

指示動作を用いたポインティングインタフェースにおける 指差し動作特性の制御理論的分析

水野 元貴[†] 近藤 一晃^{††} 中村 裕一^{††}

[†] 京都大学大学院 工学研究科

[〒] 606-8501 京都府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 京都府京都市左京区吉田本町

E-mail: [†]{mizuno,kondo}@ccm.media.kyoto-u.ac.jp, ^{††}yuichi@media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 指差し動作を画像計測により計測し、指示位置にポインタを表示するポインティングインタフェースシステムの特性について報告する。我々は、より使いやすいポインティングインタフェースを設計することを目的に、制御理論を用いて系全体をモデル化することを提案した。本報告では指示方法の多様性に着目し、種々の指示方法がどのような特性を持つのかをモデル内の外乱項と伝達関数の同定を通して解析する。被験者実験を通して得られた結果およびその原因について議論し、その結果に基づいてユーザビリティを高める設計指針について検討を行う。

キーワード ポインティングインタフェース 画像計測 指示方法 制御モデル

Modeling pointing behaviors using control theory approach for vision-based remote pointing interface

Genki MIZUNO[†], Kazuaki KONDO^{††}, and Yuichi NAKAMURA^{††}

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

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

E-mail: [†]{mizuno,kondo}@ccm.media.kyoto-u.ac.jp, ^{††}yuichi@media.kyoto-u.ac.jp

Abstract Our research purpose is to construct an easy-to-use pointing interface that shows a pointer at an indicator's intended location using visual sensing result of his or her pointing posture. We had proposed modeling of a total system including the indicator based on the classical control theory to analyze it mathematically. In this paper, we analyze features of several pointing styles through estimating the noise term and the transfer functions in the control model. The experimental results are discussed with related to human's physical and cognitive characteristics, which gives us some guideline for improving the pointing interface.

Key words Pointing interface/Visual sensing of human behavior/Pointing styles/Control theory

1. はじめに

昨今における映像技術の発展を受けて、薄型かつ4K等の高精細かつ高解像度のディスプレイや、大型スクリーンへの画像投影などが普及しつつある。このような大型提示デバイスを用いてプレゼンテーションを行う場合、従来は支持棒やレーザーポインタ等の道具を用いることが一般的であった。本研究では、そういった場面において、指差しを主としたジェスチャにより直感的かつインタラクティブに、コンテンツを操作するようなポインティングインタフェースを想定している。ここで想定するポインティングインタフェースとは、カメラを用いた画像計

測により指示者の指差し姿勢・指示位置を推定し、その位置にポインタを提示する仕組みである(図1)。追加の道具を必要としないため多人数のユーザーが簡単に利用できることできる他、ジェスチャとポインタ提示方法の対応付けを場面や用途に応じて変更することで様々な指示形態を実現できるというメリットがある。

しかし、指示者の意図を正確に伝えられるような使いやすいインタフェースの設計は容易ではない。それには大きく2つの理由が存在する。1つ目は、カメラの分解能や光源環境、部分的な隠れ、計測速度等の問題から、指示者の姿勢を正確に計測することがまだまだ難しいという点である。磁気センサ等の高

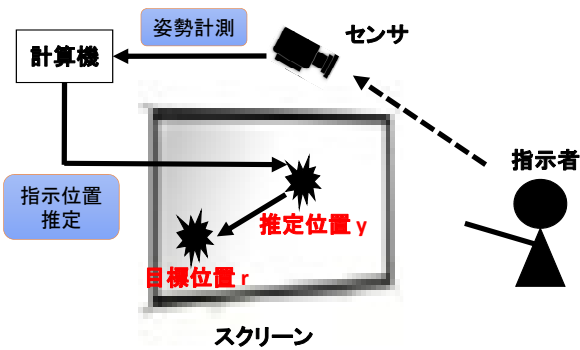


図 1: ポインティングインタフェースの模式図

精度計測デバイスを指示者に装着すればある程度これらの問題は解決されるが、自然なジェスチャを阻害する上に実用的でない。2つ目は、指示者の意図した指示位置と姿勢が必ずしも一致しないという点である。例えば、指先方向を延長した先に意図した指示位置があるとは限らないことが知られている。また、指示動作の途中では、指示していると思っている位置が実際の姿勢に対して先行しているような場合もある。このような原因から現状のポインティングインタフェースでは必ずしも意図通りの位置にポインタを表示できているわけではなく、人間が位置ずれを補正するように調整しながら指差しているのが現状である。

そこで本研究では、上記2つの原因がもたらす特性を数学的にモデル化し、その影響をできるだけ補正・緩和するようなインタフェースの設計を目指している。我々は、指示者とポインティングインタフェースとのインタラクションを制御理論に基づいてモデル化する手法を通して系の解析を進めてきた [1] [2] [3]。これらの先行研究では、指示位置推定に対する影響が大きいこと、個人差が大きいこと、から主に上記の2番目の理由である指示動作の曖昧さについて計測・分析を行ってきた。ただし、腕を伸ばして指差す・肘を曲げて指差すといった指示方法についてのみを対象としており、実際の利用場面における多様な指示方法は扱われていない。本報告ではより一般的な場面を想定したポインティングインタフェースの設計のために、従来の指差しを用いた2つの指示方法に、「顔向きで指示する」「肘先で指示する」方法を加えてその特性を計測・分析・比較する。

2. 関連研究

指差し状態における姿勢と指示位置の関係については古くから研究が行われてきた。福本らは体内に位置する基準点と指先を結んだ半直線上に指示位置が存在すること報告しており、腕を伸ばした状態では基準点は目に、肘を曲げた状態では基準点は肘関節にあることを示している [4]。Woodworthらは、ポインティング動作が、「まずは指示対象の方向へ動かす」という初期のフィードフォワード動作と、その後続く「速度を調整しながら指示対象まで正確に到達させる」という制御性を含んだフィードバック動作に分けられることを示した [5]。Elliottらは、初期位置から指示対象までを移動する際の動的な特性に注目し、指示に要する時間が指示対象の大きさと指示対象までの

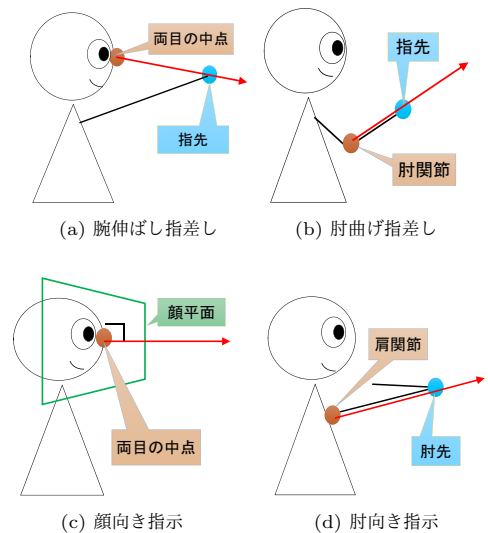


図 2: 本論で扱う4種の指示方法

距離に応じて変化することを発見した [6]。Fittsらはそれをさらに詳しく分析し、ポインティングに要する時間・指示対象の大きさ・指示対象までの距離の関係を数学的にモデル化した [7]。これは Fitts の法則と呼ばれており、人間工学に基づいてポインティングデバイスを評価する際の指標として広く用いられている。しかし、これら従来研究ではマウス操作などの直接に指示位置を与えるデバイスを想定しており、本研究で扱う「動作計測の不正確さ」「指差し姿勢の多様性・指示位置の曖昧さ」は考えられていない。また指示開始時と指示終了時との関係は示しているものの、その途中状態については扱われていない。このような問題に対して、本論では、多様な指示方法における動作特性を、ポインティング途中状態および終了状態を過渡と定常の状態で表すことのできる制御モデルを用いて分析する。さらに、その結果を利用することでより使いやすいポインティングインタフェースの設計を目指す。

3. ポインティングシステム

3.1 対象とする指示方法と指示位置推定モデル

本研究では、日常的・一般的な指示方法としてこれまで扱われてきた、(a) 腕を真っ直ぐにして指差す方法（腕伸ばし指差し）、(b) 肘を直角に曲げた状態で指差す方法（肘曲げ指差し）に、(c) 顔の向きで示す方法（顔向き指示）、および (d) 腕を折りたたんだ状態で肘先を用いて示す方法（肘向き指示）を加えた合計4種の指示方法について分析を行う（図2）。本稿で新たに扱う顔向き指示・肘向き指示は主に手が塞がっている場合の指示方法を想定している。例えば、模型製品を手にしながらかプレゼンする際に必要に応じてスクリーンを指し示したり、料理中に手が使えないときに顔向きや肘先を使ってモニタに表示されたレシピ等のコンテンツを操作するときなどが挙げられる。また、身体障害を持つ人のための指示方法としても有効と考えている。顔向き指示を分析することは、参加者の注意状態を合わせて取得できるという副次効果があり、コミュニケーションの円滑化に役立てることもできる。

表 1: 指示方法と基準点・端点の対応, および位置計測のためのセンサ取り付け位置

	腕伸ばし指差し	肘曲げ指差し	顔向き指示	肘向き指示
基準点 (センサ)	両目の中点 (左右の目頭)	肘関節 (肘先)	頭部中心 (左右の目頭)	肩関節 (肩先)
端点 (センサ)	指先 (人差し指先)	指先 (人差し指先)	両目の中点 (顎)	肘先 (肘先)

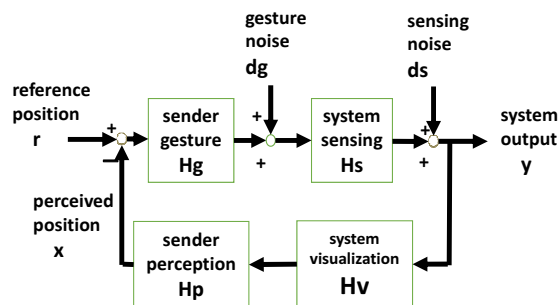


図 3: ポインティングシステムの制御モデル。\$H_g\$ は指差し動作特性, \$H_p\$ は視覚認知特性, \$H_s\$ はセンサ・計算機による指示位置推定, \$H_v\$ は画面表示特性を示す伝達関数である。また, \$d_g\$ は指差し姿勢の不正確さ, \$d_s\$ は指示位置の計測誤差を示し, それぞれ外乱として想定している。

指示者が意図する指示位置と実際の指示姿勢の関係は, これら 4 種の指示方法の間で同一ではない。すなわち指示姿勢から指示位置を推定するモデルを指示方法毎に個別に考える必要がある。ただし, 一般性を保持するため, 本研究では福本らの推定モデル [4] および実際に指し示した際の身体性を考慮して, 体内にある特定の基準点と指示方法で決まる身体端点を結んだ指示ベクトルの先に意図した指示位置があるという共通のモデルを用いる。指示方法と基準点および端点の位置の対応を表 1 に示す。顔向き指示についてのみ, 基準点である頭部中心の位置を直接計測するのは難しいため, 目頭位置と顎位置を用いて顔面法線を計測し, これを指示ベクトルの方向と見なしている。

3.2 ポインティングシステムのモデル化

ポインティングシステムの動きは以下のような一連の流れとして表すことができる。

- (1) 指示者が目標位置 \$r\$ (指し示したい位置) に向けて指差し動作を行う。
- (2) 計算機がその動作を計測して指示位置 \$y\$ を推定する。
- (3) 指示位置 \$y\$ に対応するスクリーンの位置にポインタを表示する。
- (4) 指示者は表示されたポインタを位置 \$x\$ にあると知覚する。
- (5) 知覚位置 \$x\$ と目標位置 \$r\$ が合致するまで手順 2-4 を繰り返す。

この流れは図 3 に示すような人間が制御対象およびコントローラの両方を兼ねたフィードバックループ系とみなすことができる。図 3 に示したブロック線図と上記流れとの対応付けは以下の通りである。

- \$H_g\$: 指差し動作特性 (1)

- \$H_s\$: 指示位置推定特性 (2)
- \$H_v\$: ポインタ表示特性 (3)
- \$H_p\$: 知覚特性 (4)
- \$d_g\$: 指差し姿勢の不正確さを表す外乱
- \$d_s\$: 指差し位置の計測誤差を表す外乱

これらのモデル要素は以下のように定式化される。まず \$H_g\$ は \$H_g(s) = e^{-\tau_g s} \frac{K_g}{T_g^2 s^2 + 2\zeta T_g s + 1}\$ のような二次遅れ系で近似されている。これはフィードバックのない状態で指差し動作を計測した予備実験に基づいて設定されたものである。\$\tau_g\$ は指示者が指差ししようとして意図してから実際に動作が開始されるまでにかかる無駄時間, \$T_g\$ は指差し動作の速さ, \$\zeta\$ は指差し動作の振動減衰係数に関するパラメータである。簡単化のため指差し姿勢の不正確さ \$d_g\$, 指示位置推定の後ろ側 (\$H_s\$ の出力側) に表れる形で扱い, それを含めて \$d_s\$ で表すものとする。すると指示位置推定 \$H_s\$ はセンシングおよび計測処理に起因する時間遅れ \$\tau_s\$ のみを持つ伝達関数 \$H_s(s) = e^{-\tau_s s}\$ でモデル化される。表示特性 \$H_v\$ も同様に, プロジェクターの表示遅延 \$\tau_v\$ を用いて \$H_v(s) = e^{-\tau_v s}\$ と定式化される。\$H_p\$ は人間の知覚特性を含んでいるため解析的な定式化は困難である。そこで十分な指差し時間が経過したときには指示推定位置 \$y\$ が目標位置 \$r\$ に等しくなる, すなわち \$y\$ についてのステップ応答の定常偏差が 0 になるような条件から \$H_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1}\$ なる一次遅れ系で近似されている。

上記のようなシステムのモデルに基づいてより使いやすいポインティング環境を構成しようとする場合, 設計対象は \$H_s\$ および \$H_v\$ となる。システムの挙動を記述するには残りの要素である \$H_g, H_p, d_s\$ を明らかにする必要がある。本稿では, 4 種の指示方法のそれぞれにおける \$H_g, H_p, d_s\$ を推定・分析することでこの要求に応え, さらにその結果に基づいて \$H_s\$ や \$H_v\$ の設計指針について検討する。

3.3 システム実装

本研究で用いたポインティングシステムの機器構成は以下のとおりである。指差し動作を計測するセンサにはカラー画像と深度画像を同時に記録できる Microsoft 社製のカメラ: Kinect for Windows v2 (以降, 単に Kinect と記す) を想定している。ただし, Kinect は非接触で計測できる反面, 人体部位の位置推定精度がそれほど高くはない。本研究では基礎分析の立場から装着型センサを用いた高精度計測を行うことにした (図 4)。この計測には公称誤差が 0.76mm で最大 240Hz で 3 次元位置を計測できる磁気モーションセンサ Polhemus LIBERTY (以降, 単に Polhemus と記す) を用いた。ポインタの表示には短焦点プロジェクタ RICOH PJ WX4141NI (以降, 単にプロジェクタと記す) を用い, 壁面に計算機上の画像スクリーンを投影する。投影サイズは 255cm×168cm, 投影分解能は 1280×800 pixel とした。

前述したモデル中のパラメータ \$\tau_s\$ は \$\tau_v\$ は計測機器・表示機器・計算処理時間で決まる。プロジェクタの表示遅延がおおよそ 18ms, Polhemus のサンプリング遅延がおおよそ 4ms であったのでこれに計算処理時間を加えることで \$\tau_v=18\text{ms}\$, \$\tau_s=12\text{ms}\$ と設定した。

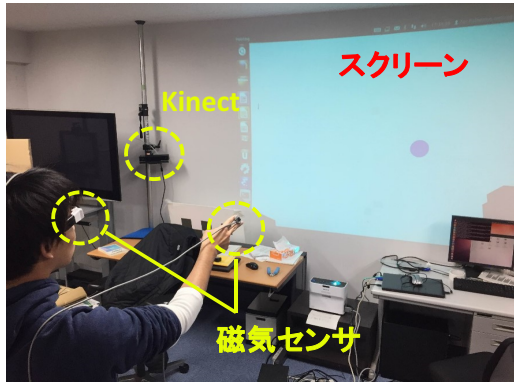


図 4: 実験環境

4. 外乱項 d_s の同定

外乱項 d_s は、視覚的なフィードバックのない条件下において、指示者が「指示対象を指している」とみなしているときの指示対象位置と指示推定位置との変位といえる。この状況を再現した被験者実験を行い、指示姿勢が十分に安定したときの変位を計測した。

実験の具体的な手順は以下の通りである。

- (1) 被験者はスクリーンからおよそ 2m 離れた位置に正面を向いて立つ。
- (2) 初期ターゲットを被験者の正面からやや右寄りに表示する。このとき被験者は指定された指示方法で初期ターゲットを指す。
- (3) 初期ターゲットを消すと同時に目標ターゲットを水平に 67.5cm 左に移動した位置に表示する。被験者は目標ターゲットを指すように指示動作を開始する。
- (4) 目標ターゲットの表示から十分に時間が経過し、指示姿勢が安定した状態（以後定常状態と呼ぶ）で被験者は指示完了を報告し、そのときの変位を記録する。

これを腕伸ばし指差し、肘曲げ指差し、肘向き指示、顔向き指示の 4 種の指示方法についてそれぞれ 20 回、3 名の右利きの被験者について繰り返し行った。指示動作における意図を固定するために、できるだけ素早く自然かつ正確に指示することを前もって被験者に伝えている。定常状態における指示推定位置は、指示動作完了の報告を受けた時刻からおよそ 2.5 秒間の平均位置とした。

結果と考察

三名の被験者についての実験結果を図 5 に、それらの分布の統計量を表 2 に示す。どの被験者・指示方法の結果も円もしくは楕円上の分布となっていることが確認されたため、平均値と分散の 2 つの観点から各指示方法を分析・比較する。

- (a) 腕伸ばし指差し 4 種の指示方法の中では平均・分散ともに最も小さい。指示者が指差し動作を行う際、自身の指先と目標ターゲットを視覚内で重ね合わせるように動作するため、推定モデルと実際の指示姿勢が一致しやすいからではないかと考えられる。
- (c) 顔向き指示 分散は腕伸ばし指差しに比べやや大きいもの

の、平均誤差はほぼ同等となった。腕伸ばし指差しと同様に、目標ターゲットが視野の中央に位置するように動作を行うために、実際の指示姿勢が推定モデルと一致しやすいからではないかと考えられる。

(b) 肘曲げ指差し 上記 2 種の指示方法に比べ大きな平均誤差・分散を持つ。後述の肘向き指示と比べると分散はやや小さな値を取るが、平均誤差については個人差が大きい。こうした結果となったのは、基準点が目の位置になく、また端点も視野に入りにくいことから、主に身体感覚によって姿勢を制御するからと考えられる。

(d) 肘向き指示 4 種の指示方法の中で最も大きな分散を持つ。こちらも肘曲げ指示と同様の原因によるものだと考えられる。

続いて上記の結果を受けて、外乱に対してどのような指針でポインティングインタフェースを設計すればよいのかについて検討する。

平均誤差は、その大小に関わらず、前もってその値を予測できれば、推定値から減ずることで補正することができる。ただし、平均誤差がどのような条件で変化するかについて詳しく調査しなければならない。例えば、個人差、指示者と指示対象の位置関係、指示対象自体の変化等が条件として考えられる。

分散は同条件における試行毎のばらつきを意味するため、上記のような方法で補正することは難しい。考えうる対応策の 1 つは H_v を工夫することである。本実験の結果ではスクリーン上で数十 cm ものばらつきが確認されるが、これはあくまで視覚的にフィードバックを与えない場合の結果である。実際の利用時にはポイントが表示されるため、定常状態における目標値からの誤差は本結果よりもずっと小さくなるはずである。そのため、動作の過渡状態における影響を抑えることが重要だと考えられる。例えばポイントの表示を大きくすることで視認性を向上させること、直近の過去のポイントの位置を同時に表示することで動作速度を予測させやすくすることなどが設計指針として挙げられる。

5. 指示動作特性 H_v および知覚特性 H_p の同定

指示動作特性 H_g および知覚特性 H_p は伝達関数の形で定義されているため、既知の入力に対する応答を計測・分析することで同定することができる。本実験では視覚的なフィードバックありの状態、すなわち制御モデル全体のステップ応答から H_v, H_p を同時に同定する。このときの外乱項 d_s には前節の実験結果を用いることもできるが、考察でも明らかなように分散が非常に大きいため正確性に欠ける。そこで、画像計測ではなく前節と同様に磁気センサを用いて正確に指示推定値を測ってその値を用いる。基本的な計測条件は前節と同様であるが、ポイントを表示することで手順が多少変化する。

- (1) 前節で述べた計測方法と同様に被験者を設定し初期ターゲットを表示する。
- (2) 被験者は指定された指示方法で、表示されたポイントが初期ターゲットに重なるように指す。
- (3) 目標ターゲットを前節と同様の設定位置に表示する。
- (4) 被験者は表示されたポイントが目標ターゲットに重なる

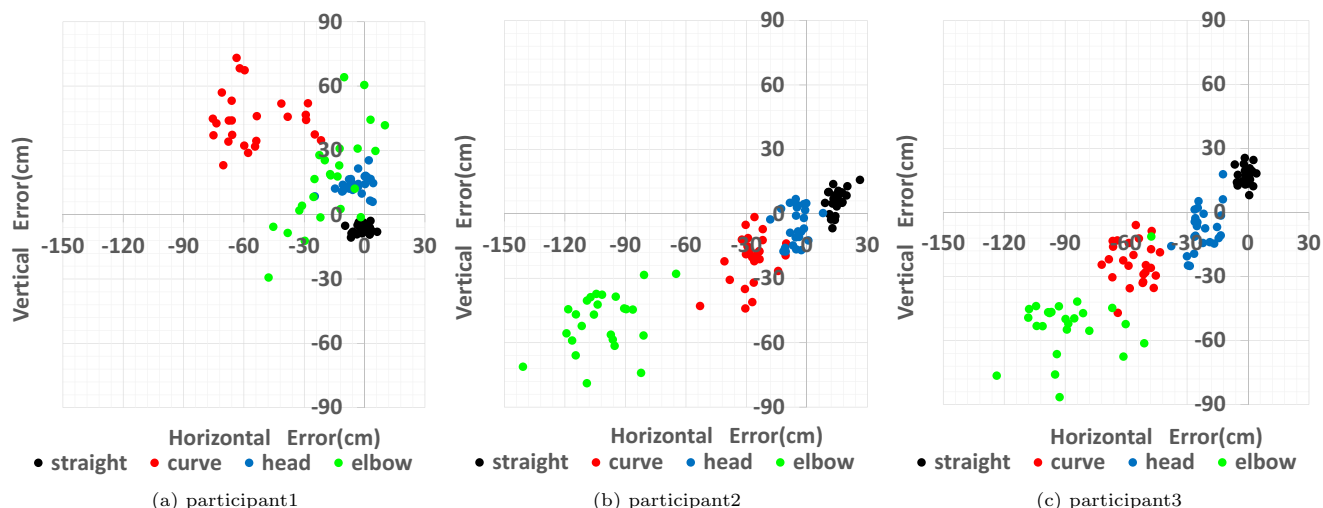


図 5: 計測された外乱項を被験者毎に示した結果. 黒点 straight が腕伸ばし指差し, 赤点 curve が肘曲げ指差し, 青点 head が顔向き指示, 緑点 elbow が肘向き指示のときの結果に対応する

表 2: 計測された外乱項の分布の統計量. x, y はそれぞれスクリーンの横方向・縦方向を示す.

	腕伸ばし指差し		肘曲げ指差し		顔向き指示		肘曲げ指示	
	x	y	x	y	x	y	x	y
participant1								
平均 (cm)	-0.8920	-6.8832	-55.025	44.470	-4.7302	14.037	-17.020	16.865
分散 (cm ²)	13.011	3.8178	282.71	149.71	45.408	18.071	223.93	470.47
participant2								
平均 (cm)	14.761	5.7653	-27.239	-21.063	-5.2389	-5.5268	-101.41	-50.105
分散 (cm ²)	12.700	31.242	75.541	122.82	26.252	67.983	246.67	173.42
participant3								
平均 (cm)	-0.8988	17.234	-56.191	-23.370	-22.552	-7.7907	-88.001	-52.919
分散 (cm ²)	6.8176	16.168	65.429	89.758	40.959	99.031	331.07	200.74

るように指示動作を行う.

被験者, 計測対象とした指示方法, 被験者への説明事項, などの実験条件は全て前節と同じである.

伝達関数の形はすでに定義されているため同定はパラメータ推定に帰着する. すなわちステップ応答を最も正しく表す $\tau_g, K_g, K_p, T_g, T_p, \zeta$ のそれぞれを決定することに相当する. 本研究では, ステップ応答の計測値とモデル予測値の差を評価関数とした最適化 (信頼度領域法) によってこれらの値を推定した. 初期値や範囲は経験的に与えた.

$$(K_g, T_g, \zeta, \tau_g, T_p) = \underset{t}{\operatorname{argmin}} \sum (\bar{y}_s(t) - y_s(t))^2 \quad (1)$$

\bar{y}_s, y_s はそれぞれステップ応答の計測値, 予測値を示す. ここで K_p が最適化対象として登場しないのはパラメータ間に制約条件が存在するからである. それは十分な時間が経過したあとには定常偏差が 0 となる条件で, $K_p = \frac{K_g - 1}{K_g}$ で表される.

全く同じ条件下でも人間の動作は毎回少しづつ異なるため, 同じ試行を何度も行った計測値を用いることでできるだけ一般的な特性を得る. ただし, すべての試行を用いて 1 つのパラメータセットを一度に推定しても十分に動作特徴を反映した結果にはならないことが分かっている. これは各施行の指示軌跡が平均化されてしまうためである. よって, 本研究では試行毎

に最適化を行い個別にパラメータ群を推定し, 最後に全試行で平均する手法を採用した. これにより軌跡ではなく伝達関数としての特徴が平均化され本研究の目的に適した推定値となる.

結果と考察

同定したパラメータを用いてステップ応答を予測した結果を図 6 に示す. 外乱項の場合と同様に, 4 種の指示方法についてそれぞれが持つ動作特性の違いについて比較する.

(a) 腕伸ばし指差し 他の 3 種の指示方法に比べ, 立ち上がり速度が小さい傾向にある. 肩から先の腕全体を動かす必要があるため, その分モーメントが増加していることが原因ではないかと考える. 目標値からの行き過ぎ量が小さくなっているのは端点である指先が視野の中央に入るため, 視覚に基づいて正確に制御できるからと考えられる.

(c) 顔向き指示 腕伸ばし指差しとは対照的に, 立ち上がり速度・行き過ぎ量ともに大きい. 頭部と腕全体とは重量がそれほど変わらないものの, 使用する筋力や動作時のモーメントの違いが表れていると考えられる. また顔向き指示では, 指示方向が直接的に制御されるため, 腕伸ばし指差しのように基準値から遠くにある指先位置を動かして間接的に指示方向を制御するよりも感度が非常に高い. そのため行き過ぎ量も大きいのではないかと考えられる.

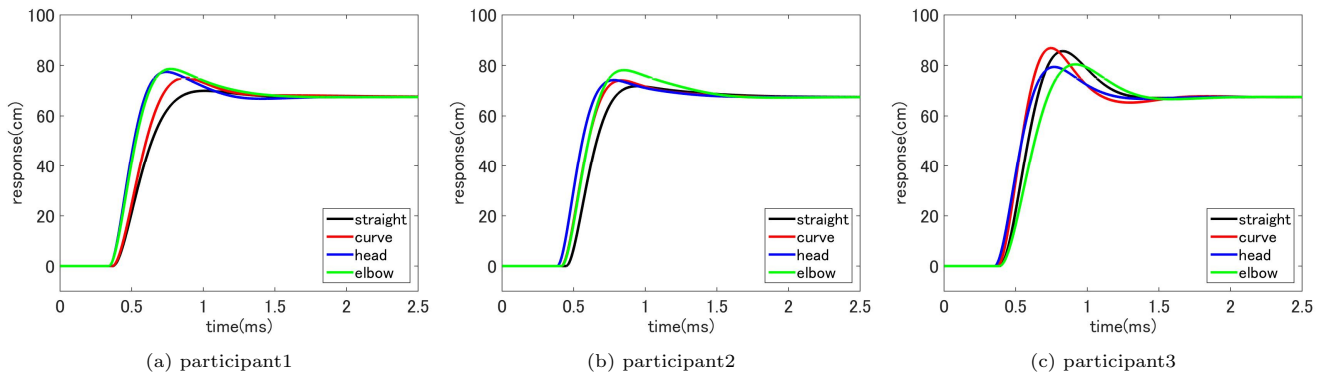


図 6: H_g , H_p の同定結果に基づいたステップ応答の予測。黒線 (straight) が腕伸ばし指差し, 赤線 (curve) が肘曲げ指差し, 青線 (head) が顔向き指示, 緑線 (elbow) が肘向き指示を表している

(b) 肘曲げ指差し 腕伸ばしに比べて動かす部位の重量やモーメントがほぼ半分となるため, その分立ち上がり速度が大きい。同時に行き過ぎ量も大きくなっている。外乱項の考察で述べたように, 端点である指先が視野外・視野の端に存在することが多いため, 視覚ではなく身体感覚に基づいて制御せざるを得ないことが原因ではないかと考えられる。

(d) 肘向き指示 やや行き過ぎ量が大きく見られるものの, 顔向きとほぼ同等の特性を持つ。しかし, その特性の原因は異なると思われる。原因としては, 腕を折りたたんだ状態で肘を動かすことはそもそも肉体的制約によって難しい上に, 普段行う動作とはかけ離れており慣れが他動作よりも必要となるといったことが考えられる。

ただし, これらの傾向はすべての被験者に対して当てはまるわけではなく一部例外が含まれている。一般的な特性を見出すにはさらに多くの被験者について調査を行うとともに, 被験者のどのような特性と関連づけるかを分析する必要がある。総合的にみると, 最も良い指示方法というものはなく, 主に立ち上がり速度と行き過ぎ量の間にトレードオフが存在することが分かった。実際の場面を想像すると, 指示者は場面・用途に応じて指示方向を選択するので, システムがどの指示方法なのか認識し, その方法が苦手とする部分を H_v によって補助することが考えられる。このとき指示動作の開始から終了まで同じ H_v を用いても上記トレードオフをうまく解消することは難しい。よって今後, 初動時と到達時で H_v を動的に変化させる仕組みを考えていく必要があるのではないかと考える。

6. おわりに

本研究では, より使いやすいポインティングシステムを制御理論に基づいて設計するための基礎調査として, 4種の指示方法におけるポインティングシステムの特性を分析した。

実際の指示動作の計測を行いその分析を行ったところ, 指示動作の外乱, 指示動作特性と指示方法の関係について多くの知見が得られた。また, 経験則との一致も確認され, 使いやすいポインティングシステムを構成していく上でのアイデアを見出すことができた。ただし, 結果の一般性は低いので, さらに被験者・実験試行数を増やす必要がある。

今後は本研究で得られた知見を基に, 実際に様々な指示方法に対応できる仕組みの導入, より使いやすいポインティングシステムのモデルの提案などを進めていきたい。本研究ではあまり重要視しなかった個人差や, スクリーン・指示対象と指示者の位置関係等についても, さらに調査を進める予定である。

文 献

- [1] 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インタフェース, HCG シンポジウム 2014.
- [2] Kondo, K., Nakamura, Y., Yasuzawa, K., Yoshimoto, H., and Koizumi, T. (2015). Human pointing modeling for improving visual pointing system design. In *In Proc. of Int. Symp. on Socially and Technically Symbiotic Systems (STSS) 2015*.
- [3] Kondo, K., Mizuno, G., and Nakamura, Y. (2016). Analysis of Human Pointing Behavior in Vision-based Pointing Interface System -difference of two typical pointing styles-. *HMS2016*.
- [4] Fukumoto, M., Suenaga, Y., and Mase, K. (1994). "Finger-Pointer": Pointing interface by image processing. *Computers & Graphics*, 18(5), 633-642.
- [5] R.S. Woodworth (1899), The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monograph Supplement*, 3(13), 1-119.
- [6] Elliott D, Helsen WF, and Chua R (2001). A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychological Bulletin*, 127(3), 342-357.
- [7] Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.