

修士論文

さまざまな実物体を
ユーザインタフェースに転用するための
動的ひずみ計測応用システムの研究

2008年2月4日

指導教員 苗村 健 准教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 66401

天野 翔

内容梗概

人とコンピュータの対話手段として、これまで主に使われてきたグラフィカルユーザインタフェース (GUI) と異なる様々なユーザインタフェースが研究されている。その一つに、実物体を介したユーザインタフェースがある。このようなインタフェースでは、実物体が持つアフォーダンスを活用することで、マウスやキーボードといった汎用的なデバイスよりも操作方法が分かり易くなると考えられる。また、実物体と特定の情報を関連づけることで、情報を手で直接操作することが可能となり、ディスプレイを必要とする GUI と比べてより直感的な操作が実現できる可能性がある。

このような実物体を用いたインタフェースを構築する際は、ユーザが普段から使用し、使い慣れている身近な物体を使うのが良いと考えられる。なぜなら、ユーザがその操作方法を熟知しているためすぐに使用でき、また背後にあるコンピュータの存在をあまり意識せずに、物体の操作そのものに集中できるからである。しかしこれまでの研究では、インタフェースとして用いる物体の内部にセンサを埋め込んだり、環境内にカメラなどの装置を必要とするものが多く、ユーザ自身が簡単にインタフェースを構築することは困難であると思われる。

筆者はこの問題を解決するため、ひずみ計測技術に注目した。ひずみ計測とは、物体が外部から力を加えられたときの変形量を計測することである。ひずみゲージやひずみセンサと呼ばれる小さな抵抗体を物体の表面に貼り付けることで計測が可能となるため、既存の物体にも簡単に適用することができる。ひずみ計測は以下のような特徴を持っており、上述した実物体を用いるユーザインタフェースに活用できると考えられる。

- センサを取り付けることのできる素材が幅広く、またセンサの取り付けが容易
- 微小な変形を検知できる
- 平面以外の形状にも貼り付けられる
- 周波数応答性が良い

本研究では、ひずみ計測を様々な実物体に対して適用し、ユーザインタフェースを容易に構築することができるシステムを提案する。ひずみセンサを貼り付ける際に問題となる増幅回路の倍率を自動で調節する回路を作成し、センサと小型の基板のみでひずみを感知できるようにする。また、センサと PC を接続する配線によってユーザの動作が制限されないよう、配線を実線化する方法を検討する。さらに、自然物への計測の適用例として、丸太を用いた重心移動型インタフェースを制作し、これを用いたインタラクティブシステムを実装する。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	2
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	関連研究	4
2.1	はじめに	5
2.2	タンジブルユーザインタフェース	5
2.2.1	単純なオブジェクトによる操作	6
2.2.2	映像による拡張	7
2.3	日用品を用いたインタフェース	9
2.4	重心移動を用いた研究	12
2.5	ひずみ計測の応用	13
2.6	まとめ	15
第 3 章	ひずみ計測の原理と増幅率の自動調整	17
3.1	はじめに	18
3.2	ひずみとひずみ計測	18
3.2.1	ひずみとは	18
3.2.2	ひずみゲージを用いたひずみの測定	18
3.2.3	半導体ひずみセンサ	20
3.2.4	ひずみ計測の利用	21
3.2.5	ひずみ計測の特徴	21
3.2.6	ひずみセンサと他のセンサの比較	22
3.3	増幅回路の作成	23
3.3.1	システム構成	23
3.3.2	増幅率とオフセットの調節方法	24
3.3.3	実験結果	25
3.4	まとめ	27
第 4 章	ひずみ計測の無線化	28
4.1	はじめに	29
4.2	無線通信の導入	29
4.2.1	無線化による利点	29
4.2.2	無線通信の規格	30
4.3	システム構成	31
4.4	アプリケーション例	32
4.5	従来システムとの比較	35

4.5.1	サンプリング速度の評価	36
4.5.2	遅延の評価	36
4.6	まとめ	36
第5章	重心移動を入力とする平均台型インタフェースの実装	39
5.1	はじめに	40
5.2	設計と実装	40
5.2.1	インタフェースの設計	40
5.2.2	実装	41
5.3	ひずみの試算	42
5.4	ひずみの測定	44
5.5	荷重位置の推定方法	45
5.6	ねじりの検出	46
5.7	映像との組み合わせ	46
5.8	おわりに	49
第6章	結論	50
6.1	本研究の成果	51
6.2	今後の展望	51
付録A	インタラクティブシステム「ログログ」の展示	53
	謝辞	57
	参考文献	58
	発表文献	61

目次

2.1	Triangles	6
2.2	Navigational Blocks	7
2.3	SenseTable	8
2.4	DataTiles	8
2.5	The Designers' Outpost	9
2.6	iStuff 入力コンポーネントの例	10
2.7	PlayStand++	10
2.8	ToolDevice (ピンセット)	11
2.9	musicBottles	11
2.10	Virtual Balance	12
2.11	sensingChair	13
2.12	Strino Plant Instrument	14
2.13	Strino Plant Instrument のシステム構成	14
2.14	Strino Playing Bar の使用風景	15
2.15	Strino Playing Bar のシステム構成	15
3.1	ひずみの発生	18
3.2	ひずみゲージの外観	19
3.3	ホイートストンブリッジ回路 (1 ゲージ法の場合)	19
3.4	半導体ひずみセンサ	21
3.5	増幅率・オフセット調節回路	24
3.6	うちわに貼り付けたひずみセンサの様子	25
3.7	回路の出力電圧とオフセット設定の変化	26
3.8	増幅率の変化	26
4.1	無線システムが目標とする環境	29
4.2	提案する無線ひずみ計測システム	32
4.3	Bluetooth 機能を内蔵した加速度センサモジュール	32
4.4	ハイパーターミナルによる受信データの表示	33
4.5	試作したグラフ表示ソフトウェア	33
4.6	うちわの柄に生じたひずみの計測	33
4.7	ひずみセンサと無線モジュールを装着した歯ブラシ	34
4.8	受信ソフトウェアの動作の様子	34
4.9	歯ブラシにおけるひずみと加速度の変化	35
4.10	比較実験のための計測構成図	36
4.11	比較実験の結果 (無線モジュール:20Hz 動作時)	37
4.12	比較実験の結果 (無線モジュール:100Hz 動作時)	37

5.1	平均台の外観	40
5.2	ひずみセンサを用いた位置の推定	41
5.3	ひずみセンサの接着位置とその拡大図	42
5.4	一端固定・他端支持の梁	43
5.5	センサに対する理論曲線	43
5.6	平均台の各寸法とひずみの計測結果	44
5.7	荷重の測定位置と推定位置のずれ	45
5.8	体を前と後ろに傾けた様子	46
5.9	ログログの外観	47
5.10	ログログの操作	47
5.11	ログログのシステム図	48
5.12	シミュレーションによって生成された流体の映像	48
A.1	「木とデジタル」展での様子	54
A.2	ICC キッズプログラム 2007 での展示	55
A.3	インタラクティブ東京での展示の様子	55
A.4	ASIAGRAPH2007 での作品の様子	56
A.5	メディアアート展の様子	56

表目次

4.1 Bluetooth と ZigBee の比較	31
--------------------------------------	----

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

近年のコンピュータの飛躍的な進歩や、ネットワークの発達、センサの小型化・高性能化に伴い、Weiserが提唱したユビキタスコンピューティング環境 [1] に向けた研究が活発になっている。ユビキタス環境では、コンピュータが周囲の環境に溶け込み見えなくなり、ユーザはコンピュータを意識して使うのではなく、あたかも日用品のように無意識に使用するようになる。

そのような環境に向けたユーザインタフェースとして、従来の Graphical User Interface (GUI) と異なる新しいユーザインタフェースが研究されている。その一つに、実物体を介したユーザインタフェースがある。このようなインタフェースでは、実物体が持つアフォーダンスを活用することで、マウスやキーボードといった汎用的な入力デバイスよりも分かりやすい操作方法が実現できると考えられる。また、情報をアイコンではなく実物体を用いて表現することができれば、ユーザは手を使って情報に「触れ」たり「移動」させたりすることが可能となる。従って、ディスプレイ上に表示されるアイコンをマウスで間接的に操作する GUI と比べ、より直接的・直感的な操作が可能となる。

これまでに、実物体を利用した数多くのインタフェースが提案されてきた。しかし、これらの研究では物体内にセンサを装着したり、物体の周辺にカメラなどのデバイスを設置するなどの必要があった。一方でユーザにしてみれば、普段から身の回りに存在し、使い慣れている物体をインタフェースとして活用することができれば、それが最もわかりやすく、かつ親しみやすい方法であると言える。残念ながら従来の研究では、既にある物体を使ってインタフェースを構築することは難しいと思われる。

この問題を解決するため、筆者は「ひずみ計測」という技術に注目した。これは従来より材料・構造の強度調査などに用いられてきたものであるが、計測に際しセンサを物体の表面に貼り付けるだけでよく、またそのセンサが幅広い素材に接着することができるという特徴をもっている。ひずみ計測技術を使うことで、既存の物体を活用し、容易にユーザインタフェースの構築を行うことができると考えられる。

本研究では、ひずみ計測を様々な既存物体に適用する際に問題となる点を整理した。そして、ユーザインタフェースへの転用の際に問題となる

- (1) 増幅率・オフセットの調節 及び
- (2) 配線の問題

を解決するシステムをそれぞれ提案する。また、ひずみ計測を既存の自然物に実際に適用し、ユーザの重心移動を利用して簡単に操作できる平均台型のインタフェースを実装する。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では関連研究について述べる。実物体を用いて情報を表現するタンジブルユーザインタフェースの研究例や、日用品を用いて構成されたユーザインタフェースを紹介する。さらに、重心移動を利用したインタフェースや、ひずみ計測を応用した研究についても述べる。

第3章では、ひずみ計測の原理と、計測に使用されるセンサ・電気回路について説明する。また、ひずみ計測の特徴について述べ、他のセンサとの比較を行う。そして、ひずみ計測の際に問題となる増幅回路の増幅率・オフセットを自動的に調節する方法について述べる。

第4章では、ひずみ計測の無線化について述べる。PCと親和性が高い無線通信方式として Bluetooth と ZigBee を紹介し、これらの比較を行う。そして、無線モジュールとひずみセンサ・増幅回路を組み合わせ、ワイヤレスでひずみデータを PC に送信するシステムを提案する。また、従来のシステムとの比較についても考察する。

第5章では、ひずみ計測の自然物の適用例として、丸太を用いた重心を入力としたインタフェースについて述べる。インタフェースの設計について述べたのち、丸太に生じるひずみの量を材料力学の知識を用いて試算し、実験結果と比較する。また、このインタフェースを使用して制作されたインタラクティブシステム「ログログ」についても紹介する。

第6章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の展望について述べる。

第2章

関連研究

2.1 はじめに

本章では、実物体を活用したユーザインタフェースの研究動向について述べる。

現在のコンピュータでは、インタフェースとして Graphical User Interface (GUI) が広く使われている。GUI はディスプレイ上にアイコンやメニューを表示し、マウスやキーボードといった汎用的な入力装置を用いてこれら进行操作する。GUI が広く普及した理由の一つは、ディスプレイ上に表示させる画像を変化させることによって、情報の多彩な表現や多様な機能の実現ができるからである。また、情報をアイコンというメタファで表現することにより、情報に対する視覚的にわかりやすい操作（例えばドラッグ&ドロップなど）が可能になった点も理由の一つとして挙げられる。

しかし GUI では、情報は基本的にディスプレイ上の画像として表現されるだけである。そのため、ユーザはディスプレイ内に映し出される情報に直接触れたり、動かしたりすることはできず、マウスなどの入力装置を用いて「間接的に」しか扱うことができない。その結果として、ユーザが属する現実空間と、ディスプレイに映し出される GUI の仮想空間の間には隔たりが生じてしまう。

この隔たりを埋める試みとして、様々な試みが行われてきた。一つのアプローチは、情報の表現に実物体を用いることで、ユーザが自らの手によって情報を直接操作できるようにすることである。タンジブルユーザインタフェースなどが代表的な例である。

もう一つのアプローチは、マウスやキーボードなどの汎用的な入力デバイスの代わりに、実世界に存在しユーザにとって身近であるような物体を用いて情報を操作できるようにすることである。マウスなどのデバイスに比べて汎用性は失われるが、特定の操作においてはユーザにとってわかりやすくなる可能性がある。

本章ではまず、実物体を活用するインタフェースの研究を、単純な物体を用いる研究・映像を用いて表現の拡張を行う研究・日用品を活用する研究の3つに分け、それぞれについて説明する。また、第5章で述べる平均台型インタフェースの関連研究として、ユーザの重心移動を実物体によって検出しインタフェースとする研究を取り上げる。さらに、本研究でも注目しているひずみ計測を用いて、実物体を活用したインタフェースを構築している研究を紹介し、最後にまとめを行う。

2.2 タンジブルユーザインタフェース

タンジブルユーザインタフェース (Tangible User Interface, TUI) とは、MIT メディアラボの石井らによって提唱されたインタフェースである。“Tangible”とは「触れられる・感知できる」といった意味であり、TUI は実体を持つデバイスに物理的に触れることで操作を直感的に知覚できることを目標としている。

TUI の基本的な思想は、情報をユーザの身体空間内で表現すること、そしてその情報をユーザの手により直接操作できるようにすることである [2] [3]。ディスプレイという仮想空間ではなく、ユーザの身体空間の中に存在するオブジェクトを用いて情報を表現することができれば、ユーザは普段の生活の中で物や道具に触れるのと同様に、情報に触れ、直接操作することが可能になると考えられている。

TUI の特徴を以下に示す。

(1) 直感的な操作

現実空間内に実際に存在するオブジェクトをインタフェースとして用いるため、表現されている情報やその操作方法が直感的に理解されやすい。

(2) 人間の持つ感覚の活用

GUI は視覚と聴覚に頼ったインタフェースであるが、現実世界のオブジェクトを用いる TUI は人間が本来持ついろいろな感覚（例えばオブジェクトに触れたときの触覚など）も使用することができる。これにより、GUI に比べてより豊かなインタラクションが実現できる。

(3) 入出力の一体化

GUIでは入力（キーボード・マウス）と出力（ディスプレイ）は明確に分離されている．一方TUIではオブジェクトが情報を表現し、同時に情報のコントローラとしても機能する．入力と出力が一体化することで、ユーザは操作による情報の変化を直感的に認識することができる．

(4) マルチユーザ性

TUIの重要な特徴の1つにマルチユーザ性がある．TUIでは同時に複数のオブジェクトを使用することができるため、一人が両手を使って異なる操作することはもちろん、多人数のユーザがオブジェクトを同時に操作することもできる．この結果として、TUIは複数人による作業を自然な形で支援することができる．

TUIがGUIに対して劣っている点は、情報の変化に応じて表現を変化させることが困難であることである．GUIでは画面内の画像を変化させることで表現する情報を変化させることができるが、TUIでは物理オブジェクトの形状や色などを動的に変化させることは難しい．そこで多くの研究では、タンジブルな物理表現（例えばブロック）にインタンジブルな表現（例えば仮想的な照明によるブロックの影）を加え、両者を物理空間内で融合させることで表現の拡張を試みている．2.2.2節でこのような例を紹介する．

以下では、MITのメディアラボで開発されたTUIに加えて、実空間のオブジェクトを用いた様々なインタフェースを紹介する．

2.2.1 単純なオブジェクトによる操作

Ishiiらが開発したTriangles [4]は正三角形の形をした入力デバイスである．三角形の各辺には磁石がついており、これを通じて他のピースと物理的・電氣的に接続することができる（図2.1）．またそれぞれのピースにはマイクロプロセッサが入っており、互いに通信を行うことができる．通信によって判明したトポロジはPCへと送られ、ディスプレイ上に再現される．PC上でモデリングを行う場合と比べ、Trianglesを用いて物理的なオブジェクトを実際に組み立てる方が立体の組成や性質（例えば均衡など）が分かりやすくなる．

Navigational Blocks [5]は、観光地における情報検索を目的としたタンジブルインタフェースである（図2.2）．立方体型のオブジェクトはそれぞれ“Who”（人名），“What”（出来事），“When”（時代）といったカテゴリを表しており、各面にはさらに細かいトピック（例えば“Founding Fathers”，“Gold rush”，“the 1860’s”）

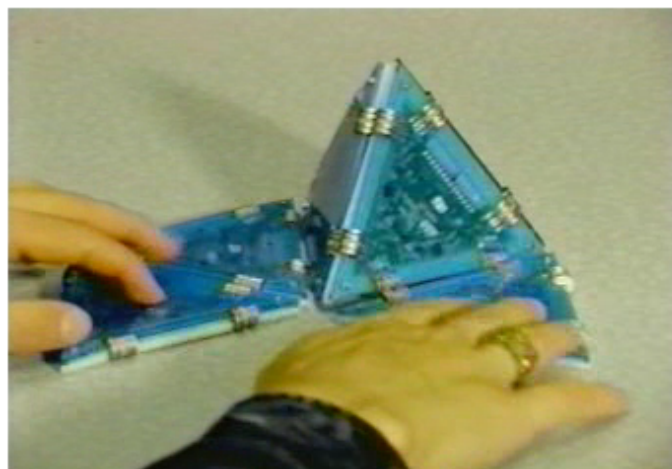


図 2.1: Triangles



図 2.2: Navigational Blocks (文献 [5] より)

が書かれている。ブロックがディスプレイの前へ置かれると、上面に示されたトピックに関する情報がディスプレイに表示される。ユーザはオブジェクトを回転させて各面を見ることで、どのような情報が得られるのかを知ることができる。また複数のブロックを同時に置くことで、より細かな情報の表示を行うことができる。Navigational Blocks は単純な物理アイコンとして機能しており、直感的な情報検索を可能としている。

2.2.2 映像による拡張

物理表現を動的に変化させることが困難であるという TUI の欠点を解消するため、物理オブジェクトと映像投影を組み合わせたインターフェースが数多く提案されてきた。

SenseTable [6] は、平面ディスプレイ上に置いたオブジェクトの位置に合わせて映像を投影するシステムである(図 2.3)。ユーザがオブジェクトを動かすと、映像がそれに合わせて変化する。またオブジェクト上に取り付けられたダイヤルを操作することで、様々なパラメータを変化させることができる。SenseTable ではオブジェクトによる入力と映像による出力が巧みに融合されており、ユーザはディスプレイ上に映し出された図形をあたかも直接動かしているかのように操作することができる。

このような物理オブジェクトと映像を組み合わせたインターフェースは、「ユーザが直感的に操作できる」「複数人が同時に使用できる」といったメリットがあり、さまざまな用途への応用が検討されている。SenseTable は電気回路のシミュレーション (CircuTUI) や音楽演奏 (Audiopad)、防災システムのシミュレータ [7] などに応用されている。また似たような研究として PitABoard [8] があり、これはデモとして都市計画を支援するアプリケーションを使用している。

複数のオブジェクトに映像を投影する例として DataTiles [9] が挙げられる。このシステムは RFID タグのつけられた透明なパネルと平面ディスプレイから構成され、ディスプレイ上にパネルを置くと対応した映像が投影されるようになっている。複数のパネルを隣接させて置くことで、それぞれの情報を組み合わせた操作を実現させることができる。例えば天気図を表示するパネルの隣に時刻を操作するパネルを置くと、任意の時刻における天気図を表示させることができる(図 2.4)。

映像を水平ではなく垂直に投影するようなインターフェースも存在する。カリフォルニア大学バークレー校で開発された The Designer's Outpost [10] は、垂直なボードと Post-it を組み合わせたウェブデザイン管理

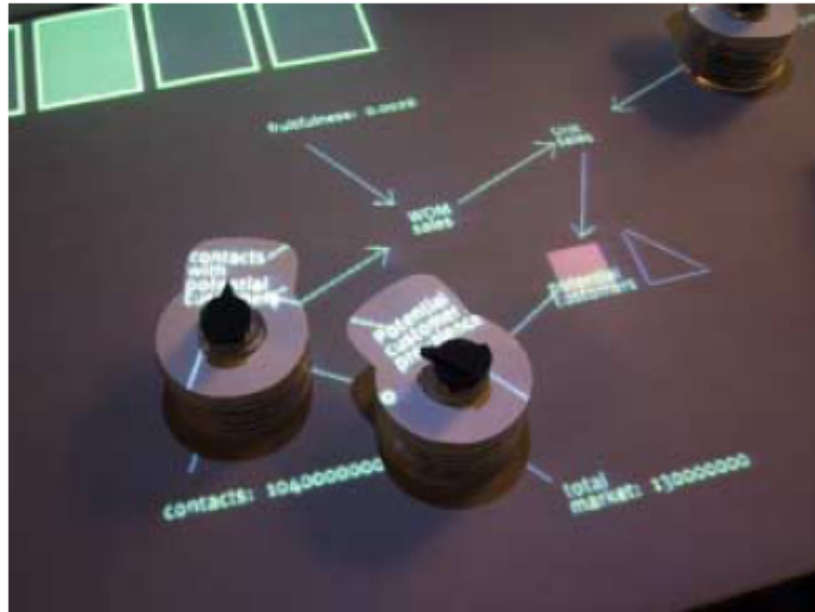


図 2.3: SenseTable (文献 [6] より)



図 2.4: DataTiles (文献 [9] より)

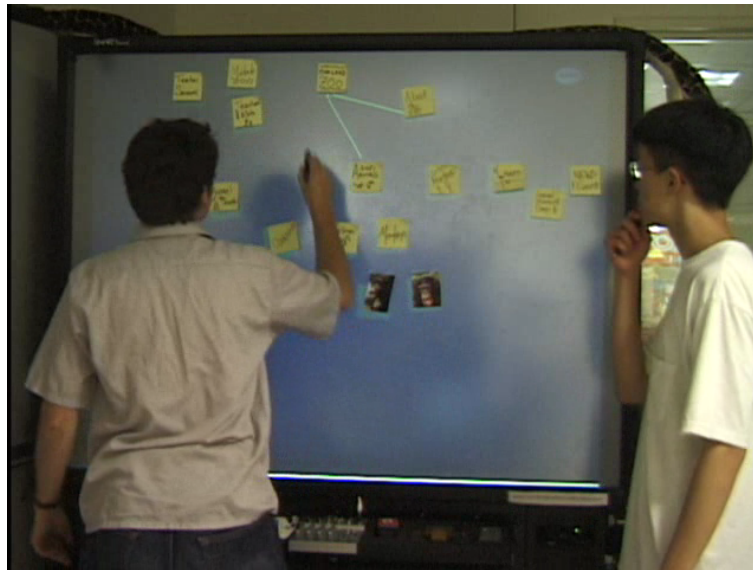


図 2.5: The Designers' Outpost

システムである(図 2.5)。ユーザはデザインのリモを Post-it に書き込みボードに貼り付ける。リモの内容はカメラによってキャプチャされ電子的に管理される。また専用のスタイラスを用いてボード上のリモを結ぶ動作を行うと、それらのリモは電子的に関連付けられ、リモの間に線が表示される。ユーザがリモを移動すると線も合わせて移動し、リモを取り除くと線も同時に削除される。The Designers' Outpost は、リモを手軽に追加・移動・削除することができるという Post-it の性質を生かした直感的な操作を実現している。同様に垂直投影を利用したシステムとしては SenseBoard [11] などがある。

2.3 日用品を用いたインタフェース

これまでに紹介したインタフェースはいずれも大型の機材を用いるものであり、一般のユーザが容易に操作できるかどうかという点ではやや疑問が残る。そこで、ユーザにとってより身近な日用品を活用したインタフェースの研究について述べる。

iStuff [12] は身の回りのオブジェクトをインタフェースにできるようにと考えられたツールキットである(図 2.6)。各オブジェクトは無線を通じて PC と接続されており、オブジェクトの状況に変化が生じるとイベントが伝達されるようになっている。イベントの処理は共通のアーキテクチャで管理され、ユーザは様々なオブジェクトによるイベントを組み合わせる使用することができる。

MouseField [13] は、RFID タグを内蔵した日用品を上置き、動かすことで様々な操作を実現するインタフェースである。例えば PlayStand++ というアプリケーションでは、MouseField の上に CD のジャケットを置くことにより音楽再生の操作を実現する(図 2.7)。ユーザがジャケットを置くと対応する音楽が再生され、ジャケットを下に動かすことで次の曲に移動し、右に回すことで音量を上げるといった操作ができるようになっている。

ToolDevice [14] は、ピンセットやスポイトなどの道具の形をしたインタフェースである(図 2.8)。ユーザはこれらのデバイスを用いて、ディスプレイ上に表示されているテキストや音楽ファイルを選択し(ピンセットで「つまみ上げる」もしくはスポイトで「吸い上げる」)、別のディスプレイやスピーカの上に移動させることができる。ToolDevice のユニークな点は、選択した情報の量によってサーボモータによる物理的なフィードバックがかかるように作られていることである。例えばピンセットを用いてファイルを選択



図 2.6: iStuff 入力コンポーネントの例 (文献 [12] より)



図 2.7: PlayStand++ (文献 [13] より)

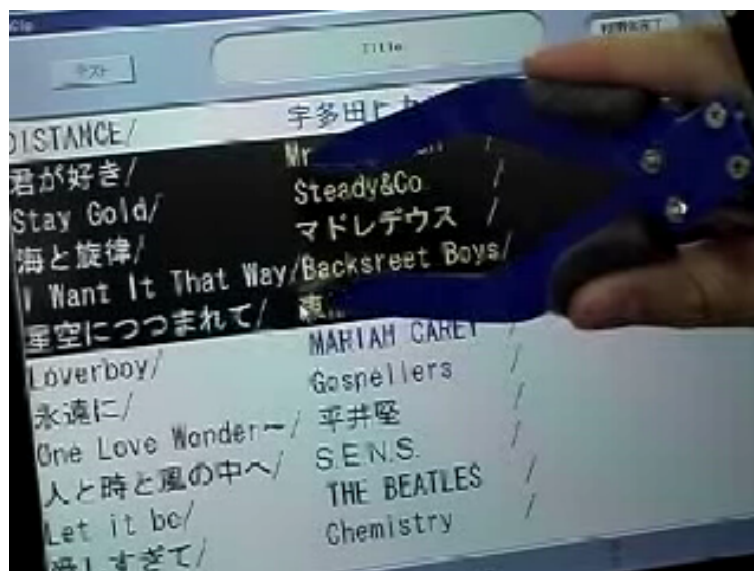


図 2.8: ToolDevice (ピンセット)



図 2.9: musicBottles (文献 [15] より)

する(「つまみ上げる」)際は、ピンセットが開こうとする反発力が、選んだファイル数に応じて発生するようになっている。

Bottles [15] はガラス瓶というありふれたオブジェクトを用いることで、コンピュータを全く意識させない、シンプルなインタフェースを構築している。アプリケーションの一つ musicBottles では、蓋を開けるとランプが瓶に照射され音楽が流れ出す(図 2.9)。それぞれの瓶は曲中の各楽器に対応しており、ユーザは瓶の蓋を開け閉めすることで楽器のコラボレーションを楽しむことができる。

Bottles は「台所で醤油の瓶の蓋を開けると醤油の香りが漂ってくる」という情景が発想の元となっている。ガラス瓶は「情報を格納する入れ物」というメタファとして用いられており、音楽以外の様々なコンテンツにも応用することができる。

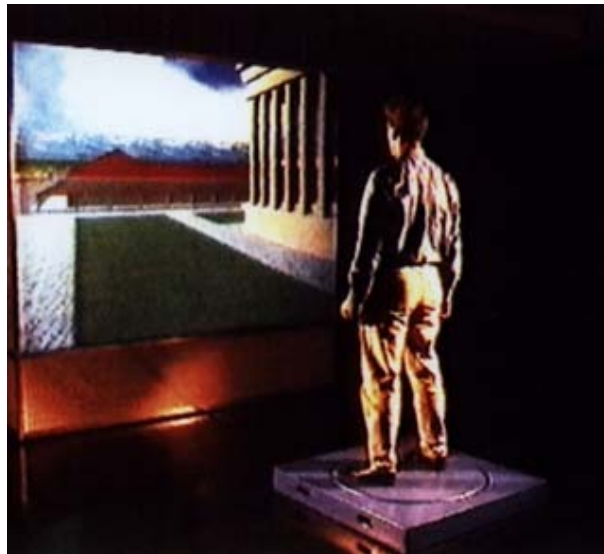


図 2.10: Virtual Balance (文献 [17] より)

これらのインタフェースはユーザが普段から見慣れているオブジェクトを使っているため、その操作方法が感覚的にわかるという利点がある。しかし iStuff や ToolDevice のようにオブジェクトに複雑な機構を取り付けなければならないことも多く、それがユーザの自然な動作を妨げてしまう可能性もある。

2.4 重心移動を用いた研究

マウスやキーボードのような汎用的な入力デバイスではなく、ユーザの重心移動によって入力を行うようなデバイスは、特にバーチャルリアリティの分野で広く活用されてきた。特に、仮想環境内での移動を目的としたものが多い。

Tilting Disc [16] は、HMD (Head Mounted Display) を装着したユーザを対象にした、仮想三次元空間内を移動するためのインタフェースである。これは直径 1m の円盤状になっており、上に乗ったユーザの重心の移動が仮想空間内の移動方向と速度に対応する。

同じような研究として、Fleischmann らによる Virtual Balance [17] が挙げられる。こちらは、2枚の木製の円板（直径は 80cm）の間に 3つの荷重計がはさまれている。ユーザが円盤の上で移動すると、3つの荷重計によって荷重分布の変化が検出される。左右に重心を移動させることで方向の変更が、前後に移動させることで仮想空間内における高度の変更ができる（図 2.10）。

WARAJI [18] はサンダルの下部に感圧センサを取り付けたインタフェースであり、重心を前後に移動させることで前進・後退が、左右に移動させることで視線の回転ができるようになっている。円盤のような機構を使用しないためユーザの位置が固定されず、HMD だけでなく大画面を用いた仮想環境システムにおいても自然な操作ができるとされている。

岩下らはより自然な移動感を得るために、ターンテーブル上で足踏み動作を行うことで仮想環境内の移動を可能にするインタフェース [19] を開発している。ターンテーブルに取り付けられた 4つの圧力センサから荷重中心を取得し、その変化を計算することで、ユーザの足踏み動作と体の向きを検出する。

円板の代わりに椅子を使って操作をする研究として、Tan らによる sensingChair [20] が挙げられる。図 2.11 のように荷重分布を計測する 2枚のセンサシートを椅子に設置することにより、ユーザの姿勢の変化による荷重分布の変化が検出できる。荷重の分布を分類することでユーザの姿勢を推定することができるため、姿勢の変化を入力とするようなゲームに応用できるとされている。



図 2.11: sensingChair (文献 [20] より)

バーチャルリアリティ以外の分野では、重心移動を用いて操縦する小型の乗車型移動プラットフォーム [21] が挙げられる。これは、40cm 角のベース部と二つの車輪が組み合わさった乗り物で、ユーザはベース部に立って乗る。ベース部を前後に傾けることで前進・後退ができるほか、ユーザの重心を左右に移動させることで操舵制御を行うことができる。左右の重心移動の検出にはひずみゲージを用いた力センサが使われている。力センサはベース部下の 4 箇所に配置されており、ユーザの重心移動によってベース部の踏み台部分（カーボンファイバー製）に生じるたわみを計測している。

2.5 ひずみ計測の応用

最後に、実物体のセンシングにひずみ計測を応用した研究を紹介する。

Strino Plant Instrument [22] は、観葉植物にひずみ計測技術を適用したアプリケーションである (図 2.12)。風などの外力によって植物がゆれる様子を音に変換して出力し、インタラクティブ性を持たせている。

システムの構成は図 2.13 のようになっている。このシステムでは、ひずみゲージが植物の茎に貼り付けられており、茎のゆれによって生じるひずみが測定される。取得したひずみの値は測定器を通じて PC に取り込まれ、値に合わせた音がスピーカから出力される。ユーザは植物に風を当てたりうちわであおいだりすることにより、植物のゆれる様子と再生される音を楽しむことができる。

Strino Playing Bar [23] [24] は、ひずみ計測技術を公園の鉄棒へ適用した例である。Strino Playing Bar を実際に使用している様子を図 2.14 に示す。

図 2.15 にシステム構成を示す。このシステムでは、鉄棒の両端付近にひずみゲージが合計 3 つ取り付けられており、ユーザが鉄棒に乗ったり鉄棒上で回転したりする時に鉄棒へ加わるひずみを測定している。

ひずみ計測器によって得られたひずみの値を PC 上で解析することで、ユーザの重みと鉄棒上の位置、そして回転に伴う加重方向の変化を計算することができる。これらの情報を元に、PC に接続されたプロジェクタから映像を、スピーカから音声を出力する。

ユーザが鉄棒にどの程度の力をかけているか、どの程度の力で握っているかという情報は、カメラによる映像解析などでは取得が難しい。将来的には、ユーザの重さや位置だけではなく、重さのかけ方・握り



図 2.12: Strino Plant Instrument

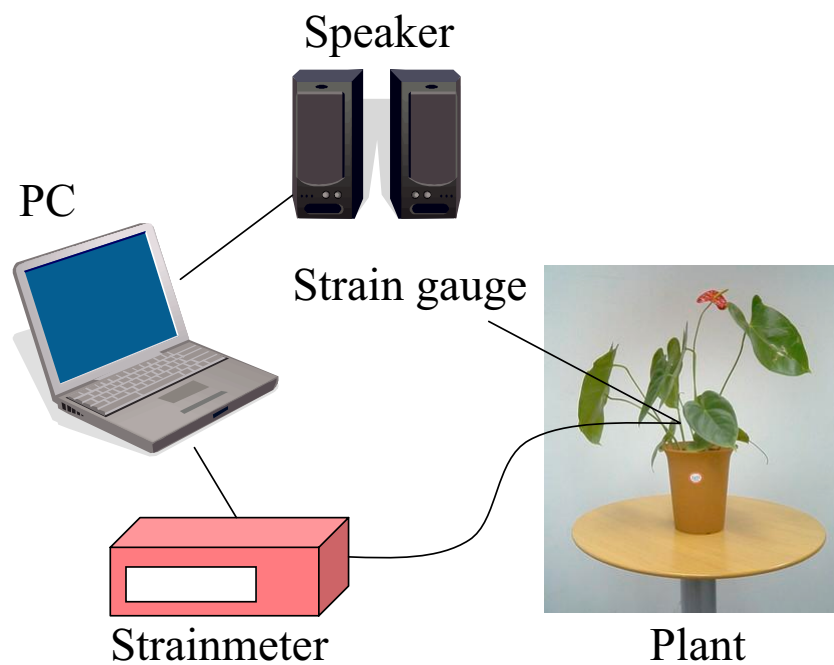


図 2.13: Strino Plant Instrument のシステム構成



図 2.14: Strino Playing Bar の使用風景

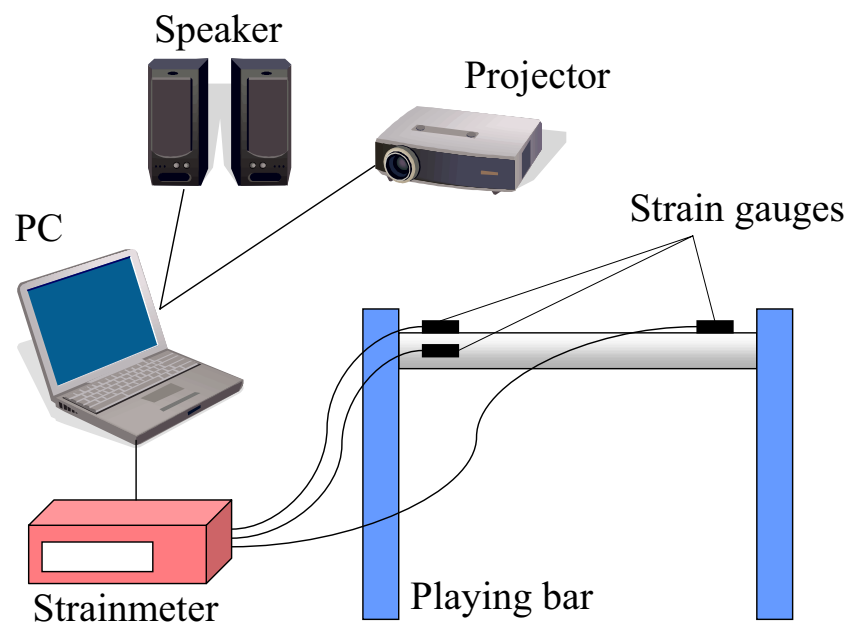


図 2.15: Strino Playing Bar のシステム構成

方・まわり方といった力学的な情報を用いたアプリケーションに応用できると考えられる。

2.6 まとめ

本章では、実物体を活用した研究について説明した。

実物体を利用する代表的な研究として、タンジブルユーザインタフェース (TUI) を紹介した。TUI は情報を実物体に割り当てることで、物体の操作を情報の操作と関連付ける。また、実物体に映像を投影することで、情報の表現を動的に変化させる研究も数多く提案されている。

続いて、日用品を活用したインタフェースについて述べた。日用品を入力デバイスとして用いることで、インタフェースとしての汎用性は失われるが、特定の操作においてはユーザにとってわかりやすい操作方法が可能となる。

さらに、ユーザの重心移動を活用したユーザインタフェースについて説明した。このようなインタフェースは特にバーチャルリアリティの分野において活用されている。また、重心移動を検出する方法も様々なものが提案されている。

最後に、ひずみ計測技術を用いて実物体をセンシングし、既存の物体をインタフェースとして活用する研究を紹介した。ひずみ計測は植物や鉄棒など様々な実物体に適用できるという特徴をもつため、既存の物体に適用することでこれまでにないユーザインタフェースの構築に応用できると考えられる。

第3章

ひずみ計測の原理と 増幅率の自動調整

3.1 はじめに

この章ではまず、ひずみの定義について述べ、そしてひずみ計測の原理について説明する。また、ひずみ計測に使われるセンサや、一緒に使われる電気回路についても簡単に紹介する。次に、ひずみ計測の特徴を説明し、他のセンサとの比較を行う。最後に、ひずみ計測の際に必要なオフセットや増幅率の調整を自動的に設定する回路の試作を行う。

3.2 ひずみとひずみ計測

3.2.1 ひずみとは

物体（弾性体）に外部から力が加わると、その力に応じて変形が生じる。このとき、単位長さあたりの変形量をひずみという。

例えば図 3.1 の場合、力が加わる前の長さを L 、変形後の長さを $L + \Delta L$ （または $L - \Delta L$ ）とすると、ひずみ ε は以下の式で計算される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

ひずみは無次元量である。通常、変形量は元の長さに比べて非常に小さいため、ひずみは 10^{-6} を基準に表されることが多い。例えば、 5×10^{-6} ひずみは、 $5 \mu\text{m}/\text{m}$ や 5 ppm などと表記される。読み方は「5 マイクロひずみ」あるいは「5 マイクロストレイン」である。

3.2.2 ひずみゲージを用いたひずみの測定

ひずみの計測にはひずみゲージ (strain gauge) がよく使われる。図 3.2 はひずみゲージの外観である。ひずみゲージは金属（抵抗体）を用いたセンサであり、被測定物の表面に接着して使用する。被測定物が外力を受けて変形すると、抵抗体の長さもそれに合わせて伸縮し、抵抗値がわずかに変化する。この抵抗値の変化を計測することで、被測定物の変形量、すなわちひずみ量を求めることができる。

ひずみに対する抵抗変化率の比のことをゲージ率、もしくはゲージファクター (gauge factor) と呼ぶ。抵

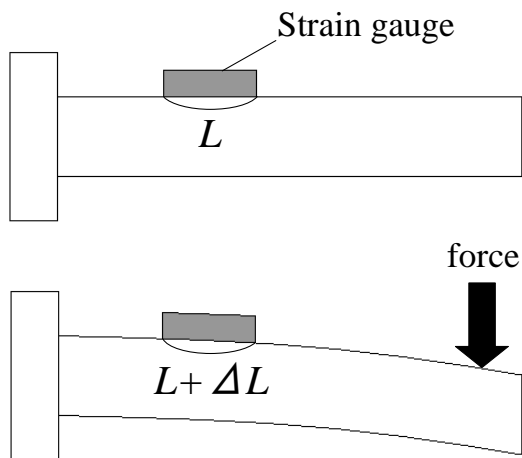


図 3.1: ひずみの発生

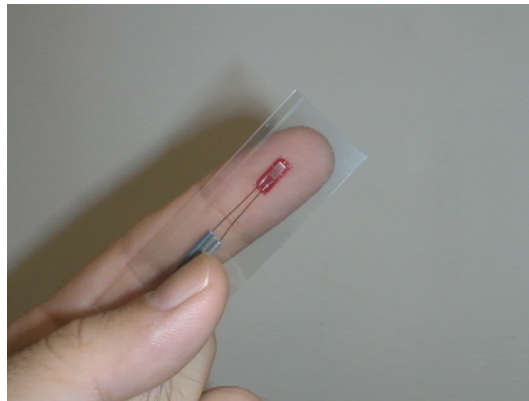


図 3.2: ひずみゲージの外観

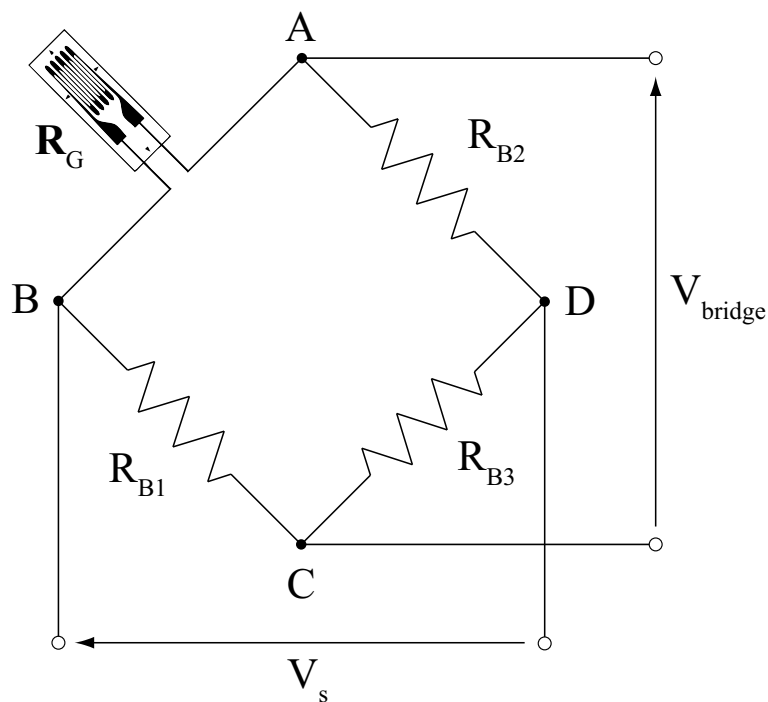


図 3.3: ホイートストンブリッジ回路 (1 ゲージ法の場合)

抗 $R \Omega$ のひずみゲージが、ひずみ量 ϵ によって $\Delta R \Omega$ 変化した場合、ゲージ率 E は

$$E = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \tag{3.2}$$

と表される。ゲージ率は無次元量であり、ひずみゲージの感度を表す値である。金属製ひずみゲージの場合は、たいていの製品で 2 程度である。

抵抗値の変化は非常に小さく、その変化を直接測ることは困難である。そこで一般的には、ひずみゲージは図 3.3 のようなホイートストンブリッジ回路と組み合わせて使用される。図 3.3 において、BD 間に電圧 V_s を加えると、出力電圧 V_{bridge} は

$$V_{\text{bridge}} = \frac{R_G R_{B3} - R_{B1} R_{B2}}{(R_G + R_{B2})(R_{B1} + R_{B3})} V_s \tag{3.3}$$

と表される．また

$$R_G R_{B3} = R_{B1} R_{B2} \quad (3.4)$$

の時，出力電圧 V_{bridge} は 0 となる．一般的なブリッジ回路の場合，4 つの抵抗の値をそろえることが多いため，以下 $R_G = R_{B1} = R_{B2} = R_{B3} = R$ とする．

ひずみゲージの長さが変化し，ゲージの抵抗が R から $R + \Delta R$ に変化すると，出力電圧は

$$V_{\text{bridge}} = \frac{(R + \Delta R)R - R^2}{(R + \Delta R + R)2R} V_s \quad (3.5)$$

$$= \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} V_s \quad (3.6)$$

となる． $R \gg \Delta R$ とし，式 3.2 を用いると，

$$V_{\text{bridge}} \simeq \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} V_s \quad (3.7)$$

$$= \frac{1}{4} \varepsilon E V_s \quad (3.8)$$

すなわち，

$$\varepsilon = \frac{4}{E V_s} V_{\text{bridge}} \quad (3.9)$$

が得られる．従って，ホイートストンブリッジ回路を用いることで，ひずみ量に比例した出力電圧が得られることがわかる．

なお実際の測定の際は，ブリッジ回路や増幅器，温度補正回路などが組み込まれたひずみ計測器が用いられる．また，感度を上げたり，温度変化の影響を減らしたりするため，1 つのブリッジ回路内で 2 枚，あるいは 4 枚のひずみゲージが用いられることもある（それぞれ 2 ゲージ法・4 ゲージ法と呼ばれる）．

3.2.3 半導体ひずみセンサ

近年では，金属の抵抗体のかわりに半導体を用いたセンサが開発されている．半導体センサはピエゾ抵抗効果を利用しており，ゲージ率が金属ゲージに比べて高い．このため金属ゲージに比べ感度が大きい反面，温度などによる影響も受けやすい．

図 3.4 は，日立製作所 機械研究所が開発した半導体ひずみセンサ [25] のパッケージ外観である．

先端部分の半導体基板（2.5mm 角）上に 2 つのひずみセンサが形成されており，2 方向のひずみ（たわみとねじり）を同時に測定することができる．また，それぞれのセンサ内においてアクティブ抵抗とダミー抵抗からなるホイートストンブリッジが構築されており，温度補償機能が備わっている．

このセンサの特徴は以下の 3 点である．

- 高感度
従来の金属ひずみゲージのゲージ率がおよそ 2 程度であるのに対し，半導体ひずみセンサのゲージ率は約 50 である．すなわち，金属ひずみゲージを使用した場合に比べ，より小さなひずみまで検出することができる．
- 低消費電力
金属ひずみゲージの抵抗値と比較して，半導体センサの抵抗値は高い．そのためセンサ部分が消費する電力は小さく，電源電圧が 3.0 V の場合ではおよそ 0.22 mW である．
- 半導体上に 2 方向のセンシング部が形成されており，一箇所に貼るだけで 2 方向（たわみとねじり）のひずみを同時に取得することができる．

本研究では，この半導体ひずみセンサを用いて実装を行っている．

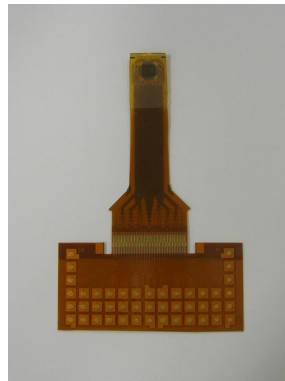


図 3.4: 半導体ひずみセンサ

3.2.4 ひずみ計測の利用

一般的にひずみ計測は、長さの変化(ひずみ)そのものではなく、この変化を生じさせる外力を測定する目的で使われる [26]。例えば材料の強度試験や疲労試験の際は、測定物に貼り付けたひずみゲージによって応力を測定する。航空機の疲労試験や船舶の応力測定なども同様に行われる。また建築物のコンクリートにひずみゲージを貼り付け、建物に残留する応力を測定することにも使われる。

ひずみゲージやひずみセンサは、力や圧力、変位などを測定する変換器にも用いられる。代表的なものはロードセル(荷重変換器)である。ひずみゲージはロードセル内部の起歪体と呼ばれる部位に取り付けられており、起歪体に加えられた荷重をひずみとして検出し、電気信号に変換する。ひずみゲージやひずみセンサは被測定物に直接貼り付けるため基本的に使い捨てであるが、ロードセルなどの変換器は繰り返し測定できるように作られており、また温度変化などによる影響もはじめから補正されていることが多い。

また、ひずみ計測はインタフェースの研究にも使用されている。例えば Tada らは、ロボット用人間型柔軟指における触覚センサとしてひずみゲージを用いている [27]。前野らは、ヒトの指の加圧による爪の変形量の計測ひずみゲージを使っている [28]。また雨宮らは、身体装着型の足踏みインタフェース WARP において、ユーザの股関節角度の計測にひずみゲージを用いている [29]。

3.2.5 ひずみ計測の特徴

以上に述べたように、ひずみ計測は一般的に物理量の測定に用いられるものである。しかし、ひずみゲージやひずみセンサの以下のような特徴に注目すると、ひずみ計測をインタフェース、特に実物体を利用するユーザインタフェースに応用することができるのではないかと考えられる。

- 取り付けることのできる素材が幅広い
- 取り付けが容易
- 微小な変化を検知できる
- 周波数応答性が良い

ひずみ計測の特徴の1つは、センサを幅広い素材に取り付けられることである。例えば、一般的なひずみゲージは長さ・幅がそれぞれ数 mm という大きさであり、日用品のような小さな物体や、観葉植物の茎といった微小なスペースにも取り付けることができる [22]。またひずみゲージは物体の表面に接着剤を用いて貼り付けるため、物体の中にセンサを組み込んだり、特殊な装置を物体に取り付けたりする必要はない。身の回りの様々な物体に取り付けることのできるひずみゲージ・ひずみセンサは、実物体を用いるユーザインタフェースと親和性が高いと考えられる。

ひずみ計測の2つ目の特徴は感度が高いことである。3.2.1節で述べたように、ひずみは 10^{-6} を基準に表されるほどの微小な変化である。ひずみ計測を利用することで、ユーザのわずかな動きや接触を感知したり、物体に加わる小さな力を入力として使用するインタフェースが実現できると思われる。

ひずみ計測の3つ目の特徴は、力が直接加わる位置ではなく、力を受けてひずむ位置にセンサを取り付けることである。例えば抵抗膜式タッチパネルなどの接触型インタフェースでは、ユーザが触れる部位にセンサを取り付けておく必要があるため、接触部分の形状が平面などに限定されてしまうことが多い。一方ひずみ計測の場合は、取り付ける物体の形状に関する制限は少ない。そのため、長さのある物体や複雑な形状をした立体などにも適用することができる。さらにゲージを取り付ける位置を工夫すれば、センサの存在を感じさせないようなインタフェースを構築することも可能であり、ユーザは現実空間内の物体との自然なインタラクションを行うことができると考えられる。

ひずみ計測に関するデメリットについても述べておく。ひずみ計測は、センサを貼り付ける物体によって計測結果が大きく左右される。例えば半導体センサの場合、計測する物体の硬さが半導体部分と異なると、ひずみがセンサ部分に十分に伝わらないことがある。また木材などにおいては、木目の方向によってひずみの伝わり方が異なってしまう。さらに、そもそもセンサが貼り付けられない物体や、弾性体以外の物体では測定することができない。

ひずみ計測ではセンサを対象物に貼り付ける必要があるが、この接着に要する時間は一般的に数分～数時間程度であり（対象物や接着剤の性質により異なる）、即座にセンサが使用可能にならない場合もある。

加速度センサや圧センサといった市販のセンサはパッケージ化されていることが多く、温度変化などによる影響もあらかじめ調節済みであることが多い。ひずみ計測においては、バランス（ゼロ点）の補正や、場合によっては増幅回路の増幅率を調節する必要がある。

3.2.6 ひずみセンサと他のセンサの比較

既に述べたように、ひずみ計測は力や圧力、物体の変位などの測定に用いられる。しかしこれらの測定であれば、圧力センサや加速度センサ、タッチパネルなどのデバイスを使うこともできる。そこで、ひずみセンサ単体を用いた場合と、これらのデバイスとの比較を以下にまとめる。

加速度センサ

加速度センサは物体の動きを検出するためによく使われる。また応用として、加速度センサを内蔵したモジュールを携帯することで、ユーザの動作や状態を推定する研究 [30] などにも使われている。最近では、加速度センサがコントローラに内蔵された家庭用ゲーム機器なども販売されており、ユーザがコントローラを振る動作をゲームに反映させることができるようになっている。

古典力学の運動方程式 $F = ma$ を用いることで、加速度が検出できれば物体に加わる力も計算できると考えられる。しかし実際には、加速度センサでは速度がゆっくりと変化する状況は検出しづらい。また、そもそも物体が運動しないような力に関しては検出することができない。ひずみセンサでは、物体の運動を検出することは難しいが、物体が運動しないような場合でも加えられた力を測定できる。

また、上述した運動方程式で計算されるのは、物体全体に加えられた力である。一方ひずみ計測は、物体上の複数点にセンサを貼り付けることで、局所的な力の加わり方を測定することができる。

圧力センサ

圧力センサは物体に加えられた圧力を検知する。力を検出するという点においてはひずみ計測と似ている。しかし、圧力センサは「センサに加えられた力を計測する」のに対し、ひずみセンサは「物体に加えられている力を計測する」という違いがある。例えば重い物体に加わる力を計測する場合、圧力センサを

物体の下に設置した場合は、物体自身の重さもセンサに加わってしまう。ひずみセンサを物体に貼り付けた場合は、物体にかかる力のみを計測することができる。

一般にパッケージとして販売されている圧力センサは、校正済みであり、すぐに使うことができる。一方ひずみセンサでは、増幅回路の増幅率やオフセット、あるいは温度に対する補正などを考慮する必要がある。

タッチパネル

ひずみ計測を平面の板に貼り付けることで、タッチパネルのようなシステムを構築することができる [31] [32]。タッチパネルには静電容量方式、抵抗膜方式、赤外光方式など様々な方式があるが、これらのシステムは主に平面上でしか使用することしかできない。ひずみ計測は、立体的な物体にも適用することができる。また、抵抗膜などで覆うことが困難であるような、長さがある物体、巨大な物体にも適用することができると考えられる。

ただし、ひずみ計測を応用してタッチパネルを作成する際は、材質や性質（例えば板の場合、木目など）を考慮する必要がある。

3.3 増幅回路の作成

ひずみゲージを用いたひずみ計測では、3.2.2 節で述べたブリッジ回路を使ってひずみ量を電圧の変化に変換した後、増幅回路を用いて電圧値を増幅する。増幅回路の増幅率は、測定するひずみの大きさに合わせて調節する必要がある。またひずみ計測に先立ち、ブリッジ抵抗の値を調節し、初期不平衡値による誤差を補正する必要がある。

専門的なひずみ測定器では、高性能の A/D 変換回路と、自動平衡機能を内蔵することでこれらの問題を解決し、高レベルの測定を可能にしている。しかし、このような測定器は大型かつ高価であり、ユーザインタフェースを構築するために身近にある様々な実物体のひずみを計測する用途には向かない。

筆者はそこで、3.2.3 節で紹介した半導体ひずみセンサと組み合わせて、増幅率と初期不平衡値を半自動的に調整する電気回路を作成した。専用の測定器を使わずにすむため、身近な物体にひずみ計測を適用しやすくなると考えられる。

3.3.1 システム構成

本研究で使用する半導体ひずみセンサは、センサ内にホイートストンブリッジ回路が組み込まれているため、外付けの増幅回路を用意するだけでひずみの計測ができる。

増幅回路には、Analog Devices 社製の IC AD623 を使用した。この IC はワンチップで計装アンプ回路 (instrumentation amplifier, インストルメンテーションアンプ回路とも呼ばれる) を実現しており、微弱なセンサ信号の増幅などに用いられる。また、この IC は特定のピンに抵抗を外付けすることでアンプ回路の増幅率を 1 から 1000 の範囲で変化させることができる。さらに、REF ピンに電圧を印加することでオフセットの調整を行うことができる。

増幅率とオフセットを変化させるために、同じく Analog Devices 社製のデジタルポテンションメーター IC AD8402 (AD8402ANZ10) を使用した。この IC には 10k Ω の可変抵抗が 2 チャンネル分入っていて、外部から制御信号を与えることにより独立に 256 段階で設定することができる。この IC を利用し、1 つのチャンネルで AD623 の増幅率を、もう一つのチャンネルでオフセットをそれぞれ変化させられるように設計した。

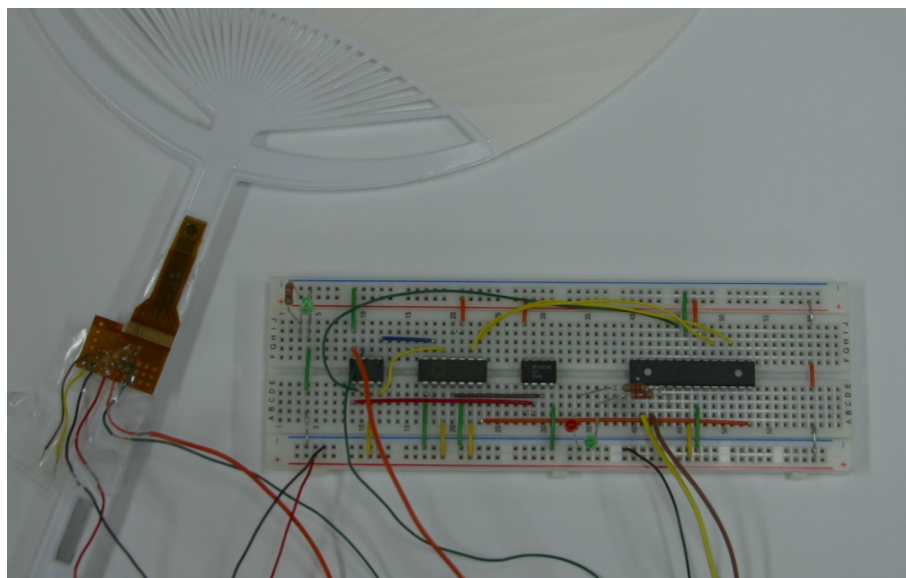


図 3.5: 増幅率・オフセット調節回路

AD8402 の制御にはマイコン (Atmel 社製 ATmega48) を使用した。AD623 の出力を ATmega48 の A/D 入力端子に接続し、プログラムから増幅回路の出力をモニタリングするとともに、増幅率とオフセットを調節してフィードバックをかけるようにした。

試作した回路の全体像を図 3.5 に示す。

3.3.2 増幅率とオフセットの調節方法

マイコンの制御プログラムは C 言語を用いて開発した。電源が投入されると、プログラムまず、AD623 の増幅率を 10 (初期値) に、オフセットを電源電圧の半分に設定する。その後、以下のような処理を順に行う。

(A) オフセットの調節。

増幅回路の出力を 20 回測定し平均値を計算する。この平均値が電源電圧の半分を中心とする一定の範囲内 ($\pm 0.2V$) に収まるように、オフセット電圧を調節する。

(B) 増幅率の調節。

増幅回路の出力値を見ながら、増幅率を少しずつ上げる。もしも出力値が電源電圧を超えた場合は、増幅率を下げる。また、その時の増幅率を上限に設定する。

(C) オフセットの再調節。

増幅率を変化させたことにより、オフセットの値も変動する。そこで再度 (A) の調節を行い、平均値が一定の範囲内に収まるようにする。

一方、この回路を使用するユーザは、以下のように物体を操作する。

- (A) と (C) の段階では、物体に力を加えない。
- (B) の段階では、物体に力を加えてひずみを発生させ、想定される最大のひずみをひずみセンサが計測するようにする。

なお、回路には 2 つの LED が装着されており、(A)・(B)・(C) の段階を見て区別できるようになっている。

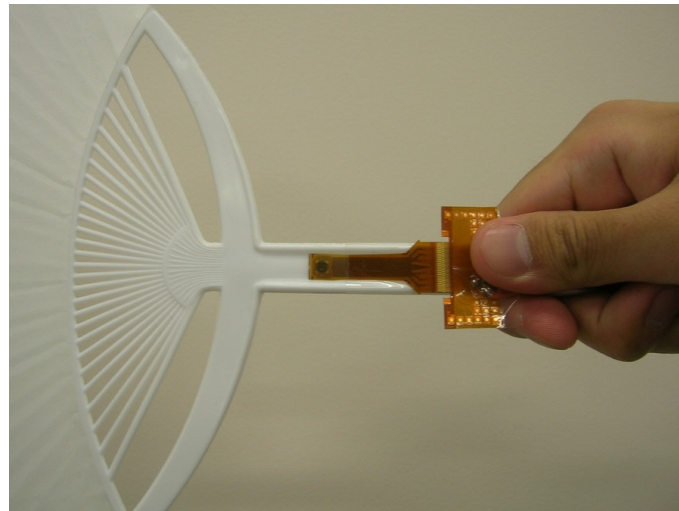


図 3.6: うちわに貼り付けたひずみセンサの様子

このようにして、力を加えない状態（ひずみが発生していない状態）とひずみを最大になる状態をあらかじめ回路に与えることで、初期不平衡値の調節と増幅率の適切な設定が可能になると考えられる。

3.3.3 実験結果

前述した回路の動作確認を行った。実験では、プラスチック製のうちわの柄にひずみセンサを貼り付け、ひずみを計測した（図 3.6）。

このうちわは、あおぐことで柄の部分が曲がるので、比較的大きなひずみが発生する。また、センサ部分を上に向けるか、下に向けるかによってひずみの初期値が変化する（重力により扇の部分がわずかに垂れ、柄に力がかかるからだと考えられる）。従って、うちわを用いたユーザインタフェースを制作する場合は、使用する状況や用途に合わせて増幅率をオフセットを適切に調節する必要があると考えられる。

ひずみセンサを試作した回路に接続し、(A)の段階でうちわを静止させ、(B)の段階でうちわを激しくあおぎ、(C)の段階で再びうちわを静止させた。図 3.7 に、一連の動作においてマイコンが計測した増幅回路の出力値と、プログラムが設定したオフセットの値を合わせて示す。また、図 3.8 は、プログラムが設定した増幅回路の増幅率である。なお、回路の電源電圧は 3.0V に設定した。

図 3.7 を見ると、(A)の段階では出力が許容範囲内に収まっていたため、オフセットは初期値（1.5V）のまま変化させていないことがわかる。一方 (C)の段階では、出力が 1.8V 付近まで上昇していたため、オフセットの電圧を 1.3V まで下げたことがわかる。

また図 3.8 を見ると、(B)の段階でプログラムは増幅率を徐々に上昇させたが、約 50 倍になったところで出力が電源電圧近くにまで達したことから増幅率をいったん 42 倍に下げ、その後さらに電源電圧近くの出力を観測したため再び 39 倍に下げたことがわかる。

なお、この調節が終了した後にうちわを大きくあおいでみたが、増幅回路の出力は電源電圧を超えることがなく、ひずみを適切に計測することができた。すなわち、うちわの柄におけるひずみ計測において、増幅率とオフセットが最適に設定されたことが確認された。

本研究で試作した回路は、想定される最大のひずみを意図的に与えることができる状況であれば様々なシステムに応用できると考えられる。

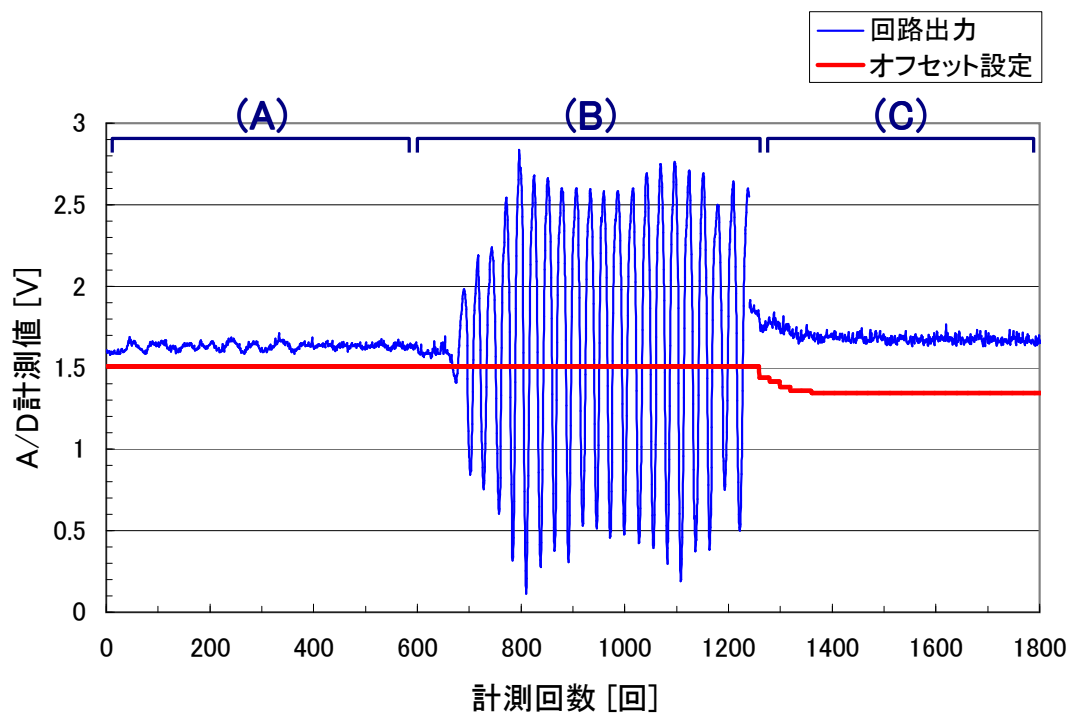


図 3.7: 回路の出力電圧とオフセット設定の変化

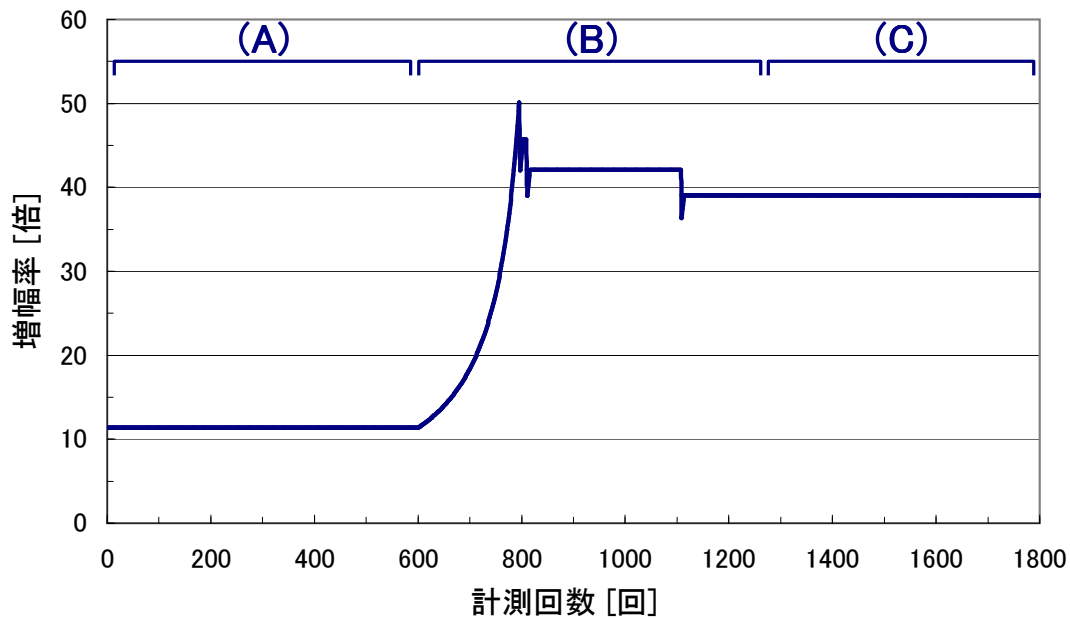


図 3.8: 増幅率の変化

3.4 まとめ

本章では、ひずみ計測の原理と、ひずみ計測を用いることによる特徴を説明した。ひずみ計測の特徴を生かすことで、身の回りにある既存物を用いてユーザインタフェースを構築できる可能性について述べた。また、様々な実物体にひずみセンサを貼り付けた場合に問題となる増幅率やオフセットの設定に対し、マイコンとデジタルポテンションメーター、計装アンプ IC を組み合わせた小型の電気回路を制作することで、専用のひずみ測定器を使わなくても簡易的な動ひずみの計測ができることを示した。

次章では、ひずみ計測を日用品などに適用した場合に問題となる配線と、その解決策としてひずみ計測の無線化について述べる。

第4章

ひずみ計測の無線化

4.1 はじめに

本章では、第3章で述べたひずみ計測を身の回りの物体に適用しやすくするために、ひずみ計測を無線化することを提案する。

既に述べたように、ひずみセンサを既存の様々な物体の表面に貼り付けることで、それらを簡易的なユーザインタフェースとして転用することができると考えられる。しかし実際にインタフェースを構築する上で、センサと測定器、もしくはセンサとPCを接続するケーブルが大きな問題となることがある。特に、持ち運びを前提とするような日用品や、回転させて使用するような道具にひずみセンサを貼り付けた場合、配線がユーザの動作を妨げ、インタフェースの自由度を下げってしまう原因となる。

そこで本章では、ひずみ計測を無線化し、配線を減らすことについて検討する。本章ではまず、ひずみ計測を無線化することによる利点についてまとめる。また、PCにおいてしばしば用いられる近距離無線通信の方式について述べ、それらを比較検討する。そして、ひずみセンサで計測したデータをBluetoothを用いてPCへ送信するシステムを提案し、日用品とシステムを組み合わせることで試作したアプリケーションについて簡単に述べる。また、従来のひずみ測定器を使用した計測との比較を行う。

4.2 無線通信の導入

4.2.1 無線化による利点

図4.1は、筆者が本研究で想定している環境の概念図である。ひずみセンサは日用品や家具、部屋の壁など、様々な位置に貼り付けられており、ユーザから加えられた力がいろいろな場所で検知できるようになっている。これらのセンサが取得したひずみデータは、1つ（もしくはそれ以上）のPCに送られ、処理される。このようにして、様々な場所でのユーザの行動を取得して、PC上で動作するアプリケーションの入力としたり、もしくはPCと接続された機器の制御に応用したりすることができる。

もちろん、一つ一つのひずみセンサとPCをケーブルで直接接続することも可能である。しかし、センサの数が増加した場合、またセンサを広範囲にわたって設置する場合などでは、ケーブルの設置に関して



図 4.1: 無線システムが目標とする環境

問題が生じるため、インタフェースの構築が煩雑になる。また前節で述べたように、ケーブルがあることにより、物体の持ち運びが困難になったり、回転などの動作が制限されてしまうことも考えられる。

これらの点を踏まえ、ひずみ計測をユーザインタフェースに應用する観点における無線化の利点を以下にまとめる。

(1) 手に持って使用する物体に適用し易くなる

ペンや歯ブラシなど、身の回りに存在する小型の物体（日用品）などにひずみ計測を適用し持ち運ぶことができる。すなわち、インタフェースの可搬性が向上する。

また、バットや竹刀といった、大きく動かしたり、振り回したりするような物体に適用した場合に、ユーザの動きが束縛されることがなくなるため、自由度が増す。

(2) 物体を回転させられる

配線をなくすことにより、物体が回転するような状況でもひずみが計測できるようになる。例えば回転椅子やボールといった物体にも適用することができるようになる。

(3) 配線の手間が省ける

多数の測定物を一度に測定する場合、センサと測定器との間の配線に手間がかかってしまう。無線システムを導入することで、これらの手間が省け、計測がより簡単になる。

この点は特に、広い空間内に複数のセンサを設置する際に顕著となる。

(4) 物理的に導線を接続できないところでも使用できる

密閉空間内にセンサを設置しておき、測定データを外部から読み取るといったことが可能となる。

このように、ひずみ計測の無線化によって、実物体を利用したユーザインタフェース構築の可能性を広げることができると考えられる。

一方、無線通信技術では有線通信と比べ送信できる情報量が少なくなることが多い。このため、無線化することにより、サンプリング速度の低下や、遅延の発生などの問題が生じることが考えられる。また、他の電磁波との干渉により、通信が不安定になったりするなど信頼性の低下も生じる。

4.2.2 無線通信の規格

本研究では、一般のユーザが身近なものにセンサを貼り付けることを想定しているため、無線通信に関しては特別な免許を必要としないものが望ましい。しかし、無線局の免許を必要としない「微弱無線局」においては電界強度が大きく制限されているため、電波の到達距離が短い、他の機器が発するノイズに弱いなどといった欠点が存在し、通信機器の製作に難がある。

そこで本研究では、PCの周辺機器に用いられ、免許が不要である小電力データ通信システムの無線局を中心に検討を行った。代表的なものは、IEEE802.11シリーズ、Bluetooth、Zigbee、RFID、Wireless USBなどである。

IEEE802.11シリーズ（いわゆる無線LAN）は、その名の通りLAN (Local Area Network) を構築される目的で使われることが多い。本研究で想定するような、単純なセンサをPCと接続する目的ではあまり使われない。

RFID通信に用いられるアクティブタグの中には、温度センサなどを内蔵し、自身のID情報に加えて定期的に測定データを送信する機能を有するものもある。しかしその送信間隔は数秒～数分であり、主としてセンサネットワークの構築や、物品の移動・流通の監視を目的として使われる。従って、動ひずみを計測しそのデータを連続的にPCに送信するような用途には使用しづらい。

Wireless USBはまだ本格的に普及しておらず、機器の入手が困難である。

以下では、BluetoothとZigbeeの2方式に絞って検討を行う。

表 4.1: Bluetooth と ZigBee の比較

	Bluetooth	ZigBee
周波数	2.4GHz 帯	2.4GHz 帯 (日本国内の場合)
最大伝送距離	100m (Class 1, 100mW 出力) 10m (Class 2, 10mW 出力) 1m (Class 3, 1mW 出力)	室内で 30m 程度
データ転送速度	1Mbps (ver 1.2) 3Mbps (ver 2.0+EDR)	250kbps (2.4GHz 帯の場合)
一つのネットワークに接続可能な最大ノード数	8	65535
マルチホップ	非サポート	サポート
消費電力		

Bluetooth と ZigBee は、日本国内ではいずれも 2.4GHz 帯の周波数帯域を使用する。Bluetooth では、一つのネットワークに最大 8 台までのデバイスを接続することができる¹。そのうちの 1 台がマスター、残りがスレーブとなり、通信はマスターとスレーブの間でのみ行われる。この一つのネットワークのことをピコネットと呼ぶ。通信を開始するにあたりペアリング処理が必要なため、接続時に数秒の時間を要する。一方、接続された後はデータを連続して送受信することができる。Bluetooth はワイヤレスヘッドフォンなどでの音声信号の伝達や、PC から携帯電話を介したダイヤルアップ接続、ゲーム機器の無線コントローラなどに使用されている。

ZigBee は、Bluetooth よりもさらに低価格・低消費電力を目的とした規格である。電池のみで数ヶ月から数年に渡って動作するようなデバイスに使われることが多い。またメッシュ型やツリー型のネットワークを構築でき、マルチホップ機能を使うことにより低消費電力で広範囲で通信を行うことができる。このような特徴から、多数のセンサを環境内に設置するようなセンサネットワークや、アドホック型のネットワークの構築などで用いられる。

本研究では、単にひずみ計測のデータを集計するのではなく、それをリアルタイムで PC に送信し動ひずみの変化に応じた処理を行うことを目的としている。そのため、通信手段もリアルタイム性が重要となる。そこで今回は、消費電力や接続数の面では制限があるが、Bluetooth を用いることにした。

4.3 システム構成

本章で提案するシステムを図 4.2 に示す。

提案システムでは、半導体ひずみセンサ (3.2.3 節を参照) から出力された電圧値の変化を、計装アンプ回路を用いて増幅する。その後、A/D 変換を行ってから Bluetooth 経由で PC へ送信する。

Bluetooth を送信する機器として、市販されているモジュール (ワイヤレステクノロジー社製、WAA-001) を使用した (図 4.3)。このモジュールは大きさが約 4cm 角、重さが 17g である。Bluetooth Ver 1.2 Class 2 に基づいた送信装置の他に、マイコン・3 軸加速度センサ・充電池が組み込まれている。本来は加速度セン

¹ただし、一つのデバイスは複数のピコネットに参加できる。そのようなデバイスがピコネット間の中継処理を行えば、9 台以上の機器が通信し合うことは理論的には可能である。

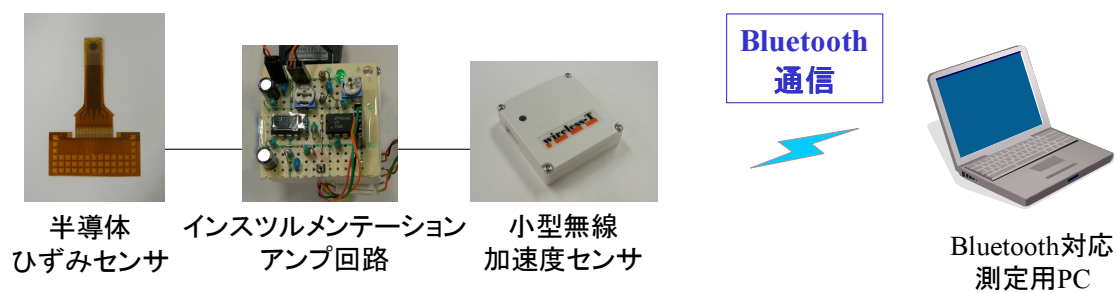


図 4.2: 提案する無線ひずみ計測システム



図 4.3: Bluetooth 機能を内蔵した加速度センサモジュール

サの値を Bluetooth 経由で PC に送信するものであるが、外部入力した電圧値を A/D 変換して送信することもできるようになっている。充電電池の容量は 150mAh であり、最長 4.5 時間ほど使用することができる。

計装アンプ回路にはオペアンプ IC である LM358N と ICL7611DCPA を用いたが、3.3 節の実験で使用した AD623 を用いることもできる。

A/D 変換は、無線モジュール内のマイコンにて 10bit の精度で行われる。今回のシステムでは電源電圧が 3.0V のため、0V から 3V の電圧値が 0 ~ 1023 の値に変換される。また、A/D 変換は最大 100Hz のサンプリング速度で行うことができる。

Bluetooth 通信は SPP (Serial Port Profile) が用いられており、シリアルポートを読み出すソフトウェアを使うことで、A/D 変換したデータを受信することができる。例として Windows 付属のハイパーターミナルによって受信した様子を図 4.4 に示す。また本研究では、ひずみの値をリアルタイムで確認できるよう、受信データをグラフとして表示するソフトウェアも試作した (図 4.5)。

なお、作成したアンプ回路と無線加速度センサモジュールはいずれも 4cm 角程度の大きになっているため、実物体とともに持ち運ぶことは十分に可能である。

4.4 アプリケーション例

前章で提案したひずみ計測システムの動作確認を行うため、実際にいくつかの日用品にひずみセンサを貼り付け、計測システムと接続した。今回は日用品として、3.3.3 節の実験で用いたプラスチック製のうちわに加えて歯ブラシを用いた。

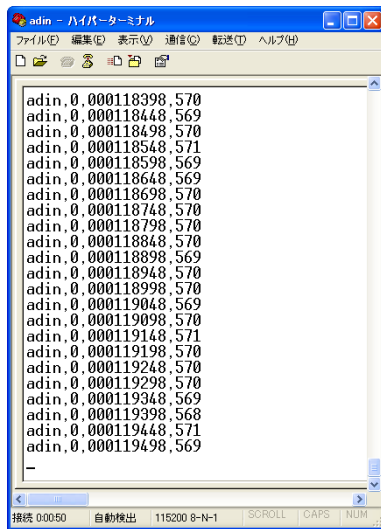


図 4.4: ハイパーターミナルによる受信データの表示

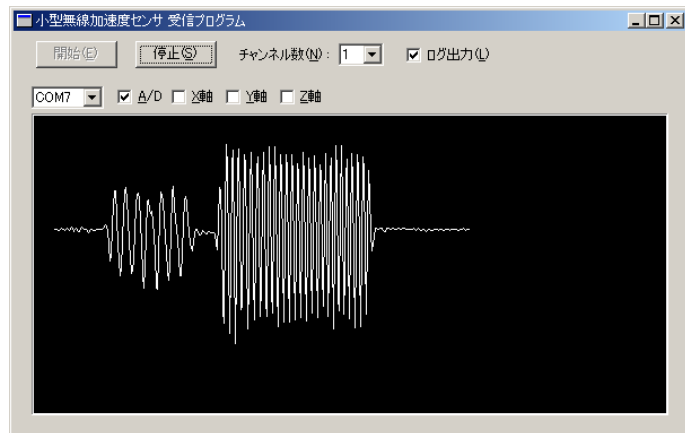


図 4.5: 試作したグラフ表示ソフトウェア

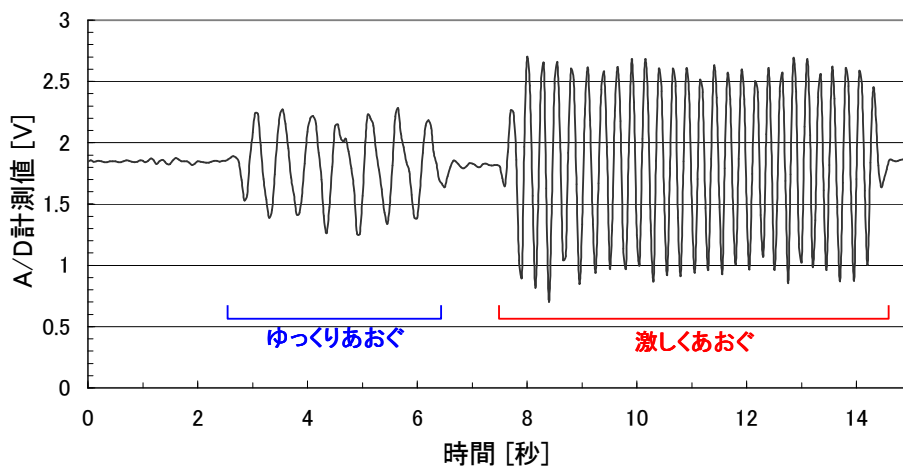


図 4.6: うちのわの柄に生じたひずみの計測

うちわを用いた動作確認

プラスチック製のうちのわの柄の部分にひずみセンサを接着した(図 3.6 を参照)。センサを提案システムに接続し、PC 上でデータを受信した。なお、システム内の計装アンプ回路の倍率は約 200 倍に、A/D 変換のサンプリング速度は 20Hz にそれぞれ設定した。

うちわをあおいで柄にひずみを生じさせると、PC 上でリアルタイムにひずみが発生する様子が観察された。はじめはゆっくりとあおぎ、その後激しくあおいだ際のひずみを計測した。得られたデータを整理したものが図 4.6 である。

グラフを見ると、うちわを左右に振る動きに合わせて柄の部分のひずみの値が上下に動いていることが分かる。また、激しくあおいだ時の方が値の動きが大きいこともわかる。このことから、ひずみセンサをうちのわに適用することで、ユーザのあおぎ方を計測し、その結果を応用したユーザインタフェースの構築が可能になると考えられる。

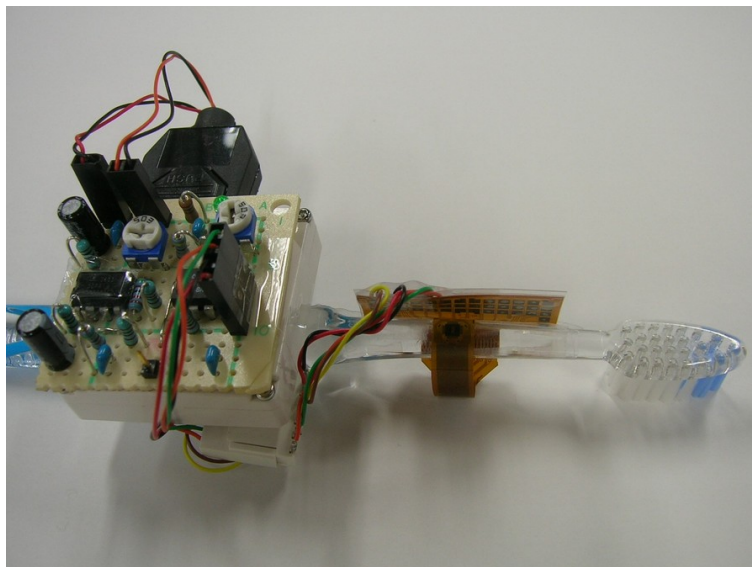


図 4.7: ひずみセンサと無線モジュールを装着した歯ブラシ

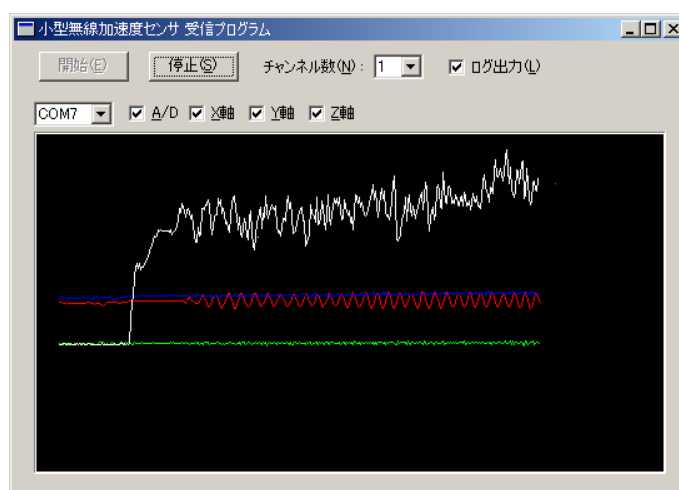


図 4.8: 受信ソフトウェアの動作の様子

なお、センサ部分と PC の間は無線により通信が行われているため、うちわを回転させたり、部屋の中で移動させたりすることもできる。

歯ブラシを用いた動作確認

歯ブラシを使う際、ユーザはブラシを歯に押し当てて使用するため、柄の部に力が加わり、ひずみが生じると考えられる。また歯ブラシは上下左右に動かして使用するので、加速度センサを用いることでその動きをある程度取得できると考えられる。

そこでうちわの場合と同様に、ブラシの柄の部分（正確には、握る部位と先端の毛の中間部分）にひずみセンサを接着し、無線システムをその付近に固定した。今回はひずみのデータと同時に、無線モジュール内の加速度センサも使用し、2種類のデータを無線で同時に PC に送信した。

作成したシステムの全体図を図 4.7 に示す。受信プログラム (図 4.8) はうちわの時と同じものを用いた。

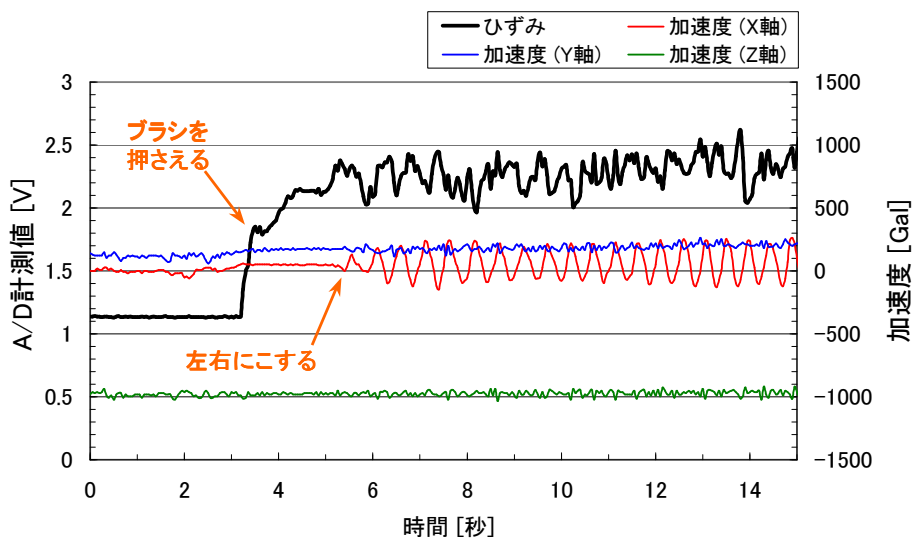


図 4.9: 歯ブラシにおけるひずみと加速度の変化

実験では、歯ブラシを手で握り、軽く机に押しあてて左右に動かした。アンプの倍率は約 200 倍に、A/D 変換のサンプリング速度は 20Hz に設定した。

データを整理すると図 4.9 のようになった。まず実験を開始して 3 秒後にひずみの値が上昇していることから、この時に歯ブラシを押し当てたということがわかる。一方加速度の値を見ると、開始して 5 秒後に X 軸の値が振動し始めていることから、この時点で擦る動作が開始されたことがわかる。実装するにあたり、加速度センサの X 軸方向を歯ブラシの向きと合わせたため、左右に動かすだけでは Y 軸や Z 軸の値はほとんど変化しなかった。

この実験結果から、持ち運び可能な日用品にひずみセンサと加速度センサを取り付け、ユーザの動作を入力するアプリケーションが構築可能であることが示された。

4.5 従来システムとの比較

ひずみ計測を無線化することにより、測定物を持ち運んだり、回転させたりできるといったメリットが生じる一方で、従来の有線通信と比較しサンプリングレートが低下したり、遅延が発生したりするといった問題も生じる。そこで、前節で用いたうちわを使い、無線化による影響を調査した。

うちわの柄の部分に、金属製ひずみゲージと半導体センサの両方を貼り付け、それぞれを動ひずみ測定器と無線システムに接続した。動ひずみ測定器は原島・苗村研究室で従来から用いられてきたものであり、専門的な動ひずみの測定の際に使用されるものである。図 4.10 に、実験の際の接続図を示す。

PC では、測定器から送信されるデータと無線システムから送信されるデータを同時に計測し、2 つのひずみデータを比較する。うちわ及び無線システムは、PC から約 50cm ほど離れた場所に置いた。なお、PC から約 1.5m 離れた場所に IEEE802.11g 規格の無線 LAN アクセスポイントがあるため、電磁波の混信が起こった可能性があることを記しておく。

PC 上で計測ソフトウェアを動作させ、うちわをあおいでひずみを発生させ、2 種類のデータを観測した。なお無線モジュールは、A/D 変換のサンプリング速度を最大 100Hz まで設定することができる。20Hz で計測を行った結果を図 4.11 に、100Hz での結果を図 4.12 にそれぞれ示す。

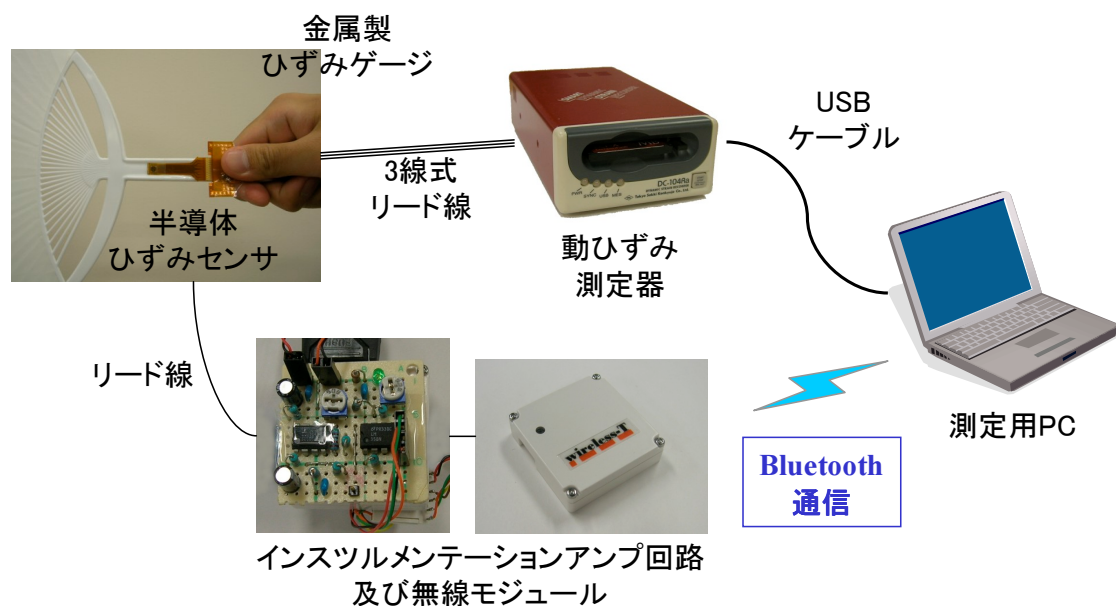


図 4.10: 比較実験のための計測構成図

4.5.1 サンプリング速度の評価

比較に用いた動ひずみ測定器は、 1×10^{-6} ひずみの分解能において最大で毎秒 5000 回の計測が可能である。一方無線モジュールに内蔵されている A/D 変換回路では、最高でも毎秒 100 回の変換を行うことしかできない。

図 4.11 の結果を見ると、ひずみ測定器からは 1 秒間に約 500 回のデータを取得しているのに対し、無線システムからは 20 回分のデータしか得られていない。そのため、実験時よりもうちわを速く動かした場合は、無線システムから得られるひずみデータの波形が乱れてしまうことが想像される。

このことから、うちわをあおぐ際に生じるひずみの完全な波形を得るのであれば、動ひずみ測定器を使うべきであることがわかる。しかし本研究の目的であるユーザインタフェースへの転用においては、うちわの大まかな動作（1 秒間における振動回数や、ひずみの最大値など）が検出できれば良いため、無線システムから得られる程度のサンプリング精度でも問題ないのではないかと考えられる。

4.5.2 遅延の評価

図 4.11・図 4.12 とともに、無線システムから得たデータは有線通信を行った場合に比べて 20~30msec の遅延が含まれている。しかしこの遅延量は一定であり、時間とともに変化することはなかった。

うちわを動かしながら PC の画面に表示されるひずみデータを目で見た限りでは、この遅延は知覚することができなかった。構築するインタフェースの種類にもよるが、非常に精度の高いタイミングが要求されるような用途でなければ、無線システムを使うことによる遅延は問題にならないと考えられる。

4.6 まとめ

本章では、ひずみ計測における配線の無線化について検討した。小型の無線モジュールと増幅回路、半導体センサを組み合わせることにより、測定したひずみを Bluetooth 経由で PC に送信するシステムを構築した。また、うちわや歯ブラシに貼り付けたひずみセンサとこのシステムを接続し、動作確認を行った。

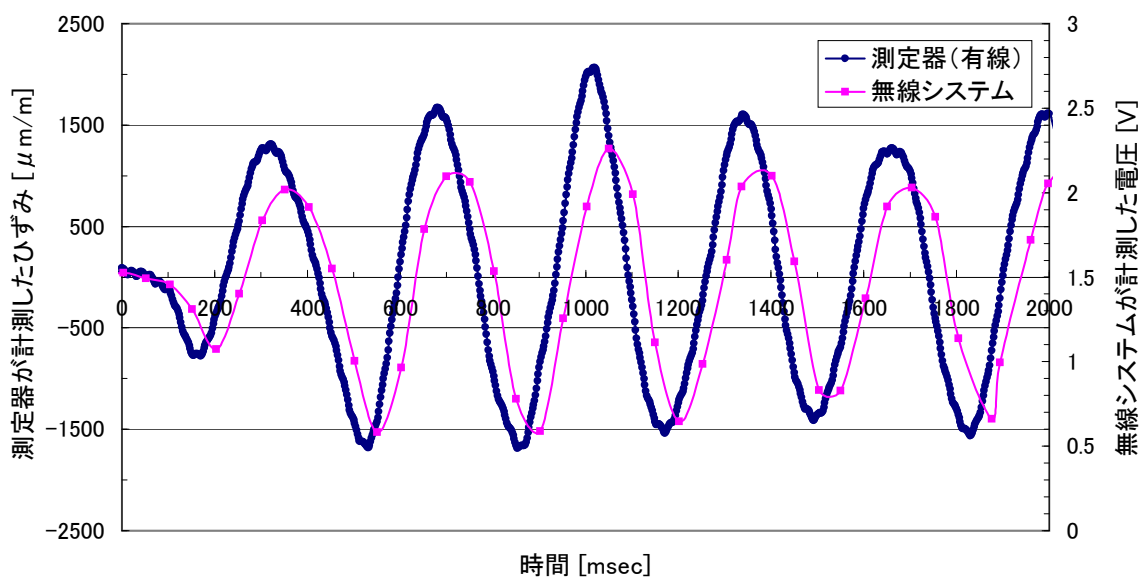


図 4.11: 比較実験の結果 (無線モジュール:20Hz 動作時)

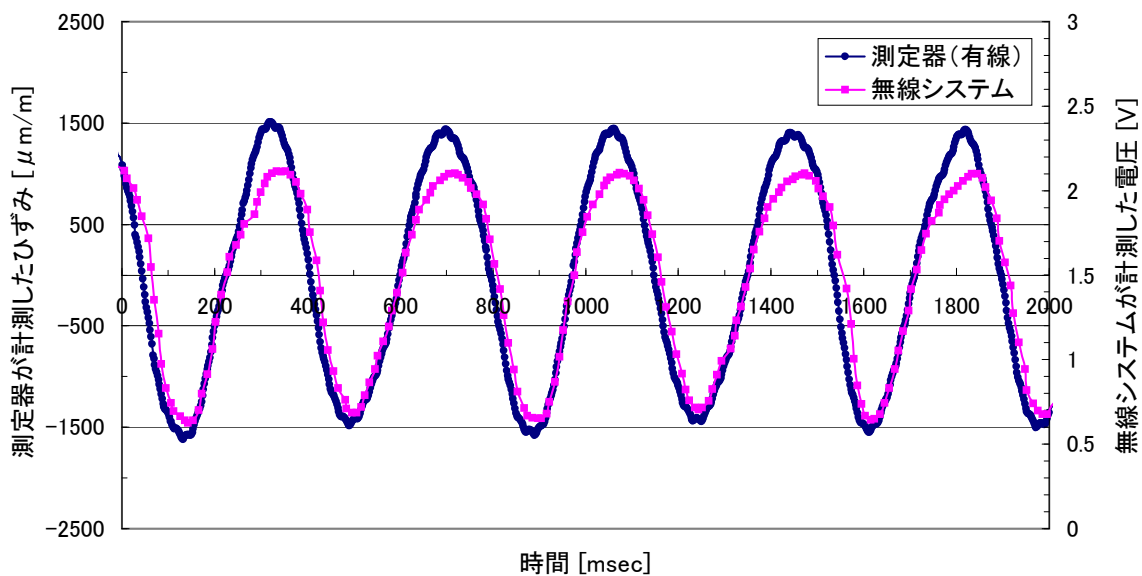


図 4.12: 比較実験の結果 (無線モジュール:100Hz 動作時)

無線化により、ひずみ計測の適用範囲を広げられること、および日用品を用いたユーザインタフェースに応用できる可能性があることを示した。さらに、モジュールに内蔵された加速度を同時に使用することで、ひずみと加速度の両方を用いるインタフェースの作成が可能であることも示した。専用の動ひずみ計測器を使用した場合に比べ、サンプリング精度の低下や遅延などが発生したが、ユーザインタフェースに応用する点においては影響は小さいと考えられる。

次章では、ひずみ計測を既存の自然物に適用し、ユーザの重心移動を入力とするインタフェースの設計と実装について述べる。

第5章

重心移動を入力とする 平均台型インタフェースの実装

5.1 はじめに

本章では、ひずみ計測に基づく、自然物を活用したユーザインタフェースの制作について述べる。第3章で述べたように、ひずみセンサを用いることにより、身の回りに存在する実物体や、既存の物体、自然物などをインタフェースとして活用することが可能となる。また、簡単に実装できる点を生かせば、室内のみならず屋外の物体にも適用できると考えられる。

そこで筆者は、ひずみ計測の適用例として、公園などに設置されている平均台型の丸太遊具に注目した。この遊具は、人が上に乗って端から端まで歩くものである。上に人の体重がかかるため、丸太にはわずかではあるがひずみが生じていると考えられる。従って、ひずみセンサを丸太の表面に貼り付けられれば、上に乗る動作が検出できる可能性がある。また公園などでよく見かけることから、ユーザにとっては「上に乗る」という操作方法を簡単に理解することができると思われる。

本研究では残念ながら、屋外での実験ができなかったため、丸太でできた平均台を入手し、それにひずみセンサを貼り付け実装を行った。

本章ではまず、インタフェースの概要と設計について説明する。次に、実装したシステムの概要を説明する。また、平均台型の物体に上から荷重がかけられた場合に生じるひずみを試算し、高感度のひずみセンサを用いることでひずみが取得できることを示す。さらに、実際に荷重をかける実験を行い、試算結果との比較を行う。最後に、インタフェースの応用例としてインタラクティブシステム「ログログ」の紹介を行う。

5.2 設計と実装

5.2.1 インタフェースの設計

図 5.1 に、本研究で用いた木製の平均台の外観を示す。ユーザはこの平均台の上に乗る、前後に歩いたり、体を傾けたりすることで操作を行う。

このインタフェースを用いて取得する情報は、

- 平均台上のユーザの重心の位置
- ユーザのバランス（前後の重心の移動）

の2つである。



図 5.1: 平均台の外観

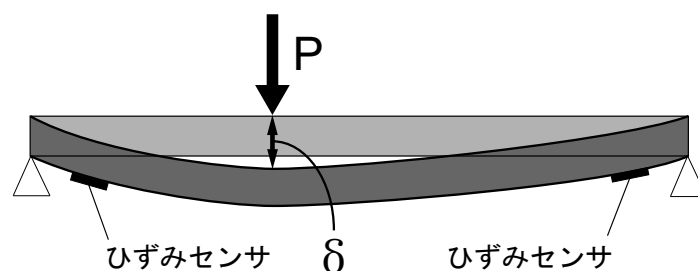


図 5.2: ひずみセンサを用いた位置の推定

以下に、平均台型インタフェースの設計を以下に述べる。

まず、平均台上のユーザの重心の位置は、丸太の両端付近に伝わるひずみを計測により推定する。図 5.2 のように、棒状の物体に力 P が加わり変位 δ が生じると、棒の端点付近に貼られたひずみセンサは物体に生じるひずみを計測する。力 P の大きさが一定であれば、ひずみの量は P の位置に応じて変化する。そこで、力の位置とひずみの量の関係を測定しておくことにより、ひずみセンサの計測値から力の位置が推定できるようになる。

また、平均台上においてユーザが前後に体を傾ける動作は、台に生じるねじりを計測することにより検出する。

このように、ひずみ計測のみを用いて重心の移動を検出することで、使用するセンサの種類を減らし、インタフェースの構成を簡略化することができる。また、平均台に限らず同様の棒状の物体にもこの手法を適用できると考えている。

提案するインタフェースの特徴は

- (1) 上に乗るという簡単な動作で操作できる（特別な操作の習得が不要）
- (2) 両手が空いており、操作と同時に別の作業を行える
- (3) カメラやタッチパネルの抵抗膜といったデバイスを必要としない、また特殊な機構をユーザに装着させる必要がない

などである。

また、平均台上のユーザの動きに応じた出力を組み合わせることで、ユーザにとってわかりやすい、インタラクティブなシステムを構築できるのではないかと考えられる。

5.2.2 実装

本研究で使用した平均台は長さ 1.8m、高さ約 45cm のものであり、直径が約 15cm の松の丸太を使って構築されていた。

ひずみを取得するセンサとして、第 3 章で述べた半導体ひずみセンサを使用した。このセンサは従来の金属製ひずみゲージに比べて感度が高く、丸太に生じる微小なひずみでも検出できるのではないかと予想される。また、先端部分の半導体基板上に 2 つのひずみセンサが形成されており、たわみとねじりのひずみを同時に測定できるため、実装が容易になるという利点を持っている。

ひずみセンサは平均台の上部の丸太の裏に、左右に 1 つずつ接着した。センサの半導体基板部分は 2.5mm×2.5mm と小さいため、この基板を丸太にそのまま接着するだけでは、丸太に生じたひずみがきちんと伝わらない恐れがある。そこで、センサを厚さ 0.2mm、大きさ 10mm×50mm の燐青銅板にいったん接着し、この金属板を丸太に接着することで、丸太に生じたひずみが基板部に確実に伝わるようにした。接着する丸太の箇所はあらかじめ金属やすりで平らに削っておき、また接着には長時間（24 時間以上）で

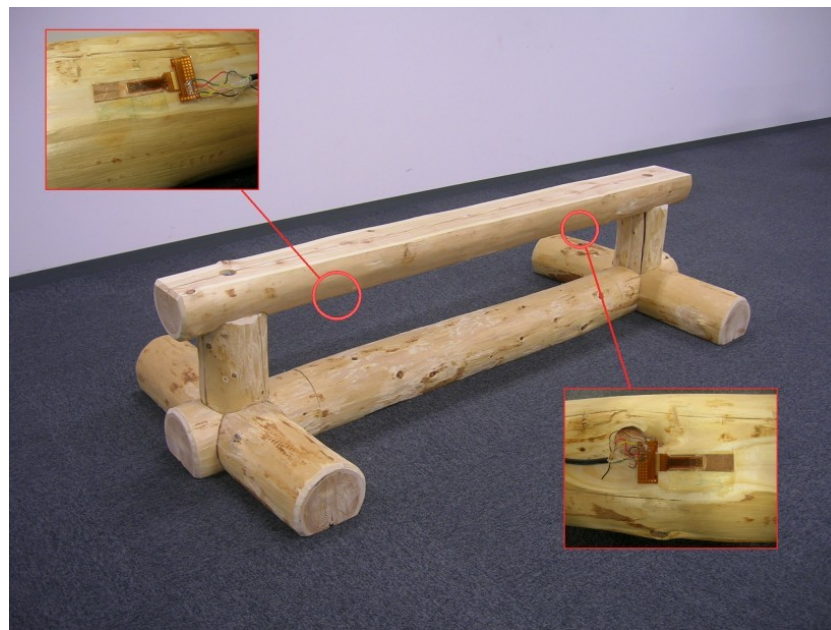


図 5.3: ひずみセンサの接着位置とその拡大図

硬化するタイプのエポキシ系接着剤を用いた。

金属板は平均台の端から 45cm (支点から 30cm) の位置に接着した。接着位置とその様子を図 5.3 に示す。

半導体ひずみセンサから出力される電圧変動は微小であるため、信号を増幅するアンプ回路が必要になる。本研究では、Analog Devices 製のインスツルメンテーションアンプ AD623 を用いて簡単な増幅回路を作成し、ひずみの信号を増幅した。基板には半固定抵抗を設け、アンプ回路の増幅率を容易に調整できるようにした。増幅した信号は USB 接続の A/D 変換器を使って PC に取り込み、ひずみをリアルタイムで計測できるようにした。

5.3 ひずみの試算

ひずみの計測を行う前に、材料力学に基づき、台に生じるひずみの量を試算した。

本研究で用いた平均台の上部の丸太は、左右 2 箇所がボルトで固定された梁であるとみなすことができる。しかし、木材は板目によりわずかに収縮することを考慮し、両端固定梁ではなく一端固定・他端支持の梁と仮定することにした。また、実際の丸太は上部が削られているが、計算上は完全に円柱形であると仮定した。

図 5.4 に、本研究で用いた一端固定・他端支持の梁のモデルを示す。支持端から a だけ離れた位置に荷重 P を加えたときに、支持端から x だけ離れた地点における、梁の底面に生じるひずみを計算する。

フックの法則により、ひずみ ε と応力 δ の関係は

$$\varepsilon = \frac{\delta}{E} \quad (5.1)$$

となる。ただし E はヤング率である。

丸太の下底における応力 δ は、曲げモーメント M 、断面二次モーメント I 、丸太の半径 R を用いて

$$\delta = \frac{MR}{I} \quad (5.2)$$

と書ける。

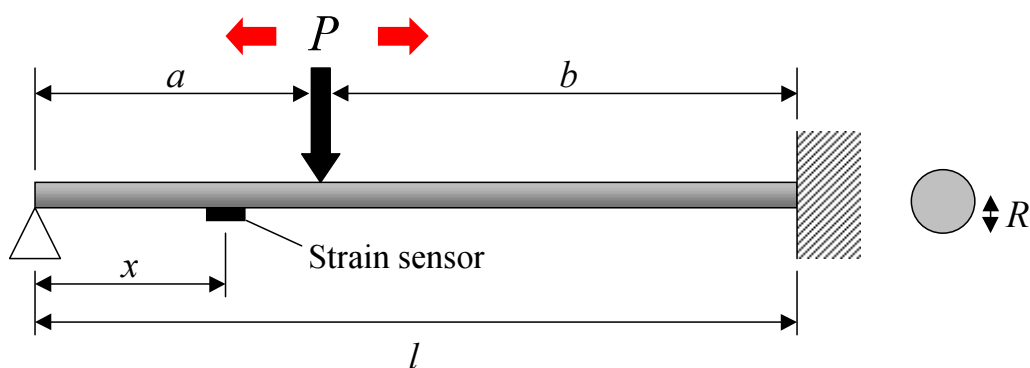


図 5.4: 一端固定・他端支持の梁

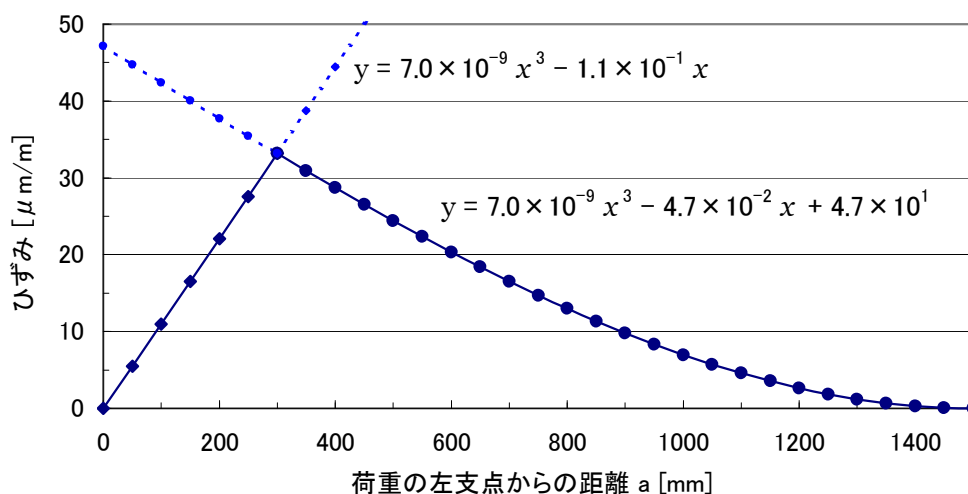


図 5.5: センサ (左) に対する理論曲線

荷重 P が左端から a の位置にある場合，支持端から x の位置の曲げモーメント M は，

$$M = \begin{cases} \frac{Pb^2}{2l^3}(a+2l)x & (0 < x < a) \\ \frac{Pb^2}{2l^3}(a+2l)x - P(x-a) & (a < x) \end{cases} \quad (5.3)$$

と書ける [33]．但し， l は梁の全長を表し， $b = l - a$ である．

また，円柱における断面二次モーメント I は

$$I = \frac{(2R)^4}{64} \pi \quad (5.5)$$

である．

以上より，式 (5.2)~式 (5.5) を式 (5.1) に代入することで，ひずみ量を計算することができる．

実装では $l = 1500$ [mm]， $x = 300$ [mm] であった．また体重 60kg のユーザが乗ることを想定し， $P = 588$ [N] とした． E の値はアカマツのヤング率 $E = 11.3$ [GPa] を使用した．

ひずみ量の計算結果をグラフを図 5.5 に示す．荷重の位置 a とひずみ量 ε の関係は，実線で示されるような，2 つの 3 次関数を組み合わせた形になった．

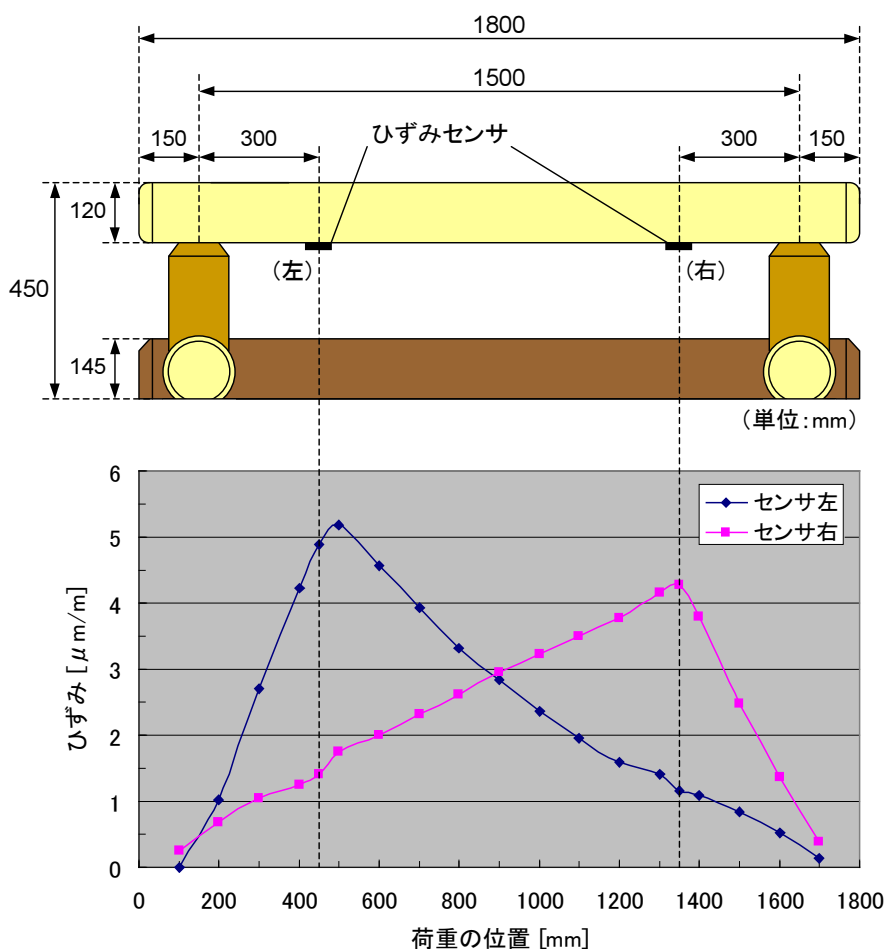


図 5.6: 平均台の各寸法とひずみの計測結果

5.4 ひずみの測定

実際に平均台に荷重をかけ、センサの出力値を計測する実験を行った。重さ 20kg の荷重（金属製の板）を、平均台の左端から 100mm の位置から 1700mm の位置まで、100mm 間隔で移動させた。実験では、増幅回路の増幅率は左右のセンサとも 126 倍であった。

平均台の寸法と、測定したひずみのグラフを図 5.6 に合わせて示す。得られたグラフは図 5.5 の曲線と同様の傾向を示しており、5.3 節のモデルによる試算方法はある程度妥当であると言える。しかし、荷重の位置がセンサから離れても、ひずみ量が 3 次関数的ではなくむしろ線形に減少するなど、モデルと異なる点も見られる。

実験では 20kg のおもりを使用したため、図 5.5 で示したひずみ量の 1/3 の量のひずみが計測されるはずである。しかしグラフを見て分かるように、実際の測定値はそれよりもはるかに小さかった。この理由の一つは、センサと木の上に金属板をはさんだことである。これにより、ひずみが確実にセンサに伝わる反面、金属板の部分でひずみが減衰してしまったと考えられる。また、丸太の表面に存在する木目やひびなどによって、ひずみがセンサまで伝わっていない可能性もある。

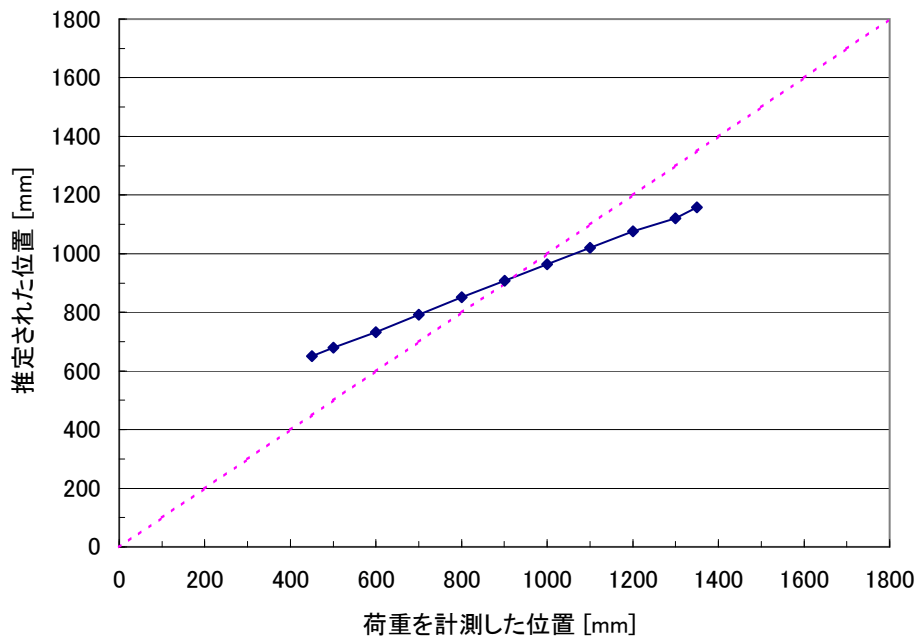


図 5.7: 荷重の測定位置と推定位置のずれ

5.5 荷重位置の推定方法

前節での計測結果を元に，荷重の位置の推定を試みる．

荷重が2つのセンサの間にある場合を考える．2つのひずみセンサによって計測されたひずみの量をそれぞれ ε_1 と ε_2 とし，これらが5.3節の式によって表されるとする．すなわち，

$$\varepsilon_1 = \frac{R}{IE} \frac{Pb^2}{2l^3} (a+2l)x \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{R}{IE} \frac{Pa^2}{2l^3} (b+2l)x \quad (5.7)$$

である． ε_1 の ε_2 の比を取ることによって，

$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 = b^2(a+2l) : a^2(b+2l) \quad (5.8)$$

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)a^3 - 3\varepsilon_1la^2 - 3\varepsilon_2l^2a + 2\varepsilon_2l^3 = 0 \quad (5.9)$$

という3次方程式が得られる．この方程式を a について解けば，荷重の位置を求めることができる．

計算した a の値と，実際の荷重の位置の関係を図 5.7 に示す．このグラフは，2つのセンサ間（450mm～1350mm）のみを示している．計算による a の値は，平均台の中央付近では実際の位置に近い値になっているが，台の端に行くにつれ誤差が大きくなり，最大で約 200mm になることがわかる．

なお，この誤差の情報を用いることで，平均台上における荷重の位置推定の精度を向上させることができると考えられる．図 5.7 で示される直線は一次関数

$$y = 0.56x + 400 \quad (5.10)$$

で近似することができる．従って，式 5.9 により算出された値を a とすると，計測位置 a' は

$$a' = 1.79a - 714 \quad (5.11)$$

という式で求められる．

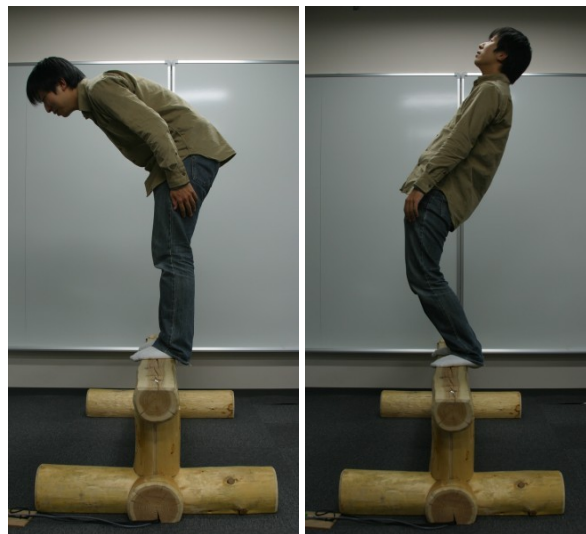


図 5.8: 体を前（写真左）と後ろ（写真右）に傾けた様子

5.6 ねじりの検出

ねじり成分の検出についても検証を行った。体重 60kg の男性が平均台の上に乗る、図 5.8 に示すように体を前後に傾けた。アンプ回路の出力は、写真左の状態で $+0.052\text{ V}$ 、写真右の状態で -0.15 V であった。なおアンプの倍率は 353 倍だった。従って、測定されたひずみ量はそれぞれ 0.94 マイクロひずみ、2.72 マイクロひずみであった。

この結果より、体を傾けることによる台のねじりについても、半導体ひずみセンサを使うことにより取得することができると考えられる。この方法は、カメラキャプチャなどによる手法よりも単純であり、簡単に実装できることが利点である。しかしながら、平均台の固定具合や、ボルトのぐらつき、さらには材木の木目などの影響により値が変化する可能性があるため、調整方法の検討を行う必要がある。

5.7 映像との組み合わせ

インタフェースの応用例として、流体シミュレーションを用いた研究 [34] と協力し、インタラクティブなシステム「ログログ」を制作した。図 5.9 がシステムの外観である。図 5.10 のように、ユーザは平均台の上に乗る、左右に歩くことが入力となる。

作品のシステム図を図 5.11 に示す。この作品は平均台型インタフェースに加え、短焦点ミラー投影方式プロジェクタ (NEC ビューテクノロジー製 WT610J) 2 台と、PC (CPU: Pentium4 2.8GHz, メモリ: 1GB, GPU: Nvidia Quadro FX 1100) を 1 台を使用する。

インタフェース内で使用しているひずみセンサ・アンプ回路・A/D 変換器については、5.4 節の実験と同様の機器を使用した。USB で接続された A/D 変換器は、アンプ回路の出力値を約 12 ミリ秒ごとに PC へ送信する。PC は得られたひずみのデータからユーザの位置をリアルタイムに計算し、同時に流体シミュレーションによるコンピュータグラフィックス映像 (CG 映像) を生成する。この映像は 2 台のプロジェクタによって、平均台の前後の床に投影される (図 5.12)。2 台のプロジェクタは PC のデュアルディスプレイ機能により、個別の CG 映像を出力する。

ユーザが平均台の上に乗ると、ユーザの位置を避けるように流体の流れが変化する。平均台の上に荷重がかかると、第 5.3 節で述べた計算方法によって荷重の位置と重さが PC 上で計算され、流体映像内の対



図 5.9: ログログの外観



図 5.10: ログログの操作

応する位置に仮想的な障害物が設置されるからである。この障害物は円形で、荷重が大きくなるにつれ半径も増加する。ユーザが歩いたり、重心の位置を変えたりすることで、障害物の位置が変化し、流れがインタラクティブに変化する。また、ユーザが平均台に対して左右に体を傾けると、ひずみのねじり成分が変化し、障害物の位置もそれに応じて左右に動く。ユーザは平均台の上で歩いたり、座ったりすることで、流れが変化する様子を見て楽しむことができる。

システムを制作する上で以下の2点が問題となった。1つは、増幅回路などに混入する電気的なノイズの影響により、小さなひずみデータがノイズに埋もれがちであったことである。そこで、

- (1) 閾値を設定し、一定量以下のひずみは検知しない
- (2) センサの入力値の時間平均を取り、ノイズを平滑化する

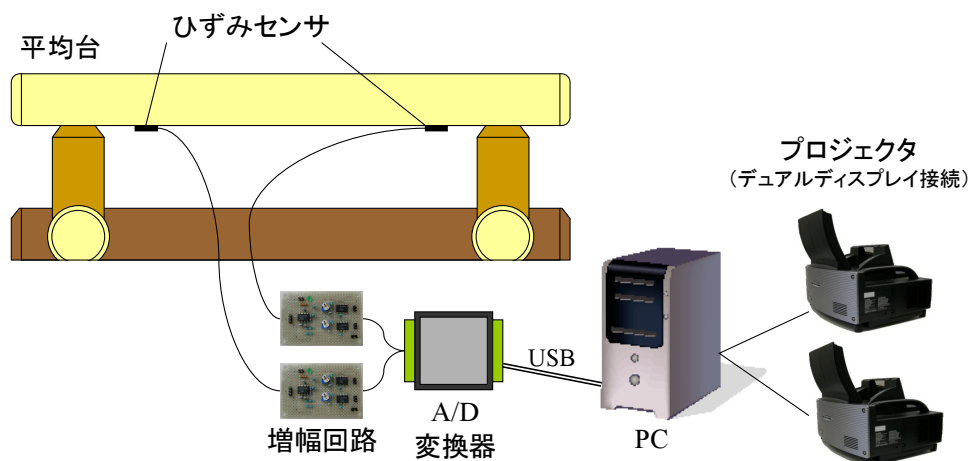


図 5.11: ログログのシステム図

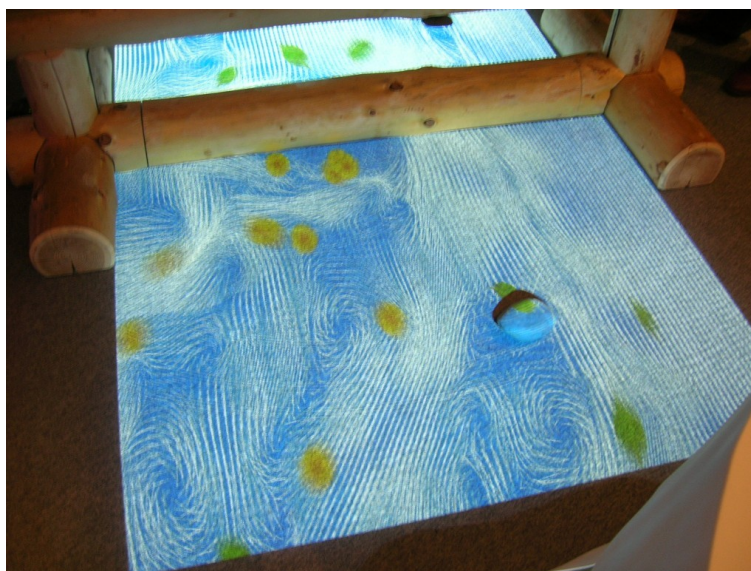


図 5.12: シミュレーションによって生成された流体の映像

という手法を採用し、安定化を図った。また、ノイズの影響そのものを少なくするため、

- センサと増幅回路をシールド線で接続し、ノイズの混入を減らす
- PCの電源をきちんとアースに接続させる

といった工夫を行った。

2つ目の問題は、平均台が設置された場所及び床の状況によって、ひずみセンサの初期値（初期不平衡値）が変化してしまうことである。特に絨毯などのやわらかい場所では、台がわずかに傾いてしまい、時間が経つにつれ初期値が少しずつ変化することがあった。この対策として、平均台と床の間に固めの素材（ゴムマットなど）を敷き、台が安定するようにした。また、一定時間ごとにセンサデータの初期値を更新し、荷重位置の計算に反映させることで、初期値の変化が位置推定計算に与える影響をできる限り少なくした。

このシステムは、国内のいくつかの展示において公開され、一般の方々から好評を博した。展示では、平

平均台の上を普通に歩く人もいれば、2人で同時に乗ってみる人や、台の上でジャンプしたり、台に座ったりする子供もいた。その他にも、途中で片足で立ったり、台の上にと座って足元の映像を眺めたりするなど、楽しみ方は様々であった。「上に乗る」というわかりやすく簡単な操作方法のおかげで、小さな子供から大人まで楽しめるシステムになったと言える。

5.8 おわりに

本章では、「既存物にもセンサを貼り付けられる」「自然物に適用できる」というひずみ計測の利点を生かし、木製の平均台を用いたユーザインタフェースを提案した。また、松の丸太で作られた小型の平均台と、半導体制のひずみセンサを用いてこれを実装した。

平均台に実際に荷重をかけてひずみを測定した結果、荷重の位置と得られるひずみの量の関係は、材料力学に基づいた計算による結果と同様の傾向にあることがわかった。従って、2つのひずみセンサの間の区間であれば、計測したひずみの量から荷重の位置が推定できることがわかった。さらに、ユーザが前後に体を傾ける動作も、ねじりの成分を測定することにより検出が可能であることがわかった。

また、試作したインタフェースを応用して「ログログ」を制作した。カメラや抵抗膜といったデバイスを使わず、ひずみセンサのみで、ユーザの重心移動を用いたインタラクティブな作品が制作できることを示した。さらに一ヶ月以上の展示を行い、システムのロバスト性を確認することができた。

第6章

結論

6.1 本研究の成果

本研究の主な成果について述べる。本研究では、ひずみ計測技術をインタフェースに応用する際において、ケーブルの問題と感度調節の問題を解決する手段を提案し、ひずみ計測の応用範囲を広げることを行った。また、ひずみ計測を自然物に応用し、インタラクティブシステムの入力装置として使う方法について述べた。

第3章では、ひずみ計測の原理、及びひずみ計測に用いられるセンサや電気回路について説明した。また、特にインタラクティブシステムに応用する面で問題となる、感度の自動調節機構について説明し、実際に回路を組んで検証を行った。

第4章では、今までリード線で接続されていたひずみセンサを無線化することを提案し、市販のモジュールを用いて、Bluetoothを使った無線システムを構築した。これにより、専用のひずみ計測器を使わずに動ひずみ計測ができるようになり、持ち運んで使うようなデバイスへの応用が可能になった。無線化により、信号伝達の遅延と、サンプリング速度の低下が生じたが、ひずみ計測をユーザインタフェースに応用する点においてはそれほど問題がないと考えられる。

第5章では、ひずみ計測の自然物への適用として、松の丸太にひずみセンサを貼り付け、ユーザの重心移動を入力とする平均台型のインタフェースを作成した。また材料力学に基づいて丸太に生じるひずみを試算し、測定結果との比較を行うことで重心位置の推定精度の向上を図った。この手法は、同様の形をした物体にも適用できると考えられる。このユーザインタフェースを使ったインタラクティブシステム「ログログ」は、国内の様々な展示において公開され、誰にでも簡単に扱えるシステムとして好評を博した。

6.2 今後の展望

本研究の今後の展望について述べる。

環境内への設置

ひずみ計測の無線化、及びパッケージの小型化により、複数のひずみセンサを広い空間の中に設置し、環境全体を入力デバイスにするといった応用が可能になる。例えば屋内であれば、ユーザが手に持って使用する日用品以外にも、棚や机、椅子、床のタイルといった幅広い物体にセンサを貼り付けることができる。また屋外であれば、手すりやベンチ、建物の壁や木などの物体に適用できる。このように、センサを多数設置することにより、環境内のユーザの動きを総合的に取得するようなインタフェースが実現でき、その場にに応じた入出力をユーザに提供することができるようになる。

無線化により、多数のセンサを設置しても配線などの問題が生じにくい。ただし現段階のシステムでは定期的な電池の充電が必要なため、システムの省電力化や、スリープモードなどの機能を追加するなど、さらなる改良が必要である。

他のセンサとの組み合わせ

ひずみセンサと他のセンサを組み合わせ、より複雑なユーザの動作を検出することが考えられる。一つの例は加速度センサである。ひずみと加速度はどちらも外部からの力によって生じるが、加速度は物体の速度が変化しなければ検出しづらいのに対し、ひずみは物体が動かなくても検出ができる。また、加速度は物体全体の速度の変化を主に計測するが、ひずみはひずみセンサを複数貼ることにより物体の局所的な力のかかり具合を測定することができる。このような性質をうまく組み合わせることで、より多機能なインタフェースの構築が可能になると考えられる。

スポーツや福祉などへの応用

ひずみセンサやひずみゲージを使用して、物体や機器の特定の部分にかかる力を調べることができる。この性質を利用すると、スポーツや福祉などの分野において、体や機器にかかる力の分布や時間変化などを調べることができる。例えば野球のバットやゴルフのクラブなどにひずみ計測を適用し、力の変化を観察することができる。また福祉の分野においては、患者をベッドから抱き起こすような状況における最適な力のかけ方などを計測することができる。

ウェアラブルインタフェースへの応用

センサ自体の小型化・無線化の性質を生かして、ひずみセンサを貼り付けたデバイスを持ち歩く、もしくは服や鞆などにひずみセンサを貼り付け、常にひずみを測定するといった、一種のウェアラブルインタフェースを考えることができる。計測処理は、簡単なものであればマイコンで、複雑なものであればハンドヘルド型のPCを用いて行うことができると考えられる。

付録A

インタラクティブシステム 「ログログ」の展示

5.7 節で制作したインタラクティブシステム「ログログ」は、国内のいくつかの展示において公開された。そのうちの主なものについて、以下に概要を述べる。

デジタルパブリックアート展「木とデジタル」

「木とデジタル」展 [40] は、2007 年 5 月 2 日から 6 日まで、表参道のスパイラルガーデンで開催された(図 A.1)。連休の時期に開催されたこともあって、小さな子供を連れた家族や、表参道近辺に買い物に来た若者などでにぎわった。来場者数は 5 日間で約 4500 人であった。

子供の中には、平均台に乗りはするものの、床の映像の変化に気付かずに降りてしまうことがあった。一方で、普通の椅子のように平均台に腰掛け、足元に投影される流体の映像をずっと眺める人もいた。

会場は、天井から直射日光が差し込むスペースであったため、日中はプロジェクタの映像が見づらく、作品の内容がわかりにくくなる原因となった。

ICC キッズプログラム 2007「サウンド×イメージ - 音を見て、映像を聴こう」

ICC キッズプログラム [43] は、新宿の初台にある「NTT インターコミュニケーション・センター」において、2007 年 7 月 14 日から 9 月 2 日までの期間に実施されたものである。総入場者数は 2 万人弱であった。夏休みに開催されたため、来場者のほとんどは家族連れであった。

前回の展示の反省から、平均台の上に乗ったとき、そして台の上で動いたときに、水しぶきの音を再生する表現を加えた。さらに、台の上で跳び丸太に大きなひずみを与えた際に、映像に波紋を表示させるよう改良した。映像と音声は連動して出力され、よりインタラクティブ性が高まった。

また、長期にわたる展示のため、平均台は床に敷かれたゴムマットに両面テープでしっかりと固定された。台が固定され微妙な傾きが修正されたため、ひずみ計測の安定性が向上した。作品の外観を図 A.2 に示す。

1ヶ月半という長期にわたる展示であったが、2、3度のメンテナンス(主にソフトウェアのバグ修正や、増幅率の微調整)を行った以外は大きな問題は起こらなかった。ひずみセンサのみを使うというシンプルな手法を適用したこと、また平均台自体がしっかりと作られていたことのおかげで、長期の展示に耐える

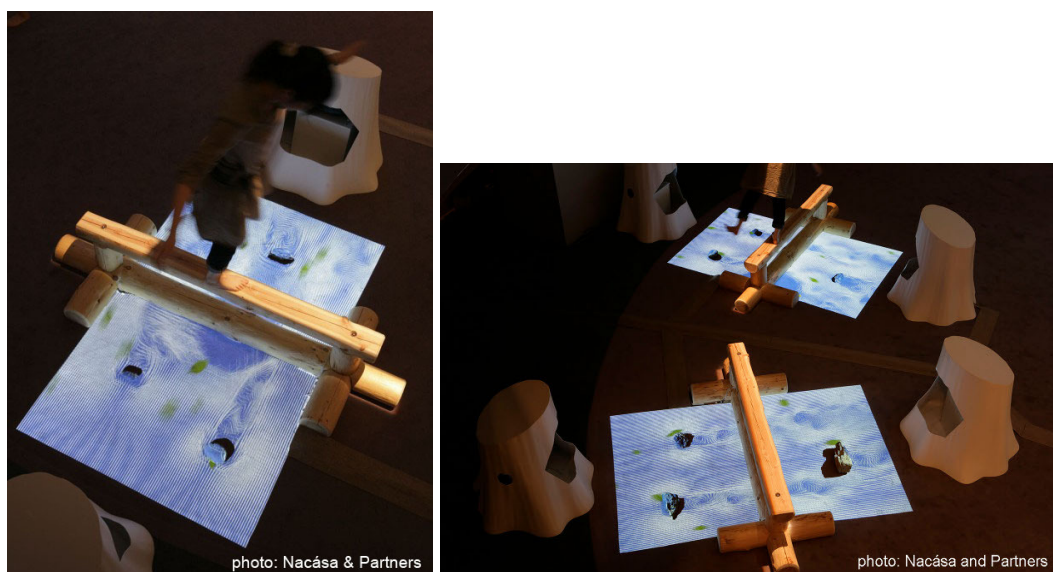


図 A.1: 「木とデジタル」展での様子



図 A.2: ICC キッズプログラム 2007 での展示



図 A.3: インタラクティブ東京での展示の様子

るシステムであることがわかった。

インタラクティブ東京 2007

インタラクティブ東京 2007 (iTokyo) [44] は、2007 年 9 月 29 日・30 日の二日間にわたり、お台場にある日本科学未来館にて開催された (図 A.3)。主な客層は、土日を利用して未来館に訪れた家族連れや、大学の研究者であった。流体の表現に興味を示す人が多く、「京都の龍安寺にある石庭のようだ」「床の上に筆で流れを描くようなアプリケーションは作れないだろうか」といった意見を頂いた。

ASIAGRAPH2007 in Tokyo 先端技術展

5 月のデジタルパブリックアート展と同じグループで、2007 年 10 月 12 日～14 日の 3 日間、ASIAGRAPH2007 in Tokyo の先端技術展に出展した [45]。ログログは図 A.4 のように、来場者が自然に乗れるよう通路の一角に設置された。展示は秋葉原の AKIBA SQUARE にて行われ、企業関係者や若者などに好評を博した。

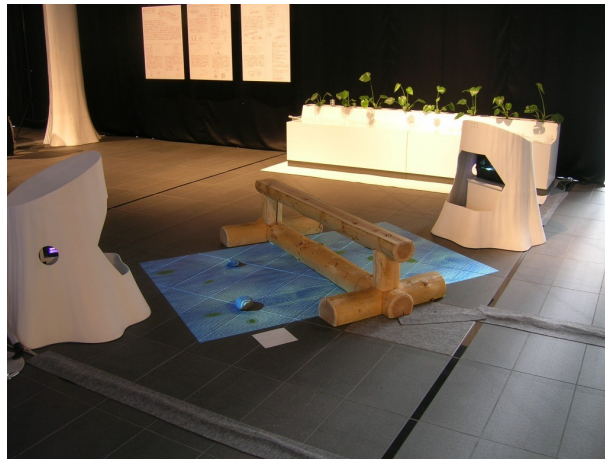


図 A.4: ASIAGRAPH2007 での作品の様子



図 A.5: メディアアート展の様子

文の京・大いなる学びシリーズ アートとサイエンス

「文京区制 60 周年記念事業 東京大学 130 周年記念事業」と題し、文京シビックセンターにて 2007 年 12 月 18 日にメディアアート展 [50] が開催され、ログログも出展された。

区内で事前にポスターによる宣伝を行ったこともあり、半日間の展示でありながら来場者は 500 人を超えた。平日だったためか 30 歳以上の方が多数で、子供連れは少なかった。ただし、長い間平均台の上に登って遊んでいた子供の姿も見られた（図 A.5）。

謝辞

本研究を進めるにあたり、素晴らしい研究環境と数多くの成果発表の機会を与えて下さり、多くの有益なご助言を頂きました。原島 博 教授、苗村 健 准教授に心から御礼申し上げます。原島教授には、さまざまな知見や研究への取り組み方についてご教示頂き、また研究の方向性について大局的な見地からご指導頂きました。苗村准教授には、毎週の打ち合わせにおいて研究内容に関する具体的なご助言を頂くとともに、学会発表や研究展示の際にはいつも親身になって面倒を見て頂きました。本当にありがとうございました。

荒川研究室の飯田 誠 特任講師には、ひずみ計測に関する数多くの理論的・技術的なアドバイスを頂くとともに、研究の内容に関して活発な議論をして頂きました。これらは本研究において大変有益なものでした。心より御礼申し上げます。日立製作所 機械研究所の太田 裕之氏には、半導体ひずみセンサの基礎的な知識から技術的なアドバイスまで、数多くの助言を頂きました。これらの助言なしでは、本研究は成り立ち得ませんでした。心より御礼申し上げます。高橋 桂太 特任助教には、研究内容や進め方に関して、多くの議論をして頂きました。研究員の寛 康明氏には、研究内容のみならず、展示や作品制作に関する数多くのアドバイスを頂き、研究展示の経験がなかった自分にとって大きな助けとなりました。心から感謝いたします。

OB の川上 翔治氏には、在学中、ひずみ計測の基本や機器の扱い方から教えて頂くとともに、研究内容について活発な議論をして頂きました。荒川研究室の白谷 栄梨子氏には、流体シミュレーションに関する知識を教えて頂き、「ログログ」を制作する上で数多くの協力を頂きました。厚く感謝いたします。

博士課程 3 年の橋田 朋子氏には、作品展示において音楽的知見に基づくアドバイスを数多く頂きました。博士課程 2 年の中洲 俊信氏、Dominique Chen 氏には、同じ SIGDC グループとして打ち合わせの際に活発な議論をして頂きました。修士課程 1 年の高田 英明氏には、同じ Strino プロジェクトチームとして数多くの活発な議論をするとともに、研究展示などで多くの協力を頂きました。ありがとうございました。

2 年間の研究生生活全般にわたって、原島・苗村研究室の皆様には大変お世話になりました。博士課程 2 年の小池 崇文氏には、発表練習などにおいて親切にご指導を頂きました。博士課程 2 年の田口 裕一氏には、研究生生活の中で多くの励ましを頂きました。楽しく充実した学生生活をともに過ごし、互いに切磋琢磨した修士課程 2 年の上田 健介氏、木村 翔氏、成 玲ア氏、吉野 祥之氏には、研究のみならずあらゆる場面でお世話になりました。修士課程 1 年の伊野 浩太氏、岩淵 正樹氏、太田 昌宏氏、学部生の谷田 英生氏には、作品制作において多くの協力をしてもらいました。また谷田氏には、マイコンや電気回路に関する多くの知識を教えてもらいました。本当に感謝しています。そして、研究環境の整備に努めてくださった、田中 崇 助手、大谷 智子氏、東山 薫氏、吉田 有里氏、坂井 理笑氏に御礼申し上げます。

廣瀬・広田・谷川研究室の鳴海 拓志氏をはじめとする学際情報学府の同期の皆さんには、数回にわたる研究展示において、展示方法に関するアドバイスなど、様々な協力を頂きました。ありがとうございました。

最後に、研究生生活を通してお世話になりました全ての方々に対して、そしていつも応援し、支援してくれた家族に対して、改めて心から感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

2008 年 2 月 4 日
天野 翔

参考文献

- [1] M. Weiser: “The computer for the 21st century,” *Scientific American*, vol. 265, no. 3, pp. 94–104, September 1991.
- [2] 石井裕: “タンジブル・ビット 情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン”, *情報処理学会誌*, vol. 43, no. 3, pp. 222–229, March 2002.
- [3] 平野光徳: “タンジブルユーザインタフェースとその応用例”, *電気学会誌*, vol. 124, no. 9, pp. 587–590, September 2004.
- [4] M. G. Gorbet, M. Orth, and H. Ishii: “Triangles: Tangible interface for manipulation and exploration of digital information topography,” in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '98)*, pp. 49–56, April 1998.
- [5] K. Camarata, E. Yi-Luen Do, B. R. Johnson, and M. D. Gross: “Navigational blocks: Navigating information space with tangible media,” in *Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI 2002)*, pp. 31–38, January 2002.
- [6] J. Patten, H. Ishii, J. Hines, and G. Pangaro: “Sensetable: A wireless object tracking platform for tangible user interfaces,” in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001)*, pp. 253–260, April 2001.
- [7] 星野寛, 香月亜希, 成田篤信: “IT 技術を駆使した次世代防災システムの検討”, *NTT 技術ジャーナル*, vol. 17, no. 9, pp. 40–44, September 2005.
- [8] E. Hornecker and J. Buur: “Getting a grip on tangible interaction: A framework on physical space and social interaction,” in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2006)*, pp. 437–446, April 2006.
- [9] J. Rekimoto, B. Ullmer, and H. Oba: “Datatiles: A modular platform for mixed physical and graphical interactions,” in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001)*, pp. 269–276, April 2001.
- [10] S. R. Klemmer, M. W. Newman, R. Farrell, M. Bilezikjian, and J. A. Landay: “The designers’ outpost: A tangible interface for collaborative web site design,” in *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2001)*, pp. 1–10, November 2001.
- [11] R. J. K. Jacob, H. Ishii, G. Pangaro, and J. Patten: “A tangible interface for organizing information using a grid,” in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2002)*, pp. 339–346, April 2002.

- [12] R. Ballagas, M. Ringel, M. Stone, and J. Borchers: "iStuff: A physical user interface toolkit for ubiquitous computing environments," in *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2003)*, pp. 537–544, April 2003.
- [13] 椎尾一郎, 増井俊之, 塚田浩二: "MouseField: コピキタスコンピューティングのための入力デバイス", *情報処理学会論文誌*, vol. 46, no. 7, pp. 1661–1670, July 2005.
- [14] 池田洋一, 木村朝子, 佐藤宏介: "液体を吸収するメタファを利用した ToolDevice", 11th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2003), December 2003.
- [15] H. Ishii, A. Mazalek, and J. Lee: "Bottles as a minimal interface to access digital information," In *Extended Abstracts of the ACM Human Factors in Computing Systems (CHI 2001)*, April 2001.
- [16] 小林稔, 志和新一, 北川愛子, 市川忠嗣, 一之瀬進: "体重移動によるサイバースペース内移動インタフェース", *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, vol. J81-D-2, no. 5, pp. 933–943, May 1998.
- [17] M. Fleischmann, T. Sikora, W. Heiden, W. Strauss, K. Sikora, and J. Speier: "The virtual balance: An input device for VR environments," in *Proceedings of the 6th International Conference on Man-Machine Interaction and Intelligent Systems in Business (INTERFACES '97)*, pp. 20–23, May 1997.
- [18] 増野智経, 中嶋正之: "仮想環境における重心移動型入力デバイス 'WARAJI'", *映像情報メディア学会技術報告*, vol. 23, no. 22, pp. 1–6, March 1999.
- [19] 岩下克, 外山篤, 橋本直己, 長谷川晶一, 佐藤誠: "荷重パターン解析に基づく等身大仮想環境のための移動インタフェースの開発", *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 103, no. 107, pp. 7–13, June 2003.
- [20] H. Z. Tan, D. S. Ebert, L. A. Slivovsky, N. Svakhine, and J. Leimgruber III: "sensingChair," in *SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, p. 135, August 2001.
- [21] M. Sasaki, N. Yanagihara, O. Matsumoto, and K. Komoriya: "Steering control of the personal riding-type wheeled mobile platform (PMP)," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, pp. 1697–1702, August 2005.
- [22] 川上翔治, 飯田誠, 苗村健: "公園におけるひずみセンシングを用いたインタラクティブメディアの研究", *エンタテインメントコンピューティング 2006 論文集*, pp. 67–68, September 2006.
- [23] 川上翔治, 飯田誠, 苗村健: "公園遊具をインタラクティブメディアにするひずみセンシングの基礎検討", *日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集*, pp. 495–496, September 2005.
- [24] 川上翔治, 飯田誠, 苗村健: "公園遊具におけるひずみ計測を用いたデジタルコンテンツの基礎検討", *第 2 回デジタルコンテンツシンポジウム 発表 2-6*, June 2006.
- [25] 太田裕之, 澄川貴志, 島津ひろみ, 丹野洋平: "機械系センサネット用低消費電力半導体ひずみセンサの開発", *日本機械学会論文集 (A 編)*, vol. 73, no. 729, pp. 666–671, May 2007.
- [26] 小川鉦一: "人と物の動きの計測技術 ひずみゲージとその応用", 東京電機大学出版局, December 2002.
- [27] Y. Tada, K. Hosoda, and M. Asada: "Sensing ability of anthropomorphic fingertip with multi-modal sensors," in *Proceedings of the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-8)*, pp. 1005–1012, March 2004.

- [28] 前野隆司, 佐藤武彦: “爪のひずみを利用した触覚センサ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, p. 42, May 2005.
- [29] 雨宮慎之介, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡部富士夫: “足踏式空間移動インタフェース (WARP) の開発と評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 6, no. 3, pp. 221–228, September 2001.
- [30] 倉沢央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀: “センサ装着場所を考慮した 3 軸加速度センサを用いた姿勢推定手法”, 情報処理学会研究報告, vol. 2006, no. 54, pp. 15–22, May 2006.
- [31] 川上翔治, 飯田誠, 筧康明, 苗村健, 松下光範: “Lumisight Table におけるカメラと歪ゲージを併用した接触入力的基础検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 104, no. 745, pp. 25–28, March 2005.
- [32] 飯田誠, 川上翔治, 苗村健: “ひずみ解析技術による自然物体の触覚ユーザーインターフェース化の基礎検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 105, no. 256, pp. 105–108, August 2005.
- [33] W. D. Pilkey: “Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices”, pp. 524–525, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [34] 白谷栄梨子, 飯田誠, 荒川忠一: “インタラクティブ流体シミュレータの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, 1A1-3, pp. 9–12, September 2007.

発表文献

- [35] 天野 翔, 川原 圭博, 森川 博之, 青山 友紀: “実空間情報を統一的に取り扱うミドルウェアの設計”, 電子情報通信学会総合大会, B-7-168, March 2006.
- [36] 平井 肇, 三村 和, 天野 翔, 森川 博之, 青山 友紀: “サービス指向ネットワークングのための仮想端末ルーピング機構の設計と実装”, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会 (IN2005-168), pp. 73–78, March 2006.
- [37] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健, 太田 裕之: “重心移動を入力とした平均台型のインタフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会, 2A3-5, pp. 452–455, September 2007.
- [38] Sho Amano, Makoto Iida, Takeshi Naemura, Hiroyuki Ota: “Strain-based User Interface Using a Wooden Balance Beam”, IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI 2008), March 2008. (発表予定)
- [39] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健, 太田 裕之: “Strino インタフェース化技術の無線化と安定化”, 電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会 (MVE), March 2008. (発表予定)

展示等

- [40] 天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “ログログ”, デジタルパブリックアート展「木とデジタル」 - テクノロジーが生み出す“新しい自然” -, スパイラルガーデン, 2nd–6th May 2007.
- [41] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健: “Strino の葉”, デジタルパブリックアート展「木とデジタル」 - テクノロジーが生み出す“新しい自然” -, スパイラルガーデン, 2nd–6th May 2007.
- [42] 新聞取材 (天野 翔, 苗村 健): “異次元のささやき 植物の反応 音や光に変換”, 東京新聞, 2007 年 7 月 25 日朝刊 28 面.
- [43] 天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “ふしぎな丸太を渡ろう! ログログ”, ICC キッズプログラム 2007「サウンド×イメージ - 音を見て, 映像を聴こう」展, NTT インターコミュニケーション・センター, 14th July–2nd September 2007.
- [44] 天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “ログログ”, インタラクティブ東京, 日本科学未来館, 29th–30th September 2007.
- [45] 天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “ログログ”, ASIAGRAPH2007 in Tokyo 先端技術展 JST CREST (東京大学 廣瀬チーム)「デジタルパブリックアートを創出する技術」プロジェクト, AKIBA_SQUARE, 12th–14th October 2007.

- [46] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健: “Strino の葉”, ASIAGRAPH2007 in Tokyo 先端技術展 JST CREST (東京大学 廣瀬チーム) 「デジタルパブリックアートを創出する技術」プロジェクト, AKIBA_SQUARE, 12th–14th October 2007.
- [47] 取材協力 (天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健): “特集「21 世紀の ID」インタラクティブデザイン熟考「ログログ」”, AXIS 誌, vol. 130, pp. 32, November 2007.
- [48] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健: “Strino の葉”, TECHTILE 展, 東京大学本郷キャンパス 工学部 2 号館, 23rd–27th November 2007.
- [49] 天野 翔, 白谷 栄梨子, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “ログログ”, 東京大学 IML オープンハウス, 東京大学本郷キャンパス インテリジェントモデリングラボラトリー, 7th December 2007.
- [50] 天野 翔, 飯田 誠, 苗村 健 (協力: 株式会社 日立製作所 機械研究所, 東京大学 荒川研究室): “Log-Log”, 文京区制 60 周年記念事業 東京大学 130 周年記念事業 文の京・大いなる学びシリーズ「アートとサイエンス - その不思議な関係 - 」, 文京シビックセンター, 18th December 2007.