

論文

直接操作型ピンディスプレイを実現する力覚センサの開発

島田 茂伸^{*1)} 篠原 正美^{*2)} 清水 豊^{*3)} 下条 誠^{*3)}

Development of Force Sensor Achieving Direct Manipulation Pin Display

Shigenobu Shimada^{*1)}, Masami Shinohara^{*2)}, Yutaka Shimizu^{*3)}, Makoto Shimojo^{*3)}

A basic device combining a tactile display function and a touch position/force direction sensing function is proposed. The first trial device consists of two major components, a tactile graphic display and a 6-axis force/torque sensor. The proposed device is substituted for the mouse functions of clicking and scrolling, and it provides fundamental GUI operations. From the knowledge acquired from the first trial device, we developed new tactile input/output device which focused on enlargement of tactile presentation area, improvement in position detection accuracy, and improvement in ease of movement. In this paper, we explain the structure of the device, and development of a 3-axis force sensor. Since the new position detection principle accompanies the change of the device mechanism, we also illustrate the position detection method.

キーワード：ピンディスプレイ, 指位置推定, 力覚センサ, マン-マシンインタフェース

Keywords: Pin Display, Estimation of Finger locus, Force Sensor, Man-Machine Interface

1. はじめに

近年, 盛んに研究が行われている触覚ディスプレイには, 健常者に作業性向上や仮想現実感を提供するものや⁽¹⁾, 障害者の職業支援や生活支援を行う感覚代行装置がある⁽²⁾。特に後者の中で, 重度視覚障害者を支援する視覚代行装置は古くから研究開発がなされている。視覚代行装置として実用化された触覚ディスプレイとしては読書を目的とするオプタコン (OPTACON)⁽³⁾ が有名であるが, 近年のOCR (Optical Character Reader) 技術と音声合成技術の普及から, 現在は画面読み上げソフトウェアに代替されている。しかし触覚機器は重度視覚障害者にとって無用にはなっておらず, たとえば我々の生活や就業にとって当たり前の存在となったPC (パソコン) が備えるGUI (Graphical User Interface) は空間的情報の把握と操作をユーザに要求することがあり, こうした場合には画面読み上げソフトウェアでは対応しきれない。そのため, 空間情報を質的・量的により良く扱える手段として, また, より純粋に図形やグラフなどの非言語情報を獲得する手段として触覚機器は大きく期待されている。

触覚機器の先行研究として, Gardnerらは点図プリンタで打ち出した紙の点図をデジタイザ (タブレット) 上に設置してPCと連携させ, 触察する部位ごとに音声フィードバックを出力可能とするシステムを開発し実用化している⁽⁴⁾。しかしハードコピーの点図を利用する限り, 点図を印刷する時間とコストは削減できず, また拡大縮小を行う場合は

それらに対応した点図を都度打ち出す必要があるなど, 動的な利用が難しい問題がある。

そこで本研究では, 動的に書換え可能であるピンディスプレイと六軸力覚センサを組み合わせることで, 視覚障害者の非言語情報獲得や作成を支援する入出力装置を提案する。

ピンディスプレイとはアクチュエータによりピンの上下を制御され, 任意の形状を凹凸の二値形状に変換し触パターンを提示するピンアレイである。ユーザはこの触パターンを手で触ることによって触察し提示されている形状を認知する。ユーザの触察力はピンディスプレイを支持するように配置された六軸力覚センサによって検出されるので, 触察位置を推定計算することが可能である。

例えば, ピンディスプレイとPCを接続しアイコンを凹凸によって提示した場合, ユーザはアイコンを触察し触覚によって形状認知を行う。ピンディスプレイ側では触察位置がわかっていることからその座標をPCに通知すれば素手によるアイコンへの触手ポイントの特定が可能となる。

既に試作機が完成しておりしきい値以上の荷重をクリック, 水平方向分力をスクロールと対応付けることで簡単なGUI操作が可能となることを示した⁽⁵⁾。被験者実験を通して装置の機能や目的に良好な評価を得ているが⁽⁶⁾, 製品化を考慮すると製造コストが高価, 小型軽量化が困難, ピンディスプレイの配置や大画面化に対応できない, 指位置の推定精度が劣る等問題点を有する。本稿では製品化を念頭に本装置の安価, 小型軽量化, 高精度化を目的として六軸力覚センサにかわる新センシング方式を提案し, 目的に適合するセンサ形状の設計開発を行った。

^{*1)}デザイングループ

^{*2)}産業技術総合研究所

^{*3)}電気通信大学

2. センサ設計および開発 (1)

2.1 センサの機能選別

触覚入出力装置の試作により

以下の知見が得られた。

- (1) クリックやスクロール機能にはモーメント情報は直接的には必要ない。
- (2) ユーザの触察力は最大でも 4.90 N である。市販の六軸力覚センサは定格 490 N 以上のものがほとんどであり最適な定格を有するセンサが少ない。
- (3) センサのインタフェースは PCI ボードでありデスクトップ PC を使用することから装置の可搬性、小型化を阻害する。

したがって、三軸まわりのモーメントを計測せず三軸方向力だけを検出することで構造を簡便にし、センサ形状の設計開発により本装置を使用する上で最適な定格を設定し、センサアンプの設計開発によって装置への組込みを考慮した力覚センサの開発を行う。

2.2 接触位置検出原理

三軸方向力による接触位置検出原理を図 1 に示す。接触点 $P_c(x_c, y_c)$ に力 f が働くと各センサには (f_1, f_2, f_3) が作用する。接触提示面は回転しないので接触位置まわりのモーメントは零となり以下の

(1) 式が成り立つ。

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i \times f_{iz}}{\sum_{i=1}^n f_{iz}}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times f_{iz}}{\sum_{i=1}^n f_{iz}} \right) \quad (1)$$

次にセンサの校正方法を以下のように定義する。

$$c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3 = W \quad (2)$$

ここで c_i ($i=1, 2, 3$) は最小二乗法から求めた校正係数、 V はセンサの出力電圧、 W は校正に使用する荷重である。

(2) 式を用いて (1) 式を書き直し以下を得る。

$$x_c = \frac{c_1 V_1 x_1 + c_2 V_2 x_2 + c_3 V_3 x_3}{c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3} \quad (3)$$

$$y_c = \frac{c_1 V_1 y_1 + c_2 V_2 y_2 + c_3 V_3 y_3}{c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3} \quad (4)$$

各センサにおいて各水平方向分力を計測すれば (5) 式のようにその合力が水平方向分力となる。

$$f_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}, f_y = \sum_{i=1}^n f_{iy} \quad (5)$$

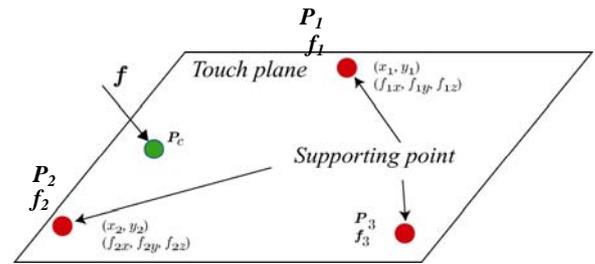


図 1. 接触位置検出原理

2.3 センサ設計

接触位置検出原理を必要十分とするためには、各センサが f_x, f_y, f_z 軸方向への力を検出する必要がある。ここではピンディスプレイを三点で支持し、各支持点を三軸センサ化することを考える。荷重を検出するセンサ形状は任意方向の力を各垂直軸成分に分離して検出できる平行平板構造を用いた。こうすることで各軸の出力値を非干渉にできる。また、ピンディスプレイとセンサをボルトで締結すると不静定な構造物となるため締結部にボールジョイントを使用し静定問題に帰着させている。

2.3.1 三軸梁型センサ

図 2 は三軸の荷重検出を梁型として設計を行った力覚センサの三次元モデルである。垂直方向分力 (f_z 軸) と水平方向分力の一軸 (f_y 軸) は梁の曲げ応力により力を検出する。水平方向分力の他の一軸 (f_x 軸) は梁の引張圧縮応力により力を検出する構造とした。CAE による解析結果を図 3 に示す。 f_z 軸では垂直方向を検出する部位だけが変化しており、水平方向荷重を検出する部位はほとんど変化しない。つまり、他軸に対して非干渉であることを表しており、良好な荷重検出が可能であると考えられる。一方、水平方向荷重の一軸 (f_x 軸) では梁全体が変形していることがわかる。このことは荷重時の軸間干渉を示しており、水平方向分力が荷重された場合には f_z 軸と f_y 軸が正しく検出できない。垂直方向分力の誤差は (1) 式の接触位置推定計算に直接影響し荷重点と推定点とのずれとなることから改良の必要がある。 f_x 軸一軸だけを引張圧縮応力検出としたことに起因していることから曲げ応力型に変更することで解消できると考えられる。なお、当該形状は試作を行い、おもりの用いた荷重実験を通して実証しており CAE の計算結果とほぼ同等の干渉状況が再現されている。また、図 1 のセンサ構造体を製作し (1) 式による位置推定計算により荷重点と推定位置にずれが生じることを確認している。

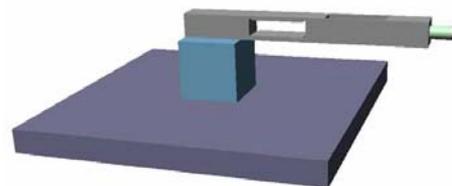


図 2. 三軸梁型センサ

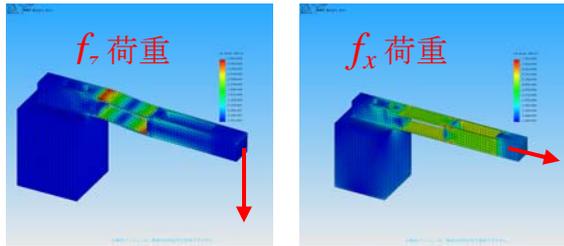


図3. CAEによる解析結果

2. 3. 2 三軸曲げ型センサ 三軸梁型センサの問題点から三軸方向の各方向荷重を曲げ応力によって検出するセンサ構造の設計を行った。三次元モデルを図4に示す。CAEによるセンサ特性シミュレーションでは多軸間に荷重を負荷させたときの軸間干渉を調査した。 f_z 軸方向に5.88 Nの一定荷重をかけながら, f_x 軸と f_y 軸をそれぞれ0.98~2.94 Nまで変化させたときの f_z 軸起歪部のひずみを計算した。結果を表1にまとめる。荷重条件が変化しても f_z が検出するひずみはほぼ一定である。数値的な差は最大で1.2 μst であり(1)式を用いた位置推定計算では0.7 mm程度のずれとなり設計要求を満たす。

しかし、3DCAD上で図1に示すセンサ構造体を構築したところ荷重位置と推定位置とにずれを生じることがわかった。推定位置がずれる説明を図5に示す。センサの原点は図中の点線で描かれている。センサは三点あることからこの点線はある平面を規定し、この平面をセンサ平面とする。触覚提示部の荷重点 P から垂線を下ろし、センサ平面との交点を K とする。 P 点と K 点の距離を h とすると K 点まわりに Ph のモーメントが発生する。各センサでは K 点まわりのモーメントに対して反力が発生しその垂直方向成分がセンサ出力に重畳される。モーメントから発生する反力が三つのセンサ出力の割合を変化させ推定位置が水平荷重の方向にずれたと予想できる。

表1. シミュレーション条件および結果

	f_z (N)	f_x (N)	f_y (N)	f_z のひずみ (μst)
1	5.88	0.98	0.98	45.9
2	5.88	0.98	1.96	46.4
3	5.88	0.98	2.94	47.1
4	5.88	1.96	0.98	46.0
5	5.88	2.94	0.98	46.2

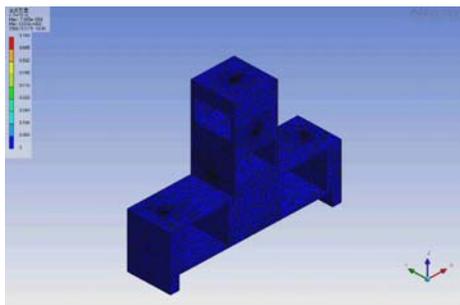


図4. 三軸曲げ型センサ

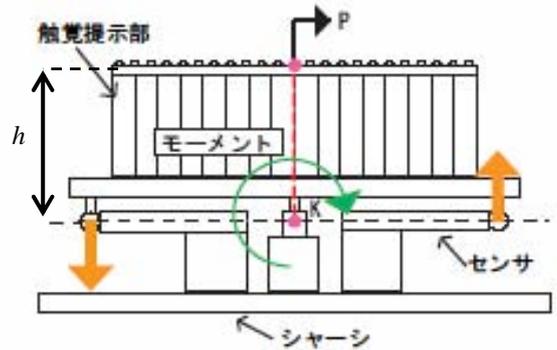


図5. 誤差要因

3. センサ設計および開発 (2)

前節までの考察によりセンサの原点と荷重点とが一致していないことによりモーメントアームが発生し水平方向分力によってモーメントの影響を受けることがわかった。そこで図6に示すようにセンサ原点をピンディスプレイ表面に設定することでモーメントアーム h を消去することを考えた。このときピンディスプレイはセンサによって吊り下げられる形となるため、図4に示すような三軸曲げ型形状を保持するとモーメントアームを生じてしまう軸が必ず存在するため図7に示すような垂直方向分力一軸のみを検出する平行平板型力覚センサを新たに設計した。(1)式に従えば垂直方向分力一軸を検出できれば指位置は推定可能であり本装置の基本機能を継承できる。一軸検出としたことで(5)式の水平方向分力は検出不可能になるが後に説明する新スクロール手法により解決する。

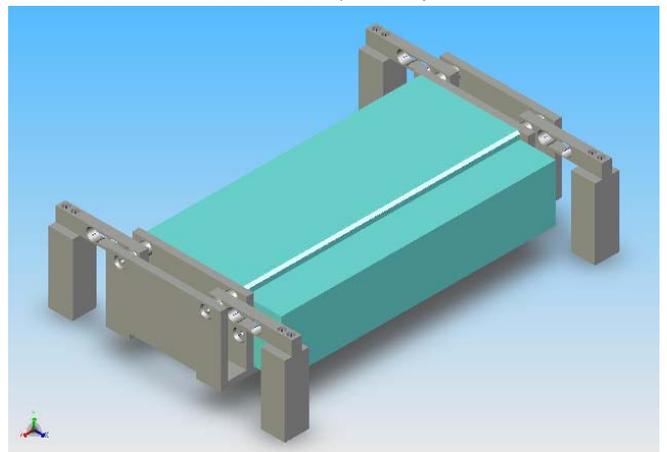


図6. ピンディスプレイ配置

3. 1 一軸力覚センサ

図7に一軸力覚センサの3DCADモデルを示す。センサ構造は起歪部の位置を比較的自由に配置できることから平行平板型とした。起歪部の形状は矩形から二つの円を長方形で結んだダンベル型に変更した。こうすることで起歪部の応力集中は円の曲率に分散して表れることになり、ひずみゲージの貼り付け精度向上が可能である。図8に荷重シミュレーションの結果を示す。図3の起歪部では矩形のエッジ近傍に

力集中しているのに対して円の曲率に応じて分散するように応力が生じている。シミュレーション条件は荷重 4.90 N で材料は A7075 とした。図中の印をつけた部分がひずみゲージの添付箇所である。 f_z 荷重時には最大のひずみが発生する。一方、 f_x 荷重時にはひずみゲージ添付箇所はほとんど変形していないことがわかる。設計意図通りの結果が得られていると言える。

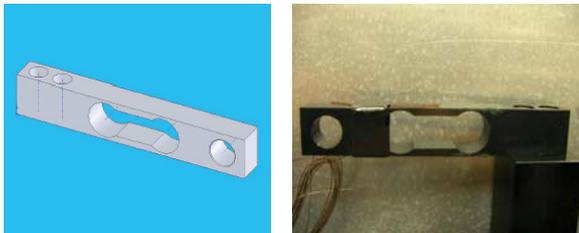


図 7. 一軸力覚センサ

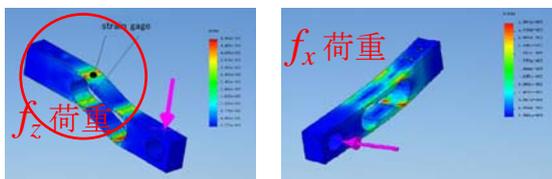


図 8. CAE 解析結果

3. 2 新スクロール手法 従前の試作機ではスクロールの実装を水平方向分力に応じて画面を書き換えることで実現していた。設計変更により水平方向分力が検出できないため以下のようなスクロール方式を提案する (図 9 参照)。

1. 触察しているオブジェクトを触る
2. スクロールボタンを押す
3. オブジェクトをスクロールさせたい場所まで指をスライドさせる
4. スクロールボタンを離す

スクロールボタンの押下という操作が増えることで両手を使わなければ操作できないことが欠点となるが、一面ではスクロールの開始と終了が明示的に認識できることになりユーザビリティの向上が期待できる。また、従前手法の実例としてスクロール操作を意図していないのに画面がスライドするような問題が存在した。ユーザが触察しているとき、水平力のみをディスプレイ面に与えるのは不可能であり必ず垂直力を伴う。このことはスクロール中に発生する水平力とクリックを目的として与えられた垂直力との弁別が難しいという問題にもつながっていた。本手法ではスクロールボタンの状態が触察を行う通常時のモードとスクロールのモードを明示的に分離するため従前手法の問題点を解決できると考えられる。

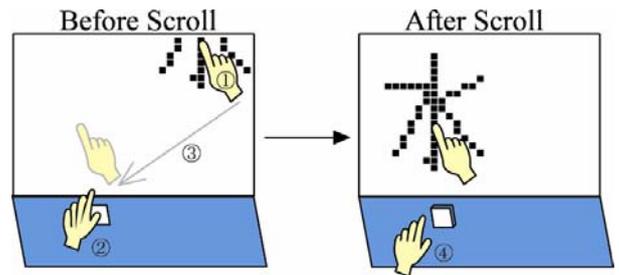


図 9. スクロール方式

4. まとめ

触図ディスプレイの画面を手指の力によって直接制御するという新規性に基づいた触覚入出力装置における新たなセンサ構造ならびに当該センサの特長を活かした機能を構築し実現可能性を実験的に確かめた。三種類のセンサ形状を設計し検討を行うことで必要十分な精度と性能を有するセンサ形状が得られた。市販の六軸力覚センサと比較して人の接触力程度の微小な力を精度良く検出することが可能でありながら、80%のコストダウンを実現している。本研究が提案した、触覚入出力装置は医用診断やエンターテインメントデバイス等における触覚提示装置への応用にも役立つものと考えられる。

(平成 20 年 7 月 4 日受付, 平成 20 年 8 月 21 日再受付)

文 献

- (1) G. Burdea: Force and touch feedback for virtual reality; John Wiley and Sons, Chichester, UK, 1996.
- (2) M. Shinohara, Y. Shimizu: Research and Development of Assistive Technology for Persons with Sensory Disabilities in Japan; Technology and Disability, 2(2), pp.22-36, 1993.
- (3) J.C. Bliss, M.H. Katcher, C.H. Rogers, R.P. Shepard: Optical-to-tactile image conversion for the blind; IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 11(1), pp.58-65, 1970.
- (4) J. Gardner, V. Bulatov: Scientific Diagrams Made Easy with IVEO; Computers Helping People with Special Needs (ICHP), Springer, pp.1243-1250, 2006.
- (5) S. Shimada, M. Shinohara, Y. Shimizu, M. Shimojo: Regarding the Accuracy in Horizontal Force Component of Tactile GUI Device, Proceedings of the First International Conference on Sensing Technology (ICST2005), pp. 437-441, 2005.
- (6) 谷井通世, 篠原正美, 下条誠, 島田茂伸, 清水豊: 重度視覚障害者用ダイレクトマニピュレーション型触覚ディスプレイの操作特性, ヒューマンインターフェースシンポジウム2005, pp.237-240, 2005.