

マウスポインティング時の C-D 比が 運動特性に与える影響

朝日 元生^{†1} 高嶋 和毅^{†1} 築谷 喬之^{†1}
北村 喜文^{†1} 岸野 文郎^{†1}

本研究では、マウスポインティング時に C-D 比が運動特性に与える影響を調査し、適切な C-D 比に関する指針を提案することを目的とする。C-D 比とはカーソル速度を決定する指標であり、ディスプレイ上のカーソル移動距離に対するマウス移動距離の比と定義される。運動特性と C-D 比の関係を調査するために、2 段階の実験を行った。実験 1 では一般的な GUI 環境で、実験 2 では大画面環境でポインティング実験を行った。実験 1 では効率的なポインティングを行うために適切な C-D 比は、0.125 ~ 0.25 という結果となり、実験 2 では 0.0625 が適切な C-D 比であるという結果となった。これらの結果から、ポインティング動作を行う際に動的に C-D 比を変更することの有効性が示唆された。また、どちらの実験においても、極端に小さい C-D 比条件 (0.0625) では、素早くターゲット付近に到達できるが、直感性の低下を招く可能性があり、ポインティング効率 (ポインティング時間) と直感性 (速度波形の歪み) にはトレードオフの関係が見られた。また、ピーク速度が検出される位置やターゲット突入時のカーソル調整に必要な距離はどちらの実験でも C-D 比に依存していなかったことから、ポインティング運動の計画は主にターゲット距離によってのみに決定されることが示唆された。

An Effect of Control-Display Ratio to Kinematics Features in a Pointing Task with a Mouse

MOTOO ASAHI,^{†1} KAZUKI TAKASHIMA,^{†1}
TAKAYUKI TSUKITANI,^{†1} YOSHIFUMI KITAMURA^{†1}
and FUMIO KISHINO^{†1}

We investigate influences of C-D (Control-Display) ratio on kinematics features in a pointing task with a mouse. The C-D ratio is defined as a value of mouse movement distance divided by cursor movement distance on a display. Two experiments using Fitts' task are conducted to investigate relationship

between kinematics features and the C-D ratio. A typical display were used in experiment 1, and large display in experiment 2. We found suitable C-D ratio conditions were ranging from 0.125 to 0.25 in experiment 1. However, it was 0.0625 in experiment 2. These results suggest availability of changing C-D ratio dynamically. In contrast, a tradeoff between an efficiency (pointing time) and intuitive control (smooth velocity profile) was also observed in both experiments. For example, excessive small C-D ratio settings (e.g., 0.0625) degrade an intuitive cursor control even though the settings offer rapid reaching to the target. Detailed analysis shows that such principal kinematics features as distance to peak velocity and distance for cursor adjustment did not depend on the C-D ratio in both experiments. Therefore, these results suggest that planning a pointing movement is previously determined by only target distance prior to an intuition of the movement.

1. はじめに

大画面高解像度のディスプレイが普及するなか、GUI 環境において、高精度で長距離のポインティングを求められる機会が増え、ユーザにかかる認知的負担や運動負担は増加する傾向にある。それらの負担を軽減するために、Windows などの一般的な OS では、カーソルの速度や加速機能の設定によって、ポインティングの効率や精度を高められるように工夫されている。

C-D 比 (Control-Display ratio) とは、マウス移動量とディスプレイ上のカーソル移動量の比率であり、カーソル速度を決定する指標である。マウスを用いた間接指示環境では、ユーザはカーソル位置をつねに確認し、それを視覚フィードバックとして利用しながらマウスの操作制御を行うため、C-D 比はポインティングという到達運動における視覚-運動制御に大きな影響を与える。これまでも、C-D 比について様々な研究がなされており、C-D 比がポインティングに与える影響を調査した基礎的な研究^{7),8),14),24)} や、C-D 比を利用したポインティング支援技術が提案されている^{6),28)}。しかし、これら先行研究の多くは、適切な C-D 比をポインティング時間という、効率の観点のみによって評価しており、ポインティング到達過程を含めての検討はなされていない。また、今後ますます普及するであろう大画面のディスプレイ環境では、C-D 比による影響はさらに大きくなると予想され、適切な C-D 比が用いられていない場合には、ポインティングにおける視覚-運動制御のバランス

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

が崩れ、直感性が失われる恐れがある。したがって、C-D 比の調査を行う際は、効率だけでなく、人のポインティング動作中の運動特性に与える影響を詳細に調査することが重要であるといえる。

そこで本研究では、一般的なディスプレイと大画面ディスプレイを用いて、様々な C-D 比条件下でのポインティング実験を行い、ポインティング時間、および人のポインティング中の速度分布などの運動特性の解析によって、適切な C-D 比に関する指針の提案を目的とする。本稿では、ターゲット距離、ターゲットサイズ、C-D 比がポインティングの到達過程に与える影響を調査した結果および考察を述べる。

2. 関連研究

2.1 ポインティング動作における運動特性

ポインティングに関する研究の中では、フィッツの法則がよく知られている¹²⁾。フィッツの法則では、ポインティング動作にかかる時間 MT はターゲットまでの距離 D と、ターゲットサイズ W によって決まるとされており、 a 、 b を実験によって決まる定数として次のように表される。

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

式 (1) では、ポインティング時間はスタート位置からターゲットまでの距離が長いほど、また、ターゲットの大きさが小さいほど大きくなることを示している。式 (1) の b の係数は ID と呼ばれ、ポインティングの難度を示す指標となっている。

また、ポインティング動作中の人の運動特性についての研究も多くなされており、ポインティング運動は視覚フィードバック情報を用いない計画運動と、用いる調整運動の 2 つからなるとされている^{11),26),27)}。ここでの視覚フィードバック情報とは、ディスプレイ上のカーソル速度などの、ポインティング動作制御に用いられる情報のことを指す。ポインティング動作中におけるこの 2 つの運動の境界については、カーソルの速度波形中の最大値であるピーク速度が現れる時点とするモデルや、最初の極小点が現れる時点とするモデルなど、様々な提案されている^{17),20),23),27)}。この境界を前者と仮定した研究では、ピーク速度以前の運動を特徴付ける特徴量はターゲット距離に依存する計画運動である一方で、ピーク速度以後はターゲット幅に依存する調整運動であることが示されている^{20),22)}。また、ターゲットの距離による人の手指や手首、腕の動きの違いを調査している研究もある¹⁹⁾。さらに、このようなポインティング基礎研究から得られた知見を基にしたポインティング支援技術が提案されている^{3),5)}。このように、人のポインティングパフォーマンスを正しく評価す

るためには、フィッツの法則だけでなく、ピーク速度などの速度波形中の特徴量も考慮に入れた、ポインティング動作全体の分析が重要であることが報告されている^{3),14),30),31)}。

2.2 C-D (Control-Display) 比

2.1 節で述べた研究のほかに、C-D 比が人の運動特性に与える影響について調査した研究もなされている。C-D 比とは、カーソル速度の指標を示す値であり、我々はその算出方法を、Blanch らに従い、式 (2) のように定義する⁶⁾。

$$C-D \text{ 比} = \frac{\text{マウス移動距離}}{\text{ディスプレイ上のカーソル移動距離}} \quad (2)$$

式 (2) は、C-D 比の値が小さいとカーソル速度は速く、大きいとカーソル速度は遅いことを意味する。

運動特性と C-D 比の関係を調査した研究は古くからなされており、数多くの報告がある^{21),25)}。その例として、ターゲット付近で C-D 比を大きくすることはターゲットサイズを増加させるということに相当し、それ以外の場所で C-D 比を小さくすることは、ターゲット距離を小さくすることと同義であることが報告されている^{8),24)}。また、ピーク速度と C-D 比の関係を分析した研究¹⁴⁾ や、C-D 比を非線形に変化させてポインティングパフォーマンスを調査した研究^{10),15),18)}、さらに、C-D 比によって腕や手指の関節の使い方を比較した研究⁷⁾ もある。これらの研究では入力デバイスとしてマウスを用いているが、マウス以外にも、ジョイスティックやトラックボールを用いて C-D 比を調査した研究もある^{2),9),13)}。

また、カーソルがターゲット付近に到達した際に C-D 比を大きくしてカーソル速度を遅くし、ターゲットのサイズを擬似的に大きくするというように、C-D 比を動的に変更したポインティング支援技術が提案されている^{6),28)}。このように、C-D 比は間接指示環境においてポインティング動作を決定づける重要な要素の 1 つであるといえる。

3. 実験 1：一般的な環境でのポインティング

3.1 概要

2.2 節で述べたように、C-D 比がポインティング動作に与える影響を調査した研究や、C-D 比の動的変更を利用したポインティング支援技術は多数存在する。しかし、様々な C-D 比条件下でのカーソルの速度波形を詳細に分析した先行研究は少ない。ポインティング中の視覚-運動制御において、カーソルの移動は重要な視覚情報であることから、カーソルが描く速度波形の分析によって、人のポインティング動作時の制御方法について何らかの知見を得ることができると考えられる。したがって、本研究では、幅広い C-D 比条件下でのポイン

ティング実験を行い、カーソルの速度波形を解析することによってポインティング中の視覚-運動制御について調査する。

3.2 実験環境

実験用アプリケーションは Microsoft 社の Visual C++ 6.0 を用いて実装し、計算機は DELL 社の Dimension 8300 (CPU: Pentium 4, 3.2 GHz, メモリ: DDR-SDRAM 2 GB, OS: Windows XP Professional), ディスプレイは DELL 社の 19 インチ液晶ディスプレイを、 $1,280 \times 1,024$ ピクセル (約 87 dpi) の解像度で使用する。入力デバイスは Logitech 社の Wheel Mouse (M-BJ58) を用いて 60 Hz でマウスカーソルの位置を取得する。マウスパッドは Power Support 社の Airpad Pro III (AK-07, 408×306 mm) を使用する。

3.3 実験計画

実験は、C-D 比 (0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1), ターゲット距離 (2, 4, 8, 16, 32 cm (68, 136, 272, 544, 1,088 pixel)), ターゲットサイズ (0.5, 1, 2 cm (17, 34, 68 pixel)) の 3 要因反復実験である。予備実験では、C-D 比はこれらよりも大きい 2 と 4 についても検討したが、2 や 4 という C-D 比条件でのポインティングはカーソル速度が非常に遅く、マウスを長距離移動させなければならなかったため、現実的なマウス操作を行うことができていなかった。そのため、本実験ではこれらの C-D 比を排除し、5 種類の C-D 比を用いる。

今回の実験では実験要因で設定した C-D 比のみを用いるために、カーソルの加速機能は用いず、C-D 比が動的に変更しないように設定する。また、一般的な OS 上のポインティング動作のターゲットは、アイコンやウィンドウのクローズボタンなど、方形であることが多い。したがって、ターゲットの形状は正方形とすることによって、現実的なタスクに近い環境でポインティング実験を行う。ターゲットの方向は水平方向のみとするが、左側にスタート地点、右側にターゲットを設定するタスクと、その逆のタスクを交互に行う。これによって、1 タスクごとにマウスをスタート位置へ戻すなどの、タスクに直接関係しない動作を省き、被験者の負担を軽減するように配慮する。また、被験者には、実験前日に、実験で 1 回目に提示される C-D 比に近い C-D 比設定で計算機を操作してもらい、普段計算機を使用する際の慣れによる影響が実験結果にできるだけ現れないように配慮する。

3.4 実験手順

被験者はディスプレイに正対して座り、ひじの高さが机の高さと同じになるように椅子の高さを調整する。このとき、視点とディスプレイは約 60 cm 離れており、最も長いターゲット距離である 32 cm は、視野角にして 30 度となる。ディスプレイには固定されたカーソルとターゲットが表示され、マウスを左クリックすることでカーソルの固定が解かれる。マウ

スを動かすとタスクが開始され、被験者はできるだけ早く正確にターゲット上までカーソルを動かし、クリックする。ターゲット領域内がクリックされた場合は正解音が、領域外がクリックされた場合は不正解音が出力される。以上が 1 タスクである。

各タスクは、1 つの C-D 比ごとに、ターゲット距離とターゲットサイズがランダムに提示される。被験者は各タスクを 16 回反復するため、各 C-D 比ごとに、 $5 \times 3 \times 16 = 240$ 回の試行が行われる。C-D 比条件は 240 試行が終了するまで変更しないが、C-D 比の提示順は被験者間でカウンタバランスをとり、C-D 比の慣れによる影響を排除する。C-D 比が切り替わるごとに被験者は 3 分程度休憩する。1 被験者あたり 5 C-D 比 $\times 240 = 1,200$ 回の試行を行い、全試行が終了した後に C-D 比の主観評価を行う。

3.5 被験者

被験者は、男性 8 名と女性 7 名の合計 15 名で、平均年齢は 24.3 歳であり、計算機の使用経験は 3 年以上ある。被験者のうち、13 名が右利きで、2 名が左利きであるが、全員が入力デバイスとして日常からマウスを右手で利用している。実験前には説明と同意がなされており、実験は全員右手でマウスを操作する。

3.6 実験結果

全 18,000 試行のうち、377 試行 (2.097%) でエラーが観察されたが、大半が単純なクリックミスによるものであり、以後の分析ではこのエラーであった試行も含めて分析する。各測定項目について、C-D 比、ターゲット距離、ターゲットサイズの三元配置反復測定分散分析で解析する。

ターゲット距離とポインティング時間の関係を図 1 (a) に示す。同図 (b) は、(a) のターゲット距離が 2 cm から 4 cm までを拡大したものである。また、ターゲットサイズとポインティング時間の関係を図 1 (c) に示す。ポインティング時間に関しては、ターゲット距離、ターゲットサイズ、C-D 比に主効果が認められた (それぞれ $F(4, 56) = 425, p < .001$, $F(2, 28) = 132, p < .001$, $F(4, 56) = 18.0, p < .01$)。また、C-D 比とターゲット距離の交互作用および C-D 比とターゲットサイズの交互作用も認められた (それぞれ $F(16, 224) = 16.5, p < .01$, $F(8, 112) = 16.2, p < .01$)。

ターゲット距離が 16 cm、ターゲットサイズが 1 cm のときの、カーソル速度の全員の平均をそれぞれ図 2 に示す。(a) は時間を、(b) はスタート地点からの距離をそれぞれ横軸としている。図 2 (a) から、C-D 比が小さくなるほどピーク速度は早く現れ、位置合わせの調整に時間を割いている様子が確認できる一方、図 2 (b) からは、ピーク速度が現れる位置やターゲット付近の速度波形はどの C-D 比でもほぼ同じであるという傾向が見られた。こ

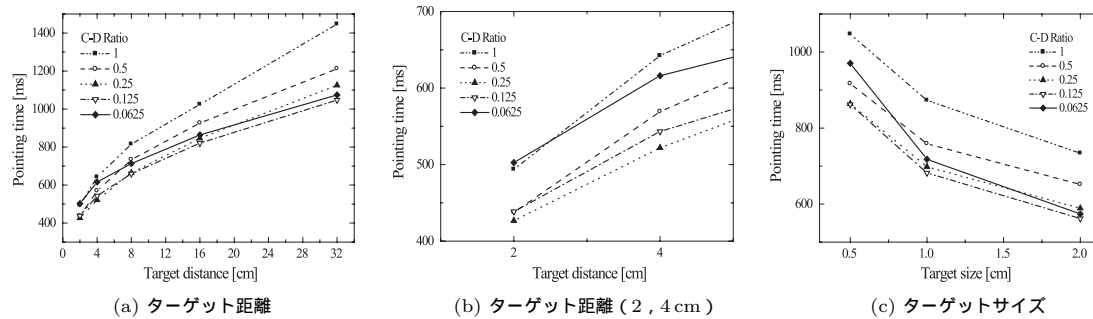


図 1 各ターゲット属性におけるポインティング時間
Fig. 1 Pointing time each target attribute.

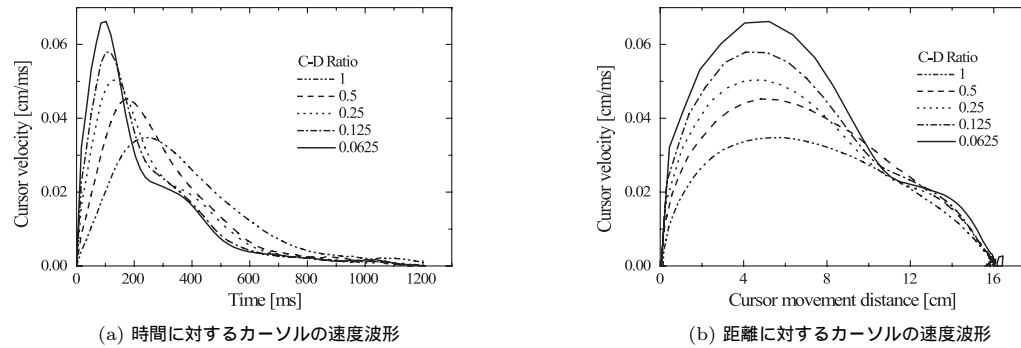


図 2 カーソルの速度波形 (ターゲット距離 16 cm, ターゲットサイズ 1 cm のとき)
Fig. 2 Time vs. distance velocity profile.

れらは、他のターゲット距離とターゲットサイズにおいても若干の差はあるものの同様であった。

この傾向をさらに詳細に分析した結果を図 3、および表 1 に示す。図 3 は、各ターゲット距離に対する、ピーク速度が出現した地点のスタート地点からの距離の割合を、表 1 は、各ターゲット距離に対する、ピーク速度検出後にカーソルが再加速する地点のスタート地点からの距離の割合を、各ターゲット距離、各 C-D 比ごとに示している。図 3 では、ターゲットサイズには主効果が認められた一方で ($F(2, 28) = 3.26, p > .05$)、ターゲット距離、C-D 比には主効果が認められず (それぞれ $F(4, 56) = 6.63, p < .01, F(4, 56) = 3.21,$

$p < .05$)、ピーク速度が検出される距離の割合は、ターゲット距離や C-D 比に関係なくほぼ一定であることが分かった。また表 1 からは、ターゲット距離とターゲットサイズにおいて主効果が見られたものの (それぞれ $F(4, 56) = 16.49, p < .01, F(2, 28) = 5.51, p < .01$)、C-D 比に関して主効果が認められず ($F(4, 56) = 1.00, p > .05$)、各ターゲット距離とターゲットサイズにおいて、カーソルが再加速する場所は C-D 比に影響されることが分かった。

被験者の主観評価で、ポインティング動作に最も快適な C-D 比を調査し、被験者 15 名の平均値をとった (5: 良い, 1: 悪い)。その結果を図 4 に示す。被験者の主観において、

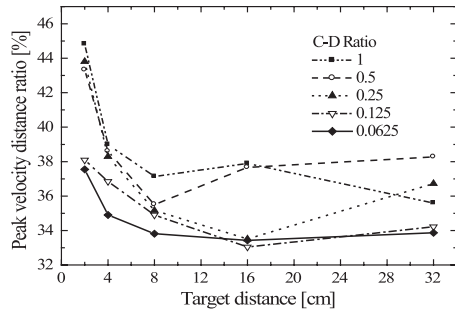


図 3 ターゲット距離に対するピーク速度が出現した距離の割合
Fig.3 Target distance vs. peak velocity distance ratio.

表 1 距離に対するピーク速度後の再加速地点の割合 (%)
Table 1 Distance of re-acceleration point (cm).

C-D 比	ターゲット距離 [cm]				
	2	4	8	16	32
0.0625	0.851	0.865	0.800	0.765	0.785
0.125	0.859	0.856	0.796	0.759	0.792
0.25	0.823	0.864	0.847	0.758	0.718
0.5	0.840	0.845	0.852	0.767	0.718
1	0.866	0.829	0.825	0.617	0.762

最も評価が高かった C-D 比は 0.125 (4.08 ポイント, 標準偏差 1.07), 次が 0.5 (3.62 ポイント, 標準偏差 1.14), 以下 0.25 (3.31 ポイント, 標準偏差 1.26), 0.0625 (2.31 ポイント, 標準偏差 1.26) と続き, 最も評価が低かった C-D 比は 1 (1.69 ポイント, 標準偏差 0.72) であった.

3.7 議 論

実験 1 によって, C-D 比がポインティング動作に与える影響についていくつかの興味深い結果を得た. ポインティング時間については, 図 1 から 0.125~0.25 の C-D 比条件では素早くターゲットをポインティングできており, ポインティングに適しているといえる. しかし, 同図において, ターゲット距離が増加するにつれて 0.0625 のときのポインティング時間の増加率は他より小さい傾向にあるため, より大きなディスプレイ環境では, 今回の実験とは異なる結果となる可能性がある.

また, 図 2(a) では, C-D 比が小さいほどピーク速度が出るタイミングが早くなる結果と

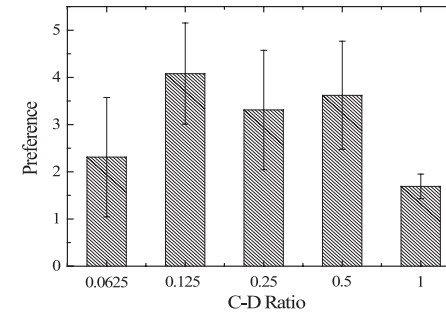


図 4 アンケート結果 (5: 良い, 1: 悪い)
Fig.4 Subjective preference.

なった一方で, 図 2(b) では, ピーク速度が出る距離やターゲット付近の速度波形は C-D 比に依存せずほぼ一定であった. このことから, 人はポインティングを行う前にピーク速度を出現させる距離やターゲットへの到達運動を決定していると考えられる. この知見は一般的なディスプレイを用いた実験によって得られた結果であるが, 1 章でも述べたように, 今後大画面環境での計算機操作の需要は高まると考えられるため, 適切な C-D 比について議論するためには, 今回の実験よりもさらにターゲットまでの距離が長いタスクを設定し, 運動特性を調査する必要がある.

そこで, 次章では大画面環境でのポインティング実験を行い, 本章の実験で得られた結果と比較することによって, 適切な C-D 比の指針の一般性をより深めることとする.

4. 実験 2: 大画面環境でのポインティング

4.1 実験環境

実験用アプリケーションは Microsoft 社の Visual C++ 2005 を用いて実装し, 計算機は Lenovo 社の ThinkPad T61 (CPU: Core2 Duo, 2.2 GHz, メモリ: DDR2-SDRAM 2GB, OS: Windows Vista Business) を使用する. また, 三洋電機社 LP-XL50 (H) 短焦点プロジェクタ (解像度: 1,024 × 768 ピクセル) を用いて大画面環境 (168 × 106 cm) を構築する. 図 5 に実験の様子を示す. 入力デバイスは Microsoft 社の USB IntelliMouse Optical を用いて 60Hz でマウスカーソルの位置を取得する.

4.2 実験計画

実験は, C-D 比 (0.0625, 0.125, 0.25), ターゲット距離 (32, 64, 96, 128 cm (200,

400, 600, 800 pixel)), ターゲットサイズ (0.5, 1, 2, 4, 8 cm (4, 7, 13, 25, 50 pixel)) の 3 要因反復実験である。その他の実験計画は実験 1 と変わらないが、マウスパッドは用いない。これは、実験 1 のときにマウス移動距離が 32 cm であるタスクを行った場合に、マウスがマウスパッドからはみ出しそうになり、実験に支障をきたす場合があったためである。本実験でも C-D 比が 0.25 で、ターゲット距離が 128 cm のタスクではマウスを 32 cm 動かすため、マウスパッドを用いずに、実験に支障をきたさないように配慮する。なお、マウスパッドを用いなくてもカーソルの位置取得には問題がないことを予備実験で確認している。



図 5 実験環境

Fig. 5 Experimental environment.

4.3 実験手順

1 タスクの手順は実験 1 とほぼ同じであるが、被験者はディスプレイから約 120 cm 離れて座ることのみ実験 1 とは異なる。このとき、最も長いターゲット距離である 128 cm は視野角にして約 56 度となる。この角度は、実験 1 での視野角条件よりも大きく、大画面環境を構築できているといえる。また、注視点が迅速に安定して見える安定注視野は水平に 60 ~ 90 度であるといわれていることから²⁹⁾、本実験での視野角条件では、ランダムに表示されたターゲットを迅速にとらえるには十分であると考えられる。

被験者は各タスクに入る前に 20 回程度練習する。C-D 比条件は 4 ターゲット距離 × 5 ターゲットサイズ × 12 反復 = 240 試行が終了するまで変更せず、C-D 比の提示順は被験者間でカウンタバランスをとり、C-D 比の慣れによる影響を排除する。C-D 比が切り替わるごとに被験者は 3 分程度休憩する。1 被験者あたり 3C-D 比 × 240 = 720 回の試行を行い、全試行が終了した後に C-D 比の主観評価を行う。

4.4 被験者

被験者は、男性 9 名と女性 7 名の合計 16 名で、平均年齢は約 25.8 歳である。被験者のうち 5 名は実験 1 にも参加している。全員が計算機を 1 日あたり 4 時間以上利用している。

4.5 実験結果

全 11,520 試行のうち、495 試行 (4.297%) でエラーが観察されたが、大半が単純なクリックミスによるものであり、以後の分析ではこのエラーであった試行も含めて分析する。各測定項目について、C-D 比、ターゲット距離、ターゲットサイズの三元配置反復測定分散

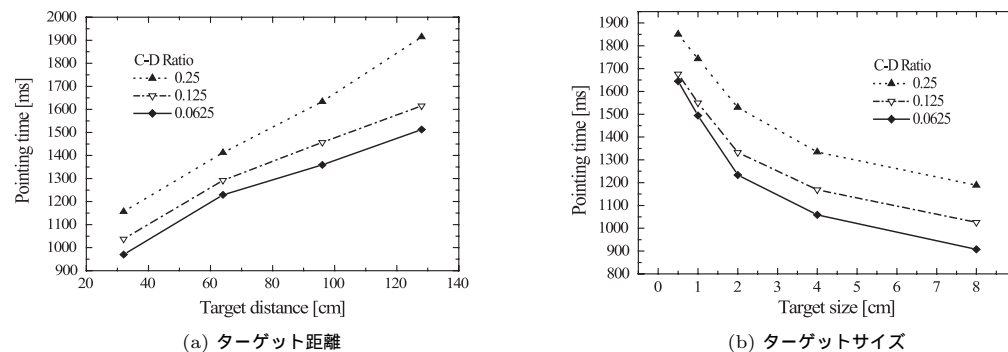


図 6 各ターゲット属性におけるポインティング時間

Fig. 6 Pointing time each target attribute.

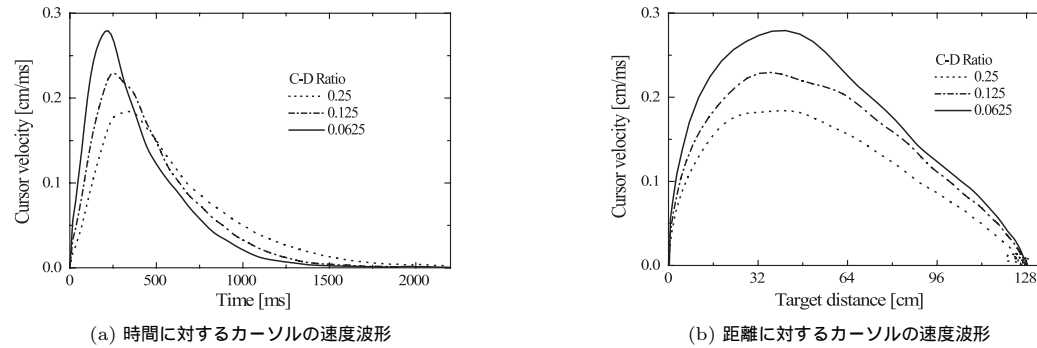


図 7 カーソルの速度波形 (ターゲット距離 128 cm, ターゲットサイズ 1 cm のとき)

Fig. 7 Time vs. distance velocity profile.

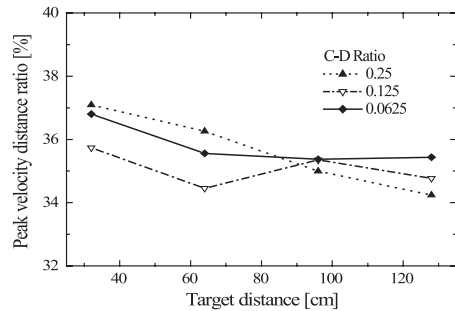


図 8 ピーク速度が出現した距離の割合

Fig. 8 Target distance vs. peak velocity distance ratio.

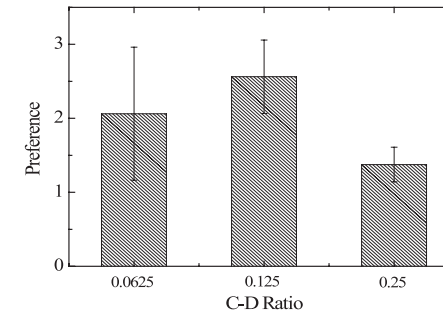


図 9 アンケート結果 (3: 良い, 1: 悪い)

Fig. 9 Subjective preference.

分析で解析する。

ターゲット距離とポインティング時間の関係を図 6 (a) に、ターゲットサイズとポインティング時間の関係を図 6 (b) に示す。ポインティング時間に関しては、ターゲット距離、ターゲットサイズ、C-D 比に主効果が認められた (それぞれ $F(3, 45) = 384, p < .001, F(4, 60) = 598, p < .001, F(2, 30) = 29.2, p < .01$)。また、C-D 比とターゲット距離の交互作用および C-D 比とターゲットサイズの交互作用も認められた (それぞれ $F(6, 90) = 21.7, p < .01, F(8, 120) = 3.54, p < .01$)。

ターゲット距離が 128 cm でターゲットサイズが 1 cm のときの、カーソル速度の全員の

平均を、それぞれ図 7 に示す。(a) は時間を、(b) はスタート地点からの距離をそれぞれ横軸としている。図 7 (a) では、C-D 比が小さいほどピーク速度は早く現れ、位置合わせの調整に時間を割いている結果となった。また、図 7 (b) からは、ピーク速度が現れる位置はどの C-D 比でもほぼ同じである傾向が見られ、特に 0.0625, 0.125 は、ターゲット付近のカーソル速度もほぼ同様の波形を描いた。図 8 に、各ターゲット距離におけるピーク速度を検出した距離の割合を示すが、実験 1 と同様に、どの C-D 比でもほぼ同じ距離でピーク速度が検出されることを確認した。

実験 1 と同様に快適な C-D 比について被験者の主観評価を調査し、被験者 16 名の平均値

をとった(3:良い, 1:悪い). その結果を図9に示す. 被験者の主観において, 最も評価が高かった C-D 比は 0.125 (2.56 ポイント, 標準偏差 0.50), 次が 0.0625 (2.06 ポイント, 標準偏差 0.90) で, 最も評価が低かった C-D 比は 0.25 (1.38 ポイント, 標準偏差 0.48) であった.

5. 考察

5.1 ポインティングに最適な C-D 比

本節では, ポインティングに最適な C-D 比について, ポインティング時間という効率の観点から論じる. 実験1で一般的なディスプレイを用いて実験を行った結果, 図1(a), (b)から, C-D 比が1のときはどのターゲット距離であっても, また, 0.0625のときは短いターゲット距離のときに, ポインティングに長い時間がかかった. ターゲットサイズについても, 図1(c)から, C-D 比が1のときは全体を通してポインティングに時間がかかり, 0.0625のときはターゲットサイズが小さいときは同じくパフォーマンスが悪化することが確認された. これらポインティング時間を用いた評価から, 効率という面で一般的なディスプレイでのポインティングに適切な C-D 比は, 0.125~0.25 付近であると考察される. これらの C-D 比は Windows などの OS の初期設定に近い値で, 多くの被験者が普段から使用しており, 被験者の慣れによる影響もあったと考えられる.

一方で, 実験2において大画面環境でポインティング実験を行った結果, 図6から, どのターゲット距離とターゲットサイズであっても, C-D 比が 0.0625のときにポインティング時間が最も短く, 一般的なディスプレイでは適していると考えられる C-D 比が 0.25のときはポインティングに時間がかかる傾向が見られた. したがって, ポインティングに適切な C-D 比はディスプレイの環境に依存し, 一意には定まらなると考えられる.

5.2 ポインティング運動とカーソル速度の関係

5.2.1 ピーク速度の位置

図2と図7の速度波形を基に, C-D 比による人のポインティング動作制御の変動に関して考察する. 図2(a)と図7(a)では, ピーク速度検出時刻は C-D 比が小さいほど早いことが確認できるが, 図2(b)と図7(b), および図3, 図8に示すように, ピーク速度を検出した距離は, どの C-D 比でもターゲット距離に対してほぼ 35~40%となる結果であった. この結果は, ピーク速度までの運動(あらかじめ計画されている運動)に必要な距離は C-D 比にほとんど依存せず, ターゲット距離に応じて決められていることを意味する. このような傾向はどのターゲット距離条件でも同様であり, 被験者はターゲット位置を確認した後,

ポインティング動作を開始する直前には, 速度がピークに達するまでの距離を計画しており, その距離へ合わせるような形で運動が生成されていると考えられる. これは, 図2(a)と図7(a)において, 0.0625という非常に小さい C-D 比(速いカーソル速度)の場合には, 他の C-D 比に比べて早い時間にピークに達してから減速に転じ, 他の C-D 比と同程度の距離にピーク速度が検出されるような波形を描いている点からも説明できる.

直接指示環境でのポインティングの場合, 手の速度波形はほぼ線対称を描くといわれているが³²⁾, 今回のようにマウスを用いた間接指示環境でのポインティングの場合, ピーク速度はターゲット距離の半分よりやや手前で出現し, 線形非対称な速度波形となる. これは, 直接指示環境でのポインティングには視覚とともに触覚がフィードバックとして与えられる一方で, 間接指示環境でのポインティングは視覚によるフィードバックのみが与えられるため, 運動制御に必要なフィードバック情報が直接指示環境よりも少ないためと考えられる. このため, 間接指示環境では視覚のみでカーソルを制御しなければならず, カーソルのオーバシュートを引き起こす可能性が高まる. オーバシュートはポインティング動作の中でも無駄な動作であるため, ユーザはそれを防ぐ目的でピーク速度の出現位置をターゲット距離の半分よりやや手前に出現させ, ポインティング前半よりも遅い速度でなめらかにターゲットに到達するように調整運動を行っていると考えられる.

5.2.2 ターゲットへの突入運動

図2(b)ではすべての C-D 比で, 図7(b)では C-D 比が 0.0625と0.125の場合に, ポインティング運動の終盤であるターゲット付近では同じような速度波形を描いている. すなわち, カーソルがターゲットへ突入していく際の速度波形はほぼ同じである. この結果から, ターゲット突入時のカーソル速度も, ピーク速度までの運動と同様に事前に計画されており, その速度に合わせるためにターゲット突入の前に調整を行っている可能性が高い. これは, 表1より, どのターゲット距離においても, ピーク速度検出後にカーソルが再加速する地点は C-D 比によらず同程度の場所で現れていることから説明できる. また, 図2(b)において, C-D 比が小さいほど速度波形に大きな歪みが生じているが, これは, 事前の計画よりもカーソル速度が速くなりすぎてしまったために, カーソルの視覚的なフィードバックを利用し, カーソル速度を適宜修正して事前の計画の速さになるように調整してからターゲットに到達していると考察され, そのためにターゲット付近で再加速運動が行われたと考えられる.

ただし, 図7(b)では, C-D 比が 0.25のときのターゲット突入時の速度波形は, 他の C-D 比と異なる結果となった. これは, C-D 比が 0.25のときはカーソル速度が遅すぎるために

事前に計画していた速度に到達できなかったためと考えられる。また同図からは、どの C-D 比でも実験 1 のときのようなターゲット付近での速度波形の歪みが見られずに、ピーク速度到達後はほぼ直線の速度波形を描いているが、ターゲットまでの距離が十分に長かったために、カーソル速度の調整を余裕を持って行うことができ、急な減速運動をする必要がなかったためと考えられる。

5.3 効率と直感性のバランス

実験 1 では、図 4 の被験者によるアンケートの結果から、被験者の主観評価は、比較的低速である C-D 比が 0.5 のときの方が、より高速である 0.25 のときよりもわずかに上回り良い結果となっている。また、同様の結果が実験 2 においても見られ、図 9 では、C-D 比が 0.125 の方がポインティング時間ではパフォーマンスが上回る 0.0625 よりも得点が高い。これは、大きな再加速運動をすることなく、滑らかに運動することが、被験者の感覚にとっては好ましいと感じられたのではないかと考えられる。実験 1 では、C-D 比が 0.0625 のときは素早くターゲット付近に到達できる一方で、カーソル速度が速すぎるために運動を直感的に制御できず、大きな再加速運動をともなしてターゲット位置合わせのフェーズに移行しなければならなかった。したがって、間接ポインティング時において、再加速運動をともなわずにカーソルを動かすことは被験者の直感性を向上させ、ポインティングパフォーマンスの向上につながる可能性があると考えられる。Ayatsuka らは、ターゲットをドラッグするときに、速やかな操作のみではなくめらかな操作を行うことの重要性を指摘しており、本研究と同様の可能性を示唆している⁴⁾。

一方、実験 1 での C-D 比が 1 のときや、実験 2 での C-D 比が 0.25 のときでは、図 2 (b) と図 7 (b) が示すように速度波形に再加速は見られず、被験者にとって直感的なポインティング運動を行うことができたと考えられる。しかし、カーソル速度が遅すぎてターゲットへの到達までに大きな時間を要するために、被験者の評価は最も低い評価となっていると考えられることから、単純に直感性のみを重視するべきではない。ポインティングにおける速度と精度のトレードオフの関係はよく議論されているが²³⁾、これらの結果を考慮して C-D 比の評価に導入する際には、効率（カーソル速度）と直感性（滑らかな速度波形）のトレードオフ関係という新たな概念を強く意識して設計を行うべきだといえる。

実験に参加した被験者からは、C-D 比が大きい（カーソル速度が小さい）ときはターゲット到達過程に、C-D 比が小さい（カーソル速度が大きい）ときはターゲット到達時の細かい調整に大きな労力を割くといった意見を得た。この意見からも、ターゲット到達過程においては効率を重視し、ターゲット到達時には直感性を重視する C-D 比の動的変更技術は有

効であると考えられる。C-D 比の動的変更をポインティング支援技術に適用させ、有効性について調査した研究はいくつか存在するが^(6),28)、人のポインティング時の運動特性については触れていないため、本研究で得られた知見をガイドラインとしたさらなる検討が今後必要である。

5.4 今後の展望

今後は、ポインティング動作の運動計画は C-D 比に依存せず、ターゲット距離によって決められているという考察に注目し、間接指示環境における人のポインティング運動メカニズムについての理解を深める予定である。また、今回は、C-D 比というディスプレイ上のカーソル速度の違いによる運動特性の調査を行ったが、被験者とディスプレイの距離による検討はしていない。したがって、被験者とディスプレイの距離の遠近による、視野角に対するカーソルの角速度の違いによる運動特性の差異についても今後調査を進めていく必要がある。さらに、ターゲット距離が短いときは C-D 比が大きく、長いときは小さい方が良いことから、C-D 比を動的に変更したポインティング支援技術についても検討を進める。この技術については、今回得られたポインティング動作中の人のポインティング中の運動特性のデータを基にして、C-D 比の変化の度合い、あるいは変更のタイミングなど、今後より詳細な検討を進めていく予定である。

6. おわりに

一般的なディスプレイ、および大画面ディスプレイを用いて様々な C-D 比条件下でのポインティング実験を行い、異なる C-D 比がポインティング動作に与える影響を実験的に調査した。その結果、実験 1 では 0.125~0.25、実験 2 では 0.0625 のときに短時間でポインティングを行うことができ、ポインティングに適切な C-D 比はターゲットまでの距離に左右されるという知見を得た。また、各 C-D 比条件における速度波形から、ピーク速度が検出される位置やターゲット突入時のカーソル調整に必要な距離はあらかじめ決められていることについて検討した。さらに、ポインティング時間による効率と速度波形の歪みによる直感性のトレードオフの可能性について検討を行った。今後は、ディスプレイからの距離に応じて変化する視野角を考慮した調査や、C-D 比導入におけるポインティング効率と直感性とのトレードオフの関係について、より詳細な検討をしていくことなどが課題である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省グローバル COE（研究拠点形成費）の補助、マイクロソフト産学連携研究機構の助成によるものである。

参 考 文 献

- 1) Accot, J. and Zhai, S.: Refining Fitts' law models for bivariate pointing, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*, pp.193–200 (2003).
- 2) Arnaut, L. and Greenstein, J.: Is display/control gain a useful metric for optimizing an interface?, *Human Factors*, Vol.32, Issue 6, pp.651–663 (1990).
- 3) Asano, T., Sharlin, E., Kitamura, Y., Takashima, K. and Kishino, F.: Predictive interaction using the Delphian Desktop, *Proc. Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '05)*, pp.133–141 (2005).
- 4) Ayatsuka, Y., Rekimoto, J. and Matsuoka, S.: Popup vernier: A tool for sub-pixel-pitch dragging with smooth mode transition, *Proc. Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '98)*, pp.39–48 (1998).
- 5) Balakrishnan, R.: "Beating" Fitts' law: Virtual enhancements for pointing facilitation, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol.61, No.6, pp.857–874 (2004).
- 6) Blanch, R., Guiard, Y. and Beaudouin-Lafon, M.: Semantic pointing: Improving target acquisition with control-display ratio adaptation, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)* pp.519–526 (2004).
- 7) Bohan, M., Thompson, S. and Samuelson, P.: Kinematic analysis of mouse cursor positioning as a function of movement scale and joint set, *The 8th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice*, pp.442–447 (2003).
- 8) Bohan, M., Thompson, S., Scarlett, D. and Chaparro, A.: Gain and target size effects on cursor-positioning time with a mouse, *Proc. Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting 2003*, pp.737–740 (2003).
- 9) Buck, L.: Motor performance in relation to control-display gain and target width, *Ergonomics*, Vol.23, pp.579–589 (1980).
- 10) Casiez, G., Vogel, D., Balakrishnan, R. and Cockburn, A.: The impact of Control-Display gain on user performance in pointing tasks, *HUMANCOMPUTER INTERACTION*, Vol.23, pp.215–250 (2008).
- 11) Elliot, D., Chua, R. and Helsen, W.: A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming, *Psychological Bulletin*, Vol.127, No.3, pp.342–357 (2001).
- 12) Fitts, P.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *J. Experimental Psychology*, Vol.37, pp.381–391 (1954).
- 13) Gibbs, C.B.: Interaction of controlling limbs, time-lags, and gains in positional and velocity systems, *Ergonomics*, Vol.5, pp.385–402 (1962).
- 14) Graham, E. and MacKenzie, C.: Pointing on a computer display, *Proc. Conference Companion on Human Factors in Computing Systems (CHI '95)*, pp.314–315 (1995).
- 15) Graham, E.: Virtual pointing on a computer display: Non-linear control-display mappings, *Proc. Conference on Graphics Interface '96*, pp.39–46 (1996).
- 16) Harris, C. and Wolpert, D.: Signal-dependent noise determines motor planning, *Nature*, Vol.394, No.20, pp.780–784 (1998).
- 17) Heath, M., Hodges, N.J., Chua, R. and Elliott, D.: On-line control of rapid aiming movements: unexpected target perturbations and movement kinematics, *Canadian Journal Experimental Psychology*, Vol.52, No.4, pp.163–173 (1998).
- 18) Jellinek, H. and Card, S.: Powermice and user performance, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '90)*, pp.213–220 (1990).
- 19) Langolf, G.D., Chaffin, D.B. and Foulke, J.A.: An investigation of Fitts' law using a wide range of movement amplitudes, *Journal of Motor Behavior*, Vol.8, pp.113–128 (1976).
- 20) MacKenzie, C.L., Marteniuk, R.G., Dugas, D., Liske, D. and Eickmeier, B.: Three-dimensional movement trajectories in Fitts' task: Implications for control, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol.39A, pp.629–647 (1987).
- 21) MacKenzie, I.S. and Riddersma, S.: Effects of output display and control-display gain on human performance in interactive systems, *Behaviour & Information Technology*, Vol.13, pp.328–337 (1994).
- 22) Meyer, D.E., Abrams, R.A., Kornblum, S., Wright, C.E. and Smith, J.E.K.: Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements, *Psychological Review*, Vol.95, No.3, pp.340–370 (1988).
- 23) Plamondon, R. and Alimi, A.M.: Speed/Accuracy Tradeoffs in Target Directed Movements, *Behavioral and Brain Sciences*, Vol.20, pp.279–349 (1997).
- 24) Thompson, S., Slocum, J. and Bohan, M.: Gain and angle of approach effects on cursor-positioning time with a mouse in consideration of Fitts' law, *Proc. Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*, pp.823–827 (2004).
- 25) Trankle, U. and Deutschmann, D.: Factors influencing speed and precision of cursor positioning using a mouse, *Ergonomics*, Vol.34, No.2, pp.161–174 (1991).
- 26) Walker, N., Meyer, D. and Smelcer, J.: Spatial and temporal characteristics of rapid cursor-positioning movements with electromechanical mice in human computer interaction, *Human Factors*, Vol.35, No.3, pp.431–458 (1993).
- 27) Woodworth, R.: The accuracy of voluntary movement, *Psychological Review Monograph Supplement*, Vol.3, No.13, pp.1–114 (1899).
- 28) Worden, A., Walker, N., Bharat, K. and Hudson, S.: Making computers easier for older adults to use: Area cursors and sticky icons, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.266–271 (1997).

- 29) 画像電子学会：3次元画像用語事典，新技術コミュニケーションズ (2000).
30) 高木 龍，北村喜文，岸野文郎：ポジショニングタスクにおけるターゲット予測に関する一検討，電子情報通信学会 2001 年総合大会講演論文集，A-15-17, p.316 (2001).
31) 高嶋和毅，北村喜文，岸野文郎：マウスポインティング中のピーク速度とターゲット距離の関係，電子情報通信学会総合大会予稿集，A-15-24, p.311 (2007).
32) 高嶋和毅，北村喜文，岸野文郎：3次元直接指示環境におけるポインティングの速度波形と奥行き知覚に関する検討，電子情報通信学会技術報告 (2006).

(平成 20 年 3 月 24 日受付)

(平成 20 年 9 月 10 日採録)



朝日 元生 (学生会員)

2007 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。同年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程入学，現在に至る。ヒューマンインタフェースの研究に従事。



高嶋 和毅

2006 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2008 年同学同専攻博士後期課程修了。同年同学同研究科助教。ヒューマンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会各学生会員。博士 (情報科学)。



築谷 喬之

2008 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。同年同専攻博士後期課程入学，現在に至る。ヒューマンインタフェースの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会学生会員。



北村 喜文 (正会員)

1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キヤノン株式会社情報システム研究所，1992 年 ATR 通信システム研究所，1997 年大阪大学大学院工学研究科助教授，2002 年より同大学大学院情報科学研究科助教授。現在，同研究科准教授。ACM，電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会等各会員。博士 (工学)。



岸野 文郎

1971 年名古屋工業大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 電気通信研究所入所。同ヒューマンインタフェース研究所において，高速・広帯域通信システムの研究・実用化，画像処理の研究に従事。1989 年 ATR 通信システム研究所知能処理研究室室長。臨場感通信，画像処理等の研究に従事。1996 年大阪大学大学院工学研究科教授，2002 年より同大学大学院情報科学研究科教授。電子情報通信学会，映像情報メディア学会，日本バーチャルリアリティ学会等各会員。博士 (工学)。