

ペンユーザインタフェース設計のための ペン操作性の検討

加 藤 直 樹[†] 中 川 正 樹[†]

本論文は、表示一体型タブレットとペンを使用する環境におけるペンの操作性を検討し、ペンの特徴やペン UI を設計するときに考慮すべき点を明らかにする。現状のペン UI の多くはマウス UI で用いられてきた対話技法を流用しており、ペンの良さを引き出しているとはいえない。ペンはマウスとは異なったデバイスであり、ペンにふさわしい UI を構築する必要がある。そこで我々は、ペンとマウスの操作性を比較する実験を行った。実験は、ドラッグングでオブジェクトを移動するタスクと、2つの対象をドラッグングとポインティングで選択するタスクについて行った。その結果、ほとんどの場合ペンはマウスより速く操作できるが、ドラッグングで正確さが要求される操作を行うとき操作回数が多くなること、長い距離をドラッグする操作や、右利きの人の場合、右、右下方向への移動をとまなう操作では操作時間が長くなるという欠点が明らかになった。このことから、右・右下方向へ頻繁に移動する対話技法、たとえば従来のドラッグングで選択するプルダウンメニューなどは、ペンには向かないことが予想される。また、ペンはマウスより、次の操作があらかじめ分かっているとき、操作がより速くできるようになることが示された。

An Investigation into the Usability of a Pen for Designing Pen User Interfaces

NAOKI KATO[†] and MASAKI NAKAGAWA[†]

This Paper investigates the usability of a pen with a display-integrated tablet, explores characteristics of pen and presents guidelines of pen interface design. The majority of present systems with pen interfaces do not exploit the pen's merits, because they have misappropriately carried over interaction techniques from mouse-based interfaces. A pen is different from a mouse and therefore a study into interaction styles, which exploit its merits, is indispensable in designing pen interfaces. We carried out comparative experiments between a pen and a mouse to investigate performances for the tasks of moving an object using dragging, and selecting two targets using dragging and pointing. From these experiments, it was found that the performance of a pen is better than that of a mouse in almost all cases. However, the following weak points with a pen became clear: the number of manipulations is greater in tasks where precision is required; it takes more time for tasks of dragging long distance or moving right and down-right for right-handed people. From these weak points it is expected that current pull-down menus, in which the user moves down right repeatedly using dragging, are not suited to pen interfaces. In addition, the improvement in performance when the user knows the next manipulation with a pen is higher than that with a mouse.

1. はじめに

近年、計算機との対話デバイスとして表示一体型タブレットとスタイラスペンを利用するペンユーザインタフェース（以下ユーザインタフェースを UI と記す）が注目されている。対話デバイスとしてペンを利用することは古くから行われていたが、情報処理の一層の大衆化の流れの中で、キーボードを使わない、使えな

い、または使いたくない利用者・利用目的を対象とする市場の開拓というニーズと、表示一体型タブレットなどの開発というシーズが一躍注目を集めた背景にある。

ペンはマウスやキーボードといった従来用いられてきた対話デバイスに比べると、次の特徴を有している。

- 直接入力が可能であり、図や数式のような2次元オブジェクトの入力に適している。
- ほとんどの人がペンの操作に慣れている。
- あらゆる大きさのハードウェアに適應する。

これらの特徴には、より多くの人がより多様な目的

[†] 東京農工大学工学部電子情報工学科
Department of Computer Science, Tokyo University of
Agriculture and Technology

に利用できる, より使いやすい UI の開発を期待させるものがある. 特に, 携帯性や小型化が重要である携帯型情報機器 (PDA: Personal Digital Assistant) にはキーボードが不適であるために, 研究・開発・商品化されている多くの PDA がペン UI を採用している.

ところが, PDA を除くとペン UI の普及は進んでいない. この原因として, ペンを利用できる既存のアプリケーション (以下, AP) では, ペンを単なるマウスの代わりとしてしか利用しておらず, ペンの利点を十分に引き出していないことがあげられる. 現在最も普及している UI は, マウスによる操作を前提として発展したものである. この操作方法を変更することは, 互換性の問題など難しい面もあるが, コストに見合う十分な付加価値なしにペン UI を導入しようとする利用者は多くない.

マウスとペンはともにポインティングデバイスとして分類できるが, その形状や制御方法はまったく異なっている. 第一に, マウスは入力操作面と表示面が異なる間接制御デバイスであるのに対して, ペンは表示一体型タブレットに対して使用することで直接制御デバイスとなりうる (表示面が一体でないタブレットを使用する場合は間接制御デバイスであるが, 本論文では表示一体型タブレットの使用を前提とする). 第二に, ポインティングを行うための動作もまったく異なり, マウスの場合はボタンを指で押すのに対して, ペンの場合はペン先をタブレット面に押しつける動作を行う. そして第三に, 操作するときに使う筋肉や神経は, マウスに比べより広範囲に及ぶ.

したがって, マウス UI で用いられてきた対話技法をペン UI にそのまま流用することは危険である. もちろん, ペン UI に適応できるものもあるが, 先にあげた特徴を引き出すことができない, あるいは, 逆に不利な面が生じる危険性もある.

これらの点から, ペン UI が成功するには, ペンを単に従来の UI でマウスの代わりとして使うだけではなく, ペンの良さを引き出し, 従来の UI にはない利点を持ち, そしてより使いやすい UI を確立することが重要である.

ところで, ペンに向けた対話技法とはどのようなものなのだろうか. このことを考えるための設計指針が十分にそろっていないのが現状であり, ペンの良さを引き出した UI を確立するためには, それらの設計指針を明らかにすることが必要である.

そこで, 我々は, ペンの操作性を調べるための実験を行い, ペン UI の設計指針を導くことを試みた. 同様の目的の実験は Mackenzie¹⁾ と魚井²⁾, 小野^{3),4)}

が報告している. Mackenzie と魚井はドラッグングによる操作について実験を行い, ペンはマウスより速く操作できることを報告している. しかし, これらの実験はディスプレイとタブレットを用いた環境を用いている. つまり, ペンを間接制御デバイスとして扱ったものである. また, 魚井と小野は, ペンによる操作の移動方向依存性を調べている. 魚井はドラッグングおよびポインティングで, 上下左右の位置関係を持った2つの対象を選択するタスクについて実験を行い, 特徴的な移動方向依存性はなかったことを報告している. しかし, 前述のとおり魚井はペンを間接制御デバイスとして扱っている. 小野は, ペンを直接制御デバイスとして扱う環境を用いて, 22.5度おき全16方向の位置関係を持った2つの対象を選択するタスクについて実験を行った. 結果として, ペンはマウスよりもポイントしやすい方向があり, それは手首を中心に左上方方向に当たる190~250度に位置する場所であると報告している. また, ペンとマウスの操作性の比較では, ペンはマウスより速く操作できることを報告している. ただし, この実験はポインティングについてだけしか行っていない.

我々は, ペンを直接制御デバイスとして扱う環境を用いた. 先に示したペンの特徴はこの環境において生じるもので, ペンの良さを生かすには直接制御デバイスとして扱うべきと考えたからである. また, PDA やペンコンピュータなど表示一体型タブレットを用いたものが製品化され, それらに適した UI の設計が急務となっていることも理由の1つである. そして, この環境におけるドラッグングによる操作の操作性を調べる実験, および, ポインティングとドラッグングによる操作についての移動方向依存性を調べる実験を行った. これらの実験結果からペンとマウスの操作性を比較し, マウス UI で用いられている対話技法を利用できるかどうかを検討した. また, 実験結果を多面的に検討し, ペンの特徴や, ペン UI を設計するときに考慮すべき点を考察した.

本論文では, それぞれの実験の手法と結果, および, その結果の考察を通して得られた事項について述べる.

2. ドラッグングによる操作におけるペンの操作性

2.1 実験の必要性和目的

マウス UI におけるドラッグングとは, マウスボタンを押し, そのままマウスを動かし, ボタンを離すという一連の動作を指す. ドラッグングは, マウス UI の基本的な動作の1つであり, たとえば, オブジェクト

表 1 実験に使用した機材

Table 1 Environment for experiments.

計算機	PC/AT 互換機 i486 66 MHz
対話デバイス	表示一体型 (LCD) タブレット (WACOM PL-100V) 計算機付属マウス
OS	MS-DOS 6.2, MS-Windows 3.1, MS-Windows for Pen Computing 1.1

i486 は米国インテル社の商標です。MS-Windows は米国マイクロソフト社の商標、MS-DOS は同社の登録商標です。PC/AT は米国 IBM 社の登録商標です。

表 2 表示一体型タブレット仕様

Table 2 Specifications of display-integrated tablet.

入出力面サイズ	192 × 144 mm
検出方式	電磁授受作用方式 (電磁誘導方式)
検出速度	205 ポイント/sec
入力分解能	0.05 mm
液晶表示ドット構成	640 × 480 ドット
ドット寸法	0.27 mm
スタイラスペン仕様	140 × 9 mm, 8 g

トの移動や回転操作における属性 (移動では移動量, 回転では回転角度) の指示, プルダウンメニューの選択に用いられる。一方, ペン UI においてこのドラッグは, ペン先をタブレット面に付けたままペンを動かす動作, いわゆる書く動作 (ライティング) に相当する。このようにマウスとペンでは, 同じドラッグでもその動きは異なっている。したがって, その操作性にも違いが生じるはずであり, マウス用に設計された操作がペンには向いていない可能性もある。

そこで, 本実験ではドラッグでオブジェクトを移動する操作をペンとマウスで行い, ドラッグによる操作におけるペンの操作性, および, ペン UI でドラッグによる操作を用いるときに考慮すべき点を検討する。

なお, ドラッグによる操作には, 図形編集におけるオブジェクトの移動といった, 正確さが要求される操作と, メニュー選択やウィンドウ間のアイコン移動といった, 正確さが要求されない操作がある。そこで, 本実験では, 正確さが要求される場合とされない場合の 2 通りについて実験を行う。

2.2 実験環境

次に実験環境について述べる。

(1) 使用機材

使用した機材を表 1 に示す。マウスを用いて操作するときも, 視覚効果の影響を除くために表示一体型タブレットの液晶表示を利用した。表示一体型タブレットの仕様を表 2 に示す。

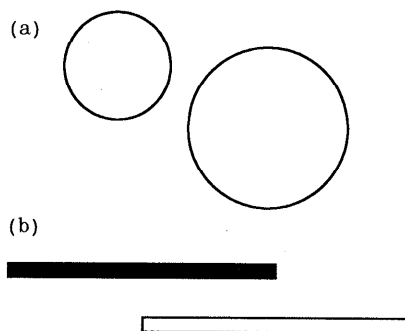


図 1 ドラッグによる操作の実験におけるオブジェクトの配置

Fig. 1 Position of two objects in the experiment using dragging.

(2) 被験者

被験者は研究室内の 21 から 24 才までの学生 7 名と同年代の一般社会人 1 名である。全員右利きであり, ペンおよびマウスを右手で持つ。なお, 研究室の学生はマウスの使用経験があるが, 一般社会人の被験者はマウスの使用経験がほとんどない。

2.3 実験手法

次に実験手法について述べる。

(1) 制御項目

本実験の制御項目は, 操作の正確さと操作デバイスである。操作の正確さについては要求される場合と要求されない場合の 2 通り, 操作デバイスについてはペンとマウスの 2 通りを用意した。つまり, 本実験では 2 つの制御項目の組合せで 4 通りの小実験を行った。

(2) タスク内容

正確さが要求されない場合の実験では, 画面上に大きな円 (半径 45 mm) と小さな円 (半径 30 mm) が一定の間隔 (水平 60 mm, 垂直 60 mm) をおいて表示される (図 1(a))。このうち小さい円を移動し, 大きい円の中に完全に入るとタスク終了である。これは, アイコンをウィンドウ間で移動させる操作を想定したタスクである。

一方, 正確さが要求される場合の実験では, 画面上に同じ大きさ (60 × 3 mm) の長方形が 2 つ一定の間隔 (水平 30 mm, 垂直 25 mm) をおいて表示される (図 1(b))。このうち内部が塗りつぶされている方を移動し, 塗りつぶされていない方に一致させる。これは, 実際の図形編集を想定したタスクである。

移動は, 移動するオブジェクトの内部でドラッグを開始することで開始される。

(3) 実験順序とタスク回数

実験結果から学習効果の影響を除くために, 小実験を行う順番を被験者によって変化させた。また, それぞ

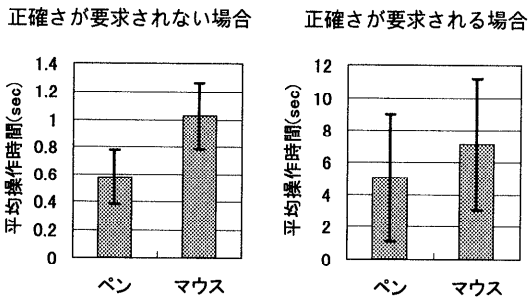


図2 ドラッグによる操作における平均操作時間

Fig. 2 Average task time for tasks using dragging.

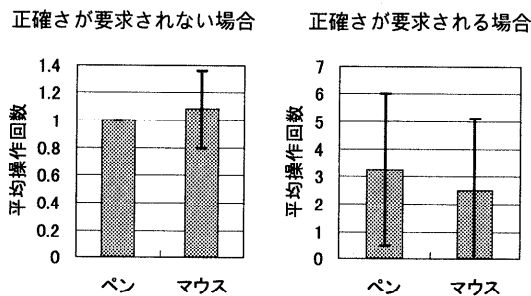


図3 ドラッグによる操作における平均操作回数

Fig. 3 Average number of manipulations for tasks using dragging.

れの小実験では、タスクを3回ずつ行った。

(4) 計測項目

操作性を比較する尺度としては、過去の報告で一般に用いられてきた1回のタスクを完了するのに要した時間（操作時間）と、その間に行ったドラッグの回数（操作回数）を計測した。1タスクは、最初のドラッグ開始から、タスクを完了させたドラッグの終了までである。

(5) 移動距離と移動方向

本実験では、移動距離と移動方向については変化させなかった。これらを変化させたときの影響については、次章の実験で調べることにした。

2.4 実験結果

小実験ごとに集計した操作時間の平均値（平均操作時間）を図2に、操作回数の平均値（平均操作回数）を図3に示す。それぞれのグラフは平均値を縦棒、平均値 ± 標準偏差の幅を線分で示している。

2.5 考察

実験結果をもとに、正確さが要求される場合とされない場合に分けて考察を行う。

(1) 正確さが要求されない場合

正確さが要求されない場合の実験では、平均操作時間はマウスよりペンの方が短かった（57%）。この差は

危険率5%の異分散 t 検定（以後の t 検定もこの条件とする）で認められた。被験者ごとでは、8名全員がマウスよりペンの方が短かった。操作回数はほとんど1回であり、ペンとマウスの間に差はなかった。

以上の結果から、正確さが要求されない場合、ペンはマウスよりも速く操作でき、操作回数も変わらないことが分かった。したがって、ペンUIにドラッグによる操作を採用しても問題はないと考えられる。そればかりか、マウスより使いやすくなる期待もある。

(2) 正確さが要求される場合

正確さが要求される場合の実験でも、平均操作時間はマウスよりペンの方が短かった（70%）。しかし、この差は t 検定では認められなかった。被験者ごとでは、8名中6名がマウスよりペンの方が短かった。一方、平均操作回数はマウスよりペンの方が多かった（130%）。しかし、この差は t 検定では認められなかった。被験者ごとでは、8名中5名はマウスよりペンの方が多く、2名はペンの方が少なかった。

以上のように、ペンとマウスの間に差は認められず、正確さが要求される場合も、ペンUIにドラッグによる操作を採用しても問題はないと考えられる。

ただし、注目すべき点として、被験者からペンによる操作で意図しない操作の失敗が起こるとの意見があった。 t 検定では差が認められなかったが、ペンの平均操作回数はマウスより多く、かつ、被験者別でもマウスよりペンの平均操作回数が多い人の方が多いという結果が得られている。この要因として、観察および被験者の意見から次の2点が考えられる。1つは、ドラッグしているオブジェクトがペンを持っている手に隠れ、状態を確認するためにいったんドラッグを中断することである。もう1つは、ドラッグを終了する（ペン先をタブレットから離す）ときに、手ぶれによってドラッグの終了位置が変わってしまうことである。前者の要因は直接制御デバイス特有の欠点であり、取り除くことは難しい。一方、後者の要因についてはUIに工夫を凝らすことで回避できると考えられ、ペンUI設計において考慮すべき点である。

3. ペン操作における移動方向依存性

3.1 実験の必要性和目的

ペンの操作性には移動方向依存性があるのだろうか。もし、あるとすれば、それを明らかにし、今後のペンUIの設計に反映することが望ましい。たとえば、プルダウンメニューや、ポップアップメニューを出現させる位置や、メニュー項目の配置などの設計で必要となる指針である。

本実験では、ポインティングおよびドラッグングで2つの対象を選択するタスクを、ペンとマウスで行う実験をし、特に移動方向依存性に着目して、ペンの操作性を検討する。

3.2 実験環境

次に、本実験の実験環境について述べる。

(1) 使用機材

使用機材は前章で述べた実験と同様である(表1, 表2参照)。

(2) 被験者

被験者は21から26才までの本学学生18名である。そのうち右利きが17名、左利きが1名である。被験者の全員が利き手でペンを持つ。一方、マウスは全員右手で持つ。視力、視野は全員正常(眼鏡使用5名、コンタクト使用6名)である。マウス使用経験を4段階で調査したところ、頻繁に使用している者が13名、たまに使用している者が5名で、何回か使用したことがある、まったく使用したことがないと回答した者はいなかった。

3.3 実験手法

次に、本実験の手法について述べる。

(1) タスク内容

本実験では、画面上に中心円と16個の選択候補円が表示される(図4)。1タスクは、中心円を選択し、その後選択候補円の中の1つ(選択円)を選択することである。対象を円としたのは、小野³⁾も述べているように、全方向で対象間の距離と対象の大きさを一定とするためである。タスクを行うときの注意として、ペンで操作する場合はペンで書くときと同じ自然な姿勢をとるように指示した。

(2) 制御項目

本実験の制御項目は、移動方向、移動距離、操作デバイス、選択の操作方法、選択円提示タイミングの5つである。次にそれぞれの制御項目について述べる。

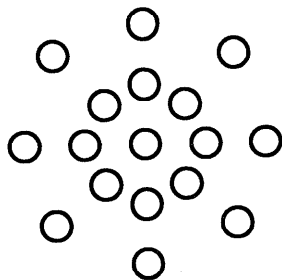


図4 選択操作の実験における中心円と選択候補円の配置
Fig. 4 Position of circles for selection experiments.

(i) 対象の配置(移動方向と移動距離)

中心円と選択円を選択する間に起こる移動の方向を変化させるために、選択候補円は、中心円を中心として45度おき8方向に配置した。また移動の距離を変化させるために、中心円と選択円の中心間距離が20mm(小)と40mm(大)になる2通りの位置に配置した。この距離は、メニューなどを選択するときの移動量を想定して決定した。

なお、対象の大きさは変化させなかった。これは、本実験の前にほぼ同じ条件で予備実験⁵⁾を行ったところ、対象の大きさは操作性の方向依存性に影響を与えないという結果を得たからである。

(ii) 操作デバイスと選択の操作方法

操作はマウスとペンで行った。操作方法はドラッグングとポインティングで行った。ドラッグングの場合、中心円の中でドラッグングを開始し、選択円の中で終了する。ポインティングの場合、中心円をポインティングし、続けて選択円をポインティングする。

(iii) 選択円提示タイミング

予備実験⁵⁾では中心円の選択を開始した直後にどの選択候補円を選ばよいかを提示していた。ところが、このタイミングで提示を行うと、実験結果として得られた“右下方向への移動に時間がかかる”ことの要因が、ペンを持つ手が邪魔で選択円の発見が遅れるためなのか、右下方向への移動自体が難しいのかが明確にならない。

そこで、本実験では選択円の提示タイミングとして、タスクを開始する前(前提示型)と、中心円の選択を開始した直後(後提示型)の2通りを用意した。前提示型では、タスクを始める前に選択円が分かるので、選択円の発見が遅れるために操作時間が長くなるという要因が除ける。

(3) 実験順序とタスク回数

制御項目のうち、操作デバイス、選択操作方法、選択円の提示タイミングから、8通りの組合せができる。それぞれの状態で行う実験を小実験と呼ぶ。実験結果から学習効果の影響を除くために、被験者によって小実験の順番を変化させた。

1つの小実験の中では、残りの制御項目である移動距離と移動方向の組合せから得られる16個の選択候補円を選択するタスクを行う。そして、1個の選択候補円につき5回の選択を行う。したがって、1つの小実験の中では80回のタスクを行う。どの選択候補円を選択するかは乱数で決定し、被験者が予想できなくした。

(4) 計測項目

操作性を比較する尺度として、1回のタスクを完了するのに要した時間（操作時間）と、選択候補円別に5回のタスクを完了する間に起きたエラー回数を計測した。

操作時間の集計では、操作が偶然速く、または遅くなったときの値を除くために、5回計測した値のうち最大値と最小値を除いた3回の値だけを使用した。

1回のタスクは、中心円の選択開始、選択完了と、選択円の選択開始、選択完了からなる。ただし、ドラッグングにおいてはそれぞれの選択開始と完了は同時である。これらの4段階において、操作エラーが存在する。どこでエラーが起きても、選択作業失敗としてタスクを中断させ、最初からやり直させた。そして、選択円の選択開始におけるエラーだけを計測した。これは、操作性の方向依存性を検討する材料としては、移動を行った後の選択操作のエラーを見ればよいと判断したからである。中心円の選択開始でのエラーは移動方向にはまったく依存しない。また、ポインティングにおける選択完了時のエラーは、移動方向に依存しないとは断言できないが、そのほとんどは被験者が慌てて操作をしたため起こるものである。したがって、これらのエラーは含めなかった。

(5) タスクの提示方法

タスク開始時は中心円を選択することを示すために中心円を黒く反転表示する。また、前提示型では同時に選択円を灰色に反転表示する。これ以外に、前提示型と後提示型の違いはない。中心円の選択を開始した段階で、次は選択円を選択することを示すために選択円を黒く反転表示する。そして、中心円の選択に成功した段階で、成功したことを示すために中心円を白抜き表示にする。次に、選択円の選択に成功した段階で選択円を白抜き表示に戻し、最初の状態に戻す。

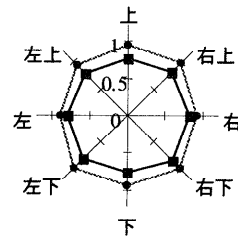
3.4 実験結果

左利きの被験者は1名しか募れなかったため、データの信頼性が低いと考えられる。そこで、ここでは右利きの人の場合だけを示す。

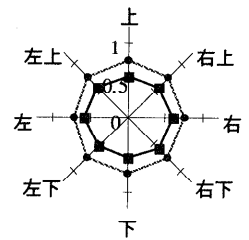
移動方向別に分類して平均操作時間を示したグラフを図5、図6^{*}に示す。また、移動方向別に分類して平均エラー回数を示したグラフを図7、図8に示す。

さらに、移動方向以外の制御項目の組合せ16通りに集計した平均操作時間を表3に示す。また平均エラー回数を表4に示す。平均操作時間を示した表に

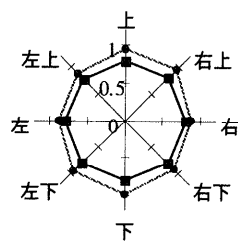
ドラッグング・後提示型



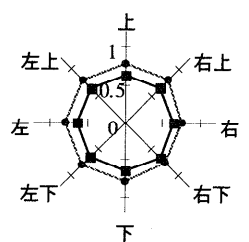
ドラッグング・前提示型



ポインティング・後提示型



ポインティング・前提示型

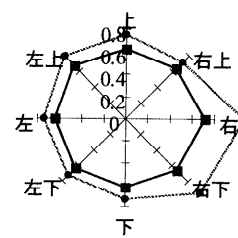


—■— 移動距離小 -●- 移動距離大

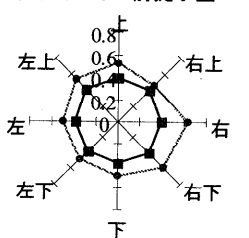
図5 マウスで操作する場合の移動方向別平均操作時間（秒）

Fig. 5 Average task time with a mouse by direction (sec).

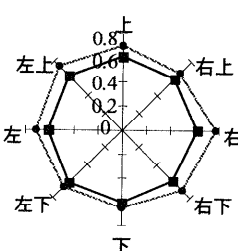
ドラッグング・後提示型



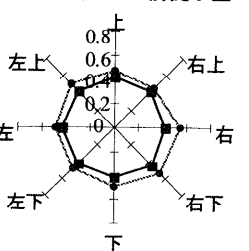
ドラッグング・前提示型



ポインティング・後提示型



ポインティング・前提示型



—■— 移動距離小 -●- 移動距離大

図6 ペンで操作する場合の移動方向別平均操作時間（秒）

Fig. 6 Average task time with a pen by direction (sec).

は、操作時間の標準偏差も合わせて示してある。

3.5 考察

3.5.1 方向依存性の検討

まず、操作性の方向依存性を検討するために、移動

^{*} 図6は、紙面の都合上、図5の約1/2のスケールで描かれている。したがって、図6に図5と同じ円が描かれている場合、操作時間は図5に比べ約1/2であるということを示す。

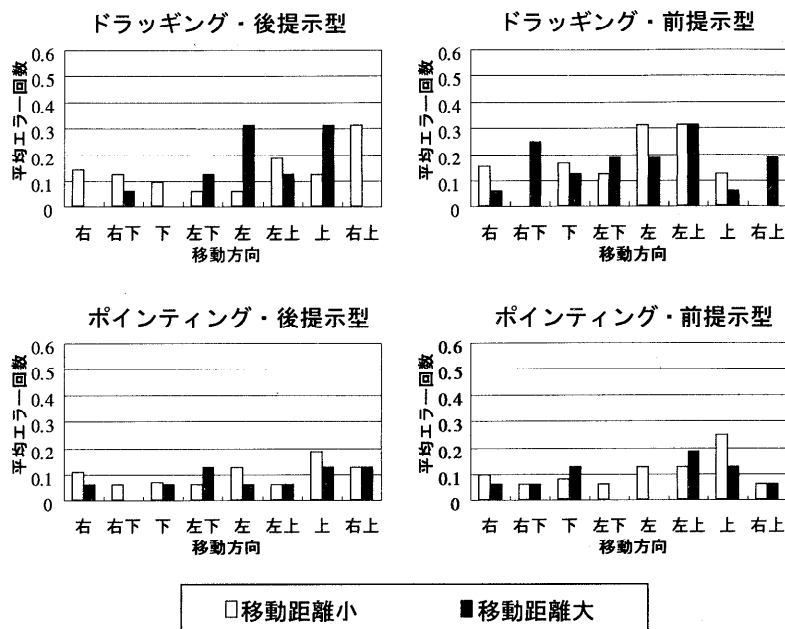


図 7 マウスで操作する場合の移動方向別平均エラー回数

Fig. 7 Average number of errors with a mouse by direction.

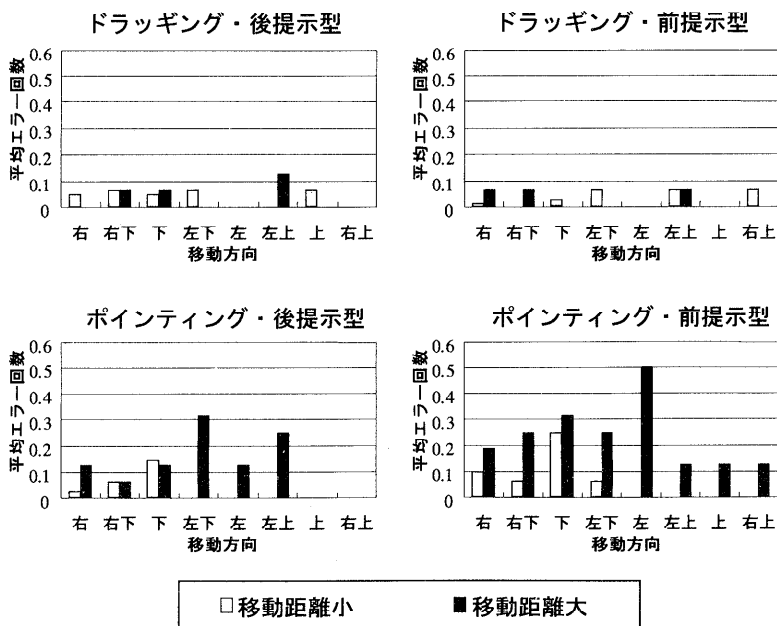


図 8 ペンで操作する場合の移動方向別平均エラー回数

Fig. 8 Average number of errors with a pen by direction.

方向別の平均操作時間と平均エラー回数について考察する。

(1) マウスの操作時間

図 5 を見た限りでは、グラフはほぼ真円を描いている。これは方向別の操作時間に差がないことを意味し

ている。より正確に差があるかどうかを検討するために、2 方向ごとすべての組合せ ($8C_2$ 通り) について t 検定を行い、ある 1 つの方向における検定において 4 方向以上と差があるとの結果が得られたとき、その方向の操作時間は他の方向と差があると認めることに

表 3 平均操作時間と標準偏差 (秒)

Table 3 Average task time and standard deviation (sec).

操作デバイス	選択操作方法	提示タイミング	移動距離	
			小	大
マウス	ドラッグング	後提示型	0.796 (0.164)	0.944 (0.181)
		前提示型	0.565 (0.154)	0.750 (0.188)
	ポインティング	後提示型	0.796 (0.153)	0.921 (0.197)
		前提示型	0.640 (0.141)	0.781 (0.190)
ペン	ドラッグング	後提示型	0.638 (0.104)	0.812 (0.207)
		前提示型	0.392 (0.132)	0.525 (0.179)
	ポインティング	後提示型	0.612 (0.085)	0.705 (0.096)
		前提示型	0.425 (0.116)	0.500 (0.123)

表 4 平均エラー回数

Table 4 Average number of errors.

操作デバイス	選択操作方法	提示タイミング	移動距離	
			小	大
マウス	ドラッグング	後提示型	0.16	0.12
		前提示型	0.16	0.17
	ポインティング	後提示型	0.11	0.08
		前提示型	0.12	0.08
ペン	ドラッグング	後提示型	0.04	0.03
		前提示型	0.02	0.02
	ポインティング	後提示型	0.02	0.13
		前提示型	0.05	0.23

する。この検定を行ったところ、後提示型のドラッグングで、移動距離が小のとき上下方向の操作時間が短く、移動距離が大のとき右上で操作時間が長くなると認められただけであった。したがって、マウスで操作するときの操作時間に移動方向依存性はあまりないと考えられる。

(2) ペンの操作時間

図 6 を見ると、移動距離が大のときを表す線で右・右下方向への膨らみがある。これは、その方向の円を選択する操作時間が長いことを意味している。マウスの場合と同じ検定を行ったところ、表 5 に示す方向で差があると認められた。したがって、右利きの人にとっては右・右下方向への大きな移動をともなうペン操作で、操作時間が長くなるといえる。この傾向はドラッグングで特に強い。

予備実験でもこの傾向は確かめられたが、対象が手によって隠れたことが原因なのか、操作自体が難しいことが原因なのかが特定できていなかった⁵⁾。今回の実験で、前提示型でもこの傾向が存在していることから、右・右下方向への移動自体にも時間がかかることが証明された。

以上のことから、手で隠れて発見しにくい部分に操作対象が突然現れたり、右利きの人の場合、右・右下方向へ長くドラッグングしなければならないような対

話方法はペン UI には不適であるといえる。UI 設計時には、右・右下方向への移動は少なく、距離は短くすべきである。そして、特にドラッグングを用いる場合はこの点に注意すべきである。

(3) エラー回数

次にエラー回数について考察する。平均エラー回数を比べると、概してペンはマウスより平均エラー回数が少ない (表 4 参照)。しかし、ペンのポインティングにおいて移動距離が大のときの操作では、平均エラー回数が非常に高くなっている。

原因は次のことが考えられる。平均エラー回数が特に高いのは左側に位置する円の選択で (図 8 参照)、この操作を右利きの人が行うとペンの傾きが水平に近くなる。ところが、タブレットでは傾きが水平に近い状態でのポインティングは検出されにくい性質を持っている。この問題は、ソフトウェアでは解決できないため、ハードウェアの性能向上を期待したい。

3.5.2 操作時間の検討

ここでは、移動方向以外の制御項目の組合せごとの平均操作時間 (表 3 参照) について考察する。操作デバイスの違いによる差、提示タイミングの違いによる差、操作方法の違いによる差に興味深い傾向が現れた。次にこれらについて述べる。

(1) 操作デバイス別

平均操作時間をペンとマウスの場合で比べてみると、8 通りすべてにおいて、マウスよりペンの方が操作時間が短い。この差は t 検定で認められた。本実験のタスクは正確さが要求されない場合に相当し、この結果は 2 章の結果と一致する。

(2) 提示タイミング別

平均操作時間を後提示型と前提示型で比べてみると、8 通りすべてにおいて、後提示型より前提示型の方が操作時間が短い。この差は t 検定で認められた。前提示型では、対象円がどこにあるかを発見し理解する時間が操作時間に含まれないため、この結果は当然である。

表 5 ペン操作における各方向どうしの操作時間の差を検定した結果

Table 5 Result of t-tests to investigate difference in task time with a pen.

移動距離	選択操作方法	提示タイミング	検定結果
小	ドラッグング	後提示型	右で時間が長い
		前提示型	
	ポインティング	後提示型	
		前提示型	
大	ドラッグング	後提示型	右, 右下で時間が長い
		前提示型	右, 右下で時間が長い
	ポインティング	後提示型	右, 右下, 左上で時間が長い
		前提示型	右, 右下で時間が長い

表 6 平均操作時間の比率 (前提示型の場合/後提示型の場合)

Table 6 Percentage of average task time (display before starting task/display after starting task).

操作デバイス	選択操作方法	移動距離	
		小	大
マウス	ドラッグング	0.71	0.79
	ポインティング	0.80	0.85
ペン	ドラッグング	0.61	0.65
	ポインティング	0.69	0.71

注目すべきは、後提示型に対する前提示型の操作時間の比率である (表 6 参照)。この比率がマウスに比べペンの方が小さい。この差は t 検定で認められた。このことから、次に移動すべき位置があらかじめ分かっているときに操作が速くなる度合いが、マウスに比べペンは強いといえる。実際の操作では、その UI に慣れてくると、メニュー項目の出現位置が分かるようになる。つまり、次に移動すべき位置が分かってくる。したがって、この結果は、UI に慣れてくるとペンでの操作はより速く行えるようになることを意味する。

(3) 選択操作方法別

マウスの場合、平均操作時間をポインティングとドラッグングで比べてみると、後提示型のときはほぼ等しく、前提示型のときドラッグングの方が短い。 t 検定でも、後提示型では差が認められず、前提示型では差が認められた。したがって、マウスによる操作で移動位置があらかじめ分かっている場合は、ポインティングに比べドラッグングの方が速く操作できるといえる。

ペンの場合、操作時間は前提示型の移動距離が小的时候だけポインティングよりドラッグングの方が短く、それ以外ではドラッグングの方が長かった。これらの差は t 検定で認められた。したがって、ペンによる操作ではほとんどの場合、ドラッグングに比べポインティングの方が速く操作できるといえる。ここで注目したい点として、ポインティングに対するドラッグングの操作時間の割合が、移動距離が小的时候に比べ大のときの方が大きくなっていることがある (表 7 参照)。この差は t 検定で認められた。このことから、ペンで操

表 7 平均操作時間の比率

(ドラッグングの場合/ポインティングの場合)

Table 7 Percentage of average task time (dragging/pointing).

操作デバイス	提示タイミング	移動距離	
		小	大
マウス	後提示型	1.00	1.02
	前提示型	0.88	0.96
ペン	後提示型	1.04	1.15
	前提示型	0.92	1.05

作する場合、移動距離が大きくなるときに操作が遅くなる度合いが、ポインティングよりドラッグングの方が大きいことが分かる。

ペンによるドラッグングは、書くこと (ライティング) と同じ動作である。ペンはそもそも書くための道具であるが、実際の紙にペンで書くときも、長い線を一筆で書くのは難しい。これは、短い線を書くときは指や手首の動きだけですむが、長い線を書くときは腕全体の運動になることや、手の側面が紙にくっつくために動かしにくいこと、腕を宙に浮かして動かすときペン先をつねに付けておく動作が難しいことが原因と考えられる。紙に線を書いている場合は途中で書くことを中断してもなんら問題はない。しかし、ドラッグングの途中でペン先をタブレット面から離すことはドラッグングの終了を意味し、問題となる。したがって、ペン UI を設計するときには、あまり長い距離をドラッグする必要がないように考慮したり、ドラッグングを中断できる方法を取り入れることが必要である。

4. おわりに

本論文では、ペンを直接制御デバイスとして扱う環境における、ドラッグングによるオブジェクト移動操作、および、2つの対象をドラッグングとポインティングで選択する操作の実験について述べた。前者の実験から、ドラッグングによる操作を行うとき、

- 正確さが要求されない場合、ペンはマウスより速く操作でき、操作回数はマウスと変わらない。

- 正確さが要求される場合、ペンの操作時間はマウスとほぼ同じであるが、操作回数はマウスに比べ多い。

ことが分かった。ペンを直接制御デバイスとして扱う場合のドラッグによる操作におけるペンの操作性に関する報告は過去になく、ペン UI を設計するときの新たな指針が得られた。

さらに、後者の実験から、ポインティングおよびドラッグで 2 つの対象を選択する操作を行うとき、

- ほとんどの場合、ペンはマウスより速く操作できる。
- 右利きの人がペンで操作する場合、右・右下方向への移動をとまなう操作では操作が遅くなる。特に移動距離が長い場合、ドラッグの場合に、この傾向が強い。
- ペンはマウスより、次の移動位置があらかじめ分かっている場合に操作が速くなる度合いが強い。
- ペンで操作するとき、ほとんどの場合、ポインティングはドラッグより速く操作できる。また、移動距離が大きくなると、ドラッグはポインティングに比べ操作が遅くなる度合いが大きい。

ことが明らかになった。同様の実験は小野^{3),4)}が行っているが、小野はポインティングについてだけであり、ドラッグについては新しくデータを得ることができた。ポインティングについて小野は、

- ペンはマウスより早く操作ができる。
- ペンも Fitts の法則に従う。
- ペンにはポイントしやすい方向がある。
- ペンは途中で操作を変更しにくい。

ことを報告している。1 点目は今回の実験でも同じ結果が得られた。Fitts の法則⁶⁾へのあてはめは、移動距離を 2 通りしか変化させなかったため行わなかった。また、今回の実験で得られた操作が遅くなる方向は、小野の報告したしやすい方向とは反対の方向であった。さらに、移動位置が分かっているとペンはマウスに比べ操作が速くなるという結果と小野の報告を合わせると、マウスに比べペンはある操作を開始すると途中で変更することは難しいが、速く操作できるという結論が導ける。

以上のことから、マウス UI におけるポインティングやドラッグを用いた対話技法をペン UI で流用することは可能であるといえる。しかし、正確な操作をドラッグで行うとき操作回数が増えること、長距離移動するドラッグや、右利きの人の場合右・右下方向への移動を含むときに操作が遅くなることなどの欠点から、ペン UI 設計においては、次の点に注

意すべきである。

- 正確な操作にドラッグを用いる場合、手ぶれの影響を減らす工夫を取り入れる。
- 長い距離のドラッグは控える。もしくは、ドラッグの中断が行えるようにする。
- (右利きのユーザのためには) 右・右下への移動は控える。特に、ドラッグの場合はこの点に注意する。
- メニューなどが手で隠れないようにその位置に気をつける。

たとえば、従来のドラッグで選択する方式のプルダウンメニューは、選択するときに右・右下方向へ長い距離をドラッグしなければならない、ペン UI には不適であることが予想される。

これらの注意点は新しい対話技法を設計する際にも考慮すべき重要な指針となる。今後、この結果を参考にして、ペンの特徴を引き出したペン UI を実際に設計・実現することが課題である。また、今回の実験ではデータ不足であった左利きの人を被験者とした実験や、今回の実験結果からドラッグ形式のプルダウンメニューはペンに向かないと予想されるため、このことを確かめる実験も今後行いたい。

謝辞 本研究は、一部、文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の補助による。

参 考 文 献

- 1) Mackenzie, S., et al.: A Comparison of Input Devices in Elemental Pointing and Dragging Tasks, *Proc. CHI '91 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.161-166, ACM Press (1991).
- 2) 魚井宏高ほか: 選択操作におけるペンとマウスの実験的評価, 情報処理学会第 43 回 HI 研究会報告, pp.33-40 (1992).
- 3) 小野 眞: ペンの操作性に関する実験的研究, 情報処理学会第 41 回 HI 研究会報告, pp.82-99 (1992).
- 4) 小野 眞: ペン入力のパフォーマンスモデルに関する検討, 情報処理学会第 47 回 HI 研究会報告, pp.1-6 (1993).
- 5) Kato, N., et al.: An Experiment Study of Interface Exploiting Pen's Merits, *Symbiosis of Human and Artifact*, Anzai, Y., Ogawa, K. and Mori, H. (Eds.), *Advances in Human Factors/Ergonomics Vol.20A*, pp.555-560, Elsevier Science Publishers B.V. (1995).
- 6) Paul, M.F.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental*

- Psychology*, 47, pp.381-391 (1954).
- 7) Alan, E.A.: The effect of graphic input devices on performance in a cursor positioning task, *Proc. Human Factors Society - Twenty-sixth Annual Meeting* (1982).
- 8) Shneiderman, B., 東基衛ほか (監訳): ユーザインタフェースの設計第2版, 日経 BP 社, (1993).

(平成 9 年 6 月 4 日受付)

(平成 10 年 3 月 6 日採録)



加藤 直樹 (正会員)

1993 年東京農工大学電子情報工学科卒業. 1995 年同大学院電子情報工学専攻博士前期課程修了, 1998 年同博士後期課程修了. 1997 年より日本学術振興会特別研究員. 手書きユーザインタフェース, コンピュータネットワーク利用に興味を持つ. 工学博士.



中川 正樹 (正会員)

1977 年東京大学理学部物理学科卒業. 1979 年同大学院修士課程修了. 同在学中, 英国 Essex 大学留学 (M. Sc. in Computer Studies). 1979 年東京農工大学工学部助手. 現在, 教授. 日本語計算機環境, 日本語文書処理, 手書きインタフェース等の研究に従事. 理学博士.