

steaDePhone：安定把持を可能にする 背面形状変化型スマートフォン

穴久保 拓磨^{1,a)} 谷田 佑貴^{2,b)} 藤波 香織^{3,c)}

概要：近年、形状が変形するインタフェースが注目されており、本論文ではスマートフォンの事例として安定把持のための変形システム steaDePhone を提案する。スマートフォンの把持に関して、端末故障や列車遅延のような端末の落下に起因した問題が多く存在する。これらは、薄く平らな端末形状により安定把持が困難なことが一因だと考えられる。steaDePhone は 12 個の独立制御可能な突起を端末背面に備えた変形機構により、操作に適した安定把持形状への変形を行う。プロトタイプシステムを開発し、操作性と安定性についてのユーザ評価を行った結果、形状変形が操作性と安定性の向上に貢献することが示唆された。

steaDePhone: A Deformable Smartphone for Steady Grip

ANAKUBO TAKUMA^{1,a)} TANIDA YUUKI^{2,b)} FUJINAMI KAORI^{3,c)}

Abstract: Shape changing interface is getting attention. In this paper, we propose steaDePhone, a deformable smartphone for steady grip as a case study. Steady grip would be able to address issues caused by dropping a terminal on the ground, e.g., delaying a train, damaging the terminal, etc. Also, the usability of an application could be improved. We propose dynamic rear-shape deformation for stable terminal operation, which is realized by 12 independent controllable protrusions. As a result of user evaluation using a prototype system, it was suggested that shape deformation is effective for improving operability and stability.

1. はじめに

近年、スマートフォンが広く普及し多くの人が所持しているが、利用者のおよそ 40%が端末の落下を経験しているといわれている [6]。落下による影響として、端末故障や線路内に端末が落下することによる列車遅延の発生が挙げられる。落下の原因として、端末自体が薄く平らな形状をしているために安定把持が困難であることが挙げられる。現在、バンカーリング [9] のような落下防止製品も販売され

ているが、多様な把持状態への対応は困難である。一方、形状変化型インターフェイス (Shape-changing interface) に関する研究が活発に行われている [1]。形状変化型インターフェイスはデバイス本体を様々な形状に変形することで情報伝達や入力を行うことが可能である。

本研究では形状変化型インタフェースの一例として、安定把持のために変形するスマートフォン (steaDePhone^{*1}) を開発する。また、安定把持によりその操作性の向上も図る。背面に凹凸制御可能な 12 個の突起を備えたプロトタイプシステムを用いてユーザ評価を行う。本論文の構成について述べる。第 2 章では形状変化を用いた携帯端末の関連研究を紹介する。つづく第 3 章では、steaDePhone の設計とプロトタイプシステムの実装について述べる。第 4 章では、安定形状の調査と定義を述べ、第 5 章では評価実験について述べる。6 章では全体を通した考察を述べ、第 7 章では結論と今後の課題を述べる。

¹ 東京農工大学 工学部 情報工学科
Department of Computer and Information Sciences,
Tokyo University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院 工学府 産業技術専攻
Department of Industrial Technology and Innovation,
Tokyo University of Agriculture and Technology

³ 東京農工大学大学院 工学研究院 先端情報科学部門
Department of Computer and Information Sciences,
Tokyo University of Agriculture and Technology

a) ana9bota9ma@gmail.com

b) rm.me.2468@gmail.com

c) fujinami@cc.tuat.ac.jp

^{*1} Steady と deformable, depth, dekokoboko (凸凹) の造語

2. 関連研究

Nakagaki, et al. は、形状が変形する紐状のインターフェイスを開発した [5]. 様々な形状への変化を、3D モデリングの際の入出力や、データ転送時のデータの流れを可視化する表現法として利用することで、形状変化を利用した多彩なインタラクションの可能性を示した.

スマートフォン型デバイスに形状変化を用いた研究として以下のようなものがある. Hemmert, et al. は、変形により触覚のフィードバックを可能にする、形状変化型スマートフォン型デバイスを開発し、端末の形状変化が新しいフィードバックとなる可能性を示した [3]. さらに Hemmert, et al. は、ユーザの手の動きによって変形するスマートフォン型デバイスを用いて、ユーザと端末間でのインタラクション手段として変形という動作を調査した [4]. これにより、反応動作がユーザとデバイス間のインタラクションの活発化の手段になることを示している. MorePhone [2] はフィルム状のデバイスの角がめくれ上がることでユーザに通知を行うものであり、形状変化による通知が視覚フィードバックとして有効であることを示している. 上記の研究では、スマートフォンに形状変形を取り入れているが、その多くがユーザとのインタラクションの手段として使用している. 本研究では、スマートフォンにおける形状変化として安定把持について着目する. さらに安定把持を可能にすることにより、端末の操作性、ユーザビリティの向上を目指すことが本研究の特徴である.

3. steaDePhone の設計と実装

3.1 前提と主要機能

steaDePhone は、ユーザの把持状態（右手での把持、左手での把持、両手での把持）と操作（テキスト入力や、スクロールなど）を認識し、それらの状況に適した安定形状に自動で変形する. そのため、1) ユーザの把持状態認識、2) 把持状態と操作に応じた安定形状の決定、3) 安定形状への変形、の3つの主要機能を提供する. システム構成図を図1に示す. 本システムは、操作状態把握のためのスマートフォン内部から取得するアプリケーションの状態（アプリ状態）と、後述するような把持状態認識のための圧力センサ値を入力とする. 予めアプリケーションに適した把持状態を変形ルールとして準備しておき、認識した情報にもとづき形状を決定し変形制御を行う.

3.2 変形方針

端末変形の方針を決定するため、変形位置や、変形時の形や仕方、変形の大きさに関する調査を行った. これには図2に示すような形状をしたスマートフォンを模した発泡スチロール製のモデルを利用した. Aは変化をしない通常の形状であり、BからEは水平方向に突起が現れるような変化をする. FからIは垂直方向の変化であり、網掛け部

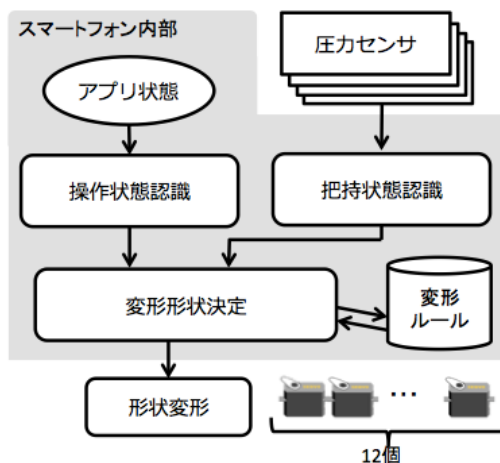


図1 steaDePhone システム構成図

Fig. 1 steaDePhone system configuration

分が奥行方向へせり出すような変形を表す.

10人の被験者に実際にモデルを把持してもらい、テキスト入力や、写真撮影などの代表的な操作をする場合に、最も安定すると思う形状をAからIの中から選択してもらい、その理由を調査した. その結果、端末背面方向への変形が好まれることがわかった. その理由として、ある被験者は背面方向に変形して凹凸ができることで、指を引っ掛けることが可能となり、安定把持に繋がることを挙げている. また同調査により、端末背面方向への変形は、8~10mmほど必要があることがわかった.

端末の背面に独立に上下運動可能なブロックを複数並べることで、任意の場所を変形する. これにより、ユーザの把持状態や操作にあった安定形状への変形を可能にする. ブロックを最大まで押し上げた高さは、上記の調査を踏まえて平常時よりも8mm高くなるようにする.

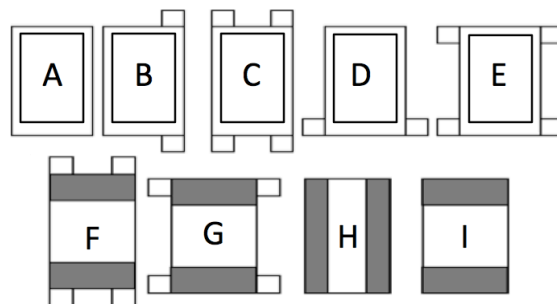


図2 調査に使用した形状モデル (上段：端末正面, 下段：背面)

Fig. 2 Shape models used for survey

3.3 プロトタイプシステム実装

現状では端末自体の変型は困難であるため、プロトタイプシステムでは変形機構や把持状態認識機構を実装したデバイスを既存の端末に被せることで実現する (図3). 以下では変型機構と把持状態認識機能の実装を説明する.

3.3.1 変形機構

3.2節で決定したように、端末背面に上下運動可能なブロックを配置することで、端末背面方向に凹凸を作るよう

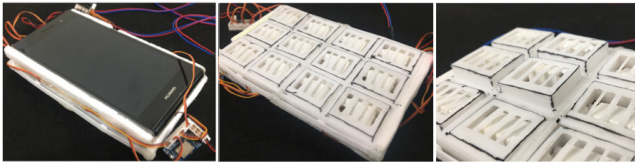


図 3 作成したプロトタイプシステム
Fig. 3 Prototype system

に変形させる。そのため、3D プリントを用いて背面に配置するためのブロックと、ブロックを固定するためデバイスの筐体を作成した。各ブロックの中に小型サーボモータを入れ、モータのサーボホーンの向きを変えることで、ブロックを上下運動させることで変形を実現する (図 4)。

使用する端末 (HUAWEI Ascend P7) のサイズをもとに製作するデバイスは、縦に 4 つ、横に 3 つのブロックを持つようにした。サーボモータは各ブロックの一つ必要のため、12 個必要になる。これらをスマートフォンから制御するにあたり、市販の超小型サーボモータ制御モジュール (bCore [8]) を用いた。bCore は、最大 4 つのサーボモータを Bluetooth で制御することができるハードウェアとソフトウェアライブラリで構成されており、今回は 4 モジュール用いる。小型サーボモータのサイズに対して、ブロックの大きさが大きすぎると、ブロックを支えることが困難となり、デバイスを把持した時にブロックが傾いてしまう。そこで、今回使用するブロックは全て縦 27 mm、横 22 mm として実装した。デバイス本体の厚さは 19 mm となった。また端末を除いた重量は 84 g となった。

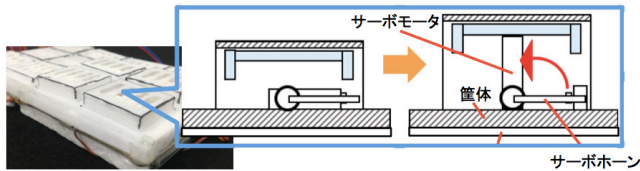


図 4 変形機構の内部
Fig. 4 Inside of deformation mechanism

3.3.2 把持状態認識部

本システムでは圧力センサを用いて把持状態認識機能を実装した。左右の持ち手を判別するため、図 5 の右図のように、製作するデバイスの左右の側面に厚さ約 0.8mm の薄膜フィルム感圧センサを 2 つずつ配置した。認識精度向上のため、左右の上下に 2 つ配置した。また、右図に示すようにプレートを取り付けた。プレートはセンサのない部分を把持していてもセンサ値を変化させるために設置した。

取り付けた 4 つの感圧センサからの測定値はデバイス外にある Arduino で集約して把持状態の認識を行う。認識した把持状態は Arduino に接続した Bluetooth モジュールを介して端末に送信する。図 5 の左図に、(a) 右手のみで把持、(b) 左手のみで把持、(c) 両手で把持、の把持状態での圧力センサ値の波形を示す。図中の波形の圧力和 (右)

はセンサ A と B の和を表し、圧力和 (左) は C と D の和とする。右手で把持している場合、圧力和 (右) が、圧力和 (左) より大きく、左手で把持している場合は、圧力和 (左) が大きくなり、把持していない側の圧力和は 0 に近い状態となっている。また両手で把持している場合は、圧力和 (右, 左) の両方が閾値 (今回は 50) より大きくなっていることがわかる。そのため、今回は端末左側の圧力センサの値の合計と右側の値の合計を比較することによって把持状態を決定した。

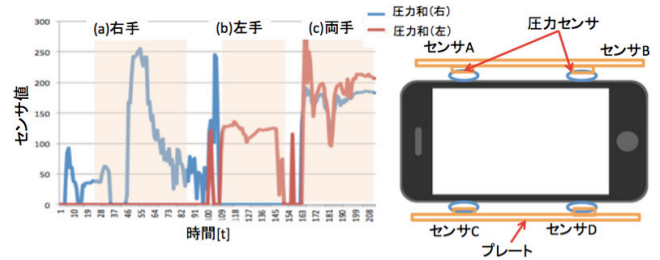


図 5 圧力センサ値の例と圧力センサの配置
Fig. 5 Pressure sensor values and arrangement

4. 安定形状に関する調査実験

把持状態や操作に応じた安定把持形状は図 1 において「変形ルール」として提供されている。以下では変形ルールを定めるための調査を説明する。本プロトタイプでは、スマートフォンで頻繁に利用する機能の上位 3 機能 [7] である (a) テキスト入力、(b) スクロール閲覧、(c) 写真撮影、の 3 操作に対して形状変形を行う。

4.1 実験方法

上述の 3 操作を片手でを行う際に最も安定する形状を被験者から収集して各形状を決定する。被験者は 3.3 節のプロトタイプシステムを用いて自由に変形させて各操作を行い、各操作に最適な安定形状を図 6 の各把持状態の上部にあるブロックを表した図の番号の組み合わせとして回答する。調査は普段からスマートフォンを利用している 10 人の被験者に対して行った。

4.2 結果

被験者から得た回答の組み合わせや意見をもとに、本プロトタイプで定義した安定形状を図 6 に示す。各形状の把持例の上部にある端末背面から見た図において、白色部分がブロックを押し出すように変形する。

被験者の意見として、テキスト入力では図 6 のブロック番号の 4 番に人差し指を掛けて、8, 11 番に中指と薬指をそれぞれ掛けることで端末を浅く把持することができ、その分親指の自由度が増すという意見があった。図 6 の形状は、右手操作時の形状のため、左手で操作している場合の安定形状は図 6 の各形状を左右反転させたものとする。

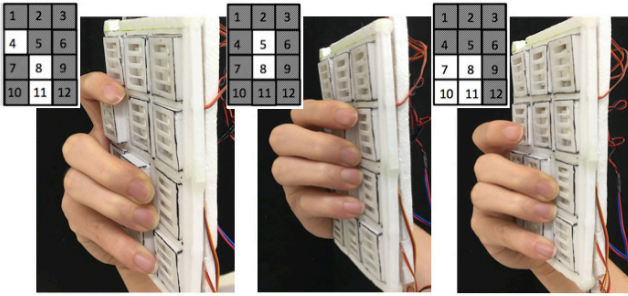


図 6 決定した 3 操作の安定形状と各形状の把持例。(白色が突出。左:テキスト入力, 中央:スクロール閲覧, 右:写真撮影)

Fig. 6 Shapes determined for each task

5. ユーザ評価実験

形状変化の有無による安定性と操作性の変化を調査するためのユーザ実験を行った。

5.1 操作性と安定性の定義

形状変化の有無による効果を比較するための指標を定義する必要がある。本研究では、与えられたタスクの所要時間が少ないほど「操作性が高い」と定義し、操作時のブレが少ないことを「安定性が高い」と定義する。

安定性を定量化するため、実験タスク中に端末内蔵の 3 軸加速度センサの値を 5 Hz で記録する。端末操作時の加速度変化を図 7 に示す。端末操作時には、画面タップ等による小さなブレと、端末持ち直しの際に生じるような大きなブレがあり、図中の (a) に示すように小さな振動を多く含む部分と、(b) のように大きな振動を多く含む部分が存在するため、これらのパターンを区別して比較することにした。そのため、各タスク中に記録した加速度データに、ローパスフィルタ (以下、LPF) とハイパスフィルタ (以下、HPF) を適用し、大きなブレと小さなブレの 2 つを区別して比較する。本研究において LPF は式 (1) で定義する。ただし a は 0.9 とし、 x はフィルタ適用前の生データ、 y は LPF 適用後のデータ、 n はサンプル番号とする。また、生データから LPF 適用後の y_n を減算することを簡易的に HPF 処理とした。すなわち z を処理後の値とすると式 (2) で表される。

$$y_n = ay_{n-1} + (a-1)x_n \quad (1)$$

$$z_n = x_n - y_n \quad (2)$$

LPF や HPF を適用後のそれぞれの値に対して、窓サイズ 15 サンプル (3 秒)、スライド間重複なしで移動分散を計算し、タスク開始から終了までの合計値をタスク全体のブレとして扱う。窓サイズは、最もタスクの所要時間が短かったものを基準に決定した。

5.2 実験方法

普段からスマートフォンを利用している 8 名の被験者が、プロトタイプシステムを用いて (a) テキスト入力、(b) ス

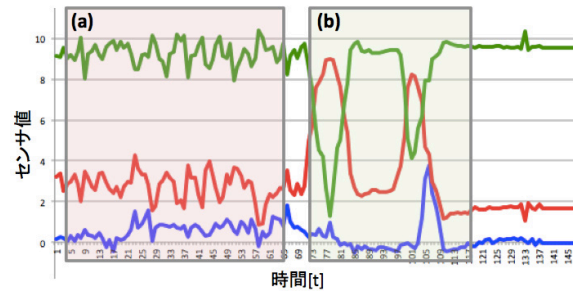


図 7 端末操作時の加速度センサ値の例

Fig. 7 Acceleration sensor value during terminal operation

クロール閲覧、(c) 写真撮影の 3 操作を行った。以下に各操作に対する設定タスクを示す。タスクは全て Android アプリとして実装し、操作性指標を算出するためにタスク完了時間を計測した。実験風景を図 8 に示す。

定義した各操作の安定形状に変形した場合 (以下、変形有り) と変形しない場合 (以下、変形無し) の 2 通りで各タスクを行った。変形無しの場合でも、把持したときのサイズを統一するためにブロックは取り付けられている。また形状変化有無の体験順による違いを吸収するために、被験者 8 人を 4 人ずつの 2 つのグループに分けて先に利用するタイプを均等にした。実験終了後にシステムの利用体験について質問紙回答とインタビューを行った。

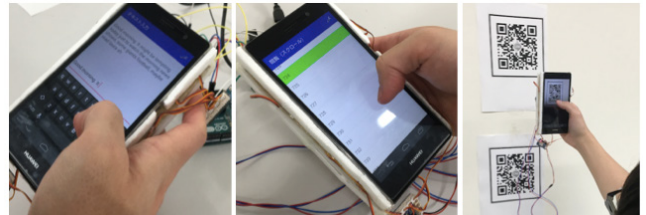


図 8 実験風景 (左:テキスト入力, 中央:閲覧, 右:写真撮影)

Fig. 8 A scene of experiment

(a) テキスト入力タスク

100 文字の英文 4 つをソフトウェアキーボードを用いて入力する。100 文字の英文を入力することを 1 セットとして、4 つの英文を用いて合計 4 セット行う。

(b) スクロール閲覧タスク

1000 行のリストの中から、一つだけ存在する色の異なる行 (以下、正解行) を画面スクロールを行いながら探し、正解行を選択する。正解行はリスト内の半分 (500 行目) から最終行までの間の位置にランダムに配置される。上記を 1 セットとして、4 セット繰り返す。

(c) 写真撮影タスク

撮影対象と撮影者の位置関係が異なる 3 箇所に設置した QR コードを認識する。QR コードは、机上と、イスに座った状態からの目線の高さの壁 (以下、目線)、目線の高さから 50cm 上の位置の壁 (以下、上方) に設置する。これらをスマートフォンのカメラで認識することを 1 セットとし、4 セット分の認識を行う。QR コードの認識は撮影完

了のタイミングが明確であり、認識の際はブレの影響を受けやすく安定していないと認識ができないため、完了時間の計測に適していると考えたために用いた。

5.3 結果

5.3.1 変形の有無による操作性の比較

各タスク時の所要時間を変形の有無で比較した結果を表1に示す。写真撮影時のタスクでは、3パターンの写真撮影の位置でそれぞれ比較する。各タスクにおいて変形の有無によるタスク完了時間の違いをt検定により確認した。その結果、スクロール閲覧タスクと、写真撮影(目線)、写真撮影(上方)の3タスクでは有意差(p<0.05)が見られ、これらのタスクではどれもデバイス変形がある方が所要時間が短くなった。一方、テキスト入力タスクでは有意差は見られなかったものの、所要時間の平均値はデバイス変形をした方が、無いときよりもやや短かった。しかし写真撮影(机上)では有意差は見られず、デバイス変形が無い方が所要時間は僅かに短かった。

表1 変形の有無と操作性の関係

Table 1 Relationship between deformation and operability

タスク	変形有り	変形無し	p 値
	平均値 [s]	平均値 [s]	
テキスト入力	107.00	109.37	0.732+
スクロール閲覧	8.03	10.06	0.008*
写真撮影(机上)	5.65	5.46	0.814
写真撮影(目線)	4.56	6.59	0.019*
写真撮影(上方)	4.96	8.00	0.00043*

* 変形有りが有意に有効 +平均値の上では変形有りが有効

5.3.2 変形の有無による安定性の比較

5.1節で定義した安定度の算出方法にもとづき、変形の有無による安定度の違いを表2に結果をまとめる。表中の「ブレ種別」は、LPFとHPFを適用して分離したブレの種類を表しており、大型と小型はそれぞれLPFとHPF適用時に対応する。また、t検定実施時のp値も示す。

テキスト入力タスクにおいては、いずれのブレ種別でもp<0.05での有意差は見られなかったものの、平均値の上では変形した方が端末が受けるブレが小さく安定していた。被験者ごとの比較を行ったところ、やはり有意差は見られなかったが、8人中5人の被験者が大小どちらのブレ種別でも変形をした方が高安定だった。一方、残りの2名は、どちらのブレ種別でも変形をしない方が高安定だった。また、閲覧タスクにおいてはいずれのケースでもp<0.05での有意差は見られなかったものの、変形時の方が安定していた。写真撮影の3つのタスクでは、「目線」と「上」のタスクの小型のブレ種別軽減に有意差が見られた。また、平均値の上では、「目線」と「上」の大型のブレ種別を除いては変形時の方が安定していた。

5.3.3 インタビュー回答

実験後の被験者に対して、定義した安定形状や、デバイ

表2 変形の有無と安定性の関係 (値が小さいほど高安定)

Table 2 Relationship between deformation and stability

タスク	ブレ種別	変形有り	変形無し	p 値
		平均値	平均値	
テキスト入力	大型	2.97	3.23	0.698+
	小型	32.9	38.9	0.217+
スクロール閲覧	大型	0.176	0.310	0.0761+
	小型	2.07	2.33	0.373+
写真撮影(机上)	大型	0.699	0.740	0.826+
	小型	1.34	1.50	0.532+
写真撮影(目線)	大型	2.81	2.67	0.221
	小型	2.65	6.45	0.00827*
写真撮影(上方)	大型	3.76	2.94	0.135
	小型	3.65	5.90	0.0119*

* 変形有りが有意に有効 +平均値の上では変形有りが有効

スの形状、その他システムの気になった点などを質問紙とインタビューにより調査した。表3に質問紙の内容と回答数を示す。質問紙については、(1)全くそう思わない、(2)そう思わない、(3)どちらとも言えない、(4)そう思う、(5)とてもそう思う、の5段階で回答した。また、自由回答形

表3 質問項目と回答数(人)

Table 3 Questions and answers

質問	1	2	3	4	5
デバイスの厚さ	0	3	0	4	1
デバイスの幅	0	3	0	3	2
テキスト入力時の安定形状の適切性	1	3	2	2	0
スクロール閲覧時の安定形状の適切性	0	1	2	2	3
写真撮影時の安定形状の適切性	0	0	0	1	7
テキスト入力時の変形の安定性	0	2	4	2	0
スクロール閲覧時の変形の安定性	1	0	2	5	0
写真撮影時の変形の安定性	0	0	0	0	8

式で得た意見の中で多く回答されたものをF1~F3に示す。

- F1 背面のブロックが増えればより柔軟に対応できる。
- F2 デバイス自体の厚さによって操作しにくい場面がある。
- F3 変形の数や変形を調整できたら良い。

6. 考察

6.1 変形の有無による操作性

評価実験での各タスクの所要時間を変形の有無で比較して示した表1のように、所要時間では、スクロール閲覧および写真撮影の「目線」と「上方」の3操作においては全て変形時の方が短く有意差も見られることから、形状変形は有効であったと考えられる。

テキスト入力では有意な差は確認されなかったが、変形時の方がタスクの所要時間がやや短いため、有効な傾向があると考えられる。ただし、表3の「テキスト入力時の安定形状の適切性」(3番目)に見られるように、適切でないという回答した人の方が多いため、形状の再定義が必要だと考えられる。一方で、テキスト入力時の安定形状の適切性に高評価

を付けた被験者からは、評価実験後のインタビュー時に、「テキスト入力中に指をデバイス背面の凹凸に引っ掛けることによって、通常のスマートフォンと比較して浅い把持が可能になり、親指の自由度が上がった」という意見が得られた。親指の自由度が上がることにより、入力操作が容易になったことが理由と考えられる。

机上物の写真撮影では有意差は見られず、変形をしない方が所要時間が短かったが、もともと机上物の写真撮影という動作が他の操作と比べて手や端末の移動が少ないことから、変形の有無による差が出にくかったと考える。

6.2 変形の有無による安定性

5.3.2 節で述べたように、変形の有無により安定性に有意な差がみられたのは、写真撮影の「目線」と「上方」の小刻みなブレに関するものだけであった。端末操作時の小さな振動を抑えることができるため、操作時の誤入力等を防いだりブレの少ない写真が撮れることも期待できる。加えて端末を安定して操作できるため、端末の落下防止も期待できる。また、写真撮影で定義した安定形状の適切性についての質問紙回答（表3の5番目）では、8人全員が変形内容の適切性への同意を意味する評点4以上をつけていた。他のタスク向けに定義した安定形状と比較して「適している」と回答した被験者が多いことから、ユーザが適していると感じられる形状を選択することが操作時の安定性向上に必要であることを確認した。上記の操作以外にもスクロール閲覧とテキスト入力では有意差は見られないが、形状変化を用いた方が数値が小さく安定している。

一方で写真撮影の「上方」と「目線」では、変形した方が大きなブレが多くなっているが、小さなブレは変形時に有意に減少している。変形をしないと小さな振動が多く慎重に操作するが、変形時はしっかり把持できているためかえって大きな動作（ブレ）を生じさせたと考えられる。

またテキスト入力と写真撮影（机上）は、操作性のp値が高く、安定度においても大小のブレ種別ともにp値が高い。これは、6.1 節で述べたように、テキスト入力では形状が適切でないと感じた被験者が多かったことや写真撮影（机上）では比較的手や端末の移動が少なかったことなどが原因であるため、差が出にくかったと考えられる。

6.3 プロトタイプシステムの改良点

実験後のインタビューで、5.3.3 節のF1のような変形（凹凸）の高分解能化に対する要望が多きかれた。分解能を向上したうえで、多くのユーザに合った様々な安定形状への柔軟な変形が求められる。またF2にあるように、プロトタイプシステムは従来のスマートフォンよりも厚い（端末本体と合わせて19mm）。より操作性を高めるために、デバイスを操作しやすい厚さを調査して改良していく必要がある。そしてF3にあるように、プロトタイプシ

ステムではブロックの上昇と下降の2値でしか制御できないが、F1と合わせると空間と時間の4つの次元における高分解能化を意味している。必要な大きさや段階、変形速度などを調査し、再現できる形状を増やしていくことで、システムが多くのユーザに対応可能になると考えられる。

7. おわりに

本論文では、形状変化型インタフェースのスマートフォンへの適用例として安定把持制御を可能にするシステムsteaDePhoneを提案し、ユーザ評価により次の知見を得た。

- 操作性向上に対してスクロール閲覧ならびに目線高や上方の写真撮影では変形が有効であったが、テキスト入力と机上物の写真撮影では明確な違いを確認できなかった。
- 安定性向上に対して、テキスト入力とスクロール閲覧では形状変化の利用が端末操作時の小さなブレの抑制に有効な傾向にあり、目線の高さや上方にある物体の写真撮影での小さいブレの抑制にも有効である。一方で、これらの写真撮影状況では、形状変化の利用は大きなブレの抑制には有効に働いていない。また、操作性と同様にテキスト入力と机上物の写真撮影では明確な違いを確認できなかった。

今後の方針を述べる。安定形状には個人差が見られ、多くのユーザに合う安定形状に変形可能にするため、より柔軟な変形を可能にすることを考え、ブロック数増加のために変形機構の再検討を行う。また、デバイスの大きさに関する改良のために、変形機構の再検討が必要である。より表現できる形状を増やすために、変形の大きさや、速度を調節できる機能の実装を行う。

参考文献

- [1] Coelho, M. et al. Shape-changing interfaces. *Personal and Ubiquitous Computing*, 15(2), pp. 161–173, 2011.
- [2] Gomes, A. et al. Morephone: a study of actuated shape deformations for flexible thin-film smartphone notifications. In *Proc. of CHI'13*, pp. 583–592.
- [3] Hemmert, F. et al. Shape-changing mobiles: tapering in two-dimensional deformational displays in mobile phones. In *Ext. Abst. of CHI'10*, pp. 3075–3079.
- [4] Hemmert, F. et al. Animate mobiles: proxemically reactive posture actuation as a means of relational interaction with mobile phones. In *Proc. of TEI'13*, pp. 267–270.
- [5] Nakagaki et al. Lineform: Actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint. In *Proc. of UIST'15*, pp. 333–339.
- [6] MMD 研究所. スマートフォンの満足度と不満度に関する調査. https://mmdlabo.jp/investigation/detail_1499.html(閲覧 2016-12-22).
- [7] MMD 研究所. スマートフォン利用に関する実態調査. https://mmdlabo.jp/investigation/detail_1565.html(閲覧 2016-12-22).
- [8] VagabondWorks. bcore モジュール. <http://vagabondworks.jp/>(閲覧 2016-12-22).
- [9] 株式会社ビジョンネット. Bunker ring. <http://bunkerring.jp/>(閲覧 2016-12-22).