

修士論文

アクティブホイールマウスにおける
指腹部滑り知覚特性

指導教員 野村由司彦 教授

平成 27 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

414M109 大池 慧

目次

第1章	緒言.....	5
1.1	本研究の背景.....	5
1.2	従来研究.....	6
1.3	本研究の方針.....	8
第2章	提示方式選定実験(最適なホイールを選択するための実験).....	9
2.1	実験概要.....	9
2.2	実験装置.....	9
2.2.1	アクティブホイールマウス.....	10
2.2.2	ホイール.....	11
2.2.3	指載荷機構.....	12
2.2.4	タッチパネルディスプレイ.....	13
2.2.5	チンレスト, スライドレール.....	13
2.3	実験条件.....	14
2.4	実験方法.....	15
2.5	実験結果.....	16
2.5.1	長さ知覚.....	16
2.6	考察.....	17
第3章	滑り知覚特性測定実験(知覚特性をモデル化するための実験).....	18
3.1	実験条件.....	18
3.2	実験結果.....	19
3.3	モデル化.....	20
第4章	実証実験(知覚モデルの有効性を確認するための実験).....	22

4.1	概要	22
4.2	実験条件	22
4.3	実験の流れ	23
4.4	実験結果, および考察	24
第5章	結言	27
参考文献	28
謝辞	29

図目次

図 1.1	点図ディスプレイ	5
図 2.1	実験装置全体図	10
図 2.2	アクティブホイールマウス	11
図 2.3	ホイールに指を置いている様子	11
図 2.4	4種類のホイール	12
図 2.5	ホイール表面の凸点	12
図 2.6	指载荷機構（ホイールへの指腹部押し当て力を一定に保持するための機構） ..	13
図 2.7	タッチパネルディスプレイによる知覚した滑りベクトル（長さと角度）の回答	13
図 2.8	チンレスト	14
図 2.9	ホイール間の比較：べき関数当てはめ後の知覚長残差の分散	17
図 3.1	提示速さに対する長さ相対誤差平均	19
図 3.2	提示時間に対する長さ相対誤差平均	19
図 4.1	実証実験風景	24
図 4.2	実証実験結果の一例 「才」	25
図 4.3	実証実験結果の一例 「也」	25
図 4.4	実証実験結果の一例 「弑」	26

表目次

表 2.1	提示方式選定実験における実験条件	15
表 3.1	滑り知覚特性測定実験における実験条件	18
表 3.2	長さ知覚に関する分散分析表	20
表 4.1	実証実験における実験条件	23

第1章 緒言

1.1 本研究の背景

人は外界の情報を得るために視覚を用いることが多い。そのため、視覚に障害を持つと日常での活動において、不自由な場面が多くある。そのような障害を持つ人たちは、視覚に代わる感覚として聴覚、触覚を用いて情報伝達をしている。その中の1つとして点字がある。指先の触覚を用い、盛り上がった複数の点を組み合わせたパターンで文字を表現するものである。この点字を用いて、図形、格子、粗さなどを自由に提示するピンディスプレイデバイス(点図ディスプレイ)という装置も開発されている(図 1.1)。しかし、ピンディスプレイでは形を提示することができるが、動的な情報を提示することは難しい。文字の書き順や、道順などの情報を提示するためには有向線分情報を提示する必要がある。

そこで本研究では、指先皮膚の触覚を通して滑りを提示することにより、有向線分情報を伝達することができる装置の開発を目指している。この装置を「アクティブホイールマウス」と呼ぶ。この装置は触覚を活用していることから、視覚障害者も利用できる。例えば、この装置で知覚した有向線分情報を接続することで図形を表現したり、地図上の経路を案内したりすることができる。



図 1.1 点図ディスプレイ

1.2 従来研究

本研究に関連の深い研究としては、人の指先皮膚の知覚特性を解明することを目的とした研究や、触覚を通して情報伝達するためのマンマシンフェースの研究があげられる。

指先皮膚感覚を用いた線分の知覚に関する従来研究では, Najib らは表面に凸点を形成した試験片を直線的に滑らせ, それを被験者が指先の皮膚感覚で知覚する研究を行った[1]. 滑り速度と滑り持続時間を個別に変更して滑り量を知覚する実験で, それぞれがべき乗則にしたがって知覚されることを確認した. さらに, 速度と時間を組み合わせ的に変更する実験を行い, 個別実験で求めた速度知覚のべき乗項と時間知覚のべき乗項の積としてモデル化できることを見出した. これは, , 長さが物理的には滑り速度と滑り持続時間の積であることに対応していると考えられる. Salada らは腕の運動覚と組み合わせた場合の滑り知覚の研究を行った[2]. また Kyung らは, 図形, 格子, 粗さなど提示するピンディスプレイデバイスの研究を行った[3]. これらの研究ではいずれも滑りを提示するための実験装置を作成しているが, 大がかりな装置となっていた.

滑りを提示する装置として比較的小さく作られているものとして, Nikos らによる指先に装着する V 型ローラ滑り型の装置を用いた研究がある[4]. 二つのローラを V 字に配置しており, ベクトル合成の原理を用いて指先に滑り速度ベクトルを提示することができる. Moscatelli らはビリヤードボール大の球を二つのモータで回転させ, ボール表面に指を置くことで滑りを与える装置を作成した[5].

Gleeso らは指先の皮膚を接線方向に変形(tangential skin stretch)させることで方向を提示する装置を作成した[6]. Gleeson らは, さらに指先皮膚から方向を提示する装置に振動刺激や音声ガイドを組み合わせたナビゲーションデバイスを開発した[7]. このデバイスを用いて実際に歩行経路のガイドを行う実験をしている.

Colin らは 4 本のベルトを用いて滑りを提示する装置を作成した[8]. 4 本ベルトを交互に編み合わせた形で, それぞれの速度と回転方向を変え, ベクトル合成的に任意の方向への滑りを提示している.

1.3 本研究の方針

本研究では滑り知覚をととしてマウス走査の方向・速度・量を使用者に教示し、動いた軌跡から使用者が線画を知覚できるシステムの開発を目指す。具体的には、線画提示・知覚に至る3段階の実験を実施した。行った実験は以下のとおりである。

- (1) 提示方式選定実験(最適なホイールを選択するための実験)：はじめに、ホイール形状を最適化することを目的として、厚さや凸点の有無を変更した5種類のホイールを比較する実験を行った。具体的には、5種類のホイールのそれぞれに対して、滑り提示時間一定条件の下で滑り速さのみを変化させて、滑りの長さ（間接的には滑り速さ）と方向の知覚特性を調べ、最も知覚特性の優れたホイール形状を選定した。
- (2) 滑り知覚特性測定実験(知覚長さをモデル化するための実験)：次に、選定したホイールを用いて、すべり提示持続時間と滑り速度を組み合わせた変えて、滑り知覚特性測定実験を行った。滑り速さと滑り持続時間との関連で、特に、については知覚特性をべき乗知覚速さとべき乗知覚時間の積の形式による長さ知覚モデル式を作成した。
- (3) 実証実験(アクティブホイールマウスおよび長さ知覚モデルの有効性を確認するための実験)：最後に、得られた知覚長さモデル式を用いて、知覚の歪を補正する方法を提案した。そして、実用を想定し、アクティブホイールマウスを用いて逐次的に有向線分情報を提示することで折れ線を提示する実験を行い、知覚長さモデル式および知覚歪補正方法が有効であることを確認した。

第2章 提示方式選定実験(最適なホイールを選択するための実験)

2.1 実験概要

提示方式選定実験の目的は、アクティブホイールマウスにおける提示方式であるホイールの形状の選定である。アクティブホイールマウスを開発するにあたって、指腹部に接して回転するホイールによる滑りの知覚特性を調べる必要がある。この知覚特性に関わる重要な因子として、「ホイールの薄い/厚いによる、エッジ刺激の有/無、さらには滑り面性状の面的/溝的」、「ホイール円周面状の凸点による皮膚表面の凹変形の変位の有/無」が考えられる。ホイールの薄い/厚い、および凸点の有/無の効果を調べるため、それぞれの有無を変更できる装置を製作して、心理物理実験により滑り知覚特性を調べた。なお、ホイール表面の滑り刺激を遮断して凸点の刺激のみを提示できるよう、指先指腹部とホイールの間にカプトンフィルムを挟んだ実験も行った。具体的には、5種類のホイール(凸なし+薄い, 凸なし+厚い, 凸あり+薄い, 凸あり+厚い, 凸あり), のそれぞれに対し、5水準の速度を1回ずつ、5種類×5ランの計25ランを1セットとし、被験者1人につき4セット、計12人×100ラン/人=1200ランの実験を行った。

2.2 実験装置

実験装置の全体図を図2.1に示す。実験装置は、滑り知覚を与えるアクティブホイールマウス、知覚量を回答するためのタッチパネルディスプレイ、ホイールへの押し当て力を調整する指載荷機構、そして被験者の姿勢を一定に保つためのチンレストやスライドラールから成る姿勢保持機構により構成される。

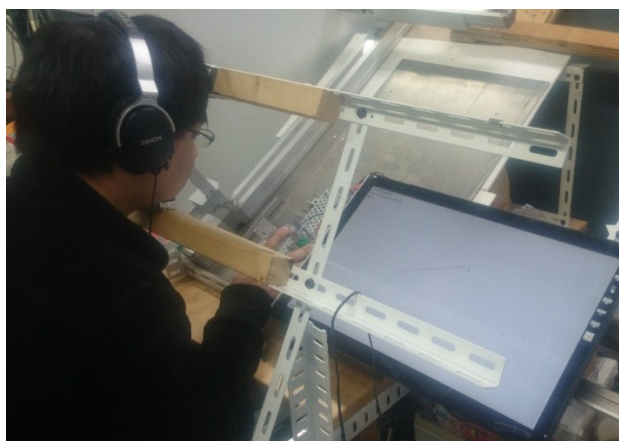


図 2.1 実験装置全体図

2.2.1 アクティブホイールマウス

人の指先に滑り知覚を与える装置としてアクティブホイールマウスを開発した（図 2.2）。この装置は、2つのステッピングモーター（M25SP-6NK と M15SP-2N、ミツミ電機株式会社製）を用いて、ホイールの滑り速度、すなわち回転の方向と速さ、そして一定時間、回転を持続させることで滑り距離を変更させて提示することができる。ホイールの外周の上部は装置上面の開口部に位置している。したがって、被験者が指先の指腹部を装置上面の開口部に置くことで、ホイールの回転に伴うホイール表面の滑りを知覚することができる(図 2.3)。



図 2.2 アクティブホイールマウス

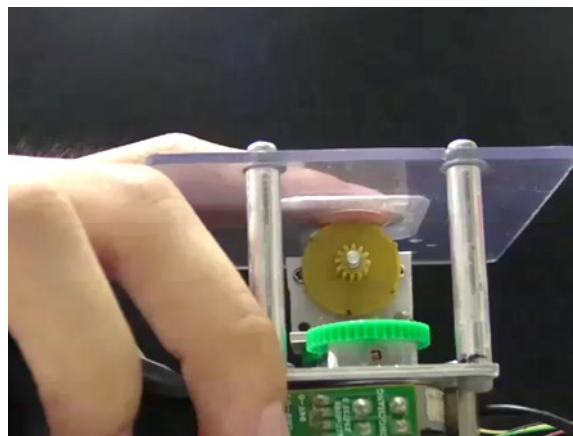


図 2.3 ホイールに指を置いている様子

2.2.2 ホイール

滑りやエッジ刺激の水準を変更できるよう，ホイール（直径 20 mm）の厚さは 2 種類（2 mm，および 6 mm）を作成し，また凹部変位の有無の水準を変更できるよう，凸点の取り付けの有無で 2 種類，さらには指先指腹部とホイールの間にカプトンフィルムを挟んで 1 種類，計 5 種類を作成した(図 2.4)．凸点は高さ 0.5 mm，軸方向凸底長と円周方向凸底長は共に 1.0mm とした．また，凸点間隔については，凸点が同時に

複数個あたらないようにすると、滑り知覚性能が最も高いとの従来研究の結果を参考に、10.5 mm とした (図 2.5).

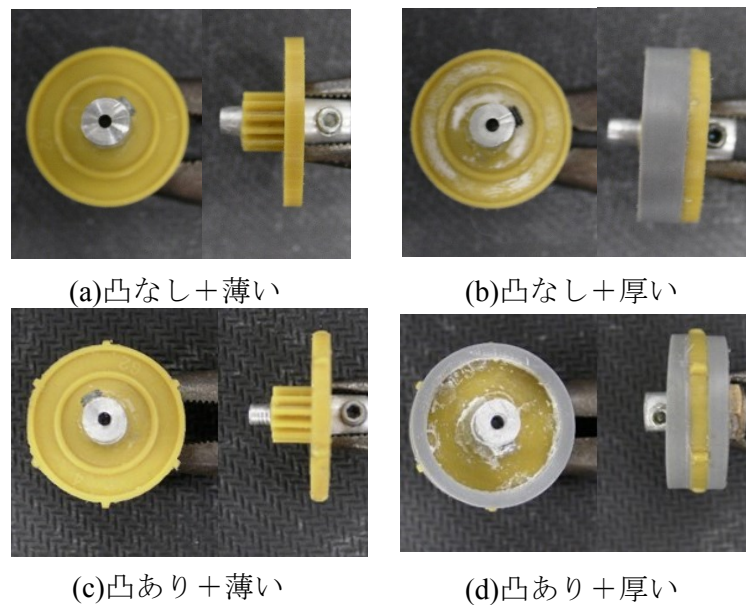


図 2.4 4 種類のホイール



図 2.5 ホイール表面の凸

2.2.3 指載荷機構

指腹部をホイールに押し当てる力を被験者間でできる限り一定に保てるよう、自由端片持ちレバー機構により、指の上から錘を載せる装置を製作し、実験時に用いた(図 2.6). 指を押し当てる力は 0.5N とした.

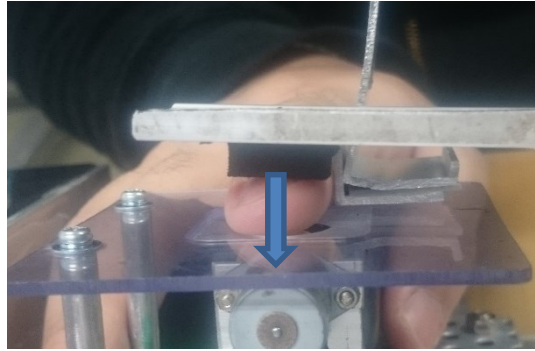


図 2.6 指载荷機構（ホイールへの指腹部押し当て力を一定に保持するための機構）

2.2.4 タッチパネルディスプレイ

線分の回答にはタッチパネルディスプレイを用いた(図 2.7). 被験者は閉眼して、滑りの提示を受け、知覚した滑りベクトル（滑り長さと滑り方向を成分とする）をメンタルイメージとして記憶する．滑り提示後，開眼し，記憶したメンタルイメージをタッチディスプレイ上に重ね，右手人差し指でその線分をなぞり描くことで知覚した滑りベクトル（長さと角度）を回答させた．

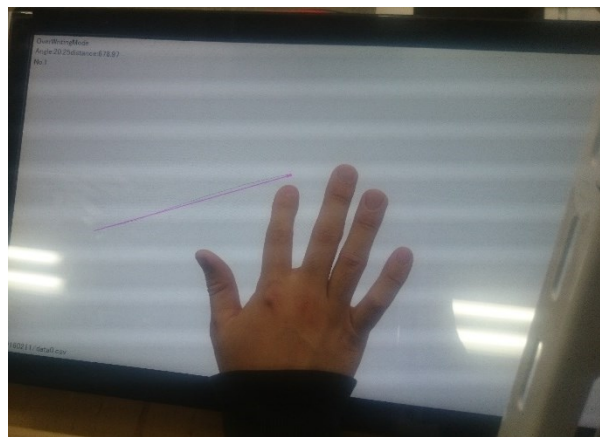


図 2.7 タッチパネルディスプレイによる知覚した滑りベクトル（長さや角度）の回答

2.2.5 チンレスト、スライドレール

チンレストは，あごを乗せることで姿勢を一定に保ち，タッチディスプレイへの回答時に視線がタッチディスプレイ表面に垂直になるようにした．これにより，透視投

影によるひずみを抑えることができる(図 2.8). また, スライドレール上にアクティブホイールマウスとタッチディスプレイを乗せ, 両者を被験者の全額平行面方向にスライドできるようにした. これを用いて, アクティブホイールマウスのホイールのタッチに際しての指先の位置, およびタッチディスプレイでの線分回答に際しての始点位置を一致させるとともに, 知覚から回答までの一連の過程において姿勢を変えなくても済むようにでき, 結果的に姿勢の変動による誤差の混入を低減させられると期待される.

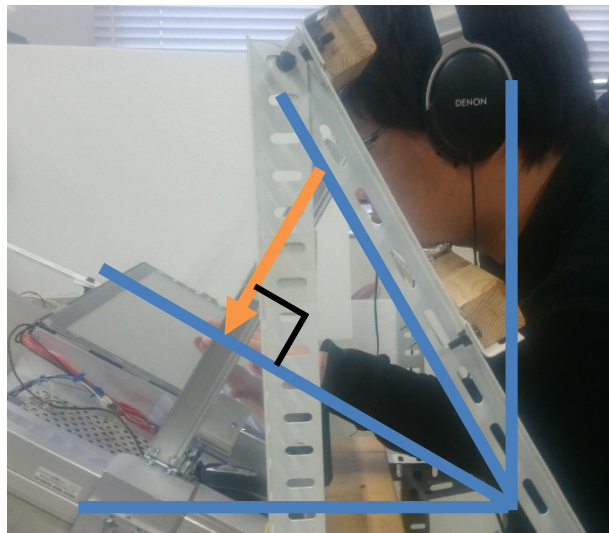


図 2.8 チンレスト

2.3 実験条件

実験条件を表 2.1 に示す. 被験者は右利きの 20 代の男性 12 名とした. 実験は右手の人差し指で滑りを知覚してもらったが, 被験者の 1 人は右手人差し指の皮膚の硬化が見られたため, 左手の人差し指を用いた.

ホイール条件は, 2.1 で記したように, 「凸なし+薄い」, 「凸なし+厚い」, 「凸あり+薄い」, 「凸あり+厚い」, 「凸あり+フィルム」の 5 種類のホイールを用いた.

提示する線分は，提示時間は 2.2s で一定とし，ホイールの回転速さを 25-125mm/s の 25mm/s 刻みで 5 水準とした．

表 2.1 提示方式選定実験における実験条件

因子	水準
被験者	10 名 (20 代，右利き，男性)
ホイール条件	5 水準：凸なし＋薄い 凸なし＋厚い 凸あり＋薄い 凸あり＋厚い 凸あり＋フィルム
提示時間	1 水準：2.2[s]
提示角度	ランダム (0～360 度の範囲)
速さ	5 水準：25, 50, 75, 100, 125 [mm/s]

2.4 実験方法

アクティブホイールマウスはホイールが正中矢状面内，へその前に位置するように設置した．タッチパネルディスプレイは視軸との直交性を確保するために 30 度，手前に傾斜させてあるので，アクティブホイールマウスも同様に傾斜させた．被験者は椅子に座り，リラックスして装置上面の開口部に利き手である右手示指を置く (被験者の内 1 人は左手)．上腕は鉛直，前腕は肩関節を内旋させることにより前額平行面から 45 度に向け，手関節は 45 度尺屈し，アクティブホイールマウスの向きに合わせた．

なお、指先の押し当て力を 0.5N 程度に調節できるよう、提示時に指の上から錘を載せる指載荷機構を用いた。

また、滑り提示時、被験者には目を瞑ってもらい、さらに装置の発する音によって滑りの知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着させてホワイトノイズを聴かせた。

実験者の開始の合図の後、ホイールが回転し、被験者は示指の指腹部の皮膚感覚で平面と凸点からもたらされる刺激を受容し、提示された滑りの長さや角度を知覚する。ホイールが停止した後、被験者は目を開け、右手でタッチディスプレイ上に知覚した線分をなぞり描くことで長さや角度を答えた。その際、システムは、指が触れている間、連続的に、始点と終点を結ぶ線分をタッチディスプレイ上に表示し続ける。この間、被験者は表示された線分がメンタルイメージに一致するように終点の位置を調整させた。

2.5 実験結果

5 種類のホイールについて被験者へ長さ、角度がどの程度知覚できたか聞いたところ、「凸なし+厚い」、「凸あり+フィルム」のホイールは「分からない」と答えた被験者が多数いたため、実験結果から除外した。

2.5.1 長さ知覚

各被験者、各ホイールに対して知覚長をべき関数でモデル化した。モデル当てはめ後の残差、すなわちモデル長からの実知覚長の差のばらつきの分散を用いて比較検討を行った。

ホイールごとの知覚長の残差の分散は図 2.9 のようになった。凸の付加されていないホイール条件(凸なし+薄い)に比べて凸点の付加されたホイール条件(凸あり+薄い, 凸あり+厚い)が良い性能を示した。

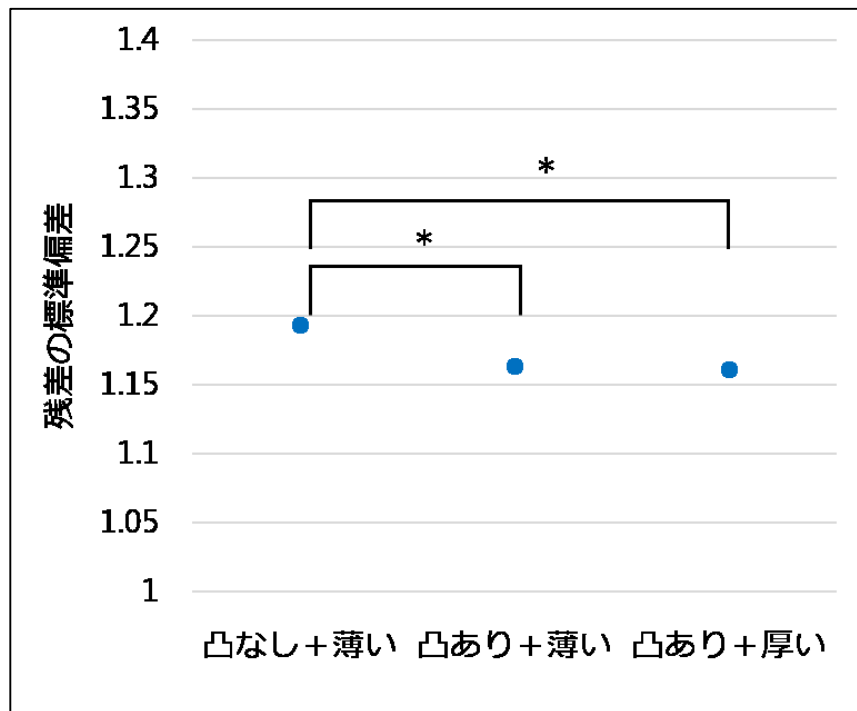


図 2.9 ホイール間の比較：べき関数当てはめ後の知覚長残差の分散

2.6 考察

長さ知覚においては凸の付加した条件が良い性能を示した。凸の付加した「凸あり+薄い」, 「凸あり+厚い」の2条件における性能の差は見られなかったため, エッジ刺激の効果を想定し, 本研究では「凸あり+薄い」条件のホイールを最適なホイールとして選定することとした。「凸あり+薄い」条件のホイールを用いて, 滑り知覚特性測定実験を行うこととした。

第3章 滑り知覚特性測定実験(知覚特性をモデル化するための実験)

第2章において選定したホイールを用いて、知覚特性をモデル化するための実験を行った。本実験では提示時間も因子とし、その水準を5水準とした。実験装置、実験方法は第2章で述べたとおりである。

3.1 実験条件

実験条件を表3.1に示す。提示時間、提示速さに応じた知覚長さをモデル化するため、提示時間も水準として設定し、その水準は5水準とした。その他、実験装置、実験方法は第2章と同様とした。

表 3.1 滑り知覚特性測定実験における実験条件

因子	水準
被験者	12 名
ホイール条件	凸あり＋薄い
提示時間	5 水準 : 0.6, 1.0, 1.4, 1.8, 2.2[s]
提示角度	ランダム (-30～30 度)
速さ	5 水準 : 25, 50, 75, 100, 125[mm/s]

3.2 実験結果

実験結果を図 3.1, 図 3.2, 表 3.2 に示す. 提示速さ, 提示時間, いずれの因子でも分散分析の結果から, 有意水準 0.1%以下で有意差が認められた.

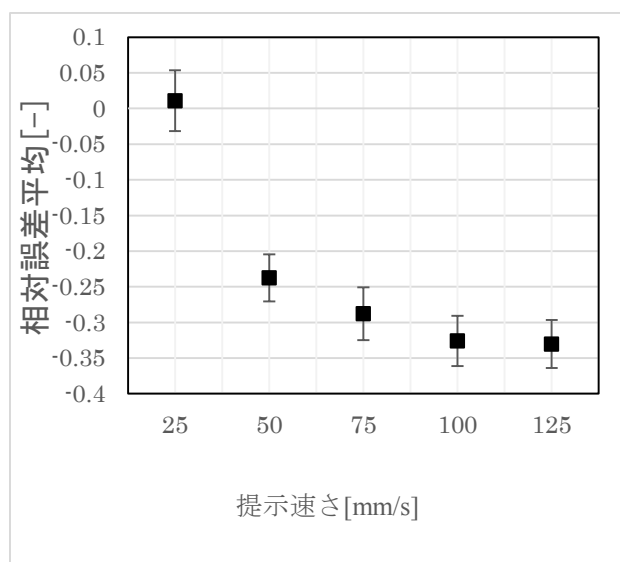


図 3.1 提示速さに対する長さ相対誤差平均

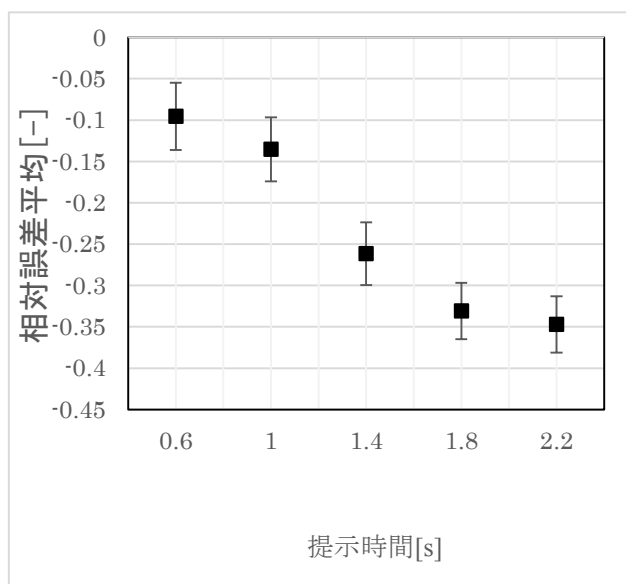


図 3.2 提示時間に対する長さ相対誤差平均

表 3.2 長さ知覚に関する分散分析表

因子	F	*:0.05	**:0.01	***:0.001	Level of Significance
提示速さ	15.09	2.39	3.35	4.68	***
提示時間	9.36	2.39	3.35	4.68	***

3.3 モデル化

知覚長さのモデル化について述べる. 実験結果から有意差が認められた二つの因子, すなわち提示時間因子, 提示速さ因子に対して, モデル式を作成する. モデルとしては, これまで多くの研究で用いられているべき関数モデルを用いた. すなわち,

$$l_{perc} = \alpha D^{\beta} S^{\gamma}$$

と定義した. ここで

l_{perc} : 知覚長さ

D : 提示時間

S : 提示速さ

α : 比例定数

β : 提示時間に関するべき指数

γ : 提示速さに関するべき指数とする. この式の両辺の対数を取って線形化して回帰方程式とした. そして, 本実験で得られたデータに対して最小 2 乗法を適用して, 未知パラメータ α , β , γ を推定した.

モデルとしては,

- (1) 個別モデル: 個人対応でパラメータすべて, α , β , γ を推定する
- (2) α のみ個別モデル: 個人対応で α のみを推定し, 全員共通として β , γ を推定する
- (3) 全員一括モデル: 全員共通として α , β , γ を推定する

の三通りを比較した。三通りのモデルの選択に際しては、AIC(赤池の情報量規準)を用いた。その結果、

AIC(個別モデル)=2049

AIC(α のみ個別モデル)=2174

AIC(全員一括モデル)=2952

となった。

AICに関する上記の結果に基づき、個別モデル、すなわち未知パラメータ α , β , γ は、3 つとも被験者ごとに個別に設定するモデル式が最適であると判断した。

第4章 実証実験(知覚モデルの有効性を確認するための実験)

4.1 概要

第3章において作成した知覚長さモデル式を基に，複数の線分を接続させて提示する実験を行った．実験では，実用を想定し，接続した線分の組み合わせにより文字を提示した．

4.2 実験条件

線分を複数，逐次，知覚させていくことで，マウスの軌跡が漢字の形となるようにホイールの動作を設定した．実験条件を表4.1に示す．今回選んだ漢字は「才，弌，也」の3字である．このうち「才，也」の2字は，速度一定，時間変化条件とし，「弌」の1字は時間一定，速度変化条件とした．ただし，本研究ではペンの上げ/下げは扱わず，1つの画の終点と始点が離れている場合も線でつなぐ形で提示した．提示する滑り量と滑り速さは，被験者ごとに求めたモデル式に基づいて，知覚量が同じになるように設定した．

表 4.1 実証実験における実験条件

因子	水準
被験者	4 名
ホイール条件	凸あり＋薄い
提示「漢字」	3 文字：「才」「弌」「也」
提示線分経路	「才」：6 本，「弌」：8 本「也」：9 本
提示時間	「才」「也」：線分ごと被験者ごと異なる 「弌」：1s(一定)
速さ	「才」「也」：50mm/s(一定) 「弌」：線分ごと被験者ごと異なる

4.3 実験の流れ

本実験では，線分の知覚量(長さ，角度)の回答をマウスのドラッグ操作によって行った．知覚方法は，停止・知覚・動作戦略(stop, perceive and go strategy)を用いた．具体的には，まず，停止時，ホイールを通して，被験者に滑りを提示する．被験者は，提示された線分を知覚する．そして，知覚した線分に基づいてマウスを動かす．このような停止・知覚・動作を通して，逐次，線分を知覚・接続することで，文字を認識させた．実証実験の様子を図 4.1 に示す．視覚障害者が使用することを想定し，被験者には実験中，目を閉じてもらった．被験者は，はじめアクティブホイールマウスのホイール部に人差し指を置き，提示が行われ，滑りを知覚したらマウス側に手を置く．

そして、マウスの左クリックを押しながら、動かすことで知覚した線分を回答した。知覚と回答を交互に続けて行い、文字の提示を行った。

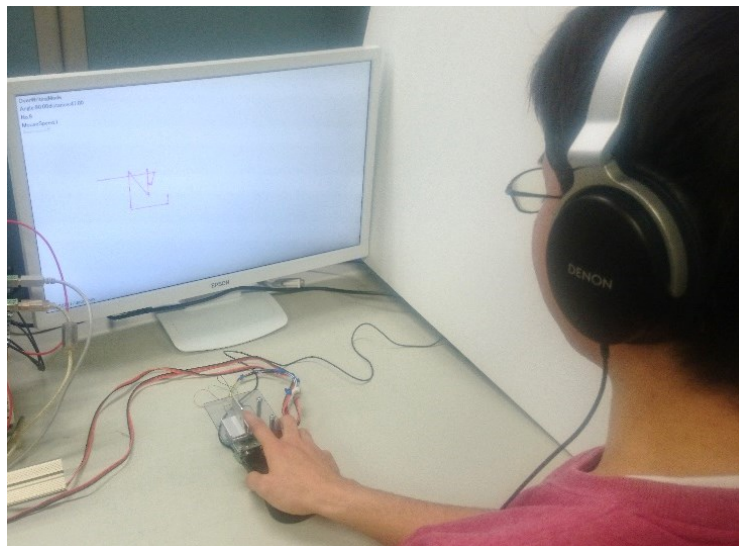


図 4.1 実証実験風景

4.4 実験結果，および考察

実際に回答した字の例を図 4.2～図 4.4 に示す。点線は本来、提示したい漢字の画ではない線分，すなわち，ペンアップの状態での運筆線分を示している。その判断は実験者が行った。その結果，図 4.2～図 4.4 のように，ある程度は漢字と認識できる結果を得ることができた。今回，提示時間，提示速さはいずれかを固定とした(「才，也」は速度一定，「弑」は時間一定)が，今後は，字の形だけでなく，書道における運筆を教示するために速度も含めた提示を検討していく必要がある。

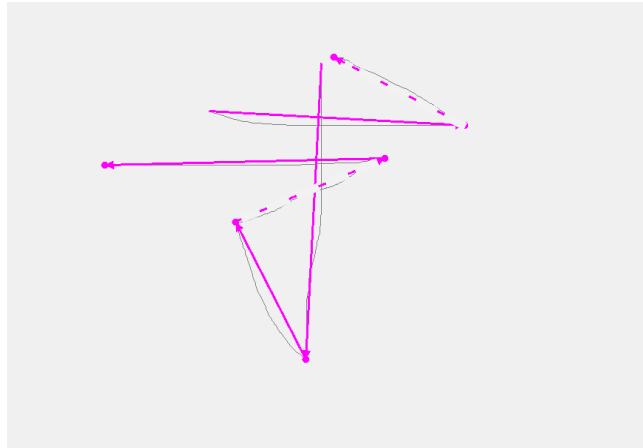


図 4.2 実証実験結果の一例 「才」

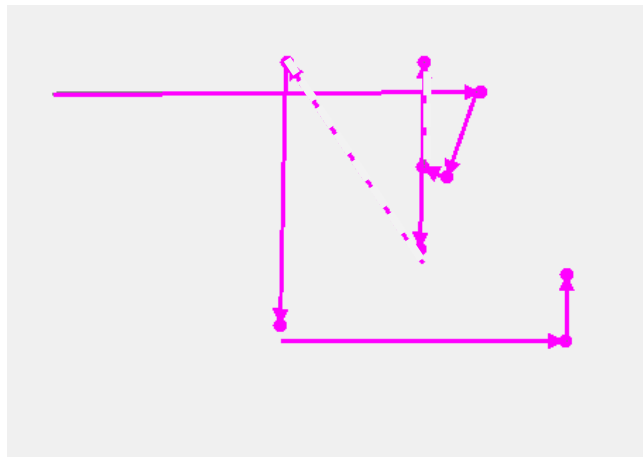


図 4.3 実証実験結果の一例 「也」

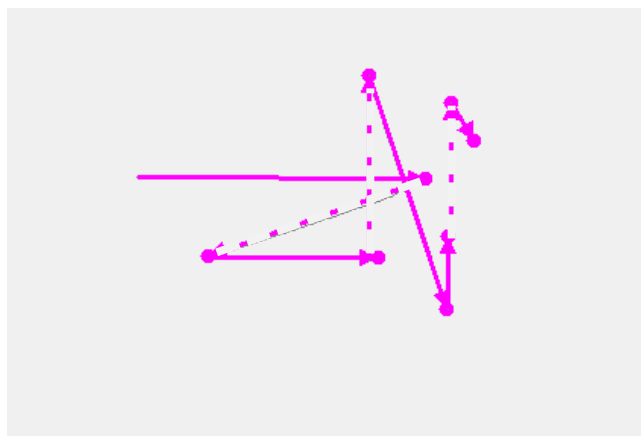


図 4.4 実証実験結果の一例 「式」

第5章 結言

本研究では、有向線分情報を伝達することができる装置としてアクティブホイールマウスを開発した。さらに、その装置を用い、指腹部の滑り知覚特性を調べる心理物理実験を行い、その結果をまとめた。

具体的には、ホイール形状の変化(凸点の付加や厚さの違い)による知覚の影響について調査し、特に、長さに関しては凸点の付加による効果を確認することができた。このホイール選定実験に基づいて、「凸あり+薄い」ホイールを選定した。次に、「凸あり+薄い」ホイールを用いて、知覚した滑り量を提示時間と提示速さに関するべき関数でモデル化した。最後に、この滑り知覚モデルに基づいて、「才」「弌」「也」など、簡単な漢字を想定した接続線分を知覚させる実証実験を行った。実証実験では、停止・知覚・動作戦略により、知覚した線分に基づいてマウスを動かしてもらい、マウスの動いた軌跡から文字が知覚できることを確認した。

今後の課題としては、

- (1) ペンの上げ下げを提示する
 - (2) 書道における運筆を教示するために、長さや方向をもつ線分の接続としての字形だけでなく、速度も含めて線画を提示する
 - (3) 停止・知覚・動作戦略以外にオンライン知覚・動作戦略で線画を提示することにより、曲線も提示できるようにする
- などが考えられる。

本研究は、日本学術振興会科学技術研究費補助金、基盤研究(B) 15H02929「弱い力による「誘発」に着目した動作教示手法の提案と一般手法に対する多次元的比較」、および萌芽研究 No. 25560112「力/位置連成動作を教示する力学的インタフェースと連成動作学習戦略」の支援による。

参考文献

- [1] Syed Muammar Najib Syed Yusoh, Yoshihiko Nomura, Ryota Sakamoto and Kazuki Iwabu, “A Study on the Duration and Speed Sensibility via Finger-Pad Cutaneous Sensations” , International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012)
- [2] Salada, Mark, et al. "Fingertip haptics: A novel direction in haptic display." Proceedings of the 8th mechatronics forum international conference. 2002.
- [3] Kyung, Ki-Uk, Seung-Chan Kim, and Dong-Soo Kwon. "Texture display mouse: vibrotactile pattern and roughness display." *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 12.3 (2007): 356-360.
- [4] Tsagarakis, Nikolaos G., T. Horne, and Darwin G. Caldwell. "Slip aestheasis: A portable 2d slip/skin stretch display for the fingertip." *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint.* IEEE, 2005.
- [5] Moscatelli, Alessandro, Abdeldjalil Naceri, and Michael Ernst. "Navigation in the fingertip." *World Haptics Conference (WHC), 2013.* IEEE, 2013.
- [6] Gleeson, Brian T., Scott K. Horschel, and William R. Provancher. "Design of a fingertip-mounted tactile display with tangential skin displacement feedback." *Haptics, IEEE Transactions on* 3.4 (2010): 297-301.
- [7] Koslover, Rebecca L., et al. "Mobile navigation using haptic, audio, and visual direction cues with a handheld test platform." *Haptics, IEEE Transactions on* 5.1 (2012): 33-38.
- [8] Ho, Colin, et al. "The Slip-Pad: A haptic display using interleaved belts to simulate lateral and rotational slip." *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE.* IEEE, 2015.

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御助言を賜りました三重大学工学部 野村由司彦教授に厚く御礼申し上げます．この場をお借りして謹んで感謝の意を表します．

また実験に協力頂いたプロセス解析研究室のメンバーにお礼申し上げます．特に実験のサポートを最後までしてくれた浅井悠太君，実験ためのプログラム作成に協力してくれた木下真君，そして大学院 2 年間の学生生活に多くの刺激と楽しさを与えてくれた小林龍太郎君と成田卓己君に深く感謝します．

本研究においてアクティブホイールマウスの作成に用いたステッピングモータを御提供頂きました，ミツミ電機株式会社様にも深く御礼を申し上げます．

最後に，本論分の作成に当たり，多大な御協力を頂きました 野村由司彦教授に重ねて御礼申し上げます．