

モジュール型デバイスによる 実世界への図形描画と空間計測

飯田 一樹^{†1} 池内 隼生^{†2}
内山 俊朗^{†2} 鈴木 健嗣^{†1}

本稿では、環境や使用者へ大きな負荷を与えず、実世界において簡便に幾何学図形を描画し、かつ描かれた図形によって作られた空間の計測を可能にする、新しいモジュール型デバイスを提案する。これは、レーザー光を出力する小型モジュールを空間内に自由に配置することで図形を描画するとともに、これらのモジュール群が形成する閉空間で物体検知を実現するものである。これにより床面を可能な限り阻害せず、空間内での物体検知が可能になるだけでなく、LED やスピーカによる視聴覚刺激を通じて人の移動・跳躍などといった運動計測、および次の動作位置の指示や認識結果の提示を実現する。これにより子どもたちが広場に線を引いて、遊びの空間を作るような新たな実世界インタラクションを実現することを目指す。

Modular Devices to Create a Flexible Sensing Space

KAZUKI IIDA,^{†1} JUNKI IKEUCHI,^{†2} TOSHIAKI UCHIYAMA^{†2}
and KENJI SUZUKI^{†1}

We propose a novel modular device that allows users to create a flexible sensing space in the real world. The developed modular device is small and lightweight. The modular device consists of a laser emitting diode, infrared sensors, wireless meshed network components, LEDs and a loudspeaker. User can freely put devices on the ground and rotate them so that a geometrical shape will appear. At the corners of the geometrical shape the modular devices are located. The boundaries of this geometrical shape are visualized by the laser emitting diode. Within this geometrical shape the sensing space is created by the infrared sensors. By creating the sensing space in this manner there are no physical objects needed or present in the sensing space. The developed system provides an interactive visual/audio environment as if children would make hand drawings on the ground and play with the created shapes. Potential applications are human-behavior registration, motion guidance and therapeutic exercise.

1. はじめに

現在、実世界における情報提示や直感的な情報操作を目指し、仮想現実感やタンジブルインタフェース、および実空間と仮想世界を重ね合わせる複合現実感技術¹⁾などの研究が広く行われている。このように、現実の空間内における人の動作に応じて情報空間の操作を行うためには、適切な情報提示と実時間での動作計測が必要不可欠である。情報提示については、プロジェクタやHMDなどによる視覚刺激に加え、スピーカやハプティックデバイスなどといった聴覚・触覚提示が用いられる。一方、動作計測には、カメラ計測に加えレンジファインダ、フォースプレート、モーションキャプチャなど、環境にセンサデバイスを設置し、人が機器を装着することなく実世界での動作を計測する手法が多く用いられている。たとえば、表面に置かれた複数の物体の位置が検出できる機とプロジェクタを組み合わせることによって直感的な操作を実現し、化学教材や音楽演奏などに応じた例²⁾や、プロジェクタと視界制御フィルムを使用することで、使用者の視線方向に応じて異なる映像を机上に提示し、かつ机内部のカメラを用いて机上のセンシングを実現した例³⁾、液晶ディスプレイと天井カメラを使用することにより手のジェスチャ認識を可能としたテーブルトップエンタテインメントシステム⁴⁾が提案されている。

このような背景のもと、簡便に動作計測と情報提示を実現するデバイスを利用して運動療法に応用するといった新しい試みが見られる。たとえば、カメラによる入力と仮想現実感を応用したSONY EyeToyを用いたリハビリテーションの臨床試験が行われており、良好な結果が報告されている⁵⁾。また、モジュール型のタイルを組み合わせることにより空間内に計測可能な空間を自由に生成し、これを用いて運動計測を行うデバイス⁶⁾が提案され、リハビリテーション効果において有効性が実証されている。一方我々も、自由な体の動きから音楽を生成する試みである身体的音響メディア技術を応用し、新たな社会的音楽インタフェースを開発^{7),8)}しており、これを運動療法へ適用する試みを行っている。これらに共通する点は、単なる運動計測だけでなく、同時に音や光により人の動作を促すことが可能であるという特徴を有することであるといえる。

^{†1} 筑波大学大学院システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{†2} 筑波大学大学院人間総合科学研究科

Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba

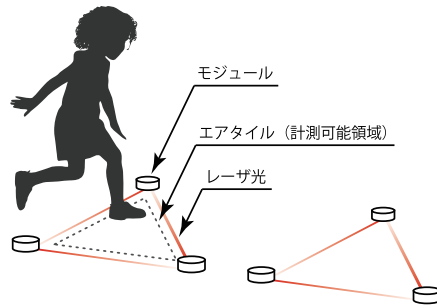


図 1 エアタイルの使用例
Fig. 1 Overview of the AirTiles.

しかしながら、このような動作計測および情報提示を実現するためには、装置が大がかりになったり、実空間に情報を提示するための使用場所に制限が大きかったりするため、利用者だけでなく周囲の環境に対する負荷が高くなる。たとえば、前述のプロジェクタやカメラを利用して動作計測や情報提示を行うシステム²⁾⁻⁴⁾の場合、それらを天井や机の下など利用者の行動範囲が見渡せる場所に設置する必要があるため、一般に広い範囲を移動する物体の計測は難しい。また、使用できる場所に制約が生じるほか、装置の頻繁な移動が困難である。一方測域センサにより動作計測を行う例^{9),10)}では、地面に対する装置の角度を正確に調整したり、死角が生じないように設置の仕方を工夫したりする必要があるなど、装置の設置が難しく、誰でも扱えるシステムを実現することは容易でない。前述のタイルデバイス⁶⁾などでも、あらかじめ定めたインターフェースの形状に制約され、計測範囲の大きさや形状を自由に変更したり、地面や壁そのものの特性を活かしたりすることが難しい。

そこで本稿では、環境や使用者へ大きな負荷を与えず、実世界において簡便に幾何学図形を描画し、かつ描かれた図形によって作られた空間の計測を可能にする、新しいモジュール型デバイスを提案する。これは、図 1 に示すようにレーザー光を出力する小型モジュールを空間内に自由に配置することで図形を描画するとともに、これらのモジュール群が形成する閉空間で物体検知を実現するものである。これにより床面を可能な限り阻害せず、空間内での物体検知が可能になるだけでなく、LED やスピーカによる視聴覚刺激を通じて人の移動・跳躍などといった運動計測、および次の動作位置の指示や認識結果の提示を実現する。これにより子どもたちが広場に線を引いて、遊びの空間を作るような新たな実世界インタラクションを実現することを目指す。

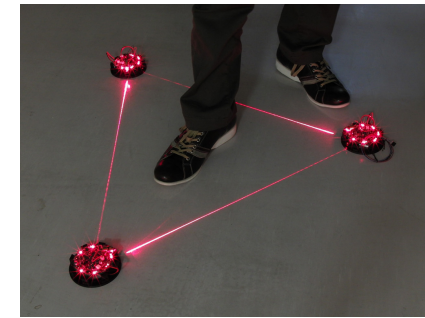


図 2 図形描画と空間計測の例
Fig. 2 An example of a generated geometrical shape and a dynamically created registration area.

2. 提案手法

ここでは、提案モジュールにより図形描画と空間計測を実現する手法を説明する。各モジュールは手の平程度の大きさで、一方向にレーザー光を照射する機能を持つ。このモジュールを複数用意し、使用者は空間内に描きたい図形の頂点にモジュールを置き、レーザー光により各辺を構成することで自由に閉空間を描くことができる。モジュールが閉空間を形成すると、その空間内において物体の検出を開始する。モジュール群による頂点とレーザー光による辺で形成された空間は、光を用いて計測可能領域を視覚的に示しており、この形成された閉空間を“エアタイル”と呼ぶ。図形描画と空間計測の例を、図 2 に示す。なお、ここで形成できる閉空間はすべての頂点を 1 度ずつ通る閉路、つまりハミルトン閉路を仮定した図形である。生成したエアタイルによって、領域への人の出入りが検知できたり、複数のエアタイルで交信することで人の移動を計測したりすることが可能である。

3. システム概要

モジュールの外観を図 3 に、システム構成を図 4 に示す。各モジュールは、マイクロコントローラ、レーザー発光器、赤外線発光部・受光部、測距センサ、バッテリーを備えており、すべて同じ仕様のモジュールを複数利用することでエアタイルを実現する。なお、マイクロコントローラは、主に以下の 4 つの処理を行う。1) 赤外線通信により他のモジュールを検出、2) メッシュネットワークを構成してモジュール間通信、3) 測距センサによりモジュール周囲の物体検出、4) レーザ・LED 発光・音響出力により、モジュールの状態を示す情報

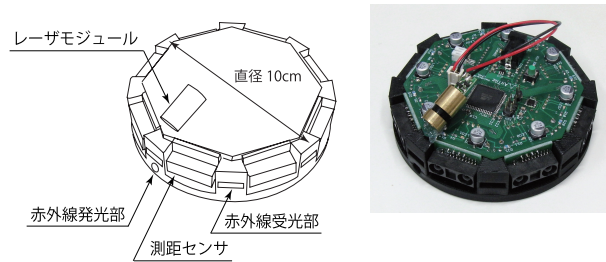


図 3 モジュールの外観 (模式図と試作モジュール)

Fig. 3 Overview of the prototype module (The diagram and the developed module).

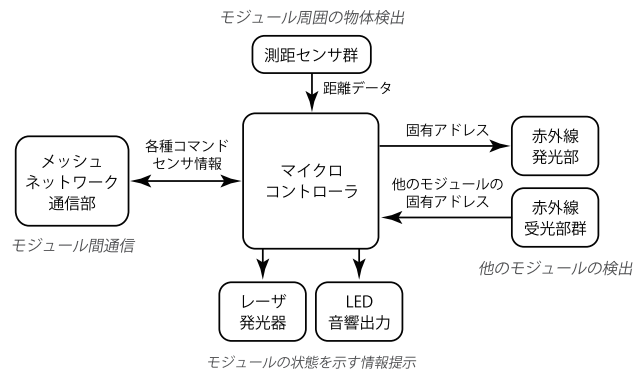


図 4 システム構成

Fig. 4 System structure.

提示: このような同様のモジュールを複数用いることで、拡張性を確保し、単一もしくは複数のエアタイルを構成する。

3.1 エアタイル生成アルゴリズム

ここでは、閉空間 (エアタイル) を生成する過程について述べる。各モジュールは、他のモジュールから発せられた赤外光を検出すると、次のモジュールへ自身の情報を伝えるためレーザー光と赤外光を発する。また、各モジュールは上部に備えたスイッチ操作により、他のモジュールからの赤外光の受光にかかわらずレーザー/赤外光を発信できる。最初に置いたモジュールは、他のモジュールから信号を受け取らないためにこのようなスイッチ操作による発光機能が必要である。

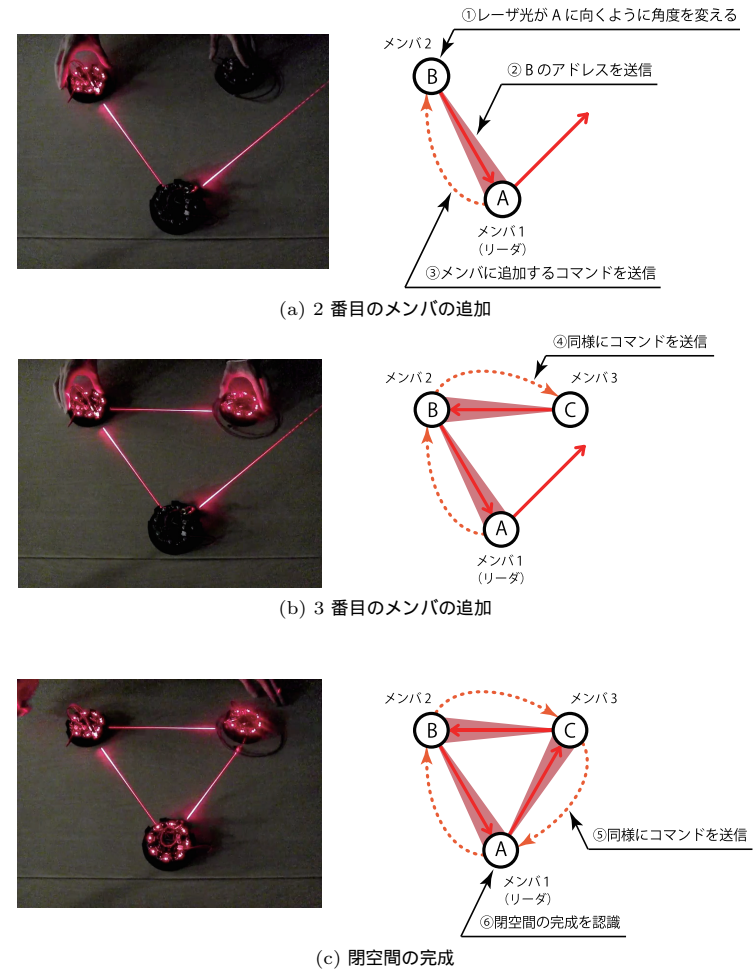


図 5 エアタイルの生成

Fig. 5 Operation for creating an AirTile.

まず使用者は、空間に 2 つのモジュールを置き、いずれかのモジュールをスイッチ操作することで、レーザー光を発光させる。そしてレーザー光の方向を確認しながら、別のモジュールにレーザー光が入射するように向きを変える (図 5 (a))。レーザー光を受ける側のモジュールを

A, スイッチ操作したモジュールを B とする。なお, モジュールはレーザー光と同一線上にある赤外線発信器により, モジュールの固有アドレスを送信する。これにより, A は B の固有アドレスを受け取ることになる。また, A はメッシュ通信により, B に対しエアタイルのメンバに追加するコマンド, および当該エアタイルにおいて何番目のメンバであるかという情報を送信する。この例では, A は 1 番目, B は 2 番目のメンバとして割り当てられる。ここで, 1 番目のメンバは, エアタイル内でリーダーとして設定される。また, メンバの追加時には, エアタイル内のリーダーのアドレスを送信すると同時に, メンバ追加を各モジュールの LED を利用して, メンバ追加時の点灯パターンを提示することで使用者に状態を伝える仕組みとする。

使用者は, LED 発光により B がエアタイルのメンバに追加されたことを視認した後, 別のモジュール C を適当に配置する。そこで, スイッチを押すことで出力されたレーザー光を B へ向けることで, 同様に C がエアタイルの 3 番目のメンバに追加できる (図 5 (b))。

さらに, 最初に置いた A のレーザー光を C に向けることで, 逐次的に情報が伝達され再び A に戻ってくる。これによりリーダーである A がエアタイルの完成を認識し, これを示す LED の点灯パターンに切り替えるように他のメンバモジュールに指令を伝達する (図 5 (c))。その結果, 使用者はエアタイルにより閉空間が形成されたことが分かる。

以上の手順によりエアタイルを生成する。ここでは, 直線の辺で形成されることを前提とし, 追加するメンバの数により, 様々な多角形を描くことが可能になる。なお, エアタイルの生成後も他のモジュールからの赤外線信号を監視し続けることによって, エアタイルはその形状を変更することができる。また, エアタイル生成後に他のモジュールに入射しているレーザー光の向きを外して一定時間おくと, エアタイルとしての動作を終了し, レーザ/赤外光の出力を止める。これにより, 使用者はモジュールを動かすことによって手軽に様々な形状のエアタイルを生成し直すことができる。

3.2 他のモジュールの検出とモジュール間通信

前節に述べたとおり, 他のモジュールの検出には, 赤外線通信を用いる。赤外光は外装を工夫することで指向性を高め, レーザと同じ方向に出力する。モジュールには全方向に対して等間隔に複数個の赤外線受光部を取り付け, 受光した受光部が向く方向によって, 自身のレーザー発光方向と他からのレーザー入射方向の相対角度を取得する (図 6)。

赤外線通信を利用してモジュールの固有アドレスを交信し, 相対角度の検知とともに, モジュールの特定を行う。また, 赤外線通信のほかに, 各種コマンドやセンサ情報などを交信するため, メッシュネットワーク通信である DigiMesh プロトコルを用いる。ユニキャスト

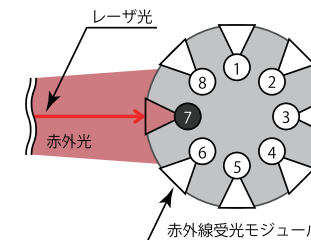


図 6 相対角度の検出方法

Fig. 6 The detection method of the relative angle.

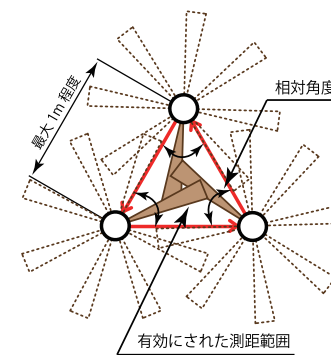


図 7 閉空間の計測方法

Fig. 7 The method of detecting objects within the enclosed region.

とブロードキャストの切替えを利用することで, モジュール間の通信や, モジュール群によって形成されるエアタイル同士の通信, および外部のホストコンピュータに対する通信を行う。

3.3 閉空間の計測

前述のとおり閉空間を形成すると, エアタイルは空間計測を行うことが可能になる。閉空間の計測には, 測距センサを用いる。各モジュールには複数個の測距センサを実装し, 図 7 に示すとおり全方向に等間隔で取り付けられる。エアタイルが生成されると, 各モジュールはモジュール同士がなす角に収まる方向の測距センサを有効にする。リーダーは各モジュールの測距センサからの値を利用することで閉空間の物体検知を実現する。

3.4 モジュールプロトタイプの開発

提案手法の有効性を検証するため, モジュールの試作を行った。モジュールは床面に置い

て使用することを想定し薄型に設計する必要がある．またアプリケーションによっては多数のモジュールが必要となるため，拡張性を考慮して設計した．測距センサには小型の PSD (Position Sensitive Detector) を用い，その測距範囲は 10 ~ 150 [cm] である．PSD と赤外線受光部の個数については，数を増やすことにより精度の高い計測が可能になる．実験に用いるプロトタイプでは，それぞれ 8 個とした．これにより赤外線による他モジュールの検出における相対角度の分解能は， $22.5 [^\circ]$ 程度となる．試作モジュールにより生成できるエアタイルは，1 辺の長さが 20 [cm] ~ 1 [m] 程度，内角は $22.5 [^\circ]$ 以上となる．各モジュールの外観は図 3 に示すとおり，直径約 10 [cm]，重さ約 130 [g] の円筒状である．制御にはマイクロコントローラ (Atmel 社製 AVR)，メッシュネットワーク通信には XBee (Digi International 社) を使用した．電源には 1,000 [mAh] のリチウムポリマ電池を用い，稼働時間は 7 時間程度である．また充電回路を内蔵することで，モジュール単位での充電を可能とした．レーザ発光器は赤色レーザを線上に照射するものを使用した．さらに，エアタイルの内部状態を伝えるための情報提示の機構として，8 個の赤色 LED とスピーカを内蔵した．

試作したモジュールで得られる描いた幾何学図形に関する情報は各辺同士の相対角度のみであり，図形の大きさを求めることはできない．そのため，単一の測距センサから得られる距離情報だけでは物体の出入りが図形内外のどちらで生じたかを判断することができず，それを判断するためには複数の測距センサの距離情報を利用する必要がある．また，描画図形の頂点数が増え，エアタイルに属する各モジュールで有効化する測距センサが増えるとともに，描画図形外の範囲を検出したり，ノイズによって誤検出をしたりする可能性が高まる．そのため，本試作では (頂点数 - 1) 以上の数の測距センサが同時に有意に変化した場合のみ，図形内で物体の出入りがあったと判断することとする．

実際に試作モジュールを利用してエアタイルを生成し，閉空間内の物体検知が可能であることを確認した．また，正三角形だけでなく，直角三角形，四角形，星形など自由に形状を変化させることが可能であることを図 8 に示す．

また，試作モジュールはステンレスやアクリル素材から構成された頑丈な外装によって保護する (図 9)．これにより，モジュールの取扱いを容易にし，使用者がモジュールを踏んでも壊れない構造としている．

4. 評価実験

4.1 実験方法

描画した図形と測定できる領域がどの程度一致しているかを明らかにするため，試作した

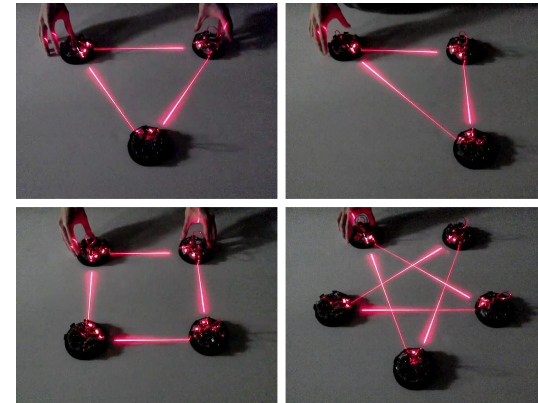


図 8 様々な形状のエアタイル
Fig.8 AirTiles with different shapes.



図 9 試作モジュールの外装
Fig.9 The exterior for the prototype module.

モジュールを使って評価実験を行う．計測実験は三角形と四角形のエアタイルについて検証する．各図形は外接円が直径 50 [cm] と 1 [m] になる辺の長さとし，検出させる物体は直径 66 [mm]，高さ 137 [mm] の円柱形の発泡素材を用いる．実験は外接円内を検出させる物体の直径と同じ間隔の格子で区切り，各格子領域に 5 回ずつ物体を置いた場合に何回物体を検出したかを記録することで行う．

検出させる物体には，様々な大きさの物体を検知させた場合の結果を予測しやすいように，その最小単位に近い大きさの物体を採用する．エアタイルはたとえば人の足の出入り

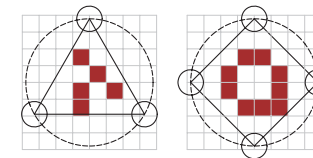
を検出する使い方を想定しているが、人の足の大きさは個人差が大きい。小学校入学時に相当する6歳男児の足の長さの平均は182.5 [mm]¹¹⁾であり、一方青年男性の足の長さの平均は253.2 [mm]¹²⁾である。この場合では、男児の足は使用した検出物体3個分の長さ、青年男性の足は4個分の長さと考えることによって、それらを検知した場合の結果の予測が可能になる。つまり、小さな検知物体で評価実験を行うことにより、実験で使用した物体よりも大きな物体を検知させた場合の結果の予測を容易にする。

4.2 実験結果と考察

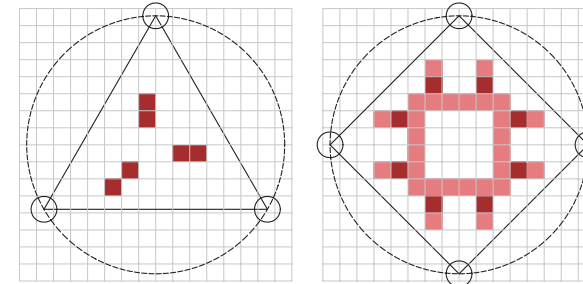
各図形を試作モジュールを用いて描画し実験を行った結果を図10に示す。図中、灰色の格子線で囲まれたものが測定を行った範囲、赤色で塗られた部分が5回中5回とも物体を検出した真の検出領域、桃色で塗られた部分が5回中1回もしくは2回物体を検出した準検出領域を表す。使用した検出物体よりも大きい物体を検出させた場合の結果を予測するには、ある場所に大きな物体を置いたとき、その物体が占める複数のマス目の中に、1つでも検出可能な領域があればその物体はその場所において検知可能であることを示す。各図形において検出範囲はおおむね描画図形内に収まっていることが分かる。一方、描画図形内でも検出できない部分が存在し、その割合は外接円の直径が大きくなると大きくなるが見取れる。

図11に検出アルゴリズムから定まる測定可能領域を示す。図中、各PSDの配置から推定される測定範囲を灰色で、検出アルゴリズムが物体の出入りがあったと判断可能な範囲を赤色で表す。実験結果の真の検出領域はこれを反映しており、準検出領域はその周りを囲むように分布していることから妥当な結果だといえる。外接円の直径が大きくなるにつれて検出できない領域の割合が大きくなる理由は、1つのPSDによって計測できる領域の幅が、外接円の大きさにかかわらず一定であるためである。

本評価実験によって、試作モジュールによる空間計測は、描画図形内での物体検出が可能であることが分かる。また、試作モジュールを人の足の検出に用いる場合、足の大きさを図10の格子線で縦3マス横1マス分と仮定すると、外接円直径が50 [cm]であれば描画図形内で確実な検出が得られることが分かる。一方外接円直径が1 [m]の場合は、足の大きさより大きな検出できない領域が多く存在するため、1人分の足の検出には向かず、たとえば複数人が同時に描画図形内に入ることを検出するような用途に適していることが分かる。試作モジュールにおける確実な検出に必要な物体の大きさは、長辺が外接円直径の半分程度であることが1つの目安となると考えられる。



(a) 外接円直径 50 [cm] の場合



(b) 外接円直径 1 [m] の場合



図10 評価実験結果

Fig. 10 Experimental results. The modules were placed on the 50 [cm] and 1 [m] diameter circle shown with the dotted line. Red color cells show the areas positively registered and pink color cells show the areas possibly registered by the modules.

4.3 モジュールの性能と課題

物体検知のためのPSDや他のモジュール検出のための赤外線受光器は、環境光による計測精度の大きな変動はなかった。これは、太陽光やランプなどの光源などの直接光からセンサを保護するための外装を設けていることや、赤外線センサが環境光に対してある程度耐性があるためだと考えられる。ただしPSDに関しては、稀に検出物体が黒色で赤外線の反射率が低い場合に、十分な反射が得られずに不安定な計測となる場合が見られた。

一方、描画図形を提示するために利用する赤色レーザー光は、一般的な屋内環境（オフィス

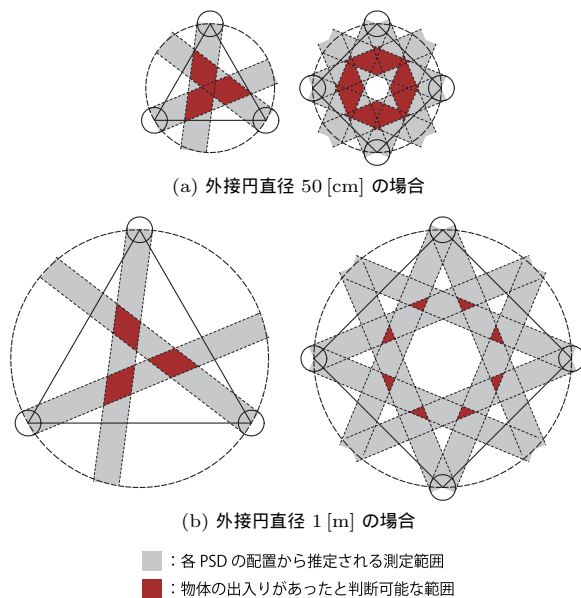


図 11 検出アルゴリズムから定まる測定可能領域

Fig. 11 The ideal detectable area according the detection algorithm. The gray shaded areas show the range of each sensor and the red color area shows the resulting ideal detectable area.

程度)の光源下では視認性が高くないため、少し暗い環境や間接照明下での使用が望ましい。より視感度の高い緑色レーザー光を用いることで視認性を向上させることが可能だが、安全性などの観点から赤色を利用している。

物体検出の性能を示すもう1つの指標として、検出のスキャンレートがあげられる。試作したモジュールの物体検出スキャンレートは、メッシュネットワーク通信の遅延に依存する。これは、エアタイル内への物体の出入りを判断するため、各モジュールによって得られた計測データを、メッシュネットワーク通信を利用してエアタイルを構成するメンバ内で共有し、つねに更新しているためである。遅延が生じない場合は、5 [Hz] 前後で物体検出が可能であるが、他の無線機器との干渉などで、稀に通信に数秒程度の大きな遅延が生じる場合がある。ネットワーク遅延のない状況では、単一のエアタイル内において1秒間に2, 3回程度の頻度の使用者のジャンプを計測したり、エアタイル内に転がってきたボールを検知したりすることが可能である。また、より遅延の少ない無線通信規格を利用することで、

地面に跳ねるボールなどといった動きの速い物体の検知が可能になると考えられる。

5. エアタイル群による応用実験

提案手法の応用として、複数生成したエアタイル間の協調動作や、ホストコンピュータとの通信を利用した運動計測システムを試作した。これにより、図形描画だけでなく、人に移動を促す情報提示を行ったり、人がエアタイル間を移動していることを検知したりすることが可能になることを示す。また、物体検知に応じて音響出力を行うアプリケーションについて述べる。

5.1 エアタイル群による協調動作

まず、複数のエアタイルにより動作の誘導を実現するシステムを試作した。これは、複数の提案モジュールによって構成されるエアタイル群のみで動作し、ホストコンピュータなどを必要としない。このようなモジュールのみによる動作は、誰でも簡単に扱えるシステムを実現するうえで重要である。ここでは、これを利用した簡単なインタラクティブシステムを製作することで、複数のエアタイルによる協調動作を実現する仕組みについて述べる。

5.1.1 エアタイル群協調動作と動作の誘導

ここではエアタイルの協調動作を実現するアルゴリズムを説明する。前章で述べたように、エアタイルが生成されるとその中のモジュールの1つがリーダーに設定される。リーダーは、情報を共有するために他のエアタイルのリーダーのアドレスを知る必要がある。このため、エアタイルが生成された時刻を利用して、自身の直前に生成されたエアタイルのリーダーのアドレスと、次に生成されたエアタイルのリーダーのアドレスを保持させ、逐次的に情報を他のリーダーへ伝達することによって、生成されたすべてのエアタイルと情報を共有できる仕組みとする(図12)。

エアタイルが生成されると、リーダーは他のエアタイルのリーダーに向けて、自分のアドレスを登録するように要求するメッセージを送信する。その要求を受け取ったリーダーの中で、最後に生成されたエアタイルのリーダーは、要求を受理するメッセージを返信すると同時に、要求元のリーダーのアドレスを自身の次に生成されたエアタイルのリーダーとして保持する。返信を受けたリーダーは、受理したリーダーのアドレスを自身の直前に生成されたエアタイルのリーダーとして保持する。最初に生成されたエアタイルの場合は、要求に対する返信が送られてこないため、一定時間返信がない場合は自身が最初に生成されたエアタイルであると認識させ、他のエアタイルのリーダーからの要求を待つ状態に移る仕組みとする。

以上の協調動作アルゴリズムを用いて、簡単なインタラクティブシステムを実装した。こ

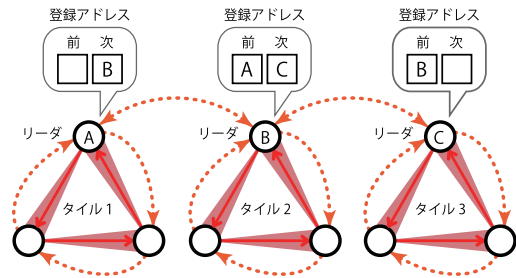


図 12 エアタイル群協調動作を実現するデータ構造
Fig. 12 The data structure of cooperatively operating AirTiles.

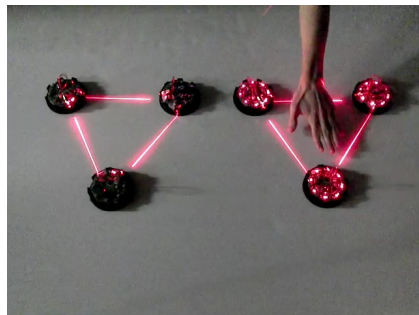


図 13 動作を誘導するインタラクティブシステムを使用中の風景
Fig. 13 An interactive system created with the AirTiles.

ここでは、エアタイルを順番に複数生成すると、最初に生成したエアタイルの LED が点滅し、他のエアタイルの LED は消灯する。LED の点滅は、使用者をエアタイル内へ誘導しており、待機状態であることを表す。点滅しているエアタイル内に物体を入れると、LED の点灯パターンを変化させるとともに、ピープ音により物体を検知したことを使用者に伝える。同時に、登録されている前後いずれかのリーダーへ LED を点滅状態にする指令を送り、別のエアタイルを待機状態に移す。使用者は、LED が点滅しているエアタイルが次々に切り替わるのに合わせて、エアタイルに手や足などを入れて遊ぶといったインタラクションが実現できる。インタラクティブシステムを使用中の様子を、図 13 に示す。

5.2 エアタイル群による動作計測（反復横跳び測定実験）

次に、複数のエアタイルとホストコンピュータを利用して、使用者の一連の動作の時系列

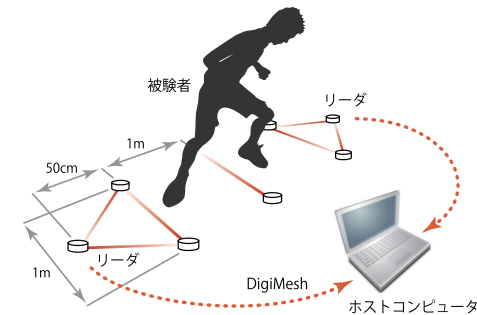


図 14 反復横跳びの測定を行うシステムの構成図
Fig. 14 Diagram for the registration of side steps.

を計測するシステムを試作した。提案モジュールは、外部のホストコンピュータなどと無線接続することで、データ収集や解析を行うことができる。これにより、あらかじめ生成するエアタイルに特定の目的を持たせ、物体を検出した時刻から人の運動に関する情報を容易に取得することができる。本節では提案モジュールをホストコンピュータに接続し、反復横跳びの測定に適用することで、提案モジュールの動作計測への応用方法を示す。

反復横跳びの測定を行うシステムの構成図を図 14 に示す。6 個の提案モジュールにより、三角形のエアタイルを 2 つ生成する。また 1 個の提案モジュールを使用して中央線を描く。ここでの提案モジュール同士の距離は図 14 に示すとおりである。ホストコンピュータを 1 台用意し、DigiMesh プロトコルによりエアタイルと通信を行う。エアタイルのリーダーはモジュールを識別するためにあらかじめ割り振られた記号とともに、物体の出入りを示すメッセージをホストコンピュータに送信する。ホストコンピュータは受信したメッセージをホストコンピュータの内部時計が示す時刻とともに記録する。被験者は健康な 20 代男性 1 名とし、記録中の被験者の様子はビデオカメラで撮影する。

記録したデータは測定終了後に解析処理を行い、エアタイル間を移動するのに要した時間を求める。なお、各エアタイルが人の進入を検出できなかった場合は、その前後の記録から求まる移動時間を平均することで補完する。測定中の様子を図 15 に示す。

実験により得られた検出時刻に基づき、エアタイル間を移動するのに要した時間を求めた。経過時間に対する移動時間の推移を図 16 に示す。反復横跳びの測定は適切に行われており、エアタイルによって人の動作計測が可能であることが分かるとともに、経過時間が長くなるにつれて、疲労により移動時間が長くなっていく様子が見て取れる。さらに、生成し

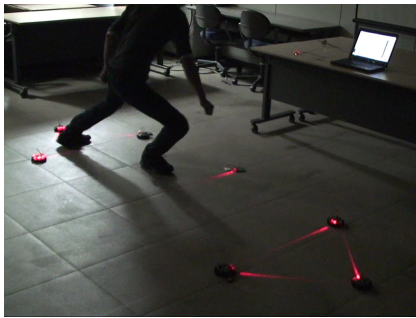


図 15 反復横跳びの測定中の風景

Fig. 15 The registration of side steps by AirTiles.

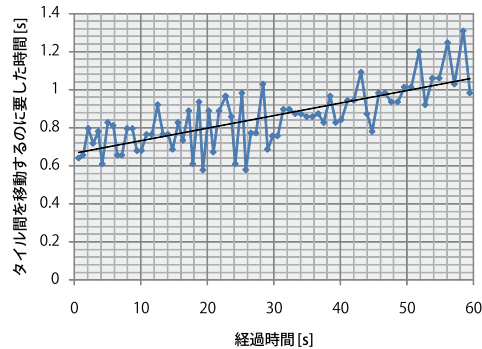


図 16 反復横跳び中の移動時間の推移

Fig. 16 The time registration of the side steps.

たエアタイル間の距離を利用すれば単位時間あたりの運動量も推定することが可能である。

5.3 エアタイルによる物体検知と音響出力

試作モジュールはスピーカを内蔵しており、ピープ音を発生することができる。さらに、メッシュネットワークを介してホストコンピュータと通信を行うことで、ピープ音より多彩な表現が可能な PCM 音声をホストコンピュータから再生することが可能である。ここでは、物体の進入を検知した場合と、退出を検知した場合に別々の音を発するシステムを試作し、その有効性を確認した。

6. まとめと今後の予定

本稿では、実世界への図形描画と空間計測を小型のモジュール群を用いて手軽に実現するエアタイルという手法を提案した。実際にモジュールを試作することで実現可能性を示し、評価実験によって空間計測が可能であることを明らかにした。また、複数のエアタイルの協調動作や動作計測への応用により、提案手法の有効性を示した。これにより、実世界において手軽に空間計測が可能になるため、既存の計測機器や、地面や壁面の模様・表示およびゲームデバイスなどと組み合わせることも可能である。

現在、運動意欲を向上させるゲームの製作を検討中である。たとえば、使用者の速く移動するという運動意欲を高めるために、提案モジュールのスピーカや LED を用いた音や光による情報提示が有効であると考えている。ここでは、使用者に 2 つのエアタイル間をできるだけ速く交互に移動してもらい、前回移動に要した時間と今回移動に要した時間を比較し、前回より速ければ心地よいメロディを、前回より遅ければ不快なメロディをスピーカによって発する。また LED により、前回エアタイルが足の進入を検知してから経過した時間を提示する。この LED の光による情報提示により、使用者により速く次のエアタイルに移動するような働きかけが可能となる。

今後は、モジュール間の距離を測定する機構を加えることで、大きさを含めた描画図形の形状を把握できるようにするなど、より自由な形状における空間計測が可能となる手法を考えたい。さらに、実世界への図形描画と空間計測にともなうゲーム性やエンタテインメント性を確保しながら、エアタイルの運動療法への応用を目指したい。また、エアタイルの内部状態を適切にユーザに伝えたり、使う楽しみを増やしたりするために、情報提示の方法を検討している。具体的には、現在単色の LED をフルカラー化すること、および PCM 音源の利用が可能である。これにより、人間の動作に応じた変化を実時間でかつ多彩な手段により提示することが可能になり、運動の意欲向上につながると思われる。

また、測量時の指標提示、カメラキャリブレーション、イベントでの区画表示などの実世界における簡便な情報提示装置としての応用も考えられる。さらに、イルミネーションやゲームなど、新たな芸術表現の創出もあわせて検討していきたい。

参考文献

- 1) 田村秀行, 大田友一: 複合現実感, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.266-272 (1998).

- 2) Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Pangaro, G.: Sensetable: A wireless object tracking platform for tangible user interfaces, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.253-260 (2001).
- 3) 筧 康明, 飯田 誠, 苗村 健: インタラクティブな多人数用方向依存ディスプレイテーブル Lumisight Table の提案, FIT2003 情報科学技術フォーラム情報技術レターズ, Vol.2, LK-012, pp.293-294 (2003).
- 4) 福地健太郎, 佐藤俊樹, 間宮暖子, 小池英樹: 指をつまむジェスチャを認識するテーブルトップエンタテインメントシステム向け入力手法とその応用, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.2 (2010).
- 5) Yavuzer, G., Senel, A., Atay, M.B. and Stam, H.J.: "Playstation eyetoy games" improve upper extremity-related motor functioning in subacute stroke: a randomized controlled clinical trial, *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.*, Vol.44, No.3, pp.237-244 (2008).
- 6) Lund, H.H., Pedersen, M.D. and Beck, R.: Modular robotic tiles: Experiments for children with autism, *Artificial Life and Robotics*, pp.394-400 (2009).
- 7) Suzuki, K.: Embodied Sound Media Technology for the Enhancement of the Sound Presence, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.5611, pp.745-751, Springer (2009).
- 8) Suzuki, K., Kyoya, M., Kamatani, T. and Uchiyama, T.: beacon: Embodied Sound Media Environment for Socio-Musical Interaction, *Proc. 8th Intl. Conf. on New Interfaces for Musical Expression* (2008).
- 9) 鈴木茂徳, 高橋 伸, 田中二郎: 測域センサによる足の位置と動作の認識手法, 情報処理学会第 72 回大会 (2010).
- 10) 帷子京市郎, 鈴木智之, 中村克行, 趙 卉菁, 柴崎亮介, 仲川ゆり: レーザスキャナを用いた群集の追跡および流動の可視化 (テーマ関連セッション 3), 情報処理学会研究報告 CVIM [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol.2007, No.31, pp.229-236 (2007).
- 11) (社) 日本機械工業連合会, (社) 人間生活工学研究センター: 子どもの身体寸法データベース 2008 年度 (2009).
- 12) 河内まき子, 持丸正明, 岩澤 洋, 三谷誠二: 日本人人体寸法データベース 1997-98, 通商産業省工業技術院くらしと JIS センター (2000).

(平成 22 年 6 月 23 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



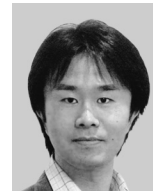
飯田 一樹

平成 20 年豊田工業高等専門学校電気・電子システム工学科卒業。平成 22 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程在籍。デンマーク工科大学プレイウェア・センターにおいて、モジュール型デバイスによる遊びを通じたエクササイズの研究に参加。次世代ヒューマンインタフェースの研究に従事。



池内 隼生

平成 21 年筑波大学芸術専門学群デザイン専攻卒業。同大学大学院人間総合科学研究科感性認知脳科学専攻博士前期課程在籍。「風船を利用した楽器」や「インターネットに繋がった万華鏡」の制作にてコンペティション入賞。インタラクティブデザイン, メディアアート, フィジカルコンピューティングを専門とする。



内山 俊朗

平成 13 年筑波大学芸術研究科デザイン専攻修了。同年筑波大学感性評価構造モデル構築特別プロジェクト助手。平成 14 年富士通株式会社総合デザインセンター。平成 18 年より筑波大学大学院人間総合科学研究科感性認知脳科学専攻講師。現在に至る。



鈴木 健嗣 (正会員)

平成 9 年早稲田大学理工学部物理学科卒業。平成 10 年伊・ジェノヴァ大学工学部客員研究員, 平成 12 年日本学術振興会特別研究員, 平成 15 年同大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士課程修了。博士(工学)。同大学理工学部助手を経て, 平成 17 年より筑波大学講師, 現在に至る。平成 21 年仏・カレッジ・ド・フランス/CNRS 客員研究員。IEEE, ACM, 日本ロボット学会, 人工知能学会等各会員。