

# 指差しインタフェースにおけるポインタサイズが指示動作に与える影響

近藤 一晃<sup>†</sup> 水野 元貴<sup>†</sup> 中村 裕一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: †{kondo,mizuno,yuichi}@ccm.media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 指示インタフェースにおけるポインタの大きさはユーザーの振る舞いに大きな影響を与える。本論では、指差しジェスチャを用いた指示インタフェースにおいて、点ではなく円状のエリアポインタを表示したときの指示動作について調査・分析を行う。またそれら指示動作を制御理論に基づいてモデル化することを試みた。その結果、ポインタサイズがもたらす指示動作への影響は、非線形な視覚特性で表せることが確認された。

キーワード ポインティングインタフェース, 指示動作, ポインタサイズ, 制御モデル

## Analyzing effect of a large size pointer in a gesture-based pointing interface system

Kazuaki KONDO<sup>†</sup>, Genki MIZUNO<sup>†</sup>, and Yuichi NAKAMURA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

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

**Abstract** We analyze the influence of pointer size in pointing behaviors when using a gesture-based pointing interface. In this paper, pointing behaviors with a small pointer and a larger blurred pointer were compared through pointing experiments for a suddenly popping target and a stable one. We also try to describe the effect of the large pointer in pointing behavior with inducing a non-linear visual perception component into the conventional control model for a small pointer.

**Key words** Pointing interface, Pointing behavior, Pointer size, Control Theory

### 1. はじめに

大型スクリーンの普及を受けて、離れた場所からの直感的で簡単なポインティングインタフェースが望まれている。我々は指差しジェスチャを認識してポインタを提示するようなインタフェースをより使いやすくするための研究を続けてきた [1], [2]。このようなインタフェースが依然として使いづらいと感じられる理由は、指示姿勢と指示位置が正確には対応づかないことである。ユーザーが指していると考えている場所とは異なる位置にポインタが提示されてしまうため、聞き手の混乱を招いたり姿勢の調整を余儀なくされたりする。

この問題を解決する方法の1つとしてポインタサイズを大きくすることが挙げられる。例えばレーザーポインタを用いて指し示す場合、一点に照射するよりも円状に照射した方が指示しやすいことは経験上明らかである。これはターゲットからポインタ中心が多少ずれていても指示対象の識別にはほとんど影響がないからだと考えられる。ただし、ポインタの大きさによってはターゲットの近傍に位置する別のコンテンツとの区別が

かなくなる恐れがある。つまりポインタサイズを介して「指示の正確さ」と「指示に要する労力」がトレードオフの関係にある。このトレードオフに対する最適値を自動的に決めることができれば、使いやすいインタフェースを設計することができると思われる。

本稿ではポインタの大きさと指示に要する労力との関係に着目する。労力はユーザーの内部状態であるため直接計測することは難しいが、指示動作の違いとして定量的に捉えられる可能性が高い。そこで異なる大きさのポインタを用いたときの指示動作を計測することで、ポインタサイズの与える労力がどのような指示動作の特性として現れるのかについて分析を行う。加えて計測された指示動作を数理モデルで記述することを試みる。実際の指示動作は同一条件下であってもばらつきが大きいので計測値をそのまま知見とすることは難しい。それらに共通する要素を取り出した上で一般的な特性としてモデル化する必要がある。一連の指示行動はユーザーとインタフェース間のフィードバックループとして表現できることから、ポインタサイズを考慮した制御モデルで指示動作を記述しその性能を評価する。

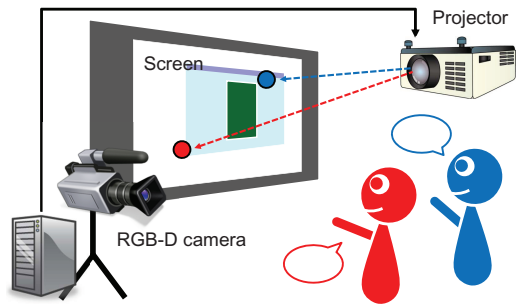


図1 本研究で想定するポインティングインタフェース

## 2. 関連研究

人間を系に含むようなシステムをうまく構成するためにはユーザーの挙動に基づいた設計が求められる。ポインティング行動については古くから研究が進められており、その草分け的な報告は Fitts らによる [3]。離れた位置をペンで押す・円盤を移動させる・ピンを移動させる、などのタスクを与えたときの、所要時間・移動量・移動先領域の大きさといったパラメータ間の関係を定式化したものである。Fitts の法則として知られているこのモデルは様々な条件下でその有効性が検証され、使いやすいインタフェースの設計に役立てられてきた。タッチパネルインタフェース [4], [5] やマウスによるカーソル操作 [6], [7] への応用はその典型例である。インタフェース設計に最もよく用いられてきた要素はターゲットの大きさである。ターゲットが大きいほど指示や選択を行いやすいため、カーソルの周囲を拡大して表示するなどの工夫がなされてきた [8]。

ポインタを大きくすることで同様の効果が得られると考えられる。Worden らはエリア状のポインタを提示するとともにターゲット付近では移動感度が下がるようなマウスインタフェースを高年齢者向けに考案している [9]。Ren らはペン先の圧力を使ってユーザーがポインタの大きさを制御できるようなデバイス提案した [10]。また Grossman らはポインタの周囲に存在するコンテンツの属性に基づいてポインタサイズを自動的に制御する仕組みを提案している [11]。これは我々が目指す使いやすいインタフェースの実装にかなり近いが、残念ながらマウスインタフェースを前提としておりジェスチャ指示における効果は明らかにされていない。

マウスやペンを使う場合とジェスチャで指示する場合の違いはなんだろうか。1つはデバイスが持つ特性である。マウスは力を抜くと止まるが、身体デバイスでは姿勢を維持するにも力を入れ続ける必要がある。もう1つはデバイスの状態と指示位置の対応付けである。マウスやペンでは一対一に対応付けることが可能だが、ジェスチャを用いた場合には全く同じ姿勢であっても指示していると感じている位置は指示の度に変動し一定しない。これらの違いがジェスチャに固有の特性をうまく取り込むことが必要な理由である。レーザーポインタを用いて指示する場合のユーザビリティについては報告されているものの、ターゲットに到達するまでの所要時間のみを評価しておりインタフェース設計の知見とするには不足している [12]。過去

に我々も円状のエリアポインタを用いることを提案しているが、その効果についてはほとんど明らかになっていない [13]。このような研究背景から本研究ではジェスチャを用いた指示におけるポインタサイズが与える影響について詳しく検証を行う。

## 3. ポインタサイズが与える指示動作への影響

### 3.1 ポインティングインタフェースの構成

本研究で想定するポインティングインタフェースは、ユーザー・画像計測に基づいた指示位置推定・ポインタ提示、などによって構成されている (図1)。目標位置へポインタを動かすときの、これら構成要素の動きは以下のように表すことができる。

(1) ユーザーが指示したい目標位置  $p_t$  を決定し、その位置を指すように姿勢を変化させる。

(2) カメラ等を用いてその姿勢を計測し、指示位置  $p_e$  を推定する。

(3) 指示位置  $p_e$  からポインタ提示位置  $p_v$  を導出しポインタの描画を行う。

(4) ユーザーは提示されたポインタを見ることでその位置を  $p_r$  として知覚する。

(5) 目標位置  $p_t$  と知覚位置  $p_r$  が一致したとみなされるまで (1)-(4) を繰り返す。

本稿ではポインタサイズが指示動作に与える影響を分析するため、ポインタ提示位置の工夫 (3) については取り扱わない。すなわち  $p_v = p_e$  とみなし、ポインタ描画のみに違いを設ける。比較するポインタは以下の2つである。どちらのポインタを用いる場合でも、まずコンテンツを提示した上でその後ポインタを重畳して描画する。

#### 点ポインタ

普段から用いられているような小さなポインタに対応する。半径  $r_t$  指示ターゲットとほぼ同等の大きさをもつ半径  $r_p > r_t$  の不透明な円を指示推定位置  $p_e$  を中心として描画する (図2(a))。

#### 円ポインタ

指示ターゲットを十分に覆い隠すことができる大きい半径  $r_c > r_p$  を持つ円を指示推定位置  $p_e$  を中心として描画する。このとき点ポインタとは異なり、中心から端に向かうにしたがって徐々に不透明度  $\alpha$  が下がるように描画を行う (図2(b))。円ポインタの端ではコンテンツがある程度透過して見えるような状態である。これは大きなポインタ領域を全て不透明に重畳描画するとコンテンツを著しく阻害するため却って指示しづらいつと考えたからである。指示位置  $p_e$  からの距離  $r$  に対する不透明度は  $\alpha(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma_c^2}}$  のように標準偏差  $\sigma_c$  を持つ正規分布に従うこととした。 $\sigma_c$  によって不透明度の変化を制御することができる。

### 3.2 異なるポインタサイズを用いたときの指示動作の比較

点ポインタ・円ポインタを用いたときの指示位置軌跡をそれぞれ計測してポインタサイズが指示動作に与える影響を分析する。実験環境は図3に示す通りである。指示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 RGB-D カメラ

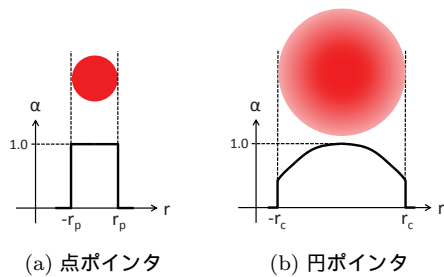


図 2 各ポインタにおける不透明度  $\alpha$  の分布 .

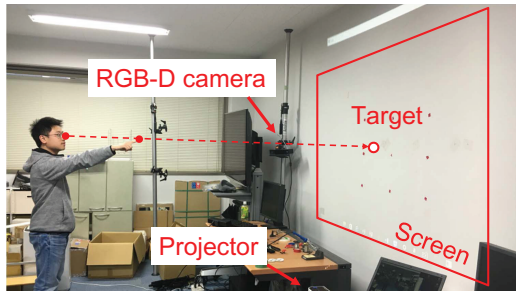


図 3 指示動作の計測環境 .

を想定している . しかし本研究は基礎分析の立ち場であるためユーザーへの侵襲性よりも計測精度を優先して装着型の 3 次元磁気モーションセンサ Polhemus LIBERTY を用いた . 磁気を受信機を被験者のこめかみと指先に装着してそれぞれの三次元位置を得た上で , こめかみ間中心と指先を結ぶ直線と壁面スクリーンが交差する位置を指示位置と推定する . このような推定方法が精度よく働くのは腕を真っ直ぐに伸ばした状態であることが知られており [14] , 被験者にもその姿勢で指示を行うよう伝えた . コンテツつおよびポインタは単焦点プロジェクタ RICOH PJ WX4141NI を通して壁面に提示される . スクリーン投影サイズはおよそ  $W250\text{cm} \times H170\text{cm}$  , 分解能は  $W1280 \times H800$  pixel である . ターゲットの半径は  $r_t = 2\text{cm}$  , ポインタ描画に用いたパラメータは  $r_p = 3\text{cm}$  ,  $r_c = 8\text{cm}$  ,  $\sigma_c = 5\text{cm}$  とした .

自由に指示させたときの動作よりも要素的な条件下における指示動作からの方が特性を見出しやすいと考え , 以下のような 2 つの指示タスクを設定した . 指示の成否に対する判断基準は , どのタスク・どのポインタ・どの外乱パターンであっても「ターゲットがポインタによって覆い隠されていればよく無理にそれらの中心を合わせる必要はない」とし , 被験者にはその旨を伝えた上で指示動作を行ってもらった .

#### 目標値追従タスク

初期位置から離れた新たな位置を指示目標として指す動作に対応する . 被験者は予め提示されている初期ターゲットにポインタを合わせてお p 区 . その後ランダムなタイミングで初期ターゲットが消失すると同時に新ターゲットが右方向におよそ  $80\text{cm}$  離れた位置に現れる . このときに被験者が新ターゲットを指し直す動作を計測する . 指示動作にはばらつきが含まれるため同じ条件で 10 回の試行を繰り返した .

#### 外乱修正動作

種々の要因によって生じる外乱を修正して元の位置にポインタ

を戻す動作に対応する . 目標値追従の場合と同様に , 初期ターゲットにポインタを合わせた状態からランダムなタイミングで外乱列を印可する . 被験者はそれを修正して初期ターゲット位置にポインタを戻すように指示を行う . 外乱を含んだポインタ位置は , 磁気センサを用いて正確に計測された指示位置に対して事前に生成した外乱信号を加えることで生成した . 外乱は既知であるため , その特性と計測された指示動作を照らし合わせて分析することが可能となる . 外乱には 0 を中心として高周波・低振幅で振動するような微小振動外乱 (外乱パターン 1) および徐々にターゲットから離れてしまうような累積外乱 (外乱パターン 2) を用いた . 前者は一樣独立同分布から , 後者はランダムウォーク列にローパスフィルタをかけることで生成している (具体的な波形については図 5 を参照) . ばらつきも含めた結果を計測するために外乱パターン毎に 10 回の試行を行った . なお印可外乱を予測してしまわないように , ダミー外乱や正負を逆転させた外乱などを含めて適宜ランダムな順に与える工夫を施した .

### 3.3 計測結果と分析

#### 3.3.1 目標値追従動作の特性

スクリーン上の指示位置の軌跡 (水平方向<sup>(注1)</sup>) を図 4 に示す . 被験者 A・B に共通して以下のような特性がみられる . まず点ポインタを用いた場合にはほぼ全ての試行において目標値に近い値に指示位置が収束している . ターゲットとほとんど同じ位置にポインタを合わせないとターゲットを覆い隠すことができないからである . それに対して円ポインタを用いたときには目標値から離れた位置にも収束値がばらついている . ポインタ中心がターゲット中心から多少離れていてもターゲットの全体を覆い隠すことができるのでそれ以上びったりと中心を合わせることはしていない . この結果から , 被験者に与えた指示の成否に関する判断基準が被験者内で確かに再現されていることが確かめられた . 実験を通して得られた知見の 1 つは , 円ポインタを用いると収束値 (目標値ではないことに注意) に対してオーバーシュートを起こす頻度が少なくなり , その大きさも小さくなることである . ポインタサイズによって目標値自体が変化しているのであれば収束値とオーバーシュートの関係は変わらないはずなので , 指差し動作開始時には円ポインタが与える影響はほとんどないと思われる . その後ポインタがターゲットに近づいたときに行き過ぎてしまいそうであれば , 無理に当初の目標値まで戻すことはせずやや奥の位置に目標値を置きなおす , という効果があると考えられる .

被験者 A と被験者 B の結果には立ち上がり速度の違いが確認できるが , これは点ポインタ・円ポインタに共通して同程度現れているためポインタサイズの影響ではない . 円ポインタが与える個人差として挙げられるのは収束値のばらつき幅である . これは「ターゲットがポインタで隠れている」とみなす基準が被験者によって異なっていたからだと思われる . すなわち中心から端に離れるにつれて透過率が上がるような円ポインタに対して , 被験者 A は多少ターゲット透けて見えてもポインタ内部

(注 1) : 本稿では簡単のために水平方向の特性のみについて議論する

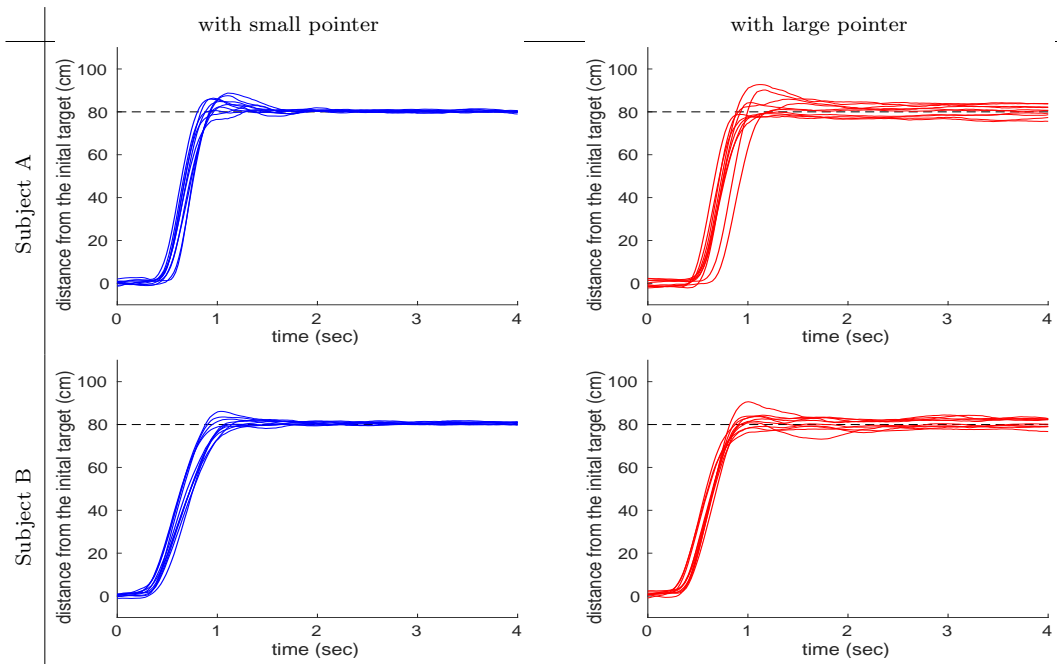


図 4 目標値追従動作の計測結果．横軸は時刻，縦軸は初期ターゲット位置を基準としたポインタ位置（水平方向）を示す．

に入っていれば覆い隠せていると判断しており，被験者 B はたとえターゲット全体がポインタ内部に入っても透けて見えている状態は覆い隠せていないと判断している．このように円ポインタが指示動作に与える影響について妥当な説明づけができるような計測結果を得た．

### 3.3.2 外乱修正動作の特性

外乱に対する修正動作を図 5 に示す．外乱が印可される前の制御量を示しているのが被験者がどのように外乱を修正しようとしているのかがそのまま表れている．まず微小振動外乱（外乱パターン 1）について見てみよう．点ポインタを用いたときには外乱によってターゲット位置からポインタが動いてしまうことを修正するような制御が何度も行われている．特に被験者 A の結果には制御量の大きな変化が頻繁に現れており，努力して外乱を修正しようとしているさまが窺える．ただし残念なことに制御量の大きさが外乱よりも大きくなりがちで，外乱を修正しようとして却ってポインタ提示位置が暴れる結果になっている．それに比べて被験者 B はやや修正頻度が少なく制御量も小さい．被験者 B からは「外乱パターン 1（のような高周波ノイズ）を頑張って修正しようとしても暴れてしまってもうまいかない．半分あきらめながらポインタ位置を合わせていた」というコメントを得ており，どうやら高周波成分をフィルタしてしまっていたと思われる．点ポインタできちんと指示するためには大きな労力を要することが再確認された．その一方で円ポインタを用いた場合は被験者 A・B とともに制御量の絶対量・変化量ともに非常に小さくなっている．つまり小さな外乱によるポインタの振動は円ポインタの特性で吸収できることが確認できた．以前として残っている制御量の微小な変化は，意図した外乱修正というよりも姿勢を完全に保持することができずどうしても揺らいでしまう様子が計測されたものだと思う．

続いて累積外乱（外乱パターン 2）を与えたときのポインタ間の違いを分析する．点ポインタを用いた場合には外乱に対して滑らかに追従もしくは小さな修正を何度も行っていることがわかる．ポインタがターゲットから少しずれただけでも覆い隠すことが難しくなるので外乱に対して感度の高い調整が行われるのであろう．これとは対照的に円ポインタを用いた場合には大きな修正を少数回行っている．すなわちポインタ中心がターゲット中心から多少ずれることは許容できるがあまりに離れると修正がかかる．興味深いのはターゲットがぎりぎり隠れるようにポインタ位置を調整するのではなく，十分に隠れるように余裕を以って大きく調整している様子が階段状の制御量変化からみてとれることである．おそらく常に修正を行うのは労力を伴うため，無意識的に修正する回数や時間を少なくしようとしているのだろう．なお被験者 A に比べて被験者 B の指示動作は修正の頻度が多く一度の制御量も小さい．目標値追従の項で述べたように被験者 B はターゲットが覆い隠せているという判断に対する基準が厳しくポインタ・ターゲット間の位置ずれに敏感なため，その特性が点ポインタ利用時に近い挙動として表れているのだと考える．以上の結果からポインタの大きさは総じて外乱に対する感度のような形で効果を持つことが確認された．

## 4. ポインタサイズを考慮した制御モデル

### 4.1 基礎モデル

計測実験の結果から得られた指示動作特性を再現できるような数理モデルの構築を試みる．円ポインタが持つ特性を導入するに先だって，まず点ポインタの特性を再現できることが確かめられている従来モデルについて述べる [1]．2.1 節冒頭で述べた一連の指示の流れは 4 つの伝達関数によって構成されたフィードバックループとしてモデル化することができる (図 6) ．



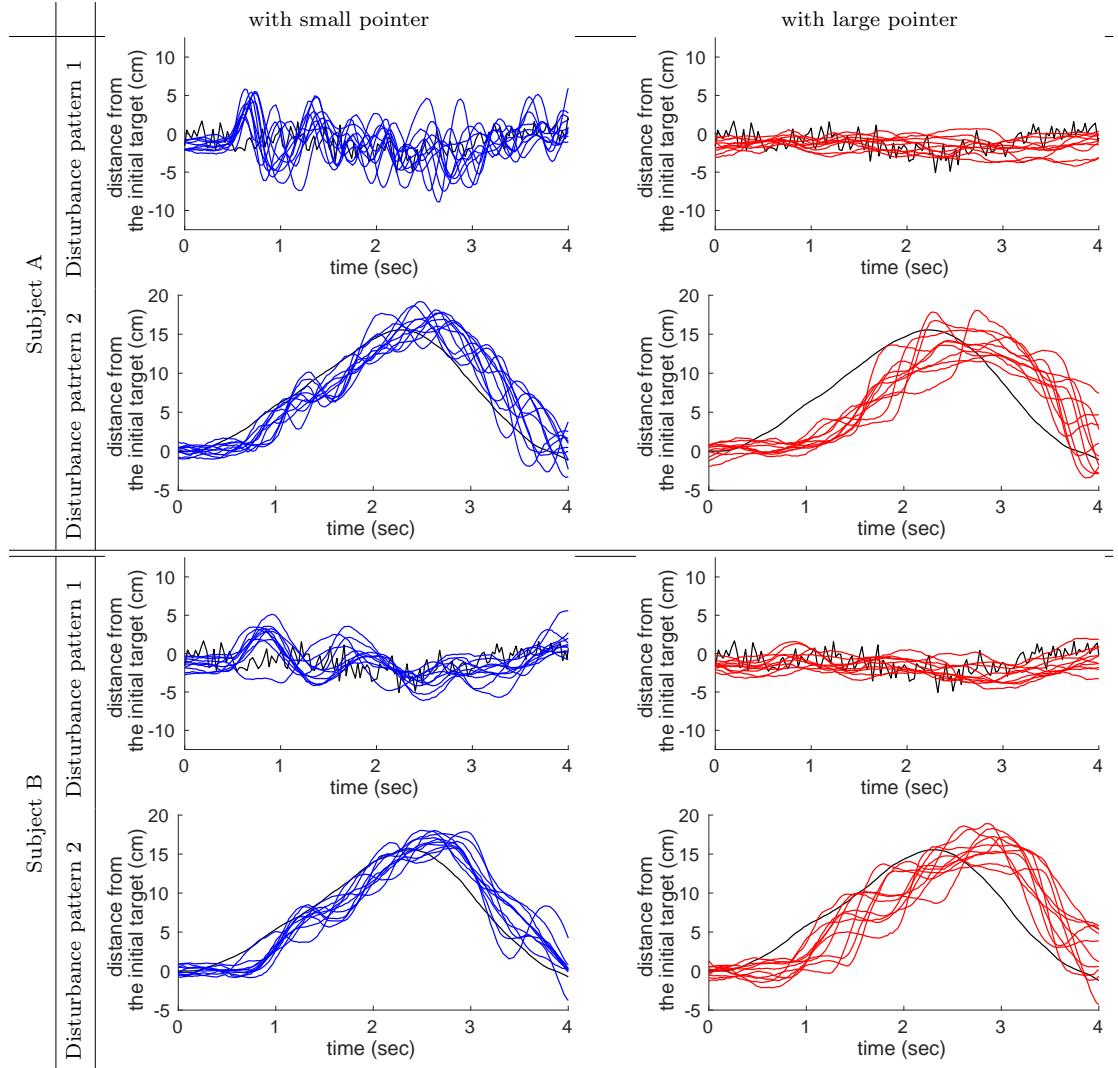


図5 外乱修正動作の計測結果（黒）と与えた外乱信号（赤、青）外乱を修正する動作を示す制御量．外乱信号に近いほどポインタ提示位置が初期ターゲットに近いことを意味する．

$H_g, H_p, H_s, H_v$  の伝達関数それぞれは人間の指示ダイナミクス・ポインタ位置の知覚特性・インタフェースによる指示位置の推定・ポインタ提示位置の導出を意味している．モデル化の詳細に関しては文献 [1] を参照して頂くとして，ここでは概要についてのみ説明する． $H_s$  の出力を制御量  $p_s$  とみなすと目標値  $p_t$  および外乱  $d_s$  からの伝達関数  $G_{st}, G_{sd}$  は

$$G_{st}(s) = \frac{H_g(s)H_s(s)}{1 + H_g(s)H_s(s)H_v(s)H_p(s)} \quad (1)$$

$$G_{sd}(s) = -\frac{H_g(s)H_s(s)H_v(s)H_p(s)}{1 + H_g(s)H_s(s)H_v(s)H_p(s)} \quad (2)$$

と表すことができる．単純に考えれば入力  $p_t, d_s$  と伝達関数の積を足した

$$p_s(s) = p_t(s)G_{st}(s) + d_s(s)G_{sd}(s) \quad (3)$$

を以って制御量  $p_s$  を表すことになるが，目標値と外乱に対する人間の指示特性は明らかに異なる．そこで共通の伝達関数の形を持つ異なるパラメータで構成される2つの制御ループが同時に働いているとみなし

$$p_s(s) = p_t(s)G_{st}(s)|_{\phi=\phi^T} + d_s(s)G_{sd}(s)|_{\phi=\phi^D} \quad (4)$$

なる定式化で制御量  $p_s$  を表す． $\phi^T$  および  $\phi^D$  は，それぞれ目標値追従，外乱修正を個別に扱った場合の伝達関数パラメータ群を示す．このような点ポインタを想定した制御モデル化をブロック線図を用いて示すと図7のようになる．

#### 4.2 非線形視覚特性の導入

計測結果の分析から，ユーザーはターゲット・ポインタ間の距離を実際よりも短く感じており，それが目標値から多少離れた位置に収束したり小さな外乱は無視するような挙動として現れるのだとみなす．実距離  $D_{act}$  とそれをユーザーが認識する主観距離  $D_{sub}$  の関係を考えて場合，点ポインタによる視覚特性が  $D_{sub} = D_{act}$  のように表せられるのに対し，円ポインタによる視覚特性は  $D_{sub} < D_{act}$  を満たす非線形関数を用いて表すことができると考えた．本稿ではその例として以下のような非線形視覚特性（以降，Non-linear Visual Perception: NVCと表記する）を想定する．

不感領域を持つ視覚特性 (NVC1)

一定の閾値距離  $D_{th1}$  までは全く距離を感じず，それを越えた

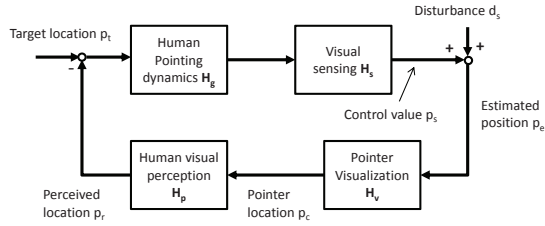


図 6 一連の指示動作をモデル化したフィードバックループ

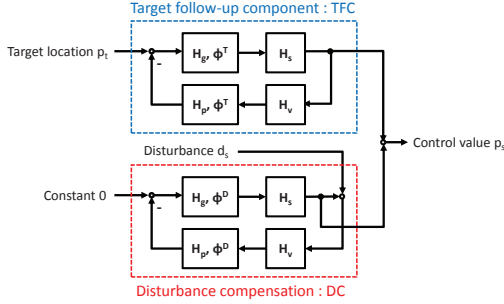


図 7 目標値追従要素と外乱修正要素の連結による指示動作制御モデル

場合には閾値を差し引いた値に感じるような不感領域を持つ視覚特性を考える．これを定式化すると

$$D_{sub} = \begin{cases} 0 & D_{act} \leq D_{th1} \\ D_{act} - D_{th1} & D_{act} > D_{th1} \end{cases} \quad (5)$$

のようになる．本稿では，透過率も考慮した上で円ポイントがターゲットを完全に覆い隠せるような閾値距離  $D_{th1} = 4cm$  を用いる（図 8(マゼンタ)）．

滑らかに実距離に近づく視覚特性 (NVC2,3)

不感領域を持つ NVC1 は閾値付近で極端に不連続な例である．そこで実際の人間が持つと思われるより滑らかな視覚特性を表現するために

$$D_{sub} = D_{act}(1 - e^{-k|D_{act}|^p}) \quad (6)$$

なる定式化を次に考える．これは近距離において 0 に，遠距離において  $D_{act}$  に漸近するような概形を持つとともにその間を滑らかに繋ぐ．0 への漸近は NVC1 で考えた不感領域を連続関数として近似したもので， $D_{act}$  への漸近はターゲット・ポイント間が遠いときには円ポイントであろうと点として扱うユーザー心理（3.3.1 節の結果）に対応している． $k, p > 0$  はそれら両漸近の度合いと中距離における挙動を決めるパラメータである．本稿では 2 名の被験者が持つ動作特性の違いを表現することを目的に 2 種のパラメータ設定  $k = 0.06, p = 1.2$ (NVC2) および  $k = 0.018, p = 1.5$ (NVC3) を用いる（図 8(赤・青)）．どちらの設定も NVC1 で設定した一定バイアスによる距離短縮  $D_{sub} = D_{act} - D_{th2,th3}$  を下回らないように関数の概形を確認しながら手で定めたものである．NVC2 ではターゲットを覆い隠す基準がやや厳しい被験者 B の特性を表すために閾値距離  $D_{th2} = 4cm$  を，NVC3 では円ポイント内部にターゲットが入っていればよいと判断した被験者 A の特性を表すために閾値距離  $D_{th3} = r_p - r_t = 6cm$  を用いた．

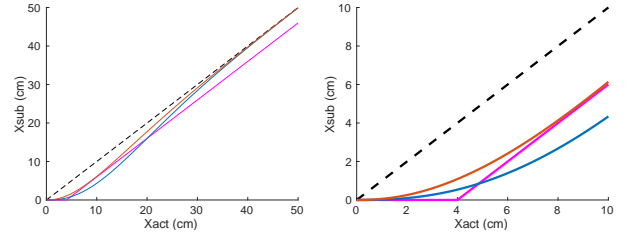


図 8 視覚特性の図示．(左) 遠距離を含めた俯瞰図．(右) 近距離付近の拡大図．(黒破線) 通常の視覚特性．(マゼンタ・赤・青実線) 本稿で提案する非線形視覚特性:NVC1・NVC2・NVC3．

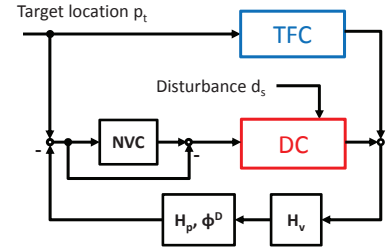


図 9 非線形視覚特性を導入した円ポイント用改良制御モデル．図中 NVC ブロックが  $D_{act}$  から  $D_{sub}$  への変換を行う．ブロック TFC,DC については図 7 を参照．

続いてこれら非線形視覚特性を制御モデルに組み込む方法を考える．計測結果の分析によると円ポイントによる指示動作への影響は，ターゲットからやや離れた位置への収束・収束値に対するオーバーシュート量の減少・微小外乱の無視（低感度）・累積外乱に対する複数回の修正，などであった．提案手法ではこれらの特性をできるだけ単純で少ないモデル改変で実現する．具体的には実距離と主観距離の差を補正値とみなし，それを従来モデル内の外乱修正要素によって応答させるような新たなモデルを構成する（図 9）．これによりターゲット位置に対して円ポイント特性に応じた補正が加わった場所に向かってポイントを合わせに行くようになると期待される．

## 5. シミュレーションによるモデル評価

### 5.1 目標値追従動作

非線形視覚特性を導入した提案モデルを用いて指示動作をシミュレートし，その値を計測した実際の動作軌跡と比較することで提案モデルを評価する．シミュレーションには MATLAB Simulink を用いた．まず目標値追従動作について評価を行うために，目標値  $p_t = 80cm$ ，外乱  $d_s = 0$  を用いてシミュレートを行った．ターゲットの手前で止まる・ターゲットから多少行き過ぎた位置に収束するといった試行のばらつきは目標値追従要素における減衰係数  $\zeta^T$  の値によって再現した．その他のモデルパラメータの値は表 1 に示す通りである．図 10 に  $\zeta^T = 0.6, 1.0, 1.2$  を用いた場合のシミュレート結果を示す．いずれの非線形視覚特性を用いた場合でも，オーバーシュートを生じる状況 ( $\zeta^T = 0.6$ ) では，ターゲット位置から行き過ぎてしまうが当初目標値の  $80cm$  まで大きく戻すのではなくやや遠い許容位置に収束する挙動，およびオーバーシュートの大きさ

が減る傾向が再現できている。 $\zeta^T = 1.0, 1.2$  を用いた動作シミュレーション結果には  $1.0sec$  付近に変曲点が見られ、目標値手前でブレーキがかかるような特徴が表れている。しかし、その後目標値手前の位置に収束するのではなく行き過ぎてしまう結果となった。時刻によって変化する補正值に対してフィードバック特性が強い外乱修正要素で応答させるようにモデル化したことが原因と考えられる。フィードバック時の応答遅れも相まって、目指す補正值と制御量がイタチごっこをするような関係に陥り、緩やかに発散する状態になってしまっている。実際の指示行動におけるユーザー心理を踏まえると指示動作収束後は姿勢を維持する感覚に近い。そのためフィードバック要素を用いた「動き」による補正ではなくポインタ位置をその場にとどめる「動かさない」速度制御を導入する方が良いモデルとなると考えられる。NVC1 を用いたシミュレート結果の  $0.5sec$  付近に負方向のテイクバックが表れている理由はやや複雑である。上記理由に加えて、遠距離においても固定値の距離バイアスがかかっていること(図8参照)、目標値追従タスクにおいて外乱修正要素が動作するまでのむだ時間が考慮されていないこと、などが追加の要因として挙げられる。

## 5.2 外乱修正動作

外乱修正動作をシミュレートするために目標値  $p_t = 0cm$  とした上で外乱  $d_s$  に計測実験で用いた2つの外乱パターンを入力した。目標値追従動作とは異なりばらつきを  $\zeta^T$  の値で再現することは難しかったため、ここではシミュレーション結果の代表例(図11)を用いて計測値との比較を行う。シミュレートに用いたモデルパラメータは表1に示す通りである。微小振動外乱(外乱パターン1)を与えたときをみると、NVC1 を用いた場合は外乱の振幅が小さく不感領域内にほぼ収まってしまいうためポインタ位置の修正はほとんど行われないう様子が再現できている。NVC2 や NVC3 を用いた場合は主観距離が0になってしまうことはないため、外乱パターン1のような振幅の小さな外乱に対しても常時いくらかの補正值(修正目標値)が発生し少量の調整が入る。また図8における近距離に対する視覚特性に対応するように NVC2 を用いた方がやや大きな修正制御がかかっていることも確認できる。

累積外乱(外乱パターン2)に対しても順にみると、NVC1 を用いた場合には大きな修正が2回に分けて行われている様子が表れており、3.3節で述べた実際の指示動作特性をうまく表現できている。一方、NVC2 や NVC3 を用いた場合には追従性能の高い制御が行われているため、小さな修正を何度も行うような特性とは食い違っている。この結果から実際の視覚特性は図8に示したような滑らかな曲線ではなく大きな変曲点を持つような形であると推察できる。もしくは視覚特性は滑らかだが、それがそのまま制御に現れるのではなく距離に応じて調整する/しないの二値のような判断を行った上で制御をかけているのかもしれない。このように大枠ではうまく指示動作の特徴を捉えたモデルを構成できていることが確認できた。また個人差を含めた実際の指示動作を精度よく再現するには視覚特性の曲線をうまく設定しなければならないこともわかった。

ただし1つ注意したいのは図11に示したシミュレーション

結果は外乱修正要素のフィードバックゲインを  $K_g^D K_p^D = 100$  に設定したときのものであり、目標値追従動作の再現に用いた  $K_g^D K_p^D = 20$  とは大きく値が異なる点である。当初は外乱修正の制御モデルにおいても同じパラメータ値を用いてシミュレーション・解析を行ったが、外乱に対する制御量が圧倒的に小さく実際の指示動作をうまく再現できなかった。そこで実動作に沿った挙動を示すパラメータを探したところフィードバックゲイン  $K_g^D K_p^D$  を大きくすることが最も効果的だということが分かった。目標値追従と外乱修正で適切な再現パラメータ値が異なる理由は、フィードフォワード制御とフィードバック制御が全体の挙動に対して占める割合の違いと考えられる。すなわち人間本来の動作特性としては高いゲインを有しているものの、目標値追従を行うようなフィードフォワード性の強い動作時にはほとんど働かず、逆に外乱修正時にはその性能がそのまま発揮されているのではないだろうか。Woodworthらによると初期位置から目標位置までを移動する一連の指差し動作では、初期はフィードフォワード制御、その後はフィードバック制御を行うことが報告されており[15]、それが本実験でも同様に確認されたといえる。現状の制御モデルでは目標値追従要素と外乱修正要素の出力を単純に1:1で足しあわせることで最終出力としているが、この重みが状況や時刻によって変化するようなモデルに拡張すればより正確に実動作を再現できると考えている。

## 6. おわりに

本稿ではジェスチャを用いた指示インタフェースにおけるポインタサイズの影響について、指示動作の計測実験を通して分析を行った。ポインタサイズの違いは、ターゲットからやや離れた位置への収束・収束値に対するオーバーシュート量の減少・微小外乱の無視(低感度)・累積外乱に対する複数回の修正、などの指示動作の特徴として現れることが確認された。また非線形な視覚特性を導入することで、ポインタサイズを考慮した制御モデルの構築を行った。ただし、計測値の特性と合致しない部分も見られるためモデルには改善の余地が残されている。

ポインタサイズが指示動作に及ぼすこれらの特徴は労力と結びついた少数のパラメータで表現しないうことでインタフェース設計に役立つ知見になると考えられる。残されたもう一方の課題であるポインタサイズと指示の正確さについては、先行研究[11]の結果を参考にしながら近傍コンテンツの特徴やユーザーの意図も含めた形で検討していきたい。最終的にはそれらを統合したインタフェースの設計・評価を行う計画である。

### 参考文献

- [1] K. Kazuaki, M. Genki, and N. Yuichi, "A hybrid feedback control model for a gesture-based pointing interface system," In Proc. of International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications, pp.●●-●●, 2017.
- [2] 水野元貴, 近藤一晃, 中村裕一, "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;" 電子情報通信学会:HCGシンポジウム2016, pp.407-412, 2016.
- [3] P.M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," Journal of Experimental Psychology, vol.47, no.6, pp.381-391, 1954.
- [4] 黒川隆夫, "タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント

表 1 シミュレーションに用いたモデルパラメータ値．それぞれの値が持つ意味や妥当さについては先行研究 [1] を参照されたい．

Task	$K_g^T$	$T_g^T$	$\zeta^T$	$\tau_g^T$	$K_p^T$	$T_p^T$	$K_g^D K_p^D$	$T_g^D$	$\zeta^D$	$\tau_g^D$	$T_p^D$	$\tau_s$	$\tau_v$
Target follow-up	1.06	150ms	0.6,1.0,1.2	430ms	0.05	0.001ms	20	400ms	8.0	160ms	17ms	18ms	12ms
Disturbance compensation	-	-	-	-	-	-	100	400ms	8.0	160ms	17ms	18ms	12ms

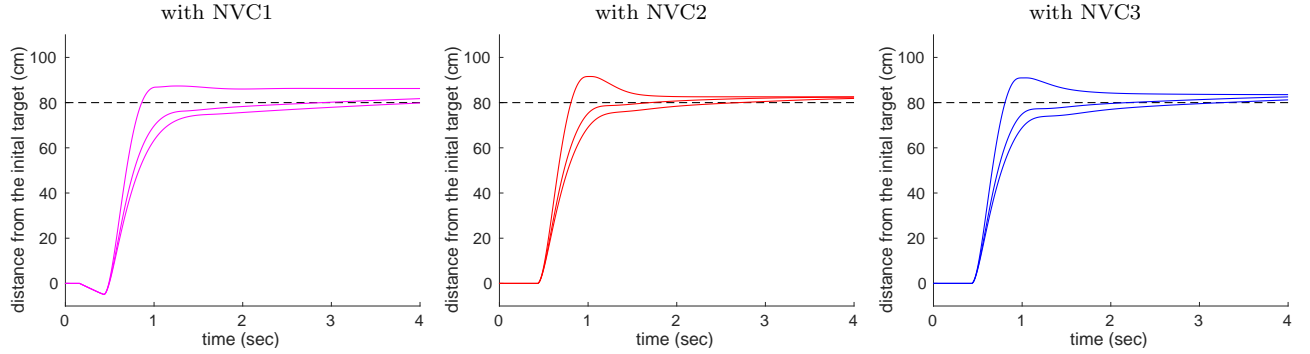


図 10 提案モデルを用いて目標値追従動作をシミュレートした結果．0.5sec 付近の立ち上がり勾配が大きい順に  $\zeta^T = 0.6, 1.0, 1.2$  を用いたときの結果に対応する．

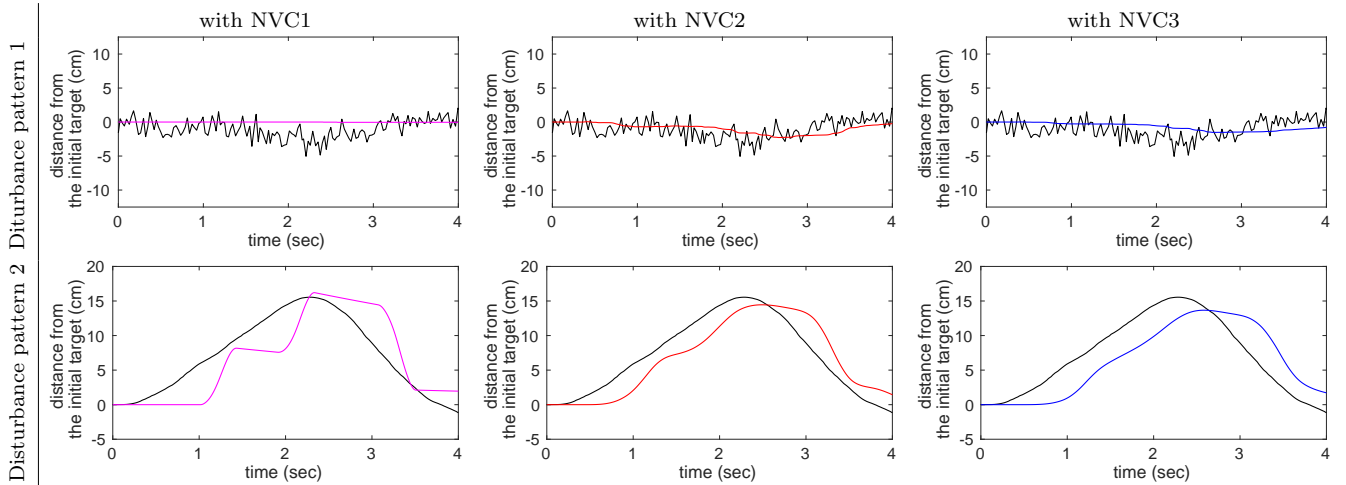


図 11 提案モデルを用いて外乱修正動作をシミュレートした結果．黒線は印可外乱を，マゼンタ・赤・青で示された軌跡は外乱を修正しようとする出力制御量を示す．

特性およびそれに対する fits の法則の適合性” ヒューマン・インタフェース研究論文集 Vol. 5, pp.5-12, 1996 .

[5] 岩瀬弘和, 村田厚生, “3次元空間での移動を要するポインティング作業への fits の法則の拡張モデル” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.85, no.11, pp.1336-1346, 2002 .

[6] I.S. MacKenzie and W. Buxton, “Extending fits’ law to two-dimensional tasks,” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.219-226, CHI ’92, 1992.

[7] S. Aranovskiy, R. Ushirobira, D. Efimov, and G. Casiez, “Modeling pointing tasks in mouse-based human-computer interactions,” 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), pp.6595-6600, 2016.

[8] L. Findlater, A. Jansen, K. Shinohara, M. Dixon, P. Kamb, J. Rakita, and J.O. Wobbrock, “Enhanced area cursors: Reducing fine pointing demands for people with motor impairments,” Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.153-162, UIST ’10, 2010.

[9] A. Worden, N. Walker, K. Bharat, and S. Hudson, “Making computers easier for older adults to use: area cursors and sticky icons,” Proceedings of the ACM SIGCHI Conference

on Human factors in computing systems, pp.266-271, 1997.

[10] X. Ren, J. Yin, S. Zhao, and Y. Li, “The adaptive hybrid cursor: A pressure-based target selection technique for pen-based user interfaces,” 11th IFIP TC 13 International Conference, pp.310-323, 2007.

[11] T. Grossman and R. Balakrishnan, “The bubble cursor: enhancing target acquisition by dynamic resizing of the cursor’s activation area,” In Proc. of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp.281-290, 2005.

[12] 田中医史, 秋藤俊介, 徳田圭世, 矢島敬士, “大画面を対象としたレーザポインティングシステムのユーザビリティ評価” 情報処理学会全国大会講演論文集, vol.50, pp.153-154, 1995 .

[13] 保澤圭亮, 吉本廣雅, 近藤一晃, 小泉敬寛, 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” 電子情報通信学会 MVE 研究会技術研究報告, vol.113, no.227, pp.59-64, 2013 .

[14] M. Fukumoto, Y. Suenaga, and K. Mase, “Finger-Pointer”: Pointing interface by image processing,” Computers & Graphics, vol.18, no.5, pp.633-642, Sept. 1994 .

[15] R.S.Woodworth, “The accuracy of voluntary movement,” Psychological Review Monograph Supplement, vol.3, no.13, pp.1-119, 1899.