

# 人間の指差し動作モデルを用いた ポインティングシステムの設計と性能予測

保澤 圭亮<sup>†</sup> 吉本 廣雅<sup>††</sup> 近藤 一晃<sup>††</sup> 小泉 敬寛<sup>†</sup> 中村 裕一<sup>††</sup>  
古谷 栄光<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院 工学研究科  
<sup>††</sup> 京都大学 学術情報メディアセンター

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

**あらまし** ディスプレイ画面上にユーザーの指差し位置を表示するポインティングインタフェースを一連の制御系とみなし、そのモデル化と同定・検証を行う。これにより様々な条件下における指差し動作の予測を通してより使いやすいインタフェースを設計することが可能となる。本稿では、人間の身体性による指差し動作の不正確さと計測の誤差、およびそれぞれの系における遅れ時間を考慮したモデルを提案する。また被験者実験を通してシステムの同定を行い、外乱の有無を含めたステップ入力に対する指差し動作の予測値を、むだ時間・遅れ時間・行き過ぎ量・整定時間といった指標により評価した結果を報告する。

**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

## Design and Performance Estimation of Pointing Interface based on Human Motion Model

Keisuke YASUZAWA<sup>†</sup>, Hiromasa YOSHIMOTO<sup>††</sup>, Kazuaki KONDO<sup>††</sup>, Takahiro KOIZUMI<sup>†</sup>,  
Yuichi NAKAMURA<sup>††</sup>, and Eiko FURUTANI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto, 606-8501 Japan  
<sup>††</sup> 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,  
†††furutani@kuee.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose the model of a user interface that shows where the pointer indicates as a control system including ambiguity of his body posture, error on measurement, and latency. This model can predict pointing behaviors of the various persons with various configurations, which will be helpful to design a user-friendly pointing interface. The pointing interface system implemented in the experimental environment had been identified in order to validate the performance of the proposed model. Here we report the accuracy of the predicted pointing trajectories with/without disturbances from system control aspects.

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

### 1. はじめに

人と人とのコミュニケーションでは離れた場所を指示するために指差し動作が日常的に用いられる。しかし、指示対象が遠

方であったり小さいときには指差し動作だけではうまく指示対象を伝えられないことがある。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を指示する場面などがその例である。このような場

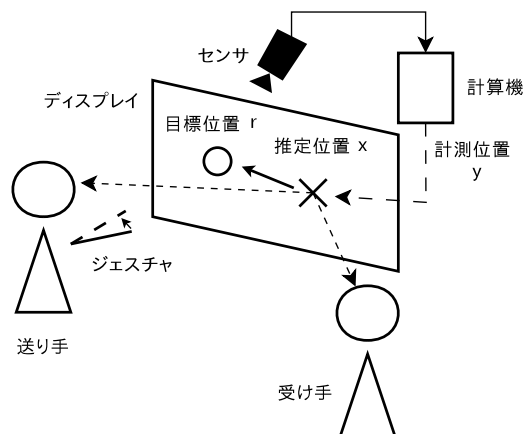


図1 指差しインタフェースの模式図

合、通常では指示場所を明確に伝えるためにレーザーポインタや指示棒等の道具を用いることが多い。本研究では、指示道具に計算機の画像処理を用いてコミュニケーションを支援する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。その模式図を図1に示す。指差しインタフェースは、計算機と指差し動作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とのやり取りとして表現できる。

計算機や画像計測技術の進歩に伴い、このような実時間システムが現実のものとなりつつあるが、一般環境で利用するにはまだ大きな課題が残っている。その一つは、計測精度と計測時間である。自然な振る舞いを阻害することなく高精度に指差し動作を計測することはいまだに難しい。もう一つは人間の動作の不正確さや動作に要する時間である。現在の技術には、人間の多様な振る舞いを解釈するための頑健性や柔軟性が不足している。このような問題に対処するためには、人間を含めた系としてシステムをモデル化し、その特性を解析しながら、システムの動作を設計することが有効である。すなわち、様々な条件やパラメータを変化させて人間の振る舞いを予測し、利用者にとって好ましい特性を持つようにシステムを設計することが可能となる。

我々はこれまでの研究で、指示位置の表示方法を変更することで指示者の動作時間が変化することを確認しており [1]、制御理論に基づいたモデルとの定性的な関係を報告している [2]。本研究では、新たに雑音とむだ時間がある場合に重点を置いて、指差し動作の予測とその評価について検討する。

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。3. 節で我々が提案する指差し動作モデルを説明する。4. 節ではシステム同定実験について説明する。5. 節では提案モデルの性能予測実験について述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 実環境における指差しインタフェースが抱える問題

人間が何を指しているかはだまかにであれば指示動作から推定できることが知られている。例えば、福本ら [3] は身体内

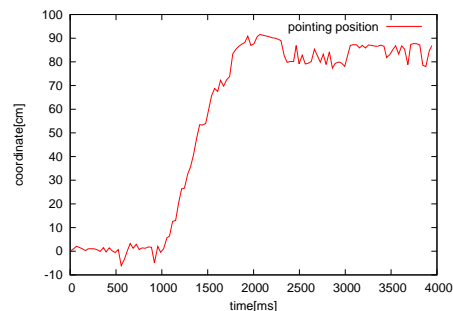


図2 実環境で計測したの指示位置の軌跡例

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示対象が存在することを報告している。しかし基準点をある一点に定めてしまうと、推定した指示位置に誤差が発生する事が多い。

その要因は人間の動作の不正確さである。指差し動作と指示位置の対応関係には様々な条件が複合的に影響し、一意に定まらないことが報告されている。例えば、田中ら [4] や新谷ら [5] は姿勢により指示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 [6] 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ズレが存在する。その結果、人間は目標位置に対して数度程度の角度の余裕を残して指差し動作をすることがわかっている。これらの要因により、人間の指示位置を一意に推定することは困難であり、人間にフィードバックを与えながら調整を行わせることが必要となる。

その一方で計測精度にも大きな問題がある。指差しインタフェースの実装では、設置の手間やユーザ負担が少ないことからカメラによる計測がしばしば用いられる。例えば、ディスプレイ上部に深度センサ付きカメラを取り付けることで指示者の骨格モデルを獲得し、頭部や手の位置関係から指示位置を推定する。このような環境で計測した指示位置の軌跡の一例を図2に示す。収束値付近で一定の範囲内で振動を繰り返していることから 80cm 付近を指示していると予測できるが、正確に目標位置を把握するのは困難である。指示者にとっては目標位置への指示が困難、指示の受け手にとっては目標位置を読み取るのが困難な状況にあると言える。このように、画像センサはユーザの自然な振る舞いを計測するのに適する一方で、高速・高精度の姿勢計測を行うことは困難であり、一定の計測誤差が生じる。

以上の二つの要因から、画像処理を用いた指差しインタフェースでは常に外乱やむだ時間を考慮した設計が必要となる。

### 2.2 指差しインタフェースの要件

指差しインタフェースの性能や使いやすさとして考えなければならない指標は多岐に渡る。その最も代表的なものは、ユーザが指示したい場所を如何に素早く指示できるか (以下、運動時間と呼ぶ) である。これに対しては、運動時間と運動距離の関係をモデル化した Fitts の法則が指差しインタフェースの評価指標として古くから広く利用されている。また、計測誤差 (外乱) が存在する場合には、カーソルのブレ (ゆらぎ) など、不快な振る舞いなどを抑えること、その状態でユーザの意図通りにカーソルが移動し、動作が速く収束すること等が課題となる。

さらに、受け手がいる場合、受け手にとっての見やすさやわかりやすさも問題となる。例えば、カーソルを大きくすれば指示者は指差しやすくなるが、受け手にとって指示位置がわかりにくくなる問題がある。

これらの要件の一つまたは複数を改善することを目的として、様々な研究が行われてきた。例えば、McGuffinらは、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指示対象を拡大表示する方法を提案している [7]。これは目標とする範囲を大きくすることで運動が収束するまでの時間を減少させることに対応している。我々が既に報告したカーソルのヒートマップ化による運動時間の短縮も同様の効果を狙っている [1]。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 [8]、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 [9] 等も報告されている。

これらの研究の多くは所期の成果をあげてきたが、その効果の見通し、つまり異なる条件での効果や適用範囲の見極めは難しいのが現状である。特に無視できない雑音(外乱)がある場合の解析については、有効な手法に乏しいのが現状である。その一つの原因は、人間がシステムの系の中に入っているため、その性能をシステムティックに予測することが難しいことであり、シミュレーションなどが可能になれば、従来よりも見通しの良いシステム設計が可能となる。本研究ではこのような考え方から、指差しシステムを人間を含めてモデル化することを目指した。

### 3. 指差しインタフェースシステムのモデル化

#### 3.1 指差しインタフェース部

本研究では、図1のように、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 [10]。

計算機はセンサから得た情報を基に指示位置を推定しその位置をディスプレイ上に表示する。その表示から送り手・受け手ともに現在の指示位置を読み取る。ここで、送り手が伝達したい指示位置を**目標位置**  $r$ 、計算機が計測した指示位置を**計測位置**  $y$ 、表示から読み取った指示位置を**推定位置**  $x$ とする。本稿では送り手と受け手の推定位置に対する認識が同等であると仮定し、送り手のみに着目する。送り手は推定位置が目標位置に一致するまで指差し動作を継続的に調整する。

送り手をシステムの内部に組み込むことによって指差しインタフェースをフィードバック制御系とみなす。図3にそのブロック線図を示す。目標値が  $r$ 、システムの出力が  $y$ 、偏差が  $r - x$  に対応する。系は、送り手の運動系  $H_g$ 、計算機の計測処理  $H_s$ 、計算機の表示処理  $H_v$ 、送り手の視覚系  $H_p$  の4つのブロックで構成される。また、2.1節で述べた人間の動作の不正確さに起因する外乱  $d_g$  を  $H_g$  の直後に、計算機の計測誤差に起因する外乱  $d_s$  を  $H_s$  の直後に加えることで外乱をモデル化する。ここで、送り手(人間)は  $H_g$  でコントローラの役目を果たすと同時に  $H_p$  でフィードバックゲインを調整する役目も同時に果たしている。つまり、人間の運動特性と視覚認知特性の2つの性質をモデルに組み込んでいる。画像計測の性能は  $H_s$ 、

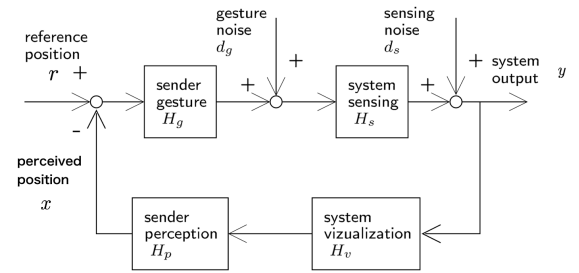


図3 計算機を介した指差し動作の制御モデル。各ブロックはそれぞれ、送り手のジェスチャ制御  $H_g$ 、計算機の計測処理  $H_s$ 、計算機による表示処理  $H_v$ 、送り手の視覚  $H_p$  に対応しており、外乱として送り手の動作の不正確さ  $d_g$ 、計算機の計測誤差  $d_s$  を想定している。

と  $d_s$  に、カーソルの表示方法の設計が  $H_v$  に反映される。

各ブロックの性質について、以下のように順に考える。 $H_s$  については、計測の時間遅れをむだ時間  $\tau_s$  とし、それ以外の入出力の変化は考えず、計測誤差は全て  $d_s$  に含める。 $H_v$  は、ディスプレイの表示遅延をむだ時間とし、外乱は考えない。カーソルの形によってゲインが変化するが、本稿においては点状のカーソルのみを考慮し、入出力間でゲインの変化はないものとする。

次に、 $H_g, H_s$  については以下の形を考える。

$$H_g(s) = e^{-\tau_g s} \frac{K_g}{T_g^2 s^2 + 2\zeta T_g s + 1} \quad (1)$$

$$H_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1} \quad (2)$$

$H_g(s)$  は Fitts の法則や我々の以前の研究との親和性から、二次遅れ要素とした。 $H_p(s)$  は、以上の  $H_s, H_v, H_g$  を用いた際にステップ応答に対する定常偏差を0にすることができるように、一次遅れ要素を用いた<sup>(注1)</sup>。

#### 3.2 外乱部

提案モデルにおける外乱  $d_s, d_g$  をモデル化し、3.節でモデル化した  $H_g, H_s, H_v, H_p$  と合わせることでシステムの動作予測が可能となる。二つの外乱の性質を確かめるため、磁気位置センサ (Polhemus LIBERTY) と画像センサ (Kinect) の両方を用いて指差し動作の計測を行った。磁気センサ、画像センサ、および指示対象の位置関係は事前にキャリブレーションを行なって求めている。磁気センサを用いた理由は、公称誤差が 0.76mm と小さいのでその特性を利用して計測値そのままを  $H_s$  の入力とみなすためである。これにより、 $d_g$  をユーザへの指差し指示値と磁気センサによる計測値の差、 $d_s$  を画像センサと磁気センサによる計測値の差でそれぞれ導出できる。

図4に磁気センサ、画像センサそれぞれの計測位置軌跡を示す。この結果から導出した  $d_g$  は標準偏差 0.3869[cm]、最大振幅 0.9637[cm] に対して  $d_s$  は標準偏差 3.240[cm]、最大振幅 6.145[cm] であった。 $d_g$  よりも  $d_s$  が指差し動作に大きな影響

(注1)：ただし、一次遅れ要素であることは十分条件であり、必要条件ではない。

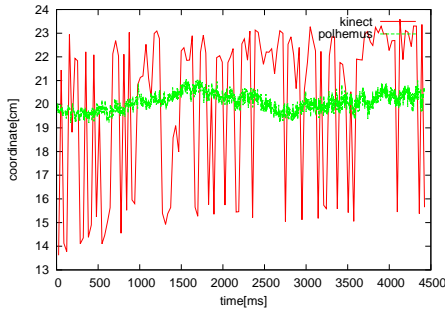


図4 画像センサ, 磁気センサそれぞれで静止状態を計測した計測位置の軌跡

を与えることが分かったため, 本稿では, 外乱  $d_s$  の性質についてのみ考える. 図4によると誤差の要因は主に2種類考えられる. すなわち, 計測条件が変化すること(環境の変化やユーザの姿勢のわずかな変化)による雑音とショット雑音のような定常過程である. 前者は発生頻度が低くステップ入力のような外乱がポアソン過程に似た過程で生成されるように, 後者はガウス雑音としてモデル化する.

### 3.3 予測した動作の評価尺度

提案モデルを用いると, 単純に目標位置が与えられた場合の系の振る舞いはステップ応答と考えることができ, 図5に示すような波形となる. これに人間の動作の不正確さや計測精度に起因する外乱 ( $d_g, d_s$ ) を加えれば, 実際のシステムに即した振る舞いを予測できることになる. また, 動作予測だけでなく, 周波数応答などから, 外乱に対する安定性, つまり人間のロバスト性を見積もることも可能になる.

このような考え方から, 動作予測の評価尺度は以下のようなステップ応答の特徴量だと考えられる.

**むだ時間  $\tau$**  応答が変化し始める時刻

**遅れ時間  $T_D$**  応答が初めて最終値の  $\frac{1}{2}$  となる時刻

**行き過ぎ量  $A_o$**  応答の最も大きい値

**行き過ぎ時間  $T_o$**  行き過ぎ量が生じる時刻

**許容範囲  $m$ , 整定時間  $T_s$**  応答が最終値から  $\pm m$  以内に収まる時刻

ここで,  $m$  は振動に対する収束の寛容性を示し, 目標位置と推定位置の差が  $m$  以下になったら指差し動作完了の条件を満たしたとする.  $m$  を指示対象の大きさ ( $W$ ) とすれば Fitts の法則における運動時間 ( $MT$ ) と本モデルの整定時間 ( $T_s$ ) が近い意味を持つと考えられる.

一巡伝達関数の周波数特性も重要な特徴となる. ボード線図などから, 外乱の特定の周波数成分に対するゲインや振動の起こりやすさなどを評価できる.

## 4. システム同定

### 4.1 同定対象システムの構成

具体的なシステムの同定を行うために図6に示すような構成で指差しインタフェースを実装した.

提示装置には横 110cm, 縦 61cm のディスプレイを用い, 動作計測のための Kinect センサをディスプレイ上部に設置した.

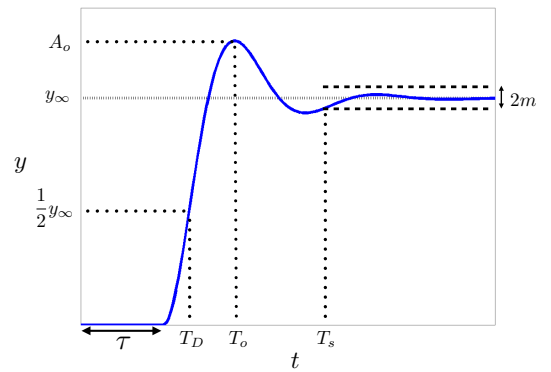


図5 提案モデルのステップ応答と各特微量の関係

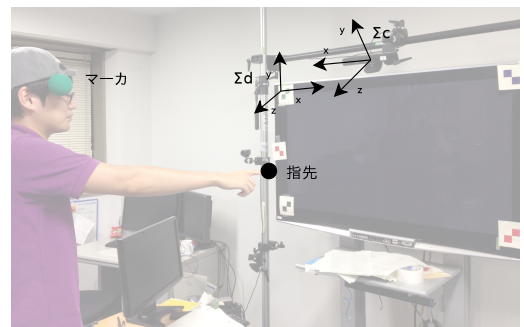


図6 計測環境の概要図

ユーザはディスプレイから約 2m 離れた地点に立って指示動作を行う. Kinect 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] 等を用いて求めた. 2.1 節で述べたように送り手の指差し方法として多様なものが考えられるが, 本稿では肘を伸ばした状態での指差し動作を対象とした. 井村ら [11] によれば, このような指差しであれば, 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. 以上の設定で, Kinect より得られる骨格モデルから指先位置を, 頭部に装着したマーカから目の位置を計測する. 目の位置と指先位置を結ぶ直線とディスプレイ平面の交点を計測位置とし, ディスプレイ上に直径 1.0cm の円カーソルとして表示する.

### 4.2 同定方法

同定は  $H_g, H_s, H_v, H_p$  における各パラメータについて行う. 計算機の処理機能を示す  $H_s, H_v$  に関しては計算機の性能・処理速度からパラメータを定める. 本稿では  $H_s, H_v$  とともにゲイン 1 の通過フィルタとしてモデル化しているため決定すべきパラメータはむだ時間のみである.  $H_s$  のむだ時間は計測機器のサンプリング周期とみなすことができるので, その値  $\tau_s$  を計測し  $H_s = e^{-\tau_s s}$  のように同定する. 同様にして  $H_v$  のむだ時間にはディスプレイの表示遅延  $\tau_v$  を用いる.

一方,  $H_g, H_p$  に関しては, まず系の安定条件からゲインを定めた上で残りのパラメータをステップ応答の最適化によって導出する. ここで  $r$  から  $y$  への閉ループ伝達関数を  $G_{yr}(s)$ ,  $d_s$  から  $y$  への閉ループ伝達関数を  $G_{yd}(s)$  とすると, 最終値公式によりステップ応答に対する収束値は

$$G_{yr}(0) = \frac{K_g}{1 + K_g K_p} \quad (3)$$

$$G_{yd}(0) = \frac{1}{1 + K_g K_p} \quad (4)$$

となる。系が安定となる条件は  $G_{yr}(0)=1$ 、かつ  $G_{yd}(0)$  が十分小さい値となることである。本稿ではこの条件を満たすようにゲイン  $K_g, K_p$  を経験的に与える。

これに続いて、上述の伝達関数から求まるステップ応答と実測のステップ応答との差が最小となるよう非線形最適化し、 $\tau_g, T_g, \zeta, T_p$  を求める。ステップ応答の計測は以下のように行った。ディスプレイ上の特定の場所に初期位置を表示し、被験者がその位置にカーソルを一致させている状態で計測を開始する。初期位置は事前告知なしに非表示となり、同じタイミングでディスプレイ横方向  $X$ cm 移動した位置に目標位置が表示されるので、被験者はその目標位置にカーソルが重なるように移動させる。被験者は指示動作完了を自身で判断しそれが申告された時点で計測を終了とする。計測には磁気センサを用いることで  $d_s = 0, \tau_s = 0$  とみなし、また 3.2 節の議論から、 $d_g = 0$  と近似する。これにより上記指差し実験の計測値を外乱なし・計測遅れなしのステップ応答として用いることができる。目標位置の移動量  $X$  には 17cm から 95cm のランダム値を用い、四人の被験者に対してそれぞれ 30 試行実施した。

#### 4.3 同定結果と考察

計測機器のサンプリング周期を測ったところ画像センサでは  $\tau_s = 33\text{ms}$ 、磁気センサでは  $\tau_s = 4\text{ms}$  であった。また計算機が映像信号を送信してからディスプレイに表示されるまでの時間を高速度カメラを用いて計測したところ約 60ms の遅延が観測されたため  $\tau_v = 60\text{ms}$  とした。 $H_g, H_p$  のゲインは  $K_g = 100, K_p = 0.99$  と定めた。この時  $G_{yd}(0) = 0.01$  となり、3.2 節で計測した  $d_s$  の最大振幅がステップ外乱として入力されても 0.06cm 程度に収束する。ディスプレイのサイズから目標値が数十 cm であるとすると、ステップ外乱は目標値の 1%未満に収束するため二つ目の安定条件を満たしている。

パラメータ最適化法には信頼領域法を用いた。システムの特徴は個人の身体性に強く依存することは当然ながら、予備調査により運動距離  $X$  によっても異なることが確認されている。そこでパラメータ推定に用いるデータを被験者毎に分けた場合、一定運動距離毎に分けた場合で同定結果を比較した。運動距離の区間は経験的に以下のように定めた。

- 距離 1 17cm 以上 35cm 未満
- 距離 2 35cm 以上 52cm 未満
- 距離 3 52cm 以上 69cm 未満
- 距離 4 69cm 以上

パラメータ最適化結果を表 1, 2 に示す。表 1 は距離 4 で個人毎に同定したパラメータを、表 2 に被験者 1 の全データで同定したパラメータと距離毎で同定したパラメータを示している。

被験者毎、運動距離毎どちらの場合も  $H_g$  のパラメータと比較して、 $T_p$  は数百分の一程度の値でしかない。この結果から  $H_p$  がシステムの振る舞いに与える影響は小さく、個人差や運動距離による変化が小さいと推測する。

表 1 被験者毎に同定したパラメータ比較

	$H_g$					$H_p$
	$T_g$	$\zeta$	$T_g^2$	$2\zeta T_g$	$\tau_g$	$T_p$
participant1	286.7	187.9	$8.222 \times 10^4$	$10.77 \times 10^4$	470.7	1.393
participant2	575.9	78.21	$3.317 \times 10^5$	$9.009 \times 10^4$	371.6	1.219
participant3	990.5	43.51	$9.8121 \times 10^5$	$8.621 \times 10^4$	379.5	1.699
participant4	165.0	275.8	$2.723 \times 10^4$	$9.106 \times 10^4$	395.0	2.429

表 2 運動距離毎に同定したパラメータ比較

	$H_g$					$H_p$
	$T_g$	$\zeta$	$T_g^2$	$2\zeta T_g$	$\tau_g$	$T_p$
all distance	302.7	169.6	$9.164 \times 10^4$	$10.27 \times 10^4$	445.0	6.368
distance1	1216	32.94	$1.480 \times 10^6$	$8.016 \times 10^4$	355.0	1.242
distance2	1220	39.70	$1.490 \times 10^6$	$9.692 \times 10^4$	441.1	2.277
distance3	1033	48.10	$1.068 \times 10^6$	$9.947 \times 10^4$	431.5	1.461
distance4	286.7	187.9	$8.220 \times 10^4$	$10.77 \times 10^4$	470.7	1.393

表 3 被験者毎に同定した結果のステップ応答特徴量

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
participant1	1012	1.034	2523	3171
participant2	827.0	1.029	2121	2547
participant3	823.0	1.054	1968	2679
participant4	852.0	1.039	2106	2721

$H_g$  に関しては表 1 や表 2 の各パラメータからシステムの振る舞いを直感的に把握するのは困難である。そこで 3.3 節で述べた各ステップ応答特徴量と照らし合わせて分析する。表 3, 表 4 にはそれぞれ表 1, 表 2 のパラメータにおいて目標値を 1 とした場合の各ステップ応答特徴量を示している。

表 3 に着目し、パラメータの個人差について検討する。被験者 2 から被験者 4 に着目すると、 $H_g$  の各パラメータは  $2\zeta T_g$  や  $\tau_g$  が類似した値をとり、他のパラメータは分散が大きい。ステップ応答特徴量の差が比較的小さい。このことから  $2\zeta T_g$  や  $\tau_g$  がシステムの振る舞いに対して支配的であると推測できる。一方被験者 1 とその他の被験者の結果を比較すると、表 3 の遅れ時間、行き過ぎ時間、整定時間の時刻に関する特徴量は被験者 1 と他の被験者として差が大きい。表 1 の  $H_g$  のパラメータにおいて  $2\zeta T_g$  と  $\tau_g$  の値が他の被験者と比べて大きい値を持つ事も確認できる。

以上の結果から送り手毎の個人差が存在し、 $H_g$  の分母の一次係数  $2\zeta T_g$  とむだ時間  $\tau_g$  に影響が強く現れている。 $2\zeta T_g$  や  $\tau_g$  と時刻に関する特徴量との間には正の相関が予測される。また、 $2\zeta T_g$  や  $\tau_g$  が近い値をもつ場合個人差が小さいとも考えられる。運動距離に関しても表 2 と表 4 から同様の傾向を確認できた。

## 5. システム評価

### 5.1 外乱を 0 とした場合の動作予測

提案モデルの性能を検証するために 4. 節で同定したシステムが実際の指差し動作をどれだけ正しく予測できるのかを評価



表 4 運動距離毎に同定した結果のステップ応答特徴量

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
all distance	961	1.037	2387	3059
distance1	776	1.067	1820	2538
distance2	941	1.061	2214	3106
distance3	941	1.042	2302	3023
distance4	1012	1.034	2523	3171

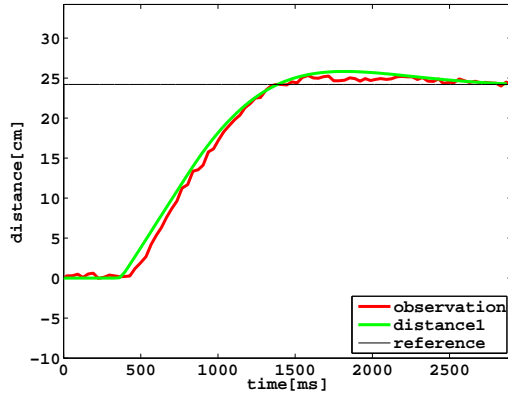


図 7 観測値とシミュレーション値との比較例 1

表 5 図 7 における各ステップ応答特徴量の比較

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
observation	838	25.32	1584	2225
distance1	792	25.83	1815	2292

表 6 図 8 における各ステップ応答特徴量の比較

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
observation	1054	60.57	2275	3462
distance1	957	61.30	2310	3191

する。この評価はシステムがシミュレートした値と磁気センサで計測した真値との差を 3.3 節で述べた尺度から分析することで行う。評価データには 4. 節で得たステップ応答を用いた。

まず外乱  $d_s = 0, d_g = 0$  とした場合の動作予測性能を評価する。被験者 1 について、磁気センサで計測したステップ応答と同定結果を用いたシミュレーションの比較の一例を図 7 に示す。観測値を赤線、シミュレーション値を緑線で示している。表 5 には各ステップ応答特徴量を示している。表 5 から遅れ時間、行き過ぎ量、整定時間の傾向が類似しているのに対して、行き過ぎ時間には差異が見受けられる。図 7 の観測値に着目すると、振幅の小さい振動が含まれたためシミュレーション値より早い行き過ぎ時間となったと考えられる。

別の例を図 8、及び表 6 に示す。この例では遅れ時間、行き過ぎ量、行き過ぎ時間の傾向が類似しているが、整定時間に差異がある。これは観測値 3000ms 付近で振動が生じたため許容範囲  $m$  内に収まるまでの時間がシミュレーション値と比較して遅くなったと推測する。

シミュレーション値と観測値の各特徴量の絶対差の平均と標準偏差を表 7 に示す。遅れ時間や行き過ぎ量と比較して、行き過ぎ時間と整定時間の分散が大きい。この要因を上述の二つの例と合わせて考察すると、前節まで 0 と近似していた小さな

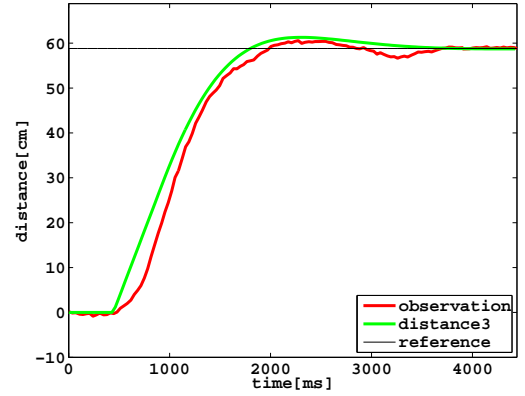


図 8 観測値とシミュレーション値との比較例 2

表 7 外乱を 0 とした場合の観測値とシミュレーションの各特徴量の絶対差の平均と標準偏差

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
average	53.2	0.9898	234.4	396.5
standard derivation	42.92	0.7278	173.9	303.7

$d_s, d_g$  に対しても、行き過ぎ時間や整定時間は敏感に反応したためと考える。この分散を小さくするためには  $d_s, d_g$  の影響を考慮した上で各特徴量を求める必要がある。

## 5.2 外乱下での動作予測

画像センサの計測誤差による外乱  $d_s$  が無視できない場合を考える。そのため、実験環境で生じる外乱をモデルから生成し磁気センサの計測に加えた場合とシミュレーション値を比較することで動作予測の性能を検証した。外乱  $d_s$  のモデルには 3.2 節で述べたように、ステップ外乱とガウス雑音を用いる。実験環境は 4. 節と同様である。

### 5.2.1 ステップ外乱を印可した場合

ステップ応答中にステップ外乱が印可されたときの動作を計測し、シミュレーション値との比較を行う。ステップ外乱は目標位置が表示されてから  $t$ ms 経過後磁気センサ出力に  $\delta$ cm を加える形で与える。 $t$  は 660ms から 1320ms,  $\delta$  は 2.7cm から 11cm の間でランダムに決定した。目標位置は距離 4 内のランダム値とし、被験者毎に 20 試行実施した。

図 9 にステップ外乱下での観測値とシミュレーション値との比較の一例を示す。赤線が観測値、緑線がシミュレーション値、青線が入力外乱、黒線が目標値である。表 8 には 20 試行分の各ステップ応答特徴量の観測値とシミュレーション値との絶対差の平均・標準偏差を示す。

この結果に関して表 7 と比較することで考察する。遅れ時間や整定時間は、外乱を考慮しない場合と同程度の分散であることが分かる。この結果はこれらの特徴量はステップ外乱を印可しても  $d_s$  やガウス雑音の影響しか受けないことを示唆している。一方行き過ぎ量・時間に関してはステップ外乱を加えた場合の方が分散が大きいが、図 9 の波形に着目すると最早二次遅れ系ステップ応答として近似できず、そのため行き過ぎ量・時間の物理的意味が薄い。

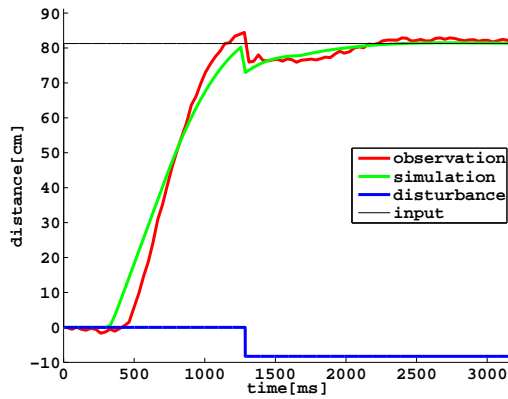


図9 ステップ外乱下での観測と提案モデルを用いたシミュレーションの比較例

表8 ステップ外乱下での各特微量の観測値とシミュレーションの絶対差の統計量

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
average	68.30	2.101	509.3	393.8
standard derivation	45.50	2.172	402.2	333.5

表9 ガウス雑音下での観測値とシミュレーションのステップ応答特微量の絶対差の統計量

	$T_D$	$A_o$	$T_o$	$T_s$
average	58.45	2.555	320.4	31.70
standard derivation	48.68	1.064	413.3	65.01

### 5.2.2 ガウス雑音を印可した場合

次に外乱として平均 2.5[cm]、標準偏差 0.5[cm] の正規分布に基づきフレーム毎に生じるガウス雑音を用いた。観測値とシミュレーション値のステップ応答比較の一例を図 10 に示す。赤線が観測値、緑線がシミュレーション値、青線が入力外乱、黒線が目標値である。20 試行分の各ステップ特微量の観測値とシミュレーション値の絶対差の平均・標準偏差を表 9 に示す。ただし、対象の幅  $W$  以上の振幅を持つ外乱を与えているため、整定時間を決める許容範囲  $m$  は  $W$  にガウス雑音の平均 2.5cm を加えた値とした。ステップ入力を加えた場合以上に行き過ぎ量・時間の物理的意味が薄いため、遅れ時間と整定時間に関してのみ表 7 や表 8 と比較しながら考察する。遅れ時間に関しては、ガウス雑音を加えた場合と表 7 や表 8 の場合とで同程度の分散である。この結果から、遅れ時間は外乱に対してロバストであると言える。整定時間に関しては、表 7 や表 8 と比較して分散が小さい。この結果は磁気センサの計測精度や  $d_s$  と比較して数倍大きい外乱が定期的に加わり、応答が許容範囲  $m$  以下に収まる時刻が計測終了直前となっただけで、整定時間の運動時間としての意味は薄いと考えられる。ガウス雑音のような定常外乱を入力する場合には、この外乱の影響を小さくするような処理を系の中に加えるか、運動時間を示す指標を新たに検討する必要がある。

### 5.3 外乱の影響を抑える工夫

外乱を考慮しない場合、ステップ外乱を加えた場合、ガウス雑音を加えた場合でそれぞれ動作予測を検証したが、運動時間

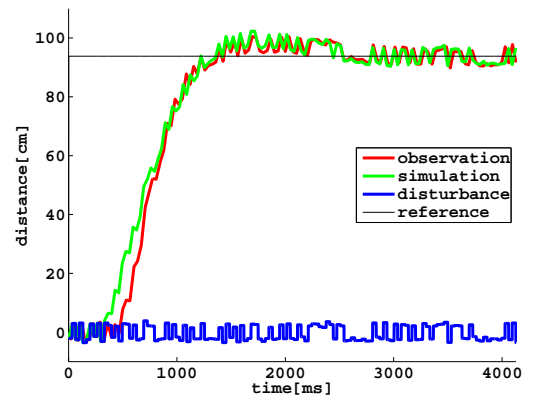


図10 ガウス雑音下での観測値と動作予測結果の比較

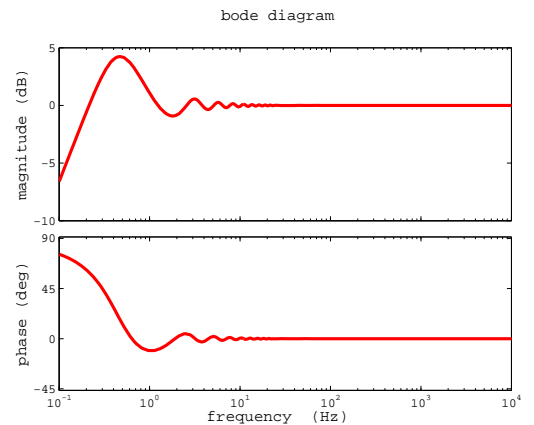


図11 提案モデルの外乱に対するボード線図

を安定して予測するには外乱の影響を抑える必要がある。その一つ的手段として、 $H_v$  に時間方向平滑化処理を組み込むことを挙げる。平滑化には、その程度を強くする程外乱の影響を小さくできるが、むだ時間の増加や反応速度の低下するといったトレードオフが存在する。このような平滑化の設計に提案モデルを活用できる。

許容範囲  $m$  は最低限の平滑化の指標となる、つまり、外乱による振動が  $m$  以下となるよう平滑化すればよい。また周波数応答からも平滑化の設計が可能である。図 11 に提案モデルの外乱に対するボード線図を示す。現在のモデルでは 1Hz 程度の低周波であってもゲインは 0dB で、振動が収束しないことを意味している。外乱の周波数を分析し、対応する周波数でゲインが 0 より小さくなるよう平滑化パラメータを設定すればよい。

## 6. おわりに

本稿では、人間と計算機を一つの系とした制御モデルを提案し、その同定法、及び同定結果を用いた動作予測の性能を検討した。システム同定の結果から、被験者毎の個人差や運動距離による振る舞いの変化は特に  $H_g$  に強い影響を与えることが分かった。モデルの予測性能に関しては、外乱下においても動作予測が可能であることが定性的に分かったが、その指標にはまだ検討が必要である。

今後はモデルに基づき  $H_v$  の平滑化要素を設計し、動作予測

の定量評価に取り組む予定である。

**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] 保澤圭亮, 吉本廣雅, 近藤一晃, 小泉敬寛, and 中村裕一. 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. In *HCG シンポジウム 2013*, pages 18-25, 松山市総合コミュニティセンター, Dec. 2013.
- [3] Masaaki Fukumoto, Yasuhito Suenaga, and Kenji Mase. "Finger-Pointer": Pointing interface by image processing. *Computers & Graphics*, 18(5):633-642, September 1994.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.