

カーボンコピーメタファを用いた トラックパッド入力モード切替え技法

池松 香^{1,2,a)} 椎尾 一郎^{1,b)}

受付日 2016年7月21日, 採録日 2017年2月9日

概要: 一般的な PC に装備されたトラックパッドでの手書きの文字入力やイラスト描画は, スマートフォンやタブレット PC での入力に比べて, 操作に時間を要する. これは後者においては, 入力面座標が画面座標に 1 対 1 対応する絶対座標系による入力であるのに対し, 前者はマウスと同じく指の移動量をポインタの移動量に対応させた相対座標系を基準とした入力方式だからである. 本論文では, トラックパッド入力においてこれら 2 つの入力方式を直感的に切り替えるインタフェースである, カーボンコピーメタファを利用したトラックパッド用対話技法を提案する. 本手法では, トラックパッドからの入力を絶対座標での入力として扱う小領域を PC 画面上に設定する. カーボンコピーメタファは, この領域を手元にある“カーボン紙片”と見なし, 非利き手でカーボン紙片の移動と固定のモード切替えを実行し, 利き手で移動と入力を行う手法である. 本論文では相対座標系および絶対座標系に基づく 2 種類の入力方式に着目し, これらを切り替えるインタフェースを設計し, 作業効率に関する評価実験を実施したうえで, 実際に GUI 環境で利用できるシステムの実装を行った.

キーワード: Multi-Touch, Gesture, Metaphor

Trackpad-based Mode Switching Technique Using Carbon Copy Metaphor

KAORI IKEMATSU^{1,2,a)} ITIRO SHIO^{1,b)}

Received: July 21, 2016, Accepted: February 9, 2017

Abstract: Hand-drawing characters or images using smartphones and tablets is much easier than drawing using track-pads commonly equipped in laptops PCs and desktop computers. This is because tablets are absolute coordinates input devices whereas track-pads are relative coordinates input devices similar to conventional mice. On the other hand, most of modern laptop PCs have track-pads as approximately the same size of smartphone's screen, and they have enough space for hand-writing. We believe that modern track-pads should allow users to do hand-writing easily as smartphones or tablets, if they properly provide an absolute coordinates input mode. This paper proposes a novel input technique that aims to switch between relative and absolute coordinates input methods seamlessly based on the “carbon copy” metaphor. We display a small workspace (“carbon copy area”) on a PC screen that corresponds one-to-one with the handy trackpad. The user can input hand-written characters or images using absolute coordinates input on this virtual carbon copy paper, and move it anywhere a user likes using relative coordinates. Our technique allows a user to call both absolute and relative coordinates inputs and use the appropriately with arbitrary timing. We developed a desktop application software to utilize this technique in a realistic GUI environment based on user evaluation.

Keywords: Multi-Touch, Gesture, Metaphor

1. はじめに

近年スマートフォンやタブレット PC, ペンタブレット, トラックパッドなど, タッチサーフェスによる入力方法は一般的なものになった. 現在利用されているタッチサーフェスには, 相対座標系を使った入力と絶対座標系を使っ

¹ お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科
Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu
University, Bunkyo, Tokyo 112-8610, Japan

² 日本学術振興会特別研究員
JSPS Research Fellow, Chiyoda, Tokyo 102-8472, Japan

a) ikematsu.kaori@is.ocha.ac.jp

b) siiio@acm.org

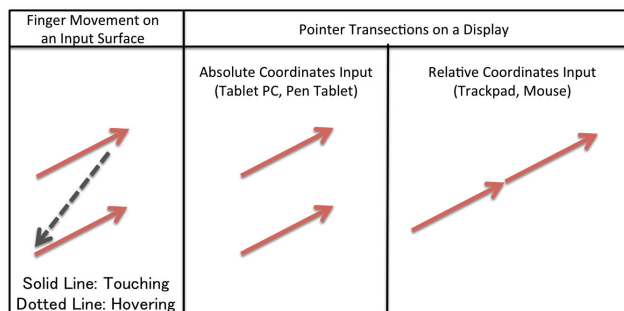


図 1 人の入力（左）と、それに対応する絶対座標入力方式および相対座標入力方式の表示面でのポインタの軌跡

Fig. 1 Input method: input by a finger (left), relative coordinates (middle), and absolute coordinates (right).

た入力の 2 種類の方式が存在する。相対座標系を用いた入力は、マウスによる入力と同様の、カーソルの現在位置からの移動差分を伝える方法である。トラックパッドはマウスと同様に相対座標系を用いており、ユーザがタッチしつつ指を動かすと画面上のポインタが指の移動量に対応して移動する。ユーザが指を持ち上げて元の位置に戻すことを繰り返し、あるいはシステムがポインタの移動に擬似的な加速度を加味することで、入力面が小さく物理的に小さい動作の入力しかできない機器であっても、大きい画面を比較的容易に操作することができる [5]。一方、絶対座標系を用いた入力はスマートフォンやタブレット PC、ペンタブレットなどによる入力と同様の、入力面座標が画面座標に 1 対 1 対応する方法である。この入力方法は、実世界においてペンで紙に絵や文字を書く際のペン先の動きと同様の動きを指先で行うため、手書きの文字・図形入力や画像編集の切り抜きなどの作業をより簡単に行うことができると考えられる。

我々はこの相対座標系および絶対座標系を用いた 2 種類の入力方式に着目し、新たな入力インタフェースの設計を行った。図 1 は相対座標入力方式と絶対座標入力方式による表示面でのポインタの動きの違いを表したものである。PC でこのような絶対座標のポインティングを容易に行うには、ペンタブレットなどの特殊な入力装置を必要とするが、トラックパッドなどにおいても絶対座標による入力を提供すれば、手書き文字や図形・画像操作が容易になると考えられる。しかし、大型のディスプレイが利用される PC 環境において、入力面と画面サイズの隔たりが大きいと、それぞれの座標を全対応させ指の動きが画面上に大きく拡大されることになり、細かい操作が困難になることが知られている [1]。トラックパッド面に対応して絶対座標入力できる小領域を画面上に設定し、その領域にだけ手書きの文字や絵を書き込めるようにすれば、指の移動量とポインタの移動量が同程度になり、この問題は解決できると著者

らは考えた。そのためには、入力用小領域を画面の中に設定したり移動させたりするための使いやすいインタフェースを提供する必要がある。一方で、メニュー選択やウィンドウ操作などの一般の GUI 操作をトラックパッドで行う場合は、現行の相対座標入力が優れていると筆者らは考える。前述したように、指を持ち上げて戻す動作や擬似的な加速度機能により大きな移動量を達成しつつ、操作対象の近辺では解像度の高い細かい操作が可能だからである。

そこで本研究では、デスクトップ PC やノート PC など、相対座標入力を基準とする操作方法のデバイス上で、(1) 相対座標入力と絶対座標入力の切替えと、(2) 絶対座標入力エリアの移動と入力を直感的に切り替える手法として、カーボンコピーのメタファを利用したインタフェースを提案する。

本方式では、ユーザが手書き文字や絵の入力などの絶対座標入力を必要とした際に、画面上に仮想的な“カーボン紙片”を表示する。ユーザは、両手のマルチタッチ操作により、入力したい領域へこのカーボン紙片を移動したり、カーボン紙片の上に描画をしたりすることができる。また、近年ではタッチ入力を受けつける、画面と入力面が一体化している PC が販売されてはいるものの、画面サイズが大きくなるとタッチ入力のために物理的に大きい動作を要するという問題がある。提案手法は、絶対座標入力と相対座標入力を任意の場面で呼び出して、目的に合わせて 2 つの入力方法の利点を活かすことを目指す。

2. カーボンコピーメタファ

本論文では、PC のトラックパッド操作において相対座標モードと絶対座標モードを提供し、これらを直感的に操作する方式として、事務作業で使われるカーボンコピーをメタファにしたインタフェース手法を提案する。カーボンコピーは事務作業において書類の間にカーボン紙を挟み、筆圧により下の紙に複写する手法である。提案方式において通常のトラックパッド操作は、従来方式と同様の相対座標モードで機能する。一方、ユーザが非利き手でタッチ面に触れると、触れている間はポインタの座標を中心として仮想的な“カーボン紙片”が現れる。これは、コンピュータ画面内のデスクトップ上に置いたカーボン紙片のメタファである。実世界のカーボン紙片は、指で軽く押さえて動かすことで、机上を移動させることができる。また指で強く押さえて固定することで、カーボン紙片への描画を下の書類に転写することができる。この動作をベースとして、以下のインタフェース手法を提供する。すなわち、非利き手指のタッチで現れたカーボン紙片は、非利き手指 1 本でタッチされている間、あたかも机上で固定されていないカーボン紙片であるかのように、利き手指のドラッグ操作で動か

ることができる．さらにユーザが非利き手の2本指でタッチ面に触れると，仮想的なカーボン紙片はデスクトップ画面に固定され，この下のオブジェクトに対して，絶対座標による操作が可能になる．つまりカーボン紙片の下に図を描くことができるオブジェクトがあれば，トラックパッド上での利き手の描画操作で手書き文字や図を描くことができることを意味する．以上により，トラックパッド操作の相対座標モードと絶対座標モードの切替え操作，さらには，絶対座標モードにおいて描画対象となる画面領域の移動操作を，直感的に行うことができる．

2.1 予備実験

本システムでは，実世界の事務作業でカーボン紙を使うときと同様の動作で，入力領域の移動とそこへの入力作業を実現しようと考えた．なぜなら，限られたエリアのみで絶対座標の入力が可能であり，またそのエリアを任意の場所へ移動することができるインタフェースは，実世界で小さなカーボン紙を画用紙上で動かして記入していく動作のようだと考えたからである．よってカーボン紙を扱うような操作で，絶対座標入力領域の操作を実現するカーボンコピーメタファを採用することにした．

コンピュータ内の仮想のカーボン紙片を操作するインタフェースを設計するにあたり，実世界で人がどのようにカーボン紙を操作しているのかを観察する実験を行った．ここでは，大きな画面の一部に描画可能なエリアが設定された状況を考え，図2のように，大きな画用紙(500 mm×400 mm)と小さなカーボン紙片(130 mm×130 mm)を用いた．被験者には，インクの出ないボールペンとカーボン紙を使って，画用紙の上の左半分に自分の名前(漢字，英字)を，右半分に自由にイラストを描いてもらい，手の動きと道具の扱い方について観察した．タスクの制限時間は特に定めなかった．被験者は大学生および大学院生6名(右利き5名，左利き1名)である．この予備実験は被験者の了承を得たうえでビデオ録画をした．

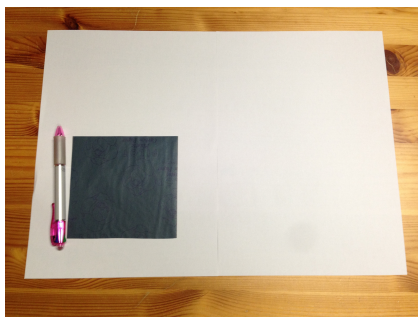


図2 予備実験に用いたカーボン紙と画用紙

Fig. 2 A carbon paper and a drawing paper for preliminary experiment.

2.2 観察結果

図3(1)は，被験者がカーボン紙の上からボールペンを使って下の紙に描画を行う際に，カーボン紙上で触れていた*1非利き手の指の本数と，タスク遂行時間全体に対する指の本数ごとの触れていた時間の割合を表している．指の本数の使用時間割合について分散分析を行ったところ有意な差が確認された($F(1,5) = 8.632, p < 0.001$)．さらに，Ryan法で多重比較を行い，非利き手の3本指で抑えている時間割合の平均は，それ以外の本数の指で抑えている時間割合の平均に対し有意に割合が高いと分かった．

- 3本指・2本指間 ($t(5) = 4.651, p < .001$)
- 3本指・4本指間 ($t(5) = 3.477, p < .005$)
- 3本指・5本指間 ($t(5) = 4.002, p < .001$)

他の組合せに有意差は見られなかった．この結果により，被験者らは非利き手の3本指を用いてカーボン紙を操作する傾向にあることが分かった．さらに非利き手の3本指を用いてカーボン紙を操作している状況をより詳細に観察した．カーボン紙上で記入をする際に，図4に示すように，カーボン紙に触れている3本の指のうち，いずれかの2本の指を広く開きカーボン紙の端に配置し，確保したスペース内に描画を行うという動作が被験者全員に観察された．

図3(2)はタスク時間全体に対する，非利き手のいずれか2本の指を広く開き描画する動作を行った時間割合を示している*2．2本の指を広く開く配置と，開かない配置で描画した時間割合の平均についてt検定を行った．結果は $t(5) = 4.773, p < .001$ であり，有意差が見られた．被験者は描画にあたり，薄いカーボン紙がめくれたり，回転したりすることなく確実に固定するとともに，描画のための領域を多く確保するために，2本の指を広げる配置をとる傾向が特徴的であった．

また，非利き手の3本の指でカーボン紙を押さえる場合でも，そのうち2本の指は接している様子が観察された．よって実質的にはカーボン紙を2点のタッチで固定していたといえる．一方で，カーボン紙を目的の場所へ移動させる動作においては，カーボン紙を押さえる位置，それに使用する手(利き手，非利き手)および指の本数は被験者によって様々に異なっていた．

2.3 インタフェース設計

前節の予備実験に基づき，次のようなインタフェース設計を行った．被験者がカーボン紙上で描画を行った動作に

*1 ここで触れていたという状態は単純に指がカーボン紙の上に乗っている状態を指し，指に力を入れて押さえている状態か否かの区別はしていない．

*2 今回のビデオ分析時には，いずれか2点の指先配置点からカーボン紙の上下辺と平行な直線を引いた際に形成される矩形領域内へ描画しているか否かという基準で判定を行った．

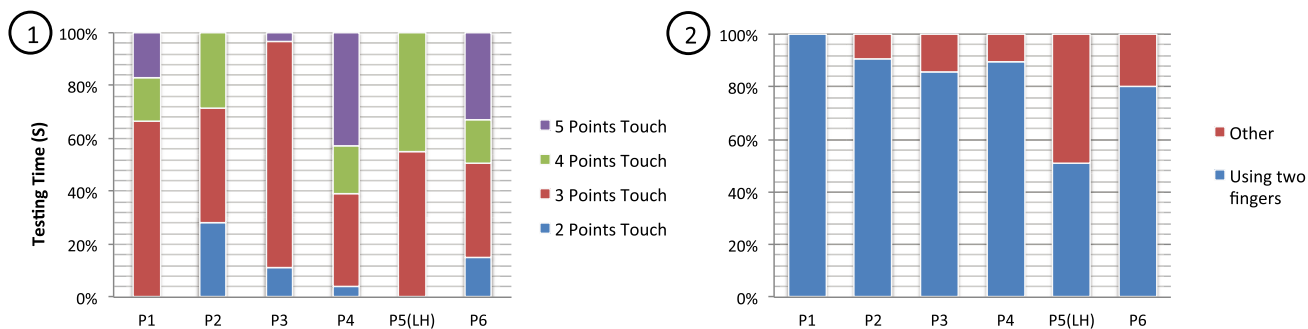


図 3 (1) カーボン紙上で触れていた非利き手の指の本数と、タスク遂行時間に対する指の本数ごとの触れていた時間割合 (%), (2) カーボン紙上で描画する際の手の配置：非利き手のいずれかの指 2 本を広く開く配置, 開かない配置の時間割合 (%)

Fig. 3 Frequency of (1) the number of fingers used to hold the carbon paper. (2) drawing between or outside the fingers used for holding the paper.

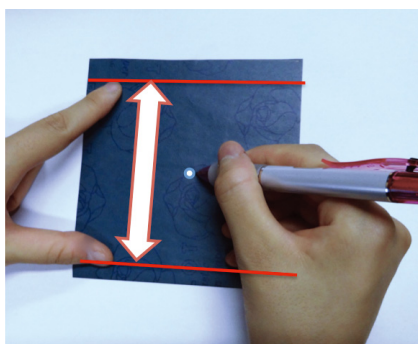


図 4 2 点の指先配置点からカーボン紙の上下辺と平行な直線を引いた際に形成される矩形領域内へ描画している状態を、いずれかの 2 本の指を広く開きカーボン紙へ配置し、確保したスペース内に描画を行っている状態として判定した

Fig. 4 In the case of drawing between any two fingertips, it was regarded as “drawing between open fingers” state.

着目し、タッチサーフェス上で絶対座標入力を行う際のトリガとして“2 点で非利き手側の端を押さえる”という動作を取り入れた。ユーザがトラックパッドで 1 点タッチによるカーソル移動中に、非利き手の 2 本指でトラックパッドを軽く押さえると画面上のポイント部分に、トラックパッドと同じ縦横サイズ比の矩形領域が現れ、その領域内で絶対座標入力を行える。この画面上に現れた矩形の絶対座標入力エリアを以後カーボンコピーエリア、絶対座標入力モードをカーボンコピーモードと呼ぶ。このカーボンコピーエリアでの入力中操作に、押さえていた非利き手の 2 点を離すと、カーボンコピーエリアは画面上から消失し通常の相対座標入力に切り替わる。ここで現れるカーボンコピーエリアは、画面の一部だけをカバーしているので、大きな領域を作業対象とする場合には、領域を移動させる必要がある。これは前節の予備実験でカーボン紙片を画用紙の上で移動させる動作に相当する。本手法は、1 点タッチによる相対座標入力モードでカーソルの移動を行い、2 点

タッチ追加によりカーボンコピーモードを起動し、入力領域の移動とそこへの入力作業をシームレスに切り替えることを実現する。

3. 実装

設計したインタフェースに基づくプロトタイプを、Apple 社の Mac OS X 10.9 アプリケーションとして実装した。

図 5 (左) は、ユーザがトリガエリアをタッチすることで、黒枠で示したカーボンコピーエリアが表示された状態である。さきの実験に対応させると、デスクトップ画面全体が画用紙に、黒枠内がカーボン紙に相当する。

本プロトタイプでは、図 6 のように、トラックパッド上のトリガエリアを 2 本指で押さえることでカーボンコピーエリアを画面上に出現・固定しつつ、入力エリアを 1 本指でタッチすることで、カーボンコピーエリアにペイント入力を行うことができる。トラックパッドの位置座標とアプリケーション内のカーボンコピーエリアの位置座標は 1 対 1 対応しており、絶対座標による入力を行える。トリガエリアを 1 本指のみでタッチしつつ、別の指でカーボンコピーエリアをタッチ操作すると、カーボンコピーエリアが移動し、画面内におけるカーボンコピーエリアの場所を変更することができる。ここで説明した手法は、マルチタッチ入力を想定している。しかしながら、マルチタッチ入力を受け付けないコンピュータにおいても、キーボードの併用により提案手法は可能であると考えた。そこで、同 MacBookPro において、トラックパッドの上部隅に近接する Command・英数または Command・かなキーを領する方法を実装した (図 7)。これは、キーを押下する動作をカーボン紙の端を押さえる動作に見立てるものである。すなわち、Command キーの押下をトリガエリアの 1 点タッチに、Command キーとともに英数またはかなキーを押下することをトリガエリアの 2 点タッチの代替とする。この

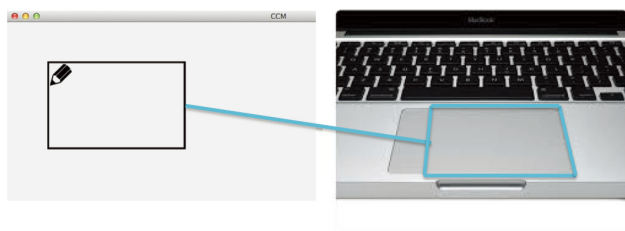


図 5 試作アプリケーション動作例. 黒枠で示したカーボンコピーエリアがトラックパッド入力エリアに対応する

Fig. 5 Black-framed carbon copy area corresponds to the input area on the trackpad.

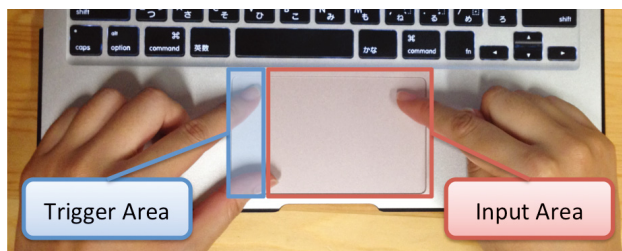


図 6 トラックパッドでの入力面分割 (ユーザが右利きの場合)

Fig. 6 Trackpad divided into two areas. This figure shows the case for a right-handed person.

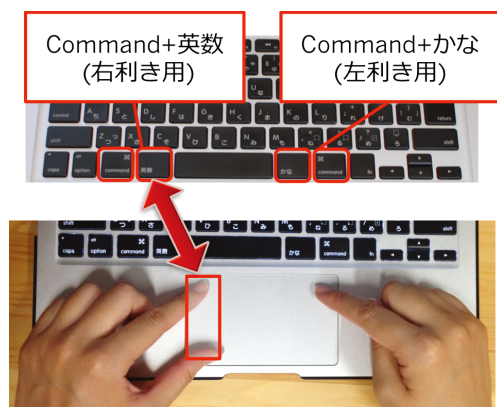


図 7 キーボード入力によるモード切替えで用いるキー

Fig. 7 Keys used for mode switching from a keyboard.

手法の場合, トリガエリアは存在せず, トラックパッド全体が入力エリアとなる. 右利きの被験者は英数キーを, 左利きの被験者はかなキーを用いることを想定した.

3.1 状態遷移

図 8 にトラックパッド上でのジェスチャ入力と本アプリケーションの機能のマッピングを示す. 図中の丸は, トラックパッド上でタッチしている指 (青は固定指, 赤は可動指) を表している. すなわち, State No.1 は 1 本指で入力エリアにタッチし動かす状態を示す. トリガエリアに触れていない状態でユーザが入力エリアにタッチすると, 従来の相対座標入力モードでのトラックパッド操作を提供す

State No.	Fingertip Position on a Trackpad	Snapshot of a Screen	Functional Instruction
1			Moving a Cursor Pointer (Relative Coordinates)
2			Showing a Carbon Copy Area
3			Moving a Cursor Pointer (Absolute Coordinates)
4			Moving a Carbon Copy Area (Relative Coordinates)

●:Moving Fingertip
●:Fixed Fingertip

図 8 Trackpad 上でのジェスチャと提案手法の機能のマッピング

Fig. 8 Mapping between fingertip position on trackpad and CCM function.

る. ユーザが非利き手側の 2 本指でトリガエリアをタッチすると State No.2 に遷移する. このとき, 画面上のポインタ位置にカーボンコピーエリアが表示され, ユーザが利き手側の 1 本指で入力エリアにタッチすることで絶対座標入力が可能となる (State No.3). また, 非利き手の 1 本指でトリガエリアにタッチしつつ入力エリアをドラッグすることでカーボンコピーエリアの画面内移動を行う (State No.4). プロトタイプの実装では入力エリアへのタッチで, カーボンコピーエリアの対応する場所へポインタが移動し, ドラッグで描画を行う. このモードは, 領域の移動のみを可能とする. 以上のように, カーボン紙片操作を想起させる非利き手のタッチでカーボンコピーエリア矩形が現れ, これをしっかりと固定する動作を想起させる非利き手の 2 点タッチでその位置が固定されることで, シンプルで直感的なモード切替えを提供する.

4. 評価実験

提案手法の有効性を検証するために, 作業効率について, 従来の相対座標入力のみによる入力方法と提案手法の入力方法を比較する評価実験を行った.

4.1 評価手法

Apple 社の MacBookPro (13 インチ) 上に, 提案方式による操作を実現するシンプルなペイントアプリケーション (370 mm × 242 mm) を実装し, このコンピュータに組み込まれているトラックパッドを用いて以下の評価実験を行った. 実験により比較するのは下記の 2 手法である.

(1) 提案手法による入力

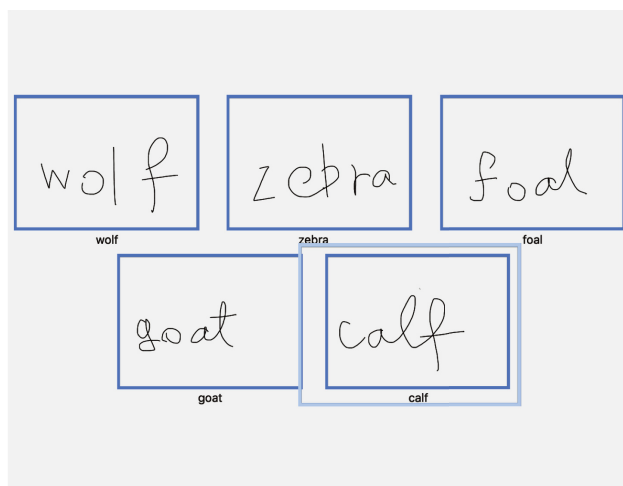


図 9 評価実験用のペイントアプリケーション画面

Fig. 9 Prototype application for the comparison experiment.
Writing task: five animal names in lowercase using five strokes for each word.

(2) 従来の相対座標入力

提案手法による入力とは、前述したカーボンコピーメタファを用いてトリガエリアへの非利き手2点タッチにより絶対座標と相対座標の入力を切り替える手法である。従来の相対座標入力とは、絶対座標と相対座標の入力の切替えを行わず、MacBookProに備え付けられているトラックパッドから通常の相対座標の入力を行う方法である。被験者は、20代から60代の大学院生および会社員（男性2名、女性6名、うち左利き2名）の合計8名である。被験者のうち1名を除きトラックパッドを日常的に使用している。これらの被験者に対して、画面上に配置された5個の長方形（600mm×430mm）の内部に、それぞれ指定された動物の英単語（いずれも合計画数5、小文字）を手書きするタスク（図9）を依頼した。カーボンコピーエリアは700mm×500mmに設定した^{*3}。記入する順番に関しては特に指示しなかった。実験開始前に、筆者がタスクの内容と操作方法を実演しつつ口頭で説明し、その後被験者に5分間以内で、被験者が満足するまで入力の練習を行ってもらった。次にカーボンコピーメタファによる本方式と従来の相対座標入力方式を用いて、このタスクを各10回ずつ行い、タスク遂行にかかる時間を測定した。本実験では、2,000画数（8（被験者）×10（タスク/被験者）×5（単語/タスク）×5（画数/単語））のデータを得た。また、提案手法に関しては、相対座標入力と絶対座標入力の意図しないモード切り替わりの回数（エラー回数）をタスクごとに数えてもらった。8名の被験者（1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8）

^{*3} 英単語を書き込む長方形は、書き込む際の大まかな位置指定のためのものである。この長方形とカーボンコピーエリアを正確に重ね合わせて行うタスクであるという誤解を避けるため、長方形とカーボンコピーエリアのサイズを異なる値に設定した。

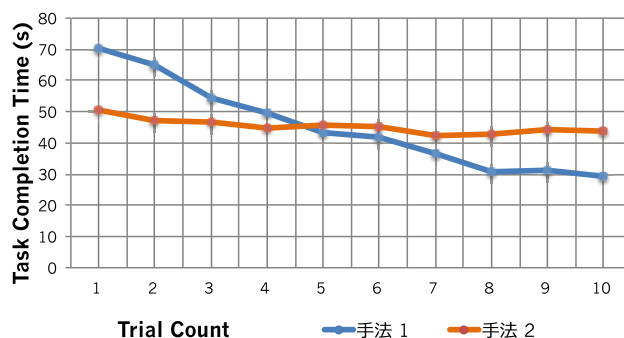


図 10 手法別タスク遂行時間平均

Fig. 10 Mean input completion time for for each technique.

は下記の順番で (1) 提案手法による入力、(2) 従来の相対座標入力によりタスクを行った。これ以降、(1) 提案手法による入力を“手法 1”、(2) 従来の相対座標入力を“手法 2”とする。

- 被験者 1, 2, 3, 4：手法 1 → 手法 2
- 被験者 5, 6, 7, 8：手法 2 → 手法 1

4.2 効率に関する結果と考察

本方式と従来方式によるタスク実行時間の8名の平均値を図10に示す。入力手法ごとのタスク遂行平均時間から、初めは提案手法による入力：70(s)は、従来手法による入力：50(s)に比べ必ずしも速くない。しかし、被験者たちはすぐに各入力手法の使用方法を習得し、提案手法による入力は5試行目から従来手法よりも速くなった。試行回数が進むと最終的（10試行目）に提案手法による入力は平均29(s)で遂行され、14(s)だけ従来手法よりも速く入力できるという結果を得た。また、相対座標入力方式において、タスク遂行時間は初回よりも10試行目の方が短くなっているものの、その差は4(s)であり、提案手法：36(s)と比較し、大きな差異は見受けられない。10試行目に関し対応のあるt検定を行ったところ、 $t(7) = 4.10122$, $p < 0.01$ となり、提案手法によるタスク遂行時間の平均は有意に短かいと分かった。これは被験者が日常的に相対座標入力方式のインターフェースを使用しており操作に慣れているためだと考えられる。一方、それぞれの被験者が行った提案手法のカーボンコピーメタファ入力におけるタスク遂行時間の推移を観察すると、先に行われたタスクより、後に行われたタスクの遂行時間が短くなっていることが分かる。これは、カーボンコピーメタファの操作方法に慣れることで、操作にかかる時間が短縮され、より効率的な入力が可能になった結果だと推察される。以上の実験結果より、本方式は従来の相対座標入力方式よりも効率的であり、短時間の操作で入力方法習得可能であることが示された。

4.3 エラーに関する結果と考察

提案手法の評価実験における、ユーザのエラー回数については、カーボンコピーモードを想定して入力したが相対座標入力モードになっていたケースが20回生じた。逆に、相対座標入力モードを想定して入力し、カーボンコピーモードになっていたケースは発生しなかった。ここで、今回のタスクでのカーボンコピーモードで入力（ドラッグ操作）を行った回数は単語の画数の総和とほぼ同等と考えられる*4ため、2,000画数（8（被験者）×10（タスク/被験者）×5（単語/タスク）×5（画数/単語））に対する20回のエラーは、 $\frac{20 \times 100}{2000} = 1.00$ （%）のエラー率に相当する。これらのエラーは、(1)描画に用いた指がトリガエリアに誤って侵入してしまう、(2)トリガエリアの指を2本中1本離してしまうという2点が原因である。前者に関しては、提案手法の習熟により軽減できると考えている。またトリガエリアを3点タッチしてもカーボンコピーモードを解除しない実装にすることで解決できる。後者に関しては、カーボンコピーエリアが固定（State No.2, 3）/非固定（State No.4）のどちらの状態にあるかがユーザにとって分かりにくいことが原因と考えられる。現在の実装では、2本で押さえていたトリガエリアの指を1本離しても、入力エリアでタッチをしていれば非固定になったカーボンコピーエリアが画面上に表示され続ける。このため、押さえていた2本の指の1本を被験者が意図せず離してしまった場合、固定から非固定に遷移したことに気づけない。これがエラーを引き起こしたと推測される。視覚的なフィードバックにより、カーボンコピーエリアの固定/非固定を被験者に伝えることでこのエラーは低減できると考えられる。

4.4 インタフェースに関するフィードバックと議論

カーボンコピーのメタファの適用に関しては、「実世界の道具からイメージしやすく、理解しやすいインタフェースである」、「普段からペンタブレットなどでもフレーム部分を押さえて絵を描く癖があるため馴染みやすい」、などの肯定的な意見が得られた。一方で入力方法に関しては「キーボードをモード切替えのスイッチとし、片手で操作をしたほうが入力エリアを広く使えるし手が疲れない」、「爪が伸びていると使いにくい」などの意見も得られた。

提案手法は、非利き手をモード切替えのためのスイッチとして利用する。評価実験でのタスクのような、ポインティングのみを行うタスクの場合、入力モードを瞬時に切り替えられるというメリットがあり、従来の相対座標入力と比較し効率的な操作が可能である。

しかし、キーボードでのタイピングとポインティングを

交互に行うようなタスクにおいては、利き手に加えて、非利き手もホームポジションとトラックパッド間で往復させる必要がある。そのためユーザは、非利き手を動かす手間に見合うだけのメリットが得られる場面で、本方式を使うことになるであろう。

また、非利き手の2点指でトラックパッドを押さえ続ける動作がユーザの身体的な疲労を招く可能性がある。

5. 常駐アプリケーションの実装

カーボンコピーメタファの機能を実現するプログラムを専用アプリケーションとしてだけでなく、より汎用な使用を目的とし、Mac OS X 10.11上で動作する常駐（ステータスバー）アプリケーションとして実装した。基本的な動作は図8に示すとおりであるが、追加機能の導入と前述の評価実験から得た知見に基づき改良を行った。本アプリケーションを起動し、カーボンコピーモードに切り替えると図11（中）のように、画面内のカーソル位置に半透明の矩形領域が出現する。この矩形領域内で行う絶対座標入力はデスクトップ環境のGUIやウィンドウに対して実行可能である。

5.1 エラー率低減のための改良

まず、トリガエリアに誤って描画に用いた指が侵入してしまう動作に起因するエラーに関して行った改良について述べる。トリガエリアの幅を1mmに縮小し、非利き手の2本指でトラックパッドのエッジ部分にかかるように押さえることでカーボンコピーモードを起動するよう変更した（図12）。トラックパッドのエッジ部分という物理的なフィードバックのある箇所を利用することで、これまでガイドのなかったトリガエリアを明示した。さらに、描画中の指がエッジ部分に触れてもカーボンコピーモードが解除されない設計とした。

次にトリガエリアの指を誤って離してしまう動作に起因

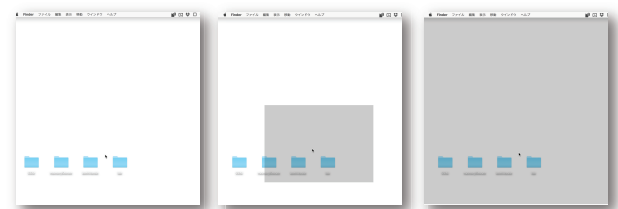


図11 通常の相対座標入力モード（左）、カーボンコピーモード（トラックパッドサイズのカーボンコピーエリア）（中）、カーボンコピーモード（全画面サイズのカーボンコピーエリア）（右）

Fig. 11 Usual relative coordinate input mode (left), Proposed carbon copy method of trackpad size mode (middle), and full screen size mode (right).

*4 今回は「z」を1画の文字としてドラッグ操作数を算出したが、これを2画で書く被験者もいた。



図 12 常駐アプリケーションにおけるトリガエリア (エッジ部分)

Fig. 12 Rescaling trigger area to 1.0 mm on a trackpad.

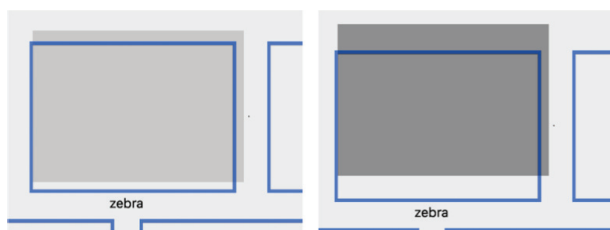


図 13 カーボンコピーエリアの非固定 (左)/固定 (右) の視覚的フィードバック

Fig. 13 Visual effects of the Carbon Copy Mode.

するエラーに関して行った改良について述べる。カーボンコピーエリアの固定/非固定の状態を視覚的に伝える機能を導入した。カーボンコピーエリアが移動可能な状態 (State No.4) ではカーボンコピーエリアのアルファ値を低く ($\alpha = 0.15$)、カーボンコピーエリアが固定されている状態 (State No.2, 3) ではアルファ値を高く ($\alpha = 0.40$) 設定することで、ユーザにカーボンコピーエリアの状態を伝えるものである (図 13)。

5.2 エラー率低減のための改良に関する評価

上記の改良により、エラーが低減されるか否かの評価を行った。実験のタスク内容および実験のセットアップは 4 章で述べた内容と基本的に同じである。差異としては、トリガエリアがトラックパッドの非利き手側のエッジ部分であること、カーボンコピーエリアの固定/非固定の状態をカーボンコピーエリアのアルファ値 (2 値) で表現していることを説明し、提案手法によるタスクのみを行ってもらった。被験者は、20 代の大学院生および会社員 (女性 3 名、うち左利き 0 名) の合計 3 名である。

本評価で意図しないモード切替えのエラーは 2 回発生した。エラー率はカーボンコピーモードで入力 (ドラッグ操作) を行った回数: 750 回 (3 (被験者) $\times$ 10 (タスク/被験者) $\times$ 5 (単語/タスク) $\times$ 5 (画数/単語)) に対し $\frac{2 \times 100}{750} = 0.27$ (%) だった。エラー率低減のための改良前 (1.00%) と比較しエラー率は 0.73 (%) 減少した。ま

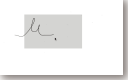
State No.	Fingertip Position on a Trackpad	Snapshot of a Screen	Functional Instruction
5			Scaling a Carbon Copy Area
6			Scaling a Carbon Copy Area to fit a forefront window

図 14 常駐アプリケーションにおける追加機能

Fig. 14 Additional function for resident application.

たカーボンコピーエリアの固定/非固定の状態をカーボンコピーエリアのアルファ値で示す視覚的効果に関し、分かりにくい/分かりやすいの二択でアンケートをとったところ全員が分かりやすいと回答した。この実験で発生した 2 回のエラーは、被験者 1 名の爪が長かったため非利き手のタッチ認識がされにくく、カーボンコピーモードが起動されないというものだった。

5.3 追加機能の導入

ステータスバーメニューのオプションメニューの選択により、英数・かなキー押下の動作からもモード切替えを行える設計とした。さらに、カーボンコピーエリアを拡大・縮小する機能を追加した。この機能は入力エリアでの 2 点上下ピンチで起動する (図 14)。たとえば、画面全体まで拡大すると図 11 (右) のように画面全体を覆う半透明の矩形領域が現れる。この状態でトラックパッドと画面の座標は 1 対 1 に対応する。この機能により、ユーザは大画面を手元の小さいトラックパッドで操作するような状況であっても、一瞬で端から反対側の端までカーソルを移動し、あるいは画面の四隅にカーソルを運びホットコーナに登録している動作を実行することが可能となる (State No.5)。また、トラックパッド手前側の 2 点のコーナをタッチすることでアクティブなウィンドウに横幅を合わせ、トラックパッドのアスペクト比を保ったまま拡大縮小する機能を追加した (State No.6)。拡大されたカーボンコピーエリアでの入力後、(State No.5) の操作によりカーボンコピーエリアを縮小、もしくは従来の相対座標入力へ切り替えることで、微細なカーソル移動による入力が必要とされる作業へ移行することが可能である。

6. 関連研究

本研究の特徴として次の 2 点があげられる。

- (1) ポインティング操作時のモード切替えを提供するインタフェースであること
- (2) 両手を用いるインタフェースであること

そこで、本セッションはこの 2 点を切り口に先行研究を

紹介し本研究と比較する。

6.1 ポインティング操作時のモード切替

文献 [6], [9], [15], [16] は相対座標と絶対座標による入力の切替えを実現している。文献 [9] はスマートフォンを用い、画面上での瞬間的なタップを絶対座標の入力として、ドラッグ入力を相対座標の入力として扱うことで入力切替を行う。文献 [6] はセンサ付きのペンデバイスを用いて、文献 [16] は深度カメラとジェスチャ入力を用いて、文献 [15] はグローブ型のモーションキャプチャデバイスを用いて壁面サイズのスクリーン上で相対座標と絶対座標の入力切替を行う。提案手法もこれらと同様に相対座標と絶対座標による入力の切替えを提供する手法であるが、デバイスとして広く普及しているトラックパッドを対象としている。また、特別なセンサやデバイスを追加する必要なく実現可能であり、またユーザごとの利き手の違いにも柔軟に対応できるので実用的である。提案手法と同じく相対座標と絶対座標による入力の切替えをトラックパッド用いて実現したユーティリティツールに Inklet^{*5}がある。Inklet は事前に定義したショートカットキーにより絶対座標と相対座標の切替えを行う。提案手法は、実世界の道具の扱い方を参考にしたインタフェースデザインをしており、ユーザに理解しやすいインタラクション手法となっている。

文献 [3], [4], [7] は CD (Control Display) 比を切り替える手法である。LOP-cursor [4] は、壁面ディスプレイに対しスマートフォンをレーザーポインタのように操作することで相対座標のポインティングを行う。そしてスマートフォンの画面上をタップすることで壁面ディスプレイ内に小さい矩形領域を表示し、その内部でのポインティングに切り替える。文献 [7] は、非利き手の 2 本指の間を横切るように利き手の 1 本指をドラッグさせる動作により、CD 比を動的に変更可能なポインティングモードへの切替えを行う。文献 [3] はタッチパッドのエッジ部分に取り付けたセンサへ指が触れている際に CD 比を高く、離れている際に CD 比を低くするというモード切替えを行う。提案手法においても、カーボンコピーエリアのサイズ切替えにより CD 比を調整可能であるが、相対座標のポインティングではなく、絶対座標のポインティング操作時を想定している点において異なる。

6.2 両手インタフェースによる入力モード切替

文献 [2], [8], [10], [12], [13], [14] は片手で主要な操作を行い、もう一方の手で補助的にモードを切り替える両手による操作インタフェースである。RodDirect [10] では、デバ

イスに格納されているタッチペンの回転や抜き差しする操作でドラッグやスクロールの切替えを行う。Sadana らはタブレット PC 上での非利き手のタッチを修飾キーとして扱い、画面上でデータを選択する際の範囲や基準を変更する手法を提案した [13]。Toolglass and Magic Lenses [2] は非利き手でトラックボールマウスを操作することで画面上の矩形領域を移動し、利き手のマウスで矩形内のメニューを選択・切替えを行う。FlickBoard [14] は静電容量センサを搭載したキーボード上で、タイピングとポインティングを使い分ける。ToolStone [12] はキューブ型の入力補助デバイスを非利き手に持ち回転や面の選択により、利き手側の入力のモードを切り替える。Gunslinger [8] はモーションキャプチャデバイスを用い、自然に下ろした状態の片手のジェスチャ入力と、もう片手による壁面ディスプレイへのタッチ入力にそれぞれ機能を振り分けた。ここであげた手法は、いずれも入力方法の判別に外付けのハードウェアやカメラ、センサを搭載したペンデバイスなどを必要とするが、提案手法ではこれらの特殊なハードウェアがいっさい不要な手法を目指した。特殊な装置を必要としない研究では ThumbSense [11] があげられる。文献 [11] は、片手の指がノート PC のタッチパッドに触れることで、キーボードのホームポジションから手を離さずにモードの切替えを行う。

このように、様々なモード切替えの方法/モードの組合せが提案されてきたが、本研究のように、デスクトップ PC やノート PC など、相対座標入力が基本になるデバイスにおいて、絶対座標系の入力と相対座標系の入力を切替えをシームレスに行うための研究は類似例がない。

7. まとめと今後の課題

本論文では、カーボンコピーメタファを利用したトラックパッド用の新しい入力技法を提案した。提案手法はデスクトップ PC やノート PC で使用されるトラックパッドのような相対座標入力デバイスに対して、絶対座標入力モードを導入し、2 つの方式による入力・切替えを直感的に行う。提案手法を用いることで、モードを意識することなく自然な動作で 2 つの入力方法を切り替えることが可能となる。2 つの入力方法の長所を目的に合わせて用いることが可能だけでなく、カーボンコピーという実世界のメタファに関連付けられているため、理解しやすく使用方法習得もしやすい、有用性の高いインタフェースであるといえよう。また、本研究では使用に特別なハードウェアやセンサを必要とせず、広く普及しているマルチタッチサーフェスのみで実現可能である点を強調したい。専用のペイントアプリケーションを用いて被験者計 8 名に評価実験を行い、その結果、10 回目の試行で従来手法と比べ平均 14 (s) 速く

^{*5} <https://tenonedesign.com/inklet.php>

入力できることを示した。さらに、実験の考察をふまえてデスクトップ環境に常駐するアプリケーションを構築し、その際入力モード切替え時のエラー率低減のための改善および、より汎用に提案手法を実行できるよう実装を行った。この改善の結果、エラー率は 0.73 (%) 低減されることを確認した。今後は、実用的な常駐アプリケーションとしてより多くのユーザの使用をもとに実用性を検証したいと考えている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (26330219) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Accot, J. and Zhai, S.: Scale Effects in Steering Law Tasks, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '01*, pp.1–8, ACM (online), DOI: 10.1145/365024.365027 (2001).
- [2] Bier, E.A., Stone, M.C., Pier, K., Buxton, W. and DeRose, T.D.: Toolglass and Magic Lenses: The See-through Interface, *Proc. 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '93*, pp.73–80, ACM (online), DOI: 10.1145/166117.166126 (1993).
- [3] Casiez, G., Vogel, D., Pan, Q. and Chaillou, C.: RubberEdge: Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback, *Proc. 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '07*, pp.129–138, ACM (online), DOI: 10.1145/1294211.1294234 (2007).
- [4] Debarba, H., Nedel, L.P. and Maciel, A.: LOP-cursor: Fast and precise interaction with tiled displays using one hand and levels of precision, *3DUI, Billinghamurst, M., Jr., J.J.L. and Lécuyer, A. (Eds.), pp.125–132, IEEE (online), DOI: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/3dui/3dui2012.html#DebarbaNM12> (2012).*
- [5] Douglas, S.A. and Mithal, A.K.: The Effect of Reducing Homing Time on the Speed of a Finger-controlled Isometric Pointing Device, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '94*, pp.411–416, ACM (1994).
- [6] Forlines, C., Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Hybrid-Pointing: Fluid Switching Between Absolute and Relative Pointing with a Direct Input Device, *Proc. 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '06*, pp.211–220, ACM (online), DOI: 10.1145/1166253.1166286 (2006).
- [7] Kuribara, T., Yoshikawa, T., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Handyscope: A Remote Control Technique Using Pull-out Gesture, *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '14*, pp.175–176, ACM (2014).
- [8] Liu, M., Nancel, M. and Vogel, D.: Gunslinger: Subtle Arms-down Mid-air Interaction, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15*, pp.63–71, ACM (online), DOI: 10.1145/2807442.2807489 (2015).
- [9] McCallum, D.C. and Irani, P.: ARC-Pad: Absolute +Relative Cursor Positioning for Large Displays with a Mobile Touchscreen, *Proc. 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '09*, pp.153–156, ACM (online), DOI: 10.1145/1622176.1622205 (2009).
- [10] Miura, M. and Kunifuji, S.: RodDirect: Two-dimensional Input with Stylus Knob, *Proc. 8th Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '06*, pp.113–120, ACM (2006).
- [11] Rekimoto, J.: ThumbSense: Automatic Input Mode Sensing for Touchpad-based Interactions, *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '03*, pp.852–853, ACM (2003).
- [12] Rekimoto, J. and Sciammarella, E.: ToolStone: Effective Use of the Physical Manipulation Vocabularies of Input Devices, *Proc. 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '00*, pp.109–117, ACM (online), DOI: 10.1145/354401.354421 (2000).
- [13] Sadana, R. and Stasko, J.: Expanding Selection for Information Visualization Systems on Tablet Devices, *Proc. 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '16*, pp.149–158, ACM (online), DOI: 10.1145/2992154.2992157 (2016).
- [14] Tung, Y.-C., Cheng, T.Y., Yu, N.-H., Wang, C. and Chen, M.Y.: FlickBoard: Enabling Trackpad Interaction with Automatic Mode Switching on a Capacitive-sensing Keyboard, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp.1847–1850, ACM (online), DOI: 10.1145/2702123.2702582 (2015).
- [15] Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Distant Freehand Pointing and Clicking on Very Large, High Resolution Displays, *Proc. 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '05*, pp.33–42, ACM (online), DOI: 10.1145/1095034.1095041 (2005).
- [16] 村福井辰哉, 山本豪志朗, 武富貴史, Sandor, C., 加藤博一: 複数大画面に対する絶対及び相対座標指定に基づくジェスチャ入力手法, インタラクション 2015 論文集, pp.691–696 (2015).



池松 香

2015 年 3 月お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。同年より同研究科博士後期課程在籍。2017 年 4 月より日本学術振興会特別研究員 DC2。



椎尾 一郎 (正会員)

1979 年 3 月名古屋大学理学部物理学
科卒業。1984 年 3 月東京工業大学
大学院総合理工学研究科博士課程修了。
同年 4 月日本アイ・ビー・エム株式会
社東京基礎研究所に入社。マルチメ
ディアシステム、オフィスシステム等

のユーザインタフェースの研究に従事。1997 年 4 月玉川大
学工学部助教授を経て、2002 年 4 月教授。2001 年 4 月～
2002 年 3 月ジョージア工科大学客員研究員。2005 年 4 月
よりお茶の水女子大学理学部情報科学科教授。2007 年 4 月
組織変更によりお茶の水女子大学人間文化創成科学研究科
教授、実世界指向インタフェース、ユビキタスコンピュー
ティングを中心に研究。ソフトウェア科学会、ヒューマン
インタフェース学会、ACM 各会員。工学博士。