

## くるみる：複数導電部もつ枠型物理オブジェクトを用いたタブレット操作

青木良輔<sup>†, ††</sup> 宮下広夢<sup>†</sup> 井原雅行<sup>†</sup>  
大野健彦<sup>†</sup> 千明裕<sup>†</sup> 小林稔<sup>†</sup> 鏡慎吾<sup>††</sup>

静電容量方式のマルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレットが普及し、物理オブジェクトを用いたタブレット向けのアプリケーションが登場している。そこで、タブレット操作に物理オブジェクトを利用することを促すために、タブレット上で枠型物理オブジェクトをくるっと回して情報をみる操作方式「くるみる」を提案する。本方式では枠の内側からも画面を遮蔽なく閲覧できるので、枠の内側の画面を見ながら、物理オブジェクトの回転操作及び並進操作が容易に行える。回転操作を3次元空間の奥行き方向の操作に割り当て、枠の内側にその操作結果を拡大・縮小表示することで虫眼鏡のように使用できる。本稿では、枠型物理オブジェクトの中で、回転しやすく、握りやすいリング型物理オブジェクトに着目し、本方式の特徴、実装及び本方式の基本操作性を評価した結果を報告する。

### "Kuru-miru" that Enables to Operate a Tablet Device with a Capacitive Multi-touch Screen Using a Frame Object

Ryosuke Aoki<sup>†, ††</sup> Hiromu Miyashita<sup>†</sup> Masayuki Ihara<sup>†</sup>  
Takehiko Ohno<sup>†</sup> Hiroshi Chigira<sup>†</sup> Minoru Kobayashi<sup>†</sup>  
and Shingo Kagami<sup>††</sup>

Tablets with capacitive multi-touch screens have increased and applications for tablets using physical objects have surfaced. To increase the use of physical objects to operate tablets, we propose Kuru-Miru which allows users to move and rotate a frame object to view digital information inside the frame object without obscuring the view of digital information in the screen. Rotation of the frame object acts as a magnifying glass and manipulates the depth in the image to mimic three dimensional space on a two dimensional surface. In this paper, we present our implementation of a easy to rotate and grasp ring object and report Kuru-Miru's features, implementation, and usability.

### 1. はじめに

近年、静電容量方式のマルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレットが電子書籍やインターネットの利用デバイスとして普及している。加えて、ユーザがタブレット向けのアプリケーションを製作し、提供できる環境が整いつつある。一般的に指の操作を用いたアプリケーションが多いが、その一方で物理オブジェクトを用いたタブレット操作を実現しているアプリケーションも登場している[1-8]。そこで、タブレット操作に物理オブジェクトを利用することを促すために、枠型物理オブジェクトを用いたタブレット向け操作方式を提案する(図1)。

図2のような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及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、例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。ここでは、タブレット上で枠型物理オブジェクトをくるっと回して情報を見るという上記で述べた操作方式を「くるみる」と呼ぶ。さらに、回転のし易さ、握りやすさ及び双眼鏡や望遠鏡のように奥行き操作に回転操作が使われることが多いという点を考慮して、枠型物理オブジェクトの中のリング型物理オブジェクトに焦点を当てる。

以下、マルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレット操作に使われている従来の物理オブジェクトの特徴を示した上で、我々の取り組みを示す。その上で本方式の操作の特徴と実装するのに適したシステム構成について説明する。それから、そのシステムを用いた3種類のアプリケーションを紹介する。さらに、情報を見ながらリング型物理オブジェクトを回転及び並進させる操作の使いやすさに関する調査結果を報告する。

### 2. 関連研究

タンジブルインタフェース(TUI[9-10])の分野において、物理オブジェクトを識別するための特殊なセンサもしくは複数の既存のセンサが組み合わされたシステムの設計に関する研究が多く報告されている[11-35]。また、物理オブジェクト側に工夫をし、既存のセンサとその物理オブジェクトを組み合わせることによって作られるインタフェースの設計に関する研究も注目されつつある[8]。

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サイバーソリューション研究所  
NTT Cyber Solutions Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, Japan

<sup>††</sup> 東北大学 情報科学研究科  
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University



図 1: くるみるの操作

図 2: 枠型物理オブジェクトの例

一方、静電容量方式のマルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレットが登場し、加えて、タブレット向けアプリケーションの製作及び提供が容易にできる環境が整いつつある。この影響を受けて、物理オブジェクトを用いてこのタブレット操作を可能にしたアプリケーションが登場している[1-7]。このアプリケーションの基本的な原理は文献[11-13]に示されており、このアプリケーションで使われる物理オブジェクトに複数の導電部が配置されている。画面上に物理オブジェクトを接地した状態で移動させることで画面に対して何らかの操作を行うアプリケーションでは、画面の閲覧性を重視する傾向がある。ゆえに、画面に対してペンデバイス[1-3]のような点接触もしくは文献[6-7]のようなサイズの小さい面で接触するデバイスが用いられる。また、サイズの大きい面で接触するデバイスが使われるときは、接触させることで新しい機能を追加する[7-8]もしくは回転操作のみでメニューを選択する[14-15]など、画面上での操作を制限している。この物理オブジェクトが上記で述べた画面の閲覧性を重視するアプリケーションで使われない原因の1つは、タブレット操作時の画面の閲覧性が悪いことである。本稿では、面で接触するサイズの大きいデバイスでも、画面の閲覧性が良い状態で、操作しやすくするために、枠型物理オブジェクトに着目する。

### 3. くるみる

本研究では、タブレット上で枠型物理オブジェクトをくると回して情報をみる操作方式「くるみる」を提案する。具体的には枠の内側からも画面上の情報を閲覧しながら、画面上でこの物理オブジェクトの並進操作及び回転操作を行う方式をさす。以下、枠型物理オブジェクトの中のリング型物理オブジェクトを用いた操作を前提とし、ユーザ操作の特徴を示す。リング型物理オブジェクトを採用したのは回転のし易さ、握りやすさ、及び双眼鏡や望遠鏡のようなデバイスで回転操作が使われることが多いという点を考慮したからである。

#### 3.1 物理オブジェクト操作時の枠の内側の画面の閲覧

リング型物理オブジェクトを用いてタブレット操作するとき、枠の内側からも画面を閲覧できる。マウスを用いたパソコン画面でのポインティング操作やリモコンを用いたTV画面のメニュー操作と異なり、タブレット操作は情報が表示される画面上で行われる。ペンデバイス[1-3]のように画面に点接触する幅の狭い物理オブジェクトであれば、物理オブジェクトの操作時に画面を遮蔽しない。しかし、画面に対して面接触するようなサイズの大きいデバイスはタブレットの画面の一部を遮蔽するため、ユーザは画面を閲覧しにくくなる。特にテーブルトップシステムと異なり、タブレットの画面は小さいので、その影響は大きい。例えば、操作したい情報をみながら操作を行うとき、その情報を物理オブジェクトが遮断しない領域で、物理オブジェクトを操作する必要がある。これは小さい画面の中でさらに操作領域が制限されるので、物理オブジェクトを操作しづらくなる。そこで、物理オブジェクトが遮断する画面の領域を減らすために、リング型物理オブジェクトのように枠の内側からも画面を閲覧できる物理オブジェクトを用いる。物理オブジェクトの枠が細いほど画面の閲覧領域は広がる。また、枠が細い物理オブジェクトでもタブレット操作できるインタフェース設計が求められる。

#### 3.2 リング型物理オブジェクトを用いた情報選択の方法

枠の内側からも画面を閲覧しながら操作することで、画面内の操作したい情報を容易に選択できる。リング型物理オブジェクトをタブレットに置くと、リング状の枠が画面上の情報を囲む。この囲むという状況がその情報を選択したことをユーザに示す。しかし、リングの内径が大きいと複数の情報を囲む可能性がある。この問題を解決するために、円の中心が触れた情報を操作できるように本方式では設定する。ペンデバイスで操作したい情報を直接選択するのと同様に、これによって操作したい情報に円の中心を合わせることで容易に選択できる。ユーザにとって円の中心位置はわかりやすく、操作したい情報を選択したかどうか也容易に判断できる。したがって、枠によって操作したい情報を囲み、かつ円の中心にある情報を操作対象とすることで容易に画面の情報を選択できる。枠の形状がリングでなくても図形の重心のように枠の内側の特徴的な点がある枠型物理オブジェクトであれば同じことが可能となる。

#### 3.3 回転操作を用いた拡大・縮小操作の簡易性

リング型物理オブジェクトによって選択された画像を拡大・縮小させる操作がこの物理オブジェクトの回転操作を使うことで簡単になる。二本の指によるピンチアウト・インによって画像を拡大・縮小させる直感的な操作が一般的なタブレット操作に使われているが、拡大・縮小させている間に画像の位置が変わる。二本の指がタブレットに最初に触れた位置から各指を同じ距離分だけ開くもしくは閉じるが容易ではないためにこの現象は起こる。一方、リング型物理オブジェクトの回転操作は複数の指によって操作されるが、タブレットが検出するのは物理オブジェクトの回転のみであ

る。加えて、指がロックされた状態で、手首、肘及び肩が巧みに動くことで、円の中心を動かさずに回転させることが容易であるため、拡大・縮小している間に選択されている画像の位置が変わらない。具体的な動きは3.4節で述べる。

### 3.4 リング型物理オブジェクトの並進操作と回転操作の関係

リング型物理オブジェクトを使うことでタブレット上での並進操作と回転操作を同時に行いやすかつそれぞれ単独の操作もしやすい。リング型物理オブジェクトを少なくとも二本の指で把持した状態で操作される。そのとき指がロックされた状態で、手首、肘及び肩が巧みに連動して動く。具体的に説明する。回転操作のみを行うときは、物理オブジェクトを掴む複数の指がロックされた状態で手首が能動的に動き、その動きに合わせて肘及び肩が受動的に動く。肩の位置は固定されているので、結果として、肘の位置が柔軟に変更されている。また、並進操作のみを行うときには、指がロックされた状態で、手首はほとんど動かずに肘が能動的に動き、それに合わせて肩が受動的に動く。二つの操作が合成されるときは、指がロックされた状態で手首と肘が能動的に動き、肩が受動的に動く。このように指と肘の巧みな動きによって、二つの操作を同時に動かしても、片方ずつ動かしても滑らかに精度よく操作できると考える。指によるタッチ操作はシングルタッチとマルチタッチの切り替えに遅れが存在するが、リング型物理オブジェクトの操作の場合、身体を動かす部位を変えるだけなので、切り替えが滑らかである。

### 3.5 枠の内側の画像に対する操作

リング型物理オブジェクトの枠の内側の画像のみを操作できる。リング型物理オブジェクトがタブレットに接触したとき、枠が内側と外側の二つの領域に分離する。さらに、枠の内側の情報の操作にリング型物理オブジェクトの回転操作を対応させる。このとき、リングの回転操作は上記でも説明したようにリングの位置を変更せずに回転操作のみを行うのは簡単であり、リング内側の画像を滑らかに操作できる。この回転操作に3次元空間の奥行き方向の操作を対応させることで様々なアプリケーションがタブレット上で実現できる。例えば、回転操作をリング内の画面の拡大・縮小を行う操作に対応させると虫眼鏡、双眼鏡、望遠鏡や顕微鏡のようにレンズの倍率を変えながらレンズを覗き見ると同様の体験をタブレット上で疑似体験できる。また、回転操作を3次元物理オブジェクトの断面を、断面の垂直方向に移動させる操作に対応させると、CT スキャンのように身体の断面画像の位置を切り替えながら診察と同じ状況を疑似体験できる。アプリケーションの詳細は5節で述べる。

### 3.6 接地面の切り替えによる回転操作に対応する情報操作の切り替え

リング型物理オブジェクトは側面を除き二つの接触面をもつので、その接触面を切り替えることで回転操作に対応する操作を切り替えることができる。例えば、一つの面の接触時の回転操作は選択した情報を拡大・縮小する操作が対応し、もう一方の面の接触時の回転操作は情報を回転させる操作に対応させる。指によるマルチタッチ操

作であれば、接地する指の本数や複数の指が同時に動く何らかの操作で複数の操作ができるが、物理オブジェクトは並進操作と回転操作のみである。ゆえに、面を変えることで利用できる操作を増やすことが考えられる。この操作はオブジェクトをくるっとひっくり返すだけなので、操作の負担も少ないと考える。

## 4. 実装

くるみるの実装システムについて説明する。くるみるを実装するための要件を下記のように整理した。

- 枠が細いリング型物理オブジェクトを用いてタブレット操作ができること
- リング型物理オブジェクトの位置及び方向を検出できること
- リング型物理オブジェクトの接触面を識別できること
- リングの内側の領域と円の中心を取得できること

この要件を満たすための一つのシステム構成として、静電容量方式のマルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレットと、複数の導電部が配置されたリング型物理オブジェクトを組み合わせたシステムを用いる。

ここで複数の導電部を用いたのはリング型物理オブジェクトの枠をできる限り細くするためである。文献[8,16-17]のように物理オブジェクト内にマイコン、バッテリーや電子部品を組み込んだ電子機器を用いた物理オブジェクトも提案されているが、電子機器のサイズは枠の大きさに影響を与える。導電部を用いるとき、物理オブジェクト操作時にユーザが握る部分と導電部を電氣的に接続する必要はある[11,13]が、タブレットに接触する導電部のサイズは小さくすむ。

次にリング型物理オブジェクトの接地面を識別するために、オブジェクトの各面に異なる配置で3点の導電部を取り付けた(図3)。タブレットは複数の導電部で構成される配置パターンを識別することで一意に接地面を識別できる。また、3点の導電部の代表的な2点を抽出し、常にその2点で作られる直線のタブレット上の角度をリング型物理オブジェクトの方向とみなせる。さらに、3点の導電部の代表的な1点の位置座標もしくはその1点の座標からの相対的な位置をリング型物理オブジェクトの位置とみなせる。

最後にリング内側の画面の領域の範囲と円の中心を指定する方法について述べる。タブレットが検出できるのはあくまで物理オブジェクトの識別及び物理オブジェクトの位置・方向のみである。だから、前もって識別される物理オブジェクトとリング内側の領域の範囲及び3点の導電部の中の代表的な点に対する円の中心への相対座標をデータベースに格納しておき、識別されたときにデータベースからその領域の範囲と円の中心を得られるようにする。

次節ではこの実装を用いた3種類のアプリケーションについて述べる。

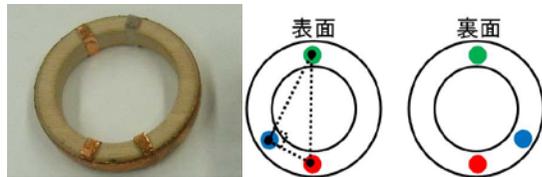


図3: 物理オブジェクトの実装例と複数の導電部の配置例

## 5. アプリケーション

フォトコラージュや2次元CADソフトのように選択された図形を目標とする位置、方向及びサイズに配置するタスクを繰り返すことで一枚の絵を作成するアプリケーションに利用できる(図4(A)). この操作は効率性が求められる. 効率的に作業を行うために図形を選択がしやすく, 複数の作業を同時に行えるしくみにするとよい. 例えば, リングの中心を図形に合わせることで図形を選択し, リングをスライドさせることで図形的位置を変更する. さらに, リング型物理オブジェクトの回転操作を選択された図形の回転操作, あるいは図形の拡大・縮小操作に対応させ, 図形の回転操作と図形の拡大・縮小操作の切り替え操作は接地する面を切り替えることで行う. 並進操作と回転操作が併用でき, 各操作の精度も高いので効率的に作業を行える.

次にCTスキャンで撮像された身体断面画像を滑らかに切り替えることで診察するアプリケーションに利用できる(図4(B)). CTスキャンを用いると, 3次元物体の1次元方向に垂直な断面図を含む断面画像の集合が得られる. この1次元方向の操作をリング型物理オブジェクトの回転操作に対応させることで, CTスキャンで得られた断面画像を滑らかに切り替える. また, 回転操作した結果をリングの内側にのみ表示することで, 3次元物体の表面のどの位置の内部に着目しているのかがわかりやすくなる. 断面図が滑らかにかわることで, 着目している位置の画像の変化から症状の悪い位置を発見するのに役立つ. 例えば, ヘルニアは神経が圧迫されて薄くなっているところがCTスキャンの写真で見てとれるが, 断面の位置が切り替えていく途中で神経の太さがだんだん小さくなるので, その変化を見ることで診断しやすくなることを期待できる.

最後に双眼鏡のように遠くのを拡大して見る操作を仮想空間上で疑似体験できるアプリケーションとして利用できる(図4(C)). 双眼鏡を用いて遠くのを拡大するために, 双眼鏡に取り付けられているピント調整リングを回転させることで焦点を合わせる. 同様に, リング型物理オブジェクトの回転操作をリングの内側の画像に対する拡大・縮小操作に対応させ, その操作結果をリングの内側に表示させることで同じ現象を体験できる. 森の中に虫を配置し, その虫を探すアプリケーションを実

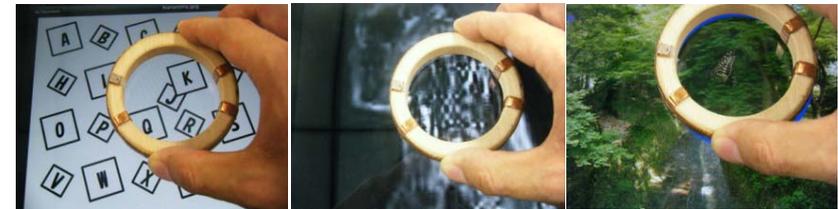


図4: アプリケーション例. (A) フォトコラージュ  
(B) CTスキャン撮影画像切り替え操作 (C) 虫眼鏡アプリ

現できる. また, 双眼鏡の代わりに望遠鏡や顕微鏡にすると, 生物の実験や天体観察などを疑似体験できる.

## 6. 操作性の評価実験

### 6.1 目的

くまの基本的な操作はリングの内側からも画面を見ながら, リングを並進及び回転させる操作となる. アプリケーションに応じて, ユーザが能動的にこれらの操作を行う場合もあれば, 画面の変化に対して受動的にこれらの操作を行う場合もある. ユーザが能動的にリングの並進操作及び回転操作するタスク(実験1)とユーザが能動的にリングの回転操作を行うが, 受動的にリングの並進操作を行うタスク(実験2)に対する本方式の使いやすさを調べた. 実験1の具体的なタスクはマルチタッチスクリーン上に表示された画像を目的の位置及び目的のサイズに合わせる作業である. 実験2の具体的なタスクは図5のような3次元物体の断面画像の位置を上底から下底まで移動させながら, 断面画像の移動によって変化する断面図の位置が, 本方式であればリング型物理オブジェクトのリング内側に, もしくはマルチタッチ操作方式であれば仮想的なフレームの内側に存在するように操作する作業である. 実験1と実験2の装置及び被験者は同じであった.

### 6.2 装置

実験で使われた物理オブジェクトは透明なプラスチックで, かつ内径55mmでかつ外形75mmでリングであった. この物理オブジェクトに銅フィルムで作成された3点の導電部が配置され, そのうち2点はリングの直径の両端に配置された. この2点の平均をとることで円の中心座標が求まる. 各導電部のサイズは5mm×5mmで各導電部の間隔は5mm以上であった. ユーザが操作時に物理オブジェクトに触れる側面に銅フィルムを貼り, 導電部と電気的に接続できるようにした. 静電容量方式のマルチタッチスクリーンが取り付けられたタブレットとして第一世代のiPadが実験で使われた. 第一世代のiPadの画面サイズは1024 pixels×768 pixels (197.1mm×147.8mm)

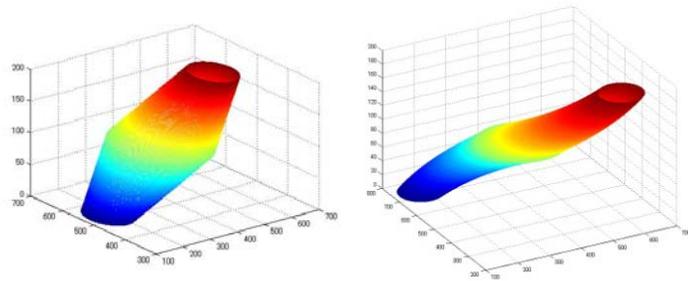


図5: タスク2で使われた3次元物体. (A) 練習用 (B) テスト用

であった. 実験で使われたアプリケーションは Objective-C で作成された.

### 6.3 被験者

女性4名, 男性8名の計12名の被験者が実験に参加した. 年齢は25歳以上40歳以下であった. 全被験者は右利きであった. 12名のうち9名は日常生活でスマートフォンのようなタブレットを日常的に利用していた.

### 6.4 実験1の実験計画

2×4の被験者内計画を用いた. 要因と水準は以下のとおりである.

- 操作方式: くるみる, マルチタッチ操作方式
  - 画像のターゲットサイズ: 40×40, 60×60, 100×100, 80×80 (pixels×pixels)
- 従属変数は目標の位置及びサイズに合わせた上で, 決定キーを押下するまでの時間と成功率である. 目標の位置及びサイズをフレームで表現し, そのフレームの幅内に操作した画像が入っていれば成功とみなした. 12人の被験者が2通りの操作方式を用い, 4通りのターゲット条件のもとで8試行ずつ操作した. 全試行回数は12×2×4×8の768試行であった.

被験者らは, 無作為に2グループに分けられ, 一方はくるみるを最初に使い, もう一方はマルチタッチ操作方式を使った. 一つの操作方式で全ての試行を完了した後, 休憩をはさみ, もう一つの操作方式を利用した. 4通りの操作の順序は, 被験者毎に無作為に行った. 一人の被験者が実験を完了するまでの時間は20分であった. 被験者は椅子に座り, 机の上にiPadが置かれた状態で操作した.

### 6.5 実験1の手順

実験は, ISO9241-9[36]記載の多方向タッピング試験を応用して実施した. 具体的には, 実験のアプリケーションを立ち上げると, ターゲットサイズを示すフレームが円環状に等間隔に8つiPad上に表示され, さらにその円環の中心点を示す点が表示される. この中心点が各試行の開始点となる. 開始点と各フレームの中心点の距離は全て

220pixelsであった. フレームの幅は15pixelsであった. 画面の左上に決定キーが表示された.

くるみるを用いた操作への指示: リングの中心が開始点と一致するように被験者がリング型物理オブジェクトを置いたとき, 被験者によって操作される画像が表示される. リング型物理オブジェクトをスライドさせることによって画像が移動された. また, リング型物理オブジェクトを回転させることによって画像の拡大・縮小が行われた. 画像を目標の位置及びサイズに合わせた後に, 決定キーを被験者は左手で触れた. そうすると画像が消えた. 被験者は各ターゲットに対して位置とサイズを合わせるこの作業を繰り返し行った.

指を用いたマルチタッチ操作方式への指示: 被験者の指が開始点に触れたとき, 被験者によって操作される画像がiPad上に表示される. 表示されたときの画像の中心は開始点にあった. 一本の指が画像に触れた状態で指を画面上でスライドさせることによって画像が移動された. また, 二本の指が画面に触れた場合でも, 二本の指をスライドさせることによって移動した二本の指の中心点の移動分だけ画像が移動された. 画像の拡大・縮小は二本の指を用いたピンチアウト・インによって行われた. 画像を目標の位置及びサイズに合わせた後に, 決定キーを被験者は左手で触れた. そうすると画像が消えた. 被験者は各ターゲットに対して位置とサイズを合わせるこの作業を繰り返し行った.

開始点に表示される操作対象の画像のサイズは80 pixels×80 pixelsであった. 左手は実験を開始する前に, 決定キーの上に配置させ, 画像の位置及びサイズを合わせた後即座にキーを押せる状態にさせた. 試行本番前に各操作方式で, 無作為に選ばれたターゲットサイズの1条件を使って練習を行った. くるみるの把持の仕方は片手で操作すること以外, どのように持ってもよいことにした.

### 6.6 実験1の結果

図7に, 両操作方式における画像のターゲットサイズごとの平均の操作時間を示す. Shafferの多重分析を行ったところ, すべてターゲットサイズにおいてくるみるを用いた方が有意に速いことが確認された. 両方式ともに成功率は100%であったので有意差は確認されなかった.

次に, ISO9241-9で規定された評価項目を用いて, 両操作方式に対する被験者の主観評価を実施した結果を図8に示す. 項目ごとにWilcoxonの順位和検定を実施したところ, 質問1から7, 及び12から13で有意差が確認された(項目3, 12, 13は $p < 0.01$ , それ以外は $p < 0.05$ )

### 6.7 実験2の実験計画

1×2の被験者内計画を用いた. 要因と水準は以下の通りである.

- 操作方式: くるみる, マルチタッチ操作方式
- 従属変数は3次元物体の断面画像が上底から下底に到達するまでにかかる操作時間

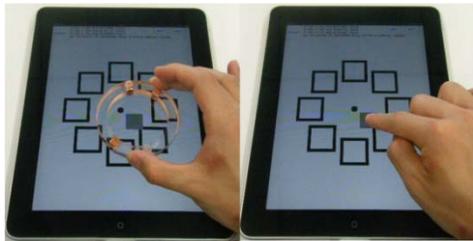


図 6: タスク 1 の実験環境

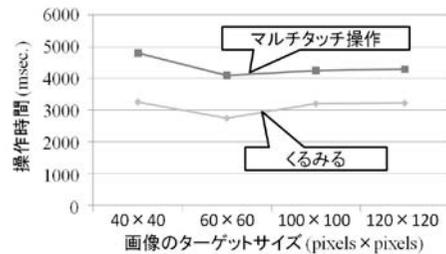


図 7: 平均操作時間 (タスク 1)

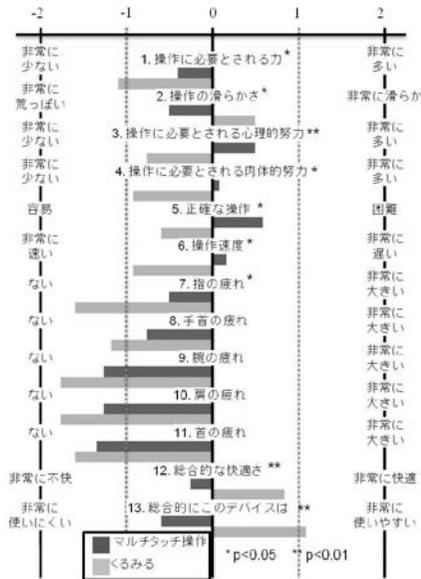


図 8: タスク 1 のアンケート結果

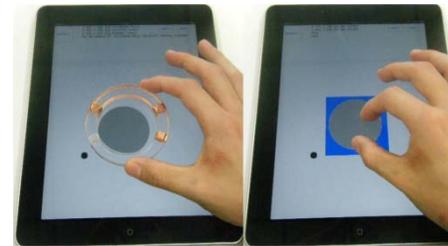


図 9: タスク 2 の実験環境

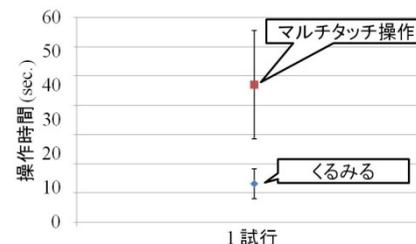


図 10: 平均操作時間 (タスク 2)

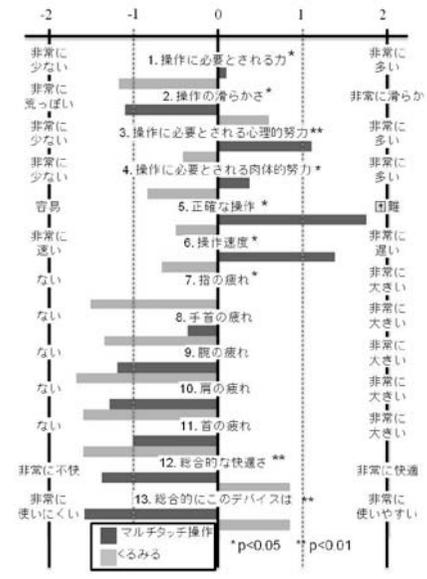


図 11: タスク 2 のアンケート結果

とその操作の間に断面画像の変化に伴って表示位置が変化する3次元物体の断面図を枠の内側に留め続ける操作の可否である。練習用に1試行行い、本番用に1試行行った。

被験者らは、無作為に2グループに分けられ、一方はくるみるを最初に使い、もう一方はマルチタッチ操作方式を使った。一つの操作方式で全ての試行を完了した後、休憩をはさみ、もう一つの操作方式を利用した。一人の被験者が実験を完了するまでの時間は5分であった。被験者は椅子に座り、机の上にiPadが置かれた状態で操作した。

### 6.8 実験 2 の手順

くるみるを用いた操作への指示：実験のアプリケーションを立ち上げると、開始点が iPad 上に表示された。リングの中心が開始点と一致するように被験者がリング型物理オブジェクトを iPad 上に置いたとき、3次元物体の上底の断面図がリングの内側に表示された。リング型物理オブジェクトを時計回りに回転させると、3次元物体を切断する断面画像が移動する。断面画像が移動すると3次元物体の形状によって3次元物体の断面図が移動し、サイズも変化する。この断面図の移動に対して、被験者はリングの内側に断面図が存在するように受動的に位置を合わせていく。3次元物体の断

面画像が3次元物体の下底に到達すると自動的にアプリケーションが終了された。

指を用いたマルチタッチ操作方式：実験のアプリケーションを立ち上げると、開始点と仮想的な枠が枠の中心と開始点が一致するように表示された。指が開始点に触れると、3次元物体の上底の断面図が仮想的な枠内に表示された。二本の指でピンチアウトすることで3次元物体を切断する断面画像の位置が移動する。断面が移動すると3次元物体の形状に応じて3次元物体の断面図が移動し、サイズも変化する。この断面図の移動に対して、被験者は仮想的な枠の内側に断面図が存在するように受動的に位置を合わせていく。3次元物体の断面画像が3次元物体の下底に到達すると自動的にアプリケーションが終了された。

### 6.9 実験 2 の結果

図 10 に、両方式における平均の操作時間を示す。結果として、くるみるを用いた方が操作時間を短くした。くるみるを用いた操作のときに、リング内側に3次元物体の断面図が存在するように、全被験者がリング型物理オブジェクトを操作できた。一方でマルチタッチ操作のときに、仮想的な枠の中に3次元物体の断面図が存在するよ

うに、12人中4人の被験者が枠内の画像を操作できた。

次に、ISO9241-9で規定された評価項目を用いて、両操作方式に対する被験者の主観評価を実施した結果を図11に示す。項目ごとにWilcoxonの順位和検定を実施したところ、質問1から7、及び12から13で有意差が確認された（項目3, 12, 13は $p<0.01$ , それ以外は $p<0.05$ ）

## 7. 考察

タスク1に関して、両方式の成功率は100%であり有意差は確認されなかったが、すべてのターゲットサイズの条件において、くるみるを用いた方が有意に速いことが確認された。加えて、主観評価の13項目中9項目で有意差が確認され、すべてくるみるの方がよい印象であった。同様にタスク2に関して、くるみるにおいて全被験者が枠の内側に3次元物体の断面図を存在させながら操作できたが、マルチタッチ操作において仮想的な枠の内側に3次元物体の断面図を存在させながら操作できたのは4人であった。加えて、タスクの操作時間もくるみるを用いた方が有意に速いことが確認された。さらに主観評価の13項目中9項目で有意差が確認され、すべてくるみるの方がよい印象であった。以上のことから、タスク1及びタスク2に関してくるみるでは、マルチタッチ操作以上の高い操作性が得られると結論づけることができる。

リング型物理オブジェクトを用いたタブレット操作の特徴を述べる。タスク1及びタスク2ともに、リング型物理オブジェクトを開始点に置いた後、並進操作と回転操作が併用された。タスク1においてターゲット位置もしくはターゲットサイズのどちらかが先に合わさった時、並進操作及び回転操作の併用から回転操作のみもしくは並進操作のみに滑らかに切り替わったことが確認された。またはタスク2において画面に表示された3次元物体の断面図のサイズに応じて並進操作及び回転操作を巧みに併用していることが確認された。このように、状況に応じた操作が可能であったのは、指がロックされている状態で、手首、肘及び肩が連動することによって滑らかに操作を切り替えかつ各操作を正確に速く行えたからと考える。リング型物理オブジェクトの指の把持は親指と人差し指、親指と中指もしくは親指、人差し指及び中指によって行われた。

マルチタッチ操作の特徴を述べる。タスク1に関して指が開始点に触れた後、11人の被験者が人差し指で画像を並進移動させ、ターゲットの位置を合わせた後に、親指と人差し指を用いてピンチアウト・インによってターゲットのサイズを合わせるという操作の流れであった。このとき、ピンチアウト・インを行っているときに親指と人差し指を同じ距離だけ最初に触れた位置から移動させることは困難であり、画像の中心点がずれるという傾向が確認された。その結果、ターゲットの位置あわせとターゲットのサイズあわせを交互に繰り返し行うことになり、操作時間が長くなった。スマ

ートフォンのブラウジングのようなケースであれば、文字の見にくさ及びリンクのタッチしにくさを解消するためにピンチアウト・インを用いるが、そこまで精度が必要でなかった。本実験のように精度を求めるタスクには操作しづらいことが客観的及び主観的評価から確認された。タスク2に関しても奥行き操作をしているときに仮想的な枠の位置が変わってしまい、3次元物体の断面画像が枠からはみだすケースが多かった。1人の被験者は人差し指と中指を用いて二本の指を接触させた状態で、画像の並進操作及び拡大・縮小操作を行った。人差し指と中指を利用することで、同じ距離だけ最初に触れた位置から指を開くもしくは閉じる動作を行った。しかし、完全に二本の指の動きの同期がとれず困難であった。

本方式とマルチタッチ操作の身体の使い方の違いは奥行き操作に使われた身体の部位である。つまり、本方式であれば、手首の回転操作が使われ、マルチタッチ操作であれば、二本の指が使われた。二つの動きで一つの操作を行う場合、二つの動きの同期がとれないと精度の高い操作ができない。ゆえに、両方式の操作性の違いはこの影響が一つの原因と考えられる。

3次元空間上の物体が3次元方向に移動しているとき、その物体を枠の内側に存在するように追跡し続けるようなタスクにおいてもくるみるの方がマルチタッチ操作よりも操作性が高いと推測する。このタスクにおいて、2次元空間上の位置合わせだけでなく、奥行き方向の操作もともに受動的な操作が行われる。ゆえに、このタスクは並進操作及び奥行き操作を同時に滑らかに行う必要がある。タスク1及びタスク2の前述したように、本方式であれば、並進操作と回転操作を同時に滑らかに行えるので、3次元空間上の物体の追跡もマルチタッチ操作に比べて容易に行えると考えられる。

実験で用いたシステム構成の問題について述べる。iPadは接触した導電部の面を点として検出するので、導電部の大きさ分の画素数だけ位置検出がずれる可能性がある。また、iPadは導電部が移動したときの電場の変化をイベントとして導電部の位置検出を行うが、微小な導電部の動きに関してイベントが発生しないときが生じる。これらの問題はハードウェアと位置検出アルゴリズムに影響を受けるので、iPadよりもより繊細なセンサをもつハードウェアが必要となる。また、画像を選択し、画像の位置、サイズ及び方向を合わせるときに、操作するリング型物理オブジェクトのサイズによって画像の操作範囲が画面よりも小さくなるというデメリットがある。タスクに応じてリング型物理オブジェクトのサイズを変更する必要がある。

## 8. おわりに

本稿では、枠型物理オブジェクトをくるっと回して情報を見る操作方式「くるみる」を提案した。本方式の特徴を述べた上で、タブレットのように画面が小さい領域での操作性に関する実験を行った。その結果、本方式を使うほうが、マルチタッチ操作よ

りも高い操作性をもつことを確認した。また、両方式の操作時の身体の使い方の違いについて述べた。

今後は両方式の操作時の身体の使い方に関してモーションキャプチャなどによるより客観的な分析を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) SOCIALIZED SOFTWARE, <http://socializedsoftware.com/2010/08/02/diy-ipad-stylus/>
- 2) Make: technology on your time, <http://blog.makezine.com/archive/2010/05/collins-lab-diy-ipad-stylus.html>
- 3) GEARZAP.COM, <http://www.gearzap.com/ipad-accessories/ipad-stylus.html>
- 4) iCrate, <http://www.icreatemagazine.com/featured/i-want-one-of-these-fling-game-controller-for-ipad/>
- 5) i-Accessorise, <http://www.i-accessorise.co.uk/igloves-touch-screen-gloves.html>
- 6) Hacker's Café Blog, <http://blog.hackers-cafe.net/2010/05/muroto-tangible-figure-as-controller.html>
- 7) Exciting Touch Screen, <http://spike5000.com/>
- 8) Neng-Hao Yu, et al., TUIC: Enabling Tangible Interaction on Capacitive Multi-touch Display
- 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) Ishii, H.: Tangible Bits: Beyond Pixels, TEI'08, pp. xv-xxv(2008).
- 11) Rekimoto, J.: SmartSkin: an infrastructure for free-hand manipulation on interactive surfaces. In CHI'02, April 20-25, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 113-120(2002).
- 12) Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology. UIST '01, Orlando FLA, pp. 219-226(2001).
- 13) 宮本 三郎, 中野 敏剛, 西村 智彦, 佐藤 誠之, 石鞍 謙一郎: 静電容量結合方式による高透過タッチパネルの開発.
- 14) Weiss, M., Wagner, J., Jennings, R., Jan-sen, Y., Khoshabeh, R., Hollan, J.D. and Borchers, J.: SLAPbook: Tangible Widgets on Multi-touch Tables in Groupware Environments. TEI'09, 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. CHI'09.
- 16) Kobayashi, K., Hirano, M., Narita, A. and Ishii, H.: A Tangible Interface for IP Network Simulation. CHI'03, March 31-April 4, Seattle, WA, USA, pp. 800-801(2003).
- 17) Kobayashi, K., Narita, A., Hira-no, M., Kase, I., Tsuchida, S., Omi, T., Kakizaki, T. and Hosokawa, T.: Collaborative Simulation Interface for Planning Disaster Measures. CHI'06, Montréal, Québec, Canada, pp. 977-982(2006).
- 18) Lucchi, A., Jermann, P., Zufferey, G. and Dillenbourg, P.: An Empirical Evaluation of Touch and Tangible Interfaces for Tabletop Displays. TEI'10, pp. 177-184(2010).
- 19) Hancock, M., Hilliges, O., Collins, C., Baur, D. and Cpendale, S.: Exploring Tangible and Direct Touch Interfaces for Manipulating 2D and 3D Information on a Digital Table. ITS'09, Canada, pp.77-84(2009).
- 20) Tuddenham, P., Kirk, D. and Izadi, S.: Gras-pables revisited: Multi-Touch vs. Tangible Input for Tab-letop Displays in Acquisition and Manipulation Tasks. CHI '10, April 10-15, Atlanta, Georgia, USA, pp. 2223-2232(2010).
- 21) Spindler, M., Stellmach, S. and Dachselt, R.: PaperLens: Advanced Magic Lens Interaction Above the Tabletop. ITS'09, November 23-25, Banff, Alberta, Canada, pp. 69-76(2009).
- 22) Wu, A., Reilly, D., Tang, A. and Mazalek, A.: Tangible Navigation and Object Manipulation in Virtual Environments. TEI'11, January 22-26, Funchal, Portugal, pp. 37-44(2011).
- 23) Izadi, S., Hodge, S., Taylor, S., Rosen-felf, D., Villar, N., Butler, A. and Westhues, J.: Going Beyond the Display: A Surface Technology with an Electronically Switchable Diffuser. UIST '08, October 19-22, Monterey, California, USA, pp. 269-278(2008).
- 24) Park, J. and Kim, M.: Interactive Display of Image Details using a Camera-cupled Mobile Projector. In IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems, pp. 1-4(2010).
- 25) Yu, N., Chan, L., Cheng, L., Chen, M.Y. and Hung, Y.: Enabling Tangible Interaction on Capacitive Touch Panels: UIST '10, October 3-6, New York, New York, USA, pp. 457-458(2010).
- 26) Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Pangaro, G.: Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces. CHI'01, March 31-April 4, Seattle, WA, USA(2001).
- 27) Underkoffler, J. and Ishii, H. Urp: a luminous-tangible workbench for urban planning and design. In CHI'99, pp. 386-393(1999).
- 28) Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K.: PhotoelasticTouch: Transparent Rubbery Tang-ible Interface using an LCD and Photoelasticity. UIST '09, October 4-7, Victoria, British Columbia, Canada, pp. 43-50(2009).
- 29) Kakehi, Y. and Naemura, T.: UlteriorScape: Opt-ical Superimposing on View-Dependent Tabletop Display and Its Applications. SIGGRAPH'08, Los Angeles, California, August 11-15(2008).
- 30) Kakehi, Y. and Naemura, T.: UlteriorScape: In-teractive Optical Superimposition on a View-Dependent Tabletop Display. 2008 IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer System (TABLETOP), 2008, pp. 189-192(2008)
- 31) Bier, E.A., Stone, M.C., Pier, K., Buxton, W. and DeRose, T.D.: Toolglass and Magic Lenses: The See-Through Interface. SIGGRAPH'93, pp. 73-80(1993).
- 32) Fitzmaurice, G.W., Ishii, H. and Buxton, W.: Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Inter-faces. CHI '95, May , pp. 442-440(1995).
- 33) Hodges, S., Izadi, S., Butler, A., Rrus-temi, A. and Buxton, B. ThinSight: Versatile Multi-touch Sensing for Thin Form-factor Displays. UIST'07.
- 34) Lee, S.K., Buxton, W. and Smith, K.C.: A multi-touch three dimensional touch-sensitive tablet. In CHI'85, October 7-10, Newport, Rhode Island, USA, pp. 259-268(1985).
- 35) Fitzmaurice, G.W. and Buxton, W.: An Empirical Evaluation of Graspable User Interfaces: towards specia-lized, space-multiplexed input, Atlanta, Georgia, USA.
- 36) ISO9241-9: Ergonomic design for office work with visual display terminals (VDTs). Part 9: Requirements for non-keyboard input devices, International Standardi-zation Organization (2000).