

デジタルパブリックアートのための 磁石を用いた簡便なひずみ計測に関する実験的検討

金 ジョンヒョン^{†1} 飯 田 誠^{†2}
苗 村 健^{†1} 太 田 裕 之^{†3}

筆者らは、植物や木材などの自然物や鉄棒や日用品などの人工物を、新たにインタフェースとして転用する手法の検討を進めてきた。具体的には、ひずみセンサを貼り付け、人が接触したことによって生じるわずかな変形を入力として用いる技術を開発してきた。しかし、厳密な貼り付けには、長時間の接着が必要とされ、メンテナンスが煩雑になるなどの問題があった。そこで、対象を限定し、磁石による簡便な設置が可能な場合において、その精度や問題点について実験的に検討する。

Experimental Evaluation of Convenient Strain Measurement Using a Magnet for Digital Public Art

JUNGHYUN KIM,^{†1} MAKOTO IIDA,^{†2} TAKESHI NAEMURA^{†1}
and HIROYUKI OTA^{†3}

We present a basic technology that utilizes natural object in the environment and use it as a new and simple interface. In our study we apply strain measurement to an object for constructing an interface. A strain is a small change in length of the object caused by some external force. In many cases, the strain is measured by attaching a strain sensor onto the surface of the object. But, there are problems that it is necessary to adhere for a long time and maintenance is complex. So we have proposed using magnets as compared with adhesive for attaching the strain sensors although the object is limited. In this paper, we evaluate a method to attach the strain sensors using magnets on the bench using in airport.

1. はじめに

近年のPCの急速な普及、機能の進歩に伴い、人とコンピュータのユーザインタフェースは、より直感的に、より簡単に扱えるように発展してきた。インタフェースの発展に伴い、人とコンピュータの関わりは急速に増加し、コンピュータの情報の操作による機械と人との関係は多様な形態をとるようになった。人と機械の関係の多様化はアート領域まで及び、近年ではMedia Artと呼ばれるアートと情報技術の融合や、Digital Public Art (DPA)^{†1}と呼ばれる、公共の空間のアート表現と、PCのデジタル技術の融合といった概念を生み出すに至っている。

このようなパブリックアート表現の構築に向けた要素技術として、筆者らはプライバシー侵害が起きるような場合があるカメラ撮影などは別のアプローチとして、ひずみ計測技術に注目してきた。ひずみ計測技術は、ひずみセンサを物体の表面に貼り付け、加えられた外力を推定し、環境中の物体の形状変化を読み取る。ひずみ計測技術を用いて、著者らはさまざまな物体のインタフェース化を試行している。しかしながらひずみ計測は、対象物体や貼付条件によってセンシング性能が異なる。特にセンサを貼り付ける作業において、貼る際の手法に工夫が必要である。その解決策として、より簡単にかつ短時間に貼り付けができる手法について検討を行ってきた²⁾。

本稿ではセンサの取り付け方法として、磁石を用いた方法を検討した。具体的には、接着剤と磁石による貼付方法について、空港に置いてあるベンチを用いてデジタルパブリックアート作品「星に座る椅子」のセンシング方法を検討するとともに、実際の空港のベンチに対し、有用性を検証した。

2. 関連研究

2.1 デジタルパブリックアート

近年、東京大学の廣瀬らによって提唱された、Digital Public Art (DPA) は、パブリック空間で表現するパブリックアートにデジタル技術を導入することで、より表現力の豊かな

^{†1} 東京大学大学院 情報理工学系研究科
Faculty of Engineering, The Univ. of Tokyo

^{†2} 東京大学 教養学部
Arts and Sciences, The Univ. of Tokyo

^{†3} 株式会社 日立製作所
Hitachi, Ltd.

空間を創造するという考えである。DPA の要素としては、空間性、実体性、自己参加の三要素が挙げられている。「ShareLog³⁾」や「まばたきの葉⁴⁾」などの多くの作品が発表されている。

2.2 Strino プロジェクト

ひずみ計測を応用した研究として著者らは「Strino プロジェクト (STRain-based user Interface with tactile of elastic Natural Objects)」を進めている。Strino プロジェクトの研究・作品 (図 1) をいくつか紹介する。

Strino の葉 (2005 年)⁵⁾ 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。風などの外力によって植物がゆれることにより音が発生し、インタラクティブ性を持たせている。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、ひずみ値に応じ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音を楽しむことができる。Log-Log (2007 年)⁶⁾ は、丸太の平均台と川の流れの流体シミュレーションからなる作品である。丸太を人が渡ると人の位置に応じて川に影ができ、イベントが発生する。Log-Log では、半導体ひずみセンサを丸太の両端につけ、2 つのセンサの値を用い、人の位置を推定した。「Strino の葉」も「Log-Log」も本物の植物、木を利用した作品で、ひずみセンサ以外の特殊な機器を取り付けていないことが特徴である。Streaming Bench (2008 年)⁷⁾ は、長椅子に人が座るとその位置に応じて、流れが変化する作品である。長椅子を 2 つ並べ、川の流れはそれぞれの椅子に対応し変化する。計算手法は Log-Log と同じであるが、流体を一直線化してグラフィックに大幅な変化を与えている。さらに鏡面側板を使用することによって、浮いているような感覚を味わうことができる。

3. ひずみ計測における問題と解決案

3.1 ひずみ計測とは

物体 (弾性体) に外力が加わると、その長さは微小に変化する。元の物体の長さを L 、変形後の長さを $L + \Delta L$ (または $L - \Delta L$) とするとき、 L と ΔL の割合をひずみと呼び、 ε で表す。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

ひずみの計測にはひずみゲージ (strain gauge) が一般的に使用される。ひずみゲージは

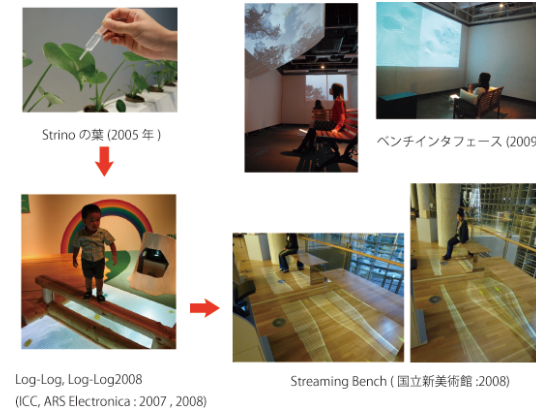


図 1 Strino の今までの流れ
Fig.1 Art Works of Strino

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、被測定物の変形量であるひずみ量を求めることができる。近年では、金属の抵抗体の代わりに半導体を用いたセンサ¹⁰⁾ が開発されている。半導体ひずみセンサはピエゾ抵抗効果を利用しており、ゲージ率 (ひずみに対する抵抗変化率の比) が金属ゲージに比べて高いため、感度が高い。この半導体ひずみセンサには、アンブなしとアンブ内蔵の 2 つがある。

本研究では、日立製作所機械研究所が開発したアンブ内蔵半導体ひずみセンサを使用した。図 2 がパッケージの外観である。先端部分の半導体基板 (2.5mm 角) 上にひずみセンサが成型されている。このセンサの特徴は、感度は約 5000 と従来の金属製ひずみゲージと比べ高感度であること、またセンサの抵抗値が高いため消費電力が非常に小さい。そして、ダイナミックな範囲調整のキャリブレーションが簡単なため、パブリック空間における設計にも簡便であり、かつアンブ回路における配線工夫の必要も減るので、外観のためにもアンブ内蔵半導体ひずみセンサによるひずみ計測は簡便性において優れている。

計測において CONTEC 社の AI-1608AYUSB の A/D 変換器を用いた。この A/D 変換器は 1ch につき最大 100kHz でサンプリングが可能である。

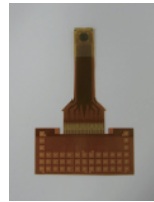


図 2 アンブ内蔵半導体ひずみセンサ
Fig.2 Strain Sensor

3.2 従来システムの問題と解決案

従来, Strino プロジェクトでは, 木や植物等の自然の物体をインタフェース化する試みを行ってきた. 本稿では, Strino プロジェクトで基盤となっているひずみ計測技術を公共空間の既存物体に適用し, インタフェースとする試行的実験を行った. 公共空間でのひずみ計測において, 子供から大人まで重さや体格の幅が広い人たちがユーザとなり得る. これはひずみの予測値が幅広くなることを意味し, データの処理に工夫が必要であることを示す. また, 公共空間での設備には, スムーズでかつ短時間の作業が求められる. 特にひずみセンサを用いる場合, 設置時に荷重が作用しない条件が必要で, かつ適切なひずみ値を取るためには, センサの貼り付け位置を調整する必要がある. これまでは半導体ひずみセンサの貼付に, また安定的なデータ取得を実現するため, エポキシ系接着剤を使用してきた. これらの接着剤を使用する場合, 気温や湿度によって異なるが, 硬化まで長時間を要する. さらに, 接着剤で貼り付けられたひずみセンサは, 非常に強固に対象物体と接着されるため, 剥がす際の後処理や貼付位置の調整が非常に困難である. 今後, 公共空間におけるより実践的な展開を進めるためには, センサの移動や再利用の可能な貼付方法の改良が求められている. この対策として, 接着剤を使用しない方法を検討している. 本稿ではセンサの取り付け方法として, 椅子の金属部分の変化に着目し, 磁石を用いた方法を検討した. 具体的には, 接着剤と磁石による貼付方法について, 空港に置いてあるベンチを用いて「星に座る椅子」のセンシング方法を検討するとともに, 実際の空港のベンチに対し, 有用性を検証した.

4. ベンチのセンシング方法

4.1 ベンチのセンシング

図 3 はベンチのセンシング判定のモデル図である. 設置時のひずみデータを基準とし, 人が座る前の状態はほぼ基準値を示す (図 3 の A). 着席すると椅子にひずみが生じ, ひずみ

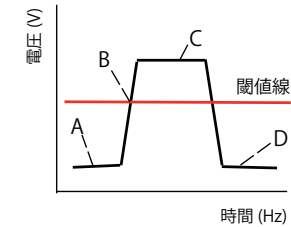


図 3 座る判定
Fig.3 decision of Sitting

値が大きくなる (図 3 の B). 着席状態では, ひずみ値は図 3 の C のように値を保持する. その後, 人が立つ際にはひずみ値は, わずかな振動を伴いまた基準値に戻る (図 3 の D). このような一連の状態遷移を「着席から脱席」と定義し, ある閾値を設定することで, 人の座る行動をセンシングした.

つまり, ベンチのセンシング性能は, 閾値の設定方法に依存し, 正しく座ったことの判定率で評価できることを意味する. そこで本稿では, 閾値の設定方法について検討し, 接着剤と磁石を使用したそれぞれの場合の判定率を評価し, 磁石による設置の有用性を評価した.

4.2 実験対象およびセンサ貼付位置

本実験は実際に空港に置かれているベンチを用いて実験を行った. 使用したベンチの外観とベンチと磁石の寸法を図 4 に示す. 予備的な検討の結果, 人の着席に最も反応する座面のセンサ貼付位置は, 中央の厚い金属板で, この金属板の端面から 2cm の位置に接着剤でひずみセンサを貼り付け, 3.5cm の位置に磁石でひずみセンサを貼り付けた.

4.3 閾値設定に関する検討

4.3.1 実験方法

被験者は 7 人で 17 回の実験を行った. 閾値設定に応じて 2 つの実験を行った.

● 静止実験

ベンチに着席し, 30 秒間静止した状態を維持し, 反応したひずみ値の平均値 m_1 , 標準偏差 σ_1 を求める.

● 自由着席実験

静止実験の後の一分間, 着席・脱席を自由に繰り返す実験である. ここでは, ここでは座る姿勢に制限しない. 着席毎に反応したひずみ値の平均値 m_2 と標準偏差 σ_2 を求め,

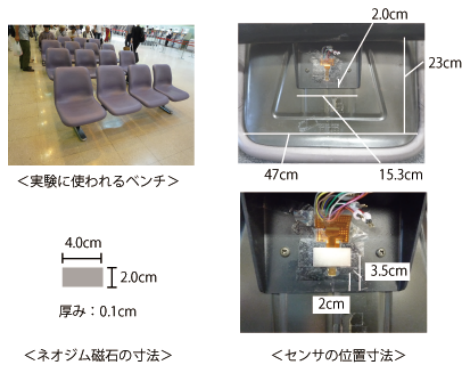


図 4 実験におけるベンチの寸法
Fig. 4 Measurement of the bench

表 1 静止実験による平均と標準偏差
Table 1 Average and standard deviate of motionless experiment

	接着剤	磁石
平均値 m_1	0.773 V	0.095 V
標準偏差 σ_1	0.102 V	0.011 V

表 2 自由着席実験による平均と標準偏差
Table 2 Average and standard deviate of free motion experiment

	接着剤	磁石
平均値 m_2	0.774 V	0.102 V
標準偏差 σ_2	0.125 V	0.020 V

これを 17 回の実験に応じた 117 回の着席データを求める。

17 回分の実験で求めたひずみデータの平均値、標準偏差を求め、標準偏差に対する閾値の候補を 4 つ設定する。ただし 40Hz 以内で 2 度座ることは姿勢における不確定な要素として判断し、判定範囲から排除する。

4.3.2 実験結果および考察

静止した実験の結果は表 1 であり、自由着席の実験結果は表 2 である。

この際、閾値の決め方は様々な方法があると考えられるが、ここでは、正規分布を用いた信頼区間を用い、閾値の設定を行った。静止実験で求めた平均値に、自由着席実験で求めた標準偏差を引いた ($m_1 - \sigma_2$) を閾値の候補とする。最大値からの累積密度関数の $\sigma_2, 2\sigma_2, 3\sigma_2, 4\sigma_2$ を信頼空間の下限值とし、閾値とした。その結果を表 3 で表す。

4.4 イベント発生抽出実験

4.4.1 実験方法

上記の自由着席実験において、着席したかどうかのイベント発生を抽出する実験(着席判

表 3 平均値と標準偏差を用いた閾値の設定
Table 3 How to decide the threshold from one-man experiment

	接着剤	磁石
平均値 m_1	0.773 V	0.095 V
標準偏差 σ_2	0.125 V	0.020 V
$m_1 - \sigma_2$	0.648 V	0.075 V
$m_1 - 2\sigma_2$	0.523 V	0.054 V
$m_1 - 3\sigma_2$	0.398 V	0.034 V
$m_1 - 4\sigma_2$	0.273 V	0.014 V

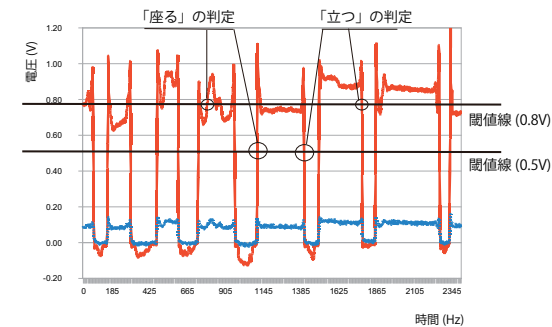


図 5 「座る」の判定を行う方法
Fig. 5 Method of judging "Sit"

定実験)である。4 つの閾値の候補から人が座ったかについて、被験者の動作結果を接着剤と磁石の場合の両方に対して検討を行った。実際に座った数とひずみデータからなる座った数を 4 パターンの閾値毎に求めて、最適な閾値を調べた。

具体的な求め方を図 5 に示す。実線が接着剤、点線が磁石のひずみ値を表す。実験は図 3 の判定基準に従い着座回数を数えた。図 5 では、閾値が 0.5V の場合においては、立った状態からスタートとしたため、7 回座ったことになり、閾値が 0.8V の場合は 14 回座ったことになる。

4.4.2 実験結果および考察

4 パターンの閾値により、座った判定を行った結果が表 4 と表 5 である。実際座った回数は 117 回であり、実際に座った数とデータから求まる座った数を比較し、数え損ねた数を求めた結果、接着剤は「 $m_1 - \sigma_2$ 」で 18 回、磁石は「 $m_1 - \sigma_2$ 」で 19 回であることが分かった。しかし、両方において「 $m_1 - 2\sigma_2$ 」は 100% の判定率を持つことが示された。こ

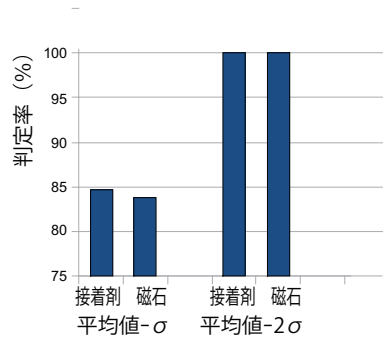


図 6 閾値設定に応じたイベント判定率
Fig. 6 Hit rate of event of threshold setting

のデータに基づき、判定率を表したのが表 6 である。これの判定率を表したグラフが図 6 である。

今実験は、閾値の求め方による判定率により、接着剤と磁石の比較を行った。磁石の方が接着剤に比べ反応値は低くても、イベント抽出においては閾値のキャリブレーションの仕方により、接着剤と同じ精度の結果を出すことが確認できた。最適な閾値の求め方は、正規分布に準じた標準偏差を求め、「 $m_1 - 2\sigma_2$ 」のキャリブレーションがより良い結果を示した。このようなキャリブレーションにより磁石を用いた貼り付け方が有効になり、インタフェースへの応用においては簡単かつ便利に設置可能になると考えられる。

5. 「星に座る椅子」における現地実験

5.1 星に座る椅子

デジタルパブリックアートプロジェクトにおける「空気の港」展⁸⁾が 2009 年 10 月 9 日～11 月 3 日に、羽田空港第 1、第 2 ターミナルにて開催された。ここでは 19 のデジタルパブリックアート作品が展示され、「星に座る椅子」⁹⁾は第 1 ターミナル 2F 南ウイングの出口ロビーに設置された。

5.1.1 作品概要

「星に座る椅子」は、夜空に見立てた天井に輝く星に、自分の座るベンチを通じてインタラクションを行うことができる作品である(図 7)。このベンチに座ると、夜空の星が光り、星の明るさが、座った人の重さや姿勢によって変化する。本作品では、ベンチからのア

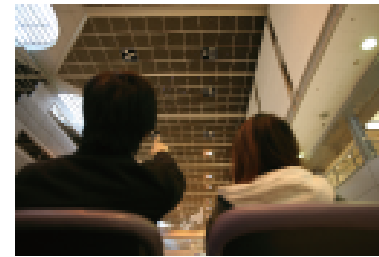


図 7 「星に座る椅子」の体験様子
Fig. 7 Constellation Chair

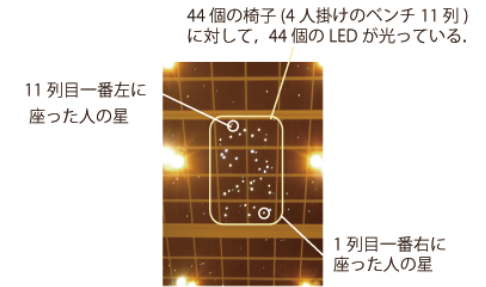


図 8 「星に座る椅子」の主なインタラクション
Fig. 8 Interaction of the Constellation Chair

クションが星に伝わるだけでなく、星の存在に気付いた人たちが、姿勢を変化させたり、他の人の動きに関心を示すなど、「星に座る椅子」に座っている人々通しの一体感を生み出していることが、会場で確認できた。本作品では、このような一連のやり取りを作品とのインタラクション、人とのコミュニケーションと考えた。また、今回の作品の特徴の一つとして、羽田空港内の既設のベンチを使用した点が挙げられる。従来、パブリックアート作品の創出では、その空間に適応してはいるが、その場になかった新しいオブジェを設置することで実現するものが多かった。Strino プロジェクトでは、このような考え方と一線を画し、その場にある物体をインターフェースとして利用することを目的として研究を進めてきた。ところが、前述の通り植物や丸太などの自然の物体を活用してきたものの、作品全体を新たに制作し、デジタルパブリックアート作品とすることが多かった。今回の展示ではこの点において、既設のベンチを使用し、作品を作り上げることができ、Strino プロジェクトの本来の目標を試行することができた。

5.1.2 システム構成とデータの流れ

全体の実装構成図は図 9 である。図に示す通り、4 つの椅子で 1 列のベンチとなる 11 列の既設ベンチを用いた。椅子一つに、LED 一つを対応させ、すべてのベンチに人が座ると天井の 44 個の LED が光る。なお、椅子と LED の位置も対応させている。人が椅子に座ると椅子の座面にひずみが生じる。そのひずみデータを AD 変換器を介してメイン PC に送信する。取得したひずみデータは、UDP 通信を用いて天井の LED 制御 PC に送信される。各装置の仕様は後述する。以上の結果、図 8 のような表現が実現される。

表 4 接着剤における 4 つの閾値による座った回数
 Table 4 Number of sitting times using adhesives

	人 1	人 2	人 3	人 4	人 5	人 6	人 7	人 8	人 9	人 10	人 11	人 12	人 13	人 14	人 15	人 16	人 17	合計
実際に座った数	7	5	8	8	6	8	7	7	5	4	8	5	7	7	7	7	7	117
閾値: $m_1 - \sigma_2$	8	3	8	8	6	11	8	8	6	4	9	6	9	8	9	8	8	
閾値: $m_1 - 2\sigma_2$	7	5	8	8	6	8	7	7	5	4	8	5	7	7	7	7	7	

表 5 磁石における 4 つの閾値による座った回数
 Table 5 Number of sitting times using a magnet

	人 1	人 2	人 3	人 4	人 5	人 6	人 7	人 8	人 9	人 10	人 11	人 12	人 13	人 14	人 15	人 16	人 17	合計
実際に座った数	7	5	8	8	6	8	7	7	5	4	8	5	7	7	7	7	7	117
閾値: $m_1 - \sigma_2$	10	7	8	9	6	11	9	10	5	5	8	6	8	9	10	9	10	
閾値: $m_1 - 2\sigma_2$	7	5	8	8	6	8	7	7	5	4	8	5	7	7	7	7	7	

表 6 閾値設定によるイベント発生の判定率
 Table 6 Hit rate of event of threshold setting

接着種類 閾値設定	接着剤		磁石		接着剤		磁石	
	$m_1 - \sigma_2$	$m_1 - 2\sigma_2$	$m_1 - \sigma_2$	$m_1 - 2\sigma_2$	$m_1 - 3\sigma_2$	$m_1 - 3\sigma_2$	$m_1 - 4\sigma_2$	$m_1 - 4\sigma_2$
数え損ねた回数 (回)	18	19	0	0	0	0	0	0
判定率 (%)	84.7	83.8	100	100	100	100	100	100

5.2 実験概要

本実験は「星に座る椅子」における現地実験である。4 章と同じベンチを用いて、人が座ったかの判定を接着剤と磁石を用いた接着方式によるひずみを計測を用いて求める。空港を利用する大勢の人を対象にして、磁石を用いた貼り付け手法がパブリック空間で適用可能かについて検討する。

5.3 実験条件および実験方法

4.2 と同様に磁石を用いてひずみセンサを貼り付ける。ただし、ベンチの裏側には、展示のために、ひずみセンサが接着剤で貼り付けられている状態であった。そのため、そのセンサの上に磁石でひずみセンサを貼り付けて実験を行った。センサの電源確保と PC との距離を踏まえた結果、11 列のベンチの中、電源が設置されている 7 列目の 4 つの椅子に、ひずみセンサを磁石で貼り付けた。展示最終日の 11 月 3 日の 12 時から 13 時までの間に実験を行い、接着剤と磁石における判定率を求める。磁石の貼り付けは 10 月 30 日に行い、計測は 11 月 3 日に行った。

5.4 実験結果および考察

その結果を表 7 に表す。1 列のベンチ 4 つに対し、左側から順次に椅子 A,B,C,D で表し、それぞれの椅子に対して座った数を数えた結果、椅子 A, B, C, D の 4 つとも、磁石と接着剤の判定率が一緒である。その結果を図 10 で表す。より、磁石を用いた場合でも接着剤に劣らない精度でイベント抽出ができることが確認できた。

6. まとめと今後の課題

本稿では、磁石を用いた取付方式について、実際に空港に置かれているベンチを用いて実験的な検討を行い、磁石による取り付け方法の有用性が示された。

ひずみ計測を用いたインタフェース応用においては、ベンチのセンシング性能は、閾値の設定方法に依存し、正しく座ったことの判定率で評価できることを意味する。そこで、両方の貼り付けにおいて、人がベンチに座ったかのイベント抽出を行った。その結果、磁石は接着剤より反応したひずみ値は低かったものの閾値のキャリブレーションを ($m_1 - 2\sigma_1$) で行

表 7 現地実験における接着剤と磁石の判定率
Table 7 Hit rate using adhesives and a magnet of a field experiment

日程	接着剤 A	磁石 A	接着剤 B	磁石 B	接着剤 C	磁石 C	接着剤 D	磁石 D
m_3	0.260 V	0.041 V	0.437 V	0.106 V	0.920 V	0.312 V	0.353 V	0.141 V
σ_3	0.028 V	0.005 V	0.016 V	0.004 V	0.199 V	0.038 V	0.060 V	0.015 V
$m_3 - \sigma_3$	0.205 V	0.030 V	0.405 V	0.099 V	0.523 V	0.235 V	0.234 V	0.111 V
座った数	7	7	5	5	4	4	0	0

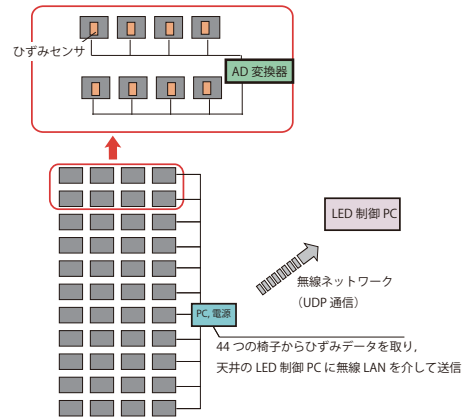


図 9 実装システム概要
Fig.9 System

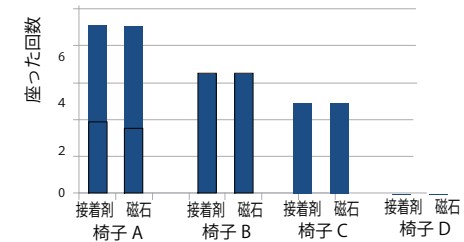


図 10 現地実験における磁石と接着剤の比較
Fig.10 Compare of using magnet and adhesive on field experiment

参考文献

- 1) 廣瀬通孝: “デジタルパブリックアート総論”, 第 2 回デジタルコンテンツシンポジウム, pp. 1-1, (2006.6).
- 2) 金 ジョンヒョン, 飯田 誠, 苗村 健, 太田 裕之: “デジタルパブリックアートのための磁石を用いた簡便なひずみ計測の基礎検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第 14 回大会 (2009.9)
- 3) K.Hashimoto ら: “Sharelog:Digital Public Art Interaction by using Suica”, In Proc. of ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2006 (ACE 2006), pp.62, (2006.6).
- 4) 鈴木康広: “まばたきの葉”, 予感研究所, 日本科学未来館, 日本, (2006.5)
- 5) 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, pp. 67-68, (2006.9).
- 6) 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, (2007.9).

うことで 100 %の精度で座った判定ができることが確認できた。そしてこのキャリブレーション手法を用いて実際の空港にセンサを設置し、実験を行った結果、磁石を用いた場合でも接着剤に劣らない精度でイベント抽出ができたことが確認でき、長期間かつ大勢の人に対応できることが分かった。

今後はパブリック空間に限らず日常生活においてモデル式から学習ができ、何でもインタフェース化できるようなシステムの構築をしていきたいと考えている。このようなシステムを用いて新たなインタフェースへの応用構築していきたいと考えている。

- 7) 東京大学原島・苗村研究室(高田英明, 金ジョンヒョン, 飯田誠, 苗村健, 原島博) +) + 鈴木康広(制作:草刈木工(株), 協力:(株)日立製作所 機械研究所): “Streaming Bench ” 国立新美術館 (2008.11.5-17)
- 8) 空気の港: <http://www.digital-public-art.org/airharbor/airharbor.php?pg=top>
- 9) 星に座る椅子: http://www.digital-public-art.org/airharbor/ah_works_t1.php?pg=14Chair
- 10) 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.