ウェアラブル手足入力インタフェースの有用性の調査*

酒田 信親[†]・佐藤 文宏[†]・富永 登夢[†]・土方 嘉徳[†]

User Study of Floor Interaction with Wearable Projection Interface Using Hand and Toe*

Nobuchika SAKATA[†], Fumihiko SATO[†], Tomu TOMINAGA[†] and Yoshinori HIJIKATA[†]

We conducted user study to unveil usability of wearable input/output interface using hands and toes by operating application of telephone call and e-mail. Specifically, subjects perform task in the state of “hands-free”, “having baggage in their dominant hand”, and “having baggage in their both hands” using the proposed system or a smartphone. Then, we evaluate usability according to questionnaire, interview, and task completion time. As a result, hand and toe input in proposed system are accepted when performing simple button operation such as answer the phone task. Also, hand input in proposed system is accepted when performing scroll operation such as read e-mail task. However, when performing accurate button operation such as text entry task, hand input and toe input in proposed system are accepted only a little.

1. はじめに

携帯電話やスマートフォンといったハンドヘルド型の携帯端末が普及し、情報サービスを利用する場所が屋内環境だけでなく、外出中や移動中など屋外環境での利用も一般的となった。それに伴い目的地までの経路の検索や、メールやスケジュールの確認といった場所を選ばず少量の情報を頻繁に閲覧する機会が増加している。現在これらの情報閲覧には、スマートフォンなどのハンドヘルド型の携帯端末の使用が一般的だが、閲覧手段としては以下のような不便な点が考えられる。

- 情報の提示領域が端末のサイズに依存する点
- 手元の端末のディスプレイを注視する必要があるため周囲に注意を払うことが難しい点
- 端末をポケットや鞆から取り出す動作が必要な点
- 両手に荷物を把持している場合の使用が困難な点

これらの課題を軽減するため、プロジェクション型デバイスの研究[1,2]が行われてきた。また、われわれはその中でも、ウェアラブルプロジェクション型デバイスの

研究[3,4,25]を行っている。過去の研究では深度センサと小型プロジェクタをユーザの胸の前に取り付け、ユーザは床に投影されたコンテンツを指差すことや踏むことによってインタラクションを行うウェアラブル手足入力インタフェース[5,17,22,23,24]を提案・開発した(Fig. 1)。本論文では、現在スマートフォン上で利用される情報サービスを、上記のウェアラブル手足入力インタフェースで操作し、さらに手に対して拘束条件を付け加えた場合のユーザビリティとユーザプレファレンスについて報告する。

2. 関連研究

本章では、関連研究としてGUIへの入力手法と足入力インタフェースに関する研究について説明する。その後、先行研究の説明を行う。

2.1 GUIへの入力

一般的なGUIでは、画面上に表示されたポインタをマウスやトラックボールなどのポインティングデバイスを介して操作していた。しかし、デバイスの小型化に伴い操作性が悪化することや、使用時に手で把持することでハンズフリーでなくなることで、取り出す手間や収納の場所が必要であることの問題がある。ハンズフリーの入力手法として、ウェアラブルコンピューティングのためのハンドマウスのような指差し入力[6]や、視線入力[7]などが研究されているが、専用のデバイスを用いること

* 原稿受付 2017年4月17日

[†] 大阪大学 大学院 基礎工学研究科 Graduate School of Engineering Science, Osaka University; 1-3 Machikaneyama, Toyonaka city, Osaka 560-8531, JAPAN**Key Words:** floor interaction, wearable computer, toe input, augmented reality.

Fig. 1 (a) システム外観,(b) 手による入力,(c) 足による入力

が多く、装着場所が頭部であったり、デバイスの小型化に課題があるため、装着による負荷や着脱のわずらわしさを与えてしまうという問題がある。

2.2 プロジェクタを用いた情報提示

情報の提示手段としてプロジェクタを用いた研究は早くからなされている [8]。現実世界と仮想世界とをシームレスに複合する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) を活用した研究では、プロジェクタを情報提示デバイスに採用することで、HMD を利用した場合に比べユーザのデバイスの装着に関する負荷の問題を解決している。とくにモバイル環境でプロジェクタを用いた研究応用例として、実環境にプロジェクタで注釈情報を重畳表示した案内システム [20]、オブジェクトをかざすことでタンジブルなディスプレイとして利用するシステム [21] などがある。これらの研究は、現実世界へのプロジェクタによるアノテーションの重畳表示がナビゲーションや移動時の情報提示として有効であることを示している。つぎに、ウェアラブルプロジェクションシステムを用いた入力インタフェースに関する研究について述べる。身体の一部を投影面に選択したものとして、山本らの研究グループ [9,10] は掌や把持物体への情報投影型ウェアラブル複合現実感システムを提案している。このシステムは、投影面を常に確保できるが、情報閲覧時にハンズフリーではなく、大きな投影面を確保できるプロジェクタの利点を活かしきれていない。投影面に対する入力手法の研究として P. Mistry ら [11] はプロジェクタを首から下げ、指先に付けたマークを使ってジェスチャ認識を行うことで、投影面に対して入力を行う研究を行っている。しかし、このシステムは指先にマークを付ける必要があるため、着脱のわずらわしさを与えたり、投影面が必ずしも確保されない点が憂慮される。その他の研究として H. Chris ら [12] による OmniTouch が挙げられる。これは、肩に取り付けた深度センサにより、あらゆる平面への指による入力を可能とするものである。しかし、常に手の届く範囲に適切な平面があるとは限らず、また、表示の大きさも壁や身の回りの平面の広さに依存するため、いつでも安定して情報を閲覧することが難しいと考えら

れる。

2.3 足を用いた入力

この節では、足を用いた入力手法の研究を紹介する。これらの研究は、センサを環境に設置しているユビキタス型とセンサをユーザの身体に設置したウェアラブル型に分類できる。

ユビキタス型はセンサを環境に設置するため、デバイスの制限が少なく、高精度な入力を可能にしている。Thomas ら [13] による Multitoe は、FTIR と FrintDI による光学認識を利用した床面タッチパネルを用いて複数の足の認識や高精度な足入力を実現した。

一方、ウェアラブル型は、センサを身体に設置するため、場所を問わず使用できるという特徴をもつ。Barrera ら [14] による WARAJI は、足に感圧センサを取り付けることによりユーザの重心移動で仮想空間内の移動を可能とした。これは、足に常にデバイスを装着している必要があり、表示に対して直接触れるような操作はなされていない。また、足ではなくポケットに携帯電話のようなデバイスを入れ足で入力する Jeremy Scott ら [15] の研究は、加速度センサ内蔵の携帯電話をポケットに入れているという一般的な条件で足を用いて入力動作を行うシステムを提案しているが、表示については考慮されていない。さらに、モバイル端末内蔵のカメラによって足の動きを認識し入力とする研究として Volker Paelke [16] が挙げられる。これは足を用いてサッカーゲームの入力を行うものであるが、デバイスを手で把持する必要がある。

これらの関連研究から、提案システムの特徴である床に情報を重畳表示し、それに対して足や手を入力することで作業支援や情報支援を行う有効性は示唆される。

2.4 先行研究

われわれは、フロアプロジェクションに対する手足を用いたインタラクションシステムを提案した [5]。この先行研究では、手足の入力特性と、地図操作タスクにおける手と足の役割分担による操作性を調査した。その結果、手は足よりも正確に入力できること、足は手よりも素早く入力できることがわかった。また、手と足の役割分担によって、地図操作が素早く、かつ正確に行えることが示唆されている。また、このシステムは胸の前に深度センサとモバイルプロジェクタを一体化したデバイスの一つだけ取り付けるだけになっているので、頭部に取り付けるタイプのものよりも装着の負荷が少なく、また見た目の面で社会的受容性も高い。くわえて、深度センサとモバイルプロジェクタは年々小型化、高輝度化している。実際に、われわれが開発したこのフロアインタラクションシステムは、2011 年からの 3 年間にデバイスの進化によって、コントローラ PC を除き重量は約 790g から約 350g に、体積は約 490ml から約 160ml に小型軽量化しており、今後ますます小型軽量化していくものと期待

される。本論文では、このフロアインタラクションシステム自体の新規性や精度を主張するのではなく、現在スマートフォン上で利用される情報サービスを上記のフロアインタラクションシステムで操作し、さらに手に対して拘束条件を付け加えた場合のユーザビリティやユーザプレファレンスについて報告する。

3. システム

現在スマートフォン上で利用される情報サービスをフロアインタラクションで操作するために、Fig. 2 のシステムを構築した。このシステムは深度センサ、モバイルプロジェクタ、ジャイロセンサから構成され、これらすべてはユーザの胸に装着される。モバイルプロジェクタは seeser M1 (ESplus Inc.) を使用する。また、床に投影する画像を補正するため、InertiaCube4 (InterSense Inc.) を使用する。[23] と同様の実装を行い、ユーザが足を出したときの体の揺れによる投影画像の変位を軽減し、足や手を出した時に体が揺れた場合でも同じ位置に安定して投影画像を十分見られるようにした。また、ユーザの手足をセンシングする深度センサとして DS325 (SoftKinetic Inc.) を使用する。また、これらセンサのコントローラであるノートパソコン (ソニー: VAIO VPCS14AFJ NVIDIA Geforce 310M, Core i5-480M 2.66Ghz, 2GB, Windows7) により投影画像の変形や制御を行った。つま先と床の接触や指の位置をこの深度センサによって判断する。また、これらの構成やジャイロセンサによる投影面の補正に関しては [5, 22, 23] で提案されており、これらに関して本論文において新規性はない。

提示された情報に対して手を用いて入力する手法は多々あるが、われわれは Fig. 3 に示すような親指と人差し指の指先を接触させる形の“つまむ”インタフェース [18, 19] を採用した。ここで、手の二次元位置の検出と選択の判定 (指のつまみ検出) のアルゴリズムについて述べる。Fig. 4 に示すように深度センサから得られる深度画像に対して二値化処理を行い、手領域を抽出する。抽出した手領域の内部の閉領域の有無により選択の判定を行う。[19] の検出手法とほぼ同等であるが、われわれのシステムでは腕の向きは入力に利用していない。また、選択に関してどのようなインタフェースを採用するかを検討段階として、床面に対して押しこむような操作や [23] のような親指を開くといったものを選択にしたインタフェースも開発したが、近接の深度であっても高精度に計測可能となった深度センサの高性能化によって、上記のつまむ形の操作手法が採用可能となったため、使用者の意見を考慮した結果、今回は上述のつまむ動作を選択としている。

被験者 4 人に 50 回ずつ目標点に対して選択してもらい、提案システムの入力精度を評価した。その結果、手は目標点に対して平均誤差 4.5cm、未・誤認識率 3.5%、足は目標点に対して平均誤差 13.4cm、未・誤認識率 16.5%で

Fig. 2 システム構成

Fig. 3 手を用いた入力手法

Fig. 4 手の検出

入力できることがわかった。[13] やこの結果に基づいて、後述の選択対象のアイコンサイズは決定している。

4. ユーザスタディ

2017 年現在では外出中での電話やメール操作などの情報サービスは、一般的にスマートフォンを用いて利用される。しかし、使用の際のデバイスの取り出しが手間であり、また情報の閲覧時にデバイスを把持するため少なくとも片手を拘束されてしまう。これらのことから、荷物を把持している時などの手が拘束されて素早くデバイスを取り出せない状態において、電話やメール操作や SNS 閲覧などの短時間で処理可能な情報サービスの利用に関しては提案システムが取り出しの素早さやわずらわしさの点でユーザに好まれるとわれわれは仮説をたてた。

Fig. 5 買い物袋による手の拘束

そこで、これらの状況において既存のスマートフォンとユーザビリティやユーザプレファレンスを比較し、提案システムの有用性や将来性を明らかにできると考えた。

被験者は提案システムとスマートフォン (Sony Ericson Xperia Arc) を身に付けた状態で、電話やメール操作などのタスクを行う。一般にスマートフォンの収納場所は、服のポケットや鞆などさまざまあるが、本実験では素早く取り出しやすいようにズボンの利き手側の前ポケットにする。また、Fig. 5a のように両手が自由なハンズフリーの状態に加えて、重さ 1kg のおもりの入った買い物袋を、「利き手で把持している状態」(Fig. 5b) と「両手で把持している状態」(Fig. 5c) の 2 状態も加えて、提案システムとスマートフォン利用時の違いも調査した。重さ 1kg を把持させた理由としては、500ml のペットボトル飲料といくらかの食料を購入し、それらを袋に入れ把持している買い物帰りを想定している。「利き手で把持している状態」と「両手で把持している状態」に関しては、提案システムに意図的に有利な設定となっており、「ハンズフリー」に関しては前者に比べとくにバイアスを掛けていない状態であると考えている。また、今回はすでに普及が始まっている腕時計型の情報端末デバイスとの比較も考えた。しかし、腕時計型デバイスは手による入力が必要とする時、実際には両手を必要とするので、「利き手で把持している状態」と「両手で把持している状態」では、著しくユーザプレファレンスの点で不利になるとも考えたので今回は比較対象とはしなかった。

タスクが開始される前に、被験者に対して各入力手法 (スマートフォン、提案システム) と買い物袋の把持の状態 (ハンズフリー、利き手拘束、両手拘束) で準備するように指示する。被験者がスマートフォンをポケットに入れ、買い物袋を指定された手で把持している状態でタスクは開始される。タスクの開始の合図は PC からの音で行う。タスクの開始と同時に提案システムで入力する場合はプロジェクタの投影面に、スマートフォンで入力する場合はスマートフォンのディスプレイにタスクが表示される。被験者は指定された入力手法で後述のタスクを実行する。タスクの実行中は買い物袋を持ち替える

Fig. 6 電話の応答タスク

ことや、床に下ろす自由は許可した。タスクの終了は、被験者が入力を終えて、買い物袋を指定された手で把持し、なおかつタスクが開始する前の身体姿勢になるまでとした。具体的に各状態でのタスク完了時間は、スマートフォンの場合は、「音がなりスマートフォンをポケットから取り出し入力しポケットに入れ終えるまで」、提案システムの場合は「直立不動の状態で音がなり、手か足で入力を終え、元の直立不動の状態に戻った時まで」とした。

本実験では、操作性の異なる三つのタスクを行う。一つ目はスマートフォンの画面に表示された電話応答ボタンへの入力に代表される視覚による応答画面への対応、一瞥すれば十分なメールの閲読、なんらかの確認の際にボタン選択するといったあまり入力精度を必要としない「視覚による応答画面への 1 回のみのボタン操作」である。具体的には、Fig. 6 に示すように表示される二つのアイコンのうち一つのアイコンを選択する電話応答を模したタスクとなる。このタスクは、スマートフォン向けのハンズフリーのヘッドセットマイクにおける電話応答のようなボタンを押すだけの動作に似ているため、これら市販のデバイスとの比較実験も考えられるが、実際は二次元平面上に表示された対象に対しての二次元入力である。たとえば、さまざまなアイコンを複数の投影箇所へ投影し、ユーザに好みの応答を選択させるような設定も可能である。この設定は前述のヘッドセットマイクのようにユーザへの情報提示と入力箇所が離れたインタフェースでは実現は難しいため、今回は比較の対象にはならないと考え、比較実験は行っていない。

二つ目はメール文の閲読や Web ブラウジングの際に行う二次元移動量を必要とするスクロール操作である。Fig. 7 のようにメール文が表示され、被験者はドラッグスクロールを用いてメール文をすべて読み、完了ボタンを選択する。メール文は、150 字から 200 字の日本語とし、5 回程度のドラッグスクロールで全文を閲覧できるタスクとした。三つ目は文章作成に代表される多くの二次

Fig. 7 メール閲覧タスク

Fig. 8 文字入力タスク

元移動量と入力位置精度が求められるボタン操作による文字入力である。予備実験でフリック入力とQWERTY配列による入力を調べた結果、提案システムの手を用いた入力（以下、単に手入力と記す）ではQWERTY配列による入力のほうが素早くかつ負担も少なく入力でき、足入力ではどちらの入力も被験者に大きな負担となることがわかった。また、フリック入力はユーザによっては日常で使用していないため、今回は対象外とした。そこで提案システムの文字入力手法はQWERTY配列に対する指を用いた入力のみとし、足入力は行わないことにした。Fig. 8に文字入力タスクの概念図を示す。入力する文字は、4文字の英単語とし、被験者は表示される英単語を入力し完了ボタンを選択する。被験者は21歳から25歳の14名（男性13名、女性1名）で行った。また、被験者が提案システムの手と足による入力手法に慣れるため、三つのタスクを三つの状態で、本タスク試行前に練習タスクを2回実施した。そしてその後、データを取得する本タスクを3回実施した。よって1状態1タスクあたり42サンプルのデータを取得している。評価項目はタスク完了時間と実験後のアンケートとインタビュー

によるユーザビリティとユーザプレファレンス検証である。また、タスクを行う順序によって実験結果に影響が出ないように、順序効果に配慮し拘束条件や実験タスク、入力手法をランダムな順序で行った。

5. 結果と考察

Fig. 9にタスク完了時間のグラフを示す。箱ひげ図の水平軸の延長にある小さな○は、全データの95%領域外のデータで外れ値を表しており、併記の数字はサンプル番号を表している。小さなアスタリスク（後述のものは別）は、箱ひげ図の箱の幅の3倍を超える場所にある極端な外れ値を表している。また、t検定を行い $p < 0.05$ で統計的に有意な差が現れた対応間を、Fig. 9のグラフ上に大きな*で記している。くわえて、各タスク完了時間の平均値をTable 1に示す。

Table 1 タスク完了時間の平均値（単位：秒）

		ボタン選択	スクロール	文字入力
ハンズフリー	手	3.05	30.25	13.79
	足	3.63	60.82	NA
	スマホ	8.20	26.59	15.43
利き手拘束	手	3.97	30.25	19.40
	足	4.83	60.82	NA
	スマホ	9.73	26.59	16.47
両手拘束	手	7.14	29.82	21.38
	足	4.09	60.34	NA
	スマホ	11.24	27.23	19.50

ボタン選択による電話応答のタスク完了時間に関して、提案システムの手と足による入力は、スマートフォンに比べ素早く入力できた。また、両手拘束時においては、提案システムの手による入力は一番早かった。スクロールを伴うメール閲覧のタスク完了時間に関しては、提案システムの手入力による閲覧とスマートフォンを用いた閲覧が足に比べ早かった。QWERTY配列による文字入力のタスクでは、提案システムの手入力とスマートフォンによる入力は、ハンズフリーと両手拘束時において、時間ではそれほどかわらなかったが、利き手拘束時においては、手入力がスマートフォンよりも入力に時間が掛かった。これは、被験者が利き手とは反対の手で入力を行ったため、誤入力が多く入力文字の修正や利き手で入力を行うため買い物袋を持ち替えることに時間が掛かったことが原因だと考えられる。また、ポケットに入れたスマートフォンを取り出し、入力し、そしてまたポケットに入れるまでをタスク完了時間としているため、このデバイス取り出しと収納の時間が必要ない手入力足入力に有利な結果が出ていると考えている。このように両手拘束・利き手拘束状態では、手入力や足入力を使うことに時間的な妥当性はある。これは手入力・足入力に有利な状況であれば、製品として完成されたスマートフォンと比べても、提案システムを用いることで操作時間の短縮が可能であることを示唆していると考えている。しか

Fig. 9 タスク完了時間（上：両手自由，真中：利き手拘束，下：両手拘束）

しながら、これらの結果はタスクの設定次第で変化するものであるため、ユーザの好み、使い勝手、将来の使用への展望を総合的に調査した次のアンケート結果とインタビューをわれわれはより重視している。

つぎに Fig. 10 の「街中で入力が必要なとき、どの入力手法を選択しますか?」のアンケートに対し、電話の応答タスクにおいて、ハンズフリーと利き手拘束時は、手入力は14人中6人に許容された。一方で足入力は、ハンズフリー時は3人、利き手拘束時は4人となり、あまり許容されなかった。しかし、両手拘束時は、14人中9人が足入力を好み、手入力はあまり許容されなかった。また、以下に述べるどの状態でもどのタスクにおいてもスマートフォンを選んだ被験者が4人おり、その理由として誤入力により電話を切りたくないなど正確さを重視する意見をこの4人からインタビューより得た。われわれはこの4人を除いた10人が提案システムの潜在的利用可能性を持っているある種のアーリーアダプタと考えている。また、このアーリーアダプタたちは、手入力足入力を選択した理由として入力の手軽さやわずらわしくない点を挙げていた。

メールの閲覧タスクでは、拘束状態にかかわらず手入力は少なからず許容されている（ハンズフリー：6人・利き手拘束時：5人・両手拘束時：5人）が、足入力はまったく許容されなかった。手入力を選択した理由として楽に入力できるという意見が多かった。反対に、手入力を選択しなかった理由として正確に入力できない時があることや、プロジェクトでの表示によって内容を周りの人に見られる可能性が高いことが挙げられた。文字入力タスクにおいては、拘束状態にかかわらず手入力はあまり許容されなかった。一方で、スマートフォンを選択した理由として誤入力の少なさが挙げられた。また、これらのアンケート項目に関しては、投票形式のアンケートで

Fig. 10 「街中で入力が必要なとき、どの入力手法を選択しますか?」のアンケート結果

検定を行うためには被験者数が少ないために統計的検定を行っていない。今回は、投票形式のアンケート結果を本論文では取り上げているが、これはユーザの好み、使い勝手、将来の使用への展望を総合的に調べたためである。結果として、精度を重視するユーザは製品として完成されたスマートフォンを好み、手入力・足入力を好むユーザはわずらわしくないことを重視していることがわかった。

ユーザビリティの詳細分析として「正確さ」「素早さ」「わずらわしくない」に関して7段階の絶対評価アンケートも行った。検定手法としては、有意水準5%でウィルコクソンの符号順位検定を行っている。ハンズフリーの状態 (Fig. 11) では、電話応答のタスクでは手入力が正確さ・素早さ・わずらわしくない点でユーザに好まれ

ていた。スクロールを伴うメール閲覧タスクでは手入力とスマートフォンは、正確さ・素早さ・わずらわしくない点では良い印象を得ているのが見て取れる。しかし一方で足入力に関しては、素早さ・わずらわしくない点でも良い印象は得られなかった。文字入力タスクでは、ハンズフリーの状態ではスマートフォンが良い印象を得ている。

利き手拘束の状態 (Fig. 12) では、電話応答のタスクでは手入力と足入力が素早さ・わずらわしくない点でハンズフリーの時に比べ好印象であった。スクロールを伴うメール閲覧タスクでは手入力が、素早さ・わずらわしくない点ではハンズフリーと比べ若干ではあるが印象を悪くしているのが見て取れる。文字入力タスクに関しては、ハンズフリーの状態と似たような印象となった。

両手拘束の状態 (Fig. 13) では、電話応答のタスクでは足入力がほかの状態に比べ好印象を得ている。とくに素早さとわずらわしくない点に関しては、統計的有意差はないものの他の状態に比べ良い印象を得ている。スクロールを伴うメール閲覧タスクではスマートフォンが、素早さ・わずらわしくない点でほかの状態にくらべて印象が統一されていないのが見て取れる。文字入力タスクに関しては、ハンズフリーと利き手拘束の状態と似たような印象を得ている。

全体的な傾向としては、正確さではスマートフォンが好印象であり、わずらわしくない点や素早さという点では手入力と足入力は好印象を得ている。これらの結果から、スマートフォンをポケットや鞆に入れている時に、単純なボタン操作やスクロールを伴う文章の閲覧などのタスクであれば提案システムの手入力足入力による操作は、わずらわしくない点や素早い印象をユーザに与える可能性はある。しかし、スマートフォンの装着具の工夫をした場合やスマートフォンをあらかじめ手に持っている状態などでは、この結果に当てはまらない可能性はある。また、[23]からの提案インタフェース自体へのユーザプレファレンスや精度の面での差分や貢献は、両手が拘束されてない状態に比べ、片手や両手拘束時の身体バランスの悪い状態であったとしても、同様の操作性やパフォーマンスを発揮できることや、ユーザプレファレンスはほぼ同様の傾向であるのが確認されたことであると考えている。

これらの実験結果から両手がふさがっている状態であまり入力精度を必要としないボタン操作で十分な情報サービスを利用するとき、たとえば電話の着信への応答や一瞥すれば十分なメールの閲覧、なんらかの確認でボタン操作を行うときには荷物を持ち替える手間がない足入力が許容されると考えられる。また、少なくとも片手が空いている状態でのあまり入力精度を必要としないボタン操作で十分な情報サービスや、スクロール操作を用いるメール文の閲覧や Web ブラウジングなどの情報サービスには手入力が許容されると考えられる。

Fig. 11 7段階アンケート結果 (ハンズフリー)

Fig. 12 7段階アンケート結果 (利き手拘束)

Fig. 13 7段階アンケート結果 (両手拘束)

一方、4文字の単語の入力に提案システムの手入力あまり許容されなかった結果から、より多くの文字入力が必要とするメールの作成や twitter などの SNS への投稿などの情報サービスの利用には提案システムは向いていないと考えられる。また、提案システムに関して両手拘束もしくは片手拘束の状態でのタスク完了時間に基づいた憶測ではあるが、提案インタフェースで十分な熟達と日常使用による一般化を伴えば、スマートフォンの QWERTY 配列による入力とほぼ変わらないパフォーマンスと満足度が得られるのではないかとわれわれは考えている。加えて、われわれの提案インタフェースと既存のスマートフォンは排他的なものではなく共存が可能であるため、ユーザが場面に応じて使い分けるのが好ましいともわれわれは考えている。これに関して、今回の実

験結果からスマートフォンを情報処理の中心に据え、提案インタフェースは特定の場面をサポートする組合せで使用するインタフェースであると考えている。たとえば実験タスクのように両手が拘束されている時のみ使用することや、他人と情報を共有したい場面で提案インタフェースを使用する特定のシチュエーションで使用するものだといえる。

最後に社会的受容性の考察であるが、プロジェクトによる表示は周りの人に見られる可能性が高いことから表示手法や表示する内容について何らかの方法でパーソナライズする検討が必要である。

6. おわりに

本論文では、われわれが提案・開発したウェアラブル手足入力インタフェースを用いて、スマートフォンインタフェースを用いた電話やメールの操作における手入力と足入力の有用性を調査した。その結果、入力の精度をあまり必要としないボタン操作やスクロール操作では提案システムによる入力も少なからず許容された。今後は、ウェアラブル手足入力インタフェースと既存のスマートフォンを組み合わせた新しいインタラクションスタイルを検討する予定である。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 研究費（課題番号 15K00270）の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] C. S. Pinhanez: The everywhere displays projector: A device to create ubiquitous graphical Interfaces; *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing 2001*, Ubicomp'01, pp. 315–331 (2001)
- [2] A. D. Wilson: PlayAnywhere; a compact interactive tabletop projection-vision system; *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST2005, pp. 83–92 (2005)
- [3] T. Konishi, K. Tajimi, N. Sakata and S. Nishida: Projection stabilizing method for palm-top display with wearable projector; *Wearable Computing 2009, 13rd IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 13–20 (2009)
- [4] K. Tajimi, K. Uemura, Y. Kajiwara, N. Sakata and S. Nishida: Stabilization method for floor projection with a hip-mounted projector; *Proceedings of 20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 77–83 (2010)
- [5] D. Matsuda, N. Sakata and S. Nishida: Wearable input/output interface for floor projection using hands and a toe; *Proceedings of 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 122–128 (2013)
- [6] T. Kurata, T. Okuma, M. Kourogi and K. Sakaue: The hand mouse: GMM hand color classification and mean shift tracking; *Proceedings of the 2nd International Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Realtime Systems*, pp. 119–124 (2001)
- [7] T. Ono and N. Mukawa: An eye tracking system based on eye ball model. Toward realization of gaze controlled input device; *Information Processing Research Report*, 2001-HI-93, pp. 47–54 (2001)
- [8] P. Wellner: Interacting with paper on the DigitalDesk; *Communication ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 87–96 (1993)
- [9] T. Karitsuka and K. Sato: A wearable mixed reality with an on-board projector; *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2003*, pp. 321–322 (2003)
- [10] G. Yamamoto and K. Sato: PALMbit: A PALM Interface with projector-camera system; *Adjunct Proceedings of 9th International Conference on Ubiquitous Computing, Ubi-Comp 2007*, pp. 276–279 (2007)
- [11] P. Mistry, P. Maes and L. Chang: WuW - wear ur world - a wearable gestural interface; *Proceedings of the 27th International Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4111–4116 (2009)
- [12] C. Harrison, H. Benko and A. D. Wilson: Omnitouch wearable multitouch interaction everywhere; *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST2011, pp. 411–450 (2011)
- [13] T. Augsten, K. Kaefer, R. Meusel, C. Fetzner, D. Kanitz, T. Stoff, T. Becker, C. Holz and P. Baudisch: Multitoe: high-precision interaction with back-projected floors based on high-resolution multi-touch input; *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST2010, pp. 209–218 (2010)
- [14] S. Barrera, P. Romanos and S. Saito: WARAJI: foot-driven navigation interfaces for virtual reality applications; *Advances in Pacific-Rim Conference on Multimedia*, pp. 1–7 (2004)
- [15] J. Scott, D. Dearman and K. Truong: Sensing foot gestures from the pocket; *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST2010, pp. 199–208 (2010)
- [16] V. Paelke, C. Reimann and D. Stichling: Foot-based mobile interaction in mobile games; *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 321–324 (2004)
- [17] D. Matsuda, K. Uemura, N. Sakata and S. Nishida: Toe input using mobile projector and Kinect sensor; *Proceedings of the 16th International Symposium on*

Wearable Computers, ISWC2012, pp. 18–22 (2012)

- [18] A. D. Wilson : Robust computer vision-based detection of pinching for one and two-handed gesture input; *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST2006, pp. 255–258 (2006)
- [19] K. Fukuchi, T. Sato, H. Mamiya and H. Koike: Pacpac: pinching gesture recognition for tabletop entertainment system; *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp. 267–273 (2010)
- [20] R. Tenmoku, M. Kanbara, N. Yokoya and H. Take-mura: Annotation overlay with a wearable computer using augmented reality; *Proceedings of 1st CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing*, pp. 27–32 (2002)
- [21] J. Huber, J. Steimle, C. Liao, Q. Liu and M. Mühlhäuser: LightBeam: Nomadic pico projector interaction with real world objects; *CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2513–2518 (2012)
- [22] 松田, 上村, 酒田, 西田: 小型プロジェクタと深度センサを用いたウェアラブル足入力インタフェース; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 161–169 (2012)
- [23] 佐藤, 松田, 酒田, 西田: フロアインタラクションに向けたウェアラブル手足入力インタフェース; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 163–171 (2015)
- [24] 佐藤, 富永, 土方, 酒田, 西田: ウェアラブルフロアインタラクションシステムにおける足モデル導入による足検出の向上の研究; システム制御情報学会論文誌, Vol. 29, No. 8, pp. 355–361 (2016)
- [25] T. Kurata, N. Sakata, M. Kourogi, H. Kuzuoka and M. Billinghurst: The advantages and limitations of a wearable active camera/laser in remote collaboration; *Conference Supplement of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work* (2004)

著者略歴

酒田 信親 (正会員)

2002年筑波大学工学システム学類卒業, 2007年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士課程修了. 2012~13年 HITLAB NZ University of Canterbury 客員研究員. 2007年4月大阪大学大学院基礎工学研究科助教, 2017年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教, 現職. 実世界指向インタフェースの研究に従事. 博士(工学). 著書は「次世代ヒューマンインタフェース開発の最前線」(NTS, 共著), 「AR (拡張現実) 技術の基礎・発展・実践」(科学情報出版).

佐藤 文宏

2014年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業, 2016年大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻修士課程修了. 実世界志向インタフェースの研究に従事.

富永 登夢

2014年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業, 現在, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻博士後期課程に在学中. ソーシャルコンピューティングの研究に従事.

土方 嘉徳

1996年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業, 1998年同大学大学院修士課程修了. 同年日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所入社, 2002年大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻助手, 2009年同准教授, 2014年ミネソタ大学 GroupLens Research 客員研究員, 2017年より関西学院大学商学部准教授, 現在に至る. ソーシャルコンピューティング, 情報推薦, テキストマイニングの研究に従事. 博士(工学). 人工知能学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本データベース学会はか会員, 電子情報通信学会シニア会員.