

# 複数導電部を持つ物理オブジェクトと マルチタッチスクリーンを組み合わせた eラーニング向けユーザインタフェース

青木 良輔<sup>1,2,a)</sup> 宮下 広夢<sup>1</sup> 榎 優一<sup>1</sup> 千明 裕<sup>1</sup>  
井原 雅行<sup>1</sup> 小林 透<sup>1</sup> 小林 稔<sup>1</sup> 鏡 慎吾<sup>2</sup>

受付日 2012年3月19日, 採録日 2012年10月10日

**概要:** 近年, 教育分野にタブレット端末のようなネット接続可能な端末が普及しつつある. しかし, 道具を操作あるいは製作する過程で培われる能力をこれらの端末で使われるタッチ操作で向上させるのは容易ではない. 一方でユーザが触れて動かすことが可能なデジタル機器を用いた遊具があるが, 遊具自体が高価で, 遊具の製作も困難である. これらの問題を解決するために, 本論文では一般的な静電容量方式のマルチタッチスクリーンを持つネット接続可能な端末と複数導電部を持つ物理オブジェクトを用いたeラーニング向けのユーザインタフェースを提案する. 物理オブジェクトの導電部を解析することで, 物理オブジェクトの識別および向きや位置の検出が可能のため, ユーザは物理オブジェクトをスクリーン上で操作することでアプリケーション内のコンテンツを操作できる. 導電部が小さいため, 様々な形状やサイズの物理オブジェクトを利用できる. 加えて, この物理オブジェクトは身の回りの材料で容易に製作が可能である. 本論文では, 提案インタフェースをユーザに提供するための設計指針を明確にする基礎実験を行い, 考察をした. 考察の結果, 物理オブジェクトに配置される導電部に関して, 導電部に使用される材料や導電部のサイズ, 導電部間の距離が導電部の位置検出精度に影響を与えるということが確認され, また, 本提案インタフェースのプロトタイプの利用者の反応から知育玩具向けインタフェースの可能性を示した.

**キーワード:** 複数導電部を持つ物理オブジェクト, マルチタッチスクリーン, eラーニング

## User Interface for E-learning Using Physical Objects on a Mobile Tablet with a Multi-touch Screen

RYOSUKE AOKI<sup>1,2,a)</sup> HIROMU MIYASHITA<sup>1</sup> YUICHI MAKI<sup>1</sup>  
HIROSHI CHIGIRA<sup>1</sup> MASAYUKI IHARA<sup>1</sup> TORU KOBAYASHI<sup>1</sup>  
MINORU KOBAYASHI<sup>1</sup> SHINGO KAGAMI<sup>2</sup>

Received: March 19, 2012, Accepted: October 10, 2012

**Abstract:** Information devices such as Interactive whiteboards, smart-phones and mobile tablets are being rapidly adopted in the field of education. It can be expected that these devices will be used for e-learning since applications can be easily downloaded from the Internet. To enhance the efficiency of e-learning, we propose a user interface for that can control digital information on a multi-touch screen via physical objects that have no electronic components. The physical objects are easy-to-make and are suitable for tablets. Additionally, users can operate digital information by manipulating various physical objects on the screen. As a design example of this user interface, we introduce a system that uses physical object with conductive points and a capacitive multi-touch screen. Since the accuracy of detecting the position of each conductive point determines the usability of the interface, we evaluate accuracy with which the positions of the conductive points can be determined.

**Keywords:** physical objects with conductive points, multi-touch screen, e-learning

## 1. はじめに

近年、電子黒板やスマートフォン、モバイルタブレット端末が教育分野に普及しつつある。これらの端末は、インターネットから教育向けアプリケーションを容易にダウンロードでき、簡易なタッチ操作によって情報収集能力を向上させる。しかし、道具を操作すること、あるいは道具を製作することによって育まれる手の器用さや思考力をタッチ操作で向上させるのには適していない。一方で、ユーザが実際に触れて動かすことが可能なデジタル機器を用いた遊具（以後、デジタル遊具と呼ぶ）が提案されている。しかし、遊具自体が高価であり、遊具の製作も容易ではなく、デジタル遊具の操作に対応するアプリケーションは1対1に制限される。また、知育教育に利用されるユーザインタフェースとして、利用者やアプリケーションに応じて物理オブジェクトの形状やサイズを利用者が適宜カスタマイズして製作し、利用できることが望まれる。

上記の課題を解決するために、eラーニングのように様々なアプリケーションをダウンロードでき、各アプリケーションに応じた様々な形状やサイズの物理オブジェクトを安い材料で容易に製作でき、製作された物理オブジェクトを用いてアプリケーションのコンテンツを操作できることが必要である。

そこで、本論文では、eラーニング向けの一般的な静電容量方式のマルチタッチスクリーンを持つネット接続可能な端末と複数導電部を持つ物理オブジェクトを組み合わせたユーザインタフェースを提案する [1]。スクリーンが物理オブジェクトに取り付けられた各導電部の位置座標を取得し、その情報を解析することで、スクリーン上に置かれた物理オブジェクトの識別および物理オブジェクトの向きと位置の検出が可能となる。これにより、ユーザはスクリーンに置く物理オブジェクトを変更することで操作内容を変更でき、物理オブジェクトを移動もしくは回転させることでアプリケーションのコンテンツを操作できる。導電部のサイズは小さいため、様々な形状やサイズを持つ物理オブジェクトを利用できる。また、日常生活で安く簡単に手に入る材料で物理オブジェクトを製作できる。具体的にはアルミホイルや銅ホイル、導電インクのような導電材料を、木材やプラスチック、紙のような非導電材料に切り貼りするだけで容易に製作できる。マルチタッチスクリーン上に置かれる物理オブジェクトに取り付けられた導電部の検出精度はこの提案インタフェースの使いやすさに影響するため、導電部の材料、サイズ、および導電部間の距離に応じ

た検出精度を評価した。さらに、評価した検出精度をふまえたうえで、識別可能な物理オブジェクトの数および物理オブジェクトの向きと位置の検出精度に関して考察した。

このような提案インタフェースを利用者に提供することで、特殊な道具を用いることなく、身の回りにある材料と材料を切り貼りする身の回りの道具を用いて物理オブジェクトを製作し、実在するものと同じ操作感で道具の使い方を疑似体験できるので、日常生活の中で、容易に手の器用さを養うことが期待される。同じ物理オブジェクトでもアプリケーションを変更するだけで、多様な体験ができるので、道具の特徴を考える力の育成が期待される。

知育教育分野に本提案インタフェースを普及していくうえで、導入のしやすさや持ち運びのしやすさは重要な要件となる。本提案インタフェースであれば、物理オブジェクト製作の容易さとアプリケーションのダウンロードの容易さにより導入しやすい。そして、外部機器に頼らず少ない道具で構成されるので、持ち運びしやすい。ゆえに、知育教育向けの提案インタフェースとして適している。

本論文では、提案インタフェースをユーザに提供するための設計指針を明確にすることに焦点をあてており、実際の現場に応用したときの効果に関しては今後の課題とする。

以下、2章で関連研究を通して、対象とする問題を明確にし、3章でこの問題を解決する提案インタフェースについて述べ、4章で提案インタフェースを用いたアプリケーション例を示す。5章で提案インタフェースの位置検出精度に関する評価を行う。6章で提案インタフェースの可能性を述べ、7章でまとめる。

## 2. 関連研究

### 2.1 eラーニング

eラーニングは教育分野にPCを通して一般的に利用されている [2]。最近では、PCの代わりにスマートフォンやタブレット端末のようなインターネットに接続可能な端末を対象としたmラーニングが普及しつつあり、mラーニングに関する研究がさかんである [3], [4]。しかしながら、操作方法としてタッチ操作を利用することを前提としており、eラーニングのシステムをモバイル環境への適用方法に関する研究がほとんどである。

### 2.2 デジタル遊具

知育教育向けの遊具としてデジタル遊具がある [5], [6], [7], [8]。これらはマイコンやバッテリーなどの電子部品が組み込まれた物理オブジェクトで構成されているという特徴がある。これにより、ユーザのデジタル遊具へのアクションに対して物理オブジェクト側からのビジュアルフィードバックがあることによって従来のアナログ遊具より付加価値を与えている。たとえば、LED、電子回路、マイクロコンピュータおよびバッテリーが組み込まれた各物理オブジェ

<sup>1</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所  
NTT Service Evolution Laboratories, NTT Corporation,  
Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

<sup>2</sup> 東北大学  
Tohoku University

a) aoki.ryosuke@lab.ntt.co.jp

クトをつなげることで1つの電子回路システムを構築するデジタル遊具がある [5], [6], [7]. また, 立方体の各面にスクリーンが取り付けられた物理オブジェクトがあり, ユーザの操作に応じてスクリーンのコンテンツが変化するデジタル遊具が存在する [8]. しかしながら, これらのデジタル遊具を用いたアプリケーションはデジタル遊具に応じて単一のアプリケーションにしか対応せず, 道具自体も高価であり, 故障した場合の復元も容易ではない.

### 2.3 タンジブルユーザインタフェース (TUI)

物理オブジェクトを用いてスクリーンに表示されたコンテンツを操作するタンジブルユーザインタフェース (TUI) [9] の研究はさかんに行われている.

スクリーン上の物理オブジェクトの識別および動きを識別するために, カメラや赤外線センサとマーカ付きの物理オブジェクトを用いた TUI がある [10], [11], [12], [13], [14], [15]. しかしながら, 外部のセンサへの電源供給にともなうケーブルや外部センサを固定するための空間や治具が必要となる. これにより, 博物館や科学館のように, 装置を随時設定しておくことが可能な場所では利用できるが, m ラーニングのように道具を持ち運び, 移動先で利用するような状況においてこのインタフェースはふさわしくない.

外部センサを用いずに直接物理オブジェクトとスクリーンがインタラクションするインタフェースも存在する [16], [17], [18]. たとえば, 物理オブジェクトに内蔵された無線通信機器を用いてスクリーンと通信する手段がある. また, タッチスクリーンと直接インタラクションできる. しかしながら, このような通信手段は物理オブジェクトおよびスクリーンのバッテリー消費を多くする. 加えて, 電子部品を用いた物理オブジェクトでは, 電子機器のサイズ分, 物理オブジェクトの形状に影響を与える.

文献 [19] では専用のタッチスクリーンを操作するキャパシタンスタグと呼ばれる導電部を持つ物理オブジェクトを紹介している. また, iPad や Andoroid 端末の普及と, これらの端末向けアプリケーションの開発環境が整ったため, 自作でアプリケーションを作成する人が増えている [20], [21], [22]. その中で, 電子回路を含まない複数導電部を持つ物理オブジェクトを用いて操作するアプリケーションを作成している例がある. たとえば, 文献 [20] では, 導電部の数が異なる物理オブジェクトを用いることで, 異なる植物の絵を貼り付けるアプリケーションを提案している. 文献 [21] では, 2つの物理オブジェクトを用いてアイスホッケーを行うアプリケーションを作成している. 文献 [22] では, つまみの形状をした物理オブジェクトで音量調整をするアプリケーションを作成している. しかし, これらのアプリケーションはエンタテインメント向けなものである. そのため, 知育教育向けに適用する際の課題などの議論は十分ではない.

## 3. 複数導電部を持つ物理オブジェクトを組み合わせたユーザインタフェース

### 3.1 提案インタフェース

2章で述べた e ラーニングとデジタル遊具, TUI の利点をあわせ持つ知育教育向けの e ラーニング向けのユーザインタフェースを実現するために必要な要件は以下のとおりである.

1. 様々な物理オブジェクトを識別し, デジタル情報操作が可能
2. 様々な形状やサイズの物理オブジェクトを利用可能
3. 容易に物理オブジェクト製作が可能
4. 提案インタフェースの設定や準備が容易に実現可能
5. 容易に持ち運びが可能

これらの要件を満たすために, 本論文では, 一般的な静電容量方式のマルチタッチスクリーンを持つネット接続端末と複数導電部を持つ物理オブジェクトを組み合わせたユーザインタフェースを提案する (図 1).

図 2 のような物理オブジェクトに取り付けられた各導電部の位置座標を取得し, 解析することで, マルチタッチスクリーン上に置かれた物理オブジェクトの識別および物理オブジェクトの向きと位置の検出が可能となる. 物理オ



図 1 提案インタフェース  
Fig. 1 The proposed e-learning tool.

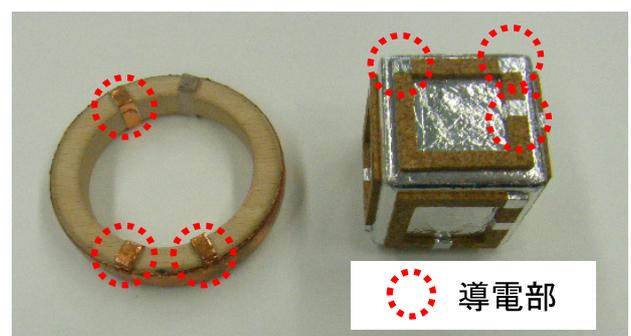


図 2 導電部  
Fig. 2 Conductive points.

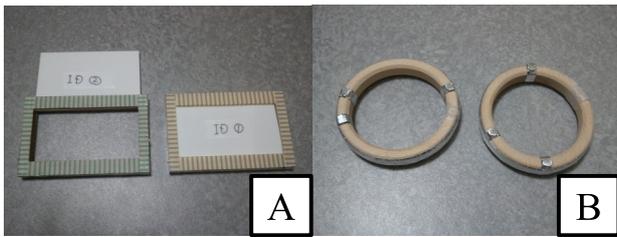


図 3 物理オブジェクト (A: 枠型, B: リング型)

Fig. 3 Two kinds of frame objects.

オブジェクトの向きや位置が検出できると、物理オブジェクトを並進および回転させることでスクリーン上のデジタル情報を操作できる (要件 1)。また、物理オブジェクトの識別ができると、スクリーンに置く物理オブジェクトを変更することで操作内容を変更できる。導電部の位置座標を用いた解析方法により、操作性、識別可能な物理オブジェクトの数が異なる。本論文では、1つの物理オブジェクトに3点の導電部を取り付け、3点の導電部の配置を把握することによる物理オブジェクトの識別方法と、取得された位置座標と物理オブジェクトの導電部の対応付けを行うことによる物理オブジェクトの向きや位置の検出方法を提案する。詳細は 3.2 節~3.4 節で述べる。

物理オブジェクトに配置される導電部は、文献 [17], [18] で使われる物理オブジェクトの電子部品に比べて小さいので、物理オブジェクトの形状の自由度が大きくなる。たとえば、図 3 (A), (B) のような枠型物理オブジェクトが実現できる。また、他にも直線や曲線が含まれる動物の形状をした物理オブジェクトなども利用できる。このように導電部を用いることで、物理オブジェクトの形状やサイズが柔軟に設定できる (要件 2)。これにより、知育教育が対象とする幅広い年齢層において、各ユーザに適したサイズの物理オブジェクトを利用できる。加えて、アプリケーションの種類に応じて様々な形状やサイズの物理オブジェクトを利用できる。ゆえに、アプリケーションに多様性を持たせることができる。ただし、導電部がスクリーンに検出しにくいと操作性に影響を与える。そこで 5 章の評価実験で導電部のサイズによる影響を確認したところ、iPad 上で 3mm×3mm の銅フィルムを用いた導電部は検出できた。詳細は 5 章で述べる。

提案インタフェースで使われる物理オブジェクトは、導電材料と非導電材料によって構成される。導電材料として、アルミフィルム、銅フィルムや導電インクなどがあり、非導電材料として、木材、プラスチックや紙などがある。このように日常生活で容易に得ることができ、低コストの材料で製作できる。図 4 に提案インタフェースで利用可能な物理オブジェクトの製作例を示す。非導電材料を準備し (図 4 (A)), 非導電材料に導電材料を切り貼りし (図 4 (B)), 図 4 (C) のように物理オブジェクト製作する。物理オブジェクトをタッチスクリーンに置いて操作する (図 4

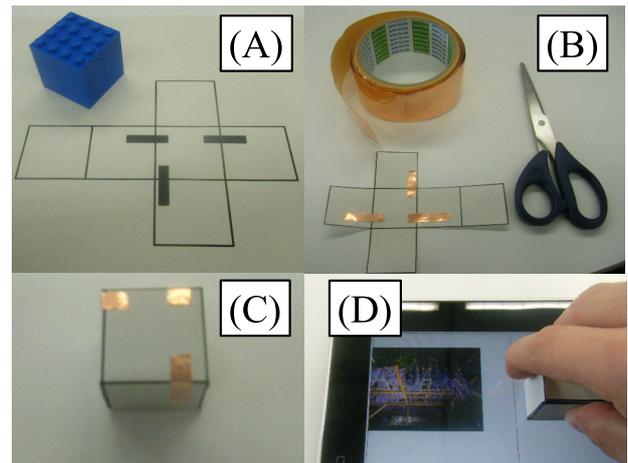


図 4 物理オブジェクトの製作の一例

Fig. 4 An example of making a physical object.

(D))。このように、電子回路の製作過程に比べて容易な製作過程で物理オブジェクトの製作が可能となる (要件 3)。これにより、雑誌の付録としてユーザに提供することも可能となる。ただし、提供する付録の物理オブジェクトの設計において、導電材料に対するタッチスクリーンの反応をよくするために、文献 [19] のようにユーザの手が導電材料に触れるように設計することが条件となる。

提案インタフェースを利用するためには、アプリケーションをダウンロードすることと、そのアプリケーションで使われる物理オブジェクトを製作する必要がある。インターネット接続可能な端末を用いるので、アプリケーションはインターネット上から容易にダウンロードできる。また、物理オブジェクトの準備も身の回りの材料を用いて容易に製作できる。このように、提案インタフェースを利用するのに必要な準備がしやすく、アプリケーションをすぐに利用できる (要件 4)。

提案インタフェースでは、カメラや赤外線センサのような外部機器を使わず、物理オブジェクトとタッチスクリーンを接続するケーブルも必要ない。物理オブジェクトに電子部品を含まないため、軽量である。ゆえに、ユーザは提案インタフェースを容易に持ち運びできる (要件 5)。

### 3.2 物理オブジェクトの識別方法

マルチタッチスクリーンは接している導電部を必ずしもすべて正確に検出できないという問題がある。この導電部の検出漏れの問題に対して、スクリーンに接地した物理オブジェクトが、操作中に別の物理オブジェクトとして識別されることを防ぐことが重要である。この対策として、アプリケーション [20] のように物理オブジェクトに配置された導電部の数で識別するのではなく、アプリケーション [21] のように物理オブジェクトに配置する導電部の数を固定し、その数の導電部が検出されたら物理オブジェクトの識別を行うようにする。アプリケーション [21] では、3

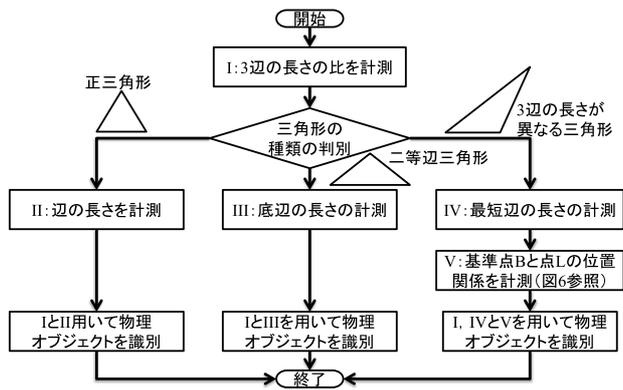


図 5 物理オブジェクトの識別のフローチャート

Fig. 5 A flowchart of a process to identify physical objects.

点の導電部が形成する二等辺三角形の高さを用いて物理オブジェクトを一意に識別する方法を利用している。しかしながら、二等辺三角形の高さのみでは、識別可能な物理オブジェクトの数に制限がある。

本論文では、3点の導電部の位置座標から計測できる特徴量(図5参照)を用いて物理オブジェクトを一意に識別する。導電部の数を3点に固定したのは、導電部の数が多くなると各導電部の位置座標の同時検出がしにくいからである。図5を用いて識別方法を具体的に述べる。3点の導電部が形成する三角形の3辺の長さの比を計測することで正三角形、二等辺三角形もしくは3辺の長さが異なる三角形に分類する。正三角形と判断した場合、3辺の長さの比と3辺の中の任意の1辺の長さを計測し、これらの値を用いて物理オブジェクトを一意に識別する。辺の長さは、相似の関係を持つ正三角形を区別するために使われる。次に二等辺三角形と判断した場合、3辺の長さの比と底辺の長さを計測し、これらの値を用いて物理オブジェクトを一意に識別する。底辺の長さは、相似の関係を持つ二等辺三角形を区別するために使われる。最後に、各辺の長さが異なる三角形と判断した場合、3辺の長さの比と最短辺の長さだけでなく、最長辺と最短辺を接続する頂点(以後、基準点Bと呼ぶ)に対する最長辺のもう一方の頂点Lの相対的な位置関係を計測し、これらの値を用いて物理オブジェクトを一意に識別する(図6)。図6に示すように、各辺の長さが異なる三角形には対称となる図形があり、3辺の長さの比と最短辺の長さだけではこの対称図形を区別できないからである。以上述べてきたような手順で一意に物理オブジェクトを識別できる。また、図7に示すように3辺の長さの比の代わりに三角形の3つの角度を用いてもよい。

ただし、この識別方法では、頻繁に導電部の検出漏れが起きたときに提案インタフェースの操作性が低下するという問題を解決しているわけではない。5章でこの問題に対する対策を述べる。

導電部の配置例 3辺の長さの比 シンメトリパターン 3辺の長さの比

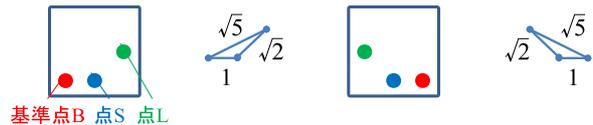


図 6 対称性を持つパターン例

Fig. 6 A symmetry pattern.

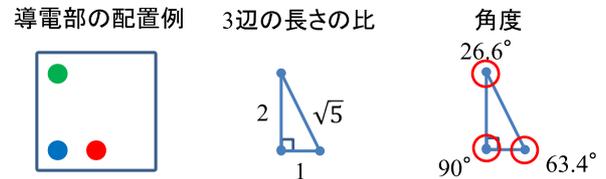


図 7 3辺の長さの比と角度の関係

Fig. 7 Three angles corresponding to proportion of three lengths.

### 3.3 物理オブジェクトの向きの識別方法

物理オブジェクトの向きは、物理オブジェクトに取り付けられた3つの導電部の中の2つの導電部で作られるベクトルの傾きで表される。3点の導電部の中で、傾きの計測に使われる2つの導電部は、導電部の配置に対応してアプリケーションに登録されている。マルチタッチスクリーンが取得する導電部の位置座標から物理オブジェクトの傾きを計測するためには、2つの処理が必要である。1つは取得した導電部の位置座標とスクリーン上の物理オブジェクトの導電部の対応を行い、登録されている2つの導電部の位置座標を得る。2つの導電部の位置座標からベクトルの傾きを計測する。具体的に説明する。3辺の長さが異なる三角形の場合、3.2節でも述べたが、最短辺と最長辺を接続する基準点B(図6)を導出し、最短辺のもう一方の頂点を点Sとし、最長辺のもう一方の頂点を点Lとする(図6)。アプリケーションに登録されている物理オブジェクトの向きを計測するのに使われる2つの導電部を基準点Bと点Lとすれば、ベクトルBLの傾きが物理オブジェクトの傾きとなる。一方、形成した三角形が二等辺三角形の場合、3辺の長さが異なる三角形の場合と異なり、底辺の頂点が一意に定まらない。そこで、垂直二等分線と底辺の交点を基準点Cとし、2つの最長辺を接続する点を点Pとすると、ベクトルCPの傾きが物理オブジェクトの向きとなる。最後に、形成した三角形が正三角形の場合、計測した位置座標と導電部を対応できないため、向きを計算できない。ゆえに、正三角形の配置は回転操作を行わない場合に利用する。

### 3.4 物理オブジェクトの位置の識別方法

物理オブジェクトの位置は、物理オブジェクトに取り付けられた3点の導電部の中の1つの導電部に対する相対的な位置に存在する点によって表される。位置計測に使われる3点の導電部の中の1つの導電部と、この導電部と物理

オブジェクトの位置を示す点との相対座標は、導電部の配置に対応してアプリケーションに登録されている。マルチタッチスクリーンが取得する導電部の位置座標から物理オブジェクトの位置を計測するためには、2つの処理が必要である。1つは、取得した導電部の位置座標とスクリーン上の物理オブジェクトの導電部の対応を行い、登録されている1つの導電部の位置座標を得る。この位置座標と上記で述べた物理オブジェクトの向きおよび登録されている相対座標を用いて、物理オブジェクトの位置を示す点の位置座標を計測する。3辺の異なる長さの三角形と二等辺三角形は位置座標と導電部の対応方法は3.3節で述べた方法と同様である。正三角形の場合は、スクリーンが取得した位置座標と対応する導電部を一意に対応付けできないので、3つの位置座標から計測可能な物理オブジェクトの重心の位置座標を用いることで物理オブジェクトの位置を計測できる。

#### 4. アプリケーション

提案インタフェースの特徴を活用した知育教育向けアプリケーションや物理オブジェクトの提供方法の具体例を紹介する。

1つ目はリング型物理オブジェクトを用いたアプリケーションである。枠型物理オブジェクトを使うことで、枠の内側からも画面を遮蔽なく閲覧できる。ゆえに、枠の内側からも画面上の情報を見ながら、この物理オブジェクトの回転操作および並進操作を容易に行える。また、回転操作を3次元空間の奥行き方向の操作に割り当て、その奥行き方向の操作結果を枠の内側に表示できる。これによって、たとえば奥行き方向の操作を枠の内側の画面の拡大・縮小操作に対応させると、双眼鏡や望遠鏡のように遠くのものを見るという現象をタブレット上で疑似体験できる(図8(A))。また、奥行き方向の操作をCTスキャンによって撮られた身体の断面の深さを調節する操作に対応させると、ユーザが着目した位置の身体の断面画像を滑らかに切り替えることができ、人体探検できる(図8(B))。このように、望遠鏡やCTスキャンのような道具を用いた観察体験を、提案インタフェースを用いて擬似的に体験できるので、科学的な観測方法に関する学習に利用できる。このアプリケーションを親子に触れてもらったところ、親子ともに夢中になって操作し、観察対象について親子で会話する傾向があることが確認された。観察体験だけでなく、学習を通じて親子のコミュニケーション促進にも影響与えることが期待される。

2つ目は様々な動物の形状を持つ物理オブジェクトを用いたアプリケーションである。導電部を用いることで、小さい動物や複雑な形状の動物でも利用できる。動物をタブレット端末に置くことで、タブレット端末が動物の種類を特定する。その動物を動かすと、動きに合わせて動物の足

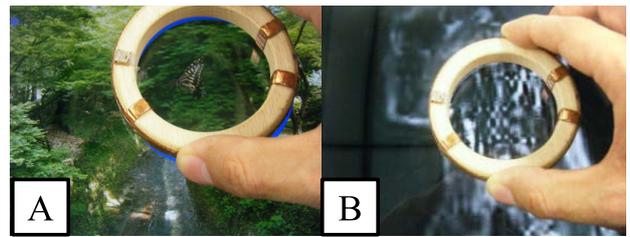


図8 リング型物理オブジェクトを用いたアプリ  
Fig. 8 Two applications using a ring physical object.

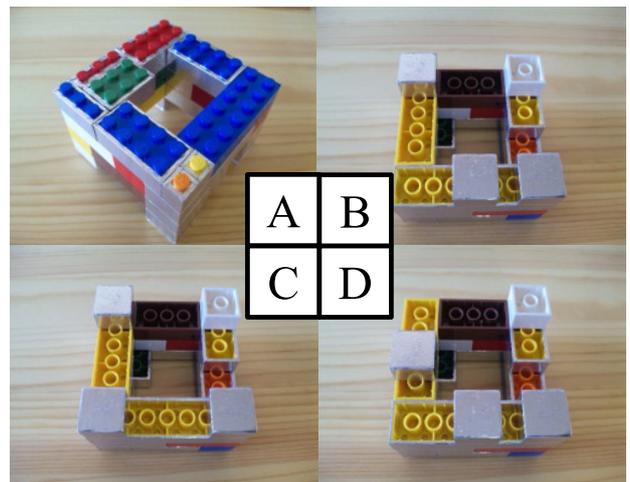


図9 複数導電部を持つLEGO  
Fig. 9 LEGO with conductive points.

音や鳴き声などを付加する。こうすることで、動物の形を実際に触ることで理解し、視覚だけでなく、聴覚も使って動物の特徴を理解するのに役立つアプリケーションとなる。このように、動物の特徴を複数の感覚を通じて疑似体験できるので、実際の動物の特徴に関する学習に利用できる。

3つ目は物理オブジェクトの提供方法について述べる。たとえば、非導電材料として普通の厚紙と、導電材料として通電インクを染み込ませた厚紙を用意し、各厚紙に切り取り線をいれておく。ユーザは各厚紙を切り、組み立てることによって物理オブジェクトを製作できる。このようにすることで、雑誌の付録としても容易に物理オブジェクトを提供することができ、かつ雑誌上にアプリケーションのダウンロード先を記入しておけば、容易に提案インタフェースを利用できる環境が整う。また、LEGO®ブロックと導電材料を被せたLEGO®ブロックを用意し、これらを用いて物理オブジェクトを製作する方法がある。ユーザは任意の形状および任意の導電部の配置に製作することができる。これらのブロックは取り外しが可能であるため、アプリケーションに応じて物理オブジェクトの形状を適宜組み替えることが可能となる。また、図9のように物理オブジェクトの形状を残したまま導電部の配置を容易に変更できるので、同じ物理オブジェクトの形状でも容易に操作内容の変更も容易となる。

## 5. 導電部の位置検出精度に関する基礎実験

### 5.1 実験目的

コンテンツの操作はマルチタッチスクリーンが識別した物理オブジェクトに応じて決定されるので、物理オブジェクトに配置された導電部の検出精度が提案インターフェースの操作性に影響を与える。この問題の対策として、操作中にマルチタッチスクリーンと物理オブジェクトに配置されたすべての導電部が物理的に接触し続けるような物理オブジェクトの構造設計と、マルチタッチスクリーンが接触したすべての導電部を同時に精度良く検出できるような導電部の設計が必要となる。この章では、後者に着目し、導電部の設計指針を得るための基礎実験として導電部の材料、サイズおよび導電部間の間隔が導電部の位置情報の検出に与える影響を評価する。

### 5.2 実験装置と実験手順

すべての実験で利用された静電容量方式のマルチタッチスクリーンは第1世代のiPadであった。以下、各実験に対する実験装置と実験手順について述べる。

導電部の材料による導電部の位置検出精度に関する実験において、3種類の導電材料（ステンレスフィルム、アルミフィルム、銅フィルム）を用いた3つのリングオブジェクトを用意した。各物理オブジェクトの導電部の数は3つであり、各物理オブジェクトとともに同じサイズ（7mm×7mm）の導電部を同じ位置に配置した。各物理オブジェクトを30秒間、iPad上を移動もしくは回転させ続けた。このとき、iPadがタッチイベントを発生させたときの同時に検出した導電部の数を計測し、記録した。

導電部のサイズによる導電部の位置検出精度に関する実験において、4種類のサイズ（2mm×2mm, 3mm×3mm, 4mm×4mm, 10mm×10mm）の導電部を1つ配置した4種類の長方形物理オブジェクトを用意した。導電材料は銅フィルムを用いた。各長方形物理オブジェクトを定規に沿って120mmほど移動させた。各サイズに対して、10回の移動を行ったときの、iPadが検出した導電部の位置座標を計測し、記録した。

導電部間の距離による導電部の位置検出精度に関する実験において、3種類の導電部間距離（1mm, 3mm, 5mm）を持つ2つの導電部を配置した3種類の物理オブジェクトを用意した。各物理オブジェクトを定規に沿って120mmほど移動させた。この移動を各距離間に対して10回繰り返した。このとき、iPadがタッチイベントを発生させたときの同時に検出した導電部の数を計測し、記録した。

### 5.3 実験結果と考察

導電部の材料による位置検出精度の実験結果を図10、図11、図12に示す。iPadはタッチスクリーン上で導電

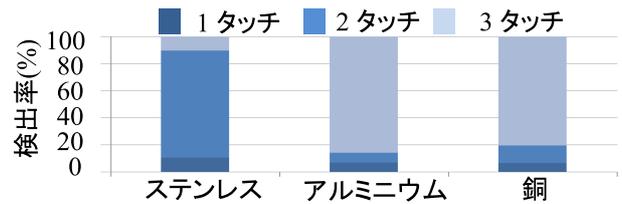


図10 材料による導電部の検出精度の影響  
Fig. 10 Influence of material of conductive points.

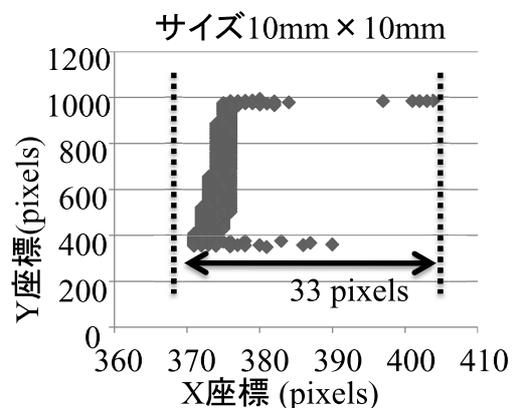
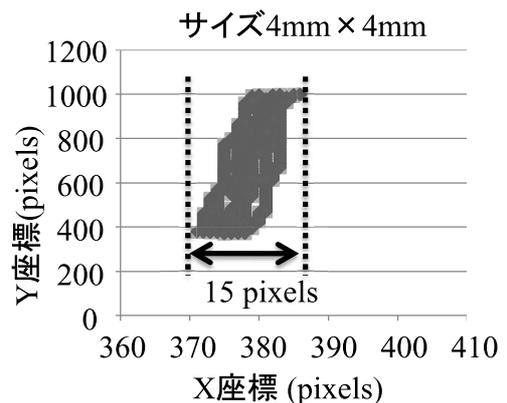
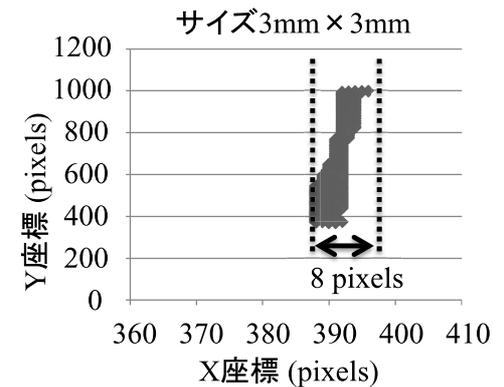


図11 1つの導電部を持つ物理オブジェクトを定規に沿って移動したときに検出された位置座標の軌跡

Fig. 11 Influence of size of a conductive point (3 mm, 4 mm, 10 mm).

部が動いている間にタッチイベントを発行し、そのイベント発行時に導電部の数および位置座標を検出できる。図 10 の検出率とは、30 秒間物理オブジェクトを移動させている間に発行されたタッチイベントの数に対する、同時に検出された導電部の数の割合を示したものである。図 10 において、導電率の低いステンレスフィルムに対して導電率の高いアルミフィルムおよび銅フィルムの方が、同時に導電部を検出する精度が高いことが分かった。また、導電率の高い材料であっても、つねに 3 点の導電部を検出しつづけることはできないことが確認された。ゆえに、導電部の材料として、導電率の高い材料が好ましく、かつ導電部の数のみで物理オブジェクトの識別をするのは好ましくない。つまり、3.2 節で述べたような導電部の配置パターンを使うほうが、誤操作を減らせると考えられる。

導電部のサイズによる位置検出精度の実験結果を図 11 に示す。2mm×2mm のサイズの導電部の位置検出はできなかったが、他のサイズの導電部は位置検出できた。サイズが小さいとタッチスクリーンの検出精度が悪いことからある程度の電荷が蓄積される面のサイズが必要と考えられる。次に、定規に沿って物理オブジェクトを移動させることにより、導電部を y 軸方向にまっすぐ移動させたが、iPad が検出した位置座標は直線ではなかった。加えて、導電部のサイズが大きいほど、座標のズレが大きかった。これは導電部の面のサイズの分、検出される位置に誤差が生じることを示す。そのため、利用用途に合わせて導電部のサイズを設計することが好ましい。

導電部間の距離による位置検出精度の実験結果を図 12 に示す。導電部の間隔が離れていても 1 点しか導電部を検出できない場合が生じた。これは、導電部の材料の実験の考察で述べたように、必ずしも導電部を 100%位置検出できるわけではないことを示している。導電部の間隔が近いほど、2 点同時に導電部を検出するのが困難であった。これはタッチスクリーンが 2 つの導電部を 1 つの導電部と誤認識したためと考えられる。

以上のべてきたように、実験を通じて以下のことが確認できた。① 導電部の検出精度を高めるために、導電性の高い材料を用いること。② 導電部のサイズに下限があること(本章の実験条件下では 3mm×3mm)。③ 導電部のサイズの上限は位置検出のズレがアプリケーションに影響しない

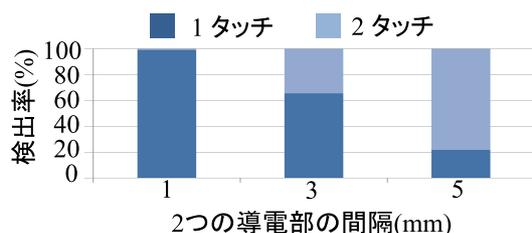


図 12 導電部間の間隔による位置検出精度の影響

Fig. 12 Influence of clearance between conductive points.

範囲とすること。④ 導電部の検出精度を高めるために、導電部の間隔を 5mm 以上にすること。

## 6. 識別可能な物理オブジェクトの数と並進・回転操作に関する考察

提案インタフェースは、導電部の配置パターンを識別しているため、導電部の配置パターンに対応する物理オブジェクトに関する情報は前もってアプリケーション内に登録することが前提である。たとえば、アプリケーションに登録ボタンを用意し、その登録ボタンを押した後に、製作した導電部を持つ物理オブジェクトをスクリーンに置いて、その物理オブジェクトの形状に対応する形状を選択することで、物理オブジェクトと導電部の配置パターンの対応を登録するという方法が考えられる。ゆえに、識別可能な物理オブジェクトの数は、同じ形状とサイズの物理オブジェクトを用いる場合、その物理オブジェクトに配置可能な導電部の配置パターンの数と同じである。逆に、形状とサイズの異なる物理オブジェクトを用いる場合、各物理オブジェクトに配置可能な導電部の配置パターンの合計から、形状とサイズの異なる物理オブジェクト間で重なる導電部の配置パターンの数を引いた数が識別可能な物理オブジェクトの数になる。

ここでは、図 13 に示すような片手で把持できるサイズの長方形型物理オブジェクトとリング型物理オブジェクトの 3 点の導電部の配置パターンを評価した。ただし、長方形のオブジェクトに対する 3 点の導電部の配置は図 13 の物理オブジェクト内に表示された□の中から選択される。また、リング型物理オブジェクトに対する 3 点の導電部の配置は物理オブジェクト内に表示された□の中から選択される。5 章の実験をふまえ導電部のサイズを 3mm×3mm の長方形および導電部間の間隔を 5mm にした。図 13 に示す 2 種類の各物理オブジェクトが持つすべての配置パターンにおいて 3 辺の比と 3 辺の長さを計算し、一意に決定される配置パターンの種類を数えた。この結果、図 13 に示す長方形型物理オブジェクトの場合、6,251 種類の 3 点の導電部の配置パターンが可能となる。また、図 13 に示すリング型物理オブジェクトの場合、84 種類の 3 点の導電部の配置パターンが可能となる。

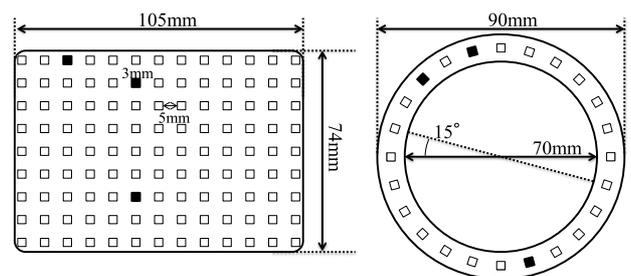


図 13 手で把持できるサイズの複数導電部を持つ物理オブジェクト

Fig. 13 Two examples of physical objects users can hold.

また、リング型物理オブジェクトを同じアプリケーションで利用する場合、同じ形状の物理オブジェクトでも異なる操作を実現できるので、たとえば1つの画像に対して、異なる特性を持つレンズを用いると画像がどのように変化するかを確認できるアプリケーションを製作できる。

提案インタフェースの操作性の初期検討として、図8のようにリング型物理オブジェクトを並進・回転させることで、リングの内側の画面を操作する実験を子供たちに行ってもらい、操作したときの感想を尋ねた。実験で使われた3点の導電部を持つ物理オブジェクトは5.2節の実験結果に基づいて製作した。マルチタッチスクリーンの端末として、第1世代のiPadを用いた。3点の導電部が検出されている間は、リングの内側に別の画像が表示され、並進・回転操作によりその画像を操作できるように設定した。このアプリケーション利用時の提案インタフェースの操作性には、①操作中の導電部の検出漏れによる影響と、②導電部の検出からアプリケーションの処理を経て画面描画するまでの遅延時間による影響がある。導電部の検出漏れの影響としては、導電部の検出漏れが頻繁に起きたときに、リングの内側の画面が頻繁に切り替わるので、リングの内側の画像の操作がしにくくなることが考えられる。遅延時間の影響としては、リングの内側に表示すべき画像がずれて外側に表示されることが考えられる。しかしながら、子供たちからこれらの影響によるマイナスの意見を得ることはなかった。

ただし、アプリケーションによってはこれらの影響が問題となる可能性があるため、これらの影響の対策を考える必要がある。導電部の検出漏れが影響するアプリケーションにおいては、前時刻までの導電部の検出結果から検出できなかった導電部の位置を推測するなどの方法が考えられる。また一方、遅延時間が影響するアプリケーションにおいては、その遅延を解消することが本質的な対策であり、マルチタッチスクリーン端末の処理速度を上げるか、もしくはアプリケーションのプログラムを高速化するなどが必要となる。

## 7. おわりに

本論文では、eラーニングとデジタル遊具、TUIの利点をあわせ持つ、一般的な静電容量方式のマルチタッチスクリーンと複数導電部を持つ物理オブジェクトを組み合わせたユーザインタフェースを提案した。このインタフェースは物理オブジェクトに3つの導電部を取り付けることで、物理オブジェクトの識別および物理オブジェクトの位置や方向を検出できる。これにより、様々な形状の物理オブジェクトを使い分けることで操作内容を変更し、物理オブジェクトを移動もしくは回転させることでスクリーン上のデジタル情報を操作できる。ここで使われる物理オブジェクトは安価な材料で容易に製作できる。これらの特徴によ

り、提案インタフェースを用いることで知育教育向けのアプリケーションに多様性を与えることができる。物理オブジェクトに配置された導電部の位置検出精度を評価する基礎実験を行い、その実験結果に基づいて設計された物理オブジェクトを用いて図8のような観察体験アプリケーションを子供たちに操作してもらったところ、問題は起きなかった。

本論文では、導電部の位置検出精度に関する基礎実験を行ったうえで、識別可能な物理オブジェクトの数および物理オブジェクトの移動や回転操作の追従性について考察した。今回は静電容量方式のマルチタッチスクリーンと複数導電部を持つ物理オブジェクトを用いたが、タッチスクリーンは静電容量方式以外にも存在し、本論文で提案した方法を実装可能なタッチスクリーンも存在する。たとえば、抵抗式マルチタッチスクリーンであれば、導電部の代わりに突起物を物理オブジェクトに取り付け、その突起物だけがタッチスクリーンに接地するように設計する。こうすることで、3.2節および3.3節で述べた識別方法を用いて物理オブジェクトの識別、位置および方向を検出できる。

今後は、実際の知育教育の現場に提案インタフェースを利用するときに得られる効果について検証していく。

## 参考文献

- [1] Aoki, R., Miyashita, H., Ihara, M., Chigira, H., Kobayashi, T. and Kobayashi, M.: E-learning Tool Using Physical Objects on a Mobile Tablet with Capacitive Multi-Touch Screen, *International Conference of Education, Research and Innovation* (2011).
- [2] Allen, I.E. and Seaman, J.: Making the Grade: Online Education in the United States, *Sloan-C*, Masseteussets, USA (2006).
- [3] Henry, L. and Sankaranarayanan, S.: Application of Intelligent Agents for Mobile Tutoring, *ICIS2009*, Seoul (2009).
- [4] Wains, S.I. and Mahmood, W.: Integrating M-Learning with E-Learning, *SIGITE2008*, pp.31-37 (2008).
- [5] Zuckerman, O., Arida, S. and Resnick, M.: Extending Tangible Interfaces for Education: Digital Montessori-inspired Manipulatives, *CHI2005*, pp.859-868 (2005).
- [6] Watanabe, R., Itoh, Y., Kitamura, Y., Kishino, F. and Kikuchi, H.: Distributed Autonomous Interface using ActiveCube for Interactive Multimedia Contents, *ICAT2005*, pp.22-29 (2005).
- [7] Newton-Dunn, H., Nakano, H. and Gibson, J.: Block Jam, *SIGGRAPH2002*, New York (2002).
- [8] Terrenghi, L., Kranz, M. and Holleis, P.: A cube to learn: a tangible user interface for the design of a learning appliance, *Pers Ubiquit. Comput.*, (2006), pp.153-158 (2006).
- [9] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, *CHI'97*, Atlanta, Georgia, USA, pp.234-241 (1997).
- [10] Spindler, M., Stellmach, S. and Dachselt, R.: PaperLens: Advanced Magic Lens Interaction Above the Tabletop, *ITS2009*, Banff, Alberta, Canada, pp.69-76 (Nov. 2009).
- [11] Wu, A., Reilly, D., Tang, A. and Mazalek, A.: Tangible Navigation and Object Manipulation in Virtual Environ-

- ments, *TEI'11*, Funchal, Portugal, pp.37-44 (Jan. 2011).
- [12] Izadi, S., Hodge, S., Taylor, S., Rosen-felf, D. and Villar, N., Alex Butler and Jonathan Westhues: Going Beyond the Display: A Surface Technology with an Electronically Switchable Diffuser, *UIST '08*, Monterey, California, USA, pp.269-278 (Oct. 2008).
- [13] Park, J. and Kim, M.-H.: Interactive Display of Image Details using a Camera-cupled Mobile Projector, *IEEE International Workshop on Projector-Camera Sys-tems*, pp.1-4 (2010).
- [14] Weiss, M., Wagner, J., Jennings, R., Jan-sen, Y., Khoshabeh, R., Hollan, J.D. and Borchers, J.: SLAP-book: Tangible Widgets on Multi-touch Tables in Groupware Environments, *TEI2009*, pp.297-300 (2009).
- [15] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J.D. and Borchers, J.: SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops, *CHI2009* (2009).
- [16] Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Pangaro, G.: Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces, *CHI2001*, Seattle, WA, USA (Mar. 2001).
- [17] Kobayashi, K., Hirano, M., Narita, A. and Ishii, H.: A Tangible Interface for IP Network Simulation, *CHI'03*, Seattle, WA, USA, pp.800-801 (Mar. 2001).
- [18] Kobayashi, K., Narita, A., Hira-no, M., Kase, I., Tsuchida, S., Omi, T., Kakizaki, T. and Hosokawa, T.: Collaborative Simula-tion Interface for Planning Disaster Measures, *CHI'06*, Montréal, Québec, Can-ada, pp.977-982 (Apr. 2006).
- [19] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for free-hand manipulation on interactive surfaces, *CHI'02*, Minneapolis, Minneso-ta, USA, pp.113-120 (Apr. 2002).
- [20] DinoStudio: iPad Physical Object Interface.
- [21] available from (<http://dinostudios.com/2010/04/ipad-physical-object-interface/>) (accessed 2011-06-05).
- [22] Hacker's Café Blog, available from (<http://blog.hackers-cafe.net/2010/05/murototangible-figure-as-controller.html>).
- [23] 岩島伊織, 赤羽 亨, 小林茂宣, 鈴木宣也: タッチパネル上に載せる触知認知可能なコントロールインタフェースの提案とプロトタイプ「つかみどころ」の製作, *インタラクション 2012* (2012).



青木 良輔 (学生会員)

2005年東北大学工学部機械知能系卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年NTTサイバーソリューション研究所に入社。現在, NTT サービスエボリューション研究所に勤務し, ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。2011年東北大学大学院情報科学研究科博士後期3年の課程に入学し, 在学中。ヒューマンインタフェース学会, IEEE 各会員。



宮下 広夢

2008年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2010年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年NTTサイバーソリューション研究所に入社。現在, NTT サービスエボリューション研究所に勤務し, 動画像処理とモバイルメディアインタフェースの研究に従事。



榎 優一

2009年東北大学工学部機械知能・航空工学科卒業。2011年同大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士前期課程修了。同年NTTサイバーソリューション研究所(現, NTT サービスエボリューション研究所)入社。現在に至る。センサフュージョン, マルチスクリーンを利用したサービス連携に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



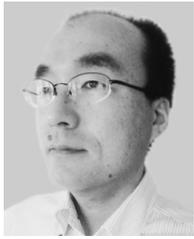
千明 裕 (正会員)

2007年早稲田大学理工学部電気・情報生命工学科卒業。2009年同大学大学院先進理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在NTT サービスエボリューション研究所にてヒューマンインタラクション関連の研究に従事。インタラクション 2011 ベストペーパー賞。



井原 雅行 (正会員)

1994年東京工業大学大学院修士課程修了。同年NTTヒューマンインタフェース研究所入所。人間の好みのモデル化, 価値観共有, ヒューマンアフォーダンスの研究等に従事。2002-2003年加国New Media Innovation Center およびブリティッシュコロンビア大学にて客員研究員。現在, NTT サービスエボリューション研究所主幹研究員。工学博士。ACM, 電子情報通信学会, 画像電子学会各会員。



小林 透 (正会員)

1985年東北大学工学部精密機械工学科卒業。1987同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年NTT入社。以来、ソフトウェア生産技術、ユビキタスコンピューティング、情報セキュリティ、データマイニング等の研究開発に従事。現在、NTT サービスエボリューション研究所主幹研究員。IEEE, 電子情報通信学会(シニア)各会員。博士(工学)。



小林 稔 (正会員)

1988年慶應義塾大学工学部計測工学科卒業。1990年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTT ヒューマンインタフェース研究所にてCSCWの研究に従事。1994年より1996年まで米国マサチューセッツ工科大学大学院(Program in Media Arts and Sciences)修士課程, 1996年同課程修了。主に、映像を用いたコミュニケーションメディア, バーチャルリアリティ, マルチモーダルインタフェース等の研究に従事。現在, サービスエボリューション研究所主幹研究員。ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, 画像電子学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 可視化情報学会各会員。博士(工学)。



鏡 慎吾 (正会員)

1998年東京大学工学部計数工学科卒業。2003年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。科学技術振興事業団研究員, 東京大学助手, 東北大学講師を経て, 現在, 東北大学大学院情報科学研究科准教授。高速ビジョンを中心とする実時間センサ情報処理の研究に従事。博士(工学)。