

# 身体的制約を利用した操作困難なマルチタッチインタラクションの提案

井上美奈<sup>1</sup> 栗原一貴<sup>1</sup>

**概要**：本研究ではスマートフォンやタブレットなどの端末において、マルチタッチを利用することで身体的制約によりあえて操作困難になるインタラクションを提案する。具体的には、「長時間タッチの継続・維持が困難なボタンの位置・動き」と「1人だと同時タッチの完遂が困難なボタンの配置」の2つである。前者は3個のボタンの配置・動きについて4種類用意し、それぞれの難易度や疲労度などを比較検証する。そしてこれらについて長時間スマートフォンを使い続けてしまう習慣の改善やタッチ継続を課すゲームコンテンツへ応用するシナリオを示す。後者は10個のボタンの配置として、2人以上なら自明に簡単であるが、1人でタッチする際に難易度が異なる「順湾曲配置」、「直線配置」、「逆湾曲配置」の比較検証を行う。そしてこれらを情報システムの同時使用ユーザ数の簡易認証や身体を利用した1人用パズルコンテンツとして応用するシナリオを示す。

**キーワード**：マルチタッチ, 身体的制約, エンタテインメント

## A Proposal for Purposefully Difficult Multi-touch Interaction Using Physical Constraints

MINA INOUE<sup>†1</sup> KAZUTAKA KURIHARA<sup>†1</sup>

### 1. はじめに

マルチタッチ技術の発展により、スマートフォンやタブレット端末、トラックパッドなどでのマルチタッチジェスチャが主流となっている。昨今のマルチタッチジェスチャは2, 3本指にとどまらず、例えばAppleのMulti-Touchトラックパッドでは4本指でのスワイプジェスチャがサポートされている。またiPhone, iPad, iPod touchではAssistive Touch[1]機能において5本指のジェスチャ入力をカスタマイズすることができる。多くのスマートフォンにおいても同時に最大10点までのマルチタッチが可能である(図1)。これはヒトの両手ですべての指を使った同時タッチをカバーする性能である。

しかし一般的なスマートフォンやタブレットなどに搭載されるタッチスクリーン性能が向上する一方で、マルチタッチ技術はディスプレイ上の座標のポインティングやタッチジェスチャ認識以外の用途ではほとんど使われていない。福地の解説論文[3]によると、単純に複数の指の位置を検出するだけのマルチタッチ技術はすでに広く取り入れられており、これを有効活用するアプリケーションの開発競争のフェーズにあること、またマルチタッチ入力とは現状新しい形での利用は特にされておらず、どう有効活用していくかの指針がほとんど確立されていない状態であることが示唆されている。

本研究では、マルチタッチ入力の新しい形としてあえて操作困難となるインタラクションについて検討する。具体的には「継続が困難」と「完遂が困難」という2つのアプローチから困難なタッチについて議論する。前者は主目的であるコンテンツを操作する利き手でない方、つまり端末を把持するだけの非利き手に数点への同時タッチを要求することでユーザに身体的な制限を生じさせ、身体的な疲労を感じやすくなったり情報視聴効率が著しく落ちたりすることを積極的に利用した「長時間タッチの継続・維持が困難なボタンの位置・動き」を提案する。後者は狭いディスプレイ領域上で多くの点への同時タッチを要求することでユーザに身体的な制限を生じさせ、操作性が極めて悪くなることを積極的に利用した「1人だと同時タッチの完遂が困難なボタンの配置」を提案する。マルチタッチ入力は主に直感的な入力による操作効率の向上や大画面での複数人による操作を可能にするために用いられているが、マルチタッチ入力によってあえて操作を困難にするような方向性は探求されていない。

本論文は以下の構成をとる。まず継続が困難なタッチとして提案したレイアウト4種類についてそれぞれのボタン配置と動きによるタッチ難易度や疲労度を比較する。また、非利き手で端末を把持する際に画面に表示された4つのボタンを同時タッチすることによる画面情報の遮蔽度を5段階の異なる位置についてそれぞれ計測する。次に、完遂が

<sup>1</sup> 津田塾大学  
Tsuda University

困難なタッチとして提案したレイアウト 3 種類についてそれぞれのボタン配置とボタンの形状によるタッチ難易度への影響を調査する。そしてマルチタッチ入力を利用した操作困難なインタラクションの有用性を検証する。また、得られた結果と考察をもとにこれらのインタラクションを用いた新しいマルチタッチの応用先を例示する。



図 1 スマートフォンでのマルチタッチ検出  
Figure 1 Multi-touch Detection in Smartphones.

## 2. 関連研究・関連事例

### 2.1 認証への利用

マルチタッチを用いることでモバイル認証の安全性を高める方法が検討されている。

TouchIn[4] は 1 本または複数の指でタッチスクリーンに描画された曲線の幾何学的特性と生理学的特性に基づいてユーザの認証を行う。これによりユーザは認証の際にタッチスクリーンを見ることなくスクリーン上の任意の領域に描画することができ、使用性とショルダーサーフィンやスマッジ攻撃[5]からの堅牢性を同時に高めている。また Yunpeng らの研究[6]ではマルチタッチジェスチャでの認証に手の形状と動作特性を組み合わせることで認証精度とユーザエクスペリエンスの低下という行動ベースの認証で生じやすい問題を克服し、信頼性の高い認証方法を実現している。

Weizhi らの研究[7][8]によるとグラフィカルパスワードベースの認証システムにおけるマルチタッチの利用により、セキュリティと使用性の両面でシングルタッチのグラフィカルパスワードを一般的に強化できることが示されている。

喜多らの研究[9]では連続した入力の時間差を用いるリズム認証にマルチタッチを取り入れることで認証に用いる特徴量が増え、これを有効活用することによる認証精度の

向上が示されている。

これらの利用法は既存の認証方法やタッチジェスチャにマルチタッチを取り入れることで入力空間の拡張や操作性の向上を実現している。本研究の新規性はジェスチャの多様化や利便性の向上ではなく、タッチ領域のレイアウトによりユーザの指を固定させることにある。

### 2.2 入力方式への利用

スマートフォンの日本語入力方式へのマルチタッチ操作の利用も検討されているが、視認性や操作性においてデメリットが目立ち、有効活用がなされているとは言い難い。

君岡らの研究[10]では画面の左右に楕円状に配置されたボタンを左手親指で子音、右手親指で母音と 2 点のマルチタッチで行う入力ボタンレイアウトを提案しているが、10 種提示する必要のある子音のボタンが小さかったり、入力の視覚フィードバックが指で隠れて見えなかったりといった要因から入力速度、入力ミス割合どちらにおいても提案手法の有効性は示されなかった。

平山らの研究[11]ではフローメニューにタブレット PC には 5 本指、スマートフォンには 3 本指のマルチタッチフリックを導入し入力時間と誤入力数についての検証を行っている。スマートフォンは利用可能な指の本数を減らしているにも関わらずメニューの項目数を増やした際の誤入力数の増加がタブレット PC と比較して著しく、運用にはタッチパネル面積の狭さが課題になっている。

### 2.3 ゲームへの利用

本研究のコンセプトにもっとも近い利用例として、指の拘束を使ったゲームがある。Android 用アプリ「指でツイスターゲーム」[12]や iOS 用アプリ「YubiSTAR」[13]などはツイスターという、複数人で指示板に示された手または足をシート上に配置された円印に置いていき倒れないようにバランスをとる全身を使ったゲームを、スマートフォン上でできるよう再現した指を用いて遊ぶアプリである。マルチタッチでお互いの指同士の動きが制限されることを利用している点で本研究と共通しているが、これらのアプリで配置されているボタンはどちらもマトリクス状に並んでいる。本研究ではマトリクス状の配置に限定しない、難易度の異なる 3 種類の新たなレイアウトパターンの検証により、実用的な用途に応用できることを示す。

## 3. 長時間タッチの継続・維持が困難なボタンの位置・動き

本章では「継続が困難」というアプローチから、長時間タッチの継続・維持が困難なボタンの位置・動きを提案する。ただし、単に継続が困難なだけではユーザにタッチを継続させようとする動機をもたせにくい。そこで実際の応用場面を想定し、何かをスマートフォンでしているときにタッチの継続が困難なタッチパターンを探求することにした。これが実現できれば、たとえば自分ではやめたいと思

っているが、つい長時間スマートフォン使用を継続してしまっている際、それを心理的に少ない導入負荷により実現させるシステムや、何か主たる作業を遂行する上でタッチを継続していないとペナルティがあるゲームのような応用が可能であろう。

継続を困難にするアプローチとして、

- ① 非利き手（スマートフォンを把持する手）を拘束し、ボタンを押さえているよう求める。その継続に疲労が蓄積するようにすることで、ユーザの継続意欲を低下させる。
- ② 非利き手を拘束し、ボタンを押さえているよう求める。失敗するとその他のスマートフォン操作や情報視聴が無効化されるようにすることで、ユーザの継続意欲を低下させる。
- ③ 非利き手を貴重な画面上の領域においておくことにより視野が遮られ、その他のスマートフォン操作や情報視聴に支障が出るようにし、ユーザの継続意欲を低下させる。

の3つが考えられる。まず③について行った基礎的な検討を示す。③は自分の指で遮蔽されて操作・視聴に支障が出るなら、タッチの継続をしたくなくなるだろうという考え方である。スマートフォン画面全体に4つのボタンを利き手側から非利き手側まで5段階に配置し、非利き手による把持とボタン押下を行ったことによる画面の遮蔽具合は図2の通りである。それぞれの写真にグリッドを表示し、画面全体のマス目に対し指で隠れずに見えている画面の割合を概算すると(a)が85%, (b)が77%, (c)が68%, (d)が50%, (e)が41%となった。(d)の位置で画面領域の半分は遮蔽されることになり、疲労がなくとも作業に支障が出るだろう。より詳細な検討は今後の課題である。

次に以降の節において①, ②について検討する。その際、画面上においてスマートフォンの本来の操作・情報視聴(以下、主タスクと呼ぶ)を行う領域と、押下を強制するボタンを表示する領域とを分ける設計とした。これは拘束のためのボタン押下により③の視界遮蔽の効果が出ることを防ぎ、③と独立した継続困難性の効果を論ずるための工夫である。実際の応用では、①②③の効果を組み合わせてより高度な継続困難性の実現を設計することに留意されたい。

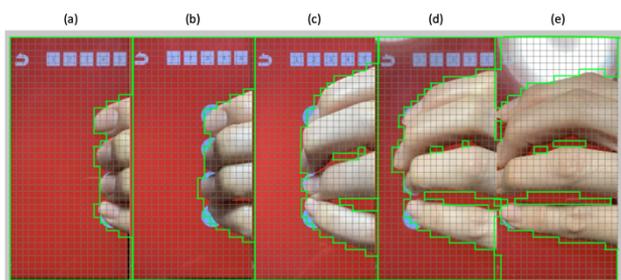


図2 画面全体に指4本を置くことによる画面の遮蔽率  
 Figure 2 Occlusion ratio by placing four fingers on the screen.

### 3.1 レイアウトパターンの提案と実装

長時間タッチの継続・維持が困難なボタンの位置・動きとして、4種類を提案する。ユーザが右利きであることを想定した配置は図3の通りである。左利きの場合は左右反転する。本研究で言及する利き手とは、字を書いたり箸を持ったりするときの利き手とは関係なく、普段スマートフォンを操作するとき主に使う方の手をさす。

これらのインタラクションは動画鑑賞やサイト閲覧などの何らかの主タスクを行う際に操作しない方の手、つまり端末を把持するだけの手を身体的に拘束し、疲労や主タスクの情報視聴効率低下などによりタッチの継続を身体的・心理的に困難にすることを目的としている。片手のみで同時タッチ完遂可能、かつ端末の把持に困難が生じないようボタンの配置数は3個とした。ボタンは縦に連なり、移動する際はそれぞれの縦軸座標の値は変化せず、横軸は全て同じ距離・方向にだけ変化する。図中の斜線部分は主タスクの表示・操作領域である。表示されているボタン3つを同時押下している間のみ主タスクの表示・操作が可能になり、1つでも押下が外れると主タスクは非表示となり操作も不能となる。

これらのレイアウトはユーザが端末の背面に掌があたるよう非利き手で端末を把持することを想定している(図4)。

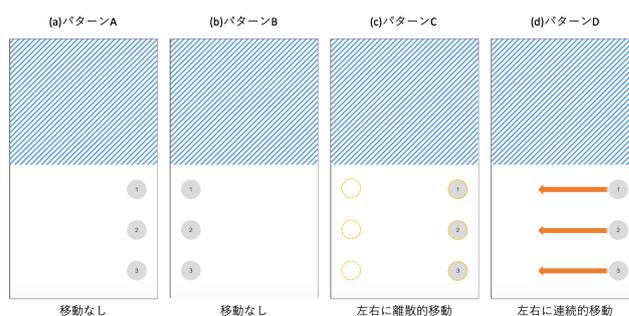


図3 提案する継続困難なレイアウト

Figure 3 Proposed layouts that makes it difficult to continue the touch.

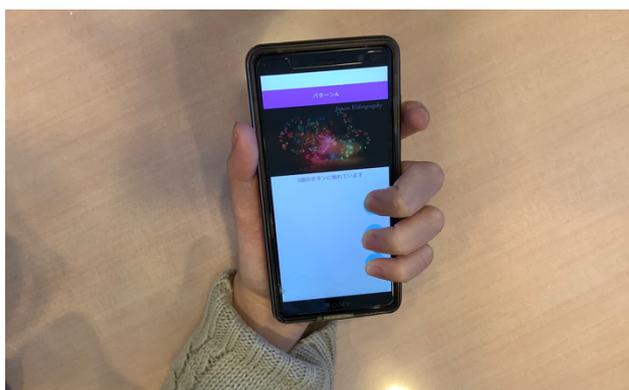


図4 端末の把持方法

Figure 4 Intended manner for grasping the device.

### 3.1.1 実装の詳細

スマートフォンにおいてクロスプラットフォームで動作する、Unity を用いたプロトタイプを開発した。ディスプレイの縦横比は 16:9 を想定した。実装における画面内の座標を図 5 に示す。また、ハードウェアのタッチの不安定さを軽減させるため、ユーザの同時タッチが離れてから主タスクの表示・操作が困難になるまで 1 秒間の猶予を設けた。つまり、一度タッチが離れてから 1 秒以内にタッチのし直しが成功した場合、主タスクは非表示・操作困難にはならない。

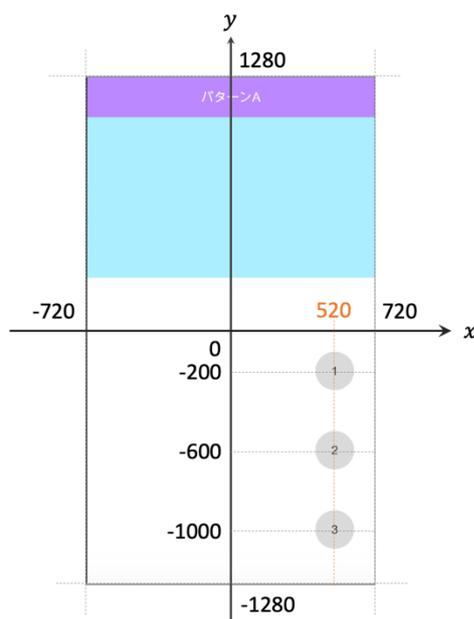


図 5 画面内の座標  
 Figure 5 Coordinates in the screen.

### 3.1.2 レイアウトの設計

パターン A (図 3 (a)) ではボタンはユーザから見て利き手側(右利きの場合  $x = 520$ , 左利きの場合  $x = -520$ )で時間経過に伴う位置の変化はなく、最も通常の把持体勢に近い。

パターン B (図 3 (b)) ではボタンはユーザから見て非利き手側(右利きの場合  $x = -520$ , 左利きの場合  $x = 520$ )で時間経過に伴う位置の変化はない。ボタンの移動はないが、本研究で想定している把持方法でタッチを試みると手首を内側に大きく捻る必要があり、把持体制の維持に伴う疲労が大きいと想定される。

パターン C (図 3 (c)) ではボタンは最初はユーザから見て利き手側に位置し、時間経過に伴い一定時間ごとに利き手側と非利き手側とで位置が切り替わる。つまり、利き手側と非利き手側を交互に離散的に移動する。離散的な移動で指を離す必要があり、必然的に主タスクが非表示となる時間ができるため、情報視聴効率は落ちる。

パターン D (図 3 (d)) ではボタンは最初はユーザから見

て利き手側に位置し、時間経過に伴い一定時間ごとに利き手側と非利き手側の間を、時間をかけて連続的に移動する。パターン C と異なり強制的に主タスクが非表示になる時間ができるわけではないが、動いている間は指をボタンに追従させることに気を取られ主タスクへの関与はほぼできなくなるため、情報視聴効率は落ちると考えられる。

## 3.2 実験

### 3.2.1 実験方法

提案した 4 種類の位置・動きの違いによるタッチ継続難易度を検証するため、実験を行なった。実験に用いたスマートフォンは Xperia XZ2 Compact (縦約 115mm×幅約 57mm) である。前述した実装における画面内の座標はこのサイズでスケールされる。

実験では被験者に、1 パターンにつき約 230 秒の動画鑑賞を主タスクとして各パターンでボタンタッチの継続を試みてもらった。動画鑑賞を主タスクとして採用した背景には、以下のような理由がある。まず、動画鑑賞は画面タッチなどのインタラクションが不要であり、作業負荷が小さい性質がある点である。仮にインタラクションのある主タスクで実験を行うと、ボタンタッチと主タスクのインタラクションそれぞれのタイミングをうまく制御しなければボタンタッチ強制による注意の削がれ具合などに影響が出る可能性があるため、これを考慮しなくて良いことは重要である。また、本実験ではスマートフォンの一部の小領域のみを主タスク用としているため、画面タッチなどのインタラクションが通常より難しくなってしまう影響を考慮しなければならないが、動画鑑賞であれば単純に表示される動画が縮小されるのみであるため、その影響を小さくできると考えた。さらに、提案インタラクションによる主タスクへの影響について、視聴効率、すなわち動画が表示されている時間を計測することで簡便に定量化できる点も特筆すべきである。

動画鑑賞中は利き手で端末を支えることを不可とし、非利き手の親指の置き方や 3 ボタンをタッチする指は特に指定しないこととする。各パターンで同時タッチが成功した時刻と離れた時刻、主タスクが表示された時刻と非表示になった時刻を計測した。画面には最初に 3 つのボタンが表示され、同時タッチが成功したと同時に動画の再生が開始される。動画が非表示になったとしても動画自体は一時停止せずに進んでおり、動画の再生が終わるとそのパターンの実験は終了となる。各パターンで再生される動画は全て同じものであり、実験前にあらかじめ 1 回見てもらった。4 パターンの計測順序はランダムとし、各パターンの計測の間には十分に休憩を取った。またテスト終了後、被験者に各パターンについての主観的な難易度、疲労度、動画鑑賞への意欲の削がれ具合、動画鑑賞の快適さをビジュアルアナログスケール (VAS) で回答してもらい、体験したインタラクションについての感想を自由に述べてもらった。

被験者は 20～50 代の男女 10 人であり、このうち右利きが 9 名、左利きが 1 名である。

各パターンの実験における時間経過に伴うボタンの x 座標の位置を、被験者が右利きの場合を例として図 6, 7, 8, 9 に示す。



図 6 パターン A の時間経過におけるボタンの x 座標  
 Figure 6 Time series plot of the x-coordinate of the button for Pattern A.



図 7 パターン B の時間経過におけるボタンの x 座標  
 Figure 7 Time series plot of the x-coordinate of the button for Pattern B.

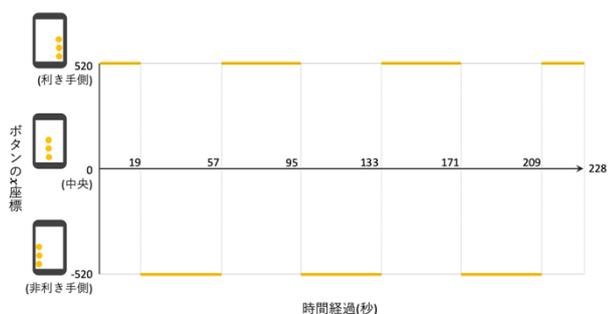


図 8 パターン C の時間経過におけるボタンの x 座標  
 Figure 8 Time series plot of the x-coordinate of the button for Pattern C.

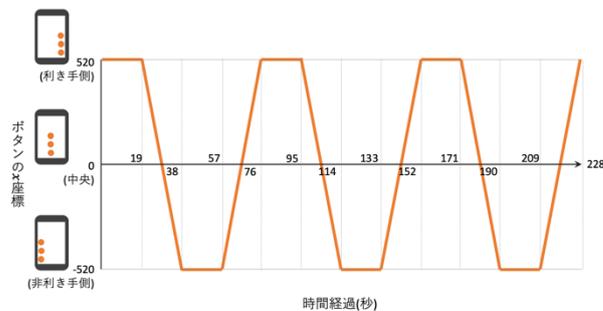


図 9 パターン D の時間経過におけるボタンの x 座標  
 Figure 9 Time series plot of the x-coordinate of the button for Pattern D.

### 3.2.2 実験結果と考察

計測したデータから、動画が見えていた時間と見えていなかった時間、動画が非表示になった、つまり途中で中断された回数を計算した。各パターンについて客観的な評価として視聴可能率、中断回数を比較する。視聴可能率は以下のように定義される。

$$\text{視聴可能率} = \frac{\text{動画が見えていた時間}}{\text{動画が見えていた時間} + \text{見えていなかった時間}} \times 100$$

またユーザが感じる「困難さ」は疲労による困難さと追従の難易度による困難さがあると考え、主観的な評価として難易度と疲労度を、また主タスクへの影響を測るため動画鑑賞への意欲の削がれ具合と動画鑑賞の快適さを比較する。

#### 3.2.2.1 視聴可能率の比較

各パターンの視聴可能率を図 10 に示す。

視聴可能率を一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AC, AD, BC, BD 間で有意確率  $p < 0.001$ , CD 間で有意確率  $p < 0.05$  で有意差が見られた。

ボタンが動かない A と B はどちらも移動する C と D と比べて有意に視聴可能率が高いことから、視聴可能率はボタンが動くか動かないかで差を付けられることがわかった。移動する C と D を比べると、左右の間を一瞬で移動する C よりも連続的に移動する D の方が有意に視聴可能率が低い。C は一瞬で場所が移動するため必ず指を離す必要があるが、時間をかけて動くボタンに追従させる作業の方が一瞬の強制的な移動よりも視聴可能率を落とせることがわかる。

#### 3.2.2.2 動画中断回数の比較

各パターンの動画中断回数を図 11 に示す。

中断回数を一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AC, AD, BC, BD, CD 間で有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。

視聴可能率と同様、ボタンが動くか動かないかで差をつ

けられることがわかる。移動する C と D に着目すると、C の標準偏差が 2.272、D の標準偏差が 4.969 と D は個人差が大きく出ているが一般的に、一瞬の強制的な移動よりも頻りに指を画面から離させることができることがわかった。

移動では一度も中断されていない被験者がいることがわかる。移動の方向による差や非利き手側の末端に位置している時間の差について焦点を絞った実験をすると難易度を左右する要因をより詳しく特定できるかもしれない。

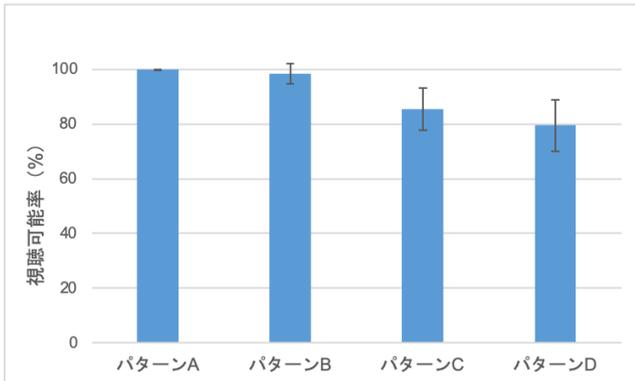


図 10 視聴可能率

Figure 10 The rate of being able to view video.

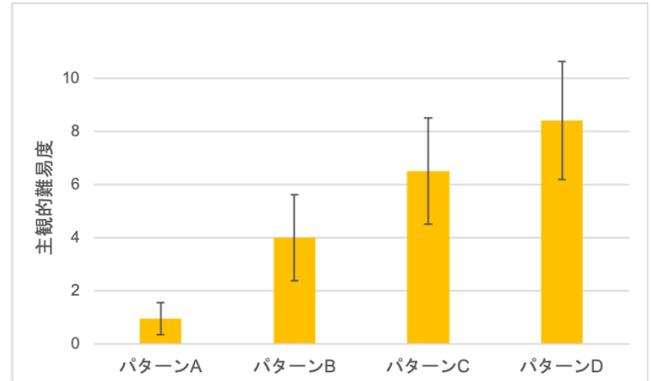


図 12 主観的な難易度

Figure 12 Subjective difficulty.

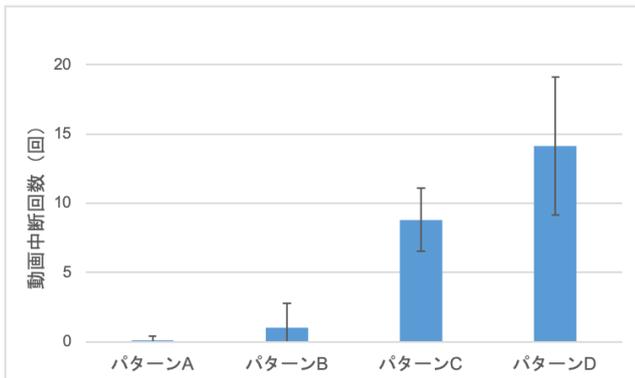


図 11 動画中断回数

Figure 11 The number of video interruptions.

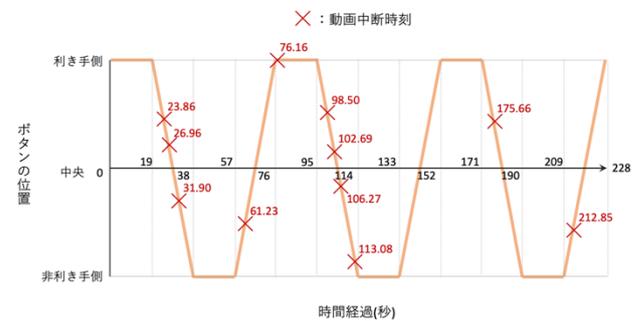


図 13 被験者 1 のパターン D における動画中断時刻

Figure 13 Interruption time in Pattern D for subject #1.

### 3.2.2.3 主観的な難易度の比較

各パターンの主観的な難易度を図 12 に示す。

主観的な難易度を一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AB, AC, AD, BD 間で有意確率  $p < 0.001$ , BC 間で有意確率  $p < 0.01$ , CD 間で有意確率  $p < 0.05$  で有意差が見られた。

難易度は 2 パターン感の組み合わせ全てで有意差が見られたことから、本提案手法は段階的な難易度の設定が可能である。

また自由回答の感想では、パターン D の移動において利き手側から非利き手側への移動は非利き手側から利き手側への移動よりも難しいという意見があった。図 13, 14, 15 は 3 人の被験者のパターン D における動画が中断された時刻を示したものである。利き手側から非利き手側への移動は非利き手側から利き手側への移動に比べて中断回数が多い傾向があることがわかる。非利き手側から利き手側への

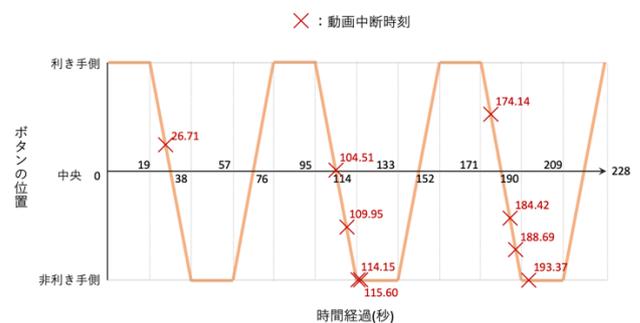


図 14 被験者 2 のパターン D における動画中断時刻

Figure 14 Interruption time in Pattern D for subject #2.

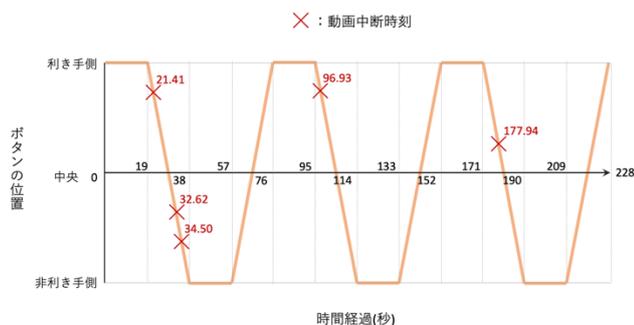


図 15 被験者 3 のパターン D における動画中断時刻  
Figure 15 Interruption time in Pattern D for subject #3.

### 3.2.2.4 主観的な疲労度の比較

各パターンの主観的な疲労度を図 16 に示す。

主観的な疲労度を一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AB, AC, AD 間で有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。

疲労度は、A のみ有意に少ないことがわかる。A 以外はボタンが非利き手側に配置されていた、または移動したことから疲労の要因は動かか動かないかではなくボタンの位置にあると考えられる。

自由回答の感想では、パターン B は動かない分持ち直しをしないため一定時間ごとに動いて持ち直しが発生する C, D よりも疲れるとの意見があった。

### 3.2.2.5 意欲の削がれ具合の比較

各パターンの意欲の削がれ具合を図 17 に示す。

意欲の削がれ具合を一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AC, AD, BD 間で有意確率  $p < 0.001$ , AB, BC 間で有意確率  $p < 0.01$ , CD 間で有意確率  $p < 0.05$  で有意差が見られた。

意欲の削がれ具合は 2 パターン間の組み合わせ全てで有意差がみられたことから、段階的な意欲削減度合いの設定が可能である。また、B は疲労度が C と D と同程度だったにも関わらず意欲の削減度は C と D と比べて有意に低いことから、「疲れたからやめなくなる」というわけではないことがわかる。

### 3.2.2.6 動画鑑賞の快適さの比較

各パターンの動画鑑賞の快適さを図 18 に示す。

動画鑑賞の快適さを一元配置分散分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに Holm 法により多重検定したところ、パターン AB, AC, AD, BD 間で有意確率  $p < 0.001$ , CD 間で有意確率  $p < 0.01$  で有意差が見られた。

A のみが有意に動画鑑賞が快適であったことがわかる。ボタンは動かないが疲労度が高くでたパターン B は同じく動かない A よりも大きく快適さが落ちていることがわかる。

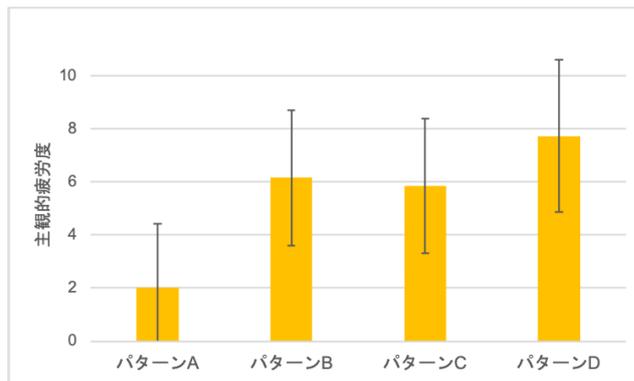


図 16 主観的な疲労度  
Figure 16 Subjective fatigue.

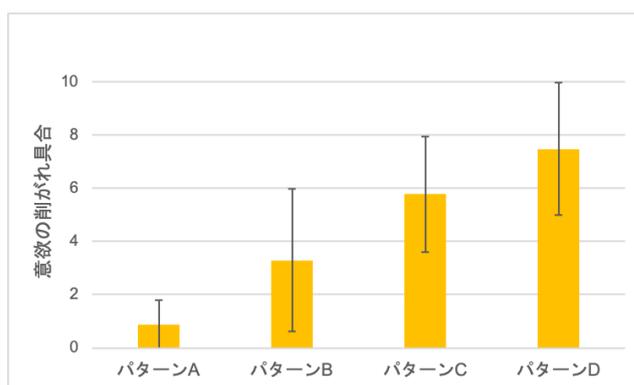


図 17 意欲の削がれ具合  
Figure 17 Degree to which motivation is reduced.

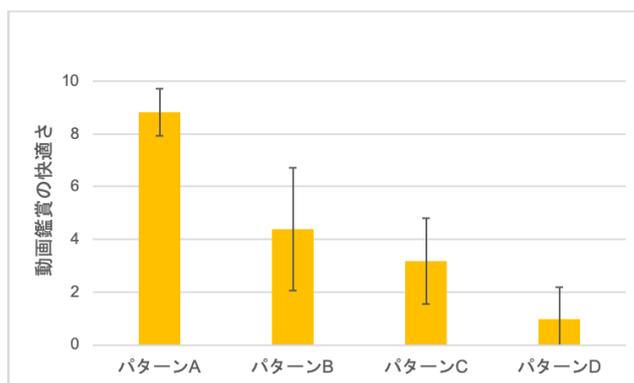


図 18 動画鑑賞の快適さ  
Figure 18 Comfort for watching videos.

### 3.2.3 議論

本実験は主タスクとして動画鑑賞を採用した。これは主タスクの作業負荷が小さい場合の結果であると解釈できる。すなわち、インタラクションが必要なもののように、主タスクの作業負荷がより大きくなれば、タッチ継続作業へのユーザの集中はより削がれるため、さらに各種の困難さは増すと考えられる。その検証は今後の課題である。

また、本実験では、各パターンにおいて利き手側に位置

している時間、非利き手側に位置している時間がそれぞれ同一ではなかったため、位置による困難さと、移動による困難さの寄与を詳しく分析することはできていない。また、パターンDにおいて移動の方向によって難易度が変化することが示唆された。困難にしようする要因についてより細分化し焦点を絞った実験が必要である。

### 3.3 応用例

実験結果に基づき、提案手法の応用シナリオを例示する。

#### 3.3.1 スマートフォン長時間使用の自粛支援

本提案手法は、スマートフォンの使用をやめたいという内発的動機付けを、異なる強さの外発的要因によって支援することが可能であろう。使用時間コントロールを強化するアプリケーションには設定した時間でアプリをロックして操作できないようにするものがあるが、本提案手法はこのように強制的にやめさせるような完全な外発的要因ではなく、外発的動機と内発的動機をうまく調節する役割を果たす。これにより、自分からやめるというユーザの行動変容を引き出すことができる。

#### 3.3.2 タッチ継続を利用したエンタテインメント

提案した4種類のインタラクションは、タッチ継続の難易度を段階的に差をつけられることが示されたので、タッチ継続の失敗によるペナルティがあるゲームなどへの応用が可能である。本提案では一定時間で3つのボタンを同じ方向に同じ距離だけ一直線上のみを移動させたが、移動のタイミングや位置などにバリエーションを持たせることでタッチ継続そのものをゲームとして導入することもできるだろう。

## 4. 1人だと同時タッチの完遂が困難なボタンの配置

### 4.1 レイアウトパターンの提案と実装

1人だと同時タッチの完遂が困難なボタンのレイアウトとして、段階的に異なる難易度になることを意図した3種類を図19のように提案する。配置の形状から、それぞれ(a)順湾曲配置、(b)直線配置、(c)逆湾曲配置と呼ぶ。

ユーザはこれらのレイアウトに対して、提示された10個のボタン全てを一度にまとめてタッチするよう試みる。例えば、ボタン全てを瞬間的に押す必要はなく、ひとつずつタッチを確かめながら押下していき、同時にボタンにタッチしている指が合計で10本に到達すれば同時タッチ完遂となる。一度タッチしても指がずれてボタンタッチ領域から外れると、その分は合計から引かれ、その指は一度画面から離してタッチし直す必要がある。

これら3種類のレイアウトは、いずれも2名あるいはより多人数のユーザが同時に取り組みれば、デバイスを挟んで対面し押下を分担することで容易に10点すべてのタッチ完遂が可能であると想定した(図20)。

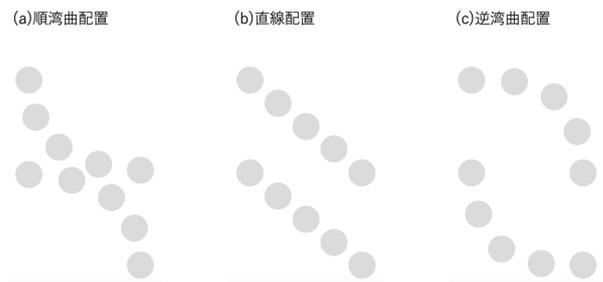


図19 提案する同時タッチ完遂が困難なタッチレイアウト

Figure 19 Proposed button layouts that makes it difficult to complete simultaneous touches.



図20 逆湾曲配置を2人でタッチする様子

Figure 20 A snapshot of two people touching the “Reverse Curvature Layout”.

### 4.1.1 レイアウトの設計

#### 4.1.1.1 順湾曲配置

順湾曲配置は、端末を横向きに置いたとき、左右両側から手を丸めながらタッチすることで10点同時タッチが比較的容易に可能であると想定した配置である。ただし実装の際のサイズやユーザの手の大きさなどによって難易度に影響を受けると思われる。

#### 4.1.1.2 直線配置

順湾曲配置が手のそれぞれの指の長さに合わせて緩やかにボタン配置のカーブをかけているのに対し、直線配置は指の長さを無視して一直線状に並んでいる。そのため、順湾曲配置と同じアプローチでタッチしようとした場合、比較的指の固定が難しいと想定される。また、直線ごとに左手、右手を割り振らず、両手の指を組み合わせてタッチする方法も考える。

#### 4.1.1.3 逆湾曲配置

逆湾曲配置は順湾曲配置と逆方向にカーブをかけているため、同様のアプローチでは指の固定がかなり困難であると想定される。片手内で指の並べ順を入れ替えたり、両手指を混合させたりするなどの工夫が必要になると考える。

#### 4.1.2 ボタン形状の設計

入力を難しくするためにはボタンを小さくすることが考えられるが、ユーザの手の大きさによっては難易度に差を出すことができず、全てのレイアウトで同時タッチの完遂ができないということになりかねない。そこで、ボタンの大きさはユーザによって個別に設定ができることとした。しかし、ボタンを円形のまま拡大すると、ボタン領域内でタッチできる座標に選択の余地が生じる。すると片手5本指によるタッチを想定している上下それぞれ5つのボタン群について、5つの円の中心をつないだ曲線の曲率よりも低い曲率の曲線上でタッチすることが可能になるため、指と指との間の窮屈さが緩和され、タッチ完遂難易度が下がってしまう可能性がある。そこで、ボタンの拡大機能を実装する場合、ボタンの形状を円形でなく楕円形にすることで各レイアウトのタッチ完遂難易度を保ったままユーザの指のサイズに合わせたボタンサイズ変更ができるのではないかと考えた。各配置においてタッチ完遂できる5指の押下座標をつないだ曲線のうち、最も低曲率のものを最低曲率許容曲線と定義する。3種類の配置における最低曲率許容曲線を図21に示す。(2)の円形ボタンの最低曲率許容曲線(青色)が(1)の元の逆湾曲配置の最低曲率許容曲線(橙色)と比べて図22で示すように緩やかになっているのに比べ、(1)の元の逆湾曲配置と(3)の楕円形ボタンの最低曲率許容曲線はほぼ一致している。

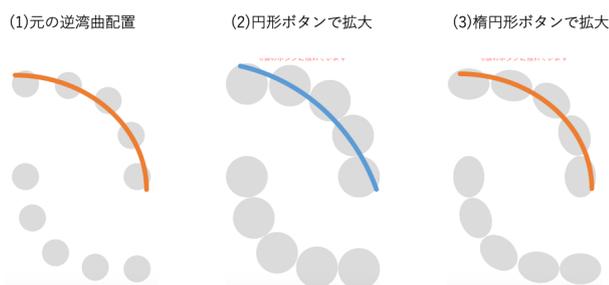


図 21 サイズを最大化した円形ボタンと楕円形ボタンによるレイアウト

Figure 21 Layouts with maximized circular buttons and with maximized oval buttons.

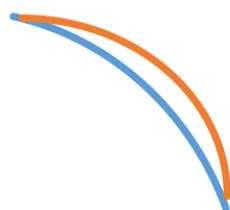


図 22 図 21 における最低曲率許容曲線の差

Figure 22 Difference of the “minimum curvature tolerance curves” in Figure 21.

#### 4.1.3 実装の詳細

以上の設計に基づき、スマートフォン、タブレット、およびマルチタッチ可能なディスプレイを持つ PC においてクロスプラットフォームで動作する、Unity を用いたプロトタイプを開発した。

実装の方針として、本研究では入力を難しくするインターフェースを目指すため、タッチ判定の基準を厳しく設定した。例えば、ボタンのクリックイベントとして PointerEnter イベントを使うと一度ボタンを押下し、押下したままタッチ領域外に指がずれたとしても、そのまま指を領域内にスライドさせれば再びタッチ判定は成功する。この判定をより厳しくするため、PointerDown イベントを使用することで一度指がタッチ領域外にずれてしまった場合、一旦その指は画面から離してから、領域内にタッチし直さなければならないようにした。

#### 4.2 実験

##### 4.2.1 実験方法

提案した3種類のレイアウトとボタン形状の違いによるタッチ完遂難易度を検証するため、実験を行なった。実験に用いたスマートフォンは Google Pixel 4 (縦約 145mm×幅約 69mm) である。なお、本提案レイアウトは画面面上でサイズ・配置を同様に表示すれば他のスマートフォンやタブレット端末などでも使用可能である。

実験は図 23 に示した6種類のテストで構成されている。テスト 1, テスト 2, テスト 3 ではレイアウトによる難易度の比較, テスト 4, テスト 5 ではボタンサイズを大きくした場合のボタン形状による難易度の変化の検証, テスト 6 では逆湾曲配置を2名でデバイスを挟んで対面し押下を分担した際の一人分の押下の可否を検証する。それぞれのテストでは被験者に提示されたボタン全てを1人で一度にまとめてタッチするよう試みてもらい、同時タッチ完遂までにかかった時間を測定する。各テストにおいて被験者は時間測定前に同時タッチする方法を考え練習する時間が十分に与えられるものとする。測定開始後の挑戦時間は300秒を上限とし、完遂できなかった場合はかかった時間を300秒として記録する。またテスト終了後、被験者に各テストについての主観的な難易度を10件法で、体験したインタラクションについての感想を自由に記述させた。被験者は20代女性8名である。

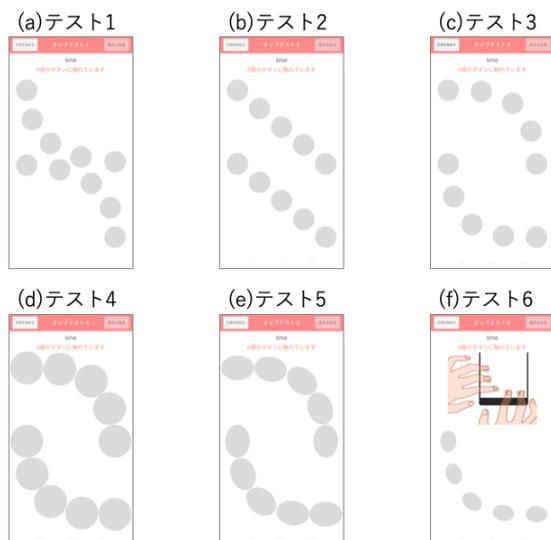


図 23 実験に用いたテスト画面

Figure 23 Screenshots of the tasks used in the experiment.

#### 4.2.2 実験結果と考察

テスト1からテスト6の同時タッチ完遂時間の平均値と標準偏差を表1に、主観的難易度の平均値と標準偏差を表2に示す。

表 1 タッチ完遂時間の平均値 (秒) と標準偏差 (秒)

Table 1 Mean (in seconds) and standard deviation (in seconds) of task completion time.

	平均	標準偏差 (SD)
テスト1	115.000	97.971
テスト2	178.875	122.606
テスト3	264.125	87.136
テスト4	190.125	147.091
テスト5	191.625	149.607
テスト6	5.250	1.488

表 2 主観的難易度の平均値と標準偏差

Table 2 Means and standard deviations of subjective difficulty.

	平均	標準偏差 (SD)
テスト1	5.875	1.553
テスト2	7.375	2.774
テスト3	9.375	0.916
テスト4	6.625	3.543
テスト5	7.250	3.655
テスト6	1.500	0.926

#### 4.2.2.1 レイアウトによる難易度の比較

テスト1, テスト2, テスト3の計測時間の差と、主観的難易度の差をそれぞれ図24, 図25に示す。

テスト1, テスト2, テスト3のタッチ完遂時間をFriedman検定で分析したところ、有意差が見られた ( $p < 0.01$ )。さらにHolm法により多重検定したところ、テスト1とテスト3の間に有意差が見られた ( $p < 0.05$ )。これにより、逆湾曲配置は順湾曲配置よりも難しいことが示された。主観的難易度も同様にFriedman検定を行ったところ有意差が見られた ( $p < 0.01$ )。続けてHolm法による多重検定により分析するとテスト1とテスト3の間に有意差が見られた ( $p < 0.01$ )。自由記述の感想では直線配置、逆湾曲配置で難儀し途中で諦めたくなったという回答がいくつか見られた。

本実験より、逆湾曲配置は順湾曲配置よりも有意に難易度が高く、提案する3種類のレイアウトによってタッチ完遂に要する時間を変化させることができる可能性が示唆された。とくに逆湾曲配置は1人では同時タッチが難しく、今回の制限時間である300秒の間にタッチを完遂できた被験者の割合は25%であった。なお直線配置は順湾曲配置、逆湾曲配置に比べて個人差が大きい。今回は300秒を上限としたが、より長い時間で実験すると異なる結果が得られるかもしれない。

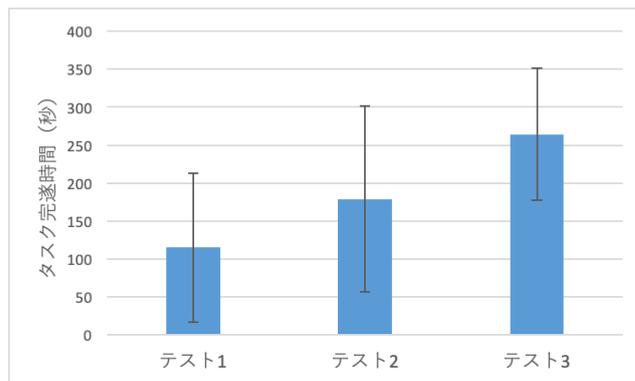


図 24 レイアウトの違いによるタスク完遂時間

Figure 24 Task completion time for each layout.

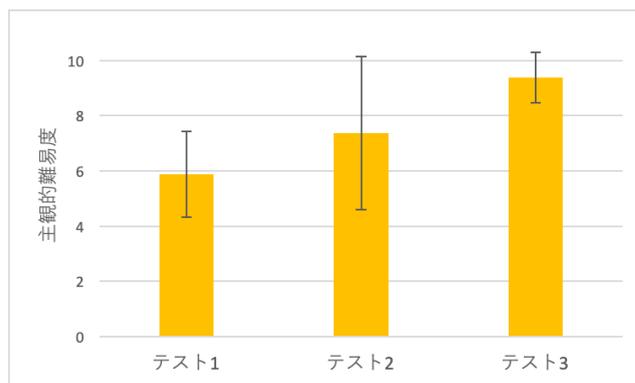


図 25 レイアウトの違いによる主観的難易度

Figure 25 Subjective difficulty for each layout.

#### 4.2.2.2 ボタン形状による難易度の変化の検証

テスト4, テスト5, の計測時間の差と, 主観的難易度の差をそれぞれ図26, 図27に示す.

テスト4, テスト5のタッチ完遂時間をWilcoxonの符号付き順位検定したところ, 有意差は見られなかった ( $p=0.465$ ). 主観的難易度も同様にWilcoxonの符号付き順位検定したところ有意差は見られなかった ( $p=0.138$ ).

本実験より, 楕円のボタンを導入することで曲率を変更し, 難易度を高める方向に調整することの有効性は現時点では示すことができなかった. 詳しくこのデータを見ると, すぐにテスト3を完遂できる人はテスト4, テスト5を同程度の時間で突破しており, 完遂できない人はテスト4, テスト5ともに制限時間を過ぎて諦めていた. より多様にパラメータを調整した検証が今後の課題である.

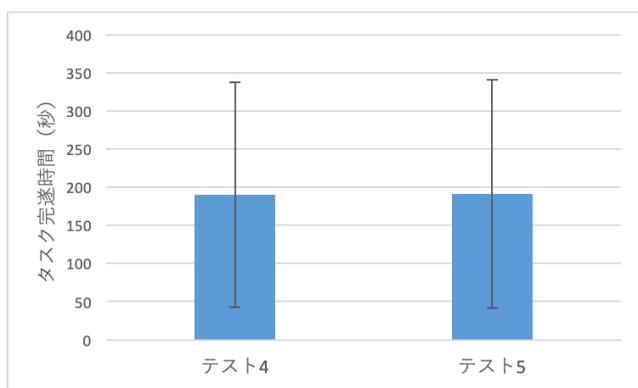


図26 ボタン形状の違いによるタスク完遂時間  
 Figure 26 Task completion time for each button shape.

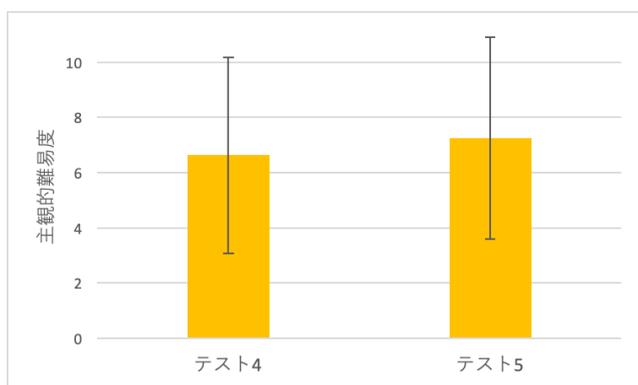


図27 ボタン形状の違いによる主観的難易度  
 Figure 27 Subjective difficulty for each button shape.

#### 4.2.2.3 2人でタッチすることを想定した場合の検証

テスト6は, テスト3(逆湾曲配置)と同座標のレイアウトで, 楕円ボタンを導入することによる難易度を高める調整を試みたものである. これについて2人で分担してタッチすることを想定し, その1人分であるボタン5つを被験者1名で全てタッチするまでにかかった時間を調べた(図23(f)). テスト6の完遂するまでにかかった時間の平

均値は5.250秒, 標準偏差は1.488秒, 主観的難易度の平均は1.500, 標準偏差は0.926である. テスト3の完遂時間平均値264.125秒, 標準偏差87.136秒, 主観的難易度平均値9.375, 標準偏差0.916に比べてテスト6は明らかに難易度が低く, 短時間で全員がタッチ完遂に成功していることがわかる.

本実験より, 逆湾曲配置は1人ではタッチ完遂が困難で, 2人ではタッチ完遂が容易な状況を実現できることが示された.

#### 4.2.3 議論

本実験は手の指のみを使用して行ったが, たとえば脚の指などの手以外の身体部位の使用や, スマートフォン用ペンデバイスの使用などにより1人でのタッチ完遂難易度が軽減できてしまう可能性が想定される. したがって応用先としてはタッチ完遂の厳密な困難性を前提にするのではない, エンタテインメント用途などの非シリアスなものがふさわしいと考えられる.

#### 4.3 応用例

実験結果に基づき, 提案手法の応用シナリオを例示する.

##### 4.3.1 情報システムの同時使用ユーザ数を認証する

実験により逆湾曲配置は1人によるタッチの完遂が困難であることが示された. これにより, タッチ完遂を指定の時間以内に行うよう制限することにより, 2人以上であれば十分間に合い, かつ1人ではタッチが難しい状況を作ることが可能である. 図28は, 実験におけるテスト3(逆湾曲配置)とテスト6(逆湾曲配置の一人担当部分)において, 各経過時間におけるタッチ完遂累計者の割合をプロットしたものである. これに基づけば, たとえば40秒以内のタッチ完遂を課すことによりそれが実現できるだろう.

この仕組みは, 情報システムの簡易な同時使用ユーザ数認証手法として応用可能である. すなわち, 複数ユーザでの使用を想定した情報システムやサービスにおいて, 初期画面および一定時間ごとに提案レイアウトを表示しタッチを要求することで, 単独のユーザでの使用を制限することが可能となるだろう.

そのような利用シーンとして, たとえば子ども単独での情報機器使用をカジュアルに制限したい場合や, 2名以上の参加を原則とするゲームの開始時に参加人数確認を行う場合が挙げられる.

本手法は指紋認証デバイスや顔認証のためのカメラデバイスを用いずに, マルチタッチデバイスのみで実現可能な人数認証手法であり, 普及が容易である点が特徴である.

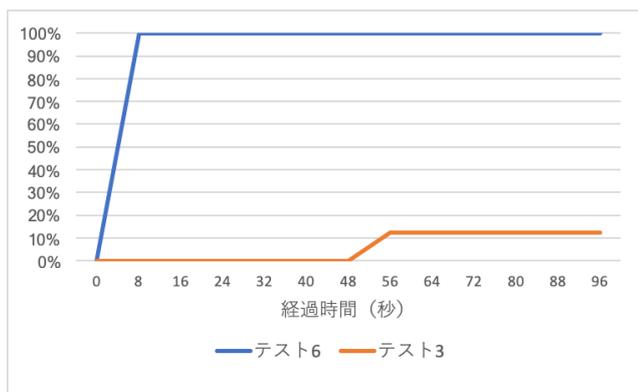


図 28 経過時間とタッチ完遂累計者数の割合

Figure 28 Time series plot of ratios of participants who completed the task.

#### 4.3.1 身体を用いたパズルコンテンツ

提案した3種類のレイアウトにおいて、タッチ完遂の困難さにある程度段階を設けられることが示されたので、1人でのタッチ完遂を目指すパズルコンテンツとして応用可能であろう。順湾曲配置を低レベル、逆湾曲配置を高レベルとすることや、制限時間を設けることによりタッチ完遂確率を制御することでレベルデザインを行うことが可能であろう。これは関連事例で述べた「指でツイスターゲーム」[12]や「YubiSTAR」[13]と類似のものであるが、これらが2人用であることに対し、本提案は1人用である点が異なる。

### 5. 今後の展望と課題

#### 5.1 展望

本研究では「継続が困難」、「完遂が困難」なアプローチにより、敢えて困難なマルチタッチインタラクションを検討した。身体的および精神的な困難性により計算機使用を妨げる技術は、デジタルウェルビーイングやペアレナラルコントロールの重要性が注目されている現代において有用な技術であると考えられる。また、タッチの困難さを段階的に調節できることが明らかになったことにより、指の運動に障害を持つ人を対象としたリハビリ支援として活用することも可能かもしれない。これは今後の課題である。

#### 5.2 課題

本稿で提案したレイアウトは多点マルチタッチが問題なく実行でき、動作が安定していることが前提になっている。しかし、マルチタッチデバイスの性能は機種によって差があり、我々のインフォーマルな実験では、検出が可能であっても10点の継続的タッチ検出が不安定なハードウェアが散見された。今後のマルチタッチ検出技術の向上を期待するとともに、このような精度の必ずしも高くないハードウェアでも活用可能なタッチ検出アルゴリズムの検討を今後の課題としたい。

### 6. おわりに

本研究ではマルチタッチ操作を使うことで発生する身体的制約によりあえてタッチ困難なボタンレイアウトを提案し、その有効性を議論した。その結果、継続の困難さ、完遂の困難さともにタッチの困難さを段階的に調節可能であることが示された。これを応用して、用途によってユーザや開発者が困難さを適切に設定して利用することができるだろう。

**謝辞** 助言をくださった皆様、実験に協力してくださった皆様に深く感謝の念を表す。

#### 参考文献

- [1] Apple, <https://support.apple.com/ja-jp/HT202658>.
- [2] 511plus, (2012), <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.the511plus.MultiTouchTester&hl=ja&gl=US>
- [3] 福地健太郎：マルチタッチ技術の研究動向，コンピュータソフトウェア，Vol.28 No.2 (May 2011), pp.55-62.
- [4] J. Sun, R. Zhang, J. Zhang and Y. Zhang : TouchIn: Sightless two-factor authentication on multi-touch mobile devices, 2014 IEEE Conference on Communications and Network Security (2014), pp. 436-444.
- [5] Aviv, A.J., Gibson, K., Mossop, E., Blaze, M., Smith, J.M. : Smudge attacks on smartphone touch screens., In: Proceedings of the 4th USENIX conference on Offensive technologies, WOOT'10 (2010), pp.1-7.
- [6] Y. Song, Z. Cai, Z. Zhang : Multi-touch Authentication Using Hand Geometry and Behavioral Information, 2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP) (2017), pp.357-372.
- [7] Yuxin Meng, Wenjuan Li, Lam-For Kwok : Enhancing Click-Draw Based Graphical Passwords Using Multi-Touch on Mobile Phones, IFIP Advances in Information and Communication Technology 405 (July 2013).
- [8] Weizhi Meng, Wenjuan Li, Lam-For Kwok, Kim-Kwang Raymond Choo : Towards enhancing click-draw based graphical passwords using multi-touch behaviours on smartphones, Computers & Security Vol.65 (March 2017), pp.213-229.
- [9] 喜多義弘, 神里麗葉, 朴美娘, 岡崎直宣：マルチタッチ操作を利用したリズム認証方式の検討，情報処理学会研究報告 Vol.2014-UBI-41 No.19 (2014).
- [10] 君岡銀兵, 志築文太郎, 田中二郎：マルチタッチを利用した携帯端末用日本語入力方式とその評価，情報処理学会研究報告 Vol.2010-HCI-138 (2010).
- [11] 平山健一, 小枝正直：スマートデバイスにおける不特定入力領域フローメニューとマルチタッチフリックを用いた入力方式の提案，第74回全国大会講演論文集 2012 巻1号 (2012), pp.73-74.
- [12] kinoya, (2013), <https://apkpure.com/jp/%E6%8C%87%E3%81%A7%E3%83%84%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%A0/com.ketaikakaku.twister>
- [13] CINCOCCO Inc., (2014), <https://apps.apple.com/jp/app/yubistar/id523591824>