

大画面壁面ディスプレイ上での 影のメタファを利用した ポインティング動作におけるフィッツの法則

築谷 喬之^{†1} ガース シューメイカー^{†2}
ケロッグ S. ブース^{†2} 高嶋 和毅^{†1} 伊藤 雄一^{†1}
北村 喜文^{†3} 岸野 文郎^{†4}

大画面壁面ディスプレイにおいて、影のメタファを用いたポインティング動作に対するフィッツの法則の適合度を実験的に検証した。実験では、ターゲット距離とターゲット幅、およびディスプレイとユーザの距離を要因とした1次元のポインティングタスクを用い、ユーザの手の動きと、ディスプレイ上での影の動きに分けて解析を行った。実験結果から、画面上の動きでも手元の動きでもフィッツの法則を適用できることが分かった。さらに、間接指示環境における先行研究と異なり、ターゲット距離とターゲット幅を分離したフィッツの法則のモデルは有効ではなく、ディスプレイとユーザの距離に関係なく通常のフィッツの法則を適用可能であることが分かった。

A Fitts' Law Analysis of Shadow Metaphor Mid-air Pointing on a Very Large Wall Display

TAKAYUKI TSUKITANI,^{†1} GARTH SHOEMAKER,^{†2}
KELLOGG S. BOOTH,^{†2} KAZUKI TAKASHIMA,^{†1}
YUICHI ITOH,^{†1} YOSHIFUMI KITAMURA^{†3}
and FUMIO KISHINO^{†4}

We investigated mid-air pointing on an interactive very large wall display using geometry based on a shadow projection metaphor. An experiment was conducted to measure pointing time in a traditional Fitts' task. Results showed that Fitts' law models performance accurately regardless of whether target amplitude and width are measured in hand space or display space. Furthermore, contrary to previous work, we also found no separable impact of amplitude and width on performance, suggesting that the original Fitts' formulation correctly models the task, regardless of display-to-user distance.

1. はじめに

協調作業や公共での情報提示を目的として大画面の壁面ディスプレイが利用される機会が増加してきている。しかし、タッチパネルなどの直接指示デバイスでは操作範囲が限定され、ディスプレイ全体へのインタラクションは困難である。また、マウスやレーザーポインタといった間接指示デバイスではディスプレイ全体へのインタラクションは可能であるものの、操作するポインタを見失いやすく、特に複数のポインタが存在する協調作業では、自身のポインタの識別が困難になることもある。

そこで、Shoemaker らは影を用いて大画面の壁面ディスプレイにアクセスする Shadow Reaching という手法を提案している^{(11),(12)}。この手法は、ユーザの仮想の影をディスプレイ上に重畳表示し、ユーザはその影を用いてインタラクションを行うことで、ディスプレイ全体への直感的なインタラクションを可能にする。また、影の動作はユーザの動作と同期しているため自然にどの影がだれの影なのかを認識することが可能で、ユーザは自分の影をポインタとして容易に識別することができる。図1に試作システムを利用している様子を示す。しかし Shadow Reaching のような影のジオメトリに基づく運動は、タッチパネルのような直接指示デバイスとも、マウスのような間接指示デバイスとも異なった挙動となるため、従来のデバイスにおいてよく知られているフィッツの法則などの運動モデルがそのまま適用できるとは限らない。影によるインタラクションを活用し、定量的に評価するためには、基本的な運動モデルを明らかにしておく必要がある。

フィッツの法則はシンプルで、ポインティングにかかる時間をロバストに評価できることから、物をつかむという基礎的な動作の標準的な評価指標となっている^{(5),(6)}。さらに、タッチディスプレイから3次元ディスプレイに至るまで様々な環境へ拡張されており、様々な定義が存在する^{(1),(4),(7)}。影を用いた壁面ディスプレイへのインタラクションにおけるフィッツの法則の定義を明らかにすることで、様々な環境のインタラクションとの定量的比較や、

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} ブリティッシュコロンビア大学

The University of British Columbia

^{†3} 東北大学電気通信研究所

Research Institute of Electrical Commutation, Tohoku University

^{†4} 関西学院大学理工学部

School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University



図 1 影を利用したインタラクション
Fig. 1 Interaction using shadow.

アプリケーション構築の際のガイドラインへの展開が期待できる．そこで本論文では，壁面ディスプレイ上の離れた位置のターゲットを影によって獲得するポインティング動作に対するフィッツの法則の適用に関して検討した結果について報告する．仮想の光源とディスプレイ，ユーザの位置関係によって影の大きさが変わるため，それらについて条件を設定して実験を行う．また，ユーザの手の動きと画面上での影の動きそれぞれについて分析し，どちらの動きに対してフィッツの法則が適用可能かを検討する．そして，これらの結果とレーザーポインタなどの従来手法を比較しながら，影を使ったインタラクションの運動モデルについて議論する．

2. 関連研究

2.1 壁面ディスプレイにおけるインタラクション

大画面壁面ディスプレイにおけるインタラクションでは，タッチパネルのような直接指示デバイスでは画面全体へのインタラクションが非常に困難であり，またマウスのような従来の間接指示デバイスでも直感的な動作が難しいことから様々な手法が提案されている．

Baudisch らの提案する Drag-and-Pop は，ドラッグ操作の際に，ドラッグ中のオブジェクトに関連のあるオブジェクトのコピーをカーソルの現在地付近に作り，そこへドロップできるようにする手法である．これによって，大画面壁面ディスプレイにおける遠く離れたオブジェクトへの直接指示による操作を支援できる²⁾．レーザーポインタのメタファを用いて離れたディスプレイへアクセスする手法も検討されており，壁面ディスプレイにおける有効性が確認されている¹³⁾．また，カメラで撮影した手指のシルエットを影として壁面ディスプレイに投影し，その影を用いてデスクトップへアクセスする手法も提案されており¹⁵⁾，基

本的な概念は本研究と共有するが，パフォーマンスモデルの構築を目指すものではない．

2.2 フィッツの法則

人のリーチングやポインティング動作を評価するための指標として，フィッツの法則がよく用いられる⁵⁾．フィッツの法則ではポインティングに要する時間がターゲット距離と幅によって示されており，ターゲット距離が長くなるほど，またはターゲット幅が小さくなるほど，要する時間が長くなるとされている．フィッツの法則にはいくつかの定義が存在するが，近年では MacKenzie らによって定式化された式 (1) がよく用いられる⁸⁾．ここで， MT はポインティング時間， A はターゲット距離， W はターゲット幅， a と b は実験によって決まる定数である．また，対数項は難易度 ID と呼ばれている．

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

さらに，ディスプレイ上のカーソルの速さを表すゲインを含めたフィッツの法則に関する検討として Graham の研究があり⁶⁾，マウスのような間接指示デバイスを用いた環境では，フィッツの法則が画面上のカーソルの動きではなく手元の動きにより適合することが示されている．また，Welford¹⁴⁾ が定義した A と W を分離した式 (2) を使い，間接指示デバイスでは式 (1) のフィッツの法則よりも高い適合度が得られることを示している．ここで， a ， b_1 ， b_2 は実験によって決まる定数である．

$$MT = a + b_1 \log_2(A) - b_2 \log_2(W) \quad (2)$$

なお，式 (2) では $b_1 = b_2$ であるとき，通常のフィッツの法則である式 (1) と同等の意味合いとなるが，Graham らの実験では，間接指示環境では b_1 の方が b_2 より 2 から 3 倍程度大きくなることが示されている．

また，Sandfeld らは，ゲインとターゲット距離の組合せにより，手元のマウスの動きは同じで，画面上のカーソルの動きが違ふときのパフォーマンスを比較している．この実験では，手元の動きが変わらなくても，画面上のカーソルの動きがポインティング時間に影響を持つことが示されている¹⁰⁾．

そのほか，2 次元タスク^{1),8)} や，3 次元タスク^{7),9)} にフィッツの法則を拡張した例など，現在もさかんに研究が進められており，様々な環境下でのポインティングやリーチングなどの基本動作の評価尺度となっている．

2.3 大画面環境におけるポインティングタスクの評価

Jota らは，レーザーポインタのような離れた位置からレイキャスティングによってポインティングする手法を Laser, Arrow, Image-Plane, Fixed-Origin の 4 つに分類して，大画面環境で比較する実験を行っている³⁾．実験タスクとして，通常のポインティングタスクの

ほかに、決められた幅の経路に沿ってカーソルを移動させるタスクも行っており、フィッツの法則に基づいた指標によって、4つの手法がそれぞれどのようなタスクに適しているのかを議論している。

Kopperらは、大画面環境においてレーザポインタを使ったポインティングタスクにおいて、式(1)よりも適合度の高いフィッツの法則を提案している⁴⁾。この研究では、ターゲット距離とターゲット幅を表す方法として、画面上のカーソル移動距離ではなく、カーソルが移動したときのユーザが手を振った角度を用いている。これは、ユーザの手元の動きに相当し、Kopperらによるフィッツの法則は式(3)のように表される。ここで、 α は角度によって表されるターゲット距離、 ω は角度によって表されるターゲット幅、 k は実験によって決まる定数である。

$$MT = a + b \log_2(\alpha/\omega^k) \quad (3)$$

この式はIDである対数項を分解すると式(2)とほぼ同じ意味合いであると見なせる。また、この実験においては、最終的には手のブレの影響を考慮して、このIDである対数項全体を2乗したものが最もよく適合することが示されている。

3. 影を利用したポインティング

3.1 影の大きさ

図2は影を使ったインタラクションを上から見たときの図で、ディスプレイとユーザ、仮想の光源、および生成される影の大きさの関係を表している。図のように仮想の光源位置を仮定すると、ユーザがディスプレイに近づくとき影は小さく表示され、光源に近づくことで影は大きく表示される。すなわち、ユーザとディスプレイの距離を変えることは、間接指示デバイスにおけるゲインを調整することと等価であると見なせる。ここで、ディスプレイと光源の距離を L 、ディスプレイとユーザの距離をディスプレイ距離 D 、ユーザが手を動かす範囲を W_h 、そのとき影が動く範囲を W_d としたとき、これらの関係は式(4)で表すことができる。

$$W_d = \frac{L}{L-D} W_h \quad (4)$$

3.2 影の動きとフィッツの法則

影を利用したポインティングでは、通常のフィッツの法則でのパラメータであるターゲット距離 A とターゲット幅 W のほかに、ディスプレイ距離 D の影響を考慮する必要がある。このディスプレイ距離 D は上で述べたようにゲインの調整と見なせるため、本研究ではま

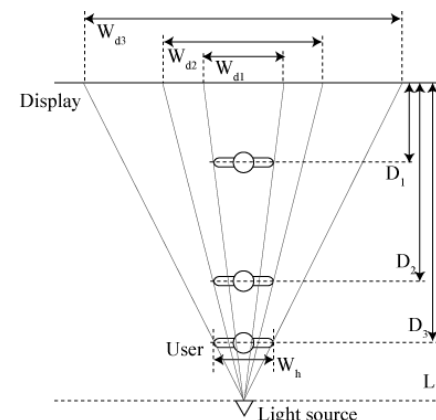


図2 ユーザの位置とそのとき生成される影の大きさの関係
Fig. 2 Relationship between user's position and a shadow generated by the user.

ずWelfordの式への適合度を調査する。そのときの b_1 および b_2 の値を先行研究と比較することによって、従来手法との違いが分かると考えられる。

レーザポインタなどの従来の大画面ディスプレイに対するインタラクションでは、レイキャスティングの起点はユーザと同位置であるのに対して、影を利用したポインティングでは、図2や式(4)によって示されるジオメトリに基づいてレイキャスティングされた点をカーソルとして使うポインティングとなる。このように両者の挙動には違いがあるため、影を用いたポインティングでは従来手法とは異なったフィッツの法則の定義がなされる可能性がある。

1章で述べたように、今後ますます普及が期待される大画面壁面ディスプレイでのインタラクションでは、影を利用した手法には多くの利点がある。そこでのインタラクションを詳細に設計し評価するためにも、従来手法との比較を通して運動モデルを明らかにする必要がある。

3.3 実験条件の検討

Shoemakerらの提案するShadow Reachingでは^{11),12)}、影を操作する方法として、ユーザが移動するほかに、ユーザが仮想の光源位置を移動させたり、またはユーザの動きに追従するように光源が自動的に移動したりと様々な手法が検討されている。しかし、光源が移動する場合でも最終的にはユーザが移動し影の大きさを調節してポインティングするため、今

回は最も単純で基本的な条件として光源位置は固定し、影の大きさはユーザの移動によってのみ変更できるものとする。

影を利用した実際のアプリケーションでは、ユーザがディスプレイの前で自由に歩き回ったり、ポインティング動作を行ったりすることが考えられ、このような運動にフィッツの法則を適用する場合には、歩き回る動作とリーチング動作を分けて定式化することが考えられる。しかし、この場合だと歩く動作はポインティング動作に比べて非常に遅い動作であるため、実際に実験を行った際に、歩く動作の影響が大きすぎてポインティング動作部分の差異を観測できない可能性が高い。そこで今回は、ユーザはターゲット獲得のために歩く動作はせず、腕を伸ばすポインティングで届く範囲のターゲットに関して検討することとする。これらの条件は、大画面環境でのポインティングタスクの評価を試みている先行研究^{3),4)}と近い実験条件となるため、実験後にそれらの結果との比較検討も行う。

4. 実験

4.1 実験環境

ディスプレイは、InFocus 社のプロジェクタ DepthQ 3120 (800 × 600 pixel) 12 台を Cyviz 社の XPO3 ディスプレイユニット 2 台で駆動することで構築した大画面の壁面ディスプレイ (5,330 × 3,000 mm, 2,720 × 1,480 pixel) を利用する (図 1)。なお、関連研究であげた Jota らの研究では 2,920 mm × 1,090 mm のディスプレイが、Regis らの研究では約 4,400 × 1,800 mm のディスプレイが用いられており、本実験はそれらよりも大きいディスプレイを用いた実験となる。

今回の実験ではユーザはポインティング中には移動せずに実験タスクを行うため、画面上のカーソル位置を算出するために必要なのは、ユーザの右手の 3 次元位置のみである。そこで、任天堂の Wii リモコンに、Vicon 社の Vicon 6 Motion Capture System のマーカを取り付け、コントローラとして利用し (図 3)、60 Hz で 3 次元位置を取得する。Wii リモコンは実装が容易である点と、把持しやすいという理由で用いており、内蔵の加速度センサは利用せず、ボタンクリックの取得のためだけに利用する。なお、ポインティング動作に Wii リモコンを用いたときに、ボタンの押し下げによってクリック時の座標がずれるなどの支障が起こらないことをあらかじめ確認している。

4.2 実験計画

影を用いたポインティング動作にフィッツの法則が適用できるかを調査するため、実験は Fitts の実験⁵⁾ にならって 1 次元上で左右に提示される 2 つのターゲットをある回数だけ、



図 3 Wii リモコンを使ったコントローラ
Fig. 3 A controller made with Wii Remote.

素早く交互にポインティングするタスクを利用する。実験はすべて右手で行い、人の体の対称性を考慮し、右手の動きが体の中心よりも右の範囲に収まるようにターゲットの配置を決定する。また、本来は影というユーザの身体の色をディスプレイに重畳表示することが特徴であるシステムだが、今回は純粋に影のように振る舞うカーソルを用いたときの運動を測定することが目的であり、視覚フィードバックによる影響を排除する必要があるため、実験中には影は表示されずカーソルのみが提示される。なお、実験開始前には影が表示された状態で参加者に対してカーソルが影と同じように動くことを説明する。

実験要因は、ターゲット距離 A とターゲット幅 W 、ディスプレイ距離 D の 3 つである。今回はディスプレイと光源間の距離 L を 4 m とし、ディスプレイ距離 D を、1 m, 2.5 m, 3.25 m と設定した (それぞれ図 2 の D_1, D_2, D_3 に対応)。これによって、 $D = 1$ m のとき $W_d = 4/3W_h$, $D = 2.5$ m のとき $W_d = 8/3W_h$, $D = 3.25$ m のとき $W_d = 16/3W_h$ となり、 $D = 1$ m であるときのユーザの手の動きに対する画面上のカーソルの動きでのゲインを 1 とすると、2.5 m のときゲインが $(8/3)/(4/3) = 2$, 3.25 m のときのゲインが $(16/3)/(4/3) = 4$ となる。これらの条件で、ユーザの手の動きと、画面上のカーソルの動きの両方でそれぞれ分析できるように、表 1 および表 2 のようにターゲット距離とターゲット幅を定めた。この表では、手元でコントローラをある距離を動かしたときの各ディスプレイ距離におけるカーソルの移動距離を表している。この中で、手元のターゲット距離が 132 mm, 264 mm, 528 mm, 手元のターゲット幅が 30 mm, 60 mm, 120 mm の条件を抽出することで、各ディスプレイ距離におけるユーザの手の動きを分析することができる。同様に、画面上の動きでターゲット距離 176 mm, 352 mm, 704 mm, ターゲット幅 40 mm,

表 1 手元のターゲット幅と各 D における画面上のターゲット幅 [mm]

Table 1 Target width on hand space vs. target width on display space on each D.

D [m]	手元のターゲット幅 [mm]				
	7.5	15	30	60	120
1	-	-	40	80	160
2.5	-	40	80	160	320
3.25	40	80	160	320	640

表 2 手元のターゲット距離と各 D における画面上のターゲット距離 [mm]

Table 2 Target distance on hand space vs. target width on display space on each D.

D [m]	手元のターゲット距離 [mm]				
	33	66	132	264	528
1	-	-	176	352	704
2.5	-	176	352	704	1,408
3.25	176	352	704	1,408	2,816

80 mm, 160 mm の条件を抽出することで, 各ディスプレイ距離における画面上のカーソルの動きを分析することができる。

図 4 に実験中の画面表示を示す。点線で示される影は上で述べたように実験中は表示されず, 影の右手にあたる部分にカーソルのみが表示される。ここで, ターゲット距離は左右のバーの中心間の距離で定義されるため, ターゲット距離よりもターゲット幅が大きい条件は設定できない。実験は画面に表示されるバーを交互にクリックするもので, その回数は 8 回である。ディスプレイ距離が 1 m のときはターゲット距離 $3 \times$ ターゲット幅 $3 = 9$ タスク, 2.5 m のときはターゲット距離 176 mm で幅 320 mm の条件が設定できないのでそれを除いてターゲット距離 $4 \times$ ターゲット幅 $4 - 1 = 15$ タスク, 3.25 m のときは, ターゲット距離 176 mm で幅 640 mm と 320 mm, ターゲット距離 352 mm で幅 640 mm の条件が設定できないのでそれらを除いてターゲット距離 $5 \times$ ターゲット幅 $5 - 3 = 22$ タスクの合計 46 タスクを 1 ブロックとし, 参加者はこれを 3 ブロック繰り返す。なお, 設定できないタスクは上で述べた手の動きでの解析および画面上のカーソルの動きでの解析には含まれない条件なので問題とはならない。ディスプレイ距離ごとに, ターゲット幅と距離はランダムな順番で提示され, ディスプレイ距離の提示順序は参加者間でカウンタバランスをとるように設

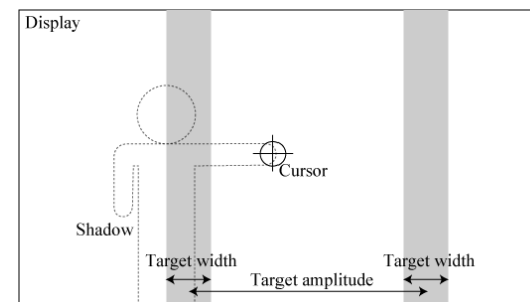


図 4 ターゲットの配置
Fig. 4 Targets placement.

定する。また, 各ブロックの間には 3 分間の休憩を挟み, 実験全体で 1 時間以内に終わるように設定した。さらに実験後には実験タスクに関するアンケートを行う。

4.3 実験手順

参加者は指定された位置に立ち, 右手でコントローラを把持する。画面には青色でターゲットとなるバーが表示され, もう片方は灰色で表示される。タスクは青色のバーにカーソルを合わせてコントローラのボタンを押してクリックすることで開始音が提示され開始される。参加者はできる限り速くかつ正確に, 続けて左右のバーを交互に 8 回クリックする。このときクリックするべきバーが交互に青色表示され, カーソルがバーの上にあるときには明るく表示される。さらに, 参加者が正しくバーをクリックできたときは緑色に, バー以外をクリックしてしまった場合は赤色にターゲットが光り, フィードバックとして提示される。同時にそれぞれ正解音と不正解音も提示される。ただし, 参加者はターゲットを正しくクリックできなかった場合でもそのままタスクを続けるようにする。8 回ターゲットをクリックしたのちに終了音が提示され, 次のタスクが提示される。参加者はこれを指定された回数繰り返す。

4.4 実験参加者

実験参加者は情報系の大学生および大学院生 12 名 (男性 10 名, 女性 2 名) で, 全員右利きである。全員日常からマウスやキーボードを使った計算機の利用には慣れ親しんでいるが, 必ずしも大画面壁面ディスプレイでの操作や Wii リモコンを使った操作には慣れていない。また, 本実験で用いるような影を利用したポインティング手法の使用経験はない。

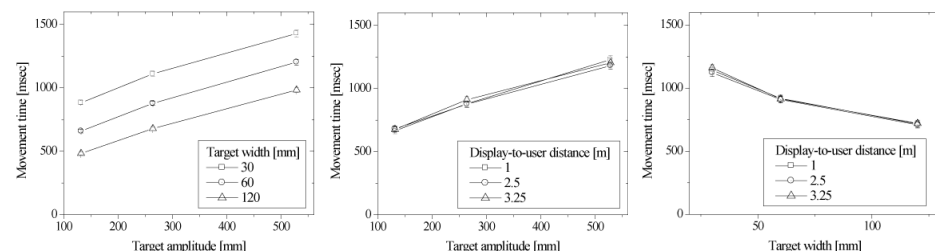


図5 手元の距離と幅、およびディスプレイ距離がポインティング時間に与える影響

Fig. 5 Movement time vs. target amplitude, target width and display distance on hand space.

4.5 結 果

すべての参加者がカーソルの動きを理解し、今回の実験システムにおいて問題なく実験タスクをこなすことができた。エラーの割合は全タスクのうち4.75%であった。フィッツの法則に従うようなタスクではエラーは4%程度になることが知られているが⁵⁾、今回はそれをわずかに上回る程度となり、影を用いた手法がポインティング動作として成り立っていることを確認できた。さらに、ポインティング時間に関して、ブロックの反復による有意差は見られず、学習効果による影響は小さかったため、以後の分析では取得した全データを用いる。

ポインティング時間について、ターゲット距離と幅、ディスプレイ距離の3要因分散分析で解析する。図5に手元の動きでの各実験要因がポインティング時間に与える影響を示す。ポインティング時間に関して、ターゲット距離 ($F(2, 22) = 258.0, p < .01$) とターゲット幅 ($F(2, 22) = 323.3, p < .01$) による主効果が見られた。これらの主効果に関して Bonferroni の手法による多重比較を行ったところ、すべてのターゲット距離とターゲット幅の間にそれぞれ有意差があることが分かった ($p < .01$)。ディスプレイ距離による主効果や交互作用は見られなかった。

次に図6に画面上の動きでの各実験要因がポインティング時間に与える影響を示す。ターゲット距離 ($F(2, 22) = 285.5, p < .01$) とターゲット幅 ($F(2, 22) = 282.4, p < .01$) による主効果が見られた。これらの主効果に関する Bonferroni の手法による多重比較でも各ターゲット距離とターゲット幅の間にそれぞれ有意差があることが分かった ($p < .01$)。また、ターゲット距離とディスプレイ距離 ($F(4, 44) = 15.4, p < .01$)、およびターゲット幅とディスプレイ距離 ($F(4, 44) = 11.1, p < .01$) の間に交互作用が表れた。これらの交互作用に関して Bonferroni の手法による多重比較を行ったところ、ターゲット距離が176 mm のときにはディスプレイ距離2.5 m と3.25 m の間に、704 mm のときには1 m と2.5 m の

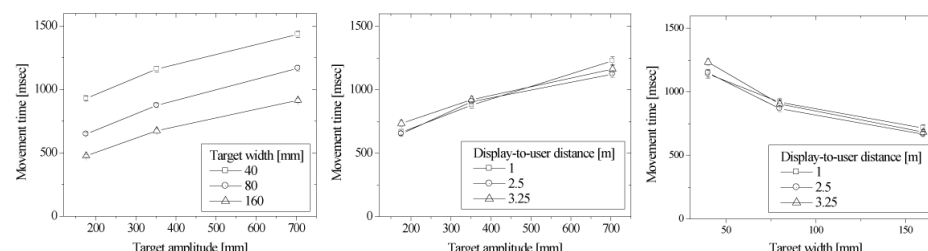


図6 画面上での距離と幅、およびディスプレイ距離がポインティング時間に与える影響

Fig. 6 Movement time vs. target amplitude, target width and display distance on display space.

間に有意差が見られた ($p < .01$)。ターゲット幅に関しては40 mm のときにディスプレイ距離2.5 m と3.25 m の間に有意差が見られた ($p < .01$)。これから、ディスプレイ距離が小さいときは長いターゲット距離に時間がかかり、ディスプレイ距離が大きいときは短いターゲット距離や小さいターゲット幅のときに時間がかかることが分かった。

このように多少のずれはあるものの、いずれにおいてもディスプレイ距離による主効果は見られず、手元の動きでも画面上の動きでも、ディスプレイ距離にかかわらず、ターゲット距離と幅だけでポインティング時間を表すことができるといえる。

そこで、手元の動きと画面上の動きそれぞれにフィッツの法則が適用できるかについて調査する。Graham の研究と同様に、各ターゲット距離、幅、ディスプレイ距離ごとの平均値を用い、Welford の式 (2) を利用して回帰分析を行った。手元の動きでの結果を式 (5) に、画面上の動きでの結果を式 (6) に示す。

$$MT = 417.43 + 264.77 \log_2(A) - 274.25 \log_2(W) \quad (R^2 = .973) \quad (5)$$

$$MT = 291.41 + 272.72 \log_2(A) - 261.71 \log_2(W) \quad (R^2 = .978) \quad (6)$$

このようにどちらも Graham の研究とは異なり b_1 と b_2 の間に大きな差はなく近い値となった。次に MacKenzie らによる式 (1) で回帰分析を行った。手元の動きでの結果を図7(a)と式 (7) に、画面上の動きでの結果を図7(b)と式 (8) に示す。

$$MT = 129.82 + 320.66 \log_2(A/W + 1) \quad (R^2 = .983) \quad (7)$$

$$MT = 134.46 + 317.91 \log_2(A/W + 1) \quad (R^2 = .994) \quad (8)$$

このように手元の動きでも画面上の動きの両方で、Welford の式 (2) にも、一般的なフィッツの法則とされている MacKenzie らの式 (1) にもよく適合する結果となった。

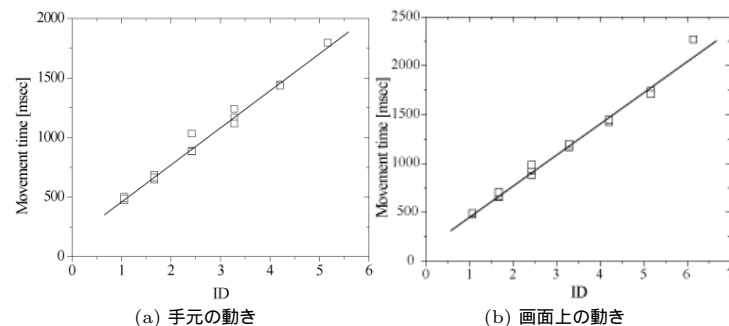


図 7 MacKenzie らの式における難易度 ID とポインティング時間
Fig. 7 ID on hand space vs. movement time.

5. 議 論

Graham によると、ゲインの設定をとまなうマウスなどの間接指示デバイスでは必ずしもターゲット距離 A とターゲット幅 W の影響は等しくなく、式 (2) のように b_1 と b_2 が異なった値になる。Shadow Reaching でもディスプレイとユーザの距離を変えることは、マウスなどの間接指示デバイスにおいてゲインを変えることに近い。実験前には Shadow Reaching においても b_1 と b_2 が異なり、ディスプレイとユーザの距離によってポインティング時間が異なることが予想された。しかし、実際には b_1 と b_2 は近い値となりポインティング時間はディスプレイとユーザの距離によらない結果となった。Graham の研究において、間接指示デバイスによるポインティング時間は画面上の動きではなく手元の動きで表せるという結果が得られたのは、この b_1 と b_2 が異なったためである。 b_1 と b_2 が近い値となった今回の実験では、画面上の動きでも手元の動きでもポインティング時間を表すことができるという結果となった。

Kopper らのレーザポインタを用いた実験⁴⁾ においてよく適合した式 (3) は、式 (2) とほぼ同じ意味合いである。手を動かす角度によってターゲット距離と幅を表している点も、Graham らの手元の動きでポインティング時間が表せるという実験結果と類似しており、従来のレーザポインタを利用した環境でのポインティングは間接指示環境でのポインティングに近い特性を持っているといえる。それに対して Shadow Reaching では、手元の動きでも画面上のカーソルの動きでも変わらずフィッツの法則がよく適合する結果となった。これは式 (3) においては $k = 1$ に相当し、Shadow Reaching とレーザポインタでは異なる運動が

なされることが分かった。また、Kopper らはより適合度の高い式として手のブレを考慮し、ID 部分を 2 乗した式も提案している。しかし、今回の実験結果に対して適合度の高かった MacKenzie の式 (1) で ID を 2 乗した式を使うと、 $R^2 = .957$ と逆に適合度が悪くなってしまう。これは Shadow Reaching ではレーザポインタのようなブレが少ないからだと考えられ、その結果 ID を 2 乗しない通常のフィッツの法則への適合度が高くなっている。

今回適合度の高かった MacKenzie らの式 (1) は、もともと直接指示環境での実験で提案されたものであるため、Shadow Reaching は間接指示であるものの直接指示に近い運動がなされていると考えられる。すなわち、Shadow Reaching では間接指示のようにゲインを変えることができ、かつディスプレイ距離の影響を受けず直接指示のように直感的な運動が可能であるといえる。これは、ユーザが遠くのオブジェクトに対してインタラクションしようとして画面から離れたとしても、画面に近い位置にいるときと同じようにポインティングできることを示しており、影を使ったインタラクションの有用性が示唆されたといえる。

Jota らの研究³⁾ では、Shadow Reaching は便宜上、ある固定点と手を結んだレイを用いてポインティングを行う Fixed-Origin の 1 つに分類されており、それ以外の 3 手法に比べてあまり良いパフォーマンスではないという結果が得られている。しかし、Jota らの研究では固定点をユーザの胴体の中心としており、仮想の光源位置をユーザの後方に置く Shadow Reaching とは異なる手法となっている。そのため、Fixed-Origin では図 2 や式 (4) における L と D が非常に近い値となり Shadow Reaching に比べてカーソル速度が速くなりすぎてしまい、パフォーマンスの低下につながっていると考えられる。一方で、本実験のように光源位置をユーザより 1 m 以上後方に設置した場合には、ディスプレイ距離にかかわらず精度の高いポインティングが行えていた。したがって、Fixed-Origin な手法を用いる際には、固定点を十分にユーザから離すべきだといえる。

今回の実験は光源位置を固定し、ディスプレイ距離ごとにユーザが手を動かす環境であったため、ユーザがディスプレイから離れたとき、画面上のカーソル速度が速くなっても、ユーザは離れてカーソルを見ることになり、ユーザの視点から見たカーソル速度がほぼ一定となる。そのため、ディスプレイからの距離による影響が出にくかった可能性がある。Sandfeld らによるマウスポインティングの実験¹⁰⁾ では、手元の動きが一定であっても画面上のカーソル速度が異なるとポインティング時間も異なる結果となっている。Shadow Reaching においても、ユーザの視点から見たカーソル速度が異なるとポインティング時間に影響が出る可能性がある。見た目のカーソル速度の変更は、ユーザの位置を固定して光源の位置を変化させることで実現されるため、今後はそのような条件での実験を行い、さらにフィッツの法

則への適合度を検討する予定である。

今回は、影を表示することによる視覚フィードバックの影響と、カーソルが影のように振る舞うことを分けて考えるために、影を表示せずに実験を行った。レーザーポインタを用いたときはカーソルの挙動が異なるため、実験の開始直後にはカーソルの動きが直感と異なるという感想を述べる参加者も数名いたが、すべての参加者がすぐにカーソルの動きを理解して高い精度でポインティング動作を行うことができた。ブロックごとの学習効果がほとんどなかったことから、参加者がすぐにカーソルの動きを理解できていたことが推察される。このように、参加者は影の表示がなくてもすぐに慣れて安定したポインティングを行えたことから、影を表示しても大きく運動モデルが変わるとは考えにくい。そこで今後は、特に複数人で Shadow Reaching を用いたときに、視覚フィードバックとしての影がポインティング動作に及ぼす影響も検討してゆく予定である。

6. おわりに

大画面壁面ディスプレイにおいて、影のメタファを用いたポインティングの実験を行った。実験結果より、影を用いたポインティングは、ディスプレイとユーザの距離にかかわらず、手元の動きでも画面上のカーソルの動きでもフィッツの法則を適用可能であることが分かった。そのことから、影のメタファを用いたポインティングは、間接指示でありながら直接指示に近い運動がなされるという知見を得た。今後は、他手法との比較や、光源位置や影の表示を変更して検討を続けてゆく予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム（研究拠点形成費）の補助によるものである。また、実験計画に対して助言をいただいた Christine MacKenzie 博士、Vicon システムを貸与いただいた Michiel van de Panne 氏に感謝を表する。

参 考 文 献

- 1) Accot, J. and Zhai, S.: Refining Fitts' law models for bivariate pointing, *Proc. CHI '03*, pp.193–200 (2003).
- 2) Baudisch, P., Cutrell, E., Robbins, D., Czerwinski, M.C., Tandler, P., Bederson, B. and Zierlinger, A.: Drag-and-Pop and Drag-and-Pick: Techniques for accessing remote screen content on touch- and pen-operated systems, *Proc. INTERACT '03*, pp.57–64 (2003).
- 3) Jota, R., Nacenta, M.A., Jorge, J.A., Carpendale, S. and Greenberg, S.: A comparison of ray pointing techniques for very large displays, *Proc. GI '10*, pp.269–276

- (2010).
- 4) Kopper, R., Bowman, D.A., Silva, M.G. and McMahan, R.P.: A human motor behavior model for distal pointing tasks, *Int'l J. of Human Computer Studies*, Vol.68, No.10, pp.603–615 (2010).
- 5) Fitts, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *J. Experimental Psychology*, Vol.37, pp.381–391 (1954).
- 6) Graham, D.E.: Pointing on a computer display, Ph.D. thesis, the school of Kinesiology, Simon Fraser University (1996).
- 7) 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 J. of Experimental Psychology*, Vol.39A, pp.629–647 (1987).
- 8) MacKenzie, I.S. and Buxton, W.: Extending Fitts' law to two-dimensional tasks, *Proc. CHI '92*, pp.219–226 (1992).
- 9) Murata, A. and Iwase, H.: Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task, *Proc. Human Movement Science*, Vol.20, No.6, pp.791–805 (2001).
- 10) Sandfeld, J. and Jensen, B.R.: Effect of computer mouse gain and visual demand on mouse clicking performance and muscle activation in a young and elderly group of experienced computer users, *Ergonomics*, Vol.36, pp.547–555 (2005).
- 11) Shoemaker, G., Tang, A. and Booth, K.S.: Shadow reaching: a new perspective on interaction for large displays, *Proc. UIST '07*, pp.53–56 (2007).
- 12) Shoemaker, G., Tsukitani, T., Kitamura, Y. and Booth, K.S.: Body-centric interaction techniques for very large wall displays, *Proc. NordiCHI '10*, pp.463–472 (2010).
- 13) Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays, *Proc. UIST '05*, pp.33–42 (2005).
- 14) Welford, A.T.: *Fundamentals of Skill*, London: Methuen (1968).
- 15) 山本豪志朗, 徐会川, 佐藤宏介: PALMbit-Silhouette: 拳シルエットの重畳表示によるデスクトップアクセス, インタラクション 2008 予稿集, pp.109–116 (2008).

(平成 22 年 6 月 28 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



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。ヒューマンインタフェースの研究に従事。



ガス シューメーカー

IDELIX Software 社で勤務後、Simon Fraser 大学で博士前期課程修了。2010 年 British Columbia 大学博士後期課程修了。同年同大学ポストドクトラルフェロー。ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。博士（情報科学）。



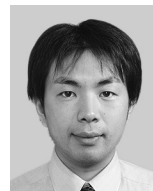
ケログ S. ブース

1968 年 Lawrence Livermore National Laboratory 研究員。1977 年 Waterloo 大学教員。その後 British Columbia 大学 the Media and Graphics Interdisciplinary Centre 所長を経て同大学教授。ヒューマンコンピュータインタラクションやグラフィックスの研究に従事。2010 年 ACM SIGGRAPH Outstanding Service Award 等受賞。博士（情報科学）。



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 年同大学院博士後期課程修了。同年同大学院情報科学研究科助教。インタラクション 2008 ベストペーパー賞受賞。博士（情報科学）。



伊藤 雄一

2000 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。2002 年同大学院情報科学研究科助手。2008 年より大阪大学ウェブデザインユニット准教授。2007 年日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞。博士（情報科学）。



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。同年キャ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。その後同大学大学院情報科学研究科准教授。2010 年より東北大学電気通信研究所教授。1997 年電子情報通信学会論文賞等受賞。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。1989 年 ATR 通信システム研究所知能処理研究室室長。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。2010 年より関西学院大学理工学部教授。博士（工学）。