

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

感圧タッチスクリーンにおける
タップの強さをを用いた
スマートフォンの入力語彙の拡張

池田 凌

指導教員 志築 文太郎

2020年2月

概要

タッチスクリーンを入力インタフェースとするスマートフォンは、ユーザが画面を直接タッチすることにより操作できるためデスクトップおよびラップトップコンピュータに用いられるマウス、トラックパッドおよびキーボードのような入力機器を必要としない。一方でこれらの入力機器を使用した入力と比較してスマートフォン上にて使用可能な入力語彙は限られている。また、スマートフォンを片手にて操作する場合複数本の指による入力が困難となるため、より入力語彙が限られる。そこで、片手操作可能なスマートフォンの入力語彙の拡張を目的として、スマートフォン搭載感圧センサから取得される押下圧をもとにタップの強さを推定し、異なる強さのタップに対して異なる入力を割り当てることによりスマートフォンの入力語彙を拡張する。本研究ではまず、ユーザのタップの強さを調節する能力を調査する、かつ異なる強さのタップの特徴を調査するための予備実験を行った。予備実験の結果、システムが取得可能なタップの強さの範囲を線形に2-6分割した際に、それぞれ98.1%、82.5%、74.1%、67.8%および54.0%の精度にてタップの強さを調節可能であった。また、分割の仕方を非線形にすることにより精度が向上する可能性が示されたため、実験を通して提案手法の最適な分割数および分割位置の検討を行った。実験の結果、実験参加者は3段階の強さのタップの強さを調節可能であった一方、ユーザごとにキャリブレーションを行い分割位置を決めることを検討する必要があることが示唆された。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	2
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	タッチ入力語彙の拡張手法	3
2.1.1	タッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法	3
2.1.2	タッチ後の継続的な情報に基づく入力語彙の拡張手法	4
2.2	押下圧を用いた入力	4
2.2.1	押下圧を用いたスマートフォンの操作手法	4
2.2.2	押下圧の調節に関する調査	5
2.3	タップの強さ	5
第3章	提案手法	7
3.1	タップの強さをを用いた入力語彙拡張の手順	7
3.2	提案手法の設計要素	7
3.3	タップの強さの推定	7
第4章	予備実験：タップの強さを調節する能力の調査	9
4.1	実験参加者および実験機器	9
4.2	タスク	9
4.2.1	分割タスク	9
4.2.2	連続タスク	10
4.3	手順	11
4.4	結果と考察	12
4.4.1	分割タスク	13
4.4.2	連続タスク	14
4.5	議論	15
第5章	実験：提案手法の最適な設計要素の検討	16
5.1	実験設計	16

5.2	実験手順	16
5.3	結果	17
5.4	議論	19
第 6 章	議論と今後の課題	21
6.1	姿勢の影響	21
6.2	年齢による影響	21
6.3	ターゲット位置による影響およびターゲット選択精度への影響	21
6.4	フィードバックの影響	22
第 7 章	アプリケーション例	23
7.1	ソフトウェアキーボードの拡張	23
7.2	アプリアイコンに対するショートカット	23
7.3	文字列選択のためのショートカット	23
第 8 章	おわりに	24
	謝辞	25
	参考文献	26
	著者論文リスト	30
付 録 A	実験の際に用いた各種書類	31
A.1	予備実験に用いた実験手順書	32
A.2	実験に用いた実験手順書	34

目次

3.1	提案手法の概要図。図はシステムが取得可能なタップの強さを線形に3分割にした際の提案手法の例。	8
3.2	タップした際（タッチダウンからタッチアップまで）に取得される押下圧の概形（左）およびタップの強さ（右）。	8
4.1	分割タスク（a, b および c） および連続タスク（d）の実験アプリケーションの画面。両タスク共通の圧力メータおよび圧力レベルに加え、分割タスクではターゲット領域、連続タスクではターゲットレベルから構成される。	10
4.2	実験中の様子（左）およびタスク中のスマートフォンの把持の様子（右）。 . .	11
4.3	実験手順。実験参加者は圧力レベルの操作を確認するための練習を3分行ったのち、分割タスクおよび連続タスクの2つのタスクを5分間の休憩を挟んで行った。	11
4.4	各ターゲット領域に対するタスク成功率および各分割数に対するタスク成功率。グラフ外の確率は各分割数に対するタスク成功率、グラフ内の確率は各ターゲット領域に対するタスク成功率を表す。	12
4.5	最上部のターゲット領域に対するタップの強さの分布。	13
4.6	ターゲットレベルに対する実験参加者全体のタップの強さの誤差の分布。赤い線はシステムの取得可能な押下圧によりそれ以上誤差が広がらない誤差の上限を表す。	14
5.1	実験にて使用されたアプリケーションの画面。(a) タップの強さの調節に慣れるため、およびシステムの取得可能なタップの強さの範囲を把握するための練習にて使用されたアプリケーションの画面。(b) 本番タスクにて使用されたアプリケーションの画面。	17
5.2	実験手順。実験参加者は実験に関する説明を受けたのち、タップの強さに慣れるためのウォームアップを行い、続いて3分割および4分割についてのセッションを5分間の休憩をはさんで行った。	17
5.3	3分割時のタップの強さのヒストグラム。	18
5.4	4分割時のタップの強さのヒストグラム。	18
5.5	各実験参加者ごとの3および4分割時のタップの強さのヒストグラム。	20

第1章 序論

本章において、まずタッチスクリーンを入力インターフェースとするスマートフォンにおける入力語彙の問題を述べる。次に本研究の目的を述べ、問題解決のためのアプローチを示す。その後、本研究の貢献を示し、本論文の構成を述べる。

1.1 背景

タッチスクリーンを主要な入力インターフェースとするスマートフォンに対して、ユーザは指を用いてタッチスクリーンにタッチすることにより入力できる。そのため、スマートフォンの操作はデスクトップコンピュータおよびラップトップコンピュータにおいて用いられるマウス、トラックパッドおよび物理キーボードなどの機器を必要としない。しかし、マウスの左右のボタンによるクリックや物理キーボードにおける様々なショートカットコマンドと比較して、スマートフォンにおける入力はタッチ位置とその時系列の情報のみを用いるため入力語彙が限られている。入力語彙を拡張するために複数本の指を用いたマルチタッチジェスチャ（例えばピンチジェスチャや2本指によるスクロール）が利用されてきた。しかし、ユーザはスマートフォンをしばしば片手にて把持し、把持した手の親指にて操作することがあり [AZ12], その際ユーザは複数本の指を用いたスマートフォンの操作が困難である。

スマートフォンの限られた入力語彙を拡張することを目的として様々な入力語彙の拡張手法が提案されてきた。入力語彙の拡張手法は入力が決定的されるタイミングに基づいて2種類に分けられる。1つはタッチ直後に得られる情報に基づいて入力が決定的される入力語彙の拡張手法である。この手法は例えば異なる強さのタップ（弱いタップおよび強いタップ） [HL11], 異なる接触面積のタッチ [BLC+12], 異なる指 [LMH19] および異なる指の部位（例えば、爪 [池松 19] および関節 [SLH+19]）によるタッチに対してそれぞれ異なる入力を割り当てることによって入力語彙の拡張を行う。これらの手法は入力に必要な動作が画面へのタッチのみであるため、実行時間が短いという利点がある。もう1つはタッチ後の継続的な情報に基づいて入力が決定的される入力語彙の拡張手法である。この手法は例えば親指を転がす動き [RLG09], タッチスクリーンに対する指のせん断力 [HFT+19], スマートフォンのベゼルを用いたスワイプジェスチャ [RT09] および離れた点における連続的なタップ [HGL14] を新たな入力として入力語彙の拡張を行う。これらの手法はタッチに加え、指を移動させる方向および力を加える方向の情報を利用することができるため、拡張できる入力語彙数が多い。

1.2 目的とアプローチ

本研究はタッチ直後に得られる情報に基づいて入力が決まる入力語彙の拡張手法の中でも、異なる強さのタップを用いた手法 [HL11] がスマートフォンの片手操作時に使用可能であることに着目し、その入力語彙数を増やすことを目的とする。

そこで、システムが取得可能なタップの強さを複数段階に分割し、ユーザが任意の段階に対してタップの強さを調節することによりタップを複数段階に拡張する手法を提案する。タップの強さの調節はユーザが画面に触れたのちに連続的にタッチの強さの強弱を変化させる操作とは異なり、ユーザが画面にタッチする瞬間の強さを調節する。この操作は入力語彙の拡張に必要な動作がタッチのみであるため、高速に実行できる可能性がある。本研究ではユーザが画面に対してタップを行なった際にスマートフォン搭載感圧センサから得られる押下圧からタップの強さを推定した。

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に示す。

- 押下圧に基づいて推定されたタップの強さをを用いたスマートフォンにおけるタッチ入力語彙の拡張
- 予備実験によるユーザのタップの強さを調節する能力の調査および異なる強さのタップの特徴の調査結果
- 実験を通じた提案手法の最適な設計要素の検討

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章では本研究の背景、目的とアプローチおよび貢献を示す。第2章では本研究に関連する研究および手法を述べ、本研究の位置付けを行う。第3章では提案手法を述べる。第4章では提案手法の実装に先立ち、ユーザのタップの強さを調節する能力を調査する、かつ異なる強さのタップの特徴を調査するための予備実験を述べる。第5章では提案手法の設計のための実験を述べる。第6章では本研究に関する議論と今後の課題を述べる。第7章では提案手法のアプリケーション例を示す。第8章では本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本手法はスマートフォン搭載感圧センサから得られる押下圧に基づいてタップの強さを推定し、それをもとに入力語彙の拡張を行うことを目的とする。そのため、本章では、タッチ入力語彙の拡張手法、押下圧を用いた入力に関する研究およびタップの強さに関する研究を順に概説し本研究の位置付けを行う。

2.1 タッチ入力語彙の拡張手法

タッチ入力語彙の拡張手法はタッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法およびタッチ後の継続的な情報に基づく入力語彙の拡張手法の2種類に分類できる。本節では、それぞれに該当する手法を説明する。

2.1.1 タッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法

画面にタッチした直後のタッチに付随する情報に基づいて入力決定される入力語彙の拡張手法として、Heo および Lee [HL11] は画面にタップした際にスマートフォン内蔵加速度センサから得られる値を用いることによりタップを強いタップおよび弱いタップの2種類に拡張した。Huang ら [HTT⁺14] は画面にタッチする指の腹の異なる領域に対して異なる入力を割り当てることによりスマートウォッチの入力語彙を拡張した。Boring ら [BLC⁺12] は画面にタッチする指の接触面積に基づいて入力の切り替えを行った。Harrison ら [HSH11] は画面への指の接触時に生じる音波を用いて指の部位（例えば指先、爪および関節）を識別するシステムを提案した。池松ら [池松 19] は静電容量方式のタッチパッドおよびタッチスクリーンにおいて、電気的特性の差異から指によるタッチと爪によるタッチを識別することにより入力語彙の拡張を行った。Schweigert ら [SLH⁺19] はスマートフォンにおいて、タッチした際の静電容量画像から指によるタッチジェスチャと関節によるタッチジェスチャを識別することにより入力語彙の拡張を行った。また、Le ら [LKB⁺18] は指によるタッチと手のひらによるタッチとを識別することにより手のひらによるタッチを新たなジェスチャとして利用した。Gil ら [GLIO17] はスマートウォッチにタッチする指の接触面積から、また Le ら [LMH19] はスマートフォンにタッチする指の静電容量画像から異なる指によるタッチを識別することによってタッチした指の種類に基づく操作を可能にした。しかし、異なる指を用いる手法 [GLIO17, LMH19] および関節を用いる手法 [HSH11, SLH⁺19] はそれぞれ複数本の指または親指以外の部位による画面へのタッチを必要とするため、スマートフォンの片手操作時での使用は困難である。池

松ら [池松 18] は通常のタッチ入力が指を画面に対して動かすのに対し、デバイスの画面を指に向けて動かしタッチする動作を新たなジェスチャとして提案した。これらのタッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法は必要な動作がタッチのみであるため、実行時間が短いという利点がある。

本研究ではこれらの入力語彙の拡張手法のうち、Heo および Lee [HL11] が提案した異なる強さのタップを入力語彙の拡張に利用した手法が片手操作時に利用可能であることに着目し、この入力語彙数を増やすことを目的とする。

2.1.2 タッチ後の継続的な情報に基づく入力語彙の拡張手法

画面へのタッチ後の継続的な情報に基づいて入力決定される入力語彙の拡張手法として、Roudaut ら [RLG09] は親指によるドラッグおよびスワイプのような既存のスライドジェスチャと親指を転がすジェスチャであるロールジェスチャを異なる入力とすることにより入力語彙を拡張した。Roth および Turner [RT09] は画面のベゼルからのスワイプを、Kubo ら [KST16] はベゼルからベゼルへのスワイプを新たなジェスチャとして入力語彙の拡張に利用した。Heo ら [HGL14] は離れた2点における短時間の連続的なタップとダブルタップとを区別することにより入力語彙を拡張した。Harrison および Hudson [HH12] はシングルタッチにおける指と画面とのせん断力を、また Heo および Lee [HL13] はマルチタッチにおける指と画面とのせん断力を推定することにより入力語彙を拡張した。Hakka ら [HIST19] はユーザが画面上のターゲットをスワイプする際に、スワイプの終端の位置がターゲットの外側になることを実験より明らかにした上で、終端がターゲット内となるスワイプを入力語彙の拡張に利用した。これらのタッチ後の継続的な情報に基づく入力語彙の拡張手法はタッチ後の指の移動方向の情報をを用いることができるため、タッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法と比較して拡張できる入力語彙数が多い。

本研究はタッチした直後の情報に基づく入力語彙の拡張手法の利点である高速な実行を損なうことなく、拡張される入力語彙数を増やすことを目的とする。

2.2 押下圧を用いた入力

本節では押下圧を用いたスマートフォンの操作手法および押下圧の調節に関する調査を説明する。

2.2.1 押下圧を用いたスマートフォンの操作手法

押下圧を用いた様々なスマートフォンの操作手法が提案されてきた。Apple 社はホームスクリーンアイコンへのタッチ後の画面の押し込みによるメニューの表示や Web リンクに対するタッチ後の画面の押し込みによるリンク先のウェブページのプレビュー表示を可能とする 3D Touch を開発した。Brewster および Hughes [BH09] は押下圧を高めることによって大文字を

入力可能なキーボードを提案した。Zhong ら [ZYW⁺18] は押下圧の調節により文字を入力可能な1次元キーボードを提案した。Corsten ら [CVLB18] は押下圧を用いることによって、表示領域が小さくかつ高速な値選択を可能とするピッカーを提案した。Suzuki ら [SSSO18] ならびに Miyaki および Rekimoto [MR09] は押下圧を用いることによって、片手操作のためのズームインおよびズームアウト手法を提案した。Antoine ら [AMC17] は押下圧を速度に対応させた長いリストの自動スクロール手法を提案した。Corsten ら [CLBV19] は押下圧により移動するカーソルを用いた片手操作手法を提案し、押下圧を高めることにより、親指から離れた位置にあるターゲットの選択を可能にした。Hakka ら [HIS19] はカーソルを用いた片手操作手法において、押下圧を用いることによりあらゆるシングルタッチジェスチャ（例としてタップ、スワイプ、およびドラッグ）の実行を可能にした。

本研究ではスマートフォン搭載感圧センサから得られる押下圧に基づいてタップの強さを推定することにより入力語彙の拡張を行う。

2.2.2 押下圧の調節に関する調査

押下圧を調節する能力に関する様々な調査がなされてきた。Ramos ら [RBB04] はタブレットコンピュータにおいて、スタイラスを用いてユーザが6段階の押下圧の強さを調節可能であることを示した。同様に、Mizobuchi ら [MTKJ⁺05] はスタイラスを用いた入力において、0–3N の範囲においてユーザが5–7段階の押下圧の強さを正確に調節可能であることを示した。Wilson ら [WSB10] は適切なフィードバックを用いることにより、ユーザが10段階までのタッチの押下圧の強さを正確に調節可能であることを示した。押下圧の調節は画面に指またはスタイラスが触れている間に連続的に押下圧の強弱を調節することができる。

本研究にて使用されるタップの強さは画面に触れたのちに強さを調節する必要がないため、実行速度が高速である。しかし、画面へのタッチ中にフィードバックを受けながらの強さの調節ができないため、押下圧の調節よりも強さの調節が難しくなることが考えられる。

2.3 タップの強さ

本研究と同様に、タップの強さを入力語彙の拡張に用いた研究がある。Heo および Lee [HL11] はスマートフォン内蔵加速度センサから得られる加速度に基づいてタップの強さを推定することによりタップを強いタップと弱いタップとの2段階の強さのタップに拡張した。また、実験にてユーザが2段階の強さのタップを90%の精度にて調節可能であることを示した。しかし、[HL11]においてタップを3段階以上の強さのタップに拡張することについては言及されていない。本研究ではスマートフォン搭載感圧センサから得られる押下圧に基づいてタップの強さを推定することにより、タップを3段階以上に拡張することを目的とする。またタップの強さの調節に関する調査として、Pedersen および Hornbæk [PH14] はテーブルトップインタフェースにおいて、タップした際に発生する音波を用いてタップの強さを推定することにより、ユーザが2段階の強さのタップを99%、6段階の強さのタップを58%の精度にて調節

可能であることを示した。本研究ではタブレットトップインタフェースとは異なり，モバイル端末であるスマートフォンにおいてユーザのタップの強さを調節する能力を調査する。

第3章 提案手法

本章において、まずタップの強さをを用いた入力語彙の拡張手順を述べる。次に提案手法の設計要素を述べたのち、タップの強さの推定について述べる。

3.1 タップの強さをを用いた入力語彙拡張の手順

提案手法における入力語彙拡張の手順を以下に示す。まず、システムが取得可能なタップの強さの範囲を複数段階に分割する。その後、ユーザは実行したい入力に対応する段階の強さのタップを行うことにより、目的の入力を実行できる。図 3.1 はシステムが取得可能なタップの強さの範囲を 3 段階に分割した際の提案手法の例である。ユーザのタップの強さがどの段階の強さの範囲に属するかによって 3 種類の入力の切り替えが可能である。

3.2 提案手法の設計要素

提案手法の設計に際して、システムが取得可能なタップの強さの範囲を複数段階に分割する際に何段階に分割するか、さらにその分割位置をどこにするかを決定する必要がある。分割数が増えるほど拡張される入力語彙数は増える一方、分割されたそれぞれの段階のタップの強さの範囲は小さくなるため、ユーザが目的とする段階の強さにタップの強さを調節することが難しくなる。また、分割位置を調節することにより、特定の段階の強さのタップの難易度を調節できる。図 3.1 に示す例ではシステムが取得可能なタップの強さの範囲を線形に 3 分割するように分割位置を定めている。その際、1-2 段階間の分割位置を左側にずらすことにより、1 段階目の強さのタップの許容範囲が小さくなる一方で、2 段階目の強さのタップの許容範囲を広めることができる。

本研究では実験を通じてユーザが複数段階の強さのタップを行った際のタップの強さを計測し、その分布からユーザが調節可能な最適な分割数および分割位置を検討する。

3.3 タップの強さの推定

提案手法におけるタップの強さの推定に iPhone 搭載感圧センサから取得される押下圧を用いた。iPhone 搭載感圧センサから取得される押下圧は UITouch クラスの force プロパティにより取得される。force プロパティはユーザの画面に対する指の押下の強さに応じて 0 から $\frac{400}{60} \simeq 6.67$ までの範囲の 400 段階の値 ($\frac{1}{60}$ 間隔) を返す。force プロパティは画面への指の接

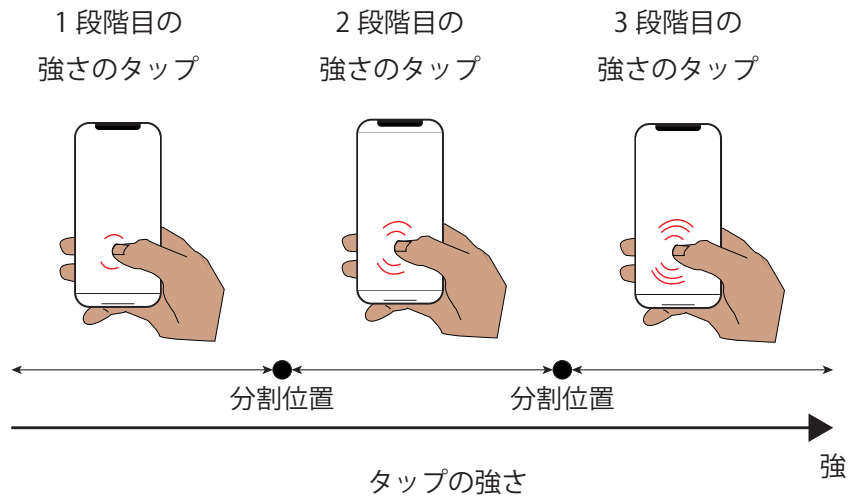


図 3.1: 提案手法の概要図. 図はシステムが取得可能なタップの強さを線形に3分割にした際の提案手法の例.

触状態（例えばタッチ位置，タッチ面積および押下圧など）が変化した際に発生するタッチイベントに付随して取得される．タッチイベントが発生する頻度は1秒あたり最大で約60回である．

Pedersen および Hornbæk [PH14] はタップの強さとしてユーザがタップした際に生じる音波の最大の振幅を用いた．Heo および Lee [HL11] はタップの強さとしてタップした際に加速度センサから得られる加速度の時系列データを積分した値を用いた．本研究では実装を容易にするため，ユーザがタップした際に取得されるタッチダウンからタッチアップまでのタッチイベントに付随する押下圧のうち，最大値をタップの強さとして用いた（図 3.2）．

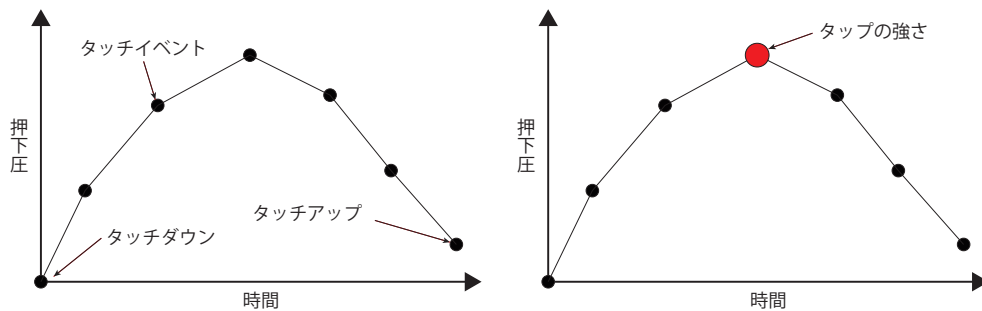


図 3.2: タップした際（タッチダウンからタッチアップまで）に取得される押下圧の概形（左）およびタップの強さ（右）．

第4章 予備実験：タップの強さを調節する能力の調査

予備実験では提案手法の設計に先立ち，スマートフォンにおけるユーザのタップの強さを調節する能力の調査および強さの異なるタップの特徴の調査を目的としてタップの強さの調節に関する予備実験を行った．以下では実験参加者および実験機器，タスク，手順，結果と考察，および議論を述べる．

4.1 実験参加者および実験機器

研究室の8名（22–23歳，平均年齢22.6歳，全員男性，全員右利き）がボランティアとして実験に参加した．実験参加者は全員日常的にスマートフォンを使用していた．

実験に用いるスマートフォンとして，タッチスクリーンに対するタッチの押下圧を取得可能な iPhone XS（5.8インチ，iOS 13.1.3）を使用した．押下圧の取得には UITouch クラスの force プロパティを使用した．force プロパティは0から $\frac{400}{60} \simeq 6.67$ までの範囲の400段階の値（ $\frac{1}{60}$ 間隔）を返す．force プロパティはタッチイベントに付随して取得される．タッチイベントは画面への接触状態が変化した際に発生し，その頻度は1秒あたり最大で約60回である．

4.2 タスク

実験では分割タスクおよび連続タスクの計2つのタスクを実施した．分割タスクは取得可能なタップの強さの範囲を線形に2–6分割したうちのいずれかの領域に対して実験参加者がタップの強さを調節するタスクであり，連続タスクは取得可能なタップの強さの範囲内のある特定の値に対して実験参加者がタップの強さを調節するタスクである．以下では各タスクの詳細を述べる．

4.2.1 分割タスク

分割タスクに用いられる実験アプリケーションの画面は圧力メータ，圧力レベルおよびターゲット領域から構成される（図4.1a）．圧力メータはシステムが取得可能なタップの強さと対応しており，圧力メータの上端が最大値の6.67，下端が最小値の0である．圧力レベルは実

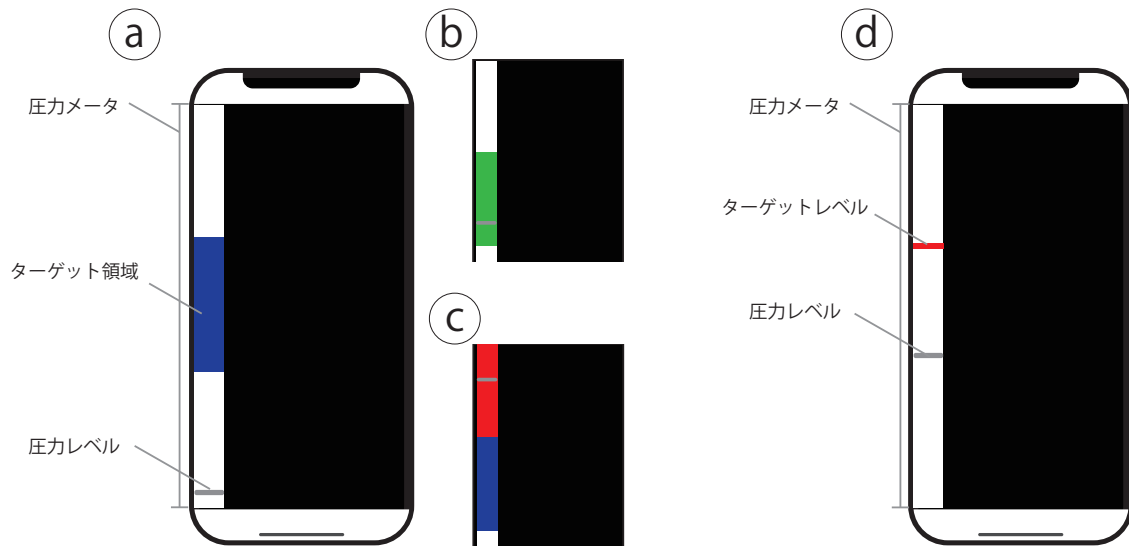


図 4.1: 分割タスク (a, b および c) および連続タスク (d) の実験アプリケーションの画面。両タスク共通の圧力メータおよび圧力レベルに加え，分割タスクではターゲット領域，連続タスクではターゲットレベルから構成される。

験参加者のタップの強さを表しており，タップの強さに応じて圧力レベルの位置が上昇する。ターゲット領域は線形に n 分割された圧力メータ内のいずれかの領域に青色に表示される。

実験参加者は圧力レベルがターゲット領域に入るようにタップの強さを調節する。実験参加者がタスクに成功するとターゲット領域が緑色に（図 4.1b），失敗すると圧力レベルが達した領域が赤色に変化する（図 4.1c）。ターゲット領域は分割された各領域にランダムな順に 10 回ずつ表示される。ターゲット領域に対して圧力レベルが入るようにタップすることを 1 試行とし， n 分割時に各領域 10 回ずつ表示されるターゲット領域に対して，試行を行うことを 1 セッションとした。実験参加者は $n = 2, 3, \dots, 6$ 分割に対してそれぞれ 1 回ずつセッションを行った。したがって，実験参加者は分割タスクにおいて $(2 + 3 + \dots + 6 \text{ 分割}) \times 10$ 回のタップ = 200 回のタップを実行した。

4.2.2 連続タスク

連続タスクに用いられる実験アプリケーションの画面は分割タスクと同様の圧力メータ，圧力レベルに加え，ターゲットレベルから構成される（図 4.1d）。ターゲットレベルはシステムが取得可能なタップの強さの範囲内において，等間隔に 100 段階（つまり force プロパティの値に換算して $\frac{6.67}{100} = 0.067$ 間隔）の位置にランダムな順に 1 回ずつ表示される。



図 4.2: 実験中の様子（左）およびタスク中のスマートフォンの把持の様子（右）。

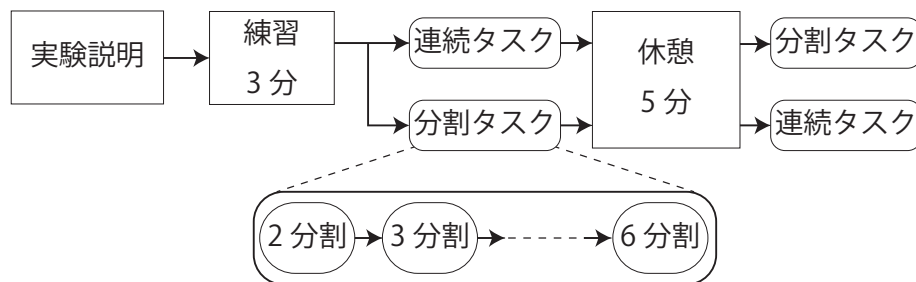


図 4.3: 実験手順。実験参加者は圧力レベルの操作を確認するための練習を3分行ったのち、分割タスクおよび連続タスクの2つのタスクを5分間の休憩を挟んで行った。

実験参加者はターゲットレベルに圧力レベルができる限り近づくように、タップの強さを調節する。

4.3 手順

実験中の様子およびタスク中のスマートフォンの把持の様子を図 4.2 に示す。実験中、実験参加者には着席してもらい、スマートフォンを右手にて把持し、把持した手の親指にてタップを行うよう指示した。また実験参加者のタップしやすい位置にてタップし、できる限り正確にタスクを行うように指示した。実験参加者がタップではなく、長押しによって押下圧を調節することがないように、画面に触れたのちできる限り早く指を画面から離すように伝えた。

実験手順を図 4.3 に示す。まず、我々は実験参加者にタップの強さによって圧力レベルの位置が上昇することを確認してもらうために、実験参加者に最大3分間の練習を設けた。練習では図 4.1 に示した画面のうち、圧力メータおよび圧力レベルのみが表示されており、実験

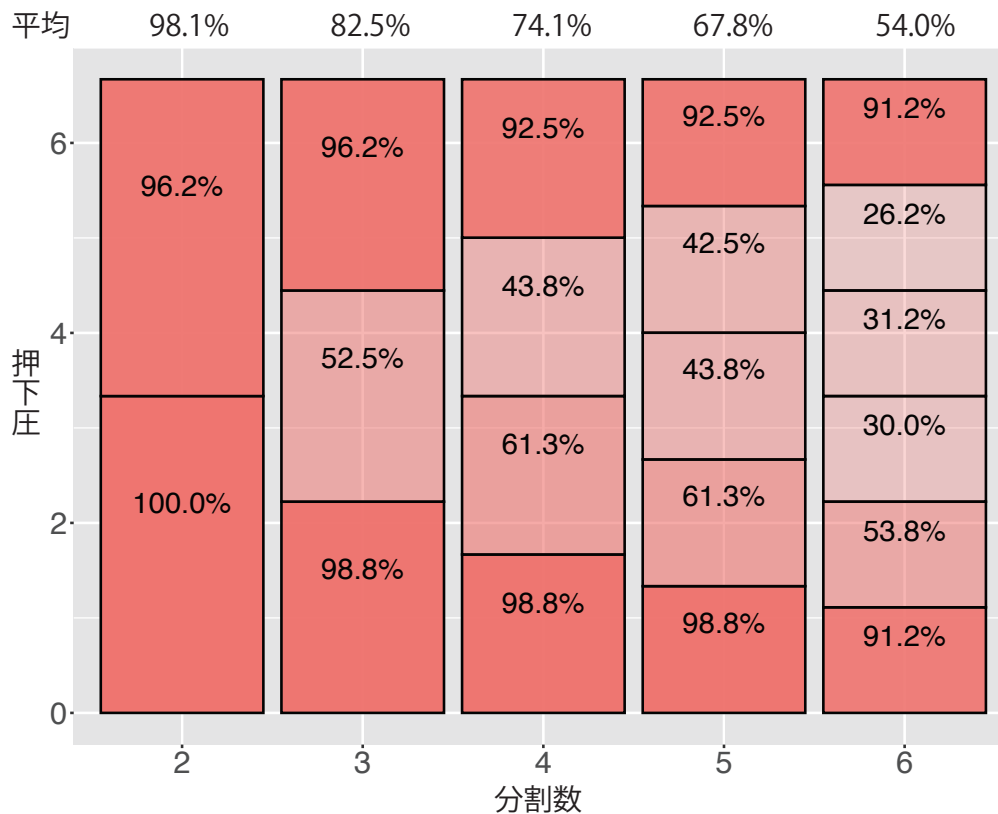


図 4.4: 各ターゲット領域に対するタスク成功率および各分割数に対するタスク成功率。グラフ外の確率は各分割数に対するタスク成功率，グラフ内の確率は各ターゲット領域に対するタスク成功率を表す。

参加者は自由にタップし、タップの強さの調節による圧力レベルの操作を確認した。実施するタスクの順序効果を取り除くために、実験参加者を分割タスクを先に行う群と連続タスクを先に行う群との2群に分け、実験を行った。分割タスクにおける分割数の順序は全実験参加者2-6分割の昇順とした。分割タスクと連続タスクの間に5分間の休憩を設けた。実験は1人あたり約25分かかった。

4.4 結果と考察

本節では分割タスクおよび連続タスクの結果および考察を述べる。

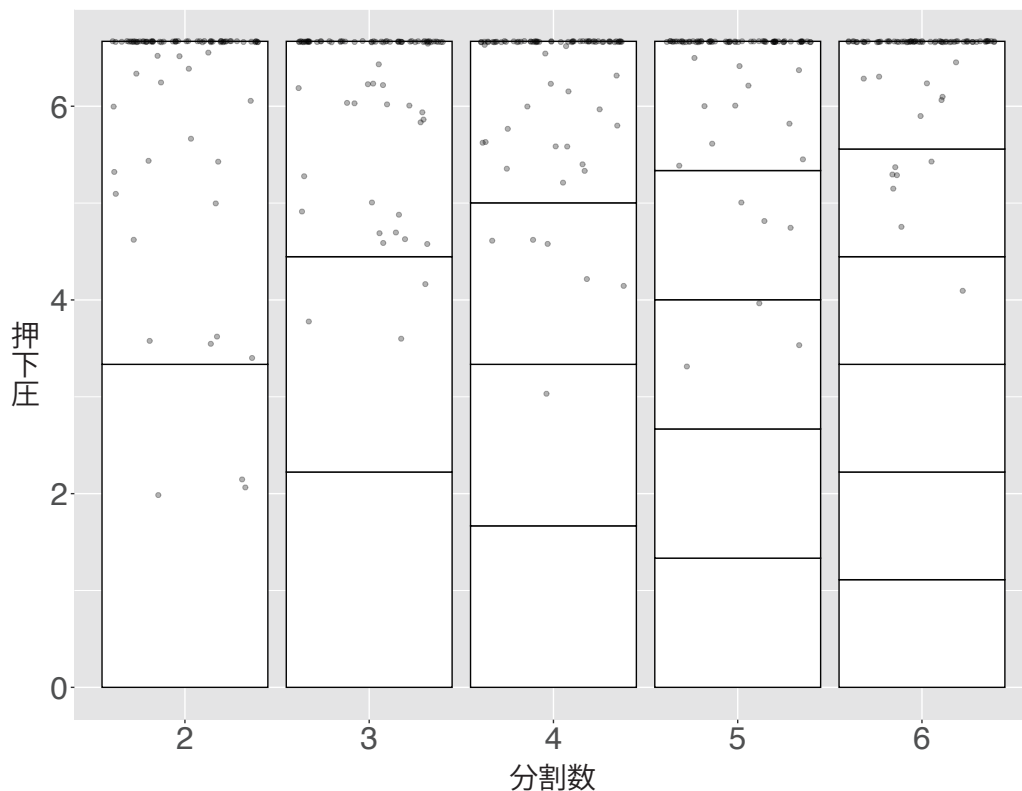


図 4.5: 最上部のターゲット領域に対するタップの強さの分布。

4.4.1 分割タスク

各分割数および各ターゲット領域に対する実験参加者全体の平均タスク成功率を図 4.4 に示す。グラフ外の上部の確率は各分割数に対する実験参加者全体の平均タスク成功率を示しており、グラフ内の確率はある分割数における各ターゲット領域に対する平均タスク成功率を示している。各領域の透明度はその領域の平均タスク成功率と対応しており、成功率が高いほど濃く表現されている。

各分割数に対する平均タスク成功率について、分割数が増えるほど平均タスク成功率は下がり、2-6 分割の成功率は順に 98.1%、82.5%、74.1%、67.8% および 54.0% であった。2 分割における各領域の成功率は共に 95% を超える高い成功率であった。しかし、3 分割以上において、最上部および最下部の領域の成功率が 90% を超えた一方で、その他の領域の成功率は全て 70% を下回った。全分割数での最上部のタスク成功率が高かった要因として、システムの取得可能な最大の押し下圧（以降、最大押し下圧）の影響が考えられる。各分割数における最上部のターゲット領域に対するタップの強さの分布を図 4.5 に示す。最上部のターゲット領域に対して行われたタップの強さの多くが、最大押し下圧となる傾向があり、その割合は 74.8% であった。これは最大押し下圧を超える強さにてタップした際に、最大押し下圧がタップの強さ

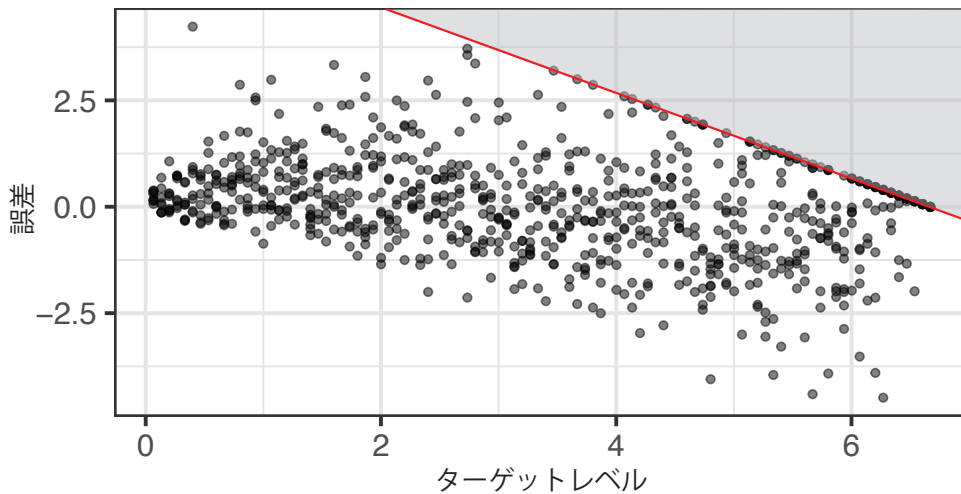


図 4.6: ターゲットレベルに対する実験参加者全体のタップの強さの誤差の分布. 赤い線はシステムの取得可能な押下圧によりそれ以上誤差が広がらない誤差の上限を表す.

として記録されるためである. したがって, 実験参加者は最大押下圧以上の強さにてタップすることによりタスクに成功できるため, 最上部のターゲット領域に対するタスク成功率が高かったと考えられる. また最下部の領域のタスク成功率が高かった要因として, 実験参加者が可能な限り弱いタップを行うことによりタスクに成功できるため, 平均タスク成功率が高かったと考えられる. また最上部の領域と6分割時の下から4段目を除き, 3-6分割時の n 段目よりも $n + 1$ 段目の成功率が低い傾向が見られた.

4.4.2 連続タスク

ターゲットレベルに対する実験参加者全体のタップの強さの誤差の分布を図 4.6 に示す. 誤差の値が正であることは圧力レベルがターゲットレベルを上回ったことを, 負であることは下回ったことを表す. 図の右上の赤い線は最大押下圧によりそれ以上誤差が広がらない誤差の上限を表す.

ターゲットレベルが最大に近い場合, 誤差のばらつきは他のターゲットレベルと比較して小さかった. これは分割タスクの最上部のターゲット領域のタスク成功率が高かった要因と同様に, 多くの実験参加者が最大押下圧以上の強さにてタップしたことにより誤差のばらつきが小さくなったためであると考えられる. 特に最大のターゲットレベルにおいては, 全実験参加者の誤差が 0 であり, 全実験参加者が最大押下圧以上の強さにてタップを行ったことがわかる. また, 赤い線より上側の領域および最大のターゲットレベル付近のターゲットレベルを除いた場合において, ターゲットレベルが最小に近い場合はばらつきが小さく, ターゲットレベルが大きいほど誤差のばらつきが大きい傾向にあった.

連続タスクにおける全タップの実行時間（タッチダウンからタッチアップまで時間）の平均は 97.4 ms（標準偏差 22.3 ms）であった。Apple 社のガイドラインによると、日常的に用いられるタッチの押下圧は約 1.0 であり、それを超える強さのタップの実行時間の平均は 100.1 ms（標準偏差 20.7 ms）であった。

4.5 議論

実験参加者は 98.1%の精度にて 2 段階のタップの強さを調節可能であったことから、Heo および Lee [HL11] と同様、タップの強さをを用いた 2 段階のタップによる入力語彙の拡張を実用的に使用できると考えられる。しかし、3 分割における中央の領域の精度は 52.5%と低く、また 4 分割以上においても最上部および最下部の領域を除く領域における精度が低いことから、3 段階以上のタップの強さをユーザが調節することによる入力語彙の拡張は、システムの取得可能なタップの強さの範囲を線形に分割した場合は実用的でない。しかし、分割の仕方を非線形にすることにより精度が向上する可能性がある。例えば 3 分割においては中央の領域の範囲を広げることにより精度向上が期待できる。また 4 分割以上においては、分割タスクおよび連続タスクの結果から、最上部および最下部の領域の範囲を狭め、上側の領域ほど範囲を広げることによって精度が向上すると考えられる。

Hakka ら [HIST19] は実験によりユーザのターゲットに対するタップおよびスワイプの実行時間を明らかにし、その平均はそれぞれタップが 80 ms（標準偏差 20 ms）、スワイプが 175 ms（標準偏差 90 ms）であった。また iPhone のデフォルトのダブルタップおよびロングタップの待機時間はそれぞれ 250 ms および 500 ms である。連続タスクにて収集されたタップの内、押下圧が 1.0 を超える日常的に実行されるタップよりも強いタップの実行時間の平均は、タップを除くこれらの実行時間よりも高速であり、提案手法は高速な実行が可能な入力語彙の拡張手法となる可能性がある。したがって今後、提案手法が様々な画面の位置へのタップや様々な状況下でのタップにおいても高速に実行可能であるかを調査する必要がある。

第5章 実験：提案手法の最適な設計要素の検討

我々は提案手法の最適な分割数および分割位置を検討するために、ユーザが複数段階の強さのタップを行った際のタップの強さを計測するための実験を行った。本章では、実験設計および手順を述べた後に、実験の結果および結果に対する議論を述べる。

5.1 実験設計

研究室内の4名（22–23歳，平均年齢22.5歳，全員男性，全員右利き）がボランティアとして実験に参加した。実験参加者は全員日常的にスマートフォンを使用していた。実験に用いるスマートフォンとして、予備実験と同じく iPhone XS（5.8インチ，iOS 13.1.3）を使用した。

実験は3分割および4分割についての2つのセッションから成り，各セッションには練習タスクおよび本番タスクがある。練習タスクでは実験参加者はタップの強さを3または4段階に分割できたと感じるまで実際にタップしながらタップの強さを調節する。続く本番タスクでは画面にランダムに表示される数字と対応する強さの段階のタップを実行する（図 5.1b）。実験参加者は各分割に対して30回ずつタップを行い，4名の実験参加者 × (3 + 4) 分割 × 30回のタップ = 840回のタップが実験において収集された。

5.2 実験手順

実験手順を図 5.2 に示す。実験の間，実験参加者は椅子に座り，スマートフォンを片手にて把持した。我々は実験参加者にスマートフォンを把持した手の親指にてタップし，できる限り正確にタスクを行うように指示した。計測ブロックを行う前に，実験参加者がタップの強さの調節に慣れるため，およびシステムの取得可能なタップの強さの範囲を把握するためのウォームアップを行った。ウォームアップでは画面の下端に黒い水平線が表示され，実験参加者はタップの強さを調節することにより水平線を上側に動かすことができる（図 5.1a）。システムの取得可能なタップの強さの範囲は画面の高さと対応しており，実験参加者が強くタップするほど水平線はより上側に移動する。ウォームアップにおいて，実験参加者がタップする前に画面のランダムな高さに赤い水平線が表示された。これは実験参加者がウォームアップの際に，タップの強さを調節する際の目標とするために表示された。ウォームアップにおいて実験参加者はこの目標を無視してもよく，自由にタップの強さを調節できた。その後，実験参加者は計測ブロックを開始した。分割数の順序効果を取り除くために，実験参加

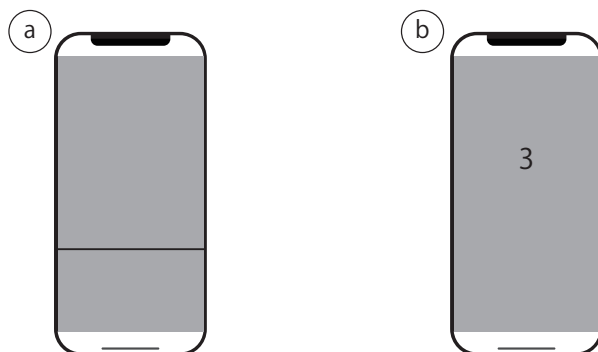


図 5.1: 実験にて使用されたアプリケーションの画面. (a) タップの強さの調節に慣れるため, およびシステムの取得可能なタップの強さの範囲を把握するための練習にて使用されたアプリケーションの画面. (b) 本番タスクにて使用されたアプリケーションの画面.

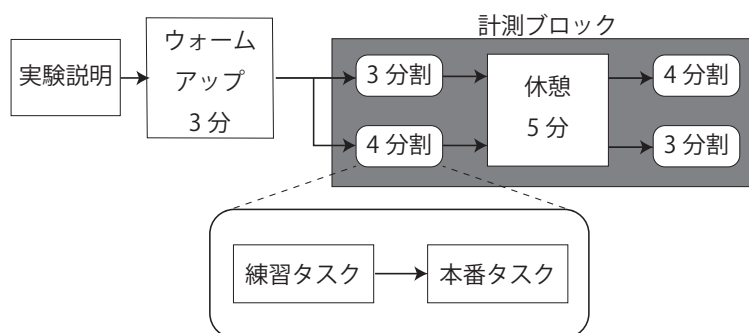


図 5.2: 実験手順. 実験参加者は実験に関する説明を受けたのち, タップの強さに慣れるためのウォームアップを行い, 続いて3分割および4分割についてのセッションを5分間の休憩をはさんで行った.

者を先に実施するセッションに基づいて2群に分けて実験を行った. 2つのセッションの間に5分間の休憩を設けた. また実験は全体で約30分かった.

5.3 結果

図 5.3 および図 5.4 に3分割および4分割のセッションにおいて計測された全参加者のタップの強さのヒストグラムを示す. このデータを用いることによって, 隣り合う2つの段階間の計測されたタップの強さを最大の精度にて分類できるように分割位置を決定した. 例えば3分割においては2つの分割位置を決定する. 1つは1-2段階目間, もう1つは2-3段階目間である.

3分割において, 決定された分割位置による計測されたタップの強さの分類精度は84.9%であった. 1-2段階目間の分割位置は1.27であり, 1-2段階目間の分類精度はそれぞれ94.1%お

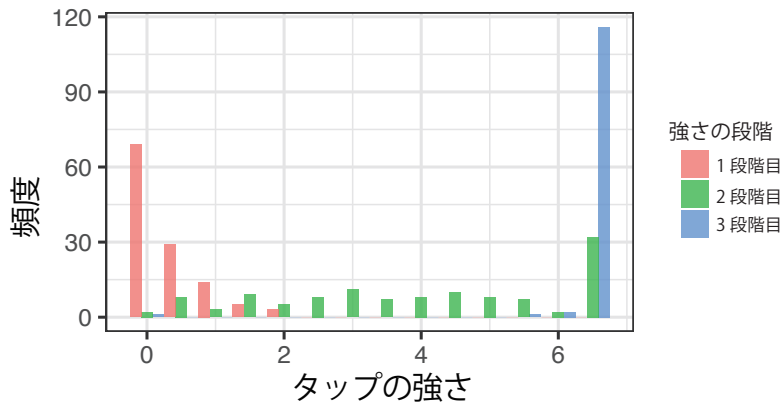


図 5.3: 3 分割時のタップの強さのヒストグラム。

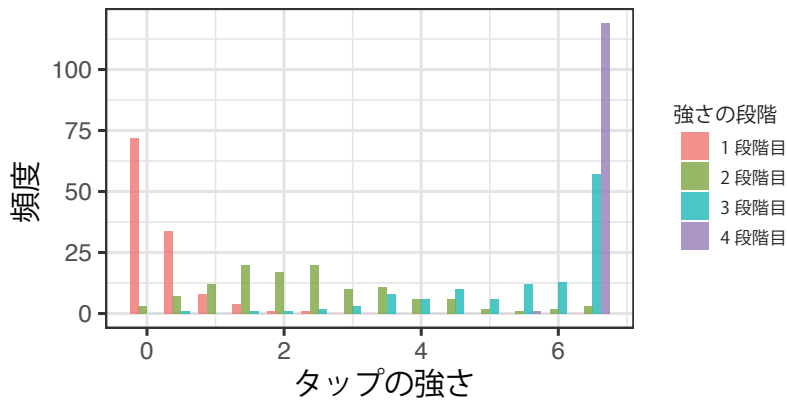


図 5.4: 4 分割時のタップの強さのヒストグラム。

よび 89.1%であった。2-3 段階目間の分割位置は 6.59 であり、分類精度はそれぞれ 76.6%および 95.0%であった。

4 分割において、決定された分割位置による計測されたタップの強さの分類精度は 77.7%であった。1-2 段階目間の分割位置は 0.79 であり、1-2 段階目間の分類精度はそれぞれ 89.1%および 91.6%であった。2-3 段階目間の分割位置は 3.92 であり、分類精度はそれぞれ 86.6%および 84.1%であった。3-4 段階目間の分割位置は 6.66 であり、分類精度はそれぞれ 60.0%および 99.1%であった。

さらに、各実験参加者ごとのデータを分析した。図 5.5 に各実験参加者ごとの 3 分割および 4 分割のセッションにおいて計測されたタップの強さのヒストグラムを示す。各実験参加者ごとのデータを用いることにより、各実験参加者ごとの分割位置を決定した。結果として、全体の分類精度は 3 分割において 88.0%，4 分割において 81.0%であった。また、3 分割における 1-2 段階間において、90%を超える分類精度となる実験参加者ごとの分割位置が存在した

(P1: 1.52, P2: 0.27, P3: 0.95, P4: 1.09)。また、2-3 段階目間においては P3 を除いて 90% を超える精度にて分類可能な分割位置が存在した。P3 の分割位置は 6.42 であり分類精度はそれぞれ 33.3% および 96.6% (平均 65.0%) であった。4 分割において、3-4 段階目を 90% を超える精度にて分類可能な分割位置は存在しなかった。

全セッション終了後、各実験参加者に対して調節可能な範囲にて何段階にタップの強さを分割できると感じたかアンケートをとった結果、全実験参加者が「3 段階まで調節可能である」と回答した。

5.4 議論

提案手法を設計する上で、日常的なタップとの競合可能性を考慮する必要がある。4 分割時の 1-2 段階目間の最適な分割位置は 0.79 であった。しかし、Apple 社の force プロパティについてのドキュメントによると日常的に行われるタップの強さはおよそ 1.0 であるため、分割位置を 0.79 とした場合に、ユーザが強くとしようとしなくても 2 段階目の強さのタップが実行される可能性がある。そのため、1-2 段階目間のタップの強さは 1.0 を超えることが望ましい。3 分割時の 1-2 段階目間の最適な分割位置 (1.27) はこれを満たし、かつアンケートに対し、全実験参加者が 3 段階までのタップの強さを調節可能と答えたことより、3 分割が最適な分割数であると考えられる。今後、これらの分割位置を用いてユーザがタップの強さを調節可能であるかを調査するための実験を行う必要がある。一方、各実験参加者ごとの実験結果から得られた最適な分割位置および各実験参加者のタップの強さの分布にはばらつきがあったため、一定の分割位置を定めて全ユーザに対して適用するのではなく、ユーザごとにキャリブレーションを行い最適な分割位置を決定することも考慮に入れる必要がある。

現在のシステムは感圧センサが取得できる最大押下圧によって制限されている。実験にて使用された最大押下圧は人間が実行することができるタップの強さの範囲よりも小さく、最大押下圧を超えたタップの強さがどのように分布しているかが計測できない。したがって、現在のシステムは実際にユーザが最大押下圧を超える強さの範囲においてタップの強さを調節できていたとしても最大押下圧を超えたタップの強さを区別することができない。より広い押下圧の範囲を取得可能なセンサを用いることによってより多くの分割数のタップを区別できる可能性がある。

実験にて提示された分割数がタップの強さの調節に影響を与える可能性がある。3 分割時において、2 段階目のタップの強さのうち 22.5% が最大押下圧を記録した。しかし、4 分割時において 2 段階目のタップの強さのうち最大押下圧となったタップは 1.7% と少なく、またその分布は 3 分割時の分布よりも左へシフトした。これらは提示される分割数が増え、タスクが難しくなるほど実験参加者は慎重にタップの強さを調節し、分布のばらつきが小さくなったと考えられる。

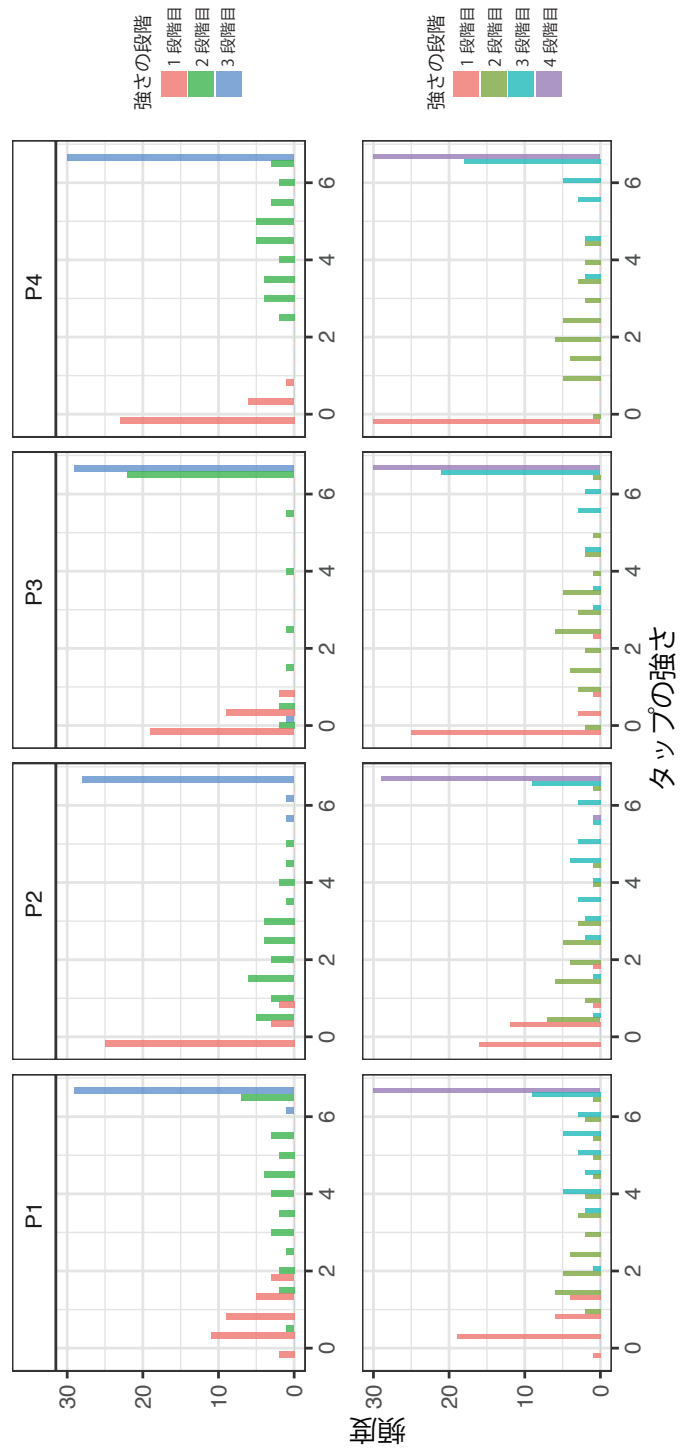


図 5.5: 各実験参加者ごとの3および4分割時のタップの強さのヒストグラム.

第6章 議論と今後の課題

本章では提案手法に関する議論および今後の課題を述べる。

6.1 姿勢の影響

提案手法の性能を評価するにあたり，スマートフォンを使用する際の様々な体の姿勢の影響を考慮する必要がある。予備実験および実験において，我々は実験参加者に椅子に座った状態にてタップするように指示した。しかし，スマートフォンは歩行時やベッドに横たわっている時のように様々な姿勢において使用される。したがって，これらの姿勢がタップの強さの調節に与える影響について調査する必要がある。

6.2 年齢による影響

本研究にて実施した2つの実験の実験参加者は22-23歳であり，年齢層が限られている。しかし，提案手法は入力語彙の拡張のために力を加える必要があるため，より年齢の低いユーザから高いユーザまでのタップに加えられる力の異なるユーザ層に対してタップの強さの調節がどの程度可能であるかを調査する必要がある。特に高齢者は押下圧を用いた操作を苦手とするため [KF96]，幅広い年齢層の参加者を募集し年齢がタップの強さの調節に与える影響を調査する必要がある。

6.3 ターゲット位置による影響およびターゲット選択精度への影響

今回行った2つの実験では実験参加者は画面のタップしやすい位置にてタップを行った。しかしながら，実際の利用場面ではユーザは様々な位置およびサイズのターゲットに対してタップの強さを調節する必要がある。スマートフォンの片手操作時において，親指を自由に動かすことができる場所は限られており，その他の領域へのタッチはデバイスの把持を不安定にする [LMBH18]。したがって，タップの強さの調節が困難となる領域が存在する可能性がある。また強い力にてタップする際，通常のタップをしたときよりもデバイスが揺れるため，タッチ位置が目的とする位置からずれ，小さいターゲットに対する選択精度が下がる可能性がある。したがって，様々な位置およびサイズのターゲットに対する提案手法の性能を調査する必要がある。

6.4 フィードバックの影響

ユーザがタップの強さを調節する際のフィードバックの影響を考慮する必要がある。タップの強さの調節は高速な実行を可能にする一方で、押下圧の連続的な調節とは異なり、画面にタッチしている間にフィードバックを受けながら強さを調節することができない。したがって、ユーザは直前に適用したタップの強さとの相対的な力に基づいてタップの強さを調節する必要がある。そのため、タップした直後にビジュアルフィードバックや音によるフィードバックなどの適切なフィードバックをユーザに与えることにより精度が向上する可能性がある。今後、提案手法に最適なフィードバックの調査および設計をする必要がある。

第7章 アプリケーション例

本節では、提案手法のアプリケーション例を示す。

7.1 ソフトウェアキーボードの拡張

スマートフォンにおける QWERTY 配列のソフトウェアキーボードでは、ユーザは大文字を入力するためにシフトキーを押したのち、目的の文字キーをタップする。また、数字や記号の入力のために、専用のキーボードへの切り替えを必要とする。これに対し、提案手法を用いることにより、1つのキーへの異なる段階の強さのタップに小文字、大文字、数字や特殊文字の入力を割り当てることができる。これにより、追加のキーのタップやキーボードの切り替えを必要とせず、様々な文字が混ざった文章を瞬時に入力可能とする。

7.2 アプリアイコンに対するショートカット

スマートフォンのアプリケーションに対する操作は通常、ホーム画面に配置されたアイコンをタップし、アプリケーションを起動したのちに目的の操作を行う。これに対し、提案手法を用いることにより、アプリアイコンに対する異なる段階の強さのタップをアプリケーションに対する操作のショートカットとすることができる。例えばカメラアプリケーションでは、起動したのちビデオ、ポートレートおよびスローモーション撮影のような撮影モードを切り替える必要があるが、提案手法を用いて特定の撮影モードでの起動を異なる段階の強さのタップに割り当てることにより、1回のタップにより指定の撮影モードにてアプリケーションを起動することができる。

7.3 文字列選択のためのショートカット

スマートフォンにおいて、ウェブページやメールの本文の文字列の選択では、選択したい文字列上またはその付近にてロングタップをすることにより単語単位の選択が行われ、同時に表示されるキャレットをドラッグし指定の位置まで動かすことにより対象の文字列の選択が行われる。これに対し、提案手法を用いることにより、文字列の単語単位の選択、行単位の選択および文字列の全選択を異なる段階の強さのタップにショートカットとして割り当てることができる。これにより行単位の選択および全選択を1回のタップにて実行できると同時に、提案手法はロングタップよりも高速に文字列の選択を開始することができる。

第8章 おわりに

本論文にて，感圧タッチスクリーンにおけるタップの強さをを用いたスマートフォンの入力語彙の拡張手法を示した．本研究ではまず，提案手法の設計に先立ち，ユーザのタップの強さを調節する能力の調査および異なる強さのタップの特徴の調査を目的とした予備実験を行った．予備実験の結果，システムが取得可能なタップの強さを線形に2-6分割した領域に対して，ユーザは98.1%，82.5%，74.1%，67.8%および54.0%の精度にてタップの強さを調節可能であった．また，分割の仕方を非線形にすることにより精度が向上すること，および提案手法が高速に実行できる可能性があることが示唆された．続く実験では，ユーザの複数段階の強さのタップを収集することにより，提案手法の最適な分割数および分割位置の検討を行った．今後，実験にて求められた最適な分割数および分割位置が妥当なものであるか検証するとともに，提案手法の性能向上のための最適なフィードバックについて検討する必要がある．

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました。特に志築文太郎先生には，研究の進め方を基礎からご指導いただいたのみならず，研究の相談や論文執筆に関して多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究活動において様々なお助言を頂きました。また，WAVE チームの皆様にはチームゼミにおいて的確なお意見を多く頂きました。これらのご意見が研究を進める上で頼れる道標となりました。大変感謝しております。特に，漆山裕太氏には研究方針や論文執筆など本研究に対して多くの重要なお助言を頂いたのみならず，共著者として数えきれないほどのご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。また，実験に参加していただいた皆様には，ご協力頂きましたことを大変感謝しております。最後に，筆者を育て，様々な面において研究生生活を支えてくださった家族，そして研究生生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [AMC17] Axel Antoine, Sylvain Malacria, and Géry Casiez. ForceEdge: Controlling Autoscroll on Both Desktop and Mobile Computers Using the Force. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3281–3292, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [AZ12] Shiri Azenkot and Shumin Zhai. Touch Behavior with Different Postures on Soft Smartphone Keyboards. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '12, pp. 251–260, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [BH09] Stephen A. Brewster and Michael Hughes. Pressure-Based Text Entry for Mobile Devices. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '09, pp. 9:1–9:4, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [BLC⁺12] Sebastian Boring, David Ledo, Xiang ‘Anthony’ Chen, Nicolai Marquardt, Anthony Tang, and Saul Greenberg. The Fat Thumb: Using the Thumb’s Contact Size for Single-Handed Mobile Interaction. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '12, pp. 39–48, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [CLBV19] Christian Corsten, Marcel Lahaye, Jan Borchers, and Simon Voelker. ForceRay: Extending Thumb Reach via Force Input Stabilizes Device Grip for Mobile Touch Input. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 212:1–212:12, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [CVLB18] Christian Corsten, Simon Voelker, Andreas Link, and Jan Borchers. Use the Force Picker, Luke: Space-Efficient Value Input on Force-Sensitive Mobile Touchscreens. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 661:1–661:12, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [GLIO17] Hyunjae Gil, DoYoung Lee, Seunggyu Im, and Ian Oakley. TriTap: Identifying Finger Touches on Smartwatches. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3879–3890, New York, NY, USA, 2017. ACM.

- [HFT⁺19] Mengting Huang, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Taichi Tsuchida, Hiroyuki Manabe, and Yoshifumi Kitamura. ShearSheet: Low-Cost Shear Force Input with Elastic Feedback for Augmenting Touch Interaction. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '19*, p. 77–87, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [HGL14] Seongkook Heo, Jiseong Gu, and Geehyuk Lee. Expanding Touch Input Vocabulary by Using Consecutive Distant Taps. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, pp. 2597–2606, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HH12] Chris Harrison and Scott Hudson. Using Shear As a Supplemental Two-Dimensional Input Channel for Rich Touchscreen Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pp. 3149–3152, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [HIS19] Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, and Buntarou Shizuki. One-Handed Interaction Technique for Single-Touch Gesture Input on Large Smartphones. In *Symposium on Spatial User Interaction, SUI '19*, pp. 21:1–21:2, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [HIST19] Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Bounded Swipe: Swipe Gesture Inside a Target. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction, OZCHI '19*, p. 312–316, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [HL11] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. ForceTap: Extending the Input Vocabulary of Mobile Touch Screens by Adding Tap Gestures. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '11*, pp. 113–122, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HL13] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. Indirect Shear Force Estimation for Multi-point Shear Force Operations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13*, pp. 281–284, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [HSH11] Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp. 627–636, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HTT⁺14] Da-Yuan Huang, Ming-Chang Tsai, Ying-Chao Tung, Min-Lun Tsai, Yen-Ting Yeh, Liwei Chan, Yi-Ping Hung, and Mike Y. Chen. TouchSense: Expanding Touchscreen Input Vocabulary Using Different Areas of Users' Finger Pads. In *Proceedings of the*

- SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 189–192, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [KF96] Hiroshi Kinoshita and Peter Francis. A Comparison of Prehension Force Control in Young and Elderly Individuals. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 74, pp. 450–460, 1996.
- [KST16] Yuki Kubo, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. B2B-Swipe: Swipe Gesture for Rectangular Smartwatches from a Bezel to a Bezel. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3852–3856, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [LKB⁺18] Huy Viet Le, Thomas Kosch, Patrick Bader, Sven Mayer, and Niels Henze. Palm-Touch: Using the Palm As an Additional Input Modality on Commodity Smartphones. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 360:1–360:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [LMBH18] Huy Viet Le, Sven Mayer, Patrick Bader, and Niels Henze. Fingers' Range and Comfortable Area for One-Handed Smartphone Interaction Beyond the Touchscreen. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [LMH19] Huy Viet Le, Sven Mayer, and Niels Henze. Investigating the Feasibility of Finger Identification on Capacitive Touchscreens Using Deep Learning. In *Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '19, p. 637–649, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [MR09] Takashi Miyaki and Jun Rekimoto. GraspZoom: Zooming and Scrolling Control Model for Single-Handed Mobile Interaction. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '09, pp. 11:1–11:4, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [MTKJ⁺05] Sachi Mizobuchi, Shinya Terasaki, Turo Keski-Jaskari, Jari Nousiainen, Matti Ryyanen, and Miika Silfverberg. Making an Impression: Force-Controlled Pen Input for Handheld Devices. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '05, pp. 1661–1664, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [PH14] Esben Warming Pedersen and Kasper Hornbæk. Expressive Touch: Studying Tapping Force on Tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 421–430, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [RBB04] Gonzalo Ramos, Matthew Boulos, and Ravin Balakrishnan. Pressure Widgets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, pp. 487–494, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [RLG09] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. MicroRolls: Expanding Touchscreen Input Vocabulary by Distinguishing Rolls vs. Slides of the Thumb. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 927–936, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [RT09] Volker Roth and Thea Turner. Bezel Swipe: Conflict-Free Scrolling and Multiple Selection on Mobile Touch Screen Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1523–1526, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [SLH⁺19] Robin Schweigert, Jan Leusmann, Simon Hagenmayer, Maximilian Weiundefined, Huy Viet Le, Sven Mayer, and Andreas Bulling. KnuckleTouch: Enabling Knuckle Gestures on Capacitive Touchscreens Using Deep Learning. In *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*, MuC '19, p. 387–397, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [SSSO18] Kenji Suzuki, Ryuuki Sakamoto, Daisuke Sakamoto, and Tetsuo Ono. Pressure-Sensitive Zooming-Out Interfaces for One-Handed Mobile Interaction. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '18, pp. 30:1–30:8, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [WSB10] Graham Wilson, Craig Stewart, and Stephen A. Brewster. Pressure-Based Menu Selection for Mobile Devices. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '10, pp. 181–190, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [ZYW⁺18] Mingyuan Zhong, Chun Yu, Qian Wang, Xuhai Xu, and Yuanchun Shi. ForceBoard: Subtle Text Entry Leveraging Pressure. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 528:1–528:10, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [池松 18] 池松香, 山中祥太, 坪内孝太, 椎尾一郎. Copernican-Touch : タッチサーフェスを指へ向けて接触させる動作を用いたタッチ入力拡張手法. 第 26 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, pp. 67–72. 日本ソフトウェア科学会, 2018.
- [池松 19] 池松香, 山中祥太. ScraTouch: 静電容量方式タッチサーフェスにおける手指の爪を使用したタッチ入力拡張技法. 第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, pp. 85–90. 日本ソフトウェア科学会, 2019.

著者論文リスト

参考論文

本論文の主な内容は，下記にて公表済みである．

- 公表済み査読なし論文
 1. 池田 凌，漆山 裕太，志築文太郎．スマートフォンにおける押下圧によるタップの拡張のための予備調査．情報処理学会研究報告，Vol. 2019-HCI-185，情報処理学会，2019年12月，7 pages.

付録A 実験の際に用いた各種書類

実験の際に使用した書類を以下に示す。

A.1 予備実験に用いた実験手順書

実験に関する説明

1 実験内容

スマートフォンに対するタップの強さの調節に関する実験を行っていただきます。実験では分割タスクと連続タスクの2つのタスクを行っていただきます。図1に実験に使用した実験アプリケーションの画面を示します。2つのタスクにおける実験アプリケーションの画面には圧力レベルが表示されます。これはタップの強さに応じて高さが変化し、強くタップするほど上側に移動します。分割タスクではシステムが取得可能な押下圧の範囲を線形に複数段階に分割したうちのある一領域に表示されるターゲット領域に対して圧力レベルが入るようにタップの強さを調節していただきます。連続タスクはシステムが取得可能な押下圧の範囲内に等間隔に100段階の位置に表示されるターゲットに対してできるだけ圧力レベルが近づくようにタップしていただきます。

2 タップの強さの説明

タップの強さの調節とは画面にタッチしている間に画面を押す強さを連続的に変化させるのではなく、タッチした瞬間の強さを調節するものです。そのため、できる限り画面にタッチしたのち素早く指を画面から離すようにしてください。

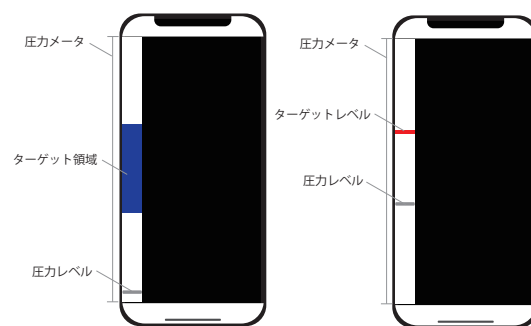


図1 分割タスク（左）および連続タスク（右）の実験アプリケーションの画面

3 実験手順

1. 実験が開始したらタップの強さの調節に慣れるための練習を行っていただきます。練習では図1の圧力レベルおよび圧カメータのみが表示され、最大3分間自由にタップしていただきます。
2. その後、分割タスクと連続タスクを行っていただきます。
3. 2-6分割の計5種類の分割について昇順に分割タスクを行っていただきます。
4. 分割タスクと連続タスクの切り替えの間に5分間の休憩を設けます。

4 実験中の注意

1. 実験中は椅子に深く腰掛け、スマートフォンを片手で持ってください。
2. タップはスマートフォンを持った指の親指にて行ってください。
3. タップする位置はタップしやすい位置にて行ってください。
4. タッチ中の強さの調節にならないようできる限り画面に触れたのち素早く指を離すようにしてください。
5. できる限り正確にタスクを行ってください。

A.2 実験に用いた実験手順書

実験に関する説明

1 実験内容

スマートフォンに対するタップの強さの調節に関する実験を行っていただきます。実験ではタップの強さに基づいてタップを複数段階の強さのタップ（例えば弱、中および強の3段階のタップ）に分けてもらいます。続いてタスクとして画面にランダムな順に表示される数字に対応した強さの段階のタップをしていただきます（図 1b）。実験は3段階および4段階に分割してもらうの2つセッションから成ります。

2 タップの強さの説明

タップの強さの調節とは画面にタッチしている間に画面を押す強さを連続的に変化させるのではなく、タッチした瞬間の強さを調節するものです。そのため、できる限り画面にタッチした後素早く指を画面から離すようにしてください。

3 実験手順

1. 実験が開始したら、タップの強さの調節に慣れるためのウォームアップを行っていただきます。ウォームアップでは画面に下端に黒い水平線が表示され、タップの強さによってその高

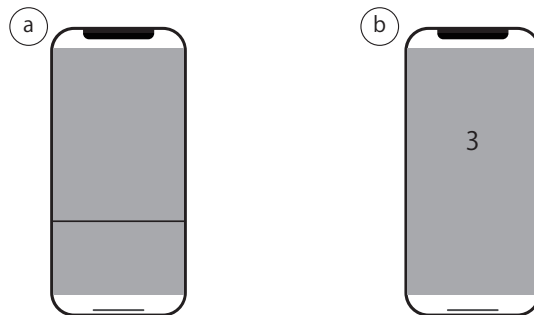


図1 ウォームアップ (a) および本番タスク (b) に用いられたアプリケーションの画面。

さを調節することができます (図 1a)。タップの強さを調節する目安として赤い水平線がランダムな高さに表示されます。ウォームアップではこれに従っても無視しても構いません。自由に 3 分間タップの強さの調節を行ってもらいます。

2. 続いて計測ブロックを開始します。
3. 計測ブロックは 3 分割および 4 分割についての 2 つのセッションからなり、各セッションには練習タスクと本番タスクがあります。
4. 練習タスクではタップの強さを分割できたと感じるまで実際にタップしながらタップの強さを複数段階に調節してもらいます。
5. 続く本番タスクでは画面にランダムに表示される数字に対応する強さのタップをしていただきます。数字が大きいほど強さタップを意味します。
6. はじめのセッション終了後、休憩を 5 分間挟んだのち次のセッションを開始します。

4 実験中の注意

1. 実験中は椅子に深く腰掛け、スマートフォンを片手で持ってください。
2. タップはスマートフォンを持った指の親指にて行ってください。
3. タップする位置はタップしやすい位置にて行ってください。
4. できる限り正確にタスクを行ってください。