

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 総合情報学専攻 博士前期課程		
氏名	横山 牧	学籍番号	1130082
論文題目	視触覚クロスモーダル現象に基づく凹凸感の強調		
要旨	<p>スマートフォンに代表されるように、タッチパネルを搭載した携帯端末が近年急激に普及している。さらに日本語入力においては、このタッチパネル特有の「なぞり動作の認識技術」を活かした「フリック入力」という入力方式が導入された。しかしながら、タッチパネルはPCや従来の携帯電話端末と異なり、キーボードの凹凸のような触覚的手掛かりによるキーの位置呈示が欠けている。物理的なキーが実際にあるPCや従来の携帯電話端末では、ユーザが知覚するキーの位置とデバイスが認識するキーの位置がずれることはなかった。一方でタッチパネルにはこのような触覚的なキー位置の呈示がないため、ユーザの意図と端末の認識の間に容易にずれが生じてしまい、入力操作が難しいという問題がある。</p> <p>この問題を解決するため、タッチパネルに触覚的手掛かりを付加する手法が数多く提案されてきた。しかしながらこれらの手法では、キー位置の呈示が出来ない、呈示の空間分堪能が低い、大掛かりな呈示装置が必要であるなど、携帯端末やフリック入力には応用出来ないという問題があった。</p> <p>最も簡単に指の位置や移動を呈示し、かつ携帯性を損なわずに触覚的手掛かりを付加する手法として、ソフトウェアキーボードのキーの境界線に沿って、畝のような段差を設けたシートをタッチパネルに貼り付ける手法が考えられる。しかしながら単純に段差を設けてしまうと、キー入力を行わない場合にもタッチパネルに触れる度にその段差に触れてしまうため、キー入力以外の操作の妨げとなることが予想される。従って、キー入力を行う際には段差が存在するが、その他の操作を行う際には段差がなくなるように、段差のON/OFFを制御出来ることが理想である。さらに、これは簡便な装置によって実現されることが望ましい。実装が簡便であれば、据え置き端末から携帯端末まで、幅広い応用先が考えられる。</p> <p>そこで本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いることで、段差のON/OFFを制御する手法を提案する。これは常に段差は設けておきながら、視覚的な手掛かりを呈示した場合にのみ段差を知覚させる手法である。この手法では大掛かりな呈示装置は一切必要としないため、非常に簡便で携帯性も高い。</p> <p>本論文では、まずキー境界線に付加した触覚的手掛かりが、フリック入力によるテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを検証する。次に、この視触覚クロスモーダル現象の有効性を検証する基本的な実験を行うとともに、段差のON/OFFの制御可能性についても検証する。これらの実験結果をもとに、視覚的手掛かりの付加による主観的段差高さへの影響を定量的に評価する。また、この現象の原因を検証するために、被験者のなぞり動作を計測する実験を行う。最後に今後の展望を述べ、本論文の結びとする。</p>		

電気通信大学大学院 情報理工学研究科

平成 24 年度修士論文

視触覚クロスモーダル現象に基づく  
凹凸感の強調

学籍番号 1130082

氏名 横山 牧

総合情報学専攻 メディア情報学コース

主任指導教員 梶本 裕之 准教授 印

指導教員 高橋 裕樹 准教授 印

提出日 平成 25 年 1 月 30 日 (水)

# 概要

スマートフォンに代表されるように、タッチパネルを搭載した携帯端末が近年急激に普及している。さらに日本語入力においては、このタッチパネル特有の「なぞり動作の認識技術」を活かした「フリック入力」という入力方式が導入された。しかしながら、タッチパネルは PC や従来の携帯電話端末と異なり、キーボードの凹凸のような触覚的手掛かりによるキーの位置呈示が欠けている。物理的なキーが実際にある PC や従来の携帯電話端末では、ユーザが知覚するキーの位置とデバイスが認識するキーの位置がずれることはなかった。一方でタッチパネルにはこのような触覚的なキー位置の呈示がないため、ユーザの意図と端末の認識の間に容易にずれが生じてしまい、入力操作が難しいという問題がある。

この問題を解決するため、タッチパネルに触覚的手掛かりを付加する手法が数多く提案されてきた。しかしながらこれらの手法では、キー位置の呈示が出来ない、呈示の空間分堪能が低い、大掛かりな呈示装置が必要であるなど、携帯端末やフリック入力には応用出来ないという問題があった。

最も簡単に指の位置や移動を呈示し、かつ携帯性を損なわずに触覚的手掛かりを付加する手法として、ソフトウェアキーボードのキーの境界線に沿って、畝のような段差を設けたシートをタッチパネルに貼り付ける手法が考えられる。しかしながら単純に段差を設けてしまうと、キー入力を行わない場合にもタッチパネルに触れる度にその段差に触れてしまうため、キー入力以外の操作の妨げとなることが予想される。従って、キー入力を行う際には段差が存在するが、その他の操作を行う際には段差がなくなるように、段差の ON/OFF を制御出来ることが理想である。さらに、これは簡便な装置によって実現されることが望ましい。実装が簡便であれば、据え置き端末から携帯端末まで、幅広い応用先が考えられる。

そこで本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いることで、段差の ON/OFF を制御する手法を提案する。これは常に段差は設けておきながら、視覚的な手掛かりを呈示した場合にのみ段差を知覚させる手法である。この手法では大掛かりな呈示装置は一切必要としないため、非常に簡便で携帯性も高い。

本論文では、まず第 3 章で畝のような形状の触覚的手掛かりが、フリック入力のテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを検証する。

第 4 章では、この視触覚クロスモーダル現象の有効性を検証する基本的な実験を行い、第 5 章では、より微小な段差試料を用いることで、段差の ON/OFF の制御可能性を検証する。この実験結果をもとに、第 6 章では視覚的手掛かりの付加による主観的段差高さへの影響を定量的に評価する。第 7 章ではこの現象の原因を検証するために、被験者のなぞり動作を計測する。

最後に第 8 章で今後の展望を述べ、本論文の結びとする。

# 目次

概要	1
第1章 序論	4
1.1 タッチパネル端末の普及	4
1.2 タッチパネルへの触覚的手掛かりの付加	5
1.3 提案手法：視触覚クロスモーダル現象を用いた主観的段差の変化	12
1.4 論文の構成	15
第2章 ヒトの触知覚機構と視触覚クロスモーダル現象	16
2.1 ヒトの触知覚機構	16
2.1.1 皮膚の構造	16
2.1.2 形態学的に分類された機械受容器の種類	16
2.1.3 応答特性により分類された機械受容器の種類	18
2.1.4 段差の知覚	21
2.2 視触覚クロスモーダル現象	23
2.2.1 クロスモーダル現象とは	23
2.2.2 視触覚クロスモーダル現象による触覚閾値の変化	23
第3章 実験1：タッチパネルへの段差付加によるテキスト入力パフォーマンスへの影響の検証	25
3.1 実験器具の製作	25
3.2 実験手順	26
3.3 実験結果	27
3.4 考察	27
第4章 実験2：視覚的手掛かり付加による主観的段差高さへの影響の検証	28
4.1 試料の製作	28
4.2 実験手順	29
4.3 実験結果	30
4.4 考察	32
第5章 実験3：視覚的手掛かりの付加による主観的段差の ON/OFF 制御可能性の検証	33
5.1 微小段差試料の製作	33
5.1.1 切削による微小段差試料製作	33
5.1.2 印刷物の転写による微小段差試料製作	35
5.1.3 薄膜蒸着による微小段差試料製作	39
5.2 実験手順	43
5.3 実験結果	44
5.4 考察	46

第6章	実験4：視覚的手掛かり付加による主観的段差の高さ変化量の算出	47
6.1	実験手順	47
6.2	実験結果	48
6.3	考察	49
第7章	実験5：なぞり動作中の押付力の計測	50
7.1	試料の製作	50
7.2	実験環境	51
7.3	実験手順	54
7.4	実験結果	55
7.5	考察	58
第8章	結論	60
	謝辞	62
	関連発表	63
	参考文献	64

# 第1章 序論

## 1.1 タッチパネル端末の普及

スマートフォンに代表されるように、タッチパネルを搭載した携帯端末が近年急激に普及している。このタッチパネルはディスプレイと入力インタフェースの2つの機能を備えており、ディスプレイに表示された対象に直接触れて操作出来ることから、従来の端末と比べて操作の直感性が増したと言える。

さらに日本語入力においては、タッチパネル特有の「なぞり動作の認識技術」を活かした「フリック入力」という入力方式が導入された。これはプルダウンメニューの一種で、まずテンキーから子音をタッチで選択し(図 1.1①)、次に指を上下左右の4方向のいずれかにスライドさせることで母音を選択し(図 1.1②)、テキストを入力する方式である。最高2回の操作で1文字を入力出来ることため、従来のトグル入力方式(目標の文字までボタンを複数回押下する入力方式)よりも速くテキスト入力を行うことが出来るという利点がある。

### ① タッチで子音を選択

### ② 指をスライドして母音を選択

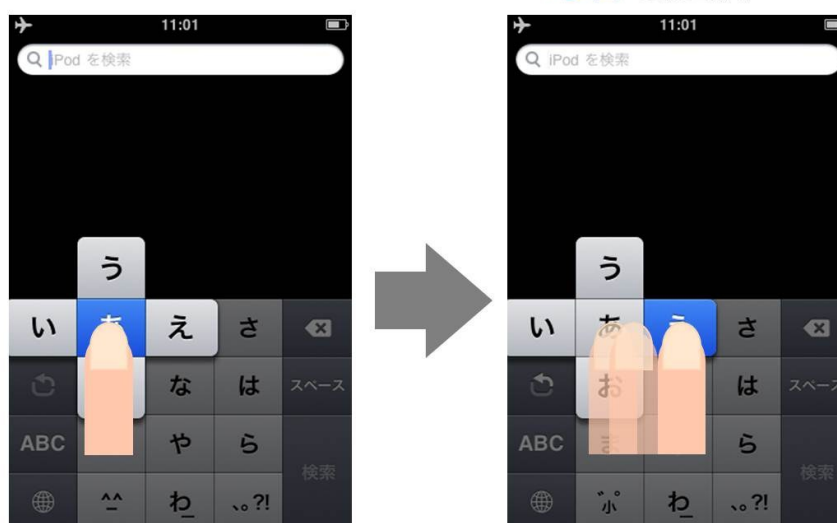


図 1.1 フリック入力

しかしながら、タッチパネルは PC や従来の携帯電話端末と異なり、キーボードの凹凸のようなキーの位置呈示やボタンの押し込み感覚など、触覚的フィードバックが欠けている。物理的なキーが実際にある PC や従来の携帯電話端末では、ユーザが知覚するキーの位置とデバイスが認識するキーの位置がずれることはなかった。一方でタッチパネルにはこのような触覚的なキー位置の呈示がないため、ユーザの意図と端末の認識の間に容易にずれが生じてしまい、入力操作が難しいという問題がある。

このようなタッチパネルの操作性に関しては、数多くの研究が成されてきた。Sears は、

据え置き型のタッチパネル、マウス、キーボードのテキスト入力パフォーマンスを比較した場合、タッチパネルは他の2つのデバイスと比較して入力速度が遅く、誤入力の割合も高いことを示した。またタッチパネルのパフォーマンスが低い原因として、触覚フィードバックがないことを上げている[11]。Hasegawa らも Sears と同様に、タブレット PC のソフトウェアキーボード（図 1.2 左）とハードウェアキーボード（図 1.2 右）を比較した場合、ソフトウェアキーボードの入力パフォーマンスが低いことを示し、原因としてやはり触覚フィードバックの欠如を上げている[12]。



図 1.2 Hasegawa らが比較を行ったタブレット PC  
(左：ソフトウェアキーボード，右：ハードウェアキーボード)

## 1.2 タッチパネルへの触覚的手掛かりの付加

タッチパネルの触覚的手掛かり欠如の問題を解決するための、携帯端末のタッチパネルに触覚を付加する手法は数多く提案されており、そのうちのいくつかはすでに実用化されている。Fukumoto らの ActiveClick（図 1.3）[25]や Poupyrev らの AmbientTouch（図 1.3）[26]、京セラの新感覚タッチパネル（図 1.5）[31][32]、Immersion 社の TouchSense（図 1.6）[27]は、携帯端末に小型の振動子や圧電素子を組み込むことで、クリック感などの触感を呈示している。

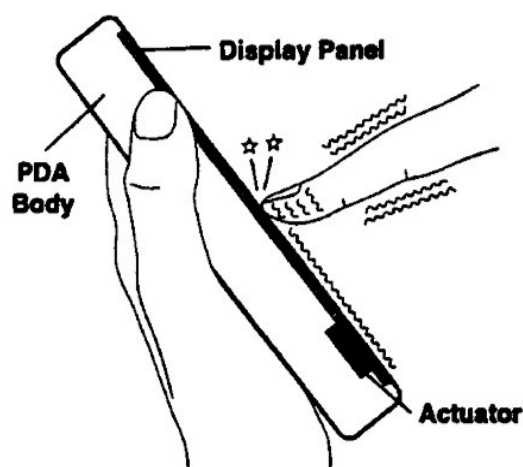


図 1.3 ActiveClick[25]

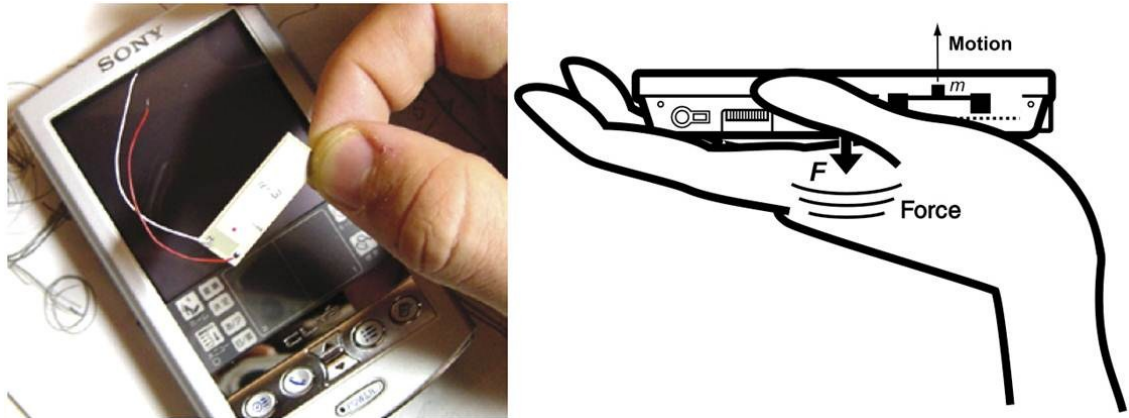


図 1.4 AmbientTouch[26] (左：振動子，右：触覚呈示原理)

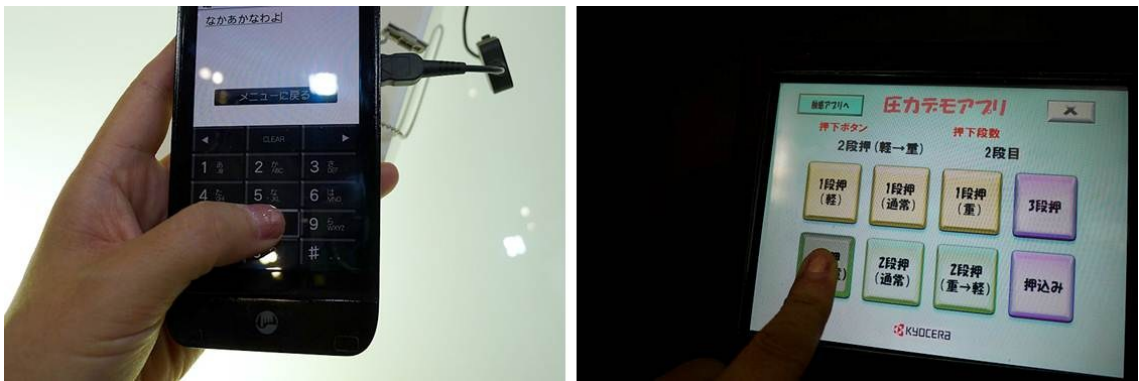


図 1.5 新感覚タッチパネル[32]

(左：ボタンのクリック感呈示，右：ボタンの7段階押し込み感呈示)

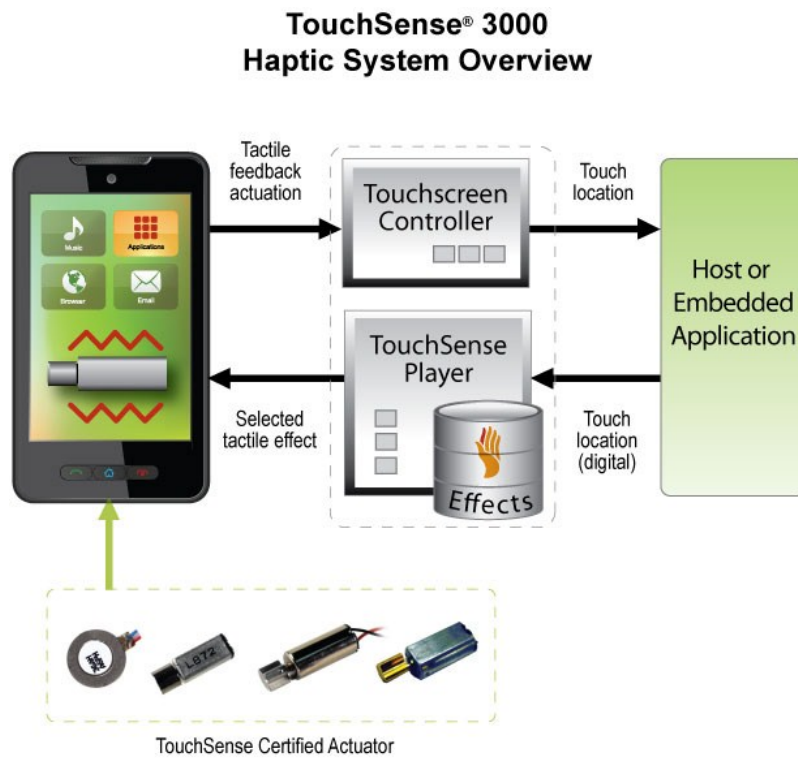


図 1.6 TouchSense[27]



このように、振動の付加によってタッチパネルのテキスト入力パフォーマンスの向上を狙う手法は数多くあり、またその評価も数多く成されている。Lee らは、タッチパネルに触覚フィードバックを付加することで、数字の入力パフォーマンスが向上することを報告している[28]。また Koskinen らは、触覚フィードバックの付加は入力パフォーマンスだけでなく、タッチパネルの使用感も向上させることを報告している（図 1.7） [29]。



図 1.7 Koskinen らが実験で使用したデバイス[29]

しかしながらこれらの手法は、振動によりボタンのクリック感を呈示しているため、従来のトグル入力のボタンを押し込んだときの感覚は呈示出来ても、フリック入力のように指をスライドさせたときの触覚フィードバックとして適切ではないと考えられる。すなわち、トグル入力はタッチパネルに対して垂直方向の指の移動だが、フリック入力は水平方向の移動であるため、フリック入力に適した触覚フィードバックを付加するためには、指がタッチパネル上を移動したことを呈示する必要があると考えられる。

これに対し Nashel らは、ユーザの指の位置によって呈示する振動パターンを変えることで、クリック感だけでなくボタンに触れているか否かを呈示する手法を提案している（図 1.8） [30]。Hoggan らは Nashel らが提案したようなユーザの指位置によって異なる振動パターンの呈示を、端末の振動子を用いて実際に行なっている。実験の結果、振動の付加によって正解率や入力速度が、ハードウェアキーボードのパフォーマンスに近付いたことを報告している（図 1.9） [35]。

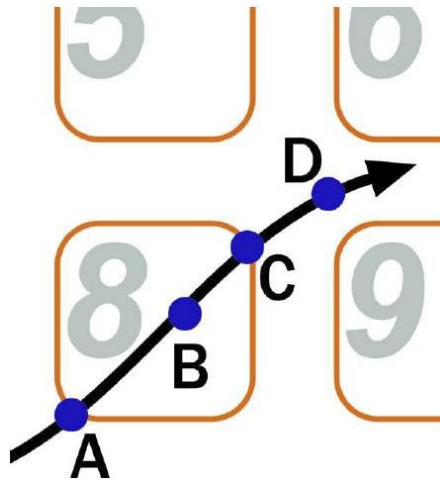


図 1.8 Nashel が提案した手法[30]

(指の位置ごとに、異なる振動パターンを与える。A：指がボタンに触れた、B：指がボタン内部にある、C：指がボタンから離れる、D：指はボタンに触れていない)



図 1.9 左：Hoggan らが実験で用いたデバイス

(左：ハードウェアキーボードの携帯端末、右：ソフトウェアキーボードの携帯端末)、右：実環境での使用を想定した実験の風景[35]

これらは振動によって指の移動を呈示する手法であるが、他には力を呈示する手法も提案されている。Bau らの TeslaTouch は、タッチパネル上の静電気を制御することで動摩擦係数を変化させ (図 1.10 下)、テクスチャ感や凹凸感を表現している (図 1.10 左上) [20]. また、嵯峨らの 2.5 次元ディスプレイでは、SPIDAR システムによって指を横向きに牽引することで凹凸感を呈示している (図 1.11) [22]. 宇戸らは手部に与える機能的電気刺激によって、凹凸面をなぞった際の力覚と皮膚感覚を再現し、バーチャルな凹凸を呈示している (図 1.12) [23].

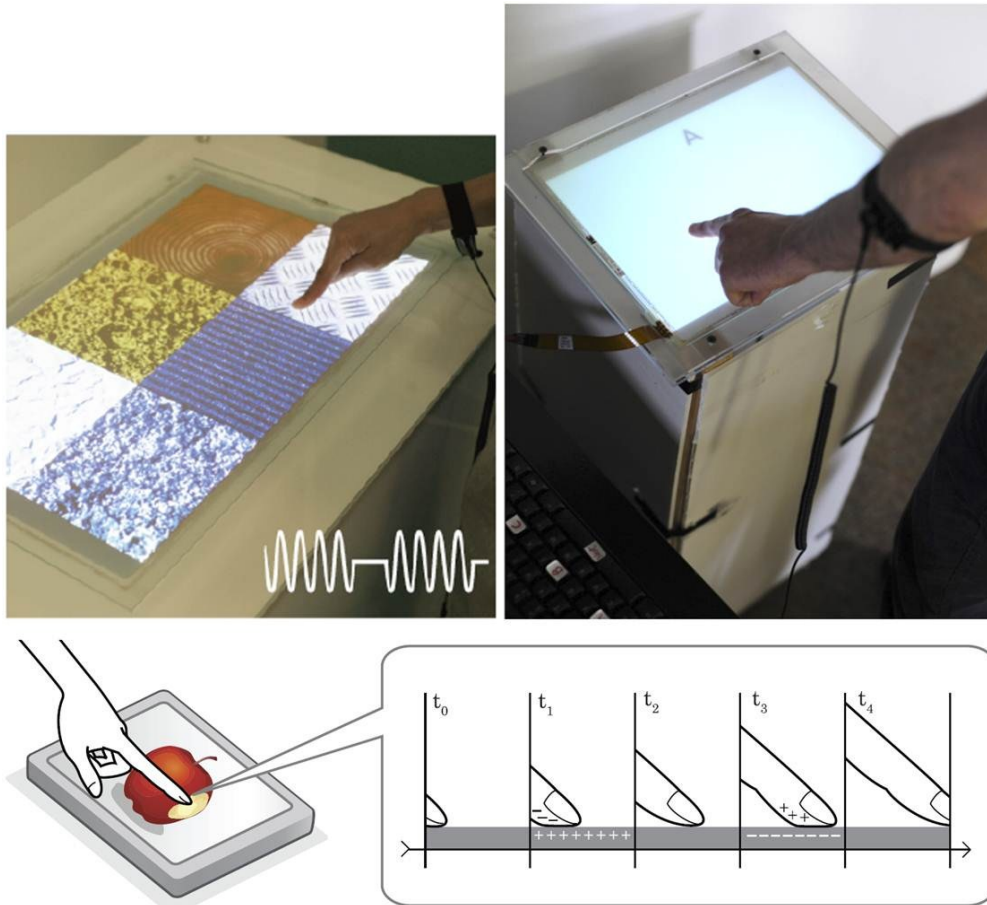


図 1.10 TeslaTouch[20]

(左上：テクスチャ感の呈示，右上：システム全体，  
下：指の移動量に応じて，タッチパネル上の静電気力を変化させる)

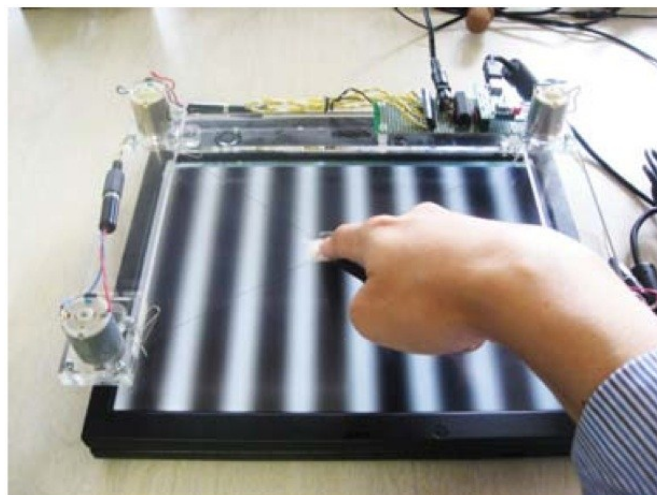


図 1.11 2.5次元ディスプレイ[22]

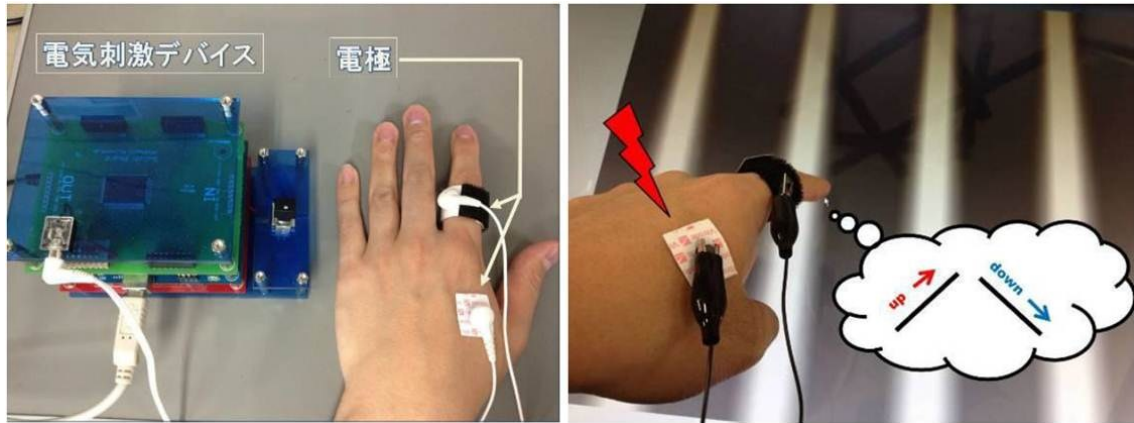


図 1.12 機能的電気刺激による凹凸面の呈示[23]

しかしながらこれらの手法は指全体へ触覚呈示であるため、呈示の空間分解能が低いという問題がある。そして、フリック入力が入力の際に上下左右の4方向に指を動かすため、4方向の違いをユーザに知覚させるためには、高い空間解像度が必要となる。

刺激素子を2次元平面上に配置することで、高い空間解像度で触覚呈示を行う手法も既に提案されている。Kajimoto らの Skeletouch では、電気刺激を行う領域と行わない領域を空間的に分布させることで、細かい線などを呈示している(図 1.13 右)。また透明電極を用いることで、タッチパネルへの触覚呈示も可能にしている(図 1.13 左)[38]。Jansen らの MudPad は、タッチパネルの下に設置した電磁石で磁性流体の粘度を制御することで、様々な空間的な粘性分布を呈示している(図 1.14)[21]。星野らは画面内の対象物体に合わせてディスプレイ自体をモータで上下に駆動させることで、物体の凹凸感を呈示している(図 1.15)[33][34]。また、Tactus Technology 社はマイクロ流体を制御することで、タッチパネル上に物理的な凹凸を出現させている(図 1.16)[24]。

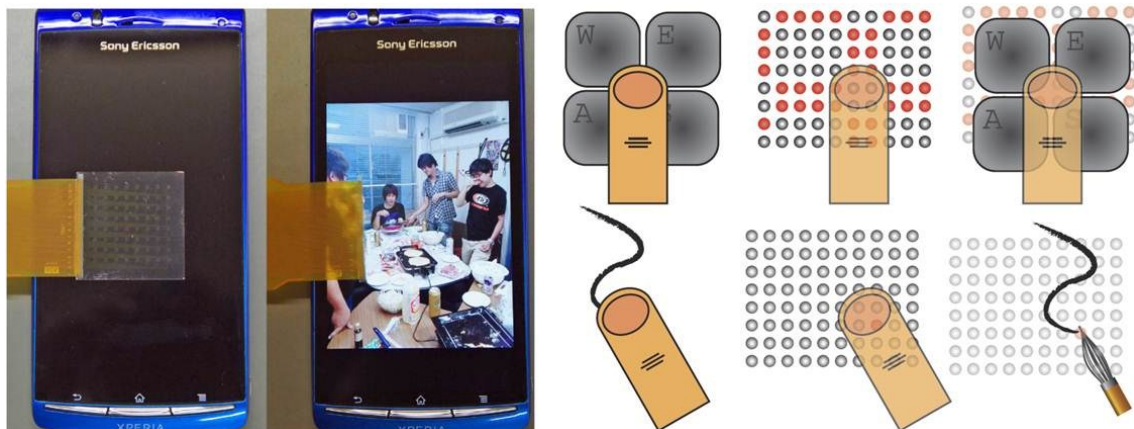


図 1.13 Skeletouch[38]

(左：透明電極，右：空間的に配置された電気刺激を行う点と行わない点)

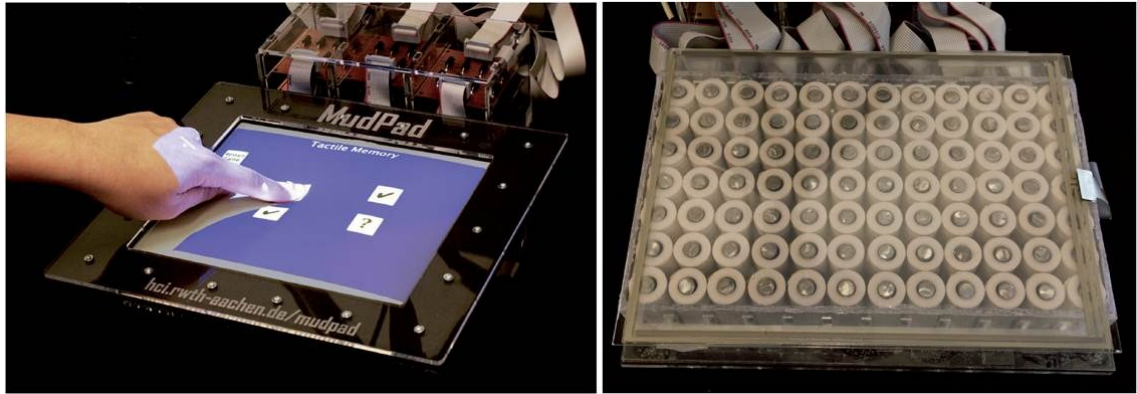


図 1.14 MudPad (左：全体図，右：磁性流体の制御装置) [21]

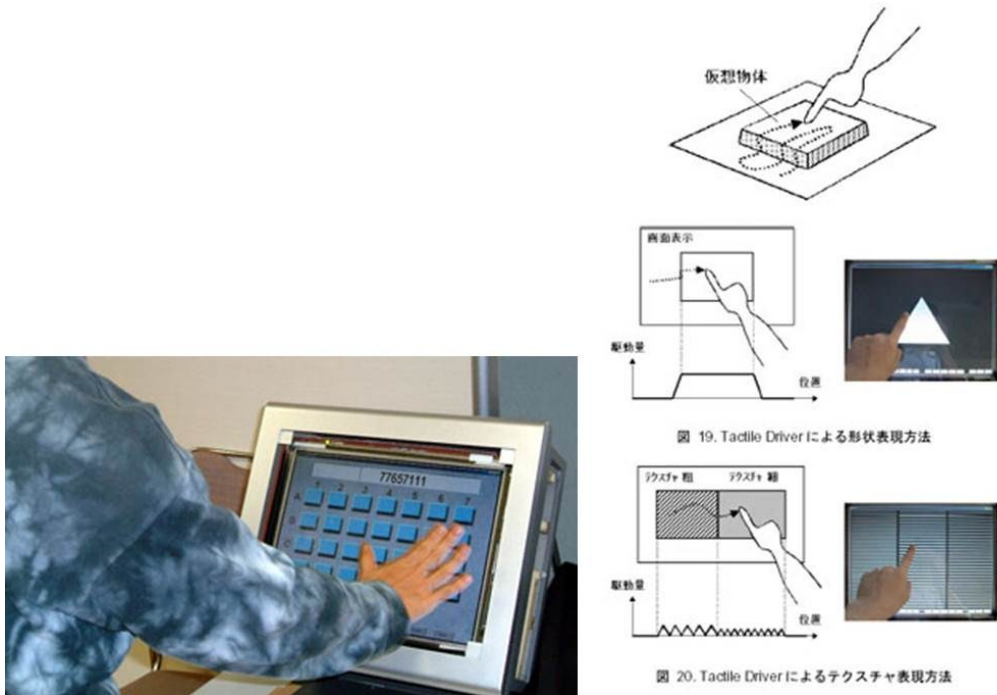


図 1.15 TactileDriver (左：全体図，右：呈示物体と駆動量) [34]



図 1.16 Tactus Technology (左：全体図，右：凹凸拡大図) [24]

しかしながら，これらの手法では触覚を付加するために電磁石やモータなどの大掛かりな装置を用いるため，日常的に携帯する携帯端末への実装は現在のところ難しいと考えられる。

大型の装置を必要とせず、かつフリック入力テキスト入力のパフォーマンスを向上させるような触覚を付加する最も簡単な手法は、実際の段差を利用することであると考えられる。しかしながら、例えば段差のついたシートをタッチパネル表面に貼り付けると、凹凸がテキスト入力以外の操作を妨げることが予想される。これに対して Fukumoto らは、段差のない透明なゲルシートを端末に表面に（図 1.17 左）、小さな突起状のゲルシートを端末の裏面に（図 1.17 右）貼り付けることでボタンのクリック感を呈示し、かつドラッグなどの表面をなぞる動作を阻害しない簡便な手法を提案している（図 1.17） [39]。しかしながらこの触覚付加手法では、ユーザは付加されるボタンのクリック感に好感を抱く一方で、入力速度や正解率などのテキスト入力パフォーマンスは向上しないことが分かっている。



図 1.17 左：端末表面に貼る PuyoSheet, 右：端末裏面に貼る PuyoDots[39]

### 1.3 提案手法：視触覚クロスモーダル現象を用いた主観的 段差の変化

最も簡単にタッチパネルのキーの位置を呈示し、かつ携帯性を損なわずに触覚的手掛かりを付加する手法として、ソフトウェアキーボードのキーの境界線に沿って畝のような段差を設けたシートを、タッチパネルに貼り付ける手法が考えられる（図 1.18）。

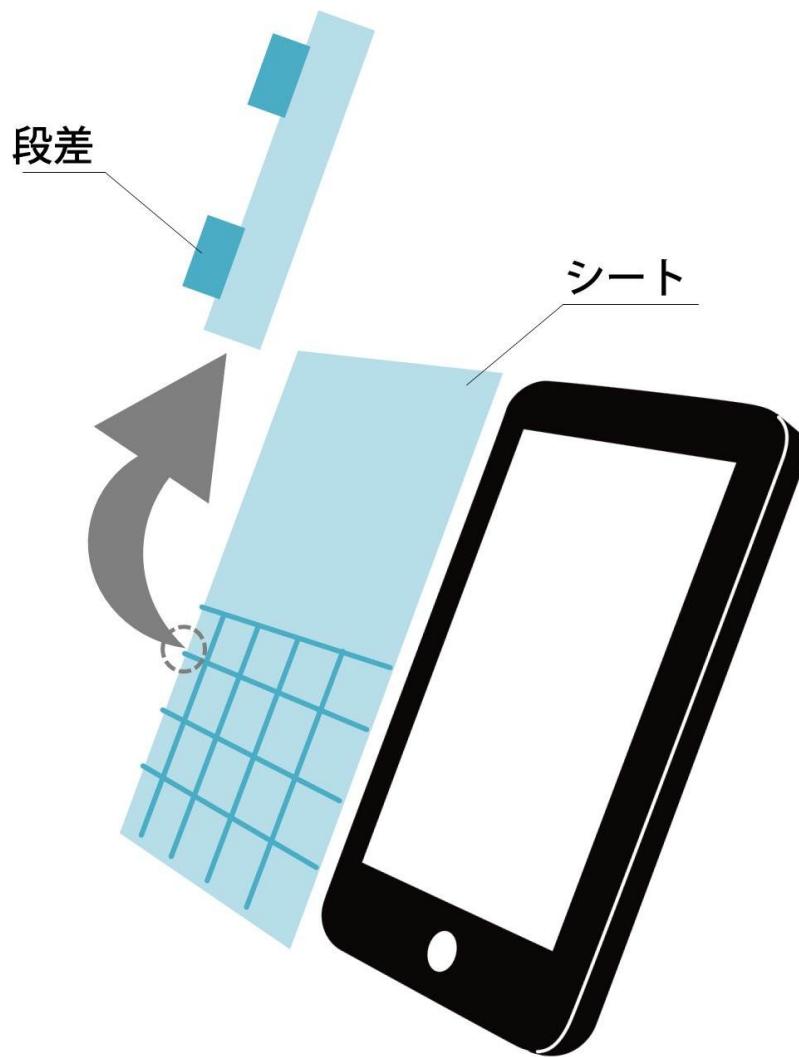


図 1.18 凹凸つきシートの貼付け

しかしながら単純に段差を設けてしまうと、キー入力を行わない場合にもタッチパネルに触れる度にその段差に触れてしまうため、キー入力以外の操作の妨げとなることが予想される。従って理想的には、キー入力を行う際には段差が存在するが、その他の操作を行う際には段差が消えるように、段差の ON/OFF を制御出来る手法が望ましい。さらにこの状態を簡便な装置で実現することで、据え置き端末から携帯端末まで応用先が幅広くなると考えられる。

そこで本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いることで、段差の ON/OFF を制御する手法を提案する。本研究が発見したこの現象では、通常は知覚が難しいヒトの段差知覚閾値周辺の微小な段差（数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ ）（図 1.19 左下）のある箇所に線のような視覚的手掛かりを付加することで、ヒトはこの段差を強調して知覚する（図 1.19 右下）。我々はこの現象を、食品包装用ラップフィルムを用いて確認した。これは視覚的手掛かりの有無による主観的段差の強調と捉えることが出来る。

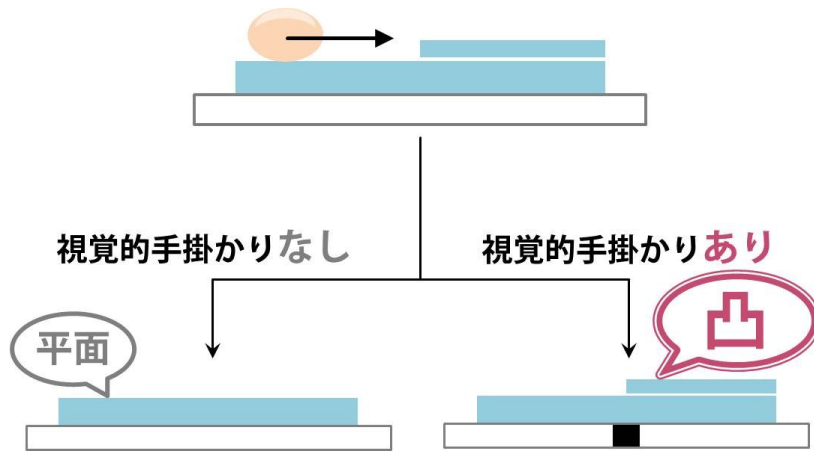


図 1.19 視触覚クロスモーダル現象による主観的段差高さの変化

本研究ではこの現象を，ON/OFF 制御が可能なタッチパネルへの触覚付加に応用することを考える．図 1.18 で示したキーの境界線に沿って付加する段差の高さを，ヒトの段差知覚閾値周辺に設定し，この段差がついたシートをタッチパネルに貼る（図 1.20 左）．通常，この盛り上がりは知覚閾値周辺であるためにユーザには知覚されにくい（図 1.20 右上）が，キーボードを使用するときにはソフトウェアキーボードの画像が視覚的手掛かりとなり，段差が容易に知覚される（図 1.20 右下）．すなわち，単純な段差付きシートと視覚的手掛かりの表示／非表示の切り替えのみで，キーの境界線の段差を主観的に生成／消失させるというものである．

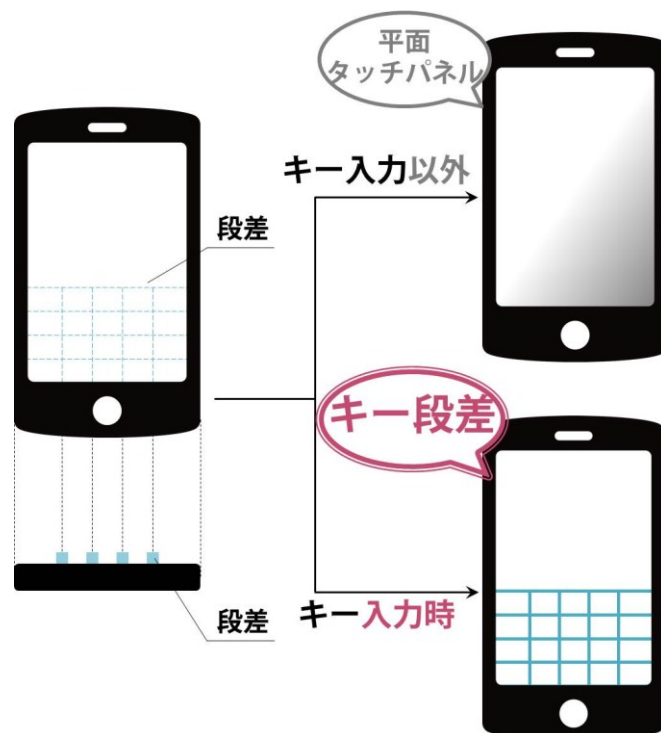


図 1.20 タッチパネルへの触覚的手掛かり付加

これによりタッチパネルのキー位置が触覚的に呈示されるため，端末が認識する指位置とユーザの想定する指位置のズレが小さくなり，フリック入力の精度が向上すると考えら



れる。またこの手法では大掛かりな装置は一切必要としないため、非常に簡便で携帯性も高い手法となることが予想される。

## 1.4 論文の構成

本論文では、まず第 2 章で本研究に関する基礎的な知識について、ヒトの触知覚機構とクロスモーダル現象の 2 つの観点から述べる。

第 3 章では、1.3 で提案した畝のような触覚的手掛かりの形状によって、フリック入力のテキスト入力パフォーマンスが向上するか否かを検証した実験について述べる。

第 4 章では、提案手法で用いる視触覚クロスモーダル現象の有効性を検証するため、視覚的手掛かりの付加と主観的段差高さの変化の関係を検証する。また、第 4 章で用いた試料の段差高さがヒトの段差知覚閾値を大きく上回っていたことから、第 5 章ではより知覚閾値に近い試料を用い、段差の ON/OFF の制御可能性を検証する。この実験結果をもとに、第 6 章では視覚的手掛かりの付加と主観的段差の高さについて定量的な評価を行う。

第 7 章では、視触覚クロスモーダル現象による主観的段差高さの変化の原因を検証するために、被験者のなぞり動作を観察する。

最後に第 8 章では、本論文の結論を述べると共に今後の展望について述べる。

## 第2章 ヒトの触知覚機構と視触覚クロスモーダル現象

本章では，本研究に関する基礎的な知識について，ヒトの触知覚機構とクロスモーダル現象の2つの観点から述べる。

### 2.1 ヒトの触知覚機構

#### 2.1.1 皮膚の構造

皮膚は表皮，真皮，皮下組織の3層から成っており，それぞれの層には異なる触覚受容器が分布している。(図 2.1)。最上層の表皮は約 1 mm と厚く，最深部にはメルケル細胞が存在する。2層目の真皮は厚さ 1~3 mm の密な結合組織で，最外層にはマイスナー小体が，深層にはパチニ小体やルフィニ終末が存在する。最下層の皮下組織は疎な結合組織である。

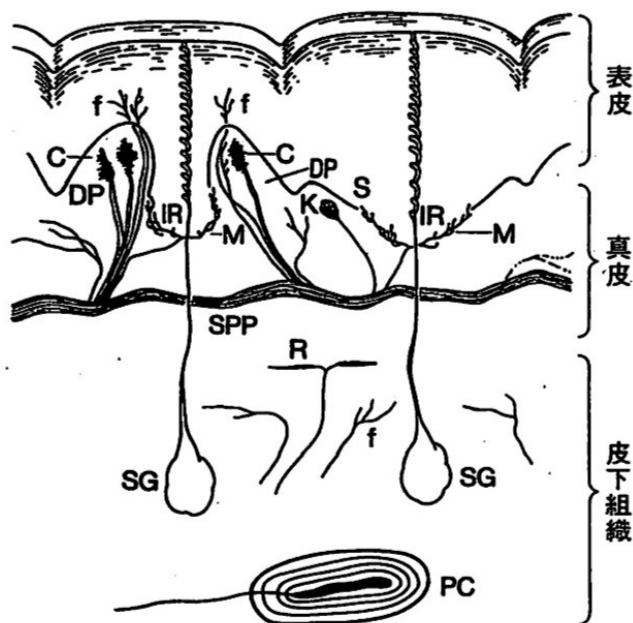


図 2.1 皮膚の構造[1]

#### 2.1.2 形態学的に分類された機械受容器の種類

触覚受容器は機械刺激によって活動することから，機械受容器とも呼ばれる。ここでは形態学的に分類された4種類の機械受容器について簡単に述べる。

- メルケル細胞

無毛部皮膚では汗腺の通過する表皮最深層の表皮突出部に集合しており，有毛部ではメルケル細胞が 50~70 個集合して隆起した，ピンカスの触盤として存在する。メルケル細

胞からは突起が数本出ており、これらの突起が周囲からの刺激を受容すると考えられている (図 2.2).

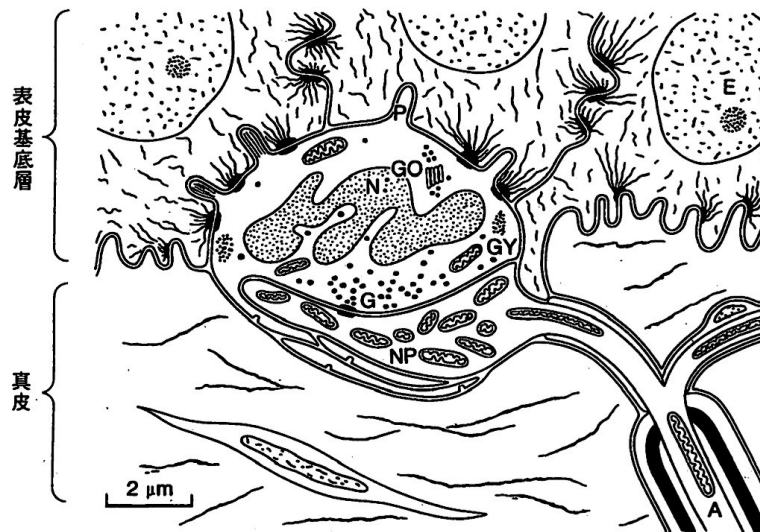


図 2.2 メルケル細胞の構造[1]

- マイスナー小体

指や手掌の皮膚の表皮の細かい溝に対応する真皮乳頭に存在する、比較的大きい受容器である (長さ: 150 μm, 直径: 40~70 μm) (図 2.3).

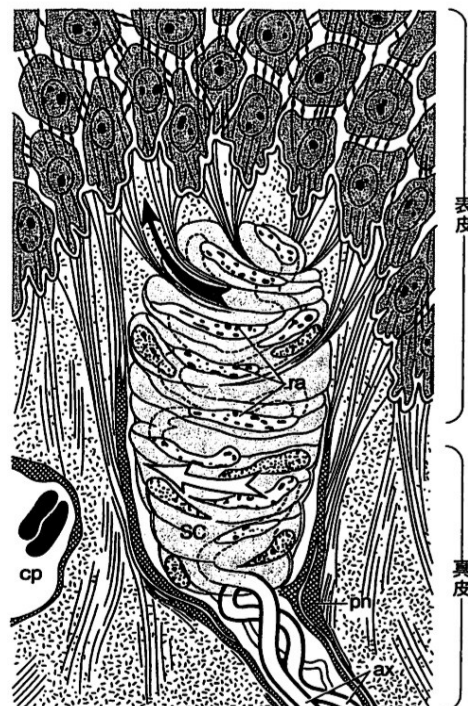


図 2.3 マイスナー小体の構造[1]

- ルフィニ終末

有毛部または無毛部皮膚の真皮に存在し、紡錘形で長さ 0.5~2.0 mm である (図 2.4).

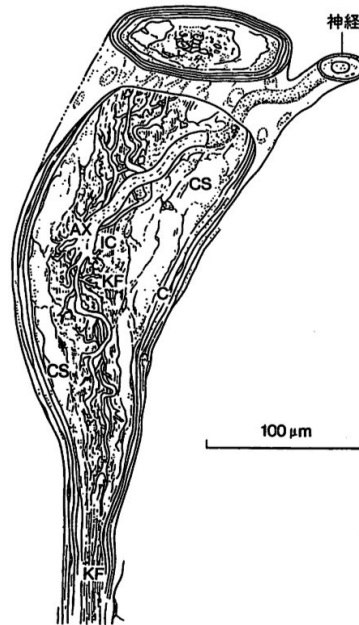


図 2.4 ルフィニ終末の構造[1]

- パチニ小体

20~70層のカプセルが、棍棒状の1本の無髄となった神経終末を含む内芯をとりまいている(図 2.5)。このカプセルが受容器の順応の速さを決めている。全体の大きさは長さ0.5~2.0 mm、径は約0.7 mmである。神経軸索の先端に繊毛様の突起(直径6 nm)があり、内芯の膜に入り込んでいる。類似の突起は他の受容器(メルケル盤、毛包受容器、ゴルジ・マツオニ小体など)にもみられる。この突起が、外部からの機械的刺激を軸索の受容膜に伝えると考えられる。

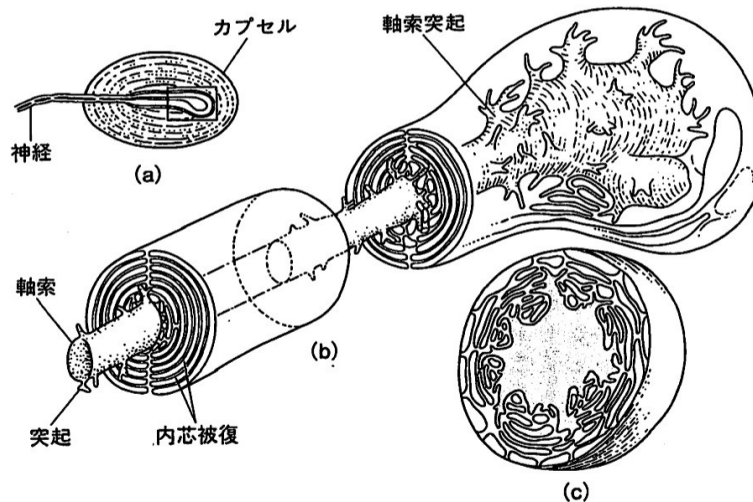


図 2.5 パチニ小体の構造[1]

### 2.1.3 応答特性により分類された機械受容器の種類

2.1.2 では形態学的に分類された機械受容器について述べたが、他に生理学的に分類する

方法もある。特に、矩形波状に持続する皮膚の変形刺激に対する応答と順応の様子より、順応速度と受容野の大きさの2つ側面から、機械受容器は4種類に分類される。順応速度に関しては、刺激が与えられている間応答が持続する遅順応型（SA型：Slowly Adapting）と、刺激の始めと終わりにのみ応答する速順応型（RA型：Rapidly Adapting）に分類される。また受容野の広さに関しては、受容野が狭く境界が比較的鮮明であるI型（SA I, RA I）と、受容野が広く境界が不鮮明なII型（SA II, RA II）に分類される。この応答特性によって分類された各ユニット（SA I, SA II, RA I, RA II）は、2.1.2で述べた4つの受容器（メルケル細胞、ルフィニ終末、マイスナー小体、パチニ小体）であると推定されている。

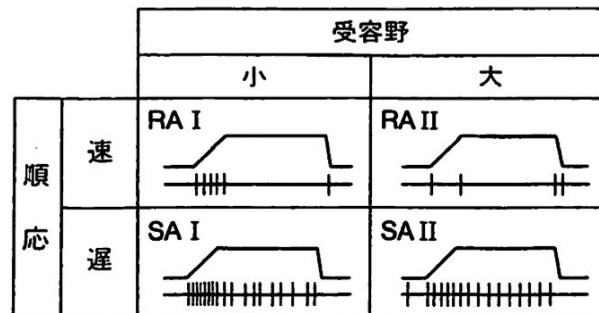


図 2.6 ヒト手指皮膚の触覚受容器の分類[1]

SA I, RA Iユニットの受容野はほぼ円形ないし卵形で、この受容野を外れると急激に感度が低下する（図 2.7 左上）。これらのユニットは、鋭い辺縁をもつ物体が受容野を横切って接触したときによく応答する。分布密度は指先において最も高く、中節、基節、手掌にいくに従って密度は低くなる（図 2.7 左下、図 2.8 下）。特に RA Iユニットは、部位による密度差が顕著である。RA II, SA IIユニットでは受容野のほぼ中心に感度の最大点が1点だけあり、周辺に向かって緩やかに感度は低下する（図 2.7 右上）。これらのユニットの受容野が大きく、また境界が不鮮明なのは、受容器が皮下の深いところに存在するためである。分布密度は指先や手掌によらず一様であり、全体的に低い（図 2.7 右下、図 2.8 下）。

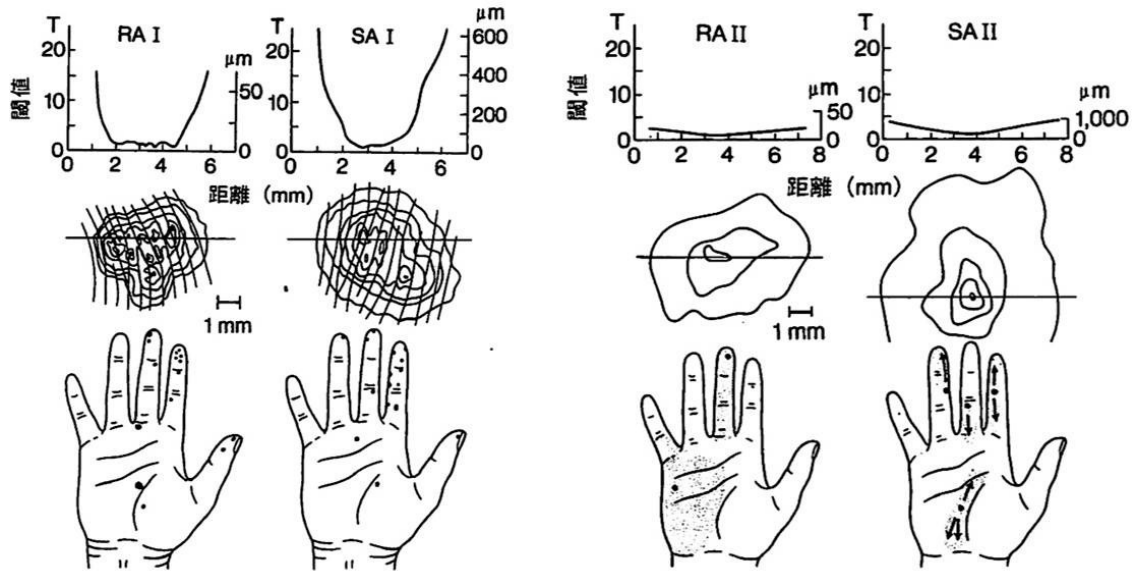


図 2.7 受容ユニットごとの受容野[1]

(上：1つの受容野における閾値の分布，中央：1つのユニットの受容野の感度分布を等高線で示したもの，下：1点が1つのユニットに対応)

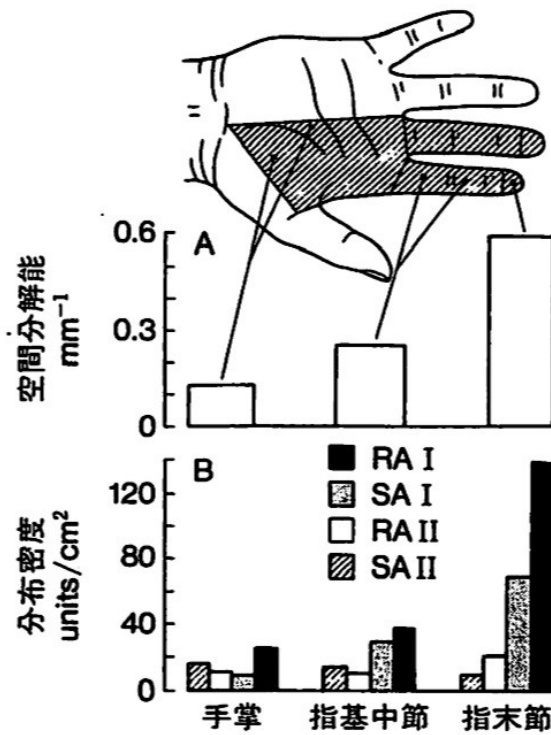


図 2.8 空間分解能と受容器密度の相関（上：空間分解能，下：分布密度）[1]

以上4つの受容器に関する特徴をまとめると，図 2.9 のようになる。

	SAI	SAII	FAI	FAII
受容器	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacinian
順応性	遅い	遅い	速い	速い
受容野の境界	明瞭	不明瞭	明瞭	不明瞭
平均的受容野面積 <sup>4)</sup>	11.0 mm <sup>2</sup>	59.0 mm <sup>2</sup>	12.6 mm <sup>2</sup>	101.0 mm <sup>2</sup>
受容器当たりの抹消感覚機構 <sup>4)</sup>	4-7	1	12-17	1
皮膚表面からの相対的深さ	浅い	深い	浅い	深い
形状・寸法 <sup>2)</sup>	卵円形(6-12 μm) 触覚円板(直径7 μm, 厚さ1 μm)	紡錘形 (長さ0.5mm-2mm)	楕円体(長軸:40-100 μm,短軸:30-60 μm)	楕円体(長軸: 2.0-45mm,短 軸:10-20mm)
手掌面における神経支配密度 <sup>3)</sup>	25% (4250本)	19% (3230本)	43% (7310本)	13% (2210本)
空間加算特性 <sup>12)</sup>	なし	--	なし	あり
時間加算特性 <sup>12)</sup>	--	あり	なし	あり
皮膚表面温度影響 <sup>12)</sup>	あり	あり(100Hz以上)	なし	あり
感覚発生に必要なパルス数 <sup>6,19)</sup>	連続パルス(20程度)	少しでは関与なし	単一パルス	連続パルス
触神経電気刺激による発生感覚 <sup>18)</sup>	Pressure	--	Tapping(1Hz) Flutter(10Hz) Vibration(50Hz)	Tickling/Vibration
周波数レンジ	0.4-100Hz	0.4-100Hz	10-200Hz	70-1000Hz
最小閾値(周波数)	10 μm(50Hz)	3 μm(50Hz)	6 μm(40Hz)	0.1 μm(250Hz)
機能的特徴	強度検出 空間パターン検出 皮膚曲率検出	皮膚の引っ張り検出	速度検出 空間パターン検出 皮膚曲率変化検出	加速度検出 振動検出
刺激(皮膚変形)と 応答(発火頻度) <sup>6)</sup>				
神経線維	伝導速度が速い(40-70m/s)、太い直径(8-13 μm以上)の有髄神経線維。 体性感覚野まで2つ程度の中継で伝達。			

図 2.9 ヒトの無毛部の機械的受容器の分類と特徴[3]

## 2.1.4 段差の知覚

段差をなぞった際の皮膚の変形を考えてみると、段差を乗り越えたときに皮膚がわずかに振動すると予想される。すなわち、段差は振動の検出と同じ機構で検出されていると考えられる。ここでは基本的な振動知覚に関して述べた後、段差知覚について報告されている

る研究について述べる。

- 振動の知覚

2.1.1 で述べた通り、受容器は分布する位置や構造が異なるため、反応しやすい振動周波数も自ずと異なってくる。図 2.10 は受容器ごとの振動検出閾を示したものである。横軸が振動周波数、縦軸が振動の振幅である。曲線で示された 4 つの受容器の曲線の下側包絡線が、ヒトの振動感応曲線となる。図 2.10 より、100~300 Hz の振動には FA II が最もよく反応し、100 Hz より低い周波数の振動には FA I がよく反応し、40 Hz 前後で最も閾値が高いことが分かる。

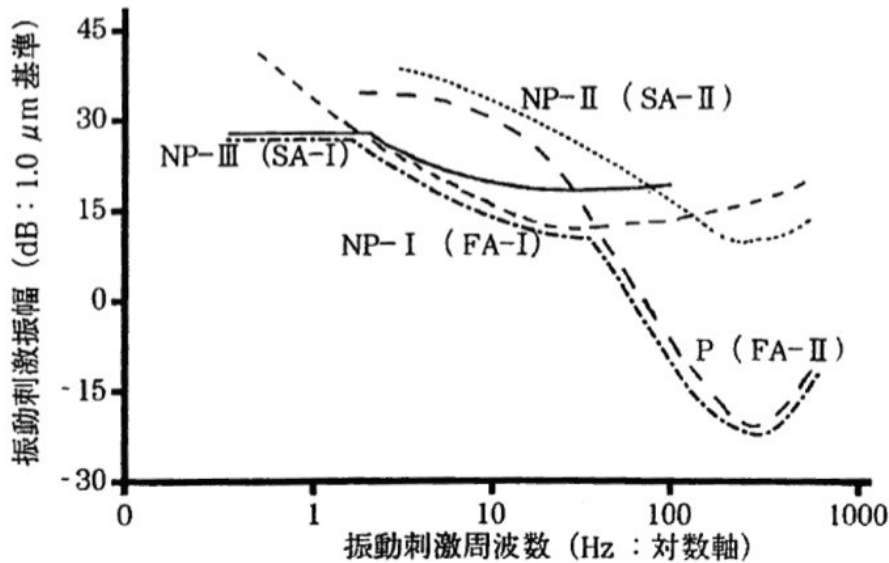


図 2.10 振動閾検出曲線[2] (P：パチニ小体，NP：パチニ小体以外の受容器)

- 段差の知覚

段差の知覚に関して、宮岡らは微小な畝を形成した金属片を用いて凹凸認識の実験を行った結果、ヒトが取得している情報は表面の凹凸周波数ではなく、凹凸の振動の幅であることを明らかにした[4].

段差の知覚閾値に関して大岡らは、図 2.11 のような可変段差呈示装置を用いて微小段差を呈示した実験より、弁別閾は触運動速度や能動触、受動触に関係なく 2~3  $\mu\text{m}$  の間であることを示した[5]. また、段差試料の温度を 15 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却して実験を行ったところ、弁別閾は 2.8  $\mu\text{m}$  となり試料温度が 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上の場合とほとんど変化がなかったことから、段差刺激に対しては 20 $^{\circ}\text{C}$ 以下でも感度が低下しない FA I が関与していることを示している。

また触運動速度に関して大岡らは、受動触において段差試料の移動速度を 40mm/秒と 20mm/秒で比較した場合、40mm/秒の場合に弁別閾値が高くなったことを報告している[6]. また同じ段差の高さを呈示した場合では、移動速度が大きい方の段差を大きく感じることも報告している。

段差の形状と神経の活動に関して LaMotte らは、段差の形状によって SA の活動頻度や程度が異なることを報告している[7].



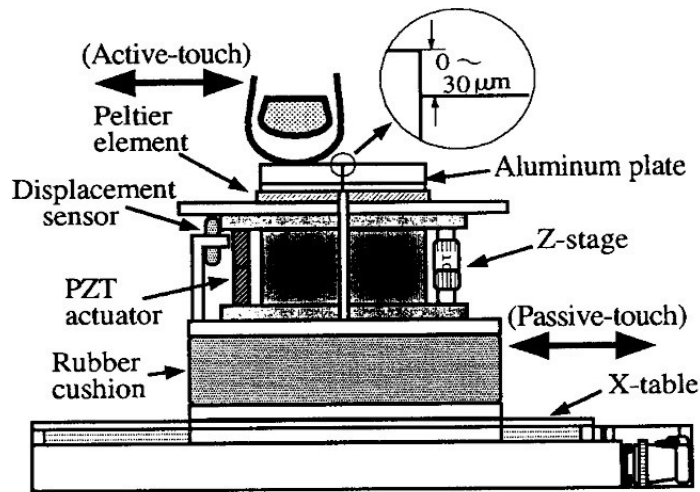


図 2.11 可変段差呈示装置 (0~30  $\mu\text{m}$  の微小段差を呈示出来る) [5]

## 2.2 視触覚クロスモーダル現象

### 2.2.1 クロスモーダル現象とは

クロスモーダル現象とは、複数の感覚器に対して刺激を与えた際に生じる相互作用である。クロスモーダル現象は視触覚に限らず見られる現象で、視聴覚クロスモーダルによるマガーク効果（「ガ Ga」と発音する際の映像と、「バ Ba」と発音した時の音を同時に呈示すると、「ガ」でも「バ」でもなく「ダ Da」と言っているように知覚する現象）[18]、ダブルフラッシュ効果（1 回点滅するフラッシュを「カチカチ」というクリック音と共に呈示すると、フラッシュが 2 回点滅しているように見える現象）[19]などがよく知られている。

ここでは、特に本研究が着目する視触覚クロスモーダルについて述べる。

### 2.2.2 視触覚クロスモーダル現象による触覚閾値の変化

これまで数多くの視触覚クロスモーダル現象に関する研究成果が報告されてきているが、ここでは特に、本研究が着目する視覚による触覚閾値の変化について報告されたものについて述べる。

Taylor らや Press ら、Serino らは、触覚刺激を与えている箇所を見る条件と見ない条件を比較した場合、刺激箇所を見る条件の方が触覚の 2 点弁別閾値が向上することを報告している[15][16][17]。2 点弁別閾値以外でも、Taylor らは触覚刺激部位を見ることで、触覚刺激の縞の方向弁別閾が向上したことを報告している[8]。

刺激箇所を捉える視野位置に関して Honoré らは、触覚刺激箇所を視野の中心で捉えることで、触覚刺激への反応時間が短くなることを報告している[9]。

視線方向ではなく、注意の方向とクロスモーダルに関して Driver らは、ある感覚器の注

意を意識的に空間の 1 点に向けているとき、その感覚だけでなく他の感覚でも、その場所での処理能力は向上することを報告している[13].

与える視覚情報についても検証が行われており、Tipper らは首や顔など、被験者が自身では直接見ることの出来ない部位に触覚刺激を与えた場合でも、ビデオカメラなどで撮影した映像を通して刺激部位を見ることで、刺激への反応速度が向上することを報告している[14]. また Kennett らは、触覚刺激とは関係ない視覚情報を体表面に呈示した場合でも、触覚の 2 点弁別閾が向上することを報告している[10].

このように、視触覚クロスモーダル現象に関しては数多く報告が成されているが、その多くが 2 点弁別閾や反応時間について検証したものであり、本研究が発見した段差知覚に関しては検証されていない。また、この現象においては与える視覚的手掛かりは指で隠れる上に、触覚刺激箇所は視野中心で捉える続けるため、これまでの視覚情報の付加や視野位置に関する報告からの議論も出来ない。従って本論文では第 4 章から第 7 章において、この視触覚クロスモーダル現象に関して検証した実験について報告する。

# 第3章 実験 1：タッチパネルへの段差付加によるテキスト入力パフォーマンスへの影響の検証

1.2 で紹介した先行研究により，振動付加によってテキスト入力パフォーマンスが向上することが報告されていた。しかしながら，キーの境界に触覚的手掛かりを付加し，かつフリック入力を用いてテキスト入力パフォーマンスの評価は行われていなかった。

従って本章ではキーの境界に付加した触覚的手掛かりが，フリック入力によるテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを検証した。

## 3.1 実験器具の製作

触覚的手掛かりである段差を付加するために，iPod touch（Apple 社，第 3 世代）の日本語キーボード（テンキー）のキー境界線に沿って綿ミシン糸（カネボウ株式会社，カネボウウカタン糸 50 番，直径：0.159 mm）を這わせた（図 3.1 右）。糸は両面テープで両端を留め，ズレを防ぐために上から食品包装用ラップフィルム（旭化成ホームプロダクツ株式会社，サランラップ 20 m，厚さ：0.014 mm）を被せた。このとき，ディスプレイに表示される文字を隠さないように，糸の長さを調節した。また段差効果の比較対象として，ラップフィルムのみを被せた iPod touch も製作した（図 3.1 中央）。



図 3.1 実験器具

（左：通常の iPod touch，中央：触覚的手掛かり無し，右：触覚的手掛かり有り）

## 3.2 実験手順

被験者は椅子に座り、利き手で iPod touch を持った状態で実験を行った。被験者のテキスト入力パフォーマンスを計測するため、タイピング練習アプリケーション「タイピング革命 Free」(iPhone App, 開発者: Takahumi Araki, バージョン: 1.30) [41]を使用した。実験で使用した「トレーニングモード」(図 3.2)では、2~3 文字の短い単語を 10 個入力する流れを 1 セットとし、この 1 セットの中で入力速度、正解率を計測する。



図 3.2 実験画面の例[41]

2 つのデバイス条件 (触覚的手掛かり無し/有り) に対して、トレーニングセッションと計測セッションの 2 つのセッションを設けた。トレーニングセッションでは、被験者は「トレーニングモード」で 5 分間フリック入力の練習を行う。続く計測セッションでは、同じく「トレーニングモード」を 3 セット行う。デバイス条件の提示順序は、被験者によってランダムにした。

触覚的手掛かりやラップフィルムと通常のタッチパネルを比較するため、被験者には 2 つのデバイス条件の前後 2 回に、比較セッションとして通常のタッチパネルを使用させた。この通常のタッチパネルは後の解析対象から除外した。

被験者は 22~26 歳の 8 名 (男性 7 名, 女性 1 名) で、全員右利き、6 名が日常的にフリック入力を使用していた。被験者には可能な限り速く、かつ正確に入力するように指示をした。なお普段の入力方法に関わらず、被験者には利き手で iPod touch 本体を持ち、同じく利き手親指でフリック入力をするように指示をした。

### 3.3 実験結果

通常のタッチパネルを用いて行った 2 回の比較セッション以外の実験結果を表 3.1 に示す。横軸はデバイス条件，縦軸は全被験者の平均入力速度（文字／分）と平均正解率（％），括弧内は標準偏差を示している。

表 3.1 触覚的手掛かりの有無と，入力速度と正解率の関係

デバイス条件	触覚的手掛かりあり	触覚的手掛かりなし
平均入力速度[文字／分]	81.1 (32.5)	78.9 (33.7)
平均正解率[%]	96.0 (3.03)	92.9 (4.76)

表 3.1 より，段差を付加することで入力速度と正解率が向上する傾向がみられた。入力速度と正解率に関してそれぞれ t 検定を行った結果，正解率に有意な差が認められた ( $p = 0.019, < .05$ ) が，入力速度では認められなかった ( $p = 0.227$ )。

### 3.4 考察

ここでは本研究が提案する触覚的手掛かりの形状が，フリック入力によるテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを，実際にタッチパネルに触覚を付加した実験器具を用いて検証した。

実験結果より，キーの境界に触覚的手掛かりとして段差を付加することで，フリック入力を用いたテキスト入力パフォーマンスのうち，特に正解率が向上することが分かった。

今回はキーの境界に段差を付加したことで，タッチパネル上にキーの位置が触覚的に明示された。これにより，正しくテキスト入力を行うためには，ユーザは上下左右のいずれかの触覚的手掛かりに対して垂直に指を動かし，また手掛かりを乗り越えれば良いことになる。つまり，触覚的手掛かりの付加によって，自分の指が動いている方向を知覚しやすくなり，また越えるべきゴールが触覚的に明示された結果，テキスト入力のパフォーマンスが向上したと考えられる。

以上により，本研究が提案する触覚的手掛かりの形状が，フリック入力によるテキスト入力パフォーマンスを向上させる可能性が示された。

本実験で用いた触覚的手掛かりは 0.159 mm と大きく，その存在がはっきりと知覚出来た。一方で，本研究の提案手法によって最終的に付加される触覚的手掛かりは，これより遥かに小さくなることが予想される。従って，パフォーマンス向上に必要な触覚的手掛かりの強さ（ここでは段差さの高さ）を今後検証する必要があると共に，最終的に提案手法によって付加される触覚的手掛かりの強さでも，パフォーマンス向上の効果があるか否かも確認する必要がある。

## 第4章 実験 2：視覚的手掛かり付加による主観的段差高さへの影響の検証

2.2.2 で述べた通り、視触覚クロスモーダルに関しては数多くの研究報告がなされてきた。しかしながら本研究が発見した現象に当てはまる報告がなかったため、本章では視覚的手掛かりと被験者が感じる主観的段差高さの関係を検証する実験を行った。

### 4.1 試料の製作

食品包装用ラップフィルムを用いて試料を製作した (図 4.1)。製作手順は以下の通りである。

- ① ラップフィルムを約 80 x 80 mm の大きさに切った
- ② 約 40 x 80 mm の大きさに切ったラップフィルムを、①に気泡が入らないように密着させた
- ③ 中央に 40 x 40 mm の四角形が印刷された台紙 (図 4.1 拡大図) に、②を粘着セロハンテープで固定した

これにより、表面テクスチャとしては全面がラップフィルム、かつ中央にラップフィルム 1 枚分の段差がある試料が出来た。今回は物理的な段差の高さの影響も検証するため、②で重ねるラップフィルムの枚数を 0, 1, 2 枚の 3 種類とした。また、台紙に印刷された四角形の中には、段差を挟むように青色と赤色の線 (線幅: 1.0 mm) を 20 mm の間隔で印刷した。被験者はこの 2 つの線の間を、指定された速さで指を移動させる。視覚的手掛かりを呈示する場合には、この 2 本の線の中央の段差部分に黒色の線分 (線幅: 0.1 mm) を印刷した (図 4.1 拡大図)。以上により、段差高さ 3 種類、視覚的手掛かりの有無 2 種類、合計 6 種類の試料を製作した。

製作した試料の厚みを、マイクロメータ (株式会社ミットヨ, M320-25AA, 測定可能範囲: 0.000~25.000 mm, 器量: 0.001 mm) を用いて計測した結果を表 4.1 に示す。

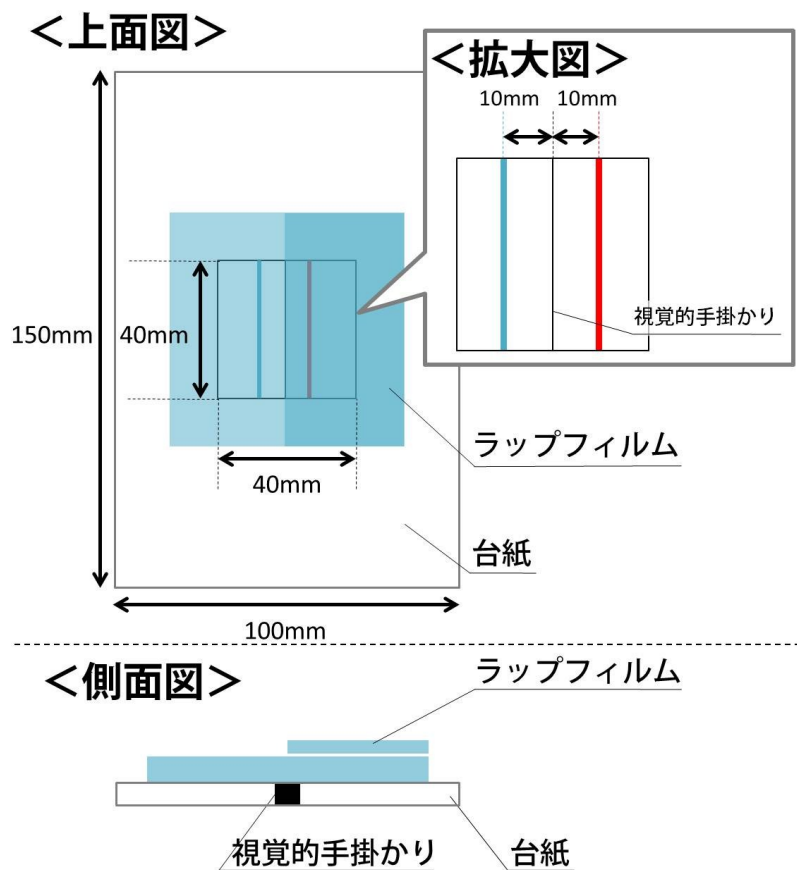


図 4.1 実験試料（視覚的手掛かり，段差が有る場合）

表 4.1 作成した試料の厚み

重ねたラップフィルムの枚数[枚]	段差高さ[mm]
0	0.000
1	0.014 ± 0.001
2	0.021 ± 0.002

## 4.2 実験手順

実験環境を図 4.2 に示す。実験は極力明かりを減らした薄暗い室内で行った（図 4.2 は明るい状態で撮影）。これは予備実験より、蛍光灯の下で実験を行うと段差部分が見えることが分かっていたためである。試料を設置した場所の照度は 2.3 Lux であった。なお実験開始前に、被験者が視覚的手掛かりと同じ太さの線分を視認出来ることを確認した。被験者は椅子に座り、試料を真上から見下ろす体勢で実験を行った。

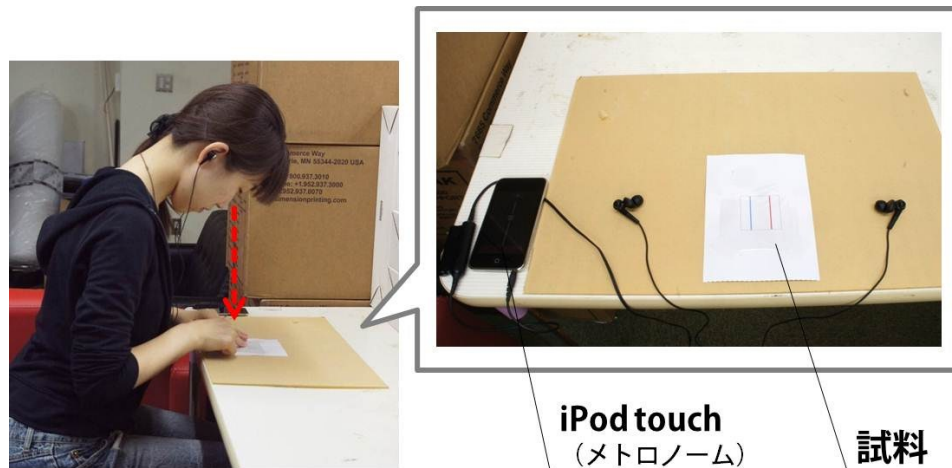


図 4.2 実験環境

被験者は青色の線から赤色の線まで右手人差し指で試料をなぞる。なぞり速度を統制するために、iPod touch からメトロノームの音を流し、音がそれぞれの線の上でのみ鳴るように動かすよう教示した。メトロノームは 80 回/分に設定したため、青色の線から赤色の線まで指を動かす時間は 0.75 秒、試料をなぞる速さは 26.7 mm/秒であった。被験者は実験開始前に練習を行った。

被験者はまず 1 つ目の試料 1 を呈示され、音に合わせて 3 回なぞった。次に 2 つ目の試料 2 に交換され、同様に 3 回なぞった。2 つの試料をなぞり終えた後、「どちらの試料の段差が大きかったか」を「試料 1」「試料 2」「同じ」の 3 つから 1 つ選び口頭で回答した。以上を 1 試行とし、6 種類の試料の組み合わせを 1 回ずつ呈示して全 36 試行を行った。

被験者は 22~24 歳の 5 名（男性 3 名、女性 2 名）で、全員右利き、矯正視力は 0.3~1.0 であった。

### 4.3 実験結果

実験結果を表 4.2 に示す。縦軸と横軸はそれぞれ呈示した試料の条件を示し、横軸の試料を「試料 A」、縦軸の試料を「試料 B」とする（実験段階の「試料 1, 2」ではない）。表の中の数値は、それぞれの呈示条件ごとの回答人数を 1 に正規化したものであり、例えば「A > B」の欄の数値は、「試料 A より試料 B の段差のほうが大きい」と回答した人数を 1 に正規化した値である。なお、「両方の段差は同じ」と回答した場合は、「A > B」, 「A < B」の両方に 0.5 人ずつカウントした。



表 4.2 実験データ

(横軸, 縦軸はそれぞれの実験条件を示し, 数値は回答人数を示す)

B 段差高さ [mm]		A											
		0.000				0.014				0.021			
		視覚的 手掛かり の有無		無し		有り		無し		有り		無し	
		A>B	B<A	A>B	B<A	A>B	B<A	A>B	B<A	A>B	B<A	A>B	B<A
0.000	無し	0.6	0.4	0.55	0.45	0.85	0.15	1	0	1	0	1	0
	有り	0.45	0.55	0.5	0.5	0.85	0.15	0.95	0.05	0.95	0.05	1	0
0.014	無し	0.15	0.85	0.15	0.85	0.4	0.6	0.8	0.2	0.95	0.05	1	0
	有り	0	1	0.05	0.95	0.2	0.8	0.6	0.4	0.75	0.25	0.85	0.15
0.021	無し	0	1	0	1	0.05	0.95	0.25	0.75	0.5	0.5	0.6	0.4
	有り	0	1	0	1	0	1	0.15	0.85	0.4	0.6	0.2	0.8

我々が注目している, 段差を変化させずに視覚的手掛かりのみ変化させた場合の回答平均を図 4.3 に示す. この結果より, 段差高さ 0.000, 0.021 mm の試料では視覚的手掛かりの付加による知覚の変化はないが, 段差高さ 0.014 mm の試料に視覚的手掛かりを付加した際, 実際には段差は変化していないにも関わらず, 段差がより大きく知覚される傾向があることが分かった.

段差高さと同視覚的手掛かりの両方を変化させた場合の効果を見るため, 段差高さ 0.014 mm と 0.021 mm の組み合わせに対して, 片方のみ視覚的手掛かりが有る場合の結果を図 4.4 に示す. 比較のため, ともに視覚的手掛かりが無い組み合わせの結果も示した. 0.014 mm の段差に視覚的手掛かりを付与した場合, 0.021 mm の段差に視覚的手掛かりが無い場合と同じ段差であると知覚される確率が高いことが分かった.

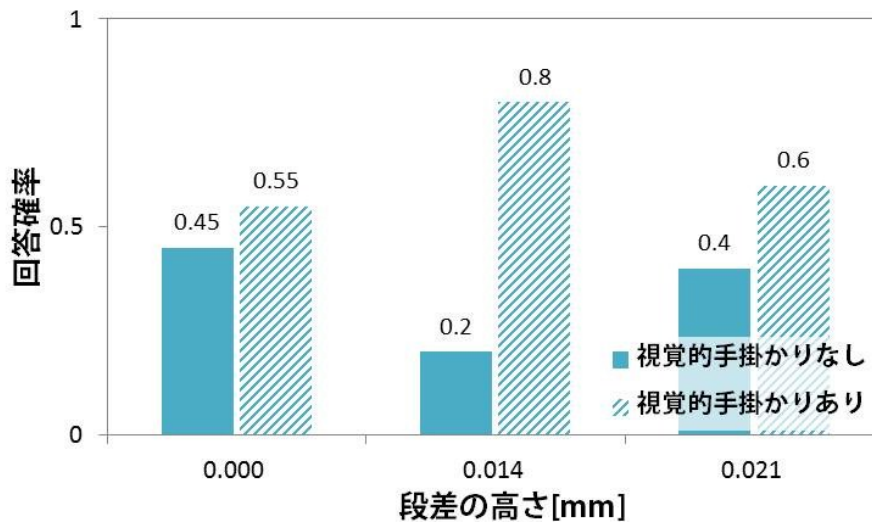


図 4.3 視覚的手掛かりのみを変化させた場合

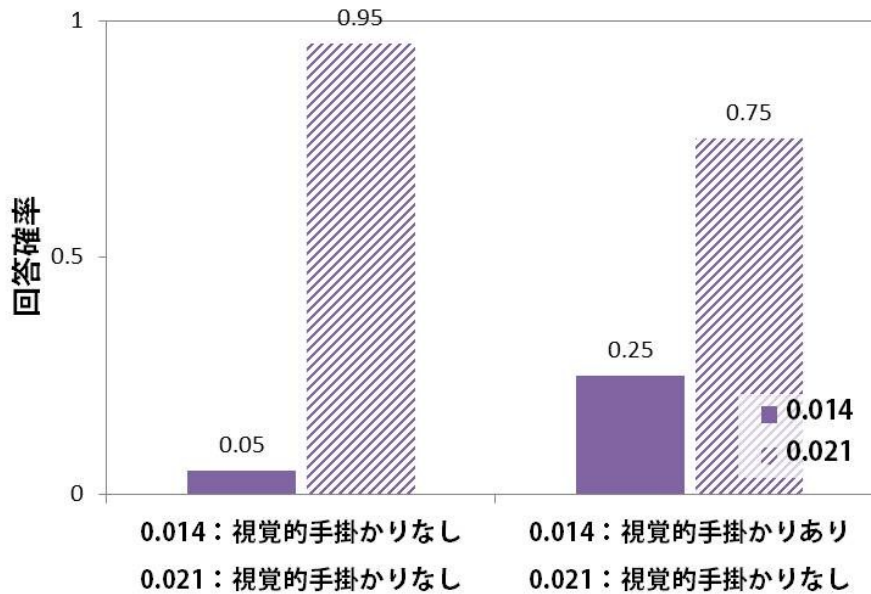


図 4.4 段差高さや視覚的手掛かりを変化させた場合

被験者の内観報告では、「視覚的手掛かりのある段差の方が尖った感じがする」や「視覚的手掛かりの場所に注意が向きやすい」といった感想が得られた。

#### 4.4 考察

ここでは、本研究が発見した視触覚クロスモーダル現象に当てはまる先行研究報告がなかったため、現象の基礎的な検証実験として視覚的手掛かりと主観的段差高さの関係を検証する実験を行った。実験結果より、視覚的手掛かりを付加することで、被験者が知覚する主観的段差の高さが高くなることが分かった。一方で今回の結果からは、本研究が提案する「視覚的手掛かりの付加による、主観的段差の ON/OFF の制御」に関しては検証が出来なかった。なぜなら、被験者は最も小さい段差も、触覚的手掛かりのみで知覚出来ていたためである。従って次の第 5 章の実験では、よりヒトの段差知覚閾値に近い高さの段差を用いて実験を行い、主観的段差の ON/OFF の制御可能性について検証する。

主観的段差高さへの影響がみられた一方で、「視覚的手掛かりを付加しても段差の大きさは変わらない」と回答する被験者もみられた。この原因として「実験環境の照度」が考えられる。今回は、ラップフィルムを重ねた境界線を被験者に視認させないために、明かりを減らした室内で実験を行った。これによりラップフィルムの重なる境界線の視認は難しくなったが、同時に被験者が視覚情報を頼りにしなくなった可能性がある。視触覚クロスモーダルにおける 2 つの感覚の優位性について Ernst や熊崎らは、視覚のノイズが増加すると視覚優位から触覚優位に移行することを報告している[36][37]。従って今後の実験では明かりを減らすのではなく、明かりの位置を工夫するなどして段差の境界線を視認し辛い環境にするような対策を行い、明るい環境下で実験を行う。

## 第5章 実験 3：視覚的手掛かりの付加による 主観的段差の ON/OFF 制御可能性の検証

第 4 章の実験より、視覚的手掛かりを付加することで主観的段差の高さが大きくなることが分かった。しかしながら、実験で用いた試料の段差高さがヒトの知覚閾値を大きく上回っていたため、段差の ON/OFF 制御の可能性は検証できなかった。従って本章では、ヒトの段差知覚閾値近傍の高さの段差試料を用いることで、主観的段差の ON/OFF 制御の可能性を検証する実験を行った。

### 5.1 微小段差試料の製作

第 4 章の実験で用いたラップフィルムの試料は段差の高さが最小のもので 14  $\mu\text{m}$  であり、ヒトの段差知覚閾値 (2~3  $\mu\text{m}$ [5]) を大きく上回っていた。ここでは段差高さをヒトの知覚閾値近傍とすることで段差の ON/OFF 制御の可能性の検証を行うため、より微小な段差が求められる。従って、まず実験の準備段階として 3 種類の手法で微小段差試料の製作を行った。

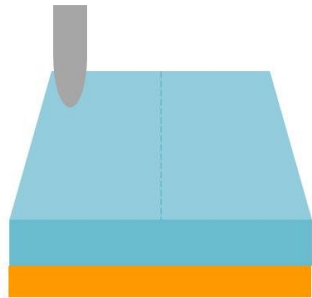
#### 5.1.1 切削による微小段差試料製作

アクリル板を 3D 加工機で切削することで、段差試料の製作を試みた。ここでは切削 RP マシン (ローランドディージー株式会社, MDX-540) を用いた。この加工機の機械的分解能は 0.001 mm/step であったが、加工機の制御に用いるソフトウェアの分解能が 0.01 mm/step であったために、通常の切削ではマイクロ単位の段差を製作することは出来なかった。

そこでここでは、加工材料の固定に変形の余地が大きい厚手の両面テープを用いることで、切削時のドリルの押付力による両面テープの z 軸方向の微小変形を用い、加工を 2 段階に分けることで微小段差試料の製作を試みた。手順は以下の通りである。

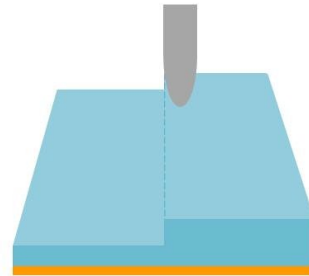
- ① 厚手の両面テープを用いて加工材料を加工台に固定して z 軸方向のゼロ点補正を行い、試料の左半分を左上の点から切削する (図 5.1①)
- ② 左半分の切削が終わる。このとき、材料の固定に使用した両面テープは、切削時のドリルの押し付けによって z 軸方向にわずかに縮んでいる (図 5.1②)
- ③ 右半分の切削を行う。このとき z 軸方向のゼロ点補正は行わないため、材料表面は①のときよりわずかに低い位置にある (図 5.1③)
- ④ 右半分の切削が終わる。切削開始の時点で材料が低い位置にあったために、設定上の左右の切削高さが同じでも実際にはわずかに差が出るため、中央に段差が生じる (図 5.1④)

①材料を厚手の両面テープで固定し，試料の左半分を切削



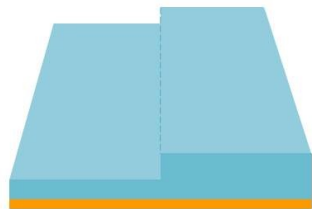
開始点：左上

③材料の右半分を切削



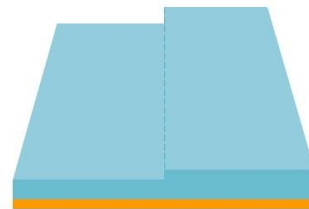
開始点：左上

②左半分の切削が完了



ドリルの押し付けにより，両面テープがz軸方向に縮む

④右半分の切削が完了



①と比べて材料の位置が下がっているため，設定上のz軸方向の切削量は同じでも，実際の切削量は①より少なくなる

図 5.1 切削による微小段差試料の製作手順

これにより，仕上がりの段差高さは指定出来ないものの，大量に製作することで数種類の段差高さをもった微小段差試料の製作が可能であると予想された。

しかしながらこの手法で製作した試料には，表面に図 5.2 のように切削時のツールマークが不均一に現れた。これにより試料表面のテクスチャが不均一になり，段差知覚に影響を与えることが予想された。従って，切削では微小段差試料は製作出来なかった。

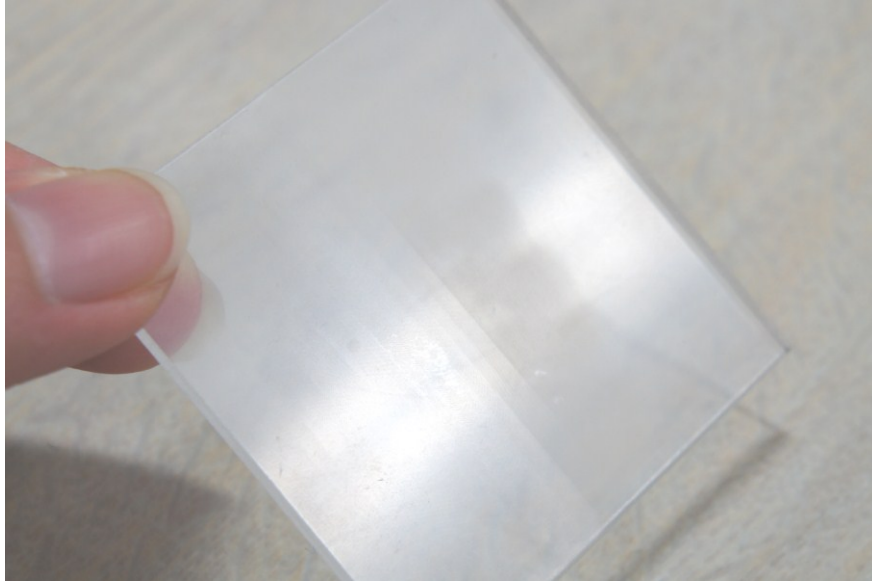


図 5.2 切削した試料表面に不均一に現れるツールマーク  
(光を反射する部分と、そうでない部分があることが分かる)

### 5.1.2 印刷物の転写による微小段差試料製作

堂田らが提案した，印刷物をシリコーンゴムで型取りすることで微小な段差を転写する手法[40]を用い，微小段差試料の製作を試みた．デジタルプリンタで印刷された印刷物には，インクによって微細な凹凸が生成されている．また，液状シリコーンゴムは高精度の型取り性能を持つ．ここでは印刷の濃度を変えることで印刷物の微小凹凸の高さを変え，これをシリコーンゴムで型取りをすることで微小段差試料の製作を試みた．手順は以下の通りである．

- ① レーザ用 OHP フィルム（富士ゼロックス株式会社，GAAA5224，A4 サイズ）に，図 5.3 のような黒塗りの四角形を印刷した．画像を作成する際に塗りつぶし透明度（ここでは黒の透明度）を変化させることで，印刷時の凹凸の厚みを変化させた．なお，透明度と実際の厚み（マイクロメータで測定）の関係は表 5.1 に示した通りであった．

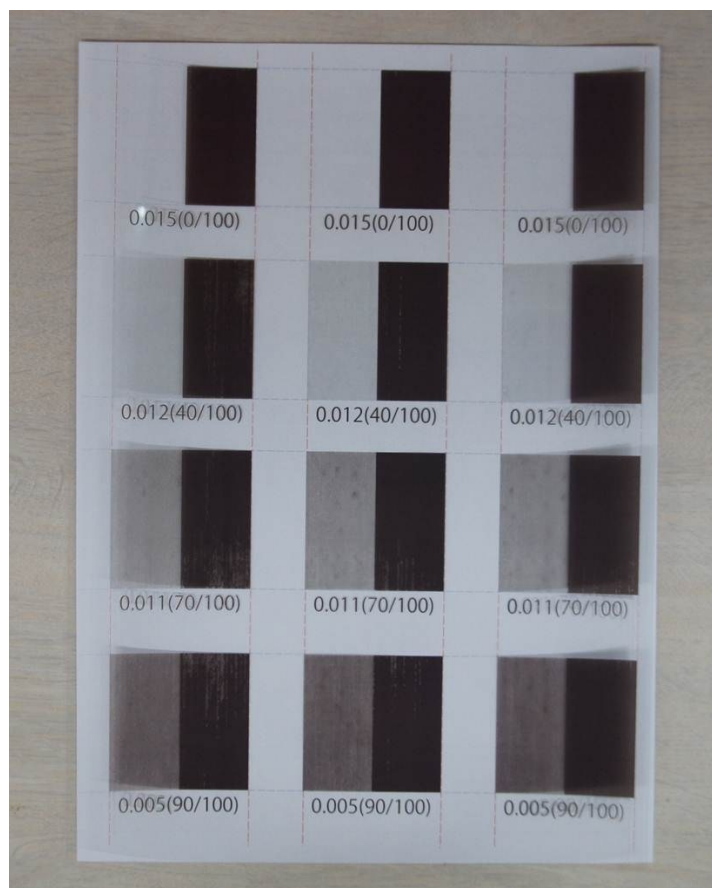


図 5.3 黒塗りの四角形（左右で透明度が異なる）を印刷した OHP フィルム

表 5.1 黒の透明度と実際の厚み

透明度 [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
厚み [mm]	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.010	0.015

- ② アクリル樹脂を図 5.4 のような形に加工し，シリコーンゴムの型を製作した．型の中央には一段高い平面を設けてあり，この段の上に OHP フィルムを貼り付け，シリコーンゴムの型とする．



図 5.4 シリコンゴムの型となるアクリル型  
(4つの型を1枚のアクリル板に配置したもの)

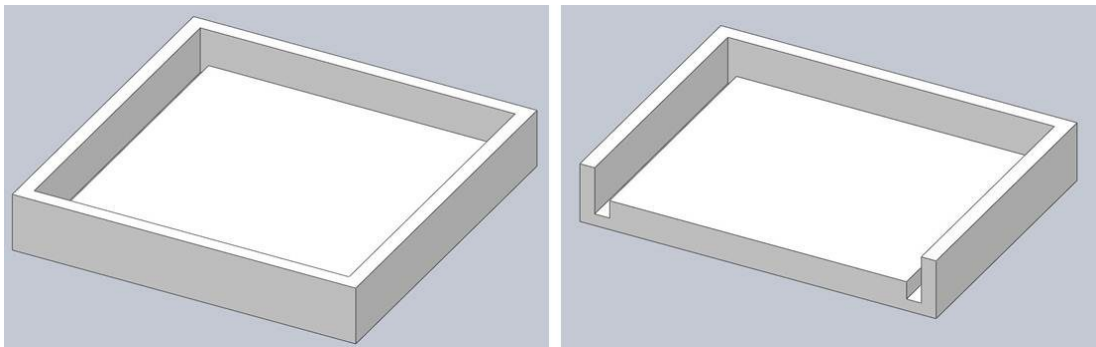


図 5.5 単体のアクリル型 (左:全体図, 右:断面図)

③ ②の型に①の OHP フィルムを, 印刷面を上にして両面テープで貼付けた (図 5.6).

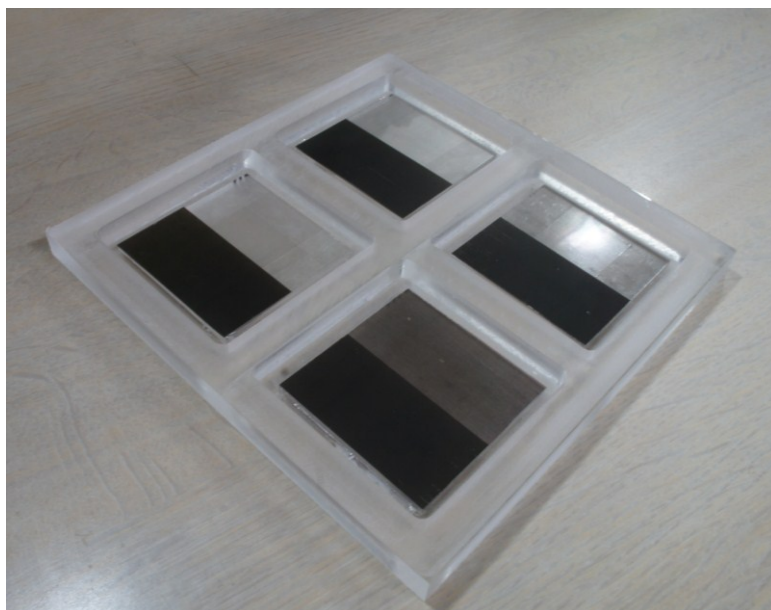


図 5.6 OHP フィルムを貼付けたアクリル型

- ④ ③に型取り用のシリコーンゴム（信越化学工業株式会社，信越シリコーン KE-14）を流し込んだ。完全固化したシリコーンゴムは図 5.7 の通りである。



図 5.7 シリコーンゴム型

- ⑤ シリコーンゴム型に，高透明エポキシ樹脂（株式会社エポック，プロクリスタル 770）を流し込んだ。完全固化した樹脂は図 5.8 の通りである。

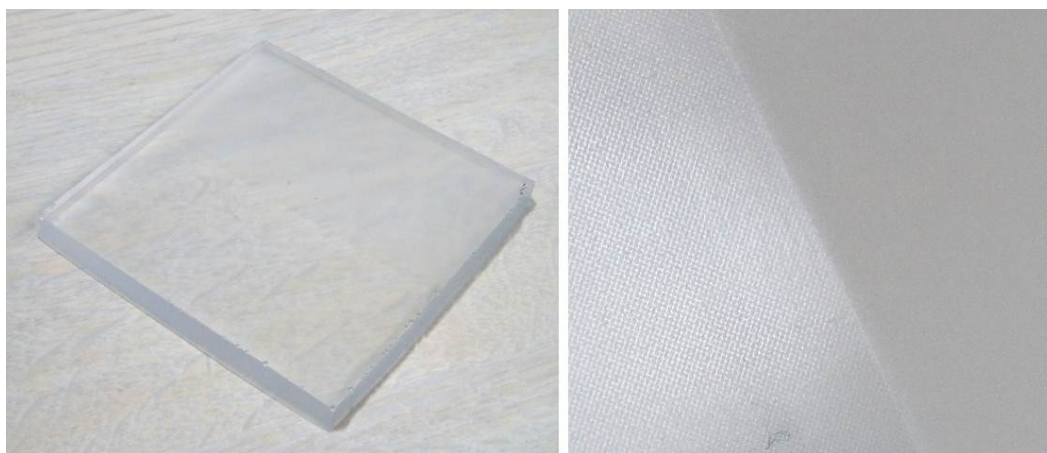


図 5.8 固化したエポキシ樹脂（左：全体図，右：中央部分拡大）

以上の手順により，エポキシ樹脂の微小段差試料を製作した。

しかしながらこの手法では，④で製作したシリコーンゴムの型を机などに置く際にわずかに歪むため，最終的に成形するエポキシ樹脂の表面と裏面の平行を保つことが出来なかった。また，デジタルプリントの印刷物はインクを一様に塗布するのではなく，大量の細かい点を打つことで印刷されており，透明度によってその密度が異なる。④のシリコーンゴムで型取りをする際にこの細かい点が転写され，最終的に成形したエポキシ樹脂にもこれが残った（図 5.8 右）。ここでは黒の透明度を変えて段差を生成したため，段差部分を境に左右で異なるテクスチャが転写され，またこのテクスチャの違いが段差知覚の手掛かりとなることが予想された（図 5.9）。このテクスチャを取り除くために，OHP フィルムやシリコーンゴムの型にラップフィルムを被せて樹脂成形を試みたが，逆にラップの細か



い皺がテクスチャとして残った (図 5.10).

従って、この印刷物の転写手法では、今回求める実験試料は製作出来なかった。



図 5.9 シリコンに転写された、段差部分で異なるテクスチャ  
(左右で光の反射が異なることが分かる)

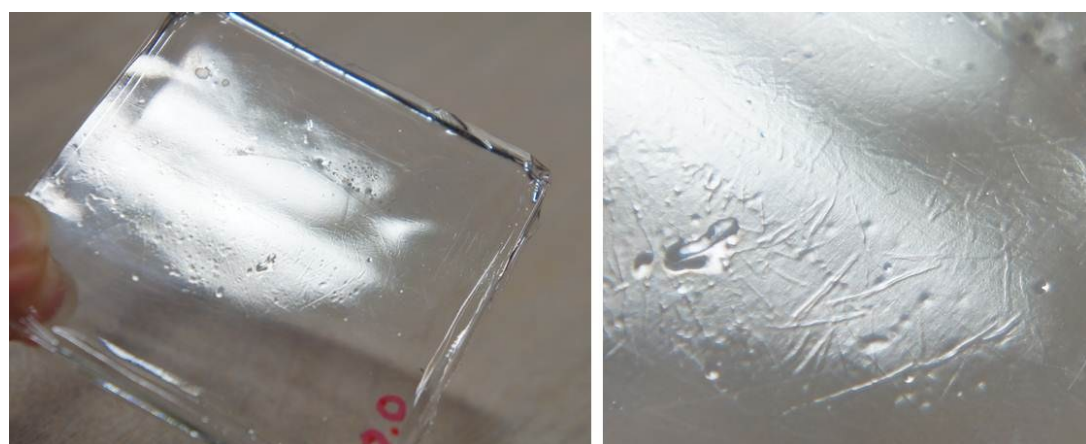


図 5.10 シリコンにラップフィルムを被せて成形したエポキシ樹脂  
(ラップフィルムの皺が視認出来る)

### 5.1.3 薄膜蒸着による微小段差試料製作

薄膜蒸着による微小段差試料の製作を試みた。(河合光学株式会社, セラテックジャパン株式会社). 薄膜蒸着とは, 金属や酸化物などを蒸発させ, 素材の表面に定着させる技術であり, 光学薄膜から半導体膜まで幅広い分野で用いられる. 特に光学薄膜などは膜の厚みなどで光の屈折が変化するため, マイクロ単位で膜厚の指定が可能である. ここでは透明なガラスの上に  $\text{SiO}_2$  膜を蒸着させることで, 透明度を保った試料の製作を試みた.

ヒトの段差知覚閾値が  $2\sim 3\ \mu\text{m}$  であることから, 製作する段差の高さはその周辺の  $2, 5, 10\ \mu\text{m}$  のとした ( $2\ \mu\text{m}$  の試料は河合光学株式会社に,  $5, 10\ \mu\text{m}$  の試料はセラテックジャパンに依頼をした). 試料の設計図は図 5.11 に示した通りである. 試料は 3 つの層からなっており, 最下層は基盤となる透明な白板ガラス (B270) とした. 試料のテクスチャを等

しくするため、2層目は基板の上に一様に SiO<sub>2</sub> 膜を成膜した。なお、この2層目の膜厚は特に指定しなかった。最上層は段差を設けるための膜であり、試料面積の半分（図 5.11 では右半分）に2層目と同じく SiO<sub>2</sub> 膜を成膜した。このときの残り半分（図 5.11 では左半分）はマスキングをした。なお、試料の大きさは 75 x 75 mm とした。

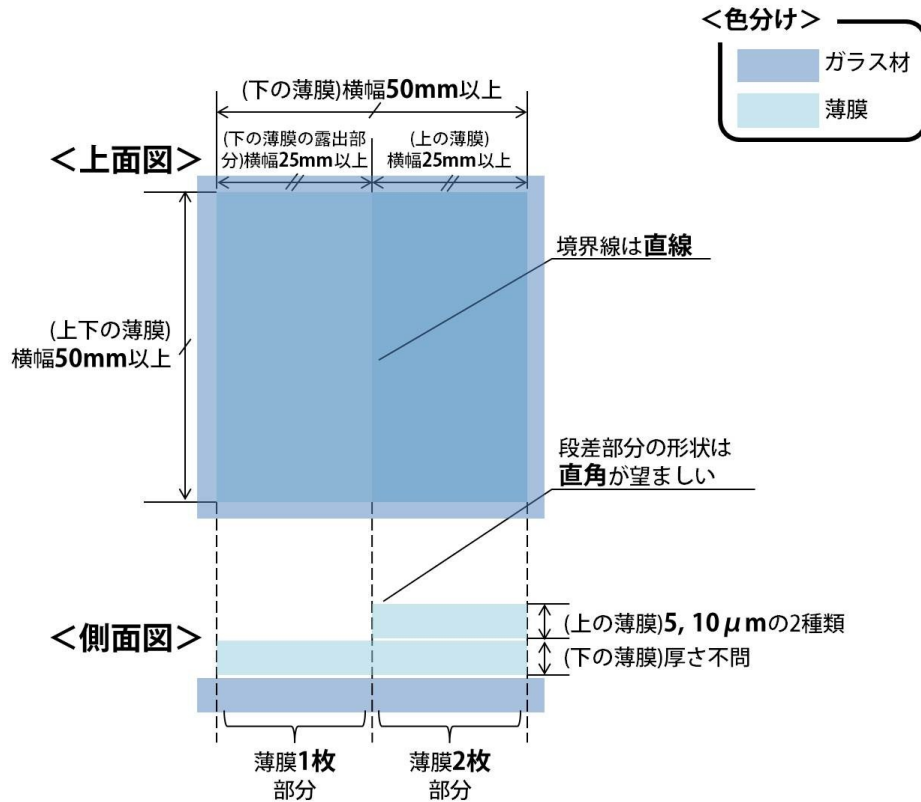


図 5.11 薄膜生成設計図 (5, 10 μm の場合)

以上の設計により成膜された試料が、図 5.12 に示した試料である。段差は光の反射を工夫すれば視認が可能である（図 5.12 右）。

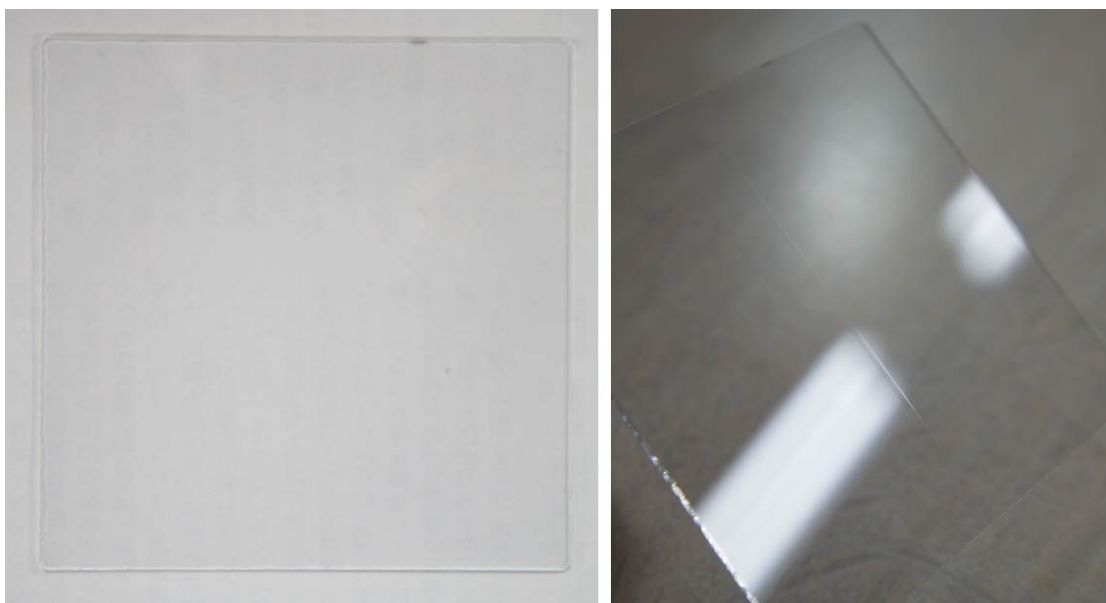


図 5.12 5 μm の薄膜試料（左：全体図，右：段差部分（中央に見える薄い線）

この微小段差試料の形状計測を、レーザ顕微鏡（株式会社キーエンス、VK-X200/210）を用いて行った。レーザによる拡大画像を図 5.13 に、段差部分の断面形状を高さで示したものを図 5.14 に、また段差の高さを表 5.2 に示した。図 5.13 より、特に 5、10  $\mu\text{m}$  の試料において、段差生成の際にマスキングをした箇所にギザギザの模様が現れていることが分かる。これはマスキングしたテープなどの下に 2 層目の  $\text{SiO}_2$  がわずかに流れ込んだものと考えられる。また図 5.14 より、段差部分の形状が直角ではなく、なだらかなカーブを描いていることが分かった。また特に 5  $\mu\text{m}$  の試料に関しては段差部分にわずかにエッジが立っていることが分かった。これは、段差をつけるために行ったマスキングを取り除く際に、すでに硬化が始まっていた  $\text{SiO}_2$  膜の一部がマスキングテープなどに引っ張られて変形し生じたものと思われる。

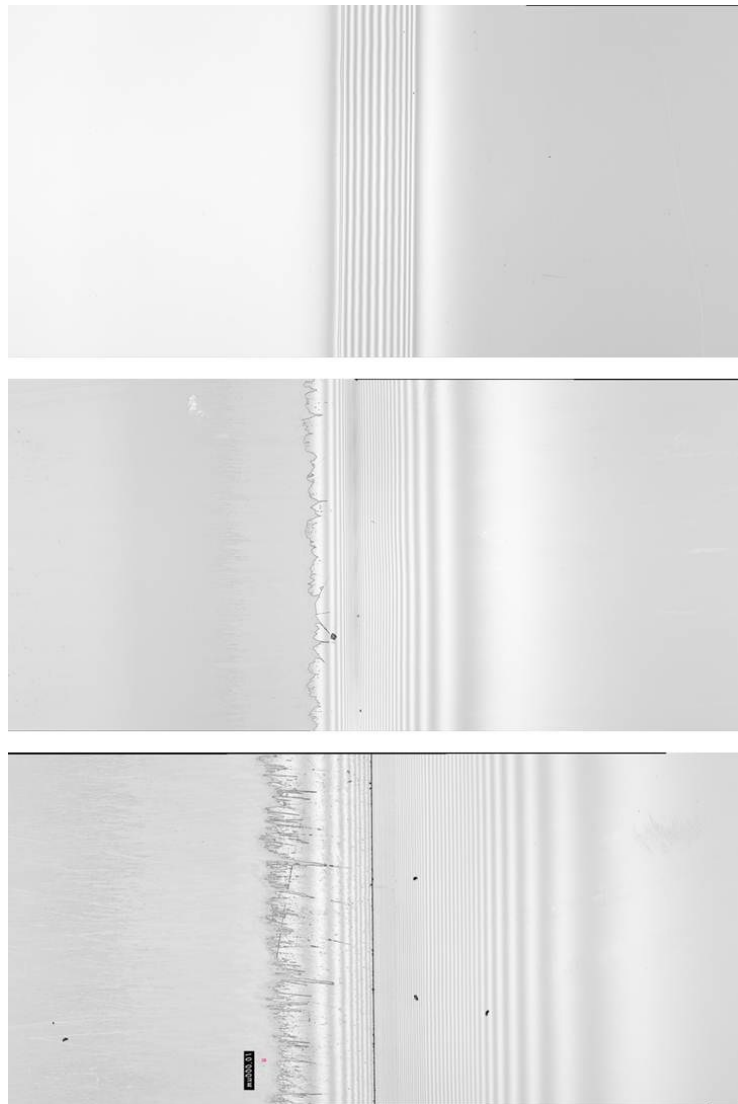


図 5.13 薄膜試料段差部分のレーザ画像（左：2  $\mu\text{m}$ ，中央：5  $\mu\text{m}$ ，右：10  $\mu\text{m}$ ）  
（画像の右の方が高さが高く，中央が段差部分。段差部分に細かく縞が現れているが，これは計測時の干渉縞であり実際の形状ではない）

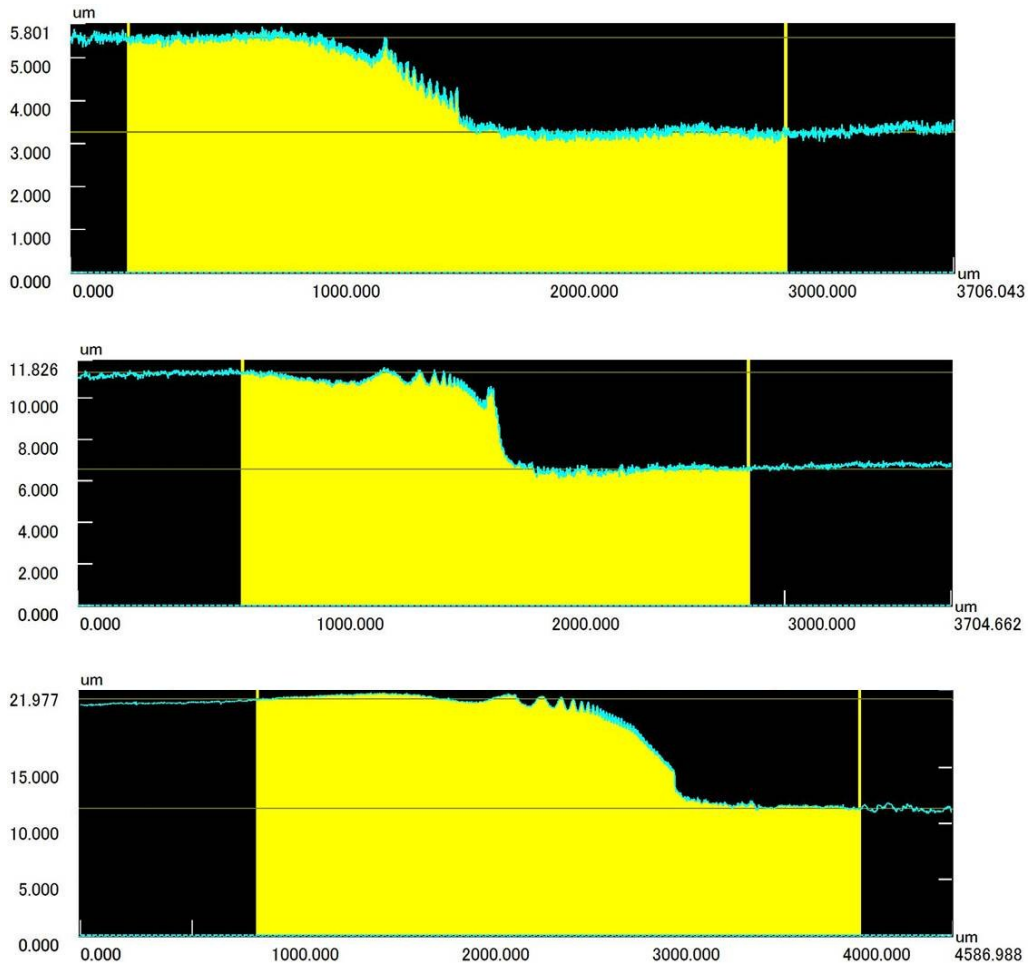


図 5.14 薄膜試料の断面図を高さで示した図  
(上：2 μm，中央：5 μm，下：10 μm)

(黄色で塗りつぶされている領域は、段差高さ測定の際に平均化に使用した領域。段差部分に波が現れているが、これは計測時の干渉縞によるものであり、実際には試料表面は波打っていない)

表 5.2 薄膜試料の段差高さ計測結果

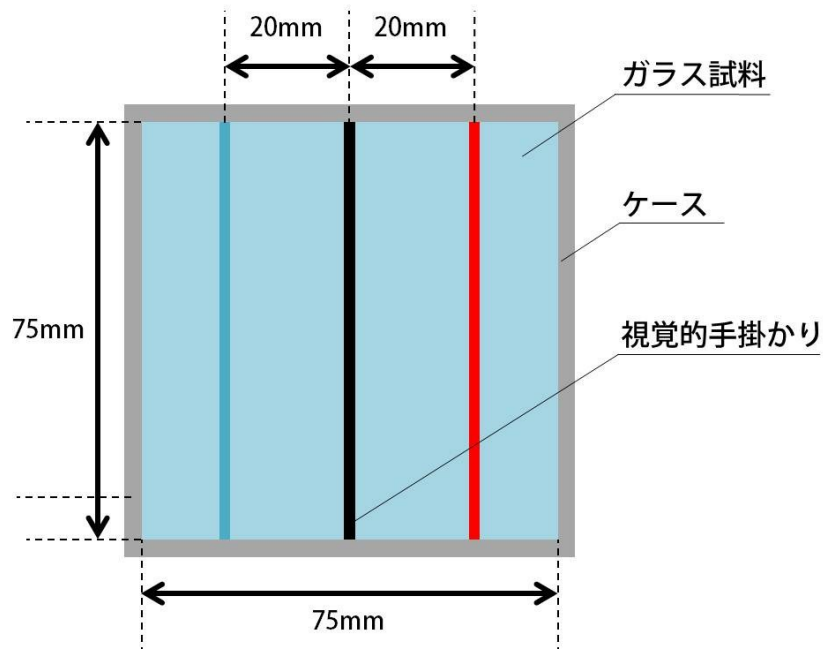
依頼時の段差高さ[μm]	2	5	10
実測値[μm]	2.2	4.6	9.7

依頼した段差の高さからはわずかに異なるものの、ヒトの段差知覚閾値周辺の試料が出来たため、この試料を用いて以下の実験を行った。

試料はアクリルで製作したケースに入れた(図 5.15)。試料の下には、視覚的手掛かりとして黒色の線分(線幅：0.1 mm)と、なぞり速度統制のための青色と赤色の線分(線幅：0.1 mm)を 20 mm の間隔で印刷した台紙を敷いた。被験者はこの青色と赤色の線の間を、指定された速さでなぞる。実験 2 ではこれらの線の間隔は 10 mm と狭かったが、速度統制に用いるメトロノームの音により聴触覚クロスモーダルが生じ、段差の知覚に影響を与える可能性が考えられたため、余裕をもたせてここでは倍の 20 mm とした。

9.7  $\mu\text{m}$  の表裏を反対にした段差高さが 0  $\mu\text{m}$  の試料も用意した。また、実験では段差知覚閾値周辺の実験条件に絞るため、9.7  $\mu\text{m}$  の試料は使用しなかった。従って、段差高さ 3 種類 (0, 2.2, 4.6  $\mu\text{m}$ )、視覚的手掛かりの有無 2 種類、合計 6 種類の試料を用意した。

### <上面図>



### <側面図>

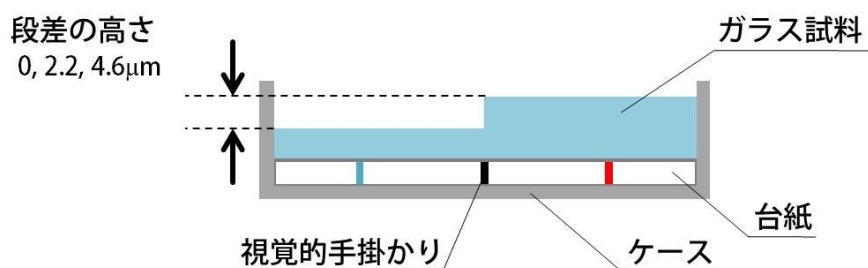


図 5.15 実験試料（視覚的手掛かり，段差がある場合）

## 5.2 実験手順

実験環境を図 5.16 に示した。被験者は椅子に座り、試料を真上から見下ろす姿勢で実験を行った。試料をなぞる速度を統制するために、iPod touch からメトロノームの音を流し、音が試料上の青色と赤色の線分上でのみ鳴るように動かすよう教示した。メトロノームは 210 回/分に設定したため、青色の線から赤色の線まで指を動かす時間は 0.286 秒、試料をなぞる速さは 140 mm/秒であった。この速度でのなぞり動作に慣れるため、被験者は実験開始前に練習を行った。



図 5.16 実験環境

被験者は呈示された試料を音に合わせて 3 回なぞった後、「試料に段差があったか」を「あった」「なかった」の 2 択で回答し、この回答に対する自信もアナログスケールで回答した (図 5.17)。以上を 1 試行として、6 種類の試料を 5 回ずつ呈示し、全 30 試行を行った。

被験者は 22~23 歳の 4 名 (男性 1 名, 女性 3 名) で、全員右利きであった。

#### 1. 段差が (ある・ない)



図 5.17 回答用紙

### 5.3 実験結果

実験結果を図 5.18, 図 5.19 に示す。図 5.18 はそれぞれの条件の試料を呈示した際に「段差がある」と回答される確率を示し、図 5.19 はその回答に対する自信を示す。また、それぞれの縦棒は標準偏差を示す。

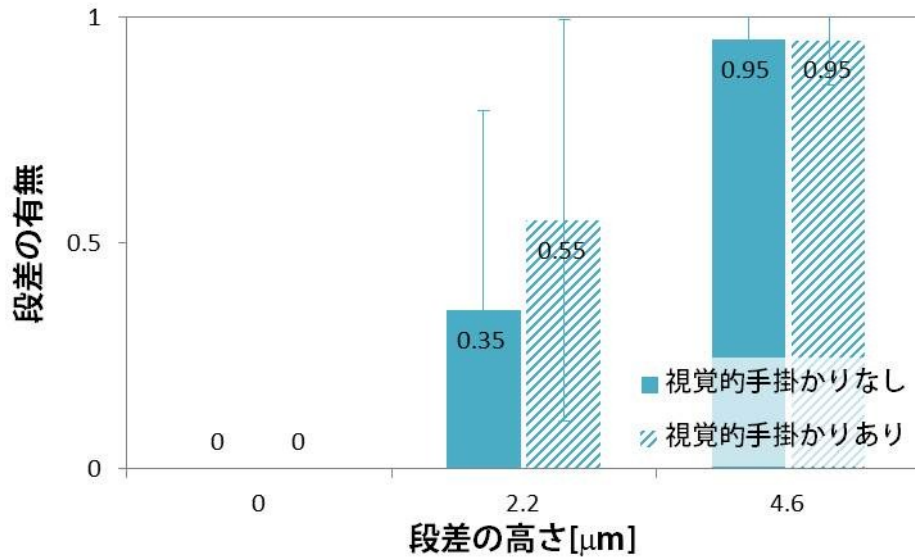


図 5.18 段差の有無

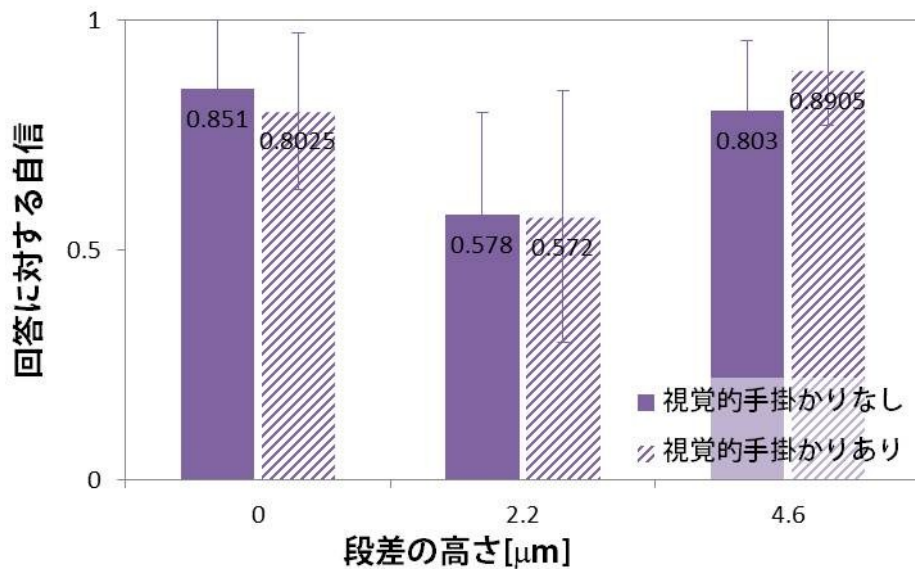


図 5.19 回答に対する自信

図 5.18 より、段差の高さが 0, 4.6 μm の場合の段差知覚は、視覚的手掛かりの有無で変化しなかった。段差高さが 2.2 μm の場合には視覚的手掛かりを付加することで段差が知覚される確率がわずかに上昇した。2 要因分散分析 (段差高さ 3 条件×視覚的手掛かりの有無 2 条件) を行った結果、段差の高さの主効果が認められ ( $F(2, 6) = 16.26, p < .01$ )、すべての組み合わせの比較において有意差が認められた ( $p < .05$ )。また図 5.19 より、回答に対する自信は視覚的手掛かりの有無で変化しなかった。段差の有無同様 2 要因分散分析を行った結果、段差の高さの主効果が認められた ( $F(2, 6) = 3.50, p < .10$ ) が、個々の組み合わせにおいて有意差は認められなかった。

## 5.4 考察

第 4 章の実験より、視覚的手掛かりを付加することで、被験者が知覚する主観的段差高さが高くなることが分かっていたが、実験で用いた試料の段差高さがヒトの知覚閾値を大幅に上回っていたため、段差の ON/OFF 制御の可能性までは検証が出来なかった。そこで本実験では段差知覚閾値近傍の段差試料を用い、視覚的手掛かりの有無による主観的段差の ON/OFF 制御可能性を検証する実験を行った。

実験の結果、知覚閾値近傍の段差を用いても、視覚的手掛かりの有無によって主観的段差の ON/OFF 制御は出来ないことが分かった。

当初、第 4 章の実験で視覚的手掛かりの付加によって主観的段差高さが向上した原因は、視触覚クロスモーダルに関する先行研究の多くが示すような、視覚による触覚閾値の向上であると考えていた。従って今回の実験で用いたような知覚閾値近傍の段差を呈示し、かつ段差の有無を知覚させた場合、視覚的手掛かりのない条件と比べて、視覚的手掛かりがある条件では「段差がある」と回答される確率が高くなると予想していた。しかしながら実験の結果より、視覚的手掛かりの有無で回答確率に差はないことが示された。

実は第 4 章の実験においても、視覚的手掛かりを付加した 0.014 mm の段差と、視覚的手掛かりを加えない 0.021 mm の段差が同じ高さに知覚される傾向がわずかにみられていた。これはまさに、この主観的段差高さの増加が原因であったと考えられる。

以上より、本研究が発見した現象は視覚による触覚閾値の向上ではなく、主観的知覚量の増加であると言える。次の第 5 章では、視覚的手掛かりの付加によって、主観的知覚量がどの程度増加するのかを算出する実験を行う。



## 第6章 実験 4：視覚的手掛かり付加による主観的段差の高さ変化量の算出

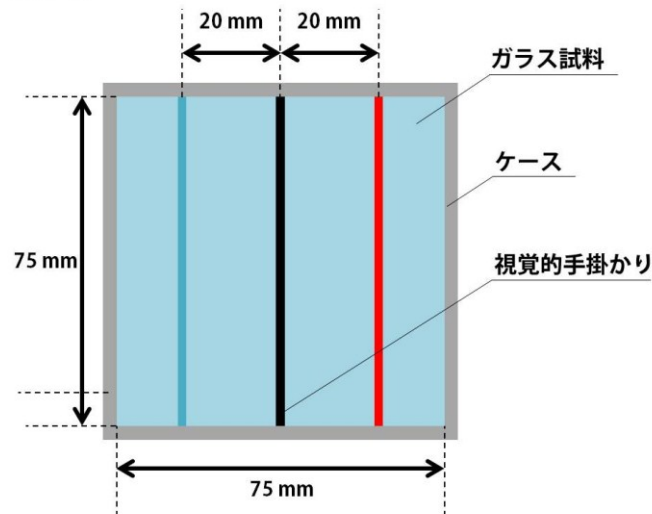
第 5 章の実験より，本研究が発見した現象は視覚的手掛かり付加による触覚閾値の向上ではなく，主観的段差高さの増加であることが示された．そこで本章は，視覚的手掛かりの付加によって主観的段差がどの程度増加するのかを算出する実験を行った．

### 6.1 実験手順

実験環境と用いた試料は，第 5 章の実験と同じである（実験環境：図 5.16，実験試料：図 5.15）．被験者は椅子に座り，試料を見下ろす体勢で実験を行った．

ここでは視覚的手掛かりの付加によって主観的段差高さがどの程度変化するかを検証するため，被験者には標準刺激と比較刺激の段差高さを比較するタスクを課した．標準刺激として，段差高さが 2.2, 4.6  $\mu\text{m}$  の視覚的手掛かりのない試料の 2 種類を設定した．対して比較刺激は段差高さが 0, 2.2, 4.6, 9.7  $\mu\text{m}$  の視覚的手掛かりのある試料の 4 種類の試料を設定した（図 6.1）．

#### <上面図>



#### <側面図>

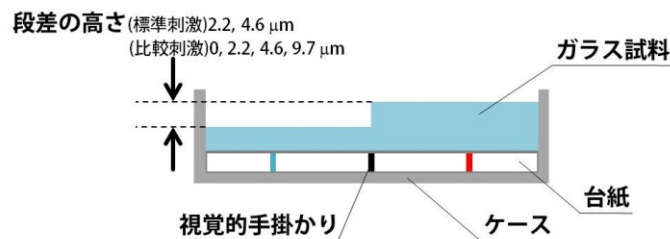


図 6.1 実験試料

被験者は試料の青色の線から赤色の線まで、右手人差し指でなぞる。なぞり速度を統制するために、iPod touch からメトロノームの音を流し、音がそれぞれの線の上でのみ鳴るように動かすよう教示した。メトロノームは 80 回／分に設定したため、青色の線から赤色の線まで指を動かす時間は 0.75 秒、試料をなぞる速さは 53.3 mm/秒であった。このなぞり速度に慣れるため、被験者は実験開始前に練習を行った。

被験者はまず 1 つ目の試料 1 を呈示され、音に合わせて 3 回なぞった。次に 2 つ目の試料 2 に交換され、同様に 3 回なぞった。2 つの試料をなぞり終えた後、「どちらの試料の段差が大きかったか」を「試料 1」「試料 2」の 2 択から口頭で回答した。1 つの標準刺激に対する試行数は、比較刺激 4 条件との 2 つの試料の組み合わせを 6 回ずつ呈示したため、24 試行であった。

被験者は 22～26 歳の 5 名（男性 3 名，女性 2 名）で、全員右利きであった。

## 6.2 実験結果

実験結果を図 6.2 に示す。縦軸は比較刺激の段差の方が大きいと回答された確率、横軸は比較刺激の段差高さである。指標から伸びる縦棒は標準偏差を示す。また、それぞれの標準刺激において、ロジスティック関数による近似結果を曲線で示した。それぞれの近似式は数式 6.1 に示した通りである。

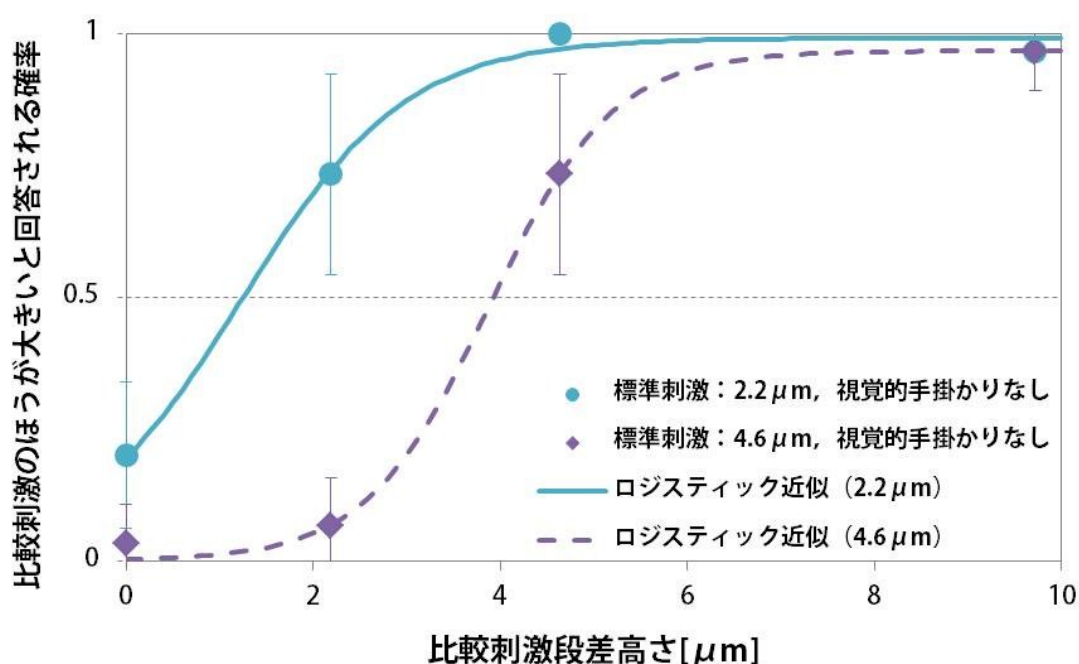


図 6.2 比較刺激の段差の方が大きいと回答される確率

$$y = \frac{0.99130825}{(1 + 4.06218785e^{-1.1331330x})} \quad y = \frac{0.96703235}{(1 + 358.767825e^{-1.5150659x})}$$

数式 6.1 ロジスティック近似式（左：標準刺激 2 μm，右：標準刺激 5 μm）

比較刺激の段差の方が大きいと回答される確率が50%となるのは、標準刺激が2.2  $\mu\text{m}$  の場合は1.3  $\mu\text{m}$ 、4.6  $\mu\text{m}$  の場合は3.9  $\mu\text{m}$  であった。すなわち、視覚的手掛かりのある1.3  $\mu\text{m}$  の段差は、視覚的手掛かりのない2.2  $\mu\text{m}$  の段差と等しく感じ、同様に視覚的手掛かりのある3.9  $\mu\text{m}$  の段差は、視覚的手掛かりのない4.6  $\mu\text{m}$  の段差と等しく感じると予想される。従って、段差知覚閾値近傍の段差に視覚的手掛かりを付加すると、実際の段差高さに関わらず、約0.8  $\mu\text{m}$  段差を大きく感じるということが分かった。実際の段差高さとして、視覚的手掛かりを付加した場合の主観的段差高さの関係は、図6.3のようになる。

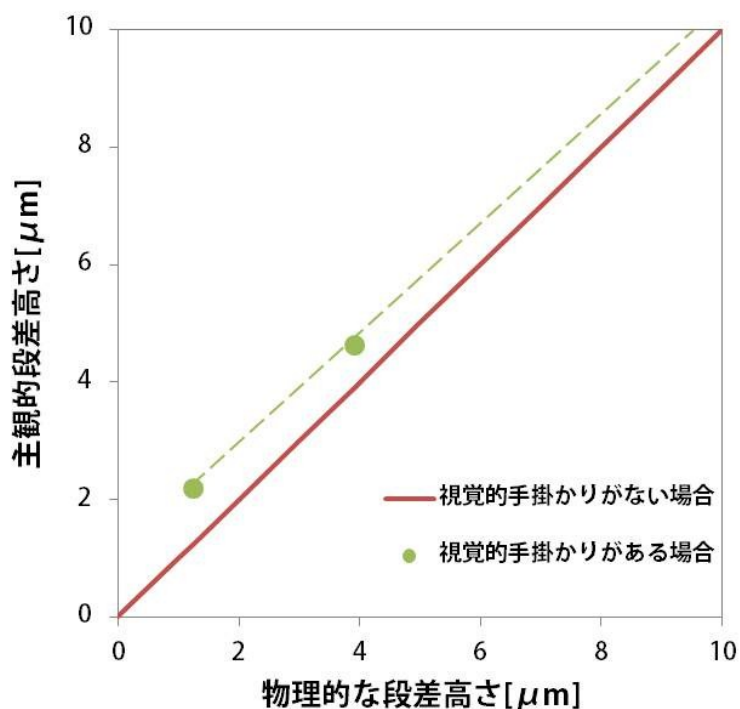


図 6.3 予想されるグラフ（点線：主観的段差高さの予想知覚量）

## 6.3 考察

第4章、第5章の実験より、視覚的手掛かりの付加によって主観的段差高さが増加することが分かっていた。従ってここでは、その変化量がどの程度であるかを算出する実験を行った。

実験結果より、知覚閾値近傍の段差に視覚的手掛かりを付加することで、実際の段差高さに関わらず主観的段差高さが約0.8  $\mu\text{m}$  大きくなることが分かった。

また、第4章の実験において、視覚的手掛かりを付加した0.014 mmの段差と、視覚的手掛かりを加えない0.021 mmの段差が同じ高さに知覚される傾向がわずかにみられていた。従って、実際の段差高さが異なると、主観的高さの増加量も異なる可能性が考えられる。しかしながら、第4章の実験ではラップフィルムを用いて実験を行っていたため、素材の違いが段差知覚に影響を与える可能性も考えられる。

従って今後は、より大きい段差を基準とした場合に増加量がどのように変化するのかについても検証するとともに、素材に関する検証が必要がある。

## 第7章 実験 5：なぞり動作中の押付力の計測

ここまで、本研究が発見した視触覚クロスモーダル現象によって、主観的段差がどのように変化するかを検証してきた。

従って本章では、なぜ主観的段差の変化が起こったのかを検証する第一歩として、なぞり動作中の指の押付力を計測する実験を行った。

### 7.1 試料の製作

試料の模式図を図 7.1 に示す。ここでは試料の素材として、第 4 章の実験で用いたラップフィルムと第 5 章の実験で用いたガラスの 2 種類を用いて、大きさ 75 x 75 mm の試料を製作した。

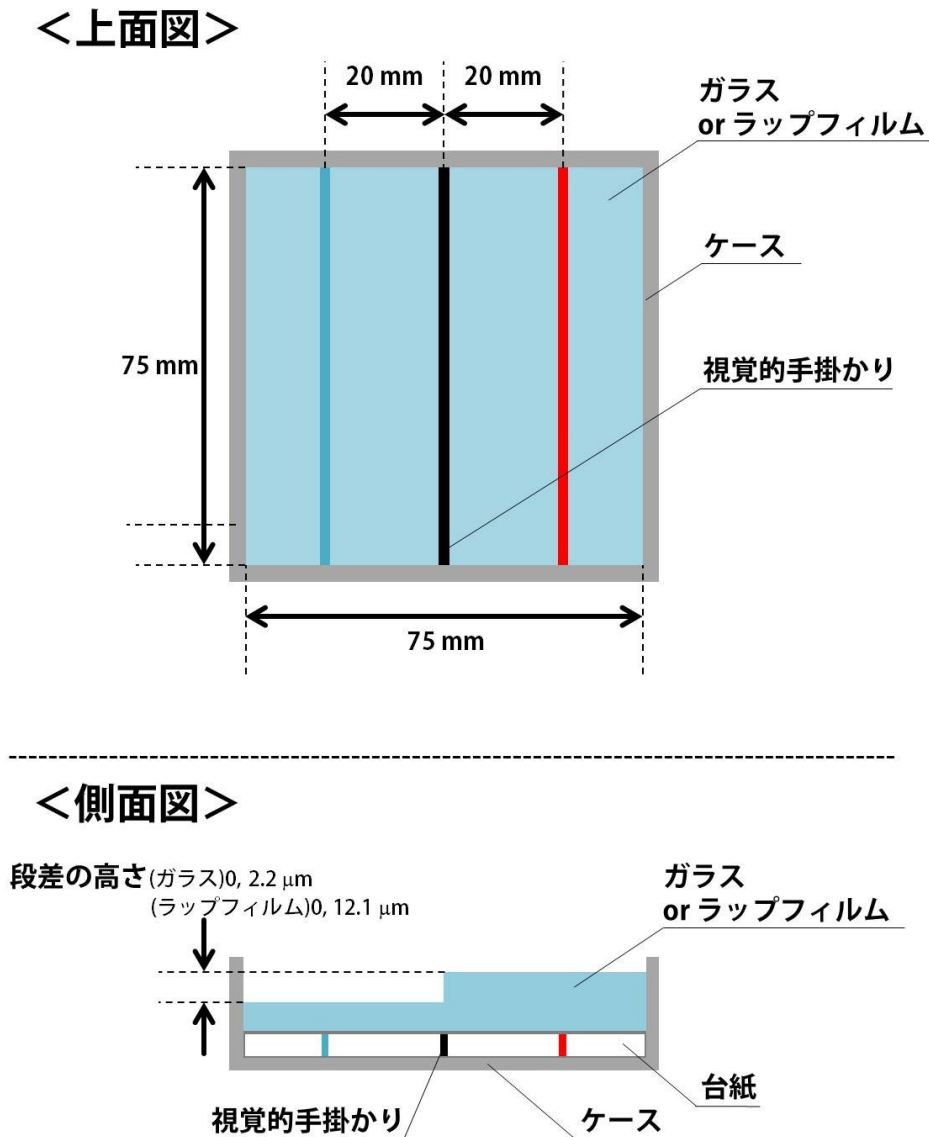


図 7.1 実験試料模式図

ラップフィルムの試料は 4.1 で述べた手順と同じ手順で、ラップフィルム 0, 1 枚分の段差を持つ試料を製作した。ここで製作した試料の形状計測をレーザ顕微鏡で行った。レーザ画像と断面形状を図 7.2 に示す。図 7.2 よりラップフィルムで製作した試料は、薄膜蒸着で製作した試料に比べて段差部分の形状が直角に近いことが分かる。また計測の結果、ラップ 1 枚分の段差を設けた試料の段差高さは  $12.1\ \mu\text{m}$  であることが分かった。

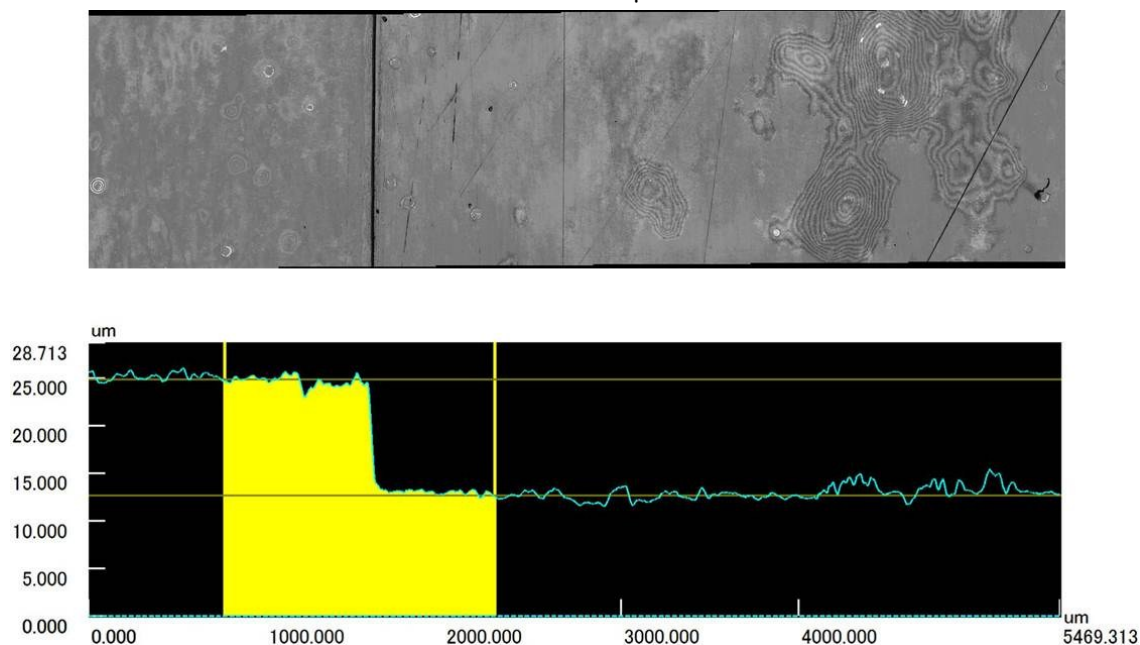


図 7.2 ラップフィルム試料の形状計測結果（上：レーザ画像，下：断面形状）

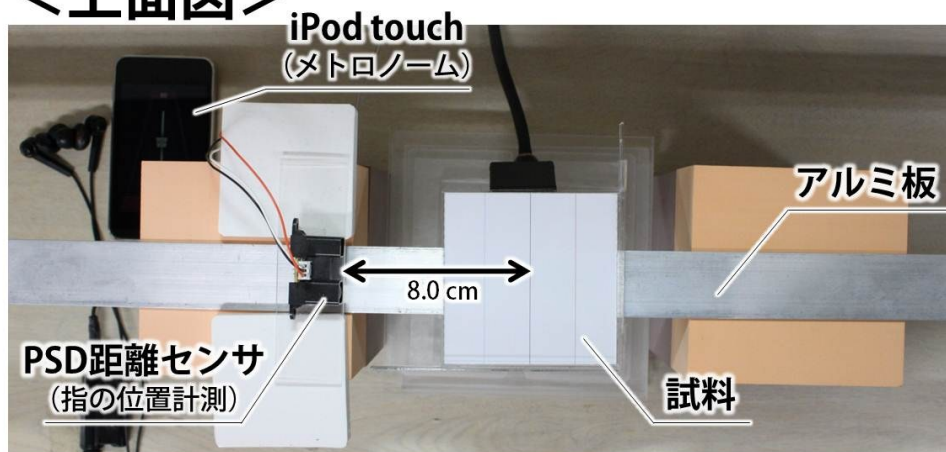
一方ガラス試料は、第 5 章の実験で製作した薄膜蒸着の試料のうち、段差高さが 0,  $2.2\ \mu\text{m}$  のものを用いた。

ラップフィルムとガラスの段差付き試料はアクリル板で製作したケースに入れ、それぞれの試料の下には、視覚的手掛かりとして黒色の線分（線幅： $0.1\ \text{mm}$ ）と、なぞり速度統制のための青色と赤色の線分（線幅： $0.1\ \text{mm}$ ）を  $20\ \text{mm}$  の間隔で印刷した台紙を敷いた。被験者はこの青色と赤色の線分の間を、指定された速さでなぞる。

## 7.2 実験環境

実験環境を図 7.3 に示す。高さの等しい 2 つのスペーサの上にアルミ板（幅： $30\ \text{mm}$ ，長さ： $864\ \text{mm}$ ，厚み： $2\ \text{mm}$ ）を乗せ、その上に試料を乗せるための台を両面テープで固定した。試料の中心から距離  $8.0\ \text{cm}$  の場所に、指の位置を計測するための PSD（Position Sensitive Detector）距離センサ（シャープ株式会社，2Y0A02 F 99）を、アルミ板に接しないようにスペーサを挟んで設置した。アルミ板を支える 2 つのスペーサの間には、指の押付力を計測するためのレーザ変位計（株式会社キーエンス，LK-G5000V）を設置した。この変位計の底面からアルミ板までの距離は  $11.8\ \text{cm}$  であった。

### <上面図>



### <側面図>

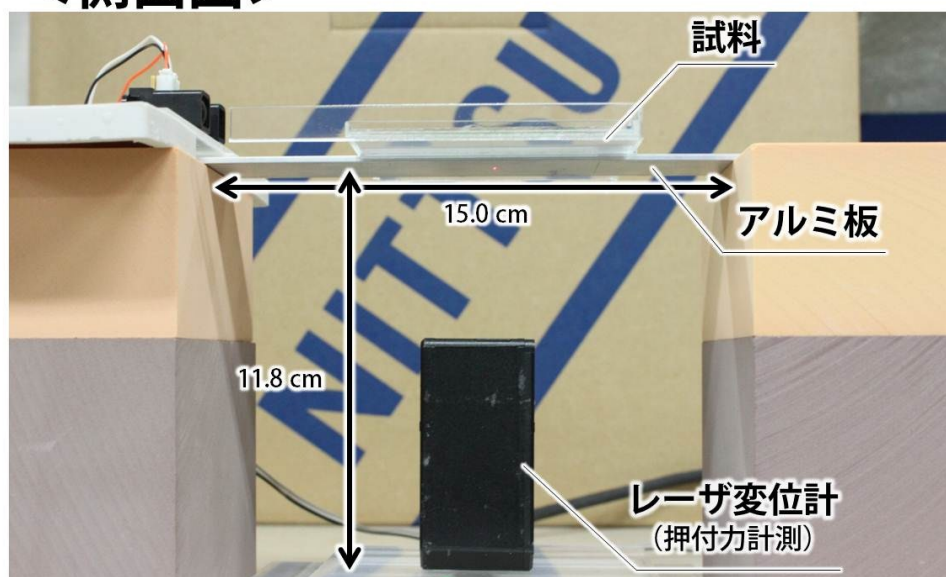


図 7.3 実験環境

ここでは、試料の横に設置した PSD 距離センサと下に設置したレーザ変位計を用いて、被験者のなぞり動作を計測した (図 7.4)。試料の横に設置した PSD 距離センサは被験者の指の位置を計測し、試料をなぞる速さを観察する。この PSD 距離センサの較正結果を図 7.5 に示す。試料の下に設置したレーザ変位計は、被験者が試料をなぞることによって縦方向に変形するアルミ板の沈み量を計測することで、試料をなぞる際の指の押付力を観察する。この実験環境を用いて力センサとして較正した結果を図 7.6 に示す。

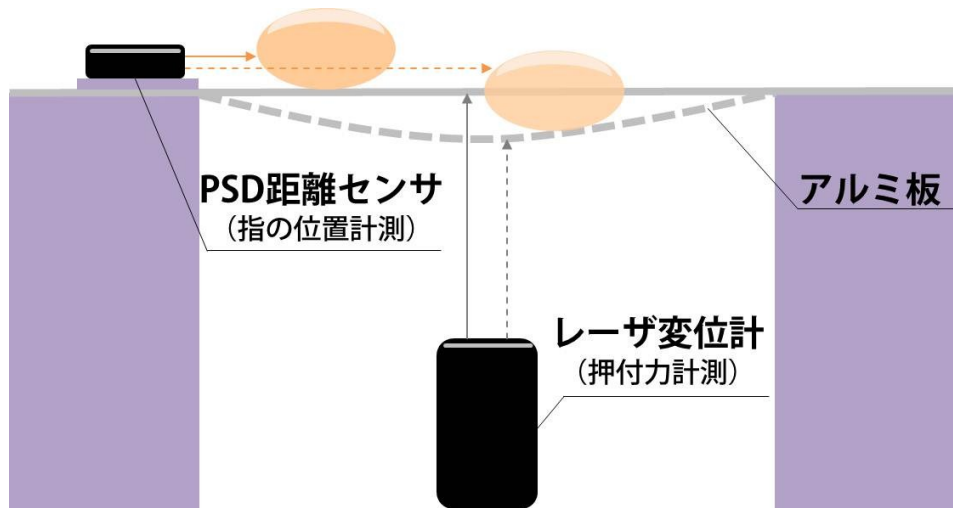


図 7.4 指の位置と押付力の計測手法

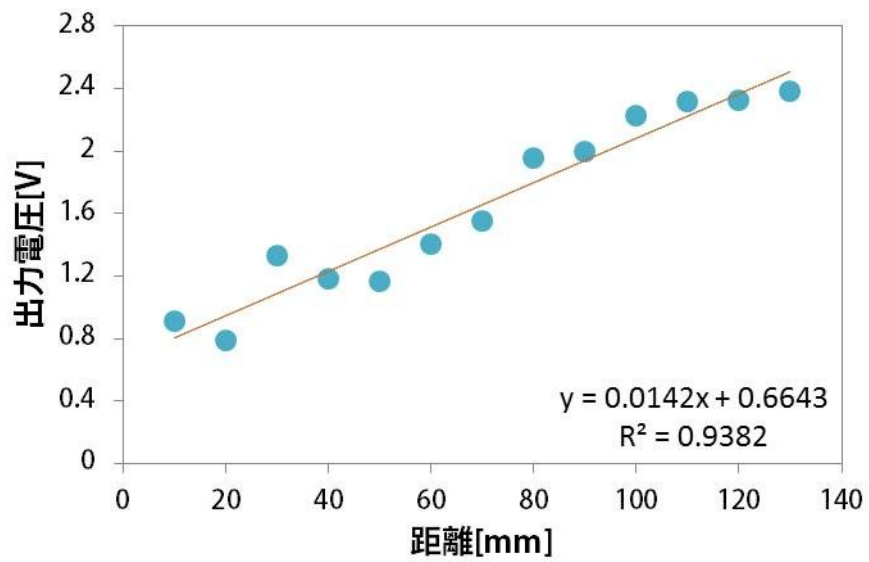


図 7.5 PSD 距離センサの較正

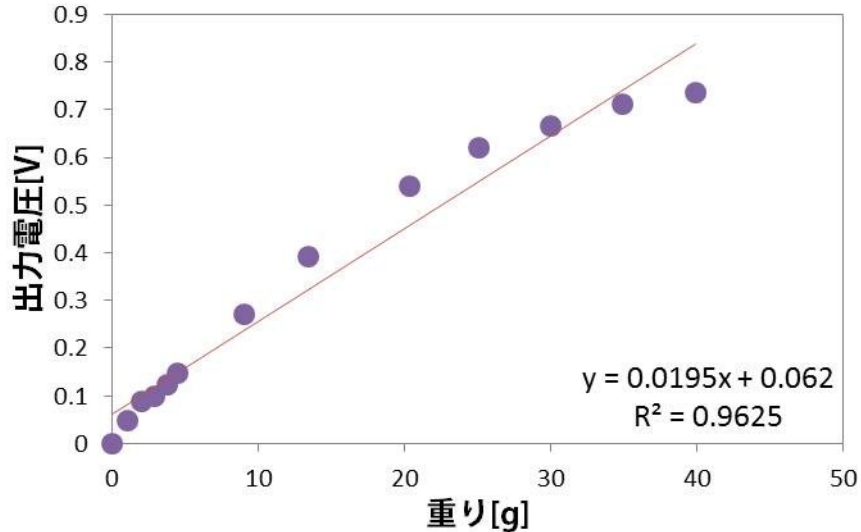


図 7.6 レーザ変位計の較正

### 7.3 実験手順

実験の様子を図 7.7 に示す。被験者は椅子に座り、試料を見下ろす姿勢で実験を行った。被験者は試料の青色の線から赤色の線まで、右手人差し指でなぞる。なぞり速度を統制するために、iPod touch からメトロノームの音を流し、音がそれぞれの線の上でのみ鳴るように動かすよう教示した。メトロノームは 80 回/分に設定したため、青色の線から赤色の線まで指を動かす時間は 0.75 秒、試料をなぞる速度は 53.3 mm/秒であった。また試料は連続して 3 回なぞり、指を戻す際にメトロノームの音が入らないように指示をした。被験者は実験開始前に、この方法で試料をなぞることに慣れるまで練習を行った。

被験者はメトロノームに合わせて 3 回なぞった後、「試料の段差の有無」について、「あった」「なかった」の 2 択から口頭で回答した。以上を 1 試行とし、8 種類の試料を 3 回ずつ呈示し、全 24 試行を行った。

被験者は 22～24 歳の 4 名（男性 3 名、女性 1 名）で、全員右利きであった。





図 7.7 実験の様子

## 7.4 実験結果

指の位置と押付け力の計測結果を図 7.8, 図 7.9, 図 7.10, 図 7.11 に示す. 横軸は時間 (ms), 縦軸は視覚的手掛かりからの距離 (cm) と押し付け力 (g) をそれぞれ表す. これらの図は全被験者の平均をとったものである.

実験では試料を 3 回なぞったが, 被験者によってこのなぞり開始のタイミングがずれていたため, なぞり開始の時間を合わせる処理を行ってから全被験者の平均をとった. また見やすさを考慮して 3 回のなぞり開始時間を調整して表示したため, 図に見られる山と山の時間間隔は, 実際に行った実験とは異なっている. なお, 第 1 の山 (1 回目のなぞり) を 50 ms から, 第 2 の山 (2 回目のなぞり) を 1000 ms から, 第 3 の山 (3 回目のなぞり) を 2000 ms から始まるように配置した.

まず, ラップフィルム試料の条件からみていく. 図 7.8 より段差がない条件では, 押付け力は視覚的手掛かりの有無による差はないことが分かった. 一方図 7.9 より, 段差高さが 12.1  $\mu\text{m}$  の条件では視覚的手掛かりを付加した条件において, 押付け力が増加する傾向がみられた. なお, 指の移動速度に関しては視覚的手掛かりの有無によって差はないことが分かった.

### ラップフィルム, 0 $\mu$ m

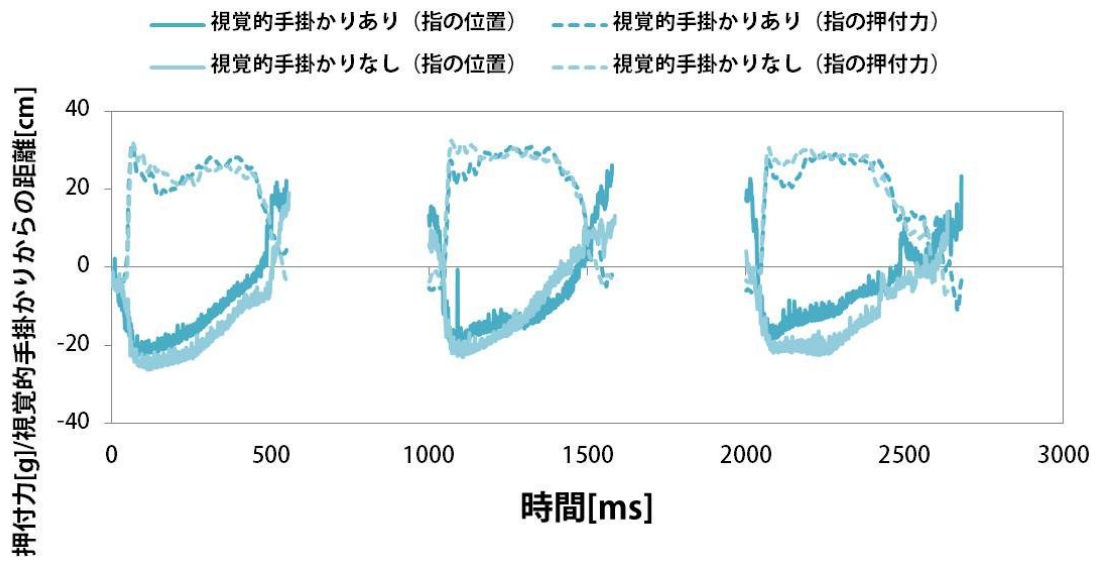


図 7.8 移動速度, 押付力の変化 (素材:ラップフィルム, 段差高さ:0  $\mu$ m)

### ラップフィルム, 12.1 $\mu$ m

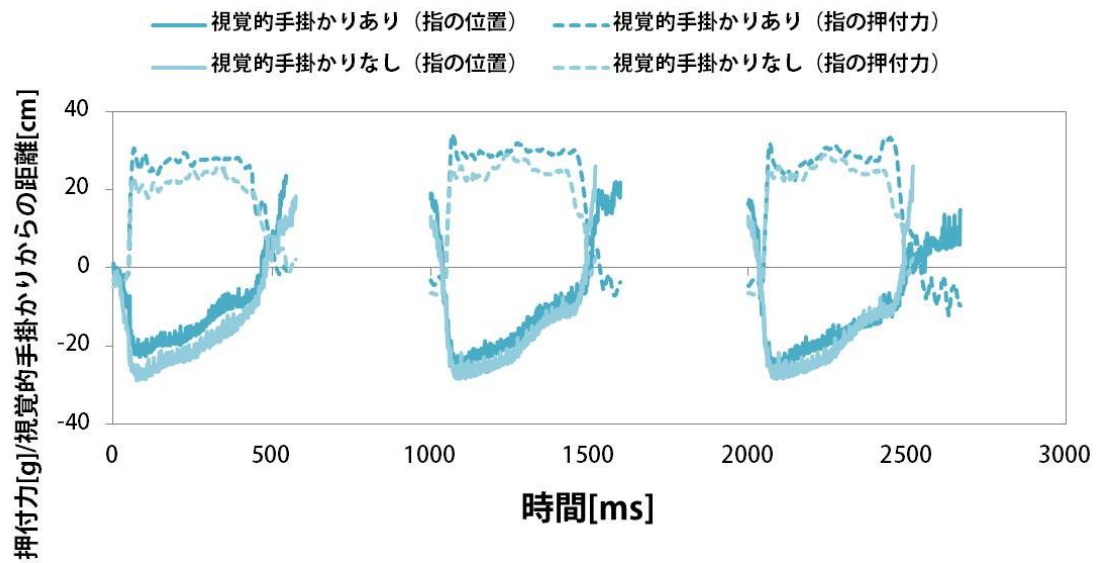


図 7.9 移動速度, 押付力の変化 (素材:ラップフィルム, 段差高さ:12.1  $\mu$ m)

## ガラス, 0 $\mu\text{m}$

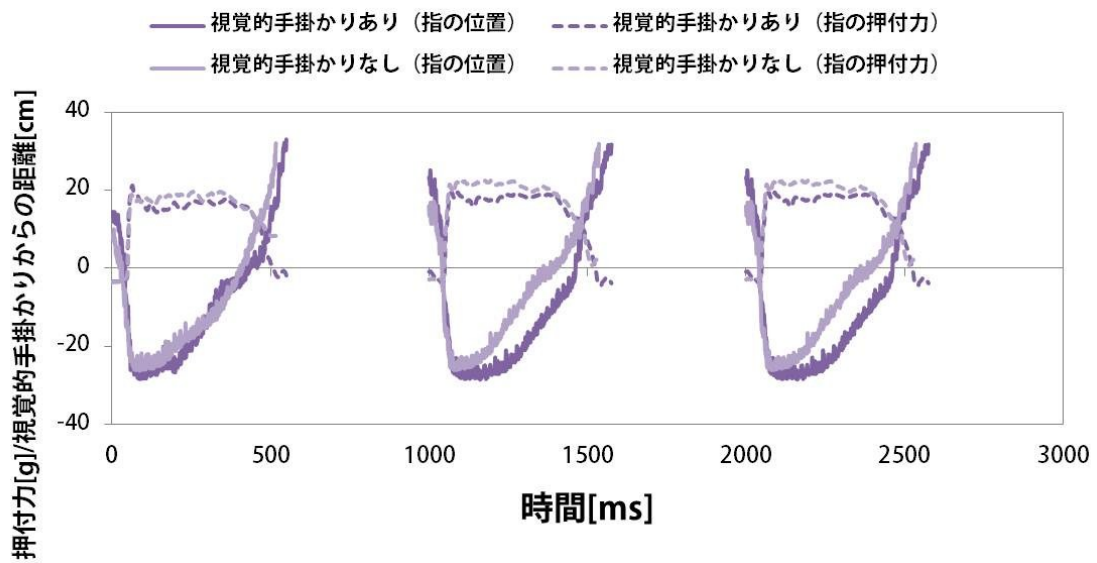


図 7.10 移動速度, 押付力の変化 (素材: ガラス, 段差高さ: 0  $\mu\text{m}$ )

## ガラス, 2.2 $\mu\text{m}$

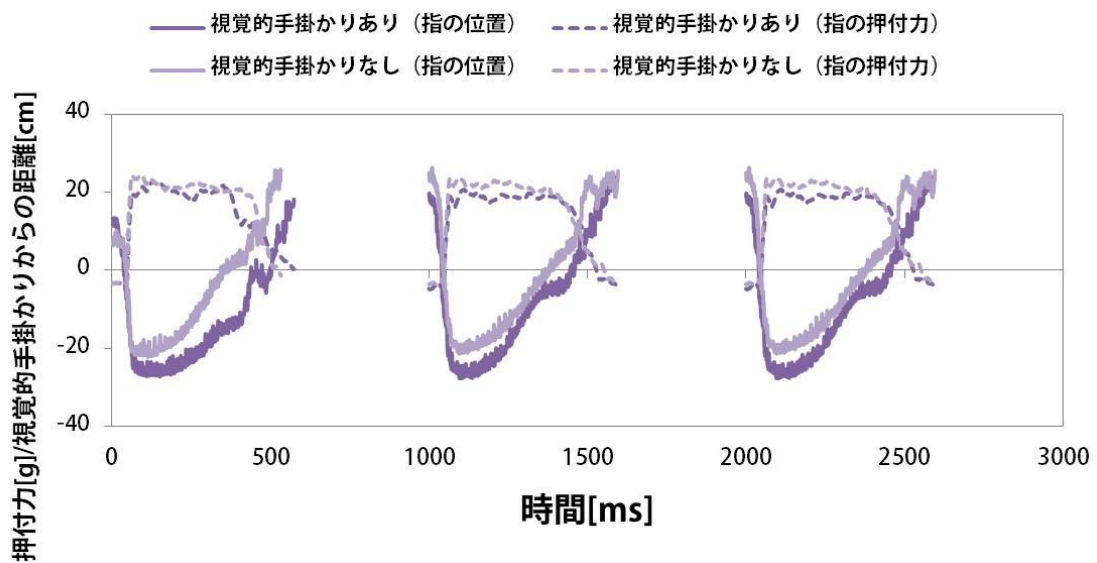


図 7.11 移動速度, 押付力の変化 (素材: ガラス, 段差高さ 2.2  $\mu\text{m}$ )

次に, ガラス試料の条件についてみていく. 図 7.10, 図 7.11 より, 指の移動速度, 押付力共に段差の有無に関わらず, 視覚的手掛かりの有無による差はないことが分かった.

また, ラップフィルム試料とガラス試料を比較した場合, 視覚的手掛かりの有無や段差の高さに関わらず, ラップフィルム試料の方が全体に押し付け力が大きいことが分かった.

段差の有無に関する回答平均を図 7.12 に示す. 図 7.12 より, 表面の素材や段差の高さに関わらず, 視覚的手掛かりの有無によって段差の有無は変わらないことが分かった. すなわち第 5 章の実験結果と同じく, 段差知覚の閾値は変化していないことが示された.

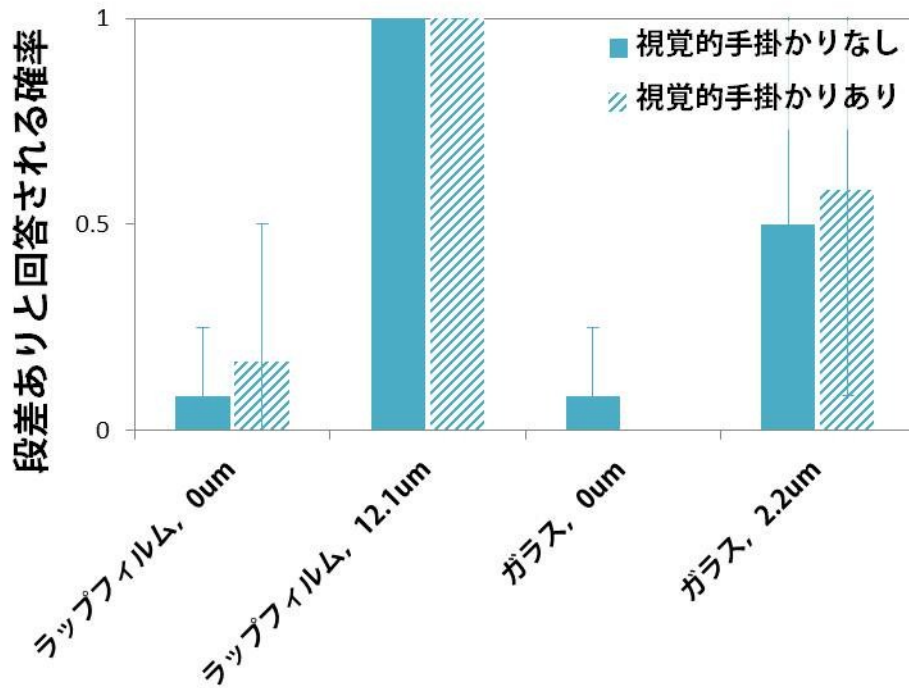


図 7.12 段差があると回答される確率

## 7.5 考察

ここまでの実験において、本研究が発見した視触覚クロスモーダル現象によって、主観的段差がどのように変化するかを検証してきた。従って本章では、主観的段差の変化が起こった原因を探る第一歩として、なぞり動作中の指の押付力を計測する実験を行った。

実験の結果、段差のないラップフィルム試料と、段差のないガラス試料、段差のあるガラス試料の 3 つの条件において、視覚的手掛かりの有無で押付力の変化は認められなかった。しかしながら、段差の高さが 12.1  $\mu\text{m}$  ラップフィルム試料においては、視覚的手掛かりを付加することで指の押付力が増加する傾向がみられた。すなわち、視覚的手掛かりのヒトの行動に影響を与えたと言える。

この押付力の変化と、第 6 章で示された主観的段差高さの変化の関係について考える。今回用いたラップフィルム試料とガラス試料は、それぞれ第 4 章と第 6 章において主観的段差高さの変化が確認されていた。そして本実験においては、このうちのラップフィルム試料でのみ、押付力の変化が確認された。従って、視覚的手掛かりによる押付力の増加は、主観的段差高さの増加の原因ではないと考えられる。

次に、なぜ段差のあるラップフィルム試料でのみ押付力の変化が生じたのかについて考える。この原因として、段差の形状と視覚的手掛かりのマッチングが考えられる。ガラス試料の段差 (図 5.14) は角がなく丸みを帯びているのに対し、ラップフィルム試料の段差 (図 7.2) は直角に近い形状をしている。また、本論文全体を通して用いた視覚的手掛かりは、幅 0.1 mm の細くて黒い線分である。この視覚的手掛かりが被験者に尖った段差を予想させたとする、その予想と実際の段差形状が一致していたラップフィルム試料での

み、行動へ影響が出たのではないかと考えられる。すなわち、視覚刺激から予想される触覚刺激（鋭い、滑らか）と、実際に与えられる触覚刺激が一致した場合にのみ行動が変化する、という仮説が立てられる。

この仮説を検証するための実験として、例えば次のようなものが考えられる。本実験で用いたガラス試料とラップフィルム試料に付加する視覚的手掛かりとして、なだらかな段差を想起させるようなものを加える。なだらかさを表現する手段としては、図 7.13 に示したように線に濃淡を付けることなどが考えられる。もし、このような視覚的手掛かりとガラス試料を組み合わせた条件を呈示した際に、本実験においてラップフィルム試料で見られたような押付力の変化が現れか否かで、仮説の真偽が示されると考えられる。

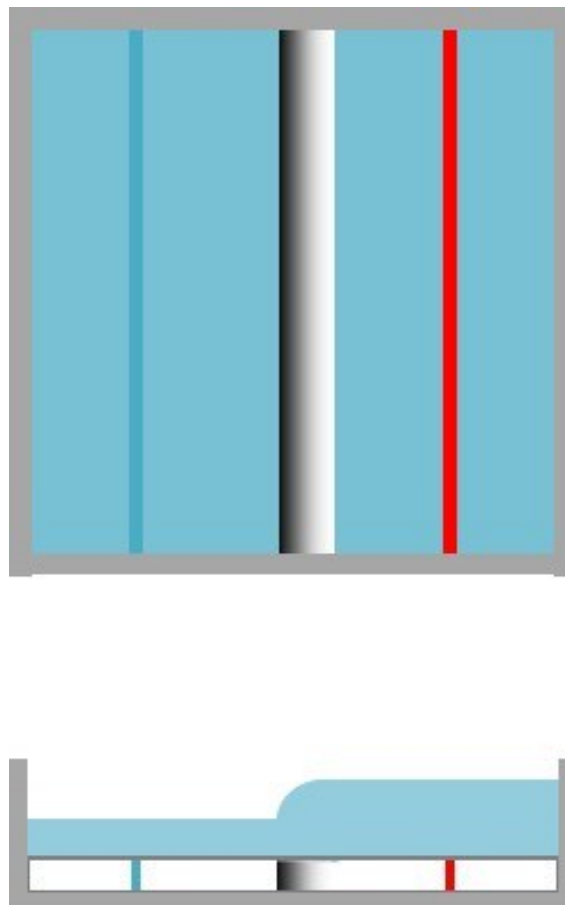


図 7.13 なだらかな視覚的手掛かりを付加した試料

## 第8章 結論

本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いたタッチパネルへの触覚的手掛かり付加手法を提案した。これは、キーの境界線に段差を設けたシートをタッチパネルに貼るが、キー入力以外の操作の妨げにならないように、視触覚クロスモーダル現象を用いて段差の ON/OFF を切り替える、というものである。これにより、フリック入力のテキスト入力パフォーマンス向上を狙う。

本論文では第 3 章にてまず、提案手法によって付加される触覚的手掛かりの形状そのものが、そもそもフリック入力によるテキスト入力パフォーマンスを向上させる効果があるか否かを検証する実験を行った。その結果、キーの境界線に段差を設けることで、正解率や入力速度が向上することが示された。

第 4 章では、提案手法で用いる視触覚クロスモーダル現象において、視覚的手掛かりの付加が主観的段差高さの知覚にどのような影響を与えるかを、ラップフィルムで製作した試料を用いて検証した。その結果、視覚的手掛かりを付加することで主観的段差高さが高くなる可能性が示唆された。しかしながら、この実験で用いた試料の段差はヒトの段差知覚閾値を大きく上回っており、本研究が狙う主観的段差の ON/OFF 制御の可能性については検証出来なかった。

従って第 5 章では、段差知覚閾値近傍の段差試料を製作し、これを用いて主観的段差の ON/OFF 制御の可能性の検証を行った。その結果、知覚閾値近傍の段差を用いても、視覚的手掛かりの有無によって主観的段差の ON/OFF 制御は出来ないことが分かった。従って、本研究が発見した視触覚クロスモーダル現象は視覚による触覚閾値の向上ではなく、主観的知覚量の増加であることが示された。

第 6 章では第 5 章の結果をもとに、視覚的手掛かりの付加によって、主観的段差高さがどの程度増加するのかを算出する実験を行った。その結果、段差知覚閾値周辺の段差に視覚的手掛かりを付加した場合、実際の段差より約  $0.8 \mu\text{m}$  段差を大きく知覚することが分かった。

第 7 章では、主観的段差の変化が起こった原因を探る第一歩として、なぞり動作中の指の押付力を計測する実験を行った。その結果、段差のあるラップフィルム試料に視覚的手掛かりを付加した条件でのみ、押付力が増加することが分かった。従って、視覚的手掛かりの付加によってヒトの行動が変化したと言える。一方で、主観的段差が変化することが確認されている別の条件ではこのような押付力の変化はみられなかったことから、視覚的手掛かりによる行動への影響は、主観的段差高さの変化とは関係のない現象であると考えられる。

以上より、本研究が提案した触覚的手掛かり付加手法を実際に用いることで、テキスト入力をしない場合は操作を妨げることのない「存在が気にならない微小な段差」だが、テキスト入力を行うためにキーボードを表示すると「気になる段差」になるような状態の変化が予想される。今後は実際にこの現象を用いて段差の強調をした触覚的手掛かりでも、

フリック入力のテキスト入力パフォーマンスが向上する効果があるか否かを検証する。

本研究が発見した視触覚クロスモーダル現象には、段差と視覚的手掛かりの 2 つの要素があり、本論文では主に段差に注目して検証実験を行ってきた、しかし今後は、視覚的手掛かりにも注目して実験を行いたい。具体的には、視覚的手掛かり線の幅や、色、濃度、そもそもの形などを変更し、この現象の発現に必要な要素を抽出すると共に、それぞれの条件を変更した場合に段差の知覚にどのような変化が現れるのかを観察する。既に予備実験において、視覚的手掛かりの形状をこれまで用いていた直線線から小さな丸い点に変えることで、得られる感触が変化する可能性が示唆されている。

また、複数の微小段差に対して単一の視覚的手掛かりを与えることで、段差を選択的に強調することが可能であるかも検証する。もしこれが可能であれば、例えば iPhone の角度を変えたときに表示されるキーボードの形が変わるような場合にも、図 8.1 のように元から沢山の段差がついているシートを張っておくことで、画面に表示される視覚的手掛かりを変えるだけで、様々な形のキーボードに対応が可能である。



図 8.1 視覚的手掛かりによって、触覚刺激を選択的に強調する

## 謝辞

修士 2 年生にして初めて、自分が提案したテーマで研究することが出来、また初めて先生から「それはおもしろいですね」のお言葉を頂くことが出来、本当に幸せで充実した 1 年間でした。タッチパネルが流行っている時世、知覚工学系に興味はあるが複雑なことが苦手な私だから思いついた、実に怠け者的なテーマだったかな、と思わなくもないです。

このような素敵な 1 年を過ごすことが出来たのは、研究室の皆様のお陰です。博士課程の福嶋さん、未知さん、蜂須さんのお三方にはお世話になりました。殊蜂須さんにおかれましては、引越しをして席が近くなってから事あるごとに気にかけて頂き、本当に有り難かったです。

同期の岡崎くん、岡部くんにも感謝の気持ちでいっぱいです。学部生の頃はツッコミ役だったような気がしなくもない岡崎くんのボケを、岡部くんと 2 人でスルーする機会がなくなるのは…もとい、兎角ギーク系の話題に敏感な 2 人の話を聞く機会がなくなるのは、非常に寂しい限りです。理由は何でも良いので、定期的な集まりを激しく所望します。

栗原くんと西村さんが留学している間、一時的にお預かりした 2 人のハイスペック女子、加藤さんと中村さん。あらゆる分野で頼りにならない先輩で誠に申し訳なかったです。が、個人的には 2 人の研究に一時的にでも関わられたこと、そのハイスペック振りを魅せつけられたことは、大変刺激になりました。有難う御座いました。

今は梶本研ではないですが、学部 4 年生の頃にご指導くださった古川先生、岡野さん。お二方から学んだことは多く、最早無意識のレベルに刷り込まれている気がします。その節は大変お世話になりました。

昨年私の下についてくれた熊谷くん。元気でしょうか。それだけが心配です。

そして、何を置いても梶本先生、本当に有難う御座いました。先生のもとで 3 年間も研究に取り組めたことを、とても幸せに思います。研究をするための技術はもちろん、発表の仕方、ものの考え方など、研究に繋がる多くのことを学ぶことが出来ました。最終的には、曲がりなりにも自分で提案したテーマで研究をすることが出来るようになりました。本当に有難う御座いました。ご恩返しが出来なかったことが唯一の心残りです。

多くの研究室では、学生は長く続いているプロジェクトの一部を研究テーマとして与えられますが、梶本研では自分自身で一からテーマを考え、それを有り難くも自分で実行する機会があります。もしこの拙い修論が新しい研究に取り組む時期にある人の目に触れたのであれば、自分で考えた研究テーマで研究することをお勧めしたいです。与えられたテーマに取り組むのと、自分で考えたテーマに取り組むのでは、ありとあらゆるものが違います。もちろん、提案すれば即採用というわけにはいかないですが、せっかく機会を与えて頂いているので、是非挑戦して欲しいと思います。

長くなりましたが最後に、3 年間に渡る研究室生活を支えてくれた両親と、このテーマを思い付ききっかけとなった iPod touch を譲ってくれた弟に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。



## 関連発表

Yokoyama M., Hachisu T., Satou M., Fukushima S., Kajimoto H.: Control of Ridge by Using Visuotactile Cross-Modal Phenomenon, ITS(Interactive Tabletops and Surfaces) 2012, CAMBRIDGE, MA

横山, 蜂須, 佐藤, 福島, 梶本: 視触覚クロスモーダルによる凹凸知覚の鋭敏化, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 神奈川, 2012

横山, 蜂須, 佐藤, 福島, 梶本: 視触覚クロスモーダル現象を用いたタッチパネルへの触覚フィードバックの付加, 第 10 回研究会力触覚の提示と計算, 沖縄, 2013

## 参考文献

- [1] 大山, 今井, 和気: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書店, 1994
- [2] 内川: 講座<感覚・知覚の科学>3 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, 2008
- [3] 下條: 触覚の生理・心理学の初歩:  
<http://www.rm.mce.uec.ac.jp/sice/2006HapticsCommitteePPt.pdf>
- [4] 宮岡, 大岡, 川村, 三矢: 滑らかさ認識の触覚情報処理機構, ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, vol.B, pp.803~806, 1996
- [5] 大岡, 宮岡, 河村, 三矢: 可変段差呈示装置によるヒトの表面粗さ弁別能力試験, 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻, 625 号, 1998
- [6] 大岡, 宮岡, 河村, 三矢: ヒトの表面粗さ弁別に及ぼす触運動速度の影響, 日本機械学会論文集 (C 編), 66 巻, 641 号, 2000
- [7] LaMotte. R. H., Srinivasan M. A.,: Tactile discrimination of shape: Responses of slowly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad, *The Journal of Neuroscience*, Vol.7, pp.1655-1671, 1987
- [8] Taylor M. C., Kennett S., Haggard P.,: Persistence of visual-tactile enhancement in humans, *Neuroscience Letters*, 354, pp.22-25, 2004
- [9] Honoré J., Bourdeaud'hui M., Sparrow L.,: Reduction of cutaneous reaction time by directing eyes towards the source of stimulation, *Neuropsychologia*, Vol.27, Issue.3, pp.367-371, 1989
- [10] Kennett S., Taylor M. C., Haggard P.,: Noninformative vision improves the spatial resolution of touch in humans, *Current Biology*, Vol.11, No.15, pp.1188-1191, 2001
- [11] Sears A.,: Improving Touchscreen Keyboards: Design issues and a comparison with other devices, *Interacting with Computers*, Vol.3, Issue.3, pp.253-269, 1991
- [12] Hasegawa A., Yamazumi T., Hasegawa S., Miyano M.,: Evaluating the input of characters using software keyboards in a mobile learning environment, *Wireless, Mobile and Ubiquitous Technology in Education (WMUTE)*, 2012 IEEE Seventh International Conference on, pp.214-217, 2012
- [13] Driver J., Spence C.,: Crossmodal attention, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.8, pp.245-253, 1998
- [14] Tipper, S.P., Phillips, N., Dancer, C., Lloyd, D., Howard, L.A., McGlone, F.,: Vision influences tactile perception at body sites that cannot be viewed directly, *Experimental Brain Research*, Vol.139, Issue.2, pp.160-167, 2001
- [15] Taylor M. C., Kennett S., Haggard P.,: Vision modulates somatosensory cortical processing, *Current Biology*, Vol.12, Issue.3, pp.233-236, 2002
- [16] Press C., Taylor M. C., Kennett S., Haggard P.,: Visual enhancement of touch in spatial body representation, *Experimental Brain Research*, Vol.154, Issue.2, pp.238-245, 2004
- [17] Serino A., Farne A., Rinaldesi M. L., Haggard P., Ladavas E.,: Can vision of the body ameliorate impaired somatosensory function?, *Neuropsychologia*, Vol.45, Issue.5, pp.1101-1107, 2007
- [18] イリュージョンフォーラム「マガーケ効果」:  
<http://www.brl.ntt.co.jp/IllusionForum/a/mcGurkEffect/ja/index.html>
- [19] イリュージョンフォーラム「ダブルフラッシュ錯覚」:  
<http://www.brl.ntt.co.jp/IllusionForum/a/doubleFlashIllusion/ja/index.html>
- [20] Bau O., Poupyrev I., Israr A., Harrison C.,: Tesla-touch: Electro vibration for touch surfaces, *UIST '10 Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.283-292, 2010
- [21] Jansen Y., Karrer T., Borchers J.,: MudPad Tactile Feedback for touch screen, *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.4351-4356, 2010

- [22] 嵯峨, 出口: 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける定量的凹凸感提示方法, 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2011
- [23] 宇戸, 岡崎, 佐藤, 福嶋, 梶本, 手部への電気刺激を用いたタッチインターフェースのための触力覚提示手法の検討, インタラクション 2012
- [24] Tactus Technology, Inc.: Taking touch screen interfaces into a new dimension, A tactus technology white paper, 2012
- [25] Fukumoto M., Sugimura T.: Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels, CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.1221-1222, 2001
- [26] Poupyrev I., Maruyama S., Rekimoto J.: Ambient Touch: Designing Tactile Interfaces for Handheld Devices, UIST '02 Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.51-60, 2002
- [27] Immersion Corporation. "TouchSense":  
<http://www.immersion.com/products/touchsense-tactile-feedback/>
- [28] Lee S., Zhai S.: The performance of touch screen soft buttons, CHI '09 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.309-318, 2009
- [29] Koskinen E., Kaaresoja T., Laitinen P.: Feel-good touch: finding the most pleasant tactile feedback for a mobile touch screen button, ICMI '08 Proceedings of the 10th international conference on Multimodal interfaces, pp.297-304, 2008
- [30] Nashel A., Razzaque S.: Tactile virtual buttons for mobile devices, CHI EA '03 CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.854-855, 2003
- [31] 京セラ株式会社トピックス「新感覚タッチパネル」:  
[http://www.kyocera.co.jp/topics/2012/1003\\_ntcp.html](http://www.kyocera.co.jp/topics/2012/1003_ntcp.html)
- [32] ケータイ Watch 「【CEATEC JAPAN 2011】京セラ、キークリック感を再現する「新感覚タッチパネル」など」:  
[http://k-tai.impress.co.jp/docs/event/ceatec2011/20111005\\_481681.html](http://k-tai.impress.co.jp/docs/event/ceatec2011/20111005_481681.html)
- [33] 星野, 塚田, 峯: Tactile Driver: 触感を忠実に再現するタッチパネルシステム, 第 10 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, (WISS2002), 2002.
- [34] ITmedia ニュース「「触覚」を忠実に再現するタッチパネルシステム」:  
[http://www.itmedia.co.jp/news/0212/17/nj00\\_wiss\\_02tactile.html](http://www.itmedia.co.jp/news/0212/17/nj00_wiss_02tactile.html)
- [35] Hoggan E., Brewster S. A., Johnston J.: Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens, CHI '08 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1573-1582, 2008
- [36] 熊崎, 寺田, 伊藤: 触運動による長さ知覚における視覚の役割, 電子情報通信学会技術研究報告, 106(328), pp. 1-6, 2006
- [37] Marc O. Ernst, Martin S. Banks.: Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion, NATURE, Vol.415, pp.429-433, 2002
- [38] Kajimoto H.: Skeletouch: Transparent Electro-Tactile Display for Mobile Surfaces, SIGGRAPH ASIA 2012
- [39] Fukumoto M.: PuyoSheet and PuyoDots: Simple Techniques for Adding "Button-push" Feeling to Touch Panels, CHI EA '09 CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.3925-3930, 2009
- [40] 堂田, 望山: 触感デザインのための印刷物転写法と Sticky-band Illusion, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.174-177, 2010
- [41] iTunes プレビュー「タイピング革命 Free」:  
<https://itunes.apple.com/jp/app/taipingu-ge-mingfree/id409693026?mt=8>