

変圧器型圧力センサーアレイとその応用に関する研究

田畑 力*, 早野 誠治, 斎藤 兆古 (法政大学)

Transformer Type Pressure Sensor Array and Its Application
Chikara Tabata, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito (Hosei University)

Abstract

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 in an initial test of our fully computerized patient monitoring system without any violation of human privacy.

キーワード: 変圧器型圧力センサーアレイ, 圧力分布, 画像認識, 状態把握システム

(Transformer type pressure sensor array, Pressure distribution measurement, Image cognition, state cognition system)

1. まえがき

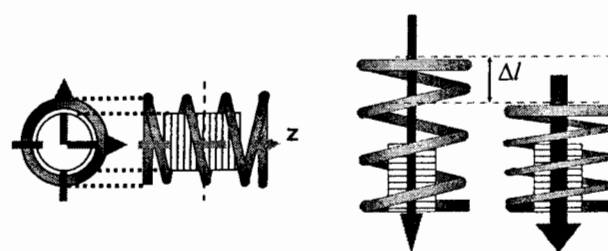
近年, 人工知能 (AI) 技術やロボット工学の研究・開発に伴い, 外界情報を感知するセンサーは極めて重要な構成要素である. 機械量を感知する圧力センサーは, 車のドアの開閉部や計算機のキーボードなどのセンシングデバイスとしてすでに我々の身近に多岐に渡って存在している. また最近では, 人間社会の環境を向上させるための一方途として, 人間が日常的に使用するベッドや椅子などの家具類の最適形状設計¹⁾, さらに, 患者の状態把握のため医療・介護用ベッドや椅子へも用いられている. 特に後者では, 人間の就寝状態や着座状態の圧力分布を測定することで, 個々の人間によって異なる新陳代謝や呼吸活動, 姿勢など, 様々な有用な情報抽出が期待できる.²⁾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像認識手法を適用し, 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. 変圧器型スプリング圧力センサー

<2.1> 動作原理



(a) Schematic diagram (b) Principle of operation

図1 変圧器型スプリング圧力センサーの動作原理
Fig.1 Schematic diagram and principle of a transformer type spring pressure sensor

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. 一次側に交流定電流を通電させ, 二次側に誘起する電圧を測定する. 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 Δl 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 Δl 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。

<2.2> 基本設計

実際に変圧器型スプリングセンサーを装着した椅子や医療・介護用ベッドを製作するには、予め所望の感度を有する変圧器型スプリングセンサーの設計を行わなければならない。ここでは、前節で述べた原理に基づき、センサー出力に直接関係する電気的設計に関して概説する。

図 2 は、変圧器型圧力センサーの電気的基礎設計のために、変圧器型圧力センサーの機械的構造の側面から見た断面を示す。スプリングに加わる圧力 F と変位量 Δl の関係は、スプリングの弾性係数を k とすれば、(1)式で与えられる。

$$F = k\Delta l \quad (1)$$

(1)式の変位量 Δl はスプリングで構成されたソレノイドコイル型一次コイル長を変化させる。このため、電気回路パラメータは圧力 F の関数となる。従って、変位量 Δl による圧力が電気的な量として測定される。また、磁界源となる一次コイルを形成するスプリングから発生する磁束は理論上無限遠点にまで分布するが、センサーコイルには局所的な磁束のみが鎖交するため、如何にこの二次コイルに鎖交する磁束数を増加させるかが、センサー感度向上へ直接反映することになる。従って、変圧器型スプリングセンサーでは、電気的設計定数である一次自己インダクタンスや一次・二次間の相互インダクタンスの値が重要な電気的設計の基礎パラメータとなる。

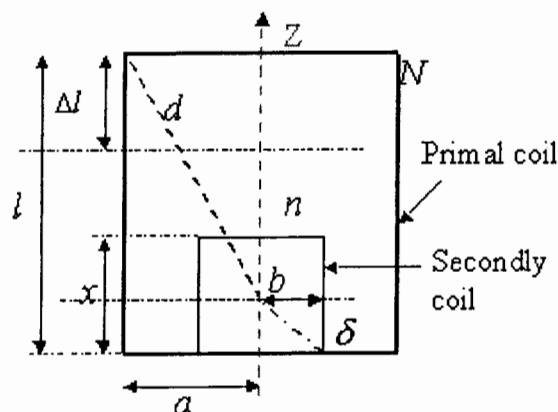


図2 変圧器型圧力センサーの2次元断面構造
Fig. 2 Side cross-sectional view of transformer type pressure sensor

真空中の透磁率を μ_0 、 K を長岡係数、 l および Δl をそれぞれ Fig. 2 に示す一次コイルの長さおよび変位量とし、一次コイルのピッチを無視すれば、一次コイルであるスプリングの自己インダクタンスは(2)式

で与えられる。(2)式から、一次コイルの自己インダクタンスは変位量に Δl 比例して増加することが判る。

$$L = \mu_0 \frac{\pi a^2 N^2}{l - \Delta l} K$$

スパイラル状に巻かれた一次・二次コイルのピッチを無視すれば、一次コイルを形成するスプリングと二次コイルであるセンサーコイル間の相互インダクタンス M は(3)式で与えられる。(3)式中で、一次・二次コイルの巻数や寸法などの諸定数 x, n, δ, d は Fig. 2 に示されている。

$$M = \frac{4\pi^2 \mu_0 n N}{2d} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{d^2} \frac{\delta^2}{d^2} \{ \lambda_{2n} P_n(x) \} \right] \quad (3)$$

(3)式を用いて二次コイルに誘起する電圧は(4)式で与えられる。ただし、 I は一次電流であり、二次回路が開回路であるため二次電流は無視する。(4)式が実際にセンサーから出力される電圧信号となる。

$$U = -\frac{d}{dt} MI \quad (4)$$

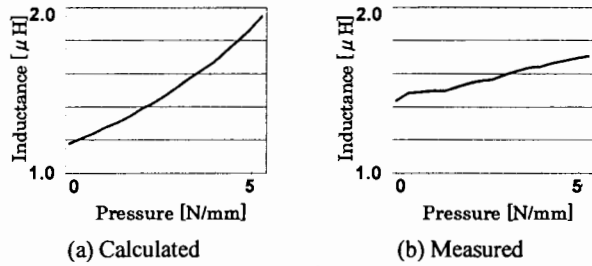
<2.3> 供試センサーの圧力-出力電圧特性

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。

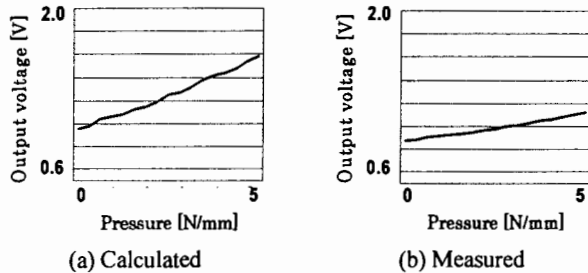
表 1 供試センサーの形状
Table 1 Various constants of a tested sensor

	Radius [mm]	Length [mm]	Number of Turns [turn]	Diameter of Conductor [mm]
Spring	14	68	12	2.3
Sensor 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 2 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、(1)式で計算した近似値と実測値としてそれぞれ図 3(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 4(a),(b)に示す。図 3 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。



(a) Calculated (b) Measured
 図3 1次コイルのインダクタンス対圧力特性
 Fig. 3 Primary inductance vs. pressure characteristics



(a) Calculated (b) Measured
 図4 2次コイルのセンサー出力電圧対圧力特性
 Fig. 4 Secondly voltage vs. pressure characteristics

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 5 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 の交流電流を通電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 コンバータボードを介し、逐次にデータを計算機へ取り込み画像化する。

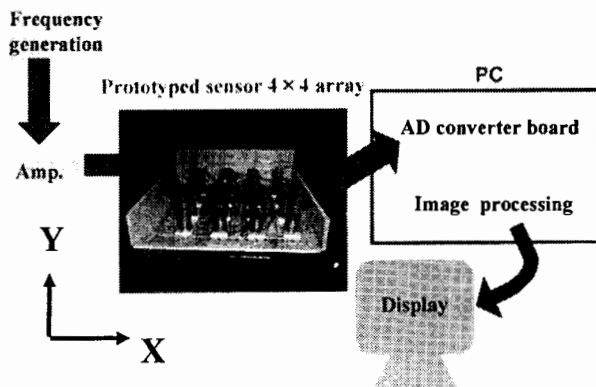


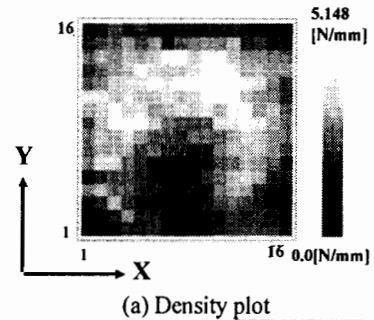
図5 圧力分布可視化システムの概要
 Fig. 5 Schematic diagram of pressure distribution visualizing system

<3.2> 静的圧力分布測定

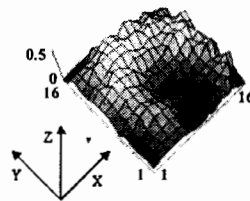
前節に示すシステムを用いて 20 代男性が着座した場合で、ほぼ安定している環境での圧力分布測定例を図 6 に示す。図 6(a)はセンサーアレイの圧力分布図であり、白い部分は圧力が大きく黒い部分は

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 6(a), (b)からこの男性は、図 6(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 7 に示す。図 6、及び図 7 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。



(a) Density plot



(b) 3D



(c) Picture of measurement

図6 被験者が着座時の感圧椅子に加わる圧力分布
 Fig. 6 Pressure distributions when sitting a human on the tested chair

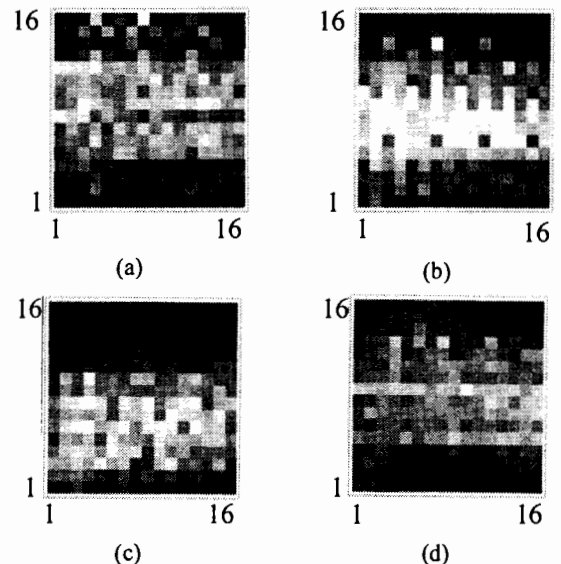


図7 4人の異なる人間が着座した時の圧力分布
 Fig. 7 Static pressure distributions when sitting four different men on the tested chair

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。

<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。

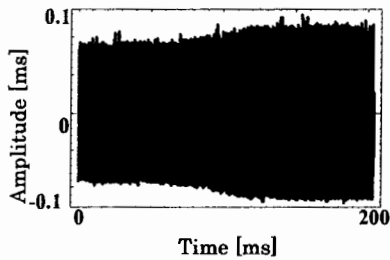


図8 変圧器型圧力センサーの時間領域出力信号
Fig. 8 An example of the output signal of transformer type spring pressure sensor

図8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8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8で時間軸の中間部にあたる8フレームを図9に示す。図9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状況が窺える。

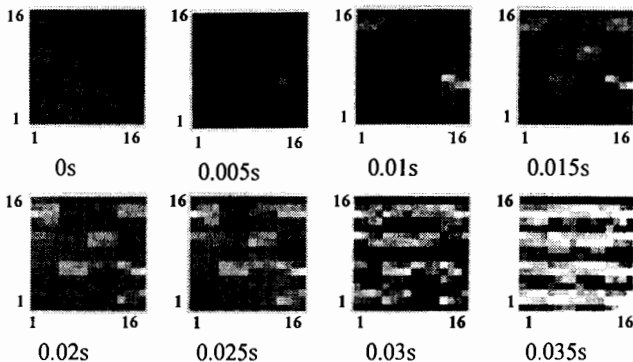


図9 被験者が直立状態から着座するまでの準動的圧力分布
Fig. 9 Quasi-dynamic pressure distributions from standing to sitting behavior on the tested chair

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。

$$\begin{aligned} image &\in pixel_{i,j} \\ pixel_{i,j} &\in f_m(x_i, y_j) \\ i &= 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ 0 &\leq f_m(x_i, y_j) \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

(5)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 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

$$I_{Mono} \in M_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

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。

$$I_{Mono}^D \in Round \left[D \times \frac{Mi}{\text{Max}[I_{Mono}]} \right], \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

(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9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。

$$C = [E_1, E_2, \dots, E_n] \quad (9)$$

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。

$$E_x = CX \quad (8)$$

(8)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 列の長方形行列となり、解ベクトル X の導出に(10)式の最小自乗法を適用することができる。

$$X = [C^T C]^{-1} C^T E_x \quad (10)$$

ここで、(10)式を満たすベクトル X が第 j 番目の要素を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、(10)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。

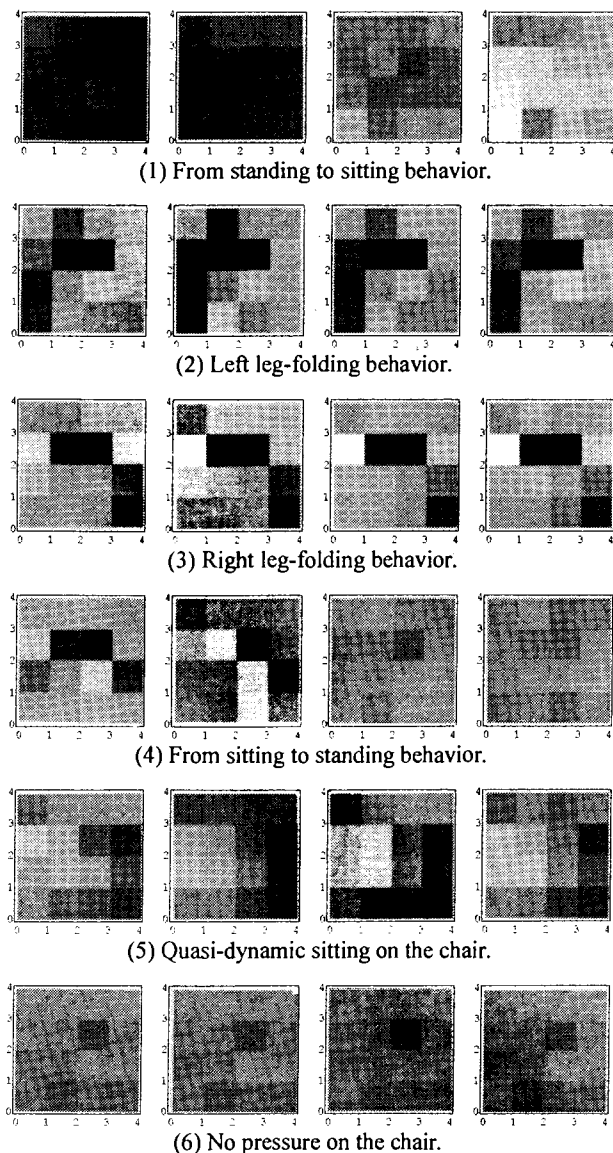


図10 準動的圧力分布データベース
Fig. 10 Database of dynamic pressure distributions

前節では直立状態から着座までの動作を可視化した。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10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。

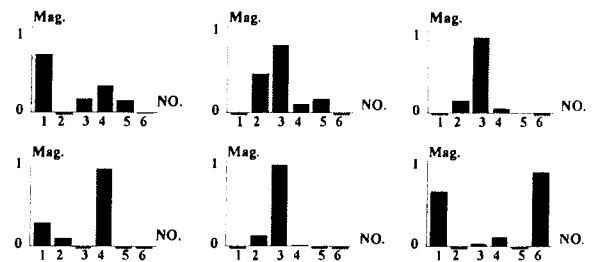


図11 認識結果
Fig. 11 Result of image cognitions

図10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、(11)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11に示す。図中の横軸は映像データベースの番号であり、図10の番号と対応している。図11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に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 34×34 [cm]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 のレイアウト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：「シート感性的品質評価法」，豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.35, No.4, (2000-12)
- [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, pp.274-281 (1999)
- [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, pp.91-94 (1999)
- [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)
- [5] 妹尾勇・早野誠治・齋藤兆古：「画像処理的手法による磁気センサー信号解析」，電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-115, (2000)
- [6] 佐藤隆紀・早野誠治・齋藤兆古：「画像処理的手法による磁気センサー信号解析」，電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-222, (2001)

原稿受付日

平成 14 年 10 月 22 日
