

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の検討

築谷 喬之[†] ガース シューメイカー[‡] ケロッグ S. ブース[‡]
高嶋 和毅[†] 伊藤 雄一[†] 北村 喜文[†] 岸野 文郎[†]

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次元のタッピングタスクを用い、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[†] GARTH SHOEMAKER[‡] KELLOGG S. BOOTH[‡]
KAZUKI TAKASHIMA[†] YUICHI ITOH[†] YOSHIFUMI KITAMURA[†] FUMIO KISHINO[†]

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の際に、自身のポインタの識別が困難になることもある。

そこで、我々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[8]。この手法では、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なアウェアネス情報を有し、ユーザはポインタである自分の影を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 による運動は、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。

フィッツの法則は非常にシンプルで、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、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、物を掴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。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、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。

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

[‡] ブリティッシュコロンビア大学
The University of British Columbia

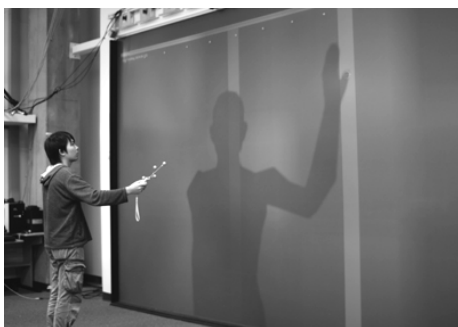


図1 影を利用したインタラクションの例

そこで本稿では、離れた位置のディスプレイ上において、影でターゲットを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を進め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、それらについても条件を設定して実験を行う。また、ユーザの手の動きとそのときの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を適用可能かについて議論する。

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不可能であり、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付近に作ることで、大画面壁面ディスプレイにおける直接指示による遠く離れたオブジェクトへの操作を支援する[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[9]。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[11]、これは基本的な概念は本研究と同様であるが、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[3]。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サイズ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バリエーションが存在するが、近年では I. S. MacKenzie らによって定式化された式(1)がよく用いられる[6]。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[4]、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、Welford ら[10]の定義した 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 $b_1 = b_2$ のとき通常のフィッツの法則の式(1)と同等の意味合いとなるが、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。

その他、2次元タスク[1,6]や、3次元タスク[5,7]にフィッツの法則を拡張した例など、現在も盛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。

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、ユーザがディスプレイに近づくと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動作と同じようなものだと見なせる。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(3)で表すことができる。

$$W_d = \frac{L}{L-D} W_h \quad (3)$$

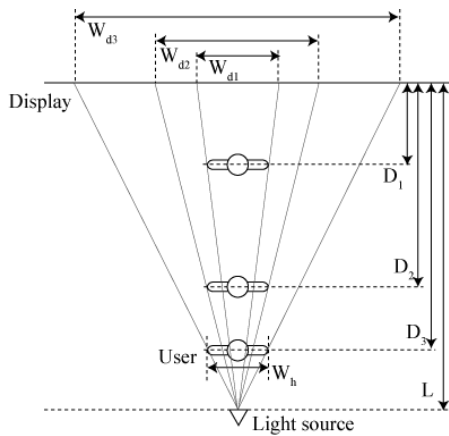


図2 ユーザの位置とそのとき生成される影の大きさの関係

3.2 影の動きとフィッツの法則

影を使った手法としては、ユーザが移動したり、仮想の光源が移動したり、またはその両方が移動するなど様々なものが考えられるが、今回は最も単純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。

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)。今回の実験においてはユーザの右手の三次元位置のみ計測できれば良いため、任天堂のWiiリモコンに、Vicon社のVicon 6 Motion Capture Systemのマーカーを取り付け、コントローラとして利用する (図3)。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、ボタンのクリックのためだけに利用している。



図3 Wiiリモコンを使ったコントローラ

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[3]にならって1次元のタッピングタスクを行う。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形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ため、実験中は影の表示はせ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 の三つである。今回はディスプレイと光源間の距離 L を4mとし、ディスプレイ距離 D を、1m、2.5m、3.25m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 の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のゲインを1とすると、2.5mのときゲインが $(8/3) / (4/3) = 2$ 、3.25mのときゲインが $(16/3) / (4/3) = 4$ 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132mm、264mm、528mm、手元のターゲット幅が30mm、60mm、120mm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, 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での分析を行うことができる。

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 でサイズ 640 mm と 320 mm, ターゲット距離 352 mm でサイズ 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ーバランスをとるように設定する。また、各ブロックの間には3分間の休憩を挟み、実験後にはアンケートを行う。実験は全体で1時間以内に終わるように設定した。

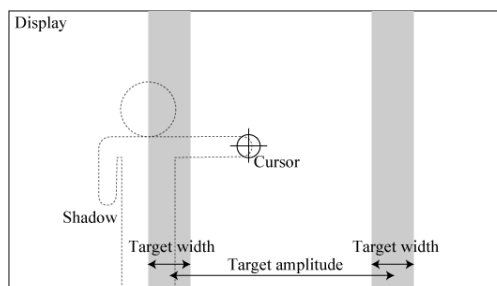


図4 ターゲットの配置

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。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。

4.4 実験参加者

実験参加者は情報系の大学生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には慣れていない。

4.5 結果

全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[3]、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なかったため ($p < .01$)、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、ターゲット距離とサイズ、ディスプレイ距離の3要因分散分析で解析する。図5に手元の動きでの分散分析の結果を示す。ポイン

表1 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]

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

表2 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]

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

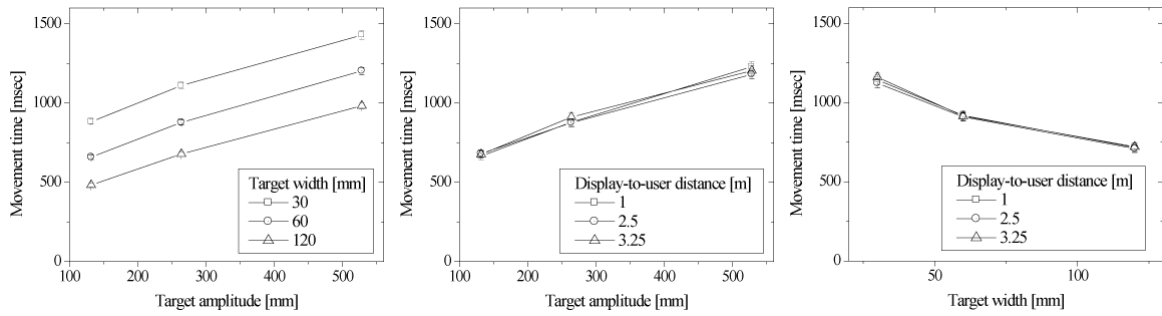


図5 手元の距離とサイズ, およびディスプレイ距離がポインティング時間に与える影響

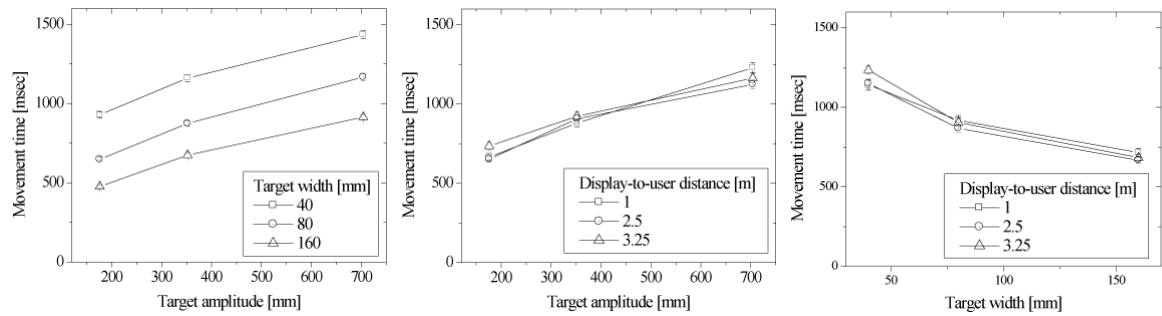


図6 画面上での距離とサイズ, およびディスプレイ距離がポインティング時間に与える影響

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. 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 ($p > .05$).

次に図6に画面上の動きでの分散分析の結果を示す. 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. 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 ($F(4,44) = 11.1, p < .01$) の間に交互作用が現れた. 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 ($p < .01$). これらから, 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る.

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関わらず, ポインティング時間を説明できると言える.

ポインティング時間は手元の動きでも画面上の動きでも説明できることが分かったので, 手元の動きを用いて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, サイズ, 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結果を示す.

$$MT = 417.43 + 264.77 \log_2(A) - 274.25 \log_2(W) \quad (4)$$

$(R^2 = .973)$

このように 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)を利用して回帰分析を行った (図7).

$$MT = 129.82 + 320.66 \log_2(A/W + 1) \quad (5)$$

$(R^2 = .983)$

このように 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)にも良く適合する結果となった.

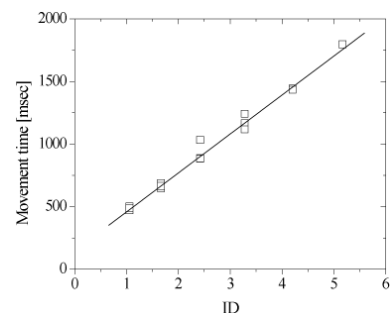


図7 手元の動きにおける難易度 ID とポインティング時間

5. 議論

Graham によると、ゲインの設定を伴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 の影響が等しくなく、式(2)のように b_1 と b_2 が異なった値になる。Shadow Reaching において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。そのため、Shadow Reaching においても実験前には 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が、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説明でき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説明できるという結果になったと考えられる。

また、 b_1 と b_2 が等しくなるフィッツの法則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、かつ直接指示のように直感的な運動が可能であると言え、今回の結果は影を使ったインタラクシオンの有用性を示していると考えられる。

今回の実験は光源位置を固定しユーザが動く環境であったため、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くても、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。そこで、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、見た目のカーソル速度による影響を調査する実験を行う予定である。

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。実験中は影を表示していないにも関わらず、参加者は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が、今後は、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いく予定である。

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。その結果、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関わらず、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り、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、光源位置や影の表示を変更して検討を続けて行く予定である。

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頂いた Christine MacKenzie 博士、Vicon システムを貸与頂いた Michiel van de Panne 氏に感謝を表す。

参考文献

- 1) Accot, J. and Zhai, S.: Refining Fitts' law models for bivariate pointing: In *Proc. of CHI '03*, pp. 193-200 (2003).
- 2) Baudisch, P., Cutrell, E., Robbins, D., Czerwinski, M., C., Tandler, P., Bederson, B., Zierlinger, A.: Drag-and-Pop and Drag-and-Pick: Techniques for accessing remote screen content on touch- and pen-operated systems, In *Proc. of INTERACT '03*, pp. 57-64 (2003).
- 3) Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *J. of Experimental Psychology*, Vol. 37, pp. 381-391 (1954).
- 4) Graham, D. E.: Pointing on a computer display, *PhD thesis, the school of Kinesiology, Simon Fraser University* (1996).
- 5) 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).
- 6) MacKenzie, I. S. and Buxton, W.: Extending Fitts' law to two-dimensional tasks, In *Proc. of CHI '92*, pp. 219-226 (1992).
- 7) Murata, A. and Iwase, H.: Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task, In *Proc. of Human Movement Science*, Vol. 20, No. 6, pp. 791-805 (2001).
- 8) Shoemaker, G., Tang, A. and Booth, K. S.: Shadow reaching: a new perspective on interaction for large displays, In *Proc. of UIST '07*, pp. 53-56 (2007).
- 9) Vegel, D., Balakrishnan, R., Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays, In *Proc. of UIST '05*, pp. 33-42 (2005).
- 10) Welford, A. T.: *Fundamentals of Skill* (1968).
- 11) 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, *インタラクシオン 2008 予稿集*, pp. 109-116 (2008).