自動的に診断できるエキスパートシステムの開発を究極の目的としている。本節ではこの基礎研究として、前節で可視化された準動的圧力分布から感圧椅子に対する被験者の動作の同定を行う。



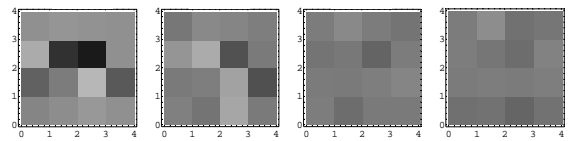
(1) 直立から着座までの動き



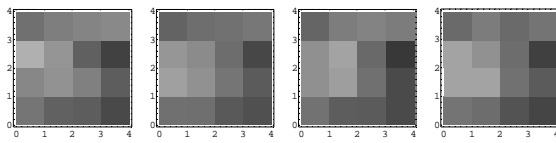
(2) 着座での左足を組む動き



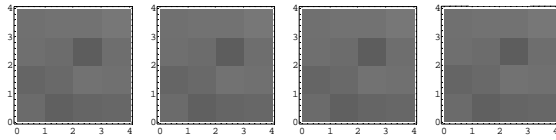
(3) 着座での右足を組む動き



(4) 着座から直立までの動き



(5) 椅子に準動的に着座した状態



(6) ゼロ点状態

図 9. 準動的圧力分布データベース

前節では直立状態から着座までの動作を可視化したが、ここでは着座した状態で左足を組んだ場合、同様に右足を組んだとき、着座状態から起立する場合、静的に着座した場合、および被験者が着座して居ない場合、すなわち、圧力が加わっていない場合、それぞれに対する順静的圧力分布動画像からそれぞれの固有パターンを抽出し、データベースを構築した。図 9 は測定された圧力分布のフレーム画像例を示す。ここでは 0.005s 毎に測定を行い、各圧力分布動画像のフレーム枚数は 32 とした。

さらに、臀部の形状に依存しない特性を抽出するため、解像度を 4×4 の圧力分布とした。また、認識対象となる入力圧力分布はデータベース構築時と同様な環境で測定した。

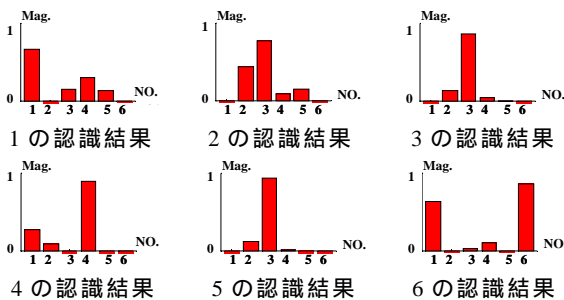


図 10. 認識結果

図 9 のデータベース及び入力映像からそれぞれ固有パターンを抽出し、(6)式を用いて解ベクトル  $X$  を求め、解ベクトル中の最大値をとる要素で同定する。認識結果として得られた映像の妥当性を吟味するために、それぞれの解ベクトルの要素を図 10 に示す。図中の横軸は映像データベースの番号であり、図 9 の番号と対応している。図 10 の結果から、動作の大きい起立時や着座時は確実に認識されるが、供試センサー感度限界から、比較的大きな圧力分布変化伴わない場合の識別が困難であることが判明した。

## 5. まとめ

本論文では、介護・患者の就寝時の状態を自動的に把握する知的ベッドシステム開発の基礎となる臀部の圧力分布の測定について述べた。

まず、耐久性・クッション性の良いスプリングを用いた変圧器型スプリング圧力センサーを試作し、スパイラルピッチを無視した近似計算値と実験値は圧力に対して

同様な傾向を持ち、基礎的設計の考え方が妥当であることを示した。

次に、実際に 34×34cm の正方形平面上に変圧器型スプリング圧力センサー 16 個を 4×4 のアレイ状に配置した感圧椅子を試作し、5 人の人間が感圧椅子にほぼ安定に着座した状態の準静的圧力分布を測定した。その結果、個々の人間によって異なる準静的圧力分布であることを示した。さらに、人間が直立状態から着座するまでの準動的圧力分布を測定し可視化を試みた。その結果、臀部の形状・体重及び一連の動作により、それぞれ固有の普遍量を持つ圧力分布となることが判明した。

最後に、感圧椅子に対する一人の異なる 6 動作から生成した準動的圧力分布動画像を用いて、各動作の識別を試みた。その結果、比較的大きな圧力分布の変動を伴う動作は確実に識別可能であることを示した。

以上の結果から、究極の目的である動圧力分布自動認識エキスパートシステム開発がある程度可能であることを示唆する基礎実験として十分な成果を得た。

## 参考文献

- [1] 稲垣大、田口敏行、安田栄一、土井俊一、"シート感性能評価法"、豊田中央研究所 R&D レビュー、Vol.1、35、No.4、2000 年。
- [2] 西田佳史、森武俊、溝口博、佐藤知正、"視覚情報による睡眠時無呼吸症候群診断手法"、日本ロボット学会誌、Vol.16、No.2、274 - 281、1999 年。
- [3] 若林健一、早野誠治、齋藤兆古、國井利泰、"画像の固有パターンと画像認識への応用"、可視化情報学会誌、Vol.19、No.1、91 - 94、1999 年。
- [4] 遠藤久、早野誠治、齋藤兆古、"電磁界の可視化手法に関する考察"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-01-069、2001 年。
- [5] 佐藤隆紀、早野誠治、齋藤兆古、"動画像処理の手法の提案と電子・電磁機器の非破壊検査への応用"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-00-222、2001 年。

キーワード .

変圧器型圧力センサー、準動的圧力分布、可視化

.....

Summary .

**Transformer Type Pressure Sensor Array and Its Application**

Chikara Tabata    Seiji Hayano    Yoshifuru Saito  
Graduate school of Engineering, Hosei University

Principal purpose of this study is to exploit a fully computerized monitoring system while a hospitalized patient is sleeping or waking on a bed without any personal privacy violation by measuring a pressure distribution in each of the patient. In order to develop a system, we have previously proposed a transformer type pressure sensor, which keeps only cushioniness for human interface but also toughness to any types of pollution. This transformer type pressure sensor is composed of the spring coils as a primary coil, which keeps cushioniness as a bed, and secondary coils to measure a pressure as an induced voltage.

In the present paper, we have worked out a pressure sensor array and equipped to a sitting surface of chair. Further, we have measured the static as well as quasi-dynamic pressure distributions when changing the sitting pose. To cognize the situation of sitting pose, we have applied the monochrome image cognition methodology. As a result, it is revealed that major sitting pose can be cognized. Thus, we have succeeded an initial test of our fully computerized patient monitoring system without any violation of human privacy.

Keywords .

Transformer Type Pressure Sensor, Quasi-static Pressure Distribution, Visualization