

平面をインタラクティブにする 加速度センサを用いたユーザアクション認識手法

磯山直也^{1,a)} 寺田 努^{1,2,b)} 塚本昌彦^{1,c)}

概要 :

近年、インタラクティブシステムのためのユーザ行動認識手法が多数提案されている。情報提示システムがインタラクティブになることで、観客はシステムを自らの体で経験して楽しむことができ、システム提供者もより豊かな表現をすることができる。ユーザ行動には様々なものがあるが、システム設置の制限などの理由により、既存のシステムは特定のアクションの認識に特化しているものがほとんどである。本稿では、平面に複数の加速度センサを装着することで、行われたアクションの位置や強さを認識する手法を提案する。小型の加速度センサのみでシステムを構成することにより、デバイスが目立たずに、汎用的に設置することが可能である。これまでに2度の長期的なメディアアートでの使用を通じて、提案手法の有用性を確認した。

1. はじめに

近年、液晶ディスプレイやプロジェクタの普及により、デジタルサイネージやメディアアートを日常的に見かけるようになってきた。これらのように情報の提示をデジタルにすることで、画像を切り替えたり、動画を流し続けたり等、紙媒体では不可能であった提示が行えるが、多くの情報を伝えたり、観客にシステムを自らの体で経験させて楽しませたりするためには提示をインタラクティブにすることが有効である。

コンピュータの小型化、高性能化により、ユーザアクションを認識しインタラクティブに動作するシステムが多数提案されている。例えば、HoloWall[1]は大型ディスプレイの後ろに赤外線 LED とカメラを備えることにより、ハンズフリーでマルチポインティングを実現し、非接触で物の接近も感知することができる。深澤らは、カメラを使用してディスプレイの間に立つユーザのジェスチャーを認識するシステムを提案している [2]。しかし、HoloWallはタッチの強さを認識できず、またディスプレイの後ろに広い空間が必要である。深澤らのシステムはカメラを使用するため、公共スペースなどで利用するには注意が必要で

あるなど、個々のシステムには得手不得手がある。ユーザアクションは様々であるが、単一のシステムで対応できるアクションには限りがあり、設置できる環境も制限が伴うため、既存のシステムは特定のアクション・環境に特化しているものが多い。

本研究では、複数の加速度センサを用いることにより、平面に対し行われたユーザアクションの位置や強さを検出できる手法を提案する。本手法では、紙やスクリーンなどの平面の裏側に装着した加速度センサが、ユーザがタッチしたりや引っ張ったり、息を吹きかけたりといったアクションをした際に平面が揺れることを検出する。アクションの種類や位置、強さの認識には揺れた際に平面上を伝わる波の伝搬速度、振幅の大きさ、波形の3つの特徴を用いる。加速度センサは小型なため、観客の目に触れることなく既存の環境にも設置することができ、提案システムは他の手法と併用し、機能を増やすこともできる。これまでに、2度の長期的なメディアアートの展示において提案システムを使用しており、その有用性を確認した。

以下、2章で関連研究を紹介し、3章で提案システムのシステムデザイン、システム構成、認識手法について説明する。4章で実運用について述べ、5章で実運用から得られた結果について考察を行なう。最後に6章で本研究のまとめを行なう。

2. 関連研究

平面上においてユーザアクションを認識するために多く

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

² 科学技術振興機構さきがけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

a) isoyama@stu.kobe-u.ac.jp

b) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

c) tuka@kobe-u.ac.jp

の研究が行なわれている。HoloWall[1] は大型のディスプレイ全体が一種のタッチパネルとして機能し、指や手だけでなく、全身を利用したインタラクションが可能である。ディスプレイの後ろに設置されている赤外線 LED と赤外線透過フィルタを備えたカメラにより認識しており、従来のタッチパネルでは不可能であった非接触での物の接近も感知することができる。ZeroTouch[3] は長方形の枠に LED と受光器を多数装着することで、その枠内でのマルチタッチを検出できる。この枠を備え付けるだけでどのような面でもマルチタッチが可能となる。深澤らは、ディスプレイの前に立つユーザのジェスチャの認識手法を提案している [2]。カメラのみで認識することにより、ユーザはハンズフリーでディスプレイ内の広告などのコンテンツを操作することが可能となる。HINOCO[4] はカーテンを用いたインタラクティブシステムである。カメラを用いることによって人とカーテンの動きを認識し、測域センサを用いることによって人がカーテンに触れた位置を検出している。PingPongPlus[5] はボールがテーブルに当たった位置を認識し、その位置にエフェクトを起こすといった、卓球を拡張するシステムである。テーブルに 8 個のマイクを設置し、ボールがテーブルに当たった際の音が伝わる速度の違いにより位置を認識している。

タッチ以外にも息を吹きかけるといったような他のユーザアクションを認識する研究も行なわれている。BYU-BYU-View[6] はスクリーン面を通じた風の入出力と映像の出力を実現するシステムである。スクリーンに風を通すことのできる特殊な素材を使用し、スクリーンの後ろに風の入力を検出するセンサを設置することにより、ユーザはスクリーンに対して息を吹きかけることによって入力を行える。Jellyfish Party[7] は、息を吹き込むことでヘッドマウントディスプレイを通して現実空間内にシャボン玉の CG が飛び出すインスタレーション作品である。呼吸センサを備えた専用デバイスを用いることによって息を吹き込むことを認識している。livePic[8] と ThermoRetouch[9] では、スクリーンの後ろに赤外線サーマルカメラを備えることによって、ユーザアクションの際の表面上の温度の変化を認識している。このシステムではタッチと息を吹きかけることの両方を認識することができる。

さらにタッチしたことだけでなく、強さなどのより詳しい情報を認識することも重要である。WrinkleSurface[10] はマルチタッチを認識するタッチパネルである。FTIR 方式のタッチパネルに、柔らかい透明なウレタンゲルシートを張り付けることにより、入力面に対して指を強く押す、指をずらす、指をねじる等の入力面を変形させる動作による入力を可能にしている。Touchê[11] は液体を含めたあらゆるオブジェクトへのタッチを識別するシステムである。どのように触れているのか、触れた面上でどのようなジェスチャをしているのかを認識することができる。これらの

ような認識システムが増えると、インタラクティブシステムの更なる発展が望める。

3. 提案システム

本研究では、様々な環境に設置できるインタラクティブシステムの構築を目指す。提案システムは、入力対象の表面を揺らすようなユーザアクションを認識する。

3.1 システムデザイン

本システムの要件を以下に記す。

- **デバイス不装着:** 公共スペースで使用する際には、観客に特殊な装置を身につけさせるべきではない。
- **カメラ不使用:** 公共スペースにカメラを設置することは現実的ではない。
- **デバイス不可視:** デバイスやケーブルが見えていると景観を損ないかねないので、観客から見えないようにすべきである。
- **可変な大きさ:** システムの設置面は様々な大きさが考えられるので、大きさの違いに対応できる必要がある。
- **様々な素材の設置面:** 入力面は布や紙、薄い板といった様々な素材を想定する。
- **他システムとの併用:** 高精度で特定のアクションを認識できる様々な既存のシステムがある。これらのシステムと併用できるようにする。

提案システムは、入力対象のオブジェクトの表面に複数の加速度センサを設置し、そのセンサのデータからユーザアクションの認識を行なう。

ユーザが平面に触れたり、息を吹きかけたり、叩いたりといったアクションを行うと、その表面は揺れるため、揺れにより伝わる波を加速度センサが検出する。強く触れると大きな揺れが検出できるため、本システムは触れた強さを検出できる。また、インタラクティブシステムはアクションの行なわれた位置を認識することも重要である。提案システムでは複数の加速度センサを用い、複数点の揺れを測定することによって大まかな位置を認識する。さらに、本システムは加速度センサを自由な位置に配置できるため、既存の環境にも設置することができ、同時に景観を損なうことなく設置できる。

3.2 システム構成

図 1 にシステム構成図を示す。システムは 3 軸加速度センサ、PC、マイクロコンピュータ、そしてユーザアクションを受け取る平面から構成されている。平面は布や紙、フィルムなどが考えられ、裏面に加速度センサが装着される。平面の大きさや、素材に応じてセンサの数を調整する。センサのデータはマイクロコンピュータを通じて PC へと送られる。

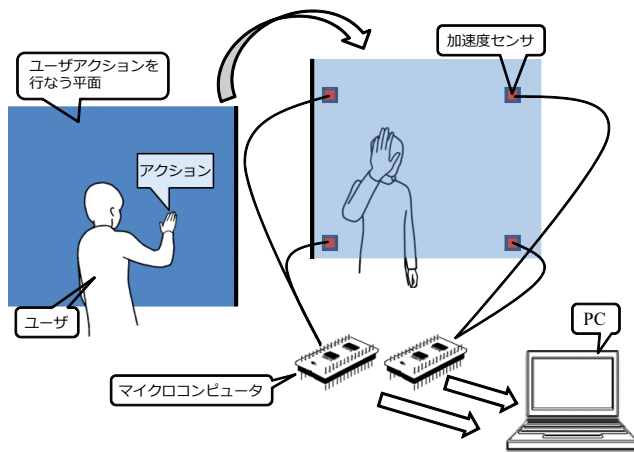


図 1 システム構成図

3.3 認識手法

ユーザがタッチしたり、引っ張ったり、息を吹きかけたりすると、表面は揺れ、その上を波が伝わる。提案システムではその波を加速度センサで検出し、ユーザアクションが行なわれたこと、その位置・強さを認識する。

図 2 に、天井と床に上下を固定した布に、加速度センサを長方形 (1000mm × 950mm) の形で 4 隅に装着し、タッチした際の加速度センサデータを示す。図左が長方形内側の左上、図右が右上付近をタッチした際のデータである。4 つのセンサにおいて、それぞれスクリーン正面から奥方向への 1 軸のデータを示しており、全て違った波形であることがわかる。その違いから位置や強さの認識が可能であると考えた。加速度センサの装着位置を変えたり、縫い付ける、両面テープで張り付けるなどの固定方法を試したり、布や紙など入力面の素材を変えたり、様々なアクションを行なったりと、様々なパターンで試してみた結果、認識のためには、伝わってくる波の伝搬速度、振幅の大きさ、波形の 3 つの特徴が有効であることがわかった。利用する際のパターンによって、3 つの特徴量の扱い方は異なるため、本手法では、キャリブレーションを行ない、どの特徴をどう用いるかを決定する。具体的には、加速度センサを装着後、複数点に対して数回認識したいアクションを行なう。そして、得られたセンサデータを比べ、アクションの強さによって違いが見られればその値によって強さの判別を行なう。アクションの強さに応じて波の振幅は影響されるため、振幅の値そのもの、もしくはその分散値は強さを認識するのに有用である場合が多い。さらに、アクションを行なった位置によって波形に違いがあるようであれば、それによって位置の検出を行なう。また、アクションを行なった位置と加速度センサの位置に近いほど、センサはより早く波を検出できると考えられ、違いが見られれば、波がそれぞれ異なる位置に装着されたセンサに到達する時間の違いによって位置を検出することができる。もし、波形と到達時間のそれぞれに違いが見られれば、システムはこれら 2

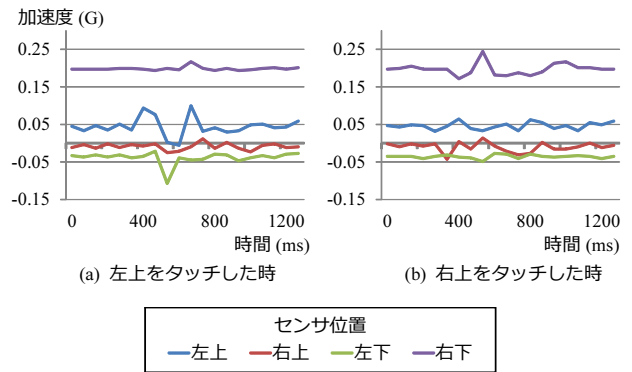


図 2 布にタッチした際の加速度データ例

つの方法から算出された 2 つの位置の平均から位置を決定する。

4. 実運用

提案システムの有用性を検証するために、2 度の長期的な展示を行なった。両展示において、システムはデスクトップ PC (CPU: Intel Core 2 Quad 2.83GHz, RAM 3.25GB), 4 つの加速度センサ (#KXM52-1050 XYZ ±2G), 2 台のマイクログコンピュータ (Arduino nano) から構成されている。

4.1 34°_41.38'N 135°_30.7'E

34°_41.38'N 135°_30.7'E は 1 部屋を使ったインスタレーションアートである。筆者らはコンセプチュアルアーティストの迫一成氏と、2012 年 8 月 10 日から 9 月 2 日にかけて展示を行なった。図 3 は展示の様子を示している。2 枚のスクリーンがあり、それぞれ後ろからプロジェクタで新聞の画像を投影されている。図 4 のように観客が左のスクリーンに息を吹きかけると、新聞画像中の文字や図、枠線が息を吹きかけられた点を中心に吹き飛び、スクリーンの枠内からなくなり、右のスクリーンから浮かび上がってくる (図 5)。

このインスタレーションでのシステムは息を吹きかけられたこと、またその強さを位置を認識することが求められる。ここで、システムは文字や図などの約 12,000 個のオブジェクトを 1920×1080 の解像度中に投影しており、それぞれのオブジェクトを認識し、エフェクトをかける必要がある。よって、システムは観客がどの位置に息を吹きかけたのかを細かな粒度で検出しなければならない。提案システムは大まかな位置の検出しかできないため、位置検出のための他のシステムと併用することで、今回のインスタレーションを実現した。

4.1.1 システム構成

34°_41.38'N 135°_30.7'E でのシステム構成図を図 6 に示す。スクリーンにはシアターハウス社の #TPW1200TK+60 を用いており、これは前面と背面からの両方のプロジェクションが可能なスクリーンフィルムである。それぞれのス

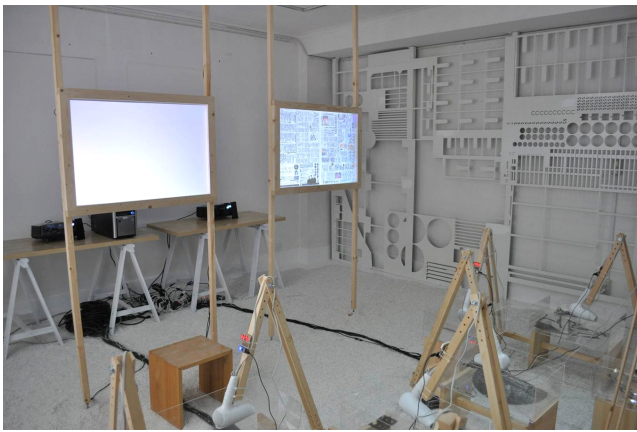


図 3 34°_41.38'N 135°_30.7'E の様子

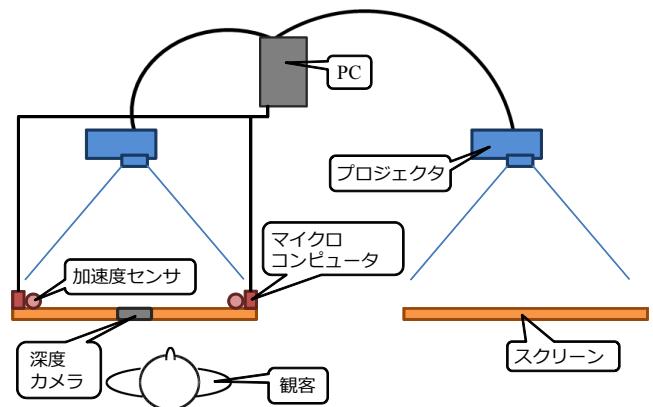


図 6 34°_41.38'N 135°_30.7'E でのシステム構成図

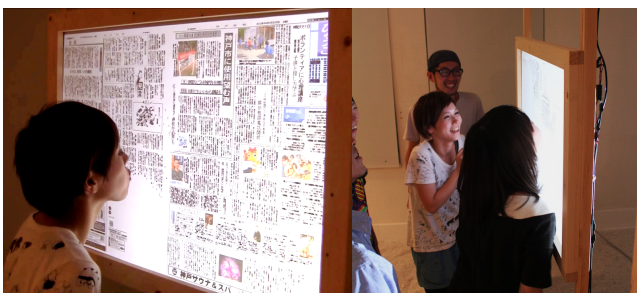


図 4 スクリーンに息を吹きかける様子

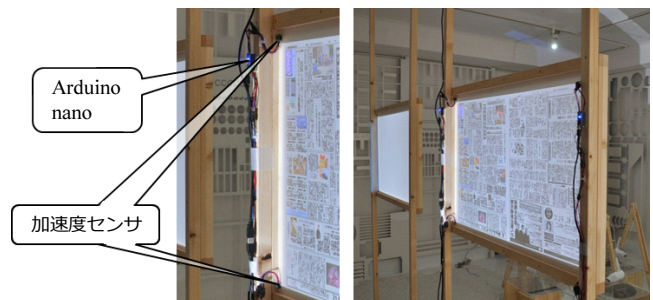


図 7 スクリーン裏側

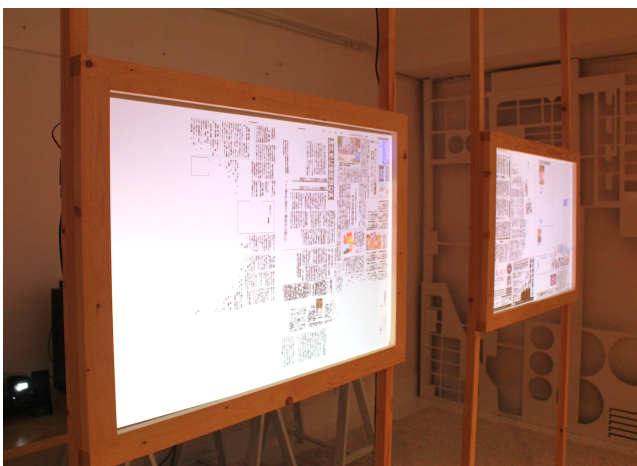


図 5 左から右のスクリーンへオブジェクトが移動した様子

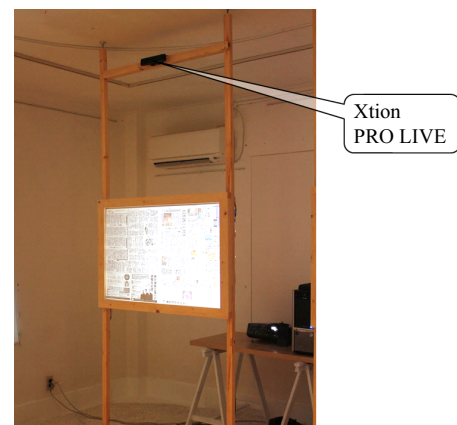


図 8 設置した深度カメラ

クリーンを新聞と同じサイズ (540mm × 810mm) にカットし、木枠にセットして使用した。木枠は 4 辺でスクリーンフィルムを固定している。映像はリアプロジェクションされ、加速度センサは図 7 のようにスクリーンの裏側、4 隅に接着剤で固定されている。本来は 3.3 節で述べたように、加速度センサのみで位置を検出するが、本展示では正確な位置検出が必要であったため、他の手法と併用が可能であることを確かめるためにも、深度カメラで息を吹かれた位置を検出する手法を使用した。深度カメラには Xtion PRO LIVE[12] を用い、図 8 のように設置した。観客の口の位置を測定する必要があり、深度カメラから観客の頭部までの距離を測り、その値に 200mm 足した値を、口の高

さとした。200mm という値は、人の頭の大きさには大きな差異はなく、頭頂部から口までが約 200mm であることから、採用した。また、深度カメラから得た頭部の中心点を口の水平位置とした。

4.1.2 認識手法

本システムでは、観客が息を吹いた際にスクリーンが揺れ、それにより表面上を伝わる波を検出することによって、息を吹きかけられたことを認識するが、観客がスクリーンに顔を近づけただけでもスクリーンはわずかに揺れてしまう。そのわずかな揺れは検出しないように閾値を設定し、閾値を超える振幅の波が伝わってきた場合のみ息が吹きかけられたと認識する。さらに、その振幅の大きさから息を吹きかけられた強さを認識している。

システムは、息を吹きかけられたことを認識すると、口の位置を中心に文字、図、枠線を散らばらせる。そしてその散らばる際の半径の大きさは、吹きかけられた息の強さが強いほど、大きくなる。

4.1.3 考察

本展示を通じて多くの観客がシステムを体験し、楽しかったと感想を残した。日常生活では行なうことのできない、新聞内のオブジェクトを吹き飛ばすという行為を楽しんでいた。

息を吹きかけたことを認識するためには、BYU-BYU-View[6]のように風が通り抜けるスクリーンを用いることや、スクリーン上に大量のセンサを配置することなどが考えられる。しかし、本展示では新聞の文字が読めるように高解像度で映像投影する必要があるため、これらの手法は用いることができなかった。本手法を用いることにより、高解像度を保ち、新聞の文字を読むことができた。Jellyfish Party[7]のように専用デバイスを観客に持たせ、それを通じて認識することも考えられたが、公共スペースであったことや、息を吹きかける動作を自然に行わせたかったため、観客にデバイスを装着させることはできなかった。また、livePic[8]や ThermoTablet[9] に比べ、はるかに低いコストでシステムを設置することができた。

提案手法では、大まかな位置しか検出することができないが、深度カメラを使用する他の手法を取り入れることで、正確な位置検出を行なうことができた。これにより、提案システムは他の手法と併用できることを確認した。

4.2 White Parallel Small Space (WPSS)

White Parallel Small Space (WPSS) は、Designer Show House というアーティストやデザイナーが各自ビルの1室をリノベーションするというイベントの際に行なった、インスタレーションアートである。筆者らはインテリアコーディネーターの一嶋眞貴子氏と、2012年10月13日から11月4日にかけて展示を行なった。図9は展示の様子を示している。図10に示すように、部屋の端から端へ掛けられているカーテンに、2つのプロジェクタから白い円と3枚の画像が投影されている。無数の白い円は雪のようにゆっくりと上から下へ落ちていき、3枚の画像は投影されている付近で漂っている。図11のように、観客が3枚の画像の内いずれかをタッチすると、その画像が右の方へと移動し、ランダムな位置で停止すると動画になり、再生される。漂っている3枚の画像は再生される動画のサムネイルである。

本インスタレーションでのシステムは、3枚の画像の内、どれがタッチされたかを認識する必要がある。展示を行なう部屋が狭いことや、展示のコンセプトから、カメラを設置できず、その他の使用する機器も観客から見られる場所に設置できない。そこで、本システムは機器をカーテンの



図9 WPSSの様子



図10 カーテンに3枚の画像が投影されている様子

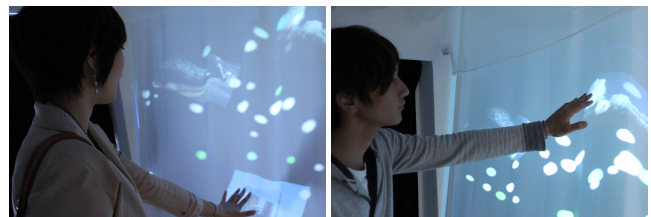


図11 観客がカーテンにタッチしている様子

後ろに配置し、カーテンをタッチされた位置は提案手法のみで検出した。

4.2.1 システム構成

WPSSでのシステム構成図を図12に示す。投影映像はPC上では1枚の映像であり、2台のプロジェクタでその1枚を投影している。図中左のプロジェクタは超短焦点であり、3枚の画像と白い円を投影している。観客が3枚の画像の内いずれかにタッチすると、その画像が右のプロジェクタで投影される範囲に移動し、動画が再生される。カーテンは天井から吊り下げられ、床で固定されている。図13に示すように加速度センサは、台形(高さ: 950mm, 上底: 1000mm, 下底: 250mm)に、細い糸で縫い付けられている。

4.2.2 認識手法

システムは、カーテンを触れた際に、表面上を伝わる波を検出することで、タッチされたことを認識する。しかし、部屋のドアの開閉や、部屋内を流れる風により、カーテンが揺れるため、その小さな波はタッチとして認識しないように4.1.2節と同様に閾値を設定する。

本展示システムでは、波が各加速度センサに到達する速度からタッチされた位置を検出する。最初、加速度センサ

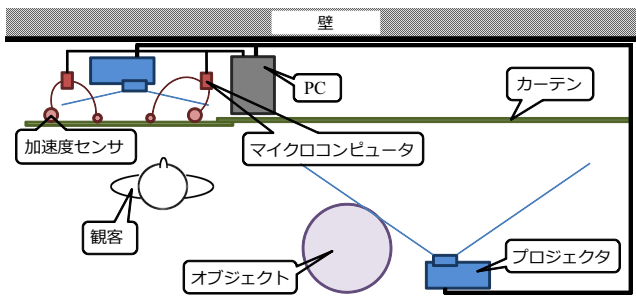


図 12 WPSS のシステム構成図

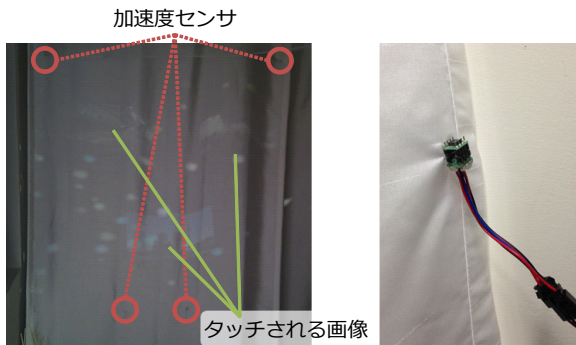


図 13 加速度センサが縫い付けられている様子

は長方形に取り付けられていた。しかし、使用したカーテンは垂直方向よりも水平方向へ波がゆっくり伝わるという特徴をもっており、垂直方向での到達速度にあまり違いは見られないが、水平方向での到達速度には違いがあるため、その差によってタッチされた位置を検出できると考えた。そこで、図 14 に示すように、水平方向で波の到達速度に差がでやすいように、台形に加速度センサを再設置した。システムは、表 1 に示す原則に従って、タッチされた画像を認識する。ここで、UL, UR, LL, LR はそれぞれ、左上, 右上, 左下, 右下の加速度センサを表しており、波を最初に検出した加速度センサが左から 1 番目の列であり、次に検出した加速度センサが 2 番目の列、タッチされたと認識される画像を右端に示す。例えば、UL が最初に波を検出した場合、システムは左上に投影されている画像がタッチされたと認識する。

本システムでは、全ての機器が観客から見えなくなっている。1つのプロジェクタ以外はカーテンの後ろに配置されており、そのプロジェクタも図 12 に示すようにオブジェクトによって隠されている。

4.2.3 考察

観客は日用品として見かけているカーテンがインタラクティブであることを不思議がっていた。システムは提案手法のみでタッチされた位置を認識できたが、少し誤認識が起こっていた。誤認識の例としては、タッチした画像とは違う画像が移動したことがあげられるが、観客がカーテンを叩くようにタッチするのではなく、表面を撫でるように触れた際に起こっていた。

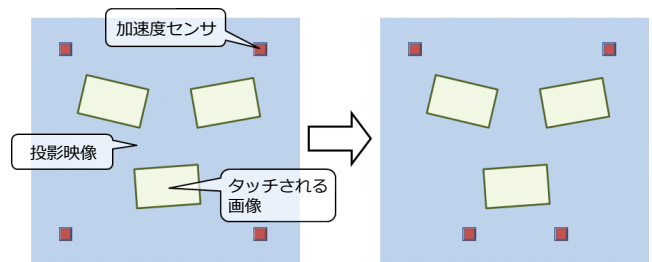


図 14 加速度センサの配置の変更

表 1 タッチされた画像の認識方法

波の到達速度		タッチされた画像
1 番目	2 番目	
UL		左上
UR		右上
LL	UL	左上
LL	UR	下
LL	LR	下
LR	UL	下
LR	UR	右上
LR	LL	下

部屋は狭く (1500mm × 3700mm)、壁とカーテンの間もわずか 700mm しか確保できなかった。本システムにおいて、カメラを用いてタッチ位置を認識する場合、観客から見えないようにカメラはカーテンの後ろに配置することになり、画角が限られてしまい、非常に狭い範囲でしか認識できなかったが、提案手法を用いることにより、観客からデバイスを隠しつつ、広い範囲での認識が可能となった。

5. 考察

2度の長期的な展示によって、本システムの有用性を確認した。本稿では、入力用の平面としてスクリーンフィルムとカーテンを用いたが、その他にも紙や薄い板など様々な素材を用いることを考えている。図 15 はアクリルボックスに 2 個の加速度センサを設置した様子であり、Sensor 2 の近くを 5 回叩いた際の加速度データが図 16 である。図中のデータはそれぞれの加速度センサについて、アクリルボックスの上から下への方向の 1 軸のデータである。入力用の平面がアクリル板のような少し硬い素材であっても、加速度センサは叩かれた際に伝わる波を検出でき、提案システムを構築できる。

実運用で構築したシステムは、各展示においてそれぞれ息を吹きかける、タッチするといったただ 1 種類のアクションを認識したが、平面を撫でる、扇ぐ、引っ張るといったアクションを行なった観客もいた。システムが同時に 2 種類以上のアクションを認識することができれば、それぞれによってエフェクトを変える等、表現できることが豊かになる。提案システムは波の伝搬速度、振幅の大きさ、波形の 3 つの特徴を用いているが、それぞれをさらに分析

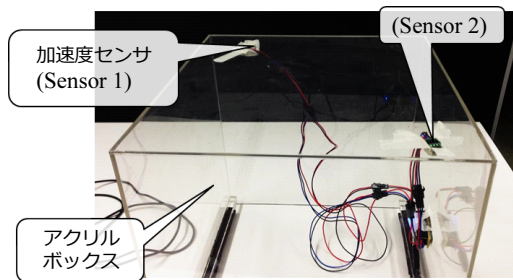


図 15 アクリルボックスに加速度センサを設置した様子

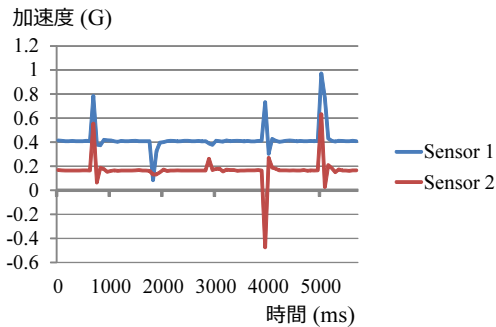


図 16 アクリルボックスを叩いた際の加速度データ

することによって、複数種類のアクションを認識できるようになると考えられる。さらに、その分析によって、アクションされた位置をより正確に検出できるようになったり、連続したアクションや、同時に複数点でアクションされても認識できるようになったりすることが期待できる。

本システムを実際に使用する際には、アクションを変えたり、加速度センサの配置を変えたりしつつ、加速度センサのデータを集める必要がある。そして集めたデータを用いて、認識のためにどのような値をどう扱うべきかを検討し、ノイズを除去するための閾値を設定するといったように、様々なパラメータをセットすることによってシステムを構築することになる。このプロセスには、センサに関する知識が必要となり、時間もかかる。そこで、センサデータの特徴量をどのように扱うかを決定できるキャリブレーションソフトの作製を検討している。具体的には、加速度センサを装着後、アクションを行なう範囲内にグリッド状に9点（もしくはそれ以上）を示し、それぞれの点に対して認識したいアクションを複数回行う。ソフトはアクションの強さや位置からマルチレベルで特徴量の違いを示し、認識のために利用できる特徴量を見つけることができる。さらに、適切な閾値を計算し、示すことにより、ユーザはGUIを用いて精度を向上するためにそれらの値を調整することができる。

実運用では、映像の投影された面を入力面としていたが、提案システムは単純に入力インタフェースとして用いることができる。例えば、デスクの裏側に加速度センサを設置しておき、ユーザがデスクの上面をノックすることによ

て、その強さや位置に応じて割り当てられたキーボードコマンドを入力することができる。

6. まとめ

本稿では、入力面としたい平面に加速度センサを取り付けることによって、ユーザアクションが行なわれたことや、その強さ、位置を認識し、インタラクティブにすることができるシステムを提案した。提案システムは特殊なデバイスやカメラなしで、小さな加速度センサを複数個付けるだけで構築できる。さらに、設置環境は、入力面の大きさに制限はなく、他のシステムと併用できる。2度の実運用を通じて、提案システムがうまく働くことや、様々な環境や制限に適應できることを確認した。

今後は、5章で述べたキャリブレーションソフトを実装し、様々な素材を入力面、様々なアクションに対して試用する。また本稿では認識のために加速度センサを使用した。他の種類のセンサについても試す。例えば、曲げセンサはタッチを認識でき、入力面のゆがんだ形を大まかに認識できる。照度センサは照明の状況や人が近づいたことを認識することが可能である。これらを用いたシステムの構築を行なう。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（さきがけ）によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] N. Matsushita and J. Rekimoto: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall, *Proc. of the 10th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 1997)*, pp. 209–210 (Oct. 1997).
- [2] T. Fukasawa, K. Fukuchi, and H. Koike: A Vision-Based Non-contact Interactive Advertisement with a Display Wall, *Proc. of the 5th International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2006)*, pp. 394–397 (poster) (Sep. 2006).
- [3] J. Moeller and A. Kerne: ZeroTouch: an Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture, *Proc. of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2012)*, pp. 2165–2174 (May 2012).
- [4] Y. Arita, T. Miyake, N. Yamamoto, P. Ravindra S De Silva, and M. Okada: HINOCO - An Interface to Collocate the Virtual-World and Real-World, *Proc. of the 13th Virtual Reality International Conference (VRIC 2011)*, pp. 18–19 (Apr. 2011).
- [5] H. Ishii, C. Wisneski, J. Orbanes, B. Chun, and J. Paradiso: PingPongPlus: Design of an Athletic-tangible Interface for Computer-supported Cooperative Play, *Proc. of the 17th SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 1999)*, pp. 394–401 (May 1999).
- [6] E. Sawada, S. Ida, T. Awaji, K. Morishita, T. Aruga,

- R. Takeichi, T. Fujii, H. Kimura, T. Nakamura, M. Furukawa, N. Shimizu, T. Tokiwa, H. Nii, M. Sugimoto, M. Inami: BYU-BYU-View: a Wind Communication Interface, *Proc. of the 34th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2007)* (Aug. 2007).
- [7] Y. Okuno, H. Kakuta, and T. Takayama: Jellyfish Party: Blowing Soap Bubbles in Mixed Reality Space, *Proc. of the 2nd International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003)*, pp. 358–359 (Oct. 2003).
- [8] M. Katsura and M. Inakage: livePic, *Proc. of the 33th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2006)* (July 2006).
- [9] 岩井大輔, 佐藤宏介: ThermoRetouch & ThermoModeler: 熱感覚を利用した画像創作支援, *芸術科学会論文誌*, Vol. 6, No. 2, pp. 65–75 (July 2007).
- [10] 坂本侑一郎, 吉川拓人, 大江龍人, 志築文太郎, 福本雅朗, 田中二郎, WrinkleSurface: しわを作って入力できる柔らかいマルチタッチインタフェース, *日本ソフトウェア科学会第19回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2011) 論文集*, (Dec. 2011).
- [11] M. Sato, I. Poupyrev, and C. Harrison: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, *Proc. of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2012)*, pp. 483–492 (May 2012).
- [12] ASUS: Xtion PRO LIVE, http://www.asus.co.jp/Multimedia/Motion_Sensor/Xtion_PRO_LIVE/.