

ハンドジェスチャを用いた2次元 GUI 操作時の操作特性に関する研究 —若年者のポインティング操作における Fitts の法則の適用に関する考察—

森山 雄大*¹, 西口 宏美*², 辛島 光彦*³

A Study on Characteristics of the Two-dimensional GUI Operation by Hand Gesture -Application of Fitts' Law to the young subjects' pointing operation-

by

Yudai MORIYAMA*¹, Hiromi NISHIGUCHI*² and Mitsuhiko KARASHIMA*³

(received on Mar. 30, 2015 & accepted on Jul. 14, 2015)

あらまし

近年、ハンドジェスチャを用いた2次元GUIの操作が、新たな操作方法として提案されている。従来のマウスによる2次元GUIのポインティング操作については、操作に要する時間が距離に比例しターゲットサイズに反比例するという特性が、実空間の人間の動作特性を表したFittsの法則を修正したモデルに適合することが明らかにされている。しかしながら、ジェスチャによる操作については、その操作特性は十分に検討されていない。本研究では、ジェスチャによる2次元GUI操作時の特性について、若年者のポインティング操作に着目し、Fittsの法則への適用に関する検討と、操作中の速度波形に基づく考察を行った結果を報告する。

Abstract

Conventional two-dimensional GUI is operated on a touch-screen of tablet PC or via the PC mouse. Recently the hand gesture in three-dimensional space has been proposed as a new method of two-dimensional GUI operation. The characteristics of the mouse operation have been examined and Fitts' Law was expanded as a model for the mouse operation. However it has not been examined whether the expanded Fitts' Law for the two-dimensional GUI could be applied to the operation by hand gesture.

This study focused on examining whether the expanded Fitts' Law could be applied to the pointing operation by hand gesture of the young.

キーワード: ハンドジェスチャ, GUI 操作, ポインティング操作, フィッツの法則, 速度波形

Keywords: Hand Gesture, GUI Operation, Pointing Operation, Fitts' Law, Velocity Profile

1. はじめに

近年、身振り手振りに代表される3次元空間におけるハンドジェスチャ（以下ジェスチャ）を用いた2次元 GUI (Graphical User Interface) の操作が、新たな操作方法として提案されている。ジェスチャによる操作は、身体的な動きを伴うため直感的な操作ができることや、デバイスを持たずに離れた位置からの操作が可能であるため大画面ディスプレイとの相性が良いことなどが利点として挙げられる。このことから、従来のマウスやタッチパネルなどのデバイス

を使用することが困難な高齢者や障がい者向けの操作方法としてはもちろん、様々な分野への応用が期待されている。

従来の GUI 操作については、PC (Personal Computer) などの2次元 GUI を操作する際の代表的な操作方法として、マウスやタッチパネルによる操作が普及している。

マウスによる操作については、カーソルをターゲットに移動させクリックする操作（ポインティング操作）に要する時間が距離に比例しターゲットのサイズに反比例するという特性が、実空間の人間の動作特性を表した Fitts の法則¹⁾ を修正したモデルに適合することが明らかにされている (Mackenzie (1992))²⁾。また、マウスと同様に、近年ではタッチパネルを用いた GUI 操作の操作特性についても多くの知見が得られており、Fitts の法則について、より高い精度のモデルを構築しようとする研究が盛んに行われてきた^{3) -6)}。

ジェスチャによる操作については、大画面環境における2次元 GUI 上のアイテムを選択するための選択手法に関する研究⁷⁾ や3次元空間上の手全体や体を使った複雑な入力手法をユーザに伝えるための研究⁸⁾、

*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程
Graduate School of Information and
Telecommunication Engineering, Course of
Information and Telecommunication Engineering,
Master's Program

*2 情報通信学部経営システム工学科 准教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Management Systems
Engineering, Associate Professor

*3 情報通信学部経営システム工学科 教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Management Systems
Engineering, Professor

ジェスチャデータベースの作成を目的としたものをはじめとするジェスチャそのものやその認識手法に関する研究^{9)~15)}が多くみられる。その一方で、ジェスチャによる2次元 GUI 操作時の操作特性については、未だ十分な検討がなされておらず、2次元 GUI の操作の基本であるポインティング操作について、マウスやタッチパネルによる操作に対して行われているような Fitts の法則への適用についても高齢者、障がい者のみならず健常若年者に対しても検討されていない。

そこで本研究では、まず健常若年者を対象としたポインティング操作に着目し、ジェスチャによる2次元 GUI 操作時の特性が、通常のマウスやタッチパネルによる操作と同様に Fitts の法則に適用できるか否かを検討した結果を報告する。

2. 関連研究

2.1 ポインティング操作

従来のポインティング操作に適用される Fitts の法則⁴⁾は、実空間における人間のポインティング動作特性をモデル化したもので、目標までの移動に要する時間 (MT ; Movement Time) は、ターゲットサイズ W と移動距離 D で表される困難度指標 (ID ; Index of Difficulty) に依存するという法則である。GUI の登場以降、より精度の高いモデルを構築しようとする研究が盛んに続けられている。Mackenzie らによる Fitts の法則の2次元ポインティング操作への拡張に関する研究では、Fig.1 に示すようなターゲットサイズ W と移動距離 d のとき、ポインティング操作に要する困難度 ID は式 (1) のように示される。このとき実験により導き出される定数 a , b を用いて、移動時間 MT は式 (2) のように示される²⁾。

$$\text{困難度} \quad ID = \log_2 \left(\frac{d}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

$$\text{移動時間} \quad MT = a + bID \quad (2)$$

また、ポインティング操作中の運動特性を分析する研究も古くからなされており、ポインティング操作中の速度変化は、計画時間と調整時間の2つに分けられることが知られている。計画時間では、視覚フィードバック情報を利用しないフィードフォワード制御が行われ、調整時間では、視覚フィードバックループによって、手の速度を調整しながら目標地点まで正確に動かそうとする制御が行われる¹⁶⁾。さらに、その速度波形中のピーク速度がこの二つの運動の境界になり得ること、ターゲットの形状によって速度波形の特徴量に変化することが明らかにされている¹⁷⁾。

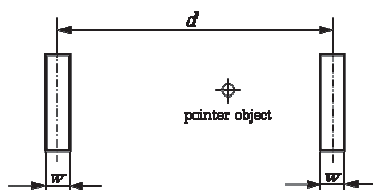


Fig.1 Fitts' law paradigm.

2.2 上肢作業を構成する人間の動作とその特性

ポインティング操作やドラッグ操作を含む人間の手や腕を用いた上肢作業については、動作分析の視点からも多くの研究がなされている。

上肢動作は、「移動動作 (Movement Activity: 目的の場所まで腕や手を伸ばす動作)」と「終局動作 (Terminate Activity: 目的のものをつかむ・置く動作)」で構成される¹⁸⁾。GUI 画面上におけるポインティング操作については、たとえば、マウスなどのデバイスを手で保持し、カーソルをアイコンなどのターゲットに移動させ、クリックする操作が上肢動作の1つと言える。

人間の上肢作業を「移動動作」と「終局動作」の二相に分離した研究として、中沢らは、人間の把握特性を実験的に検討し、移動軌跡の経時的变化をもとに作成した速度波形から「大きなピークを持つ波形 (移動動作に相当)」と「小さなピークを持つ波形 (終局動作に相当)」の二相と判断することができる¹⁹⁾。

また、宮代は鉄筆を移動させて目標に接触させる作業において、鉄筆の上端の加速度を求め、比較的目標が大きい場合には加速度の減速ピーク時を二相の境界指標として用いることができると報告している。また、目標のサイズが小さくなると、作業終了時に「微調整動作」が加わり、速度波形も異なると報告している²⁰⁾。

さらに、築谷らは、前述の3次元空間上における直接上肢を用いた移動および位置決め動作における知見について、マウスによるポインティング操作についても同様のことが言えると報告している。画面上のポインタの軌跡が同じく二つの動作相によって構成されると指摘している²¹⁾。

2.3 ISO 9241-411 (旧 ISO9241-9)

国際標準化機構による非キーボードの入力装置の要求事項および推奨事項についての規定でありポインティングデバイスの評価などに利用される。当該規格を基礎とし、技術的内容及び規格票の様式を変更することなく翻訳された規格に JIS Z 8519 がある。附属書にあたる Annex A~D には入力装置の試験に用いる方法についての情報が記載されている²²⁾。特に Annex B には前述の Fitts の法則に基づいた試験について記載があるため、本研究における実験課題構築の参考とした。

2.4 ジェスチャによる入力方式

ジェスチャによる GUI 操作においては、GUI 上のアイテムの選択などマウスの左クリックに相当する選択操作を新たに定義する必要がある。ジェスチャによる代表的な選択手法として、ポインタを一定時間静止する「ウェイティング」、ターゲットをポインタで横切る「シングルクロッシング」、短時間に同じターゲットを2回クロッシングする「ダブルクロッシング」が挙げられる。中村らは大画面環境におけるハンドジェスチャによるポインティングの操作手法について、

これら3つの選択手法について、選択時間や誤選択率を測定した評価実験を通して検討を行った。その結果から、大画面アプリケーションの作成においては、ダブルクリックは有効な手法であるが、操作の正確さを必要とする場合は、ウェイティングを使用するのが適していることが示唆された³⁾。

本研究においては、ジェスチャによる2次元 GUI の基本的な操作の特性を明らかにするという目的から、実験課題に対して一定の正確さを必要とするため、ウェイティング法による実験システムの実装を行った。

3. 実験方法

3.1 実験概要

若年者のポインティング操作について、移動時間 MT とターゲットサイズ W と移動距離 D に基づく困難度 ID の関係が Fitts の法則に適用できるか否かを検討することを目的として実験を行った。また、それにより得られた結果が実験の課題等に依存するものではないことを確認するため、併せてマウスによる同一課題の実験を行った。前半をジェスチャによるポインティング操作実験、後半をマウスによるポインティング操作実験とした。

3.2 被験者

日頃から PC 操作に慣れている利き手が右手の健康若年者12名（20歳～24歳、男性7名・女性5名）を被験者とした。なお被験者に対しては、当該実験の趣旨ならびに実験で取得した各種データについて統計的処理した上で個人が特定できない形で使用することなどを実験前に説明し、倫理的配慮にも留意した。なお、東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の審査を受け、承認された（承認番号13046）。

3.3 実験装置

用いた実験機材は以下の通りである。

- ・大型ディスプレイ（58inch, 1920px×1080px, Panasonic 製 TH-58PF12）
- ・ノート型 PC（hp 社製 pavilion dv6-7000, OS : Windows7, CPU : Intel Core i7-3820QM @ 3.70GHz, メモリ : 8GB）
- ・ビデオカメラ（Panasonic 社製, SDR-H80）
- ・ノビテック製 VENUS 3D モーションキャプチャシステム
- ・ワイヤレスマウス（Logicool 製, Wireless Mouse M305, 1000 dpi）

当該実験の実施にあたって、前半のジェスチャによるポインティング操作実験については、前述の4.3項と同様にノビテック社製 VENUS 3D によって取得した反射マーカ（被験者の右手に装着）の位置座標と GUI 上のカーソルの位置が連動するシステムによってデータを取得した。VENUS 3D の制御と GUI の制御を hp 製 pavilion dv6-7000にて行い、VENUS 3D

によって取得したデータをもとにカーソルの位置が連動するプログラムは Microsoft Visual C++ 2008 を用いて実装した。また、後半のマウスによるポインティング操作実験については、大画面ディスプレイと接続した実験課題を制御するノート型 PC にワイヤレスマウスのレシーバーを取り付けることで、同様の操作を実現した。なお、実験課題については、Microsoft Visual Basic 2010を用いて実装した。

3.4 実験環境

被験者は、大型ディスプレイからの視距離2mとし、高さの調節できる椅子に座り、当該実験の課題を行った。操作感をできるだけ統一するため、各被験者の外眼角の高さが大型ディスプレイの中心の高さと一致するように座面高を調整した。なお、当該実験においては、位置情報の正確性とそれに起因する一定の操作の快適性を担保するために赤外線カメラによるキャプチャシステムを使用した。赤外線カメラの反射を用いて正確な位置情報を取得するため、被験者の右手に反射マーカを装着した。実験の様子、実験のレイアウトは以下の Fig.2, Fig.3に示す通りである。また、後半のマウスによるポインティング操作実験については、被験者の右側に高さ103.5 cm の台を置き、その上でマウスの操作を行った。

また、室温は約21℃～26℃、被験者位置の床面1mにおける水平面照度は約650lx（±50lx）であった。

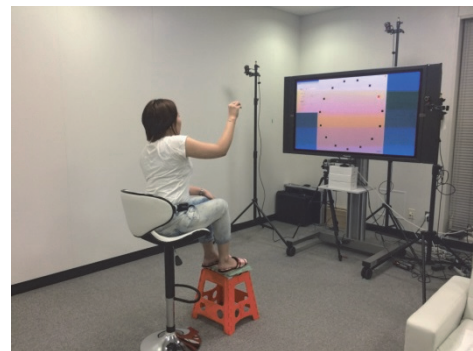


Fig.2 A scene during the gesture operation.

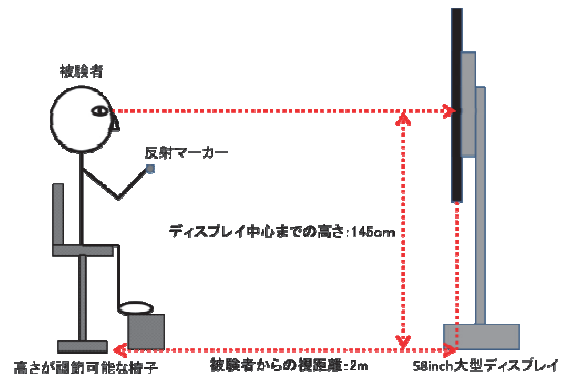


Fig.3 Experimental layout.

3.5 実験課題

ISO 9241-411 Annex B²²⁾ (JIS Z 8519 附属書 B) の多方向タッピング課題を基にしたカーソルの移動操

作課題を実験課題とした。

Fig.4に示すように円周上に等間隔に配置された15点のターゲットのうち、ポインティング操作については、赤色に表示されたターゲットを番号順にポインティングする作業（多方向のタッピング作業）を行わせた。一周するごとに同じIDについて15回分のデータが得られるようになっていた。各IDでこの課題を2周することとした。

ターゲットサイズ W と移動距離 D (円の大きさ) は Table 1に示すように3通りずつ用意し、困難度 ID は9パターンとした。

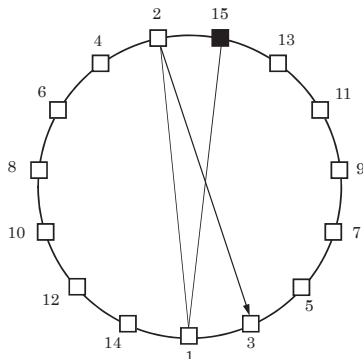


Fig.4 Experimental task.

Table 1 Amplitude conditions used in the experiment.

	W (px)	D (px)	ID
①	60	400	2.94
②	60	700	3.66
③	60	1000	4.14
④	45	400	3.31
⑤	45	700	4.05
⑥	45	1000	4.54
⑦	30	400	3.84
⑧	30	700	4.60
⑨	30	1000	5.10

3.6 操作方法

被験者は大型ディスプレイから2m離れた位置で右手を動かすことでカーソルの移動操作を行った。ジェスチャでは従来のマウスやタッチパネルなどのデバイスにおけるクリック操作に相当する操作が難しいため、それに相当するものとして、ウェイトング法³⁾による2秒間の静止時間 (dwell time) の判定によってクリック操作を行う方法を採用した。なお前述の実験課題においては、視覚的フィードバックとして次のターゲットが点灯することによりクリックが完了したことを被験者が認識できるようにした。

3.7 実験手順

- ① 実験開始前にジェスチャによるポインティング操作の練習を、実験課題を用いて行わせた。練習に用いた課題は、Table 1の困難度 ID の値が最も高いものに統一した。
- ② ジェスチャによるポインティング操作について

の実験課題とその操作方法を十分に理解したことを確認した上で、実験課題を行なわせた。ターゲットをポインティングしたときの位置情報及び作業開始時からの経過時間情報を記録するとともに、被験者の操作方法をビデオカメラにより記録した。

- ③ ②を9つのパターンの困難度 ID について行った。その際、順序効果を考慮し、被験者間でカウンターバランスを施した。また被験者の腕や肩の疲労の影響を軽減にするため、各パターンの作業が終了するごとにおよそ2分間の休憩時間を設けた。
- ④ ジェスチャによるポインティング操作について、9つのパターンについての試行が終了した時点でおよそ10分間の休憩を設け、続いて同じく実験課題を用いてマウスによるポインティング操作についての練習を行わせた。練習に用いた課題は、ジェスチャによるポインティング操作と同様に困難度 ID の値が最も高いものに統一した。
- ⑤ マウスによるポインティング操作についての実験課題とその操作方法を十分に理解したことを確認した上で、実験課題を行なわせた。その際、ターゲットをポインティングしたときの位置情報及び作業開始時からの各操作の経過時間情報を記録するとともに、被験者の操作方法をビデオカメラにより記録した。
- ⑥ ⑤を9つのパターンの困難度 ID について行った。その際、課題の順序効果に対するカウンターバランスについて、同一被験者においては、ジェスチャによるポインティング操作と同様の困難度 ID の順に課題を行うこととした。また、被験者の腕や肩の疲労の影響を軽減にするため、各パターンの作業が終了するごとにおよそ2分間の休憩時間を設けた。

3.8 評価項目

当該実験における測定項目は、以下のTable 2の通りである。測定項目より、各操作ともターゲットが点灯してから、クリックされるまで時間から判定に要した静止時間を引いた時間を操作時間として扱った。

なお、実験により得られたデータについては、ターゲットサイズ W と移動距離 D の組み合わせ毎に有意水準5%でスミルノフ・グラブス検定を行なうことで、異常値を除去した。また、本研究において操作特性に関する各指標については、Kopper らの遠距離からのポインティングについての研究²³⁾と同様に全ての被験者の平均値を用いて議論することとした。

Table 2 Measurement items.

・画面上でターゲットがクリックされた時の時間値 (ms)
・画面上でターゲットがクリックされた時のXY座標 (px)
・課題開始から10msごとの画面上のカーソルのXY座標 (px)

4. 結果・考察

4.1 Fitts の法則の適用

当該実験によって得られた若年者のジェスチャによる平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係を、Fig.5に示す。

このとき、実験により得られたデータを用いて、ある被験者のジェスチャによる平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係について回帰分析を行うと、次の式 (3) のように回帰式が求められ、寄与率 (R^2) は、0.4239を得た。

$$MT = 810.27 + 349.72 \times ID \quad (3)$$

続いて、同じく実験によって得られた若年者のマウスによる平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係を、以下の Fig.6に示す。このとき、実験により得られたデータを用いて、マウスによる平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係について回帰分析を行うと、次の式 (4) のように回帰式が求められ、寄与率 (R^2) は、0.9859を得た。

$$MT = 377.76 + 149.15 \times ID \quad (4)$$

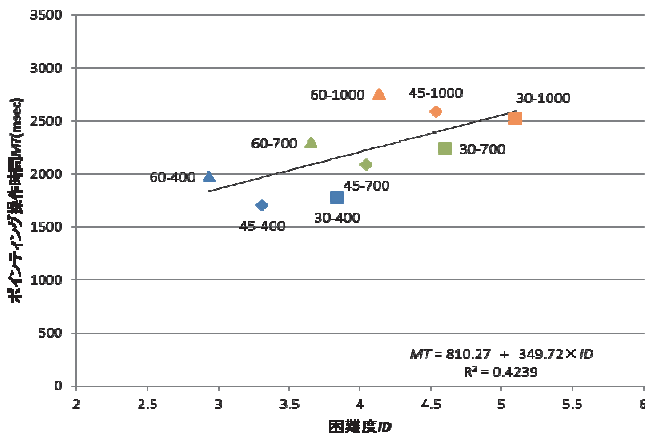


Fig.5 Relation with ID and the pointing time by using hand gesture.

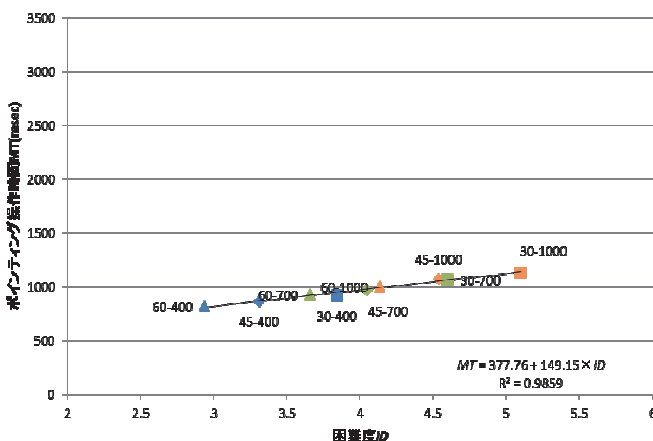


Fig.6 Relation with ID and the pointing time by using mouse.

まず、当該実験において得られた若年者のデータをもとに、ジェスチャによる平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係について、Fitts の法則²⁾への適用について検討する。一般的な統計の話で考えれば、先の結果よりそれぞれ回帰分析によって得られた寄与率は決して低いものではない。なお、平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係について、無相関の検定を行ったところ、有意水準1%で相関関係も認められた。しかしながら、従来の Fitts の法則^{1), 2)}と比較すると、それが必ずしも高い値であるとは言えない。たとえば、先行研究より Mackenzie らは、Fitts の法則¹⁾における2次元平面の移動に対するターゲットサイズの取り方に着目した検討を行っているが、その際に自身らの実験の中で移動する方向に対して、ターゲットの水平方向の長さをターゲットサイズとした STATUS QUO モデルについて得られた寄与率0.8097を低いと考え、Fitts の法則の2次元モデルへの拡張を試みた²⁾。このことから、ジェスチャを用いた2次元 GUI 操作時のポインティング操作を必ずしも Fitts の法則に適用できるとは言えないことが示唆される。

また、平均操作時間 MT と困難度 ID の関係について、Fig.5に示すように困難度 ID に対するターゲットサイズ W と移動距離 D の関係から平均操作時間 MT がターゲットサイズ W ごとに横並びになる傾向がみられた。このことから平均操作時間 MT がターゲットサイズ W から受ける影響が少ないことが示唆された。

先の平均操作時間 MT がターゲットサイズ W から受ける影響が少なくなるという傾向については、通常のマウスによる操作における同一課題によるものと比較すると、マウスによる操作では、従来の Fitts の法則とそれに関する研究^{1), 2)}に匹敵する高い寄与率を得たことから実験課題に依存した結果ではないことが示され、同時にこのことがジェスチャによる2次元 GUI 操作時の操作特性の1つであることが示唆された。

4.2 ポインティング操作中の速度波形

前述の4.1項にみられたポインティング操作時間 MT に対してターゲットサイズ W ごとに横並びになる傾向について、それと同様の傾向がみられた当該被験者のポインティング操作に着目し、以下の Fig.7, Fig.8にある被験者のポインティング操作中の速度波形を示す。Fig.7はジェスチャによる操作の際の速度波形、Fig.8はマウスによる操作の際の速度波形である。なお、速度分布を作成するにあたって、ノイズを除去するために5点移動平均法を用いた²⁴⁾。

人間の上肢作業における動作特性として、中沢らが報告した速度波形を「大きなピークを持つ波形 (移動動作に相当)」と「小さなピークを持つ波形 (位置決め動作に相当)」の二相とする基準¹⁹⁾で分離すると、その境界がピーク速度から減速していく波形の中で傾きに変化する点にあることが示唆される。この二相を分離する点について、いずれの速度波形においてもジェスチャによる操作とマウスによる操作で比較すると、ジェスチャについては明らかにその点が

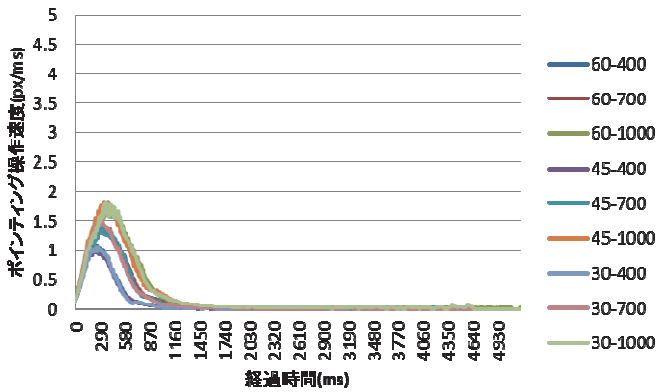


Fig.7 Comparison of velocity profile during pointing operation by hand gesture.

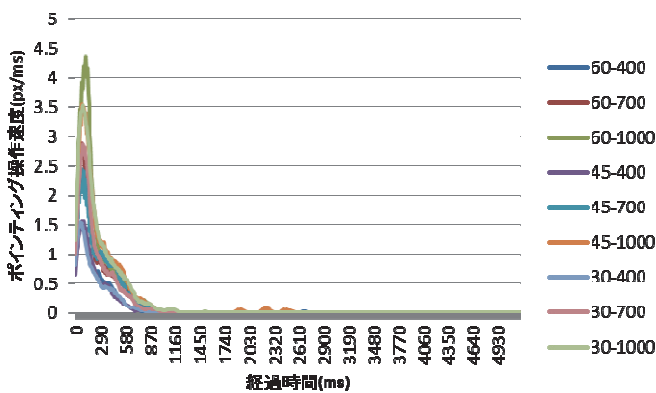


Fig.8 Comparison of velocity profile during pointing operation by mouse.

位置決め完了する直前にあり、位置決め動作に相当する2つめの速度のピークとなる点がほとんど見られないことが分かる。つまり、ジェスチャによるポインティング操作では、移動動作と位置決め動作が明確に分離されず、位置決め難しさが移動動作の中に吸収されてしまうことが考えられ、ポインティング操作時間全体に対しても、同様に位置決め難しさが反映されにくくなることが示唆される。

この位置決め動作が分離されず、移動動作の中に吸収されてしまうことが、前述のジェスチャによる2次元 GUI 上のポインティング操作について、ポインティング操作時間 MT と困難度 ID の関係について、困難度 ID のターゲットサイズ W の影響が少なくなるという傾向がみられた要因の一つであるということが示唆される。

4.3 Fitts の法則の修正

前述の4.1項より「平均操作時間 MT と Fitts の法則に基づく困難度 ID との関係について、困難度 ID に対してターゲットサイズから受ける影響が少なくなる」という操作特性を考慮した新しい困難度 ID 式を提案する。困難度 ID に対するターゲットサイズの影響が小さくなるよう任意の定数 n を用いた式 (5) をもとに、寄与率 (R^2) を最大化する n の推定を行った。

$$ID_{new} = \log_2 \left(\frac{D}{n\sqrt{W}} + 1 \right) \quad (5)$$

その結果、実験により得られた若年者のポインティング操作の平均操作時間 MT との関係について、すべて $n=0.00$ となった。このとき、分母の値が1となることからターゲットサイズからの影響を受けないと解釈することができる。ここで、対数 ID_{new} の真数について、誤差項にあたる (+1) について、ターゲットサイズ W の影響を受けないとするならば、この誤差項は不要となり、以下の式 (6) が、先の特性と考察されたそのメカニズムを反映した式であることが示唆される。

$$ID_{new} = \log_2 D \quad (6)$$

改めて、先の式 (6) を用いて、実験により得られた若年者のジェスチャによる平均ポインティング操作時間について、回帰分析を行うと平均ポインティング操作時間 MT と困難度 ID_{new} の関係について、回帰分析の結果から、式 (7) のような回帰式が求められ、寄与率 0.8930 ($\leftarrow 0.4239$) を得た。

$$MT = -3319.2 + 591.78 \times ID_{new} \quad (7)$$

このことから、ジェスチャのポインティング操作時間は、ターゲットサイズ W の影響を組み合わせず、移動距離 D だけで説明されることが示唆された。

5. まとめ

本研究の目的は、若年者のポインティング操作に着目し、ジェスチャによる2次元 GUI 操作時の特性が通常のマウスやタッチパネルによる操作と同様に Fitts の法則に適用できるか否かを検討することであった。

本稿においては、ハンドジェスチャを用いた2次元 GUI 操作時の操作特性について、実験を通じて検討を行った結果、以下のような知見が得られた。

- I. ジェスチャによる2次元 GUI 上の若年者のポインティング操作については、その操作の特性に対して必ずしも Fitts の法則²⁾ が適用できるとは言えず、困難度 ID に対して、ターゲットサイズ W から受ける影響が少なくなる。
- II. ポインティング中の速度波形について、ジェスチャによる操作では、位置決めに要する時間と距離が、マウスによる操作と比較して短く、速度波形の中で位置決め動作相に見られるはずの2つめの速度ピークが現れない。このことから、移動動作の中に位置決め動作が吸収され、困難度 ID に対する位置決め難しさとしてのターゲットサイズ W から受ける影響が少なくなる。
- III. I より若年者について、ジェスチャを用いた2次元 GUI のポインティング操作について、Fitts の法則¹⁾ がその操作特性に必ずしも適用できるとは言えず、II と併せて困難度 ID に対して、ター

ゲットサイズ W から受ける影響が少なくなることから、従来の Fitts の法則²⁾ の困難度 ID の式から、ターゲットサイズ W の影響を省いた式による適用を試みたところ、従来の式と比較して高い寄与率を得た。そのことから、ジェスチャのポインティング操作時間は、ターゲットサイズ W の影響を組み込まず、移動距離 D だけで説明されることが示唆された。

これらの知見を活用して、ジェスチャによる操作方法の提案や画面設計を行うことにより、効率的かつ快適な GUI の操作環境を提供できると考えられる。

最後に、ポインティング中の速度波形をもとにした検討においては、移動動作相と位置決め動作相の二相の境界となる点について、定量的な基準に基づく分離をするまでには至らなかった。今後、根拠となるデータ数を増やすとともに、加速度を指標とする検討などを通して移動動作相と位置決め動作相についてより詳細に検討することが必要であると考えられる。さらに、困難度 ID に対してターゲットサイズ W の影響が少なくなるという現象については、当該実験で対象とした条件でそのような結果を得たが、例えば、ターゲットサイズ W を極端に大きくしたり、小さくしたりした場合にも同様の現象が生じるかということについては、検討の余地が残された。

なお、本研究は科研費（研究課題番号24500152）の助成を受けた「2次元 GUI 操作時のハンドジェスチャの操作特性に関する研究」の一部として実施したものである。

参考文献

- Paul M. Fitts : The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47-No.6, 381-391, 1954.
- I. Scott Mackenzie et. al. : Extending Fitts' Law to two-dimensional Tasks, *Proc. CHI '92*, 219-226, 1992.
- 黒川隆夫, 久世通由, 森本一成 : タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント特性およびそれに対する Fitts の法則の適合性, *ヒューマンインタフェース*, Vol.5, 5-12, 1996.
- 高田喜朗, 梅木良太郎, 辻野嘉宏, 都倉信樹 : 大きい目標の選択操作に対する Fitts の法則の適合性, *電子情報通信学会*, Vol.J79-D-1-No.11, 1001-1003, 1996.
- 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 Fitts の法則の拡張モデル, *電子情報通信学会*, Vol.85-No.11, 1336-1346, 2002.
- 岩瀬弘和, 村田厚生, 北岡正敏, BALINGIT Juvy : 2次元ポインティング作業における Fitts の法則の改良, *計測自動制御学会*, Vol.40-No.9, 881-889, 2004.
- 中村卓, 高橋伸, 田中二郎 : “大画面環境におけるハンドジェスチャの選択手法—ダブルクロッシングの提案と他の選択手法との比較—”, *電子情報通信学会*, Vol.J96-D-No.4, 478-488, 2013.
- 小川正幹, マルコ エルム, 米澤拓郎, 中澤仁, 徳田英幸 : 公共メディアへのジェスチャ入力のためのユーザに対する操作指示手法 (2014年10月16日版), *情報処理学会*, Vol.51-No.1, 316-328, 2015
- J. Segen and S. Kumar : Simplifying human-computer interaction by using hand gestures, *Look Ma, No Mouse!*, *Comm. ACM*, Vol.43-No.7, 102-109, 2000.
- J. Segen and S. Kumar : Fast and accurate 3D gesture recognition interface, *Proc. ICPR'98*, 86-91, 1998.
- R. Cipolla, Y. Okamoto and Y. Kuno : Qualitative visual interpretation 3D hand gestures using motion parallax, *Proc. MVA'92*, 477-482, 1992
- A. Wexelblat : An Approach to Natural Gesture in Virtual Environments, *Computer Human Interaction*, Vol.2-No.3, 179-200, 1995.
- 速水悟, 長谷川修, 赤穂昭太郎, 坂上勝彦, 吉村隆, 長屋茂喜, 遠藤隆, 中沢正幸, 坂本憲治, 外川文雄, 山本和彦 : 身振りと言話のマルチモーダルデータベース, *電子情報通信学会技術研究報告*, PRMU Vol.97-No.250, 1-8, 1997.
- 呂山, 猪木誠二 : ネットワーク化手話単語映像データベースの開発, *電子情報通信学会技術研究報告*, MVE Vol.98-No.616, 41-47, 1999.
- 三原功雄 : ジェスチャ操作 IF のためのシニアのジェスチャの解析 (<特集>インタラクション技術の革新と実用化), *情報処理学会*, Vol.43-No.12, 3685-3693, 2002.
- D. Elliot, R. Chua and W. F. Helsen : A Century Later : Woodworth's (1899) Two-Component Model of Goal-Directed Aiming, *Psychological Bulletin*, Vol.127-No.3, 342-357, 2001.
- C. L. Mackenzie, R. G. Marteniuk, C. Dugas and B. Eickmeier : Three-dimensional Movement in Fitts' task : Implications for control, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol.39-A, 629-647, 1987.
- F. B. Gilbreth : *Applied Motion Study*, Easton Publishing Company, 130-157, 1911.
- 中沢信明, 池浦良淳, 猪岡光 : 人間の把握特性の実験的考察—把持物体を置く場合—, *人間工学*, Vol.32-No.5, 223-229, 1996
- 宮代信夫 : 加速度波形の時間的構造とバリスティック運動との関係について, *日本経営工学会論文誌*, Vol.39-No.6, 353-359, 1989
- 築谷喬之, 高島和毅, 北村喜文 : マウスポインティングにおけるターゲット属性が軌跡と運動特性に与える影響, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol.10-No.1, 95-102, 2008
- ISO/TS 9241-411 : Ergonomics of Human-system interaction – Part411: Evaluation methods for the design of physical input devices, 2012.
- R. Kopper et al. : A human motor behavior model for distal pointing tasks, *Int. J. Human-Computer Studies* 68, 603-615, 2010.
- W. G. Iwan : *Principles of Biomechanics and Motion Analysis*, 石毛勇介監訳, NAP, 208-237, 2008.