準動的接触圧力分布を測定する センサシステムの開発*

尾田十八^{*1} 本 悟^{*2}
井上二郎^{*3} 多保田純^{*3}

Development of a Sensing System Measuring Semidynamic
Contact Pressure Distributions

Juhachi ODA , Satoru MOTO , Jirou INOUE and Jun TABOTA

In this paper, a sensing system measuring semidynamic contact pressure distributions is proposed. The system is the development of the sensing system proposed previously for static contact pressure distributions. The sensing material is made of piezoelectric ceramics and a special electric circuit is designed to measure electric charge in the material. The semidynamic contact pressures are determined using the repeated static measurement at high speed. The sampling time is 25 ms and the measurement is repeated in 255 cycles. Therefore, we can obtain the dynamic behavior of contact pressure distribution for about 6 seconds by using this system. The semidynamic contact pressure distributions for several problems are determined. The obtained dynamical total force variations are compared with that of the corresponding force.

Key Words : Measurement , Experimental Stress Analysis , Piezoelectric Ceramics , Sensor , Automatic Sensing System , Dynamic Contact Pressure.

1 . 緒 言

近年, F A 等の分野ではロボットの急速な実用化とその普及により, ロボットハンド部に設置すべき高性能な接触覚センサの開発が要求されている。また, M E の分野でも感覚機能を失った身体障害者の人工皮膚の開発や足圧測定器, 床ずれ防止用特殊ベットの開発等が要求され, 高性能接触覚センサが不可欠な状況となっている。

そこで著者らは, これまで圧電セラミックスが圧力に応じて分極電荷を発生する特性に注目し, これをセンサ素子として, 20×10点のマトリックス状に配置した静的な圧力分布測定用センサを試作した⁽¹⁾⁽²⁾。

また, マイクロコンピュータを用いて専用の制御回路をコントロールすることで, このセンサによる静的接触圧力分布の自動測定を可能とした。しかし, 前報までのセンサシステムは測定対象が静的な現象に限られているなどの制限があり, それによって, 用途が限定されたものであった。

そこで, 本研究では, このセンサシステムをより実用的, 一般的なものに近づけることを目的として時間的に変動する現象をも測定可能とするように改良した。その際にシステム的大幅な変更は行わず, システムのモジュール独立性を有効に活用し, 専用制御回路の変更でこれに対応した。さらに, このセンサシステムを使用していくつかの時間的に変動する接触圧力分布を測定し, それらの圧力分布状況やその時間的な変化からセンサ自身の特性や性能を評価し, 有効性を確認したのでここに報告する。

* 平成2年3月13日 東海支部第39期総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年3月29日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

^{*2} 准員, (株)PFU (〒920 石川県河北郡宇ノ気町)。

^{*3} (株)村田製作所 (〒617 長岡京市天神2-26-10)。

2. 測定原理

圧電材料とは、圧力を負荷する(ひずむ)と電荷を発生する(圧電効果)材料であり、圧電セラミックスはその一種である。負荷した圧力と発生する電荷の間には比例関係がある。すなわち、一軸状態で負荷した圧力を p 、発生する電荷を Q とすると、次の関係が成立する。

$$p \propto Q \quad (1)$$

本研究で用いた圧電材料は $\text{Pb}(\text{Mn}, \text{Nb}, \text{Cr})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ 系の3成分圧電セラミックス(一般には PZT と呼ばれている材料)である。形状は電極面積 $8 \times 6 \text{ mm}$ 、高さ 6.7 mm の直方体で、その電気的、機械的特性を表1に示す。

さて前述したようにセンサとしては圧電セラミックス素子(以下、素子と略す)に圧力を負荷しその結果生ずる電荷 Q を測定できればよい。しかし、素子の容量は表1のように一般のコンデンサ(以下 Capa と略す)に比較して非常に小さいため、それ自体で電荷を静的に保持し続けることは困難である。そのため、著者らは図1に示すように素子に Capa を並列に接続し、その Capa に電荷を蓄える回路を考案した⁽¹⁾。すなわち、素子 C_1 と並列に $\text{Capa } C_2$ を接続して素子 C_1 に発生した電荷を $\text{Capa } C_2$ に蓄え、出力スイッチ(SW1)を閉じることによって $\text{Capa } C_2$ に蓄えられた電荷を放電させ、測定する。

出力スイッチ(SW1)には FET が用いられている。この回路の出力波形は後段の積分回路(図2参照)によって測定される。積分回路とは入力電圧波形を積分するもので、その出力は発生した電荷 Q に放電抵抗を乗じたものになる。なお、積分回路の出力は次第に減少するため後段に図3のようなピークを保持するピークホールド回路(以下 P/H 回路と略す)を付加してある。以上のような回路を基本回路の後段に設けることにより、素子に発生した電荷を定電圧として検出できる。

以上が、前報までで説明した静的圧力測定の原理である。これに対し、本研究では、この静的圧力センサを時間的に逐次用いることによって、時間変動する圧力を測定可能とした。すなわち、その方法は次のようなものである。

図4に示すような時間的に変動する荷重が素子に負荷されているものとする。この荷重に対して微小時間 Δt ごとに静的測定を行えば、1回の測定で求められるセンサ出力電圧 ΔV と荷重増分 Δp との間には、式(1)と同様な次の関係が成り立つ。

$$\Delta p = k \cdot \Delta V \quad (2)$$

表1 圧電セラミックスの電気的、機械的特性

Electrical Characteristic	Symbol	Value
Relative Permittivity	$\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0}$	700
Piezoelectric Strain Constant	d_{33}	$116.8 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
	d_{31}	$-38.7 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Capacitance	C	51.1 pF
Resistance	R	$1 \times 10^{11} \Omega$

Mechanical Characteristic	Symbol	Value
Young's Modulus	E	111 GPa
Poisson's Ratio	ν	0.313
Compressive Strength	σ_b	0.41 GPa
Density	ρ	7.85 g/cm ³

図1 基本回路

図2 積分回路

図3 ピークホールド回路

図4 時間的に変動する圧力の測定原理

ここで、 k は電圧荷重係数である。よって任意時刻の荷重 $p(t)$ はそれ以前の荷重増分を加え合わせることににより得られる。すなわち、

$$p(t) = \sum_{i=1}^j \Delta p_i \quad (3)$$

図中に示すように、圧力が減少しているときには、荷重増分として、負の圧力、つまり、引張りが作用していることになり、圧力の時とは逆符号の電圧が出力される。したがって、測定回路では、正負両電圧を測定することが要求されるので、前報の回路のようにP/H回路を接続したままでは正負両方向同時に測定することが不可能となる。そこで、P/H回路を取り除くことにした。このことにより、負の電圧を測定することが可能となるが、積分回路出力は次第に減少するため、コンピュータを用いて高速にA/D変換することにより、この問題点を解決することを考えた。

このような回路を用いて静的な圧力-出力電圧関係を測定した。その結果を図5に示す。これより圧力と出力電圧との間には荷重が正、負のいずれの場合でも優れた線形性のあることがわかる。また、この図から先ほどの電圧荷重係数 k も求めることができる。

3. 測定用センサシステム

3.1 測定手順 前節で述べたように、結局本研究で使用した回路は図1に示したように素子 C_1 と並列に充電用 $Capa C_2$ を接続し、 $Capa$ の後段には出力スイッチ用FET(SW1)を取り付け、さらにこの後段には積分回路が設けてある。積分回路には積分回路リセット用FET(SW2)がある。このような回路を用い

図5 電圧-荷重関係

た静的な測定手順を以下に簡単に説明する。

- (1) 初期段階としてすべてのスイッチをONとして $Capa$ 内の電荷をクリアし、積分回路をリセットする。
- (2) すべてのスイッチをOFFとする。
- (3) 荷重を静的に負荷する。この時、素子に発生した電荷のほとんどは $Capa C_2$ に蓄えられる。
- (4) 出力スイッチ(SW1)をONとして電荷を放電する。
- (4) 積分回路出力をA/D変換する。
- (5) 測定を繰り返すときは(2)にもどり、さもなくば終了する。

以上のような手順により得られた積分回路出力電圧は、あらかじめ圧力-出力電圧関係を測定しておくことにより、圧力に変換することができる。また、基本回路をマトリックス状に複数個設け、(2)から(5)の操作を各素子について順次行えば、接触圧力分布を測

図6 システム構成図

定することができる。同時に各素子が受け持った荷重を加算することによりセンサに加わった総荷重も測定できる。この総荷重はセンサの精度の評価因子の1つとなる。このような静的測定を前述のように時間的に連続して行い、メモリ内で加え合わせて時間的に変動する圧力分布を測定する。

3・2 センサシステムの概要 本センサシステムの構成図を図6に示す。センサシステムは大きく分けてセンサ受圧部、専用制御回路部、データ処理部の3つのモジュールに分割されており、相互にケーブルで接続されている。受圧部には図7に示すように基本回路が200個配置されている(その全体寸法は $300 \times 150 \text{ mm}$)。専用制御回路部は積分回路、コンローラおよび切換回路、A/D変換器、バッファ(一時記憶メモリ)を含んでいる。また、データ処理部のマイクロコンピュータ内には、データ入出力用の汎用インターフェースボードが増設されている。

測定の開始はコンピュータからのサンプリング開始信号によって行われる。受圧部で発生した電荷は、専用制御回路部のコントローラで順次選択された積分回路を通ることにより定電圧にされ、回路内のA/D変換器に送られる。A/D変換器はこれら電圧値をデジタル量に変換する。そしてそれらはバッファに記憶される。測定が終了した段階ではバッファに各時間に対応した電圧値が格納された状態になっている。そのデータをホストのマイクロコンピュータが一つずつ読みだして加算を行う。電圧値は、あらかじめ求められている各素子の圧力-電圧係数で圧力、あるいは各素子が受け持った荷重に変換処理され、種々の出力機器に記録、表示される。

CRTへの出力例を図9(a)(b)に示す。このように圧力分布測定値を(a)等高線表示、(b)棒表示することにより分布形状が容易に把握できる。これら1回の圧力分布測定に要する時間は、サンプリングタイムが 25 ms であり、バッファの容量により制限されるが連続255回のサンプリングが可能となっている。し

図9 (a)足圧分布の画面表示(等高線表示)

たがって、約6秒間の時間的な変化した圧力分布測定ができる。これは、前報のセンサが1回の静的測定に対し約2秒要したのに比較して大幅に高速化されている。

4. 測定例と考察

本章では、本センサシステムを使用して各種の時間的に変動する接触圧力分布を測定した結果を示す。

4.1 ボールの接触圧力分布 バレーボールを図10に示すように手で押すことにより平面に接触させた時の接触圧力分布を測定した。ボールの接触荷重とその時間的な変化を正確に知るため、図示のようにセンサ下部に平板型ロードセルを設置した。図11(a)は接触時のセンサによる測定総荷重の時間変化をロードセルによる測定値と比較して示したものである。また図

図7 センサ受圧部

図8 専用制御回路部

図9 (b)足圧分布の画面表示(棒表示)

11(b)は接触圧力分布の等高線表示の時間的変化を示す。なお、この図中の各コマ左下隅の数字はサンプリング時刻に対応している。まず、図11(a)よりセンサによる総荷重の時間的変化は定性的にロードセルによるそれと良く一致していることがわかる。さらに図11(b)よりその分布域は円形となっており、その値もこの円形全域にわたってほぼ一様であり、ボールを加圧した場合の圧力分布をよく表している。また、総荷重が増大していても、その圧力値はほとんど変化せず、接触領域の大きさのみが増大している様子がわかる。

以上のことから、本センサが接触圧力分布の時間的変化をかなり良く測定していることが認められる。

4.2 足圧の分布 複雑な接触圧力分布例の一つとして人の足の接触圧力分布の測定を先のボールの測定方法と同様な方法で行った。すでに示した図9(a)(b)はそれを画面表示したものであり、図12(a)は総荷重変化、図12(b)はその等高線表示を示す。図12(a)より総荷重は踏み始めと踏み終わりにピークを持

つものであることがわかる。またセンサによる値はロードセルによるそれとよく一致していることも確認できる。さらに、図12(b)の圧力分布よりかがとからついて、爪先から離れるまでの様子がよくわかる。特に足の幅中央線付近での圧力分布が高くなっており、足の形状をよく表している。

図10 ボールによる負荷概要

図11 (a) バレーボール押し付け時の総荷重
(サンプリングタイム50ms)

図11 (b) バレーボール押し付け時の等高線表示
(サンプリングタイム50ms, 線幅0.02MPa)

図12 (a) 足圧分布 総荷重表示
(サンプリングタイム50ms)

図12 (b) 足圧分布 等高線表示
(サンプリングタイム50ms, 線幅0.02MPa)

図13 自転車通過時概要

4.3 自転車の圧力分布 センサ受圧部上を自転車でゆっくり通過した場合の圧力分布を以下に示す。図13はその測定方法の概要を示す。このように①、②の2方向に通過した場合を測定した。図14(a)は②に対するその総荷重変化、図14(b)はその等高線図を示すものである。図(a)でセンサよりもさきにロードセルに荷重が検出されているが、これは、図13からわかるようにロードセルの方がセンサより大きいのである。この結果より、総荷重の立ち上がりや下降の挙動および、それらの大きさ自身とセンサによる測定値が良くロードセルのそれらに一致していることがわかる。また図(b)から自転車の進行挙動とタイヤの圧力分布の時間的な変化状況も明確に知ることができる。

5. 結 言

本研究では、圧電セラミックスを用いて、接触圧力分布をリアルタイムで測定することのできるセンサシステムを測定のダイナミック化に重点を置いて開発した。具体的には、 20×10 点の測定点を有し、静的測定を繰り返し行うことによって荷重増分を得、それらを加え合わせることで任意の時間的に変動する圧力分布を測定する方法である。この時のサンプリングタイムは最高25msである。

そして、測定例としてセンサによってボールの押し付け圧および足圧分布や、自転車による移動圧を測定

図14 (a) 自転車通過時の総荷重
(サンプリングタイム50ms) 図14 (b) 自転車通過時の等高線表示
(サンプリングタイム50ms, 線幅0.02MPa)

した。現在のところ、測定点数が100点を超え、時間的に変動する圧力分布を測定できるこの種のセンサは、世界的にも少なく、また、その測定速度や精度の点から言っても本センサシステムが十分実用的に有効なレベルに達していると判断できる。さらに、本センサ素子は現状においてその寸法を約1/3程度まで縮小化することは容易であり、このような素子を用いれば各種の機器センサへの応用も可能となる。

おわりに、本研究を進めるにあたり当時卒業研究生だった奥輝昭君に大いに協力を受けたことを記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 尾田,ほか3名,機論,54-498,A(昭63-2),399-404.
- (2) 尾田,ほか3名,機論,No.893-1(平1-3),62.