

筐体のひずみを利用した入力インタフェース

野中 誉子¹, 長谷 智弘²

Input Interface Using Strain of Device Surface

Takako NONAKA¹, Tomohiro Hase²

Abstract :

This paper proposes a new input method that provides a multi-valued, linear output according to user's pressure on surfaces of a small, portable information terminal. Our proposed interface uses strain gage sensors to detect microscopic strain caused by fingertip pressure on the device. First, a strain detection circuit was verified using a simple aluminum plate sample with 2 strain gages. Next, to verify operation of the proposed interface, an experimental prototype was manufactured using strain gage sensors on each side surface of an aluminum box and 2-axis strain detect circuits. The experiments to control screen image displayed on a LCD were conducted by 6 users. As the results, the users could operate the image by pushing the side surfaces of the terminal device. The strength of user's pressure applied to the scroll speed, and the direction of the load related to the motion direction of the image. With the proposed interface, the information terminal units do not require a specific area, thickness, or position for input button-switches in the chassis.

Keyword :

Fingertip pressure, linear output, strain gauges

1. はじめに

近年、急速に普及したスマートフォンと呼ばれる多機能携帯電話や家庭用ゲーム機のコントローラのような情報通信端末では、携帯性と操作性の両立が求められている。これは、(1)小型で軽量な取り回しのしやすいサイズのデバイス上で、(2)膨大で多様な情報を簡単に扱えるユーザインタフェース (UI) の実現により、達成できるものと考えられる。

現在までに開発された小型情報端末用 UI の多くが、ボタンスイッチによる入力方式を採用している。しかし、その方法には以下の問題がある。

まず、ボタンスイッチは基板上の接点の開閉動作

を利用するため、ON と OFF の 2 値しか得られない。そこで、多機能化したデバイスの全機能呼び出すためには、各機能に対応したボタンを配置する必要がある。

一方で、携帯性や保持のしやすさを考慮すれば、端末の大きさや重量もある範囲内に収める必要がある。よって、全機能分のボタンスイッチを配置する十分な領域を端末表面に確保するのは難しい。

したがって、限られたボタンだけを配置し、そのうち複数個を同時または継時的に押すような組み合わせ入力が必要となる。この場合、多機能になるほど 1 つのボタンが呼び出す機能が増え、操作方法が難しくなるといった問題が生じる。

そこで我々は、端末の側面を入力部として、その 1 か所への入力操作で多値を入力するインタフェースを提案した [1]。本論文では、これを拡張して、端末の 2 側面を用いて 2 次元入力を可能にするユーザインタフェースを提案する。

¹人間環境学科

²龍谷大学

2. 提案するユーザインタフェース

本論文で提案するユーザインタフェースは、端末で指先で押す力に応じて筐体に生じるひずみを検出し、入力値として利用するものである。

本提案 UI の構造と検出手順を図1に示す。本システムは、ひずみセンサを貼り付けた筐体（入力部）、ブリッジ回路と差動増幅器として機能するひずみ検出回路（検出部）、ならびに A/D 変換器（A/D 変換部）の3つのパートから構成される。これらが小型情報端末に接続され、入力インタフェースとして動作することを想定している。

以下に各パートと検出手順について述べる。

入力部は、図1に示す通り、筐体の4側面にひずみセンサを取り付けた構造をしている。ここで、ユーザの指圧力によって筐体側面に生じたひずみを検出する。本提案では、ひずみ検出センサとして、材料の変形をモニターするために広く使われている [2] ひずみゲージを用いる。一般に、ひずみゲージは測定対象の表面に接着して利用する。対象物が変形すると同時に、表面に貼り付けたゲージ（抵抗線）が変形し、その電気抵抗値が変化する。これを利用して測定対象に生じたひずみを算出する。

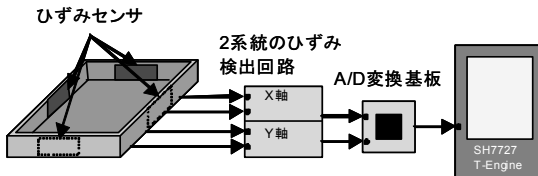


図1 提案システムの構成

検出部は、入力部で生じた抵抗値の変化を電圧に変換するブリッジ回路と、後続の A/D 変換器が扱える電圧レベルまで引き上げる増幅回路とで構成される。

最後に、増幅した電圧値を小型情報端末で利用できるデータ形式に変換するため A/D 変換部でアナログデータをデジタルデータに変換する操作を行う。

本論文では、ひずみゲージを用いたユーザインタフェースを提案するにあたり、まず、提案システムの基本的な動作検証を行った。次に、情報端末で実際によく行われる操作を考慮したアプリケーションを開発し、その動作検証を行った。

以降、3章でひずみ検出回路の入出力に関する基本

的な検証実験、4章で提案システムの動作検証、5章では実用を意識したアプリケーションの開発と、それを提案システムに実装した場合の動作検証について述べる。

3. ひずみ検出回路の動作検証

実験1として、ひずみゲージを貼り付けた筐体に生じるひずみと、作製したひずみ検出回路の出力の関係が理論値と近い値を示すかについて、簡潔な実験モデルを用いて検証する。

図2に、作製したひずみ検出回路の構成を示す。この回路はホイートストンブリッジと差動増幅器から構成され、それぞれ前述のブリッジ回路、増幅回路に相当する。

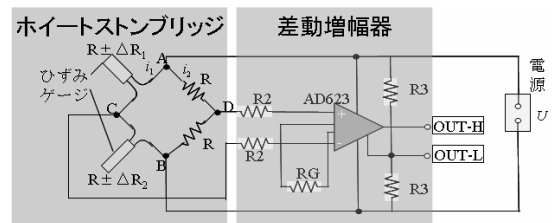


図2 ひずみ検出回路

ホイートストンブリッジにより、ひずみゲージに生じたひずみ量に応じた電圧値を求める。このうち最も単純な回路は、1ゲージ法と言われるひずみゲージを1枚用いた回路である。しかし、ひずみゲージは他の抵抗に比べて温度の影響を受けやすいため、1ゲージ法では温度変化の激しい環境下では正確な測定が難しい [3]。そこで、ひずみゲージを測定対象の裏表に1枚ずつ貼る2ゲージ法とする。図2は2ゲージ法を採用した場合のホイートストンブリッジである。この回路は、温度によって生じるゲージの抵抗変化を互いに打ち消す構造となっているため、正確な抵抗を得ることができる。

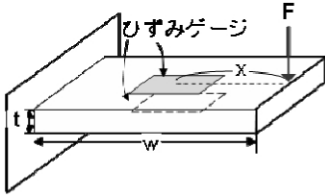
次に、この検出回路の出力値の計算方法を述べる。ひずみ検出回路の出力を VDD とすると、VDD は図2のひずみゲージ1の検出するひずみ ε_1 、ひずみゲージ2の検出するひずみ ε_2 、ひずみゲージのゲージ率 K、差動増幅器のゲイン G と V_{cc} から、次式で表される。

$$V_{DD} = \frac{1}{2} V_{CC} \cdot G \cdot K \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1)$$

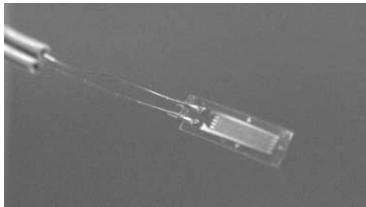
3.1 実験装置

図3に実験1で用いた検証実験システムを示す。実験1では、図3(a)に示すような一端を万力で固定した片持ちはりに生じるひずみを測定する。厚さ t のアルミ平板の端から x の位置の表裏に、図3(b)に示したひずみゲージを貼り付け、作製した検出回路の X 軸側ブリッジ回路に2ゲージ法にて接続する。そして、図3(a)に示す位置に大きさ F の荷重を加えたときのひずみ検出回路の出力電圧を測定する。

また、実験システムの各パラメータを表1に示す。



(a) 片持ちはりとひずみゲージの貼付け位置



(b) 実験に用いたひずみゲージ



(c) 検証実験システムの全体

図3 片持ちはりによる検証実験システム

表1 実験条件およびシステム変数

要素	パラメータ	値
平板	t	0.80 [mm]
	w	100 [mm]
	x	50 [mm]
	E	70×10^3 [N/mm ²]
	F	0, 0.5, 1, ..., 7.5, 8 [N]
検出回路	V_{CC}	5.0 [V]
	G	1000
	K	2.16
	ゲージ長	5 [mm]
	ゲージ法	2ゲージ曲げ検出

3.2 実験結果

図3(a)において、力点に加わる荷重 F [N] とひずみゲージに生じるひずみ ε の関係は、はりのヤング率 E [N/mm²], はりの長さ w [mm], はりの厚み t [mm], 力点とひずみゲージの中心との距離 x [mm] を用いて式(2)で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{6x}{w \cdot t^2 \cdot E} \cdot F \quad (2)$$

ヤング率 E は材料に固有の値であり、今、はりの寸法は固定なので、式(2)より、ひずみ ε は荷重 F の一次関数である事がわかる。ひずみゲージを両面に貼り付けているので、 $\varepsilon_1 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = -\varepsilon$ とすると、式(1), (2)より、検出回路の出力電圧 V_{DD} は次式で表される。

$$V_{DD} = \frac{1}{2} \cdot V_{CC} \cdot G \cdot K \cdot \frac{6x}{w \cdot t^2 \cdot E} \cdot F \quad (3)$$

以上の式より算出した理論値と、実験により得られた測定値、およびその誤差を図4に示す。

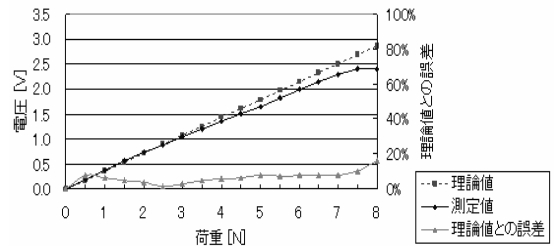


図4 指で押す力 F と出力電圧 V_{DD} の関係

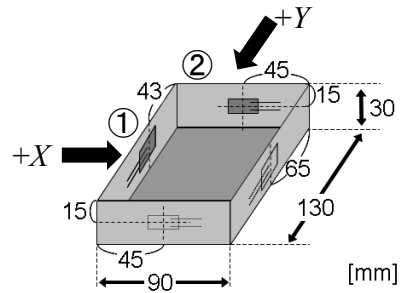
図4より、はりにかかる荷重が4N以下では、作成した検出回路の出力電圧は理論値にほぼ一致し、荷重に比例して増加することが確認できた。また、7N以下では、理論値との誤差が10%未満に収まることを確認した。

一方で、荷重が1Nに満たないほど小さい場合は、出力電圧も小さいため、理論値と実測値の誤差が大きくなる。また、荷重が7N以上の場合、理論式では出力電圧が2.5V以上になるが、今回作成した回路では上限が2.5Vのため、これ以上の値はすべて最大値に丸め込まれてしまっている。

入出力にこの特性を利用するに当たっては、すべての荷重を正確に検出できなくとも、入出力関係の線形性が確保される範囲を有効に活用することで、ユーザの操作に応じた出力を実現できるものとする。

以上より、本実験システムは、提案UIを実現するために必要な、ユーザが端末を指で押す力に比例した電力を出力できることを確認した。

上に指がかかりやすい。保護テープはアルミ板と同程度の厚みがあり、クッション性に優れているため、ユーザ自身の指先に「押した」感覚のフィードバックがあっても、実際にはアルミ板に荷重がかかっていない状態が起こりえる。そこで実験2では、箱の外側面にはゲージを貼らず、内側面にのみゲージを貼った1ゲージ法による測定を行った。



(a) ひずみゲージの貼り付け位置

4. 提案システムの試作とハードウェアの動作検証

実験1の結果を踏まえ、片手で保持できるサイズの実験システムを試作し、荷重検出性能について、動作検証を行った。

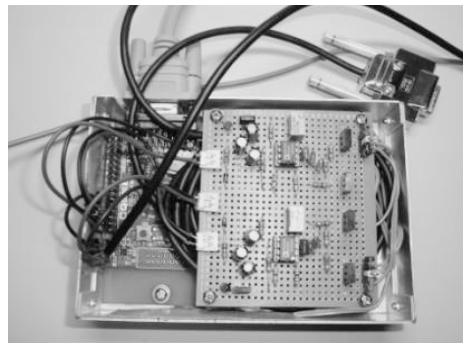
4.1 実験装置

A/D変換基板として分解能が12ビットで、シリアル通信によるデータ送信が可能なものを用いた。図5に、このA/D変換基板とひずみ検出回路を組み合わせた実験システムを示す。

図5(a)に示した筐体の4側面にひずみゲージをテープで貼り付け、ひずみ検出回路とA/D変換基板を内部に収納した。図5(b)は試作機の内部の様子である。

検証実験は、図5(c)に示す実験システムで行った。A/D変換基板とノートPCをRS232Cケーブルで接続し、シリアル経由で受信した出力データをノートPCでモニタリングした。出力電圧は、検出回路のX軸、Y軸それぞれの+側に対応する面(図5(a)の①と②)のみに負荷をかけて測定した。

また、実験1とは違って片手で保持して指で押す操作の場合、変形が大きくなる側面中央の両面にひずみゲージを貼り付けると、ゲージを固定する保護テープ



(b) 筐体内部



(c) 動作検証実験システム

図5 提案UIの検証実験システム筐体の設計

4.2 実験結果

実験では、筐体に加える荷重 F を変え、その際の出力電圧を求めた。実験システムのパラメータおよび実験条件を表 2 に示す。

表 2 実験装置のパラメータ

要素	変数	値
検出回路	V_{CC}	5.0 [V]
	G	1000
	K	2.16
	ゲージ法	2ゲージ曲げ検出
	F	0, 0.5, 1, …7.5, 8 [N]
シリアル設定	ボーレート	9600 [kbps]
	データビット	8ビット
	パリティ	なし
	ストップビット	1
	フロー制御	なし

結果得られた X 軸の荷重と出力電圧を図 6 に、Y 軸の荷重と出力電圧の関係を図 7 にそれぞれ示す。

図 6 より、出力電圧は荷重にはほぼ直線的に比例していることが分かる。

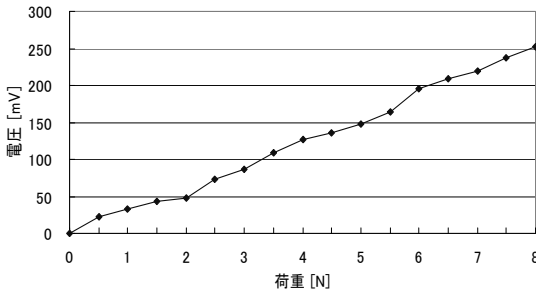


図 6 X 軸の荷重と出力電圧の関係

一方、図 7 では、荷重に応じて出力電圧は増加しているが、その傾きは一定ではなく、X 軸に比べて同じ荷重に対する出力電圧が小さい。これは、応力を加える側面の長さが X 軸側の 130mm に対して Y 軸側は 90mm と短いため、同じ荷重でも生じる変形量が少なく、出力電圧が小さくなり、回路内のノイズや A/D 変換誤差の影響を受けやすいためと考えられる。

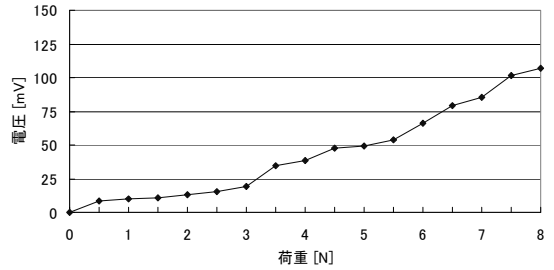


図 7 Y 軸の荷重と出力電圧の関係

作製した試作機では、X 軸は Y 軸の出力値の約 2.3 倍を示したので、アプリケーションの操作に 2 軸データを利用する場合には、指で押す面の寸法が違って同じ入力荷重に対して同じ操作が実現できるように、増幅レベルや出力データに対する重みづけを調整することにより、2 軸の体感的感度を補正することとした。

5. ひずみ UI の開発と動作検証

最後に実験 3 として、指で押す力に応じた 2 軸の出力を利用したアプリケーションを開発し、検証実験を行った。

本論文では、携帯端末上で画面をスクロールすることを想定し、仮想画面移動アプリケーション（仮想画面モード）を開発した。これは、指で押した力の強さと押し込む向きに応じて視点を移動させ、画像の表示領域を変更する。図 8 に、実験に用いたビットマップ画像と、端末上のディスプレイ寸法を示す。

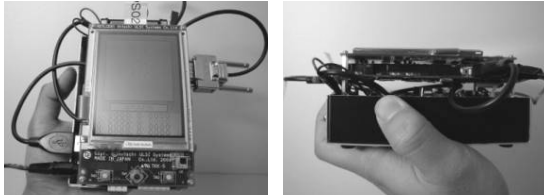


図 8 仮想画面と端末ディスプレイ寸法

5.1 実験装置

図 9 に、提案 UI の試作機を示す。先述の実験 1, 2 で検証した、入力システム、検出回路、および筐体を、

携帯情報端末に見立てた組込機器標準開発プラットフォーム T-Engine に接続してシステムを構築した。



(a) 正面 (b) 側面
図9 試作した検証実験システムの外観

T-Engine とは、ユビキタスコンピューティング環境の構築のためのオープンリアルタイムシステム標準開発環境 [4] である。実験システムに用いた T-Engine の仕様を表3に、実験システムのソフトウェアおよびハードウェア構成を図10に示す。

表3 SH7727/T-Engine の仕様

構成	仕様
CPU	SH7727 入力クロック：12MHz 動作クロック：内部 96MHz 外部 48MHz
メモリ	Flash：8Mb SDRAM：32Mb
I/F	PCMCIA Card：1スロット シリアル：2ch
ディスプレイ	TFTカラーLCD 18bit (262144色) QVGA (240 × 320)
タッチパネル	ADS7843
動作電圧	DC5.6V
最大消費電流	600mA

本システムでは、入力と出力を以下のように関連付けた。



図10 提案 UI デモシステムの構成

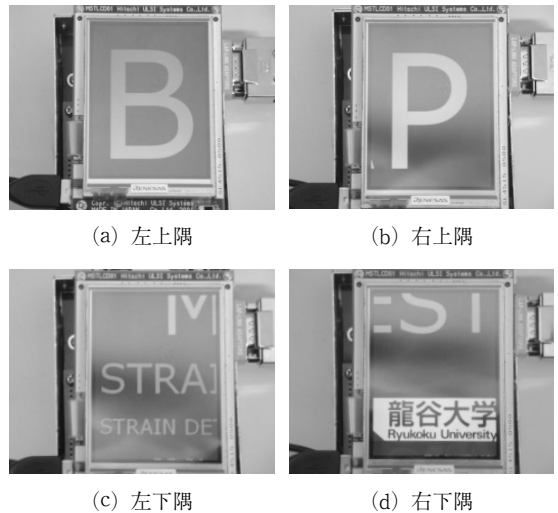
ディスプレイには、大きな画像の一部が表示されており、ディスプレイは窓のように作用する。隠された画像領域を表示するためには、その領域があるはずの方向へ、窓であるディスプレイを移動させる。この移動の速さと方向を、端末側面の押し方で制御する。

このとき、押す力の大きさを窓の移動速度に対応させ、力が大きいほど速く移動するようにした。また、押し込む向きを窓の移動方向に等しくした。つまり、ディスプレイ上に「B」が表示されている状態から、端末の左側面を右方向へ押しすと、右とりにあるはずの「I」が表示される。

5.2 実験結果

提案システムの検証実験として、20代前半の男性4名、女性2名の被験者による操作実験を行った。

被験者にはあらかじめ、表示されている画像とディスプレイの関係、および操作方法を口頭で説明した。そのうえで、Bが表示されている状態のシステムを操作し、画像右上のP、画像左下、画像右下のロゴマークを表示させるように指示した。実験の様子を図11に示す。



(a) 左上隅 (b) 右上隅
(c) 左下隅 (d) 右下隅
図11 仮想画面上での移動

実験の結果、6名の被験者全員がすべての領域を正しく表示することができた。ただし、女性被験者は手が小さく、端末を片手で保持した状態では上下の面を押すことができなかった。また、実験後のアンケートでは、4名の被験者から、上下の面が固く操作しづら

いと回答を得た。検証実験で得られた結果をもとに、荷重と出力の関係が等しくなるよう2軸を調整していたが、実際に端末を保持した際には、指のかかりやすさが左右側面と上下面とで大きく異なったため、上下の面を強く押し込むことが困難だったためと考えられる。

また、TRONSHOW2011 (2010年12月15日～12月17日, 東京ミッドタウン) [5]において、1日5時間連続通電する耐用実験を、3日間行った。その結果、連続通電時間が4時間を過ぎると、負荷のない状態でも画像が動く、反応が鈍くなるといった現象が毎日見られた。しかし、電源を切って10時間以上室温で放置すると、翌日には正常に動作した。これは、上記実験環境が展示会会場でデモシステムがスポットライトに照射されていたため、筐体の温度が上昇し、ひずみゲージが熱膨張したことが一因と考えられる。

今後、実用的なシステムを構築するにあたり、保持しやすい筐体寸法の設計とより押しやすい筐体材質の選定、連続使用を想定したひずみセンサの熱膨張問題への対応、押すという動作に対するユーザへの物理的フィードバックの設計などについて検討することが、使いやすく信頼性の高いUIの実現に向けた残された課題だと考える。

6. まとめ

本論文では、指先で携帯情報端末の側面を押す強さに応じた値を出力する入力インタフェースと、それを用いて端末上のディスプレイに表示される画像を操作するユーザインタフェースを提案した。入力インタフェースを実現するために、本研究では、端末側面を押した際に筐体に生じる変形量をひずみゲージで検出して利用した。

はじめに、一辺固定のアルミ平板の表裏両面にひずみゲージを貼り、基本的な動作検証を行った。その結果、押す力に応じた出力が得られることを確認した。

次に、情報端末を模したアルミ製の箱型の筐体側面4面にひずみゲージを貼り、上下、左右の2方向への負荷を検出できる入力インタフェースを試作した。動作検証の結果、筐体の形状や各面の寸法により、指がかかりにくく押しにくい箇所や、同じ力で押しでも変形量が異なる場合があったが、2軸にかかる力の大きさと向きを独立に検出できることを確認した。

上記の結果を踏まえ、情報端末における実用的な操作を考慮して、画像の表示領域を制御するアプリケー

ションを開発し、デモシステムに実装した。6名の被験者による動作検証の結果、側面を押す向きと同じ方向に画像を移動させ、押す力の強さに応じた速さで画像を移動させる操作が可能であることを確認した。

以上より、本提案を用いることで、寸法上制約のある情報端末上に多数のボタンやホイールスイッチを設置することなく、2次元の多値入力が可能となった。試作した入力インタフェースでは、AD変換の分解能に見合う数の値を入力できるため、1箇所オン/オフの2値しか入力できないボタンスイッチやキーボードと違い、狭い領域で多様な入力を実現できる。本論文では、操作対象アプリケーションを表示画像のスクロールとしたが、今後はその他にも、直感的で多様な入力操作への対応が期待できる。

参考文献

1. T. Nonaka, S. Saino, M. Shimano, T. Hase. Input Method to Enter Linear Data Using Fingertip Pressure, In Proc. 2008 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics (SMC 2008), pp. 2197-2201 (2008).
2. 佐藤浩之. ダイナミックセンサとしてのひずみゲージ: 高速・柔構造型材料試験機への適用, 精密工学会誌, 52(4), pp. 610-614 (1986).
3. 土井浩, 広末日出夫, 接着型抵抗線ひずみゲージをプラスチックスに使用する場合の問題について, 材料試験: Journal of the Japan Society for Testing Materials, 10(88), pp. 20-22 (1961).
4. Ken Sakamura and Noboru Koshizuka. T-Engine: The Open Realtime Embedded Systems Platform, IEEE MICRO, 22 (6), pp. 48-57 (2002).
5. TRONSHOW 2011 ~進化する TRON~, TRONWARE, 127 (2010).

謝辞

本研究の一部は、以下の助成を受けて実施した。

1. 文部科学省・私立大学学術研究高度化推進事業「ハイテク・リサーチ・センター設置事業」(龍谷大学), 2006-2010.
2. 科学研究費補助金事業, 基盤(C), 課題番号 21500127, 2009-2011.

