

ペンとカーソルキーでのポインティング課題における ターゲットサイズの実用限界およびターゲット数の効果

溝 渕 佐 知^{†,††} 任 向 実^{†††} 安 村 通 晃^{††}

本研究では、携帯情報端末におけるペンおよびカーソルキーの特性を理解するために、掌サイズのディスプレイ上の両入力デバイスでのターゲットポインティングを比較する実験を行った。実験1では、ターゲットサイズの実用限界を知るため、様々なサイズのターゲットを用いてポインティング課題を行った。この結果、ターゲットとなるセルのサイズが2mmから4mmのときにはペンのエラー率はカーソルキーよりも高いが、5mmのときには両者の差が見られなくなることが分かった。実験2では、ターゲットのサイズを5mmに固定し、ターゲット数を変化させてポインティング課題を行った。この結果、カーソルキーでターゲットまでの移動セル数が3以上のとき、カーソルキーよりもペンの方がターゲットを速くポイントできることが分かった。実験結果について Fitts の法則への適合性を検討した結果、携帯情報端末上のペンによるターゲットポインティングも Fitts の法則に従うことが分かった。また、ターゲットの位置の効果を検討したところ、カーソルキーにおいては画面の端にあるターゲットは中のターゲットよりも速くポイントできることが示されたが、ペンにおいては位置による優位性は見られなかった。

An Empirical Study of the Minimum Required Size and the Number of Targets with a Pen and with a Cursor Key on a Small Display

SACHI MIZOBUCHI,^{†,††} XIANGSHI REN^{†††} and MICHIAKI YASUMURA^{††}

In this study, two experiments were conducted to investigate the applicability and characteristics of pen input on small sized displays. We compared participants' performance of target pointing with a pen and with a cursor key, and examined the effect of target size and the effect of the number of targets. The results showed that pen input was likely to make more errors than key input when the target size is 2–4 mm, but at a target size of 5 mm, the error rate decreased to the same level as a cursor key input. With this target size, the pen could point to targets quicker than a cursor key when the number of cell movement exceeds 3. We also investigated how well Fitts' law can predict our results. The results showed that Fitts' law can also model pointing performance with a pen on a portable device. We found that a target on the edge of the display can be pointed at more quickly than a target in the center of display when using a cursor key, but did not find any effect of the target position with a pen.

1. はじめに

1.1 携帯情報端末の入力方式

近年、掌に収まるような小さなハードウェアの中に、テキストエディタ、スケジューラ、ブラウザなどの複

雑なアプリケーションが搭載された情報端末がリリースされている。こうした機能の高度化は、ユーザと機器とのインタラクションを複雑にする傾向があるが、より多くのユーザが高度な機能をストレスなく使いこなせるようにするためには、シンプルで効率の良い操作を実現するヒューマンインタフェースが必要である。

ハンドヘルド型の情報端末における代表的な入力方式としては、2方向(上下、左右)あるいは4方向に指示部分(カーソル)を移動させることのできる方向キー(以下カーソルキー)があげられる。これは現在携帯電話などに広く用いられている。カーソルキーは、片手での操作が容易で、見なくてもある程度操作でき

† ノキア・ジャパン株式会社ノキアリサーチセンター
Nokia Research Center, Nokia Japan Co., Ltd.

†† 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

††† 高知工科大学情報システム工学科
Department of Information Systems Engineering,
Kochi University of Technology

るという利点があるが、指示部分の移動方向の自由度は低い。また、ポイントするべきターゲットに到達するまでにカーソルが通らなければならないオブジェクト数が増えると、キー押し操作の回数が増加するという欠点がある。別の入力方式として、多くの携帯情報端末 (Personal Digital Assistants, 以下 PDA) で採用されているスタイラス (以下ペン) がある。ペンは様々な方向にある対象を直接指し示すことができるため直感的に分かりやすく、初心者でも使いやすい入力方式の 1 つである。ペンの動きの自由度は高いが、これは利点であると同時に、ターゲットをポイントし損ねやすいという欠点ともなり、ターゲットを見ながらカーソルキーよりも慎重にポイントすることが求められる。

PDA の中にはカーソルキーとペンの 2 つの入力方式を提供しているものもあるが、「どちらの方式も使える」ことは、必ずしも「どちらの方式でも十分なパフォーマンスが得られる」ことを示しているとはいえない。どのようなタスクにはカーソルキーが有利で、どのような場合にはペンを用いる価値があるのかを理解することにより、より効果的なユーザインタフェースのデザインを行うことが可能になると考えられる。そこで本研究では、ペンとカーソルキーそれぞれが有効に働く条件の詳細を明らかにするための実験を行った。

1.2 先行研究と本研究の位置づけ

1.2.1 ペンの特性に関する研究

ペンに適した対話技法の設計指針を見出すためにペンの特性を明らかにしようとする試みの例として、MacKenzie ら¹⁾や魚井ら²⁾による研究があげられる。彼らはドラッ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。また、加藤ら³⁾はペンとマウスの操作性を比較する実験を行い、ペンではドラッグで正確さが要求される操作を行うとき操作の回数が増えること、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ことを見出した。彼らはさらに、次の操作があらかじめ分かっているときに、ペンは操作がより速くできることを報告している。ターゲットの方向に関する同様の指摘は、小野⁴⁾によっても報告されている。また、小野⁵⁾はペンはマウスに比べ操作を開始した後に操作を変更することが難しいことを指摘している。さらに、単純な 2 つの操作にかかる時間の和と、それらの操作を連続して行ったときにかかる時間とを比較して、マウスでは個別の操作の和の方が短いのに対し、ペンでは連続した方が同じまたは短いことを見出し、

最初の操作を実行しながら次の操作の準備を並行して行うというペンの操作モデルを提案している。

Sears ら⁶⁾は、様々なサイズのターゲットのポイントング課題について、タッチスクリーン、固定したタッチスクリーン、およびマウスの 3 つの入力デバイスにおける被験者のパフォーマンスを比較し、固定タッチスクリーンがエラー率を下げるのに有効であることを見出した。

Ren ら⁷⁾はポイントングのストラテジーについて検討を行った。彼らはターゲットのサイズ、距離、方向を変化させてターゲットポイントング実験を行い、ターゲットのサイズとポイントングストラテジーの間に交互作用を見出した。

こうした先行研究の多くがマウスとの比較においてペンの特性を検討しているが、本研究ではカーソルキーとの比較からペンの特性を明らかにするアプローチをとる。

1.2.2 Fitts の法則

本研究では、掌に収まるような小型のディスプレイ上におけるペンのパフォーマンスが、Fitts⁸⁾の法則にあてはまるかどうかを検討する。オリジナルの Fitts の法則によれば、視覚的ターゲットをポイントするまでの運動時間 MT は以下の式 (1) で予測される。

$$MT = a + b \log_2(2A/W) \quad (1)$$

ここで、A は初期位置からターゲットの中心までの距離、W はターゲットの幅を表す。a, b は定数である。また、 $\log_2(2A/W)$ は課題の困難さ (Index of Difficulty: ID) を示す。MacKenzie⁹⁾は、実際のデータとの適合性がより高い式として式 (2) を提案しており、本研究では式 (2) を用いて実験結果を分析した。

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (2)$$

Fitts の法則を用いたポイントング操作の検討は、これまで数多く行われてきた。たとえば Card ら^{10),11)}は、マウス、ジョイスティック、step keys, text keys によるポイントング操作も Fitts の法則で説明できることを示した。一方、黒川ら¹²⁾は、タッチ画面におけるポイントング操作には Fitts の法則の適合度は低いと報告し、運動プログラムという観点からこれを考察している。小野⁴⁾によれば、水平方向の運動以外でも、ペンによるターゲットポイントングは Fitts の法則によく従う。しかしこの実験では中型ペンコンピュータ (液晶タブレット) が使用されており、PDA 上でのパフォーマンスの Fitts の法則への適合性を報告した例は国内外ともまだ見られない。

1.2.3 ターゲットの位置の効果

Tognazzini¹³⁾は、マウスでのポイントング操作に

ついて、ディスプレイの端に提示されるターゲットの優位性を指摘している。ディスプレイの端にあるターゲットは、ポインタが行き過ぎるということがない。したがって、Fittsの法則に基づいて考えると、実質的に片方向に無限の深さを持つターゲットと見なすことができる。こうしたターゲット位置による優位性が、カーソルキーおよびペンでのポインティングについても見られるかどうか、実験によって確かめた報告例はまだ見られない。カーソルキーの場合にも、ポインタ移動が画面の端で止まるような条件であれば、マウスと同様、端の優位性が見られると考えられる。ペンの場合、物理的な端があればそこでペンの動きが止められるためにポイントしやすくなる可能性が考えられる。また、視覚的にも、端にあるものと中にあるものとは人が感じる「ポイントしやすさ」に違いがある可能性があり、これがポインティングパフォーマンスに影響を及ぼすことも考えられる。

1.2.4 本研究のねらいと2つの実験

本研究では、人間-機器の最も基本的なインタラクションといえるターゲットポインティング課題において、ターゲットのサイズや数がどのような条件のときにカーソルキーに対するペンの有効性が見られるのかを調べるため、2つの実験を行った。一般に、ディスプレイ上に表示されるターゲットのサイズと作業効率はトレードオフの関係にあり、これはヒューマンインタフェースデザインの基本的な課題といえる。すなわち、限られたスペースの中に多くのターゲットを表示するにはターゲット1つあたりのサイズを小さくすればよいが、小さくなりすぎるとポインティングの難度が上がりエラー率が高くなる。一方、ターゲットのサイズを大きくすれば、限られたディスプレイスペースに一度に表示できるターゲット数は少なくなり、情報の一覧性が損なわれる。利用者に効率の良いインタラクションを提供するヒューマンインタフェースデザインのためには、十分正確にターゲットをポイントできる範囲でより多くの情報を提示できる条件を明らかにする必要がある。まず、実験1では、ターゲットのサイズを変化させたときのペンとカーソルキーのパフォーマンスを比較した。続く実験2では、ターゲットの数を変化させたときのペンとカーソルキーのパフォーマンスを比較した。また、ターゲットの位置の効果もあわせて検討した。

2. 実験1 ターゲットサイズの効果

2.1 目的

本実験では、カーソルキーと同程度以上の精度でペ

ンでポイントできる、ターゲットの最小サイズを調べることが目的とする。ある地点から別の地点にあるターゲットをポイントする場合、画面上のターゲットのサイズが変わっても、カーソルキーを押す回数は変わらない。したがって、ターゲットサイズはカーソルキー入力のパフォーマンスには影響しないと考えられる。一方、ペンでは、ターゲットが小さくなるほどポインティングは困難になり、パフォーマンスは低下すると考えられる。

2.2 方法

2.2.1 被験者

被験者は男性8名、女性2名の計10名、年齢は19歳から60歳(平均32.5歳, SD = 14.8)であった。全員視力は正常(矯正含む)で、右利きであった。本実験装置の使用経験者はなく、日常的にペン入力デバイスを用いている者もいなかった。

2.2.2 装置

Microsoft社のVisual Basicで実験用プログラムを作成し、NTTドコモ/カシオ社製PDA(G-FORT)上で実行した。PDAには入力装置としてタッチスクリーンとペンのほか、前面に4方向のカーソルキーと3つのキーがあり、端末の右下隅のキーをセレクトキーとして使用した(図1および表1)。

ポイントすべきターゲットとして、正方形(以下セル)をディスプレイの左隅に6行×6列提示した。セルのサイズは一辺2mm, 3mm, 4mm, 5mmの4



図1 実験で使用した装置

Fig. 1 Device used in the experiment.

表1 実験で使用した装置の仕様
Table 1 Specification of the device.

OS	Microsoft WindowsCE Version3.0
CPU	VR4122 150 MHz
メモリ	32 MB
表示	240 × 320 ドットカラー透過型 TFT 液晶 (65,536色)
ディスプレイ寸法	610 × 810 mm
外形寸法	W 85 × H 135 × D 25.5 mm
質量	約 300 g

通りに変化させた。これは、現在製品として発売されている PDA 上のソフトキーボードの 1 つのキーのサイズが 4 mm 程度であることから、その前後の大きさを調べるのが妥当と考えたためである。予備実験の結果、一辺 1 mm の場合は小さすぎてターゲットであるかどうかを識別しにくくなることが分かったので、最小サイズは 2 mm とした。また、各セル間の間隔は被験者がターゲットとそれ以外の空間を見分けやすいよう、最小セルサイズよりも小さい 1.5 mm とした。

2.2.3 実験デザイン

独立変数はセルのサイズ (2, 3, 4, 5 mm) と入力方式 (ペン, カーソルキー) で、すべての被験者が 8 通りの条件下でタッピング課題を行う被験者内実験計画を用いた。従属変数はポインティング時間とエラー率であった。

2.2.4 手続き

被験者はペン, カーソルキーそれぞれの操作法について説明を受けた後、練習試行として、一辺 4 mm の条件下で、ペン, カーソルキーの順に 20 回ずつターゲットポインティングを行った。

カーソルキー条件：実験者は被験者に、着席した状態で両手で装置を持ち、左手親指でカーソルキーを、右手親指でセレクトキーを押すように指示した。ディスプレイ上には、太枠で囲まれたスタートセルと灰色に塗られたターゲットセルが同時に提示された。スタートセルは四隅 (左下, 右下, 左上, 右上) のいずれかに、出現頻度が均等になるよう様々な順序で提示され、ターゲットセルはそれ以外のセルにランダムに提示された。実験者は被験者に、開始セルにある太枠を、カーソルキーを用いてできるだけ速く、かつ正確ターゲットセルまで移動させた後、セレクトキーを押すよう指示した。カーソルキーを 1 回押すと太枠がセル 1 つ分移動するようになっており、端のターゲットまで移動すると、それ以上カーソルキーを押しても先に進まないようになっていた。正しくターゲットがポイントされたか否かにかかわらず、セレクトキーが押されると次の開始セルとターゲットセルが提示された (図 2)。

ペン条件：被験者はテーブルに向かって着席し、実験中は装置を持った手をテーブルの上に置いた。実験者は被験者に、非利き手 (本実験では全員左) で装置を持ち、利き手 (本実験では全員右) でペンを持つように指示した。はじめにスタートセルのみが太枠で提示され、ペンが太枠内に触れるとターゲットセルが灰色で提示された。カーソルキー条件と同様、スタートセルは四隅 (左下, 右下, 左上, 右上) のいずれか

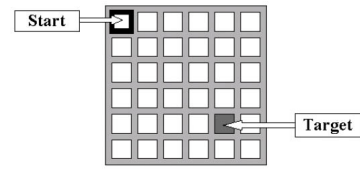


図 2 カーソルキー条件：スタートセルとターゲットセルが同時に提示される

Fig. 2 Appearance of start cell and target cell under the key condition.

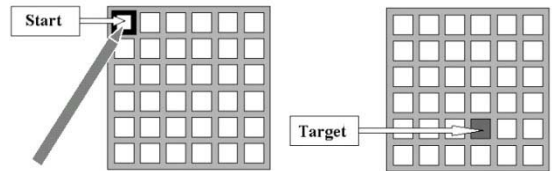


図 3 ペン条件：スタートセルをポイントするとターゲットセルが提示される

Fig. 3 Appearance of start cell and target cell under the pen condition.

に、出現頻度が均等になるよう様々な順序で提示され、ターゲットセルはそれ以外のセルにランダムに提示された。実験者は被験者に、ターゲットをできるだけ速く、かつ正確にポイントするよう指示した。カーソルキー条件と同様、正しくターゲットがポイントされたか否かにかかわらず、スタートセルをポイントした後で次にペンがディスプレイに触れると次の開始セルが提示された (図 3)。

両条件とも、各条件 50 試行ずつ本試行を行った。提示順序による効果を統制するため、被験者ごとに順序を変えて条件を提示した。

2.3 結果と考察

2.3.1 ポインティング時間

ポインティング時間として、カーソルキー条件ではスタートセル提示後初めてカーソルキーが押された時点からセレクトキーが押されるまでの間の時間を計測した。ペン条件では、スタートセルがポイントされてからターゲットセルがポイントされるまでの時間を計測した。つまり、両条件とも、計測時間の中には「スタートセルを見つける時間」は含まれていなかった。図 4 は各入力方式による、それぞれのターゲットサイズでのポインティング時間の平均値と標準偏差である。二元配置分散分析の結果、入力方式による主効果 ($F_{1,9} = 2789.45, p < .001$), セルサイズの主効果 ($F_{3,7992} = 14.48, p < .001$), および入力方式とターゲットサイズの交互作用が見られた ($F_{3,7992} = 14.48, p < .001$)。入力方式ごとにターゲットサイズの効果の分析を行った結果、カーソルキーではターゲットサイズ

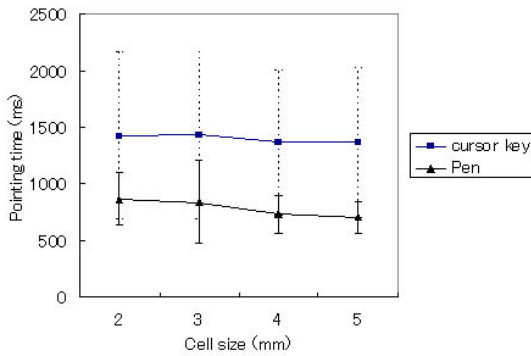


図4 ターゲットサイズと入力方式ごとの平均ポインティング時間と標準偏差

Fig. 4 Mean pointing times and SDs by target size and pointing device.

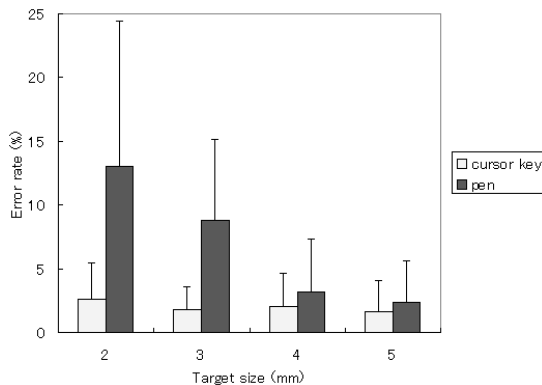


図5 セルサイズと入力方式ごとの平均エラー率と標準偏差

Fig. 5 Mean error rates and SDs by target size and pointing device.

の効果は有意ではなかった ($F_{3,3996} = 1.11, p > .05$)。一方、ペンにおいてはターゲットサイズの有意な効果が見られ ($F_{3,3996} = 105.56, p < .001$)、すべてのターゲットサイズ間に有意な差が見られた。つまり、いずれのターゲットサイズにおいてもペンはカーソルキーよりも速く、ターゲットサイズは、当初予測したとおりペンの場合のみ影響を及ぼすことが分かった。

2.3.2 エラー率

各被験者ごとに、それぞれの入力方式について、全試行数のうちターゲットが正しくポイントされなかった試行数の割合を算出した (図5)。二元配置分散分析の結果、入力方式の主効果が見られ ($F_{2,9} = 36.16, p < .001$)、ペンはカーソルキーよりもエラー率が高いことが示された。下位検定の結果、ターゲットサイズが2 mm から4 mm のときにはペンのエラー率はカーソルキーのエラー率よりも有意に高いことが示されたが、ターゲットサイズが5 mm のときには両者には有意な差は見られなかった ($F_{1,9} = 1.23, p > .05$)。

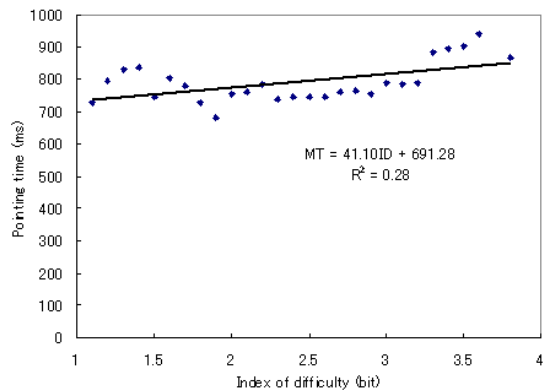


図6 各IDにおける平均ポインティング時間

Fig. 6 Mean pointing times in each ID.

2.3.3 開始位置の効果

先行研究^{3),4)}から、ペンの操作は方向に影響を受けることが指摘されている。そこで、ペン条件のデータについて、ターゲットサイズごとに開始位置の効果を一元配置分散分析によって分析したところ、有意な主効果が見られた ($F_{3,1996} = 3.07, p < .05$)。スタートセルが左上に提示される条件のときにポインティング時間が最も長く (平均 804.50 ms, SD = 246.84)、下位検定の結果、左下に提示される条件 (平均 763.81 ms, SD = 179.80) との間に有意な差が見られた ($p < .05$)。左上から右下方向への移動に時間がかかることは先行研究の結果と一致しており、原因の1つとして、手によって画面が隠れるためターゲットを見つけにくいということが指摘されている。

2.3.4 Fittsの法則の適合性

ペン条件における被験者のポインティング時間について、Fittsの法則に基づく分析を行った。ターゲット間の距離Aは開始セルの中心点とターゲットセルの中心点との間の距離 (mm)、ターゲットの幅Wはセルの一辺の長さとし、Index of difficulty (ID) を算出した。IDごとにポインティング時間の平均値を求め、回帰式と決定係数を求めた (図6)。

全体に、Fittsの法則で予測されるとおり、IDが大きくなるほどポインティング時間が長くなる傾向が見られるが、IDが2以下のときと3.5以上のときにポインティング時間のばらつきが大きい。検定の結果、モデルの説明力は有意であった ($F_{1,25} = 9.7, p < .01$) が、 R^2 値 (決定係数) は0.28と低い値を示した。

3. 実験2 ターゲットの数と位置の効果

3.1 目的

実験1では、ターゲットのサイズが5 mm のとき、

ペンによるポインティング時間はカーソルキーによるものより速く、エラー率においては両者の差がなくなることが分かった。そこで、実験2では、同じターゲットのサイズ(5mm)に対して、ターゲットの数が、2つの入力方式におけるポインティング時間にどのような影響を及ぼすかを調べた。つまり、2つの入力方式の差が見られなくなるターゲット数が存在するかどうかを調べることを目的とした。また、実験2では、マウス操作の際に見られるような、ディスプレイの端にあるターゲットの優位性が、カーソルキーやペンにおいても見られるかどうかを調べた。もし被験者が「ポインタを端に当てて止める」方略を用いるのであれば、端のターゲットのポインティングの方が有利になると考えられる。

3.2 方法

3.2.1 被験者

男性7名、女性5名の計12名(19歳から26歳まで、平均年齢21.1歳、SD=2.1)が実験に参加した。全員視力は正常(矯正含む)で、右利きであった。うち6名は、6カ月から2年のペン入力デバイスの使用経験があった(平均1.13年)。

3.2.2 装置

実験1と同じPDA上で実験プログラムを実行した。ターゲットとして、一辺5mmのセルを4行×4列、6行×6列、8行×8列の3通りで提示した。各セルの間隔は1.5mmであった。ターゲット位置の効果を調べるため、ターゲットの周囲にプラスチックのカバーを設置し、物理的な端ができるようにした(図7)。

3.2.3 デザイン

独立変数はセルの数(4×4、6×6、8×8)と入力方式(ペン、カーソルキー)で、すべての被験者が6通りの条件下でタッピング課題を行う被験者内実験計画を用いた。従属変数は実験1と同じく、ポインティング時間とエラー率であった。



図7 実験2におけるターゲット提示
Fig. 7 Appearance of cells in Exp.2.

3.2.4 手続き

実験1と同様の手続きを用いた。被験者ごとに異なる順序で各ターゲット数の条件を提示した。

3.3 結果と考察

3.3.1 ポインティング時間

ペンとカーソルキーそれぞれについて、提示したセル数ごとにポインティング時間の平均値と標準偏差を求めた(図8)。

二元配置分散分析の結果、入力方式による有意な主効果が見られた($F_{1,3593} = 1235.43, p < .001$)。また、入力方式と提示セル数との間に有意な交互作用が見られた($F_{1,3593} = 109.21, p < .001$)。セル数4×4、6×6、8×8のいずれの条件においてもペンの方がターゲットポインティングに要する時間が短く、両者の差は提示セル数が多くなるにつれ開いていった。次に、カーソルキーで開始セルからターゲットまで移動するために最低限経なければならないセル数(最少パス長)という単位を用い、ペンおよびカーソルキーで、画面上の同じ位置に表示されたターゲットをポインタするために必要なポインティング時間の平均値を算出した(図9)。こうして共通の指標を用いることにより、どの時点でペンとカーソルキーの差が見られなくなるかをさらに詳しく調べることができると考えた。分析には、4×4、6×6、8×8の3条件すべてのデータを用いた。

この結果、最少パス長が2のとき、ペンとカーソルキーのポインティング時間はほぼ等しく、最少パス長が3以上になるとペンの方が速くなり、その後はその差が開いていくことが明らかになった。

3.3.2 エラー率

本実験では、図10に示すとおり、エラー率は実験1と比べて非常に低かった。このことから、実験1で確認

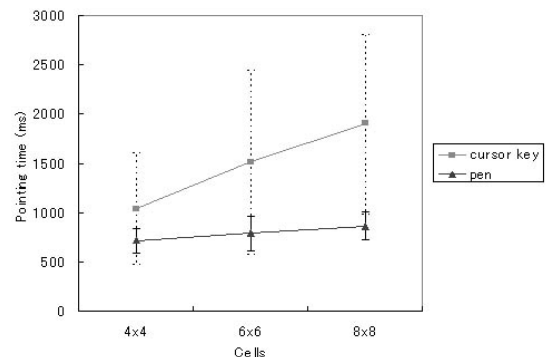


図8 提示セル数および入力方式ごとのポインティング時間と標準偏差

Fig. 8 Mean pointing times and SDs by target number and pointing device.

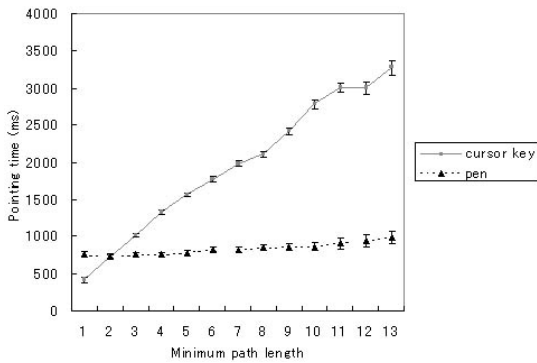


図 9 最少パス長と入力方式ごとの平均ポインティング時間と標準偏差

Fig.9 Mean pointing times and SDs by path length and pointing device.

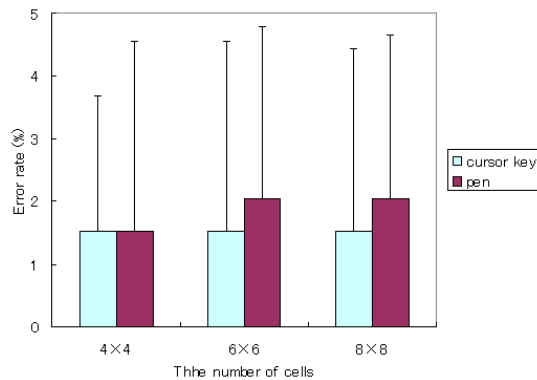


図 10 セル数および入力方式ごとの平均エラー率と標準偏差
Fig.10 Mean error rates and SDs by target number and pointing device.

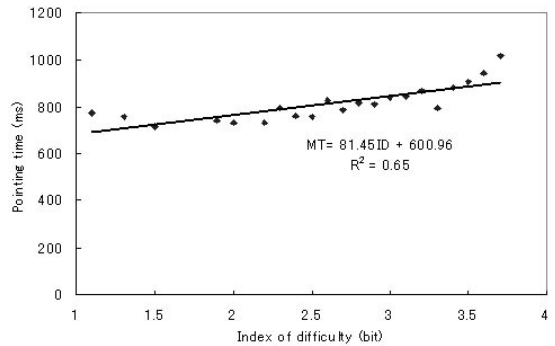


図 11 各 ID における平均ポインティング時間
Fig.11 Mean pointing times by ID.

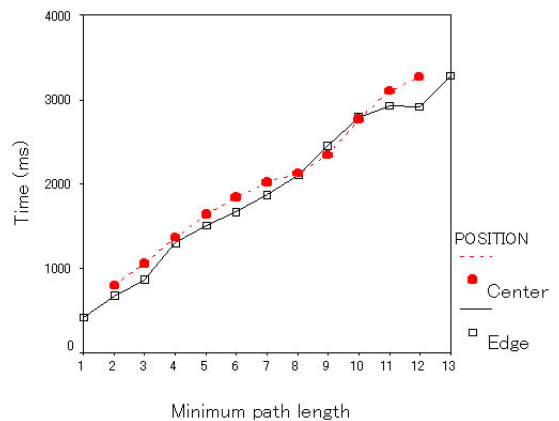


図 12 カーソルキーにおけるターゲット位置ごとのポインティング時間
Fig.12 Mean pointing times with a cursor key by position of target.

されたように、一辺 5 mm のターゲットは十分な精度でポイントできる大きさであったといえる。また、入力方式による有意な差は見られなかった ($F_{1,11} = 0.28$, $p > .05$)。

3.3.3 開始位置の効果

開始位置間でポインティング時間の比較を行ったところ、有意な主効果が見られた ($F_{3,1761} = 2.72$, $p < .05$)。下位検定の結果、左上からのポインティングは、右下からのポインティングよりも有意に時間がかかることが分かった ($p < .05$)。

3.3.4 Fitts' law に基づく分析

実験 1 と同様に、各 ID におけるポインティング時間の平均値を求めた。また、このデータについて回帰式と決定係数を求めた (図 11)。検定の結果、回帰式の説明力は有意であった ($F_{1,19} = 35.55$, $p < .001$)。

3.3.5 ターゲット位置の効果

スタートセルの対角の端にあるものを端のターゲット、それ以外の場所にあるものを中のターゲットとし、

カーソルキーで、同じ最少パス長にあるターゲットのポインティング時間を端と中とで比較した (図 12)。分散分析の結果、ターゲット位置による有意な主効果が見られ ($F_{1,1776} = 8.55$, $p < .01$)、端にあるターゲットは中にあるターゲットよりも速くポインティングできることが示された。

ペンについては、スタートセルとターゲットセルの中心間の距離をポインティング時間で割りポインティング速度 (mm/ms) を求め、これを端と中のターゲット間で比較した。ポインティング時間の平均値は、中のターゲットが 0.031 (SD = 0.014)、端のターゲットが 0.032 (SD = 0.017) であり、分散分析の結果、ターゲット位置による有意な効果は見られなかった ($F_{1,1763} = 1.09$, $p > .05$)。

4. 総合考察と今後の課題

4.1 入力方式によるパフォーマンスの差

まず実験 1 では、ターゲットサイズを変化させたときのペンとカーソルキーによるターゲットポイント時間とエラー率を比較した。この結果、ペンはカーソルキーよりも速くターゲットをポイントできるが、ターゲットサイズが 4 mm 以下のときにはエラー率が高く、パフォーマンスの信頼性が低いことが分かった。カーソルキーと同レベルのエラー率に抑えるためには、少なくともターゲットは一辺の長さを 5 mm 以上にする必要があることが明らかになった。

続く実験 2 では、ターゲットの数を変化させたときのペンとカーソルキーによるターゲットポイント時間とエラー率を比較した。実験 1 から得られた必要最小サイズである一辺 5 mm のターゲットを用いて実験を行った結果、最少パス長が 3 以上のとき、ペンはカーソルキーよりも速くターゲットをポイントできることが示された。

これらの結果は、携帯情報機器のユーザインタフェース設計者にとって、GUI の具体的な要求事項を提供するものである。たとえば、これまでカーソルキーで提供していたメニュー操作をペン操作用に置きかえる場合、メニューアイテムのサイズは最低限一辺 5 mm は必要である。ペンのみを備えた端末の場合、あるいはソフトキーボードのように、ペンで入力されることを前提としているアプリケーションの場合には、1 辺 5 mm を下回らない範囲ならば項目を 1 画面に多く表示した方がペンの利点を活かせる。カーソルキーのみを備えた端末の場合には、移動ステップ数が 3 以内で収まるような設計が望ましい。

4.2 Fitts の法則の適合性

ID ごとにポインティング時間の平均値を求め回帰式を算出したところ、実験 1 ではポインティング時間のばらつきが大きく、決定係数は 0.28 という低い値であった。しかし実験 2 では、ほぼ線形に回帰する結果が得られ、決定係数も 0.65 と比較的高い値が得られた。いずれの実験でも回帰式の説明力は有意であり、PDA 上でのペンポインティングも Fitts の法則に適合することが示唆された。実験 1 と 2 で適合度に違いが見られた理由については、操作した条件が異なっていたこと、2 つの実験の被験者の年齢や経験に違いがあったことなどが考えられるが、現時点では原因の特定は困難であり、今後より多くのデータを収集したうえでさらに検討が必要である。なお、年齢による影響については 4.6 節で述べる。

4.3 ターゲット提示方法の効果

実験 1, 2 では、ペン条件とカーソルキー条件で、ターゲットの提示の仕方が異なっていた。すなわち、カーソル条件ではスタートセルとターゲットセルが同時に提示されたのに対し、ペン条件では、スタートセルをポイントした後にターゲットセルが現れるようになっていた。このような提示方法の違いが、被験者のポインティングパフォーマンスに影響を及ぼした可能性がある。

ターゲット提示方法の違いがポインティングパフォーマンスにどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、スタートセルとターゲットセルが同時に提示される条件でペンでポインティングを行う追加実験（以下実験 3）を行い、実験 2 の結果との比較を行った。

被験者は男性 7 名、女性 5 名の計 12 名（20 歳から 28 歳まで、平均 23.4 歳、SD = 2.6）で、実験 1, 2 と同じ装置を用いてペンによるターゲットポインティング課題を行った。視力は全員正常（矯正含む）で、1 名が左利きであった。4 名がペンタイプのデバイス使用歴があり、うち 2 名は現在も所有して日常的に使用していた。

一辺 5 mm のセルを 1.5 mm 間隔で 8 行 × 8 列提示した。スタートセルとターゲットセルが同時に提示される条件で 50 試行のポインティングを行った。

4.3.1 ポインティング時間

実験 2 におけるペンの 8 × 8 条件と実験 3 から得られたポインティング時間のデータを用い、スタートセルとターゲットセルとの間の距離ごとにポインティング時間の平均値を求めたところ、図 13 が得られた。全体に同時提示条件（実験 3）のポインティング時間の方が連続提示条件（実験 2）よりも短く、両者の間には有意な差が見られた（ $F_{1,1148} = 2404.74, p < .001$ ）。

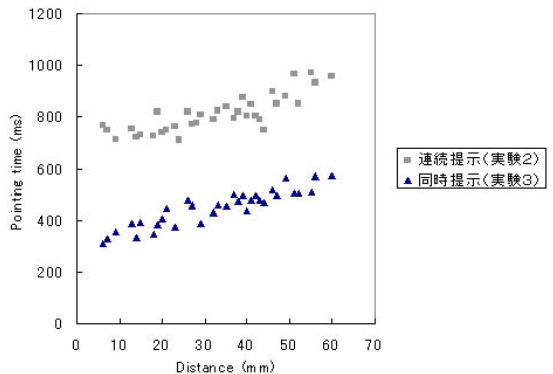


図 13 ターゲット提示方法ごとの各距離のポインティング時間
Fig. 13 Mean pointing times by target presentation method and distance.

連続提示条件の場合のターゲットポインティング時間には、「ターゲットを見つけるための時間 (T1) + ターゲットを知覚してから運動に移すまでの反応時間 (T2) + 実際にターゲットをポイントするための運動時間 (T3)」が含まれると考えられる。

一方、同時提示条件では、被験者はスタートセルとターゲットセルの位置を確認した後で運動を開始できる。このため、提示条件の場合のターゲットポインティング時間は T1 が含まれない分有利となり、連続提示条件よりも短くなると考えられる。実験 2 と実験 3 で同じ距離のターゲットのポインティング時間の差を求めたところ、平均 367.3 ms (SD = 46.63) の差があることが分かった。つまり、上記モデルで T1 に費やされる時間は、およそ 400 ms 弱であると考えられる。

4.3.2 エラー率

実験 3 で特異的にエラー率の高かった 1 人の被験者のデータ (23.9%) を除いて分析したところ、同時提示条件と連続同時提示条件との間にエラー率の有意な差は見られなかった (同時提示条件: 平均 3.49%, SD = 3.02; 連続提示条件: 平均 2.04%, SD = 2.50)。

4.3.3 開始位置の効果

実験 3 で得られたポインティング時間について、開始位置ごとに平均値を比較したところ、左上とその他の条件すべての間に有意な差が見られた (左上: 平均 510.69, SD = 160.64; 左下: 平均 440.18, SD = 133.15; 右上: 平均 458.15, SD = 134.68; 右下: 平均 423.83, SD = 132.28)。

4.4 ターゲット提示位置による効果

開始位置の効果を検討した結果、ペンでは左上から右下方向 90 度の範囲のポインティングは、その他の方向への運動よりも時間がかかることが分かった。これは先行研究の結果と一致しており、ペンインタフェースにおいては右下方向にターゲットを提示するデザインは不利であることを示している。

ターゲットの位置の効果について検討した結果、カーソルキーでは、画面の端にあるターゲットの方が、中にあるターゲットよりも速くポイントできることが示された。この優位性は、カーソルキーでオートキーリビート (キーを押しつづけるとカーソルが移動しつづける機能) が行われた場合にさらに顕著になると考えられる。一方、ペンにおいてはターゲットの位置による優位性は見られず、位置による視覚的な効果がポインティングパフォーマンスに影響を及ぼさずという仮説は支持されなかった。また、端のターゲットをポイントする際に、ペンが物理的な端に当たって止まる様子は実験時の観察からは見られなかった。

黒川ら¹²⁾は「身体の位置決め運動は一般に全体を中枢に設定された運動プログラムによって制御されるプログラム運動と体性受容器および視覚系からの感覚が主要な役割を果たすフィードバック運動に分けることができる」とし、タッチ画面上のターゲットを指でポイントする操作では、指がタッチ画面に衝突することで運動が不随意的に停止させられ、フィードバック運動が始まる余地が比較的少ない、と考察している。ペンによるポインティングについても、ターゲット付近で運動の修正が行われる余地は少なく、ほとんどがプログラム運動によって制御されていたと考えられる。これは、「ペンはマウスに比べ、操作を開始した後に操作を変更することが難しい」という小野⁵⁾の指摘とも関連すると推察される。

4.5 開始位置による効果

すべての実験において、左上にスタートセルが提示されたときに最もポインティング時間が長かった。実験 3 で、スタートセルとターゲットセルが同時に提示される条件においても同じ傾向が見られたことから、「左上のスタートセルをポイントすると、ターゲットが手で隠れやすいので、ターゲットが画面のどこに出現したのかを探し出すために時間がかかる」という認知的な要因よりも、「左上から右下方向の運動はその他の方向よりも運動しにくい」といった物理的な要因の方が影響が大きいと考えられる。

4.6 被験者による効果

実験 1 では、19 歳から 60 歳までの幅広い年齢層の被験者が参加した。今回の実験では、年齢による効果はスコープに入っていないことが、個人差にかかわらず「ポインティング時間はカーソルキーの方がペンよりも長い」という相対的な関係はどの被験者にも一致していたことから、被験者の年齢によってデータを分けずに分析したが、ポインティングにかかる時間の絶対値は年齢によって影響を受ける可能性がある。そこで、実験 1 について被験者を 20 歳前後の若年者 7 名と 50 歳以上の年長者 3 名との 2 つの年齢群に分け、入力方式ごとに各セルサイズにおけるポインティング時間の平均値を求めた (図 14)。平均値の差を分析した結果、ポインティング時間の平均値には年齢による有意な差があり、いずれの入力方式でも高齢者群の方が若年者群よりもポインティング時間が長くなること (カーソルキー: $F_{1,1998} = 344.0, p < .001$; ペン: $F_{1,1998} = 68.16, p < .001$) が分かった。また、この差はカーソルキーにおいて特に顕著であった。なお、入力方式による効果については、どちらの年齢群においてもペンの方がカーソルキーよりもポインティング時間

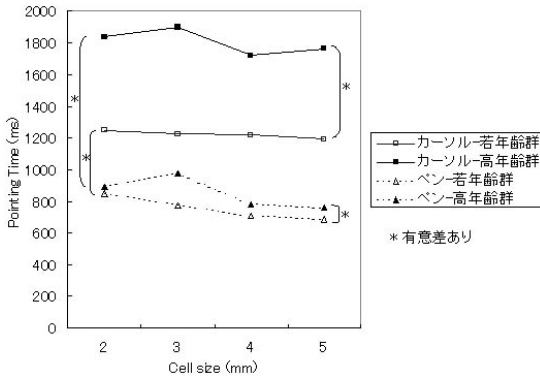


図 14 年齢層別の、各セルサイズにおけるペンとカーソルキーによるポインティング時間

Fig. 14 Mean pointing times by age group, input method, and cell size.

が有意に短かった(カーソルキー: $F_{1,2792} = 898.21$, $p < .001$; ペン: $F_{1,1192} = 696.46$, $p < .001$).

今回の実験では高齢年齢の被験者数はわずか 3 名であり、この結果をそのまま一般化するには限界があると考えられる。年齢による効果については今後さらなる検討が必要である。

また、各インプット方式に対する被験者の経験も影響を及ぼすと考えられる。今回の被験者の多くはペンタイプのデバイスの使用経験を持たなかったが、ペン操作に熟練した被験者とそうでない被験者とでは、ポインティング時間やエラー率に違いが見られると考えられる。今後、このような年齢や経験の要素も含め、様々なインプットデバイスが効果的に働く条件をより詳細に明らかにすることによって、個々の利用者に合ったユーザインタフェースが提案できると考えられる。

4.7 利用状況の効果

本実験では、座った状態でターゲットポインティングを行った場合のターゲットサイズと数の実用限界について具体的な数値が得られた。しかし、携帯情報端末が様々な状況下で用いられることを考えると、たとえば立って端末を手に持った状態で操作する場合など、被験者に負荷をかけた状態のパフォーマンスがどうなるかを検討することも必要である。また、実際にペン入力デバイスを利用する場合、ペンを取り出したり元の位置に収める手間と時間を考慮する必要がある、短い操作時間で少ないターゲットを操作するような場面では、ポインティング速度のわずかな優位性はこうした作業によって相殺されてしまう可能性がある。今後、こうした要因も考慮しながら、それぞれのインプットデバイスを利用するのに適した課題や文脈を明らかにしていく必要がある。本実験で得られた結果は、そう

した検討の基点となると考える。

5. おわりに

本研究では、携帯情報端末によく用いられるペンとカーソルキーの 2 つの入力方式に着目し、それぞれの優位性が発揮される条件を詳細化することを目的として、2 つの実験を行った。この結果、ターゲットとなるセルのサイズが 2 mm から 4 mm のときにはペンのエラー率はカーソルキーよりも高いが、5 mm のときには両者の差が見られなくなることが分かった。また、カーソルキーでの移動セル数が 3 以上のとき、カーソルキーよりもペンの方がターゲットを速くポイントできることが分かった。本実験結果から、PDA でのペンによるターゲットポインティングも Fitts の法則に適合することが確認された。ポインティングの方向については、左上を開始点とするときにより長い時間がかかることが分かった。また、ターゲットの位置の効果の検討したところ、カーソルキーにおいては画面の端にあるターゲットは中のターゲットよりも速くポイントできるが、ペンにおいては位置による優位性は見られなかった。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B)課題番号 14780338)による。本研究に対し様々な助言を下された Miika Silfverberg 氏、実験の実施にご協力下された森浩一氏、清水ゆり子氏および今井淳氏に感謝する。

参考文献

- MacKenzie, S., Sellen, A. and Buxton, W.: 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).
- 魚井宏高, 篠田真由美, 山本康友, 辻野嘉宏, 都倉信樹: 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.82-99 (1992).
- 加藤直樹, 中川正樹: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp.1536-1546 (1998).
- 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).
- 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).
- Sears, A., Plaisant C. and Shneiderman, B.: A new era for high precision touchscreens, *Advances in Human-Computer Inter-*

- action, Vol.30, Ablex, Norwood, NJ, pp.1-33 (1992).
- 7) Ren, X. and Moriya, S.: Improving selection performance on pen-based systems: A study of pen-input interaction for selection tasks, *Transactions on Computer Human Interaction (ToCHI)*, Vol.7, No.3, pp.384-416 (2000).
 - 8) Fitts, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, pp.381-391 (1954).
 - 9) MacKenzie, S.I.: Fitts' law as a research and design tool in Human-Computer Interaction, *Human-Computer Interaction*, Vol.7, pp.91-139, Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (1992).
 - 10) Card, S.K., Moran, T.P. and Newell, A.: The psychology of human-computer interaction, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates (1983).
 - 11) Card, S.K., English, W.K. and Burr, B.J.: Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT, *Ergonomics*, Vol.21, No.8, pp.601-613 (1978).
 - 12) 黒川隆夫, 久世通由, 森本一成: タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント特性およびそれに対する Fitts の法則の適合性, *Progress in Human Interface*, Vol.5, pp.5-12 (1996).
 - 13) Tognazzini, B.A.: Quiz designed to give you Fitts, <http://www.asktog.com/columns/022DesignedToGiveFitts.html> (1999).

(平成 14 年 4 月 15 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



溝淵 佐知 (正会員)

1995 年早稲田大学大学院文学研究科心理学専攻修士課程修了。同年, 日本電信電話(株)入社。ソフトウェア研究所(旧)にて, オンラインコミュニティにおける利用者の態度・行動や WWW における情報の効果的提示方法等の研究に従事。1999 年ノキア・ジャパン(株)入社。現在, ノキア・リサーチセンターにて携帯情報機器のユーザビリティに関する研究に従事。2001 年より慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士後期課程に在学中。日本心理学会, 日本認知科学会, ACM 各会員。



任 向実 (正会員)

1965 年生。1991 年東京電機大学工学部電気通信工学科卒業。1993 年同大学大学院情報通信工学専攻修士課程修了, 1996 年同専攻博士課程修了。博士(工学)。1996~1999 年東京電機大学工学部情報通信工学科助手。2000 年より高知工科大学情報システム工学科および同大学大学院工学研究科基盤工学専攻情報システムコース講師。Human-Computer Interaction(HCI)全分野, 特に pen-based systems, multimodal interaction, usability に興味を持つ。電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM SIGCHI, IEEE Computer Society, British HCI Group 各会員。



安村 通晃 (正会員)

1947 年生。1971 年東京大学理学部物理学科卒。1975~1977 年 UCLA 留学。1978 年東京大学理学系大学院博士課程(情報科学専攻)満了(株)日立製作所中央研究所主任研究員を経て, 1990 年 4 月より慶應義塾大学環境情報学部助教授。現在, 同教授。理学博士。実世界指向インタフェース, マルチモーダルインタラクション, ユニバーサルデザイン等の研究に従事。情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本ソフトウェア科学会, 日本認知科学会, 日本教育工学会, ACM, IEEE Computer Society 各会員。