

Title	スマートフォンにおける厚みによる摩擦感設計
Sub Title	Design for subjective friction of smartphone with thickness of outer case
Author	竹村, 純(Takemura, Jun) 稲見, 昌彦(Inami, Masahiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2013
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2013年度メディアデザイン学 第310号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002013-0310">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002013-0310</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2013年度（平成25年度）

スマートフォンにおける厚みによる摩擦感設計

慶應義塾大学大学院  
メディアデザイン研究科

竹村 純



本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に  
修士(メディアデザイン学) 授与の要件として提出した修士論文である。

竹村 純

審査委員：

稲見 昌彦 教授 (主査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

古川 享 教授 (副査)

修士論文 2013年度（平成25年度）

## スマートフォンにおける厚みによる摩擦感設計

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

### 論文要旨

我々はスマートフォンを日常的に持ち歩き、生活の一部として欠かせないものになっている。スマートフォンは高感度タッチパネルや高解像度液晶の搭載などにより操作性を飛躍的に向上させているが、これらの性能向上には限界がある。そこで本論文ではスマートフォンにおける操作感を構成する要素の中でも摩擦感に着目し、スマートフォンの厚みを変化させることで摩擦感を自在に設計する手法を提案する。スマートフォン状の物体のスイープ操作の際に、操作部の摩擦係数が同一でも物体の厚みを増加させた場合に主観的な摩擦感が増加するという現象を用いスマートフォン筐体の厚みを制御することで操作時の摩擦感を設計する手法を提案することを目的とした。

本研究ではまず、主観的な摩擦感に対して支配的なパラメータを抽出するため、従来研究から得られた知見に基づいた基礎的な検証実験を行なった。その結果、スマートフォン状の把持物体の厚さと摩擦感の関係性において、支配的なパラメータが押下力であることが実験的に明らかになった。さらに、得られた結果に基づいて、スマートフォン操作時における画面上での摩擦感を一様に保つための設計を想定し、スマートフォン外形の設計手法を提案した。最後に、提案した設計手法に基づいて実際に押下力補正アダプターの設計を行い、実証実験により提案手法の妥当性を確認した。

キーワード：

筐体設計, 摩擦力, 摩擦感, 把持力, スマートフォン

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

竹村 純

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2013

Design for Subjective Friction of Smartphone with  
Thickness of Outer Case

Category: Science / Engineering

Summary

In this study, we focused on subjective friction among several elements composing operational feeling and we propose a new design method to control users' subjective friction by varying the thickness of devices such as smartphones. We have found a phenomenon that users feel the larger friction when they swipe the screen on the thicker devices even if the coefficients of friction of the screens are identical. Focusing on this phenomenon, we studied the design method to control the subjective friction by the thickness of devices as a design parameter. First of all, we did a fundamental experiment to reveal the mechanism of the phenomenon. As a result of the experiment, we found the strong correlation between the thickness of the devices and the pressing force by users. Then, we proposed a design method for shape of smartphones on which screens we can expect uniform subjective friction. We confirmed the validity of our design method by a demonstration experiment using attachment parts designed by the proposed method.

Keywords:

Product Design, Friction Force, Subjective Friction, Gripping Force, Smart Phone

Graduate School of Media Design, Keio University

Jun Takemura

# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 背景	1
1.2. 問題意識と課題	3
1.3. 目的	4
1.4. 構成	4
第 2 章 摩擦感についての関連研究	6
2.1. 摩擦とは	6
2.2. 摩擦知覚の仕組み	6
2.3. 摩擦感の提示方法	9
2.3.1 物理量に対する手法	9
2.3.2 心理量に対する手法	12
第 3 章 基礎的検証	13
3.1. 概要	13
3.2. 把持力の計測	13
3.2.1 摩擦感の主観的等価点の計測	14
3.2.2 用いた試験片と厚さ	14
3.2.3 実験手順	15
3.2.4 結果	16
3.2.5 考察	17
第 4 章 押下力分布制御のための設計	19
4.1. 端末背面の厚みにより押下力を制御する設計手法の提案	19
4.2. タッチパネル面の距離により押下力を制御する設計手法の提案	25

第5章 実証実験	27
5.1. 端末背面の厚みにより押下力を制御する設計手法の実証 . . . . .	27
5.1.1 実験目的 . . . . .	27
5.1.2 実験方法 . . . . .	27
5.1.3 実験手順 . . . . .	28
5.1.4 結果 . . . . .	32
5.1.5 考察 . . . . .	32
5.2. タッチパネル面の距離により押下力を制御する設計手法の実証 . .	39
5.2.1 観察 . . . . .	39
第6章 結論と展望	41
6.1. 結論 . . . . .	41
6.2. 今後の課題 . . . . .	42
6.3. 展望 . . . . .	43
謝辞	44
参考文献	45

# 目 次

1.1	フィーチャーフォンの操作 . . . . .	2
1.2	iPhone3G 画像はウィキメディア・コモンズより引用 [1] . . . . .	3
1.3	フリック操作の様子 . . . . .	4
2.1	皮膚の構造と機械受容器 [2] . . . . .	7
2.2	ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類 [2] . . . . .	8
2.3	ELECOM 社製 液晶保護フィルム PS-A12FLSA [3] . . . . .	10
2.4	アピロス社製 Fusso SmartPhone [4] . . . . .	10
2.5	スギタ社製 YUBISAKI [5] . . . . .	11
2.6	Vib-Touch [6] . . . . .	12
3.1	試験片 . . . . .	14
3.2	把持力計測実験の様子 . . . . .	15
3.3	被験者 A . . . . .	16
3.4	被験者 B . . . . .	17
3.5	被験者 C . . . . .	18
4.1	スマートフォンの底面 . . . . .	19
4.2	スマートフォン底部に装着するアダプターの設計 . . . . .	20
4.3	スマートフォン底部に装着するアダプターの三面図 . . . . .	21
4.4	押下力分布に合わせた補正アダプターの設計 (A) . . . . .	21
4.5	押下力分布に合わせた補正アダプターの設計 (B) . . . . .	22
4.6	押下力の三次元グラフ化 . . . . .	23
4.7	平面と交差させた三次元グラフ化 . . . . .	23
4.8	ベジェ曲線の作図 . . . . .	24

4.9	フィレットの作成 . . . . .	24
4.10	押し出し . . . . .	25
4.11	従来のスマートフォン . . . . .	26
4.12	考えられる設計 . . . . .	26
5.1	実験の様子 . . . . .	28
5.2	HUAWEI GL07S . . . . .	29
5.3	アダプター表面 . . . . .	29
5.4	アダプター裏面 . . . . .	30
5.5	被験者がアダプター装着スマートフォンを把持している様子 . . . . .	30
5.6	押下力補正アダプター . . . . .	31
5.7	押下力補正アダプターを装着したスマートフォン . . . . .	32
5.8	被験者 A 補正前 . . . . .	33
5.9	被験者 A 補正後 . . . . .	33
5.10	被験者 B 補正前 . . . . .	34
5.11	被験者 B 補正後 . . . . .	34
5.12	被験者 C 補正前 . . . . .	35
5.13	被験者 C 補正後 . . . . .	35
5.14	被験者 D 補正前 . . . . .	36
5.15	被験者 D 補正後 . . . . .	36
5.16	被験者 E 補正前 . . . . .	37
5.17	被験者 E 補正後 . . . . .	37
5.18	補正効果が確認できた被験者 . . . . .	38
5.19	補正効果が確認できなかった被験者 (被験者 E) . . . . .	39
5.20	作成したモックアップ . . . . .	40

# 表 目 次

2.1 皮膚感覚受容器の分類 .....	9
----------------------	---



# 第1章 序

# 論

## 1.1. 背景

コンピューターの世界には、東京大学和田英一名誉教授の有名な格言がある！アメリカ西部のカウボーイたちは、馬が死ぬと馬はそこに残していくが、どんなに砂漠を歩こうとも、鞍は自分で担いで行く。馬は消耗品であり、鞍は自分の体に馴染んだインターフェースだからだ。(中略)いまやパソコンは消耗品であり、キーボードは大切な、生涯使えるインターフェースであることを忘れてはいけない [7]。これは使用者の体にあったインターフェースは本来使い捨てるべきでないことを強く示唆している。

筆者が普段メモ書きやスケッチに使っている万年筆は長年の使用で筆者の癖にあわせてイリジウム合金のペン先が摩耗している。筆者にとってこれは紙に文字や絵を入力するための唯一無二のインターフェースであり、ペン先の狂いを恐れて人に貸すことはまずない。かつて写真機のライフサイクルが10年単位だった時代のプロカメラマンたちも、愛機に革を貼り付けて手との接触部のあたりを向上させたり、木を削りだしたグリップを装着するなどして唯一無二のインターフェースを作り上げていた。こういった個人にとって完全なインターフェースとなった状態を我々は「馴染んでいる」と言っている。

現在、スマートフォンやタブレットのようなハンドヘルドな情報端末機器が普及する時代になり、人と機械がより密接に結びつくようになり利便性は大きく向上しているが、情報端末機器のライフサイクルは短くなる一方である。コンピューターとインターフェースが一つのハードウェアに統合された製品が普及したことで、結果的にコンピューターとともにインターフェースまでもが当然のように使

い捨てられるものになってしまっているという負の面も見えている。

携帯電話端末では従来，キーボード型やテンキー型と呼ばれるような物理的なキーボードを持つフィーチャーフォンと呼ばれる端末が普及しており，Webの閲覧や文字の入力などの端末操作は図 1.1 のように，物理的なハードウェアキーボードを押下して行われていた。



図 1.1: フィーチャーフォンの操作

しかし，2008 年の iPhone3G (図 1.2) の登場を契機として [8]，物理的なキーボードを持たず，筐体上面をほぼ覆いつくすようにデザインされたタッチパネルと一体の画面上を通してほとんどの情報の入出力が行われるような携帯電話端末が普及してきている。

iPhone3G のように，携帯電話端末の中で携帯情報端末の機能を併せ持つものの中でも特にディスプレイ等の表示部分にタッチパネルを搭載したものを本論文ではスマートフォンと呼ぶ。2008 年にモバイル・コンテンツ・フォーラムから発行された「ケータイ白書 2009」によると，先程述べたフィーチャーフォンのような物理キーボードによる操作の需要は低下し [9]，これに変わってスマートフォンにおける Graphic User Interface (GUI) 操作では，指先でのフリック (図 1.3) による端末操作が普及し，画面上に配置されたバーチャルなキーやページ，アイコン



図 1.2: iPhone3G 画像はウィキメディア・コモンズより引用 [1]

ン等を指先で触れているかのように直接操作をするようになっている。その結果、タッチパネル操作時の摩擦感が操作感に直結するようになった。そこで日常的に触れる画面上での快適な操作感を設計するために、スマートフォン操作時における摩擦感の研究は重要である。

## 1.2. 問題意識と課題

スマートフォンの摩擦感を均一に保つことに焦点を絞り、考えられるパラメータとして、サイズ、重量、厚みなどが考えられる。しかし、サイズの変更は情報の表示量に直接関わるために大きく変更することは出来ず、また、重量化はユーザーにとって望ましくない。一方で、厚みは基板の薄型化などが進み、比較的設計自由度が高い。そこで本研究では、把持する対象物の厚みが主観的な摩擦感に寄与しているという知見を用いて、スマートフォンの外形を制御することによる摩擦感設計を試みる。



図 1.3: フリック操作の様子

### 1.3. 目的

本研究では，スマートフォンの操作時の摩擦感を任意に制御するため，厚さの設計に基づいたスマートフォンの外形設計手法を提案することを目的とする．具体的には，端末画面上のタッチパネルでのフリック操作を前提とした，摩擦感を厚みによって制御するための携帯電話の設計手法を提案し，実際に提案手法に沿った形で設計を行い，その妥当性を実験により確かめる．

### 1.4. 構成

本論文の以下の構成は次の通りである．

第 1 章では研究の背景と目的をまとめた．第 2 章では先行研究についてまとめ，本研究を進める上で重要な知見を整理する．第 3 章では，摩擦感において支配的な要因の抽出を行うための基礎的検証を実施する．第 4 章では，本研究で提案する摩擦感の設計手法について述べ，実際に提案手法を適用した設計を行い，実証

実験を行う。最後に，第5章で本論文の結論と今後の展望を述べる。

## 第2章

# 摩擦感についての関連研究

### 2.1. 摩擦とは

2つの接触する物体が相対的に運動しようとするときや運動している時に、これらの接触面でこの運動を妨げる反対方向の力が生じる現象のことを摩擦という [10]。本論文中で述べる摩擦とはこの中のいわゆる滑り摩擦のことであり、滑り摩擦は動摩擦の一種で、この場合に摩擦力は互いに接触しながら滑り運動している物体同士の間で常に運動方向と反対の方向に働いている [11]。

このときの摩擦力はアモンソン-クーロンの法則により、滑らせる速度や見かけ上の接触面積にかかわらず垂直荷重に比例していることが知られている [12]。

### 2.2. 摩擦知覚の仕組み

ヒトのが指先で摩擦を感じている時、指先の中にある生体センサの応答を通して知覚している [13]。ヒトの皮膚断面の模式図を図 2.1 に示す。ヒトの指先の中のセンサには4種類あることが知られており、それぞれメルケル細胞 (Merkel cell) (直径約  $7 \mu\text{m}$ , 厚さ約  $1 \mu\text{m}$ )、マイスナー小体 (Meissner corpuscles) (長さ約  $150 \mu\text{m}$ , 直径  $40 \sim 70 \mu\text{m}$ )、パチニ小体 (Pacinian corpuscles) (長さ  $0.5 \sim 2\text{mm}$ , 直径約  $0.7\text{mm}$ )、ルフィニ終末 (Ruffini endings) (長さ  $0.5 \sim 2\text{mm}$ ) と呼ばれている。これら4つのセンサは総じて触覚機械受容器と呼ばれているものだが、4種類は位置する場所や機能、特性がそれぞれ異なっている (表 2.1)。メルケル細胞は指先に触れている物体のテクスチャや曲率を力として感じ取る。マイスナー小体は指先と指先が触れている物体の間に滑りが生じた時に応答する。パ



チニ小体はメルケル細胞よりも細かいテクスチャ、つまり高い振動周波数（200～500Hz）によく応答し、指先全体の振動を脳に伝えている。ルフィニ終末は皮膚の伸びに対して反応する器官だと考えられている（図2.2）[14] [2]。指紋表面に接線方向の摩擦力が加わった場合には、指紋直下に2列に並んだマイスナー小体のうち一方のひずみエネルギー密度が大きくなり、他方が小さくなる。これにより指先の摩擦を知覚している。従って、摩擦感とは複数のマイスナー小体のエネルギー密度の差であると考えられる。

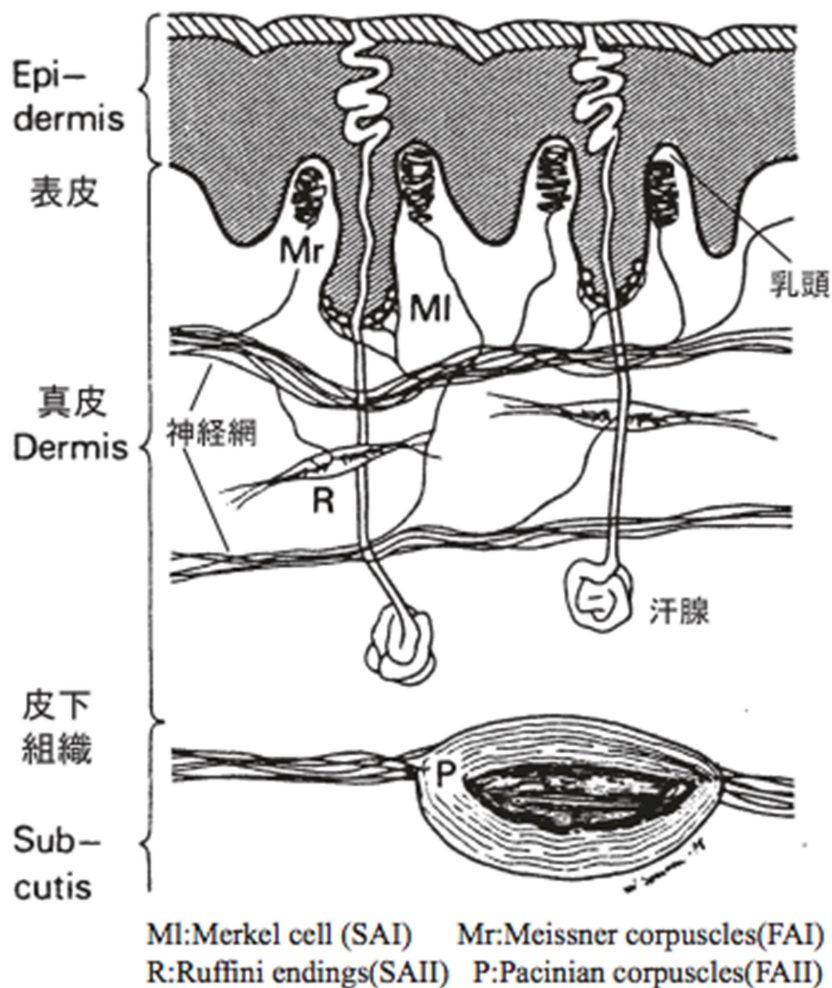


図 2.1: 皮膚の構造と機械受容器 [2]

	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 2.2: ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類 [2]



表 2.1: 皮膚感覚受容器の分類

	順応遅い	順応はやい
受容野狭い	メルケル細胞	マイスナー小体
受容野広い	ルフィニ終末	パチニ小体

## 2.3. 摩擦感の提示方法

摩擦感を制御するための手法は2つに大別することができる。つまり、まず「物理量」の制御であり、例えば構成物質の摩擦係数そのものや、指先に提示される摩擦力の制御が考えられる。次に考えられるのが「心理量」であるが、これは実際の摩擦力とは異なったとしても主観的に感じられる摩擦であると定義し、これの制御が考えられる。

### 2.3.1 物理量に対する手法

物理量を変化させる手法としてはすでに、表面に微小な凹凸を設ける加工をした透明プラスチックフィルムを貼り付けることによりスマートフォン操作時に指すべりを滑らかにし、快適な操作性を実現することを目的とした [3] 液晶保護フィルムが商品化されている (図 2.3)。

また、タッチパネルのガラス面をフッ素と化学結合させ薄膜のコーティングを施すことにより、タッチパネル表面の動摩擦係数を低下させ、滑りを向上させることを狙った [4] スマートフォン向けのフッ素コーティング剤も市販されている (図 2.4)。



図 2.3: ELECOCM 社製 液晶保護フィルム PS-A12FLSA [3]



図 2.4: アピロス社製 Fusso SmartPhone [4]

同様にスマートフォン操作時のタッチパネルと指先の間働く動摩擦係数の低減による操作性の改善を狙った商品としては通常のキュプラ系やポリエステル系、ポリウレタン系などとともに、アクリル製の導電糸を30%編みこんで作られた [5] 布製の指サックがある (図 2.5)。これはスマートフォン側ではなく、操作するユーザーの指先側の性質を改善する提案である。



図 2.5: スギタ社製 YUBISAKI [5]

### 2.3.2 心理量に対する手法

心理量を変化させる手法としてまず、昆陽らの開発した Vib-Touch インターフェースが提案されている [15]。これは触力覚情報を携帯情報端末上で手軽に利用することを目的とした触覚フィードバックインターフェースで、端末操作時にポインティングデバイスから指先へ制御した振動刺激を加えることで、Stick-Slip 現象、慣性・粘性感などの力覚を擬似的に提示することができ、端末画面中のオブジェクトとインタラクションする「仮想能動触」を実現するものである。



図 2.6: Vib-Touch [6]

また、中山らは同じ表面素材のスマートフォンでもその厚さや重さによってスワイプ操作時の摩擦感が異なるということを発見し、実験により、スマートフォン状の物体の厚みを増加させた時に、表面素材が同じである、つまりは物体の持つ摩擦係数が同じであるにもかかわらずスワイプ時の摩擦感は増加するという相関を明らかにした [16]。しかしこの現象が、物理的な実際の「摩擦力」の変化に起因しているのか、それともヒトの感じている「摩擦感」が変化していることによるのかは明らかにされていない。

## 第3章

# 基礎的検証

### 3.1. 概要

第2章で示したように中山らが行った実験結果 [16] からスマートフォン状の物体の厚みを増加させた時に表面素材を変化させない、つまりは摩擦係数を変化させない条件でスワイプ時の摩擦感が増加するということが確かめられている。この現象を利用すればスマートフォン筐体の材質に関わりなく、また複雑な装置を必要とせずとも摩擦感を制御することができる可能性がある。しかし、生じる現象の機序については解明されておらず、現状ではこの現象をスマートフォンへ適用する設計手法が確立されていない。そのため本章では押下力と摩擦感の関係性を明らかにすることを目的とする。

### 3.2. 把持力の計測

まず、摩擦感の増加は実際の摩擦力の増加によるものであると仮定する。そこで、摩擦係数を変動させずに厚みをパラメータとして変動させ、押下力を測定する。ただし、人が効率よく把持する力には個人差があり、把持力統制により主観的な摩擦感への注意が阻害されることが考えられたため、被験者の把持力の統制はあえて行わずに計測する。さらに、我々は日常的に滑りやすい物は強く把持することから、経験的に把持力と摩擦力との相関を経験的に知っていると考えられるからである。

### 3.2.1 摩擦感の主観的等価点の計測

被験者に厚さの異なる2つの試験片を両手にそれぞれ持たせ、基準となる片方の摩擦感とおなじになるように対象となる試験片をスワイプさせた。これにより、試験片に対する主観的等価点を求めた。なぜならば、被験者らは強い力で把持すると摩擦力が上がること、ひいては把持力と実際の摩擦力の相関を経験的に知っていると考えられるからである。

### 3.2.2 用いた試験片と厚さ

試験片はABS製で10, 15, 20, 25, 30 [mm]の5種類の厚みを用意し、すべて幅60[mm]、長さ110 [mm]、重さ75 [g]に統一する。

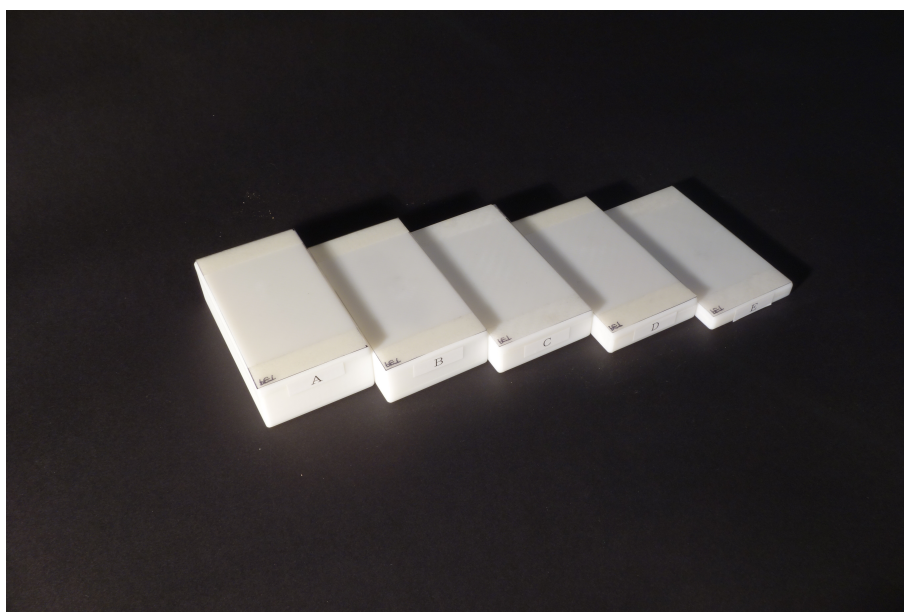


図 3.1: 試験片

また、これら試験片と把持力測定のための電子天秤 (YAMATO UDS-500N, 分解能 1[g], 測定可能最大値 5,000[g]) を用いた。試験片と電子天秤と摩擦係数の統制を図るためにエクシールコーポレーション社のぷよシートをはりつけた。



### 3.2.3 実験手順

被験者には右手に試験片を，左手に把持力測定用の電子天秤を把持させ，その後，試験片表面を右手親指で，電子天秤の表面を左手の親指でそれぞれなぞらせる．その上で，両方の親指の先で感じる摩擦感が等しくなるように把持を続けさせ，被験者がなぞっている際の押下力をデジタル秤上で実験者が目視で読み取った．代表値として，最大値と最小値の中間値を記録した．なお，試行毎に右手の試験片の厚さを変動させて計測している．

また，厚さに応じた把持力を計測するにあたり，事前に把持力の統制をおこなっていない．これは，効率よく摩擦感を得るための能動的な行動において，把持力に個人差があると考えられるためである．

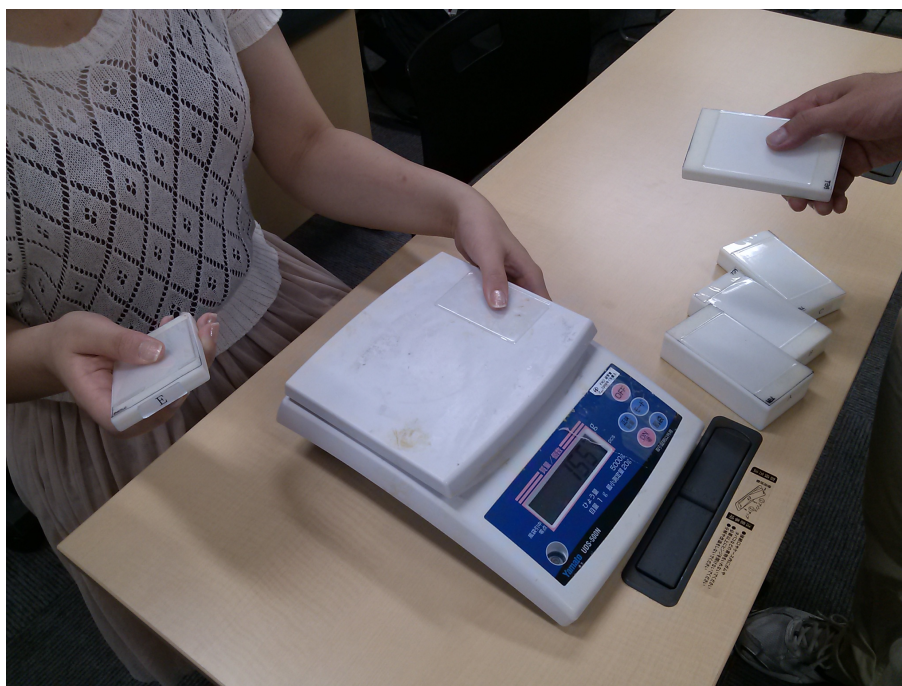


図 3.2: 把持力計測実験の様子

計測は以下の手順で行った．

1. 右手に把持力測定装置を把持させる
2. 左手に試験片を把持させる

3. 左右それぞれの親指の先で試験片と把持力計測装置をなぞらせる
4. 左右両方の指先で感じる摩擦感が等しくなるように把持させ続ける
5. 把持力計測装置の数値を読み取る

一人あたりこれを一つの厚さにつき 10 回ずつ施行する。なお、被験者に把持させる試験片の厚みの順序はランダムになっている。

### 3.2.4 結果

実験の結果 3 パターンの傾向が見られた。右手に持たせた試験片の厚みを増加させると、左手に再現される押下力が増加する傾向が確認された。10 倍の開きが出たその人にとっての最適な値が違う

図 3.3 に示すように、試験片の厚さが厚くなるほど押下力が強くなっている被験者 11 人中のうち 8 人がこれと同様の傾向が確認された。

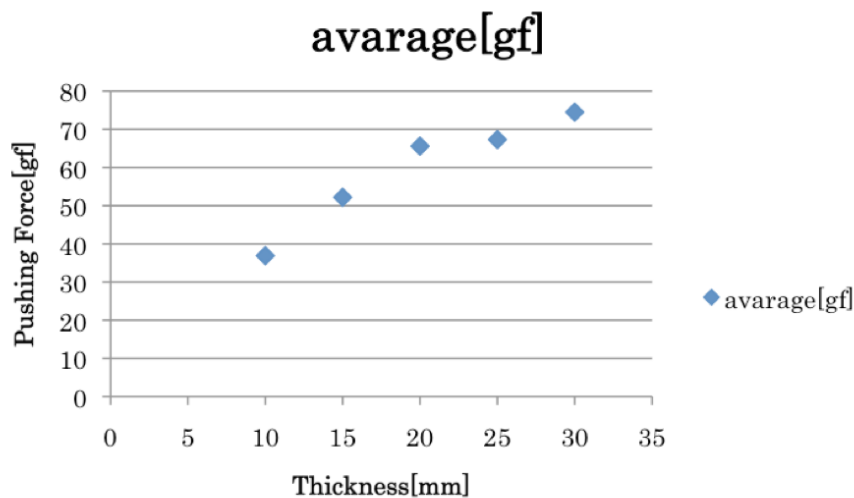


図 3.3: 被験者 A

図 3.4 に示す通り、被験者 11 人のうち 1 人は反対に試験片の厚さが厚くなるほど押下力が弱くなっている。



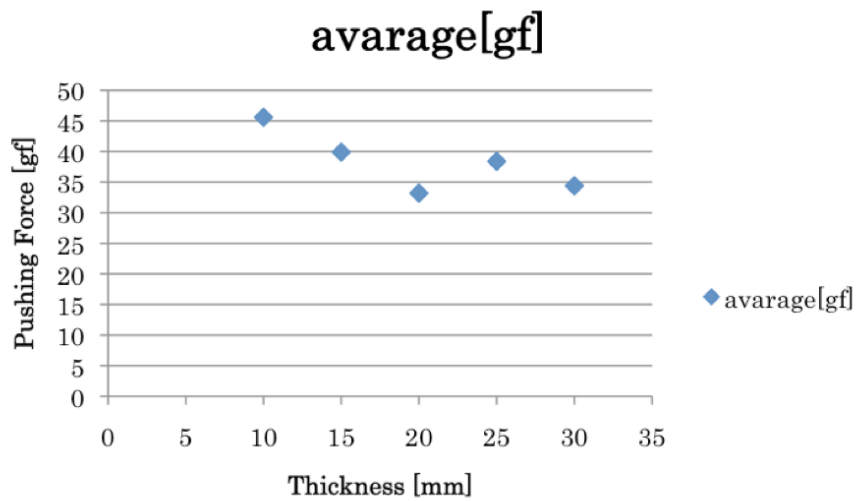


図 3.4: 被験者 B

図 3.5 に示す通り，被験者 11 人のうち 2 人には試験片の厚さと押下力の間に相関性が見られなかった．

### 3.2.5 考察

実験結果より，試験片の厚さと摩擦感，そして実際の摩擦力には相関があることがわかった．これは，対象物の厚みによって摩擦力が変化する現象が物理的な現象によって引き起こされているという可能性を示唆している．厚みを変化させることで押下力の補正が可能であり，ひいては表面の摩擦力の補正が可能であると考えられる．

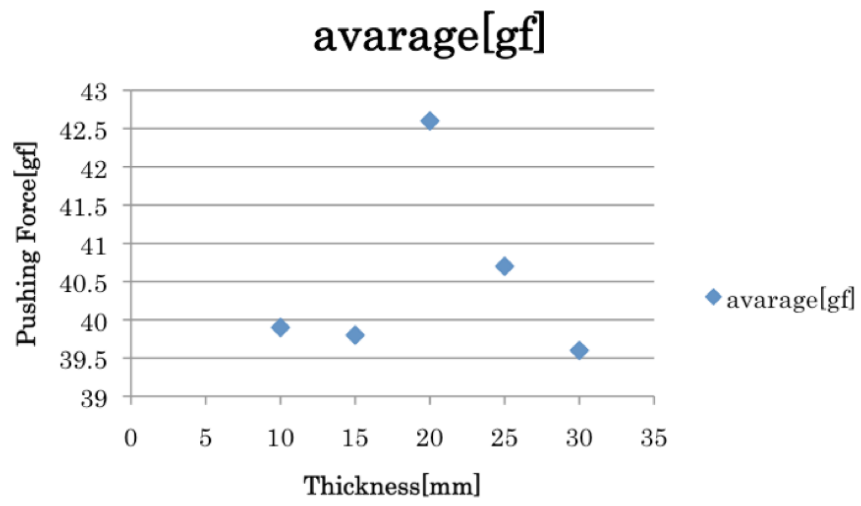


図 3.5: 被験者 C

## 第4章

# 押下力分布制御のための設計

### 4.1. 端末背面の厚みにより押下力を制御する設計手法の提案



図 4.1: スマートフォンの底面

基礎実験の結果から，厚い筐体は強く把持するために摩擦が増加し，薄い筐体は弱く把持するために摩擦が減少することが示唆されたため，スワイプ操作時に強い摩擦力を持たせたい端末の筐体は厚く，弱い摩擦力を持たせたい端末の筐体は薄く設計すれば良いと言える．また，例えば設計者がタッチパネル全面にわたって均一な摩擦感を持たせたいと考えた場合，筐体設計時にユーザーがスワイプ操

作をした際の押下力分布を計測し，押下力が弱く計測される箇所の裏面を厚く，押下力が強く計測される箇所の裏面が薄くなるよう筐体の厚みを設計することにより実現できると考えられる．

そこで，このような設計が実際に可能であるかを検証するため，被験者の押下力分布を計測し，それを補正するようなアダプターを作成し，スマートフォン底部に装着することを考えた．ここではまず実験時に多人数の被験者に適応できるように補正アダプターを交換式とし，スマートフォン底部の曲面を平坦にするアダプター（図 4.2，図 4.3）と補正アダプター本体を分離した構造を考える．これにより図 4.4 4.5 のような複数の補正アダプターだけを取り替えることで素早く被験者の切り替えに対応することができる．

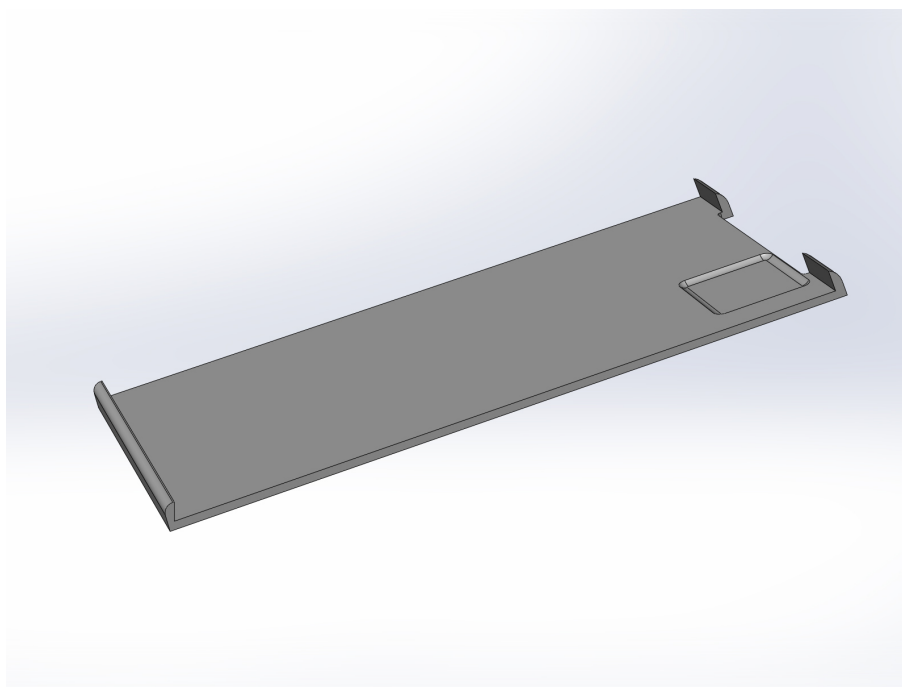


図 4.2: スマートフォン底部に装着するアダプターの設計

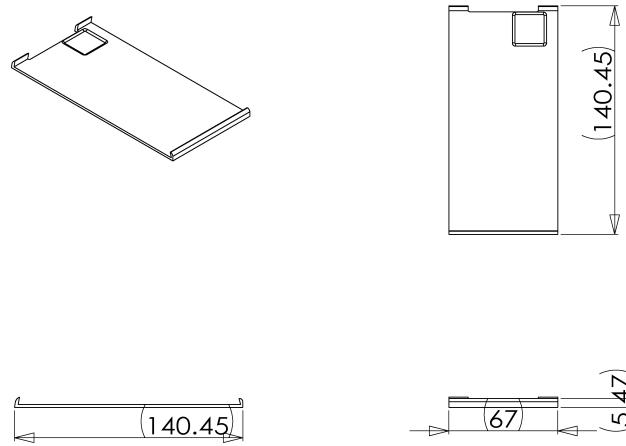


図 4.3: スマートフォン底部に装着するアダプターの三面図

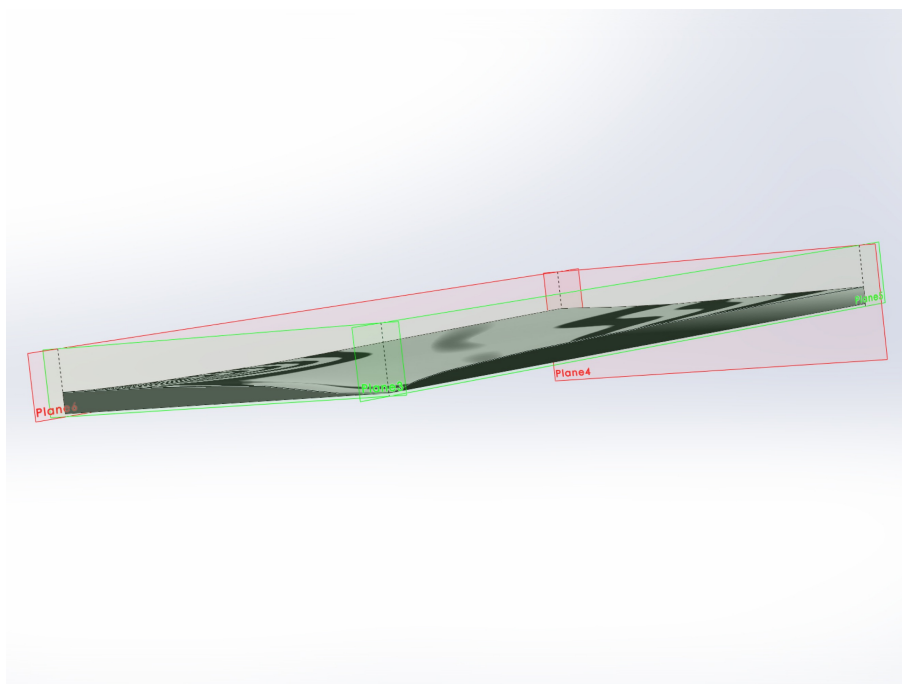


図 4.4: 押下力分布に合わせた補正アダプターの設計 (A)

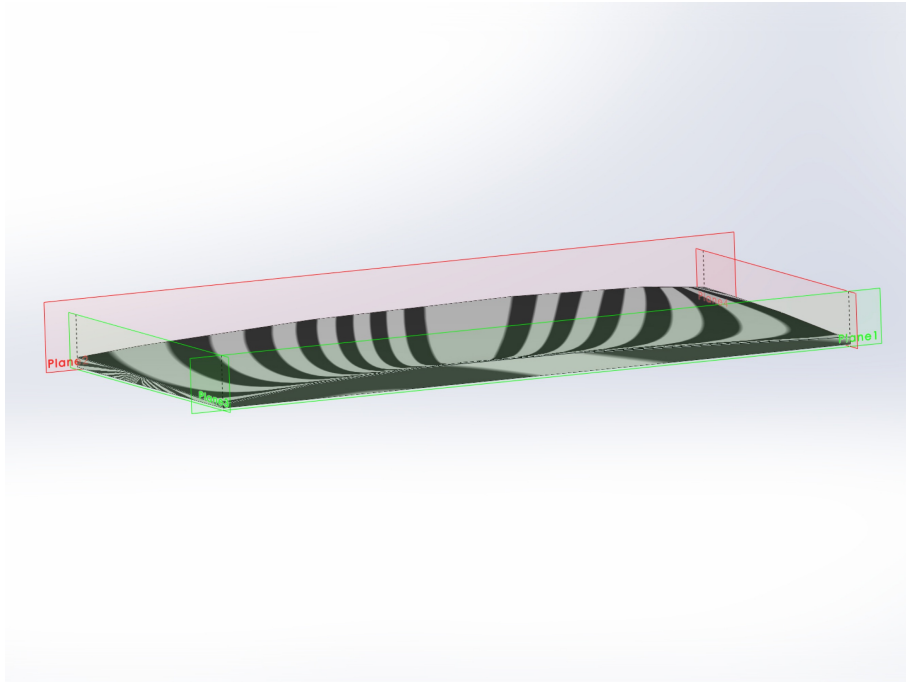


図 4.5: 押下力分布に合わせた補正アダプターの設計 (B)

この場合に補正アダプターの設計は、

1. 被験者の押下力を計測する
2. 押下力を三次元グラフ化する (図 4.6)
3. 押下力の三次元グラフを縦方向、横方向の平面複数と交差させる (図 4.7)
4. それぞれの平面上で交差した頂点を通過するようにベジェ曲線を引く (図 4.8)
5. ベジェ曲線からフィレットを作成する (図 4.9)
6. フィレットを平坦化アダプターの底面まで押し出す (図 4.10)

という段階を踏んで設計する。

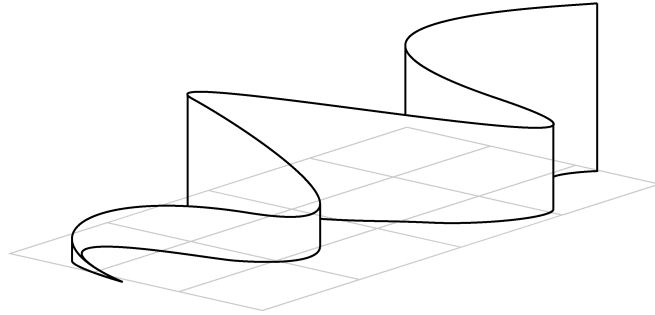


図 4.6: 押下力の三次元グラフ化

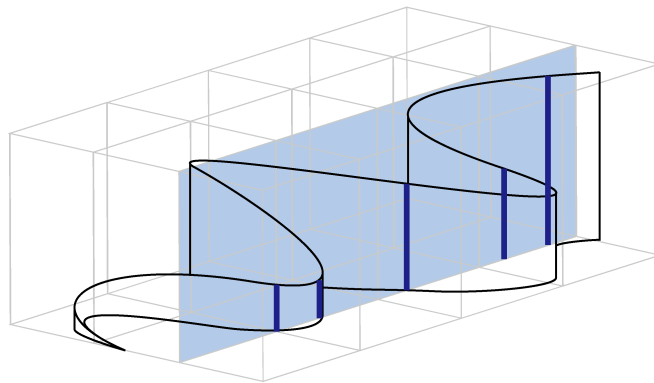


図 4.7: 平面と交差させた三次元グラフ化

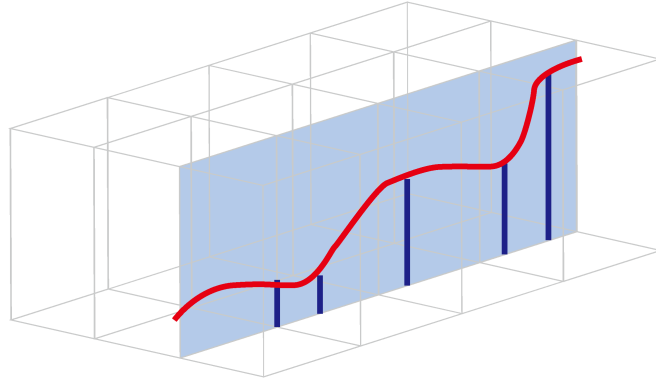


図 4.8: ベジェ曲線の作図

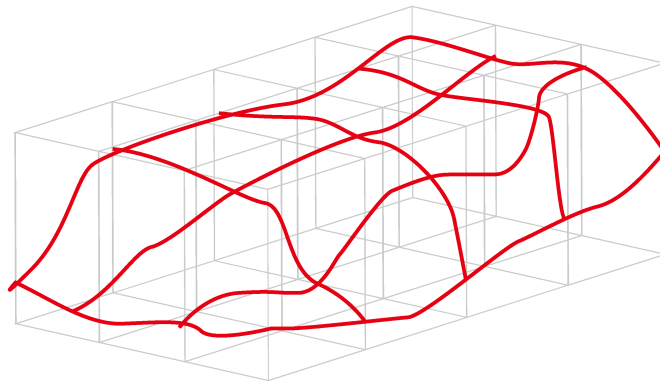


図 4.9: フィレットの作成



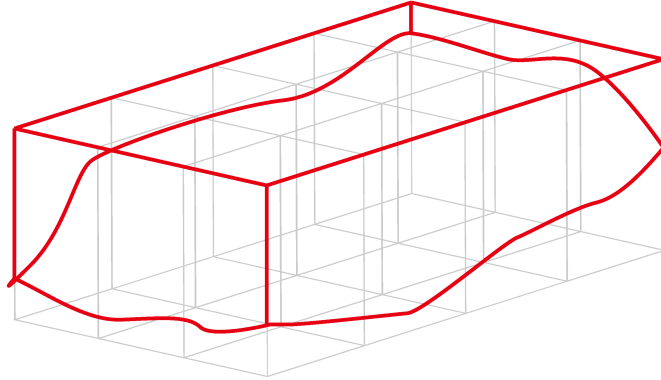


図 4.10: 押し出し

## 4.2. タッチパネル面の距離により押下力を制御する設計手法の提案

もう一つの設計手法として、そもそも押下力が指先のストロークとスマートフォンのタッチパネルの距離の関係にあると仮定すると、スマートフォンを操作する親指の可動範囲に対して適正な距離にタッチパネルを設置する設計が考えられる。タッチパネル操作時、従来のスマートフォン(図 4.11)は親指と画面との距離がタッチパネル上の操作する位置によって変わっている。このことによって押下力が不均一になっていると考えることができる。

つまり、画面上で摩擦力を増加させたい部位を近く、摩擦力を低下させたい部分を遠くなるように設計することが考えられる。仮に、画面全体での押下力を均一にさせたいという意図が設計者にあった場合、親指の可動範囲に合わせた設計としては 図 4.12 のようにタッチパネルを含めた筐体全体を曲面で構成するものが考えられる。

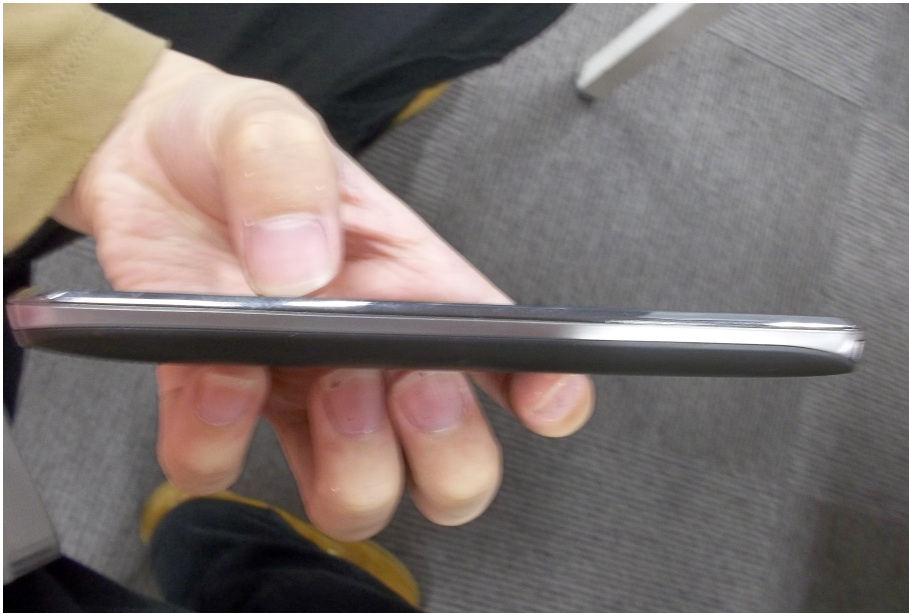


図 4.11: 従来のスマートフォン



図 4.12: 考えられる設計

## 第5章

# 実証実験

### 5.1. 端末背面の厚みにより押下力を制御する設計手法の実証

#### 5.1.1 実験目的

厚みを変化させることで押下力が変化することに着目し、押下力を制御することで実際のスマートフォンの外装設計に応用した場合にスマートフォン使用者のスマートフォン操作時の摩擦力を意図的に変化させることができると考え、その一例として、画面全体で一定の摩擦感でスワイプ操作をさせたい場合、スマートフォンの厚みを個人の癖に合わせて押下力が弱く生じている箇所の厚みを増すことで押下力を補正し、画面全体で一定の押下力を与えるという設計の妥当性を検証することを目的とした。

#### 5.1.2 実験方法

第4.1節で述べた設計手法に基づき、スマートフォン操作時の押下力のばらつきを補正するためのアダプタを設計し、それとともにスマートフォンのディスプレイにかかる押下力を計測するためのアプリケーションを開発した。これらを用いてアダプター装着前後でのスマートフォンディスプレイにかかる押下力のばらつきを計測した。

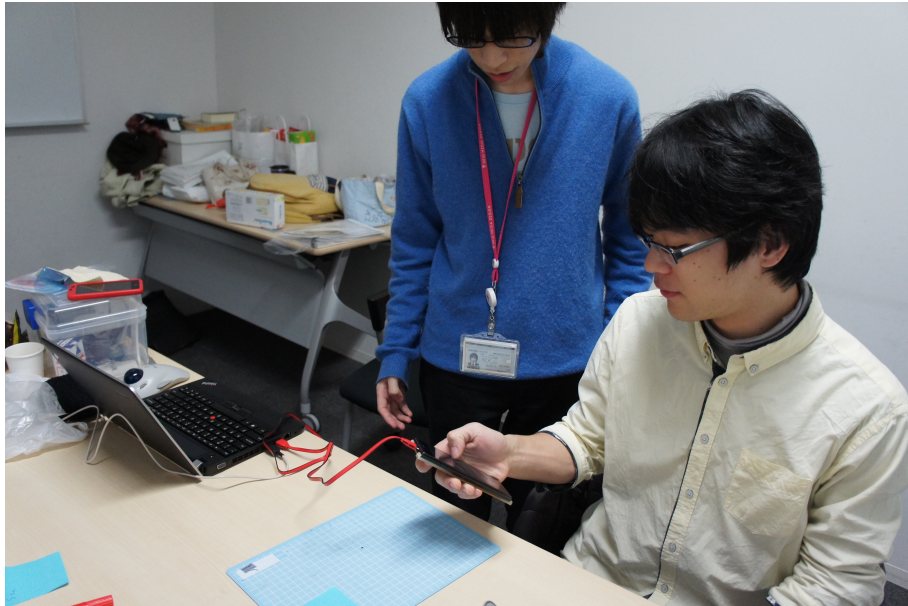


図 5.1: 実験の様子

### 5.1.3 実験手順

計測は以下の手順で行う。

1. スマートフォンの底面形状を平らにするためのアダプターを光造形 3D プリンタ (Keyence 社 Aglista) を用いて作成し, スマートフォンの底面に装着する。
2. 1. の状態のスマートフォンを用いて被験者にスワイプ操作を再現させ, 操作時の押下力を計測した。操作は普段スマートフォンを使用している状態をイメージさせながら行わせる。
3. 2. を 4 試行繰り返し, そのうちの 3 試行目のデータを抽出する。
4. 抽出した押下座標と押下力のデータをグラフ化する。
5. グラフによって可視化された押下力に合わせ, 押下力が強い箇所が薄く, 押下力が弱い箇所が厚くなるようにスマートフォン底面に装着する押下力補正アダプターを CAD を用いて設計する。





図 5.2: HUAWEI GL07S

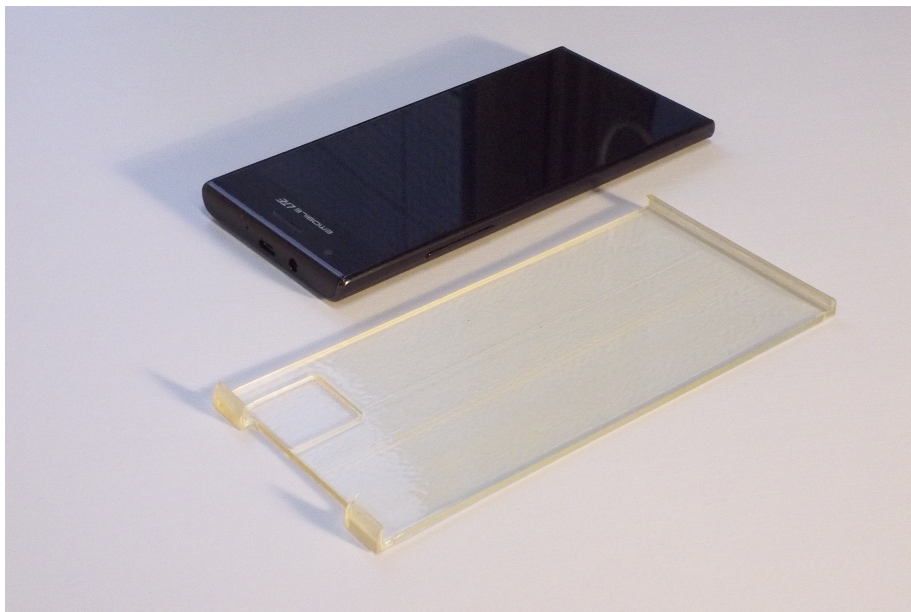


図 5.3: アダプター表面

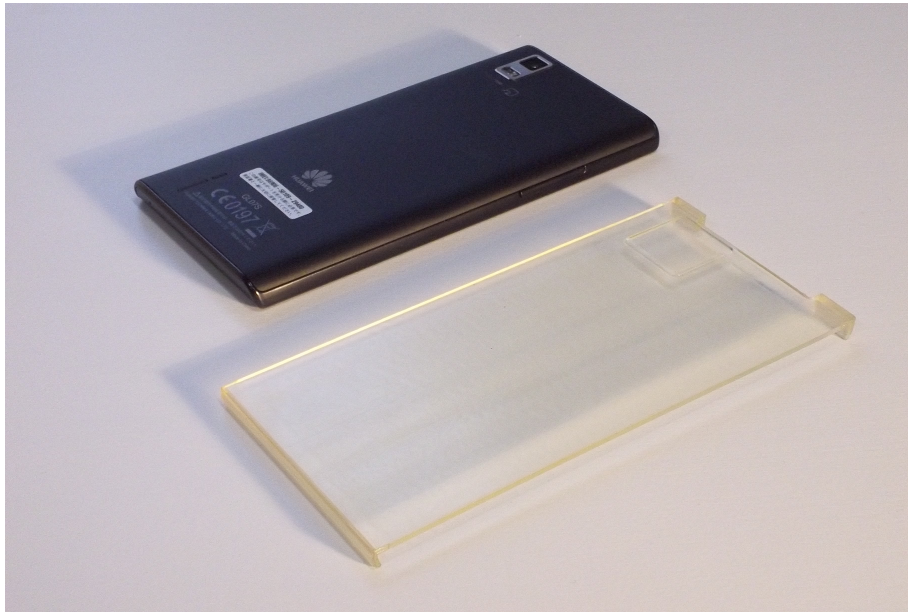


図 5.4: アダプター裏面



図 5.5: 被験者がアダプター装着スマートフォンを把持している様子

6. 設計した押下力補正アダプターを光造形 3D プリンターによって立体印刷する .

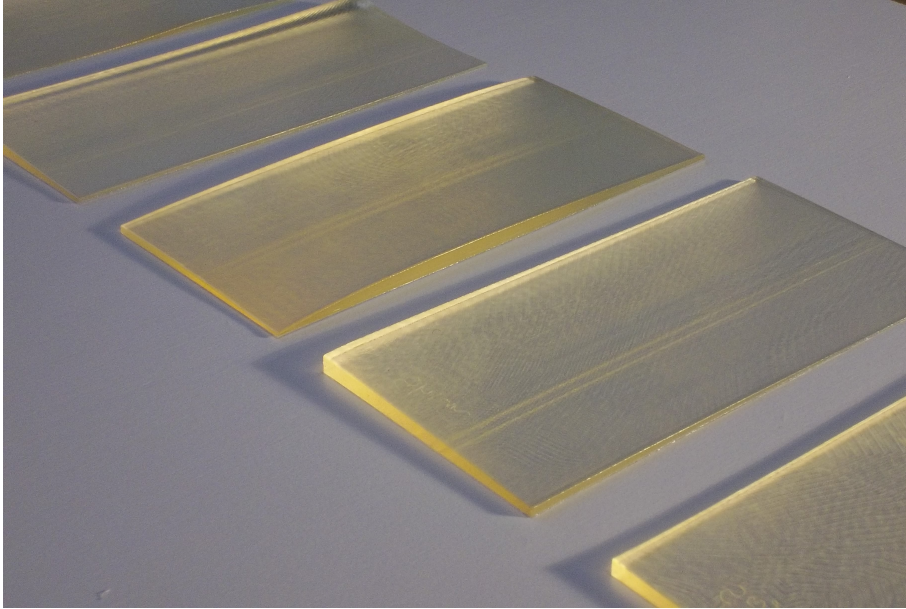


図 5.6: 押下力補正アダプター

7. 1. で作成したアダプターの底面に 6. で立体印刷した押下力補正アダプターを装着する .
8. 2. 同様に押下力と押下座標を計測する .
9. 3. と同様の手順を行う .
10. 抽出した押下座標と押下力のデータをグラフ化する .
11. 評価する .



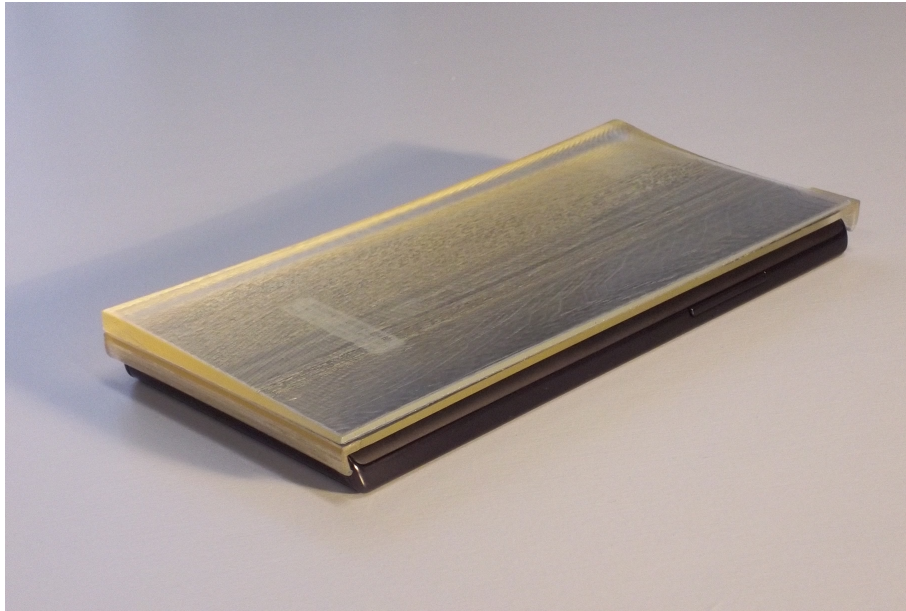


図 5.7: 押下力補正アダプターを装着したスマートフォン

#### 5.1.4 結果

3次元グラフ化した押下座標と押下力のデータを補正アダプター装着前後で比較すると、アダプター装着前の押下力分布には大きくばらつきがあり、個人差が見られる。それに比べ、アダプター装着後は画面上の位置の押下力分布の幅が小さくなっていることが確認できる。ただし、被験者Eのみ補正アダプター装着前後での押下力分布の大きな差が見られなかった。

#### 5.1.5 考察

被験者によって補正アダプター装着前後の押下力分布の値に差があるが、被験者Eを除くすべての被験者の実験結果において補正アダプターによってアダプター装着前と比べて押下力の変化の幅が小さくなっていることが確認できるため、厚みによって押下力を制御することで押下力が補正されたと考えられる。また、アダプターによる左右方向の補正力と上下方向の補正力には違いが見られ、上下方向の厚みの変化は左右方向と比べて少なく見えるため、アダプター製作時には上



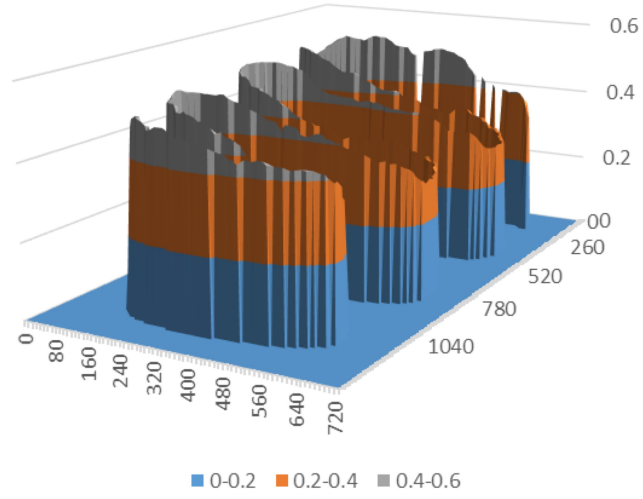


图 5.8: 被験者 A 補正前

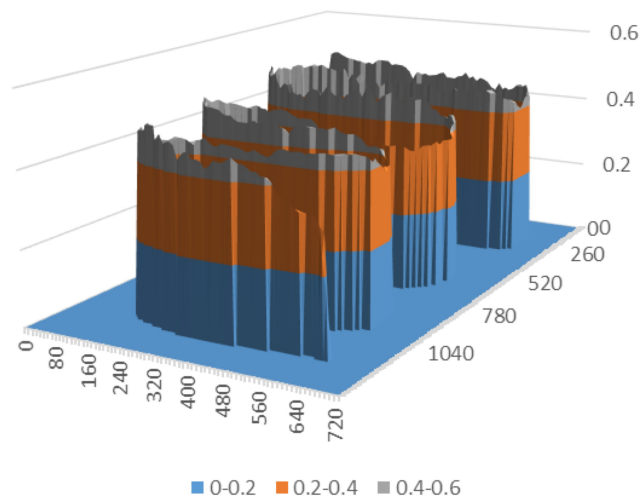


图 5.9: 被験者 A 補正後

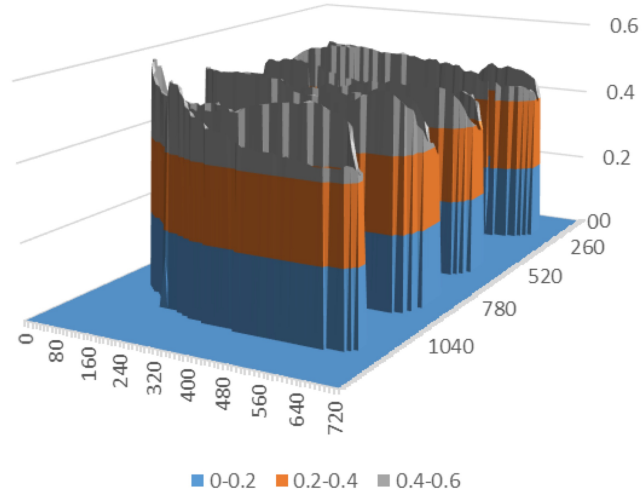


図 5.10: 被験者 B 補正前

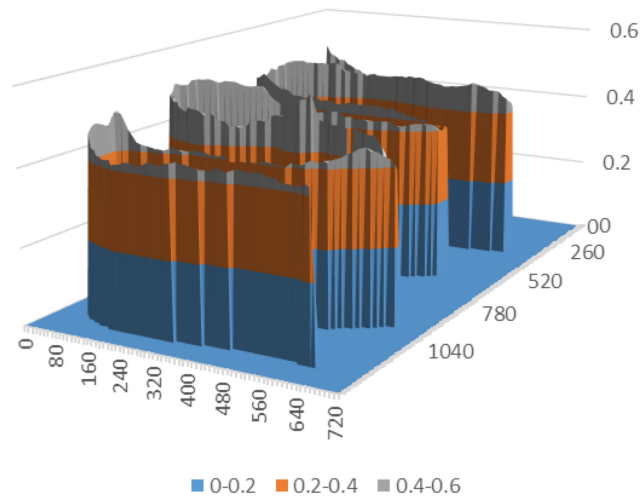


図 5.11: 被験者 B 補正後

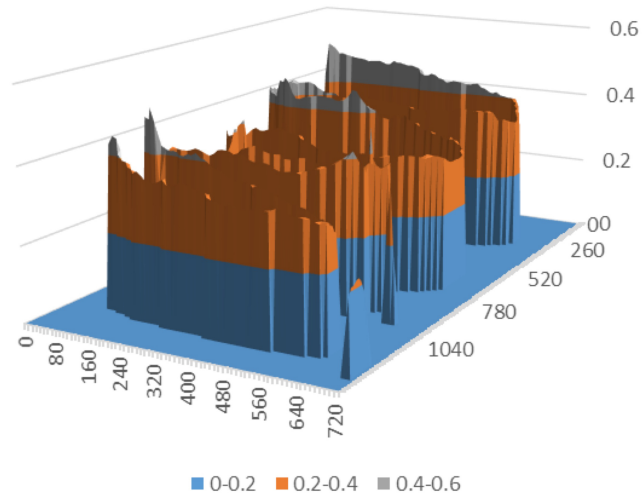


図 5.12: 被験者 C 補正前

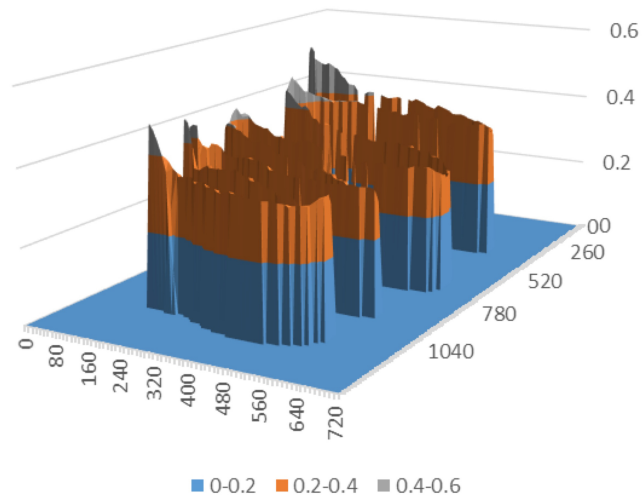


図 5.13: 被験者 C 補正後

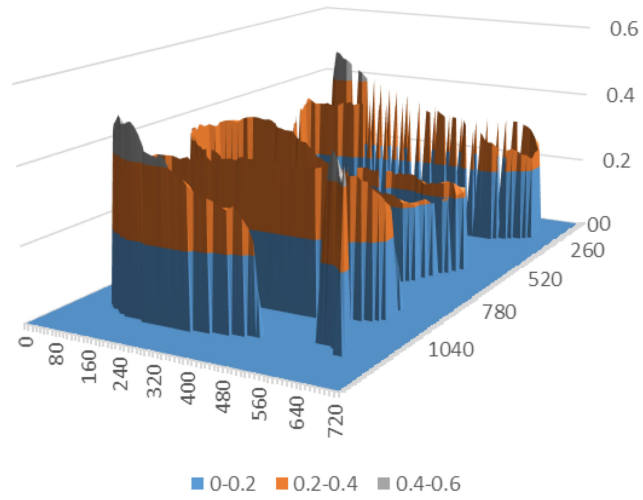


図 5.14: 被験者 D 補正前

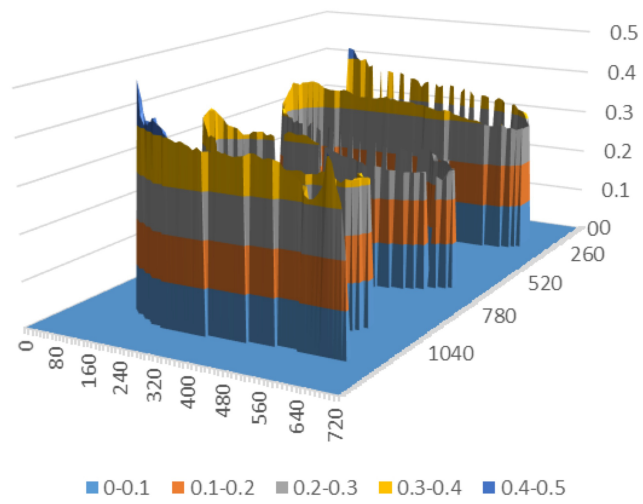


図 5.15: 被験者 D 補正後

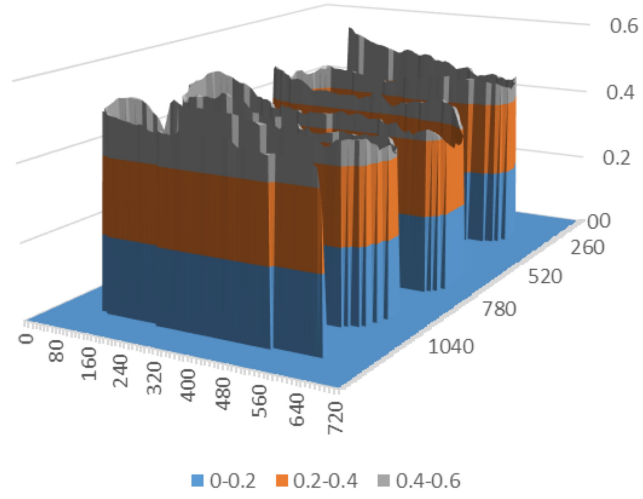


図 5.16: 被験者 E 補正前

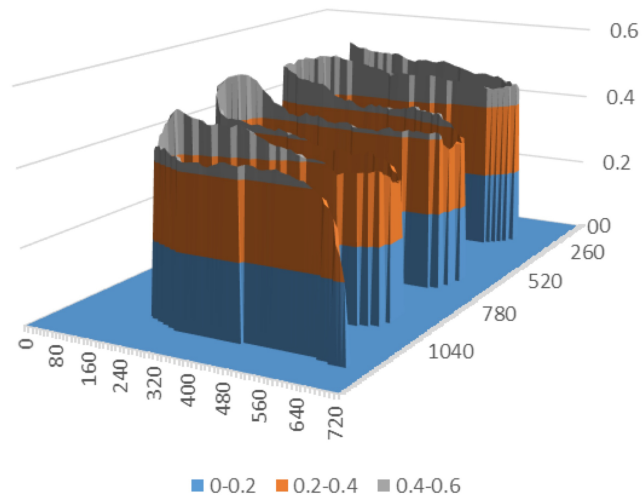


図 5.17: 被験者 E 補正後

下方向の厚みの変化をより強める必要が有ることが示唆された。

また、被験者を観察したところ、本実験においてアダプターによる補正効果、つまりは厚みを増した箇所の押下力の増加が確認できた被験者と、アダプターによる補正効果が確認できなかった被験者、つまりは厚みを増した箇所の押下力の増加が確認できなかった被験者の間には、スマートフォン操作時の筐体把持の方法に異なる特徴があることが確認された。補正効果が確認できた被験者はスマートフォンを親指以外の4本の指の上に軽く載せるようにスマートフォンを把持しているのに対し、補正効果が確認できなかった被験者はスマートフォンの筐体を握りこむように把持していた、このため本実験において変化させた厚みの影響が小さくなったと考えられる。



図 5.18: 補正効果が確認できた被験者



図 5.19: 補正効果が確認できなかった被験者（被験者 E）

## 5.2. タッチパネル面の距離により押下力を制御する設計手法の実証

### 5.2.1 観察

タッチパネル面の距離により押下力を制御する設計手法では、スマートフォンの薄型化が進み、曲面ディスプレイ製造技術も向上した近未来を想定し、スマートフォンのモックアップを作成した。

作成したモックアップを被験者に自由に触らせ、その反応を観察した。被験者からは「もちやすい」「なるほど」「手にフィットしている」などの好意的な反応をしている様子が見られたため、妥当な設計であったと考えられる。



図 5.20: 作成したモックアップ



## 第6章

# 結論と展望

### 6.1. 結論

本研究では、スマートフォン設計において操作時に生じる摩擦感に着目し、スマートフォンの厚みを増すと操作時の摩擦感も増すという現象に注目した。スマートフォン設計のパラメーターとして厚みを制御することで摩擦感を自在にデザインする設計手法の研究を目的とした。目的に対しまず、スマートフォン操作時の摩擦感が触覚の錯覚によるものであるのか、それとも実際の摩擦力に起因するものなのかを調べるために摩擦感の主観的等価点を計測する実験を行った。この結果、スマートフォン操作時の摩擦感は実際にスマートフォン上のタッチパネルディスプレイと操作する指先の間を生ずる物理的な摩擦であることが示唆され、また厚みによる摩擦の変化は操作する指の押下力に起因しているということを明らかにした。

この結果をふまえ、実際の設計に応用するために試作を行い効果の検証をするにあたり、仮に設計者がスマートフォン操作時のタッチパネルの摩擦感を全域にわたって均一にしたいという設計を行うことを想定し、実際に端末背面の厚みにより押下力を制御する設計手法を適用した。まず始めに、スマートフォン操作時にスマートフォンの操作ディスプレイ上にどのように押下力が生じているかを測定する実験装置を作成した。この実験装置によって、スマートフォン操作時の被験者の指とタッチパネル面の間に働く押下力には位置によってばらつきがあることが示唆された。次に、スマートフォン操作時の被験者の押下力はタッチパネルの位置によって異なることが示唆されたため、押下力が弱く生じている箇所の厚みを増すことで個人の押下力のばらつきを補正するアダプターを設計し、スマー

トフォン操作時の押下力を測定する実験装置によって効果を検証した。検証の結果、アダプターによって厚みを増した箇所の押下力が向上し、ひいては厚みによる押下力の補正が可能なが証明された。また、実験の過程において、左右方向の補正は比較的簡単だが、上下方向の補正はより大きく変化させる必要がある可能性が示唆された。

以上により、本研究ではスマートフォン筐体自体の材質や表面加工の方法に起因した摩擦係数に関わらず、その厚みを変化させることのみで摩擦感を自在にデザインする設計手法の一つを提案し、その妥当性を検証することができた。

## 6.2. 今後の課題

本論文中ではスマートフォンのタッチパネル操作時の押下力がタッチパネル全域で等しくなるような設計例を示し、実験によってその実証をした。設計理論上はあえて部位によって摩擦力を偏らせることも可能であり、操作性の高さと手からの滑り落ちにくさを両立したスマートフォン等の製作や、ユーザーが普段良く使うアプリケーションによって必要とされる適切な摩擦感分布、例えばスマートフォンで正確な文字入力を必要とするユーザーへは、ソフトウェアキーボードが表示される画面下部の厚みを増すことでフリック入力時に必要以上に指が滑らないようにする、といった設計へ発展させられる可能性がある。このような場合については今後、ユーザー観察からはじめ、実用試験までを視野に入れ検証を進めていきたい。また、第5章での実証実験中の被験者Eのように、押下力補正アダプターの効果が出ない事例においても、押下力の補正が可能となるようにしたい。この事例については、筐体の把持方法の特徴から推測し、スマートフォン筐体の厚みでだけではなく、幅方向に対する寸法の補正を適用することで解決できる可能性があるため取り組みたい。また、本論文中では厚みを増す方向の補正のみを行ったが、相対的に厚みを減ずる方向の実験にも取り組みたい。

### 6.3. 展望

本論文の研究を応用すれば，個人個人の手に合ったインターフェースが実現でき，また，端末使用時の押下力分布を記録することによって，端末が故障したり，別の端末を使う事になる時にも，個々人が使い慣れた設定プロファイルを読み込むだけでインターフェースの特性を引き継いで使用することができるようになる可能性が拓ける．万年筆のような非可逆的な変形とは違い，可逆的な変形や，形状の固定も可能になる．いつまでも「馴染んでいる」状態の携帯電話端末が簡単に誰の手にでも渡る時代に少しでも貢献できることを切に願う．

# 謝 辞

幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲見昌彦教授に心より感謝いたします。

研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授に心より感謝いたします。

研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の古川享教授に心より感謝いたします。

論文原稿作成時の技術的問題の解決にご尽力いただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心より感謝いたします。

論文執筆の直接のご指導を頂いた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の古川正紘特任助教に心より感謝いたします。

この研究の発端となった現象の研究をされたマイクロソフト・リサーチの福本雅朗氏及び東京農工大学の中山雅野特任助教に心より感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] iPhone3G. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Hook%27s\\_iPhone\\_front.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Hook%27s_iPhone_front.jpg).
- [2] 下条誠. 触覚の生理・心理学の初歩, 2007.
- [3] PS-A12FLSA. <http://www2.elecom.co.jp/avd/cellphone/protection-seal/ps-a12flsa/>.
- [4] Fusso SmartPhone. [http://www.apeiros.jp/Fussode\\_COAT/Fussode\\_COAT.html](http://www.apeiros.jp/Fussode_COAT/Fussode_COAT.html).
- [5] YUBISAKI. <http://www.yubi-saki.com/>.
- [6] Vib-Touch. <http://www.rm.is.tohoku.ac.jp/index.php?SCOPE>.
- [7] 和田英一. 1995年度研究報告書「第19部 個人用小型キーボード」. Technical report, WIDE プロジェクト, 1995.
- [8] モバイル・コンテンツ・フォーラム. ケータイ白書 2009, p. 180. インプレス R & D, 2008.
- [9] モバイル・コンテンツ・フォーラム. ケータイ白書 2009, p. 172. インプレス R & D, 2008.
- [10] 加藤周一. 世界大百科事典 第2版. 平凡社, 2006.
- [11] 広中清一郎. 図解入門よくわかる最新摩擦と摩耗の基本と仕組み:日常生活と密接に関係する摩擦と摩耗を学ぶ, pp. 54–68. 秀和システム, 2010.

- [12] Charles-Augustin de Coulomb. *Thorie des machines simples. en ayant gard au frottement de leurs parties et la roideur des cordages*, 1821.
- [13] 白土寛和仲谷正史. 触感をつくる 《テクタイル》という考え方, pp. 20–24. 岩波科学ライブラリー, 2011.
- [14] 岩村吉晃. ヒト触覚受容器の構造と特性. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 438–444, 1984.
- [15] 土屋翔, 昆陽雅司, 岡本正吾, 田所諭. Vib-touch: 指先による仮想能動触を利用した触力覚インタラクション. 一般社団法人日本機械学会, 2010.
- [16] 中山雅野, 福本雅朗, 稲見昌彦, 舘すすむ. 対象物の厚さに依存する摩擦に関する触覚効果. 電子情報通信学会, 2013.