

229 変圧器型圧力センサーを用いた圧力分布の可視化

田畑 力[○], 早野 誠治, 斎藤 兆古(法政大学)
堀井 清之(白百合女子大学)

Visualization of Pressure Distributions by Using Transformer Type Pressure Sensors

Chikara TABATA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

In modern human society, various types of pressure sensor are widely used for various fields, e.g. simple weight measurement, pressure distribution of the chairs and so on. In particular from medical viewpoint, dynamic pressure distribution measurement makes it possible to observe a patient condition without any personal privacy violation. Because of human body metabolism, dynamic pressure distribution of the patient is capable of inform various important medical data such as heartbeat, breathing and pulse count.

In the present paper we have carried out a pressure distribution measurement as a first step to exploit a smart bed system having dynamic pressure visualizing capability. Employed pressure sensor is a transformer type, which keeps cushioniness as well as toughness as a bed in medical use.

Keywords: Pressure sensor, Pressure distribution, Visualization

1. まえがき

現代社会では、様々な分野において圧力センサーが広汎に使われているが、商品化されている圧力センサーの多くは工業計測用であり、計測しやすい環境が整えられた状態の中で使用されている。しかし、生物の圧力分布例えば人間が就寝時にベッドへ与える圧力分布を考えた場合、圧力分布は一様でなく、個々の人間の代謝に依じた就寝状態や健康状態によって異なり、医学的観点から見れば様々な有用な情報を与える。

本研究は、医療及び介護を受けている患者に対して、患者の状態を患者のプライバシーを侵害すること無く把握する圧力分布を測定可能とするシステム開発に関するものである¹⁾³⁾。医療や介護の対象は人間であるため、常に代謝や呼吸などを伴う。これは、圧力分布は単純な静止画像として取り扱えず、必然的に動画像となることを意味する。

本論文は、圧力分布を動画像として表す動圧力可視化システム開発の基礎として、クッション性に劣る導電性ゴムやセラミックス圧力センサーでなくクッション性を損なわないスプリングを用いた変圧器型圧力センサーアレイを用いた椅子を試作し、臀部の圧力分布を測定した結果を報告する。

2. 圧力測定

2.1 変圧器型スプリング圧力センサー

Fig. 1は我々が試作した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クッション性のある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Fig. 1に示すZ軸に平行して通るためである。

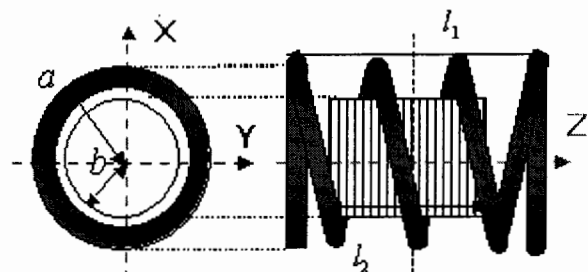


Fig. 1 Schematic Diagram of a Transformer-Type Pressure Sensor

一次側に一定の交流電流を通電させ、二次側に誘起する電圧を測定する。圧力で一次コイルであるスプリングが縮小すれば二次コイルに誘起する電圧が増加する。これが変圧器型スプリング圧力センサーの動作原理である。

Table 1 は試作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。

Table 1 Various Constants of 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

2.2 供試圧力センサー特性

一次コイルをスプリングコイルで構成する変圧器型圧力センサーの一次電流を測定するために、一次コイルに $1[\Omega]$ の抵抗を直列接続した。一次コイルの印加電圧は周波数 $10[\text{kHz}]$ 、最大振幅 $1[\text{A}]$ の正弦波である。Fig. 2 に入力電流波形を示し、Fig. 3 に Fig. 1 に示す Z 軸方向へ圧力を $0.33[\text{N/mm}]$ 刻みで加えた場合の一次コイルの自己インダクタンス $L[\text{H}]$ の変化を示す。さらに Fig. 4 は二次コイルに誘起する出力電圧の実効値を示す。

なお、筆者らの究極のセンサーは 3 次元圧力センサーであるが、ここでは基礎実験として Fig. 1 に示す Z 方向成分のみを測定した。

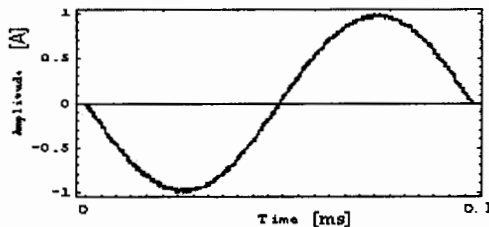


Fig. 2 Input Current Waveform

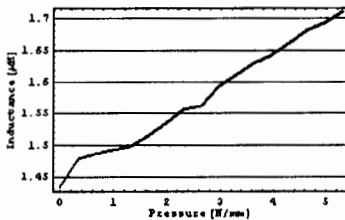


Fig. 3 Primary Inductance vs. Pressure Characteristic

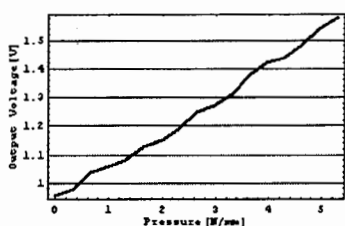


Fig. 4 Secondary Induced Voltage vs. Pressure Characteristic

Fig. 3 と Fig. 4 を比較すると、一次励磁コイルの自己インダクタンスと二次誘起電圧は圧力に対して同一の傾向を持つ特性であることが判る。これは、二次誘起電圧を直接測定しなくても、一次インダクタンスを測定すれば圧力測定が可能であり、必ずしも常時励磁電流を通电する必要がないことを意味する。

2.3 圧力分布測定

Fig. 1 に示した圧力センサーを $34 \times 34[\text{cm}]$ の正形状平面に 16×16 個アレイ状に配置した感圧椅子を試作した。

20 代男性が感圧椅子に座り、安定した準静的状態における圧力分布測定例を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は圧力分布の等高線図であり、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、Fig. 5(b) は Fig. 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。

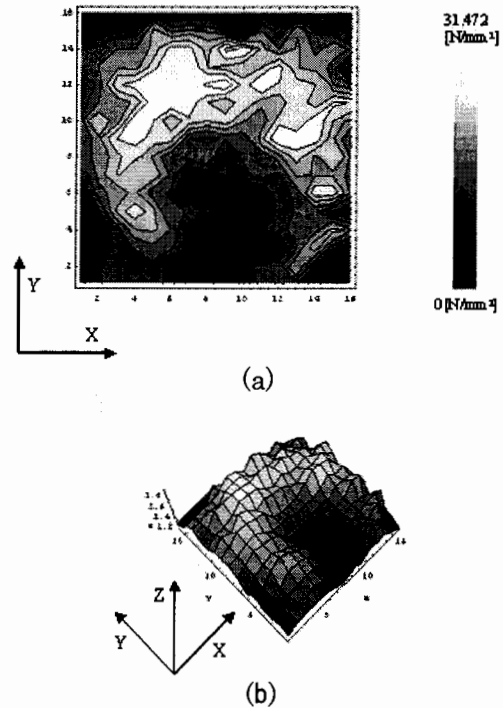


Fig. 5 Pressure Distribution When Sitting a Human on the Tested Chair

Fig. 5 からこの男性は、安定に準静的に座った場合、右側に重心を置く傾向があ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が確認された。

3. 変圧器型スプリング圧力センサーの設計

3.1 電氣的基礎設計モデル

第 2 章では、変圧器型スプリングセンサーをアレイ状に配置した椅子を試作し、圧力分布の可視化が原理的に

可能であることを検証した。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、センサー出力に直接関係する電気的設計の考え方に関して概説する。

Fig. 6 は、変圧器型圧力センサーの電気的な基礎設計のために、変圧器型圧力センサーの機械的構造を簡略化したモデルを示す。

一次コイルを形成するスプリングの可動方向である Z 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に変化を喚起する。圧力による変位 Δl は一次励磁コイルによる磁界を変化させ、二次センサーコイルに鎖交する磁束数の変化を促し、結果として圧力を電圧として感知する。これが変圧器型圧力センサーの基本動作原理である。

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、二次コイルを形成するセンサーコイルにはその局所的な磁束のみが鎖交するため、如何に二次コイルに鎖交する磁束を増加するかがセンサー感度向上へ直接反映するかは自明であろう。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設計基礎パラメータとなる。

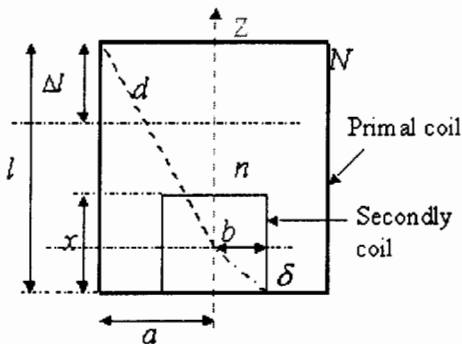


Fig. 6 Cross-Sectional Side View of Transformer Type Pressure Sensor Model

3.2 インダクタンス

真空中の透磁率を μ_0 、 K を長岡係数、 l および Δl を Fig. 6 に示す一次コイルの長さおよび変位量として、一次コイルの自己インダクタンスは(1)式で与えられる。

$$L = \mu_0 \frac{\pi a^2 N^2}{l - \Delta l} K \quad (1)$$

$$K = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k'} \left\{ \frac{k'^2}{k^2} (A - E) + E - k \right\}$$

$$k^2 = \frac{4a^2}{4a^2 + l^2}$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$

$$A = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

(1)式から、一次コイルの自己インダクタンスは変位量 Δl に比例して増加することが判る。Fig. 3 は(1)式の妥当性を裏付けている。

Fig. 7 は、一次コイルの自己インダクタンスを(1)式より算出した理論値と実測値の比較を示す。Fig. 7 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同様であることが判る。

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が実現可能であることを示唆している。

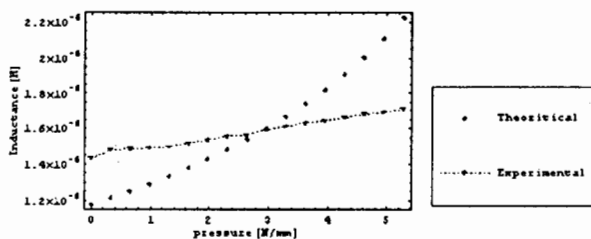


Fig. 7 Comparison Theoretical and Experimental Self Inductance Values

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、スパイラル状に巻かれた一次・二次コイルの形状を勘案して解析的に求めることが不可能である。従って、ここでは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した近似相互インダクタンスの解析解(2)式を用いる。

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

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \left[\frac{d^n}{dx} (x^2 - 1)^n \right]$$

但し、 x, n, δ, d は Fig. 6 中に示す値である。特に距離 d は一次コイルの全長 l と

$$d = \sqrt{\left(l - \left[\frac{x}{2} \right]^2 \right) + a^2} \quad (3)$$

で関係し、二次センサーコイルの半径 a と長さ x は一定値であるから、 d と l はほぼ比例関係である。すなわち、距離 d の減少は変位 Δl の増加を意味し、相互インダクタンス M の増加を促す。その結果、二次センサーコイルの誘起電圧の増加となり、Fig. 4 の結果は(2)式の妥当性を裏付けている。これが従来型変圧器圧力センサーの基本原理の理論的根拠である。

3.3 圧力と出力電圧の関係

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 κ とすれば、(4)式で与えられる。

$$F = \kappa \Delta l \quad (4)$$

(4)式で、変位量 Δl は(1)-(3)式のパラメータとなっていることに注意すべきである。すなわち、圧力 F に比例する変位量 Δl は電気回路パラメータの関数であるため、圧力が電氣的な量として測定される。

Fig. 8 に変圧器型スプリング圧力センサーの電気回路を示す。ここで、一次側を形成するスプリングの自己インダクタンスは L_1 、二次側を形成するセンサーコイルの自己インダクタンスは L_2 、相互インダクタンスは M であるから、一次側を形成するスプリングに誘起する逆起電力 U_1 と二次側を形成するセンサーコイルに生ずる起電力 U_2 は、二次回路が開回路であるため二次電流は無視できるから、それぞれ(5)、(6)式で与えられる。

$$U_1 = -\frac{d}{dt} L_1 I_1 \quad (5)$$

$$U_2 = -\frac{d}{dt} M I_1 \quad (6)$$

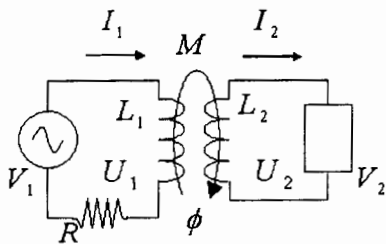


Fig. 8 Electric Circuit Model of the Transformer Type Pressure Sensor

(5)、(6)式で、準静的な場合、一次自己インダクタンス L_1 と相互インダクタンス M は一定値とみなせ、さらに一次励磁電流 I_1 の時間変化率 Fig. 2 に示すように一定である。このため、圧力 F による変位量 Δl と二次誘起電圧はほぼ比例する。

4. 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圧力分布の

測定と可視化法について述べた。

実際に 34×34 [cm] の正方形平面にセンサーを 16×16 個アレイ状に配置した感圧椅子を試作し、被験者が感圧椅子に座った状態で圧力分布測定した。その結果、被験者は右側に重心を置く傾向があることが観察され、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述べた。

さらに、変圧器型スプリングセンサーの近似解析法について述べ、解析解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。一次・二次コイルの断面形状やスパイラルピッチ等を考慮して厳密に解析すれば、比較的容易に変圧器型スプリングセンサーの設計が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 茂田幸康, 早野誠治, 齋藤兆古: 磁気センサー信号処理に関する考察, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-273 (2000).
- 3) Sato, T., Marinova, I., Hayano, S., Saito, Y: Dynamic Image Cognition Along with Eigen Patterns, The 2nd Japan-Australia-New Zealand Joint Seminar (2001).