

人間の視覚・運動特性を考慮した指差し支援インタフェース

保澤 圭亮[†] 吉本 廣雅^{††} 近藤 一晃^{††} 小泉 敬寛[†] 中村 裕一^{††}

[†] 京都大学大学院 工学研究科

〒 606-8501 京都市左京区 吉田本町

^{††} 京都大学 学術情報メディアセンター

〒 606-8501 京都市左京区 吉田本町

E-mail: †{yasuzawa,yoshimoto,kondo,koizumi}@ccm.media.kyoto-u.ac.jp, ††yuichi@media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 我々は、画面上のコンテンツを閲覧するユーザー間のコミュニケーションを支援するための指差し支援インタフェースの設計と評価のためのモデル化を行なっている。対象とする支援システムは、これはユーザが画面上のコンテンツを指し示す動作を画像処理で認識し、その指示位置をコンテンツに重畳表示するものである。本稿では、このシステムとユーザの動作や認知の特性を制御モデルで表現し、その振る舞いを解析する試み、また、その振る舞いが望ましいものになるようにシステム表示を設計する試みについて紹介する。従来から、ポインティングの特性について数多くの研究が行われてきたが、これらの知見と我々の解析結果が概ね整合すること、また、我々のモデルのパラメータを調節することにより、システムの振る舞いが改善されることについて報告する。

キーワード 指差しインタフェース ジェスチャ認識 ユーザビリティ 制御モデル Fittsの法則

Pointing Support Interface

Based on Human Characteristics of Visual Perception and Kinematics

Keisuke YASUZAWA[†], Hiromasa YOSHIMOTO^{††}, Kazuaki KONDO^{††}, Takahiro KOIZUMI[†], and Yuichi NAKAMURA^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto, 606-8501 Japan

^{††} Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: †{yasuzawa,yoshimoto,kondo,koizumi}@ccm.media.kyoto-u.ac.jp, ††yuichi@media.kyoto-u.ac.jp

Abstract We are tackling with the modeling for design and evaluation of a pointing user interface that supports communications among people looking or pointing at the same contents on a large screen or display. The objective system is a user interface that consists of a gesture measurement process and its visualization process. In this paper, we introduce the analysis of the system and users behaviors based on control theory and users motion and perception characteristics, and the design of the display scheme for a better performance of the total system. We then report the results are consistent with a number of previous works, and parameter adjustment in our model is useful for improving a pointing support system.

Key words Pointing support interface / Gesture recognition / Usability / Control model / Fitts' law

1. はじめに

人と人がコミュニケーションをとる手段の一つに指差しジェスチャがある。指差しジェスチャは、例えば、会議やプレゼンテーションのような大型ディスプレイを介した対話の場で、ディスプレイ上のコンテンツの一部を相手に指示する際に用いられる。本研究は、このような指差しジェスチャを用いたコミュニ

ケーションを支援するシステムとして指差しインタフェースを考える。これは、画像処理により指差しジェスチャを認識し、その指示位置をディスプレイ上のコンテンツに重畳表示する計算機システムである。

指示位置の伝達媒体としてみると、指差しインタフェースの利用者の立場は、ジェスチャを行う指示位置の**送り手**と、重畳表示からそれを読み取る**受け手**の二つの立場に分類できる。こ

ここで送り手のタスクは、ジェスチャにより計算機を操作することでディスプレイ上に表示されている指示位置を目標位置へ移動させるポインティングのタスクとなる。このタスクでは、送り手の視覚による指示位置の確認と運動によるその調整、及び計算機による計測とその表示処理とが連携して働いている。

本研究は、より使いやすい指差しインタフェースの実現を目指し、送り手の負担を低減する方法について議論を行う。その手段として我々は指差しインタフェースの視覚効果に着目する。

既に我々は予備実験により、指示位置の表示方法を変更すると送り手の動作に変化が現れ操作時間が変化することを確認している [1]。本研究ではこの予備実験をもとに更なる実験・分析を行い、人間の視覚・運動特性を考え、モデル化を行う。このような解析的なモデル化が可能になれば、種々の条件を変化させながらより使いやすい送り手の負担が少なくなる方法をシステムティックに調査できるようになる。

以下、本稿では 2. 節で関連研究を挙げ本研究との関係について整理する。次に 3. 節で我々が提案する指差し動作のシステムモデルを説明する。4. 節では実験環境や試作システムについて説明する。5. 節では実験とシステムモデルに基づいた分析結果について述べ、提案するシステムモデルの有効性について考察を述べる。

2. 関連研究と本研究の位置づけ

2.1 ポインティングの動作モデル

指差しのようなポインティング動作は人間の基本的な動作の一つである。その性質は古くから研究されており、1899 年には Woodworth らがポインティング動作を手の速度を決定するフィードフォワードの段階と手の速度を調整するフィードバックの段階の二つの要素で表すモデルを提案している [2]。このモデルはその後様々な検討がなされており、例えば Elliott らは、ポインティング動作が指示対象の大きさ、指示対象までの距離に応じて変化する運動としてモデル化できることを報告している [2]。

Fitts らはポインティング動作に要する操作時間 MT が指示対象までの距離 A と指示対象の大きさ (目標幅) W の関数で近似できることを報告している [3]。これは Fitts の法則として知られており、以下の式で表される。

$$MT = a + b \times ID \quad (1)$$

$$ID = \log_2\left(\frac{A}{W}\right) \quad (2)$$

ここで ID は難しさの指標 (Index of Difficulty) であり、 a 、 b はタスクや状況に応じて変化する定数である。さらに MacKenzie らは、人間の動作の正確さを考慮した指標として、被験者に与えた目標幅 W に対して被験者が実際に知覚した有効目標幅 W_e を考え、式 2 を

$$ID_e = \log_2\left(\frac{A}{W_e}\right) \quad (3)$$

と補正する方法を提案した [4]。 ID_e はポインティングインタフェースの評価指標としても広く利用されており、その算出方法・利用方法はポインティングデバイスに対する人間工学的要

求を規定した国際規格 ISO9241-9 およびその日本語版である JIS Z8519 として標準化されている。

2.2 視覚効果によるポインティング支援

Fitts の法則が示すように、ポインティング動作には指示対象の目標幅 W が大きい場合や指示対象までの距離 A が短い場合に操作時間 MT が短くなる傾向がある。この傾向を利用すると、視覚効果により操作時間が削減できる可能性がある。その方法としては、指示対象を拡大表示し目標幅 W を直接大きく提示する方法、視覚効果を工夫することで有効目標幅 W_e を実際より大きく知覚させる方法、が提案されている。前者の方法としては、GUI とマウスを用いたポインティング操作においてマウスカーソル付近のボタンやスクロールバー等の指示対象を拡大表示する方法 [5] がある。後者の方法としては、GUI で指示対象の代わりにマウスカーソルを拡大表示する方法 [6]、指示対象の付近ではマウスカーソルの移動速度を減少させる方法 [7] がある。ただしこれらの手法では、指示位置の分解能が低下してしまう点、視覚効果が変動することに伴いユーザの認知的負荷が増加してしまう点、が欠点として指摘されている [6]。

また視覚効果によりユーザの負荷を低減する方法も提案されている。たとえば、マウスカーソルの軌跡を表示すると指示位置の視認性と追従性を高めることができ、結果操作時間も削減できることが報告されている [8]。

2.3 画像処理を用いた指差しインタフェースの問題

指差しインタフェースでは、送り手がポインティング動作を生成する際に生じる送り手の負担の問題だけでなく、計算機や受け手がポインティング動作を観測する際に生じる指差し動作の曖昧さと計測精度の問題がある。

受け手や計算機の側からみると、指差し動作には指示位置との対応関係が一意に定まらない問題がある。数々の先行研究が存在するように、その対応関係には様々な条件が複合的に影響していると考えられる。たとえば福本らは、身体内部にある点を基準点とし、それを指先と結んだ直線上に指差し動作の指示対象が存在すると報告している [9]。しかし、田中ら [10] や新谷 [11] らは姿勢によりその基準点が移動してしまうことを報告している。また、吉田ら [12] が指摘するように、人間の空間認知特性により実空間と認識空間には誤差が存在する。これらの要因により計算機が機械的に指差し動作から一意に指示位置を推定することは非常に困難となっている。

また計算機による指差し動作の計測を考えると計測精度も問題となる。人間の自然な振る舞いを観測するにはカメラなどの画像センサが最適である。しかし画像として獲得される情報には、ノイズ等の外乱が多く含まれる。また基準点や指先の計測位置に含まれる誤差は、基準点や指先を結ぶ直線の計測精度に大きく影響する。

2.4 本研究の位置づけ

本研究はポインティング動作の支援と誤認識・誤計測への対処を同時に実現する方法について議論を行う。本稿はその議論に向けた基礎研究成果として、指差しインタフェースのシステムモデルとその同定方法について報告を行う。このモデルにより、我々は人間の視覚・運動特性及び計算機の認識・計測・表

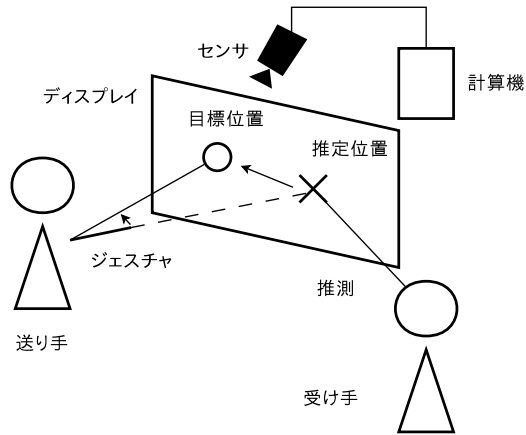


図1 指差しインタフェースの模式図

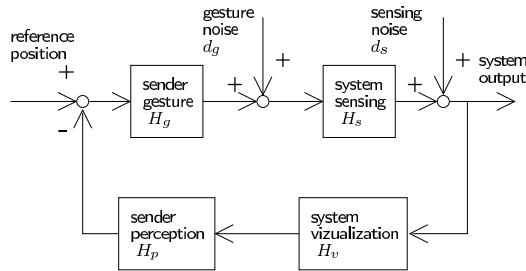


図2 計算機を介した指差し動作の制御モデル。各ブロックはそれぞれ、送り手のジェスチャ制御 H_g 、計算機の計測処理 H_s 、計算機による表示処理 H_v 、送り手の視覚 H_p に対応しており、外乱として送り手の動作の不正確さ d_g 、計算機の計測誤差 d_s を想定している。

示処理の特性をパラメータ化し、それらパラメータがユーザビリティに及ぼす影響を予測する手法の確立を目指す。次節ではまず指差しインタフェースのシステムモデルについて述べ、関連研究との関係を議論する。

3. 指差しインタフェースのシステムモデル

図1に本研究が対象とする指差しインタフェースの模式図を示す。これは例えば、大型ディスプレイ上に表示されたスライドや資料に向かって、指差し動作を交えながら議論や説明を行う場を想定している [13]。

指差しインタフェースは指示位置を伝達するインタフェースである。送り手が指差し動作を開始すると、計算機はその姿勢から指示位置を計算しその位置にカーソル等の形でディスプレイ上に表示する。その表示から受け手と送り手は現在の指示位置を読み取ることになる。ここで、送り手が伝達したい指示位置を**目標位置**、計算機が計測した指示位置を**計測位置**、表示から読み取った指示位置を**推定位置**と区別すると、送り手は推定位置が目標位置に一致するように自身の指差し動作を調整していることになる。

本稿は指差しインタフェースを視覚に基づいたフィードバック制御系とみなし、そのシステムモデルを図2に示す制御モデルとして表現する。この制御系では、送り手のジェスチャ制御 (H_g) と計算機の計測処理 (H_s) が前向き要素であり、それに計

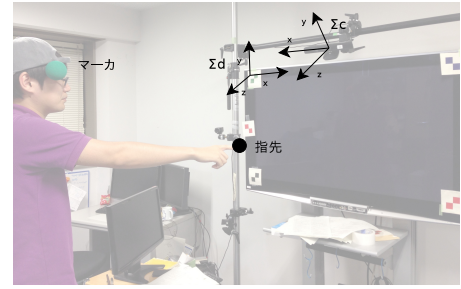


図3 計測環境の概要図

算機による表示処理 (H_v) と送り手の視覚 (H_p) がフィードバック要素となる。また外乱として、 H_s の直前に送り手の動作の不正確さに起因する外乱 d_g 、 H_s の直後に計算機の計測誤差に起因する外乱 d_s を考える。

この制御モデルでは推定位置と目標位置の差が偏差であり、偏差が送り手の許容範囲以下になった時点で指差し動作は完了となる。動作の完了までに要する時間を**操作時間**とすると、この制御モデルの安定性や速応性を高めることができれば、それは操作時間の削減につながる。本研究は、この操作時間の削減がコミュニケーションの支援になると考える。以下、本稿では送り手と受け手の H_p が共通であると仮定し送り手の動作のみ着目し、操作時間と各ブロックの特性の関係について議論を進めその同定実験を行い、従来の知見との比較を交えながら提案モデルの妥当性を考察する。

4. 実験環境

提案モデルの妥当性を検証・議論するにあたり、本稿は我々が試作した指差しインタフェースを用いて、人間の視覚・運動特性の計測、およびそのモデルのパラメータ同定を行う。以下、試作した指差しインタフェースの詳細を説明する。

4.1 使用機材

図3に実験環境の概要を示す。これは送り手が50インチの大型ディスプレイの正面に立ちディスプレイ上のコンテンツを指示する状況を想定している。またディスプレイ上部には Kinect センサを設置した。なお Kinect センサとディスプレイ間の幾何関係は、鏡を用いたキャリブレーション法 [1] 等を用いる事で予め既知であるとする。

指差しインタフェースは、この Kinect センサで獲得した RGB-D 画像を解析することで人間の姿勢を3次元で計測し、その計測結果に基づいてディスプレイ上の指示位置の計測を行うものとする。なお Kinect センサは 30Hz で撮影した比較的低解像度の画像を元に3次元計測を行うセンサであり、動作の計測デバイスとしては時間的にも空間的にも分解能が低い。そこで以下の実験では、最大 240Hz でミリ単位の精度で3次元位置が計測できる磁気式モーションセンサ Polhemus LIBERTY を適宜併用し、その計測結果を真値とみなして Kinect センサを利用した指差しインタフェースの特性を解析する。

4.2 画像処理による指示位置の計測

指示位置の計測モジュールについて概要を述べる。この計測モジュールは、システムモデルにおける H_s に相当する。

2.3節で述べたように、任意の指示位置に対して送り手の姿勢は多様で1対多の対応関係にある。姿勢から一意に計測位置を求めることは困難である。ただし、井村 [14] らによれば、指示対象が近距離で送り手が肘を伸ばした状態であれば、指示方向は目から指先へと向かうベクトルで近似できることが報告されている。また新谷 [15] らは利き目が与える指示方向への影響を報告している。これら報告に則り、本稿では肘をのばした状態での指差し動作のみを議論の対象とする。そして両目の位置から求まる基準位置と指先位置とを結ぶ半直線とディスプレイ平面との交点を計測位置とした。

具体的な指示位置の計測処理としては、まず指先位置は、OpenNI ライブラリを用いて上半身の骨格追跡を行い、得られた右手首座標を起点に RGB-D 画像から指先位置を検出することで、その3次元座標を求める。また基準位置は送り手の頭部に色マーカーを二つ付け、マーカーの3次元座標から基準位置の3次元座標を算出した。

本稿は、この画像処理に基づく計測モジュールの特性を H_s として分析する。またその比較対象として、計測外乱や遅れが少ない計測モジュールを Polhemus を用いて作成した。後述の実験ではこの二つの計測モジュールを適宜切り替え比較することで制御モデルの分析を進める。

4.3 確率密度によるポインティング表示

指示位置の表示モジュールについて概要を述べる。この表示モジュールは、システムモデルにおける H_v に相当する。

制御モデルに従うと指差し動作の速応性・安定性は、 $H_v(s)$ の特性により変化する。例えば、表示モジュールに計測位置を平滑化するような視覚効果を加えると、それは $H_v(s)$ における積分要素として作用し、外乱 d_s が抑制され、安定性が高まる可能性がある。また GUI におけるマウスカーソルの軌跡のように、計測位置の軌跡を描画する視覚効果を加えると、それは微分要素として働き速応性が高まる可能性がある。

また2.2節で述べたように、様々な先行研究において、Fittsの法則を利用することで視覚効果により操作時間が削減できることが報告されている。

このようにポインティング表示には、指示位置を表示する機能だけでなく、ユーザの振る舞いを制御する機能を与えることができる。そこで我々はユーザの振る舞いを動的に制御する手段として**確率密度によるポインティング表示法**を提案している。これはパラメータにより調整可能な視覚効果を有する指示位置の表示方法である。例えば、指示位置を点や一定の大きさを持つ円で可視化したり、その軌跡を可視化できる表示法である [1]。

この表示法は、カーソル形状の変形を利用した空間方向の視覚効果の制御と、そのカーソルの残像を利用した時間方向の視覚効果の制御を同時に実現する方法である。その計算方法として我々はヒートマップと呼ばれる手法を応用している。具体的には、まずカーソルの形状として時刻 t における指示位置の確率密度関数 $p(x)$ を考え、それに基づいて画像 $I_p(t)$ を生成する。さらにそれを以下の式で時間方向に積分した画像をヒートマップ画像 $I_h(t)$ とする。

表1 $p(x)$, α , β と $I_h(t)$ の例

$p(x)$	$\alpha = 0, \beta = 1$	$\alpha = .9, \beta = .1$

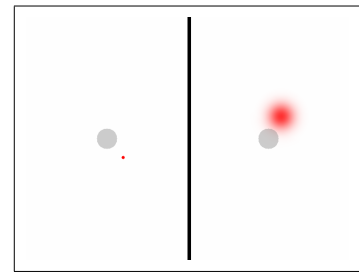


図4 視覚効果が距離感覚に与える影響の計測実験

$$I_h(t) = \alpha I_h(t-1) + \beta I_p(t) \quad (4)$$

ここで α , β は定数で、1未満の正の実数とする。提案法は、この $I_h(t)$ をコンテンツ上に重畳表示することで、計測位置をユーザに提示する。実例を表1に示す。これはある被験者の実際の指差し動作を、 $p(x)$, α , β を変えて可視化した結果である。このように提案法は指示位置やその移動軌跡に対する空間方向と時間方向の視覚効果をパラメータにより柔軟に制御できる表示方法となっている。

5. 実験

前節で述べた環境および計測・表示モジュールを用いて、我々は各伝達関数の特性を測定し提案モデルの妥当性を検証する実験を行う。以下、本節では各伝達関数毎に実験の詳細と結果について報告する。また先行研究やその知見との比較を行い、考察をまとめる。

5.1 H_v と人間の視覚の関係

まず表示モジュールによる視覚効果が、人間の距離感覚に与える影響を測定する実験を行った。実験手順の概要を図4に示す。これは、指示位置から指示対象までのユークリッド距離 D に対して、被験者が知覚する距離を有効距離 D_e とし、 H_v の視覚効果により D と D_e の関係がどのように変化するかを測定する実験である。画面左側では点を用いたポインティング表示法を用い、指示対象からある距離 D_{left} 離れた場所に指示位置を表示する。一方画面右側ではカーソル形状として円表示や分布表示を用いたポインティング表示法を用い、指示対象からある距離 D_{right} 離れた場所に指示位置を表示する。そして被験者に左右の指示位置でより近く感じる方を選択させる。

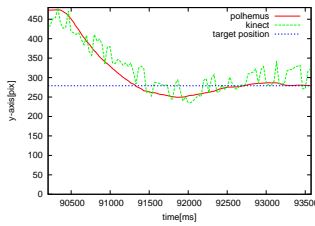


図7 Kinectの計測

この実験を様々な D_{left} と D_{right} の組み合わせで行った結果を図5に示す。ここで各図の横軸は D_{left} 、縦軸は D_{right} である。各サンプル点は、被験者が $D_{left} > D_{right}$ と知覚した場合を赤色の+、 $D_{left} < D_{right}$ と知覚した場合を緑色の×で表示してある。ここで図5(a)は左右とも同じ点によるポイントング表示を行った際の実験結果であり、直線 $D_{left} = D_{right}$ を境界として、 $D_{left} > D_{right}$ つまり直線の上側領域に赤色の+が、 $D_{left} < D_{right}$ つまり直線の下側領域に緑色の×が分布していることが読み取れる。これは、点によるポイントング表示では実際の距離と D と知覚した距離 D_e に正比例の関係があることを意味している。これに対し、図5(b)の円表示での結果、図5(c)の分布表示での結果では、直線の下側 $D_{left} > D_{right}$ の領域に赤色の+の領域が存在している。これはつまり、この領域付近では、実際の距離と D と知覚した距離 D_e の間に $D > D_e$ の関係が生じていることを意味する。

この効果はポイントング表示による指示対象の判定にも影響する。その測定の概要、結果を図6に示す。図6(a)(b)(c)に示すような図を順に示し赤いカーソルが灰色のオブジェクトを指示できているかを判定させる。図6(d)(e)(f)は距離に応じて指示している事象と指示していない事象の割合を示している。その割合がカーソルの形に応じて変化している傾向がみられた。

これらの結果から、視覚効果のカーソル形状 $p(x)$ のパラメータにより、人間が視覚 H_p を介して知覚する距離 D_e を制御できることが示された。また図5のサンプル点の分布から D と D_e には何らかのモデルがある可能性が類推される。この点は今後詳細に分析する予定である。

5.2 H_s と指差し動作の関係

まず4.2節で説明した計測モジュールの特性を分析した。これは制御モデルにおける H_s とその誤差 d_s の分析である。分析にあたり、我々は4.1節で説明したように Polhemus による計測モジュールの出力を真値として、それを基準に Kinect による計測モジュールの出力を検証した。図7に測定結果の一部を示す。これは指差し動作中の指示位置の軌跡であり、横軸を時間、縦軸を y 座標とし、赤線が Polhemus による計測結果、緑線が Kinect による計測結果を表している。これら計測結果から d_s を算出したところ、その誤差は最大で60ピクセル、平均で21.7ピクセル程度であった。これはディスプレイ上の指示位置としては平均2cm程度の誤差になる。

この誤差は、画像撮像系の特性および画像処理アルゴリズムの特性を考慮すると、姿勢追跡処理に伴う H_s の一次遅れの要素、及び画像の観測雑音に起因する d_s の白色雑音により生じ

たものと推察される。図7の計測結果からも概ねその傾向が読み取れる。

5.3 H_v と指差し動作の関係:定性的分析

次に4.3節で説明した表示モジュールについて、そのパラメータと送り手の動作の関係を定性的に比較した。これは制御モデルにおける H_v の分析に相当する。

まず、 H_v のパラメータとして $p(x)$ のみを変化させた場合について、指差し動作がどのように変化するかを測定する実験を行った。測定は、指差しインタフェースを用いて被験者がディスプレイ上で縦方向に200ピクセル、約25.8cm離れた目標位置へ指示位置を移動させる条件下で行い、制御モデルにおける $p(x)$ 以外のパラメータはそれぞれ $\alpha = 0$ 、 $\beta = 1$ に固定した。なお測定には精度を重視し polhemus を用いた。

測定結果を図8に示す。図上段は $p(x)$ として (a) 点表示 $p_p(x)$ 、(b) 円表示 $p_c(x)$ 、(c) 分布表示 $p_d(x)$ を用いた場合の結果であり、横軸が経過時間、縦軸が指示位置を y 軸方向の偏差の形で表している。また、下段の (d)(e)(f) は速度の時間変化を示している。

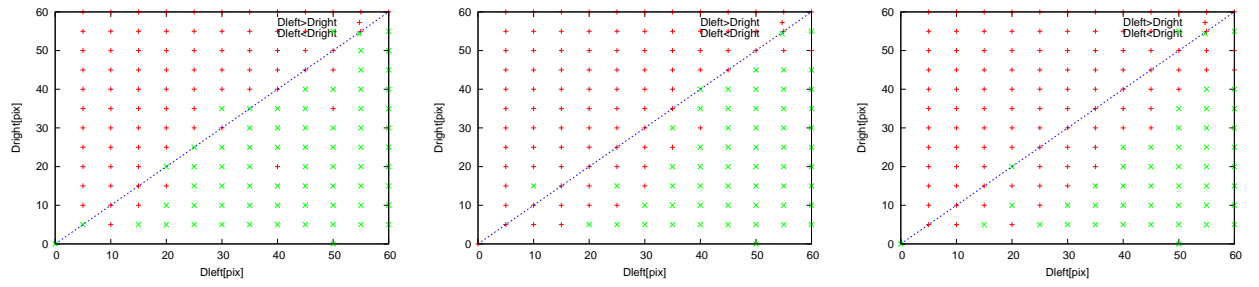
ここでまず上段の横軸、時間に着目すると、指差し動作による操作時間は (a) が一番遅く、(b)(c) の順で若干早くなる傾向がみられた。つまりカーソルの大きさを大きくした場合に操作時間が短くなる傾向が見られた。これは我々の先行知見 [1] や Kabbash らの先行研究 [6] とも一致している。また図8下段を見ると、動作の最高速は (c) の分布表示で最も速くなり、(b)(a) の順で遅くなる傾向がみられた。またその速度の減少は、(c)(b)(a) の順に急になる傾向がみられる。このように、 H_v のカーソル形状が変化すると、指し手の動作、とくにその動作速度が変化することが定性的に観察できた。

5.4 H_v と指差し動作の関係:Fittsの法則に基づいた分析

次に Fitts の法則を用いて定量的に H_v と動作の関係を分析した。

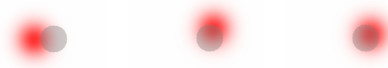
まず被験者には指差しインタフェースを用いたポイントングタスクを複数回試行してもらい、その試行毎に式3に基づいた ID_e と、そのタスクに要した操作時間 MT の対を測定した。この測定を H_v を (a) 点表示 (b) 円表示 (c) 分布表示と切り替えながら行った。なお ID_e の計算は式3を用いるが、先行研究 [6] 等の知見に従い、指示対象の有効幅に H_v で使用するカーソル $p(x)$ の有効幅を合算した値を有効目標幅 W_e として用いた。

図9に計測モジュールとして polhemus を用いた指差しインタフェースによる実験結果、図10に計測モジュールとして kinect を用いた指差しインタフェースによる実験結果、を示す。図左の散布図はそれぞれ H_v を (a) 点表示 (b) 円表示 (c) 分布表示で測定した ID と MT の組の分布を示しており、図中の直線はそれらデータに対して式2の直線を当てはめた結果である。また図 (d) はそれら三つの直線をまとめて描画した図である。これらの図を比較すると、散布図とその直線への当てはめ結果から全体の傾向としては ID と MT との間に比例関係があることが読み取れる。これはつまり、指差しインタフェースにおける指差しタスクも Fitts の法則に沿う動作モデルで全

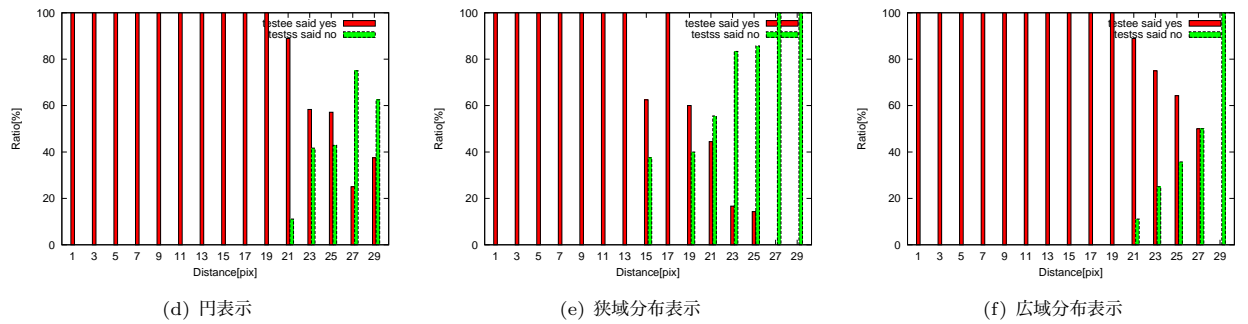


(a) 点表示における実距離と実効距離の関係 (b) 円表示における実距離と実効距離の関係 (c) 分布表示における実距離と実効距離の関係

図5 H_v によるユークリッド距離と有効距離の変化



(a) 実効半径計測 (b) 実効半径計測 (c) 実効半径計測
に用いた図例1 に用いた図例2 に用いた図例3



(d) 円表示 (e) 狭域分布表示 (f) 広域分布表示

図6 カーソル毎の距離と指示している事象と指示していない事象の割合の計測実験

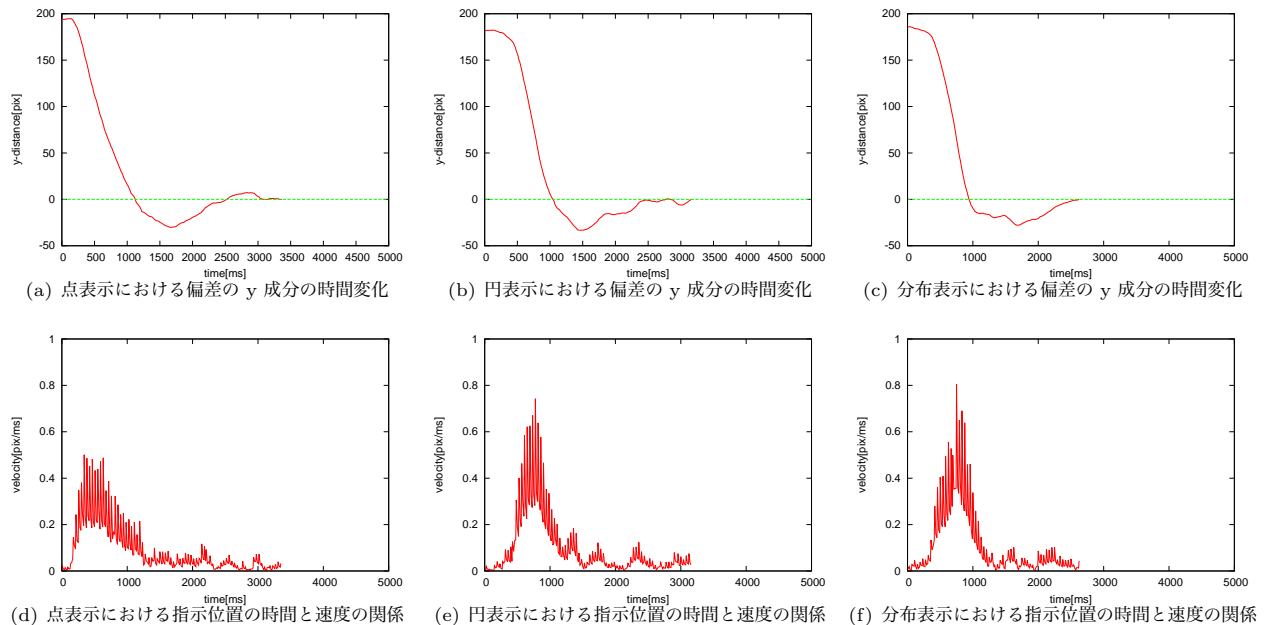


図8 表示による軌跡と速度の関係の比較

体的な傾向が予測できることを意味する。この傾向は文献 [4,6] 等の先行知見とも一致する。

しかしより細かく分析すると Fitts の法則に従わない部分もある。まず、Fitts の法則に従えば MT は ID に正比例するの

で、図 (a)(b)(c) の各サンプル点は直線上に集中する筈である。さらに図 (d) に示す三つの直線は完全に一致はずである。

しかし我々の測定実験では、図 (a)(b)(c) の散佈図上で MT が ID に正比例していないサンプルが多数見られる。そしてそ

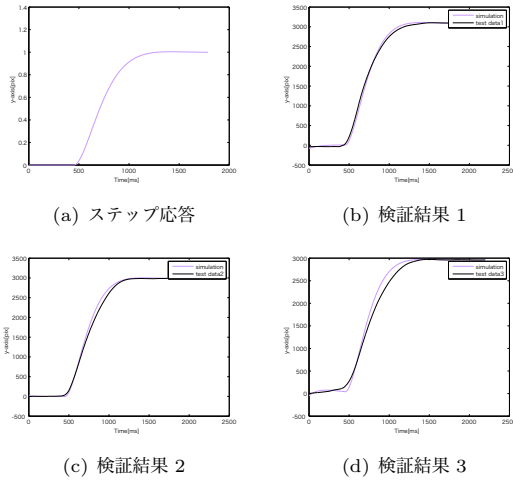


図 11 同定した H_g のステップ応答と検証結果

の傾向は図 9 に比べ、図 10 の方が大きい。また双方の図 (d) では H_v により直線の切片や傾きが変化する傾向が見られる。

これらの結果から、制御システムに対する外乱や H_v の視覚効果が指差し動作に与える影響には、Fitts の法則だけでは説明できない別の要素が含まれている可能性が考えられる。

5.5 H_g と指差し動作の関係:制御理論に基づいた分析

上記の実験で、我々は H_v により人間の振る舞いに差が生じることを確認した。そこで次に人間の振る舞いを $H_p(s)$ と $H_v(s)$ の二つのモデルで同定することを考える。ここで本稿は同定を進めるにあたり、人間の運動特性に関するモデル $H_g(s)$ は H_v の影響を受けず、 $H_p(s)$ の特性のみが H_v に応じて変化すると仮定した。

まず被験者の $H_g(s)$ の同定を考える。 $H_g(s)$ の入力として、被験者に指差し動作の指示を与え、フィードバックのない状態でその後生じる指示動作を $H_g(s)$ のステップ応答として計測した。そのステップ応答から、我々は伝達関数 $H_g(s)$ として次のモデルを同定した。

$$H_g(s) = e^{-450s} \frac{2.569 \times 10^{-5}}{s^2 + 0.0101s + 3.581 \times 10^{-5}} \quad (5)$$

$H_g(s)$ のステップ応答を図 11(a) に示す。また推定した $H_g(s)$ の妥当性を検証するために、テストデータとの比較結果を図 11(b), 11(c), 11(d) に示す。この検証により我々が推定した $H_g(s)$ は、送り手の運動を正しく予測できることを確認した。

5.6 H_p と指差し動作の関係:制御理論に基づいた分析

次に各 H_v に対応する $H_p(s)$ の同定を行った。

実験では $H_p(s)$ への入力として H_v による視覚効果を与え、そのフィードバックを受けた被験者の指差し動作を $H_g(s)H_p(s)$ のステップ応答として計測した。そのステップ応答から、我々は伝達関数をまず $H_g(s)H_p(s)$ の形で次のように同定した。

$$H_g(s)H_p(s) = e^{-Ls} \frac{K}{s^4 + As^3 + Bs^2 + Cs + D} \quad (6)$$

実験の結果、点表示の場合それぞれの計数は、 $L = 450$,

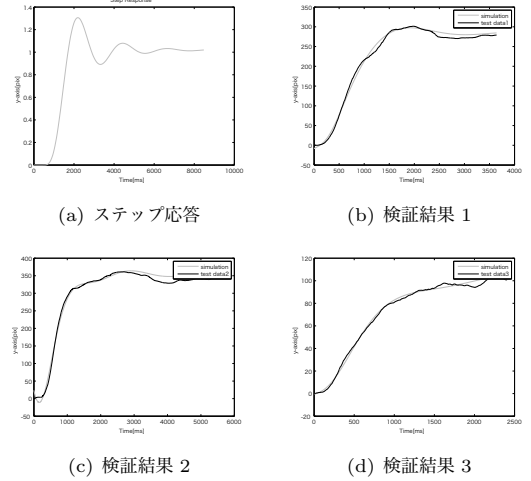


図 12 同定した $H_g(s)H_{pp}(s)$ のステップ応答と検証結果

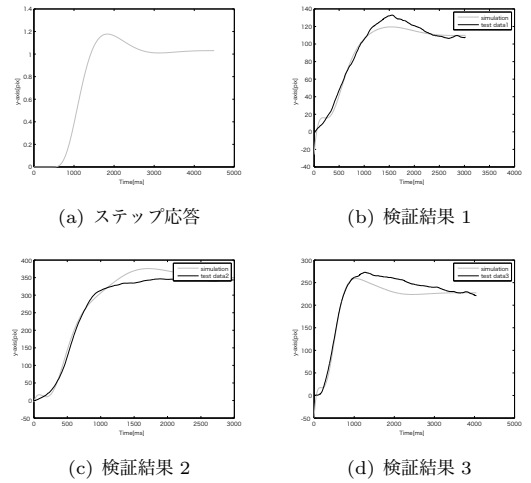


図 13 同定した $H_g(s)H_{pc}(s)$ のステップ応答と検証結果

$K = 7.157 \times 10^{-11}$, $A = 0.006068$, $B = 2.307 \times 10^{-5}$, $C = 5.097 \times 10^{-8}$, $D = 7.026 \times 10^{-11}$ となった。また、円表示の場合は、 $L = 450$, $K = 4.178 \times 10^{-10}$, $A = 0.01033$, $B = 7.843 \times 10^{-5}$, $C = 2.143 \times 10^{-7}$, $D = 4.064 \times 10^{-10}$ となった。

図 12(a) に $H_g(s)H_{pp}(s)$ のステップ応答を、図 13(a) に $H_g(s)H_{pc}(s)$ のステップ応答を示す。またモデルの妥当性を検証するためのシミュレーション結果をそれぞれ図 12, 13 に示す。点表示の場合のシミュレーション結果は一致度が高く、式 6 が妥当であったと言える。一方、円表示の場合ではシミュレーションと観測が一致しない部分が多い。これは式 6 で表現できない部分が存在することを示し、 $H_g(s)$ が H_v の影響を受けないという前提を踏まえると、表示の変化に伴い $H_p(s)$ のモデル自体が変化すると推測する。

以上の検証から、我々は点表示において $H_g(s)$ との積の形であるが、 $H_p(s)$ の同定を行うことができ、 H_v による $H_p(s)$ のモデル変化を示唆する結果を得た。

5.7 考察

以上まとめると、本実験では各 H_v , H_s , H_g , H_p の特性を、関連研究での先行知見、人間の視覚・運動特性、計算機の認識

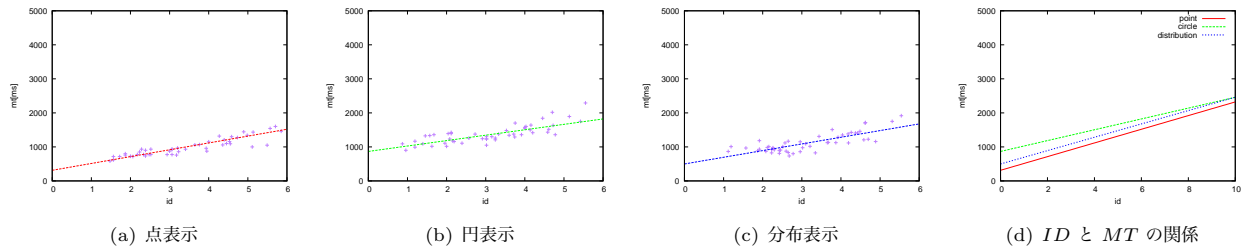


図9 polhemus を用いた計測におけるカーソル毎の ID と MT の関係

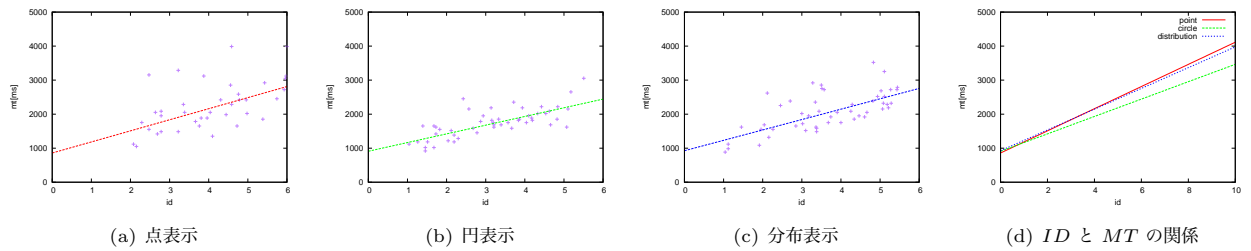


図10 kinect を用いた計測におけるカーソル毎の ID と MT の関係

計測アルゴリズムの特性を考慮して分析し、モデル化した。そしてモデルのパラメータ同定を行い、人間の振る舞いが予測できうことを確認した。

の法則で説明

6. おわりに

本稿は、ユーザのポインティング動作の支援方法、および計算機の誤認識・誤計測への対処方法の議論にむけた基礎研究として、指差しインタフェースのシステムモデルを考案し、そのパラメータの同定方法について検討を行った。実験の結果、提案モデルは指差しインタフェースにおける人間および計算機の振る舞いを予測でき、システムモデルの各種パラメータから指差しインタフェースのユーザビリティが予測できることを実験的に確認した。

今後は、制御モデルのより詳細な解析、特に H_p の解析、システムモデルに基づいた H_v の最適化手法の検討が挙げられる。また肘を曲げた姿勢等の多様な指差しジェスチャーへの対応方法を検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「マルチモーダルな場の認識に基づくセミナー・会議の多層的支援環境」の助成を受けて行った。

文 献

- [1] 保澤 圭亮, 吉本 廣雅, 近藤 一晃, 小泉 敬寛, and 中村 裕一. 動作の正確さと計測の精度に基づいた指差しインタフェース - 確率密度によるポインティング表示 -. *信学技報 MVE*, 113(227):59-64, Sep. 2013.
- [2] D Elliott, W F Helsen, and R Chua. A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychological Bulletin*, 127(3):342-57, May 2001.
- [3] Paul M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381-391, June 1954.
- [4] I. Scott MacKenzie. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1):91-139, March 1992.
- [5] Michael J. McGuffin and Ravin Balakrishnan. Fitts' law and expanding targets: Experimental studies and designs for user interfaces. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 12(4):388-422, December 2005.
- [6] Paul Kabbash and William A. S. Buxton. The "prince" technique: Fitts' law and selection using area cursors. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pages 273-279, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [7] Renaud Blanch, Yves Guiard, and Michel Beaudouin-Lafon. Semantic pointing: improving target acquisition with control-display ratio adaptation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, pages 519-526, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [8] Patrick Baudisch, Edward Cutrell, and George Robertson. High-density cursor: A visualization technique that helps users keep track of fast-moving mouse cursors. In *In Proc. Interact' 03*, pages 236-243, 2003.
- [9] Masaaki Fukumoto, Yasuhito Suenaga, and Kenji Mase. "Finger-Pointer": Pointing interface by image processing. *Computers & Graphics*, 18(5):633-642, September 1994.
- [10] 田中 宏一, 和田 俊和, and 松山 隆司. 3次元人体形状計測に基づく指差し動作の解析. *情報研報 CVIM*, 2002(34):125-132, May 2002.
- [11] 新谷 晃市, 間下 以大, 清川 清, and 竹村 治雄. 大画面ポインティングシステムのための画像特徴量を用いた指差し位置推定. In *ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集 (CD-ROM)*, volume 2009, page ROMBUNNO.1112, Sep. 2009.
- [12] 吉田 千里 and 乾 敏郎. ポインティング動作に基づく空間認知特性の検討. *映像情報メディア学会技術報告*, 24(51):9-16, sep 2000.
- [13] 河原達也. [特別講演] スマートポスターボード: ポスター発表における場のマルチモーダルなセンシングと認識. *信学技報 PRMU*, PRMU2012-167(441):167-172, Feb. 2013.
- [14] 井村 誠孝, 武田 直之, 佐々木 博史, 安室 喜弘, 眞鍋 佳嗣, and 千原 國宏. VR 空間における操作者の姿勢に基づく指示方向推定. *情報処理学会論文誌*, 48(3):1307-1315, Mar. 2007.
- [15] 新谷 晃市, 間下 以大, 清川 清, and 竹村 治雄. 指差し動作における身体の左右差に関する調査. In *HCG シンポジウム 2010*, pages B7-3, 宮崎シーガイア, Dec. 2010. 電子情報通信学会.