

早稲田大学審査学位論文  
博士（人間科学）

タッチパネルの表面性状と感知領域が  
操作性に及ぼす影響

Influences of Surface Property and Sensitive Area on  
Operability of Touch-Sensitive Screens

2014年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

西村 崇宏

NISHIMURA, Takahiro

研究指導教員： 藤本 浩志 教授

# 摘要

タッチパネルは、スマートフォンや PMP などの携帯端末、タブレット PC、ATM、駅の券売機、製造現場の FA モニタ、車載モニタ、電子黒板、医療モニタ、POS レジスタなど、多岐の分野にわたって様々なデバイスに搭載されており、我々の生活になくはない入力インタフェースとして位置づけられている。こうしたタッチパネルの需要は今後もますます増加していくとの予想がなされており、関連技術の開発研究などが盛んに行われている。しかし一方で、ユーザインタフェースとしてのタッチパネルについて、その操作性に関する課題も指摘されている。それは、タッチパネルのハードウェア及びソフトウェアのデザイナーが設計の際に参考とすべきヒトの操作特性に関する基礎的知見が不十分であるが故に、ユーザに対して設計上の配慮が十分になされていないデザインが多く存在するといった問題である。具体的には、デジタル教科書として教育分野での活用が注目を浴びているタブレット端末において、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響が明らかになっていないといった問題が挙げられる。また、搭載デバイス別の市場で最も高いシェアを占める携帯端末においては、ある拡がりをもった指先の接触面で操作するが故に自身の意図した位置をポインティングすることが困難であり、ミスタップが頻発するといった問題も依然として存在している。

そこで本研究では、タッチパネルの操作性向上に向けて、ヒトの操作特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした。具体的には、タッチパネル市場を牽引するタブレット端末と携帯端末の各デバイスについて、“ディスプレイの表面性状”と“タッチ感知領域”にそれぞれ着目し、各因子と操作性の関係を明らかにするための評価実験を実施した。

本論文の第 1 章では、序論として、本研究の背景と目的、タッチパネルの操作性に関する基礎的知見、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、デジタル教科書として教育分野での活用が期待されているタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を評価した。本実験では、指先の滑り易さが異なるディスプレイ表面を再現するために、まず指先の滑り易さが主観的に異なるフィルムを選定した。次に、指先の

滑り易さを算術平均粗さ及び動摩擦係数により定量的に評価した。そして、選定したフィルムを用いてタブレット端末の操作性評価実験を行うことで、ディスプレイ表面の指先の滑り易さが操作性に及ぼす影響を調べた。その結果、フィルム表面の算術平均粗さが大きいほど動摩擦係数は小さくなり、反射防止性能をもつアンチグレアフィルムの動摩擦係数は、耐擦傷性能をもつハードコートフィルムのおよそ3分の1であることがわかった。さらに、曲線をトレースする操作では適切な範囲の摩擦抵抗を表面に施すことによって操作の正確性が向上し、斜線や直線をトレースする操作や指先の止め・方向転換を伴う操作では表面の摩擦抵抗を大きくすることで操作の正確性は向上することが明らかになった。本実験で得られた知見は、タッチパネルディスプレイやディスプレイ保護フィルムの表面設計に際して参考になるとともに、指先の滑り易さに配慮したソフトウェアの設計指針を示すものであると考える。

第3章では、搭載デバイス別の市場シェアで最も高い割合を占める携帯端末について、GUIの設計指針に供する操作特性の基礎的知見を得ることを目指し、ポインティング特性を明らかにすることを目的として実験を行った。本実験では、携帯端末の操作方法に着目し、片手操作と両手操作の双方におけるポインティング位置の分布、ポインティング精度、ポインティング時間の各指標を調べた。その結果、いずれの操作方法においても、ディスプレイ上の表示位置によってターゲットに対するポインティング位置の分布傾向は異なることが明らかになった。また、片手操作では、母指手根中手関節を基点とした円弧状の領域において、ポインティングの精度及び速さは向上することがわかった。そして、両手操作では、ディスプレイ上の表示位置によるポインティング精度の違いはみられないが、指の初期位置から遠い距離にあるターゲットに対して、ポインティング時間は長くなることがわかった。さらに、実験によって得られたポインティング位置の分布が楕円で近似的に表されることを示し、楕円によるタッチ感知領域の設計手法を検討した。その結果、楕円のタッチ感知領域では、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対して、正方形による設計手法よりも効率的にタッチ感知領域を設計できる可能性が示唆された。

第4章では、結論として、第2章と第3章で得られた研究成果を統括し、本研究によって得られた知見と意義についてまとめるとともに、今後の展望を述べた。

本研究で得た知見が、タッチパネルのハードウェア及びソフトウェアの設計に関わるデザイナーに活用され、ヒトの操作特性に配慮したデザインが施されることで、タッチパネルの操作性向上につながることを期待したい。

# 論文目次

摘要

論文目次 ..... i

図表目次 ..... iv

## 第1章 序論

1.1	本研究の背景	2
1.1.1	タッチパネルの歴史	2
	(1) 海外の動向	2
	(2) 国内の動向	5
1.1.2	タッチパネルの市場動向	8
	(1) 市場全体の動向	8
	(2) 方式別の市場動向	8
	(3) 搭載デバイス別の市場動向	11
1.1.3	タッチパネルの方式及び構造と検出原理	12
	(1) タッチパネルの方式	12
	(2) 抵抗膜方式タッチパネルの構造と検出原理	15
	(3) 投影型静電容量方式タッチパネルの構造と検出原理	17
1.2	タッチパネルの操作性に関する基礎的知見	20
1.2.1	タッチパネルの操作方法	20
1.2.2	タッチパネルのユーザビリティ	21
	(1) 入力インタフェースとしてのタッチパネルの特性	22
	(2) ユーザビリティにおける操作性の位置づけ	23
	(3) タッチパネルの操作性評価の必要性	26
1.2.3	タッチパネルのグラフィカルユーザインタフェース	27
1.2.4	ISO 9241-9におけるタッチパネルの設計上の要求事項及び 推奨事項	29
1.2.5	タッチパネルの操作性に関する先行研究	30
1.2.6	タッチパネルの操作性に関する課題	33
	(1) タッチパネルタブレット端末の操作性に関する課題	33
	(2) タッチパネル携帯端末の操作性に関する課題	35



1.3	本研究の目的 .....	37
1.4	本論文の構成 .....	37
第2章	タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面性状が 操作性に及ぼす影響	
2.1	目的.....	40
2.2	フィルムの選定 .....	40
2.2.1	指先の滑り易さの評価対象フィルム .....	40
2.2.2	算術平均粗さの測定方法及び測定結果 .....	41
2.2.3	動摩擦係数の算出方法及び算出結果 .....	42
	(1) 動摩擦係数の算出方法 .....	42
	(2) 動摩擦係数の算出結果及び考察 .....	43
2.3	タッチパネルタブレット端末の操作性評価 .....	45
2.3.1	実験参加者 .....	45
2.3.2	実験課題 .....	45
2.3.3	手続き .....	46
2.3.4	評価指標及びその解析方法 .....	47
	(1) 正円での曲線におけるズレ量の算出方法 .....	47
	(2) 正三角形での斜線におけるズレ量の算出方法 .....	48
	(3) 正方形での直線におけるズレ量の算出方法 .....	48
	(4) 正三角形及び正方形での折線におけるズレ量の算出方法 .....	49
	(5) 正三角形及び正方形でのトレースの終点におけるズレ量 の算出方法 .....	49
	(6) 速さの算出方法 .....	49
2.3.5	結果 .....	50
	(1) 曲線・斜線・直線におけるズレ量の結果 .....	50
	(2) 折線におけるズレ量の結果 .....	52
	(3) トレースの終点におけるズレ量の結果 .....	52
	(4) 速さの結果 .....	53
2.4	考察 .....	55
2.5	小括 .....	56

第3章	タッチパネル携帯端末におけるポインティング特性の評価とタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討	
3.1	目的	59
3.2	ポインティング特性の評価	59
3.2.1	実験参加者	59
3.2.2	実験課題	59
3.2.3	操作方法	61
3.2.4	手続き	62
3.2.5	評価指標及びその解析方法	62
3.2.6	結果	63
	(1) ポインティング位置の分布	63
	(2) ポインティングの精度及び速さ	67
3.2.7	考察	68
	(1) ポインティング位置の分布	68
	(2) ポインティングの精度及び速さ	69
3.3	タッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討	70
3.3.1	ポインティング位置の分布の特徴	70
3.3.2	タッチ感知領域の設計手法	71
3.3.3	タッチ感知領域の評価	72
	(1) 評価方法	72
	(2) 結果及び考察	72
3.4	小括	75
第4章	結論	
4.1	本研究のまとめ	78
4.2	本研究の意義	80
4.3	今後の展望	81
	参考文献	85
	謝辞	93
	研究業績一覧	95

# 図表目次

## 第 1 章 序論

Fig.1.1	Hurst, G. Sam (left), founder of Elographics, Inc. and “Elograph” <sup>[1-7]</sup> .....	2
Fig.1.2	Curved glass touch sensor developed by Elographics <sup>[1-7]</sup> .....	3
Fig.1.3	The transparent capacitive touch screen, developed by CERN <sup>[1-9]</sup> .....	3
Fig.1.4	HP-150 (Hewlett-Packard Co.) <sup>[1-10]</sup> .....	4
Fig.1.5	Newton (Apple, Inc.) <sup>[1-11]</sup> .....	5
Fig.1.6	Simon (IBM) <sup>[1-12]</sup> .....	5
Fig.1.7	iPhone (Apple, Inc.) <sup>[1-13]</sup> .....	5
Fig.1.8	iPad (Apple, Inc.) <sup>[1-13]</sup> .....	6
Fig.1.9	Kindle Fire (Amazon.com, Inc.) <sup>[1-14]</sup> .....	6
Fig.1.10	Nexus7 (Google Inc.) <sup>[1-15]</sup> .....	6
Fig.1.11	Surface (Microsoft Corp.) <sup>[1-16]</sup> .....	6
Fig.1.12	Ticket vending machine in JR East .....	7
Fig.1.13	WS003SH (SHARP Corp.) <sup>[1-17]</sup> .....	7
Fig.1.14	Market trends and forecasts of touch-sensitive screens <sup>[1-17, 1-18]</sup> .....	8
Fig.1.15	Trends and forecasts of average annual growth rate <sup>[1-17, 1-18]</sup> .....	9
Fig.1.16	Market trends and forecasts of touch-sensitive screens according to types of detections <sup>[1-15]</sup> .....	10
Fig.1.17	Vicissitude of types of detections and devices <sup>[1-20, 1-21]</sup> .....	11
Fig.1.18	Market trends and forecasts of touch-sensitive screens according to types of devices <sup>[1-17]</sup> .....	12
Fig.1.19	Fine classification of touch-sensitive screens according to types of detections <sup>[1-20]</sup> .....	13
Fig.1.20	Structure of resistive touch-sensitive screen <sup>[1-17]</sup> .....	15
Fig.1.21	Electrical circuit in contacting two electro plates <sup>[1-17]</sup> .....	16
Fig.1.22	Structure of projected capacitive touch-sensitive screen <sup>[1-21]</sup> .....	18
Fig.1.23	Figure of the principle of projected capacitive touch-sensitive screen <sup>[1-17]</sup> .....	18
Fig.1.24	Basic operational methods of touch-sensitive screens .....	20
Fig.1.25	Comparison of pointing time in several pointing devices <sup>[1-26]</sup> .....	22
Fig.1.26	Conceptual diagram of relationship between level of proficiency and operability <sup>[1-21]</sup> .....	23
Fig.1.27	Conceptual diagram of usability defined by Nielsen, J. <sup>[1-28]</sup> .....	25

Fig.1.28	Conceptual diagram of usability defined by ISO 9241-11 <sup>[1-28]</sup> .....	26
Fig.1.29	An example of GUI used in touch-sensitive screens (iOS 7.0.2) .....	28
Fig.1.30	Kinect (Microsoft Corp.) <sup>[1-32]</sup> .....	29
Fig.1.31	Configuration of this thesis .....	38
Table 1.1	Types of detections of touch-sensitive screens and its features <sup>[1-17]</sup> .....	14
Table 1.2	Requirements and recommendations for the design of touch-sensitive screens <sup>[1-34]</sup> .....	31

## 第 2 章 タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面性状が操作性に及ぼす影響

Fig.2.1	Results of the average roughness .....	41
Fig.2.2	Measurement example of kinetic friction and normal components of reaction and analysis range of coefficient of kinetic friction in film A .....	43
Fig.2.3	Results of the coefficient of kinetic friction .....	43
Fig.2.4	Geometric configuration used in the experiment .....	45
Fig.2.5	Analysis range of deviation and speed in each geometric configuration .....	47
Fig.2.6	Results of the deviation in curved line, oblique line, and straight line .....	51
Fig.2.7	Results of deviation in broken line .....	52
Fig.2.8	Results of deviation in end point of trace .....	53
Fig.2.9	Results of speed .....	54

## 第 3 章 タッチパネル携帯端末におけるポインティング特性の評価とタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討

Fig.3.1	Display layout of the application and dimensions of the target .....	60
Fig.3.2	Operational procedure of the experimental task (one-handed operation A) .....	60
Fig.3.3	Operational conditions and its ratio of respondents .....	61
Fig.3.4	Definition of the evaluation index .....	63
Fig.3.5	Results of average pointing position .....	64
Fig.3.6	Relationship between the distance between and the angle made by the average pointing position and the center of target .....	65
Fig.3.7	Horizontal to vertical ratio of the standard deviation .....	66
Fig.3.8	Results of pointing accuracy .....	67

Fig.3.9	Results of pointing time.....	68
Fig.3.10	Frequency distribution of pointing position (One-handed operation A, 5th row and 4th column) .....	71
Fig.3.11	Distribution of pointing position and touch-sensitive area .....	74
Table 3.1	Conditions of the touch-sensitive area.....	72
Table 3.2	Rate of number of pointing position contained in the touch-sensitive area.....	73

#### 第 4 章 結論

Fig.4.1	ATM used in Japan Post Bank Co., Ltd. ....	82
Fig.4.2	Accessibility for people with visually impaired in ATM used in Japan Post Bank Co., Ltd.....	83
Fig.4.3	Operation of touch-sensitive screen by person with visually impaired .....	84

# 第 1 章

## 序論

- 1.1 本研究の背景
- 1.2 タッチパネルの操作性に関する基礎的知見
- 1.3 本研究の目的
- 1.4 本論文の構成

### 概要

第 1 章では、まず、本研究の背景となるタッチパネルの歴史と市場動向について述べるとともに、タッチパネルの検出方式として代表的な抵抗膜方式と投影型静電容量方式の構造と検出原理について簡単にまとめる。続いて、タッチパネルの操作性に関してこれまでに報告されている基礎的な知見を整理するとともに、タッチパネル市場を牽引するタブレット端末と携帯端末の操作性に関する研究課題を明確にする。具体的に、第 1 の研究課題では、デジタル教科書として教育分野での活用に注目が集まるタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を定量的に評価する。そして、第 2 の研究課題では、搭載デバイス別の市場で最も大きなシェアを占める携帯端末について、GUI の設計指針に供するヒトのポインティング特性を評価するとともに、得られた知見を用いてタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討を行う。最後に、上述した研究背景と研究課題を踏まえて設定した本研究の目的について述べるとともに、本論文の構成を示す。

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 タッチパネルの歴史

#### (1) 海外の動向

タッチパネル (Touch-sensitive screen) とは、国際規格 ISO9241-400<sup>[1-1]</sup>において「ディスプレイに指を触れる、ディスプレイから指を離す、又はディスプレイ上で指を動かす操作によって位置及び選択入力信号を発生する入力装置」と定義される入力インタフェースの1つである。タッチパネルの基礎技術は、1965年に Johnson, E.A.によって考案され<sup>[1-2]</sup>、1968年には航空機の制御パネルへの応用に関する論文も発表されている<sup>[1-3]</sup>。タッチパネルが入力インタフェースとして注目を集めるようになったのは1970年代に入ってからであった<sup>[1-4]</sup>。米国では、トレーニングの必要がなく、簡単かつ迅速に使用できる入力インタフェースとして軍事や宇宙開発の分野で開発が進められたと言われている<sup>[1-4, 1-5]</sup>。1974年には、当時ケンタッキー大学 (米国) の講師であった Hurst, G. Sam (Elographics 社創立者) によって Elograph が開発された<sup>[1-6]</sup>。この Elograph は、現在の透明なタッチパネルではなく、タッチパッドのようにペンで入力するデバイスであったが、現在広く普及しているタッチパネル技術の礎を築いたと言



図 1.1 Hurst, G. Sam (写真左) と “Elograph”<sup>[1-7]</sup>

Fig.1.1 Hurst, G. Sam (left), founder of Elographics, Inc. and “Elograph”<sup>[1-7]</sup>



われている（図 1.1 参照）。その後、1977 年には、後に Touch screen の名称で呼ばれることとなる透明の抵抗膜方式タッチパネル技術を開発し、特許を取得している（図 1.2 参照）。一方、欧州においても、1973 年に欧州原子核研究機構（CERN）の技術者であった Beck, F.と Stumpe, B.によって透明なタッチパネルが開発され、実用化がなされている<sup>[1-8]</sup>（図 1.3 参照）。1980 年代に入ると、タッチパネルは量産レベルで使用され始めるようになり、1983 年には Hewlett-Packard 社から世界初となるタッチパネル搭載のパーソナル・コンピュータ HP-150 が発売された（図 1.4 参照）。そして 1990 年代には、携帯端末などにタッチパネルが搭載され始めた。その先駆けとして、1993 年に Apple 社は世界初となる Personal digital assistant（以下、PDA）の Apple

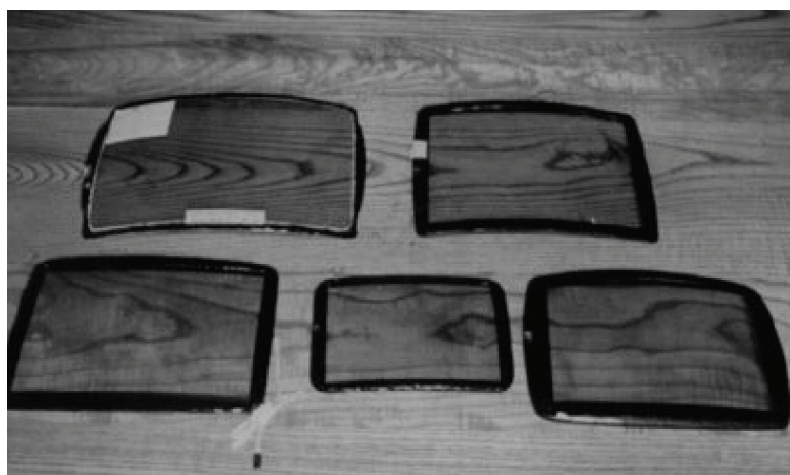


図 1.2 Elographics が開発した透明なタッチパネル（タッチセンサ）<sup>[1-7]</sup>

Fig.1.2 Curved glass touch sensor developed by Elographics<sup>[1-7]</sup>

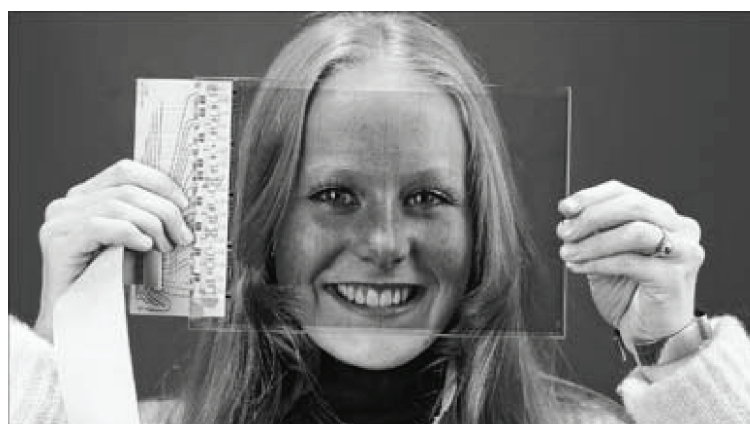
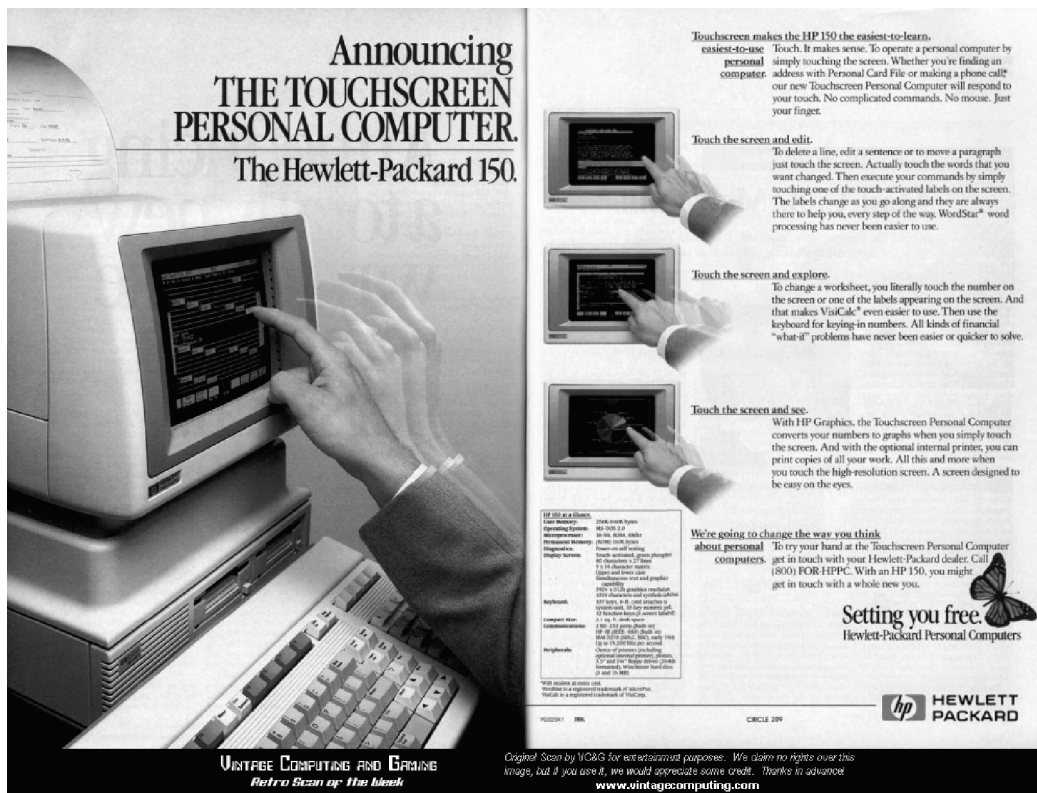


図 1.3 CERN が開発した透明なタッチパネル<sup>[1-9]</sup>

Fig.1.3 The transparent capacitive touch screen, developed by CERN<sup>[1-9]</sup>

図 1.4 HP-150 (Hewlett-Packard 社製)<sup>[1-10]</sup>Fig.1.4 HP-150 (Hewlett-Packard Co.)<sup>[1-10]</sup>

Newton を発売する (図 1.5 参照) . そして, 1994 年には, 世界発となるスマートフォン Simon が IBM 社から発売された (図 1.6 参照) . この Simon は, 通話機能に加え, データ通信機能やメール, 電卓, カレンダー, メモ帳, todo リストなどのアプリケーションが搭載されており, タッチペンのようなスタイラスで入力を行う携帯端末であった. 2000 年代に入り, タッチパネルは直感的に操作可能な入力インタフェースとして世界的に広く認知されるようになる. そのきっかけとなったのは, Apple 社から 2007 年に発売された iPhone (図 1.7 参照) であった. 従来のスマートフォンの多くには, 文字入力用としてキーボードが搭載されていたが, iPhone ではタッチパネルでほぼすべての操作が完結する構成がとられ, 賛否両論を呼んだ. しかし, ソフトウェア技術の進歩に伴って操作性は日を追うごとに進化し, 瞬く間にタッチパネル完結型のスマートフォンは普及していった. さらに 2010 年代には, 携帯端末よりも大きいディスプレイを搭載し, ノート PC よりも可搬性に優れたタブレット端末の需要が高まり, 2010 年に iPad (Apple 社製) (図 1.8 参照), 2011 年に Kindle Fire (Amazon.com 社製) (図 1.9 参照), 2012 年に Nexus7 (Google 社製) (図 1.10 参

照) , Surface (Microsoft 社製) (図 1.11 参照) などの多くのタブレット端末が相次いで発売された。

## (2) 国内の動向

日本においては、まず、1970年代に銀行の現金自動支払い機 (Cash dispenser) や現金自動預け払い機 (Automated teller machine, 以下 ATM) などに採用されたことで、



図 1.5 Newton (Apple 社製) <sup>[1-11]</sup>

Fig.1.5 Newton (Apple, Inc.)<sup>[1-11]</sup>



図 1.6 Simon (IBM 社製) <sup>[1-12]</sup>

Fig.1.6 Simon (IBM)<sup>[1-12]</sup>



図 1.7 iPhone (Apple 社製) <sup>[1-13]</sup>

Fig.1.7 iPhone (Apple, Inc.)<sup>[1-13]</sup>



図 1.8 iPad (Apple 社製) [1-13]

Fig.1.8 iPad (Apple, Inc.) [1-13]



図 1.9 Kindle Fire (Amazon.com 社製) [1-14]

Fig.1.9 Kindle Fire (Amazon.com, Inc.) [1-14]



図 1.10 Nexus7 (Google 社製) [1-15]

Fig.1.10 Nexus7 (Google Inc.) [1-15]



図 1.11 Surface (Microsoft 社製) [1-16]

Fig.1.11 Surface (Microsoft Corp.) [1-16]

我々は日常生活においてタッチパネルを目にするようになる<sup>[1-4]</sup>。その後、1980年代に入り、電子手帳のような個人用情報端末や、企業における情報伝達ツールとして、タッチパネルはモノクロのLCD (Liquid crystal display : 液晶) やCRT (Cathode ray tube : ブラウン管) に搭載され始めた<sup>[1-4]</sup>。そして、1990年代、今日では当たり前となっているタッチパネル式の自動券売機が、1995年にJR東日本で導入された<sup>[1-4]</sup> (図1.12 参照)。画面展開でどの券売機でもすべての券種が購入できるような画面インターフェース設計や、機械スイッチで多発していた経年劣化や接点の接触不良などによる



故障が軽減されるといった利点は大きく、タッチパネル式の自動券売機は広く普及していった。そして 2000 年代に入り、タッチパネルの市場は急速に拡大した。その背景として、LCD の性能向上や小型化に加え、2004 年に発売されたニンテンドーDS（任天堂社製）、2007 年に発売された iPhone（Apple 社製）の人気による後押しもあり、小型ディスプレイ用途を中心にタッチパネルは身近な入力インタフェースとして一般に認知されるようになった。なお、日本で最も早く普及したスマートフォンは、2005 年に SHARP 社から発売された“W-ZERO3”シリーズ（図 1.13 参照）であり、その OS には Windows Mobile が採用されていた<sup>[1-17]</sup>。Windows Mobile は、PC の OS である Windows の操作性を踏襲しているため、マウスと同様の高いタッチ精度が求められるインタフェースデザインが特徴である。また、ディスプレイも比較的小さいものであったため、文字入力用にキーボードを搭載するという構成がなされていた。そして、2010 年代に入った現在、タッチパネルは、スマートフォンや Personal media player（以下、PMP）、タブレット PC、車載ディスプレイ、POS レジスタ、電子黒板、医療モニタ、KIOSK 端末など、あらゆる分野に広く普及しつつあり、その利便性からなくてはならない入力インタフェースとして位置づけられている。



図 1.12 JR 東日本の自動券売機

Fig.1.12 Ticket vending machine in JR East

図 1.13 WS003SH（SHARP 社製）<sup>[1-17]</sup>Fig.1.13 WS003SH (SHARP Corp.)<sup>[1-17]</sup>

## 1.1.2 タッチパネルの市場動向

### (1) 市場全体の動向

タッチパネル市場は、年々飛躍的な急成長をみせており、2011年には出荷枚数で約11億枚、出荷金額では約1兆円（約100億ドル）に達する市場規模となった（図1.14、図1.15参照）。この成長は今後も続くと言われており、フラットパネルディスプレイの成長率が停滞する一方で、タッチパネルは2017年には約3兆円（約300億ドル）の市場規模にも達するとも言われている<sup>[1-17]</sup>。タッチパネル市場が急成長を遂げた要因として、スマートフォンやタブレットPCへの急速な普及が挙げられる。2006年頃からPMPやスマートフォン、タブレットPCなどへの搭載が進み、これらの端末が大量生産されることで、市場が大きく拡大したと言われている<sup>[1-19]</sup>。また、今後は、タッチパネル操作に対応したPCへのさらなる普及や、デジタルサイネージ、電子黒板、自動販売機などの中・大型サイズのディスプレイへの搭載が増加していくことで、さらなる市場拡大が予想されている<sup>[1-17]</sup>。

### (2) 方式別の市場動向

タッチパネルの方式は、抵抗膜方式や静電容量方式、赤外線走査方式、再帰反射方

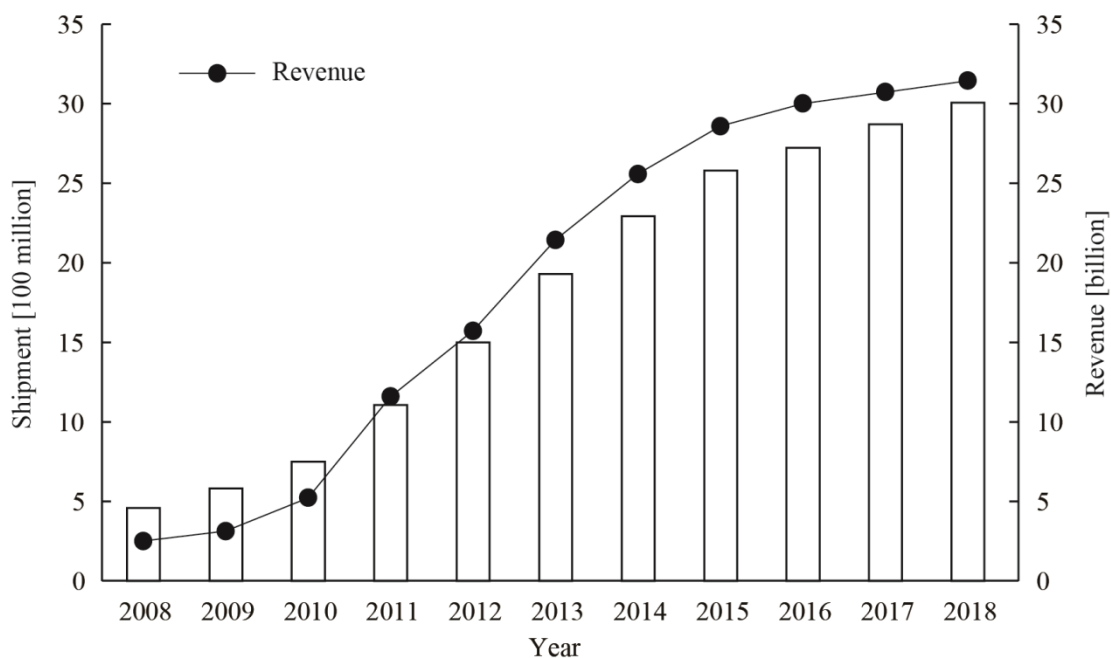
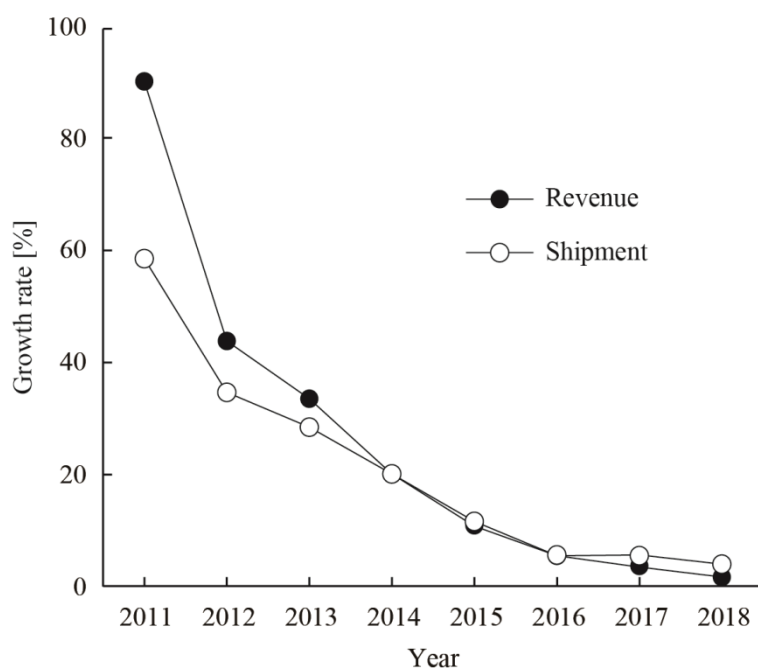


図 1.14 タッチパネル市場の推移と予測<sup>[1-17, 1-18]</sup>

Fig.1.14 Market trends and forecasts of touch-sensitive screens<sup>[1-17, 1-18]</sup>

図 1.15 年平均成長率の推移と予測<sup>[1-17, 1-18]</sup>Fig.1.15 Trends and forecasts of average annual growth rate<sup>[1-17, 1-18]</sup>

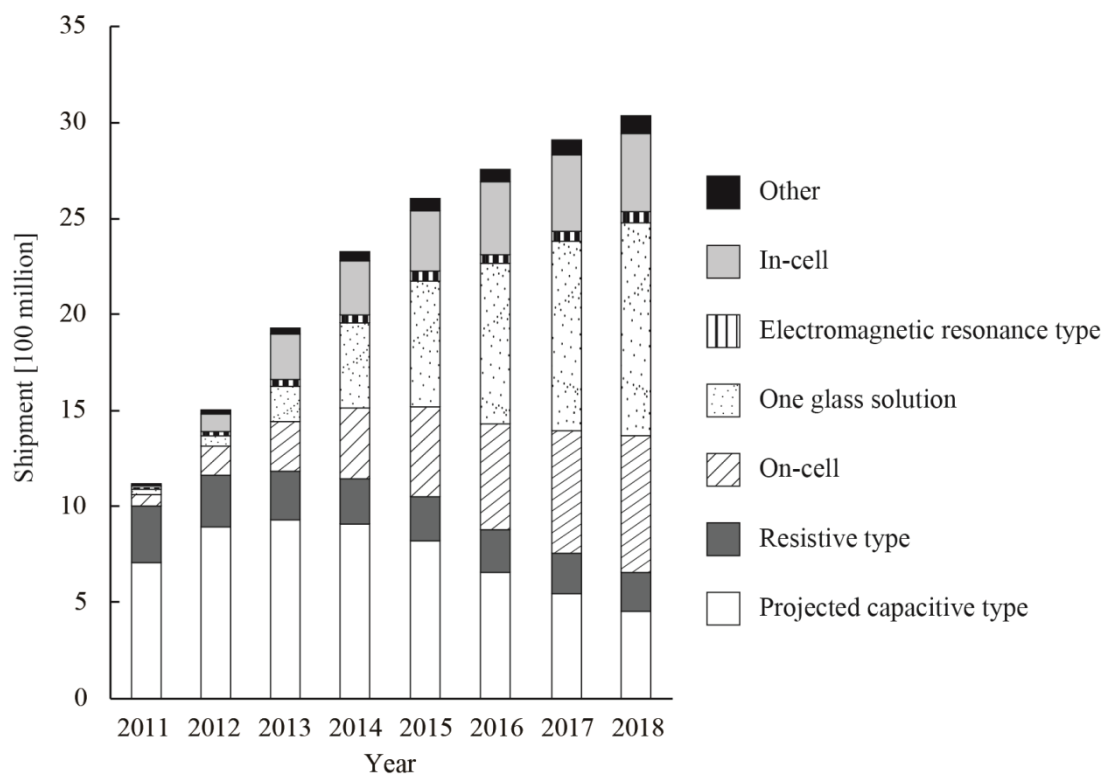
式など数多く存在するが、その中でも抵抗膜方式は長期にわたって方式別市場で圧倒的なシェアを占めていた<sup>[1-17]</sup>。しかし、2007年に投影型静電容量方式のタッチパネルを搭載した iPhone が Apple 社から発売された以降は同方式がシェアを拡大していき、2011年には抵抗膜方式を上回るシェアとなっている（図 1.16 参照）。

投影型静電容量方式が急速に普及した背景として、マルチタッチ（2点以上のタッチ位置を同時に識別可能）による多彩な入力操作が可能になったことが挙げられる<sup>[1-17]</sup>。さらに、投影型静電容量方式の需要が増加するに従って、安価な抵抗膜方式の単価に近づいたことで、コスト面でのデメリットも小さくなっている。

なお、現在でも、抵抗膜方式は投影型静電容量方式に次いで多くのシェアを占めており、指やスタイラスなどの入力方法を選ばないことや、安価であることなどから多くのデバイスに搭載されている。図 1.17 に、タッチパネル方式と主な搭載デバイスの変遷を示す。スマートフォンやタブレット PC のような市場を牽引するデバイスに投影型静電容量方式が多く採用されている一方で、抵抗膜方式も携帯ゲーム機やデジタルカメラといった大量生産されるデバイスに搭載されており、今日でも一定の需要が存在している。

また、赤外線走査方式は、屋内の ATM やキオスク端末などで多く採用されており、

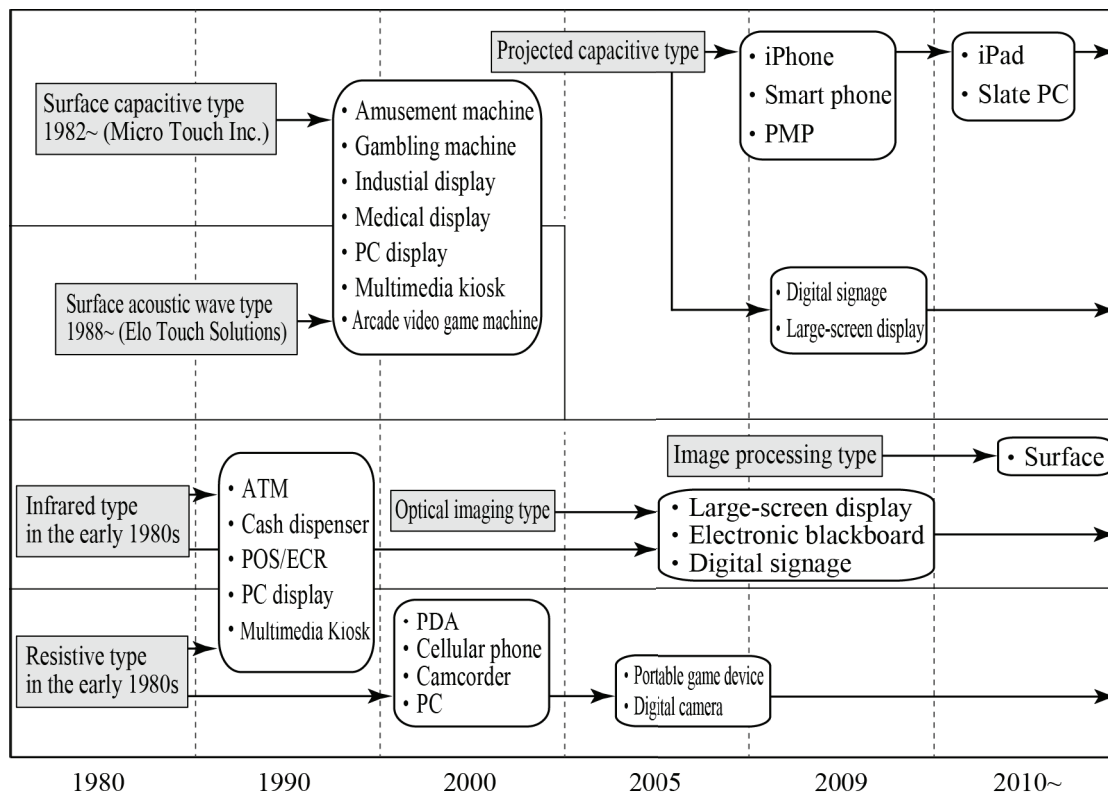


図 1.16 方式別市場の推移と予測<sup>[1-17]</sup>Fig.1.16 Market trends and forecasts of touch-sensitive screens according to types of detections<sup>[1-17]</sup>

ユーザが手袋をつけたままでも操作できる点などが評価され、今後も安定して推移していく方式であると言われている<sup>[1-17]</sup>。また、その原理上、指先で触れる表面の部材を選ばないため、アクリルなどの透明樹脂を使用することができ、ガラスなどを用いた場合に想定される事故を未然に防ぐことができるメリットも一定の需要を生んでいる要因である<sup>[1-17]</sup>。

赤外線走査方式と同様に、光波を利用する方式である再帰反射方式は、複数のカメラを用いて位置を測定する構造をとるため、ディスプレイの大型化に伴うコストアップが比較的小さい<sup>[1-17]</sup>。そのため、電子黒板やデジタルサイネージといった大型のディスプレイを中心に採用されている。ちなみに、2011年、電子黒板用途のタッチパネルは、この再帰反射方式が全体の53%と過半数を超えるシェアを占めている<sup>[1-17]</sup>。

一方、今後の成長が予想される方式は、オンセル方式とインセル方式である。これらの方式では、ディスプレイに直接タッチパネルが組み込まれるため、軽量性や薄型性へのニーズの要求が強いスマートフォンなどの携帯端末用途で需要が拡大していく

図 1.17 タッチパネル方式と主な搭載デバイスの変遷<sup>[1-20, 1-21]</sup>Fig.1.17 Vicissitude of types of detections and devices<sup>[1-20, 1-21]</sup>

と予想されている<sup>[1-17]</sup>.

### (3) 搭載デバイス別の市場動向

タッチパネルの黎明期には、産業用モニタなどの限られた人間が使用する専門的なデバイスであったり、PDA のようなごく一部の個人用情報端末にしか搭載されていない入力インタフェースであった<sup>[1-17]</sup>。しかし、現在では、スマートフォンやタブレット PC をはじめとして、多岐の分野で様々なデバイスに搭載されている。

タッチパネルの市場が急速に成長した背景には、スマートフォンへの搭載が大きく貢献している。図 1.18 に示した搭載デバイス別の市場動向より、2011 年には、出荷枚数で約 70%のシェアをスマートフォンだけで占めていることがわかる。

また、スマートフォンに次いで高いシェアをもっているタブレット PC が、年々市場を拡大してきている。2012 年に発売された Windows 8 の登場によってタブレット PC はデバイスとしての利便性がより向上し、今後最も搭載率の向上が期待されるデバイスである。さらに、タブレット PC は医療現場での電子カルテや教育現場でのデ

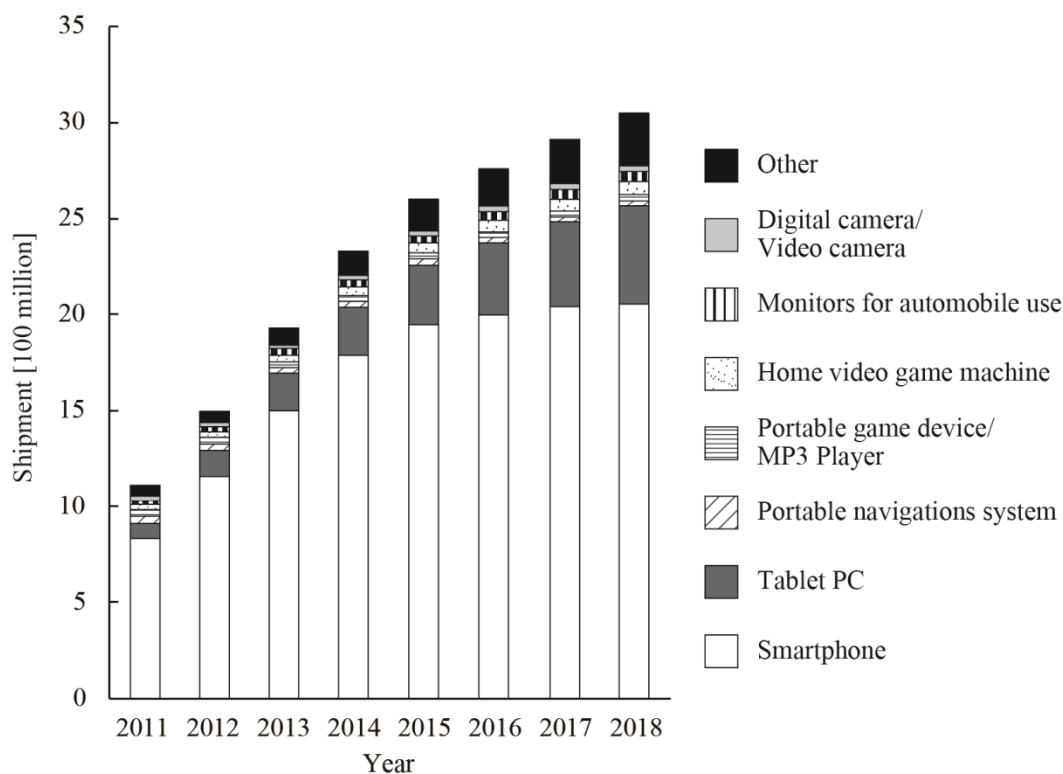


図 1.18 搭載デバイス別市場の推移と予測<sup>[1-17]</sup>

Fig.1.18 Market trends and forecasts of touch-sensitive screens according to types of devices<sup>[1-17]</sup>

デジタル教科書としての用途も期待されており，その動向が注目される<sup>[1-22]</sup>。

### 1.1.3 タッチパネルの方式及び構造と検出原理

#### (1) タッチパネルの方式

タッチパネルには，電氣的にタッチ位置を検出する方式や，物理的な振動，赤外線，画像認識などを用いて検出を行う方式など様々な検出方式のものが存在し，それぞれの方式で特徴をもっている。まず，図 1.19 に方式別の詳細分類を示す。広義のタッチパネルは，“抵抗膜方式”，“静電容量方式”，“光学方式”，“超音波方式”，“電磁誘導方式”，“インセル方式”に大別することができる<sup>[1-20]</sup>。これらの方式をさらに詳細に分類した中でも，とくに代表的な 6 つの方式（抵抗膜方式，投影型静電容量方式，赤外線走査方式，再帰反射方式，超音波表面弾性波方式，電磁誘導方式）<sup>[1-23]</sup>の特徴を表 1.1 に示す。これより，どの方式もそれぞれに特徴をもっており，一長一短であることがわかる。以下では，表 1.1 で挙げた 6 つの代表的な方式の中で，

方式別市場シェアの大部分を占める抵抗膜方式と投影型静電容量方式について、その利点と課題を簡単にまとめる。

まず、抵抗膜方式の利点は、シンプルな回路によって構成されているため、安価なことである。また、物理的に表面の電極膜をたわませ、2枚の電極膜を電氣的に接触させることで検出を行うため、指やスタイラスなどの入力方法を選ばない。そのため、様々なデバイスに搭載できることも利点である。一方、課題は、上部電極と下部電極の間にドットスペーサで隔てられた空気層が存在するため、内部反射によって透過率が低下することや、上部電極にITO（インジウム錫酸化物）が成膜されたフィルムを

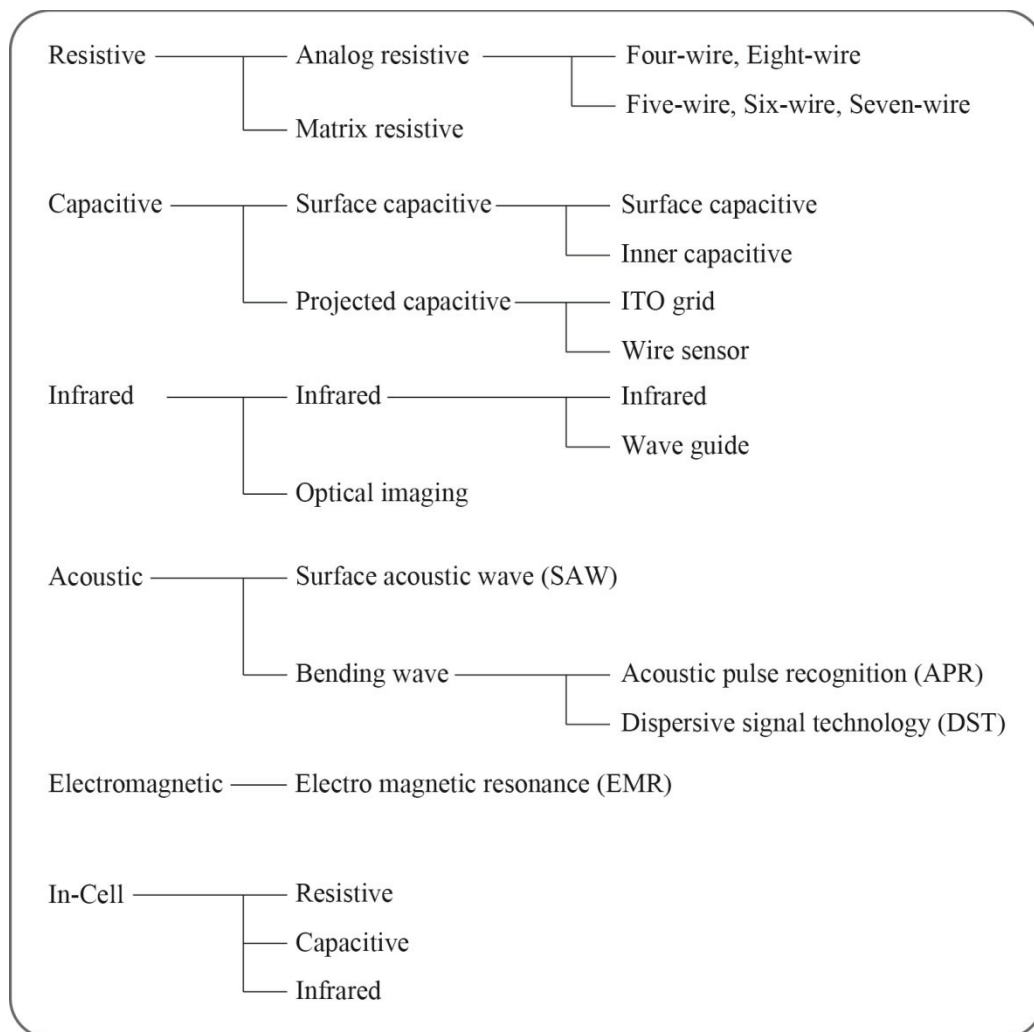


図 1.19 タッチパネルの方式別詳細分類<sup>[1-20]</sup>

Fig.1.19 Fine classification of touch-sensitive screens according to types of detections<sup>[1-20]</sup>

表 1.1 タッチパネルの方式と特徴<sup>[1-17]</sup>Table 1.1 Types of detections of touch-sensitive screens and its features<sup>[1-17]</sup>

	Types of applications					
	Resistive	Projected capacitive	Infrared	Optical imaging	Surface acoustic wave	Electro magnetic resonance
Transmission	△	○	◎	◎	◎	◎
Resolution	◎	△	×	○	○	◎
Durability	△	△	◎	◎	◎	◎
Cost	◎	○	○	○	○	○
Input by finger	◎	△	×	○	△	◎
Size	1~20"	2~15"	<3" 20~150"	19~100"	10~36"	10~19"
Multi-touch	△	○	○	○	○	×
Input means	Finger/ Stylus	Finger/ Conductive stylus	Finger/ Stylus	Anything	Finger/ Stylus	Electronic pen

用いているため、物理的な接触に対して耐久性が低いことなどである<sup>[1-24]</sup>。

次に、投影型静電容量方式について述べる。まず、その最大の利点は、従来の抵抗膜方式では実現できていなかったマルチタッチが可能になったことである。これによって新たなユーザインタフェース（User interface, 以下 UI）としての付加価値をつけられるようになり、その斬新かつ高い操作性が市場で広く受け入れられた。また、表面にハードコート層を形成できるため、高い表面硬度を確保することができ、耐久性も高い。ガラスなどを用いることで、デザイン性を向上させることができるメリットも大きい。他方、課題は、電極を細微な格子状にパターンニングする際に加工コストがかかることや、ノイズ処理などに特殊な IC が必要であることなどから、抵抗膜方式に比べてコストが高くなることが挙げられる<sup>[1-25]</sup>。しかし、近年では投影型静電容量方式の需要が増加し、単価が抵抗膜方式に近づいたことでコスト面でのデメリットは小さくなっている。

なお、本研究では、現在最も高い方式別市場シェアをもっており、携帯端末とタブ

レット端末のいずれにおいても大多数のデバイスに採用されている投影型静電容量方式のタッチパネルを用いて実験を行うこととした。

## (2) 抵抗膜方式タッチパネルの構造と検出原理

ここでは、方式別の市場シェアで大部分を占める抵抗膜方式と投影型静電容量方式の2つの方式のうち、まず、抵抗膜方式の構造と検出原理について簡単に述べる。抵抗膜方式の構造は比較的簡易な回路系で済むために廉価であり、長期にわたって多くのデバイスに搭載されてきた。一般的な抵抗膜方式の構造を図1.20に示す。透明電極を形成した2枚の基板（フィルムもしくはガラス）を対向させ、指やスタイラスなどによって押圧された箇所の上部電極膜がたわみ、ドットスペーサがない位置で2枚の透明電極膜が電氣的に接触することによって入力及び位置の検出を行う。

抵抗膜方式によるタッチ位置の検出原理について簡単に述べる<sup>[1-17]</sup>。図1.21に指もしくはスタイラスで抵抗膜方式タッチパネルを押下し、2枚の電極膜同士が接触した際の電気回路を示す。なお、この図は $x$ 座標を検出する際の回路を表している。上部電極膜に $V_0$ の電圧かけた場合、 $(A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A)$ と $(A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow A)$ の各回路網で以下に示す式(1.1)、式(1.2)が成立する。

$$(1-x)r_x L_x I_1 + x r_x L_x (I_1 - I_2) = V_0 \quad (1.1)$$

$$(1-x)r_x L_x I_1 + x r_x L_x (I_1 - I_2) = V_0 \quad (1.2)$$

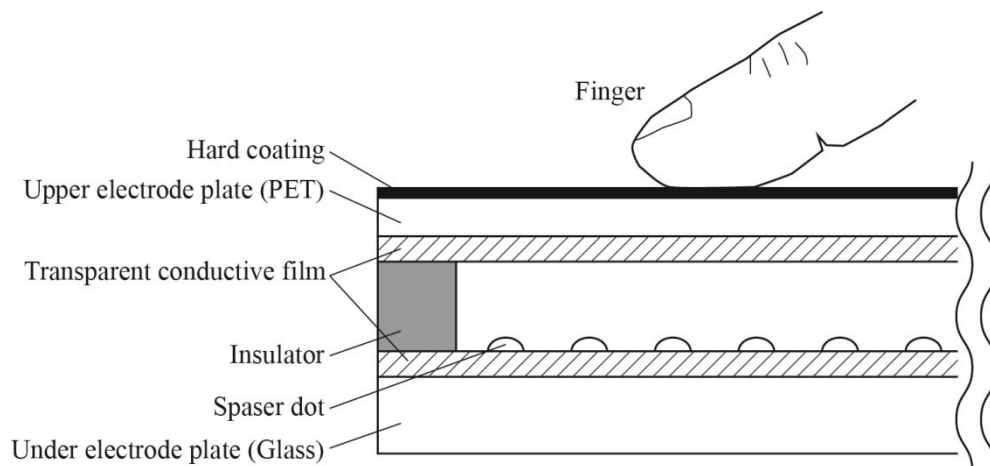


図1.20 抵抗膜方式の一般的構造<sup>[1-17]</sup>

Fig.1.20 Structure of resistive touch-sensitive screen<sup>[1-17]</sup>

- $L_x$  :  $x$ 方向の有効長さ
- $L_y$  :  $y$ 方向の有効長さ
- $x$  :  $L_x = 1$ としたときの  $x$  座標  $0 \leq x \leq 1$
- $y$  :  $L_y = 1$ としたときの  $y$  座標  $0 \leq y \leq 1$
- $r_x$  :  $x$ 方向の単位長さあたりの抵抗
- $r_y$  :  $y$ 方向の単位長さあたりの抵抗
- $R$  : 電圧計の内部抵抗

上記の式を  $I_1$ ,  $I_2$  について解くと下記の式 (1.3), 式 (1.4) が得られる.

$$I_1 = \frac{\{xr_xL_x + y(1-y)r_yL_y + R\}V_0}{r_xL_x\{x(1-x)r_xL_x + y(1-y)r_yL_y + R\}} \quad (1.3)$$

$$I_2 = \frac{xV_0}{x(1-x)r_xL_x + y(1-y)r_yL_y + R} \quad (1.4)$$

これより, 電圧計の電圧  $V$  が以下の式 (1.5) から得られる.

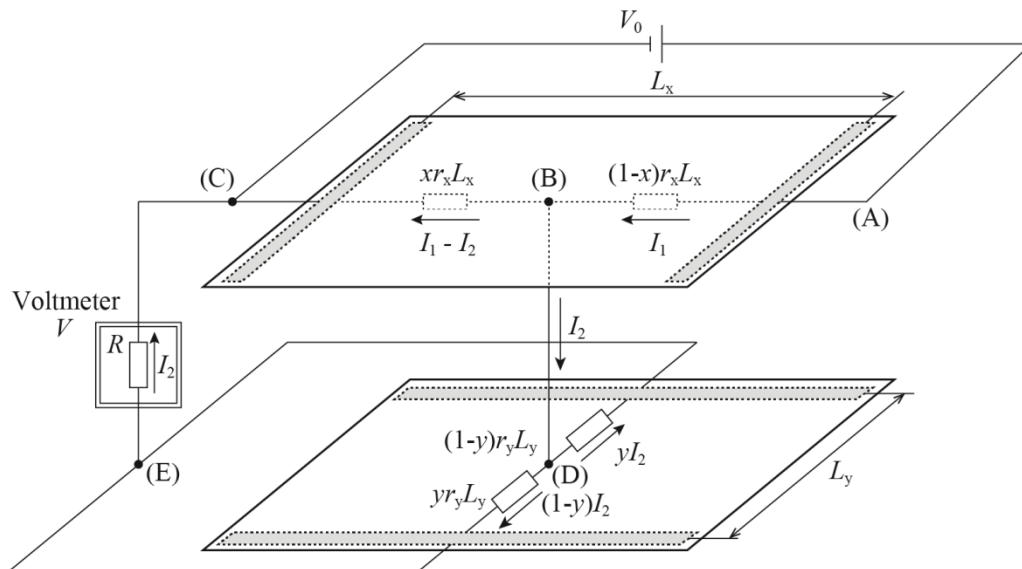


図 1.21 電極膜同士が接触した際の電気回路<sup>[1-17]</sup>

Fig.1.21 Electrical circuit in contacting two electro plates<sup>[1-17]</sup>



$$V = V_x = \frac{xRV_0}{x(1-x)r_xL_x + y(1-y)r_yL_y + R} \quad (1.5)$$

ここで、 $R$ が $r_xL_x$ や $r_yL_y$ に比べて十分に大きければ、式(1.5)は以下の式(1.6)のように単純化できる。

$$V_x = xV_0 \quad (1.6)$$

よって、指やスタイラスなどによって押圧された位置の $x$ 座標の絶対値 $X$ と $y$ 座標の絶対値 $Y$ を以下の式(1.7)、式(1.8)からそれぞれ得られる。

$$X = L_xV_x/V_0 \quad (1.7)$$

$$Y = L_yV_y/V_0 \quad (1.8)$$

抵抗膜方式では、以上の原理により指やスタイラスでのタッチ位置を検出する。しかし、 $R$ が $r_xL_x$ や $r_yL_y$ に比べて十分に大きくなく無視できない場合などにはリニアリティを確保するために補正が必要となり、タッチパネル製造メーカー各社は独自のノウハウをもっている<sup>[1-17]</sup>。このリニアリティは、理論電圧と出力電圧の誤差をパネルの有効領域の最外端電圧差で除した値で定義されるものであり、抵抗膜方式タッチパネルのタッチ精度を決める重要な要素である。

### (3) 投影型静電容量方式タッチパネルの構造と検出原理

ここでは、現在、方式別市場シェアで最も高い割合を占める投影型静電容量方式の一般的な構造と検出原理について簡単に述べる。投影型静電容量方式は、指でタッチパネルに触れた際の微少な静電容量変化を捉えることでタッチ位置の検出を行う方式である。図1.22に、一般的な投影型静電容量方式の構造を示す。電極を格子状（一般的には菱形格子状）にパターンニングした透明電極膜を組み合わせた構成であり、タッチパネルコントローラでパターン上のどこに静電容量変化が発生したかを検知する。人体は水分が多く導電性があるため、センサに指が直接触れなくても近づくだけで指と電極間の静電容量が増加し、タッチ位置を検出することができる。そのため、指で触れる表面にガラスなどを配置することができ、物理的な耐久性や耐環境性、さらに

デザイン性にも優れているという特長をもつ。

投影型静電容量方式のタッチ位置の検出原理について述べる<sup>[1-17]</sup>。図 1.23 に示すのは、投影型静電容量方式の原理図である。x方向の電極から時分割で交流電圧を順次

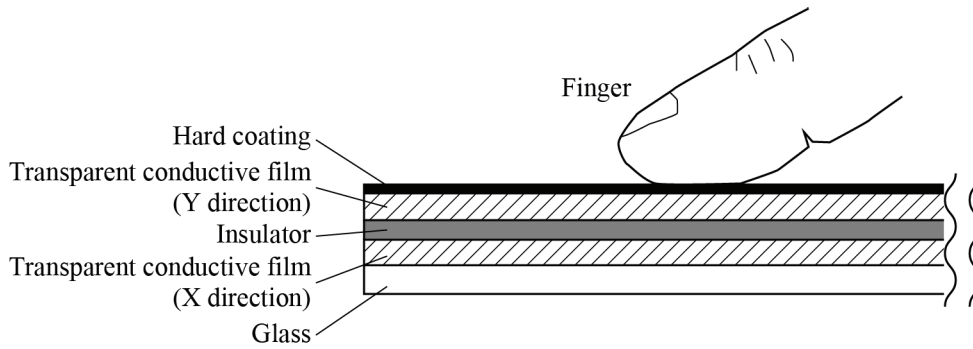


図 1.22 投影型静電容量方式の一般的構造<sup>[1-21]</sup>

Fig.1.22 Structure of projected capacitive touch-sensitive screen<sup>[1-21]</sup>

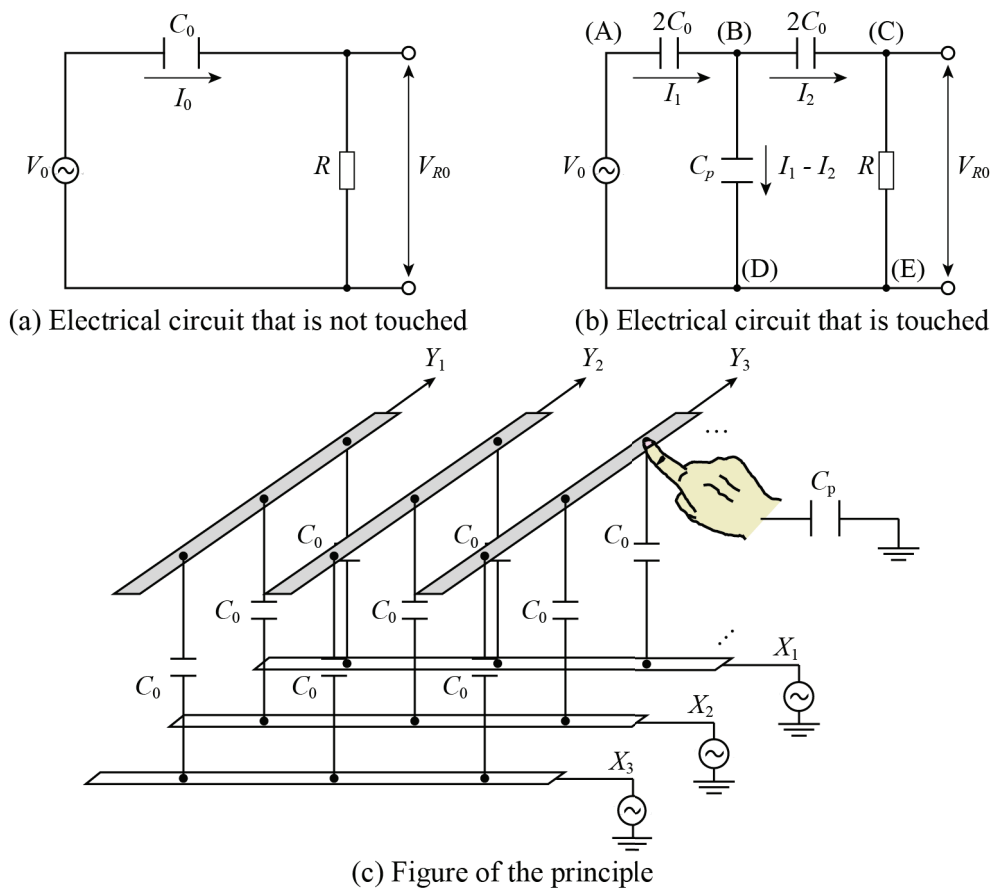


図 1.23 投影型静電容量方式タッチパネルの原理図<sup>[1-17]</sup>

Fig.1.23 Figure of the principle of projected capacitive touch-sensitive screen<sup>[1-17]</sup>

加え、 $y$ 方向の電極それぞれで検知する。その際、指で触れていなければ図 1.23 (a) に示す回路が成立し、交流電源の周波数を $\omega$ とすると、検知される電圧は式 (1.9) で表される。

$$|V_{R0}| = \frac{V_0}{\sqrt{1 + (1/\omega RC_0)^2}} \quad (1.9)$$

これに対し、指で触れている場合には、容量 $C_0$ の中に割り込むことになるため、図 1.23 (b) に示すような回路が形成される。ここで、便宜上 $C_0$ を $1/C_0$ ごとに 2 分割し、その間にタッチパネルに触れたヒトの容量 $C_p$ が入ると考える。この際、(A→B→C→E→D→A) と (A→B→D→A) の各回路網で以下の式 (1.10) 及び式 (1.11) が成り立つ。

$$V_0 = \frac{I_1}{i2\omega C_0} + \frac{I_2}{i2\omega C_0} + RI_2 \quad (1.10)$$

$$V_0 = \frac{I_1}{i2\omega C_0} + \frac{I_1 - I_2}{i\omega C_p} \quad (1.11)$$

これを $I_1$ について解くと、以下の式 (1.12) , 式 (1.13) が得られる。

$$I_1 = \frac{\{1 + (C_p/2C_0) + i\omega RC_p\}V_0}{R\{1 + (C_p/2C_0)\} - (i/\omega C_0)\{1 + (C_p/4C_0)\}} \quad (1.12)$$

$$I_1 = \frac{V_0}{R\{1 + (C_p/2C_0)\} - (i/\omega C_0)\{1 + (C_p/4C_0)\}} \quad (1.13)$$

これより、 $V_R$ は $RI_2$ から、以下の式 (1.14) で表される。

$$|V_R| = \frac{V_0}{\sqrt{\{1 + (C_p/2C_0)\}^2 + (1/\omega RC_0)^2\{1 + (C_p/4C_0)\}^2}} \quad (1.14)$$

ここで、 $\gamma = C_p/C_0$ とおくと、以下の式 (1.15) が得られる。

$$|V_R| = \frac{V_0}{\sqrt{\{1 + (\gamma/2)\}^2 + (1/\omega RC_0)^2\{1 + (\gamma/4)\}^2}} \quad (1.15)$$

ここで、 $\gamma = 0$ とすると、タッチパネルに指が触れていない状態での電圧 $V_{R0}$ と等しくなる。すなわち、 $\gamma > 0$ は指が触れていることを表し、タッチ位置に応じて $V_R$ の値は変化する。また、式 (1.15) から明らかなように、投影型静電容量方式タッチパネルの検出能力は、 $\gamma = C_p/C_0$ の大きさに依存する。

## 1.2 タッチパネルの操作性に関する基礎的知見

### 1.2.1 タッチパネルの操作方法

投影型静電容量方式の登場で、2本以上の指の位置を検出することのできるマルチタッチが可能となり、ジェスチャー操作と呼ばれる多彩な操作方法を実現できるよう

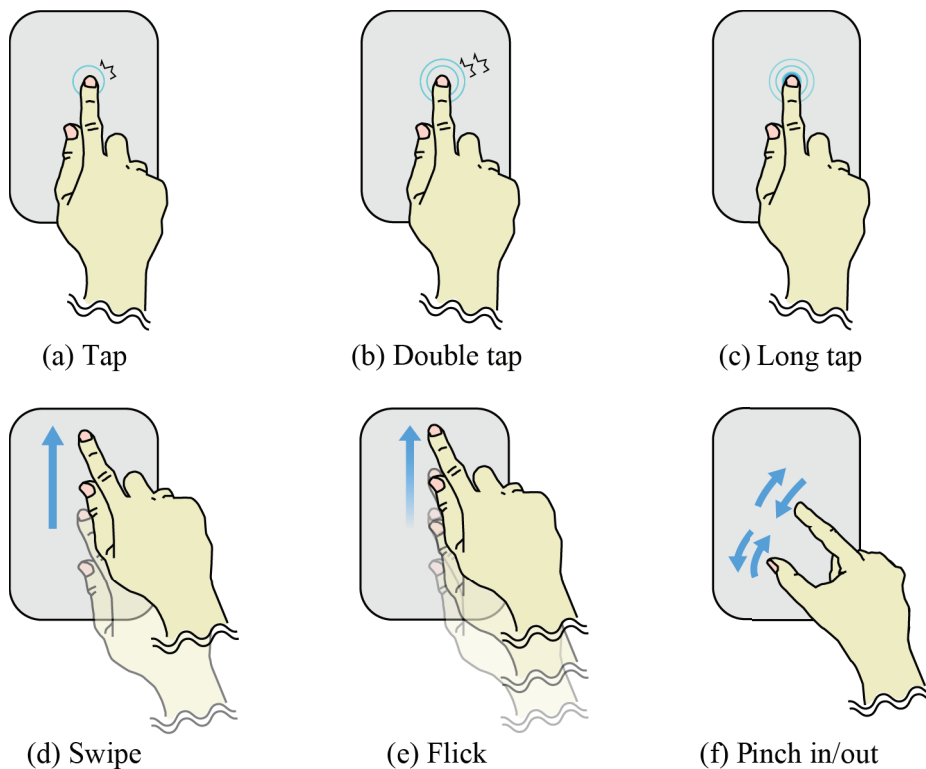


図 1.24 タッチパネルの基本的な操作方法

Fig.1.24 Basic operational methods of touch-sensitive screens

になった。ここでは、タッチパネルで用いられる代表的な操作方法について述べる。

図 1.24 に、タッチパネルにおける代表的な操作方法を示す。図 1.24 (a) に示すのは最も基本的な操作の 1 つである“タップ”である。ディスプレイに軽く 1 度だけ触れる操作であり、ボタンやアイコンの選択や決定の際に用いられる。図 1.24 (b) に示す操作方法は“ダブルタップ”と呼ばれ、ディスプレイに 2 度連続して触れる操作である。主に、表示画面の切り替えやズームイン・アウトを行う際に使用される。図 1.24 (c) に示す操作方法は“ロングタップ”と呼ばれ、指でディスプレイ上のボタンやアイコンなどに触れ続ける操作を指す。マウスの右クリックに似た役割をもち、メニューを表示させたり、テキストの選択などを行う際に使用する。図 1.24 (d) には“スワイプ”の操作方法を示す。ディスプレイ上で指を滑らせる操作であり、拭い取るという意味をもつ“swipe”が語源である。ディスプレイのスクロールやページ送りなどを行う際に使用する。なお、状況に応じて“スライド”や“スクロール”などとも表現される。図 1.24 (e) では“フリック”の操作方法を示す。はじくという意味をもつ“flick”の言葉通り、ディスプレイ上で指をさっとはじくように動かす操作を示す。“スワイプ”と混同される場合が多いが、“スワイプ”よりも速く指を動かすという特徴がある。画面のスクロールにも使われるが、フリック入力と呼ばれる文字入力方式が代表的である。また、図 1.24 (f) には“ピンチアウト・ピンチイン”の操作方法を示した。指を 2 本使い、ものをつまむような状態から指を広げる“ピンチアウト”と、指を狭める“ピンチイン”がある。それぞれ、ズームイン、ズームアウトする場合に頻繁に使用される操作方法である。

このように、タッチパネルでは他の入力インタフェースには見られない独特の操作方法が採用されており、その多くは現実世界で我々が行う動作のメタファに基づいた直感的なものである。タッチパネルの操作性を考える上では、これらの直感的な操作方法を最大限に活かすために、ハードウェアやソフトウェアの設計について配慮を行う必要がある。

## 1.2.2 タッチパネルのユーザビリティ

ここでは、入力インタフェースとしてのタッチパネルのユーザビリティについて論ずる。具体的には、まず、入力インタフェースとしてのタッチパネルの特性について述べる。続いて、ユーザビリティの概念の中で、本研究で扱う“操作性”の位置づけについて述べる。最後に、タッチパネルの操作性評価の必要性について述べる。

### (1) 入力インタフェースとしてのタッチパネルの特性

入力インタフェースとしてのタッチパネルの特性について、他のポインティングデバイスとの比較について述べる。図 1.25 に示すのは、様々なポインティングデバイスを用いてポインティングを行った際のポインティング時間をまとめたものである<sup>[1-26]</sup>。なお、ここで示されている数値は、単純なポインティング操作から、複数のボタンを押させるポインティング操作といったあらゆる実験課題の結果までを含んでいるため、折線同士の比較には意味をもたない。しかし、同じ折線上で横軸に配したポインティングデバイス間で比較をしてみると、軸の左側にいくほどポインティングに要する時間は短くなっている。そのため、軸の最も左に配されたタッチパネルでは、いかに速く操作できるかという点において、他のポインティングデバイスよりも高い操作性をもつことが確認できる。

このように、高い操作性をもつタッチパネルであるが、どのような状況においても、この高い操作性を維持できるわけではないという指摘もなされている<sup>[1-21]</sup>。それは、キーボードやジョイスティックといった物理的な入力インタフェース (Solid user interface) とタッチパネルを比較した場合に、操作に対する習熟度と操作性の間に関

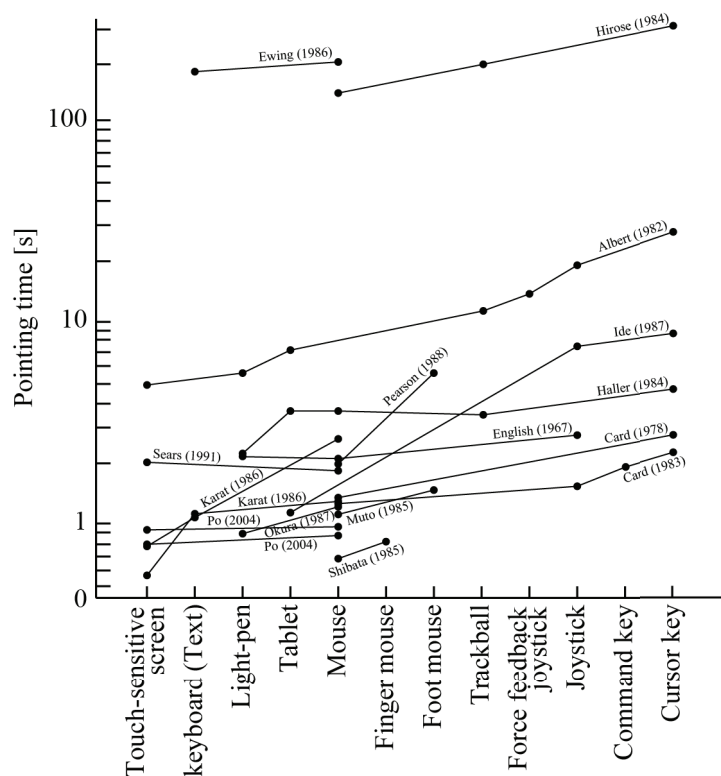


図 1.25 様々なポインティングデバイスでのポインティング時間の比較<sup>[1-26]</sup>

Fig.1.25 Comparison of pointing time in several pointing devices <sup>[1-26]</sup>

係性があるからであると言われているためである。すなわち、図 1.26 に示すように、横軸に操作の習熟度、縦軸に操作性をとると、タッチパネルはほぼ一定の操作性を示すが、習熟とともに操作性が向上するような入力インタフェースの場合では、ある習熟度を越えた時点でタッチパネルの操作性を上回るとされる。それ故、タッチパネルを効果的に導入するためには、操作の習熟を求めないようなデバイス（例えば、駅の券売機や ATM など）に搭載するなどの配慮も必要になると考えられる。なお、ほとんどのユーザは、入力インタフェースを使用する前に、時間をかけてそのインタフェースの操作方法を学んだりはしないという知見も示されている<sup>[1-27]</sup>。そのため、いかに早く直感的にそのインタフェースを使用することができるかという点もユーザビリティの観点からは重要であり、その点においては、操作の習熟をほとんど必要としないタッチパネルの利点は大きいと言える。

## (2) ユーザビリティにおける操作性の位置づけ

タッチパネルに限らず、様々なインタフェースやシステムの使い易さや使い勝手、学習のし易さなどを含む概念として、“ユーザビリティ (Usability)” という言葉が広く知られている<sup>[1-28]</sup>。ユーザビリティには広義なものから狭義なものまで存在し、その言葉が示す明確な概念については未だに議論が分かれるところであるが、ここではユーザビリティ概念の変遷における代表的な定義について簡単に述べ、その中で、本研究が取り扱う“操作性”の位置づけを明確にしていく。

ユーザビリティに関する問題意識は、情報通信技術 (Information and communication

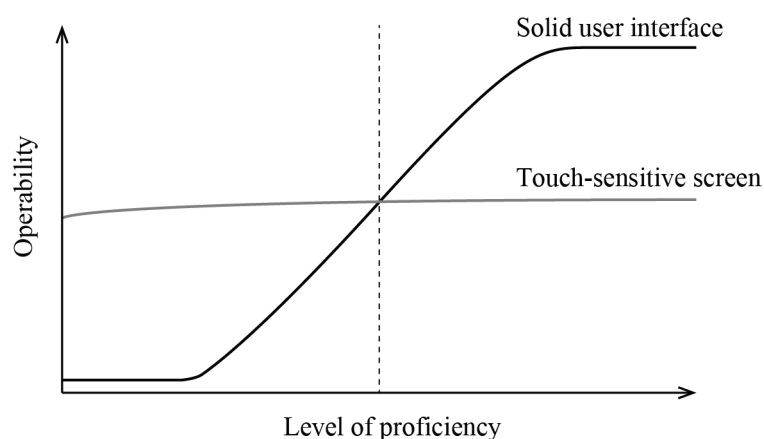


図 1.26 操作に対する習熟度と操作性の関係の概念図<sup>[1-21]</sup>

Fig.1.26 Conceptual diagram of relationship between level of proficiency and operability<sup>[1-21]</sup>



technology, 以下 ICT) の発展に加え, これとともに展開していった人間工学と認知工学によって次第に明確になっていったとされる<sup>[1-28]</sup>. 具体的には, 1980 年代に PC の普及によって認知工学的な問題が浮き彫りとなり, 従来のハードウェアの使い易さに関わる人間工学的なアプローチに加えて, ソフトウェアも統合した総合的なアプローチが必要となり, ユーザビリティに対する問題意識が大きくなっていった. その後, ユーザビリティという概念が明確に定義されるようになったのは, 1993 年に Nielsen, J.などによって“ユーザビリティ工学 (Usability engineering)”という分野が提唱されたことに関係すると言われている<sup>[1-28]</sup>. これによって, ユーザビリティに関わる方法論の整備などが行われ, 人間工学, 認知工学, 感性工学などのアプローチを母体としつつ, ユーザビリティテスト (Usability test) やインスペクション法 (Inspection method) などの新たな手法が開発されていった.

ここで, Nielsen, J.が提唱したユーザビリティの概念を図 1.27 に示す. ここでは, ユーザビリティは, ユーティリティ (Utility) とともにユースフルネス (Usefulness) の下位概念として定義されている. そして, ユーザビリティはさらに次の 5 つの概念に分けることができる<sup>[1-27]</sup>.

- ・ 効率性 (Efficiency) ——システムは, 一度ユーザがそれについて学習すれば, 後は高い生産性を上げられるよう, 効率的な使用を可能にするべきである.
- ・ エラー発生率 (Errors) ——システムはエラー発生率を低くし, ユーザがシステム使用中にエラーを起こしにくく, もしエラーが発生しても簡単に回復できるようにしなければならない. また, 致命的なエラーが起こってはいけない.
- ・ 学習し易さ (Learnability) ——システムは, ユーザがそれを使って作業をすぐ始められるよう, 簡単に学習できるようにしなければならない.  
記憶し易さ (Memorability) ——システムは, 不定期利用のユーザがしばらく使わなくても, 再び使うときに覚え直さなくて使えるよう, 覚えやすくしなければならない.
- ・ 主観的満足度 (Satisfaction) ——システムは, ユーザが個人的に満足できるよう, また好きになるよう, 楽しく利用できるようにしなければならない.

上記の 5 つの項目の中で, 本研究で“操作性”として評価を行う項目は, “効率性”と“エラー発生率”である. これら 2 つの項目は, ユーザビリティ工学に関わる人間

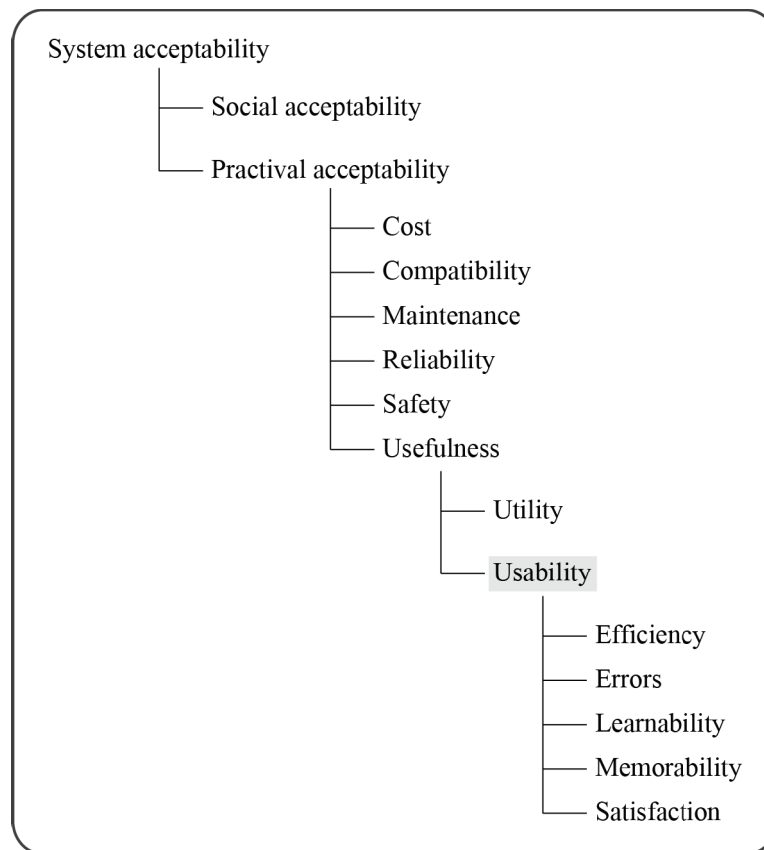


図 1.27 Nielsen, J.によって定義されたユーザビリティの概念図<sup>[1-28]</sup>

Fig.1.27 Conceptual diagram of usability defined by Nielsen, J.<sup>[1-28]</sup>

工学，認知工学，感性工学の 3 つの研究分野において，人間工学的なアプローチによって評価が求められる項目である<sup>[1-29]</sup>。

また，ユーザビリティ工学が広く認知されるようになった 1990 年代後半には，ユーザビリティという概念に含まれる対象は，それまでの評価を中心としたものから，ユーザの利用状況の理解やインタフェースのあり方に至るまでの広範に広がりを見せつつあった。このような背景の下，1999 年に，設計の上流から下流に至るプロセスの流れを定義した ISO 13407 (Human-centred design processes for interactive systems)

(2010 年に，ISO 9241-210 (Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems) へと移行) が国際標準化機構 (以下，ISO) により制定され，その後のユーザビリティ活動を世界的規模で躍進させたと言われている<sup>[1-28]</sup>。この ISO 13407 の中に含まれる ISO 9241-11 (Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) – Part 11: Guidance on usability) で定義されたユーザビリティの概念を図 1.28 に示す。ここでは，ユーザビリティは次の 3 つの項

目に分けられている。

- ・ 有効さ (Effectiveness) ——ユーザが、指定された目標を達成する上での正確さと完全さ。
- ・ 効率 (Efficiency) ——ユーザが、目標を達成する際に正確さと完全さに費やした資源。
- ・ 満足度 (Satisfaction) ——不快さのないこと、および製品使用に対しての肯定的な態度。

ここで定義されるユーザビリティを定量的に評価する際には、有効さはエラー率や正答率、効率は作業に要する時間、満足度は主観的評価尺度を用いるとされ<sup>[1-28]</sup>、とりわけ“有効さ”と“効率”の評価においては、人間工学的な手法を用いた解析が重要になってくる。

以上を踏まえ、本研究では、ユーザの身体的特性や運動特性を踏まえた上でタッチパネルにおける有効さと効率さを評価するために、タッチパネルを操作する際の正確性や操作に要する時間などの指標を人間工学的手法を用いて計測することで、エラーを軽減させ、効率的に操作を行うためのタッチパネルの設計指針を得ることを目指す。なお、本研究における“操作性”は、Nielsen, J.が定義するユーザビリティの“効率性”と“エラー発生率”，ISO 9241-11 が定義するユーザビリティの“有効さ”と“効率”にそれぞれ対応すると考える。

### (3) タッチパネルの操作性評価の必要性

人間中心のデザインを施すことで、インタフェースを使い易く、理解し易いものに

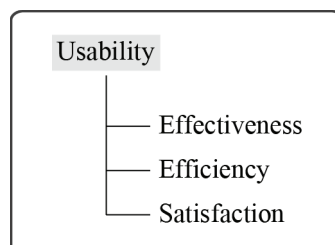


図 1.28 ISO 9241-11 で定義されたユーザビリティの概念図<sup>[1-28]</sup>

Fig.1.28 Conceptual diagram of usability defined by ISO 9241-11<sup>[1-28]</sup>

しなければならないという考え方は古くから提唱されており<sup>[1-30]</sup>，近年でスマートフォンやタブレット PC などに急速な普及を遂げたタッチパネルにおいても例外ではない。とりわけ，子どもから高齢者までが日常生活においてタッチパネルを操作するようになった昨今の状況を鑑みれば，需要拡大が予想されるタッチパネルの操作性向上に寄与する知見を充実させ，インタフェースデザインに対する普遍的な要求を満足させることは必要不可欠な研究課題であると言える。実際，タッチパネルにおける UI の設計指針整備は，喫緊の課題として急がれている。しかし，マルチタッチが可能な投影型静電容量方式の携帯端末やタブレット端末は近年で急速に普及を遂げたデバイスであり，その操作特性はこれまで十分には調べられてきていない。そのため，これらの端末に特化した新たな設計指針の確立が必要になると考えられる。とくに，スマートフォン普及率の上昇や，タブレット端末の教育分野や医療分野などへの応用が進行しているという状況を踏まえれば，ユーザビリティ向上のための操作性評価研究に課せられた使命は大きい。

また，デザイナーがインタフェースを設計する際には，ユーザの多くが共有している一般的な操作特性や心理特性を把握しておくことで，デザインにかかる作業コストを大幅に削減することができるという利点もある<sup>[1-31]</sup>。すなわち，多くのユーザがもつインタフェースデザインに対する基本的な要求を活用することで，デザイナーは，個々のアプリケーションの細部に至るデザインや，対象とするユーザに特化したデザインの変更などに注力することができる。このような観点からも，タッチパネルの操作性を評価し，多くのユーザに共通してみられる基礎的知見を得ることの必要性が伺える。

### 1.2.3 タッチパネルのグラフィカルユーザインタフェース

ここでは，タッチパネルのグラフィカルユーザインタフェース（Graphical user interface，以下 GUI）の特性や，デザイン時に求められる基本的な要求について述べる。まず，GUI とは，キーボード入力と文字表示のみを使って操作を行うキャラクタユーザインタフェース（Character user interface）に対して使用されるようになった言葉であり，コンピュータから出力される情報をグラフィカルに表示させることで，大半の基本的な操作をポインティングデバイスによって行うことができるユーザインタフェースのことである<sup>[1-28]</sup>。タッチパネルにおいては，図 1.29 に示すようなボタンやアイコン，スライダ，スイッチなどの総称を指す。

タッチパネルについて，直感的な操作が可能であるということが頻繁に言われるが，

これは、タッチパネルが「自然な入力によって直感的、あるいは本能的でとぎれのない体験を提供することができる」ためである<sup>[1-21]</sup>。このようなインターフェースは、ナチュラルユーザインタフェース (Natural user interface, 以下 NUI) とも呼ばれ、最近では Microsoft 社から発売された Kinect (図 1.30 参照) が代表的である。NUI で“自然に操作できる”ということについて、各操作要素に分けて考えてみる。例えば、従来のマウスによるポインティングでは、(ユーザ→マウス→マウスカーソル→GUI) という流れをとっており、ユーザと GUI の間にはいくつかの操作要素が介在し、非常に間接的な操作であった。一方、タッチパネルでは、(ユーザ→GUI) という流れで操作を行うことができるため、ユーザと GUI の間に他の間接的な操作要素がなく、直感的に操作できるという特長をもつ<sup>[1-21]</sup>。

このように、タッチパネルは他のポインティングデバイスに比べて直感的な操作が可能となるが、それ故に GUI のデザイン時において求められるタッチパネルに特化した基本的な要求も存在する。例えば、タッチパネルのオンスクリーンキーボードは、



図 1.29 タッチパネルで 사용되는 GUI の一例 (iOS 7.0.2)

Fig.1.29 An example of GUI used in touch-sensitive screens (iOS 7.0.2)

図 1.30 Kinect (Microsoft 社製) <sup>[1-32]</sup>Fig.1.30 Kinect (Microsoft Corp.)<sup>[1-32]</sup>

その配列などに Solid user interface (以下, SUI) のキーボードのメタファを利用していながらも, それと同じ操作をユーザに提供できない<sup>[1-33]</sup>. 具体的に, SUI のキーボードで“F”と“J”のキー上に付される凸記号は, タッチパネルのキーボード上では再現することができない. すなわち, ユーザが凸記号を触覚上の手掛かりとしてタッチタイピングを行うことができないという点において, タッチパネルのオンスクリーンキーボードは, SUI のキーボードと同じ操作性を再現することはできない. そのため, デザイナは, 物理的な SUI に対するメタファを適切に利用しつつも, ヒトの身体的特性や心理的特性を踏まえて, タッチパネルに特化した GUI のデザインを施さなければならない.

#### 1.2.4 ISO 9241-9 におけるタッチパネルの設計上の要求事項及び推奨事項

情報社会の進展に伴って変化する労働環境や作業環境, 並びに生活における情報化に対処するべく, マウスやジョイスティック, タッチパネルなどの入力インタフェースに関して, 人間工学的配慮を加えた設計指針及び試験方法に関する国際規格 (以下, IS) が ISO により 2000 年 2 月に制定された (ISO 9241-9: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) – Part9: Requirements for non-keyboard input devices) <sup>[1-34]</sup>. さらに, 我が国では, 2007 年 9 月に ISO 9241-9 の邦訳版である日本工業規格 (以下, JIS) (JIS Z 8519: 人間工学—視覚表示装置を用いるオフィス作業—非キーボードの入力装置の要求事項) が制定され<sup>[1-35]</sup>, 据え置きで使用されるマウスやタッチパネルなどの入力インタフェースについて, 人間工学的要素に基づく設計指針が示されている. 以下では, この ISO 9241-9 (JIS Z 8519) で示されるタッチパネ



ルに関する要求事項及び推奨事項についてまとめる。

まず、ISO 9241-9 (JIS Z 8519) において、タッチパネルは「ディスプレイに指を触れる、ディスプレイから指を離す、又はディスプレイ上で指を動かす操作によって位置及び選択入力信号を発生する入力装置」と定義される。また、“タッチ方式 (Touch strategies)” として、ディスプレイ表面に指が触れたときに入力を検出する方式 (First-contact touch strategy) と、ディスプレイ表面から指が離れたときに入力を検出する方式 (Last-contact touch strategy) の2つの方式が定義されている。タッチパネルの設計に関しては、表 1.2 に示すように、“目標の位置”，“接触感知領域”，“文字寸法及び輝度比”，“自動繰り返し接触機能の開始遅延”，“目標の非作動空間”，“目標への追従”，“静電気”の各項目があり、それぞれについて要求事項及び推奨事項が定められている。

このように、ISO 9241-9 (JIS Z 8519) では、ユーザとタッチパネルとのインタラクションにおいて、ユーザが円滑かつ有効的に端末を使用できるように誘導、支援する上で望ましい設計や評価法が人間工学的知見から規定されている。しかし、これらの規格が制定されてから現在までの間に、タッチパネルはあらゆる分野へと広く普及するようになり、ハードウェアに関連する技術も大きく進歩している。そのため、近年で急速に普及が進んだ携帯端末やタブレット端末については、規定作成のための根拠となる定量的な知見を蓄積していき、新たな設計指針を確立していく必要がある。例えば、スワイプやピンチなどのジェスチャー操作では、ディスプレイに指で直接触れて指先を滑らせるように操作を行うため、ディスプレイの表面性状と操作性との関係に関する定量的な知見に基づいて設計を行う必要もあると考えられる。また、ハードウェアのみならず、GUI として用いられるボタンやアイコンなどのソフトウェア設計についても、ユーザがストレスなく円滑に使用でき、なおかつエラーを軽減させる設計を行うためには、GUI に対するポインティング操作の基礎的な知見を充実させ、設計に反映させていくことが必要不可欠である。

### 1.2.5 タッチパネルの操作性に関する先行研究

タッチパネルに関してはこれまでに多くの先行研究が行われてきており、操作方式<sup>[1-36, 1-37]</sup>や、触覚フィードバック技術<sup>[1-38, 1-39]</sup>、押下感を付加させる機構<sup>[1-40]</sup>の開発研究から、それを使用する際のヒトの行動学的研究<sup>[1-41]</sup>まで様々である。本項では、タッチパネルに関わるハードウェア及びソフトウェアの設計指針を得ることを目的として



表 1.2 ISO 9241-9 におけるタッチパネルの設計に関する要求事項及び推奨事項<sup>[1-34]</sup>Table 1.2 Requirements and recommendations for the design of touch-sensitive screens<sup>[1-34]</sup>

Item	Requirements and recommendations
Target location	Vertically oriented touch-sensitive screens shall allow touch targets to be positioned below shoulder height. Horizontally oriented touch-sensitive screens shall allow touch targets to be positioned at or below elbow height and inside the reach envelope of the intended user population.
Touch-sensitive area	For systems using a first contact touch strategy, the size of the touch-sensitive area should be at least equal to the size of the ninety fifth percentile male distal (digit 2) joint breadth. The touch-sensitive area should be increased if parallax results in a degradation in performance.
Character size and contrast	The area of the screen within the touch-sensitive location shall conform with the relevant requirements of ISO 9241-3, ISO 9241-7, ISO 9241-8 and ISO 13406-2.
Repeat function delay	When a repeat function is provided, there should be an initial delay of from 500 ms to 750 ms to prevent unintended activation.
Inactive space of target	For touch-sensitive screens designed for first-contact touch activation, an inactive space of a width of at least 5 mm should be provided around each touch target.
Target tracking	During a drag operation, the object or pointer being moved should track the finger or stylus, both temporally and spatially.
Static electricity	To avoid or reduce discomfort due to the discharge of static electricity when the user touches the screens, touch-sensitive screens should have an anti-static treatment.

行われた操作性評価に関する先行研究についてまとめる。

まず、タッチパネルが入力インタフェースとして普及し始めた当初は、マウスやキーボードなどの他のデバイスとの比較研究が盛んに行われた。Albert, A.E.<sup>[1-42]</sup>は、ポインティングの速さ、正確性、主観的な操作のし易さを指標として、タッチパネル、ジョイスティック、タブレット、トラックボール、キーボードの各ポインティングデバイスにおける作業成績を比較した。その結果、タッチパネルはポインティングの速さで他のポインティングデバイスに勝るが、正確性では劣ることを明らかにしている。一方、Sears, A.ら<sup>[1-43]</sup>は、タッチパネルとマウスとの操作性について、長方形のボタンをポインティングさせる課題を用いた評価実験を通じて比較を行っている。その結果、サイズの小さいボタン (0.4 mm×0.6 mm) ではタッチパネルのほうが有意にポイ

ンティング時間は長く、エラー率は高いが、それよりも大きいボタンサイズ (1.7 mm × 2.2 mm, 6.9 mm × 9.0 mm, 13.8 mm × 17.9 mm) では、タッチパネルとマウスとの間で有意な差はみられなかったとしている。このことは、タッチパネルの優れた操作性を活かすためには、適切な GUI 設計を行う必要があることを示している。

このような研究成果を踏まえ、タッチパネルが他のポインティングデバイスと比較しても優れた操作性をもつということが一般的になってからは、いかに正確かつ速く操作できるかということに着眼点が置かれ、この要求を満たすためのインタフェースデザインの設計指針を模索する研究が多くなされてきた。Potter, R.L.ら<sup>[1-44]</sup>は、ポインティングの正確性、速さ、主観的な操作のし易さを指標とし、3つのタッチ戦術 (テイクオン戦術、ファーストコンタクト戦術、テイクオフ戦術) における操作性を比較している。その結果、テイクオフ戦術 (ディスプレイに表示させるカーソルの位置を指先で触れた位置の約 0.5 inch だけ上にずらし、指先がディスプレイから離れた時点で決定を行う設計) を採用することで、操作の正確性が向上することを示した。また、黒川ら<sup>[1-26, 1-45]</sup>は、据え置きタッチパネルを対象とし、GUI として用いられるボタンのサイズや形状、ディスプレイ上での表示位置などを指標とした操作性評価実験を行い、ポインティング時間やエラー率に及ぼす影響を調べている。その結果、示指でのポインティング操作について以下に示すような知見を得ている。

- (1) ボタンのサイズは 340 mm<sup>2</sup>以上にするのが望ましい。ちなみに、示指の指先の面積はおよそ 150 mm<sup>2</sup>である。
- (2) 正方形のボタンを採用すべきである。
- (3) 複数のボタンが同時に表示される場合は、ボタン相互の間隔を十分に離して配置すべきである。
- (4) 複数のボタンが同時に表示される場合は、それらをコンパクトな領域内に配置すべきである。しかし、これが (3) と抵触する場合は、ボタン数を減らすことが望ましい。また、ボタンを表示させる領域は、画面中央から右寄りに確保することが望ましい。なお、左利きのユーザもこの領域にあるボタンを右利きのユーザと同程度に速く、かつ正確にポインティングできることが判明している。
- (5) 視覚的に表示されるボタンよりも少し広いタッチ感知領域を設けて、ユーザのタッチ位置をボタン内に誘導すべきである。
- (6) タッチパネルは水平か、それに近い角度に設置することが望ましい。

- (7) 不特定多数のユーザが利用するシステムではテイクオン戦術を採用すべきである。
- (8) ボタンをポインティングした際には、ボタンをハイライト表示するなどの方法でユーザへフィードバックすべきである。特にテイクオフ戦術を採用する場合にはフィードバックは必須である。

据え置きタッチパネルは、ATM や KIOSK 端末などのあらゆる公共情報端末で使用されており、これらの端末に対して示指で行うポインティング操作については多くの先行研究がなされている。上述した知見の他にも、端末の設置角度や高さ<sup>[1-46, 1-47]</sup>、操作する手（利き手と非利き手）<sup>[1-48]</sup>、年齢（若年者と高齢者）<sup>[1-49]</sup>、性別<sup>[1-50]</sup>、手によるディスプレイの遮蔽<sup>[1-51]</sup>、GUI の色彩デザイン<sup>[1-52]</sup>、ボタンのサイズ・形状<sup>[1-53]</sup>、触覚フィードバックの有無<sup>[1-54]</sup>といった因子が操作性に及ぼす影響が調べられてきており、ハードウェアやソフトウェアに関する設計指針が整備されつつある。また、企業においても、ATM のような公共情報端末のユーザビリティに対する関心は高く、身体的特性などに関わらずに使用できるようなユニバーサルデザインに関する取組みも盛んに行われている<sup>[1-55]</sup>。

また、近年では、スマートフォンやタブレット PC などの新たに主流となったデバイスの操作性に関する評価研究が盛んに行われている。スマートフォンなどの携帯端末では、GUI として用いるボタンの適切な設計方法の提案を志向した評価研究<sup>[1-56, 1-57, 1-58]</sup>が多数報告されている。一方、タブレット PC などのタブレット端末では、オンスクリーンキーボードの設計方法に関する評価研究<sup>[1-59]</sup>が数多くなされており、携帯端末とタブレット端末のいずれにおいても、GUI をいかに設計するのかといったことに着目した研究が主流となっている。このように、携帯端末やタブレット端末を対象とした GUI の設計方法に関する研究が数多く行われている背景には、ディスプレイサイズが据え置きの端末と比較して小さく、これまでに蓄積された GUI の設計指針をそのまま適用することが難しいためだと考えられる。

## 1.2.6 タッチパネルの操作性に関する課題

### (1) タッチパネルタブレット端末の操作性に関する課題

これまでに述べてきたように、タッチパネルはスマートフォンやタブレット PC などをはじめとして、その市場を大きく拡大してきた。その中でも、近年、タブレット端末の需要が急成長を示しており、携帯端末と並んで市場を牽引するデバイスである

と言われている。このようなタッチパネルタブレット端末の用途は多岐にわたり、教育現場や医療現場などでも広く活用されている<sup>[1-60]</sup>。特に、教育分野では政府による小学校・中学校・高等学校へのデジタル教科書導入が検討されており<sup>[1-61]</sup>、その動向が注目を浴びている<sup>[1-22]</sup>。

従来、学校教育では ICT やインターネットの導入などが進められてきたが、タッチパネルタブレット端末の登場により、教育の情報化が急速に進みつつある。具体的に、政府は 2020 年に生徒一人につき一台の情報端末とデジタル教科書の普及を目指しており、総務省と文部科学省の両省が連携して学校教育の情報化を推進している<sup>[1-61]</sup>。また、2010 年 7 月には教育関連企業や情報機器メーカー、出版社などの多様な民間企業で構成されるデジタル教科書教材協議会（Association of digital textbook and teaching, 以下 DiTT）が設立され、デジタル教科書・教材の開発や普及を目的とした活動を行っている。なお、DiTT がその発足に際して作成した提言書<sup>[1-62]</sup>では、デジタル教科書・教材が備えるべき条件としてタッチパネルを搭載していることが示されている。また、森本<sup>[1-63]</sup>は、ユーザの操作に対する心理的負担が軽減されるとの観点から、直感的な操作が可能なタッチパネルを教育現場に応用させることは大きな影響力をもつと述べている。

このように、教育分野への応用が注目を浴びるタッチパネルタブレット端末であるが、操作性に関する問題が懸念されている。その一つに、指先でディスプレイをなぞって操作する際に、指先の滑り易さが操作性に影響を及ぼすといった問題が指摘されている。これについて、澤田ら<sup>[1-64]</sup>は、幼児教育で用いるタッチパネル用ソフトウェアの試作を通して、指先の滑り易さが操作性に影響を及ぼす可能性があることを報告している。このような問題は“触る”という行為がインタフェースとしての役割を担うタッチパネル特有の問題であるが、ディスプレイ表面における指先の滑り易さと操作性の関係に関する定量的なデータは示されていない。また、タブレット端末はディスプレイサイズが携帯端末などと比較して大きく、操作に伴う指先の移動量も多いために、指先の滑り易さによる問題が顕在化し易いと考えられる。さらに、指先の滑り易い表面特性をもつディスプレイ保護フィルム<sup>[1-65]</sup>も市販されているが、指先の滑り易さに関する評価は経験則や主観的な判断に基づくものであるため、設計の際に参考となる定量的なヒトの操作特性データが求められている。それ故、ディスプレイ表面における指先の滑り易さがタッチパネルタブレット端末の操作性に及ぼす影響を評価することで、タッチパネルディスプレイやディスプレイ保護フィルムの表面設計に際

して参考となるデータが得られるとともに、指先の滑り易さに配慮したソフトウェアの設計指針を示すことができると考えられる。1.2.5 項で述べた通り、これまでもタッチパネルの操作性に関する研究は数多くなされてきた。しかし、ディスプレイの表面特性と指先の滑り易さの関係に着目し、操作性を評価した研究はこれまでに行われていない。

そこで本研究では、タッチパネルタブレット端末に関する研究課題として、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を評価することで、タッチパネルディスプレイやディスプレイ保護フィルムの表面設計に際して参考となる基礎的知見を獲得することとした（第2章）。

## (2) タッチパネル携帯端末の操作性に関する課題

近年で急速に普及した投影型静電容量方式のタッチパネルでは、1.2.1 項で述べたようなジェスチャー操作を活用することで小さなディスプレイ上に様々な機能を集約させることができ、操作力をほとんど必要としない。そのため、スマートフォンや PMP など多くの携帯端末に急速な普及を遂げており、2011 年には出荷枚数で約 70% の搭載デバイス別市場シェアをスマートフォンだけで占めるといった状況である<sup>[1-17]</sup>。

タッチパネルの特長の一つに、GUI をソフトウェアで自由に設計できる点があげられる。それ故、1.2.5 項でも述べた通り、タッチパネル携帯端末の操作性向上を指向した研究がこれまでも多くなされてきており、タッチパネルで用いられる GUI の設計指針は徐々に整備されつつある。しかしながら、依然としてオブジェクトを誤操作する問題が存在しており<sup>[1-66]</sup>、タッチパネルの操作性向上を目指す上で重要な課題となっている。具体的には、Web 閲覧画面におけるテキストリンクやオンスクリーンキーボードにおける小さなサイズのボタンに対して、点ではなくある面積をもつヒトの指先では意図した位置をポインティングすることが困難であるといった問題であり、これは *Fat finger* 問題<sup>[1-67]</sup>とも呼ばれている。この問題に対する解決法の一つとして、ヒトの指先でも正確にポインティングできるようにするために、ユーザのポインティング特性に基づいた GUI 設計を行うことが有効であると考えられる。そのためには、タッチパネル携帯端末を対象としたヒトのポインティング特性に関する基礎的知見の充実が必要不可欠であり、得られた知見を GUI 設計に反映させていくことが重要である。

従来、携帯端末を対象としてポインティング特性を調べた研究は数多くなされてき



たが、次に述べる点において、その知見は十分とは言えない。まず、携帯端末使用時に頻見される片手操作では、筐体を保持した手の母指のみで操作を行うために母指の運動が制限され、小さなディスプレイでもオブジェクトが表示される位置によって操作時の手指の姿勢やパフォーマンスは異なる可能性がある。そのため、ディスプレイをいくつかのエリアに細かく区分し、エリアごとのポインティング特性を評価する必要があると考えられるが、そのようなアプローチからの従来研究は少ない。さらに、従来研究では片手操作を対象としたものが多数を占めているが、Karlson ら<sup>[1-68]</sup>が行った携帯端末の操作方法に関する調査によれば、タッチパネル携帯端末の操作方法には片手操作と両手操作（片手で筐体を保持し、もう一方の手の示指で操作する方法）があり、そのどちらも広く利用されている。そのため、両手操作におけるポインティング特性の評価も行い、片手操作と比較することで、タッチパネル携帯端末の実利用場面に基づく知見を示す必要がある。加えて、従来研究ではディスプレイに表示されるボタンに対してポインティング時間やエラー率などを指標として評価を行ったものが多数であるが、端末側で検出されるポインティング位置の分布傾向などを解析した研究は少ない。

そこで本研究では、タッチパネル携帯端末に関する研究課題として、片手操作及び両手操作におけるポインティング特性を評価するとともに、得られたポインティング特性に基づく効率的な GUI 設計手法について基礎的検討を行うこととした（第3章及び第4章）。

なお、本研究では、ポインティング特性の基礎的知見に基づく GUI の設計手法の一例として、タッチ感知領域（Touch-sensitive area<sup>[1-34]</sup>）を考える。タッチ感知領域とは、視覚的に表示されるボタンやアイコンなどに対して、それらがポインティングされたと端末側で判定されるディスプレイ上の領域を指す。タッチ感知領域の設計手法に関する従来研究はこれまでも多数行われてきているが、その多くはタブレット端末などで使用されるオンスクリーンキーボードを対象としたものである。しかし、タブレット端末よりも筐体のサイズが小さく、操作方法も異なると考えられる携帯端末について、タッチ感知領域の設計に反映させるための基礎的知見が不足しているといった現状がある。そのため、タッチパネル携帯端末については、ポインティング特性を考慮したタッチ感知領域の設計手法について、基礎的検討がほとんど行われていない。

### 1.3 本研究の目的

これまでに述べてきたように、間接的な操作要素がなく直感的に操作できるタッチパネルは多岐にわたる分野で入力インタフェースとして急速に普及している。ハードウェアの技術進歩も目覚ましく、教育や医療分野での活用が注目を浴びる一方で、その操作性に関する課題が指摘されている。そして、これらの課題を改善するためには、タッチパネル端末の設計に関わる技術者や GUI のデザイナーが、ユーザにとって使いやすい設計を施す上で必要となるヒトの操作特性に関する基礎的知見の獲得が必要不可欠である。

そこで本研究では、タッチパネルの操作性向上に向け、以下に述べる 2 つの研究課題を通して、ヒトの操作特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした。

- (1) 第 1 の研究課題では、デジタル教科書として教育分野での活用に注目が集まるタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を実験により定量的に評価する。この実験の詳細については、本論文の第 2 章に記述する。
- (2) 第 2 の研究課題では、搭載デバイス別の市場で最も大きなシェアを占める携帯端末について、GUI の設計指針に供するヒトのポインティング特性を実験により評価するとともに、得られた知見を用いて GUI の設計手法に関する基礎的検討を行う。この実験の詳細については、本論文の第 3 章に記述する。

### 1.4 本論文の構成

本論文は、全 4 章で構成される。本論文の流れを以下に示す（図 1.31 参照）。

第 1 章では、本研究の背景と目的、タッチパネルの操作性に関する基礎的知見、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、デジタル教科書として教育分野での活用が期待されているタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を実験により評価する。本実験では、指先の滑り易さが異なるディスプレイ表面を再現するために、まず指先の滑り易さが主観的に異なるフィルムを選定する。次



に、指先の滑り易さを算術平均粗さ及び動摩擦係数により定量的に評価する。そして、選定したフィルムを用いてタブレット端末の操作性評価実験を行うことで、ディスプレイ表面の指先の滑り易さが操作性に及ぼす影響を明らかにする。

第3章では、搭載デバイス別の市場シェアで最も高い割合を占める携帯端末について、GUIの設計指針に資する操作特性の基礎的知見を得ることを目指し、ポインティング特性を実験により評価する。本実験では、片手操作及び両手操作の双方の操作方法に着目し、それぞれの操作方法におけるポインティング位置の分布、ポインティングの精度及び速さを指標とした評価を行うことで、ポインティング特性を明らかにする。さらに、得られたポインティング位置の分布傾向に基づき、楕円によるタッチ感知領域の設計手法について検討及び評価を行う。

第4章では、第2章及び第3章で得られた研究成果を統括し、本研究によって得られた知見と意義についてまとめるとともに、今後の展望について論ずる。

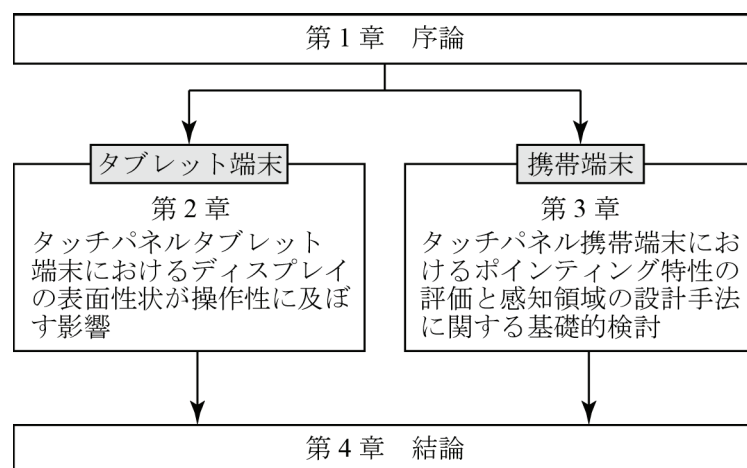


図 1.31 本論文の構成

Fig.1.31 Configuration of this thesis

## 第2章

### タッチパネルタブレット端末における ディスプレイの表面性状が操作性に及ぼす影響

- 2.1 目的
- 2.2 フィルムの選定
- 2.3 タッチパネルタブレット端末の操作性評価
- 2.4 考察
- 2.5 小括

#### 概要

第2章では、第1章で述べたタッチパネルタブレット端末に関する課題に対して、その課題を改善するための基礎的知見を得ることを目的として実施した実験について述べる。具体的には、デジタル教科書に代表されるように、教育分野での活用が注目を浴びているタブレット端末において、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さと操作性の関係を明らかにすることを目的とした研究課題である。

本実験では、まず、指先の滑り易さが異なるディスプレイ表面を再現するため、定量的に指先の滑り易さが異なるディスプレイ保護フィルムの選定を行った。そして、選定したフィルムを用いてタッチパネルタブレット端末の操作性評価実験を実施し、ディスプレイの表面特性と操作性の関係を評価した。その結果、フィルム表面の算術平均粗さが大きいほど動摩擦係数は小さくなり、反射防止性能をもつアンチグレアフィルムの動摩擦係数は、耐擦傷性能をもつハードコートフィルムのおよそ3分の1であることがわかった。さらに、曲線をトレースする操作では適切な範囲の摩擦抵抗を表面に施すことによって操作の正確性が向上し、斜線や直線をトレースする操作や指先の止め・方向転換を伴う操作では表面の摩擦抵抗を大きくすることで操作の正確性は向上することが明らかになった。

## 2.1 目的

本章では、タッチパネルタブレット端末のディスプレイの表面性状と指先の滑り易さの関係を調べるとともに、表面性状が操作性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、まず、指先の滑り易さが異なるディスプレイ表面を再現するため、定量的に指先の滑り易さが異なるディスプレイ保護フィルムの選定を行った。そして、選定したフィルムを用いてタッチパネルタブレット端末の操作性評価実験を実施し、ディスプレイの表面性状と操作性の関係を評価した。

## 2.2 フィルムの選定

本節では、フィルムによる指先の滑り易さを定量的に評価することで、タッチパネルタブレット端末の操作性評価実験に用いるフィルムの選定を行った。具体的には、まず、フィルムメーカーの協力を得て主観的に指先の滑り易さが異なるいくつかのフィルムから評価対象とするフィルムを選定した。そして、選定したフィルムについて指先の滑り易さを定量的に評価し、次節で詳述する操作性評価実験において実験因子として用いることとした。

### 2.2.1 指先の滑り易さの評価対象フィルム

フィルムメーカーの協力を得て、ディスプレイ表面よりも主観的に指先が滑り易いものから滑り難いものまでを含む4種類のフィルムを用意した。具体的には、表面に塗布するコーティング剤に微少な粒子を分散させることで表面に凹凸形状を形成し、反射防止性能をもたせたアンチグレアフィルム（以下、AGフィルム）を2種類用意し、それぞれフィルムA（パナック社製 パナプロテクト PX125AH2）、フィルムB（パナック社製 パナプロテクト PX100AH4）とした。また、シリコン系樹脂を表面にコーティングすることで離型処理を施した離型フィルムをフィルムC（パナック社製 サンプル）として採用した。そして、UV硬化系アクリル樹脂を表面にコーティングすることで耐擦傷性能をもたせたハードコートフィルム（以下、HCフィルム）を用意し、フィルムD（きもと社製 KBフィルム G01）とした。以上の指先の滑り易さが主観的に異なる4種類のフィルムを評価対象フィルムとして採用した。

本実験では、指先の滑り易さを評価する指標としてフィルムの算術平均粗さ<sup>[2-1]</sup>及

び動摩擦係数の2つの指標を採用した。算術平均粗さを評価指標に採用した理由は、フィルム表面の粗さによって指先の皮膚との密着度が変化し、指先の滑り易さに影響を及ぼすと考えたためである。つまり、フィルム表面の算術平均粗さが小さく平滑であると、指先での精神性発汗などによって隆線（皮膚小稜）にある汗口が吸盤の役割を果たし指先が滑り難くなると考えられるためである<sup>[2-2]</sup>。動摩擦係数を評価指標として採用した理由は、指先を滑らせながらタッチパネルを操作する場面を想定し、動的に摩擦抵抗を評価できる指標であると判断したためである。これらの関係を調べつつ、選定したフィルムについて指先の滑り易さを定量的に評価することとした。

### 2.2.2 算術平均粗さの測定方法及び測定結果

算術平均粗さの測定には非接触表面性状測定装置（三鷹光器社製 PF-60）を用いた。測定範囲を縦 1000  $\mu\text{m}$ ×横 1000  $\mu\text{m}$ 、測定軸を横方向とし、縦 10  $\mu\text{m}$  間隔でフィルム表面の算術平均粗さを測定した。そして、測定軸方向の測定値から無作為に 5 箇所 の値を抽出し、それらの平均を算術平均粗さの評価値とした。

図 2.1 に算術平均粗さの測定結果を示す。フィルムを要因とした分散分析の結果、フィルムによる主効果が認められた [ $F(3, 12) = 1125.04, p < 0.001$ ]。また、Bonferroni 補正法による多重比較で水準間の有意差を調べた結果、各フィルム間で有意な差がみられた。具体的には、フィルム A, B, C, D の順で算術平均粗さの値は有意に小さくなり、AG フィルムのフィルム A で最も大きく、HC フィルムのフィルム D で最も小さくなることがわかった。

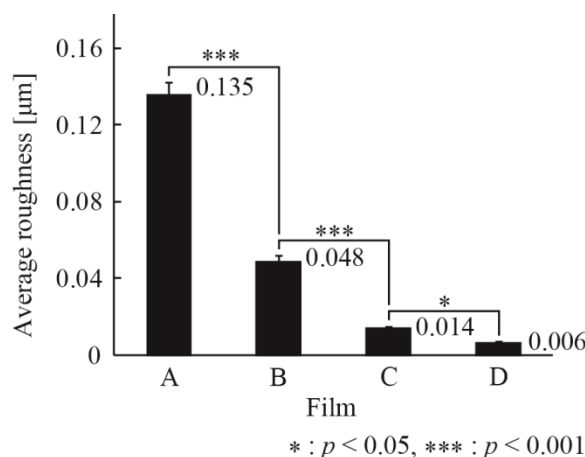


図 2.1 算術平均粗さの測定結果

Fig.2.1 Results of the average roughness

### 2.2.3 動摩擦係数の算出方法及び算出結果

#### (1) 動摩擦係数の算出方法

一般的に2つの物体間での摩擦特性は式(2.1)のAmontons-Coulombの摩擦法則に従うことが知られている。

$$F = \mu' \cdot N \quad (2.1)$$

ここで $F$  [N] は動摩擦力、 $\mu'$  は動摩擦係数、 $N$  [N] は垂直抗力である。動摩擦力 $F$ と垂直抗力 $N$ を計測することで、式(2.1)より動摩擦係数 $\mu'$ を算出することができる。そこで、3分力ロードセル(共和電業社製 LSM-B-50NSA1, 定格容量 50 N)を用いてフィルム上で指先を滑らせた際の動摩擦力 $F$ 及び垂直抗力 $N$ を計測し、得られたデータから動摩擦係数を算出することとした。具体的には、評価対象フィルムを貼り付けたアクリルプレートの下に3分力ロードセルを取り付け、フィルム上で指先を滑らせた際の動摩擦力(指先を滑らせる方向にかかる力)と垂直抗力(指先でフィルムを押しつける力)をそれぞれサンプリング周波数 1kHz で計測した。なお、計測時の指先の速さと垂直抗力は、あらかじめ数名の参加者に自然にタッチパネルを操作させた際の値を参考に、それぞれ 50 mm/s, 1.0 N とした。

計測は、フィルム上に 50 mm 間隔の目印をつけ、60BPM (Beats per minute) に設定した電子メトロノームの拍節に合わせて参加者にフィルム上で利き手人差し指の指先を滑らせた。なお、事前にタッチパネル操作を観察した際、いずれの参加者も指腹ではなく指先(指尖部)を使って操作を行っていたため、ここでは指先のみをフィルムに接触させて指を滑らせるよう教示した。また、実際のタッチパネル操作ではあらゆる方向に指先を滑らせて操作を行う。そのため、フィルムに対して指幹軸方向を前方向、それに対して直角の方向を横方向とし、前後左右の4方向についてそれぞれ3試行ずつ計測した。ゆえに、試行数は合計で48試行(フィルム4条件×摩擦方向4条件×各条件3試行ずつ実施)であった。計測に要した時間は約1時間であった。

実験参加者数は、個体差や予備実験での計測値に顕著な差が認められなかったことから、成人男女3名(男性2名、女性1名)とした。平均年齢は23.0歳(標準偏差2.0歳)であり、いずれの参加者も指先の皮膚に外傷や関連既往症はみられなかった。また、指先の発汗や皮脂の実験条件を統制するため、各試行前にはエタノールで指先をよく拭き、自然乾燥させた直後に計測を行った。なお、本実験は早稲田大学の人を対

象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て行った。また、参加者には事前に内容を説明し、インフォームドコンセントを得て計測を行った。

## (2) 動摩擦係数の算出結果及び考察

動摩擦力及び垂直抗力の計測事例（フィルム A）を図 2.2 に示す。計測データのうち、垂直抗力がほぼ 1.0 N で安定して動摩擦が生じている 0.5 s 間を解析区間として動摩擦力  $F$  と垂直抗力  $N$  の平均値を求め、式 (2.1) より動摩擦係数  $\mu'$  を算出した。

図 2.3 に動摩擦係数の算出結果を示す。フィルムを要因とした分散分析の結果、フ

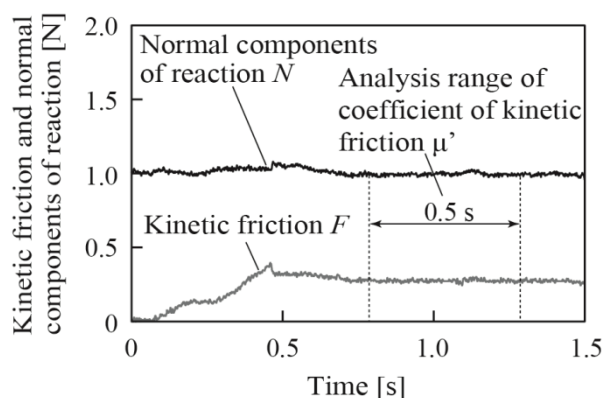


図 2.2 フィルム A における摩擦力及び垂直抗力の計測事例と動摩擦係数算出区間

Fig.2.2 Measurement example of kinetic friction and normal components of reaction and analysis range of coefficient of kinetic friction in film A

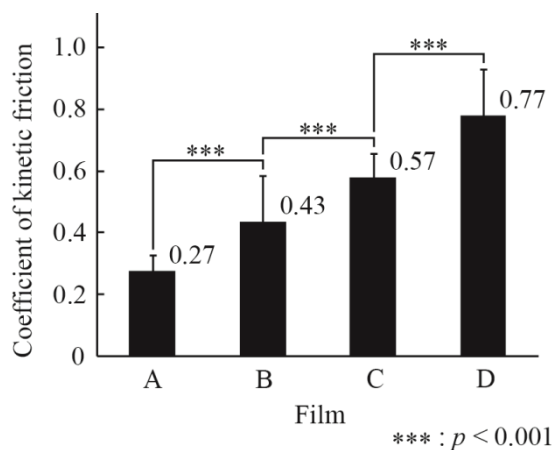


図 2.3 動摩擦係数の算出結果

Fig.2.3 Results of the coefficient of kinetic friction



フィルムの主効果が認められた [ $F(3, 140) = 92.77, p < 0.001$ ] . また, Bonferroni 補正法を用いた多重比較の結果, 各フィルム間で有意差がみられた (いずれも  $p < 0.001$ ) . 具体的には, フィルム A, B, C, D の順で動摩擦係数の値は有意に大きくなり, AG フィルムのフィルム A で最も小さく, 値が最も大きかったフィルム D のおよそ 3 分の 1 であることがわかった.

図 2.1 に示した算術平均粗さの測定結果と比較してみると, 算術平均粗さの減少に伴って動摩擦係数は増加することがわかる. これについて, 算術平均粗さの値が小さく表面が平滑であると, 先述の通り指先の指紋をなす隆線 (皮膚小稜) にある汗口が吸盤作用を起こすことによって指先が滑り難くなり, 動摩擦係数の値も大きくなったと考えられる.

笹田ら<sup>[2-3]</sup>の報告によれば, 指腹の摩擦には異方性が存在し, これらは渦状紋や弓状紋といった指紋の形式に影響を受ける. 具体的には, 摩擦方向が指紋をなす隆線 (皮膚小稜) と同一の場合は皮膚小稜自体の変形が小さく, 皮膚小稜上に配列された汗口の吸盤作用が破綻し難いために, 高い動摩擦係数を示すとある. このことを踏まえ, 本実験においても異方性の影響を考慮し, 得られた動摩擦係数の結果に対して摩擦方向を要因とした分散分析を行ったが, 摩擦方向の主効果は認められなかった. これについては, 指とフィルムの接触角度が影響を及ぼしていた可能性が考えられる. 嶋脇ら<sup>[2-4]</sup>は, 触対象物 (アクリル板) と指先がなす角度 ( $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ) を要因として指幹軸方向に指先を滑らせた際の動摩擦係数を計測している. その結果, 接触角度の増加に伴って動摩擦係数は減少する傾向がみられている. これについて, 接触角度が大きくなると, 触対象物と指の接触面積及び皮膚と末梢骨の距離が減少し, 皮下の軟組織が受ける圧縮応力が大きくなることで指先が硬化したためだと考察している. 硬い物体のせん断強さが一般的に低いことも, この考察を支持している. 一方, 本実験ではフィルムに指先 (指尖部) のみを接触させるよう教示を行っている. そのため, 上述のような過程で指先が硬化し, 動摩擦係数が減少することで, 汗口による吸盤作用が摩擦方向による動摩擦係数の違いにまで影響を及ぼさなかったために, 笹田ら<sup>[2-3]</sup>が指腹で報告しているような摩擦の異方性がみられなかった可能性は考えられる.

以上より, 本実験で用意した 4 種類のフィルムについて定量的にも指先の滑り易さは異なることが明らかになった.



## 2.3 タッチパネルタブレット端末の操作性評価

本節では、前節で選定したフィルムを用いて、タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面性状と操作性の関係を評価した実験について述べる。

### 2.3.1 実験参加者

本実験では、日常的にタッチパネルが搭載された端末を使用しており指先でのタッチパネル入力操作に慣れている成人男女 12 名（男性 9 名，女性 3 名）に実験参加の協力を得た。平均年齢は 21.4 歳（標準偏差 2.3 歳）であり，いずれの参加者も指先の皮膚や上肢の運動機能に異常や関連既往症はみられなかった。また，ディスプレイ上に表示される情報を認識するのに十分な視力（矯正含む）を有していた。なお，本実験の参加者 12 名には，2.2.3 項で述べた動摩擦係数算出のための計測実験に参加した者は含まれていない。また，本実験は早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て行った。さらに，参加者に対して実験内容を事前に説明し，インフォームドコンセントを得た上で実験を開始した。

### 2.3.2 実験課題

実験課題として，ポインティングデバイスに対する人間工学的要求を規定した ISO9241-9<sup>[2-5]</sup>で示される効率及び有効性の試験を参考に，図 2.4 に示す単純な幾何学図形を利き手人差し指の指先でトレースするアプリケーションを作成し，投影型静電容量方式のタッチパネルタブレット端末（Apple 社製 iPad 2）上で動作させた。なお，投影型静電容量方式は現在最もシェアが高く<sup>[2-6]</sup>，一般的に使用されている方式であることから，本実験において実験装置として採用した。ディスプレイのサイズは

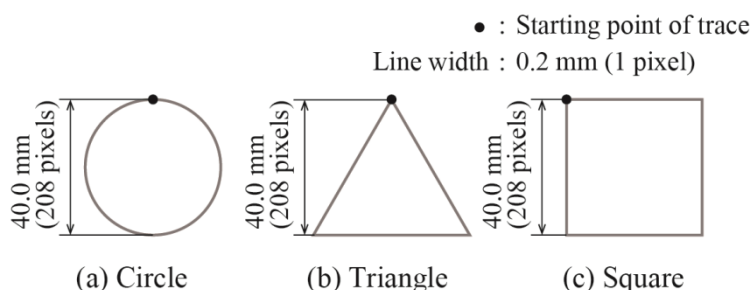


図 2.4 評価実験に用いた幾何学図形

Fig.2.4 Geometric configuration used in the experiment

1024 pixels×768 pixels (9.7 inch) , 解像度は 132 ppi (pixels per inch) であった.

アプリケーションの操作手順を述べる. まず, 図 2.4 に示す正円, 正三角形, 正方形の幾何学図形のうち 1 つがランダムにディスプレイ上に表示される. 次に, 参加者は任意のタイミングで図 2.4 中のドットで示す各幾何学図形の始点から左回りに 3 周トレースし, その後速やかに指先をタッチパネルから離す. この間, アプリケーション内で操作中のタッチ座標 (トレースの軌跡) をサンプリング周波数 100 Hz で記録した. なお, トレースの向きは左回りと教示したが, 本実験に先駆けて行った成人男女 5 名を対象とした予備実験においては, トレースの向きによる結果への影響はほとんどみられなかった. ディスプレイに表示させる正円, 正三角形, 正方形のそれぞれの幾何学図形は, 図 2.4 に示す通り, 高さ 40.0 mm (208 pixels) , 線幅 0.2 mm (1 pixel) とし, 線の色は灰色 (R, G, B = 128, 128, 128) で表示させた. 幾何学図形の高さ (40 mm) に関しては, 予備実験の結果を参考とし, 課題の難易度による結果への影響が可能な限り小さくなるよう配慮して決定した. なお, これら 3 つの幾何学図形を採用した理由について, 正円は曲線, 正三角形は斜線・鋭角をなす折線, 正方形は直線・直角をなす折線をトレースする各動作成分に分解できるためである. タッチパネルタブレット端末における指先での書字<sup>[2-7]</sup>やドラッグ操作では, 指先をディスプレイに接触させた状態であらゆる方向に直線や斜線, 曲線, 折線を描きながら指先を滑らせる. そのため, これらの動作成分を含む 3 つの幾何学図形を用いて評価を行うことで, 指先の滑り易さと操作性の関係に関する基礎的なデータを獲得できると考えられる. また, ディスプレイ上を指先でトレースした軌跡を線幅 0.2 mm (1 pixel) の黒 (R, G, B = 0, 0, 0) の線で表示させ, 視覚による操作のフィードバックを与えた. このフィードバックの線幅に関しては, 提示された幾何学図形とトレースした軌跡とのズレを参加者に対して明確に示すため, 可能な限り幅の狭い線となるように設計した. 背面色は, 白 (R, G, B = 255, 255, 255) とした. なお, 上述した幾何学図形の高さや線幅などの寸法 [mm] はディスプレイ上での目標値を表しており, 実際の寸法はピクセルのサイズに依存する.

### 2.3.3 手続き

参加者は高さの調整が可能な椅子に座り, 肘を机上にのせた姿勢で利き手の人差し指を使い操作を行った. 実験で用いたタッチパネルタブレット端末は, 机に対して水平な角度で固定した. 試行数については, 合計で 36 試行 (フィルム 4 条件×幾何学

図形3条件×各条件3試行ずつ実施)を行った。なお、指先の発汗や皮脂による実験条件を統制するため、各試行前にはエタノールで指先をよく拭き、自然乾燥させた直後に操作を開始させた。また、採用した2つの実験因子について順序効果の影響を排除するため、参加者間でカウンターバランスをとった。さらに、参加者に実験の手続きと課題に慣れてもらうため、本試行に入る前に十分な練習試行を行った。実験は適宜休憩を取りながら行い、実験時間はいずれの参加者においても約2時間であった。

### 2.3.4 評価指標及びその解析方法

本実験では“ズレ量”と“速さ”を操作性の評価指標として採用し、いかに正確かつ速く実験課題を遂行できるのかを評価することとした。具体的に、ズレ量は、図2.5に示す各解析区間において、トレースした軌跡とディスプレイに表示させた幾何学図形のズレの値を用いて評価を行った。詳細な解析方法は、以下で述べる。速さは、100 Hzでサンプリングしたトレースの軌跡を基に、図2.5に示す各解析区間におけるトレースの速さの平均値を求めた。具体的な解析方法は2.3.4(6)で後述する。

#### (1) 正円での曲線におけるズレ量の算出方法

正円を構成する曲線(図2.5(a)参照)について、時刻 $t_i$ におけるタッチ座標( $x_i$ ,

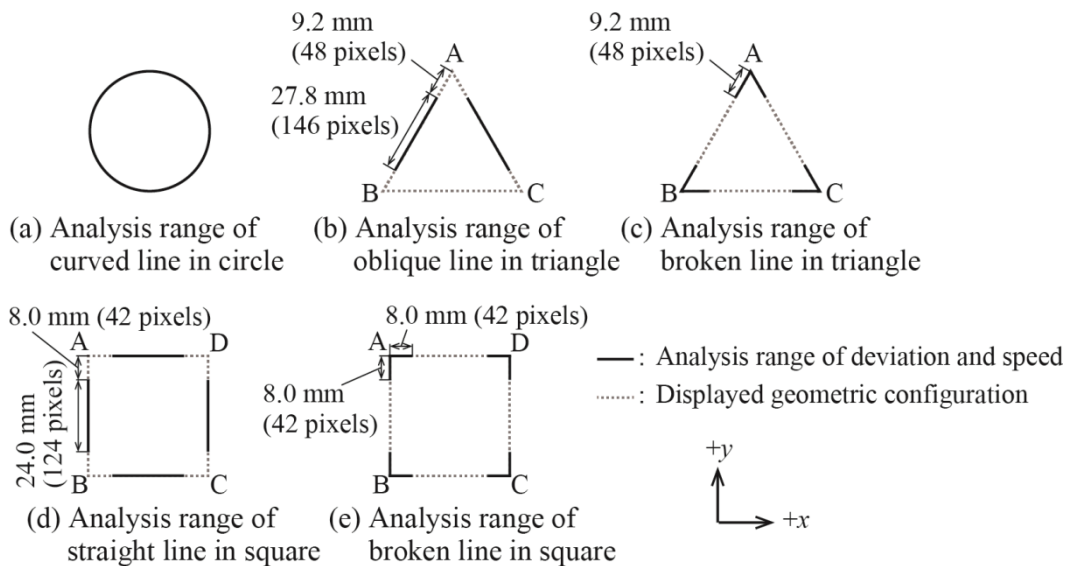


図2.5 各幾何学図形におけるズレ量及び速さの解析区間

Fig.2.5 Analysis range of deviation and speed in each geometric configuration

$y_i$ ) と正円の中心座標  $(x_0, y_0)$  との距離を  $d_i$ , 正円の半径を  $r$  とし, ズレ量  $G$  を式 (2.2) より算出した.

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - r| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r \right| \quad (2.2)$$

式 (2.2) からトレースした軌跡と曲線のズレの平均値を求めることにより, いか  
に正確に曲線をトレースできるのかを評価した.

### (2) 正三角形での斜線におけるズレ量の算出方法

正三角形を構成する斜線 (図 2.5 (b) 参照) では, 時刻  $t_i$  におけるタッチ座標  $(x_i, y_i)$  と一次関数で表される斜線との距離を  $d_i$  とし, 式 (2.3) からズレ量  $G$  を算出した.

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|ax_i + by_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \quad (2.3)$$

式 (2.3) からトレースの軌跡と斜線のズレの平均値を算出することで, いか  
に正確に斜線をトレースできるのかを評価した.

### (3) 正方形での直線におけるズレ量の算出方法

正方形を構成する直線 (図 2.5 (d) 参照) において, 時刻  $t_i$  におけるタッチ座標の  $x$  軸成分を  $x_i$ , そこから直線に下した垂線の足の  $x$  座標を, 足の長さを  $d_i$  とし, ズレ量  $G$  を式 (2.4) から算出した.

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x'_i| \quad (2.4)$$

なお, 式 (2.4) は図 2.5 (d) の辺 AB, CD におけるズレ量の算出式を示しており,  
辺 BC, DA におけるズレ量についても得られたタッチ座標の  $y$  軸成分を用いて同様に  
算出した.

このように、トレースの軌跡と直線のズレを求めることによって、いかに正確に直線をトレースできるのかを評価した。

#### (4) 正三角形及び正方形での折線におけるズレ量の算出方法

正三角形及び正方形の折線におけるズレ量の算出方法を述べる。ここでは、いかに正確に折線をトレースできるのかを評価するため、頂点を曲がる際のタッチ座標に着目し、そこから頂点までの距離を評価指標として用いることとした。まず、図 2.5 (c) に示す正三角形の解析区間において、頂点 B を例にズレ量の算出方法を述べる。時刻  $t_i$  におけるタッチ座標が  $(x_i, y_i)$  であるとき、 $(x_{i+1} - x_i) > 0$  を初めて満たす座標  $(x_i, y_i)$  を頂点に対応するトレース軌跡上の座標とみなし、これと頂点 B  $(x_0, y_0)$  との距離を  $d_i$  として式 (2.5) よりズレ量  $G$  を求めた。

$$G = d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (2.5)$$

また、図 2.5 (e) で示した正方形の解析区間において、頂点 B を例にズレ量の算出方法を述べる。時刻  $t_i$  におけるタッチ座標を  $(x_i, y_i)$  としたとき、 $|x_{i+1} - x_i| > |y_{i+1} - y_i|$  かつ  $|x_{i+2} - x_{i+1}| \geq |y_{i+2} - y_{i+1}|$  を初めて満たす座標  $(x_i, y_i)$  を頂点に対応するトレース軌跡上の座標とし、これと頂点 B  $(x_0, y_0)$  との距離を  $d_i$  として式 (2.5) からズレ量  $G$  を求めた。

#### (5) 正三角形及び正方形でのトレースの終点におけるズレ量の算出方法

タッチパネルタブレット端末における指先での書字<sup>[2-7]</sup>やドラッグ操作では、任意の位置で指先が止められることも操作性の観点から重要である。そこで、正三角形と正方形それぞれのトレースの終点において、トレースを終了する際のタッチ座標、すなわち指先をディスプレイから離す瞬間の座標に着目し、トレースの終点に該当する頂点までの距離を求め、評価指標として採用した。なお、正三角形及び正方形のトレースの終点は、図 2.5 に示した各幾何学図形の頂点 A に該当する。また、正円ではトレースの終点が視覚的に不明瞭であったため、ここでは評価対象から除外した。

#### (6) 速さの算出方法

サンプリング周波数 100 Hz で記録したタッチ座標を利用し、図 2.5 (a) , (b) ,

(d) で示した各解析区間においてトレースの平均速さ $v$ を求めた。具体的には、時刻 $t_i$ におけるタッチ座標が $(x_i, y_i)$ であるとき、0.01 s後の時刻 $t_{i+1}$ で $(x_{i+1}, y_{i+1})$ まで移動する速さを $v_i$ とし、式(2.6)より $v$ を求めた。

$$v = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} v_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{\Delta t} \right] \quad (2.6)$$

ここで、 $\Delta t$ はサンプリング周期の0.01 sである。

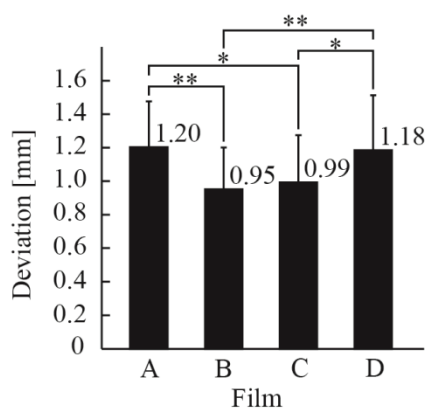
### 2.3.5 結果

前項で述べた各評価指標の結果について、フィルムを要因とした分散分析を行った。フィルムの主効果が有意であった場合には、Bonferroni 補正法による多重比較を行い、水準間の有意差を検定した。

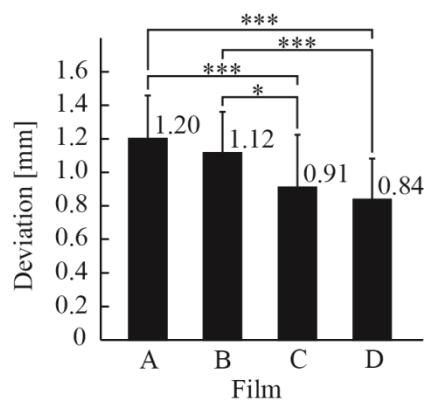
#### (1) 曲線・斜線・直線におけるズレ量の結果

図 2.6 (a) に示した正円における曲線でのズレ量について、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 7.91, p < 0.001$ ]。多重比較の結果、フィルム B, C では、フィルム A, D に対してズレ量は有意に減少することがわかった。図 2.6 (b) に示した正三角形での斜線におけるズレ量について、フィルムの主効果が認められた [ $F(3, 33) = 14.75, p < 0.001$ ]。水準間の有意差を調べた結果、フィルム C では、フィルム A, B に対してズレ量は有意に減少することがわかった (それぞれ  $p < 0.001, p < 0.05$ )。また、フィルム D では、フィルム A, B と比較してズレ量は有意に小さくなることがわかった ( $p < 0.001$ )。図 2.6 (c) の正方形における直線でのズレ量について、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 8.89, p < 0.001$ ]。水準間の有意差を調べた結果、フィルム C では、フィルム A, B に対してズレ量は有意に減少することがわかった (それぞれ  $p < 0.001, p < 0.05$ )。さらに、フィルム D では、フィルム A に対してズレ量が有意に小さかった ( $p < 0.01$ )。

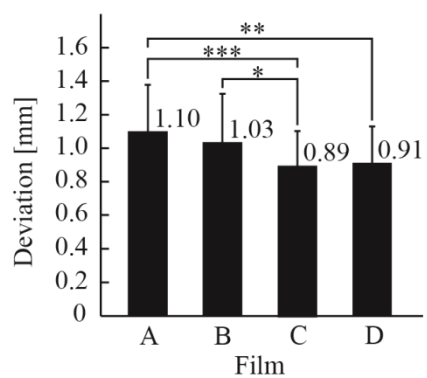
以上の結果より、曲線では、動摩擦係数の値が最も小さいフィルム A と最も大きいフィルム D と比較して、その中間の動摩擦係数を有するフィルム B, C でズレ量は減少することがわかった。他方、斜線及び直線では、動摩擦係数の大きいフィルム C, D でズレ量は減少することがわかった。



(a) Curved line (Circle)



(b) Oblique line (Triangle)



(c) Straight line (Square)

\* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$ , \*\*\* :  $p < 0.001$

図 2.6 曲線・斜線・直線におけるズレ量の結果

Fig.2.6 Results of the deviation in curved line, oblique line, and straight line



### (2) 折線におけるズレ量の結果

図 2.7 (a) に示した正三角形での鋭角をなす折線のズレ量について、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 4.44, p < 0.01$ ] . 水準間の有意差を調べた結果、フィルム D ではフィルム B に対してズレ量は有意に減少することがわかった ( $p < 0.05$ ) . 図 2.7 (b) に示した正方形での直角をなす折線のズレ量について、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 11.45, p < 0.001$ ] . 多重比較の結果、フィルム C では、フィルム A, B よりもズレ量が有意に減少した (それぞれ  $p < 0.001, p < 0.05$ ) . また、フィルム D では、フィルム A, B よりもズレ量が有意に小さかった (それぞれ  $p < 0.001, p < 0.01$ ) .

以上の結果をまとめると、鋭角をなす折線と直角をなす折線の双方においてフィルムの影響がみられ、全体的な傾向として、動摩擦係数の値が大きいフィルムでは、小さいフィルムよりもズレ量は減少することがわかった.

### (3) トレースの終点におけるズレ量の結果

図 2.8 (a) に示した正三角形のトレースの終点におけるズレ量について、フィルムの主効果は認められなかった. 図 2.8 (b) に示した正方形のトレースの終点におけるズレ量については、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 7.25, p < 0.001$ ] . 多重比較の結果、フィルム C では、フィルム B よりもズレ量は有意に小さかった ( $p < 0.01$ ) . また、フィルム D では、フィルム A, B と比較してズレ量は有意に減少す

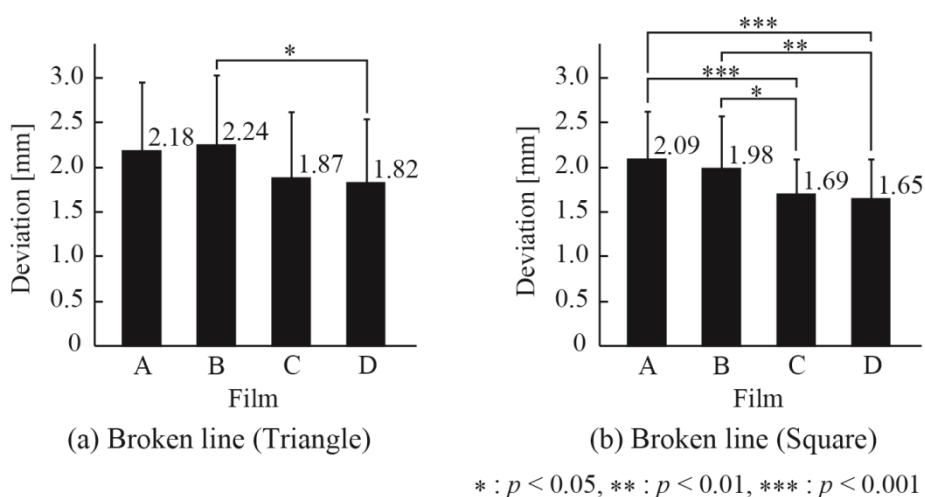


図 2.7 折線におけるズレ量の結果

Fig.2.7 Results of deviation in broken line

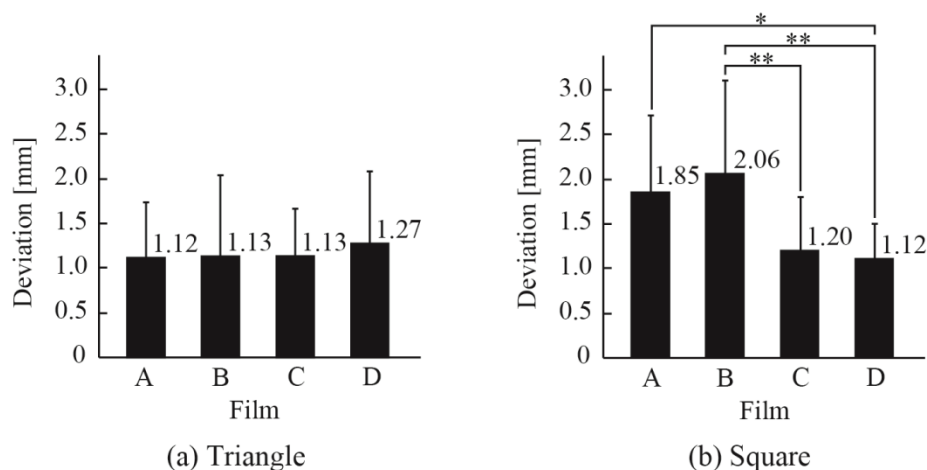
ることがわかった（それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ）。

以上の結果より、正三角形のトレースの終点におけるズレ量は、フィルムによる指先の滑り易さの影響を受け難いことがわかった。一方、直線をトレースする正方形ではフィルムによる影響がみられ、動摩擦係数の大きいフィルムでは、小さいフィルムと比較してズレ量は減少することがわかった。

#### (4) 速さの結果

図 2.9 (a) に示した正円における曲線での速さの結果について、フィルムの主効果は認められなかった。また、図 2.9 (b) に示した正三角形での斜線における速さの結果についても、同様にフィルムの主効果は認められなかった。図 2.9 (c) に示した正方形での直線における速さの結果について、フィルムの主効果が有意であった [ $F(3, 33) = 3.97$ ,  $p < 0.05$ ]。水準間の有意差を調べた結果、フィルム A では、フィルム D よりも速く直線をトレースしていることがわかった ( $p < 0.05$ )。

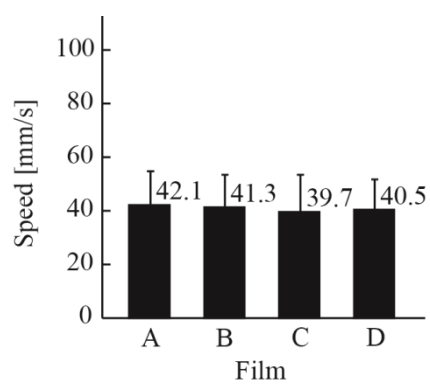
以上の結果より、曲線と斜線においては、指先の滑り易さの違いがトレースする速さに与える影響は小さいことがわかった。一方、直線ではフィルムによる主効果が認められ、動摩擦係数の値が最も小さいフィルム A では、最も値の大きいフィルム D よりも速くトレースすることが明らかになった。



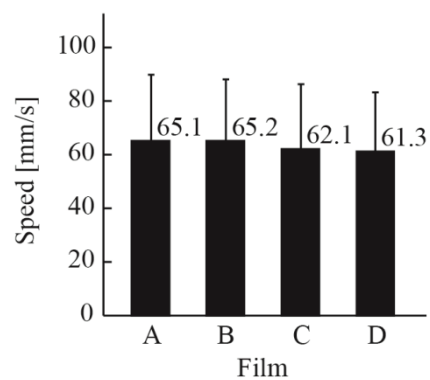
\* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$ , \*\*\* :  $p < 0.001$

図 2.8 トレースの終点におけるズレ量の結果

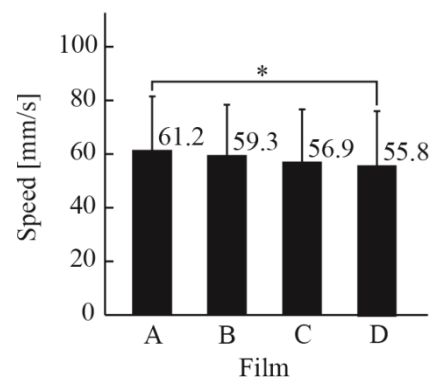
Fig.2.8 Results of deviation in end point of trace



(a) Curved line (Circle)



(b) Oblique line (Triangle)



(c) Straight line (Square)

\* :  $p < 0.05$

図 2.9 速さの結果

Fig.2.9 Results of speed

## 2.4 考察

曲線におけるトレースでは、フィルムの動摩擦係数が小さすぎても大きすぎてもズレ量は増加することがわかった。これについて、動摩擦係数が最も小さいフィルム A では、指先が滑り易く操作中の指先のブレを抑制することが難しかったために、ズレ量が増加したと考えられる。一方、動摩擦係数が最も大きいフィルム D では、操作中に指先がフィルムに引っかかることで細かな制御が難しくなり、ズレ量が増加したと考えられる。また、斜線と直線におけるトレースでは、動摩擦係数の大きいフィルムでズレ量は減少することがわかった。これについては、ある程度の滑り難さがあることで操作中の指先のブレが抑制され、ズレ量が減少したと考えられる。なお、曲線とは違って動摩擦係数の小さいフィルムでズレ量が増加しなかったことについては、曲線のトレースでは斜線や直線よりも巧緻な操作が求められたためだと考えられる。図 2.9 に示した速さの結果から、曲線では斜線と直線の約 3 分の 2 の速さでトレースしていることがわかる。このことから、曲線のトレースでは斜線や直線と比較して巧緻な操作が必要であったために、慎重にトレースしていた可能性が考えられる。

折線におけるズレ量については、鋭角をなす折線と直角をなす折線でよく似た傾向がみられ、全体的に動摩擦係数の小さいフィルムでズレ量は増加した。これについて、動摩擦係数が小さいフィルムでは指先が滑り易く、折線をトレースする際に角の位置で指先を方向転換させることが難しかったためだと考えられる。なお、実験参加者からは、フィルムが滑り易いと任意の位置で指先を方向転換させたり、止めたりすることが難しいとのコメントを得ている。

トレースの終点におけるズレ量の結果について、正三角形ではフィルムの影響はみられないが、正方形では動摩擦係数の小さいフィルムでズレ量は増加することがわかった。ここで、図 2.9 に示した速さの結果をみると、正方形では動摩擦係数が大きく指先の滑り難いフィルム D よりも、動摩擦係数が小さく指先の滑り易いフィルム A で速くトレースしていることがわかる。このフィルムによるトレースの速さの違いが、トレースの終点における指先の止め易さに影響を及ぼしたために、正方形においては動摩擦係数の小さいフィルムでズレ量が大きくなった可能性が考えられる。

速さの結果については、正方形でのみフィルムの主効果が認められ、動摩擦係数が小さく指先の滑り易いフィルム A では、動摩擦係数が大きく指先の滑り難いフィルム D よりも速くトレースできることがわかった。このことから、直線をトレースす

のような単純な操作では、指先の滑り易さが操作の速さに影響を及ぼし、指先の滑り易いフィルムでより速く操作できることがわかった。

以上より、タッチパネルタブレット端末のディスプレイにおける指先の滑り易さと操作性の関係が明らかになった。本実験で得られた知見は、タッチパネルディスプレイやディスプレイ保護フィルムの表面設計を行う際の参考データになるとともに、指先の滑り易さに配慮したソフトウェアの設計指針を示すものであると考えられる。具体的には、斜線や直線をトレースするような操作や指先の止め・方向転換を伴う操作が要求されるアプリケーションでは表面の摩擦抵抗を大きくすることで操作の正確性は向上し、曲線をトレースするような巧緻な操作が要求されるアプリケーションでは、適切な範囲の摩擦抵抗を表面に施すことによって、操作の正確性は有意に向上することが明らかになった。なお、本実験では、操作性について“いかに正確かつ速く操作できるか”に着目して評価を行った。しかし、タッチパネルやディスプレイ保護フィルムの表面設計では指先で触れた際の“つるつる”や“さらさら”といった触感も重要な設計因子になると考えられる。今後は、ディスプレイの表面性状と官能検査を用いた触感の関係解析を行うことで、両者の関係についても明らかにする必要があると考える。

## 2.5 小括

本章では、タッチパネルタブレット端末のディスプレイの表面性状と指先の滑り易さの関係を調べるとともに、表面性状が操作性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) フィルム表面の算術平均粗さが大きいほど動摩擦係数は小さくなり、反射防止性能をもつ AG フィルムの動摩擦係数は、耐擦傷性能をもつ HC フィルムのおよそ 3 分の 1 である。
- (2) 曲線をトレースする操作では、適切な範囲の摩擦抵抗を表面に施すことによって操作の正確性が向上する。
- (3) 斜線や直線をトレースする操作や指先の止め・方向転換を伴う操作では、表面の摩擦抵抗を大きくすることで操作の正確性が向上する。
- (4) 直線をトレースする操作では、表面の摩擦抵抗が小さいほうが速く操作できる。

以上の通り，第1章で述べたタッチパネルタブレット端末に関する操作性の課題に対して，課題改善に向けた基礎的知見を得ることができた。



## 第3章

### タッチパネル携帯端末におけるポインティング特性の評価 とタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討

- 3.1 目的
- 3.2 ポインティング特性の評価
- 3.3 タッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討
- 3.4 小括

#### 概要

第3章では、搭載デバイス別の市場で最も大きなシェアを占める携帯端末において、操作性の良い GUI を設計するために必要となる、ヒトのポインティング特性に関する基礎的知見を得ることを目的として行った実験について述べる。さらに、得られたポインティング特性の知見に基づき、タッチ感知領域の設計手法に関して行った基礎的検討について述べる。

本実験では、片手操作と両手操作の双方に着目し、平均ポインティング位置、ポインティング精度、ポインティング時間を用いてポインティング特性を評価した。さらに、得られたポインティング位置の分布データを用いて、楕円によるタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討を行った。その結果、片手操作と両手操作の双方におけるポインティング特性を明らかにすることができた。さらに、評価実験によって得られたポインティング位置の分布が楕円によって近似的に表されることを示した。これにより、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対しては、楕円によるタッチ感知領域によって、正方形による単純なタッチ感知領域よりも効率的にポインティングを検出できる可能性が示唆された。

### 3.1 目的

本章では，GUI の設計指針に供する知見の獲得を目指し，タッチパネル携帯端末を対象として，片手操作及び両手操作におけるポインティング特性を評価することを目的とした．さらに，実験によって得られたポインティング特性に基づいたタッチ感知領域の基礎的検討を行う．

### 3.2 ポインティング特性の評価

ここでは，タッチパネル携帯端末を対象として，片手操作と両手操作の双方におけるヒトのポインティング特性を調べた実験の方法について述べる．

#### 3.2.1 実験参加者

本実験では，日常的にタッチパネルが搭載された端末を使用しており，指先でのタッチパネル入力操作に慣れている成人男性 15 名（平均年齢 22.3 歳，標準偏差 2.4 歳）に実験参加の協力を得た．全ての参加者は右利きで，第一指長<sup>[3-1]</sup>の平均値は 6.4 cm（標準偏差 0.5 cm）であった．また，いずれの参加者においても実験課題遂行に支障をきたすような手指運動機能及び視覚機能の異常はみられなかった．

#### 3.2.2 実験課題

実験課題として，図 3.1 (a) に示すような画面レイアウトのアプリケーションを作成し，投影型静電容量方式のタッチパネル携帯端末（Apple 社製 iPod touch（第 4 世代））上で動作させた．なお，端末のディスプレイサイズは 960 pixels × 640 pixels（3.5 inch），解像度は 326 ppi（pixels per inch）であった．以下に，作成したアプリケーションの操作手順を示す（図 3.2 参照）．

- (1) 図 3.1 (a) にドットで示す 70 個（10 行 × 7 列）の表示位置の中から，ランダムで 1 箇所十字のターゲット（図 3.1 (b) 参照）が表示される．
- (2) 表示されたターゲットを可能な限り正確かつ速くポインティングする．この際，表示されるターゲット（十字）の交点を目指してポインティングするよう実験参加者に教示した．

(3) 指をディスプレイから離し，初期位置（筐体の右側面）に戻す。（1）に戻る。

操作中，アプリケーション内でポインティングの位置と時間を記録した．また，70個の各ターゲットは，1 試行中にそれぞれ 1 回ずつ表示される．すなわち，1 試行で

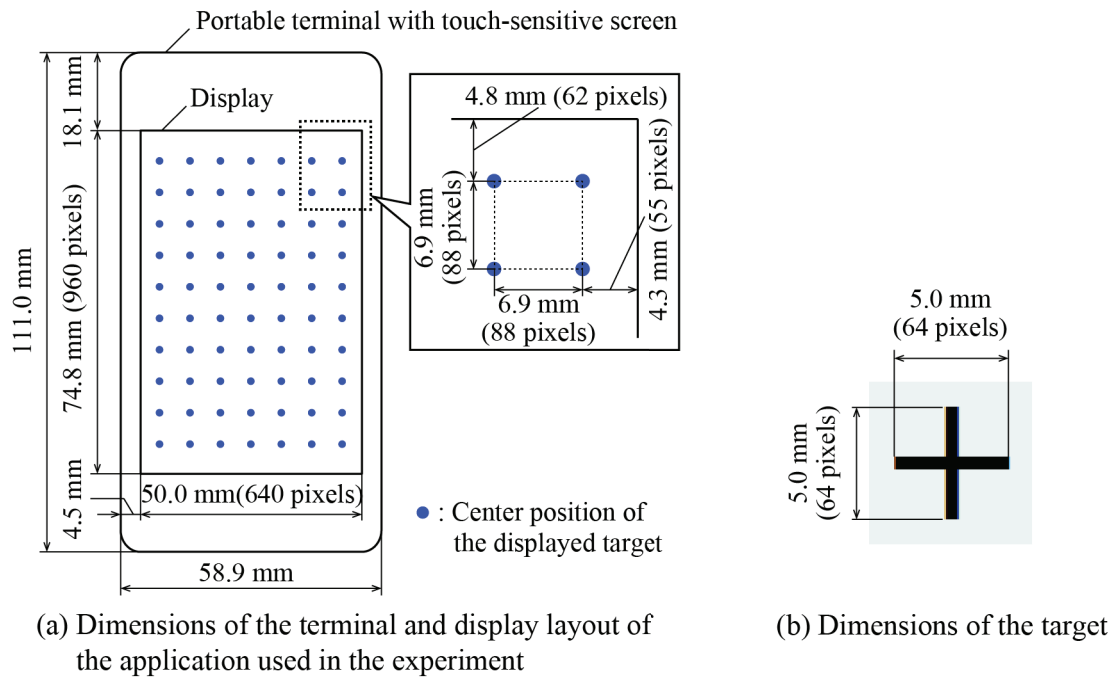


図 3.1 携帯端末の寸法及び評価実験用アプリケーションの画面レイアウト

Fig.3.1 Display layout of the application and dimensions of the target

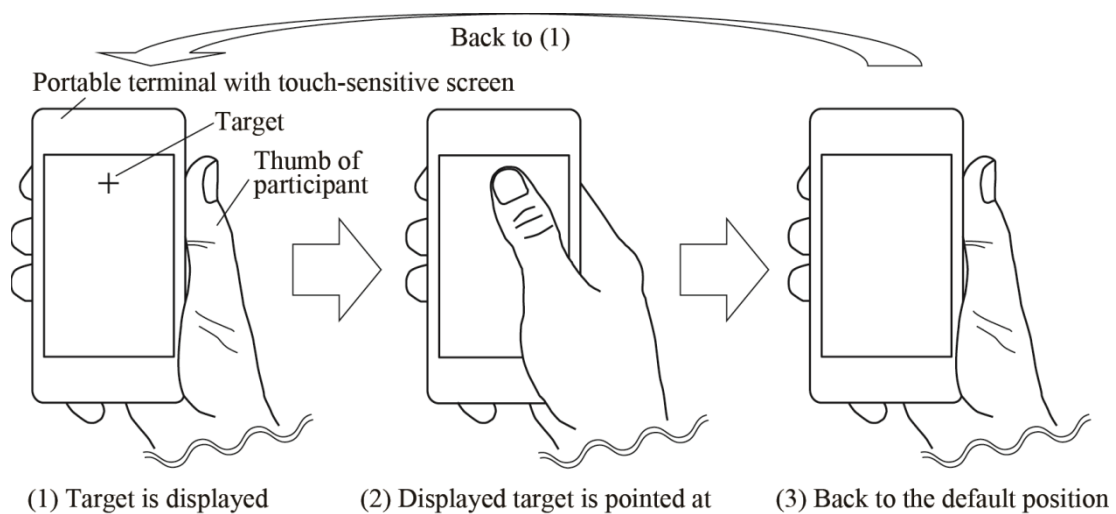


図 3.2 評価実験用アプリケーションの操作手順（片手操作 A の例）

Fig.3.2 Operational procedure of the experimental task (one-handed operation A)

のポインティング回数は合計 70 回（ターゲット表示位置 70 箇所×各ターゲットを 1 回ずつポインティング）とした。また、ターゲットである十字の大きさは縦 5.0 mm（64 pixels）×横 5.0 mm（64 pixels）とした（図 3.1 (b) 参照）。ターゲットを十字にした理由は、実験参加者にポインティングさせる位置を明確に示すためである。さらに、ターゲットをポインティングしてから次のターゲットが表示されるまでの時間間隔を 1.0～3.0 s の間でランダムに設定し、一定の時間間隔でターゲットが表示されないようにした。これは、実験参加者が次にターゲットが表示されるタイミングを推測して指を動かさないようにするためである。ポインティング位置の決定方法は、テイクオフ戦術<sup>[3-2]</sup>に従い、ディスプレイから指が離れた瞬間の位置を採用した。また、指を初期位置に置いてから次のターゲットが表示されるまでは、指を筐体の右側面から離さずに待機するよう教示した。指の初期位置を筐体の右側面に設定した理由は、表示されるターゲットが指で隠れることのないようにするため<sup>[3-3]</sup>と、筐体を片手で保持したときに指を自然に待機させることができるためである。背景色は白（R, G, B=255, 255, 255）、各ターゲットの線の色は黒（R, G, B=0, 0, 0）とした。

### 3.2.3 操作方法

操作方法について、図 3.3 に示す 3 条件を実験因子として採用した。具体的には、図 3.3 (a) に示すように筐体下部に小指をかけて保持し、母指で操作する方法を“片手操作 A”，図 3.3 (b) に示すように母指以外の指を筐体左側面にかけて保持し、母指で操作する方法を“片手操作 B”，図 3.3 (c) に示すように片手で筐体を保持し、もう一方の手の示指で操作する方法を“両手操作”とした。この 3 条件の操作方法に

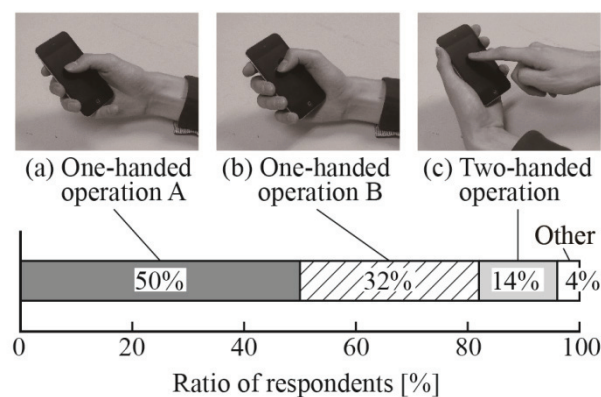


図 3.3 操作方法の条件とそれらの回答率

Fig.3.3 Operational conditions and its ratio of respondents

については、日常的にタッチパネル携帯端末を使用している成人男女 50 名に対して行ったタッチパネル携帯端末の操作方法に関するアンケートの回答結果を基に選定を行った<sup>[3-4]</sup>。具体的には、比較的高いポインティング精度が要求されると考えられる Web 閲覧時におけるテキストリンクのポインティングやメール作成場面を想定し、普段最も多く行っている操作方法を聞いた。その結果、片手操作 A で操作を行っていたのは 25 名 (50%)、片手操作 B は 16 名 (32%)、両手操作は 7 名 (14%)、その他の操作方法は 2 名 (4%) であった (図 3.3 参照)。なお、片手操作 A と B はいずれも片手操作であるが、小指を筐体下部にかけることで操作時の手指の姿勢やパフォーマンスが異なる可能性も考えられたため、本研究ではいずれの操作方法についても実験因子として採用した。

### 3.2.4 手続き

実験参加者は、高さの調節が可能な椅子に座って肘を机の上に置き、手首を支持台にのせた姿勢で操作を行った。なお、両手操作では、筐体を保持する側の手首を支持台にのせ、操作する側の肘を机の上にのせた姿勢で操作を行わせた。試行数については、合計で 30 試行 (操作方法 3 条件×各条件 10 試行ずつ実施) を行った。なお、3 条件ある操作方法については、実験参加者ごとにランダムな順番で実施した。さらに、実験参加者に実験の手続きと実験課題に慣れてもらうため、本試行に入る前には十分な練習試行を行った。実験は適宜休憩を取りながら行い、実験時間はいずれの実験参加者においても 3 時間程であった。

本実験は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得ており、事前に実験内容を参加者に説明した上で参加の同意を得た。

### 3.2.5 評価指標及びその解析方法

本実験では、ポインティング特性としてターゲットに対するポインティング位置の分布、ポインティングの精度、速さを評価するため、アプリケーションで記録したポインティングの位置 $P_i$ と時間 $T_i$ のデータを基に、図 3.4 に示す各指標を算出した。具体的には、まず、ターゲットに対するポインティング位置の分布傾向を調べるため、分布の中心を“平均ポインティング位置” $P$ として式 (3.1) より算出した。

$$P = (\bar{x}, \bar{y}) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (3.1)$$

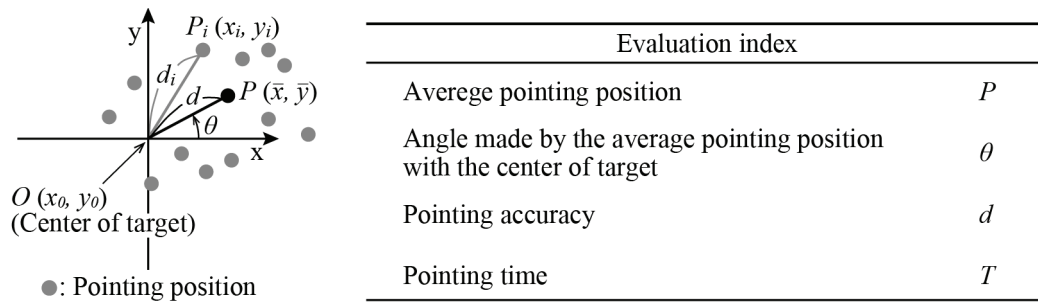


図 3.4 ポインティング特性の評価指標

Fig.3.4 Definition of the evaluation index

また、平均ポインティング位置がターゲットの中心に対してどの方向にずれるのかを調べるため、平均ポインティング位置とターゲットの中心が成す角度を“平均ポインティング角度”  $\theta$  [°] として算出した。

次に、ポインティングの精度を調べるため、各ターゲットで得られたポインティング位置のデータについてターゲットの中心  $O$  までの 2 点間距離を式 (3.2) より求め、“ポインティング精度”  $d$  [mm] として評価に用いた。

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3.2)$$

そして、ポインティングの速さを調べるため、ディスプレイ上にターゲットが表示されてから、それをポインティングして指を離すまでの時間  $T_i$  を用いて、“ポインティング時間”  $T$  [s] を式 (3.3) より算出した。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.3)$$

なお、 $n$  は各ターゲットにおける総ポインティング回数と等しく、式 (3.1) ~ (3.3) において  $n = 150$  である。

### 3.2.6 結果

#### (1) ポインティング位置の分布

図 3.5 に平均ポインティング位置の結果を示す。図 3.5 (a) , (b) に示す片手操作



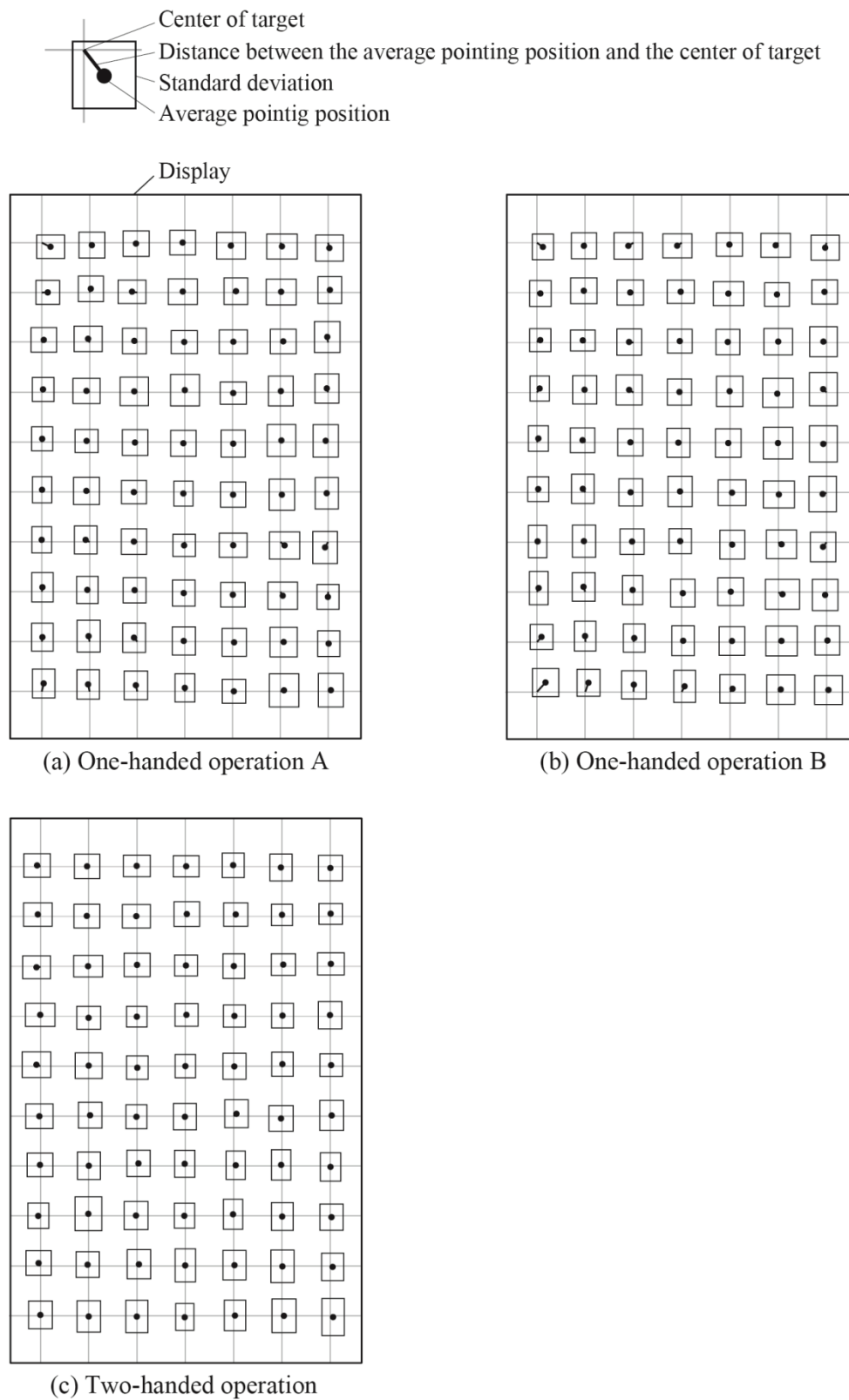


図 3.5 平均ポインティング位置の結果

Fig.3.5 Results of average pointing position

A, B の結果について, ディスプレイ左上に表示されるターゲット (1 行 1 列目) では, 平均ポインティング位置とターゲット中心間の距離が大きく, ターゲットの中心に対して右下方向にずれることがわかった. また, ディスプレイ左下 (9 行 1 列目, 10 行 1, 2, 3 列目) に表示されるターゲットでも平均ポインティング位置とターゲット中心間の距離は大きく, 平均ポインティング位置はターゲットの中心に対して右上方向にずれることがわかった. 図 3.5 (c) に示す両手操作の結果では, ディスプレイ上のいずれの領域に表示されるターゲットでも平均ポインティング位置はターゲットの中心とほぼ一致しており, 特定の方向にずれるような傾向はみられなかった.

以上で述べた結果を定量的に評価するため, 図 3.6 にターゲットの中心から平均ポ

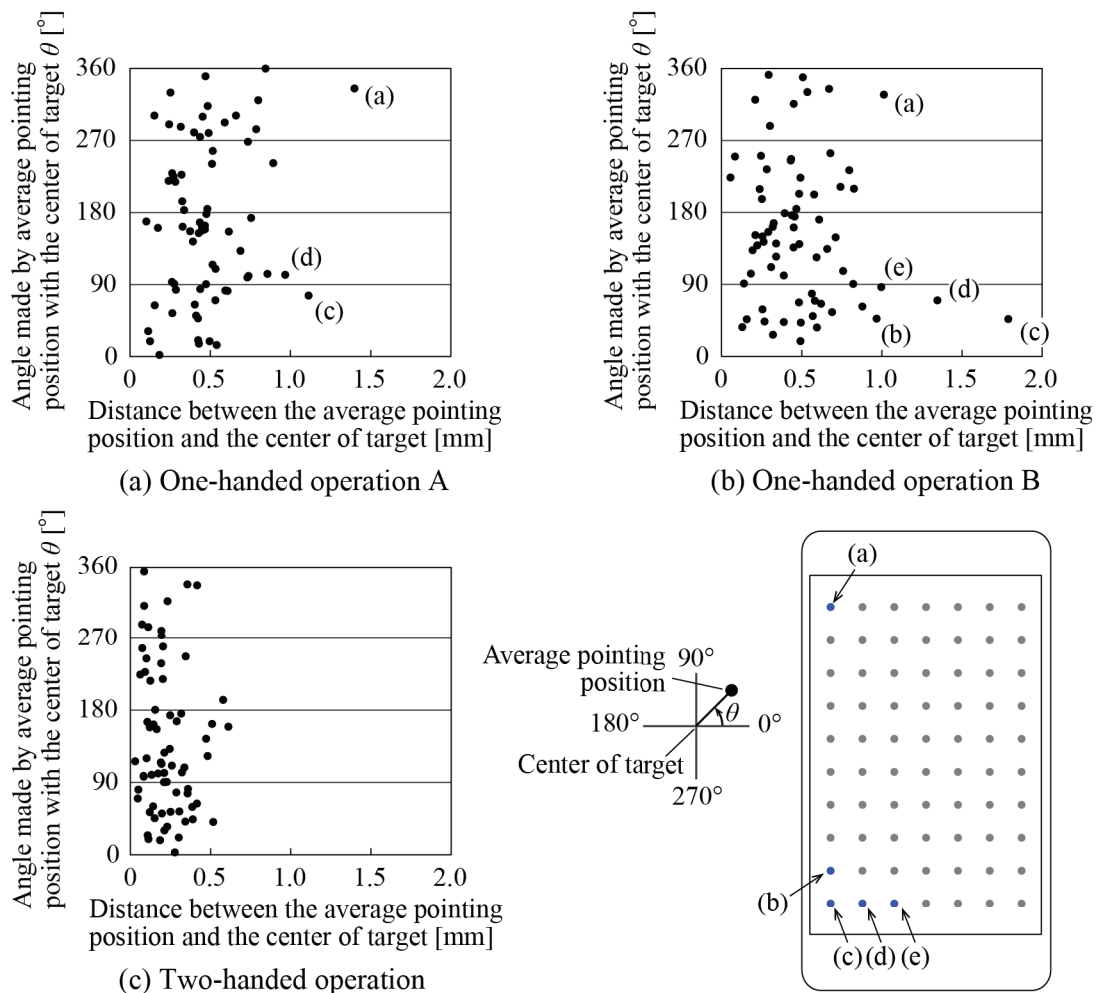


図 3.6 平均ポインティング位置とターゲットの中心との位置関係

Fig.3.6 Relationship between the distance between and the angle made by the average pointing position and the center of target

インティング位置までの距離と、平均ポインティング角度との関係を示す。図 3.6 (a), (b) に示す片手操作 A, B の結果より、平均ポインティング位置とターゲット中心間の距離が 1.0 mm 以上と比較的大きくなるディスプレイ左上と左下の領域においては、それぞれターゲットの中心に対して 270~360° (右下方向) と 0~90° (右上方向) の範囲に平均ポインティング位置が存在することを確認できる。一方、図 3.6 (c) に示す両手操作の結果では、ディスプレイ上のいずれの領域に表示されるターゲットにおいても、平均ポインティング位置とターゲット中心間の距離は 0.6 mm 以下と片手操作 A, B に比べて小さく、平均ポインティング位置はターゲットの中心近くに存在することがわかる。

さらに、ポインティング位置のばらつきを調べるため、 $x$  軸方向 (ディスプレイ横方向) に対する  $y$  軸方向 (ディスプレイ縦方向) の標準偏差の比を算出した。得られた結果を図 3.7 に示す。1.0 を基準として、比の値が 2.0 に近いほどポインティング位置のばらつきは縦方向 ( $y$  軸方向) に広く、0 に近いほど横方向 ( $x$  軸方向) に広く分布していることを表す。図 3.7 (a) に示す操作方法 A の結果について、ディスプレイ上でポインティング位置の分布の傾向が異なり、ディスプレイ左側下方 (9 行 2 列目) では縦方向にポインティング位置は広く分布することがわかった。一方、ディスプレイ上部 (3 行 5 列目) では、逆にポインティング位置は横方向に広く分布する傾向が

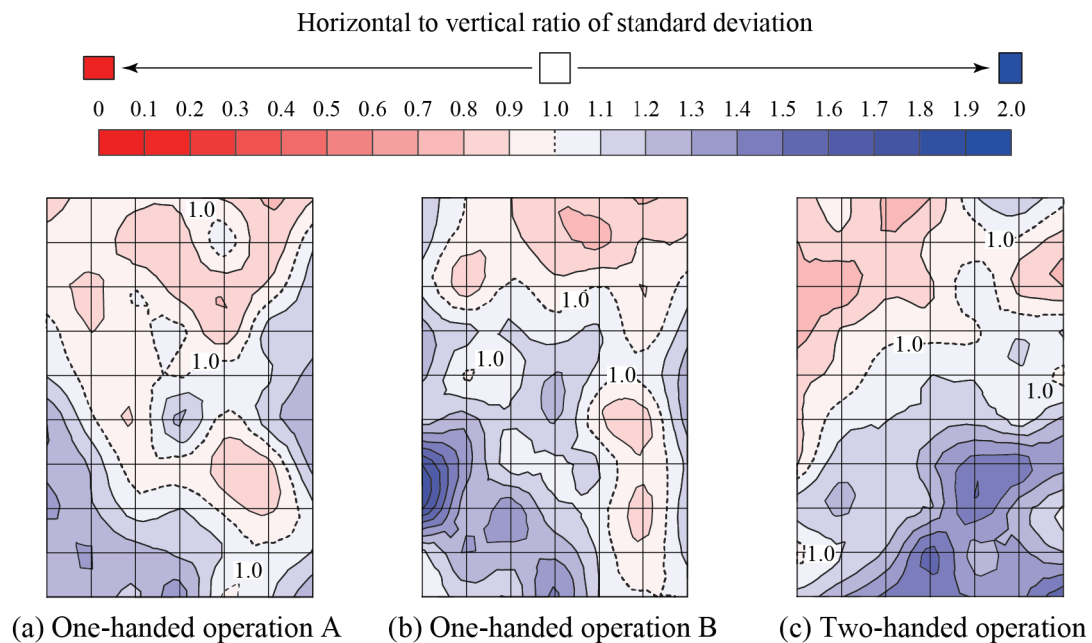


図 3.7 ポインティング位置の標準偏差の縦横比

Fig.3.7 Horizontal to vertical ratio of the standard deviation

みられた。図 3.7 (b) に示す操作方法 B の結果について、ディスプレイ左側下方 (7, 8 行 1 列目) では縦方向にポインティング位置は広く分布することがわかった。一方、ディスプレイ右上 (2 行 5 列目) では逆に横方向に広く分布する傾向であった。図 3.7 (c) に示す両手操作の結果について、ディスプレイ下方 (9 行 4 列目) でポインティング位置は縦方向に広く分布しディスプレイ左上 (3 行 2 列目) では逆に横方向に対して分布は広がることがわかった。

## (2) ポインティングの精度及び速さ

図 3.8 に、ポインティング精度の結果を等高線図で示す。なお、図中のグリッド線の交点は、各ターゲットの中心に対応している。図 3.8 (a) に示す片手操作 A の結果では、ディスプレイ右側の中央 (5 行 7 列目) で精度は低下することがわかった。また、図 3.8 (b) に示す片手操作 B の結果について、ディスプレイ右側の中央 (5 行 7 列目) や下方 (8 行 6 列目) で精度は低下することがわかった。一方、図 3.8 (c) に示す両手操作の結果では、全体的に他の領域と比較して精度が低下する領域は確認されなかった。

図 3.9 に、ポインティング時間の結果を等高線図で示す。図中のグリッド線の交点は、各ターゲットの中心に対応する。図 3.9 (a) に示す片手操作 A の結果について、ディスプレイ右上 (2 行 7 列目) から左側の中央 (6 行 2 列目) にかけてポインティ

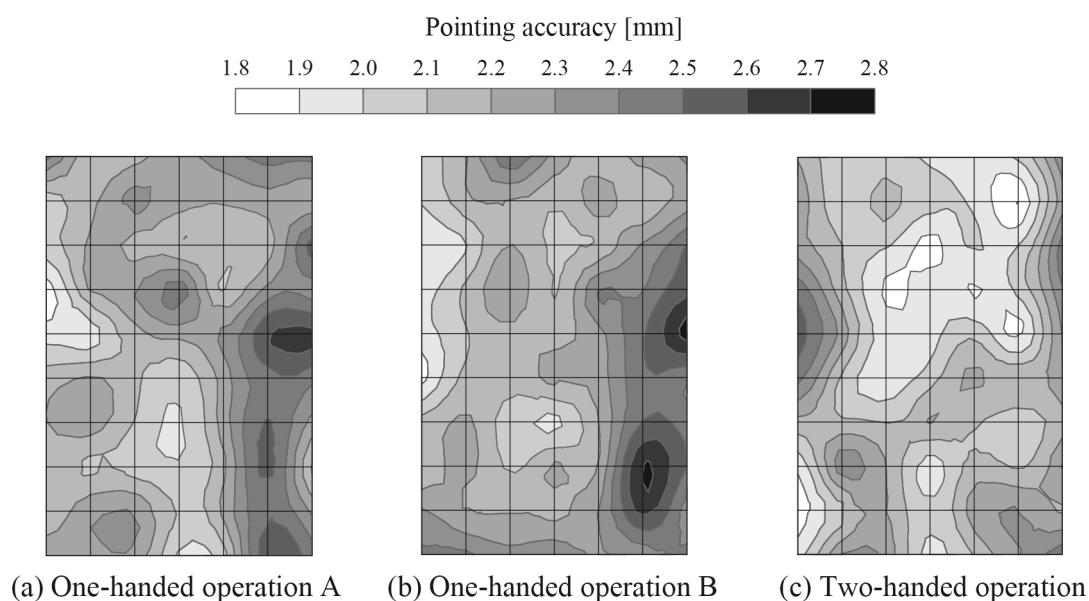


図 3.8 ポインティング精度の結果

Fig.3.8 Results of pointing accuracy

ング時間は短くなることがわかった。一方、ディスプレイの左上（1行1列目）ではポインティング時間は長かった。さらに、図3.9（b）に示す片手操作Bの結果について、ディスプレイ右上（2行6列目）から左側の中央（5行2列目）にかけてポインティング時間は短くなることがわかったが、その領域は片手操作Aと比較して狭かった。また、ディスプレイの左上（1行1列目）、左下（10行1列目）、右下（10行7列目）ではポインティング時間は長くなる傾向がみられた。一方、図3.9（c）に示す両手操作の結果では、ディスプレイ右上（2行7列目）の領域でポインティング時間は短かった。しかし、右上からの距離が遠くなるに従い、ポインティング時間は長くなることがわかった。

### 3.2.7 考察

#### （1）ポインティング位置の分布

平均ポインティング位置について、片手操作A、Bでは、ディスプレイ左上と左下の領域において、分布の中心はそれぞれターゲットの右下方向と右上方向にずれることがわかった。これについて、左上の領域は母指を最大限に伸展させないと届かない領域であったため、指先を自然に到達させることができる範囲内にポインティング位置が偏ったことで、平均ポインティング位置が右下方向にずれたと考えられる。一方、

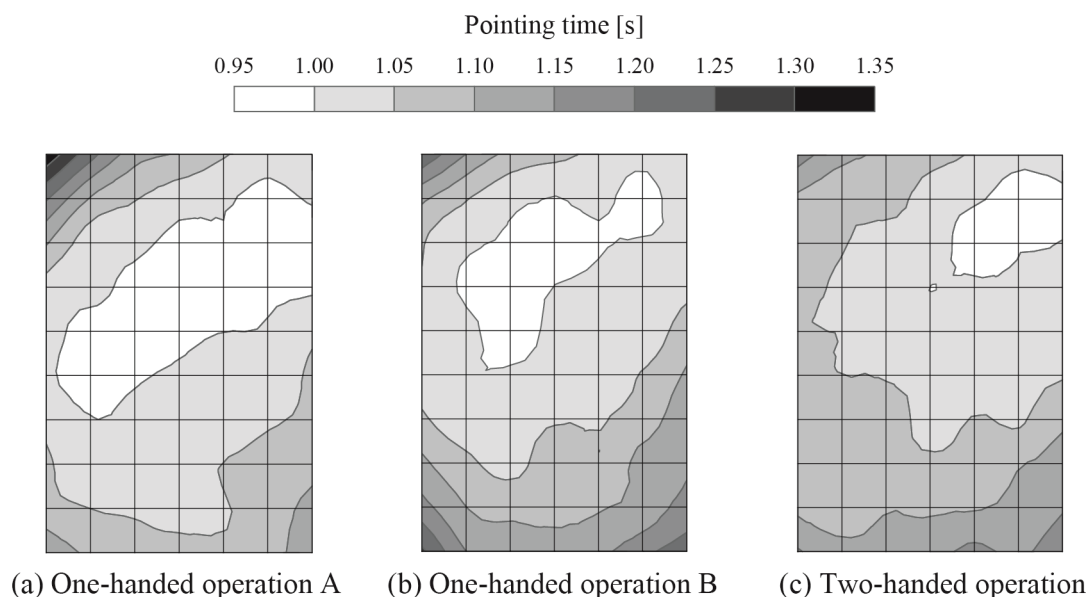


図3.9 ポインティング時間の結果

Fig.3.9 Results of pointing time

ディスプレイ左下の領域については、ターゲットをポインティングする際、手指が窮屈な姿勢になるために操作し難かったとの内観報告を数人の実験参加者から得ている。実際に、ディスプレイ左下の領域をポインティングする際には、母指は最大内旋位に近づく。これらのことから、自然に指先が到達する範囲内にポインティング位置が偏ったため、分布の中心が右上方向にずれたと考えられる。また、標準偏差の縦横比の結果から、いずれの操作方法においても、ディスプレイ上での位置によって比の値が異なる傾向がみられた。このことから、ポインティング位置はターゲットに対して均一に分布するわけではなく、その分布傾向はターゲットが表示される位置によって異なることがわかった。そのため、表示位置による分布の違いに応じてオブジェクトやタッチ感知領域 (Touch-sensitive area<sup>[3-5]</sup>) の面積や形状を変化させることで、より多くのポインティング位置をカバーできるという点から、ポインティング精度の向上が期待できる。

## (2) ポインティングの精度及び速さ

ポインティング精度について、片手操作 A, B ではディスプレイ右側の中央や下方で精度は低くなることがわかった。これは、ディスプレイ右側で母指は最大屈曲位に近くなるため、自身が意図した位置にポインティングすることが困難であったためだと考えられる。なお、ディスプレイ右側で母指を深く屈曲させて操作を行う様子は、実験中に実験参加者の手元を撮影した動画からも確認することができた。このことから、片手操作を想定した GUI 設計では、ポインティング精度が要求されるオブジェクトは可能な限りディスプレイ右側の領域には配置しないといった配慮が必要であると言える。一方、両手操作では、他の領域と比較して精度が低下する領域はみられなかった。これについては、本実験で評価対象とした携帯端末のディスプレイサイズが 3.5 inch と小さく、机上にのせた肘を支点とする正常作業域内<sup>[3-6]</sup>での操作に限定されていたためだと考えられる。

ポインティング時間について、片手操作 A では、ディスプレイの左上、片手操作 B では、ディスプレイの左上、左下、右下の各領域で長くなることがわかった。ディスプレイ左上で長くなることについては、母指を最大限に伸展させてポインティングを行う必要があったためだと考えられる。また、片手操作 B で、ディスプレイ左下と右下で長くなる結果については、指の初期位置 (筐体右側面) からの距離が遠かったことに加え、ポインティングの際にそれぞれ母指の内旋と屈曲を伴う領域であったこと



が影響していると考えられる。他方、ディスプレイ右上から左側の中央付近にかけてポインティング時間は短かった。これは、ディスプレイ右下に位置する母指手根中手関節を基点として伸展・屈曲を伴わずに操作が行えたためだと考えられる。なお、同領域においては、ポインティング精度の低下も認められなかった（図 3.8 (a), (b) 参照）。そのため、片手操作を対象とする GUI 設計では、母指手根中手関節を基点とした円弧状の領域にオブジェクトを配置することで、ポインティングの精度と速さを向上させることができると考えられる。また、操作方法 A と操作方法 B におけるポインティング時間が短くなる領域を比較すると、操作方法 A のほうがその領域は小さい傾向がみられた。このことから、小指を筐体下部にかけて操作を行う片手操作では、母指以外の 4 指を筐体左側面にかけて操作を行う片手操作と比較して速く操作できる領域は広く分布することがわかった。一方、両手操作では、ディスプレイ右上から遠い領域にあるターゲットに対してポインティング時間は長くなることがわかった。これについて、本実験ではポインティング特性の基礎的知見を獲得するために単一のターゲットに対する独立したポインティング操作を評価対象にしており、実験課題ではポインティングごとに指を初期位置（筐体の右側面）に戻すように教示した。そのため、指の初期位置から遠い距離にあるターゲットに対してポインティング時間が長くなったと考えられる。単純なポインティング動作では、指の初期位置からターゲットまでの距離が遠いほどポインティング時間は長くなる<sup>[3-7]</sup>という知見もこの考察を支持すると考えられる。

### 3.3 タッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討

ここでは、前節で得られたポインティング特性の結果に基づいて、タッチ感知領域の設計手法に関する実験的検討を行う。具体的には、前節で述べた実験により得られたポインティング位置の分布の結果に基づき、楕円によるタッチ感知領域の設計手法について検討及び評価を行う。

#### 3.3.1 ポインティング位置の分布の特徴

前章で得られたポインティング位置のデータについて、その分布傾向をより詳細に調べるため、まずは片手操作 A に着目し、ディスプレイ中央（5 行 4 列目）のターゲットを代表例として、ポインティング位置の分布をディスプレイ横方向（x 軸方向）

と縦方向 (y 軸方向) に分けてその頻度分布を算出した. 図 3.10 に x 軸と y 軸それぞれの頻度分布を正規分布曲線 (図中の点線) とあわせて示す. これより, ディスプレイ横方向 (x 軸) と縦方向 (y 軸) のそれぞれに対するポインティング位置の頻度分布は, 概ね正規分布に近づくことを確認できる. また, Kolmogorov-Smirnov 検定を用いて正規性を調べた結果, x 軸と y 軸のいずれの成分においても有意水準 5%で帰無仮説が採択されたことから, ポインティング位置の頻度分布は正規分布に対して十分な適合性があると言える. ここで, x 軸と y 軸の頻度分布が正規分布であり, 互いに相関関係でないとき, xy 平面における頻度分布は 2 次元正規分布となる. そして, xy 平面上における分布は, x 軸の標準偏差と Y 軸の標準偏差を長径あるいは短径とする楕円で表現される. すなわち, ポインティング位置の分布は楕円で近似できることを示唆する. なお, 他の領域に表示されるターゲットにおいても, 頻度分布は概ね正規分布に従う傾向がみられた. さらに, 片手操作 B, 両手操作においても同様の傾向を確認することができた.

これらを踏まえ, より効率的にポインティング位置の分布をカバーするために, 楕円によるタッチ感知領域について検討を行うこととした. 次項にて, 具体的な設計手法を述べる.

### 3.3.2 タッチ感知領域の設計手法

タッチ感知領域の設計手法について述べる. まず, 着目するターゲットで得られた

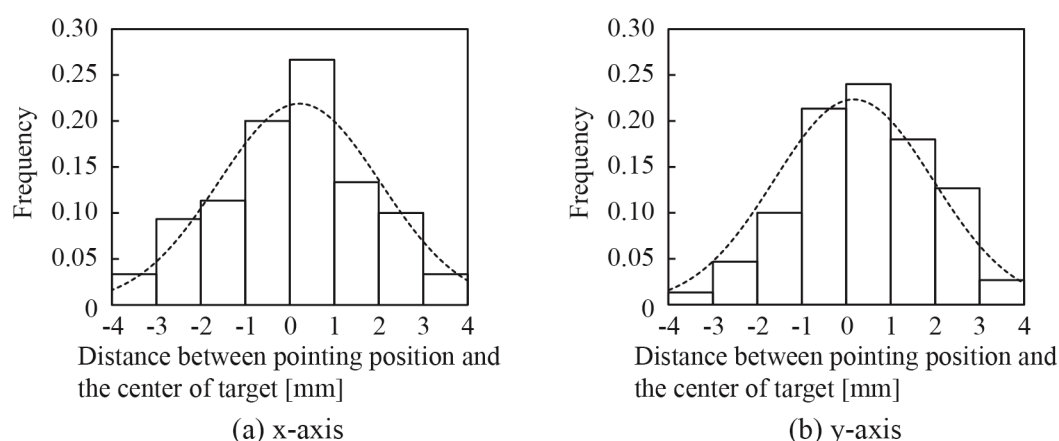


図 3.10 ポインティング位置の頻度分布 (片手操作 A, 5 行 4 列目の例)

Fig.3.10 Frequency distribution of pointing position (One-handed operation A, 5th row and 4th column)

ポインティング位置のデータについて，ターゲットの中心を原点とする  $xy$  の 2 次元座標系を考え，原点を通る近似直線を最小二乗法にて求める．次に，近似直線の傾きが 0 となるように座標を回転させる．このとき，近似直線の傾きが正であれば負の方向に，負であれば正の方向に座標を回転させる．そして，座標回転後のポインティング位置のデータについて以下の式 (3.4) で表される楕円を考える．

$$\frac{(x - x')^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (a \geq b > 0) \quad (3.4)$$

ここで， $a$ は長半径， $b$ は短半径， $x'$ は座標回転後の分布データにおける $x$ 座標の平均値を表す．なお， $a$ と $b$ は，領域内に含まれるポインティング位置のデータ数が最大となる値を採用した．また，ここではより多くのデータを用いて汎用的なタッチ感知領域の設計手法を検討するため，前節のポインティング特性評価実験で得られた参加者 15 名全てのデータを用いて楕円の算出を行った．

### 3.3.3 タッチ感知領域の評価

#### (1) 評価方法

ここでは，式 (3.4) で表される楕円でタッチ感知領域を設計し，前節の評価実験で得られた参加者 15 名分のポインティング位置の分布データを含む割合を指標として，検討するタッチ感知領域の評価を行う．着目するターゲットは，片手操作 A, B において，平均ポインティング位置からターゲットの中心までの距離が大きく，ターゲットの中心に対する平均ポインティング位置のずれがみられたディスプレイ左上 (1 行 1 列目) のターゲットとした (図 3.5 (a), (b) 参照) ．

検討を行うタッチ感知領域の設計手法を評価するために，市販の製品や先行研究で頻繁に使用されている正方形のタッチ感知領域の設計手法との比較を行う．表 3.1 に評価対象とするタッチ感知領域の条件を示す．具体的には，十字のターゲットの交点

表 3.1 評価に用いたタッチ感知領域の条件

Table 3.1 Conditions of the touch-sensitive area

Shape	Ellipse , Square
Area [mm <sup>2</sup> ]	25 , 80

を中心とする正方形である。これら2つの設計手法について、面積  $25 \text{ mm}^2$  と  $80 \text{ mm}^2$  でタッチ感知領域を設計した際に、領域内に含まれるポインティング位置のデータ数の割合を百分率で算出した。評価対象とした面積については、市販のタッチパネル携帯端末で一般的に使用されているオンスクリーンキーボードのボタンのサイズ ( $25 \text{ mm}^2$ ) と、アイコンのサイズ ( $80 \text{ mm}^2$ ) をそれぞれ参考とした<sup>[3-8]</sup>。

## (2) 結果及び考察

表 3.2 に結果を示す。これより、タッチ感知領域の面積が  $25 \text{ mm}^2$  のときは、いずれの操作方法においても、楕円によるタッチ感知領域は正方形によるタッチ感知領域よりも多くのポインティング位置のデータを含むことがわかった。また、タッチ感知領域の面積が  $80 \text{ mm}^2$  のときは、片手操作 A, B の操作方法において、楕円によるタッチ感知領域は正方形によるタッチ感知領域よりも多くのポインティング位置のデータをその領域内に含むことがわかった。しかし、両手操作の結果においては、2つのタッチ感知領域が含むポインティング位置のデータの割合は同じであった。これらの結果について考察するため、図 3.11 に面積が  $80 \text{ mm}^2$  のときの各設計手法によるタッチ感知領域をポインティング位置の分布とあわせて示す。図 3.11 (a) に示す片手操作 A の結果より、ポインティング位置はターゲットの中心から右下方向に偏って分布していることがわかる。また、図 3.11 (b) に示す片手操作 B の結果では、ポインティング位置の分布がターゲットの中心に対して右下に偏っていることが確認できる。これらのことより、片手操作 A, B では、特定の方向に分布が偏るポインティング位置のデータに対して楕円の長軸方向でカバーできたために、正方形によるタッチ感知領域よりも多くのポインティング位置のデータを領域内に含むことができたと考えら

表 3.2 タッチ感知領域内に含まれるポインティング位置のデータ数の割合

Table 3.2 Rate of number of pointing position contained in the touch-sensitive area

Operational method	Area: $25 \text{ mm}^2$		Area: $80 \text{ mm}^2$	
	Ellipse	Square	Ellipse	Square
One-handed operation A	76	69	97	91
One-handed operation B	85	81	100	97
Two-handed operation	76	73	97	97

Unit: %

れる。ちなみに、片手操作 A, B では、ディスプレイ左下（10行1列目）に表示されるターゲットにおいても右上方向にポインティング位置の分布が偏る傾向がみられており、楕円によるタッチ感知領域では正方形によるタッチ感知領域よりも多くのポインティング位置データを含む結果が同様に得られている。これらのことから、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対して、本研究で検討を行った楕円によるタッチ感知領域は正方形による設計手法よりも多くのポインティング位置をカバーできることがわかった。一方、表 3.2 に示す結果より、面積が  $80 \text{ mm}^2$  のときには両手操作における楕円のタッチ感知領域と正方形のタッチ感知領域が含むポインティング位置の割合は等しかった。これについて、図 3.11 (c) に示すポインティング位置とタッチ感知領域の関係をみてみると、操作方法 A, B とは異なり、特定の方向にポインティング位置が偏って分布するような傾向は確認されなかった。それ故、十字のターゲットの交点を中心として広がる正方形のタッチ感知領域においても、楕円によるタッチ感知領域と同等のポインティング位置をカバーでき

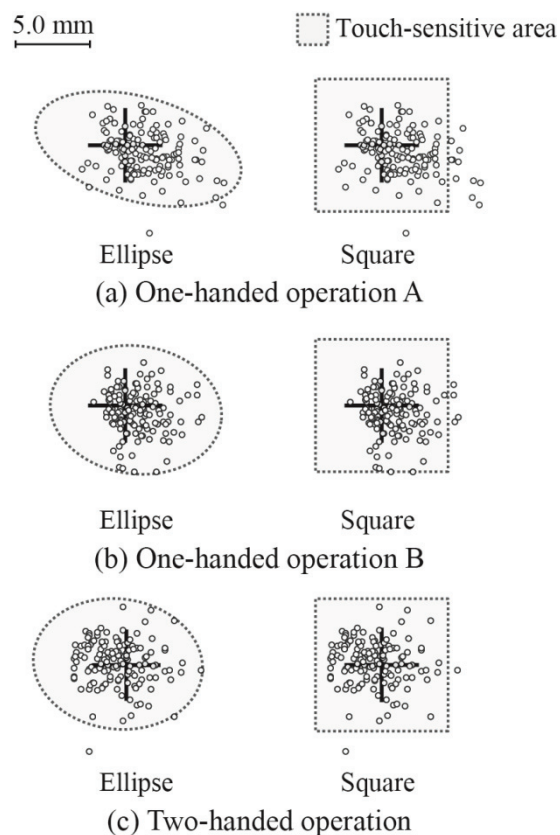


図 3.11 ポインティング位置分布とタッチ感知領域

Fig.3.11 Distribution of pointing position and touch-sensitive area

たと考えられる。

以上より、本章で検討を行った楕円によるタッチ感知領域の設計手法では、片手操作でみられる特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対して、正方形による設計手法よりも多くのポインティング位置のデータを領域内に含むことができた。このことから、楕円によるタッチ感知領域の設計手法では、限定的ではあるが、効率的にタッチ感知領域を設計できる可能性が示唆された。なお、楕円は平面を充填させることができない。そのため、本研究で検討を行った楕円によるタッチ感知領域は、オンスクリーンキーボードのようなディスプレイに敷き詰められたボタンなどに対しては適用範囲が限られる。一方で、アプリケーション内で単独に配置されるボタンなどに対しては特に有効であると考えられる。

また、ポインティング動作に対するパフォーマンスモデルとして Fitts の法則<sup>[3-9]</sup>がよく知られており、Mackenzie ら<sup>[3-10]</sup>が 2 次元空間での動作を対象として提案した拡張モデルは、マウスなどによるポインティング時間を高い精度で予測することができる。一方で、タッチパネルでのポインティング動作には適用が難しい<sup>[3-11]</sup>とされているが、ポインティング動作のモデルは GUI を設計する上で大変有用である。そのため、今後はタッチパネルを対象としたポインティング動作のモデル化に関する研究が必要となってくるであろう。

### 3.4 小括

本章では、タッチパネル携帯端末の操作性向上を目指し、片手操作と両手操作の双方におけるポインティング特性を明らかにすることを目的として実験を行った。さらに、実験により得られたポインティング特性に基づき、タッチ感知領域の設計手法に関して基礎的検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 片手操作と両手操作のいずれにおいても、ディスプレイ上の表示位置によってターゲットに対するポインティング位置の分布傾向は異なる。
- (2) 片手操作では、母指手根中手関節を基点とした円弧状の領域において、ポインティングの精度及び速さは向上する。一方で、母指の伸展・屈曲・内旋を伴う領域においては、ポインティングの精度及び速さは低下する。
- (3) 両手操作では、ディスプレイ上の表示位置によるポインティング精度の違いはみ



られないが、指の初期位置から遠い距離にあるターゲットに対して、ポインティング時間は長くなる。

- (4) ポインティング位置の分布データに基づいて検討を行った楕円によるタッチ感知領域の設計手法では、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対して、正方形による設計手法よりも効率的にタッチ感知領域を設計できる可能性が示唆された。

以上の通り、タッチパネル携帯端末を対象として片手操作と両手操作の双方におけるポインティング特性を明らかにすることができた。本実験で得られた知見は、第1章で述べたタッチパネル携帯端末の操作性に関する課題に対して、ポインティング特性に配慮した GUI 設計を行う際に有用であると考えられる。さらに、タッチパネルの操作特性に関する基礎的知見を用いて、効率的な GUI 設計を行うことのできる可能性が示唆された点も意義のあるものだと考える。

---

## 第4章

### 結論

- 4.1 本研究のまとめ
- 4.2 本研究の意義
- 4.3 今後の展望

#### 概要

第4章では、第2章と第3章で述べた研究成果を統括し、本研究によって得られた知見と意義についてまとめるとともに、今後の展望について論ずる。これまでに、第1章で設定した研究課題に対して、第2章ではタブレット端末、第3章では携帯端末を対象とし、ヒトの操作特性に関する基礎的知見を得るために実施した実験について述べてきた。具体的に、第2章では、デジタル教科書として教育分野での活用が期待されているタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を評価した。また、第3章では、搭載デバイス別の市場シェアで最も高い割合を占める携帯端末について、GUIの設計指針に供する操作特性の基礎的知見を得ることを目指し、ポインティング特性を明らかにすることを目的として実験を行った。さらに、得られたポインティング位置の分布が楕円で近似的に表されることを示し、楕円によるタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討も行った。

以上のことから、本研究では、教育分野での活用が期待されるタブレット端末と、搭載デバイス別の市場で大部分を占める携帯端末について、それぞれの端末における操作性の課題を改善するために必要なヒトの操作特性を明らかにすることができた。

本研究で得た知見が、タッチパネルのハードウェア及びソフトウェアの設計に関わるデザイナーに活用され、ヒトの操作特性に配慮したデザインが施されることで、タッチパネルの操作性向上につながることを期待したい。

## 4.1 本研究のまとめ

本研究では、タッチパネルの操作性の向上を目指し、ヒトの操作特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした。具体的には、教育分野でデジタル教科書としての活用が期待されるタブレット端末と、搭載デバイス別の市場シェアの大部分を占める携帯端末について、それぞれの操作性に関する課題を設定し、各課題の改善に向けて必要不可欠となるヒトの操作特性を明らかにするための評価実験を行った。まず、タブレット端末の操作性に関する課題では、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を評価することを目的として実験を行った。次に、携帯端末の操作性に関する課題に対しては、GUI の設計指針に供する知見の獲得を目指し、タッチパネル携帯端末におけるポインティング特性を評価することを目的として実験を行った。そして、得られたポインティング特性の結果に基づき、タッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討を行った。

本論文の第1章では、序論として、本研究の背景と目的、タッチパネルの操作性に関する基礎的知見、本論文の構成について述べた。

第2章では、デジタル教科書として教育分野での活用が期待されているタブレット端末について、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に及ぼす影響を評価した。本実験では、指先の滑り易さが異なるディスプレイ表面を再現するために、まず指先の滑り易さが主観的に異なるフィルムを選定した。次に、指先の滑り易さを算術平均粗さ及び動摩擦係数により定量的に評価した。そして、選定したフィルムを用いてタブレット端末の操作性評価実験を行うことで、ディスプレイ表面の指先の滑り易さが操作性に及ぼす影響を調べた。その結果、フィルム表面の算術平均粗さが大きいほど動摩擦係数は小さくなり、反射防止性能をもつアンチグレアフィルムの動摩擦係数は、耐擦傷性能をもつハードコートフィルムのおよそ3分の1であることがわかった。さらに、曲線をトレースする操作では適切な範囲の摩擦抵抗を表面に施すことによって操作の正確性が向上し、斜線や直線をトレースする操作や指先の止め・方向転換を伴う操作では表面の摩擦抵抗を大きくすることで操作の正確性は向上することが明らかになった。本実験で得られた知見は、タッチパネルディスプレイやディスプレイ保護フィルムの表面設計に際して参考になるとともに、指先の滑り易さに配慮したソフトウェアの設計指針を示すものであると言える。

第3章では、搭載デバイス別の市場シェアで最も高い割合を占める携帯端末につい

て、GUI の設計指針に供する操作特性の基礎的知見を得ることを目指し、ポインティング特性を明らかにすることを目的として実験を行った。本実験では、携帯端末の操作方法に着目し、片手操作と両手操作の双方におけるポインティング位置の分布、ポインティング精度、ポインティング時間の各指標を計測した。その結果、いずれの操作方法においても、ディスプレイ上の表示位置によってターゲットに対するポインティング位置の分布傾向は異なることが明らかになった。また、片手操作では、母指手根中手関節を基点とした円弧状の領域において、ポインティングの精度及び速さは向上することがわかった。一方で、母指の伸展・屈曲・内旋を伴う領域においては、ポインティングの精度及び速さは低下することが明らかになった。そして、両手操作では、ディスプレイ上の表示位置によるポインティング精度の違いはみられないが、指の初期位置から遠い距離にあるターゲットに対して、ポインティング時間は長くなることがわかった。以上のことから、タッチパネル携帯端末を対象として片手操作と両手操作の双方におけるポインティング特性を明らかにすることができた。そして、得られたポインティング特性の結果に基づき、タッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討も行った。具体的には、評価実験によって得られたポインティング位置の分布が楕円で近似的に表されることを示し、楕円によるタッチ感知領域の設計手法を検討した。さらに、タッチ感知領域の形状として楕円と正方形に着目し、ポインティング位置のデータ数が含まれる割合を評価指標として、両者を比較した。その結果、ポインティング位置の分布データに基づいて検討を行った楕円によるタッチ感知領域の設計手法では、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対して、正方形による設計手法よりも効率的にタッチ感知領域を設計できる可能性が示唆された。

第4章では、結論として、第2章と第3章で得られた研究成果を統括し、本研究によって得られた知見と意義についてまとめた。

以上、本研究では、教育分野での活用が期待されるタブレット端末と、搭載デバイス別の市場で大部分を占める携帯端末について、それぞれの端末における操作性の課題を改善するために必要なヒトの操作特性を明らかにすることができた。具体的には、タブレット端末において、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さの違いが操作性に影響を及ぼすことを明らかにし、両者の関係を定量的に評価することができた。また、携帯端末において問題となっていたミスタップが頻繁に生じるという課題に対し、GUI を設計する際に参考となるポインティング特性の基礎的知見を示すことがで

きた。さらに、得られたポインティング位置の分布に応じて楕円のタッチ感知領域を検討し、特定の方向にポインティング位置の分布が偏るような特徴をもつターゲットに対しては、正方形による設計手法よりも効率的にタッチ感知領域を設計できる可能性を示すことができた。

このように、タッチパネルの操作性に関する基礎的な知見を示した本研究は、近年あらゆる分野に応用が進むタッチパネルについて、ヒトとの親和性を高め、より使い易い入力インタフェースとして操作性を向上させることに大きく貢献するものであると考える。

## 4.2 本研究の意義

本研究は、入力インタフェースとして我々の生活のあらゆる場面で活用されているタッチパネルに関して、ユーザがより正確かつ効率的に操作できるインタフェースとして利用できるよう、端末やソフトウェアの設計時に参考となるヒトの操作特性に関する基礎的な知見を示したものである。近年、タッチパネルは、個人が使用する情報端末への搭載のみならず、駅の券売機や銀行の ATM などの公共情報端末、産業用モニタ、教育現場で本格的な導入が検討されているデジタル教科書や電子黒板、医療現場で用いられる電子カルテや医療モニタといったあらゆるデバイスへの搭載が急速に進んでいる。これらタッチパネルの操作性向上を指向した本研究は、入力インタフェースとしてタッチパネルを使用する際のエラーを減少させ、操作の効率性を向上させるための設計指針を示すことができた点において、社会的にも非常に意義のあるものだと考える。

これまで、タッチパネルの端末やソフトウェアの設計における人間工学的な配慮については、デザイナーの裁量に依存する部分が大きかった。各企業における設計ガイドライン<sup>[4-1]</sup>や人間中心設計に関する IS<sup>[4-2]</sup>も制定されつつあるが、タッチパネルが公共情報端末や教育分野などに広く応用されるようになった昨今の状況を鑑みれば、操作性に関する一般的な基礎的な知見を示し、インタフェースデザインに対する普遍的な要求を満足させることは UI の観点からも必要不可欠な研究課題である。このような観点から、本研究の学術的な意義は高いと考える。

本研究で得た知見が、タッチパネルのハードウェア及びソフトウェアの設計に関わるデザイナーに活用され、ヒトの操作特性に配慮したデザインが施されることで、タッチパネルの操作性向上につながることを期待したい。

### 4.3 今後の展望

第2章では、ディスプレイの表面性状による指先の滑り易さがタッチパネルタブレット端末の操作性に及ぼす影響を評価した。ここでは、いかに正確かつ速く操作できるかを調べるために、エラー率と速さを指標として評価を行った。しかし、フィルムメーカーの技術者からのヒアリングを通じて、タッチパネルやディスプレイ保護フィルムの表面設計では、フィルムに指先で触れた際の“つるつる”や“さらさら”といった触感も、操作性と同じく重要な設計指針になることがわかった。そのため、今後はディスプレイの表面性状と触感の関係を官能検査を用いて解析することで、両者の関係についても明らかにし、ディスプレイ表面の設計に関する知見をさらに充実させていく必要があると考える。

第3章では、タッチパネル携帯端末を対象として、片手操作と両手操作の双方におけるポインティング特性の評価を行った。さらに、得られたポインティング位置の分布に基づいて楕円によるタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討を行った。ここでは、市場で広く普及している 3.5 inch の携帯端末を実験装置として評価を行い、母指の伸展や屈曲といった関節動作がポインティング特性に影響を及ぼすことを確認した。しかし、端末のサイズによって操作時の関節動作は異なってくることが考えられ、それに伴ってポインティング特性も変化することが予想される。また、片手で筐体を持って母指で操作するといった操作方法自体も変化してくる可能性も考えられる。今後は、筐体サイズの大小による操作方法の変化といった基礎的なデータを調査し、ポインティング特性に関する普遍的な知見を拡充させていくことで、あらゆる操作場面においても一定の操作性を確保することのできるインタフェースデザインの設計が可能になると考えられる。

また、マウスなどのデバイスを用いたポインティング動作に対するパフォーマンスモデルとして Fitts の法則<sup>[4-3]</sup>がよく知られており、Mackenzie ら<sup>[4-4]</sup>が 2 次元空間での動作を対象として提案した拡張モデルではポインティング時間を高い精度で予測することができる。一方で、タッチパネルでのポインティング動作には適用が難しい<sup>[4-5]</sup>とされている。これについては、Fitts の法則が触覚などから得られるフィードバック情報処理までを含んだモデルであることが原因であると言われている。つまり、タッチパネルのポインティング操作では触覚フィードバックをほとんど得ることができないため、対象としている運動系が異なる Fitts の法則にはうまく当てはまらないためである。しかし、ポインティング動作のモデルは、構築した GUI デザイン上でユー



ザのパフォーマンスをある程度予測することができる点において、非常に有用なものである。そのため、タッチパネルを対象としたポインティング動作のモデル化に関する研究についても今後は重要となってくるであろう。

さらに、タッチパネルは、指先で触れるディスプレイ上に凹凸や触覚上の手掛かりがなく、操作の大半を視覚からの情報に頼らざるを得ないため、視覚障害者の使用が限定されてしまうといった問題がある。この問題は、タッチパネルが普及し始めた当初から指摘されており、その問題改善に向けては様々な取り組みが行われている。例えば、郵便局に設置されている ATM (図 4.1 参照) では現金の引き出しや預け入れといった基本操作をタッチパネルの操作部で行うが、それに加えて視覚障害者へのアクセシビリティに配慮した様々な設計がなされている。具体的には、数字入力のためのハードウェアキーボードや、残高を点字ピンディスプレイで表示するシステム、音声による操作案内といった設計が施されている (図 4.2 参照)。このような視覚障害者対応 ATM は、郵便局 ((株)ゆうちょ銀行) では 100%の導入率を実現できている一方、銀行や信用金庫などでの導入率は 2013 年現在で約 72%であり、100%の導入率に向けて対応が急がれている<sup>[4-6]</sup>。このような事例にみられるように、公共情報端末と



図 4.1 ゆうちょ銀行で使用される ATM

Fig.4.1 ATM used in Japan Post Bank Co., Ltd.



して使用されるタッチパネルの UI においては、残存する他の感覚器を利用した入力システムは非常に有効であると考えられる。

また、タッチパネルのハードウェアに音声や触覚によるフィードバックを組込むことで、視覚障害者のタッチパネル利用を支援する研究も盛んに行われている。矢入ら<sup>[4-7, 4-8]</sup>は、音を振動に変換して指先にフィードバックを提示することで、文字入力や形状知覚を補助する FVFS (The fingertip vibration feedback system) を開発し、視覚障害者のタッチパネル利用支援システムとしての有効性を示している。また、iPhone の UI には障害者（視覚障害者を含む）へのアクセシビリティが標準的に備わっている。具体的には、視覚障害者へのアクセシビリティとして、テキストや操作結果を音声で読み上げる“VoiceOver”や、音声による操作を可能とする“Siri”，ディスプレイ色の反転などの機能が組み込まれている。しかし、音声による文字入力エラーや漢字の変換ミスといった技術的課題も残されており、今後の改善が待たれる。

一方、視覚障害者向けのタッチパネル UI を考える上では、晴眼者との操作方法の



図 4.2 ゆうちょ銀行で使用される ATM の視覚障害者に対するアクセシビリティ

Fig.4.2 Accessibility for people with visually impaired in ATM used in Japan Post Bank Co., Ltd.

違いにも着目する必要があると考えられる。図4.3に示すのは、iPhoneの“VoiceOver”を使用した視覚障害者のタッチパネル操作の様子である。片手で筐体を持ち、もう一方の手でスワイプしてメモのアプリケーションを選択し、ダブルタップによって起動させた後に、音声による文字入力を行っている。入力された文字は、一部で漢字の誤変換などがみられたが、概ね意図した文章を作成することができている。ヒアリングを行った視覚障害者からは、個人用のメモとして利用する場合には十分な変換率だが、仕事に関わるメール作成の用途では使用していないとのコメントを得た。このような事例にみられるように、個人用情報端末として使用されるタッチパネルでは、機能の適用限界を把握した上で使用することで、視覚障害者の利用範囲は広がると考える。障害の有無による情報格差問題の改善に向けて、多様な操作上のニーズをもつ視覚障害者の要求を満たすために、UI技術の発展が急がれる。

以上で述べてきたように、タッチパネルにはまだ多くの課題が残されている。障害者や高齢者までを含めた多くのユーザにとって、タッチパネルが使い易い入力インタフェースとなるように、本論文で示した知見が当該領域の発展に寄与すれば本望である。

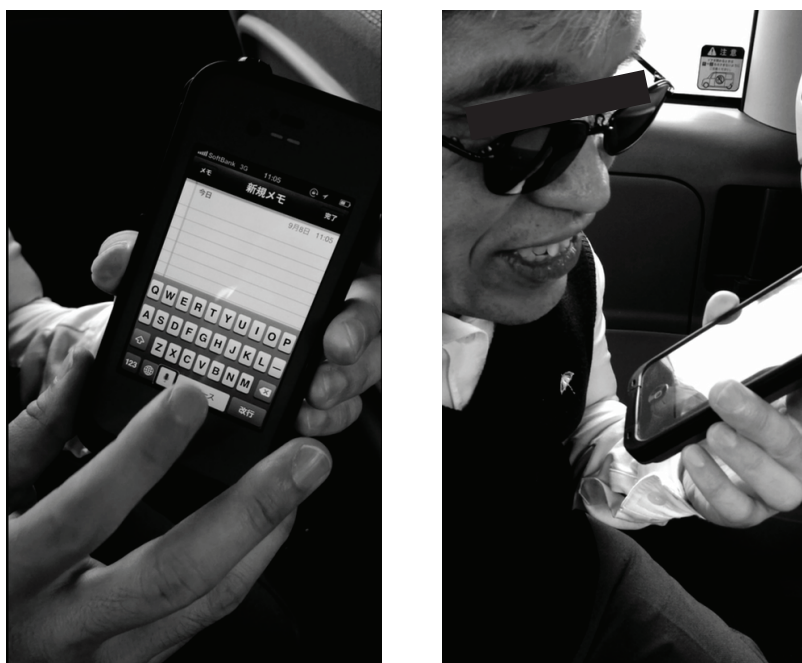


図4.3 視覚障害者のタッチパネル操作の様子（本人の許可を得て掲載）

Fig.4.3 Operation of touch-sensitive screen by person with visually impaired

---

## 参考文献

### 第 1 章 序論

- [1-1] International Organization for Standardization: 2007 ISO9241-400, Ergonomics of human- system interaction – Part 400: Principales and requiremetns for physical input devices.
- [1-2] Johnson, E.A.: 1965 Touch Display – A novel input/output device for computers. Electronics Letters, Vol. 1, No. 8, pp. 219-220.
- [1-3] Orr, N.W., Hopkins, V.D.: 1968 The role of touch display in air traffic control. The Controller, Vol. 7, pp. 7-9.
- [1-4] 三谷雄二：2001 タッチパネルの基礎と応用. テクノタイムズ社.
- [1-5] 河村正行：2004 よくわかるタッチパネル—新世代のマンマシン・インタフェース—. 電波新聞社, 13-26 頁.
- [1-6] Mary Bellis: Who Invented Touch Screen Technology? (<http://inventors.about.com/od/tstartinventions/a/Touch-Screen.htm>)
- [1-7] Elo Touch Solutions, Inc.: History of Elo (<http://www.elotouch.com/aboutelo/history/>)
- [1-8] Beck, F., Stumpe, B.: 1976 Two devices for operator interaction in the central control of the new CERN accelerator, CERN 73-6, SPS.
- [1-9] CERN: The first capacitative touch screens at CERN (<http://cerncourier.com/cws/article/cern/42092>)
- [1-10] Hewlett-Packard Development Company, L.P., (<http://www8.hp.com/jp/ja/home.html>)
- [1-11] Guifx, LLC.: Touch screens that changed the world. (<http://blog.guifx.com/2010/01/27/touchscreens-that-changed-the-world/>)
- [1-12] Smartphone / Touchscreen phone - Basic Patent | Original Patent | First Model. (<http://thinkpat.blogspot.jp/2012/04/smartphone-touchscreen-phone-basic.html>)
- [1-13] Apple Inc. (<http://www.apple.com/jp/>)
- [1-14] Amazon.com, Inc. ([http://www.amazon.co.jp/ref=gno\\_logo](http://www.amazon.co.jp/ref=gno_logo))
- [1-15] Google Inc. (<http://www.google.co.jp/nexus/>)

- 
- [1-16] Microsoft Corp. (<http://www.microsoft.com/surface/ja-JP>)
- [1-17] 西川武士, 西野利晴, 板倉義雄, 土屋健一, 大井祥子: 2012 タッチパネル技術開発・市場・アプリケーションの動向. オーム社, 11-50 頁, 155-190 頁.
- [1-18] ディスプレイサーチ: 2012 Touch panel market anysis 2012.
- [1-19] 三谷雄二, 板倉義雄: 2011 月刊ディスプレイ別冊 新・タッチパネル実用講座. テクノタイムズ社.
- [1-20] 越石健司, 黒澤 理: 2011 タッチパネルがわかる本. オーム社, 1-28 頁.
- [1-21] 林 哲史: 2012 タッチ・パネル最前線 2013-2014. 日経エレクトロニクス, 7-37 頁, 185-223 頁.
- [1-22] 矢野耕平: 2010 iPad で教育が変わる. 毎日コミュニケーションズ.
- [1-23] 古市昌一: 2009 タッチパネル方式によるヒューマンインタフェースの研究最前線. 情報処理, 50 巻 4 号, 327-333 頁.
- [1-24] 越石健司, 黒澤 理: 2009 要点解説 タッチパネル. 工業調査会, 35-64 頁.
- [1-25] 三谷雄二, 板倉義雄: 2009 月刊ディスプレイ別冊 最新タッチパネル技術. テクノタイムズ社, 19-51 頁.
- [1-26] 三谷雄二: 2009 タッチパネル—開発技術の進展—. シーエムシー, 157-181 頁.
- [1-27] Nielsen, J./ 篠原稔和 (監訳): 2011 ユーザビリティエンジニアリング原論—ユーザーのためのインタフェースデザイン—. 東京電機大学出版局, 19-38 頁.
- [1-28] ユーザビリティハンドブック編集委員会: 2007 ユーザビリティハンドブック. 共立出版, 1-64 頁, 307-704 頁.
- [1-29] 黒須正明, 伊東昌子, 時津倫子: 2000 ユーザ工学入門. 共立出版, 1-29 頁.
- [1-30] Norman, D.A./ 野島久雄 (訳): 2009 誰のためのデザイン? 認知科学者のデザイン原論. 新曜社, 307-359 頁.
- [1-31] Raskin, J./ 村上雅章 (訳): 2002 ヒューメイン・インタフェース 人に優しいシステムへの新たな指針. ピアソン・エデュケーション, 1-9 頁.
- [1-32] Microsoft Corp.: KINECT for Windows (<http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>)
- [1-33] 松本信義, 森 啓, 大和淳司: 2011 身体尺から見直すタッチパネル・インタフェース—ハードウェアの模倣からソフトウェアの柔軟さ—. 映像情報メデ
-

- ィア学会技術報告, 35 卷 36 号, 89-94 頁.
- [1-34] International Organization for Standardization: 2000 ISO9241-9, Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) –Part9: Requirements for non-keyboard input devices.
- [1-35] 日本規格協会 : 2007 日本工業規格 JIS Z 8519 人間工学—視覚表示装置を用いるオフィス作業—非キーボードの入力装置の要求事項.
- [1-36] Albinsson, P.A., Zhai, S.: 2003 High precision touch screen interaction. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System, pp. 105-112.
- [1-37] 岩淵正樹, 筧康明, 苗村健 : 2008 画面タッチ入力可能な透明インタラクティブディスプレイ. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集, 1151-1156 頁.
- [1-38] Strong, R.M., Troxel, D.E.: 1970 An electrotactile display. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 72-79.
- [1-39] 山本晃生, 石井利樹, 樋口俊郎 : 2004 摩擦力制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ. 計測自動制御学会論文集, 40 卷 11 号, 1132-1139 頁.
- [1-40] 新井史人, 岩田直也, 福田敏男 : 2005 タッチパネル入力機器のためのクリック感を有する透明スイッチ機構. 日本機械学会 (C 編), 71 卷 706 号, 193-199 頁.
- [1-41] 久宗周二, 岸田考弥 : 1997 自動販売機利用時の人間行動 (第 4 報) —新型自動券売機利用者の行動観察調査—. 日本人間工学会大会講演集, 33 卷, 372-373 頁.
- [1-42] Albert, A.E.: 1982 The effect of graphic input devices on performance in a cursor positioning task. Proceedings of the Human Factors Society 26th Annual Meeting, pp. 54-58.
- [1-43] Sears, A., Shneiderman, B.: 1991 High precision touchscreens: design strategies and comparisons with a mouse. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 34, No. 4, pp. 593-613.
- [1-44] Potter, R.L., Weldon, L.J., Shneiderman, B.: 1988 Improving the accuracy of touch screens: an experimental evaluation of three strategies. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 27-32.



- 
- [1-45] 黒川隆夫, 久世通由, 森本一成: 1996 タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント特性およびそれに対する Fitts の法則の適合性. *Progress in Human Interface*, 5 巻, 5-12 頁.
- [1-46] 西村崇宏, 瀬尾明彦, 土井幸輝: 2010 可操作性を用いたタッチパネルの表示面傾斜角度がその操作性に及ぼす影響の評価. *日本経営工学会論文誌*, 61 巻 1 号, 23-30 頁.
- [1-47] 西村崇宏, 瀬尾明彦, 土井幸輝: 2011 タッチパネルの設置高さ及び表示面傾斜角度が操作性と上肢負担に与える影響について. *日本機械学会論文集 (C 編)*, 77 巻 778 号, 132-141 頁.
- [1-48] 高橋里奈, 村田厚生: 2009 タッチパネル操作における利き手と非利き手のエラー特性の違いについて—若年者と高齢者の比較— (短報). *人間工学*, 45 巻 3 号, 173-177 頁.
- [1-49] 村田厚生, 松原和志: 2012 タッチパネル操作におけるペンと指の入力の特性—若年者と高齢者の比較— (短報). *人間工学*, 48 巻 6 号, 341-345 頁.
- [1-50] 駒崎雅信, 出澤正徳: 2004 タッチモニタにおけるヒトのポインティング特性に対する加齢と性別の影響. *福祉工学シンポジウム講演論文集*, 141-144 頁.
- [1-51] 西村崇宏, 瀬尾明彦, 土井幸輝: 2011 タッチパネル操作時の手による画面の遮蔽計測と上肢負担. *日本経営工学会論文誌*, 61 巻 6 号, 325-336 頁.
- [1-52] 坂本牧葉, 須藤秀紹: 2011 タッチパネルインタフェースの色彩デザインの印象と操作時間及び正確性との関係. *日本感性工学会論文誌*, 10 巻 4 号, 543-550 頁.
- [1-53] Hall, A.D., Cunningham, J.B., Roache, R.P., Cox, J.W.: 1988 Factors affecting performance using touch-entry systems: tactual recognition fields and system accuracy. *Journal of Applied Psychology*, Vol. 73, No. 4, pp. 711-720.
- [1-54] 中西美和, 福井教洋, 岡田有策: 2011 産業機械操作における触覚フィードバックの活用可能性に関する研究. *ヒューマンファクターズ*, 16 巻 2 号, 124-132 頁.
- [1-55] 三樹弘之: 2004 ユニバーサルデザインの取組み. *沖テクニカルレビュー*, 71 巻 3 号, 38-41 頁.
- [1-56] Pekka, P., Amy, K.K., Benjamin, B.B.: 2006 Target size study for one-handed thumb use on small touchscreen devices. *Proceedings of the 8th International C*
-



- onference on Human-Computer Intercation with Mobile Devices and Services, p p. 203-210.
- [1-57] 松浦吉祐, 郷 健太郎 : 2007 小型タッチ画面における片手親指の操作特性. ヒューマンインタフェース学会論文誌, 9 巻 4 号, 455-461 頁.
- [1-58] 西村崇宏, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2011 スイッチのサイズ及び形状が抵抗膜方式タッチパネル携帯端末の操作性に及ぼす影響について. 日本機械学会論文集 (C 編) , 77 巻 780 号, 84-94 頁.
- [1-59] Lin, C.J., Wu, C.: 2013 Reactions, accuracy and response complexity of numerical typing on touch screens. *Ergonomics*, Vol. 56, No. 5, pp. 818-831.
- [1-60] 前原孝章, 川元麻衣子, 石田樹生 : 2011 2015 年の電子書籍 現状と未来を読む. 東洋経済新報社, 75-97 頁.
- [1-61] 内閣府高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (IT 戦略本部) : 2012 新たな情報通信技術戦略, 49-52 頁.
- [1-62] デジタル教科書教材協議会 : 2011 DiTT 第一提言書 改訂版.
- [1-63] 森本一成 : 2010 デジタルメディアが教育に潤いを与える. ヒューマンインタフェース学会誌, 12 巻 4 号, 236 頁.
- [1-64] 澤田伸一, 板東宏和, 馬場康宏, 小野 和 : 2004 大画面とタッチパネルの環境に適した幼児向けソフトウェアの試作. 情報処理学会研究報告, 13 巻, 22-32 頁.
- [1-65] 株式会社コクヨバッファローサプライ : iPad (2012 年発売モデル) ・ iPad2 両対応液晶保護フィルム イージーフィット/スムーズタッチタイプ BSEFIPD12 (<http://buffalo-kokuyo.jp/>) .
- [1-66] 株式会社 D2C : 2012 モバイル利用動向調査 (2012 年 8 月調査) . (<http://www.d2c.co.jp/>)
- [1-67] Siek, K.A., Rogers, Y., Connelly, K.H.: 2005 Fat finger worries: how older and younger users physically interact with PDAs. *Proceedings of the 2005 IFIP T C13 International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 267-280.
- [1-68] Karlson, A.K., Bederson, B.B., Contreras-Vidal, J.L.: 2006 Understanding single-handed mobile device interaction. University of Maryland HCIL-2006-02.

---

## 第2章 タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面性状が操作性に及ぼす影響

- [2-1] 日本規格協会：2001 日本工業規格 JIS B 0601 製品の幾何特性仕様（GPS）—表面性状：輪郭曲線方式—用語，定義及び表面性状パラメータ．
- [2-2] 笹田 直：2000 生体の運動とトライボロジー．トライボロジスト，45 巻 2 号，101-107 頁．
- [2-3] 笹田 直，井上恵一：2002 ヒト皮膚の摩擦特性（第 4 報）—手指の摩擦異方性に対する指紋の役割—．千葉工業大学研究報告 理工編，49 巻，43-47 頁．
- [2-4] 嶋脇 聡，酒井直隆：2007 ヒト指尖部の摩擦特性に関する研究．日本機械学会論文集（C 編），74 巻 739 号，166-172 頁．
- [2-5] International Organization for Standardization: 2000 ISO9241-9, Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) –Part9: Requirements for non-keyboard input devices.
- [2-6] 三谷雄二，板倉義雄：2011 月刊ディスプレイ別冊 新・タッチパネル実用講座．テクノタイムズ社，73-88 頁．
- [2-7] 露崎謙治：2012 弱視教育に有効と思われる先端機器の活用について—デジタル教科書・マルチメディアデジター・タブレット端末の有効性—．弱視教育，49 巻 4 号，1-5 頁．

## 第3章 タッチパネル携帯端末におけるポインティング特性の評価とタッチ感知領域の設計手法に関する基礎的検討

- [3-1] 通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所：1994 設計のための人体計測マニュアル．人間生活工学研究センター，78 頁．
- [3-2] Potter, R.L., Weldon, L.J., Shneiderman, B.: 1988 Improving the accuracy of touch screens: an experimental evaluation of three strategies. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 27-32.
- [3-3] 西村崇宏，瀬尾明彦，土井幸輝：2011 タッチパネル操作時の手による画面の遮蔽計測と上肢負担．日本経営工学会論文誌，61 巻 6 号，325-336 頁．
- [3-4] Nielsen, J./ 篠原稔和（監訳）：2011 ユーザビリティエンジニアリング原論—ユーザーのためのインタフェースデザイナー—．東京電機大学出版局，161-

- 176 頁.
- [3-5] International Organization for Standardization:2000 ISO9241-9, Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) –Part9: Requirements for non-keyboard input devices.
- [3-6] 伊藤謙治, 桑野園子, 小松原明哲 : 2012 人間工学ハンドブック (普及版) . 朝倉書店, 272-284 頁.
- [3-7] Card, S.K., English, W.K., Burr, B.J.:1978 Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT. *Ergonomics*, Vol. 21, No. 8, pp. 601-613.
- [3-8] Apple Inc.: 2012 iOS Human Interface Guidelines. (<https://developer.apple.com/>)
- [3-9] Fitts, P.M.: 1954 The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J. Experimental Psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381-391.
- [3-10] Mackenzie, I.S., Buxton, W.: 1992 Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 219-226.
- [3-11] 黒川隆夫, 久世通由, 森本一成 : 1996 タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント特性およびそれに対する Fitts の法則の適合性. *Progress in Human Interface*, 5 巻, 5-12 頁.

#### 第 4 章 結論

- [4-1] Apple Inc.: 2012 iOS Human Interface Guidelines. (<https://developer.apple.com/>)
- [4-2] International Organization for Standardization: 2010 ISO9241-210, Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human- centred design for interactive systems.
- [4-3] Fitts, P.M.: 1954 The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J. Experimental Psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381-391.
- [4-4] Mackenzie, I.S., Buxton, W.: 1992 Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 219-226.
- [4-5] 黒川隆夫, 久世通由, 森本一成 : 1996 タッチ画面インタフェースにおける人間のポイント特性およびそれに対する Fitts の法則の適合性. *Progress in Human Interface*, 5 巻, 5-12 頁.

- [4-6] 金融庁：2013 障がい者等に配慮した取組みに関するアンケート調査結果.  
(<http://www.fsa.go.jp/index.html>)
- [4-7] Noguchi, T., Fukushima, Y., Yairi, I.E.: 2011 Evaluating information support system for visually impaired people with mobile touch screens and vibration. Proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, pp. 243-244.
- [4-8] 植松洋亮, 野口嵩人, 矢入郁子：2013 視覚障害者タッチパネルインタラクションのための指先振動フィードバックシステム. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2013 論文集, 867-874 頁.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なご指導とご教示を賜りました早稲田大学人間科学学術院 藤本浩志教授に深く感謝し、心より御礼申し上げます。また、博士後期課程の3年間、素晴らしい研究環境を与えて頂いただけでなく、研究活動以外の面においても温かくご指導、ご鞭撻を賜りましたこと、重ねて深く感謝し、御礼申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり、御忙しい中貴重なお時間を割いて頂き、副査として適切なご指導、ご検討を賜りました早稲田大学人間科学学術院 野嶋栄一郎教授、早稲田大学人間科学学術院 百瀬桂子准教授に深く感謝致します。

そして、首都大学東京在学時から現在に至るまでの6年間、公私に渡って多大なご指導、ご鞭撻を賜りました国立特別支援教育総合研究所教育情報部 土井幸輝主任研究員に厚く感謝申し述べます。熱心にご指導頂いた日々は、私の人生のかけがえのない財産となりました。重ねて厚く御礼申し上げます。

本論文は、博士後期課程における研究成果をまとめたものです。博士後期課程1年時には、文部科学省グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」（拠点代表：早稲田大学創造理工学研究科 藤江正克教授）にリサーチ・アシスタントとして参画させて頂きました。本プログラムを通じて、早稲田大学理工学術院 藤江正克教授、早稲田大学理工学術院 高西淳夫教授、早稲田大学理工学術院 菅野重樹教授、早稲田大学理工学術院 小林哲則教授をはじめとする諸先生方には機械工学的な観点からご指導、ご鞭撻を賜りました。深く感謝申し上げます。また、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究（A）「全身協調動作を誘発する福祉支援ロボットの制御手法の開発」におきまして、早稲田大学理工学術院 藤江正克教授、早稲田大学スポーツ科学学術院 彼末一之教授、大阪工業大学工学部 赤澤堅造教授（大阪大学名誉教授）には熱心にご指導を頂きました。記して感謝の意を表します。

そして、フィルムの提供などでご協力を頂いた株式会社信栄代表取締役社長 伊藤重友様、同社取締役営業部長 伊藤憲治様、パナック株式会社機能材料営業部部長 多田和則様、同社同部副部長 町田和男様に深く感謝申し上げます。また、フィルム加工に関して適切なお助言を頂きました松山テクノロジ機能フィルム加工技術研究所代表 松山忠巳様、東レフィルム加工株式会社技術部長 井上敬二郎様、株式会社きもと業務部 横井博様に厚く謝意を申し述べます。

さらに、本研究に関する実験にご協力頂き、共に遂行して頂いた早稲田大学人間科

学部 平松寅彦氏，早稲田大学人間科学部 黒澤昌宏氏に心より感謝致します。

そして，同時期に博士後期課程へ進学し，互いに切磋琢磨できた首都大学東京大学院システムデザイン研究科 菅間敦氏，早稲田大学大学院創造理工学研究科 中島康貴氏，早稲田大学大学院スポーツ科学研究科 中川剣人氏に深く感謝致します。苦楽を共にした日々は，一生忘れられない思い出となりました。また，先輩，同輩，後輩の関係にこだわらず，研究について有意義な議論をして頂いた藤本研究室の皆様，グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」RA，研究助手の皆様にも深く感謝致します。

また，学会や研究会などで貴重なご意見を頂きました研究者の皆様，関係者の皆様，研究活動を応援して下さり，いつも温かく励まして頂いた友人や先輩方に心より感謝申し上げます。そして，本研究の実験に対してご協力を頂きました多くの実験参加者の方々に感謝致します。

本研究の一部は，文部科学省グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」，日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費，課題番号 24-3427）の助成を受けております。記して感謝の意を表します。

最後に，筆者の研究活動を応援し，いつも支えてくれた両親と妹に心より感謝致します。

2014年1月29日

西村崇宏



## 研究業績一覧

2014年1月29日現在

### (1) 本研究に関連する業績

#### 学術論文

- [1] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志 : 2013 タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面特性が操作性に及ぼす影響. 日本感性工学会論文誌, 12巻3号, 431-439頁.
- [2] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志 : 2014 タッチパネル携帯端末の操作方法がポインティング特性に及ぼす影響. バイオメカニズム, 22巻 (印刷中)

#### 国内学会発表

- [1] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志 : 2013 静電容量方式タッチパネル携帯端末の操作方法がポインティング特性に及ぼす影響. 第23回バイオメカニズムシンポジウム予稿集前刷, 505-514頁.
- [2] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志 : 2013 タッチパネルタブレット端末のディスプレイ表面の指先の滑り易さと操作性の関係. 第15回日本感性工学会大会予講集, C36.
- [3] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志 : 2013 静電容量方式タッチパネル携帯端末の操作性向上に寄与するポインティング特性の評価. ヒューマンインタフェースシンポジウム2013論文集, 861-862頁.

---

## (2) 本研究以外の業績

### 学術論文

- [1] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2010 可操作性を用いたタッチパネルの表示面傾斜角度がその操作性に及ぼす影響の評価. 日本経営工学会論文誌, 61 巻 1 号, 23-30 頁.
- [2] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝, 大島勇輝 : 2010 荷物運搬作業時の階段昇降動作における身体負担特性の評価. 日本経営工学会論文誌, 61 巻 3 号, 107-115 頁.
- [3] 大塚真言, **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2010 ピンコネクタ差し込み作業における作業位置と身体負担の関係. 日本経営工学会論文誌, 61 巻 5 号, 275-283 頁.
- [4] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2011 タッチパネル操作時の手による画面の遮蔽計測と上肢負担. 日本経営工学会論文誌, 61 巻 6 号, 325-336 頁.
- [5] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2011 タッチパネルの設置高さ及び表示面傾斜角度が操作性と上肢負担に与える影響について. 日本機械学会論文集 (C 編), 77 巻 778 号, 132-141 頁.
- [6] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2011 スイッチのサイズ及び形状が抵抗膜方式タッチパネル携帯端末の操作性に及ぼす影響について. 日本機械学会論文集 (C 編), 77 巻 780 号, 84-94 頁.
- [7] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝, 平松大明 : 2011 荷物運搬作業における取り扱い物の重さと作業後の重さ感覚の関係. 日本感性工学会論文誌, 10 巻 4 号, 481-487 頁.
- [8] 土井幸輝, **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 串山久美子, 馬場哲晃 : 2012 ヒト手掌部における温度感覚特性及び識別特性の評価. 日本感性工学会論文誌, 11 巻 3 号, 419-425 頁.
- [9] **西村崇宏**, 唐澤洋之, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2012 ヒト手掌部での温度感覚による仮現運動において温度刺激の提示時間と SOA が発生率に及ぼす影響の評価. 日本感性工学会論文誌, 11 巻 3 号, 475-481 頁.
- [10] 土井幸輝, **西村崇宏**, 藤本浩志, 和田勉, 田中良広, 澤田真弓, 大内進, 金子健, 金森克浩 : 2014 紫外線硬化樹脂点字のマス間隔比が触読性に及ぼす

- 影響. 国立特別支援教育総合研究所研究紀要, 41 巻 (印刷中)
- [11] 土井幸輝, 菅間敦, **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 井野秀一, 布川清彦, 小菅一彦 : 2014 アラミド繊維強化プラスチック製の軽量白杖の作製と身体負担軽減効果の実験的検証. 日本感性工学会論文誌, 13 巻 2 号 (印刷中)

#### 査読付国際会議

- [1] Hiroki Minami, **Takahiro Nishimura**, Akihiko Seo, Kouki Doi: 2009 Development of a New Method for Ergonomic Usability and Workload Evaluation for Digital Human. Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, pp.1878-1883.
- [2] Kouki Doi, Atsushi Sugama, **Takahiro Nishimura**, Shuichi Ino, Kiyohiko Nunokawa, Masaaki Sugiyama, Kazuhiro Kosuge, Akito Miyazaki: 2012 Influence of the Weight of White Canes on Muscle Load of the Upper Limbs. Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, pp. 2019-2022.
- [3] Kouki Doi, Kensaku Soma, **Takahiro Nishimura**, Hiroshi Fujimoto, Susumu Ouchi, Yoshihiro Tanaka, Mayumi Sawada, Ken Kaneko, Katsuhiro Kanamori, Masaru Kawano, Tsutomu Wada: 2012 Development of Fabrication Technique for Accessible Design Pamphlet for Visually Impaired and Sighted Persons. Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, pp. 2050-2053.
- [4] Kouki Doi, Atsushi Sugama, **Takahiro Nishimura**, Akihiko Seo, Shuichi Ino, Kiyohiko Nunokawa, Kazuhiko Kosuge, Akito Miyazaki, Masaaki Sugiyama, Yoshihiro Tanaka, Mayumi Sawada, Ken Kaneko, Susumu Ouchi, Katsuhiro Kanamori: 2013 Relationship between Weight of Our Developed White Cane and Muscle Load on the Upper Limbs during Swinging Action of the Cane. Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 231-235.
- [5] **Takahiro Nishimura**, Kouki Doi, Hiroshi Fujimoto: 2013 Relationship between Surface Property and Operability of Tablet Terminal with Touch-Sensitive Screen. Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 543-547.

## 国内学会発表

- [1] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2010 可操作性を用いたタッチパネルの表示面傾斜角度がその操作性に及ぼす影響の評価. 日本経営工学会論文誌, 61 巻 1 号, 23-30 頁.
- [2] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2009 タッチパネルの設置条件がその操作性に与える影響についての研究. 福祉工学シンポジウム 2009 講演論文集, 67-68 頁.
- [3] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2009 タッチパネル操作時の手による画面の遮蔽がその操作性に与える影響について. 日本人間工学会関東支部第 39 回大会講演集, 52-53 頁.
- [4] 中野敬太, 菅間敦, **西村崇宏**, 瀬尾明彦 : 2010 振動知覚を用いた情報伝達インタフェースに関する研究. 日本経営工学会平成 22 年度春季大会予稿集, 68-69 頁.
- [5] 岩本直樹, 菅間敦, **西村崇宏**, 瀬尾明彦 : 2010 手すり使用による立ち上がり動作時の上下肢負担. 日本経営工学会平成 22 年度春季大会予稿集, 70-71 頁.
- [6] 中野有敬, 瀬尾明彦, 菅間敦, **西村崇宏** : 2010 下肢が非対称な姿勢を伴う作業時の下肢負担評価に関する研究. 日本経営工学会平成 22 年度春季大会予稿集, 74-75 頁.
- [7] 土井幸輝, 小菅一彦, 宮崎明人, 杉山雅章, 奥村大介, 加藤満裕美, **西村崇宏**, 菅間敦 : 2010 アラミド繊維強化樹脂体による視覚障害者用の白杖の開発. 日本繊維機械学会第 63 回年次大会研究発表論文集, 196-197 頁.
- [8] **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2010 タッチスクリーン片手操作におけるスイッチ構成因子とポインティング特性の関係. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010 論文集, 1023-1026 頁.
- [9] 土井幸輝, **西村崇宏**, 西川冬瑠, 瀬尾明彦, 串山久美子, 馬場哲晃 : 2010 加齢が温冷感覚特性に与える影響. 第 12 回日本感性工学会大会予稿集, 1G1-5.
- [10] 土井幸輝, 和田勉, 片桐麻優, 豊田航, 藤本浩志, **西村崇宏**, 澤田真弓, 金森克浩, 中村均 : 2010 点字の 3 次元拡大モデルの開発～点字プリンタと点字の 3 次元形状の関係～. 電子情報通信学会技術研究報告, 教育工学, 110

- 卷 209 号, 55-60 頁.
- [11] 土井幸輝, 西村崇宏, 赤平仁奈, 藤本浩志, 金森克浩, 嶺也守寛 : 2010 触覚を活用したサウンドデバイスの開発～ヒトの指先の硬さ感覚の活用～. 電子情報通信学会技術研究報告, 教育工学, 110 卷 312 号, 37-40 頁.
- [12] 土井幸輝, 金森克浩, 畠山卓朗, 西村崇宏 : 2010 音感・触感呈示インタフェースの開発と活用法の検討. ATAC カンファレンス 2010 Proceedings, 147-148 頁.
- [13] 土井幸輝, 西村崇宏, 相馬健作, 藤本浩志, 澤田真弓, 田中良広, 大内進, 金子健, 金森克浩, 中村均 : 2011 アクセシブルデザインを目指したパンフレット作製技術の確立. 第 13 回日本感性工学会大会予稿集, E45.
- [14] 土井幸輝, 西村崇宏, 藤本浩志 : 2011 点字触読支援具の着用効果と製作法. 日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集, S153025.
- [15] 赤澤堅造, 奥野竜平, 西田秀治, 土井幸輝, 西村崇宏 : 2011 アクセシブルデザインの理念を取り入れた新しい電子楽器～そして、障害種を越えて. ATAC カンファレンス 2011 Proceedings, 45-46 頁.
- [16] 奥野竜平, 赤澤堅造, 西田秀治, 土井幸輝, 西村崇宏 : 2011 障害種を越えた楽しいデジタル教材楽器 Cymis～アクセシブルデザインを目指して. ATAC カンファレンス 2011 Proceedings, 74-75 頁.
- [17] 土井幸輝, 相馬健作, 西村崇宏, 藤本浩志, 金森克浩, 中村均, 大内進, 澤田真弓, 田中良広, 金子健, 菊池一文, 梅田真理 : 2011 アクセシブルデザインを目指した共用印刷物. ATAC カンファレンス 2011 Proceedings, 117-118 頁.
- [18] 土井幸輝, 菅間敦, 西村崇宏, 瀬尾明彦, 井野秀一, 布川清彦, 小菅一彦, 宮崎明人, 杉山雅章, 田中良広, 澤田真弓, 金子健, 大内進, 金森克浩 : 2012 アラミド繊維強化プラスチック製の軽量白杖の開発と身体負担軽減効果の評価法の実験的検討. 第 7 回日本感性工学会春季大会予稿集, 220-223 頁.
- [19] 西村崇宏, 唐澤洋之, 瀬尾明彦, 土井幸輝 : 2012 温度刺激の提示時間及び SOA がヒト手掌部における運動知覚錯覚に与える影響. 第 14 回日本感性工学会大会予稿集, F6-7.
- [20] 土井幸輝, 西村崇宏, 瀬尾明彦, 串山久美子, 馬場哲晃 : 2012 ヒト手掌部

- における温度感覚特性と二点温度刺激に対する識別特性の評価. 第 14 回日本感性工学会大会予講集, F6-8.
- [21] 土井幸輝, 河野勝, **西村崇宏**, 藤本浩志, 澤田真弓, 田中良広, 大内進, 金子健, 金森克浩, 中村均: 2012 アクセシブルデザインに基づく点字学習教材の作成技術の開発. 日本教育工学会第 28 回全国大会講演論文集, 269-270 頁.
- [22] **西村崇宏**, 土井幸輝, 田中 隆, 菅間 敦, 金森克浩, 畠山卓朗: 2012 視覚障がい児を対象とした触図筆ペンの開発と筆記し易さの評価. 日本教育工学会第 28 回全国大会講演論文集, 659-660 頁.
- [23] **西村崇宏**, 土井幸輝, 田中隆, 栗田晃宜, 菅間敦, 畠山卓朗, 金森克浩: 2013 視覚障害児・者を対象とした筆記具の開発. 第 8 回日本感性工学会春季大会講演予稿集, 170-171 頁.
- [24] 土井幸輝, 河野勝, **西村崇宏**, 藤本浩志, 田中良広, 澤田真弓, 金子健, 大内進, 金森克浩: 2013 アクセシブルデザインの理念に基づく墨字と併記可能な点字・触図の新規作成装置の開発. 第 8 回日本感性工学会春季大会講演予稿集, 172-173 頁.
- [25] 土井幸輝, 河野勝, **西村崇宏**, 藤本浩志, 田中良広, 澤田真弓, 大内進, 金子健, 金森克浩: 2013 紫外線硬化樹脂点字・触図の新規作成装置の開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A1-A05.
- [26] 土井幸輝, **西村崇宏**, 田中隆, 菅間敦, 金森克浩, 畠山卓朗: 2013 視覚障害者のための筆記具の開発とその評価. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A1-A06.
- [27] 土井幸輝, 菅間敦, **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 井野秀一, 布川清彦, 小菅一彦, 宮崎明人, 杉山雅章, 田中良広, 澤田真弓, 金子健, 大内進, 金森克浩: 2013 強化プラスチック繊維を用いた高強度・軽量白杖の開発と路面タッチ動作時の上肢負担の評価. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 2A2-A05.
- [28] 土井幸輝, 菅間敦, **西村崇宏**, 瀬尾明彦, 井野秀一, 小菅一彦, 宮崎明人, 杉山雅章, 田中良広, 澤田真弓, 金子健, 大内進, 金森克浩: 2013 高強度・軽量化を実現するアラミド繊維強化プラスチック製白杖の開発とその評



価～上肢負担軽減効果の評価法に関する実験的検討～. 電子情報通信学会技術研究報告, 福祉情報工学研究会 (WIT), 97-99 頁.

- [29] 土井幸輝, 西村崇宏, 藤本浩志: 2013 点字の触読性向上を目指した触読支援具の作成. 日本人間工学会東海支部 2013 年研究大会論文集, 68-69 頁.

## その他

- [1] 土井幸輝, 西村崇宏, 藤本浩志, 田中隆: 2013 視覚障害児・者支援技術の実践的研究. 第 31 回日本ロボット学会学術講演会特別併設シンポジウム紀要論文集, 62-63 頁.