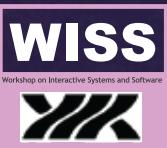


WISS
2020



第28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(WISS)

W I S S
2 0 2 0



WISS2020について

寺田 努*

本論文集は、日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェア(ISS)研究会が主催し、2020年12月16日(水)～18日(金)にかけてオンライン開催される「第28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」(Workshop on Interactive Systems and Software: WISS2020)での発表をまとめたものです。

2020年はCOVID-19の影響によりほとんどの会議がオンライン開催となっています。WISSは本来、2泊3日の泊まり込み形式で、インタラクティブシステムにおける未来を切り拓くような新しいアイデア・技術を議論するワークショップであり、200名程度の参加者が朝から深夜まで会場内外のそこら中で議論する会議です。1993年にスタートしたWISSは今年で28回目を迎えたが、WISS2020では初めて完全オンラインで開催することとなりました。WISSはこれまで発表中のリアルタイムチャットや複数スクリーンを用いた発表など、インタラクションを充実させる数々の先進的な取組みを取り入れた会議ですが、これはあくまで現地でのコミュニケーションを活性化させるためのものだったと感じます。

WISS2020の基本方針を考えるにあたって、我々は2つの可能性を考えました。一方は、今後の会議がオンラインになるのは避けないと考えて、「WISSらしいオンライン会議を工夫する」あるいは「現地とオンラインの究極のハイブリット開催を目指す」といった、画期的なアイデアをベースにここでしかない会議を目指すというものです。もう一方は、WISSはあくまで現地開催を面白くすることに注力すべきであり、今後の現地開催を見据えて今年は奇をてらったことはしない、消極的にいえば「WISSを延命する」という考え方です。運営委員の皆さんと議論を重ね、結論としてはWISS2020は後者の考えを基本とすることにしました。WISS2020はオンライン開催ではありますが、究極のオンライン会議を追求するのではなく、WISSの雰囲気がオンラインでも残るのか、オンライン会議で大事なことはなんなのか、を参加者・発表者とともに考える会にできればと思います。WISSの発表はその発表自体にパワーを備えていると信じています。また、その結

果として運営コストを抑え、WISS初の参加費無料を実現しました。

発表形態としては、オンラインでのデモ・ポスター発表は行わないこととしました。一方で、COVID-19の影響で実験や実装が思うように進まなかったものに関しては議論の機会を与えるため、0ページ(原稿なし)～6ページの自由なページ数で申込み可能な査読なし発表カテゴリを用意しました。また、登壇発表はArchival、査読なし発表はNon-archivalとウェブサイトおよび原稿自体に明記することにより、発表内容を国際会議等に投稿する際に不利にならない形態を著者が選択できるようにしました。

本年は、登壇発表に対して、34件のフルペーパーの投稿がありました。それぞれに対してプログラム委員から3名の査読者を割り当てて査読を行いました。そして、プログラム委員会で詳細に検討した結果、23件の論文を採択しました。査読なし発表は29件の申込みを受けました。講演の聴講は参加登録をした人のみインタラクティブに参加できるオンライン会議によるものと、誰でも自由に閲覧可能なYoutube Liveでの配信によるものを用意しました。ここにSlackおよびWISS Challengeで公募したコミュニケーション支援システムが加わり、WISSの特徴である活発な議論を生み出せねばと考えています。

なお、WISSの開催時期は2017までずっと12月上旬近辺でしたが、WISS2018、2019は9月末開催になりました。これは国内の分野が重複する会議との開催間隔を充分取ることで高品質な論文を生み出せるのではないかという議論に基づくものです。2年間の様子を見た結果、思ったいい影響が生まれていないと判断し、WISS2020は12月開催に戻しました。会議にとって開催時期はとても重要ですが、「よくしたい」という意識に基づいてフットワーク軽くこのような変更が行える空気を引き続き保っていきたいと思います。

最後に、登壇発表論文を投稿頂いた皆様、査読なし発表に申込み頂いた皆様、議論に参加し会議の成功に貢献して下さる参加者の皆様、スポンサー企業の皆様、協賛学会関係者の皆様、査読者の皆様、そして、WISS2020プログラム委員/運営委員の皆様に深く感謝いたします。

* 神戸大学、WISS2020プログラム委員長

WISS 2020 プログラム委員長

寺田 努 (神戸大)

WISS 2020 運営委員長

五十嵐 悠紀 (明治大)

WISS 2020 副運営委員長

真鍋 宏幸 (芝浦工大)

WISS 2020 運営委員会計 細部 博史 (法政大)
瀬川 典久 (京産大)出版・デザインコンペ 池松 香 (ヤフー)
加藤 邦拓 (東京工科大)参加者管理 樋口 啓太 (Preferred Networks,
醸造酒類研究所)

照明・音響 川口 一画 (筑波大)

広報・学会リエゾン 佃 洋子 (産総研)
横窪 安奈 (青学大)

WISS Challenge 入江 英嗣 (東大)

チャット 福地 健太郎 (明治大)

動画生中継 阪口 紗季 (東大)

デモ・ポスター 村尾 和哉 (立命館大)
土田 修平 (神戸大)ネットワーク 原 貴洋 (ヤマハ)
奥本 隼 (TwoGate)Web・投票・サーバー 小山 裕己 (産総研)
福里 司 (東大)懇親会 築瀬 洋平 (Unity)
倉本 到 (福知山公立大)表彰 沖 真帆 (はこだて未来大)
宮下 芳明 (明治大)企業 岩本 拓也 (サイバーエージェント)
開原 沙文 (チームラボ)学生 櫻井 翔 (電通大)
中野 倫靖 (産総研)**表紙デザイン**

宮武 陽子 (お茶の水女子大)

WISS 2020 プログラム委員

五十嵐 悠紀 (明治大)

池松 香 (ヤフー)

入江 英嗣 (東大)

岩本 拓也 (サイバーエージェント)

沖 真帆 (はこだて未来大)

奥本 隼 (TwoGate)

開原 沙文 (チームラボ)

梶本 裕之 (電通大)

加藤 邦拓 (東京工科大)

川口 一画 (筑波大)

倉本 到 (福知山公立大学)

栗原 一貴 (津田塾大)

小池 英樹 (東工大)

小山 裕己 (産総研)

阪口 紗季 (東大)

櫻井 翔 (電通大)

瀬川 典久 (京産大)

塚田 浩二 (はこだて未来大)

佃 洋子 (産総研)

土田 修平 (神戸大)

寺田 努 (神戸大)

中野 倫靖 (産総研)

鳴海 紘也 (東大)

原 貴洋 (YAMAHA)

樋口 啓太 (東大)

福里 司 (東大)

福地 健太郎 (明治大)

細部 博史 (法政大)

真鍋 宏幸 (芝浦工大)

宮下 芳明 (明治大)

村尾 和哉 (立命館大)

築瀬 洋平 (Unity)

横窪 安奈 (青学大)

ISS 研究会連絡先

日本ソフトウェア科学会

「インタラクティブシステムとソフトウェア研究会」

主査: 寺田 努

神戸大学 工学部 電気電子工学科

兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

E-mail: tsutomu (at) eedep.t.kobe-u.ac.jp

本研究会に関する情報は <http://www.wiss.org/> からアクセス可能です。

もくじ

まえがき: WISS2020について 寺田 努.....	i
---------------------------------	---

セッション1：行動支援

LineChaser: 視覚障害者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム 栗林 雅希, 稲川 青汰, 木 啓伸, 浅川 智恵子, 森島 繁生.....	ロング採録	ロング発表	1
---	-------	-------	---

本論文は視覚障害者が列に並び、列の動きに合わせて移動していくという状況をスマートフォンのデプスセンサを用いてサポートするというものです。問題の発見、新規のデバイスを用いない解決、評価実験など見るべき点は多く、世間に広まることを予感させる研究となっています。

One-Shot Wayfinding System: 360 度スマートフォンカメラと矢印分析を用いた視覚障害者のための公共施設における方向決定支援システム 山中 優太朗, 稲川 青汰, 木 啓伸, 長岡 雄一, 平塚 義宗, 栗原 聰.....	ショート採録	ショート発表	7
---	--------	--------	---

本研究では、360 度カメラで撮影した画像から公共施設の矢印情報を抽出し、目的地の移動を支援する手法を考案している。問題設定はシンプルであるが面白く、査読者の一定の評価を得ました。一方で、システムの有用性や妥当性については議論の余地が残されているため、今後の新規性の強化に期待したい。WISS では、360 度カメラを用いたガイド方法が実環境においてどこまで活用できるのか等について議論したい。

ストレッチセンサを用いた常時膝角度推定によるサポート型怪我防止システム 桐野江 高太, 寺田 努, 塚本 昌彦, 大西 鮎美.....	ショート採録	ショート発表	13
--	--------	--------	----

膝を痛めないようにランニングを続けるという問題設定に対し、装着しやすく正確な測定ができるデバイスを提案した有用性のある研究です。ウェアラブルデバイスとしてストレッチセンサの利用は発展性があり、今後の解析が期待されるため、本ワークショップでの短い発表に適した論文であると判定します。

セッション2：ディスプレイ

電解イオンディスプレイ 石井 綾郁, 池松 香, 椎尾 一郎.....	ロング採録	ロング発表	19
--	-------	-------	----

すべての査読者の総意として、新規性、有効性、参加者へのインパクト 3 点を考慮にいれたうえで、「ロング採録」がふさわしいと判断しました。

特に、5. 3 「スタンプ式」においての、「任意のカラーパターンを食品の表面に表示することができる」に関して、とても可能性が感じられる研究だと判断しました。

カスタマイズ可能な二次元レンティキュラを用いた多視点情報提示手法の提案 島元 謙, 塚田 浩二	ショート採録	ショート発表	25
--	--------	--------	----

全ての査読者が、レンズアレイによる 2 次元レンティキュラの実現とその基礎性能の評価について、新規性と有用性を認めています。発表の規模からショート採録が妥当と判断します。

電気分解気泡による流水ティッカー表示と高画素階調表示	ショート採録（採録条件あり）	ショート発表
石井 紗郁, 福島 真花, 田中 波輝, 的場 やすし, 池松 香, 椎尾 一郎	31	

昨年度発表された電気分解泡ディスプレイを拡張し、「1ライン電極 + 流水によるティッカー提示」と、「高解像度電極 + グレースケール提示」を実現した論文です。確かな技術的進歩と、アートやエンターテインメント等の幅広い表現分野への応用可能性を感じられます。コアとなる技術は昨年度と同様であることを考慮して、ショート採録と判断しました。

セッション3：ものづくり

パーツの集合体を利用した半幅帯のための帶結び形状デザインツールの提案	ロング採録	ロング発表
坂本 あゆみ, 五十嵐 悠紀	37	

本研究では、カジュアルな着物や浴衣に合わせて用いられる半幅帯の帶結びに着目し、その支援を行う枠組みを提案しています。提案する3つのシステム・手法は半幅帯の帶結びのデザイン・作製で有益であると考えられ、WISSにおいては同じ結び方の中でどの程度デザインに差異を出せるか、構造図の計算の妥当性、帶結びの表現力などについて議論できればと思います。

Pop-up Print: 双安定な折りたたみ3Dプリント	ロング採録	ロング発表
野間 裕太, 鳴海 紘也, 奥谷 文徳, 川原 圭博	43	

本研究では3Dプリント時における造形時間の短縮とサポート材の消費削減を実現する新しい設計手法“Pop-up Print”を提案している。設計された物体は必要に応じていつでも簡単に折りたたむことができ、収納性の観点でも優れている。論文の記述も明解であり、いずれの査読者も WISS で議論するべき論文として採録を推薦した。手法の適用範囲や技術的発展性などについて活発な議論ができると期待する。

手芸初心者を対象とした猫用ケープの制作支援システム	ショート採録（シェファーディングあり）	ショート発表
栗原 彩花, 五十嵐 悠紀	49	

先行研究や周辺領域/サービスの調査が不足していると感じます。
ケープだけではなく、ペットの柄や毛の長さ等など作成する点は改善点も見当たりますが作り込まれている印象を感じています。
着眼点や将来性に期待できる研究と判断し、ショート採録（シェファーディングあり）と評価しました。

セッション4：認識

アクティブ音響センシングを用いた食材認識カトラリー	ロング採録	ロング発表
西井 遥菜, 双見 京介, 村尾 和哉	55	

本論文では、フォークもしくはスプーン型デバイスにマイクとスピーカを取り付け、アクティブ音響センシングによって、食材の判別をすることを試みています。カトラリーに接触する食材の判別をするという発想は新しく、先行研究との差分も十分にあります。

実際の食事シーンでは、調理されることで食材の組成が変化することや、唾液や食材の一部が残ることによる精度への影響、同時に複数食材を同時に食べた場合の認識方法などの課題は残りますが、評価実験を丁寧におこなっており、食材の刺し方・載せ方にばらつきがあっても高い結果になったことが評価されました。

モジュラー型パルス遅延回路に基づく3Dモデリングのためのインタラクティブブロック	ショート採録	ショート発表
齋藤 圭汰, 志築 文太郎, 川口 一画, 高橋 伸		61

安価なアナログ回路のみを内蔵したブロックの提案で、電圧測定で積み重ね段数や種類、積み重ね順を識別する機構を提案しており、新規性があると判断する。
一方で、インタラクティブブロックとしての有用性は判断できなかった。

PartsSweeper: 電子部品や工具をさりげなく整理するインタラクティブ・デスクの試作と応用	ショート採録 (採録条件あり)	ショート発表
折原 征幸, 塚田 浩二		67

作業机の上の部品や工具をさりげなく整理するシステムを実現するために、電子部品や工具が磁性体である点に着目し、机の下の磁石を制御することによって物を移動させる手法を提案している。「さりげない」というコンセプトの明確化と、技術的妥当性に関しては更なる議論が必要なことから、ショート採録と判断された。

セッション5：入力インターフェース

FieldSweep: 永久磁石の配列とスマートフォン磁気センサを用いた二次元トラッキング手法	ロング採録 (採録条件あり)	ロング発表
宮武 陽子, 椎尾 一郎		73

複数の磁石を平面上に並べ、安価・バッテリレスで2次元のトラッキングを実現するという興味深い手法を提案しております。査読者全員が新規性を認めています。
WISSでの発表としてもふさわしい内容であると判断したため、ロング採録と判定しました。
一方、論文中では一部不明瞭な箇所があることから、それらの修正を条件とした。

ORANGE: 360度カメラと画像認識技術によるユニバーサルリモコン	ショート採録 (採録条件あり)	ショート発表
木ノ原 中也, 卷口 誉宗, 高田 英明, 坂本 大介, 小野 哲雄		79

360度カメラを用いて使用者周辺の状況を取得し、同時に視線方向から注視対象となる物体を検出するという仕組みについて、機構のシンプルさが評価された。現状ではリモコンシステムの全体像が不明瞭であり、今後さらにシステムの完成度を高めての評価が待たれる。

時間および範囲をもとに認識する凝視に基づく操作手法	ショート採録	ショート発表
磯本 俊弥, 山中 祥太, 志築 文太郎		85

本論文の提案する新しい「凝視」の計算手法について新規性があると判断しました。これは、1名ではありますが被験者実験によってもある程度有効性が示されています。一方、1名という被験者の数、かつそれが著者である、ということから信頼性に懸念があることから、ショートとしての採択で合意しました。

ペイズ情報利得を用いたスクリーンキーボードカーソルの効率的移動手法 ショート採録 ショート発表
中嶋 誠, 勝 世聰, 五十嵐 健夫 91

ワークショップとしては十分な内容であり、ペイズ実験計画法を用いたインタラクション技術は様々な場面での応用可能性につながることから、WISSで発表いただき、内容を共有することは有意義である。ショート採録を推す。

JoyFlick: フリック入力に基づくゲームパッド向けかな文字入力手法 ショート採録 ショート発表
横山 海青, 倉 礼, 志築 文太郎 97

いずれの査読者も提案手法に一定の有用性があること、実験結果に対する考察や今後の方向性は妥当かつ有益な示唆を含むことを認めています。一方で、ジョイスティックを用いたフリック入力自体に新規性は乏しく、提案内容自体は比較的シンプルなものであるためショート採録が適切であると判定しました。

セッション6：情報提示

画面に映っている食品の味を再現して味わえる味ディスプレイの開発 ロング採録（採録条件あり） ロング発表
宮下 芳明 103

基本五味の組み合わせで任意の味を表現する本技術について、新規性があり WISSでの議論に値する内容である。著者による CHI2020EA で既発表の Norimaki Synthesizer を発展させた内容であり、無味ゲルの追加、センサキャリブレーション、味の編集・エフェクト・イコライザ、三角形ゲルによる実装に関する発展がある（部分的に UIST2020 で既発表）。Norimaki Synthesizer から多数の発表内容があると考えられ、ロングでの十分な発表と、深い議論を期待する。

散布図選択による多次元データ可視化へのグラフ彩色問題の適用 ショート採録 ショート発表
伊藤 貴之, 中林 明日香, 萩田 真理子 109

本論文は、多次元データの可視化のために多様な 2 次元の散布図を選択する手法を提案したもので、散布図の選択にグラフ彩色問題を利用するという考え方には新規性が認められます。一方で、内部的に四つの指標のみを使っているために多様性が制限されてしまわないか、特徴がないと判断される散布図に価値がないかどうかは不明ではないか、ディスプレイ空間の制約を扱うためにユーザはどういうインタラクションをするのかといった点については議論の余地が残ります。

1 対多遠隔コミュニケーションにおける聴衆反応の集合的提示 ショート採録（採録条件あり） ショート発表
前田 清洲, 曆本 純一 115

本研究では、オンライン講義のような 1 対多の状況において、聴衆の視線情報を取得しそれを講師側の資料上にヒートマップで提示する手法を提案しています。提案手法はオンライン講義等が急増した昨今の状況下で有益であると考えられ、WISSにおいては提案システムを用いることでどのような効果が期待されるか、またそれをどのように評価していくかについて議論できればと思います。

セッション7：教育支援

askTA：消極的な受講生でも質問可能なオンライン演習講義支援システム

ロング採録

ロング発表

又吉 康綱, 中村 聰史 121

オンライン実習講義の支援システムの提案・実装・運用報告に関して述べられています。

提案システムは、受講生が TA に質問があるときに、まず質問の概要をシステムに投稿するアプローチをとっています。このことにより、質問者自身による質問の具体化/記録、複数人いる TA のマッチング、待ち時間の管理、を可能とし、質問のハードルをさげるとともに、TA の負担軽減を図っています。

システムは、実際の授業で運用され、アンケート結果が示されています。

喫緊の課題に対して、試行錯誤しながらインタラクティブシステムの提案と運用により解決を図った姿勢に、WISS らしさを感じます。

視覚・聴覚フィードバックによるフィールドホッケーのプッシュ練習支援システムの提案と実装

ショート採録

ショート発表

岩本 宗大, 大西 鮎美, 寺田 努, 塚本 昌彦 127

着眼点および適切なシステム提案を評価している点は査読者 3 名で一致しており、ショート採録となりました。実験で期待されたような結果が出なかったことに対しては発表の場で議論ていきましょう。

SectionsNote: セクションを考慮してレイアウトおよび閲覧できるデジタルノート

ショート採録

ショート発表

越後 宏紀, 五十嵐 悠紀 133

よく日本の教育で使われるノートの構成方法をツールに落とし込み、教員の作業負荷を軽減を図った点に一定の新規性が認められる。一方で評価方法には疑問が残る内容となっている。

著者らが主張する 2 点の貢献：

- ・提案システムで様々なノートのレイアウト作成が可能であることを確認
- ・閲覧ビューの分割数の評価実験

これらのうち、前者を評価した。

以上の結果から、[ショート採録] と判断された。

LineChaser: 視覚障碍者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム

栗林 雅希 *† 粥川 青汰 *† 高木 啓伸 ‡ 浅川 智恵子 ‡ 森島 繁生 §

概要. 本研究は視覚障碍者が列に並ぶ事を支援するシステム (*LineChaser*) を提案する。列に並ぶ際は、刻々と位置が変化する列の最後尾を発見し、列の動きを検知して追従する必要があるが、どちらも視覚障碍者には難しいタスクである。本研究ではスマートフォン 1 台で視覚障碍者を列の最後尾まで案内し、列に追従できるよう支援するシステムを開発した。提案システムは列ができる場所の概形が記録された地図を使用し、地図上における周囲の人物の位置をスマートフォンの RGBD カメラを用いて検出する。検出結果に基づいて検出された人物が列に並んでいるかを判断し、音声と振動を用いてユーザに列に並ぶための指示を与える。12 名の視覚障碍者を対象にシステムの評価実験を行ったところ、提案システムを用いることで全ての参加者が単独で列の最後尾の発見および列の追従が可能となり、普段の体験と比較して列に並ぶ際の自信度も有意に向上した。

1 はじめに

空港やショッピングモールといった公共空間内では列に並ぶ機会が存在するが、視覚障碍者にとって単独で列に並ぶ事は困難である。列に並ぶためには「列の最後尾の発見」および「列の追従」という 2 つのタスクが求められる。列の最後尾の位置は刻々と変化するため、周囲の人物が列にならんでいるか否かを判断した上で最後尾へ移動する必要がある。また列を追従する際は、いつ、どの方向へ、どれだけの距離を進むべきか判断する必要がある。本研究で視覚障碍者を対象に予備調査を行ったところ、これらの列に並ぶためのタスクを視覚障碍者が白杖や盲導犬といった従来の歩行支援ツールを用いて 1 人で行うことは極めて難しいというコメントが得られた。

また予備調査では、列に追従するタスクを支援するプロトタイプシステムを実装し、評価実験を行った。プロトタイプシステムはスマートフォンに搭載された RGBD カメラと物体検出手法 [7] を組み合わせることでユーザの前に立つ人物との距離を計測し、距離に基づいて進むべきタイミングを振動パターンを用いてユーザに伝える(図 1)。実験の結果、プロトタイプシステムを使用したユーザが追従すべき最後尾の人物以外の人物を追従してしまう結果が確認され、参加者からは前の人物との距離や方向を具体的に知りたいというコメントが得られた。

予備調査の結果を基に、本研究は視覚障碍者が列の最後尾を発見し、列に追従できるように支援するスマートフォン型システム—*LineChaser* を提案する(図 3)。提案システムは列ができる場所の概形

が記録された地図を事前に用意し、用意した地図と AR マーカを用いた自己位置推定結果を元に列の入り口まで案内する。その後地図に記録された列の概形に沿って案内し、列の最後尾を目指す。その際提案手法は、RGBD カメラと物体検出手法 [7] を組み合わせて周囲の人物の地図上における位置を検出することで、検出された人物が列に並んでいるか、どの人物が列の最後尾か、を判断する。列の追従時はカラーヒストグラムを用いて最後尾の人物をトラッキングし、その人物の位置情報に基づいて進むタイミングと方向および距離を音声と振動を用いて伝える。

本研究では 12 名の視覚障碍者に対して、提案システムを用いて直線および蛇行した列に並ぶタスクを与え、提案システムの有用性を検証した。実験から(1) 提案システムは視覚障碍者に対して列の最後尾の発見および列の追従を可能にする、(2) ユーザは提案システムを用いることで自信を持って列に並ぶことができる、(3) ユーザは音声と振動を組み合わせた案内を有用に感じる、という知見が得られた。

2 関連研究

視覚障碍者向け案内システムとして、スマートフォンと自己位置推定技術を用いて目的地までの経路を案内するシステムが提案されている [8, 2]。これらの研究はお店や施設などの固定された目的地までの案内を支援するが、列の最後尾のように刻々と位置が変化する目的地までの案内に適用することは難しい。また、スマートフォンカメラとコンピュータビジョン技術を用いて周囲の様子をユーザに伝える視覚障碍者支援システム¹も提案されている。しかしながら、これらの支援システムは検出された人物との距離や人物が列に並んでいるかといった列に

Copyright is held by the author(s).

* Authors contributed equally.

† 早稲田大学

‡ IBM Research

§ 早稲田大学理工学部総合研究所

¹ <https://www.microsoft.com/en-us/seeing-ai>

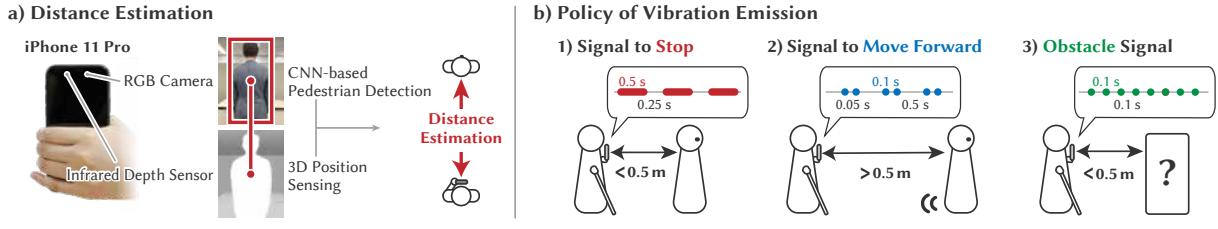


図 1. プロトタイプシステムの概要

並ぶために必要な情報を検出することができない。周囲の人物の位置を検出し、視覚障碍者と歩行者の衝突回避に利用するシステムも提案されている[3, 4]。しかしながら、視覚障碍者が列に並ぶためには人物の位置情報に加えてその人物が列に並んでいるか、どの人物が列の最後尾かをシステムが判断する必要がある。また自律ロボット向けの技術として、列の先頭から列に沿って移動しながら人物を順番に検出することで列の最後尾を発見し、列に追従する手法が提案されている[6]。しかしながら、ロボット向けに提案された手法を用いて視覚障碍者が列の最後尾を発見する場合、ユーザは人物を検出するために体の向きを頻繁に変える労力が必要となり、自分の位置を見失ってしまう危険性も生じる。

3 予備調査

本研究ではまず初めに 6 名の視覚障碍者に対して、普段単独で列に並ぶ際の経験を聞き取る予備調査を行った。全ての参加者は過去に列の前の人物と衝突する、あるいは列が動いていたことに気づかなかつた経験があると答えた。また、「駅やショッピングモールのようなうるさい場所だと列が進んだことを把握するのは難しい。たとえそれが分かってもどれくらい進めばいいのかわからない」、「蛇行の列に並ぶときはどの方向に進めばいいのかわからない」といったコメントが得られた。

また本研究では、列の追従を支援するプロトタイプシステムを実装し、予備調査に参加した視覚障碍者からフィードバックを集めた。システムはスマートフォン(iPhone 11 Pro²)のRGBDカメラと物体検出手法[7]を組み合わせて前方の人物との距離を計測し(図 1-a)，距離に基づいて進むべきタイミングを 3 種類の振動パターンを用いてユーザに伝える(図 1-b)。予備実験において参加者は直線の列の最後尾についていた状態からシステムを用いて列に追従するタスクを行った。

実験の結果、参加者は 75% の成功率でプロトタイプシステムを用いて 1 人で列に追従できた。追従に失敗した要因として、システムが追従すべき最後尾の人物以外の人物を検出したためにユーザが誤った

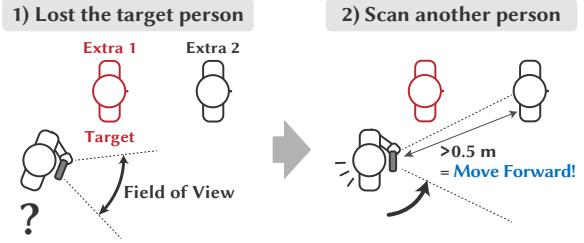


図 2. 追従に失敗した例

人物を追従した結果が確認された(図 2)。また実験後のインタビューから、列の人物との距離や方向などより詳細な情報を知りたい、というコメントが得られた。実験の詳細な結果は[5]を参照してほしい。

4 LineChaser の実装

4.1 自己位置推定

LineChaser は列ができるうる場所の概形(列の入り口、終点、幅、曲がり角など)および自己位置推定で用いる AR マーカの位置が記録された地図を使用する(図 3, Setup)。本研究では、スマートフォンで 0.27m–0.74 m 程度の精度[9]で自己位置推定が可能な ARKit を用いる。提案システムはスマートフォンのカメラで AR マーカを読み込み、ARKit を用いて地図上におけるユーザの自己位置推定を行う。

4.2 列の最後尾の発見および人物の位置検出

提案システムは自己位置推定結果を元に、ユーザを列の最後尾まで案内する。まず最初に提案システムはユーザを列の入り口まで案内する(図 3, Step1)。その後提案システムは、地図に記録された列に沿って最後尾の人物が見つかるまで歩くようにユーザに指示する。列に沿って歩く間、提案システムは周囲の人物検出および列に並んでいるか否かの判定を行うことで最後尾の人物を検出する。

具体的に提案手法はまず、スマートフォンに搭載された RGB カメラと深度センサを用いて人物の位置を検出する。RGB カメラと YOLOv3-tiny[7]を用いて人物検出を行い、検出された人物の矩形領域の中心部分と深度データを対応づけることで人物の位置を検出する。ユーザの自己位置推定結果と人物

² <https://www.apple.com/iphone-11-pro/>

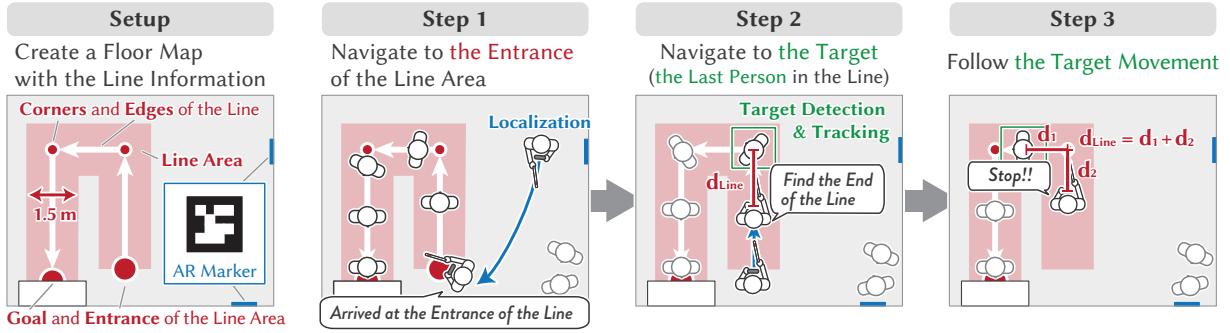


図 3. LineChaser の列に並ぶタスクの支援方法の概要

の位置検出結果を元に、地図上における人物の位置を推定し、列に並んでいるか否か、検出された人物の中でも列の一番後ろに立っている人物が誰なのかを推定する。列の最後尾と推定された人物との距離が 2.5m 以下になった時点でシステムはユーザが列の最後尾についたとみなし、続いて列に追従するタスクの支援を始める。

4.3 列の最後尾のトラッキングに基づく列の追従

人物の位置検出結果に基づいて LineChaser は検出人物のトラッキング [4] を行う。予備調査での失敗は、プロトタイプシステムが列に並ぶ人物の中から最後尾の人物を見分けられなかったことに起因する。そこで LineChaser は検出された人物のカラーヒストグラムに着目することで、最後尾の人物かそうでないかを区別する。これにより、最後尾の人物がカメラの画角に入らず、画角内の別の人物をシステムが検出した場合も最後尾以外の人物に追従することを防ぐことが可能となる。

具体的に提案手法はまず、最後尾の人物と推定された人物に対して検出された矩形領域の中心部分におけるカラーヒストグラムを取得する。さらに列追従時においても検出された人物に対して同様にヒストグラムを取得する。各検出人物のヒストグラムに対して列の最後尾発見時に取得した最後尾の人物のヒストグラムとの Lab 色空間における a 空間と b 空間のバタチャリア距離を計算し、閾値 $\gamma = 0.40$ 以下の人物を追従すべき人物として認識する。

LineChaser は追従すべき人物との列に沿った距離 d_{Line} を計算し（図 3, Step3）， $d_{Line} > d_0$ ではユーザに進むように、 $d_{Line} \leq d_0$ では止まるように指示する。本研究では実験時にソーシャルディスタンスを保つために $d_0 = 1.7\text{ m}$ とした。

4.4 案内に使用するインターフェース

予備調査では振動のみでユーザに指示を与えたが、そこで得られたフィードバックを元に、LineChaser では音声による指示と振動パターンを組み合わせた

インターフェースを採用する。

音声による指示は、「2時の方向、3m進め」というように、時計方向による方向の指示と具体的な距離の値を用いてどの方向へどれくらい進むべきかを骨伝導イヤホンを用いてユーザに伝える。ユーザが向くべき方向から 30° 以上ずれた方向を向いている場合、LineChaser は正しい方向を向くように指示を与える。また、ユーザの向きは正しいが、列から左右どちらかにはみ出している際は「2歩左へ」というように、左右にスライドするように伝える。

例として LineChaser は以下の様に音声による指示を与える：（1）案内開始時：「2時の方向、2.1m 進め.」，（2）列の入り口到着時：「これから列に沿って進みます.」，（3）列の最後尾発見時：「列の最後尾を発見。止まれ。ターゲット（追従すべき人物）は1時の方向に1.5m.」，（4）列追従時：「ターゲットに向かって前方に1.4m進め.」，（5）列の先頭到着時：「列の先頭に到着.」

提案システムは 2 種類の振動パターンを用いてユーザに進むべきか止まるべきかを伝える。まず、弱く素早い振動をユーザが正しい方向を向いており進むべき時を知らせる振動として用いた。ユーザはこの振動を受け取る間は自分の向いている方向へ前進し、振動が止まった場合はその場で立ち止まって音声による指示に合わせて向きを調整する。また提案システムは、ユーザの 0.5 m 以内に人物に限らず壁など何らかの障害物が存在する場合、緊急停止用信号として強く長い振動を発する。

5 評価実験

5.1 実験方法

LineChaser の有用性を検証するために 12 名の視覚障害者（年齢：23–58（平均 43.8）歳、男性 4 名、女性 8 名）を対象に評価実験を行った。実験では直線もしくは蛇行した列の情報を記録した地図を用意し、そこに沿って 2–4 名が並ぶ列を用意した（図 4）。本実験では感染予防の観点から、互いにソーシャルディスタンス（1.5m）を確保するように各人

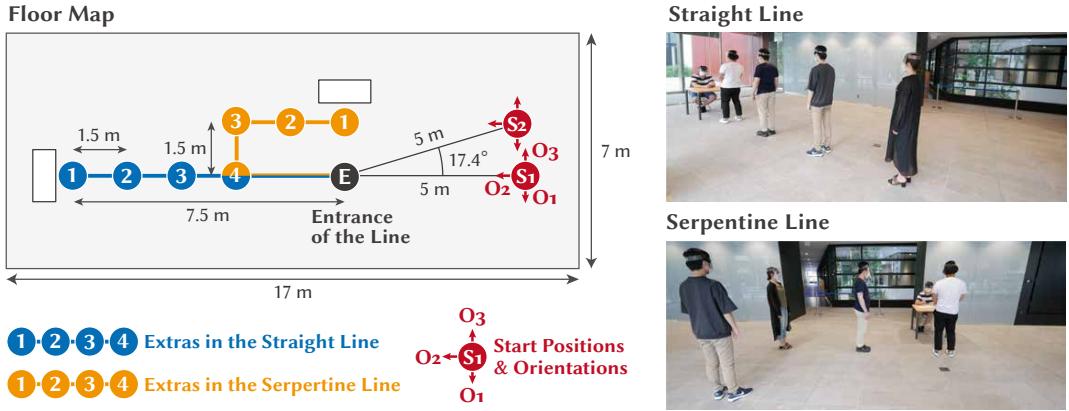


図 4. 評価実験の実験セットアップ概要

物を配置した。参加者はランダムに設定された開始位置（2種類の開始位置 S₁, S₂ および 3種類の開始方向 O₁–O₃）から、列の最後尾の発見および列の追従を行い、列の先頭にあるレジに見立てた机まで提案システムを用いて列に並びながら移動する。参加者が列を発見した後、列はランダムに 20, 40, 60 秒おきに 1人ずつ進行させた。列の最後尾の位置が変わりうるという性質を実験の列でも反映させるために各試行において列に並ぶ人数を 2–4 名の 3種類に設定し、各参加者は合計 6 回実験（直線 3回、蛇行 3回）を行った。参加者は右手に白杖、左手に提案システムを（ただし盲導犬ユーザの P11 は左手に盲導犬のハンドル、右手に提案システムを）持つて移動した。また、人混みの環境を再現するために実験中は 60dB でスピーカーからショッピングモールの環境音を流し続けた。

5.2 実験手順と評価尺度

まず参加者に対して、普段単独で列に並ぶ際の自信度に関するアンケート（図 6, Q1–Q7）を 7 段階の評価軸（1: 全く同意しない, 7: 強く同意する）で回答する形で行った。その後、参加者に LineChaser の使い方の説明および練習を 30 分行った。

実験本番中は、追従すべき人物の周辺の領域を 0.5m 四方で区切り、参加者が列を発見した時および列が進行するたびに参加者がどの領域に立ち止まつたかを記録した（図 5）。特に列の追従すべき人物の 1.5m 後方を中心とした 0.5m 四方の領域を Ideal Position, Ideal Position の周辺 1.5m 四方の領域を Acceptable Positions とした。

本番終了後、本番前と同様の質問事項を参加者に尋ね、提案システムを使うことで列に並ぶ際の自信度が変化したかを調査した。また参加者は、音声および振動の指示に関する主観評価アンケート項目（図 6, Q8, Q9）および system usability scale (SUS) [1] の質問項目に回答した。最後に参加者に対してインタビューを行い、システムの利点欠点を調査した。

6 結果

6.1 停止位置の分布

図 5 (a) に列発見時の停止位置の分布を示した。全ての参加者が Acceptable Positions の領域内で列を発見することに成功した。特に Ideal Position で列を発見した割合は 40.2% (72 回中 29 回) であった。

図 5 (b) に列追従時の停止位置の分布を示した。全ての参加者は全試行において列の先頭にあるレジまでたどり着いた。参加者は全試行の 90.9% (144 回中 131 回) の割合で Acceptable Positions 内で停止し、34.7% (144 回中 50 回) の割合で Ideal Position 内で停止した。しかしながら参加者が Acceptable Positions の外に立ち止まる機会が 13 回観測された。

Acceptable Postions の中に留まる事に失敗した 13 回は次の 4 つの理由に起因する：(1) P01, P08 と P09 は列が進むまでに身体の向きを修正できず、進むことができなかった、(2) P05 はシステムの使い方を理解できておらず、システムが進む指示を出しているのに進まなかった、(3) P12 はシステムの指示を聞かずに前進した、(4) システムの自己位置推定の誤差が蓄積した。(1) と (2) は Acceptable Position の後方で参加者が停止した 10 回の原因、(3) は追従すべき人物と 0.5 m 以下の距離しか取らず直後ろについた原因である。追従すべき人物との距離が 1.7 m 以下となり、提案システムは振動を停止していたが、P12 はそれに気づかず前進し続け、システムが発した緊急停止信号を受けて停止した。(4) は列の右側に参加者がずれた原因である。

6.2 主観評価結果

図 6 にアンケート結果を示した。列に並ぶ際の自信度に関して実験前（システムの支援なし）と実験後（支援あり）の結果についてウィルコクソンの符号順位検定（有意水準：1%）を用いて比較したところ、Q6 以外の全ての質問項目に対して実験後に結果が有意に改善された。音声と振動を用いた指示も

LineChaser: 視覚障害者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム

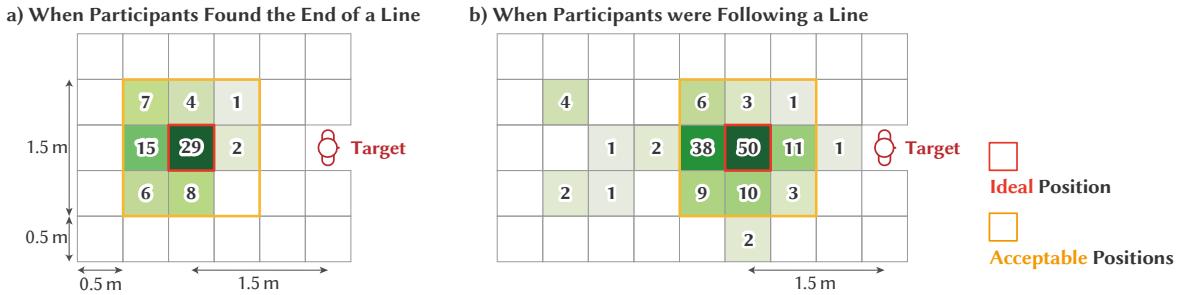


図 5. 列発見時及び追従時の停止位置の分布

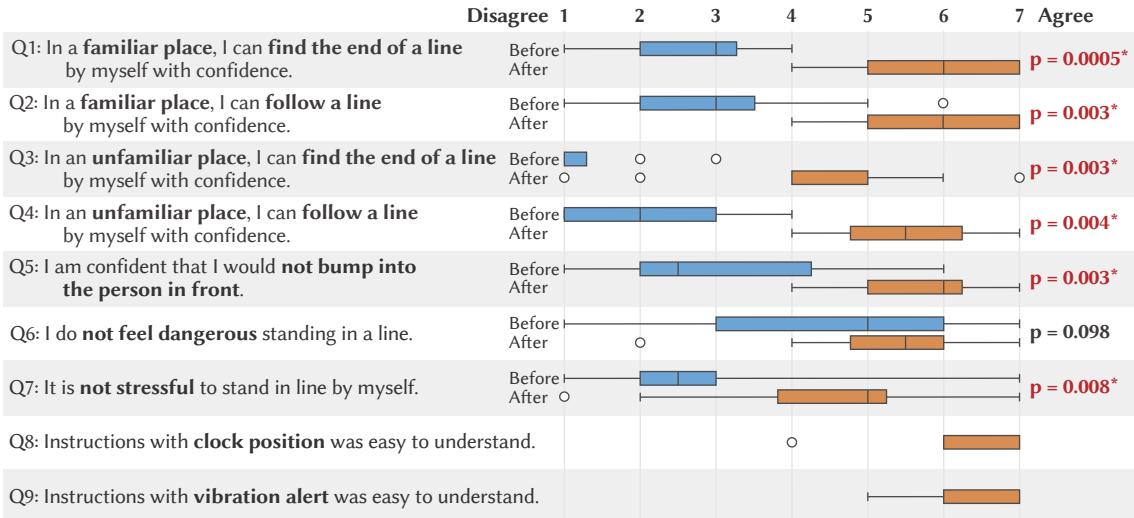


図 6. 実験前（システムの支援なし）と実験後（システムの支援あり）での列に並ぶことの自信についての質問事項の比較

参加者から高く評価され (Q8, Q9), SUS のスコアの平均と標準偏差は 82.9 ± 10.6 となった。

6.3 ユーザフィードバック

全ての参加者から、提案システムを使えば1人で列に並べるというコメントが得られた：A1 :「このシステムを使うと前の人と一定の距離を保つことができるため、使っているうちに白杖は必要無くなるのではないかと思った。普段列を見つける際には他人に尋ねていたが、このシステムは誰にも頼ることなく列に並ぶことができるため、このシステムは革新的だ。」(P06), A2 :「周囲の人に触れることなく、列を発見できることは素晴らしいかった。また、前方にいる人に衝突する心配もなかった。」(P03)

また、盲導犬とシステムを併用した参加者は以下の様にコメントした：A3 :「システムを使うことで列の発見と追従を両方できた。どちらも盲導犬ではできないことである。しかし、左にスライドさせる指示は、盲導犬はそのような動きはしないため盲導犬が非常に困惑していた。盲導犬を使っている以上

は前の人と衝突することはないと思うため、「進め/止まれ」の指示は不要で、周囲の人物の方向と距離を教えてくれるだけで十分だと思う。」(P11)

12名中 9名の参加者は音声と振動を組み合わせたインターフェースは使いやすかったとコメントした：A4 :「音声で大まかに自分の向くべき方向と進むべき距離が分かり、振動を頼りに自分の進むべき方向を正確に合わせられた。」(P10)

半分の参加者が、スマートフォン1台で列に並ぶ支援を実現したことを高く評価した：A5 :「たったスマートフォン1台で列にひとりで並ぶことができて嬉しかった。」(P09) 一方で、7名の参加者からはスマートフォンのカメラを用いることに関して否定的な意見が得られた：A6 :「スマートフォンのカメラを他の人に向け続けることは抵抗がある。」(P03)

7 議論

7.1 LineChaser の有用性

予備調査から視覚障害者が単独で列に並ぶことは困難であることが確認されたが、LineChaser を使用

することで全ての参加者が単独で列の最後尾を発見し、列の動きを追従することができた。またユーザの主観評価においても、LineChaser の SUS スコア [1] の平均は 82.9 となり、提案システムを使うことで列に並ぶ際の自信度が有意に向上した（図 6）。

7.2 案内方法と訓練方法の改善

提案システムの案内方法は高く評価された一方で、改善の余地が存在する。例えば盲導犬ユーザ (P11) から左右にスライドさせる指示は盲導犬が混乱するというコメント (A3) が得られたように、ユーザが使用する歩行支援ツールによって最適な案内方法は変わりうる。また、実環境で移動する際に視覚障害者が使用する O&M (Orientation and Mobility) スキルやエコロケーションスキルによっても最適な案内方法は変わりうる。今後は実環境で様々な条件の列（より長い列や複数本の並行した列など）を対象に実験を行うことで、ユーザの特性ごとに実環境での使用に最適な案内方法をデザインしていきたい。

また今回の実験では、30 分ほどの練習時間を確保したが、一部の参加者 (P01, P08, P09 と P12) はシステムに慣れていたため列に適切に追従できない場合があった。システムを普及させていく際はシステムの提案に加え、視覚障害者の歩行訓練 (O&M トレーニング) にどのように支援システムの訓練を組み込んでいくかも併せて検討する必要がある。

7.3 既存のナビゲーションシステムとの統合

本研究の最終的な目標は、LineChaser を既存のスマートフォンを用いた経路案内システム³[8] と統合し、実環境で列に並ぶタスクを支援することである。本研究では AR マーカを用いた自己位置推定技術を利用することで列に並ぶタスクをスマートフォン 1 台で支援できることを確認した。しかしながら、既存の経路案内システム [8] で用いられる自己位置推定技術は少なくとも 1.5m 以上の誤差が生じてしまい、列に並ぶタスクの支援に用いるための精度としては不十分である。今後は CV 技術も利用した列の最後尾検出や自己位置推定手法の精度向上などに取り組みつつ、既存の経路案内システムとの統合を目指していきたい。

7.4 システムの社会受容性

参加者から提案システムがスマートフォン 1 台で完結している点を高く評価された (A5) 反面、周囲にカメラを向ける動作は他人からの理解が得られない場合があるため抵抗があるというコメントも得られた (A6)。今後はスマートグラスなどのウェアラブルデバイスの使用を含め、社会受容性を損なわないシステムのデザインを検討していきたい。

³ <https://www.google.com/maps>

8 まとめ

本研究は視覚障害者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム、LineChaser を提案した。提案システムはユーザの自己位置推定、周囲の歩行者の位置検出、列に並んでいる人物かの判断を行うことで、列の最後尾および列の動きの検出を行う。提案システムは検出結果に基づいて音声で進むべき方向と距離を、振動で進むべきか止まるべきかを伝える。評価実験の結果、提案システムを使うことで全ての参加者が単独で列の最後尾の発見および列の追従が可能となり、普段の体験と比較して列に並ぶ際の自信度も有意に向上した。また、ユーザは音声と振動を組み合わせた案内方法を高く評価した。今後の展望は実環境での実験を通してインターフェースの改善と既存の案内システムとの統合を目指していきたい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP20J23018)，早稲田大学理工学術院総合研究所若手研究者支援事業 (アーリーバードプログラム)，JST 未来社会創造事業 (JPMJMI19B2) の助成を受けた。また研究をサポートしてくれた João Guerreiro, Asuka Hirata, Yoshiki Kubotani に感謝する。

参考文献

- [1] J. Brooke, et al. SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry '96*, 189(194):4–7.
- [2] H.-E. Chen, et al. BlindNavi: A navigation app for the visually impaired smartphone user. In *CHI'15*, pp. 19–24.
- [3] J. Guerreiro, et al. CaBot: Designing and Evaluating an Autonomous Navigation Robot for Blind People. In *ASSETS '19*, pp. 68–82.
- [4] S. Kayukawa, et al. BBeep: A sonic collision avoidance system for blind travellers and nearby pedestrians. In *CHI '19*, pp. 1–12.
- [5] S. Kayukawa, et al. Smartphone-Based Assistance for Blind People to Stand in Lines. In *CHI EA '20*, pp. 1–8.
- [6] Y. Nakauchi, et al. A social robot that stands in line. *Autonomous Robots '02*, 12(3):313–324.
- [7] J. Redmon, et al. Yolov3: An incremental improvement. *arXiv '18*.
- [8] D. Sato, et al. NavCog3 in the wild: Large-scale blind indoor navigation assistant with semantic features. *ACM Transactions on Accessible Computing '19*, 12(3):1–30.
- [9] C. Yoon, et al. Leveraging Augmented Reality to Create Apps for People with Visual Disabilities: A Case Study in Indoor Navigation. In *ASSETS'19*, pp. 210–221.

One-Shot Wayfinding System: 360度スマートフォンカメラと矢印分析を用いた視覚障害者のための公共施設における方向決定支援システム

中山 優太郎 * 粥川 青汰 † 高木 啓伸 ‡ 長岡 雄一 § 平塚 義宗 ¶ 栗原 聰 *

概要. 本研究は駅や空港等の公共施設内において視覚障害者による目的地への方向決定を支援するスマートフォン型システムを提案する。公共施設内に設置される誘導サインは、矢印と目的地の情報を掲示することで目的地への方向を晴眼者に示すが、視覚障害者はその情報を利用できない。提案手法はスマートフォンに接続した360度カメラにより撮影された1枚の全周囲画像からユーザ周辺の誘導サイン上の文字と矢印の検出および文字と矢印の関係性の分析を行うことで目的地への方向を推定する。したがって提案手法は、施設へのセンサの設置や地図等の事前準備を必要とせずに視覚障害者の方向決定支援を実現する。本研究では通常のスマートフォンカメラを用いて誘導サインを読み上げる比較手法を実装し、8名の視覚障害者を対象に提案手法との比較実験を行った。実験の結果、提案手法は比較手法よりも少ない回転量で素早く目的地への方向決定が可能であることを確認した。

1 はじめに

駅や空港といった公共施設内には目的地への方向を示す誘導サインが設置されているが、視覚障害者はサインが示す情報を認識できず、経路の分岐点における目的地への方向決定(Wayfinding)に役立てることができない。光学的文字符号認識(OCR)を用いてサイン上の文字も認識可能な支援システム[9]が提案されているが、視覚障害者が対象のサイン全体を撮影するのは難しい[4]。そのため、システムから必要な情報が得られなかった際に、ユーザは周りに目的地に関するサインがないか、あるいはカメラを適切な方向に向けられていないかの区別が難しい。

そこで本研究は、ユーザが360度スマートフォンカメラを用いてカメラ姿勢を気にせず1回撮影するだけで、周囲の全ての誘導サインを認識可能な方向決定支援システムを提案する(図1)。誘導サインを方向決定に利用するためには文字に加え矢印も分析する必要がある。例えば図1-①に示したように、右矢印つきのサインはサインに対して右方向に目的地があることを示している。そこで提案手法は撮影された全周囲画像(Equirectangular画像)からOCRを用いた文字検出に加え、物体検出手法[8]を用いた矢印検出を行い、検出された文字と矢印を最小全域木を用いて対応付ける。最小全域木を構築する際、ある矢印の上にある文字は矢印の下にある文字よりも矢印との関連性が低い、などの傾向に

基づき、辺の重みを設計した。この結果、図1-2の“Departures”は左矢印に、“Arrivals”は右矢印にそれぞれ対応付けられる。対応付けの結果をもとにユーザの向きに対する目的地の方向を推定し、「3時方向Arrivals」のように音声で指示を与える。また、ユーザが指示された方向を向いた時にスマートフォンを振動させることで正確な方向決定を支援する。

本研究では、通常のスマートフォンカメラを用いてサインの文字と矢印を読み上げるシステムを比較手法として実装し、8名の視覚障害者による提案手法との比較実験を行った。COVID-19対策として本研究では、事前に空港と駅で撮影した全周囲画像を使用して、施設内での方向決定のタスクを再現した。実験から、(1) 提案手法は比較手法よりも余分に回転することなく素早く方向を決定できること、(2) 参加者は提案手法が方向決定においても有用である感じた、という結果が得られた。

2 関連研究

ユーザがスマートフォンを用いて撮影した画像から周囲の環境を認識するシステム¹が提案されている。カメラを用いるシステムはマーカやセンサなどを空間に設置する必要が無い利点がある。しかしながら視覚障害者にとって、撮影対象の物体全体をカメラで捉えることは難しく[4]、撮影時に身体の向きを頻繁に変えると方向感覚を失う可能性がある[5]。そこで提案手法は、ユーザが360度カメラで1回撮影した画像を使用し、カメラをサインに向けずに方向決定ができるよう支援する。

また、サインの文字を検出し、方向決定に利用するシステムが提案されている[9]。しかしながら、左

Copyright is held by the author(s).

* 慶應義塾大学

† 早稲田大学

‡ IBM Research

§ 東京視覚障害者生活支援センター

¶ 順天堂大学

¹ <https://www.microsoft.com/en-us/seeing-ai>

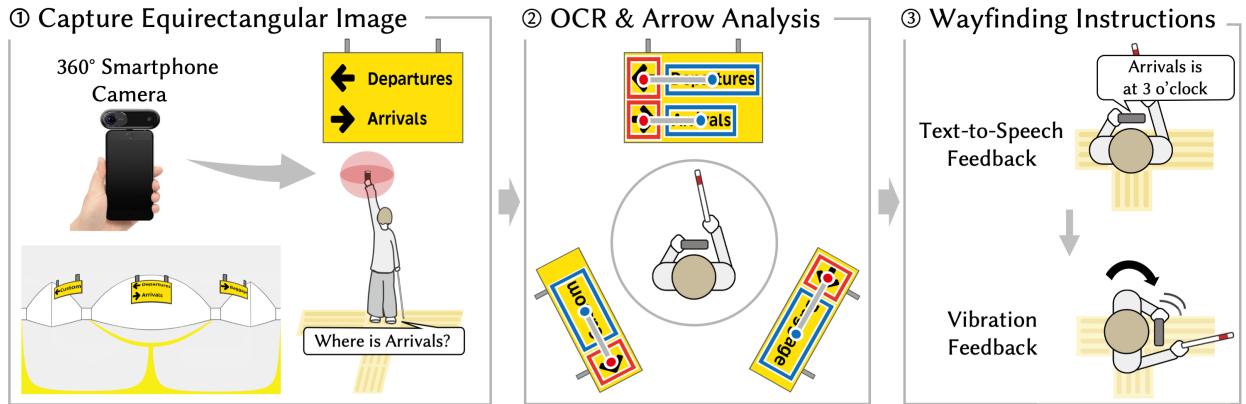


図 1. 提案手法の概要図。

右の矢印も掲示された誘導サインはサインの設置方向と目的地への経路が一致しないため、サインの文字情報を伝えるだけでは方向決定ができない。そこで提案手法はサインの矢印も検出し、文字情報を矢印に対応付けることで、目的地への方向を推定する。

視覚障害者向け案内手法では音声や触覚による指示が多く採用されている。Loomis ら [7] は、時計方向による指示で視覚障害者を目的地まで誘導できることを示した。一方で、視覚障害者が自力で方向を細かく調整することは難しく [10]、頻繁な音声フィードバックは環境音を阻害し、視覚障害者の認知負荷を増加させる可能性が指摘されている [2]。そこで提案手法は時計方向による音声の指示と振動フィードバックを組み合わせた指示方法をデザインした。

3 提案手法

本研究は公共施設の点字ブロック上を歩く視覚障害者が分岐に差し掛かった際に、目的地がどちらの方向にあるかを指示する方向決定支援システムを提案する。ユーザはまず音声入力を用いて目的地をシステムに登録する。次にユーザの後方も写るように頭上にスマートフォンを掲げて全周囲画像を 1 枚撮影する。システムは画像から文字と矢印を認識し、文字と矢印の関係性を分析（矢印分析）することで、ユーザの向きに対する目的地への方向を推定する。システムは推定した方向を音声と振動による指示を用いてユーザに伝え、ユーザはシステムからの指示および点字ブロックや壁といった周囲のランドマークを考慮して最終的に進む方向を決定する（図 1-3）。

提案システムは、Web API（全周囲画像の前処理、矢印検出、OCR、矢印分析）とスマートフォンインターフェース（目的地の方向推定およびユーザへの指示）から構成される。本研究は 360 度カメラとして Insta360 ONE²を使用し、iPhone6³に取り付

² <https://www.insta360.com/product/insta360-one>

³ <https://support.apple.com/kb/sp705>

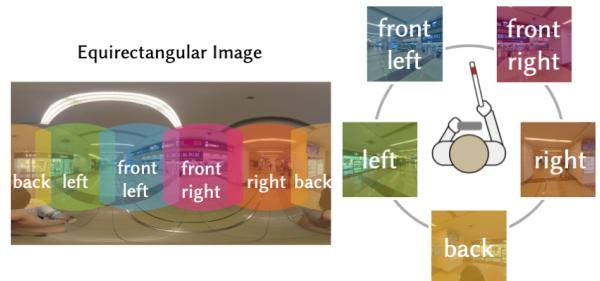


図 2. 全周囲画像からキューブマップ画像への切り出し。

けた。撮影された全周囲画像は、カメラに内蔵されるジャイロセンサにより水平方向に補正されるため、ユーザはスマートフォンの傾きに注意を払うことなく撮影が可能になる。撮影された画像はサーバ上の Web API に送信される。

3.1 全周囲画像の前処理

全周囲画像は歪みがあるため、正確に矢印検出を行うためにキューブマップ画像を作成する。キューブマップの境界で矢印が見切れてしまうことを防ぐために、提案手法は全周囲画像を水平方向に重複する領域を持つ 5 個のキューブマップ画像（front left, front right, left, right, back）に分割する（図 2）。提案手法はキューブマップ画像全てを用いて矢印検出を、全周囲画像と back のキューブマップ画像を用いて OCR を行う。

3.2 矢印検出と OCR

矢印検出は物体検出手法（Yolov3 [8]）を用いて行う。Open Images Dataset[6] と Flickr API（Creative Commons の画像のみ）から矢印が写る画像を集め、4 つのラベル（前、下、右、左）でアノテーションを行い、モデルを学習させた。提案手法は 5 つのキューブマップ画像から矢印を検出し、各矢印の全周囲画像における位置を取得する。キューブマップ

360 度スマートフォンカメラと矢印分析を用いた視覚障害者のための公共施設における方向決定支援システム

a) Definition of Edge Weights

Edge Type	$\{ A_x \leq B_x \}$ $A_y \leq B_y$	$\{ A_x \leq B_x \}$ $A_y > B_y$	$\{ A_x > B_x \}$ $A_y \leq B_y$	$\{ A_x > B_x \}$ $A_y > B_y$	
Example					
(λ_1, λ_2)	(1, 1)	(1, 50)	(4, 1)	(4, 50)	

b) Edge Design



c) Arrow Analysis Result

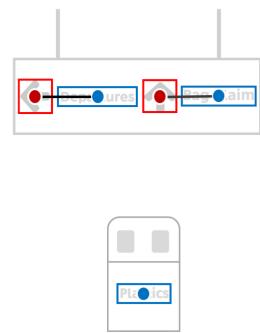


図 3. 矢印分析の概要： a) 辺の重みの定義, b) ノードの位置関係による重みの再計算, c) 矢印分析の結果.

画像で重複した領域で同じ矢印が検出された場合は、予測時の確信度が高いものを採用する。

提案手法は文字検出を行うために Google Cloud Vision API⁴で提供される OCR パッケージを利用する。全周囲画像に加えて、back のキューブマップ画像も OCR の入力にすることで全周囲画像の両端で分割された文字も検出する。矢印検出と同様に、検出された文字の全周囲画像における位置を取得する。

3.3 矢印分析

検出した矢印と文字を紐づけるために、提案手法は最小全域木を構築する。具体的にはまず、検出された矢印と文字の矩形領域の中心座標をノードとした有向グラフを構築する。この際に文字ノードと矢印ノード、文字ノード同士には辺を張るが、矢印ノード同士には辺を張らない。次に 2 つのノードの位置関係と辺の長さに基づいて、辺の重みを定義する（図 3-a）。左から右方向に書かれる言語では、誘導サインにおいて矢印の右側に文字が掲示されることが多いため [1]、あるノードから左や上のノードに繋がる辺にはより大きい重みを与えた。また全周囲画像においてノード同士の水平距離が全周囲画像の横幅の半分よりも大きい場合は、画像を 180 度分だけシフトさせ、辺の重みを計算し直す（図 3-b）。提案手法は各矢印ノードに重み 0 の辺で繋がるノードを追加し、このノードから最小全域木を構築する。構築した全域木から重みが 0 または 5000 以上の辺を削除することで、矢印ノードを根、文字ノードを子とした木が矢印ノードの個数分だけ得られる（図 3-c）。提案手法では根の矢印ノードのラベル（前、下、左、右）が子の文字ノードの方向を示すとする。

3.4 矢印検出と矢印分析の評価

矢印検出と矢印分析の評価およびユーザ実験での使用を目的として、本研究では空港と駅の点字ブロックの分岐地点で撮影した全周囲画像 104 枚（空

港：43 枚、駅：61 枚）からなるデータセットを構築した。各画像に対して分岐地点での方向決定に関する誘導サインの矢印の領域とその方向を示すラベル、そして矢印がカバーするサイン上の領域をアノテーションした。

矢印検出に関して mAP (Mean Average Precision) を測定したところ、空港は 71.0%、駅は 72.8%，全体では 71.9% であった。

矢印分析の評価のために、OCR で検出された文字に関して以下の分類をおこなった：

- TP: サイン上の文字が正しい矢印に紐づいた。
- FP₁: サイン上の文字が誤った矢印に紐づいた。
- FP₂: サイン上にない文字が矢印に紐づいた。
- FN: サイン上の文字がどの矢印にも紐づかなかった。
- TN: サイン上にない文字がどの矢印にも紐づかなかった。

以上の分類を元に、矢印分析全体の精度として $Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP_1+FP_2+FN+TN}$ を、サイン上の文字が正しい矢印に紐づいたかに注目した精度として $Precision_1 = \frac{TP}{TP+FP_1}$ を計算した。 $Precision_1$ の値が低い場合、つまりサイン上の文字の多くが誤った矢印に紐づいた場合、方向決定支援において重大なミスとなる。評価の結果、空港と駅における矢印分析の $Accuracy$ はそれぞれ 82.0% と 73.4%， $Precision_1$ は 91.4% と 80.0% であった。

3.5 誘導サイン上の文字の方向推定

矢印分析完了後、Web API は矢印の位置と向きのラベル、そして矢印に紐づいた文字情報をシステムに返す。結果を元に提案手法は目的地への方向推定をおこなう。提案手法では図 4 に示したように以下の二つの角度を定義する：**Angle to Arrow**：全周囲画像の中心に対する矢印の中心への角度、**Arrow Context Angle**：矢印の予測ラベルに基づく角度（前/下: 0 度、左: -90 度、右: 90 度）。システムは

⁴ <https://cloud.google.com/vision/docs/ocr>

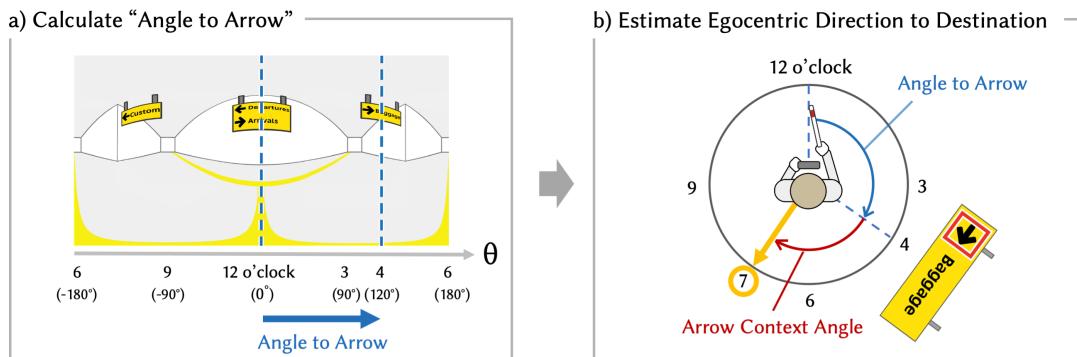


図 4. 誘導サイン上の文字の方向推定。

Angle to Arrow に Arrow Context Angle を足すことで、ユーザの向きに対する目的地への方向を推定する（図 4-b）。

3.6 ユーザインターフェース

提案手法は時計方向による音声の指示と振動フィードバックを組み合わせることで推定された目的地への方向をユーザに伝える。例えばユーザが“Arrivals”とシステムに登録し、推定された方向がユーザの向きに対して 120 度右であった場合、システムは“4 時方向 Arrivals”と読み上げる。ユーザが向きを変更する間、システムはスマートフォンのジャイロセンサを用いてユーザの向きをリアルタイムに取得する。ユーザが指示された方向に向いた際には、システムはスマートフォンを振動させることでユーザに対して正しい方向を向いていることを通知する。

システム操作用のインターフェースとして、スマートフォンの画面に以下の 3 つのボタンを配置した：

Record：画面上部に配置されたボタン。音声入力を用いて目的地を登録する。

Capture：画面左下に配置されたボタン。全周囲画像を撮影する。

All：画面右下に配置されたボタン。矢印に紐づいた全ての文字を読み上げる。

ユーザは Record ボタンで目的地を登録し、分岐に差し掛かるたびに Capture ボタンを押して周囲の画像を撮影し、方向決定を行う。登録した目的地に関する音声フィードバックが無い場合、ユーザは All ボタンを押して周囲の看板の文字情報を認識し、他に方向決定に有用なキーワードがないかを確認する。

4 ユーザ実験

8 名の視覚障害者（男性 5 名、女性 3 名、平均年齢 46.4、全盲 3 名、Legally Blind 5 名）を対象にユーザ実験⁵を行い、提案手法の有用性を検証した。本実験ではスマートフォンに内蔵のカメラを使用し

て誘導サインをリアルタイムで読み上げるシステム（比較手法）を実装し、提案手法との比較を行った。

4.1 実験手順

本研究では COVID-19 対策として、事前に駅および空港で撮影した全周囲画像のデータセット（節 3.4）を使用し、実験室内で方向決定の場面を再現した。実験では使用する画像ごとに撮影地点と同じ配置の点字ブロックの分岐を研究室の床に敷き、目的地へ向かう点字ブロックを選択するタスクを参加者に与えた。データセットの中から、1) 建物（空港または駅）、2) 参照する誘導サインがある方向（参加者のタスク開始時の向きに対して前後左右のいずれか）、3) 点字ブロックの分岐数（3 または 4）の 3 つの条件が同じ 8 対の画像を選択し、8 枚の画像からなるサブセット A、B を用意した。参加者をグループ X、Y に分け、グループ X はサブセット A を提案手法、サブセット B を比較手法を用いてタスクに取り組み、グループ Y は X とは逆の手法を使用した。

参加者は点字ブロックの分岐の上に立ち、タスクごとに実験者から目的地の情報を伝えられる（例：「Arrivals の方向にある点字ブロックを選んでください」）。参加者は事前に目的地が登録されたそれぞれのシステムを用いて目的地へ伸びる点字ブロックを決定し、実験者に口頭で伝える。

4.2 提案手法と比較手法

提案手法は参加者が Capture ボタンを押した際に、iOS の API を用いて設置した点字ブロックに対するカメラの姿勢を取得する。取得したカメラの姿勢の分だけ事前に撮影した全周囲画像を θ 方向にずらすことで、施設内の点字ブロックの分岐地点で参加者が撮影した全周囲画像を研究室内で再現する。この画像を入力として目的地への方向を推定し、ユーザに伝達する。

比較手法は参加者が使用する間のカメラの姿勢を iOS の API を用いてリアルタイムに取得し、全周囲画像上で画角（水平方向：100 度、垂直方向：80 度）に入る目的地と全ての矢印のラベルを読み上げ

⁵ 慶應義塾大学 生命倫理委員会承認済み（番号 2020-69）

る。複数の矢印が画角に入る際は、左上から右下の順番で読み上げる。本実験では事前に各画像について OCR と矢印検出を行うことで、システムが目的地と矢印をリアルタイムに読み上げるように実装した。

4.3 評価指標

実験では各システムに対し、8回のタスクで正解の点字ブロックを選んだ回数の割合をタスク正解率として計算した。また各タスクの開始から点字ブロックの選択までに経過した時間をタスク完了時間として測定した。提案手法は Web API に画像を送信して OCR および矢印検出を含む処理を行なうが、比較手法は事前に OCR および矢印検出を行っているため処理時間がほとんどない。そこで本実験では、提案手法の処理時間（API の処理時間と API との通信時間）を除いたタスク完了時間も測定した。また実験中はスマートフォンのジャイロセンサを用いてユーザが正解の点字ブロックを選ぶときの参加者の回転量を測定し、理想の回転量（ユーザの実験開始時の向きから正解の点字ブロックまでの角度）との差分の絶対値をタスクの回転効率として計測した。この値が小さいほどユーザは余分な回転を行うことなく方向を決定できることを表し、またユーザが回転によって方向感覚を失うリスクも低減する[5]。主観評価指標として、全てのタスクが完了後に System Usability Scale (SUS) [3] のアンケート調査および各手法の利点欠点に関するインタビューを行った。

5 結果

5.1 タスク正解率、完了時間、および回転効率

提案手法のタスク正解率 (93.8%) は比較手法 (75%) よりも高かったが、Wilcoxon の符号順位検定 (有意水準 5%) を用いて比較したところ、本実験では有意差は認められなかった ($p = 0.057$)。

図 5 に各手法と誘導サインの位置ごと、およびそれらをまとめたタスク完了時間の平均と 95% 信頼区間を示した。Wilcoxon の符号順位検定 (有意水準 5%) を行ったところ、提案手法のタスク完了時間 (処理時間を除く) は比較手法よりも短くなった ($p < 0.0001$)。またサインの位置が参加者の後方にある場合は、処理時間を含んだタスク完了時間においても提案手法は比較手法よりも有意にタスク完了時間が短くなかった ($p = 0.004$)。提案手法に関する処理時間の平均と標準偏差の値は、通信時間が 1.01 ± 0.62 秒、Web API での処理時間が 6.91 ± 0.78 秒、全処理時間が 7.92 ± 0.88 秒であった。

提案手法におけるタスクの回転効率の平均と標準偏差は 66.6 ± 94.3 度、95% 信頼区間は $40.1\text{--}93.1$ 度となった。また比較手法は回転効率の平均および標準偏差が 110.1 ± 98.3 度、95% 信頼区間は $81.6\text{--}138.7$ 度であった。Mann-Whitney の U 検定を用

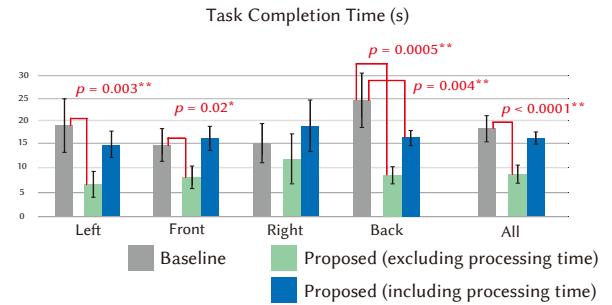


図 5. タスク完了時間。

いて比較したところ、提案手法は比較手法よりも余分な回転量を伴うことなく点字ブロックを選択可能であることが明らかになった ($p = 0.00095$)。

5.2 主観評価

それぞれのシステムの SUS スコアの平均と標準偏差は提案手法が 78.4 ± 13.1 、比較手法が 63.4 ± 25.3 であった。また 8 名中 6 名 (P2, P3, P5-P8) において、SUS スコアは提案手法の方が高くなかった。

6 名の参加者 (P3-P8) が、誘導サインの内容を読み上げるシステムは方向決定に役立つと述べた：A1:「公共空間での単独歩行に自信がないため、サインの内容を読み上げて目的地への方向を教えてくれるシステムを使いたい。」(P3)。6 名の参加者 (P2, P3, P5-P8) は、提案手法がサインの方向に体を向けずに方向を決定できる点を高く評価した：A2:「2 番目のシステム（比較手法）はその場で回転するために自分の中で方向がわからなくなると感じたが、1 番目のシステム（提案手法）は様々な方向に体を向ける必要がないのが良い。」(P5)。一方で P4 は、ユーザ自身が周囲のサインにカメラを向ける比較手法を好んだ：A3:「1 番目のシステム（比較手法）は自分の向いている方向にあるサインの内容を読み上げるので、自分の動きと一致して自然な使い方ができる。」(P4)。

6 名の参加者 (P2, P3, P5-P8) は提案手法の指示方法を高く評価した：A4:「2 番目のシステム（提案手法）は直感的に指示された方向を理解することができたが、1 番目のシステム（比較手法）はサインの方向に向いた後に目的地の方向を考える必要があるので時間がかかった。」(P2)。一方で P1 は、比較手法が右/左といった単純な方向の指示で案内する点を評価した：A5:「時計の位置での指示は自分にとっては理解しにくい。2 番目のシステム（比較手法）の方向指示の方が直感的に理解することができた。」(P1)。

半分の参加者 (P2, P4-P6) が 360 度カメラの重量に関して否定的な評価をした。また、P3 から A6:「実環境でシステムを使わないと本当にどちらが良いのか比較できない」というコメントを得た。

6 議論

6.1 提案システムの有効性

ユーザ実験の結果より、提案手法は比較手法に比べてユーザが余分な回転をせずに方向を決定できることが明らかになった。参加者からも提案手法が身体の向きを変える必要が無く、方向を見失うリスクを抑えられる点を評価された（A2）。

また、比較手法はユーザが読まれた矢印に応じて自分で正しい方向を決定する必要があったのに対し、提案手法は目的地の方向を推定してユーザに提示した（A4）。この違いおよび先述した余分な回転が必要でない点が、提案手法の方がタスク完了時間が短くなった結果につながったと考えられる。

6.2 より高精度な目的地の方向推定

提案手法では矢印分析を行う際に、誘導サインはユーザに正対していると仮定し、右または左の矢印はそれぞれ誘導サインからみて右または左 90 度の方向にある目的地を示すと考え（Arrow Context Angle），目的地への方向を推定した。提案した推定方法を用いた場合、多くの参加者は正しい方向の点字ブロックを選ぶことができたが（93.8% のタスク正解率），推定された方向が点字ブロックの分岐のちょうど間の方向となった際に参加者は間違った点字ブロックを選ぶ場合があった。方向推定の精度を向上させる改善案としては、撮影した周囲画像から点字ブロックや通路の壁など方向決定に役立つ物体を検出することや、深度センサを用いて誘導サインの角度を測定することなどが考えられる。

6.3 実環境での実験

また P3 が述べたように（A6），本研究で実験を行った研究室の環境と公共施設の実環境では多くの差がある。例えばエコロケーションや環境音、空気の流れや通行人の気配など視覚障害者が移動する際に活用する感覚、照明条件の違いや通行人によるサインの遮蔽が引き起こす認識精度の低下は研究室内で再現することができない。今後は実際の公共施設内で実際にユーザに移動してもらいながらシステムの評価実験を行うことで、実環境により適したインターフェースやアルゴリズムの実装を検討していく。具体的には、提案手法の処理時間の削減、社会受容性が高くかつユーザの負担を減らすシステムのデザイン（360 度カメラの装着方法など）、ユーザの O&M（Orientation and Mobility）スキルに合わせた指示方法のデザインなどが挙げられる。

7 まとめ

本研究は 360 度スマートフォンカメラを用いて視覚障害者の周囲にある誘導サインを認識する方向決定支援システムを提案した。提案手法は撮影した全

周囲画像からサインの上の文字と矢印の検出およびそれらの関係性の分析を行い、サインに書かれた目的地への方向を推定する。提案手法は時計方向を用いた音声の指示とユーザがその方向を向いた際に振動するフィードバックを組み合わせることで目的地への方向をユーザに伝える。通常のスマートフォンカメラを用いた比較手法との比較実験の結果、提案手法は比較手法よりも余分な回転をせずにすばやく目的地への方向を決定できることを確認した。今後は実環境での実験を通して、実環境での使用により適した案内方法や方向推定のアルゴリズムを検討していきたい。

謝辞

本研究は AMED 研究費 20dk0310108「ロービジョンケアの連携と最適化推進に関する研究」、JSPS 科研費（JP20J23018），早稲田大学理工学術院総合研究所若手研究者支援事業（アーリーバードプログラム）の助成を受けた。また日本空港ビルディング株式会社、東日本旅客鉄道株式会社から協力を得た。

参考文献

- [1] Wayfinding Guidelines International Health Facility Guidelines.
- [2] S. Azenkot, et al. Smartphone Haptic Feedback for Nonvisual Wayfinding. In *ASSETS '11*, p. 281–282.
- [3] J. Brooke. SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry '96*, p. 189.
- [4] C. Jayant, et al. Supporting Blind Photography. In *ASSETS '11*, p. 203–210.
- [5] S. Kayukawa, et al. Guiding Blind Pedestrians in Public Spaces by Understanding Walking Behavior of Nearby Pedestrians. *The Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 4(3).
- [6] A. Kuznetsova, et al. The Open Images Dataset V4: Unified image classification, object detection, and visual relationship detection at scale. *International Journal of Computer Vision* '20.
- [7] J. M. Loomis, et al. Spatial updating of locations specified by 3-D sound and spatial language. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* '02, p. 28:2:335.
- [8] J. Redmon, et al. Yolov3: An incremental improvement. 2018.
- [9] M. Saha, et al. Closing the Gap: Designing for the Last-Few-Meters Wayfinding Problem for People with Visual Impairments. In *ASSETS '19*, p. 222–235.
- [10] D. Sato, et al. NavCog3: An Evaluation of a Smartphone-Based Blind Indoor Navigation Assistant with Semantic Features in a Large-Scale Environment. In *ASSETS '17*, p. 270–279.

ストレッチセンサを用いた常時膝角度推定によるサポート型怪我防止システム

桐野江高太 * 大西鮎美 * 寺田 努 * 塚本昌彦 *

概要. ランニングによる怪我で最も多い故障部位は膝であり、疲労の影響により着地時の膝の角度が変化することで着地時の衝撃加速度が増加して怪我につながる。このような怪我を防ぐため、本研究ではランニング時の膝の角度をリアルタイムで取得し、疲労によるランニングフォームの変化を認識し、ユーザに警告するシステムを提案する。提案デバイスでは、伸縮性があり体の動きを阻害しないストレッチセンサをスポーツ用膝サポートに取り付け、ランニング時の膝の屈曲状態を計測する。野外での走行実験の結果、着地時の衝撃吸収の指標となるダブルニーアクションの動きをセンサ値から確認できた。また、機械学習アルゴリズムを用いた膝角度推定精度の評価実験では、相関係数 0.98 以上、MAE は 1.6° から 4.2° となり高い精度で膝角度を推定できることが分かった。今後は、着脱を考慮した推定精度評価を行う。

1 はじめに

ランニングは日常的に行える運動として世代を問わず人気があり、国内のランナーの人口は現在 950 万人を超えており、ランニングが原因で怪我をする人は多い。ランニングにおいて最も損傷が多い部位は膝であり、損傷全体の 42.1% であるという調査結果がある [2]。

膝の痛みは、ランニングにおける着地時の衝撃の吸収が上手くできないときに骨や筋肉などの他の部位に余計な負荷がかかり起こる。マラソンではランナーは坂道や砂利道のような様々な環境下を時には長時間走ることになる。その際、環境に適したフォームで走ることができない場合や、長時間走り続けたことによる疲労の蓄積でランニングフォームが乱れてくると着地時の衝撃吸収が不十分になり怪我に繋がる。Mizrahi らの調査では、長時間のランニングによる疲労の影響で着地時の膝の角度の変化や着地時の衝撃加速度は約 50% 増加する [3]。また、体の上下動が大きいランニングフォームで走ると着地時に膝が過度に沈み込み、前腿の筋肉に負担がかかって膝の故障を招きやすい [4]。

衝撃吸収の適切さの指標には、一般に着地時の関節の角度が適切かどうかや [3][4]、ダブルニーアクションという動きが行われているか [5] が用いられている。ダブルニーアクションとは、図 1 のようにランニングにおいて足が地面に接地し、地面を蹴り上げ、再び足が接地するという周期運動の 1 周期の間に膝が 2 回屈曲する動作である。この動きが不十分になると着地時の衝撃吸収が上手くできず、怪我に繋がる可能性がある [5]。

従来のランニング分析やトレーニング指導では医療機関等で専門のトレーナーが見ている状況でトレッ

ドミル上を走行し、映像から関節角度やダブルニーアクションの有無を分析する方法がとられてきた。怪我を防ぐためには、走行環境に適したランニングフォームで走る必要があるが、これらの従来手法では実環境の計測は想定されていないため、ランナーが実際に野外環境を走行するときに適切なフォームであるかを確認できない。したがって、市民ランナーが自身のランニングフォームを常時計測し、それをチェックし修正する目的で使用するには向きであり、そのような用途では野外でもランニングフォームを常時計測ができるシステムが求められる。

そこで著者らは、小型で常時計測に適したウェアラブルセンサを用いて膝の屈曲状態を常時計測するアプローチを考えた。近年、伸縮性、柔軟性に優れたセンサが開発されつつあり、これらは衣服や人体などの曲面が多い場所にも設置可能であるため、複雑な人体の動きの計測に適している。このような伸縮性、柔軟性のあるセンサを用いて、様々な野外環境下において膝の屈曲状態を常時計測できるデバイスを作製し、長時間のランニングによる膝の動きの変化を装着者にフィードバックするアプリケーションがあれば、装着者は痛みを抱える前にランニングを中断できる。また、走行中に膝に加わる衝撃を減らす走り方が身につき、専門のトレーナーの下でなくとも怪我なく安全にランニングを楽しむことができる。

そこで本研究では、ランニング時の膝の屈曲状態を取得するため、多くのランナーが装着し、装着に違和感のないスポーツ用の膝サポートに着目し、伸縮性があるストレッチセンサを備えたサポート型デバイスを提案、実装した。提案デバイスではランナーが実際に走ると想定される野外環境下でのランニングにおける膝の屈曲状態をストレッチセンサの値の変化から計測することと、ランニング中のストレッチセンサの値から実際の膝の角度を推定する。

Copyright is held by the author(s).

* 神戸大学



図 1. ダブルニーアクションの特徴的な動作

2 関連研究

2.1 ウエアラブルデバイスを用いた走行分析

ウェアラブルデバイスを用いたユーザの走行状態の分析に関する研究や製品は数多く存在する。medilogic 社の medilogic Foot Pressure Measurement System[6] は、圧力センサが配置されたインソール型の足裏圧力分布の計測システムで、足圧値を取得し、歩行や走行を分析できる。Huang らは圧力センサを用いて足圧分布データから足圧分布の重心である足圧中心を算出し、ランニング時の重心移動を分析している[7]。飯田らはセンサ部分の変形により生じる光損失変化を利用した光ファイバセンサを用いて、関節の屈曲により変化するセンサ値から足先から接地するフォアフット走法と踵から接地するヒール走法の識別を行っている[8]。Nylander らはランニングテクニックをフィードバックするアプリである「RunRight」を開発しており、加速度センサと心拍センサを内蔵したボディハーネス型のウェアラブルデバイスから得られたデータをもとにビープ音による音声フィードバックを行い、ランニングペースの誘導を行う機能や水平方向と垂直方向の加速度の可視化を行うことでランニングのペースをユーザにリアルタイムで確認させている[9]。また、McGrath らは足首に取り付けたジャイロセンサから得られるデータをもとにランニングや歩行時のヒールストライクとトゥーオフの認識を行っている[10]。このように、ウェアラブルデバイスを用いることで野外環境での走行状態を分析することは可能であるが、いずれも膝の屈曲状態は計測していない。そこで、本研究では着脱が容易な膝サポート型のウェアラブルデバイスを用いて膝の屈曲状態を計測する。

2.2 関節屈曲状態の計測

身体の関節屈曲状態の計測に関する研究や製品も数多く存在する。Microsoft の Kinect[11] は、赤外線によりユーザの姿勢やジェスチャを認識できる。MVN のモーションキャプチャシステム[12] は、IMU センサが内蔵されたモーションキャプチャスーツにより骨格情報を取得し Wi-Fi による無線通信で PC に各関節の座標を送信する。これらのシステムを用いることで、各関節の座標を取得し関節の屈曲状態の計測が可能であるが、Kinect は設置型であり、ま

た MVN は Wi-Fi 環境下での計測が想定されているためどちらも野外環境での計測は難しい。齊藤らは 9 軸モーションセンサを下腿部と大腿部に装着して歩行した際のセンサ値の変化から歩行時の膝角度の推定を行っている[13]。また、Gioberto は 2 つのストレッチセンサを縫い合わせたセンサを伸縮性のあるズボンに取り付け、そのズボンを着用したマネキンを用いてランニング時の膝関節の角度推定を行っている[14]。Haladjian らは前十字靭帯断裂の手術による腫れを抑える包帯に加速度センサを備えたデバイスである KneeHapp を用いて患者のリハビリ時における膝の動作を記録するシステムを提案している[15]。O'Donovana らは脛と足の甲に装着しジャイロ・加速度・磁力センサの信号を組み合わせて 3 次元の関節角度を推定している[16]。しかし、これらの研究は装着位置の固定をする際に専門知識が必要であったり、配線による走行動作の制限が起こるため、野外での長時間の使用には適していないと考えられる。本研究で提案するデバイスは、市民ランナーを対象とし野外環境での長時間の使用を想定しているため、着脱や固定が容易な膝サポートに設置したストレッチセンサを用いて着脱を考慮した手法で膝の屈曲状態を計測する。

3 提案システム

本章では、ランニング時の膝の屈曲状態を計測するシステムについて述べる。

3.1 想定環境

本研究では、ウェアラブルデバイスを用いてランニング時の膝の屈曲状態を常時計測することを目的とする。野外環境でのランニング中の使用を想定しているため、装着して見た目を損なわないデザイン性や、デバイスを装着することによって走り方が制限されない装着性などを考慮する必要がある。膝の怪我を防止するためには、ダブルニーアクションが確認できることと、走行時の膝角度から沈み込みが過度にならないようにすることが大切である[3]。ダブルニーアクションが確認できなくなったり、着地後の膝の沈み込みが平常時と比べ過度に増加した場合には、走りすぎとみなしてユーザに休憩を促す。そこで以上を踏まえ以下の要件を満たすシステムを提案する。

- 膝の角度を取得できる。
- ダブルニーアクションのような膝の屈曲状態を確認できる。
- 着脱による計測誤差が少ない。

本研究では、ランナーが装着しても違和感のない膝サポートに注目し、伸縮性がありサポートに容易に取り付け可能なストレッチセンサを用いてデバイ

ストレッチセンサを用いた常時膝角度推定によるサポート型怪我防止システム

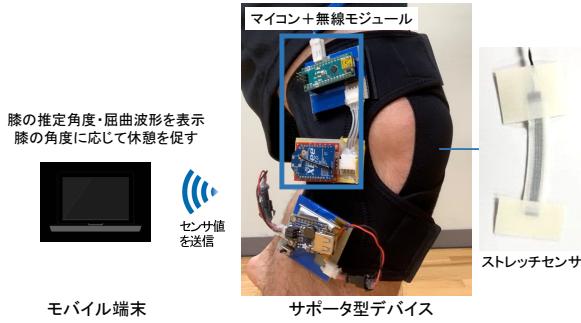


図 2. システム構成

スを実装した。提案デバイスでは、サポートに取り付けたストレッチセンサの値からランニング時の膝の屈曲状態を取得し、得られたセンサ値に基づき膝の角度を推定する。また、準備運動時に行う屈伸運動でキャリブレーションを行うことで、ランニングの一連の動作のなかで着脱や体型の変化による誤差を小さくする。

3.2 システム構成

提案システムの構成を図2に示す。提案システムはサポート上に取り付けたストレッチセンサから得られるデータをモバイル端末上で処理し、リアルタイムでランニング時の屈曲状態を提示する。さらに取得したセンサデータから機械学習により膝の角度を推定する。この2つの衝撃吸収の指標に基づき、ユーザにランニングフォームの変化や走りすぎによる疲労状態をフィードバックする。

3.2.1 使用手順

ユーザの提案システム使用手順について述べる。まず、ユーザは提案デバイスであるサポートを装着し、モバイル端末上のアプリケーションを起動する。次にアプリケーションの指示に従い準備運動として屈伸運動を行う。この屈伸によりシステムでは着脱による誤差を減らすためのキャリブレーションが完了する。屈伸運動の後、ランニングを開始するとアプリケーション上でリアルタイムに膝の屈曲状態の提示と膝の角度推定が行われる。膝の角度や屈曲状態に変化があったり衝撃吸収が不適切な場合には走りすぎとみなし、ユーザはシステムから、ランニングフォームの改善や休憩を促される。

3.2.2 キャリブレーション手順

着脱による誤差を減らすためのキャリブレーションについて述べる。個人の足の太さや着脱によって、得られるセンサ値は異なる。これによる計測誤差を防ぐため、学習データはあらかじめ試行ごとの最大値最小値を用いて正規化する。リアルタイムに取得するデータは、キャリブレーション時の最大値と最

小値に基づき正規化する。キャリブレーション時は屈伸動作を行い、センサ値を記録する。キャリブレーション時に記録したセンサ値の最大値を V_{max} 、最小値を V_{min} 、取得したセンサの瞬時値を x 、正規化した値を y とし、以下の式に基づいて正規化する。

$$y = (x - V_{min}) / (V_{max} - V_{min})$$

3.2.3 ダブルニーアクションの提示手法

ユーザはランニング中に自身のランニングフォームが適切であるか適宜確認できることが望ましい。提案デバイスではストレッチセンサはサポートの膝蓋骨にあたる部分に取り付けられているため、膝を屈曲させるとセンサが伸びて出力されるセンサ値が大きくなり、膝を伸展させるとセンサが縮まり出力されるセンサ値が小さくなる。この性質を利用してランニング時の膝の屈曲状態を示す動作であるダブルニーアクションを計測する。計測したダブルニーアクションはリアルタイムでディスプレイ上で表示することでユーザは自身のランニングフォームを適宜確認できる。

3.2.4 角度推定手法

膝の角度推定には機械学習アルゴリズムのひとつである k-NN を用いる。特徴量は、センサ値の瞬時値と直近の過去 9 サンプル分のセンサデータ、およびその平均値、分散値の計 12 種類とした。この特徴量と動画からトラッキングした膝の角度を対応づけたものを学習データに用いる。学習データはトレーディミル上を走行して収集した。

k-NN では学習データとテストデータそれぞれの特徴量のユークリッド距離を計算し、特徴量がテストデータと最も近い k 個の学習データを算出する。具体的には次式に示すように学習データを $X = \{(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{121}), (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{122}), \dots, (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{12n})\}$ とし、テストデータ $Y = \{(y_1, y_2, \dots, y_{12})\}$ のユークリッド距離 d を全ての学習データについて計算し、最も距離が小さい k 個の学習データを抽出する。

$$d_n = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_{jn} - y_j)^2} \quad (1)$$

推定膝角度 $B_{predict}$ は抽出された k 個の学習データに割り当てられた膝角度 $\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ の平均値、

$$B_{predict} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k B_i \quad (2)$$

とする。

3.2.5 怪我防止のためのフィードバック

モバイル端末上のアプリケーションではランニング中の膝の角度をリアルタイムで常時推定、記録し

ている。走りすぎによる疲労によるランニングフォームの変化である膝の沈み込み^{[3][4]}を認識することでユーザの過度なランニングを検出し、ユーザに対し走りすぎを伝え、ランニングフォームの改善や休憩を促す。走り過ぎの検出方法は、走行の序盤の膝角度としてランニング開始直後の10歩程度の一定時間の着地時の膝の角度を取得し、平均値をとって保持し、その後は當時着地時の膝の角度を推定し続け、着地時の膝の角度が4°以上大きくなる走り過ぎと判定される。走り過ぎと判定されると休憩を促す文字が端末の画面上に表示される。

3.3 実装

実装したデバイスを図2に示す。ストレッチセンサ(C-STRETCH)をスポーツ用の膝サポート(EK-1)の膝蓋骨にあたる部分に取り付け、有線でArduino社のマイコン(Arduino Nano)に接続している。マイコンで取得したセンサ値はDigi International社のRFモジュール(XBee PROシリーズ1)でモバイル端末に無線送信する。端末上では受信したセンサ値をprocessingで処理し、リアルタイムでセンサ値の波形を提示することでユーザは屈曲状態を確認できる。さらに、センサ値から膝の角度を推定して、提示する。これらは端末に記録されるため走行後に確認することも可能である。膝角度が一定の値を超えた場合に、休憩を促す文字が端末の画面上に表示される。

4 評価実験

提案システムで平坦な道や上り坂、下り坂のような様々な野外環境下におけるランニング時の膝関節の屈曲状態と着地時の膝への衝撃を計測できるかを確認するための評価実験と提案デバイスで取得したランニング時のセンサ値をもとに行なった膝角度推定精度評価実験について述べる。

4.1 野外環境におけるランニング時のダブルニー アクションの確認

提案システムでは、実際のランナーが走る野外環境において怪我の原因となる変化を計測できることが望ましい。そこで提案システムのストレッチセンサ値から平坦な道や上り坂、下り坂のような野外環境下でのランニング時においてダブルニーアクションが確認できるか調査した。さらに、各野外環境下でのランニングにおけるフォームの特徴がストレッチセンサ値の波形にどのように表れるか調査した。

実験概要

各野外環境下でのランニングにおいて提案システムのストレッチセンサ値のみから衝撃吸収の指標となる膝屈曲運動のダブルニーアクションが確認できるかを調査するため、提案デバイスを装着した状態

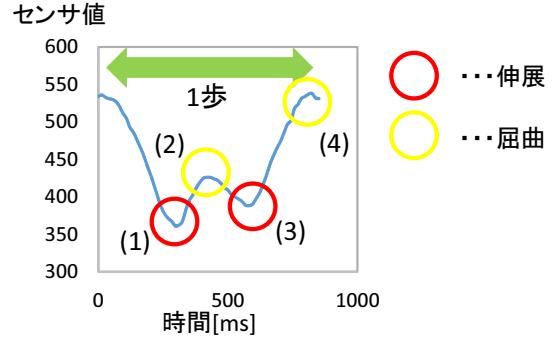


図3. ストレッチセンサ値の時間変化(平坦な道, 右膝)

で平坦な道、上り坂、下り坂を走り、動作データを取得した。被験者は20代男性1名で、計測周期50[Hz]である。まず被験者は平坦な道、上り坂、下り坂を走り、その様子をビデオカメラで撮影した。同時にマイコンで取得したストレッチセンサのセンサ値をPC上でリアルタイムでグラフ化し、その映像を録画した。

結果と考察

平坦な道でのランニング時のストレッチセンサのセンサ値をグラフ化したものを見ると図3に示す。図中の(1)～(4)はランニング時の1歩の周期の中の特徴的な動作を表しており、(1)着地時の伸展、(2)衝撃吸収のための屈曲(3)蹴り出しの時の伸展、(4)足を前に持ってくる動作時の屈曲に対応している。前述の図1にこの特徴的な動作を示している。図3のように1歩の周期の間に膝が2回屈曲しており平坦な道でのランニングにおいてダブルニーアクションが確認できた。また、同様に坂道でのランニングにおいてもセンサ値からダブルニーアクションを確認できた。

4.2 膝角度推定精度評価実験

実験概要

本節では実験概要について述べる。被験者は20代1名で、提案デバイスを装着した状態でトレッドミル上を時速6km、8kmの2種類の速度でそれぞれ10歩ランニングする試行を3回ずつ行った。各試行間にデバイスの着脱はなく、疲労を防ぐため数分間座位状態で休憩をとった。また、センサ値の最大最小正規化を行うために試行前に屈伸運動を3回行った。膝角度の正解データ取得のために大転子、大腿骨外頭、外果の3箇所に色付きのシールをつけ、ビデオ撮影も同時に行った。

各試行毎に得られたセンサ値は、事前に行った屈伸運動時に取得したセンサ値の最大値と最小値を用いて3.2.2節で述べた方法で正規化する。また、撮

表 1. 6km/s での走行における試行内の交差検証結果

	相関係数	MAE	RMSE
k-NN(k=3)	0.99	1.61	2.18
k-NN(k=5)	0.99	1.62	2.19
k-NN(k=9)	0.99	1.69	2.27

表 2. 8km/s での走行における試行内の交差検証結果

	相関係数	MAE	RMSE
k-NN(k=3)	0.99	1.74	2.38
k-NN(k=5)	0.99	1.76	2.38
k-NN(k=9)	0.99	1.78	2.43

影した映像の下肢 3箇所に着けた色付きのシールを Adobe After Effects を用いてトラッキングし、トラッキングにより得られた座標からランニング中の実際の角度を算出した。

提案デバイスから取得し正規化したセンサ値の瞬時値と直近の過去 9 サンプル分のセンサデータ、およびその平均値、分散値を特微量に使用し、トラッキングにより得られた実際の膝角度を正解データとする。推定精度の評価には、提案手法により推定した推定膝角度とトラッキングにより得られた正解膝角度の相関係数、平均絶対誤差 (MAE: Mean Absolute Error) と二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Squared error) を用いる。推定手法である k-NN の k=3,5,9 の場合において、それぞれの膝角度を推定し、精度を評価した。評価には標本データを分割して、その一部を正解データ、残りを学習データとして汎化性能を検証する手法である交差検証を用いた。本論文では同一速度の同一試行の標本データを用いた三分割交差検証、同一速度の異なる試行毎の標本データを用いた三分割交差検証、全試行のデータの標本データを用いた三分割交差検証を行った。

実験結果

各検証における相関係数、MAE、RMSE を表 1 から表 5 に示す。それぞれの検証において k の値を変化させても推定精度に大きな差はなかった。また、相関係数は 0.98 を超えており、角度推定の誤差も小さいことから高い精度で推定できている。怪我につながる変化は 4° から 10° であるのに対して、提案システムでは 2° から 4° の誤差で推定できた。よって実用的な精度といえる。

結果と考察

試行内の交差検証と比較して試行毎の交差検証の推定誤差が大きくなったのはデバイスを装着したままの状態で休憩を行ったことによるサポートの装着位置のずれが要因と考えられる。そのため、一定期

表 3. 6km/s での走行における試行毎の交差検証結果

	相関係数	MAE	RMSE
k-NN(k=3)	0.99	4.42	5.15
k-NN(k=5)	0.99	4.32	5.00
k-NN(k=9)	0.99	4.24	4.88

表 4. 8km/s での走行における試行毎の交差検証結果

	相関係数	MAE	RMSE
k-NN(k=3)	0.99	2.23	2.82
k-NN(k=5)	0.99	2.19	2.77
k-NN(k=9)	0.99	2.15	2.71

間動かなかつた場合に再度キャリブレーションを行うことで誤差は減らすことができるを考える。また、時速 6km における試行毎の交差検証の推定誤差が大きくなつたのは、時速 6km という速度がランニングでも歩行でも可能な速度であるため、フォームのブレが大きくなつてしまつたことが原因と考えられる。学習データの量を増やせばこの問題は解決されると考える。

他のアルゴリズムを用いた膝角度推定精度の比較

機械学習アルゴリズムは他にも存在するため他のアルゴリズムとの比較を検討する必要がある。そこで本節では Waikato 大学を中心開発されているデータマイニングツール WEKA を用いて膝角度推定を行つた結果と k-NN で推定した結果を比較した。今回は Random Forest を用いて交差検証を行い、各データセットから膝角度を推定する。Random Forest は、決定木を弱学習器とする集団学習のアルゴリズムであり、ランダムサンプリングされた学習データの特微量から多数の決定木を作成する。Random Forest を用いた膝角度の推定結果は表 6 のようになった。どの検証においても MAE、RMSE ともに k-NN のほうが推定誤差が 1° から 2° と低い結果となつた。今回の実験ではサポートの着脱は行つていないため、学習データとテストデータに類似したものが含まれていた可能性がある。しかし着脱や走行速度、走行環境が変化するなどの複雑な状況下では Random Forest を用いた方が精度が高くなる可能性があるため、着脱を含む様々な状況下での計測が必要となる。

5 まとめと今後の展望

本論文ではストレッチセンサを備えたスポーツ用膝サポートを用いてリアルタイムで膝の屈曲状態を取得し、膝の角度を推定するシステムを実装した。野外での走行実験の結果、平坦な道や坂道などの様々な野外環境下においてセンサ値からダブルニアクションが確認できた。また、機械学習アルゴリズム

表 5. 全試行の標本データを用いた交差検証結果

	相関係数	MAE	RMSE
k-NN(k=3)	0.98	2.83	3.63
k-NN(k=5)	0.98	2.68	3.40
k-NN(k=9)	0.99	2.57	3.27

表 6. Random Forest による検証結果

条件	相関係数	MAE	RMSE
6km/s, 試行内	0.97	2.55	4.43
8km/s, 試行内	0.98	2.37	3.56
6km/s, 試行毎	0.97	5.00	6.24
8km/s, 試行毎	0.98	2.74	3.67
6km/s, 8km/s	0.97	3.41	4.55

を用いた膝角度推定精度評価実験の結果、k-NN での推定精度が相関係数が 0.98 以上で、MAE は 1.6° から 4.2° となり Random Forest を用いた手法より高い精度で推定できることが分かった。しかし、本論文では着脱なしで実験を行っているため、着脱による影響を考慮できていない。今後は着脱の条件も加えた実験を行い、より実利用に近い条件での推定を行う。また、様々な走行速度での学習データを集め、精度の高いシステムの構築を目指す。

本論文で述べた膝角度推定システムを安定した精度で実装することができれば、長時間のランニングによるランニングフォームの変化を認識でき、ランニングフォームの修正や休息を促すことが可能となる。また、医療機関でのリハビリテーションの支援やスポーツの技術習得支援、高齢者の転倒防止などに幅広く応用できると考えられる。

謝辞

本成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務およびJST CREST(JPMJCR18A3)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 笹川スポーツ財団, https://www.ssf.or.jp/thinktank/sports_life/data/jogrun_9818.html#:~:text=
- [2] J. E. Taunton, M. B. Ryan, D. B. Clement, D. C. McKenzie, D. R. Lloyd-Smith, B. D. Zumbo: A Retrospective Case-Control Analysis of 2002 Running Injuries, *British Journal of Sports Medicine*, Vol. 36, pp.95–101 (Apr. 2002)
- [3] J. Mizrahi, O. Verbitsky, E. Isakov, and D. Daily: Effect of Fatigue on Leg Kinematics and Impact Acceleration in Long Distance Running, *Human Movement Science*, Vol. 19, pp. 139–151 (Dec. 2000).
- [4] 文春オンライン マラソンランナー必読 「膝の故障」の原因と対策, <http://bunshun.jp/articles/-/6359>.
- [5] 佐野佑樹, 岩田 晃, 渡邊 学: TKA 術後の歩行速度の変化と double knee action の関連について, 理学療法学 Supplement, Vol. 2011, p. 921 (Aug. 2012).
- [6] medilogic: medilogic Foot Pressure Measurement System, <http://www.medilogic.com/>.
- [7] P. Y. Huang, C. F. Lin, L. C. Kuo, and J. C. Liao: Foot Pressure and Center of Pressure in Athletes with Ankle Instability during Lateral Shuffling and Running Gait, *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, Vol. 21, pp. 461–467 (Aug. 2011).
- [8] 飯田 稔, 小山勇也, 渡辺一弘: 光神経ウェアによるランニング支援システム, 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 54, pp. 1341–1342 (Nov. 2011).
- [9] S. Nylander, M. Jacobsson, J. Tholander: Run-Right – Real-Time Visual and Audio Feedback on Running, *Proc. of the 2014 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI 2014)*, pp. 583–586 (Apr 2014).
- [10] D. McGrath, B. R. Greene, K. J. O'Donovan, B. Caulfield: Gyroscope-based assessment of temporal gait parameters during treadmill walking and running, *International Sports Engineering Assosiation 2012*, pp. 207–213 (Jul 2012).
- [11] Microsoft: Kinect, <https://developer.microsoft.com/ja-jp/windows/kinect>.
- [12] Xsens: MVN Link, <https://www.xsens.com/>.
- [13] 齊藤亜由子, 宮脇和人, 小松 瞭, 巖見武裕: 歩行計測における大腿部および下腿部へのモーションセンサ装着位置の検討(矢状面における膝関節角度に着目して), 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 865, pp. 1–13 (Sep. 2018).
- [14] G. Gioberto: Garment-integrated Wearable Sensing for Knee Joint Monitoring, *Proc. of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2014)*, pp. 113–118 (Sep. 2014).
- [15] J. Haladjian, Z. Hodaie, H. Xu, M. Yigin, B. Bruegge, M. Fink, J. Hoher: KneeHapp: A Bandage for Rehabilitation of Knee injuries, *Proc. of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2015)*, pp. 181–184 (Sep. 2015).
- [16] K. J. O'Donovana, R. Kamnikb, D. T. O'Keefea, G. M. Lyonsa: An Inertial and Magnetic Sensor Based Technique for Joint Angle Measurement, *Journal of Biomechanics*, pp. 2604–2611 (Mar. 2007).

電解イオンディスプレイ

石井 紗郁* 池松 香† 椎尾 一郎*

概要. 本研究では、電気分解により生成するイオンを利用し、湿潤面上にカラーパターンを表示する手法を提案する。濡れた物体に電極を接触させ通電することで電気分解が起こり、特定のイオンが生成する。このイオンに反応する呈色指示薬を用いて、カラーパターンを表示可能なディスプレイを実現する。電極パターンの実装には、プリント基板のような既存の回路実装技術を適用することができ、ドットパターンやセグメントパターンをコンピュータ制御により表示可能である。また、パターン表示後に逆向きに通電し電極の極性を反転させることで、表示色を薄め、逆電極イオンによる反応色で表示することができる。提案手法は可動部分が不要で低コストであり、小型化が容易である。また、pH反応性物質を含む一部の食品が表示媒体として使用可能である。よって、湿潤面を持つ日用品や食品を、情報表示の媒体として使用する用途が期待できる。本稿では、ディスプレイの実装と可能な使用形態を報告する。

1 はじめに

テクノロジーの進歩により、人々はいつでも、どこにいても情報にアクセスすることが可能になった。情報へのアクセスは主に液晶ディスプレイ (LCD) のような、平面的で硬い無機質なディスプレイを介して行われる。一方で、日常生活でよく目にする実物体は、柔らかく、曲面を持ち、有機的である場合が多い。このような日常的な実物体を利用して、生活の中に溶け込むディスプレイを開発する研究が盛んに行われている。例えば、これまでに、泡 [4, 5, 8], 水滴 [15, 6], 結露 [14] などがディスプレイの素材として使用されてきた。さらに、温度変化で色が変わることのある染料であるサーモクロミックインクを布や糸に染み込ませ、衣服をディスプレイとして用いる手法も提案されている [16, 2]。実物体に対する化学反応を利用して情報提示を行う手法も提案されている。Organic Primitives [10] では、pHの値に応じて色や香り、形が変わる材料を実物体に適用し、マルチモーダルなセンサやディスプレイを作成した。この研究において、化学反応は pH 反応性物質で覆われた実物体に酸や塩基性の液体を滴下することで実現される。しかし、日常的に使用するようなディスプレイを実現するためには、低コストにコンピュータ制御可能な化学反応を起こす機構が必要である。

本研究では、電気分解をコンピュータ制御することで、湿潤面にイオンによるカラーパターンを表示する手法を提案する（図 1）。本手法では、濡れた物体に電極を接触させ通電することで電気分解を行う。この電気分解による酸化還元反応のため、電極周辺で特定のイオンの数が増減する。増減したイオンに反応して呈色反応を起こす指示薬を電解液に加

えると、電極が触れた部分の色が変化する。電極の実装に、プリント基板 (PCB) などの電子回路実装技術を用いることで、ドットパターンやセグメントパターンが容易に実現可能である。これにより、コンピュータからの制御で特定の電極上で電気分解を起こし、さまざまなカラーパターンを表示することができる。また、カラーパターン表示後に逆方向に通電し電極の極性を逆にすることで、表示パターンを薄れさせ、逆電極に発生するイオンによる反応色で表示することも可能である。

本手法のシステムは可動部を必要としないため、大掛かりな装置を必要とせず低コストで実現できる。さらに、電極を柔軟なプレート上に実装することで、曲面上にカラーパターンを表示することも可能である。また、本手法は一部の食品表面にも適用可能である。具体的には、アントシアニンやクルクミンなどの pH 反応性物質を含むも食品のうち、湿潤面を持つものに直接情報表示することも可能である。以上より本手法は、食品を含む日常生活でよく見られる濡れた面や柔らかい面、曲面上に任意のカラーパターンを表示することができる。

2 関連研究

日常生活で目にする実物体を画素として利用する情報提示手法が多数提案されている。例えば、泡 [4, 5, 8], 水滴 [15, 6], 結露 [14], 布 [16, 2] などの実物体を用いた表示が提案されている。本研究では、電気分解により生成するイオンを利用し、任意のカラーパターンを実物体の表面に表示するという新しい手法を提案する。電気分解は、飲料表面に電気分解気泡による情報表示を実現する先行研究でも使用されている [8]。本研究では、泡ではなくイオンを用いることで、複数の色による文字やアイコンを動的に表示する。

Copyright is held by the author(s).

* お茶の水女子大学

† ヤフー株式会社

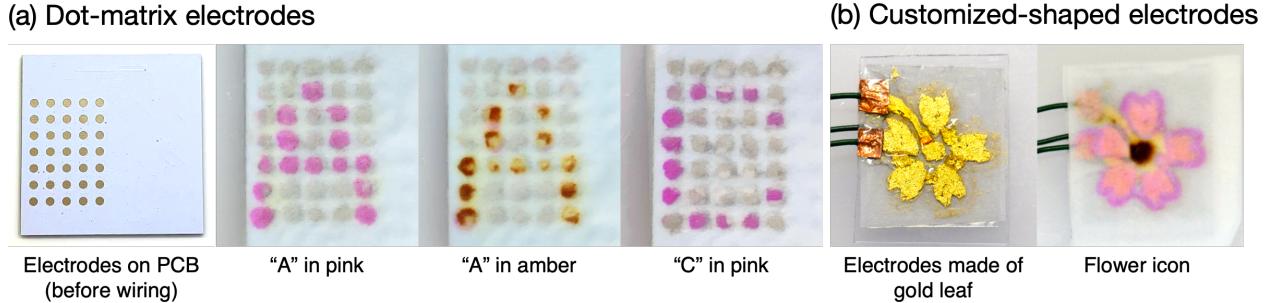


図 1. (a) ドットマトリクス電極のプロトタイプ。「A」をピンク色で表示した後、逆方向に通電し電極の極性を反転させることで、褐色で表示することもできる。また、「C」など他のパターンを表示することもできる。(b) 任意の形状に設計可能なセグメント電極のプロトタイプ例。

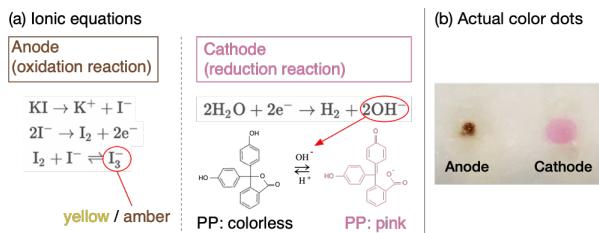


図 2. (a) 陽極と陰極で起こる化学反応のイオン反応式。(b) KI と PP の混合溶液を用いて電気分解を行った例。金箔で作った一対のドット状電極の上に、溶液を浸した濾紙を設置して電気分解した。

本研究と同様に、化学反応を利用した情報表示が提案されている。Organic Primitives [10]では、pHの値により色、香り、形状が変化する物質を用いて、食品や人体、植物などの有機物とのインタラクションを実現した。この研究において、化学反応はpH反応性物質で覆われた実物体に酸や塩基性の液体を滴下することで実現される。しかし、コンピュータ表示デバイスに応用するためには、化学反応をコンピュータ制御する仕組みが必要である。本研究では、コンピュータ制御可能な電気分解を利用して、化学反応による情報表示を実現した。

また、本研究と同様に、発光部品を使用せずカラー表示を行うディスプレイが多数提案されている。これらのディスプレイには、熱に反応して色を変化させるサーモクロミック材料や、光に反応して色を変化させるフォトクロミック材料が使用される。サーモクロミック材料は、主にテキスタイルディスプレイ [16, 2] やタトゥー型皮膚インターフェース [17, 11] に使用してきた。フォトクロミック材料は、ある特定の波長の光を投射することで色が変化する染料である。従来のフォトクロミック材料では透明から一色までしか変化しなかったが、近年、複数の色に変化する材料が開発された [13, 9]。これらの研究では、発色のためにUVプロジェクタが必要なため、システムが大掛かりになり、高価になってしまふ。

一方、我々の提案システムは PCB のような電子回路実装技術が使用可能であり、小型かつ安価な実装が可能である。近年では EL(エレクトロルミネンス)インクを実物体に適用し情報提示を行う手法も複数提案されている [12, 18, 3]。ELインクは通電により発光する性質を持っているが、2枚の電極間に誘電体とともに挟みこむ必要があるため、多層構造のインターフェースとなる。一方で、我々の手法は電極と表示媒体の2層で表示を実現することができ、作成が容易である。また、発光しないため、日中の屋外でも使用することができる。

3 イオンディスプレイの概要

本研究で提案する情報提示手法は、ドットマトリックス型またはセグメント型の電極上で電解液の電気分解を行い、発生したイオンを用いてカラーパターンを表示する。電気分解を行うと、電解液中の特定のイオンの数が増減する。このとき、その特定のイオンに反応して呈色反応を起こす指示薬を電解液に添加することで、電極付近の電解液の色を変えることができる。物体の表面または液体中に電極を配置し、コンピュータから電極への通電を制御することで、カラーパターンを物体に直接表示できる。また、電極の極性を反転し、通電の向きを逆にすることで、表示されたパターンを薄めて、逆電極のイオンによる反応色に切り替え表示することもできる。

4 実装

4.1 電解液

本研究では電解液として、主にヨウ化カリウム溶液（以下 KI, 1% w/v）とフェノールフタレン溶液（以下 PP, 0.01% w/v）の混合溶液を使用した。これらの溶液は初期の中性の状態で無色透明であり、電気分解による発色の確認が容易である。この混合溶液を電気分解した際のイオン反応式を図 2 に示す。電気分解により、陽極ではヨウ化物イオン (I^-)

電解イオンディスプレイ

	陽極（酸化反応）	初期状態	陰極（還元反応）
KI	黄色～褐色	無色透明	
PP		無色透明	ピンク色
アントシアニン	赤色	紫色	青～緑色
クルクミン	黄色		赤色

図 3. 扱う呈色指示薬の一覧と電極の状態ごとの色変化。

が酸化され、陰極では水 (H_2O) が還元される。酸化された I^- はヨウ素 (I_2) に変化し、還元された H_2O は水酸化物イオン (OH^-) に変化する。生成した I_2 は再び溶液中に溶解して三ヨウ化物イオン (I_3^-) となり、この物質は陽極上で黄色から褐色を呈する。陰極側では OH^- の増加に伴い、pH の値が上昇する。PP は pH の値が 8.2~12.0 の場合にピンク色を呈するため、陰極上でピンク色のパターンを表示できる。

また、食材に含まれる色素を用いることで、提案手法を食品のような日常生活に身近な物体に適用することができる。このような指示薬の例としてはアントシアニンやクルクミンがある。アントシアニンはムラサキイモやベリー類などの食材に多く含まれており、クルクミンは主にターメリックに含まれている。これらの色素は pH の値に応じて色が変化する。アントシアニンは酸性では赤色、中性では紫色、アルカリ性では青色から緑色に呈色する。また、クルクミンは酸性と中性では黄色に、アルカリ性では赤色に呈色する。これまでに説明した、本研究で扱う指示薬の一覧を図 3 にまとめた。

4.2 電極

ドットマトリクス電極（図 1(a)）とセグメントパターン電極（図 1(b)）の 2 種類の電極を実装した。

4.2.1 ドットマトリクス電極

ガラスエポキシ製の PCB に、円形平面状のドットマトリクス電極を実装した。電気分解による電極の溶出を防ぐため、各ドット電極上に純白金箔を貼り付けた。各ドットの直径は約 3 mm であり、5.1 mm 間隔で 5×7 のマトリクス状に配置されている。マトリクス電極全体のサイズは約 33 mm×23 mm である。図 4 にドットマトリクス電極の動作回路図を示す。先行研究 [8] と同様に、アクティブマトリクス回路方式を採用した。35 個の電極がアクティブマトリクス回路に接続されている。先行研究 [8] では、Arduino により各電極が陰極とハイインピーダンスの 2 状態に切り替えられたのに対し、本研究では、陽極、陰極、ハイインピーダンスの 3 状態に切り替えられる。電極の極性を切り替えるために、すべてのライン配線とマトリクスの交点に、N チャネル MOSFET および P チャネル MOSFET の両方

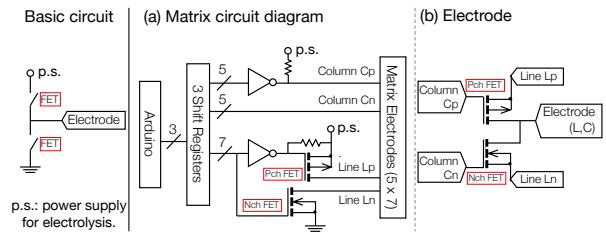


図 4. (左) 基本的な通電制御の仕組み。スイッチングにより電極の状態を陽極、陰極、ハイインピーダンスに切り替える。(右) L ライン C カラム ($L = 1 \sim 7$, $C = 1 \sim 5$) の配線を示す回路図。L ライン配線と C カラム配線のそれぞれには、P チャネル MOSFET に接続する配線と N チャネル MOSFET に接続する配線 (L ラインには「Lp」と「Ln」, C カラムには「Cp」と「Cn」) が使用される。

を使用した。電極を陽極に切り替えるには、P チャネル MOSFET をオンにし、陰極に切り替えるには、N チャネル MOSFET をオンにする。両 MOSFET をオフにすると、電極はハイインピーダンスになる。よって、各ラインとカラムには、P チャネル用と N チャネル用の配線が 1 本ずつ必要である。電気分解に広範囲の電圧値を適用可能にするために、P チャネル MOSFET には外部直流電源が接続されている。異なる電源に接続された P チャネル MOSFET をシフトレジスタから制御するために、オープンドレインインバータが使用されている。P チャネルラインと N チャネルライン上の MOSFET のソースは、それぞれ外部電源と接地に接続されている。これらの MOSFET を活性化すると各ラインは外部電源または接地に接続され、活性化しない場合はハイインピーダンスとなる。

図 4(b) に L ライン C カラムの交点部分の回路を示す。各カラムとラインは P チャネル配線と N チャネル配線の 2 本で構成されているため、4 本の配線が交点で接続する。画素用電極は N チャネルおよび P チャネル MOSFET 両方のドレインに接続され、2 本のカラム配線はそれぞれのゲートに、2 本のライン配線はそれぞれのソースに接続されている。P チャネルラインが活性化（正電圧が印加）されて P チャネル MOSFET がオンになると、画素用電極は正電圧に接続され陽極として機能する。N チャネルラインが活性化（接地）されて N チャネル MOSFET がオンになると、画素用電極は接地され陰極として機能する。両 MOSFET をオフにすると電極はハイインピーダンスとなる。このようにして各画素電極を 3 状態のいずれかに設定することで、コンピュータ制御により任意のパターンを任意の色で表示することができる。さらに、コンピュータで動作するソフトウェアを実装し、ユーザによる表示色の選択や表示パターンのデザインを可能にした。

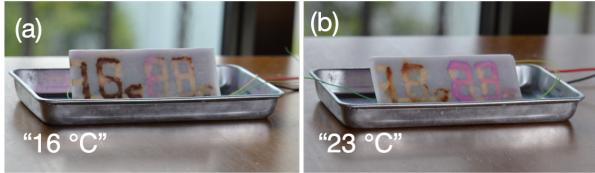


図 5. 湿式の気温ディスプレイ. (a) 今日の気温 (16°C) が褐色で表示されている. (b) 翌日の気温 (23°C) がピンク色で表示される. このとき、前日の気温 ((a) の褐色の表示) が薄く表示されている.

4.2.2 セグメント電極

ドット電極に加えて、7セグメント方式や任意形状のセグメント電極も使用できる。セグメント数が14以上(2桁以上)など多い場合、前節で説明したアクティブマトリクス回路を用いて電極を制御するのが望ましい。一方、セグメント数が少ない場合は、1セグメントずつ個別に制御することも可能である。図1(b)に、任意の形状に設計可能なセグメント電極のプロトタイプ例を示す。この電極は、プラスチック板に純金箔を貼り付けることで作成されている。この電極をワイヤでマイクロコントローラに接続することで、電気的な制御が可能である。レーザーカッターでステンシル用のモールドを作成し、純金箔を貼り付けることで、任意形状のパターンを表示可能な電極を作成することができる。

5 実装方式と応用例

電極と電解液の構成を変えることで、提案手法は複数の方式で実装可能である。本節では、「湿式」、「液体式」および、「スタンプ式」の3実装方式についてそれぞれ説明する。

5.1 湿式

電極の上に電解液を染み込ませた表示媒体を置き、その媒体上にカラーパターンを表示することができる。図1に、4.1節で述べたKIとPPの混合溶液を染み込ませた厚さ0.3mmの濾紙を媒体として使用し、ドットマトリクス電極やセグメント電極上に設置することで表示を行った例を示す。図1(a)のように文字を一色で表示する場合、PCBの裏側に共通電極を設置し、画素用電極に印加した電圧と逆の電圧を印加することで表示を実現した。本形態では媒体として紙を使用するため、ディスプレイを縦に設置し、表示を横から観察可能にすることもできる。図5は、気温を表示するディスプレイの例である。イオンによる表示は時間経過とともに徐々に薄れていく。よって、表示の彩度によりその情報の鮮度を直感的に表すような表示を実現することができる。

また、表示媒体として電解液を染み込ませた砂も使用可能である。図6は、媒体として白い砂を使用

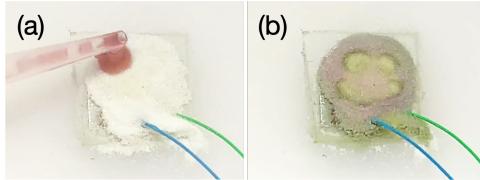


図 6. 白い砂を用いたディスプレイのプロトタイプ。電解液を砂に染み込ませることで、笑顔の顔のアイコンが表示される。

し、インタラクティブな表示を実現した例である。砂の下に電極を配置し、通電を行う。砂が乾燥している場合は何も表示されないが、砂に電解液を染み込ませることで、顔のアイコンが表示される。電解液中の呈色指示薬として、アントシアニンのような生物に無害な物質を用いることで、本手法を植木鉢の中の土に適用できると考えている。また、ドットマトリクス電極も利用可能なため、任意のパターンを土の上に表示できると考えている。これにより、灌水作業を通して植物とのインテラクションを誘発し、植物を世話をすることを楽しく動機付けできると考えている。

5.2 液体式

電解液は液体の状態のまま使用することも可能である。図7に、電解液として白い液体を使用して文字をカラー表示する例を示す。ドットマトリクス電極を実装したPCB上にアクリル板による高さ約1cmの隔壁を設置し、ここに電解液を溜める容器を作成した。この容器に電解液が溜められた状態で電極に通電することで、任意のカラーパターンを表示できる。電解液には4.1節で述べたKIとPPの混合溶液を用い、これに水冷コンピュータで使用される白色クーラント¹を加えた。溶液が透明だと電極の色が見てしまい、表示品質が低下する。そこで、溶液をクーラントにより白く濁らせ表示品質を保持した。このとき、鮮明な表示のために必要な水位は約3mmであった。容器の縁に銅テープによる共通電極を設置し、画素用電極に印加した電圧と逆の電圧を印加することで、図7(b), (c)のような一色での表示を実現した。本形態では電解液を液体の状態で用いるため、システムを手で揺らしてパターンを即座に消去することも可能である(図7(d))。

5.3 スタンプ式

前述の方式では、電解液を含む湿った素材の背面に電極を設置した。これに対して、素材の上に電極をスタンプのように接触させることで、任意の位置に任意のパターンを表示することも可能である。転写パターンが動的に変化するスタンプとしてdotanco[1]などが提案・実装されている。dotancoはスタンプ

¹ EK Water Blocks, EK-CryoFuel Solid Cloud White

電解イオンディスプレイ

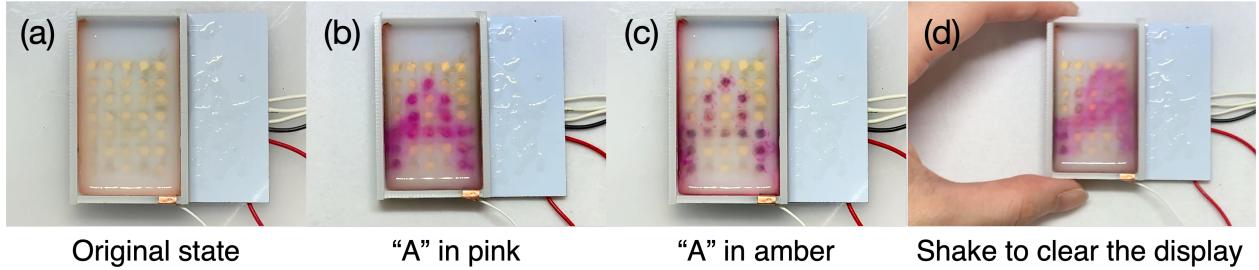


図 7. 水中に電極を設置したプロトタイプ. (a) ドットマトリクス電極が実装された容器の中に白く濁らせた電解液が入っている. (b) 液面に、ピンク色のドット文字「A」が表示されている. (c) 逆方向の通電により電極の極性を反転させ、褐色のドット文字「A」も表示可能である. (d) 容器を揺らすことで、表示パターンを即座に消去することができる.

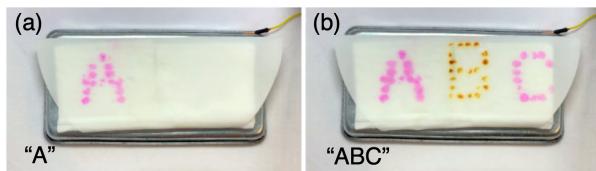


図 8. スタンプ型のプロトタイプ. (a) 電解液を染み込ませた白い紙の上に、ドットパターンを転写. (b) 極性とパターンにより異なる色やパターンを転写.

のインク面が格子状に分割されており、これらの凹凸を機械的に制御することで転写パターンを変化させる。一方で、我々の提案手法では、機械的な可動部分やインクを使用することなく、電極への通電を制御することで任意のカラーパターンを転写することができる。図 8 (a) に、電解液を染み込ませた濾紙にスタンプされた文字「A」を示す。通電パターンを変えることで、異なる色や文字をスタンプすることも可能である（図 8 (b)）。

パターンの表示媒体として、湿潤面を持つ食品を用いることもできる。食品の中には、4.1 節で説明したような、pH の値によって色が変化する物質が含まれているものが存在する。その食品に電極を接触させることで、任意のカラーパターンを食品の表面に表示することができる。図 9 (a) は、ターメリックソースがけのパンの表面にメッセージ「Hi」を表示した例である。ターメリックに含まれるクルクミンは pH の値により色が変化し、酸性・中性では黄色に、アルカリ性では赤色に変化する（図 3）。よって、任意のパターン状に画素用電極を接地させることで、赤色のパターンをパンの表面に表示することができる。また、ミックスベリーパンナコッタの表面にパターンを転写することもできる。図 9 (b) に、表面に AR マーカを転写した例を示す。ベリー類にはアントシアニンが含まれており、中性では紫色であるが、アルカリ性では緑色に変化する性質を持っている。よって、AR マーカの形状に設計されたセグメント電極を接地させることで、緑色のマーカパ

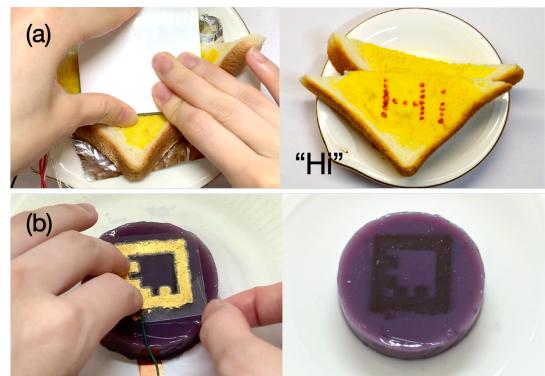


図 9. スタンプ型のプロトタイプを食品に応用した例. (a) ターメリックソースがけのパンに赤色のドット文字「Hi」を転写. (b) ミックスベリーパンナコッタに AR マーカを転写.

ターンをパンナコッタのような湿った食品の表面に表示することができる。このマーカは、コントラスト調節などを行うことで認識可能であった。

6 議論

図 1(a) に示したドットマトリクスパターンを表示するために、5.5 V の電圧を印加し、このとき 1 個の電極に流れた電流値は約 6 mA であった。1 対の電極に通電しドットが観察できるまでの時間は定性的に測定した。ドットが観察できた状態は、図 1(a) に示すパターンと同程度の発色が視認できた状態とした。その結果、5 節で説明した湿式で濾紙を使用した場合に約 5 秒、液体式を使用した場合に約 2 秒であった。また、既に色が出ている状態で、逆向きの通電を行い電極の極性を反転させてから、反対色のドットが観察されるまでの時間も定性的に測定した。結果は、濾紙を使用した場合に約 25 秒、液体式で約 13 秒であった。将来的に、より詳細な表示速度の測定を行うことを予定している。

表示されたカラーパターンは、電極の極性を反転させ電極付近の電解液を中性にすることで消え、反対色で表示されると予想した。しかし、特に濾紙を

表示媒体として使用した際、既存の色の完全な消去が難しい場合や、反対色が鮮明に表示されない状況が観察された。今後は、呈色指示薬の濃度や通電時間の最適値を調査することで可逆性を向上させたいと考えている。一方で、液体式の実装では濾紙を使用した場合と比べて、既存色の消去および反対色の鮮明な表示が容易であった。これは、電解液が液体の状態であり表示が拡散しやすいためだと考えられる。一方で、表示が拡散しやすいと、アイコンなどの鮮明な表示は難しいと考えられる。したがって、可逆性を重視するなら電解液を液体状態で使用し、表示品質を重視するなら紙を使用するなど、状況に合わせて表示媒体を適切に選択する必要がある。

5.3 節で、食品を表示媒体として使用する例を説明した。このとき使用する呈色指示薬は食用である。また、指示薬となる物質はその分子構造が変化することで呈色反応を起こすため、電気分解の過程で有害な副産物が生成することはない。さらに、電極に純白金箔または純金箔を使用しているため、電気分解中に電極が溶出することはない。したがって、提案手法によりパターンが転写された食品は、人体に無害であると考えられる。

7 まとめ

本研究では、電気分解により生成するイオンを利用して、湿潤面上にカラーパターンを表示する手法を提案した。そして、複数の実装方式をその応用例と合わせて報告した。今後は、呈色指示薬や通電時間などの最適値を調査し、より安定した表示が可能なディスプレイの開発を行う予定である。また、開発したディスプレイの性能評価も行う予定である。さらに、さまざまな使用形態に沿った応用例を複数提案・実装することで、日常生活でよく見られる幅広い物体への適用可能性を模索していく。なお、本研究の一部について、ACM UIST2020 [7] でポスター発表を行った。

参考文献

- [1] dotanco. <http://gekitetz.com/dotanco/>, 2013.
- [2] L. Devendorf, J. Lo, N. Howell, J. L. Lee, N.-W. Gong, M. E. Karagozler, S. Fukuhara, I. Poupyrev, E. Paulos, and K. Ryokai. “I Don’t Want to Wear a Screen”: Probing Perceptions of and Possibilities for Dynamic Displays on Clothing. In *Proc. of CHI ’16*, pp. 6028–6039, 2016.
- [3] O. Hanton, M. Wessely, S. Mueller, M. Fraser, and A. Roudaut. ProtoSpray: Combining 3D Printing and Spraying to Create Interactive Displays with Arbitrary Shapes. In *Proc. of CHI ’20*, pp. 1–13, 2020.
- [4] J. M. Heiner, S. E. Hudson, and K. Tanaka. The Information Percolator: Ambient Information Display in a Decorative Object. In *Proc. of UIST ’99*, pp. 141–148, 1999.
- [5] S. Hirayama and Y. Kakehi. Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles. In *Proc. of SIGGRAPH ’10*, pp. 1–1, 2010.
- [6] Y. Inoue, Y. Itoh, and T. Onoye. TuVe: A Flexible Display with a Tube. In *Proc. of SA ’18*, pp. 16:1–16:2, 2018.
- [7] A. Ishii, K. Ikematsu, and I. Siio. Electrolysis Ion Display on Wet Surfaces. In *Proc. of UIST ’20 Adjunct*, pp. 19–21, 2020.
- [8] A. Ishii and I. Siio. BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. In *Proc. of UIST ’19*, pp. 619–623, 2019.
- [9] Y. Jin, I. Qamar, M. Wessely, A. Adhikari, K. Bulovic, P. Punpongsanon, and S. Mueller. Photo-Chameleon: Re-Programmable Multi-Color Textures Using Photochromic Dyes. In *Proc. of UIST ’19*, pp. 701–712, 2019.
- [10] V. Kan, E. Vargo, N. Machover, H. Ishii, S. Pan, W. Chen, and Y. Kakehi. Organic Primitives: Synthesis and Design of PH-Reactive Materials Using Molecular I/O for Sensing, Actuation, and Interaction. In *Proc. of CHI ’17*, pp. 989–1000, 2017.
- [11] H.-L. C. Kao, C. Holz, A. Roseway, A. Calvo, and C. Schmandt. DuoSkin: Rapidly Prototyping on-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials. In *Proc. of ISWC ’16*, pp. 16–23, 2016.
- [12] S. Olberding, M. Wessely, and J. Steimle. PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-Film Touch-Displays. In *Proc. of UIST ’14*, pp. 281–290, 2014.
- [13] P. Punpongsanon, X. Wen, D. S. Kim, and S. Mueller. ColorMod: Recoloring 3D Printed Objects Using Photochromic Inks. In *Proc. of CHI ’18*, pp. 1–12, 2018.
- [14] Y. Tsujimoto, Y. Itoh, and T. Onoye. Ketsuro-Graffiti: An Interactive Display with Water Condensation. In *Proc. of ISS ’16*, pp. 49–55, 2016.
- [15] U. Umapathi, P. Shin, K. Nakagaki, D. Leitinger, and H. Ishii. Programmable Droplets for Interaction. In *Proc. of CHI EA ’18*, pp. VS15:1–VS15:1, 2018.
- [16] A. Wakita and M. Shibutani. Mosaic Textile: Wearable Ambient Display with Non-Emissive Color-Changing Modules. In *Proc. of ACE ’06*, pp. 48–es, 2006.
- [17] Y. Wang, S. Luo, Y. Lu, H. Gong, Y. Zhou, S. Liu, and P. Hansen. AnimSkin: Fabricating Epidermis with Interactive, Functional and Aesthetic Color Animation. In *Proc. of DIS ’17*, pp. 397–401, 2017.
- [18] M. Wessely, T. Sethapakdi, C. Castillo, J. C. Snowden, O. Hanton, I. P. S. Qamar, M. Fraser, A. Roudaut, and S. Mueller. Sprayable User Interfaces: Prototyping Large-Scale Interactive Surfaces with Sensors and Displays. In *Proc. of CHI ’20*, pp. 1–12, 2020.

カスタマイズ可能な二次元レンチキュラを用いた多視点情報提示手法の提案

島元 謙* 塚田 浩二*

概要. レンチキュラは、ユーザの視点によって絵柄が変化するポスター等の印刷物に広く利用され、裸眼立体視表現などディスプレイへの応用も進められている。一方、一次元方向でしか画像を切り替えることができず、レンズを印刷物等に精密に張り合わせる必要があり、個人のモノづくりではあまり利用されてこなかった。そこで本研究では、UVプリンタで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案する。本手法では、レンズアレイの直径／厚み／サイズなどをカスタマイズして出力し、独自のパターン設計ツールと組み合わせて、視点に応じて二次元方向に画像が変化する情報提示を行うことができる。本稿では、設計ツールの実装や応用例の構築、視認性の基礎評価について述べる。

1 はじめに

レンチキュラレンズとは、かまぼこ型の凸レンズが連なったシート状のレンズである。これを複数画像を交互に分割して配置した合成画像の上に重ねることで、見る角度によって画像が切り替わって見える。この仕組みは一般にレンチキュラと呼ばれ、傾けるとアニメーションするカードや、ユーザの視点によって絵柄が変化するポスター等の印刷物に広く利用されている。さらに、裸眼立体視表現などディスプレイへ応用する研究も行われている[1]。一方、従来のレンチキュラでは一次元方向でしか画像を切り替えることができず、一般的なユーザが扱うためにはレンズを印刷物等に精密に張り合わせる必要があり、敷居が高い問題があった。よって、3Dプリンタやレーザーカッターのように個人レベルのモノづくりではあまり利用されてこなかった。

そこで本研究では、UVプリンタで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案する。二次元レンチキュラでは、凸レンズを二次元方向に敷き詰めたレンズアレイをディスプレイや印刷物と組み合わせることで、視点に応じて二次元方向に画像が変化する情報提示を行うことができる(図1左)。さらに、小型マイコン／スマートフォン／タブレット等の多様なサイズのディスプレイに適応したり(図1右)，レンズの焦点距離を変えることで視認性を調整することもできる。

本稿では、本研究の先行研究を紹介した後、二次元レンチキュラの基本的なアイデアとコンセプト、実装について説明する。さらに、応用例や視認性の基礎的な検証結果を紹介し、制約や将来性について議論する。

Copyright is held by the author(s).

* 公立はこだて未来大学

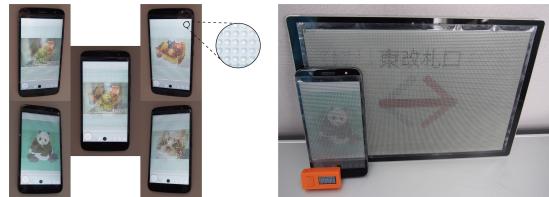


図1. 本研究の概要。二次元レンチキュラを用いて視点に応じて画像が変化する情報提示を行う(左)。レンズアレイは多様なサイズ／厚み等にカスタマイズして造形できる(右)。

2 関連研究

本章では、本研究の関連研究について「デジタル工作機器を用いた光学素子造形手法」、「多視点情報提示手法」の2点から紹介する。

2.1 デジタル工作機器を用いた光学素子造形手法

CNCフライスや光造形3Dプリンタ等のデジタル工作機器を用いてレンズを造形する研究について紹介する。森田ら[2]は、レーザー熱処理に用いる集光レンズを簡易的に制作するための手法として、CNCフライスでアクリル板を削り、シリコンオイルの塗布によって表面の粗さを低減することでレンズを制作した。また、The Magic Lens[3]は、一見ランダムに見えるパターンの中に隠れた画像を複合化する屈折レンズアレイである。PolyJet方式3Dプリンタで制作しており、画像を複合化する機能は果たしているものの、表面の粗さによる像のぼやけが課題とされている。Printed Optics[4]は、インタラクティブデバイスのための光学素子の3Dプリント手法である。例えば、光ファイバーの束のように光の導線を3Dモデルの中に組み込むことができ、テーブルトップインターフェース上に置かれたオブジェクトに組み込むことで、下面の液晶ディスプレイの

映像をオブジェクトの正面に映し出すことができる。これらの手法はデジタル工作機械での造形後に磨き等の後処理が必要であったり、ハイエンドの3Dプリンタを必要とするため個人が手軽に利用することは難しかった。

本研究の前身として、杉山ら[5]は、UVプリンタを用いて透明な紫外線硬化インクを積層し、レンズを造形する手法を提案した。専用のツールを用いることで多様な大きさや厚みのレンズを手軽に造形することができる。本研究では、この手法・ツールをカスタマイズ可能な二次元レンチキュラの制作に活用する。

2.2 多視点情報提示手法

櫻井ら[6]は、ユーザの立ち位置などに応じて、プロジェクタからテーブルに投影される情報の輝度を制御し、複数のユーザに対して異なる可視性で情報を提示するテーブルトップ型ディスプレイを提案した。これらの手法は基本的に大型ディスプレイを想定しており、大掛かりな機材を必要とする。本研究では多様なサイズのディスプレイ等に合わせたレンズアレイを造形して組み合わせるだけで、手軽に多視点情報提示を実現できる。

Sakuraiら[7]は、UVプリンタを用いてCMYKインクの上に衝立状の構造を印刷することで、見る角度によって異なる画像を表示する手法を提案した。我々の提案と類似する効果を実現しているが、画像パターンや衝立の構造が複雑になるため、一般的なPCでは数時間の計算が必要となる。また、印刷物を対象としており、ディスプレイとの組み合わせは報告されていない。

藤木[8]は、フルカラー3Dプリンタを用いて、グレーデーション付きの窪みを多数備える3Dモデルを造形した。この窪みにアクリル球を埋め込むことで、見る角度に応じてモデルの色がなめらかに変化する作品を発表した。本研究では、カスタマイズ可能なレンズアレイを用いて、こうした表現手法を多様なディスプレイや素材に適用することができる。

3 提案

本章では、二次元レンチキュラの基本的なアイデアについて紹介したのち、提案手法のコンセプトを述べる。

3.1 二次元レンチキュラ

まず、二次元レンチキュラの基本的な構造について説明する。

二次元レンチキュラは、半球状の凸レンズを隙間なく並べた二次元レンズアレイと、各レンズの下に配置された円状の画像パターンから構成される（図

2）。この画像はスマートフォンなどのディスプレイ上で表示したり、UVプリンタでレンズアレイと一緒に（あるいは別々）に印刷することができる。例えば、図2はレンズアレイと色環状の画像パターンを別々に1mm厚／同形のアクリル板上に印刷した例である。ここで、レンズアレイを画像パターンの上に重ねることで、視点に応じて色環上の異なる箇所が拡大されるため、二次元的に色が変化して見える（図3）。

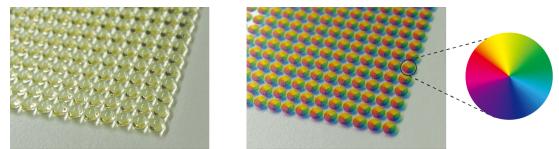


図2. 二次元レンズアレイ（左）。各レンズの下に配置された円状の画像パターン（右）。

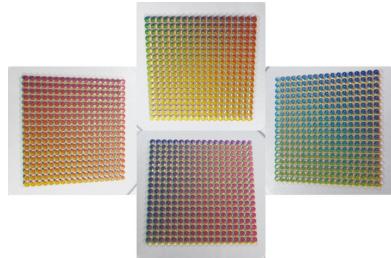


図3. 二次元レンチキュラの例。角度によって二次元的に色が変化する。

3.2 コンセプト

本研究のコンセプトは以下の3点である。

- (1) カスタマイズ可能なレンズアレイの造形
- (2) 手軽な画像パターンの設計
- (3) 多様な素材への出力と活用

一点目は、UVプリンタを用いることにより、様々な直径、厚み、レイアウトのレンズアレイを制作できる。これにより、スマートフォンやタブレット、小型マイコン等の多様なサイズに対応した二次元レンチキュラを手軽に造形できる。また、厚みを変えることでレンズの焦点距離を調整したり、直径を変えることで解像度を用途に応じて変更できる。

二点目は、画像パターンの設計を支援するために、スマートフォンやタブレット上で動作する設計／表示ツールを提供することである。本ツールを利用すれば、特殊な技能を持たないユーザでも手軽に二次元レンチキュラ用の画像パターンを用意できると考える。なお、画像パターンとツールの詳細については後述する。

三点目について、紙やアクリルなど様々な素材に印刷できるUVプリンタの特性を生かして、多様な活用事例を提案することである。例えば、スマートフォン等のディスプレイ上で利用する場合は、付け

カスタマイズ可能な二次元レンチキュラを用いた多視点情報提示手法の提案

外しが可能な画面保護シートにレンズアレイを造形することで、用途に応じて交換や取り外しが容易となる。さらに、スマートフォン等で設計して視認性を確認したパターンを書き出して、UV プリンタでアクリル板等に（レンズアレイと共に）印刷することで、アナログな二次元レンチキュラとして活用することもできる。

3.3 画像パターンの設計

ここでは、二次元レンチキュラに利用する画像パターンの設計について説明する。パターンの各ピクセルはレンズの直径に合わせた円とする。円の分割方式を調整することで異なる情報提示に活用できる可能性があるが、本論文では単純に円を最大八分割した扇形毎に、任意の画像を割り当てる方式を採用する。例えば、図 4 に示すように、4 種類の画像を視点に応じて切り替える例を考える。まず、提示したい 4 種類の画像を用意し、パターン設計ツールに読み込む（図 4 左）。次に、パターンの各ピクセル（円）を四分割した扇形の 1 つに、各画像の対応する 1 ピクセルを割り当てる（図 4 中央）。なお、各画像の解像度はパターンに応じて自動的に削減される。最終的に、各扇形に配置された 4 種類の画像を合成することで、画像パターンが完成する（図 4 右）。

このパターンをレンズアレイと組み合わせることで、扇形の位置に応じた一定の角度から画像を視認することができる。なお、円の分割数を増やせばより多くの画像を埋め込むことができるが、視認可能な角度は狭まることになる。

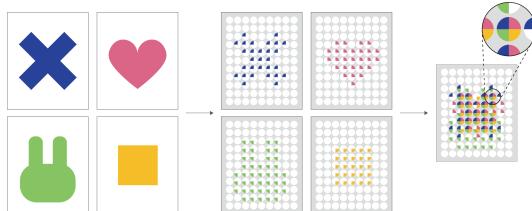


図 4. 提示する画像（左）、各画像を扇形に割り当てた画像（中央）、4 種類の画像を合成したパターン（右）

4 実装

本章では、提案システムの主要な構成要素として、レンズアレイとパターン設計ツールの実装について述べる。

4.1 レンズアレイ

レンズアレイは、先行研究[5]のレンズ設計ツールと Adobe Illustrator を活用して、UV プリンタで印刷する。UV プリンタは、Roland DG 社の VersaUV LEF-12i（以下、VersaUV）を利用した。先行研究では基本的に 1mm～2mm 厚のアクリル板上にレンズを造形していた。一方、本研究ではレンズ

アレイをスマートフォンやタブレットのディスプレイ上に張り付けて利用することになる。よって、こうしたデバイスへの取り付け／取り外しを容易にしつつ、タッチパネル機能を殺さないために、A4 サイズで 0.08mm 厚の画面保護フィルム（エーワン ラベルシール 光沢フィルム 透明）上にレンズアレイを造形することにした。なお、この保護フィルムは非常に薄く、印刷中にレンズの張力等で丸まってしまうため、シートの周囲をテープなどで UV プリンタの台座に固定し、ピンと張った状態で印刷を行った。図 5 に、シート上に印刷したレンズアレイの例を示す。これらのレンズアレイをスマートフォンに取り付けた状態でもタッチ操作は可能であり、複数回の取り付け／取り外しができることを確認した。なお、このような注意をした上でも、直径 3mm を超えるようなレンズアレイを造形すると、シートが丸まってしまう傾向があった。ガラスタイルの保護フィルム（Moto G5 Plus ガラスフィルム/Ferlinso 社、厚み 0.4mm）への造形も試したが、表面加工の問題かレンズが剥がれやすい傾向があったため、今後適切な素材を引き続き探していくたい。

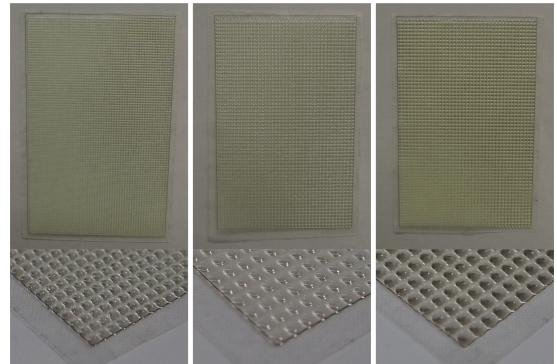


図 5. それぞれ画面保護フィルム上に印刷したレンズアレイの一例。左から、直径 1mm／厚さ 0.5mm、直径 1.5mm／厚さ 0.35mm、直径 1.5mm／厚さ 0.75mm

4.2 パターン設計ツール

パターン設計ツールは Processing で実装した。PC（Windows, Mac）に加えて、Processing for Android を用いることで、スマートフォン（Android 端末）でも動作する。

アプリケーションは画面上部のパターン描画部と、下部のツール群から構成される（図 6）。前述したようにレンズアレイの上からでもタッチパネル操作はできるが、視認性が落ちるため、パターン描画部のみにレンズアレイを張り付けることとした。パターン描画部では、前述したように任意の画像を読み込むだけでなく、指やタッチペン等を用いて直接ドット画像を描画することもできる（図 7）。ツール群では、各ピクセル内の描画箇所（扇形）の選択ツール

や描画用のペン／消しゴム／色選択ツール、画像読み込みツール、設定ツール等を備えている。設定ツールでは、ピクセル（円）のサイズや位置を微調整できる。これにより、様々なディスプレイサイズやレンズ径に対応したり、多少の貼り付け位置のずれに対処できる。また、円の分割数は4分割／8分割に変更できるようにした。

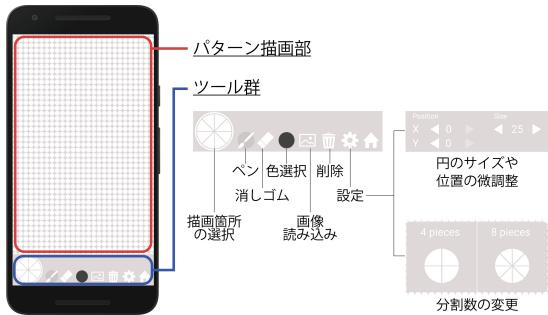


図 6. パターン設計ツールの画面構成



図 7. パターン設計ツールの利用例

4.3 応用例

ここでは、提案手法を活用した応用例について示す。まず、行先案内板について紹介する（図 8）。行先案内板は複数の行先が表示されると複雑になりがちであるが、ここでは、横から見ることで進行方向の矢印と目的地だけが表示される。目的地は、目線の高い大人が見ると漢字表記となり、目線の低い子供が下から見るとひらがな表記となるよう配慮した。このように、目線の高さに合わせて表記を切り替えるような、インタラクティブな情報提示が可能になる。なお、図 8 左の事例はタブレット端末（Surface4 / Microsoft 社）上にレンズアレイを造形した保護フィルムを張り付け、パターン描画ツールを用いて実現している。このようにしてデザインや視認性を

確認したうえで、同サイズのアクリル板にレンズアレイと画像パターンを同時に印刷することで、静的ながらインタラクティブ性のある行先案内板として長期的に活用できる可能性がある（図 8 右）。

次に、机上に設置した多視点ディスプレイの事例を紹介する（図 9）。テーブルを複数（2～4 人）のユーザが囲むような状況で、レンズアレイを備えたディスプレイを机の中央に平置きすることで、ユーザの位置に応じた異なる情報を提示することができる。これにより、ユーザ間のコミュニケーション支援等に活用できる可能性がある。図 9 の事例は、スマートフォン（Moto G5 Plus / Motorola 社）を用いて、人狼ゲームに活用している。ここでは、プレイヤーの位置に応じた役職（村人、人狼等）をランダムに提示している。これに加えて、進行状況等を切り替えて提示すれば、一台の端末だけで人狼ゲームをスマートに進行できると考える。

さらに、提案手法を小型マイコン M5StickC に適用した例を示す（図 10）。M5StickC のディスプレイは 0.96 インチ（解像度：80×160）と非常に小型であるが、保護フィルム上に造形したレンズアレイを張り付けて画像パターンを提示することで、スマートフォン等と同様に角度に応じて異なる画像を視認できることを確認した（図 10 左）。なお、パターンの描画は M5StickC 上で実装した独自のプログラムで行っている。さらに、搭載するバックライトが明るいためか、レンズアレイを取り付けることでディスプレイの見かけ上の輝度が向上し、視認性が上がるよう感じられた（図 10 右）。このように、ディスプレイの解像度は下がるもの、遠距離からの視認性が向上した LED マトリクス（電光掲示板）のように扱える可能性もあると考える。



図 8. 行先案内板。Surface4 で表示したもの（左）とアクリル板に印刷したもの（右）

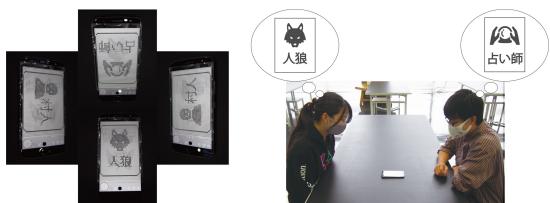


図 9. 机上に設置した多視点ディスプレイ。プレイヤーの位置に応じた役職を提示（左）、人狼をプレイする様子（右）

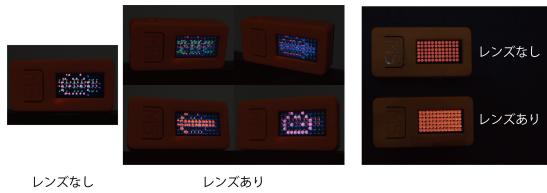


図 10. M5StickC に適用した例. 角度を変えることで絵柄が変化する様子 (左), レンズの有無による輝度の比較(右)

5 議論

本章では、レンズアレイの厚みによる視認性調査やレンズアレイの造形上の制約について述べる。

5.1 レンズの厚みによる視認性の調査

レンズの厚み (\approx 焦点距離) による画像パターンの視認性の変化等を調査するため、直径 1.5 mm / 厚さ 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm の 3 種類のレンズアレイを 4 章で紹介した保護フィルム (厚さ 0.08mm) 上に造形した。なお、レンズアレイ全体のサイズはスマートフォン (Moto G5 Plus/Motorola 社) に合わせて、103.5 mm × 67.8mm とした。画像パターンは、図 11 に示すように 4 色の市松模様とした。色付きの各ピクセルは赤、青、緑、黒の 4 色で 90 度ずつ扇形に塗りつぶされている。変更するパラメータは、レンズアレイの厚みに加えて、ディスプレイの回転角度 (-60~60 度)、ディスプレイの向き (縦方向 / 横方向)、視点との距離 (視距離, 20cm, 30cm, 60cm) とした。画像パターンを表示したスマートフォンに慎重に保護フィルムを張り付けて位置ずれがないことを確認した上で、三脚にスマートフォンを固定し、15 度ずつ回転させてデジタルカメラで撮影した。さらに、視距離、レンズアレイの厚み、ディスプレイの向きを変えて繰り返し撮影した¹。

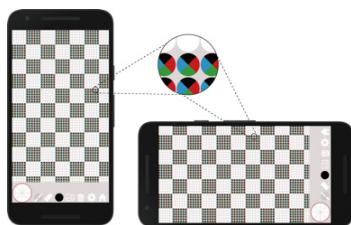


図 11. 実験用の画像パターンと縦画面／横画面の表示例。

次に、調査結果について述べる。ディスプレイの向きが縦方向の結果を図 12 に、横方向の結果を図 13 に示す。なお、視距離による差はあまり確認できなかったため、これらの図では 30 cm の例のみを抜

¹ ディスプレイの向きを変える際、緑と黒の市松模様が写真では視認しにくかったため、図 11 のように、市松模様も 90 度回転させることにした。

粋した。また、ディスプレイの回転角度については、60 度はパターンが目視できなかつたため除外した。

まず、図 12/13 の全体的な傾向として、-30 度～-15 度の範囲では赤色、15 度～30 度の範囲で青の市松模様が表示されており、視点に応じた画像の変化が確認できる。特に 15 度の角度では、レンズの厚みに関わらずくっきりした色が確認できる。

次に、レンズの厚さの違いに着目すると、図 12 の -30 度 / 30 度の時に厚さ 0.35mm では全体的に赤色 / 青色がくっきり見えているのに対し、厚さ 0.75mm ではほぼ視認できなくなっている。同様に、図 13 の -30 度に着目すると、厚さ 0.35mm では全体が赤色に見えるのに対し、厚さ 0.75mm では左端は赤みがかっているが、右側はほぼ色が視認できない。このように、レンズの厚さが大きくなるほど、視野角は狭くなる傾向が確認できた。

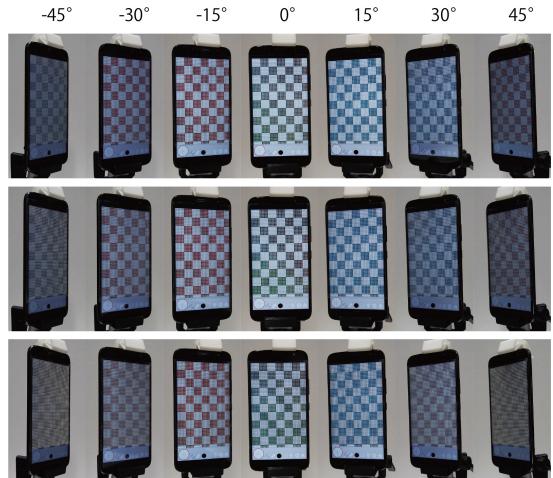


図 12. レンズの厚さによる視認性の変化(1) : ディスプレイ縦向き／視距離 30cm で、厚さは上から 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm.

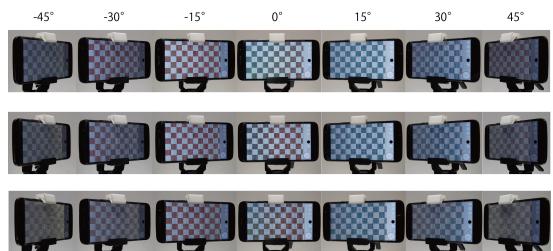


図 13. レンズの厚さによる視認性の変化(2) : ディスプレイ横向き／視距離 30cm で、厚さは上から 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm.

最後に、視距離については前述のように差があまり確認できなかつたが、レンズの厚みが 0.75mm / 横方向の例を参考として紹介する(図 14)。-30 度の角度において、20cm の距離では左側が赤みがかつていて、60cm の距離では全体的に色が非常に薄

く、ほぼ視認できなくなっている。これ以外の条件では今回は差が確認できなかつたが、ディスプレイのサイズが大きくなり、距離が離れていくと、同じレンズでも視野角が若干狭まる可能性がある。

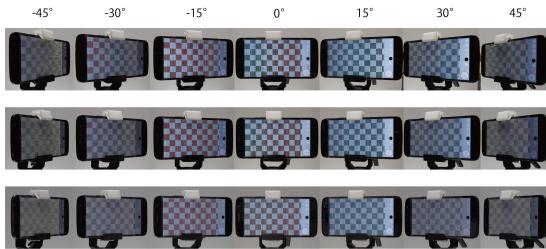


図 14. 視距離による視認性の変化：ディスプレイ横向き
／厚さ 0.75mm で、視距離は上から 20cm, 30cm, 60cm.

5.2 提案手法の制約

ここでは、提案手法の制約として、印刷サイズ／レンズの正面からの視認性について述べる。

まず、印刷サイズについては、VersaUV で印刷可能な最大範囲が 305mm、奥行 280mm であるため、この大きさを越えるレンズアレイは直接印刷できず、複数枚に分割する必要がある。なお、サイズが大きいほど印刷時間も増加するものの、今回制作したタブレット用のレンズアレイ（厚さ 0.50mm, 173.2mm × 260mm）／スマートフォン用のレンズアレイ（厚さ 0.50mm, 67.8mm × 103.5mm）の印刷時間はそれぞれ約 97 分／45 分であった。面積比が約 6.5 倍あるものの、印刷時間は約 2.2 倍に収まっている。一方、同じスマートフォン用で厚みの異なるレンズアレイ（0.35mm／0.50mm／0.75mm）の造形時間はそれぞれ約 35 分／45 分／58 分となり、厚みが約 2.1 倍になると、印刷時間は約 1.7 倍かかっている。このように、印刷時間においてはレンズの厚みの影響が大きいため、特に視野角を狭くしたいという意図がなければ、薄いレンズを選択したほうがよいと思われる。

最後に、現在の画像パターンでは、レンズの正面から見た際に、全てのパターンが混ざって見えてしまう。この問題は、パターンの中央部のみを背景色や別の画像で塗りつぶすことで解決できると考える。さらに、画像パターンの分割方法を工夫することで表現の可能性を広げていきたい。

6 まとめと今後の展望

本研究では、UV プリンタで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案した。本手法では、レンズアレイをディスプレイや印刷物と組み合わせることで、視点に応じて二次元方向に画像

が変化する情報提示を行うことができる。本稿では、PC やスマートフォン上で動作する設計ツールを実装し、タブレット／スマートフォン／マイコン等多様なサイズのディスプレイを用いた応用例を構築した。さらに、視認性の基礎評価を通して、視点に応じてクリアに画像が変化し、レンズの焦点距離を変えることで視野角が変化することを確認した。

今後は、より多様な応用例の構築や、解像度や視認性の向上に取り組み、光学プロトタイピングの可能性を追求していきたい。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 山田 千彦, 磯野 春雄, “背面投射方式大画面 3D ディスプレイ用両面対称型レンチキュラスクリーンの一設計法”, 電気学会論文誌, 125, 3, (2005), p.420.
- [2] 森田 翔, 渡辺 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一. 切削と液体塗布によるレーザ熱加工用簡易アクリルレンズの作製と評価, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 711-712, 2015.
- [3] Marios, P., Thomas, H., Derek, N., Markus, G., and Wojciech, J. The Magic Lens: Refractive Steganography. ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol31, No.6, pp.186:1-186:10, 2012.
- [4] Karl, W., Eric, B., Scott, H., and Ivan, P. Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices, In Proceedings of UIST' 12, pp.589 – 598, 2012.
- [5] 杉山 圭, 塚田 浩二, UV プリンタを用いたレンズ造形手法とその応用, WISS2019 論文集, pp. 25-30, Sep, 2019.
- [6] 櫻井 智史, 北村 喜文, スリラムサプラマニアン, 岸野文郎: 回転偏光フィルタにより情報の可視性を制御するテーブルトップ型ディスプレイ; 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 332-343, 2009.
- [7] Kaisei Sakurai, Yoshinori Dobashi, Kei Iwasaki, and Tomoyuki Nishita. 2018. Fabricating reflectors for displaying multiple images. ACM Trans. Graph. vol. 37, No. 4, pp. 158:1-158:10, Jul. 2018.
- [8] 藤木 淳, みやざきアートセンター開催の個展についての報告 —「不可思議の体験展藤木淳個展」—, 札幌市立大学研究論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 17-28, 2018.

電気分解気泡による流水ティッカー表示と高画素階調表示

石井 紗郁 * 福島 真花 * 田中 波輝 * 的場 やすし * 池松 香 † 椎尾 一郎 *

概要. 筆者らは電気分解により発生する気泡を画素として用いる情報提示手法を提案している。本研究ではこれを拡張し、気泡表示の更新速度を高速化する手法と、気泡による高画素階調表示を実現する手法を提案する。先行研究では、日常的な情報提示装置への利用を想定していたが、泡は消えやすく儂い性質を持っている。そこで、提案手法の可能性を模索するため、2点の気泡表示デバイスの開発を行った。1点目は、流れる水面にティッカー状の泡表示を行う“UTAKATA”である。水路の底面に電極を直線状に配置し電気分解を行うことで、泡によるメッセージを水路の下流に向かって流しながら表示する。2点目は、水盤に対面したユーザの顔を水面に泡で表示する鏡のようなディスプレイ“Bubble Mirror”である。これは、32×32個の電極を用いて、8段階のグレースケールの泡による顔画像を水面に表示する。

1 はじめに

水は我々の生活に不可欠であり、日々の生活を豊かにする。人々は古来より、河川の流れや池の水面にうつる景色を見て楽しんできた。一方で、水だけでなく、その表面に浮かぶ泡も興味深い存在である。鴨長明が方丈記で述べたように、流れる水やそれに浮かぶ泡はとどまるところなく変化していくため、無常のメタファとして多くの文学作品に登場してきた。近年、水泡により文字や画像を表示する手法がいくつか提案されている。例えば、電気分解により発生する気泡を画素として用い、水面に情報表示を行うディスプレイが提案されている[6]。このディスプレイを用いることで、飲料表面に10×10のドットマトリクスピターンを動的に表示することが可能である。これらの研究では主に、日常的に使用される情報提示装置としての利用が想定されてきた。一方で、前述のとおり泡は儂い性質を持ち、作品の表現手法としてしばしば用いられる。そこで我々は、この泡がインタラクティブなアートやエンターテインメント作品のための素材としても有用であると考えた。

本研究では従来の電気分解気泡表示の課題解決、すなわち、低い表示応答速度を克服し、高画素化・階調表示を実現する目的で、2種類の気泡表示手法を提案する。そして、この手法を用いて、アート作品等への応用を模索する2点の気泡表示デバイスを開発する。電気分解気泡を利用した情報表示装置自体は既に提案されているが、本研究ではこれまで検討されなかった流水表面への表示や高画素グレースケール表示などの技術課題に取り組んだ。本研究の貢献は、これらの表示手法の提案・実装を通して技術課題を解決し、その表示特性を評価したことであ

る。本研究はTEI2021にて登壇発表予定である[5]。

2 技術課題と提案手法

電気分解気泡表示の先行研究[6]では、泡による画素を数秒で生成可能であったが、画素が自然に消えるまでに1分以上の時間が必要であった。よって、ディスプレイの応答速度は低く、アニメーションやスクロールなどの表現が困難であった。また先行研究では、電極への通電時間の調節によりグレースケールの泡ディスプレイが実現可能であると示唆されているものの、高画素な階調表示は未実装であった。そこで本研究では、低い表示応答速度を克服し、高画素化・階調表示を実現する目的で、2種類の泡表示システムを提案する。

1点目は、水路を流れる水面にティッcker状の泡表示を行う“UTAKATA”である(図1)。UTAKATAでは、先行研究での表示手法の応答速度を改善するために、流水路を採用した。水路の底面に7個の電極を直線状に配置し電気分解を行うことで、泡によるテキストメッセージを水路の下流に向かって流しながら表示できる。

2点目は、カメラ撮影した来訪者の顔を、グレースケールの泡で表示する鏡のようなディスプレイ“Bubble Mirror”である(図4)。液体が入った水盤状の装置を覗くと、その水面に顔画像が表示される。Bubble Mirrorは、電気分解気泡により高解像度(1024ピクセル)のグレースケール(8段階)表示を実現する初めての試みである。

3 関連研究

3.1 泡を画素として用いる表示

泡を画素として用いる情報提示手法として、水中を上昇する気泡を用いるディスプレイ[3]やシャボン玉自体を画素として用いるディスプレイ[4]が提

Copyright is held by the author(s).

* お茶の水女子大学

† ヤフー株式会社



図 1. UTAKATA による表示例. (左) 「WISS」(右) 記号「○×△□」.

案されている。これらの装置では、気体の供給や制御のために画素・列ごとにエアポンプや電磁バルブなどの可動部分が必要である。よって、機構が大掛かりになり、高画素表示を安価に実現することが困難である。この問題を解決するために、電気分解を利用した泡ディスプレイが提案されている [6]。このディスプレイでは、微細な気泡によるドットを数秒で生成できるものの、気泡ドットが自然に消えるまでに1分以上の時間が必要であった。本研究で提案するUTAKATAでは、流水を利用したティッカー状の表示機構を導入することで、応答速度の改善を行った。また、先行研究 [6]において、電極への通電時間を調節することでグレースケール表示が可能であると報告されているが、詳細な実装および調査は行われていない。本研究で提案するBubble Mirrorは、カメラ撮影した顔画像を8段階のグレースケールの泡で表示し、その上、従来の約10倍の1,024画素表示を可能にした。

高解像度の泡ディスプレイを実現するため、フェムト秒レーザパルスをグリセリンのような高粘度溶液に照射することで生成するマイクロバブルを利用する手法が提案されている [7]。これにより機械的・電気的な部品を使わず光学的に3D画素を生成できるが、大型の装置を必要とする。また、高粘度溶液中に泡を生成するため応答速度は低い。我々の提案手法は媒体に低粘度の溶液を使用するため、[7]の手法と比較し応答速度が速い。電気分解により発生する泡を用いたアート作品 [1] が提案されている。この作品では、電極で発生した泡が音楽と同期し煙のように上昇するものの、泡を画素として用い情報表示する機能はない。我々は、電気分解により水面に形成される円形の微細泡群に焦点を当て、これをドット文字の画素として利用する。

3.2 僵さを持つインターフェースやアート作品

泡により表示された情報は脆く消えやすいため、ユーザの注意を引きつける。このように、限られた時間しか持続しない事象を利用したインターフェースを「エフェメラルユーザインタフェース」(EUI)と呼ぶ [2]。EUIを実現するために、落水・流水・泡のように、形状が持続しない素材が用いられる。Bit.Fall [10] は落水を使用したEUIの例である。滝

のように水滴を落とし、その水滴自体を画素として用いてメッセージを表示する。水滴は地面に向かって落下するので、情報は約1秒間しか持続しない。チューブ内を移動する水滴を画素として用いるディスプレイも実装されている [9]。チューブの一部を縦に複数並べ、各チューブ内に水滴を注入し、その位置を制御することで文字を表示する。チューブが乱雑に配置されている部分では無秩序に流れている水滴ビットが、チューブが揃えられた表示領域に近づくにつれ徐々に文字を形成し、消失する。このような一時的なメッセージ表示はユーザの注意を引きつけ、興味深い体験を創出する。泡もEUIによく使われる素材である。浮遊するシャボン玉に投影を行い空中ディスプレイとして利用する手法が提案されている [8, 12]。シャボン玉を指で触り破裂させることで、投影される映像が変化したり、効果音や香りの提示を行う。また、シャボン玉自体をタンジブルな入力のために利用する手法も提案されている [13]。石鹼水の入った容器の上にシャボン玉を置き、その位置を指で移動させ入力を行う。このように、水や泡は流れ、破裂し、消失することで儂さを体現するため、EUIのための素材や表現媒体として有用である。我々も水と泡の儂さに着目し、これをを利用して独自の体験を提供することを目指す。

本研究で提案する表示手法に近いユーザ体験を提供すると考えられるアート作品は、Bit.Flow [9] と Wooden Mirror [11] である。Bit.Flow は UTAKATAと同じく、水を流すことで情報を提示するティッカー状のディスプレイである。先述したように、チューブの中を流れる水滴を画素として用い、メッセージを表示する。Wooden Mirror は、木片自体を画素として使用したディスプレイである。Bubble Mirror と同様に、デバイスと対面する人の顔画像を約30×30画素で表示する。Wooden Mirror は木片の角度を制御することでグレースケール表示を実現するが、我々は可動部分のない電極への通電時間を制御することでグレースケール表示を行う。

4 実装

4.1 UTAKATA

本節では、流水を用いたティッカー方式泡ディスプレイ UTAKATAについて報告する。図 1 に動作

電気分解気泡による流水ティッカー表示と高画素階調表示

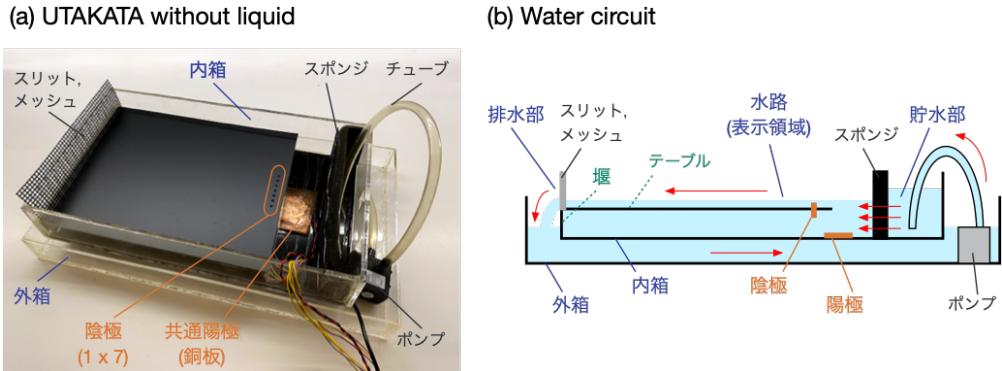


図 2. (a) 電解液を入れる前の状態の UTAKATA. (b) 水回路の断面図. 内箱の中では下流に向かって（右から左へ）水が流れ、外箱の中では上流に向かって水が流れる. 赤い矢印は流れの方向を示す.

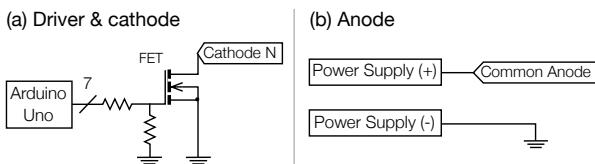


図 3. N 行目の配線を示す回路図. (N = 1~7)

例を示す. 図 2(a) は、電解液を入れていない状態の装置の外観である. 装置はアクリル製の内箱と外箱で構成され、内箱には表示のための深い水路が設置されている. 水路の上流部の底面に 7 個の電極（陰極）が直線上に配置されており、任意の複数電極に通電することで水面に泡による画素列を生成することができる. これが下流に向かって流れることで、縦 7 画素のティッカーディスプレイを実現できる. 本実装における主な技術的課題は、流れる水の表面に泡によるドットを生成し、流路上に歪みの少ないドット表示を実現することである.

4.1.1 流水の制御

図 1 に示すように、内箱が外箱の中に設置されており、中にインスタントコーヒーが入っている. 内箱は厚さ 5 mm のアクリル板で作成され、大きさは約 35 cm × 21 cm × 6 cm である. 内箱は 2 cm の脚を使用し外箱よりも高い位置に設置した.

水流を発生させるために、内箱に水を供給し排出する必要がある（図 2(b)). 水を供給するために給水ポンプを外箱に設置し、ポンプにつながるチューブを内箱の上流側に配置した. ポンプより送り込まれる水は、内箱上流部の貯水部に貯められる. このとき、ポンプの影響による乱流を緩和するために、貯水部と水路との間（陰極から 6 cm 上流の位置）に厚さ 1 cm のスponジを配置した.

内箱の排水部には、アクリル板による堰、スリット、およびメッシュを設置した. 泡表示を歪ませないために、水面付近の流れを均一に近づける必要が

ある. 単純な堰の構造の場合、排水部では水面付近の水のみが流れるのに対し、上流部では水面だけでなく水深の深い部分でも流れが起きる. よって、上流部では水面流速が遅いのに対し排水部では流速が速くなり、この結果、下流部で流れが加速して泡表示が歪んでしまう. そこで、水底付近の流れと水面付近の流れとを分離するため、2.5 cm の脚を持つテーブルを設置し水路の底面を堰と同じ高さまで上げた. これにより、表示領域の水流を均一に近づけた. また、堰上部に微小な凹凸があると、特定の部分から集中して排水され、表示が歪む原因となる. そこで、堰の上に整流効果のあるスリット（幅 10mm, 4 mm 間隔）と粗いメッシュ（約 4 mm）を配置し、堰を乗り越える際の水面の流れを均一に近づけた.

4.1.2 泡生成機構

電気分解気泡による表示を実現するため、内箱の上流部に共通陽極と画素表示用電極（陰極）を設置した. 共通陽極には 15 cm × 6.2 cm の銅板を用い、内箱の底面に設置した. 画素表示用陰極には金メッキピンヘッダ部品を 7 個使用し、水路の入り口に一列に 7.6 mm 間隔で配置した. 電解液は、先行研究 [6] と同様に炭酸水素ナトリウム (0.4 % w/v) とコーンスター（0.25 % w/v）を添加したインスタントコーヒー（1.5 % w/v のコーヒー粉を使用）を用いた. 泡による画素を流れる水面上で拡散することなく保持するために、コーンスターの量を先行研究より增量し、粘度を 15 mPa·s とした.

図 3 に UTAKATA の回路図を示す. 7 個の画素表示用電極が MOSFET を介して Arduino UNO に接続されている. MOSFET のゲートは Arduino に、ソースはグラウンドに、ドレインは電極に接続されている. Arduino が複数の MOSFET を活性化すると、対応する電極が接地される. 接地された電極は電気分解の陰極として機能し、その電極から水素が発生する. 図 3 (b) に示すように、直流電源の正の出力を共通陽極に、負の出力を接地に接続した.

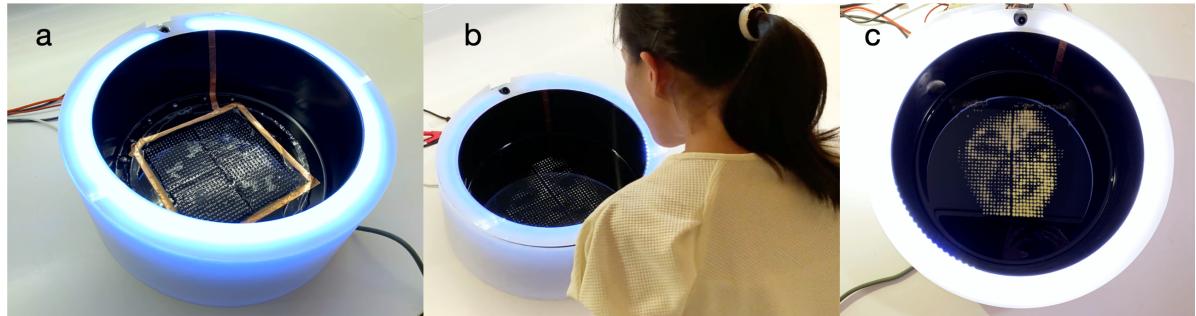


図 4. Bubble Mirror. (a) 水盤の底面にマトリクス陰極群と共通陽極が配置されている。 (b) 水盤の中を覗きこむと、水面に顔画像が表示される。 (c) グレースケール（8段階）の泡による顔画像表示の例。

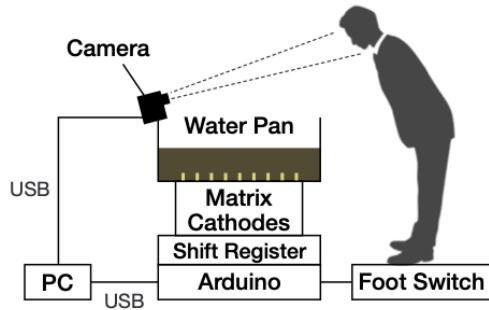


図 5. Bubble Mirror のシステム構成。

4.2 Bubble Mirror

本節では、Bubble Mirrorについて報告する。図4に概要と使用例を示す。電気分解を利用した泡ディスプレイの先行研究 [6]では、画素数の拡張可能性やグレースケール表示の可能性が示唆されている。本研究では、これらの特徴を活かし、電気分解気泡を利用した高解像度のグレースケール表示を初めて実現した。図4(a)に示すように、水盤の底面に 32×32 の画素表示用電極を設置した。そして、覗き込んだ人の顔をカメラ撮影し(図4(b))、その顔画像を電気分解により生成する8段階のグレースケールの泡で表示する機構を実装した(図4(c))。本実装では、1,000画素以上の泡による表示が可能なディスプレイの製作と、グレースケール表示のための適切な電極制御などの技術的課題に取り組んだ。

4.2.1 システム構成とユーザ体験

図5にBubble Mirrorの全体構成を示す。本システムは、水盤、Arduino UNO、フットスイッチ、USBカメラ、Processingプログラムが動作するPCから構成される。水盤の中には、インスタントコーヒー粉で黒く色づけされた電解液が入っている。PCとUSB接続されたArduinoは、電気分解の電流制御とフットスイッチの読み取りを行う。PCはArduinoからフットスイッチの状態を受信し、表示画像データをArduinoへ送信する。

体験者がシステムの前に立つと、フットスイッチが体験者の存在を検出する。体験者が水盤を覗き込

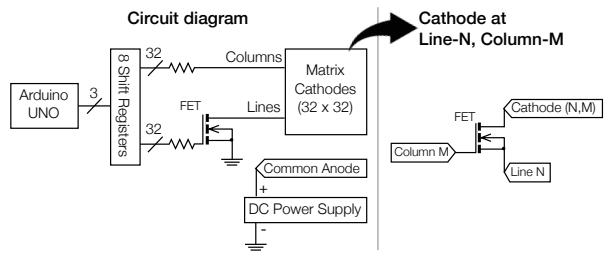


図 6. 回路図。右側に N 行 M 列の配線を示す ($N = 1 \sim 32$, $M = 1 \sim 32$)。

むと、カメラにより顔が撮影され、泡の画素により水面に顔画像の静止画が表示される。水盤の周囲には、覗き込む人の顔を照明するLEDテープを貼り付けた。LEDの光を拡散させるために、LEDテープの上に厚さ3mmのドーナツ型の白い半透明のアクリル板を設置した。

4.2.2 泡生成機構

図4(a)に、電解液が入っていない状態の水盤の底部を示す。関連研究の節で説明したWooden Mirrorの画素数を参考に、 32×32 のマトリクス電極(陰極)を表示のために使用した。そして、マトリクス陰極の周囲に共通陽極を配置した。マトリクス陰極全体のサイズは $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ である。陰極には金メッキピンヘッダ部品を使用し、共通陽極には銅テープを用いた。電解液には、UTAKATAと同様に炭酸水素ナトリウム(0.4% w/v)とコーンスター(0.2% w/v)を添加したインスタントコーヒー(1.5%のコーヒー粉)を使用した。

図6にBubble Mirrorで使用した回路図を示す。任意の電極を接地させることで、その電極が陰極として機能し、水素の気泡を生成する。画素ごとのハードウェアは、先行研究[6]のアクティブマトリクス回路と同様である。一方、先行研究で実装した100画素のバイナリ表示機構では、鮮明な顔画像を表示するには不十分である。そこで本実装では1,024画素に拡張し、これらをパルス密度変調(PDM)することでグレースケール表示を実現した。図6の左

電気分解気泡による流水ティッカー表示と高画素階調表示

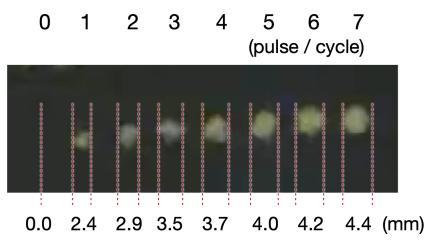


図 7. 各グレースケールレベルにおける実際の泡とその直径。

側に示すように、Arduino の 3 個のデジタル出力端子に 8 個の 8 ビットシフトレジスタを接続し、32 カラム 32 ラインの配線に接続した。Arduino からの制御で MOSFET が活性化すると、各ライン配線は接地される。図 6 の右側に、N ライン M カラムの交点にある 1 画素の表示用電極をスイッチングする回路を示す。マトリクスの各交点は、MOSFET と表示用電極で構成されている。Arduino からの制御で、任意の複数のカラム配線には High または Low の電圧がかかり、32 本のうち 1 本のライン配線が接地する。すると、交点部分の MOSFET が活性化し、接地されたライン配線上の選択された表示用電極が接地する。この過程を 32 本の各ライン配線について繰り返すことで、任意の電極を接地させることができる。接地した電極は電気分解の陰極として機能するため、その電極から水素の気泡が発生し、泡による表示が実現できる。電気分解用の電流を供給するために、安定化直流電源の正の出力を共通陽極に、負の出力を接地に接続した。

Arduino プログラムは、それぞれのライン配線上の任意の複数電極に 10 ms の通電を行う。これを 32 本のライン配線全てに対し行うため、全ラインを走査するために全体で 320 ms の時間を要する。電気分解電流の PDM 制御により 8 段階のグレースケール表示を実現するため、320 ms の全ライン走査を 7 回繰り返すプログラムを作成した。この 7 回の走査において、グレースケールのレベル N(0~7) に割り当てられた電極に対して N 回（合計 $N \times 10$ ms）通電するようプログラムした。したがって、1 画面の描画には 7 回の走査（所要時間は 2.2 秒）が必要であり、本ディスプレイのリフレッシュレートは 0.45 Hz となる。図 7 に、陰極への通電を PDM 制御し、生成した泡を示す。図の上部の数字はリフレッシュサイクル中に各電極に印加した電流のパルス数を表す。

4.2.3 顔画像処理

PC 上の Processing プログラムが訪問者の顔を撮影し、その画像を 32×32 画素の 8 段階グレースケール画像に変換する。まず、本システムの前に設置されているフットスイッチの上に人が立つと、カメラが顔を撮影し、顔認識を行う。顔認識ライブラリには OpenCV for Processing を使用した。次に、カメラフレームの中心付近で検出された顔画像を 100

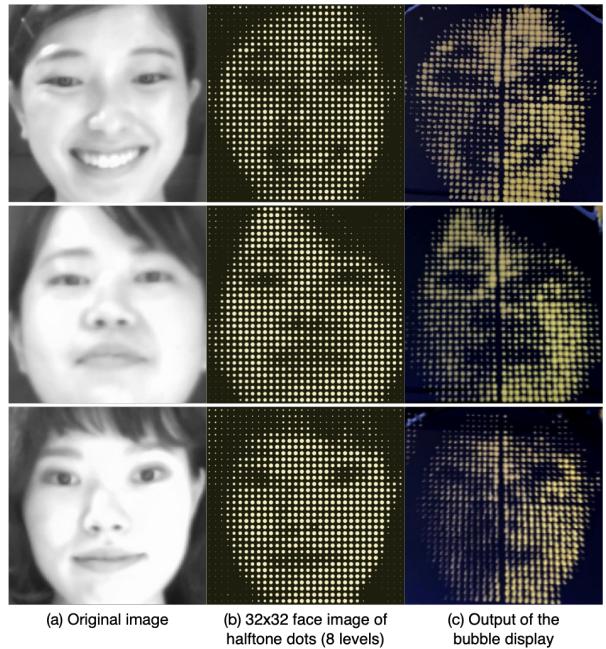


図 8. (a) 顔認識で取得した顔画像. (b) 32×32 画素の網点画像 (8 段階) (c) 実際の泡による表示。

ms 以上の間隔で 5 枚保存する。保存した画像は 256 階調の 32×32 画素の画像に変換され、その中からブレのない最適な画像を選択する。ここでは、コントラストが最大となる画像（隣接画素間における、画素値の差の絶対値の合計が最大となる画像）を最適画像と判断した。最適画像の各画素値は降順ソートされたのち 8 区画に分けられ、各区画ごとに 8 段階のグレースケール値が割り当てられる。結果として、32×32 画素の 8 段階グレースケール画像が生成できる。この画像データを PC から Arduino に送信し、Arduino がこれに応じて PDM の調節をし各電極に通電することで、グレースケールの泡表示を実現する（図 8）。

5 表示特性と評価

5.1 UTAKATA

図 1 は四文字のアルファベットと四個の記号をそれぞれ表示した例である。このとき、20 V の電圧を印加し、各電極に流れた電流値は約 23 mA であった。また、表示領域の水位は約 4 mm であった。陰極の間隔が 7.6 mm であるため、垂直方向の表示画素密度は約 3 dpi であった。泡による画素は直径約 5 mm であり、中央の泡の流速は、陰極付近で約 1.3 cm/s であった。図 9 に、水流による泡文字の時系列変化を示す。本システムは 25 cm の表示領域幅（陰極から排水部までの長さ）を持つ。画素の直径が約 5 mm であることから、横幅 5 ドットの文字であれば、隣接する画素との間隔を 5 mm 以下に設定することで、最大 5 文字まで同時観察可能であった。

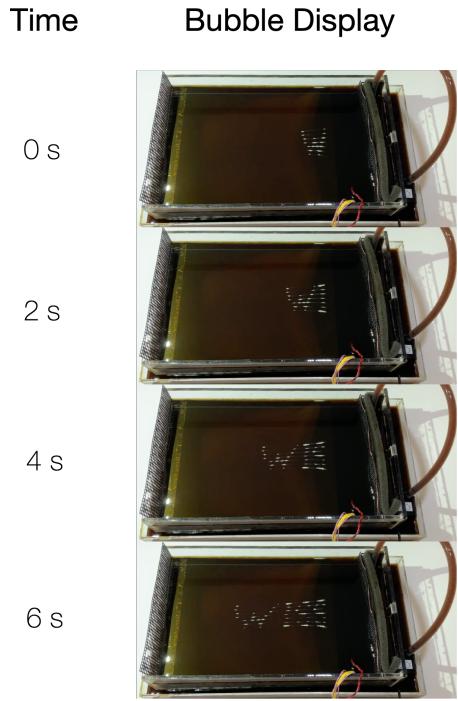


図 9. 泡文字「WISS」が流れながら表示されている。上から下に向かって、「W」、「WI」、「WIS」、「WISS」と表示されている。

5.2 Bubble Mirror

マトリクス陰極全体のサイズが約 16 cm × 16 cm であるため、表示画素密度は 5 dpi であった。鮮明な表示を得るために必要な電解液の水位は約 1 cm であり、このとき印加した電圧値は 30 V であった。全体として約 300~400 mA の電流が使用され、通常の使用では約 12 W の電力を消費する。

Bubble Mirror の Black-to-light-gray (BTG) 応答時間と White-to-dark-gray (WTG) 応答時間を測定した。先行研究 [6] と同様に、0 % gray to 80 % gray 時間を BTG 応答時間とし、100 % gray to 40 % gray 時間を WTG 応答時間とした。測定のために、Bubble Mirror にグレースケールレベル 7 の泡を 1 画素のみ表示し、これをビデオカメラで記録した。このとき、泡表示のために必要な電圧値は 30 V で、電流の平均値は 1.2 mA であった。結果としては、BTG 応答時間は約 4 秒、WTG 応答時間は 1 分以上必要であった。WTG 応答時間は長いものの、体験者の痕跡が残留することで、本システムのコンセプトを他の鑑賞者に伝える効果もあると考えている。WTG 時間がユーザ体験に影響を与えるようであれば、ディスプレイに電動ファンを取り付ける、体験者自身に水面に息を吹きかけて泡を消してもらう指示をするなどの手段を検討したい。

6 議論と今後の課題

本研究では、UTAKATA の装置の排水部にスリットとメッシュを配置した。しかし、スリット間の壁

やスリット下端の凹凸が均一な流れを妨害している可能性がある。より歪みを軽減して表示品質を高めるため、排水部の設計を改善する予定である。

Bubble Mirror の動作を確認するため、著者ら 3 名（うち 1 名は UTAKATA 担当著者で Bubble Mirror は初体験）が使用体験した。この結果、泡による顔画像が自身の顔であると容易に認識できた（図 8）。また、予想以上に気泡の出現が速いことが確認され、BTG 応答時間が十分短いことを裏付けた。今後はより多くの人に体験してもらい、フィードバックをもとに装置の改善を行う。

参考文献

- [1] J. Bobrow. H₂ Bubble Display. <http://cargo.jonathanbobrow.com/Bubble-Display>, 2012.
- [2] T. Döring, A. Sylvester, and A. Schmidt. A Design Space for Ephemeral User Interfaces. In *Proc. of TEI '13*, pp. 75–82, 2013.
- [3] J. M. Heiner, S. E. Hudson, and K. Tanaka. The Information Percolator: Ambient Information Display in a Decorative Object. In *Proc. of UIST '99*, pp. 141–148, 1999.
- [4] S. Hirayama and Y. Kakehi. Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles. In *Proc. of SIGGRAPH '10*, pp. 1–1, 2010.
- [5] A. Ishii, M. Fukushima, N. Tanaka, Y. Matoba, K. Ikematsu, and I. Siio. Electrolysis Bubble Display based Art Installations. In *Proc. of TEI '21*, to appear in February 2021.
- [6] A. Ishii and I. Siio. BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. In *Proc. of UIST '19*, pp. 619–623, 2019.
- [7] K. Kumagai, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki. Volumetric bubble display. *Optica*, 4(3):298–302, 2017.
- [8] M. Nakamura, G. Inaba, J. Tamaoki, K. Shiratori, and J. Hoshino. Mounting and Application of Bubble Display System: Bubble Cosmos. In *Proc. of ACE '06*, 2006.
- [9] J. Popp. Bit.Flow. <https://vimeo.com/22390871>, 2011.
- [10] J. Popp. Bit.Fall. <https://www.ludwigmuseum.hu/en/news/julius-popp-bitfall>, 2016.
- [11] D. Rozin. Wooden Mirror. <http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>, 1999.
- [12] S. A. Seah, D. Martinez Plasencia, P. D. Bennett, A. Karnik, V. S. Otrocol, J. Knibbe, A. Cockburn, and S. Subramanian. SensaBubble: A Chrono-sensory Mid-air Display of Sight and Smell. In *Proc. of CHI '14*, pp. 2863–2872, 2014.
- [13] A. Sylvester, T. Döring, and A. Schmidt. Liquids, Smoke, and Soap Bubbles: Reflections on Materials for Ephemeral User Interfaces. In *Proc. of TEI '10*, pp. 269–270, 2010.

パーティの集合体を利用した半幅帯のための帯結び形状デザインツールの提案

坂本 あゆみ* 五十嵐 悠紀*

概要. 半幅帯とは、女性のカジュアルな着物および浴衣に合わせて用いる帯であり、多様な帯結びが存在する。本稿では半幅帯に注目し、半幅帯の帯結びを1本のつながったものではなく、パーティの集合体として扱うというアイデアをもとに、3つの提案を行う。第一に、帯結びをデータ化して扱うシステムとして、パーティの組み合わせによって帯結びの形状データを作成する帯結びエディタを提案する。第二に、実世界において、パーティの組み合わせによってさまざまな帯結びに変えられる帯、「組み替え帯」を提案する。第三に、第一の提案である帯結びエディタによって作成したデータから第二の提案である組み替え帯を組み立てるための支援として、帯結びの形状データをもとに、実際に組み換え帯で作成する際のパーティ対応とパーティのたたみ方などを示すソフトウェアを実装し、構造図の計算手法を提案する。

1 はじめに

半幅帯(細帯とも呼ばれる)は女性の和服帯の一種であり、お洒落着の着物・浴衣などに合わせて用いる帯である。カジュアル向けで決まりごとがあまりなく自由度が高い。幅15~18cm、全長360~440cm程度の長方形で、その長さを利用してさまざまな形状に結ぶことができる[1]。既存の帯結びにアレンジを加えることや、オリジナルの創作結びをすることも可能なため、帯結びの種類は数に限りがない。

本稿では、半幅帯の帯結びをパーティの集合として考え、3つの提案を行う。第一に、半幅帯における帯結びでよく使われる形をパーティとして用意しておき、それらを組み合わせることによって、帯結びの形状データ(以下、帯結びデータ)を作成するシステムである、帯結びエディタ(図1a)を提案する。第二に、帯結びをパーティの集合として扱うアイデアを実際の帯に適用し、パーティを組み合わせることによってさまざまな帯結びに変えられる帯、組み替え帯(図1b)を提案する。第三に、帯結びエディタで作成した帯結びデータをもとに組み替え帯を組み立てて、データと同じ帯結びを作るための支援システム(図1c)と、その構造図の計算アルゴリズムについて提案する。これらの提案を用いることによって、和服文化の保存と活用を目指す。

2 半幅帯の帯結び

半幅帯の帯結びについては、明確な規則や基準があるわけではない。同じ形状の帯結びでも人によって呼び方が異なったり、逆に呼び方が同じでも表す形状が人によって違ったり、名称が定まっていない

帶結びもある。形状・構造からいくつかの系統に分類して考えることができるが、その系統の種類と属する帶結びの分け方についても、個人差がある。本稿では、できるだけ複数の文献に採用されているものを優先する。

本稿で用いる、帯結びに関する用語および帯結びの種類と系統を以下に示す[1][2][3][4][5]。

■ 用語

- ・羽根：本稿では、横方向に飛び出る部分。
- ・お太鼓：結びを縦にくるむような形の部分。

■ 帯結びの種類と系統(図2)

- ・文庫系：文庫、花文庫、一文字、片流しなど。半幅帯の帯結びの中では最もベーシックな形で、バリエーションも多い。帯の一端を折りたたんで羽根とし、もう一端で中心を留めるという形状。
- ・リボン系：リボン返しなど。文庫系と外見はよく似ていて、どちらもリボンのような形だが、リボン系として分類する場合はいわゆる蝶々結びをベースとしたものを指すことが多い。
- ・角出し系：割り角出しなど。角のような小さい羽根を覆うようにお太鼓を巻き付けた形。
- ・貝の口系：貝の口、矢の字、サムライ結びなど。背中に沿うような平らで左右非対称な形。
- ・その他：レイヤー結び、カルタ結びなど。似通った帯結びが少なく系統として分類するのが難しいものもある。構造ではなく見た目のみで分類する場合もある。

3 関連研究

和服を対象とした研究に、Sano らによる浴衣デザインシステム[6]がある。袴丈や身頃といった身体

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学

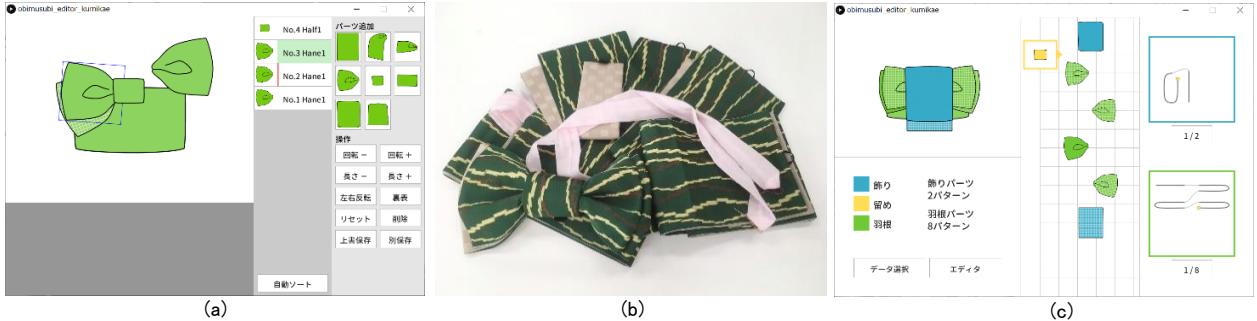


図 1 本論文の 3 つの提案. (a) 帯結びエディタ, (b) 組み替え帯, (c) 帯結びデータを用いた組み替え帯組み立て支援システム.



図 2 半幅帯の帯結びの例.

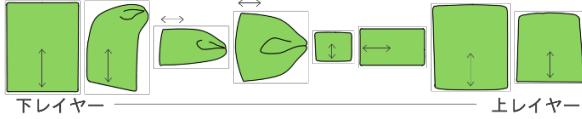


図 3 エディタパーツの一覧.
図中の矢印は長さ調節の方向を示す.

のサイズを入力し、テクスチャパターンを選択するだけで初心者でも簡単に浴衣を仕立てることができることを目指している。また、どのように反物(着物生地)を裁断すると、どのような着物の柄の出方になるかのパターンの配置を事前に検討するシステム[7]などが提案されている。伊藤らは対話型遺伝的アルゴリズムを用いて和服のカラーコーディネートを支援している[8]。田口らは着物の仮想試着システム "MIRACLE"を提案している[9]。

帯を扱った研究としては、奥山らの円筒バーコードを利用した和服帯の AR 試着システム[10]が提案されている。帯のモデル形状は文庫結び 1 種類をスキャンして用いている。

さらにベクトルデータで描かれたグラフィックスに対してレイヤー構造を扱う手法として、平面上に折り重なっておかれた布や紐などの柔軟物体の重なり順を、簡単に変更することのできるインタラクション手法[11]がある。重なり方をレイヤーのように扱う点は共通するが、本提案では和服帯の結びに特化した重なり方の表現と構造図の計算を行っている。Entemらは、ベクタグラフィックスの外形から単純なパーツの集合に分解して構造化し、レイヤー構造

を使って表現することを行った[12]。本提案ではデータをパーツに分解するのではなく、元々パーツ情報の集合でデータが表現されているという点で異なっている。

4 帯結びエディタ

半幅帯の帯結びの種類をデータ化して扱うシステムとして、帯結びデータを作成するソフトウェアを、Processing を用いて実装した(図 1a)。帯結びにあらわれる形をパーツとして扱い、その組み合わせによって帯結び形状を作成するエディタである。

エディタパーツは現状で 8 種類あり(図 3)、パーツの追加・削除のほか、それぞれに移動・回転・長さ調節・左右反転・裏表・重ね順の操作が可能である。長さ調節の方向はパーツによって縦または横が設定されている。パーツの種類や状態の情報および外形の画像を帯結びデータとして記録する。

データを作成する際の補助機能として、パーツの位置チェックと重ね順の自動ソートを実装した。パーツの位置チェックでは、各パーツの基点となる頂点が一定範囲内(胴に巻いた部分の上部中央付近)に入っているかどうかを確認し、範囲外にある場合はユーザに修正を促す。データを作り始めるときの、位置の基準として参考にすることができる。外見デザインに影響するため自動での修正はしない。重ね順については、パーツの種類によって順序が決まる(図 3)ため自動でソートが可能であり、これはシステムが修正することとした。アルゴリズムはバブルソートを用いた。羽根にあたるパーツは、蛇腹に折ることを想定して左右交互になるようソートするため、パーツの種類と重ね順の関係が図 3 で示した順番と前後する場合がある。羽根以外で同種のパーツが複数ある場合の重ね順はユーザが決定する。

帯を結ぶ際の手順ではなく、できあがった状態の帯結びの外形を対象としてデザインしていく。帯結びをデータという形で表現することにより、帯結びの種類をコンピュータ上で管理することが可能になり、保存・読み出し・編集や他システムとの連携が

パーツの集合体を利用した半幅帯のための帯結び形状デザインツールの提案

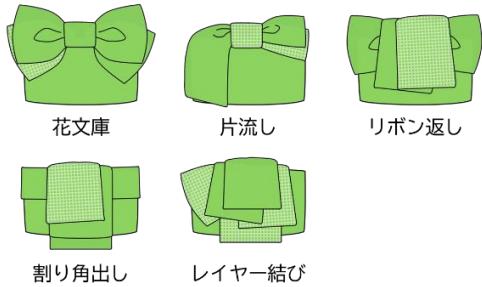


図 4 帯結びデータ作成例.

期待できる。エディタの対象ユーザは帯結びに関する知識のある人とし、帯結びデータについては、知識の有無に関わらず、初心者を含んだ全ての人の利用を想定している。

エディタで作成した帯結びデータの例を図 4 に示す。帯結びの種類としては、文庫系、リボン系、角出し系を中心に、一部その他の系統や系統に属さない帯結びも作成できる。帯以外の小物を使わないと結べない帯結びについても、帯の形状のみであれば表現できるものがあるが、小物の位置などには対応していない。貝の口系のように用意されたパーツにない形状を含むもの、パーツの重なりが複雑なものでは表現できない。

帯結びデータの利用シーンとしては以下のようないものが考えられる。コーディネートシステムへ導入して、帯結びの違いによる後ろ姿の印象の変化を確認する。着付けの際に着付けする側が帯結びを提示して、される側がそれに対し意見を言うなど、リアルタイムで手を加えながら互いにイメージを伝える。また、帯結びデータをもとに組み替え帯を組み立てるための支援については後述する。

5 組み替え帯

4 章の帯結びエディタでも用いた、「帯結びをパートに分解して考える」というアイデアを基に、パートを組み合わせてさまざまな帯結びにできる帯「組み替え帯」を提案する(図 1b)。

既存の商品として、作り帯と呼ばれる、結び部分がすでに形成されており紐などで留めて着用するものがある。通常の帯が結べなくても手軽に着用できるが、市販の作り帯は、帯結びそのものを変更することはできない。組み替え帯は、帯結びをパートごとに分解・再形成することで、帯結びが成形された状態で着用できるという利点を保つつつ、異なる種類の帯結びを表現できる。

5.1 製作

組み替え帯は、前帶、羽根(大・小)、留め(表柄・裏柄)、飾り(大・中・小)のパートからなる(図 5)。使うパートの組み合わせや各パートの折りたたみ方な

どを変えることによって、さまざまな種類の帯結びを作ることが可能である。製作に際して、市販の作り帯(文庫系 2 種類)を分解観察し、参考にした。

材料として、市販のポリエステル半幅帯(同柄 2 本)、腰紐、スプリングホック、ボタン、紐(ボタンループ用)、布用接着剤、縫い糸を使用した。装着には腰紐や着物クリップを使用する。

羽根パートは羽根の長さや枚数を変えられるようひとつながりになっており、留めパートにはスプリングホックとボタン、飾りパートにはボタンループがついている。留めパートはボール紙を芯として、上下は紐を通すため輪になっている。各パートはリバーシブルの帯を用いて作成し、留めパート以外はリバーシブルで使用できるようにした。留めパートは片面の柄しか出せないが、表柄のものと裏柄のもの 2 つを用意し柄を選択することとした。

5.2 使い方・使用例

組み替え帯の基本的な使い方を図 6 に示す。

① 羽根を折りたたむ(図 6a,b)

羽根の長さと枚数を調節しながら、羽根パートを折りたたみ、ひだをとる。蛇腹に折ることで重なった羽根を作ることができる。

② 羽根に留めパートをつけて紐を通す(図 6c,d)

ひだの部分を留めパートで押さえてホックを留める。留めパートの輪に腰紐を交差させながら通す。

③ 飾りパートをつけ、結びの形を整える(図 6e,f)

飾りパートのボタンループを留めパートのボタンにかけ、飾りパートを巻く・垂らす、羽根を広げるなどして形を整える。必要であれば着物クリップや洗濯ばさみで一時的に固定する。飾りパートを使用しない帯結びもある。



図 5 組み替え帯パート一覧.

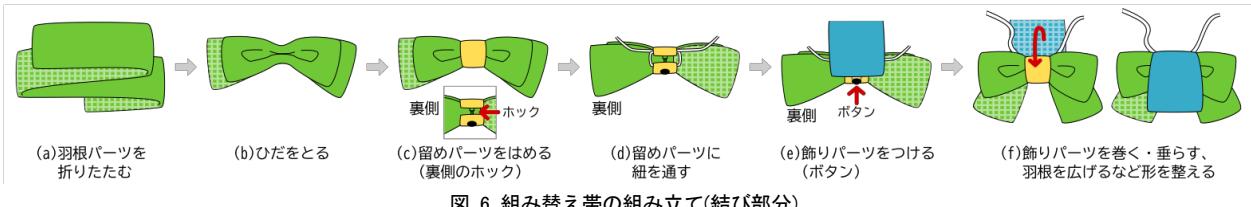


図 6 組み替え帯の組み立て(結び部分).

④前帯を巻き、結び部分を紐で留める

胴体に前帯を巻き前帯の紐を結んで、紐は帯の中に押し込んで隠す。前帯全体を時計回りに回して巻き終わりの位置を調節し、袖や結び部分で隠れるようにするか、後ろに回し斜めに折り上げることで通常の帯を結んだときに似せる。背中に結び部分をあてて前で紐を結び、紐を前帯に隠す。クリップなどを使っていたら外す。

組み替え帯で作れる帯結びの例を図 7 に示す。主に、①での羽根パーツのたたみ方と③での飾りパーツの有無や形によってさまざまなバリエーションが作れる。先述した使い方は文庫系の帯結びが中心となっているが、構造は異なるものの、リボン系や角出し系(ひだのある羽根ではなく幅を半分に折った羽根を使う)は、文庫系のような構造で外見の似たものを作ることはできる。また、先述した基本の使い方とは異なる手順や小物を用いて、一部特殊な形状の帯結びを作ることも可能である。

初心者にとって、組み替え帯を用いることで通常の半幅帯を結ぶよりも手軽に、かつ既存の作り帯よりも多様な帯結びを楽しめる。組み替え帯は、通常の帯を結ぶのに近い要素も含んでおり、帯結びの構造を多少考える必要があるため、帯を結べるようになりたい人の第一歩としても使えるのではないかと考えている。上級者は、帯結びに関する知識がある分基本の使い方にとらわれず、幅広いバリエーションの帯結びを組み替え帯で作ることが可能である。このように、組み替え帯は、通常の半幅帯と既存の作り帯との中間に位置するものといえる。

6 帯結びデータを用いた組み替え帯の支援

6.1 組み立て支援ソフトウェア

帯結びエディタで作成した帯結びデータをもとに、組み替え帯で同じ形を組み立てるための情報を提示するソフトウェアを作成した(図 1c)。実装には Processing を用いた。

帯結びデータを構成するエディタパートに対して、組み替え帯パートがどのように対応するかをそれぞれ色分けして表示するとともに、羽根パートと飾りパートをどのようにたためばよいかという構造図を提示し、組み立て支援を行う。画面左下に色分けの凡例と構造パターン数を示しており、あてはまる構



図 7 組み替え帯の使用例.

造パターンがひとつもない場合には、不可能である旨を表示する。構造図の計算はリアルタイムに稼働し、エディタと組み立て支援の画面を行き来して帯結びデータを編集しながら構造図を確認することも可能である。また、データ中に羽根パートがあるのに留めパートがない場合、留めパートが入るべき重なりの位置に留めパートを挿入する提案を行う。5.2 節で述べた基本の使い方に準じているため、帯以外の小物を使う場合の小物の位置や、羽根パート・留めパートにあたる形状が使われない帯結びの組み立て方法には対応していない。

6.2 構造図の計算

帯結びデータの各パートを、種類と角度に応じて、組み替え帯における各パートに振り分ける(図 8)。飾りパートと羽根パートそれぞれについて、以下のように構造図の計算を行う。

各エディタパートは、図 8 上段のように方向をもつ構造モデルで表す。飾りパートについて左が手前(胴体から遠く、重ね順が上の方)、羽根パートについて上が手前として、パート断面の構造を表したものである。このとき図 8 の赤い点線で示した側の柄が結んだとき外から見える。折り返す・折り返さないの 2 種があるパートは折り返す方が基本であり、折り返さない方は構造パターンの結果で帯の端に該当した場合に使用する。帯結びデータに含まれるパートの構造モデルを並べ、始点と終点に通し番号をふる(図 9)。パートの数と種類に応じて探索の開始点をいくつか定め、すべてのパートがひとつながりになるよう 2 つずつ点を結ぶ接続のパターンを探索し、裏表と交差の条件にあてはまつものを残す。

裏表の柄の出方は、2 パートの構造モデルを接続したときの方向で確認することができる。

- 順方向の接続(始点-終点): 2 つのパートは同じ柄
- 逆方向の接続(始点-始点, 終点-終点): 違う柄

接続するパートが 3 つ以上ある場合、接続の線が交差してしまうと、実際の帯でその形を作ることは

パーティの集合体を利用した半幅帯のための帶結び形状デザインツールの提案

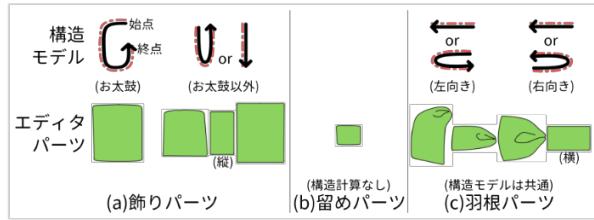


図 8 パーツの振り分けと構造モデル.

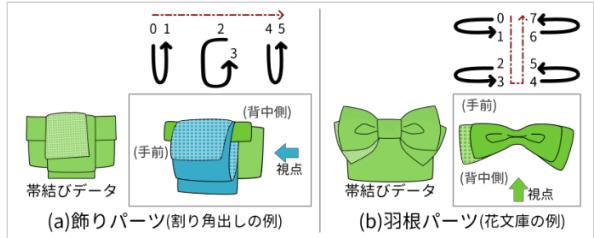


図 9 構造モデルの点番号の例.

できない。構造モデルにおいて、通し番号をふった始点・終点は一直線に並んでいるとみなすことができる(図 9 の赤い点線矢印)。任意の 2 本の接続に対し、接続した点をそれぞれ, p_1, p_2, q_1, q_2 ($p_1 < p_2, q_1 < q_2, p_1 < q_1$) とすると、 $p_1 < q_1 < p_2 < q_2$ のときに交差が発生する(図 10)。ただし、お太鼓にあたるパーティが複数ある場合は、重ね順が上のお太鼓で下のお太鼓を包み込むため、点の位置が前後する。

裏表と交差の条件で残った各パターンに対し、以下のようないくつかの基準で評価値を設定する。その後、構造パターンを構造図として描画し、評価値の高いものから順にユーザに提示する。

■ 羽根パーティ

- 左向きと右向きを接続していればプラス
- 同じ向きのものを接続していればマイナス

■ 飾りパーティ(図 11)

- 終了点(留めパーティと接続しない方の端)が上向きになつていればマイナス
(留めることが難しい可能性がある)
- 開始点(留めパーティと接続する方)の上をまたぐような接続であればプラス
(帯以外の小物を使わずに済む可能性が高い)

6.3 通常の半幅帯に対する構造図の応用

本稿では組み替え帯の組み立てを想定して構造図を求めていたが、通常の半幅帯で結ぶ際にも、部分的に構造図を適用できる場合がある。羽根パーティの構造図は文庫系を結ぶときの羽根のたみ方として見ることができる。ただし、通常の帯であれば一端は胴に巻いた部分とつながっているため、胴に最も近い点(図 9b 上段における 3 番と 4 番)以外を開始点とするようなパターンは採用できない。飾りパーティの構造図は、飾りパーティに相当する部分を、帯の片方の端で作る場合に適用できる。蝶々結びにした

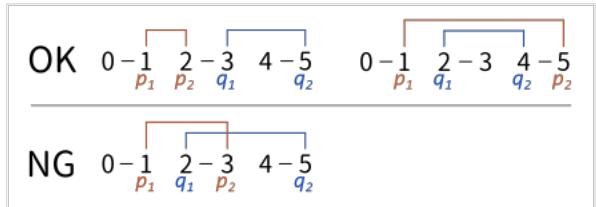


図 10 交差判定の例.

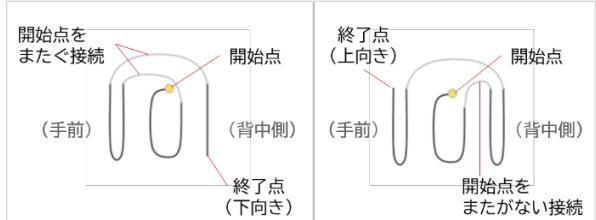


図 11 飾りパーティ構造図の例(割り角出し).

左：評価値の高いパターン、右：低いパターン。

あとの両端を用いてお太鼓を作る、などのような場合には、本稿の構造図を用いることはできない。

構造図を参考にしながら通常の半幅帯を結ぶことによって、部分的なアレンジを簡単に施すことが可能になると考える。例えば書籍に載っている帶結びの、裏表の出方を変更して結びたい、パーティをひとつ追加した形にして結びたい、といった場合に利用することができる。

7 専門家からのコメント

本提案システムについて和服の専門家からコメントをいただいた。まず、パーティという概念でデザインを施していくアイデアはとても良いとの意見をいただいた。また、通常の作り帯では決まった 1 つの形状だけの着こなしであるが、本稿で提案した組み換え帯を使うことで羽根や飾りの部分にアレンジを施すことが可能であり、従来の帯を結ぶアレンジの楽しみと作り帯の手軽さの両方を備えている点も魅力だとのことであった。

また、現状では多くの種類がある帶結びについても伝承は問題点であり、データベース化などはできていない。本システムを使うことでデータベース化していくことも魅力の 1 つであるとし、自らデザインせずとも、データベースの中から好きな形状を選んで作ることができる点も評価していただいた。

一方で、一般ユーザーの立場からこういったニーズがあることは理解できるとしながらも、業界としては通常は帯を切ったり貼ったりすることはあまりしないため、一般ユーザーに対して組み換え帯そのものを商品化して販売するといった展開よりも、一般ユーザー自身が半幅帯を購入して、自分で組み換え帯を制作して楽しむといった展開のほうが期待できるのではないかとご意見をいただいた。そういう観点

からも和服業界の中でもカジュアルな世界と相性がよく、カジュアルに用いられる半幅帯を対象としたことは本提案の良さの1つであると述べていた。

和服業界では帯をつくる帯屋、着物をつくる機屋(はたや)、小売り屋、着付け屋と分業化しているが、その中でも、着付け屋や帯屋などと組むことで、デザインツール、制作支援ツールおよび作り方や装着方法を解説した動画と組み合わせた展開を今後検討できるのではないかといったご意見をいただいた。

8 まとめと今後の課題

本稿では、半幅帯の帯結びをパートの集合として考え、3つの提案を行った。第一に、半幅帯の帯結びデータを作成できる帯結びエディタを提案した。第二に、パートの組み合わせによってさまざまな帯結びに変えられる帯「組み替え帯」を提案・製作した。第三に、エディタで作った帯結びデータをもとに組み替え帯を組み立てるための支援ソフトウェアを実装し、パートの対応表示とたたみ方の提示のためのアルゴリズムを考案した。

今後、これらのツールを用いて帯結びの形状の記録および再現を行うことで、後世に知見を残していくように記録し和服文化の保存を目指す。

さまざまな帯結びについて、基本的な情報やエディタで作成した帯結びデータ、通常帯での結び方や組み替え帯での組み立て方などを絡めて、高齢化している和服着付け師のこれまでの知見なども記録するようなデータベース化を視野に入れている。試験的にscrapboxで帯結びに関する情報を集めたページを作成した(図12)。書籍にしか掲載されていない帯結びを取り上げるのが難しいといった欠点もあるが、タグなどによって関連を示せるなど、有用な点も多い。そのほか、帯結びデータ同士の外見や構造図の類似度を計算することによって、例えば2,3種類の帯結びだけ結べるというユーザに対し、少しアレンジすれば違う帯結びも結べるといった提案を行うことが可能になる。初心者が帯結びの構造や系統について理解するための助けになると考えられる。構造図の計算を拡張し、通常の帯へ適用することも

有用である。今回は半幅帯を対象に行ったが、様々な帯の種類に発展させたいと考えている。

本研究を起点として、和服や帯結びをより身近に感じられるようなサービスが生まれることを期待している。

謝辞

本研究はJSPS科研費17K12731の助成を受けたものである。ご意見をいただいた、三勝株式会社代表取締役社長 天野豊様に感謝する。助言をいただいた中島萌子氏、越後宏紀氏に感謝する。

参考文献

- [1] 大竹恵理子(2014)『半幅帯の本』、河出書房新社。
- [2] 着物屋くるり(2015)『着物の楽しみが広がる 帯結びアレンジ帖』、池田書店。
- [3] オハラリエコ 監修(2016)『ふだん着物のらくらく帯結び 半幅帯と兵児帯』、世界文化社。
- [4] 野口倫子(2018)『気軽に便利！ 半幅帯結び 楽しみ帖』、池田書店。
- [5] 池田節子 監修(2018)『5分で結べる！ 簡単らくらく半幅帯のお洒落』、世界文化社。
- [6] Sano, T., et al. (2007). Design Support System for Japanese Kimono Using Mobile Phone. 2007 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, pp. 404-407.
- [7] Sano, T., et al. (2005). Adaptive Texture Alignment for Japanese Kimono Design. 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, vol.2, pp. 1307-1310.
- [8] 伊藤亜世, 他. (2013)「対話型遺伝的アルゴリズムを用いた和服のカラーコーディネートに関する研究」, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2013A(0), pp. 781-782.
- [9] 田口哲典, 他. (2002)「"MIRACLE"システムのための布形状認識の一検討」, 映像情報メディア学会技術報告, 26.82(0), pp. 55-58.
- [10] 奥山瑞希, 他. (2017) 「M系列円筒バーコードとAR和服帯試着システムへの応用」, 第25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, pp. 17-22.
- [11] Igarashi, T. and Mitani, J. (2010). Apparent Layer Operations for the Manipulation of Deformable Objects. ACM Transactions on Graphics, 29(4), Article No. 110.
- [12] Entem, E., et al. (2018). Structuring and layering contour drawings of organic shapes. Expressive '18, vol.18, pp. 1-14.



図12 半幅帯の帯結びに関する情報をまとめたscrapboxのページ。

Pop-up Print: 双安定な折りたたみ 3D プリント

野間裕太 * 鳴海紘也 * 奥谷文徳 * 川原圭博 *

概要. 3D プリンタは長い造形時間と高価なサポート材消費を課題としている。本稿ではこれらの問題を解決するため、物体を折りたたんだ状態で 3D プリントした後に展開させる手法、Pop-up Print を提案する。この手法により、造形時間に影響する高さと、サポート材消費に影響する体積を減らすことができる。また、展開と折りたたみの動作を繰り返し行うことができ、物体の収納性や運搬性を高められる。本手法を実現するため、本稿ではまず基本的な形状を複数のパラメータを変化させて 3D プリントし、展開された状態での自立安定性への影響を測定した。この結果に基づき、双安定性や 3D 形状の折り線位置をインタラクティブに決定できる設計ツールを実装した。この設計ツールでは、折りたたみ可能な部分や展開時の自立安定性といった非直感的な条件を可視化することで、ユーザが物体の機能性やデザイン性を考慮して折り線位置を決定できるよう支援する。最後に、造形例を複数提示し、本手法の有効性を示した。

1 はじめに

3D プリンタは、高速なプロトタイピングを推進する強力なツールとして近年広く用いられるようになっている一方で、依然として以下の 2 つの課題が残っている。

1. **長い造形時間.** 既存の 3D プリンタの多くは造形時間が長い。例えば図 1a 左に示す徳利は、3D プリンタ (Objet260 Connex3) を用いたところ造形に 10.5 時間を要した。多くの 3D プリンタは一層ずつ造形を行う付加造形方式を採用しており、高さのある物体の造形には特に長時間を要する。
2. **サポート材消費.** 3D モデルに張り出しや中空部分が存在する場合、多くの 3D プリンタはサポート材と呼ばれる素材を物体と一緒に印刷する。しかし、サポート材は造形後に不要になる上に高価である。

これらの課題を解決するため、近年、4D プリント

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学

トと呼ばれる手法が盛んに研究されている。4D プリントは、物体を最終形状よりもコンパクトな状態で造形して造形時間やサポート材消費を削減し、造形後に熱や湿度などの環境的な刺激を与えて最終形状に変化させる手法である [1]。しかし、これらの 4D プリント手法は造形時の形状から最終形状への変形が容易にできる一方で、最終形状から造形時のコンパクトな形状へ戻せない。もし最終形状から再度造形時のコンパクトな状態に戻せる手法があれば、造形時間やコストだけでなく、非使用時の収納性や運搬性を向上できる。

そこで我々は、昆虫の外部器官の作り方に着目した。カブトムシのツノは、蛹の状態では折りたたまれた状態で形成され、体液を押し出すことによってツノの形になる [5]。これと同様に、もし折りたたまれたコンパクトな状態で 3D プリントし、造形後に展開させることができれば、3D プリント時の物体の高さや体積を削減でき、造形時間やサポート材消費を削減できる。さらに、折りたたまれた状態と展開された状態の間の遷移が簡単かつ可逆的にできれば、物体の非使用時の運搬性や収納性を向上できる。

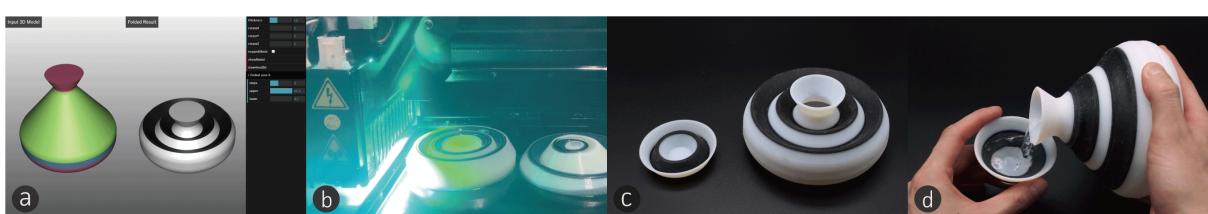


図 1. Pop-up Print の概略. (a) 折りたたまれた形状をインタラクティブに決定できる設計ツールの様子. (b) 折りたたまれた物体を造形する様子. (c) Pop-up Print により造形された徳利と猪口. (d) 造形された徳利から猪口に酒を注ぐ様子.

そこで我々は、折りたたまれた状態で物体を造形し可逆的に展開できる手法である Pop-up Print を提案する。Pop-up Print の実現のため、本研究では以下の貢献を行った。

- 多様な 3D 形状を折りたたまれた状態に変換するためのアルゴリズムの構築
- 折りたたまれた物体の双安定性の定式化
- 折りたたまれた状態に変換できる設計ツールの実装
- Pop-up Print を用いて造形された物体の例示

なお、本研究の成果は [7] で詳説されており、こちらも参考されたい。

2 関連研究

2.1 造形時間とサポート材消費の削減

造形時間とサポート材消費を削減できるデジタルファブリケーション手法はこれまで盛んに研究されてきた。その方法の 1 つが、レーザカッタ [3] やブロックの積層 [9]、バキュームフォーミング [11] といった 3D プリント以外のファブリケーション手法を応用する方法である。これらの手法は 3D プリントと比べ高速かつ安価に実現できる一方で、その最終造形物の表面には凹凸や穴が存在し、滑らかで穴のない表面を実現できていない。

もう 1 つの方法は、物体をコンパクトな形状で 3D プリントし、造形後に変形させるものである。造形前に小さな塊に分解して造形後に人の手で組み立てる手法 [4] はその一例である。さらに、造形後の組み立てを簡略化するため、4D プリントの手法が多くの研究者により研究されている。4D プリントに関する先行研究では、コンパクトなシートの状態で造形し、熱湯 [2] や熱 [1] といった外部の刺激によって最終形状を得ることができる。これらの手法では 3D プリントを用いるため、滑らかで精巧な表面を実現できる。

2.2 変形が可逆なデジタルファブリケーション手法

造形後の形状が 2 つの状態を持ち、片方の状態からもう片方の状態への遷移が可逆なデジタルファブリケーション手法は複数存在する [12][10]。これらの手法は収納性や運搬性の観点から有用である一方、いずれも (1) 滑らかで穴のない曲面を造形できない、(2) 展開された状態に外部からの支持が必要、(3) 折りたたまれた状態から展開された状態への遷移に手間がかかる、という 3 つの課題を抱えている。一方で、本研究は (1) 滑らかで穴のない表面を造形できる、(2) 双安定性により展開された状態で安定するため外部からの支持が不要、(3) 展開する動作が数秒で完結する、という 3 点で優れている。

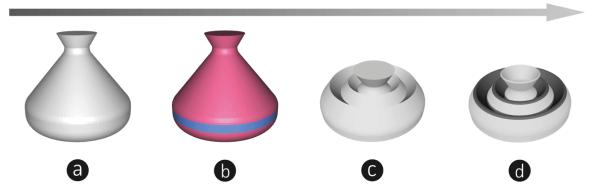


図 2. 折りたたみ処理の流れ。

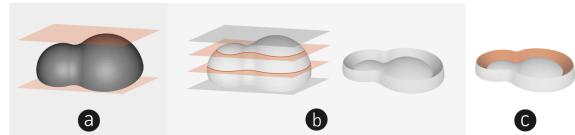


図 3. 鏡映変換の手順。

3 折りたたみのアルゴリズム

3.1 概略

本研究では、所望の 3D 形状を事前に折りたたまれた状態に変換する処理を行う。まず、入力された 3D 形状の表面を抽出する（図 2a）。次に、表面の内折りたたみ可能な先細り形状領域（3.2 で詳説）を検出する（図 2b の赤で示した部分）。次に、折りたたみ可能な領域に対して鏡映変換（3.2 で詳説）を施す（図 2c）。最後に、表面の厚み付けや素材の分割、ヒンジ作成を行い、折りたたまれた状態に変換する（図 2d）。

3.2 鏡映変換による折りたたみ

本研究では、3D 形状の表面の折りたたみに平面での折り返しを用いた。平面での折り返しは、特に折る曲面が可展面（後述）の場合には、3D 形状を折り目の乗っている平面で鏡映変換した結果と同じになる [6]。本研究では、計算や設計の簡単さから、平面による鏡映変換を折り方法として採用した。

図 3 に、3D 形状の表面に平面での折り返しを行う様子を示す。まず、2 平面間にある表面が全て先細り領域（後述）となる平行な 2 平面を選択する（図 3a）。次に、選択した 2 平面間に、平行かつ等間隔な平面を偶数個配置し、それらの平面で鏡映変換を施す（図 3b）。最後に、鏡映変換が平面での折り返しと等価になるよう、折りで裏返った部分を可展面に変換する（図 3c）。

この鏡映変換は、理論的には任意の 3D 形状に対して施すことができる。しかし、折りたたまれた状態で造形した物体は造形後に展開できる必要があることから、折りたたみによって自己交差が発生しないことが必要である。この自己交差を防ぐため、本研究では折りたたみ可能な領域を「先細り形状」に限定した。先細り形状とは、 $z_1 < z_2$ なる z_1, z_2 において、 $z = z_1$ と $z = z_2$ による 3D 形状の切断面

Pop-up Print: 双安定な折りたたみ 3D プリント

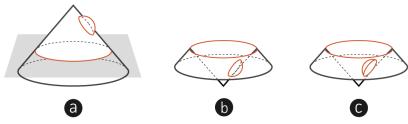


図 4. 非可展面 (a) に鏡映変換を施した結果 (b) と平面で折り返した結果 (c) .

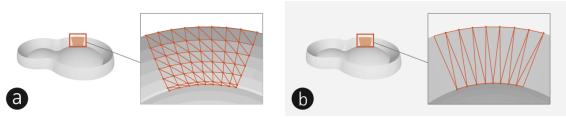


図 5. (a) 非可展面のメッシュ. (b) (a) を可展面に変換した結果.

$\Omega(z_1)$ と $\Omega(z_2)$ が、どのように z_1, z_2 を選んでも、常に $\Omega(z_1) \subset \Omega(z_2)$ (または常に $\Omega(z_1) \supset \Omega(z_2)$) となるような形状である。本研究では、[10] の先細り形状検出法を援用し、ある 2 平面間にあるメッシュの法線ベクトルが全て正 (または全て負) であれば、その 2 平面間の領域は先細り形状であると判定している。

一方で、先細り形状は一般的な 3D 形状には必ずしも含まれない。そこで本研究では、本研究の手法をより多様な 3D 形状に適用するため、形状の一部を先細り形状に変換するアルゴリズムを提案している。詳細は [7] で説明されており、こちらも参照されたい。

また、平面での折り返しと鏡映変換が等価なのは、表面が可展面の場合に限られる [6]。可展面とは、伸縮したり切り開いたりすることなしに一枚の平面上に展開できるような曲面である。例えば、図 4a に示す非可展面を平面で折り返す場合、鏡映変換を施した結果 (図 4b) と実際に平面で折り返した結果 (図 4c) は異なる形状になってしまう。もし可展面であればこのようなミスマッチは発生しないため、本研究では平面での折り返しを施す対象を可展面に限定した。

そこで本研究では、折りたたみによって裏返った部分 (図 3c の橙色部分) を、可展面に変換する処理を行う。図 5 にメッシュを可展面に変換する処理の様子を示す。[8] に代表される可展面変換手法では、図 5a のように内部点を持つ非可展面を、図 5b のように境界にある点のみで構成されるようリメッシュして可展面に変換している。本研究でも同じ方法により可展面への変換を行っている。

3.3 素材とヒンジ

本研究で用いた平面での折り返しでは、折りの過程で面にたわみが発生する [6] ため、折りにより裏返る部分は伸び縮みする柔軟素材で造形しなければならない。一方で、折りにより裏返らない部分は、

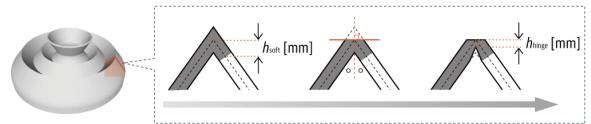


図 6. 素材の境界部分とヒンジの作成手順.

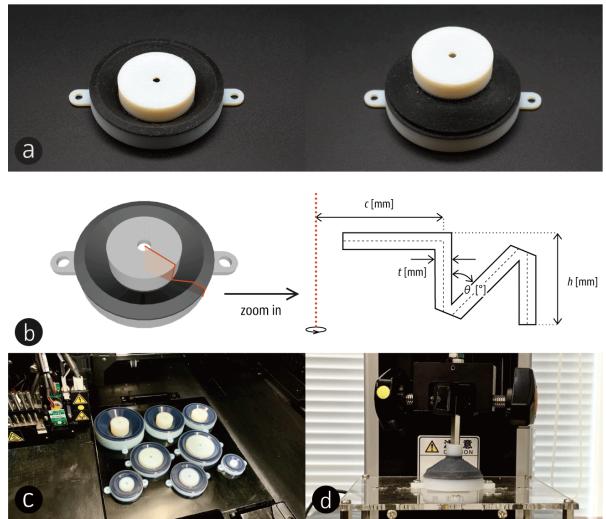


図 7. 双安定性の測定実験の様子. (a) 実験に用いてコップ様の形状. (b) コップ様の形状の形状パラメータ. (c) パラメータを変えて 3D プリントしたコップ様の形状. (d) 測定実験の様子.

耐久性や 4 章で後述する双安定性のためには、硬質素材で造形されることが望ましい。そこで、物体の一部のみを柔軟素材で造形するため、本研究では複数素材を同時に 3D プリント可能なマルチマテリアル 3D プリンタの Objet260 Connex3 を用いた。

図 6 に、厚み付けと素材の分割、ヒンジ作成のパイプラインを示す。まず、鏡映変換を施された表面に対して厚み付けを行う。この時、平面での折り返しの折り目の中心から定数 h_{soft} [mm] だけ離れた箇所に柔軟素材と硬質素材の境界を設けて分割する。次に、ヒンジの頂点の厚みを、ヒンジ部の厚みが半分となるように山側を削り取る。最後に、ヒンジの厚みが定数 h_{hinge} [mm] になるように調整する。このようにヒンジの厚みを薄くすることにより、展開状態と折りたたみ状態の両状態での折り角を実現できる柔軟性と、展開と折りたたみの操作を繰り返せる耐久性を持たせることができた。

4 双安定性の評価

4.1 双安定性

本研究では、折りたたまれた物体は人の手で「押し出す」ことによって展開できる。本研究の手法で

3D プリントされた物体は展開された状態での使用が想定されるため、外部から力を加えずとも自立安定することが望ましい。考えられる方法の1つに、物体の内部に支えとなる柱を設置する方法がある [10]。しかし、[10] の柱は設置に膨大な手数を必要とする上、内部に柱が存在するために容器などの用途で使用するには不便である。

そこで本研究では、支えとなる構造がなくとも、展開された状態と折りたたまれた状態の両方で自立安定となる双安定性を持つよう、最終形状を設計することを目指す。物体が双安定性を持っていれば、折りたたまれた状態から展開された状態に遷移させる操作が、人間が指で押し出すだけで数秒で完結する。

本研究では準備実験として、図 7a に示す物体を 3D プリントし、折りたたまれた状態と展開された状態の両方で安定となることを確認した。そこで、この双安定となる条件を他の多様な形状でも一般化するため、双安定性に与える各形状パラメータの変化の影響を実験により解析した。

4.2 定式化

本手法で造形された物体の双安定性を議論するため、本研究では展開された状態から折りたたまれた状態に戻すために必要な外力を考えた。もしこの外力が十分に大きければ物体は双安定であり、逆に 0 もしくは負の値であれば双安定ではないと判定できる。この外力を形状パラメータを用いて定式化できれば、本手法で造形された物体が双安定かどうかを判定できる。

図 7 に、双安定性に影響を与える形状パラメータを示す。本研究では物体の厚み t [mm]、曲率半径 c [mm]、折りたたまれた部分の高さ h [mm]、折りたたまれた部分の角度 θ [°] の 4 つのパラメータを考慮した。展開された状態から折りたたまれた状態に遷移させるのに必要な外力 F [N] は、これらのパラメータについて 1 次または 2 次であると推測できる ([7] の図 10) ため、 t , c , h , θ についての関数 $f_t(t)$, $f_c(c)$, $f_h(h)$, $f_\theta(\theta)$ 、および定数 K を用いて以下のように表されると仮定した。

$$\begin{aligned} F &= f(t, c, h, \theta) \\ &= K \cdot f_t(t) \cdot f_c(c) \cdot f_h(h) \cdot f_\theta(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

本研究では、 $f_t(t)$, $f_c(c)$, $f_h(h)$, $f_\theta(\theta)$ を定式化することを目的として、以下の実験を行った。まず、特定の形状について 1 種類の形状パラメータのみを変え 3 種類の形状パラメータを固定したものを 3D プリントした。次に、展開された状態から折りたたまれた状態に遷移させるための外力を引張圧縮試験機 (MCT-2150) を用いて測定した。最後に、得られた結果に対してカーブフィッティングを施し、 $f_t(t)$, $f_c(c)$, $f_h(h)$, $f_\theta(\theta)$ を得た。

表 1. 実験に用いたパラメータの一覧。

t	1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3
c	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25
h	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22
θ	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65

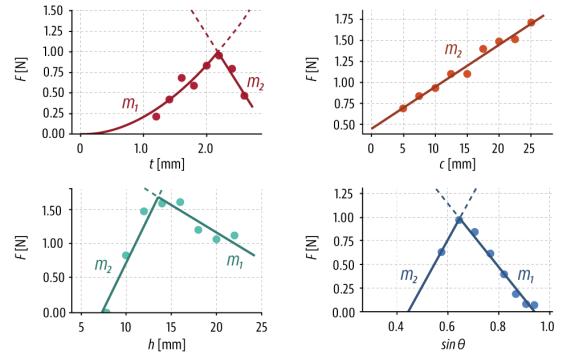


図 8. 測定結果。

4.3 実験

実験ではまず、コップ様の形状の 4 つの形状パラメータの内 1 つのパラメータのみを変えて 3D プリントした (図 7c)。この実験では $t = 2$ mm, $c = 15$ mm, $h = 10$ mm, $\theta = 45^\circ$ を基本形状とし、測定のためその内 1 つの変数のみを表 1 に示す値に変えて計 37 個の物体を 3D プリントした。

次に、展開された状態から折りたたまれた状態への遷移に必要な最大の外力を測定した (図 7d)。この実験では 15 回遷移を測定し、その平均値を採用した。

図 8 に結果を示す。[7] に詳説した関数によりフィッティングした結果は以下のようになった。

$$\begin{aligned} f_t(t) &= \min\{0.22t^2 - 0.020t, -0.63t + 2.2\} \\ f_c(c) &= 0.0050c + 0.45 \\ f_h(h) &= \min\{-0.080h + 2.8, 0.27h - 2.0\} \\ f_\theta(\theta) &= \min\{-3.4 \times \sin \theta + 3.2, 4.9 \times \sin \theta - 2.2\} \\ K &= 2.6 \\ F &= f(t, c, h, \theta) \\ &= K \cdot f_t(t) \cdot f_c(c) \cdot f_h(h) \cdot f_\theta(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

この式を用いて、所望の形状の形状パラメータを代入して計算した値がもし正であれば双安定、負であれば双安定でないと判定した。

5 設計ツール

本手法を用いて所望の形状を折りたたまれた形状に変換する際には、折りたたみ可能な先細り領域や

Pop-up Print: 双安定な折りたたみ 3D プリント

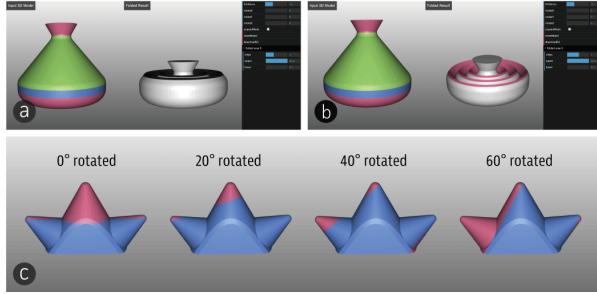


図 9. 折りたたみ形状を決定するための設計ツールの様子。

双安定性の有無といった、人間にとて非直感的な事項を把握する必要がある。一方で折り目の位置の決定には、その物体の使われ方やデザイン性も考慮する必要があり、それらは人間の得意とするところである。そこで、人間とコンピュータが協調して折りたたみ形状を決定できるようにするために、本研究では以下の 2 要件を実現するインタラクティブな設計ツールを実装した。

1. 折り目の数、厚み、折り平面の向きといったパラメータを探しながら決定できる
2. 折りたたみ可能な部分や双安定性をリアルタイムで表示できる

図 9 に、実装した設計ツールの動作する様子を示す。この設計ツールは STL ファイルを入力すると、画面左側に入力形状、画面右側に折りたたみのシミュレーション結果が表示される（図 9ab）。左側に表示されている 3D 形状の表面の内、赤色部分は 3.2 で説明した先細り形状部分、青色部分は先細り形状でない部分、緑色部分はすでに折りたたみ済みの領域である。もしユーザが赤色部分をクリックすると、平行で等間隔に配置された平面によりその部分を鏡映変換した結果が画面右側に表示される。画面右端には（1）物体の厚み、（2）3D 形状の XYZ 回転、（3）折りたたむ領域の位置、（4）鏡映変換を行う平面の数、の 4 つを操作できるメニュー部分がある。ユーザがこれらを操作すると、3D 形状の表示がリアルタイムに反映される。これにより、ユーザは折りたたみ形状を試行錯誤しながら決定できる。

この設計ツールでは、ユーザが 3D 形状を回転させると先細り形状部分がリアルタイムに変化する（図 9c）ため、ユーザは折りたたみ可能な領域を視認しながら適切な折りたたみの方向の探索できる。また、設計ツールは折りたたみ形状のシミュレーション結果を更新するたびに、式 2 により双安定性を再計算する。そこでも柔軟素材部分が双安定でないと判定された場合、図 9b の柔軟素材部分が赤色で表示される。これにより、折りたたまれた物体が双安定となる条件を視認しながら、パラメータを操作



図 10. Pop-up Print の造形結果例。

して折り線の位置を調整できる。

最後に、ユーザは *downloadStl* ボタンを押すことで、折りたたまれた形状の STL ファイルを保存できる。

6 3D プリント結果の例と議論

図 10 に、本手法を用いた実際の造形結果の例を示す。本研究では、3D プリントで徳利と猪口を模した水密な容器を優れた収納性を有する双安定構造で実現できた。また、Huffman's Cone をはじめ、滑らかで穴のない表面を持ち、かつ美的にも優れた物体を 3D プリントすることもできた。

本研究の主眼である造形時間とサポート材消費は、Objet260 Connex3 を用いた場合、いずれの物体でも削減できた。造形時間は平均で 39%，サポート材消費は平均で 26% 削減できた。

一方で、3D プリントされた物体には以下の 2 課題が残った。

6.1 元の形状とのずれ

図 10c のヒトデの腕のように、展開された形状に若干のたわみが発生し、入力形状とのずれが発生した。これは、ヒンジが折りたたまれた状態で 3D プリントされるため、展開時に元に戻ろうとする外力が働くためである。この課題を解決するためには、ヒンジ構造を改良する必要がある。

6.2 耐久性

本手法で造形された物体の耐久性を確認するため、双安定性実験で用いた基本形状 ($t = 2 \text{ mm}$, $c = 15 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$, $\theta = 45^\circ$) について、展開と折りたたみを 100 往復繰り返す耐久試験を行い、展開された状態から折りたたまれた状態への遷移に必要な外力を測定した。その結果、最初の 5 回の外力の平均が 0.795 N だった一方、最後の 5 回の外力の平均は 0.752 N であり、5.5% の減少が見られた。このため、短期間で繰り返し展開と折りたたみを行う場合には、本手法は適さないことがわかった。

7 今後の課題と展望

本研究の折りたたみ法は先細り形状という限られた形状にしか適用できない。折りたたみ可能な形状の幅を広げるためには、3D プリントで実現可能な別の折りたたみ法を模索する必要がある。

また、本研究は 3D プリントの時間と素材の削減が目的だったが、本手法で造形できる双安定性な構造は 3D プリント可能なロボットや触覚インターフェースなど、他用途への応用も期待できる。

8 結論

本研究では、物体を折りたたまれた状態で造形し、造形後に展開させる手法である Pop-up Print を提案し、その折りたたみのアルゴリズムを論じた。また、物体が双安定となる条件を定式化した。また、ユーザがインタラクティブに折り線位置を決定できる設計ツールを実装した。さらに、本研究の手法で実際に物体を造形し、造形時間やサポート材消費が削減できることを確認した。

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (JP17J09630, JP19J14472), JST ACT-I (JPMJPR18UN), および JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] B. An, S. Miyashita, A. Ong, D. Aukes, M. Tolley, E. Demaine, M. Demaine, R. Wood, and D. Rus. An End-to-End Approach to Self-Folding Origami Structures by Uniform Heat. *IEEE Transactions on Robotics*, 34, 11 2017.
- [2] B. An, Y. Tao, J. Gu, T. Cheng, X. A. Chen, X. Zhang, W. Zhao, Y. Do, S. Takahashi, H.-Y. Wu, T. Zhang, and L. Yao. Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 260:1–260:12, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [3] D. Beyer, S. Gurevich, S. Mueller, H.-T. Chen, and P. Baudisch. Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, p. 17991806, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, and W. Matysik. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable Parts. *ACM Trans. Graph.*, 31(6), Nov. 2012.
- [5] K. Matsuda, H. Gotoh, Y. Tajika, T. Sushida, H. Aonuma, T. Niimi, M. Akiyama, Y. Inoue, and S. Kondo. Complex furrows in a 2D epithelial sheet code the 3D structure of a beetle horn. *Scientific Reports*, 7(1):13939, 2017.
- [6] J. Mitani and T. Igarashi. Interactive Design of Planar Curved Folding by Reflection. In B.-Y. Chen, J. Kautz, T.-Y. Lee, and M. C. Lin eds., *Pacific Graphics Short Papers*. The Eurographics Association, 2011.
- [7] Y. Noma, K. Narumi, F. Okuya, and Y. Kawahara. Pop-up Print: Rapidly 3D Printing Mechanically Reversible Objects in the Folded State. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [8] C. Schüller, R. Poranne, and O. Sorkine-Hornung. Shape Representation by Zippables. *ACM Trans. Graph.*, 37(4), July 2018.
- [9] R. Suzuki, J. Yamaoka, D. Leithinger, T. Yeh, M. D. Gross, Y. Kawahara, and Y. Kakehi. Dynablock: Dynamic 3D Printing for Instant and Reconstructable Shape Formation. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 99–111, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [10] K. Wolff, R. Poranne, O. Gläuser, and O. Sorkine-Hornung. Packable Springs. *Computer Graphics Forum*, 37(2):251–262, 2018.
- [11] J. Yamaoka and Y. Kakehi. ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2106–2115, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [12] C. Yu, K. Crane, and S. Coros. Computational Design of Telescoping Structures. *ACM Trans. Graph.*, 36(4):83:1–83:9, July 2017.

手芸初心者を対象とした猫用ケープの制作支援システム

栗原 彩花* 五十嵐 悠紀*

概要. 本稿では猫用ケープのデザインと制作を支援するシステムを提案する。提案システムでは猫用ケープの基本形となる型紙を元に、パーツの組み合わせを選択することでデザインを行う。外部のペイントソフトとの連携をする機能も用意することで詳細なデザインを実現可能とした。また、猫の大きさと種類を入力することで作成したデザインの型紙を出力し実際に制作支援も行った。

1 はじめに

近年はストレス社会であり、日々の生活に癒しを求めるため、ペットを飼う家庭が増加している。これによりペット用品やペットとの体験を提供するサービスの需要が増えてきた。ヒューマンコンピュータインターフェースの業界でもペットを対象とした研究[1, 2]が増えている。

そこで我々はペット服に注目した。従来のペット服は主に皮膚保護や温度調節を目的としたシンプルなデザインがほとんどだったが、昨今では子ども服のようにオシャレやコスプレ用のペット服の需要が増えてきている。犬を対象とした Ilio[3]や Dog Dept[4]ではペット服を店舗で試着できるサービスを行っており、ペットの体格に合った服を購入することが出来るようになっている。通販でも購入したペット服のサイズが合わない場合に返品が行えるなど近年ではペット服を対象としたサービスも充実してきた。その一方でペット服は体格や着脱のしやすさ、快適さ等を考慮した形状でなくてはならないためオリジナルで制作するのは手芸初心者にとって困難であると言える。また、猫用の衣服を対象とした書籍は少なく、手芸初心者の制作活動を困難にしている。そこで本システムでは猫を対象に初心者でも簡単に制作できるケープ型のペット服に注目した。

本稿では具体的に猫を対象としてケープ型の服のデザイン・制作支援システムを提案する。システムではユーザーが襟やバイアステープといったパーツの組み合わせと柄を選択することで容易にデザインを作成できる。外部のペイントソフトとの連携を行う機能も付加することで詳細なデザインを作成することも可能とした。また、システムではユーザーが入力したペットの大きさや種類といった情報から、デザ

インしたペット服の大きさを調整し型紙を自動生成する。これにより出力された型紙を使うことで思い通りの大きさで制作をすることができる。加えて、デザインに対して縫製予測時間を表示することで縫製時間を考慮したデザイン作成も可能とした。本システムでの対象ユーザは、ペット服をデザインしたことがない初心者とし、3次元モデリングの知識がなくともデザインを行えるシステムを目指した。

2 関連研究

ペットを対象とした研究である Cat@Log[1]では GPS やカメラを搭載した猫用のウェアラブルセンシングデバイスを検討し、猫の行動分析とネットワークサービスとの連携を行うことで Human Pet Interaction という新しい分野を開拓した。わんてーブル[2]では人の食事という行為を、匂いを用いて犬と共有する体験を提案している。

人間の衣服を対象とした関連研究としては衣服の外形をスケッチすることで3次元形状を推定し3次元モデルに衣服を着せる手法[5]が提案されている。この手法ではスケッチインターフェースでモデリングが行えることでモデリング初心者による衣服デザインを支援した。さらに、2次元の型紙と3次元シミュレーション間の双方向編集を可能とするインターフェース[6]ではユーザが直感的な衣服デザインを行うことを可能とした。

また、3次元モデルのキャラクターへの着衣を対象とした研究[7]では、キャラクターの3次元モデルと型紙の両方に対応となるストロークを描くというインターフェースの提案でキャラクターの着衣を実現させた。異なるキャラクター間での衣服モデルの転写についても研究されている。体型の異なる3次元モデル間で同じ衣服モデルの着衣を自動で可能とするアルゴリズムを提案した研究[8]ではユーザの作業時間の効率化を図ることが出来た。加えて、文献[9]では動物用の衣服など種族や姿勢が違うモデル間に

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学総合数理学部

おいても衣服モデルの転写を可能にした。今後、本研究でもユーザがデザインした服での動きやすさを担保するために前述の研究のアルゴリズムを利用したシミュレーションを行いたい。

犬用の服制作の書籍[10]では型紙の基本の形を変更せずに布の種類やパーツの組み合わせでデザインを作成する手法が見られる。本システムのデザイン作成もこの手法を参考にした。通常、自作でケープ型のペット服を制作するには襟付きケープ型のペット服製作手順を説明した書籍[11]やハンドメイドを行っている個人の Web サイトを参考に体格に合った型紙を作図し、製作する。手芸初心者にとって一番困難であるのはペットに合った型紙制作であり、本システムでは型紙出力まで行うことでデザイン支援に加えて制作支援とした。-

また、猫の首輪制作の書籍[12]では布地や毛量の違いを考慮し、布地の長さと幅（首回り）を変えることでのデザインのバリエーションについて述べ、短毛種の首輪よりも幅を広くとることで長毛種に似合うデザインとなることを解説している。本システムでも長毛種の型紙計算の参考とした。

制作支援の関連研究として Pillow[13]を紹介する。Pillow では、読み込んだ 3 次元モデルにユーザが縫い目をデザインすることで型紙を出力し、物理シミュレーションを適用することでその型紙を縫い合わせたときにできる立体形状をあらかじめユーザに提示し、より良い型紙の制作を支援した。また、Pillow では縫い目の長さから縫製時間の推定も行いユーザの制作を支援している。本システムの縫製時間の推定では Pillow[13]のアルゴリズムを利用した。

3 提案システム

猫用ケープのデザイン作成支援と制作支援を行うソフトウェアを Unity 2019.3.13f1 と Processing3.5.4 を用いて制作した。以下でデザイン作成を行うデザインエディタと型紙を自動生成する型紙生成エディタについて述べる。

3.1 デザインエディタ

本システムのデザインエディタでは、主に 3 次元モデルの組み合わせをユーザが入力することでデザイン作成を行う。エディタ作成を行うにあたって猫の 3 次元モデルとして Free3D 内のモデル[14]を使用した。このモデルの著作権は制作者に帰属する。

システム初期画面から start ボタンを押すことで型紙を制作するために必要な情報の入力画面(図 1)が表示される。ケープの入力画面ではユーザは猫の首回りの大きさと丈の長さ、毛の長さ（猫種）を入力する。完了ボタンを押すことで図 2 のデザイン作成画面となる。



図 1 情報入力画面

図 2 の右上のボタンからタブを切り替え、デザイン作成を行う。また左下部のボタンにより猫のモデルの向きを横、前、斜めに変更できる仕様となっている。モデリングの知識がないユーザにとって 3 次元モデリングの回転は煩雑であるため、モデルの向きを手軽に変更できるボタンインターフェースとした。

ケープのタブではケープの布の柄を選択できる。柄のプリセットが全部で 16 種あり、更にプラスボタンで新しい布画像の取り込みも行える仕様とした。加えて、画面右下の Advanced ボタンから図 3 の画面に遷移する。ここでは open ボタンでケープの UV 画像を外部のペイントソフトで開くことが出来る。外部のペイントソフトではユーザがスタンプ機能やパターンブラシ機能を使用し、レースやワッペン等のデザインをケープ布に追加することを想定している。外部のペイントソフトで UV 画像を上書き保存することでデザインエディタに反映させる。

フチのタブ(図 4)では、ケープのフチ部分にファー やバイアステープを使用するデザインを作成できる。チェックボタンで使用したいモデルを選択し、下のスクロールバーで柄を決定する。

襟のタブでは襟を付けるかをチェックボタンで決定し、スクロールバー内の 9 個のボタンで襟の布の柄を決定することが出来る。



図 2 デザイン制作画面

手芸初心者を対象とした猫用ケープの制作支援システム

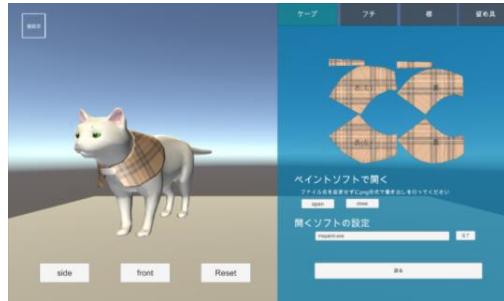


図 3 Advanced 画面



図 4 フチ選択画面



図 5 留め具のタブ

留め具のタブ（図 5）ではケープを留める素材の選択を行う。ユーザはマジックテープを使った留め具（ベルト）とリボンのどちらかの選択を行い、スクロールバー内のボタンから柄を決定する。ベルトを選択した場合、ケープの布同様に Advanced ボタンで外部アプリを利用した詳細なデザイン作成を行うことが出来る仕様とした。

また図 2 の左上の猫設定ボタンを押すことで猫の 3 次元モデルの設定を行える仕様とした。ここでは猫の 3 次元モデルの設定として柄と目の色を変更することができる。柄は白・黒・グレー・茶トラ・三毛の 5 種と目の色は青・緑・黄・橙の 4 種類から選択できる。この機能で制作前にシミュレーション結果を提示することにより、ユーザがデザインした服が猫に似合うかどうかの検討を可能とした。設定例を図 6 に示す。

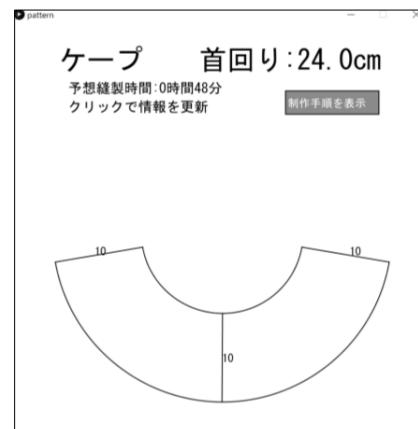


図 6 猫の設定例（白・黒・三毛）

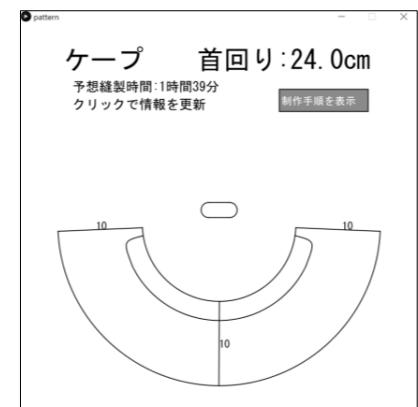
3.2 型紙生成エディタ

型紙生成エディタでは、デザインエディタで入力したデータとデザインを基に型紙をシステムが生成する。ユーザが縫製時間を考慮したデザイン作成を可能とするため予想縫製時間の表示（図 7）も行う。

デザインエディタで首回り・猫種を入力し終えたのちに型紙生成エディタの画面をクリックすることで情報が更新され、現在のデザインに合わせた型紙と予想縫製時間が表示される。さらに右上の制作手順表示のボタンを押すことで現在のデザインに対応した制作手順の表示（図 8）がされる仕様とした。



(a) 短毛種



(b) 長毛種, 襟・留め具あり

図 7 型紙出力例

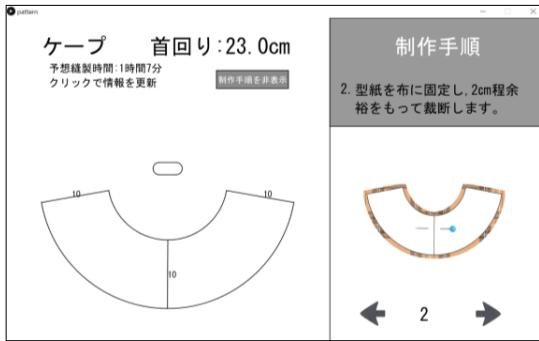


図 8 制作手順表示例

4 アルゴリズム

4.1 型紙生成のアルゴリズム

型紙は、入力した首回りのサイズ N 、丈の長さ、毛の長さ（種類）といった情報から導出された値を基に制作している。

短毛種の場合は円弧の開き角度 θ_{short} を 160° とし、式 1 を用いて内円の直径 D_{short} を導出している。ケープの首回りにゆとりを持たせるため式 1 では 1 cm の加算を行っている。円弧の開きの角度は猫用のエリザベスカラー¹の角度を参考にした。また、外円の直径は内円に 2 倍した丈の長さを加算することで導出できる。

$$D_{\text{short}} = \frac{360}{\theta_{\text{short}}\pi} N + 1 \quad \dots \text{(式 1)}$$

長毛種の場合は短毛種よりもゆとりを持たせるため円弧の開き角度 θ_{long} を 175° とし、式 2 で内円の直径 D_{long} を導出している。式 2 では毛の長さを考慮し、出来上がりサイズにゆとりを持たせるため 2.5 cm の加算を行っている。また、外円の直径は短毛種と同様に 2 倍した丈の長さを加算することで導出できる。

$$D_{\text{long}} = \frac{360}{\theta_{\text{long}}\pi} N + 2.5 \quad \dots \text{(式 2)}$$

襟部分の型紙では丈の長さに対して襟の長さを割合でユーザが任意に設定できるようになっている。初期設定として襟の長さを丈の長さの 23% と設定し、襟の外円の直径を導出した。加えて襟の円弧の開き角度では留め具の見えやすさを考慮し短毛種の場合は 148° 、長毛種の場合は 163° と設定し描画を行っている。

4.2 縫製時間の推定

縫製時間の推定には、Pillow[13]での導出式（式 3）を用いた。この式では推定縫製時間 (C_{sew})、単位あたりの縫製にかかる時間 (W_{sew})、縫製する長さ (L_{seam})、

玉留めにかかる時間 (W_{knot})、玉留めの個数 (N_{knot}) としている。

$$C_{\text{sew}} = W_{\text{sew}} L_{\text{seam}} + W_{\text{knot}} N_{\text{knot}} \dots \text{(式 3)}$$

本システムではユーザが縫う長さを型紙の外周の長さとし、縫製時間の推定を導出している。推定を行うにあたって、Pillow[13]での実験で推定された $W_{\text{sew}}=22 \text{ s/cm}$ 、 $W_{\text{knot}}=80 \text{ s/knot}$ の数値を利用した。ケープでは辺ごとにユーザが縫製することを想定し、玉留めの個数を 8 個と設定した。縫製する長さは式 1 で導出した内円と外円の直径と円弧の開きの角度、丈の長さから算出した。

襟は玉留め個数を 4 個と想定した。ケープと同様に内円と外周の直径、円弧の開きの角度から算出すことで縫製する長さを近似した。

留め具の場合はマジックテープを取り付けることを考慮し玉留め個数を 8 個とした。

加えて、バイアステープを使用したパツツはユーザの縫製の速度が遅くなることを考慮し、 $W_{\text{sew}}=33 \text{ s/cm}$ とした。また、玉留めの個数と縫製の長さも通常の 2 倍とすることでバイアステープを使用した際の制作時間の推定を行った。

縫製推定時間は秒で計算しているが、実際に縫う際には個人差も大きいため、切り上げて分までの表示とした。Pillow[13]では手縫いでの縫製時間であるため、本システムでも手縫いでの指標となっている。そのため、ミシンを使用して縫製する場合などは縫製時間が変わってくると考えられる。

5 結果

実際に本システムを用いてデザイン作成とケープ制作を行った。作成したデザイン例を図 9 に示す。図 9 のデザイン作成に用いた時間は(a)約 25 分、(b)約 10 分、(c)約 3 分である。(c)のようにプリセットでデザインを行う場合は容易にデザイン作成を行うことが出来ると分かった。さらに型紙生成エディタの予想縫製時間の表示によりデザインを行う際に襟をつけるかつけないかといった比較によってどのくらい縫製時間が変わってくるかなどについてデザイン段階で検討できるメリットがあった。その一方で外部アプリを用いたデザイン作成を行う際の所要時間が長いため、外部連携を行う Advanced タブのインターフェースを検討する必要があると考えられる。

また、型紙生成エディタを利用し、実際にケープを制作した。図 9(a)のデザインの制作例を図 10 に、図 9(b)のデザインの制作例を図 11 に示す。それぞれの予想縫製時間および実際の縫製時間を表 1 に示す。図 10 の予想縫製時間は 2 時間 40 分と提示され

¹ 手術などによる外傷を持った動物が、傷口をなめるなどを防ぐ為の円錐台形状の保護具

手芸初心者を対象とした猫用ケープの制作支援システム

て実際の縫製には約 3 時間 10 分かかった。また、図 11 の予想縫製時間には 2 時間 26 分と提示されて実際の縫製には約 2 時間 40 分かかった。

図 10 の予想縫製時間との差はケープに装飾としてリボンを付けたこととマジックテープが縫いにくい素材であったことが主な原因として考えられる。加えて図 11 の予想制作時間との差は布の素材と個人の縫うスピードが影響であると考えられる。実際の縫製にかかった時間が予想提示時間の 1.19 倍、1.1 倍となっており、システムで縫製時間が長くかかると表示されたほうが実際にも時間がかかっていることから、同じ人が作るときに図 9(a)のデザインのほうが図 9(b)のデザインよりも制作時間がかかるといった比較には使えると考える。

今後、システムを改良するにあたり素材を考慮した縫製時間の推定が必要である。また、縫製時間以外の時間である型紙印刷に時間がかかった。制作時間の短縮のために型紙生成エディタに印刷倍率の表示や制作手順の提示といったインターフェース改善を行い、再度制作時間を比較する必要がある。

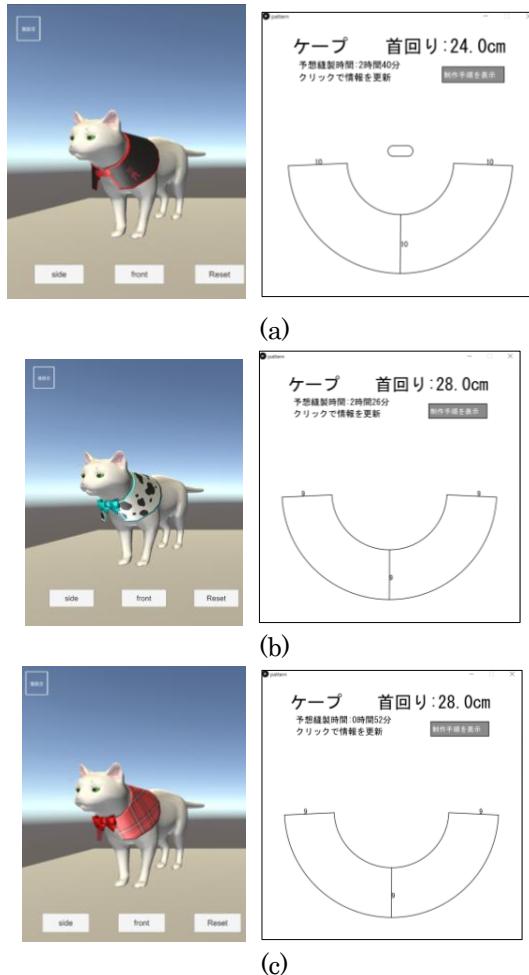


図 9 デザインシミュレーション例

表 1. 予想縫製時間と実際の縫製時間

デザイン と制作物	予想縫製 時間 (t)	実際の縫製 時間 (T)	縫製時間の ずれ (T/t)
図 9(a) 図 10	2 時間 40 分	3 時間 10 分	1.19
図 9(b) 図 11	2 時間 26 分	2 時間 40 分	1.10



図 10 ケープ制作例 1 (図 9(a)を制作)



図 11 ケープ制作例 2 (図 9(b)を制作)

6 まとめと今後の課題

本稿では猫を対象としたペット服のデザイン・制作支援を行うシステムを提案した。ペット服の中でも具体的にケープ型の服に特化したシステムを提案した。提案システムを使うことできまざまな組み合わせのケープデザインを事前に試すことができ、ペット服をデザインしたことのないユーザでも手軽にデザイン・制作できる可能性を示した。

今後は、ワンピースのような複雑な形状をした服でのシステム構築を目指す。その際にデザインエディタでは衣服モデルの転写アルゴリズム[6]を組み込み、猫の姿勢が変わった時に作成したデザインが動きを制限していないかシミュレーションを行う。更に、生地の種類を考慮した物理シミュレーター[15]と AR 機能を導入することで猫に完成した衣服を着させた時とデザイン作成時のイメージの差異を減らす支援も行いたい。ポーチのデザイン・制作支援システム[16]では、透過イラストを用いながら、ユーザ自身が選んだ生地のテクスチャを使った制作手順提示を実現している。今後こういった手順提示を組み込むことで制作の過程をより便利にわかりやすく提示できる可能性も考えられる。

さらに、本システムでは猫を対象としたが、ペッ

トにはウサギやハムスターなどさまざまな種類がいるため、多くの種類に対応できるようにシステム拡張を行っていきたい。

参考文献

- [1] 米澤香子, 味八木崇, 曙本純一. 「Cat@Log: Human Pet Interaction のための猫ウェアラブルセンシング」第 17 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(WISS2009), pp.47-52, 2009.
- [2] 星野瑠海, 橋田朋子. 「わんテーブル: 犬と人が食体験を共有するための匂い伝送システム」, 2020.
- [3] Ilio. <http://ilio.ir.shopserve.jp/index.htm>, (参照 2020-11-06)
- [4] DOG DEPT. <https://www.dogdept.com/>, (参照 2020-11-06)
- [5] Cody Robson, Ron Maharik, Alla Sheffer, Nathan Carr. 「Context-Aware Garment Modeling from Sketches」 Computers and Graphics (Proc. SMI 2011), pp.604–613, 2011.
- [6] Nobuyuki Umetani, Danny M. Kaufman, Takeo Igarashi, Eitan Grinspun. 「Sensitive Couture for Interactive Garment Editing and Modeling」 ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2011), Article No.90, pp.1-12, 2011.
- [7] Takeo Igarashi, John F. Hughes. 「Clothing Manipulation」 15th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, ACM UIST'02, Paris, France, October 27-30, 2002, pp.91-100.
- [8] Remi Brouet Alla Sheffer Laurence Boissieux, Marie-Paule Cani, 「Design Preserving Garment Transfer」 ACM Transactions on Graphics, July 2012, Article No.36.
- [9] Fumiya Narita, Shunsuke Saito, Tsukasa Fukusato, Shigeo Morishima. 「Quasi-Developable Garment Transfer for Animals」 SIGGRAPH Asia 2017 Technical Briefs, November 2017, Article No.26, pp.1-4, 2017.
- [10] 辻岡ピギー: ピポン, 小林光枝: ピポン. 「着せるとカワイイ 平らなワンコ服 30 着」学校法人文化学園 文化出版局, pp.6-9, 2019.
- [11] 高橋ひとみ (編). 「改訂版 作ってあげたい! かわいいワンコ服&こもの」, 株式会社ブティック社, pp.6-7, pp.63, 2008.
- [12] 西イズミ. 「作ってあげたい 猫の首輪」株式会社河出書房新社, pp.6, 2010-06-30.
- [13] Yuki Igarashi, Takeo Igarashi. 「Pillow: Interactive Flattening of a 3D Model for Plush Toy Design」 SmartGraphics 2008, LNCS 5166, pp. 1–7, 2008.
- [14] Snippysnappets. 「Low Poly Cat 3D モデル」Free3D. <https://free3d.com/3d-model/low-poly-cat-46138.html>, (参照 2020-09-28)
- [15] Marvelous Designer. <https://www.marvelousdesigner.com/>, (参照 2020-11-07).
- [16] 池田優希, 五十嵐悠紀. 「ポーチを対象とした型紙デザイン支援及び製作支援システム」画像電子学会論文誌 第48巻 第4号(通巻250号)pp.521-525, 2019.

未来ビジョン

近年では工場で稼働するロボットだけではなく、福祉の現場や家庭でもロボットの活躍が期待されている。そのため様々な用途に適した様々な形状のロボットの開発が予想される。そうした状況下でロボットの親密性を向上させるためにロボット用の服を作成することも考えられる。また自作することで親密性をより増すこともできるかもしれない。

一方で多様な外観のロボットが普及しており、それに対応する服デザインも簡単ではない。さまざまな動き、防水の必要性、可動域、脱着のしやすさ、など制約を考慮した服デザインは簡単ではない。さまざまな形状や用途に対応できる服デザインにおいて支援システ

ムの発展が期待されていると考える。

また、制作の現場ではオリジナリティを追求できる機会も増えてきた。例えば、家庭用インクジェットプリンターで出力できる布が販売されており、個人がオリジナルデザインで生地作りができるサービスも普及している。さらに、アニメやゲーム等のコンテンツの影響により一般の人でもペインソフトを所持していることも増えている。こういった背景から、これからものづくりでは今まで素材とされてきた布の柄のデザインから行うようになることが予想できる。そのような世の中にになったときに、外部ペイントソフトとの連携のインターフェースがデザインシミュレーションを行うシステムにとって大事な要素となっていくだろう。

アクティブ音響センシングを用いた食材認識力トラリー

西井 遥菜* 双見 京介* 村尾 和哉 *†

概要. 本研究では、ユーザが道具を介して物体とインタラクションをする場面において、ユーザが使用する道具にアクティブ音響センシング技術を適用させることで、ユーザが道具を介して接触した物体を認識する手法を提案する。提案手法は、ユーザが使用する道具にスピーカとマイクを取り付け、スピーカから音響信号を流し、道具が物体に接触した際に物体を伝搬した音響信号をマイクから取得し、その音響信号の周波数特性を解析することで物体を認識する。食事場面を対象とし、ユーザに食事と関係無い動作を行わせることなくユーザが食べた食材の認識を行うカトラリーとして、食材を刺すフォーク型デバイスと、食材をのせるスプーン型デバイスを実装した。提案手法の有効性を評価する実験を14種類の野菜およびデバイスと食材が接触していない状態の計15種類に対して行った結果、フォーク型デバイスでF値0.916、スプーン型デバイスでF値0.949が得られたことを確認した。

1 はじめに

人類はこれまでに、道具を使用して多種多様な物体とのインタラクションを行ってきた。人類最初の道具とされる石器は目的に応じて加工され、対象となる物体を挟む、切る、つぶす、耕す、すぐう、掘る、書くなど多くの機能をもつようになり、食事や調理、農作業や狩猟、衣類作成や住居建築、絵画や学習用記録などのさまざまな目的のために利用されてきた。そして現代においても人々は、衣食住や娯楽、学習などの活動のために、道具を用いている。

このようなユーザが道具を介して物体とインタラクションをする場面において、人がインタラクションを行った物体を認識できれば有用である。実空間内の物体を認識する技術は、近年のセンサやコンピュータの小型化や性能向上とともに発展しており、例えば、ICタグを用いた物体認識には、RFタグ[1]や、IREDデバイスを用いたスマートタグ[2]がある。また、カメラを用いた物体認識技術には、Zensor++[3]や、光ストライプ投射法[10]がある。ほかにも、アクティブ音響センシングを用いた物体認識手法[9]などがある。こういった物体認識技術を利用することで、物体を認識してログを残すライログシステムへの利用や、認識した物体に応じたサービスを提供するコンテキストアウェアシステムへの利用など、さまざまなユーザ支援に利用されている。

本研究では、ユーザが道具を介して物体とインタラクションをする場面において、ユーザが使用する道具にアクティブ音響センシング技術を適用させることで、ユーザが道具を介して接触した物体を認識する手法を提案する。アクティブ音響センシング技

術とは、物体がもつ固有の音響特性を利用した物体認識手法であり、スピーカを用いて特定の音響信号を物体に伝搬させ、マイクで得たその応答の周波数特性を解析することで、物体の種類や状態を認識するものである。提案手法では、ユーザが使用する道具にスピーカとマイクを取り付け、スピーカから音響信号を流し、道具が物体に接触した際に、物体を伝搬した振動・応答をマイクから取得し、その応答の周波数特性を解析することで物体を認識する。このように提案手法では、ユーザが使用する道具が認識したい物体に接触することと、認識したい物体が固有の音響特性をもつことを利用している。

提案手法の有効性を検証するために、本研究では食事場面を対象として、ユーザが食べた食材の認識を、ユーザに特別なふるまいをさせることなく行うためのカトラリーを開発する。具体的には、食材を刺すフォーク型デバイスと、食材をのせるスプーン型デバイスを実装した。評価実験では、それぞれのデバイスを用いて提案手法の食材の認識精度の評価を14種類の野菜に対して行う。

2 関連研究

本研究と同じくアクティブ音響センシングを用いた認識手法には次のものがある。大野らはアクティブ音響センシングを用いたタッチ認識技術を提案している[4][5]。これは、物体にコンタクトスピーカとコンタクトマイクを取り付け、物体の触り方の違いを取得することで把持状態を認識する手法である。河田らは、把持状態の認識を物体ではなくユーザにセンサを取り付けることにより行った[6]。また、Mujibiyaらは低周波の超音波で皮膚表面を共振させ、身体上の別地点で受け取ることで身体上の接触位置やジェスチャを推測している[7]。このほか、測位にもアクティブ音響センシングは用いられて

Copyright is held by the author(s).

* 立命館大学大学院情報理工学研究科

† 科学技術振興機構さきがけ

Kunze らは、携帯電話に内蔵されているスピーカの音と振動モータからの振動を利用して、加速度センサとマイクを用いて応答を分析することで、携帯電話の位置を把握する手法を提案している[8]。岩瀬らは、アクティブ音響センシングを仕込んだアクリル板の上の物体の種類と位置の認識を行った。また、複数物体の同時識別も可能とした[9]。このようにアクティブ音響センシングを用いた認識では、人が自発的に動作して音や振動を発生させなくても、物体に触れているだけで物体の情報を取得できる。本研究では、ユーザと物体とのインタラクションが道具を介して行われる場面において、アクティブ音響センシングの新しい応用を提案している。

3 提案手法

本節では、フォークやスプーンといったカトラリーに対してアクティブ音響センシングを適用し、カトラリーが接触した食材を認識する手法について述べる。

3.1 想定環境

本研究では、食事場面を想定し、フォークやスプーンなどのカトラリーにアクティブ音響センシングを適用し、カトラリーで刺したり、すくったりした食材を識別する手法を提案する。アクティブ音響センシングをカトラリーに適用するアプローチを採用した理由を述べる。人の生活において食事は必須の活動であり、健康的な生活を送るために食事を記録することは有用である。既存の食事の記録手法として、食事をする前にメニュー全体の写真を撮る方法や、食事の前後で人が記録する方法がある。また、調理するレシピの記録や食事の後に食べた物を思い出しながら記録する方法などがある。しかし、写真を撮って記録する方法は、料理の中に含まれるすべての食材を記録することは難しい。また、食べた順序を記録するためにはビデオで食事中記録し続けなければならないため面倒であるし、プライバシーの問題を含む。人が記録する方法では、記録し続けるための記録者の高いモチベーションが必要であり、記入漏れや誤記録といった記録ミスの回避も難しい。また、食材に直接センサやタグを取り付ける方法は衛生面や手間の観点から現実的ではない。

これらの既存手法に対して、提案手法はユーザが使用するカトラリーのみにセンサを取り付けるため、カトラリーで食材に接触するだけで物体を認識できる。カトラリーで食材に接触する動作は、人が食事をするときに必ず生じる動作であるため、ユーザは食材を認識させるための特別な動作を行う必要がなく、通常通りに食事をするだけで実際に摂取した食材を認識できる。

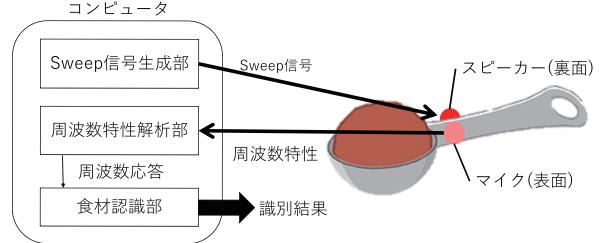


図 1: 提案システム概要

3.2 提案手法の流れとシステム構成

提案システムの概要を図 1 に示す。提案システムはコンタクトスピーカとコンタクトマイクが搭載されたカトラリー（フォークおよびスプーン）と、Sweep 信号生成部、周波数特性解析部、食材認識部から成るコンピュータによって構成される。

提案手法は食材のもつ音響特性をもとに、食材の認識を行う。食材を含むすべての物体には固有の音響特性があり、共振モード、共振周波数、モード減衰比によって表せられる。これは、物体の形、材質、境界条件により決定される。これらの音響特性の差を利用することで、食材の種類の違いを識別することができる。

提案手法では、各食材から得られる音の周波数特性を区別するために、アクティブ音響センシングを用いる。具体的にはまず、ユーザが使用するカトラリーに Sweep 音を発するコンタクトスピーカと反響音を取得するコンタクトマイクを取り付ける。そして、周波数が時間とともに変化する Sweep 音をコンピュータの Sweep 信号生成部で生成して振動スピーカから発してカトラリーを振動させる。その振動はカトラリーを経由してコンタクトマイクから取得されるが、カトラリーに接触する食材の種類や形状、カトラリーの状態によって変化する。そして、コンタクトマイクから取得した音（振動）の周波数特性を得るために、固定長のウィンドウで切り出した音を FFT（高速フーリエ変換: Fast Fourier Transform）してパワースペクトルを得る。そして周波数特性では、事前に収集した各食材のパワースペクトルを学習した機械学習モデルを用いて、カトラリーに接触している未知の食材の認識を行う。

3.3 Sweep 信号生成部

Sweep 信号生成部では、200ms のあいだに周波数が 20kHz から 40kHz まで直線的变化する Sweep 信号（Chirp 信号とも呼ばれる）を繰り返し生成する。この周波数帯域は、先行研究[4]の論文を参考にして決定した。具体的には、人の可聴域は年齢にもよるが 20Hz から 20kHz 程度であり、人の非可聴域である 20,001Hz から 40,000Hz までの範囲と合わせて記録することにした。サンプリング周波数は

アクティブ音響センシングを用いた食材認識カトラリー

96kHz である。 Sweep 信号を繰り返し流すと、繰り返しの切れ目の部分で周波数が大きく変化することによるインパルスノイズが発生するため、ノイズを軽減するために音の繰り返しの瞬間にクロスフェード処理を行う。この Sweep 信号はフリーのオープンソースオーディオソフトウェアである Audacity¹ を用いて作成した。

3.4 周波数特性解析部

周波数特性解析部では、カトラリーのマイクから取得した振動応答を、FFT を用いてパワースペクトルに変換する。振動応答は 96kHz, 16bit でサンプリングした。振動応答の時系列データから 96000 サンプルをごとに FFT をを行いパワースペクトルを得る。サンプリング定理により、48000 点の 0Hz から 48kHz までの周波数のパワースペクトルを得られるが、この中から人の非可聴域かつ Sweep 信号の周波数である 20,001Hz から 40,000Hz の領域を抽出する。このことから、20000 点のパワースペクトルが得られる。

3.5 食材認識部

食材認識部では、事前に取得した特徴量ベクトルと正解の食材ラベルからなる学習データを用いて認識モデル（評価では SVM を利用）を構築しておき、入力された未知の食材の特徴量ベクトルを認識する。学習データには認識したい食材の特徴量ベクトルに加えて、カトラリーが何の食材にも触れていないときの特徴量ベクトルを含めている。これによりカトラリーで食材に触れているときは食材名が出力され、食材に触れていないときは「触れていない」と出力される。

4 評価実験

提案手法の有効性を示すために、野菜を認識対象として実験を行う。まずははじめに、実験で使用するカトラリーの実装の説明およびスピーカとマイクの位置に関する予備実験を行う。その次に、予備実験の結果をもとに最適な位置にスピーカとマイクを取り付けたカトラリーを用いて 2 つのシナリオ（シナリオ 1 とシナリオ 2）で 14 種類の野菜に対して認識精度を評価する。シナリオ 1 は、各野菜につき複数の個体や複数種類のカットされた形を学習して、個体や形の違いに関わらず野菜の種類を認識できるかを評価した。シナリオ 2 は、野菜の種類だけでなく、カットされた形も正解ラベルに含めて、野菜の種類と切り方を同時に認識できるかを評価した。

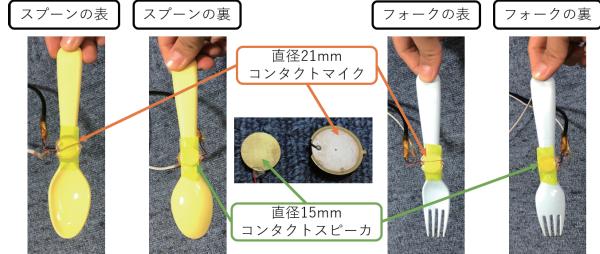


図 2: マイクとスピーカを取り付けたフォークとスプーン

4.1 スピーカとマイクの位置に関する予備実験

本研究で使用する食材を刺すフォーク型デバイスと食材を乗せるスプーン型デバイスを図 2 に示す。図ではマイクとスピーカをともに柄に付けている。フォークとスプーンはプラスチック製で、ともに全長 16cm である。物体を振動させるコンタクトスピーカには圧電サウンダ (FGT-15T-6.0A1W40) を使用した。直径 15mm, 厚さ 0.3mm 以下の超薄型軽量な円盤形である。コンタクトスピーカの発した音を取得するコンタクトマイクはスライプ社の OMR20F10H-BP-310 を使用した。直径 21mm, 厚さ 0.3mm 以下の超薄型軽量な円盤形である。音の入出力は USB 接続のオーディオインターフェース (Steinberg 社の UR 22mkII) を介して行う。また、取得した時系列の振動応答を FFT する周波数特性解析部、機械学習を行う食材認識部のコンピュータとして、レノボ・ジャパン社の ThinkPad X1 Carbon (CPU: Intel Core i7-5600 2.60GHz, RAM: 8.00GB) を使用した。

スピーカとマイクの位置の候補として、フォークやスプーンの先端、柄、柄尻の 3 か所が考えられるが、フォークやスプーンの先端にセンサを取り付けると、カトラリーとして機能しないため候補から除外した。したがって、スピーカとマイクの位置の組合せはフォークやスプーンの柄の表裏に取り付ける、柄と柄尻に取り付ける、柄尻の表裏に取り付ける 3 通りが考えられる。柄と柄尻に取り付ける場合に、マイクを柄に付けるか、柄尻に付けるかで 2 通りあるが、予備実験では柄にマイク、柄尻にスピーカを取り付けた。スピーカとマイクを 3 通りの方法で取り付けたフォークおよびスプーンを用いて、人参、キュウリ、サツマイモの 3 種類の野菜を認識した。機械学習モデルには、SVM(多項式カーネル) を使用した。フォーク型デバイスは、フォークの先端で野菜を刺した状態で振動データを取得した。スプーン型デバイスは、スプーンの先端に野菜をのせた状態で振動データを取得した。各野菜につき約 60 秒のデータを取得し、長さ 1 秒のウインドウをスライド幅 100% で切り出して FFT し、1 種類の野菜から 50 サンプル特徴量を抽出した。1 種類の野菜につき

¹ <https://www.audacityteam.org/>

表 1: スピーカとマイクの設置位置を変えたときの
フォーク型デバイスとスプーン型デバイスの F 値

野菜の種類	mic=柄 spk=柄	mic=柄 spk=柄尻	mic=柄尻 spk=柄尻
人参	0.958	0.800	0.794
キュウリ	0.948	0.760	0.789
サツマイモ	0.906	0.775	0.746
人参	0.997	0.828	0.778
キュウリ	0.844	0.841	0.748
サツマイモ	0.783	0.669	0.829

3 個体分のデータを採取したため、全部で 1350 サンプルのデータ（50 ウィンドウ × 3 種類の野菜 × 3 個体 × 3 種類の取り付け位置）を得た。

フォーク型デバイスおよびスプーン型デバイスを用いたときの認識結果の F 値を表 1 に示す。結果より、マイクとスピーカをともに柄に取り付けたフォーク型デバイスにおいて平均 F 値 0.937、スプーン型デバイスにおいて平均 F 値 0.874 と最も高い精度を示した。よって以降の評価実験では、柄の部分の表と裏にスピーカとマイクを取り付けたフォークとスプーンを使用する。

4.2 評価実験で使用する野菜

評価実験では一般的に利用される野菜を選択するために、厚生労働省が発表している日本人における野菜の摂取量ランキング²を参考にして、大根、玉葱、キャベツ、白菜、人参、ほうれん草、トマト、キュウリ、カボチャ、レタス、ネギ、ピーマン、ジャガイモ、サツマイモの 14 種類の野菜を採用した。

野菜の個体ごとの差異に関わらず提案手法が野菜を認識できるかを検証するために、1 種類の野菜につき 5 個体を用意した。また、切った形による認識精度の変化を調査するために、各個体を表 2 に示す 3 種類の形に切った。一例としてニンジンの実験素材を図 3 に示す。1 本のニンジン（個体）から形 A（いちょう切り）、形 B（乱切り）、形 C（輪切り）の 3 種類の形に 1 個ずつ切り出した。つまり、実験の素材として 14 種類の野菜 × 5 個体 × 3 種類の形 = 210 素材を用意した。なお、野菜の切り方に関しては、野菜ごとに一般的な切り方を選択した。そのため、野菜ごとに 3 種類の切り方は異なる。

4.3 実験環境とデータセット

フォーク型デバイスについて、前述の 210 素材すべてに対してフォークの先端で素材を刺した状態で 1 素材につき 60 秒間、振動データを取得した。スプーン型デバイスについてもスプーンの皿に素材をのせた状態で同様に振動データを取得した。また、

表 2: 野菜の切り方

野菜の種類	形 A	形 B	形 C
キャベツ	ざく切り	千切り	みじん切り
人参	いちょう切り	乱切り	輪切り
白菜	ざく切り	千切り	みじん切り
キュウリ	斜め切り	乱切り	輪切り
ピーマン	乱切り	輪切り	短冊切り
レタス	ざく切り_芯	ざく切り_複数	ざく切り_葉
玉葱	みじん切り	短冊切り	串切り
ジャガイモ	半切り	4 分の 1 切り	輪切り
カボチャ	乱切り_大	薄切り	乱切り_小
大根	輪切り	いちょう切り	短冊切り
ネギ	斜め切り	輪切り	筒切り
ほうれん草	葉_半分	葉_複数	葉_1 枚
サツマイモ	輪切り	斜め切り	乱切り
トマト	賽の目切り	半月切り	串切り

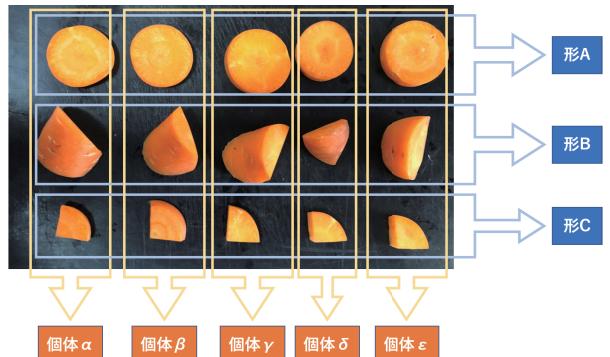


図 3: 個体と切り方の違いによる実験素材

食事をしない状態を認識するため、デバイスと食材が接触していない状態を 60 秒間、5 回振動データを取得した。つまり、野菜と合わせて全部で 215 素材ある。取得したデータから、長さ 1 秒のウインドサイズで FFT を計算し、1 素材あたり特徴量を 50 サンプル得た。その結果、10750 サンプルデータ（50 ウィンドウ × 3 種類の形 × 5 個体 × 14 種類の野菜 + デバイスと食材が接触していない 1 状態 × 5 回分）を得た。

4.4 シナリオ 1

シナリオ 1 では、野菜の個体やカットされた形に関わらず、野菜の種類を認識できるかを評価した。具体的には、個体の違いとカットされた形の違いに関わらず、同一の種類の野菜には同一の野菜ラベルを付けた。したがって、野菜に接触していない状態を含めてラベルは 15 クラスである。機械学習モデルは SVM, Random Forest, Naive Bayes で試したところ、最も性能の良かった SVM（多項式カーネル）を用いて 5-fold 個体別交差検証を行って比較した。つまり、ニンジンの個体 α , 個体 β , 個体 γ ,

² <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000096138.html>

アクティブ音響センシングを用いた食材認識カトラリー

表 3: シナリオ 1 における各野菜の認識精度

野菜の種類	フォーク型デバイス			スプーン型デバイス		
	適合率	再現率	F 値	適合率	再現率	F 値
キャベツ	0.952	0.956	0.954	0.986	0.967	0.976
人参	0.801	0.909	0.852	0.923	0.899	0.911
白菜	0.853	0.819	0.835	0.919	0.999	0.957
キュウリ	0.871	0.848	0.859	0.966	0.991	0.978
ピーマン	0.987	0.987	0.987	0.981	0.983	0.982
レタス	0.922	0.971	0.945	0.821	0.912	0.864
玉葱	0.908	0.813	0.858	0.934	0.976	0.954
ジャガイモ	0.912	0.921	0.916	0.945	0.919	0.932
カボチャ	0.888	0.931	0.909	0.953	0.937	0.945
大根	0.868	0.844	0.856	0.940	0.979	0.959
ネギ	0.982	0.923	0.951	0.980	0.904	0.940
ほうれん草	0.989	0.989	0.989	0.956	0.808	0.876
サツマイモ	0.856	0.912	0.883	0.976	0.984	0.980
トマト	0.970	0.915	0.942	0.975	0.979	0.977
非接触状態	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均	0.917	0.916	0.916	0.950	0.949	0.949

個体 δ を学習データとして学習モデルを構築してニンジンの個体 ϵ をテストデータとして認識し、テストデータをローテーションするようにした。

フォーク型デバイスとスプーン型デバイスの認識精度の適合率、再現率、F 値を表 3 に示す。フォーク型デバイスでは F 値 0.916、スプーン型デバイスでは F 値 0.949 を示した。

4.5 シナリオ 2

シナリオ 2 では、提案手法が野菜の種類とカットされた形の両方を認識できるか評価した。具体的には、野菜の種類と形をラベルとした。例えば、ニンジンはニンジン A, ニンジン B, ニンジン C の 3 種類のラベルが存在し、ラベルは全部で 14 種類の野菜 \times 3 種類の形 + デバイスと食材が接触していない 1 状態の合計 43 クラスである。機械学習モデルはシナリオ 1 と同様に SVM を用いた。

フォーク型デバイスとスプーン型デバイスの認識精度の適合率、再現率、F 値を表 4 に示す。フォーク型デバイスでは F 値 0.532、スプーン型デバイスでは F 値 0.599 を示した。

4.6 考察

シナリオ 1 の 15 種類の野菜および状態の認識結果から、フォーク型デバイスは F 値 0.916、スプーン型デバイスは F 値 0.949 であった。フォーク型デバイスとスプーン型デバイスの両方において高い認識精度が得られたことから、食材の刺し方や乗せ方にばらつきがあり、カトラリーと野菜の接触方法の異なっても提案手法が有効であるといえる。この結果から、箸やナイフなど食材との接触方法が異なるほかのカトラリーに対しても提案手法が汎用的に利

表 4: シナリオ 2 における各野菜の認識精度

野菜の種類と形	フォーク型デバイス			スプーン型デバイス		
	適合率	再現率	F 値	適合率	再現率	F 値
キャベツ_A	0.606	0.664	0.634	0.708	0.756	0.731
キャベツ_B	0.537	0.440	0.484	0.559	0.608	0.582
キャベツ_C	0.560	0.620	0.588	0.896	0.552	0.683
人参_A	0.292	0.276	0.284	0.745	0.840	0.789
人参_B	0.238	0.380	0.292	0.392	0.284	0.329
人参_C	0.246	0.268	0.257	0.397	0.544	0.459
白菜_A	0.702	0.916	0.795	0.718	0.988	0.832
白菜_B	0.138	0.052	0.076	0.870	0.616	0.721
白菜_C	0.337	0.352	0.344	0.806	0.896	0.848
キュウリ_A	0.927	0.808	0.863	0.533	0.384	0.447
キュウリ_B	0.865	0.868	0.866	0.488	0.644	0.555
キュウリ_C	0.963	0.940	0.951	0.698	0.812	0.750
ピーマン_A	0.593	0.768	0.669	0.427	0.376	0.400
ピーマン_B	0.652	0.584	0.616	0.352	0.376	0.364
ピーマン_C	0.471	0.388	0.425	0.293	0.316	0.304
レタス_A	0.312	0.388	0.346	0.248	0.208	0.226
レタス_B	0.361	0.316	0.337	0.451	0.668	0.539
レタス_C	0.468	0.520	0.492	0.190	0.224	0.206
玉葱_A	0.776	0.720	0.747	0.512	0.412	0.457
玉葱_B	0.773	0.600	0.676	0.446	0.496	0.470
玉葱_C	0.902	0.480	0.627	0.539	0.576	0.557
ジャガイモ_A	0.164	0.208	0.183	0.864	0.612	0.717
ジャガイモ_B	0.301	0.252	0.275	0.364	0.348	0.356
ジャガイモ_C	0.289	0.288	0.289	0.529	0.512	0.520
カボチャ_A	0.765	0.860	0.810	0.626	0.776	0.693
カボチャ_B	0.618	0.596	0.607	0.976	0.804	0.882
カボチャ_C	0.406	0.492	0.445	0.762	0.744	0.753
大根_A	0.495	0.596	0.541	0.522	0.484	0.502
大根_B	0.467	0.372	0.414	0.384	0.412	0.398
大根_C	0.434	0.672	0.527	0.725	0.716	0.720
ネギ_A	0.431	0.496	0.461	0.427	0.376	0.400
ネギ_B	0.679	0.668	0.673	0.461	0.308	0.369
ネギ_C	0.461	0.332	0.386	0.324	0.400	0.358
ほうれん草_A	0.703	0.548	0.616	0.639	0.652	0.646
ほうれん草_B	0.950	0.756	0.842	0.863	0.656	0.745
ほうれん草_C	0.694	0.800	0.743	0.748	0.688	0.717
サツマイモ_A	0.655	0.852	0.741	0.971	0.660	0.786
サツマイモ_B	0.330	0.232	0.272	0.809	0.900	0.852
サツマイモ_C	0.459	0.408	0.432	0.761	0.944	0.843
トマト_A	0.613	0.760	0.679	0.803	0.848	0.825
トマト_B	0.354	0.280	0.313	0.808	0.824	0.816
トマト_C	0.277	0.228	0.250	0.681	0.572	0.622
非接触状態	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均	0.541	0.536	0.532	0.612	0.600	0.599

用できると考えられる。また、異なる個体を学習しても野菜を認識できることがわかったため、認識時とは別の野菜の個体を事前に学習したモデルを利用でき汎用性は高いといえる。さらに、同じ野菜で同じ切り方でも形は多少異なるため、同じ切り方のなかでの形のプレの影響は小さいといえる。実際の食

事場面では、出現頻度の高い複数の切り方で切った野菜を事前に学習しておけば、高い精度で食材の種類の認識ができると考えられる。

シナリオ 2 の 43 種類の野菜と切り方および状態の認識結果から、フォーク型デバイスは F 値 0.532、スプーン型デバイスは F 値 0.599 であった。この結果より、野菜を認識する際に形まで認識することは提案手法では困難であるといえる。シナリオ 1 とシナリオ 2 の結果より、野菜の種類の違いによる音響特性の違いは、野菜の形状の違いによる音響特性の違いよりも大きく、野菜を切ったときの個々の片の形状の違いは野菜の種類の認識に大きく影響しないといえる。

提案手法の応用として、食事のログが考えられる。ユーザが何の食材をどういった順番でどのタイミングで食べたかを記録できる。ほかには、提案手法を調理器具に適用した調理支援がある。包丁やお玉などの調理器具に提案手法を適用することで、調理しながら食材を認識できるため、調理過程の記録（レシピ自動作成）や調理段階に応じた調理方法の提示など調理インターフェースに利用できる。

提案手法は食事や調理以外の場面で活用できる。例えば、組立て作業において、ねじやナットはドライバやペンチなどの道具を用いて取り付けられる。写真で視覚的に指示をされても、似たねじを間違えることもあるが、提案手法を工具に適用することで、組立て作業の工程において誤ったねじや部品を取り付けたことを検出できる。また、農作物の収穫において、収穫鉄や運搬に使用されるロボットアームなどに提案手法を適用することで、収穫物の種類や成熟度、サイズを判断して自動で仕分けして、収穫や出荷作業の負担を削減できると考える。

4.7 リミテーション

提案手法について本論文で検証できていない点として以下が考えられる。一点目は、検証における食材の種類である。今回選択した野菜以外にも、肉や魚、キノコ類など、さまざまな食材が存在するため、今後は野菜以外の食材でも提案手法の有効性を調査する。二点目は、デバイスの実用性である。実装したプロトタイプデバイスはカトラリーと PC は有線接続されているが、食事時に使用するため無線通信であることが望ましい。また、マイクやスピーカーがカトラリーから外れて食事時に誤飲する可能性を避けるため、また洗浄に耐えるため、カトラリーの内部にデバイスを組み込むことが望ましい。三点目は、食材の組成が変化した場合の認識精度の変化の調査である。今回の結果から、野菜の認識には野菜の形ではなく組成が効いていると考えられるが、調理段階で茹でたり焼いたりすることで野菜の組成が変化し、認識精度が低下する可能性がある。

5 おわりに

本論文ではユーザが道具を介して物体とインタラクションをする場面において、ユーザの使用道具にアクティブ音響センシング技術を適用させることで、物体認識を行う手法を提案した。食事場面を対象とし、フォーク型デバイスとスプーン型デバイスを実装した。提案手法の有効性を評価する実験を 14 種類の野菜およびデバイスと食材が接触していない状態の計 15 クラスに対して個別交差検証で実施し、フォーク型デバイスにおいて F 値 0.916、スプーン型デバイスにおいて F 値 0.949 が得られた。また、14 種類の野菜を 3 種類の切り方で切り、42 種類の野菜の種類と形および食材が接触していない状態の計 43 クラスに対して個別交差検証を行った結果、フォーク型デバイスにおいて F 値 0.532、スプーン型デバイスにおいて F 値 0.599 を得た。これにより、野菜の切り方の違いまでを認識することは困難であるが、切り方のばらつきを吸収して野菜の種類を高精度で認識できることがわかった。

参考文献

- [1] B. Mustapha et al., Tag-based vision: assisting 3D scene analysis with radio-frequency tags, ICIF'02, Vol. 1, pp. 412–418 (2002).
- [2] J. Kim et al., Object Recognition using Smart Tag and Stereo Vision System on Pan-Tilt Mechanism, ICCAS'05, pp. 2379–2384 (2005).
- [3] A. Guo et al., Crowd-AI Camera Sensing in the Real World. IMWUT, Vol. 2, No. 3, Article. 111 (2018).
- [4] 大野 誠ら, アクティブ音響センシングを用いた把持状態認識, インタラクション'13, pp. 56–63 (2013).
- [5] M. Ono et al., Touch and Activate: Adding Interactivity to Existing Objects using Active Acoustic Sensing. UIST'13, pp. 31–40 (2013).
- [6] 河田大史ら, 振動のアクティブセンシングによるウェアラブル所持物体認識システム, DICOMO'15, pp. 400–406 (2015).
- [7] A. Mujibiya et al., The sound of touch: on-body touch and gesture sensing based on transdermal ultrasound propagation. ITS'13, pp. 189–198 (2013).
- [8] K. Kunze et al., Symbolic Object Localization Through Active Sampling of Acceleration and Sound Signatures. UbiComp'07, pp. 163–180 (2007).
- [9] 岩瀬大輝ら, アクティブ音響センシングによる日常物体識別と位置推定, インタラクション'18, pp. 62–71 (2018).
- [10] O. Ozeki et al., Real-Time Range Measurement Device for Three Dimensional Object Recognition. IEEE TPAMI, Vol. 8, No. 4, pp. 550–554 (1986).

モジュラー型パルス遅延回路に基づく 3D モデリングのためのインタラクティブブロック

齋藤 圭汰 ^{*†} 志築 文太郎 [‡] 川口 一画 [‡] 高橋 伸 [‡]

概要. ユーザが現実のブロックを用いて 3D モデリングを行うための、モジュラー型パルス遅延回路に基づくインタラクティブなブロックシステムを開発した。本システムにおけるブロックは、パルスを遅延させて出力する安価なアナログ回路（モジュラー型パルス遅延回路）を内蔵する。積み重ねられたブロックは、底面におけるパルスの印加をトリガとして、最下段から順番にパルスを出力する。本システムは、パルスの出力時間に基づきブロックの段数を識別する。また、測定される電圧値に基づき、ブロックの種類を識別する。本システムを用いて、8 種類のブロックを用いた 30 段の積み重ねを識別できることを確認した。本システムにおいて、1 段であれば 100 種類、20 段であれば 25 種類のブロックの識別が可能となる見込みである。



図 1. 開発したインタラクティブなブロックシステム。
積み重ねたブロックの位置および種類を識別する。

1 はじめに

ユーザが現実のブロックを用いて 3D モデリングを行うための、インタラクティブなブロックシステムの研究がなされてきた。ブロックシステムはユーザが組み合わせたブロックの構造（以降、ブロック構造）を識別することにより、ブロック構造を 3D モデルへ変換する。ブロックシステムは、コンピュータ上の操作対象と現実世界のブロックを一对一に対応させることができるために、操作対象の位置および形状をユーザが識別しやすいという特徴を持つ。

これまで、ブロックシステムとして、大きく分けて、電子回路を用いるシステム [3, 4, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17]、カメラを用いるシステム [9, 15]、マーカを用いるシステム [5, 6]、電磁気的特性を用いるシステム [12, 14, 18] が開発してきた。ただし、ブロックシステムの開発において、安価なブロックを用いて構造全体および複数種類のブロックを識別することは課題であった。例えば、カメラを用いる手法に

おいては、市販の安価なブロックをそのまま用いることが可能であるものの、オクルージョンによりカメラに映らない位置にあるブロックを識別することが難しい。また、ブロック同士の通信が可能な電子回路を内蔵する手法ではブロック構造をなす個々のブロックを識別可能であるものの、ブロックの作製コストが高い。

我々はモジュラー型のパルス遅延回路に基づく、インタラクティブなブロックシステムを開発した（図 1）。開発したブロックシステムにおけるブロックは、安価なアナログ回路のみを内蔵する。これにより、ブロックの作製コストを抑える。また、積み重ねられたブロックの底面において測定される電圧を用いて、ブロックの積み重ね段数、種類および積み重ね順を識別できるため、ブロック構造をなす個々のブロックを識別できる。

2 関連研究

ブロックシステムとして、電子回路を用いるシステム、カメラを用いるシステム、マーカを用いるシステムおよび電磁気的特性を用いるシステムが研究されてきた。これらと本研究との差分を述べる。

2.1 電子回路を用いるシステム

ブロックに内蔵したマイクロコントローラ、距離センサ、およびジャイロセンサ等の電子回路を用いて、ブロック構造識別を行うシステムが開発されてきた。Gorbet ら [8]、Anderson ら [3]、および Watanabe ら [17] は、ブロックにマイクロコントローラを内蔵し、ブロック同士を通信させることによりブロック構造を識別するシステムを開発した。Ando ら [4] および Hosoi ら [10] は、コネクタのないブロックを用いて、積み重ねられたブロックの位置および角度を推定するシステムを開発した。Glauser ら [7]、

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学コンピュータサイエンス専攻

† ksaito@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

‡ 筑波大学システム情報系

Wang ら [16] および Leen ら [13] は、センサおよび変形できるパーツを持つブロックを用いて、ブロック同士の接続だけでなく、ブロックの曲げ伸ばしを計測するシステムを開発した。これらの手法において、各ブロックには通信が可能なマイクロコントローラが内蔵されているため、ブロックの作製コストは高い。一方、センサを搭載することにより、ブロックへのタッチおよび傾ける操作などを入力として利用できる。

RFIBricks [11] は、RFID タグを使用して、ブロック構造を識別するシステムである。RFID タグには、個別の ID を割り振ることができるために、このシステムでは多くの種類のブロックを識別できる。また、RFID タグを用いるため、ブロックの製造コストは低い。一方、RFID タグの通信距離の制限により、9 段以上の積み重ねを識別できないことが示されている。

我々のブロックシステムもこれらのシステムと同様にブロックに電子回路を内蔵する。ただし、内蔵される回路は、マイクロコントローラや RFID などの通信を行う部分を含まず、替わりにパルスを遅延させて出力するアナログ回路のみから成る。このため、ブロックの作製コストを抑えられ、かつ、理論上では識別可能なブロックの個数に制限がないという特徴を持つ。

2.2 カメラを用いるシステム

ブロック構造を識別するために、カメラ画像を使用するシステムが開発されてきた。Miller ら [15] のシステムおよび DuploTrack [9] は深度カメラによって取得した画像を用いてブロック構造を識別する。カメラ画像を使用するため、ブロックとして市販の安価なものを使える。一方、オクルージョンにより、カメラに映らない位置にある個々のブロックを識別できない。

我々のブロックシステムは、これらのシステムと異なり、ブロックに電子回路を内蔵する。これにより、ブロック構造をなす個々のブロックを識別する。

2.3 マーカを用いるシステム

マーカを用いてブロック構造を識別するシステムが開発されてきた。Lumino [5] はグラスファイバによって構成されたブロックおよびマーカを用いることにより、ブロック構造を識別する。CapStones and ZebraWidgets [6] は静電容量性マーカによってタッチパネル上に発生するタッチポイントの形状を用いることにより、ブロック構造を識別する。これらのシステムでは、積み重ねられたブロックの底面に現れる形状（すなわち、各ブロックが持つマーカを足し合わせた形状）を用いることにより、ブロックの段数を識別する。そのため、ブロックの底面の大きさによって、識別可能な段数が制限される。

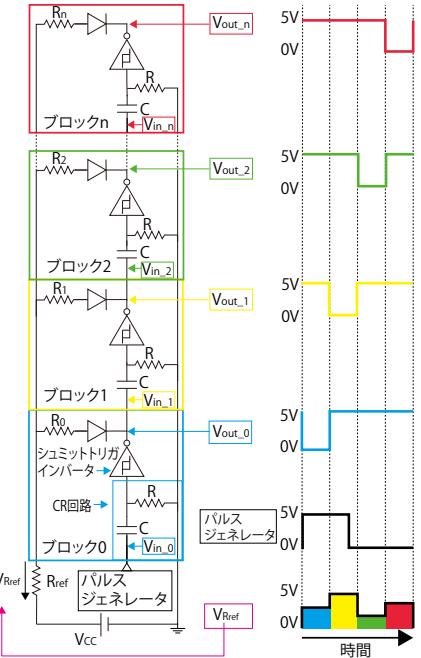


図 2. 複数接続されたモジュラー式パルス遅延回路
およびパルスの印加に対する出力パルスの時間変化。

我々のブロックシステムでは、ブロックを測定電極に接続する必要があるため、ブロックを置ける位置は測定電極の位置に制約される。一方、理論上ブロックの積み重ね段数に制限がない。

2.4 電磁気的特性を用いるシステム

電磁気的特性を持つブロックのブロック構造を識別するシステムが開発されてきた。Yoshida ら [18], Liang ら [14], および Ikegawa ら [12] は、静電容量または磁気を持つブロックを用いて、ブロック構造を識別するシステムを開発した。これらのシステムはブロック構造をなす個々のブロックを識別可能であり、かつ、ブロックを安価に作製可能である。一方、識別可能なブロックは 1 種類のみである。

我々のブロックシステムは、これらのシステムと異なり、複数種類のブロックを識別できる。

3 識別原理

我々のブロックシステムは積み重ねられたブロックの底面において測定される電圧を識別に用いる。種類を伴うブロックの並び順に電圧値を対応させる場合、少なくとも種類の段数乗の分解能が測定器に必要となるため、多段多種の識別は難しい。一方、ブロックを 1 つずつ順番に測定できれば、測定時間に基づき段数を識別し、電圧に基づき種類を識別できるため、測定器に種類数を識別できる分解能があればよい。この回路を実現するために、我々はパルス遅延回路を使用したブロック構造識別回路（以降、

モジュラー型パルス遅延回路に基づく 3D モデリングのためのインタラクティブブロック

モジュラー型パルス遅延回路) を設計した。また、抵抗を用いて、種類を識別できるようにした。本節ではこれらの回路の動作原理、および、この回路を用いたブロック構造の識別原理を述べる。

3.1 モジュラー型パルス遅延回路

モジュラー型パルス遅延回路は CR 回路およびシュミットトリガインバータによって構成される(図 2 ブロック 0)。モジュラー型パルス遅延回路の入力端子 V_{in} の電圧が 0V から HIGH (今回の実装においては 5V) に切り替わることにより、出力端子 V_{out} の電圧が HIGH から 0V へと切り替わる。また、出力の切り替わり後に一定時間(今回の実装においては 0.1 ms) 経つとコンデンサの充電が終わり、シュミットトリガインバータへの入力電圧が下がるため、 V_{out} の電圧が 0V から HIGH に戻る。モジュラー型パルス遅延回路を複数個接続すると、各回路が 1 回ずつ順番に 0V のパルスを出力することになる(図 2)。

我々のシステムにおける各ブロックは、モジュラー型パルス遅延回路を内蔵する(図 2)。積み重ねられたブロックは、底面におけるパルスの印加をトリガとして、最下段から順にパルスを出力する。我々のシステムは、パルスが出力されている時間の測定により、積み重ねられたブロックの段数を識別する。

3.2 種類識別

我々のブロックシステムは、図 2 の R_{ref} における電圧降下 $V_{R_{ref}}$ を測定し、測定結果に基づきブロックの種類を識別する。識別には、個々のブロックに内蔵される種類識別抵抗 R_n が変わると、これに応じて $V_{R_{ref}}$ が変わることを利用する。 $V_{R_{ref}}$ は、電源電圧 V_{CC} 、ダイオードの順方向電圧 V_{diode} 、基準抵抗 R_{ref} および R_n を用いて、次式で表される。

$$V_{R_{ref}} = \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_n} \times (V_{CC} - V_{diode}) \quad (1)$$

なお、任意の異なる 2 種類の種類識別抵抗 R_n による $V_{R_{ref}}$ の差は、測定器の分解能以上でなければならない。そこで、我々は任意の 2 種類のブロックにおける $V_{R_{ref}}$ の差が一定かつ分解能以上となるように R_n を選択した。また、種類識別に使用できる電圧は $V_{CC} - V_{diode}$ であり、その電圧を最大限使用できるようにした。以下に R_n の選択式を示す。

$$V_{R_{ref}R_n} = V_{CC} - V_{diode} \quad (2)$$

$$dV = \frac{V_{R_{ref}R_n}}{N} > V_{res} \quad (3)$$

$$R_n = V_{R_{ref}R_n} \frac{R_{ref}}{(V_{R_{ref}R_n} - n \times dV)} - R_{ref} \quad (4)$$

ここで、 $V_{R_{ref}R_n}$ は R_{ref} および R_n における電圧降下の和、 N は識別したい種類数、 V_{res} は測定器の分



図 3. 作製したブロック。左：上面、右：底面。



図 4. ブロックに内蔵する部品。

解能、 dV は任意の 2 種類のブロックにおける V_{ref} の差を表す。また、 n はブロックの種類を表す 0 以上の整数である。

4 実装

我々のシステムは、モジュラー型パルス遅延回路を内蔵したブロックおよびパルス測定ハードウェアから成る。また、作製したハードウェアを用いて 3D モデリングを行えるようにするアプリケーションを作製した。

4.1 ブロック

モジュラー型パルス遅延回路を内蔵したブロック(図 3)を 30 個作製した。ブロックは、回路を入れるための箱、ブロックの上面および底面に取り付けるマグネット式電極(図 4 左および中央)、およびモジュラー型パルス遅延回路(図 4 右)によって構成される。マグネット式電極は USB ケーブル(Oray, Rotating Magnetic Data Cable)に用いられているものである。また、モジュラー型パルス遅延回路において使用される素子は、コンデンサ(100 pF, エラー率 5 %)、抵抗器(1 MΩ, エラー率 1 % および種類識別用抵抗エラー率 1 %)、シュミットトリガインバータ(TOSHIBA, TC4584BP, 6 回路入り、1 回路のみ使用)である。これらの素子を使用した際にブロックから出力されるパルスの幅は約 0.1 ms であった。また、現在回路に使用している素子の価格の合計は 43 円である。なお、表面実装用の素子(シュミットトリガインバータ: 74AHC1G14GW(Nexperia)、ダイオード: M4A(HY Electronic Corp)、MLCC: 100 pF(Murata)、SMD レジス

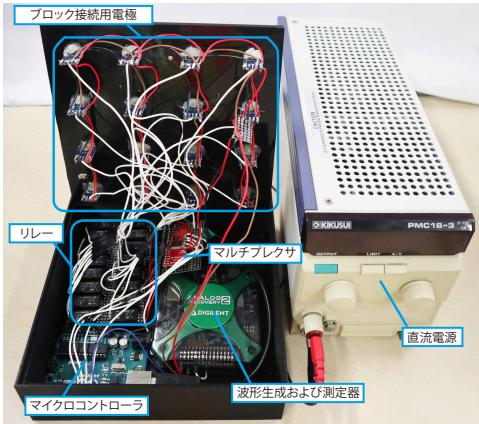


図 5. パルス測定ハードウェア.

タ: $1\text{ M}\Omega$ および種類識別用 (RS PRO)) を用いた場合は、5円 [1] である。

今回の実装では、式 2-4 に基づき、異なる 8 種類の抵抗を内蔵する 8 色のブロックを作製した。まず、式 2-4 における変数にはそれぞれ、 $V_{CC} = 5\text{ V}$, $V_{diode} = 0.6\text{ V}$, $N = 8$, $R_{ref} = 10\text{ k}\Omega$ を代入した。次に、 $n=0\text{-}7$ とした計算結果に近い抵抗を E24 系列の抵抗から選択した。結果として、黒色には $R_0 = 0\Omega$, 緑色には $R_1 = 1.5\text{ k}\Omega$, オレンジ色には $R_2 = 3.3\text{ k}\Omega$, 青色には $R_3 = 6.2\text{ k}\Omega$, ピンク色には $R_4 = 10\text{ k}\Omega$, 赤色には $R_5 = 16\text{ k}\Omega$, 黄色には $R_6 = 30\text{ k}\Omega$, 白色には $R_7 = 68\text{ k}\Omega$ を取り付けた。

4.2 パルス測定ハードウェア

パルス測定ハードウェアは、電圧測定器およびパルスジェネレータとしての多機能測定器 (Digilent, Analog Discovery 2), 5V 電源およびマルチプレクサのコントローラとしてのマイクロコントローラ (Arduino Srl, Arduino UNO Rev3), マルチプレクサ (SparkFun, CD74HC4067) および 16 個のリードリレー (FUJITSU SEMICONDUCTOR, FRL-644D05 / 1AS 5V) から成る (図 5)。また、20 個以上のブロックを使用する場合において、Arduino 電源の定格電流 (200 mA) 以上の電流を必要とするため、直流安定化電源 (KIKUSUI, PMC18-3) (図 5 右) を使用した。なお、マルチプレクサは、測定したいブロック列に接続されたリードリレーをオンにする。マルチプレクサを介して電圧を印加すると抵抗 (約 70Ω) の影響を受けて印加電圧が減衰するため、接点接触抵抗が $150\text{ m}\Omega$ であるリードリレーを使用した。その後、パルスジェネレータからブロック列には、パルス幅 0.5 ms の矩形パルスを印加する。システムは、サンプリング周波数 2 MHz において電圧測定器を使用して、 R_{ref} に加わる電圧を測定する。電圧測定器は 8000 個の測定電圧をバッファリングして PC に送信する。

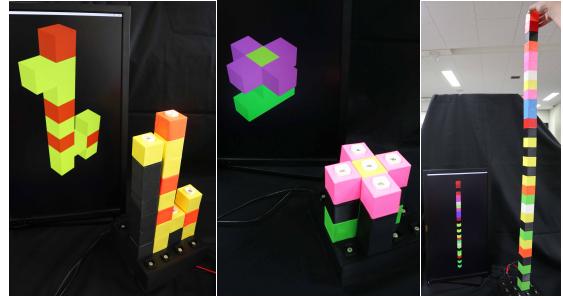


図 6. 3D モデリングアプリケーションを用いて作製した作品 (左: キリン, 中央: 花, 右: タワー)。キリンおよび花において黒色のブロックは透明なブロックとして扱った。

4.3 3D モデリングアプリケーション

作製したハードウェアを用いて 3D モデリングを行えるようにするアプリケーションを作製した。このアプリケーションは、プログラム言語として Python 3.7.6, 描画ライブラリとして OpenGL 4.6.0 を用いて作製された。アプリケーションは電圧測定器から送信された測定電圧が閾値 (今回は 0.4 V) 以上となる時間を用いてブロックの段数を識別する。また、各ブロックにおける電圧値と閾値を比較することによりブロックの種類を識別する。このため、全種類のブロックの電圧を予め測定し、その電圧を基準として $\pm 0.2\text{ V}$ を閾値とした。ハードウェア 16箇所のブロック列を測定し、アプリケーションが画面を更新するまでの時間は、 0.3 s である。

アプリケーションを用いて 3 つの作品を作製した (図 6)。キリン (図 6 左) には、20 個、花 (図 6 中央) には 15 個、タワー (図 6 右) には 30 個のブロックを使用した。キリンおよび花において黒色のブロックを透明に描画した。今後、アプリケーションと現実のブロックの見た目を揃えるために、透明を意味するブロックを透明の素材を用いて作製する予定である。なお、タワーの作製により、システムが 30 段のブロックを識別できることを確認した (図 6 右)。

5 性能評価

作製したブロックおよびパルス測定ハードウェアの性能を評価するための実験を行った。これらの実験において、電源には Arduino UNO の 5V 電源ではなく、安定した電源を確保するために、直流安定化電源 (KIKUSUI, PMC18-3) を使用した。

5.1 種類数

測定実験のために、式 2-4 に基づき、種類識別抵抗を作製した。種類識別抵抗には、誤差率 1% の E24 系の抵抗を 1 個または 2 個使用した。また、作製した種類識別抵抗の値は、計算結果から最大 1% の差

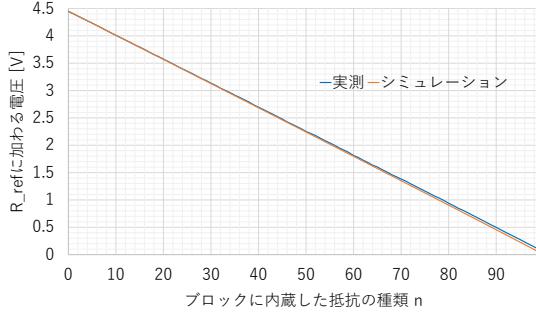


図 7. 100 種類 ($n=0 \sim 99$) のブロックを 1 段積んだ際に測定される電圧。

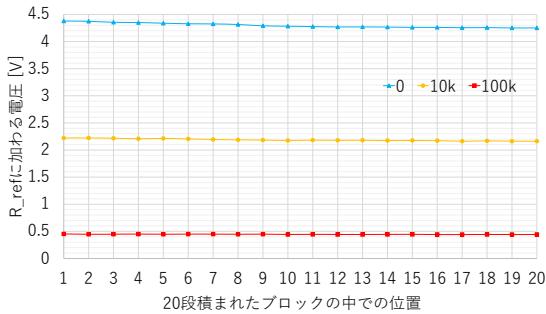


図 8. 20 段積んだブロックの各位置において測定される電圧。

がある。そのため、計算結果からの差、および抵抗の持つ誤差を考慮すると、最大 2% の差が発生する。2% の誤差によって発生する R_{ref} における電圧降下の差をシミュレータを用いて計算した結果、最大 ± 0.022 V となった。つまり、 $0.022 \times 2 = 0.044$ V 刻みにおいて R_{ref} における電圧降下が変化するように、種類識別抵抗を選択すれば、測定される電圧に重複がない。そこで、0.044 V 刻みにおいて電圧降下が変化するように、式 2-4 における変数を、 $V_{CC} = 5$ V, $V_{diode} = 0.6$ V, $N = 100$, $R_{ref} = 10\text{ k}\Omega$, $n = 0 \sim 99$ とし、100 種類の抵抗を作製した。

作製した抵抗を 1 つのブロックに取り付け、測定ハードウェアを用いて R_{ref} における電圧降下を測定した(図 7)。図 7において青が実測値、オレンジがシミュレーション値(LTSpice XVII)である。実測値における種類間の最小の電圧の差は、0.032 V、最大の電圧の差は 0.055 V であった。つまり、理論値の 0.044 V を基準として、-0.012 V および +0.011 V の差があった。この結果は、素子の誤差による差の範囲内であった。一方、実測値とシミュレーションの差は抵抗値の増加に伴って大きくなり、最大の差は 0.049 V であった。この結果は、素子の誤差による差より大きい。この原因として、測定器の誤差、およびシミュレーションにおいて入出力インピーダンスを考慮していないことなどが考えられる。

5.2 段数

ブロックを 20 段積み、ブロック底面の V_{in} 端子にパルスを印加した。その後、各位置(1 段目、2 段目など)のブロックにおいてパルスが出力された際に、 R_{ref} に加わる電圧を測定した。また、この測定を 20 段全てのブロックの種類識別抵抗が 0Ω , $10\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$ の 3 つの場合において測定した。その結果を図 8 に示す。3 つの場合において、高い位置になるほど、測定される電圧が下がっていることが確認できる。それぞれの場合における最大の電圧および最小の電圧の差は、 0Ω において 0.127 V, $10\text{ k}\Omega$ において 0.060 V, $100\text{ k}\Omega$ において 0.012 V であった。電圧が減衰する原因として、ブロックの電極による接触抵抗が考えられる。すなわち、接続数が増えるほど抵抗値が加算されるため、高段に位置するブロックほど測定電圧が減衰すると考えられる。

5.3 結果の考察

現在の実装では、基準電圧土数十 mV という閾値を用いて種類識別を行う。実測値を基準電圧とした場合、100 種類を閾値の範囲に重複なく測定できており、1 段であれば 100 種類を識別できる。一方、高段のブロックの測定電圧には減衰があり、最大は 0Ω における 0.127 V である。このことから、積み重ね個数が 20 段までの場合は、抵抗の誤差と電圧の減衰を考慮した、基準値 $+0.022$ V および -0.149 V($= -0.022 - 0.127$) を閾値として、 0.171 V($= 0.022 + 0.149$) を刻み幅とした 25 種類($25.7 = 4.4 / 0.171$)が識別できると考えられる。

6 議論と今後の展望

性能評価の結果より、我々のシステムにおいて、1 段であれば 100 種類、20 段であれば 25 種類のブロックの識別が可能となる見込みである。また、各ブロックに内蔵される回路は比較的安価(表面実装の素子を用いた場合、回路の価格は 5 円程度[1])である。このように、比較的安価でありながら、多段多種の識別を実現した点は、既存システムにはない本システムの利点である。この利点を活かすことにより、大量のブロックを用いたモデリングシステムを実現できる可能性がある。

ただし、現実装では高段まで識別しようとするほど識別可能な種類数が減る。レゴブロック[2]に使用されている色は 100 種類以上であることから、段数を問わず 100 種類程度の識別ができることが目標である。

本論文では 1 段および 20 段において識別可能な種類数を推定した。今後、接触抵抗のシミュレーションにより、各段数における識別可能な種類数を推定し、段数に対する種類数の一般式を導く必要がある。

現在、高価(4.5 万円程度)な測定器を使用して

いるが、AD コンバータおよびマイクロコントローラを用いることにより、パルス測定ハードウェアを安価な構成にて実現できる可能性がある。また、今後、2 MHz より低いサンプリングレートを用いたより安価な構成を検討する。さらに、パルス測定ハードウェアにおいてリレーを用いているが、台座の拡張を簡単化するために、リレーを必要としないパルス測定ハードウェアの設計を試みる。

現在の実装において、30 段までであれば同一ブロックが複数並んだ場合においても、問題なく識別ができるることを確認した。一方、システム構成および使用環境が異なる場合において、コンデンサの精度およびシュミットトリガインバータの閾値が変化するため、パルス幅が変わる可能性がある。その場合において、正確に段数を計測する方法を調査する。

本システムでは、それぞれのブロックが持つ抵抗を測定できるため、抵抗値の変化に基づくセンサを使用できる可能性がある。抵抗変化型のタッチセンサおよび傾きセンサなどをブロックに埋め込むことにより、ブロックに対するタッチ、およびブロックを傾ける操作によって 3D モデルを変化させるなどのインタラクションが可能となると考えられる。

7 まとめ

モジュラー型パルス遅延回路を用いたインタラクティブなブロックシステムを開発した。本論文において、モジュラー型パルス遅延回路を内蔵するブロック、パルス測定ハードウェア、および 3D モデリングアプリケーションの実装を示した。また、本システムを用いて、8 種類のブロックを用いた 30 段の積み重ねを識別できることを確認した。性能評価の結果より、我々のシステムにおいて、1 段であれば 100 種類、20 段であれば 25 種類のブロックの識別が可能となる見込みである。今後、測定ハードウェアの安価な実装、識別性能の向上方法、および本システムにおけるセンサの使用を検討する。

参考文献

- [1] RS コンポーネンツ, 2020. <https://jp.rs-online.com/web/>, (2020 年 9 月 29 日 閲覧).
- [2] レゴ, 2020. <https://www.lego.com/>, (2020 年 11 月 12 日 閲覧).
- [3] D. Anderson, J. L. Frankel, J. Marks, D. Leigh, E. Sullivan, J. Yedidia, and K. Ryall. Building Virtual Structures with Physical Blocks. In *UIST '99*, pp. 71–72, 1999.
- [4] M. Ando, Y. Itoh, T. Hosoi, K. Takashima, K. Nakajima, and Y. Kitamura. StackBlock: Block-shaped Interface for Flexible Stacking. In *UIST '14 Adjunct*, pp. 41–42, 2014.
- [5] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck. Luminous: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles. In *CHI '10*, pp. 1165–1174, 2010.
- [6] L. Chan, S. Müller, A. Roudaut, and P. Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens. In *CHI '12*, pp. 2189–2192, 2012.
- [7] O. Glauser, W.-C. Ma, D. Panozzo, A. Jacobson, O. Hilliges, and O. Sorkine-Hornung. Rig Animation with a Tangible and Modular Input Device. *ACM Trans. Graph.*, 35(4):144:1–144:11, 2016.
- [8] M. G. Gorbet, M. Orth, and H. Ishii. Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography. In *CHI '98*, pp. 49–56, 1998.
- [9] A. Gupta, D. Fox, B. Curless, and M. Cohen. DuploTrack: A Real-time System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly. In *UIST '12*, pp. 389–402, 2012.
- [10] T. Hosoi, K. Takashima, T. Adachi, Y. Itoh, and Y. Kitamura. A-Blocks: Recognizing and Assessing Child Building Processes during Play with Toy Blocks. In *SA '14*, pp. 1:1–1:2, 2014.
- [11] M.-J. Hsieh, R.-H. Liang, D.-Y. Huang, J.-Y. Ke, and B.-Y. Chen. RFIBricks: Interactive Building Blocks Based on RFID. In *CHI '18*, pp. 189:1–189:10, 2018.
- [12] K. Ikegawa and B. Shizuki. Tesla Blocks: Magnetism-based Tangible 3D Modeling System Using Block-shaped Objects. In *OzCHI '18*, pp. 411–415, 2018.
- [13] D. Leen, R. Ramakers, and K. Luyten. Strut-Modeling: A Low-Fidelity Construction Kit to Iteratively Model, Test, and Adapt 3D Objects. In *UIST '17*, pp. 471–479, 2017.
- [14] R.-H. Liang, L. Chan, H.-Y. Tseng, H.-C. Kuo, D.-Y. Huang, D.-N. Yang, and B.-Y. Chen. GaussBricks: Magnetic Building Blocks for Constructive Tangible Interactions on Portable Displays. In *CHI '14*, pp. 3153–3162, 2014.
- [15] A. Miller, B. White, E. Charbonneau, Z. Kanzler, and J. J. LaViola Jr. Interactive 3D Model Acquisition and Tracking of Building Block Structures. *IEEE TVCG*, 18(4):651–659, 2012.
- [16] M. Wang, K. Lei, Z. Li, H. Mi, and Y. Xu. TwistBlocks: Pluggable and Twistable Modular TUI for Armature Interaction in 3D Design. In *TEI '18*, pp. 19–26, 2018.
- [17] R. Watanabe, Y. Itoh, M. Asai, Y. Kitamura, F. Kishino, and H. Kikuchi. The Soul of Active-Cube: Implementing a Flexible, Multimodal, Three-Dimensional Spatial Tangible Interface. *Comput. Entertain.*, 2(4):Article 6b, 1–13, 2004.
- [18] A. Yoshida, B. Shizuki, and J. Tanaka. Capacitive Blocks: A Block System that Connects the Physical with the Virtual Using Changes of Capacitance. In *UIST '15 Adjunct*, pp. 85–86, 2015.

PartsSweeper: 電子部品や工具をさりげなく整理するインタラクティブ・デスクの試作と応用

折原 征幸* 塚田 浩二*

概要. デスクワーク等を行う作業机、特に電子工作では多数の電子部品や工具が机の上に配置され、それらを組み合わせて使用するために煩雑になりやすい。本研究では、電子工作等の作業机に着目し、さりげなく机上の工具／部品等を移動・整理するシステム「PartsSweeper」を提案する。本システムは、机の裏に設置したXYプロッター、ヘッド部の永久磁石と昇降機構、及び作業空間を入力するタブレット端末を中心に構成される。特別なセンシングを行うことなく、工具と電子部品を個別に移動／整理することを目指す。本論文ではデバイスやシミュレータの実装と、基礎的な動作検証、また応用例について報告する。

1 はじめに

デスクワークを行う作業机には、文房具や書類、コンピュータ等の大きさや形の異なる様々な日用品が置かれている。こうした作業机では手を動かしていくうちに常にモノの配置が変化し、煩雑になりやすい。作業中にモノを見失い、探索に無駄な時間を使ってしまった経験のある人も多いであろう。

特に電子工作では、多数の細かい電子部品や複雑な形の工具が机上に配置され、部品同士を組み合わせたり工具を使い分けたりしながら作業を進めていく。そのため作業を進めるほど、机上に部品や工具が散乱しやすい傾向がある。部品や工具を使い終わるたびに丁寧に再配置すればこうした問題は軽減できるが、作業中は回路図／設計図等の理解や繊細な作業に気を取られ、整理整頓を心掛けることは難しい。

こうした問題を解決するために、本研究では作業机がさりげなく机上の工具／部品を移動／整理するシステム「PartsSweeper」を提案する（図1）。

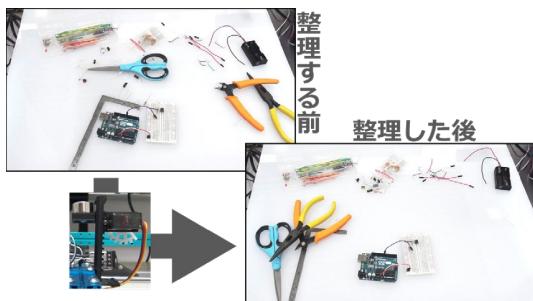


図1 磁石による机上の電子部品／工具の整理

2 関連研究

本研究の関連研究を「机上のモノを物理的に移動させるシステム」、「モノ探しや整理を支援するシステム」の2つの視点から紹介する。

2.1 机上のモノを物理的に移動させるシステム

机上のモノを物理的に移動するシステムについて紹介する。Cooky[1]は机上に複数の小型ロボットを配置し、作業を分担して調理を行えるシステムである。調理過程で人とロボットが柔軟に協調作業を行うことを目指している。TRANSFORM[2]はインタラクティブに形状が変化する家具である。机上の凹凸を機械的に制御することで、物体の移動を可能としている。

次に、磁力を用いてモノを移動させるシステムについて紹介する。ToolShaker[3]は、日用品に情報提示機能を付加できる手法を提案している。具体的には、壁面や机上に収納／配置された日用品に対して、外部から電磁石で磁力を発生させて動かしている。またActuated Workbench[4]は、机の下に格子状に配置した電磁石を制御することで机上の物体移動を可能にした。砂鉄を電磁石で制御し、絵を描画するなどの活用例も示している。dePENd[5]は、ユーザの持つボールペンの動きを机裏面に設置した磁石で制御することで、「こっくりさん」のような新たな体験の創出や、描写スキルの向上を目指すシステムである。またインテリジェントデスク[6]は、電磁石を備えたXYテーブルを机の裏側に配置して、底面に磁石をつけた食器などを机上で移動させるシステムである。カメラでの画像認識を組み合わせることで、物体の衝突を検知して障害物を避けている。

Copyright is held by the author(s).

* 公立はこだて未来大学

2.2 モノ探しや整理を支援するシステム

モノ探しや整理を支援するシステムについて紹介する。DrawerFinder[7]は、1つの棚に格納された複数の収納箱を対象としたモノ探し支援システムである。収納箱を開け閉めする際の中身と周辺状況を自動で撮影し、Web ブラウザ上で手軽に確認することができる。Limpid Desk[8]は机上に積み重ねられた書類に関して下層の書類の映像を机上に設置したカメラで取得し、あたかも上層の書類が透けるかのように処理した映像をプロジェクタ投影するシステムである。

次に、ロボットによる整理支援を行う研究を紹介する。郷古ら[9]は、机上に置かれたロボットが机の上の物体を落とすという振る舞いによって、作業者の片づけの動機付けを促せることを実験によって示した。木下ら[10]は机上の工具を探索するロボットを制作した。車輪型ロボットで工具板から足りない工具の情報を取得し、室内を巡回してカメラで机に放置された工具の探索を行う。

2.3 本研究の特徴

本研究では、電子工作を行う作業机に焦点を当てる。机上の電子部品や工具をさりげなく移動／整理することで作業者を支援する。また少数の磁石ヘッドを移動させるシンプルな駆動方式も特徴である。

3 PartsSweeper

PartsSweeper の主要なコンセプトは以下の 3 点である。

1. 電子部品／工具を移動して整理
2. ユーザの作業への配慮
3. 既存の作業机を拡張

以下、それぞれの詳細について説明する。

3.1 電子部品／工具を移動して整理

電子工作を行う作業机の上に多数置かれる受動部品（抵抗／コンデンサ等）や工具（ニッパー／ペンチ等）の移動と整理を行う。我々はこうした部品や工具の多くが強磁性体であり、磁石に反応することに着目した。磁力を調節しながら磁石を前後左右に移動させることで部品や工具を任意の場所に移動させることを目指す。

なお、本論文では整理について、「部品と工具が分類されて数ヶ所にまとまり、作業空間が確保されている状態」と定義する。

3.2 ユーザの作業への配慮

本稿のタイトルにもあるように、本研究では「さりげない」整理を行う。本研究における「さりげない」とは、システムの存在感が少なく、ユーザの作業を阻害しにくいことを意図している。すなわち、

ユーザがシステムの動作に気づきにくく、また気づいたとしても介入しやすい手法を利用する。具体的には、机の下側から磁力を用いて部品や工具を移動させる方式を採用する。移動ロボットやロボットアーム等を用いる場合と比較して、システムやその動作が目立たないため心理的な負担が少なく、運動力が相対的に弱いため介入しやすい（例えは運動を防いだり、手動で移動させたりしやすい）と考える。

またユーザによっては、図 2 に示すように普段から机上での部品／工具の配置を決めている場合がある。勝手に位置を変えてユーザを混乱させないように、好みの作業空間をレイアウトするための入力インターフェースを用意する。位置／移動経路／タイミングなどを事前に指定して、個々のユーザの好みに合わせられるように配慮する。

3.3 既存の作業机を拡張

既存の作業机の拡張を前提として、導入が容易なシンプルなシステム構築を採用する。具体的には、天板の裏面に 2 軸の駆動機構を搭載し、ヘッド部に磁石を搭載することで、机上の部品／工具に対して磁力を出力する。また磁石には永久磁石／電磁石の 2 種類の選択肢があるが、本研究では永久磁石を利用する。電磁石は距離による吸着力の減衰が大きいため天板を挟んだ設置には向かず、強い磁力を得るために大容量の電源が必要になるため設置コストが高くなると考えた。

4 実装

本システムは、天板の裏面に設置された磁力制御機構とそれを操作するタブレット端末から構成される。ここでは本論文を書くにあたって使用したプロトタイプのシステム構成について紹介する。

4.1 磁力制御機構

基本的な駆動機構としては、前述したコンセプトを踏まえ、XY プロッター（MakeBlock 「XY-Plotter ロボットキット V2.0」）を採用した。XY プロッターは 2 台のステッピングモーターとタイミングベルト

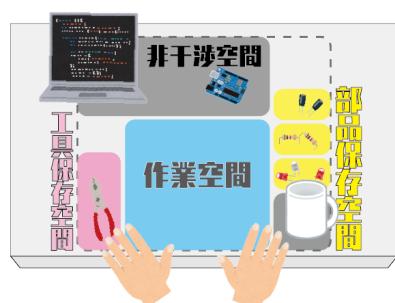


図 2 作業空間設計の例

PartsSweeper: 電子部品や工具をさりげなく整理するインタラクティブ・デスクの試作と応用

を用いてヘッド部をコンピュータ制御で2軸方向に動かせる装置である。ヘッド部の構成を変えることで様々な用途に使用でき、ペンを取り付けるとペンプロッターに、レーザーを取り付けるとレーザーカッターとして使用することができる。

我々はヘッド部に磁石を搭載し、磁石自体を上下させ、図3のように厚さ5mmのアクリル板を上部に設置した。そうすることでアクリル板を机の天板に見立て、机上の任意の個所に磁力を発生／停止させることにした。磁石を上げたままヘッド部を移動させることで、机上の部品／工具の強磁性体を引きずって移動させることができ、磁石を下げることで部品／工具を移動させた場所に留まらせることができる。磁石を十分に机から離さないと磁力の影響が机上に残りうるため、サーボモータの回転運動を昇降運動に変換する機器を自作することにした(図4)。

さらに、磁力を調節することで部品／工具を選択して運搬する。すなわち、磁力を弱めることで工具は移動できず、部品のみを移動させるという状態にすれば、ヘッドの移動のみで部品／工具を分けて整理できる。実装方式として、磁力の違う2種類の磁石を使う方法や、天板との距離を調節することで吸着力を制御する方法にこれまで取り組んできた。本稿では、磁石と昇降機構が1つずつで済むためヘッド部がコンパクトになるという点から、後者的方式を中心に説明する(図4)。

4.2 タブレット端末

タブレット端末は、部品／工具を整理するための入力インターフェースを提供する。入力インターフェースのソフトウェアはProcessingで実装した。例えば磁石を昇降する高さや、ヘッド部を平面移動させる位置などを直接指定できる動作検証用ソフトウェアや前述した作業空間をレイアウトするソフトウェアを構築した(図5A)。

また動作のタイミングもソフトウェア上で指定することができる。常に稼働／一定間隔で稼働／一度だけ稼働など複数の条件でヘッド部を動作させる。

4.3 移動シミュレータ

磁力によるヘッド部の移動パターンを試行するた



図3 プロトタイプの外観

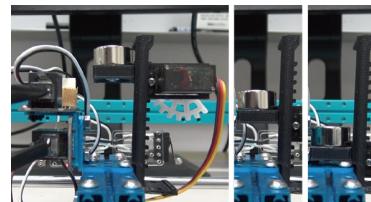


図4 ヘッド部の外観と動作例。左から右に行くほどヘッド位置が下がる。

めの移動シミュレータに関して述べる。実機では最大動作速度の制約があり、部品等の初期位置を統一することも困難であるため、様々なヘッドの移動経路を試行錯誤することが難しい。

そこでソフトウェア上で移動経路の検証を行うための移動シミュレータを用意する。机上に同じ部品が大量にあり、その部品を1~2か所に集めることを想定している。このシミュレータを用いて、効率的に部品を移動できる経路を検証し、実機での実装に生かしていく。

実装はProcessingで行い、磁力を再現するために群衆アルゴリズム(Boids)を利用している。Boidsとはオブジェクトに分離・整列・結合といった3つの動作原則を与え、多数を同時に動かして群れの振る舞いをシミュレーションするアルゴリズムである。図5Bにて、シミュレータの機能を説明する。左上の大きな円をヘッド部の磁石、小さな円を強磁性体の部品とする。大きな円が小さな円に接近すると小さな円を引き付ける。小さな円同士はお互いに引き付けないが、接触したらぶつかり弾かれ重なることはない。右側のメニューは、0から7の数字のボタンは事前に設定した動作パターンを選択できる。また、その下に全体のリセットボタン、磁力のオンオフの状態を示す表示等が配置される。

5 予備実験

ここでは、「移動可能な部品／工具の調査」と、「移動シミュレータと実機での動作テスト」について述べる。

5.1 移動可能な部品／工具の調査

磁力で移動可能な部品／工具の調査を行った。今回対象にした部品／工具は図6にあるように、単色LED、抵抗、積層セラミックコンデンサ、ボルトとナット、はさみ、ニッパー、けがき針である。調査方法は対象となる電子部品または工具をPartsSweeperの天板の上に置き、ヘッドを動かし磁力を用いて30cm離れた2点間を移動させた。な

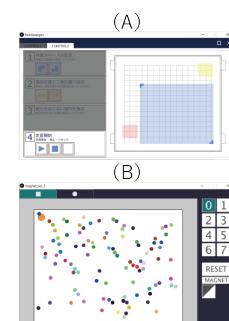


図5 ソフトウェアの画面

お、実験は強・弱2種類の磁石ヘッドを備えた前身のプロトタイプで行った。

結果を表1に示す。対象となる物体が移動できる場合が「○」、吸着はするが移動できない場合を「△」、吸着自体ができない場合を「×」としている。単色LEDと積層コンデンサはどちらの磁石でも移動でき、けがき針とはさみは強い磁石のみ移動が確認できたので、これらの部品／工具は選択的な移動対象とできると考える。なお抵抗の脚は磁石につかないが、皮膜の部分は磁石に反応した。ニッパーの移動ができなかつたのは、持ち手の滑り止めにより摩擦が強く働いたことが原因だと考える。

5.2 移動シミュレータと実機での動作テスト

机全体に散らばった部品を一部に移動させるような経路を考案し、移動シミュレータで実装した。作成した7種類の経路を図7に示す。今回、その中でうまく想定通りの位置に集められたパターン2とうまくいかなかったパターン1を実際の環境で試し、移動シミュレータの有用性と、実機での特徴を調べる。

まず事前に実験を行った移動シミュレータでの結果を示す(図8上段)。パターン2はほとんどの部品が指定個所に集められた。成功要因として、部品を少量ずつ1辺に集めていることが挙げられる。制御の観点だと、磁力を切り替えつつ、磁力オンの状態ではヘッドを同一方向に周期的に移動させる点が特徴である。パターン1では移動の途中でヘッドから遠い部品がはじかれてこぼれてしまう様子が見られた。これらの結果から、ヘッドは一度に運べる量に限界があるため、すべての部品を一筆書きのように一気に集める経路は向かないことが分かった。

続いて実際の環境での動作テストを行った。PartsSweeperのヘッド部を移動シミュレータと同じ移動経路で動かし、天板に乗せた電子部品を1か所に集める。電子部品は、全体が磁石で付く部品60個(LED×30個、コンデンサ×30)と部分的に磁石で付く部品40個(抵抗×20、タクトスイッチ×20)の計100個を用意した。試行回数は5回とした。

結果として、実機でもパターン2ではほとんどの部品を最後まで移動できた反面、パターン1では取りこぼしが多い傾向があった(図8下段)。今後、各移動パターンについて実機での詳細な検証を行い、シミュレータの再現性を検証していきたい。また実機での特徴として、取りこぼしの少ないパターン2であっても、磁石で付きにくい抵抗やタクトスイッチは3個程度取りこぼしが見られた。

6 応用例

本章では、目的である机上の整理以外に本システムで実現可能な応用例として、電子工作支援、はん

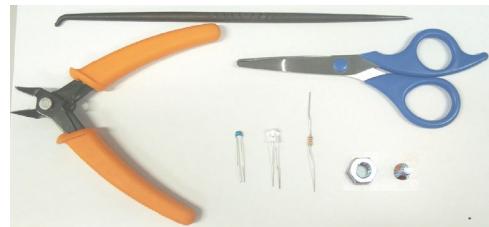


図6 調査対象の部品／工具

表1 部品／工具の移動結果

	対象	弱磁石	強磁石
部品	単色LED 抵抗 積層コンデンサ ボルトとナット	○ △ ○ △	○ ○ ○ ○
工具	けがき針 はさみ ニッパー	△ × ×	○ ○ △

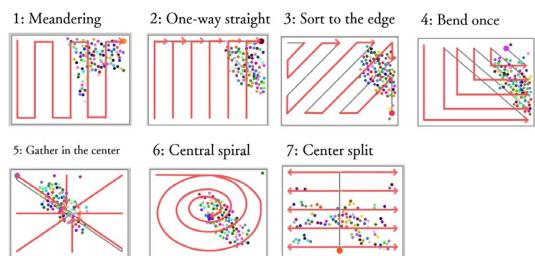


図7 用意した移動パターン。

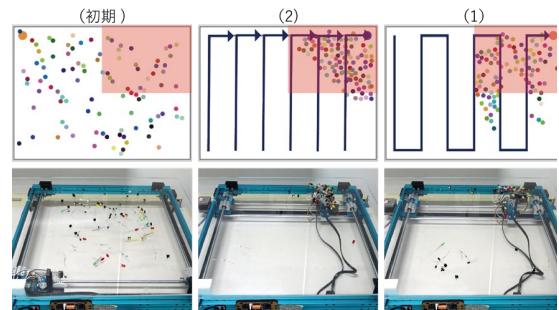


図8 移動シミュレータでの結果(上段)と実機での結果(下段)。右から初期状態、パターン2、パターン1。

だづけの支援、天板の拭き掃除を紹介する。なお、応用例の一部(電子工作支援、はんだ付け支援)は提案技術の可能性を広めるために実装しており、コンセプトの「さりげなさ」とは矛盾する点があるため、本格的な導入については今後議論していきたい。

6.1 電子工作支援

特に学習段階の電子工作においては、ステップ毎に1つずつ電子部品を使って組み立てる方法が一般的である。例えば、初めにLEDを点灯し、次に可変

PartsSweeper: 電子部品や工具をさりげなく整理するインタラクティブ・デスクの試作と応用

抵抗を利用して光量を調節し、さらにタクトスイッチを利用して LED をオンオフする、といった具合である。また、初学者にとって抵抗やコンデンサは区別が難しく、間違った部品を取り付けてしまうと回路がショートする恐れもある。

こうした初学者の電子工作支援のために、事前に用意した部品を 1 つずつ手元に運ぶ応用例を実装した(図 9)。机奥のディスプレイに現在の組み立て手順が表示される。指示に沿って工作を行っていくと、部品を組み込む際、所定の位置に用意した部品が自動で手元に届く。これによって逐一部品を探す必要がなくスムーズに電子工作を行え、さらには部品の選択ミスをなくすことができる。

6.2 はんだづけの支援

はんだづけを行う際は、はんだ、小手、部品の最低 3 つを保持する必要があるため、様々な固定具を活用することが多い。そこで、磁石で部品を固定することで、はんだ付けを支援する応用例を実装した(図 10)。磁石を特定の場所に移動させ、天板に近づけることで、その近くに置いた部品を磁力で引き付けることができる。図 10 は、LED を固定した例である。クリップのような強固な把持力は持たないが、部品を同じ場所／向きで留められることを確認した。

また、部品の磁化を利用して、はんだごての先に部品を引き付けたり、逆に磁石を離すことで引き離せたりできる可能性がある。

一方、今回はアクリルの天板を利用しておらず、またネオジム磁石自体も熱に弱いため、長期的な運用には検証が必要である。

6.3 天板の拭き掃除

工作机は部品の散乱以外にも、ほこりなどで汚れやすい。そこで、提案システムで自動的に拭き掃除を行う応用例を実装した。まず、図 11 の右側のように、食器洗い用のスポンジに磁石の付いた板を取り付けた。これを天板上に配置することで、磁石がヘッド部に吸着してスポンジを移動させることができ

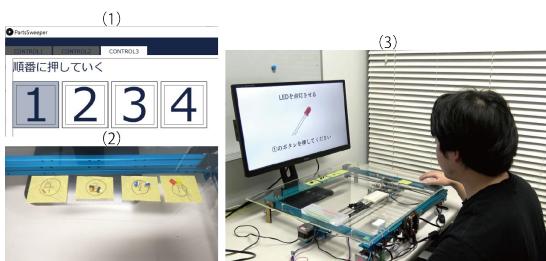


図 9 電子工作学習の操作支援の様子。(1)操作すると(2)図のように配置された部品が手元に来る。(3)はスライドに合わせて学習している様子。

る。事前にスポンジに洗剤や水をつけることで、天板がきれいに磨かれるなどを確認した。

この仕組み単体では掃除機ロボットなどでも代用可能であるが、スポンジの配置位置などを工夫することで、机の上の整理→拭き掃除といった一連の作業を自動化できる可能性がある。

7 議論

7.1 適切な分類方法の設計

提案システムでは原理的には工具と部品を個別に移動可能である。すなわち、先に弱い磁力で部品を移動させ、次に強い磁力で工具を移動させる。一方、実際にこの手順でシステムを運用すると、部品が工具に引っかかって止まってしまう場合が散見された。このための解決策としては、(1)カメラなどで工具を認識して移動経路を設定する、(2)工具を(部品と一緒に)先に移動させ、移動先の機構で部品と分類するといった方式が考えられる。本研究ではシンプルなシステムを検討しているため、主に(2)の方式を中心に対策を検討したい。たとえば、工具などを格納するための机の周辺部に小さな穴を開けることで、部品だけを振り落として下にまとめるような機構が考えられる。また、机の一部に物理的なパターン(例: 幅の異なる凹凸や摩擦力の異なるテクスチャ)を配置することで、電子部品の重さや形状に応じて、ふるいにかけるような細かい分類もできる可能性がある。

7.2 非磁性体の移動

提案システムは永久磁石を用いて強磁性体のみを移動させる。電子部品や工具の多くが強磁性体であることが研究の着眼点ではあるものの、実際には工作机の上にも非磁性体の部品等が存在している。こうした非磁性体を整理する方法として、(1)非磁性体を金属のトレイに載せてまとめる、(2)角材に金属板を張り付けて横に滑らせるなどで非磁性体をまとめて移動させる。といった方式が考えられる。一方で、こうした対策は机の上に元来不要なモノを増やすことになるので、ユーザへの負担に配慮しつつ実



図 10 磁力で固定しあんごてをしている様子

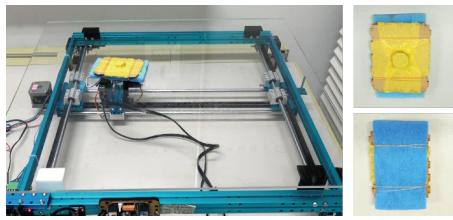


図 11 拭き掃除の様子と加工したスポンジ

現可能性を探っていきたい。

7.3 さりげない動作に向けて

本提案のコンセプトであるさりげない動作を実現するための、動作タイミングや介入時のフィードバック等について議論する。

動作タイミングとしては、作業者の着座状況等は簡単なセンサで検出でき、離席時は直接的に作業を邪魔する心配がないためシステムを動作させやすいと考える。しかし、必ずしも作業の終了を意味するわけではないため、戻ってきたユーザが不快に感じる可能性もある。もちろん、整理ボタンを用意しておき、ユーザが任意のタイミングでボタンを押すことで動作を開始する仕組みは現実的な方法であるが、さりげない動作からはやや離れてしまう。このように動作タイミングは一長一短であるため、任意に調整できるような方式を整理していきたい。

介入しやすさの観点では、現状のシステムでは運搬力が弱くデバイスに直接接触しないため、ユーザが安全に介入することはできる。一方、ユーザの介入状態をセンシングする仕組みは存在しないため、簡易なセンサでユーザの介入を検出し、システムの動作を変更するような手法を検討していきたい。

また、はんだ付けの支援のような応用例ではシステムのサポート状態を明示する（さりげなさを抑える）方がよい可能性もある。こうした例を本研究の対象とする場合、システムの存在感を調整するような仕組み（例：ヘッド部にLEDを付けて動作状態を提示する）も併せて議論していきたい。

7.4 磁力による影響の考慮

電子部品などの精密部品の中には磁力の影響を受けやすいものも存在する。特に磁気センサや低周波帯のRFIDのようなインダクタンスを扱う部品の利用には注意が必要である。

現時点の対処方法としては、机の一部に物理的に高さのある台や磁気シールド素材を設置する、ソフトウェア的に磁石を上げることのできない非緩衝空間を設定する、といった対応を検討している。一方、これらの手法はさりげない利用の観点では悪影響があるため、今後上述した部品への磁力の影響を調査し、対応を検討していきたい。

8 おわりに

本研究では、電子工作等の作業机に着目し、さりげなく机上の部品／工具を移動／整理するシステム PartsSweeper を提案／試作した。PartsSweeper は天板の裏面に設置した XY プロッターと、磁石と昇降機構からなるヘッド部、作業空間を入力するタブレット端末を中心に構成される。今回基本的な動作検証を行った。またプロトタイプと移動シミュレータを制作し、ヘッド部の移動パターンの模索／検証を行い、3つの応用例を紹介した。今後はシミュレータと実機を連動して実装／検証し、移動と天板上の物理的な機構を組み合わせて整理を行えるような経路を見つける。また実際の電子工作環境での運用を通して、システムの効果を検証したい。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1]Y. Sugiura, D. Sakamoto, A. Withana, M. Inami, and T. Igarashi, “Cooking with Robots: Designing a Household System Working in Open Environments,” In Proceedings of CHI’ 10, pp. 2427-2430, Apr. 2010.
- [2]L. Vink, V. Kan, K. Nakagaki, D. Leithinger, S. Follmer, P. Schoessler, A. Zoran, and H. Ishii, “TRANSFORM as Dynamic and Adaptive Furniture,” In Proceedings of CHI’ 15, pp. 183, Apr. 2015.
- [3]道具 駿斗, 沖 真帆, 塚田 浩二, “ToolShaker: 日用品自体を駆動する情報提示手法の提案,” 情報処理学会論文誌, vol. 60, no. 2, pp. 385-396, Feb. 2019.
- [4]G. Pangaro, D. Mayes-Aminzade, and H. Ishii, “The actuated workbench: Computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces,” Proc. UIST ’02, pp. 181-190, Oct. 2002.
- [5]山岡 潤一, 簍 康明, “dePEND: ボールペンの強磁性を利用した手書き制御システム,” 情報処理学会論文誌, vol. 55, no. 4, pp. 1237-1245, Apr. 2014.
- [6]蓮本 謙介, 横田 基紘, 尾形 正泰, 今井 倫太, “XY テーブルを用いた卓上アクチュエーションシステム,” 第 78 回全国大会講演論文集, vol. 2016, no. 1, pp. 215-216, Mar. 2016.
- [7]M. Komatsuzaki, K. Tsukada, I. Sii, “DrawerFinder: finding items in storage boxes using pictures and visual markers,” In Proceedings of IUT’ 11, pp. 363-366, Feb. 2011.
- [8]岩井 大輔, 佐藤宏介, “Limpid Desk: 投影型複合現実感による机上書類の透過化,” 情報処理学会論文誌, vol. 48, no. 3, pp. 1294-1306, Mar. 2007.
- [9]郷古 学, 金 天海, “テーブル上の物体の片付けを促すためのロボットの振る舞い,” 人工知能学会論文誌, vol. 32, no. 5, pp. E-H31_1-8, Sep. 2017.
- [10]木下 和樹, 油田 信一, 坪内 孝司, “画像により机上の工具を探索する移動ロボット-自律片付けロボットの開発-,” 計測自動制御学会論文集, vol. 49, no. 1, pp. 111-118, Jan. 2013.

FieldSweep: 永久磁石の配列とスマートフォン磁気センサを用いた二次元トラッキング手法

宮武 陽子 * 椎尾 一郎 *

概要. 本稿では、永久磁石とスマートフォンのみを用いた平面上のトラッキング手法、FieldSweep を提案する。本手法は、適当な位置に配置された永久磁石の磁場を利用し、平面上での磁気センサの位置を推定する。磁気センサはスマートフォンに内蔵されているものを使用し、平面側は磁石と磁石固定用の板のみで構成されているため、システムに電源や電子部品の取り付けは必要ない。本稿では、トラッキングのために必要な条件、実装したプロトタイプを報告し、今後の発展や応用について議論する。

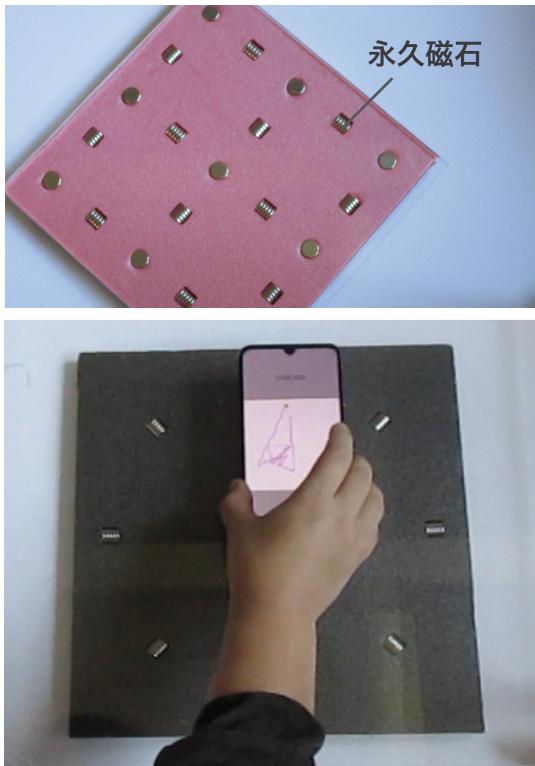


図 1. FieldSweep でトラッキングに用いる磁石の配列
例（上）とトラッキングの様子（下）。

1 はじめに

我々の生活は情報で溢れている。なかでも、駅の案内板や地図、学校の掲示板、看板などの公共の場の情報は、紙や板に印刷され、平面上に掲示・表示される場合が多い。近年では、液晶ディスプレイやプロジェクタの価格が低下し、デジタルサイネージとして情報提示されることも多なくなった。さらに、

それに入力を加え双方向のインタラクションを可能にしたものも増えている。例えば、タッチパネルを用いた案内板や自動販売機が街中に多く設置されている。タッチパネルだけでなく、壁上での動作の検出と映像の投影を行なうプロジェクタも市販されている。

これらの双方向システムの多くは、手や指の動きを用いた入力を前提としている。そのため、平面上で物体の動作を検出する技術の需要が拡大してきている。従来、この検出には、静電容量タッチパネルやカメラ、赤外線センサが主に使われてきた。しかしこれらは高価であり、電源を必要とするため、あらゆる生活環境や公共の場でユビキタスに展開することが困難であった。

本稿では、永久磁石とスマートフォンのみを利用した平面上のトラッキング手法、FieldSweep を提案する。本手法は、複数の永久磁石を平面上に並べ、その上でスマートフォンを滑らせるように動かすことで、その位置をトラッキングする（図1）。基本的な仕組みは、永久磁石によって平面上にできた磁場をスマートフォンの三軸磁気センサで計測し、計測された磁力線の三次元ベクトルから、磁石に対する相対位置を推定する。平面側には永久磁石とアクリル板等の固定用の板のみを用いるため、電子部品や電源は不要である。また、三軸磁気センサはスマートフォンに標準的に搭載されているため、スマートフォン側に部品やセンサを追加する必要もない。

永久磁石はこれまでにも入力用の道具として長く研究してきた。電源が不要であり、磁場の強度や向きが距離や動きの検出に利用可能であるためである。しかし永久磁石が作る二次元上の磁場のパターンについては着目されてこなかった。またスマートフォンやスマートウォッチのモーションセンサや、スマートフォンに取り付けた光学式センサからトラッキングを行う研究もあるが、絶対座標の検出は不可能であった。本手法では磁場のパターンにより、一定の範囲の中では絶対座標の検出も可能である。

Copyright is held by the author(s).

* お茶の水女子大学

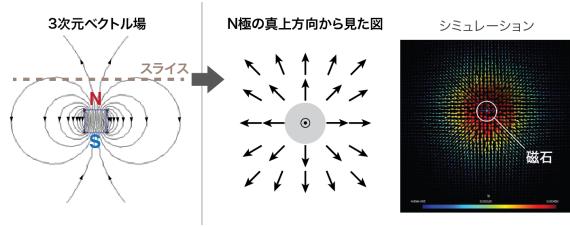


図 2. 磁場平面のスライスとシミュレーション例.

本稿では、永久磁石を用いた二次元のトラッキングのために必要な条件、実装したプロトタイプを報告し、今後の発展や応用について議論する。

2 動作原理

磁石はその周りに磁場を発生させる。これは磁石を中心とした三次元ベクトル場である；磁束密度と磁束の向きがそれぞれ、各ベクトルの、強さと向きを表す。したがって、この磁場内に三軸(X, Y, Zの3方向)磁気センサが置かれると、その地点での三次元磁気ベクトルを計測することができる。これは複数個の磁石による磁場が干渉し合っている地点においても同様である。

また、三次元ベクトル場のある平面でスライスすると、ある平面上でのベクトル場を確認することができる。図2に、 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の円柱形磁石のN極側の面から 30mm 離れた平面での磁気ベクトルをシミュレーションした結果を示す。(シミュレータについては4.3参照。)

本手法ではまず、特定の磁石配置に対して、磁石上方の平面上の磁気ベクトル場をシミュレーションし、方向ベクトル場を三次元ベクトル値の二次元配列として保存する。次に、その磁石配置を実際に構成し、シミュレーションに相当する距離にある平面状にスマートフォンを置き、内蔵三軸磁気センサによる計測を行い、磁力線の方向ベクトルを取得する。この磁気ベクトルの角度を、シミュレーションで得たデータと比較し、最も角度が近いデータの場所をスマートフォン磁気センサ位置とする。角度の近さの指標には、シミュレーションで得られた磁場方向ベクトルと、測定で得られた方向ベクトルのコサイン類似度を用いている。コサイン類似度はふたつの方向ベクトルのなす角のコサインであり、-1から1の値をとる。

3 磁石の配置

図2に示すひとつの磁石の磁場が検出される範囲であれば、スマートフォンで測定された磁場の方向ベクトルを検出することで、位置を知ることができる。これに対して、複数の磁石を並べることで、磁

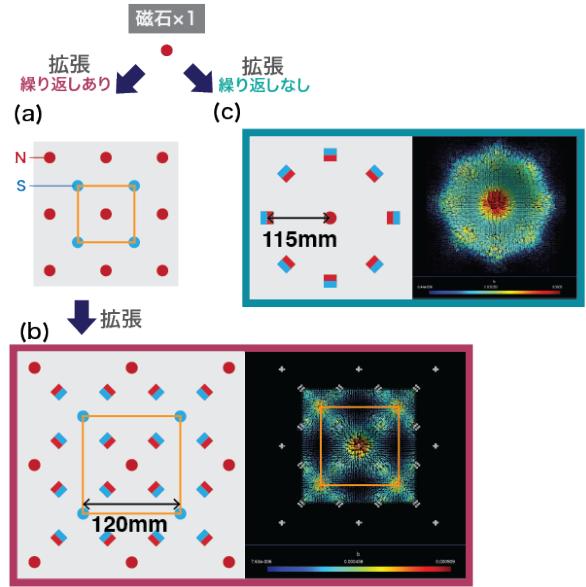


図 3. 本手法で提案する磁石パターン.

場検出範囲を拡大でき、位置検出範囲を広げられると考えた。

磁石同士を近くに置くと、互いの磁場同士の干渉・反発が起こる。逆に遠くに置くと、間に磁場の弱い領域ができる。さらに、磁場は、磁石の配置、大きさ、形状、種類によって異なるパターンになる。

今回使用する磁気センサはスマートフォンにコンパス用に搭載されており、地磁気の方向を検知する用途で作られている。そのため、地磁気以上の強さの磁場ではスマートフォンの磁気センサを用いてトラッキングが可能であろう。逆に、配置した磁石の間隔が大きくなり、その磁場の弱い領域が地磁気を下回る状態では、キャリブレーションにより地磁気を除去する際の誤差が大きくなり、位置検出が困難になると考えられる。そこで、地磁気を下回る磁場の領域が生じないよう、磁石を配置する必要がある。さらに、本手法で位置を一意に確定するためには、磁気ベクトルがそれぞれの場所で異なる方向である必要がある。

本手法で安定したトラッキングを行うためには、この2点を考慮して磁石を配置した。以下では、本研究で実装した2種類の磁石配置パターンについて説明する。

ひとつの磁石により得られる磁場パターンを広い面積に拡張するために、図3に示した2種類の拡張方式を考えた。

ひとつの方式は、図3(a)(b)に示す繰り返しのある拡張である。例えば図3(a)に示すように、N極・S極がそれぞれ手前に向く磁石を市松模様に配置することで、スマートフォンで測定可能な磁場領域を

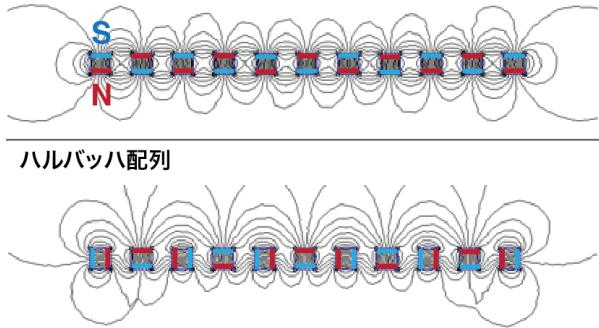


図 4. 上図が N 極と S 極を交互に上向きにし並べた配列、下図がハルバッハ配列。

大きく拡大することが可能である。ここでは、図中の正方形が一単位となり、磁石配置が左右上下に繰り返す。このため、繰り返し単位は全く同じ磁場パターンを持つため、磁気ベクトルが一意になりうるのは一繰り返し単位の中のみである。そのため、絶対位置の推定は、この一単位の中でしか行うことができない。

市松模様パターンの繰り返し単位を拡大できれば、一意な磁気ベクトルが得られる範囲も広げることができる。そこで、ハルバッハ配列と呼ばれる磁石配列を利用した。一次元のハルバッハ配列を図 4 で説明する。N 極・S 極が上下を向いた磁石を交互に並べることで、上面と下面に同程度の強度の磁場が発生する。これに対して、それぞれの磁石の間に横向きの磁石を挿入する配列がハルバッハ配列である。縦向きと横向きの磁石の磁場が干渉することで、上面の磁場が強化される [5]。今回は二次元に拡張したハルバッハ配列 [8] を用いて図 3(b) に示す配列とした。これにより、スマートフォンを当てる面の磁場を強化し、磁石間隔を広げても十分な磁場を発生させることができる。その結果、単純な市松模様パターンに比べて、一意な位置検出が可能な繰り返し単位を拡大することができる。

もうひとつの方式は、図 3(c) に示す、繰り返しを避けた拡張である。先述したように、単純な市松模様あるいは二次元ハルバッハ配列では、パターンが繰り返される。この繰り返しにより、トラッキング範囲も無限に拡大可能であるものの、どの繰り返し領域にスマートフォンが置かれているかを検出するための手段が別途必要である。また、図 3(b) に示すように、磁場強度が他と比べて格段に弱い領域があり、ここで地磁気より強い磁場を得るためにには磁石間隔を大きく広げることができなかった。そこで、繰り返しを避け、ひとつの磁石の磁場を円形に拡大したものが図 3(c) のパターンである。ここでもハルバッハ配列の考え方を利用し、スマートフォンを置く面の磁場を強化するように、横向きの磁石を配

置した。このパターンは繰り返しができないため位置検出範囲が限定されるが、図 3(b) に比べてより少ない磁石数で、一意な位置検出可能な領域を確保することができる。

4 実装

前節で考察した磁石配置に基づき、図 3(b) と (c) の形状磁石を配置し、スマートフォン搭載磁気センサで位置検出するシステムの試作を行った。それぞれの配置を、以下でパターン (b)、パターン (c) と呼ぶ。図 3 に示すように、パターン (b) では磁石の繰り返し単位を 120mm とし、パターン (c) では中心磁石とこれを取り囲む磁石の間隔を 115mm とした。

4.1 磁石の種類と大きさ

本研究では、日常生活や公共の場でユビキタスに利用できる安価なデバイスの実現を目指している。一方で、強力な磁石を使用すれば、より広い領域での位置検出が可能になる。そこで一般的に入手可能なネオジム磁石を使用した。より安価な磁石にフェライト磁石やゴム磁石があるが、磁力は弱い。今回の試作では、13mm × 2mm の円盤ネオジム磁石（税抜き 25 円）を 5 枚重ねてたものをひとつの磁石として使用した。磁石一単位当たりのコストは 130 円程度であり、日常生活のさまざまな場面に展開可能と考えられる。

4.2 磁石とセンシング面間の距離

磁石に対するセンシング面の位置、すなわち三次元磁気ベクトル場をスライスする位置は、計測される磁気の強さに影響する。またこの距離が実際に作成した際のシステムの厚みになる。今回はパターン (b) は 50mm、パターン (c) は 40mm の距離とした。スマートフォンのセンサを非常に強い磁場で動作させると、計測が止まってしまう現象が引き起こされた。OS 内部での処理の結果で、回避が困難であったため、この程度の距離を離して設置した。この現象については 8 章に示す。

4.3 磁場のシミュレーション

磁場のベクトルデータを生成するために、有限要素法を用いた磁場のシミュレータ ONE LAB¹を使用した。ONE LAB はオープンソースの有限要素法ソルバインターフェースであり、メッシュ生成ソフトウェアの Gmsh と、メッシュソルバの GetDP を使用している [6]。データは 2mm 間隔で生成した。

4.4 磁気データの計測

磁気ベクトルの計測にはスマートフォン搭載の三軸磁気センサを用いる。スマートフォンは Huawei

¹ <http://onelab.info/>

P30 lite (Android OS) を使用し、60Hz で計測を行った。また、センサの計測誤差によるノイズを軽減するため、移動平均により円滑化した。このため、過去0.5秒のデータ30個を平均し、直近の磁気データ測定値とした。

磁石の配置によっては、磁場が弱く、地磁気の影響が無視できない領域が存在する。そこで、測定開始に先立って、地磁気の影響を排除するためのキャリブレーションを行うことにした。キャリブレーションのために、磁石から離れた地点でスマートフォンを測定時と同じ姿勢・方向に保ったまま1秒間磁気の計測を行った。ここで収集された値を平均し、測定時にセンサの値から減算する。

4.5 位置検出プログラム

位置検出を行い、動作を確認するアプリケーションを、Unity プラットフォーム上で C# を用いて実装した。このプログラムは以下の手順でスマートフォン位置を検出する。

ユーザがスマートフォンをセンシング面に置くと、本システムのプログラムが磁場ベクトルを測定し、あらかじめ用意された磁場方向ベクトル情報を比較し、スマートフォン位置を検出する。さらに、パターン (b) のように、磁場のパターンが繰り返す磁石配置の場合には、スマートフォンがどの繰り返し領域に置かれているかを判断する仕組みが必要である。現在は、直近の所在位置と移動先の候補点との間の距離から、繰り返し領域の越境を判定している。

位置検出プログラムは、最初に初期位置の推定を行う。そのため、まず検出された磁場ベクトルに対して、ある閾値以上の類似度の複数ベクトルをパターンの全体から取り出し推測位置群とする。次の磁場ベクトルが検出されると、先の検出で得られた推測位置から一定距離以内にある地点を対象に、同様に閾値以上のベクトルを持つ地点を選び新たな推測位置群とする。これを繰り返し、取り出されるベクトルの位置がある程度定まつたら、推測位置群の中心の位置を初期位置とする。初期位置の推定後は、引き続き磁場ベクトルを測定し、前回の推測位置群から一定距離の範囲内の磁場データを対象に比較し、類似する推測位置群を求め、その中心を新たな位置とする。

パターン (b) のような磁石配置の場合、磁場が著しく弱くなる領域が存在する。磁場が弱いと、磁場スカラー量測定誤差の割合が大きくなり、方向ベクトルの誤差も大きくなる。また地磁気の影響も受けやすくなる。これにより、正確なトラッキングが困難になる。そこで磁場が一定値以下の地点については、位置の更新を行わないようプログラムした。

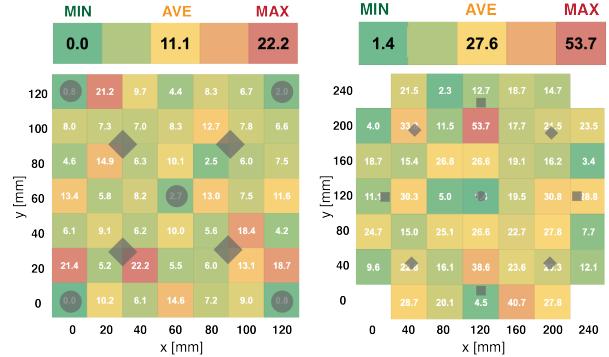


図 5. 精度評価の結果。計測を行った各格子点ごとの誤差の平均 [mm] を表示している。左がパターン (b)，右が (c)。中の黒い図形は磁石位置を表す。

5 精度評価

パターン (b), (c) それぞれについて、トラッキングの精度を評価する実験を行った。

ボードの端から端まで、パターン (b) は 20mm 間隔、パターン (c) は 40mm 間隔の格子状の点を用意し、各点上での推定位置と実際の位置の間の距離を計測した。これを 2 種類のパターンについて行った。ただし、パターン (c) は円形に拡大された磁場であり四隅の部分は磁場が弱いため、測定から除外した。

はじめに、スマートフォン内の磁気センサの位置を確認する。磁石の S 極をスマートフォンの画面側に垂直に当てたときに、三次元コンパスアプリ²のコンパスの針が画面に垂直方向になる位置がセンサの位置だと判断した。

次に、格子点の計測順序が無作為になるように各格子点に順番を割り振る。その後、アプリを起動し初期位置の推定を行う。初期位置は、測定対象領域の中から任意に選んだ場所とした。初期位置の推定後、測定対象格子点の真上にスマートフォンのセンサが位置するようにスマートフォンを移動させ、位置を推定した。これを計測順番に従って全ての格子点に対して連続して計測した。さらに以上の手順を計 5 回行った。

全試行での誤差（本来の座標から測定された地点までの距離）を格子点ごとに平均した結果を、図 5 に示す。パターン (b) では全面での誤差の平均が 11.1mm、パターン (c) では 27.6mm であった。測定領域の 1 辺に対する誤差では、パターン (b) が 9%，パターン (c) が 12% であり、それぞれ 10% 程度の誤差で位置を検出できたと言える。

² <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.plaincode.magnetmeter>



図 6. アプリケーション例（拡大鏡）。

6 応用例

スマートフォンの位置がトラッキングされることで、スマートフォンのディスプレイを、ボード上で動く窓枠のようにして利用することができる。このようなインタラクションはすでに椎尾ら [9] や小池ら [3] により提案されている。

今回我々は、拡大鏡のアプリケーションを実装した。これは前述の動作確認プログラムと同様、Unity 上で実装されている。このアプリケーションでは、絵や文字が書かれた紙の上でトラッキングを行い、紙と同じ画像の、センサの位置部分のみを拡大したものをディスプレイに表示することで、現実世界にある紙の一部が拡大されて表示されたかのようなインタラクションを提示することができる（図 6）。ここでは拡大した画像を表示するだけの実装に留まっているが、この画像に重ねて他の画像や機能を表示することで、AR のようにも使用できる。

この他にも、ボード上のゲームや、壁やドアに本システムを取り付けて壁の反対側にあるカメラの映像を表示することでディスプレイ部分だけ壁が透過しているように見えるシステムなど、さまざまな応用が可能であると考える。また、本手法は同じボード上で同時に複数台のスマートフォンを使用することも可能であるため、複数人でのゲーム等のインタラクションも可能である。

7 関連研究

7.1 磁気を利用した入力・トラッキング

磁石を利用したトラッキングや入力の技術はさまざまに開発されてきた。特に、電源不要で安価な永久磁石は、使いやすく手に入りやすい素材としてヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 研究分野でよく利用される。Chen らは磁石を付けた親指の三次元の動きを別の指につけたふたつの磁気センサの入力から推定した [1]。これは三軸磁気センサを用いて三次元でのトラッキングを行う手法であった一方、Liang らはより安価なホール素子を平面に配列し、それらの入力からデバイス上の磁石の動き

を特定した [4]。TRing [13] は本手法と同じく永久磁石を固定し、その磁場と指に付けた 9 軸慣性計測装置 (IMU) の値から磁石の周りでの三次元の位置を推定するが、ひとつの磁石のみを使用しているため、トラッキングの範囲は限られていた。Watanabe らは電気モータにより回転する磁石をマーカとして用い、数 cm 単位での位置検出を行っている [11]。

さらに、地磁気などによる環境磁場をスマートフォンで測定して、そのフィンガープリントから屋内位置を検出する研究もある [12][10]。

これらの研究は単数の磁石や環境磁場を利用しておらず、複数の磁石から意図的に作り出される磁場について議論を行った論文はなかった。本研究では、複数の磁石の配置を利用することで、現行の研究に比べ拡大可能かつ高密度かつなトラッキングを行った。

7.2 平面上のトラッキング

平面上でトラッキングを行うための技術は、さまざまな研究がある。

光学式のエミッタとセンサを用いた位置検出は古くから研究が行われており、精度や拡大性も高い [7]。また、カメラと画像処理を用いた光学方式も広く開発されている。静電容量方式は特に指やスタイルスのパネルへの接触を検出する高精度なトラッキング手法であり、現在我々の身の回りでもよく見かけられる。これらの方では、計測のためのボードやカメラが電源を必要としたり、特別な道具を把持している必要があった。

また、本手法のように、手に把持した機械やセンサを用いてトラッキングを行う手法もある。例えば、機械式 [9] や光学式 [2] マウスの方式を用いて物体の移動を検知するインタラクションが提案されている。しかしこれらは相対的な移動の推定しか行うことができないため、初期位置は指定される必要がある。アノト方式は、ペンに取り付けた小型のカメラで専用のパターンを読み取り、平面上での位置を判断する³。この方法では絶対位置が推定できるが、専用の道具（ペン）が必要である。

8 制約と議論

本稿では 1 種類のスマートフォンで実装を行ったが、スマートフォンと OS によって磁気センサの特性や動作プログラムが異なる。スマートフォンの磁気センサは、地磁気を読み取るために搭載されているので、強い磁場を読み取ると異常な動作をすることがあった。実際に試作の過程で、センサが飽和すると値の出力が止まってしまう機種が見受けられた。また、磁石に近づけることで部品が磁化されるためか、その後の値が変動するスマートフォンもあった。

³ <https://www.anoto.com/solutions/ace/>

今回用いたHuawei P30 liteも、一定の強さ以上の磁気を連続測定すると、アプリケーションがクラッシュする現象が発生した。そのため、強すぎる磁場を与えないように、磁石とセンシング面の間に空間を設けている。今後は、強い磁場が集中せず全体に広く分布するような磁石配置を検討していきたい。

また、スマートフォンに強い磁場を加えることで、故障する可能性がしばしば指摘されている。しかし、今回の実装では、実験終了後に使用したスマートフォンが動作不良に陥る事例は発生しなかった。スマートフォンケースやホルダなどのアクセサリの一部には、強いネオジム磁石が使われていることもあり、強い磁場によりスマートフォンが破壊されることはあると考えている。

スマートフォン搭載磁気センサが読み取る磁場ベクトルの向きは、スマートフォンの姿勢によって変わる。今回の実装ではスマートフォンの方向を固定して使用する方式を採用した。公共の場の掲示板やポスターのように、垂直に設置された平面を対象としたアプリケーションに限定すれば、スマートフォン搭載加速度センサにより重力加速度方向を測定し、これによりスマートフォンの傾きを自動的に補正できると考えている。

9 まとめと今後の課題

本稿では、スマートフォン本体と安価な永久磁石のみで二次元トラッキングを行う手法FieldSweepについて報告した。この手法は電源や電子部品を必要とせず、スマートフォンへ部品を外付けする必要もない。

今後は磁石配置の改良、位置推定アルゴリズム改善、応用の可能性を探っていきたい。特に磁石配置に関しては、薄型磁石を広く薄く配置する方式、異なる大きさや種類の磁石の混在、磁石以外の磁性体の併用などさまざまな改良の余地があると考えている。

参考文献

- [1] K.-Y. Chen, K. Lyons, S. White, and S. Patel. UTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, p. 237–244, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [2] C. Harrison and S. E. Hudson. Minput: Enabling Interaction on Small Mobile Devices with High-Precision, Low-Cost, Multipoint Optical Tracking. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, p. 1661–1664, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [3] H. Koike, W. Nishikawa, and K. Fukuchi. Transparent 2-D Markers on an LCD Tabletop System. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, p. 163–172, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [4] R.-H. Liang, K.-Y. Cheng, C.-H. Su, C.-T. Weng, B.-Y. Chen, and D.-N. Yang. GaussSense: Attachable Stylus Sensing Using Magnetic Sensor Grid. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, p. 319–326, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [5] J. Mallinson. One-sided fluxes – A magnetic curiosity? *IEEE Transactions on Magnetics*, 9:678–682, 1973.
- [6] D. Meeker, N. Bianchi, J. Gyselinck, R. Sabariego, L. Alberti, G. Pellegrino, and F. Cupertino. Electrical machine analysis using free software. In *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2017.
- [7] J. Moeller and A. Kerne. ZeroTouch: An Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, p. 2165–2174, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [8] R. Moser, F. Barrot, J. Sandtner, and H. Bleuler. Optimization of two-dimensional permanent magnet arrays for diamagnetic levitation. 2002.
- [9] I. Siio, T. Masui, and K. Fukuchi. Real-World Interaction Using the FieldMouse. In *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '99, p. 113–119, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.
- [10] K. P. Subbu, B. Gozick, and R. Dantu. LocateMe: Magnetic-Fields-Based Indoor Localization Using Smartphones. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 4(4), Oct. 2013.
- [11] K. Watanabe and N. Kawaguchi. A Smartphone Short-Range Path Estimation with Hyperbolic Function for Spinning Magnet Marker. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, p. 459–460, 2019.
- [12] H. Xie, T. Gu, X. Tao, H. Ye, and J. Lv. MaLoc: A Practical Magnetic Fingerprinting Approach to Indoor Localization Using Smartphones. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '14, p. 243–253, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [13] S. H. Yoon, Y. Zhang, K. Huo, and K. Ramani. TRing: Instant and Customizable Interactions with Objects Using an Embedded Magnet and a Finger-Worn Device. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 169–181, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

ORANGE: 360 度カメラと画像認識技術によるユニバーサルリモコン

木ノ原 中也* 巻口 誉宗† 高田 英明‡ 坂本 大介* 小野 哲雄*

概要. ネットワークで接続された家電製品や IoT デバイスなどが環境内に増加するに伴い、それらを統一的に制御できる汎用リモコンが求められる。これまで、環境中にカメラなどのセンサを設置し、ユーザの操作を捉えて複数のスマートデバイスを操作する手法が多く提案されているが、環境中へのセンサ設置や複数センサのキャリブレーションなど、導入コストの高さが問題となる。そこで我々は、1台の 360 度カメラと複数の機械学習ベースの画像認識ソフトウェアからなる手持ちのユニバーサルリモコンシステム ORANGE (One Remote for All New GEneration things) を提案する。ORANGE は 360 度カメラの映像から操作ユーザとその注視点、周囲のオブジェクトの認識を行い、ユーザが操作したい対象を直感的に選択できる。本稿では 360 度カメラ映像からのユーザ検出、および注視点推定手法の詳細を述べ、精度評価実験とその結果を報告する。

1 はじめに

様々な家電製品や IoT デバイスがネットワークで接続され、制御されるスマート環境の普及が始まった。賢い機械達によって我々の生活が便利になるという恩恵は重要である一方で、そのような機器の増加は同時にリモコンの増加や操作方法の煩雑化につながる。このため、汎用リモコンをはじめとして、環境内の機器をまとめて操作する試みが数多く行われてきているが、既存の多くの手法では予めカメラなどのセンサを環境内に設置する必要がある。こうした手法では、ユーザが機器を操作できるエリアを広げるためにセンサを大量に設置する必要があり、機材や設置のコストに加え、複数のセンサのキャリブレーションコストも大きな課題となる。さらに、最近ではスマートテレビやスマートスピーカーのようにユーザを識別してコンテンツを切り替える機器が増加している。その際、部屋の任意の場所に位置するユーザや移動するユーザの顔を逐次捉えて識別することは、環境に固定されているカメラでは死角や画角の点で現実的ではない。

そこで我々は 360 度カメラと機械学習に基づく画像認識ソフトウェアからなる手持ちのユニバーサルリモコンシステム ORANGE (One Remote for All New GEneration things) を提案する(図1)。本システムの最終的な目標は、環境中のセンサを用いず、リモコンという一台のデバイスのみで環境中の機器全てを操作することである。ユーザは ORANGE リモコンを把持しながら操作したいスマートデバイスを注視することで操作対象を選択できる。操作対象の選択に視線を用いることで、複数の機器が環境中



図 1. 提案手法 ORANGE を利用している様子

に存在する状態でも直感的に機器を選択できる他、音声認識と組み合わせることで指示語を用いた曖昧な指示での操作も可能になる。また、ユーザに 360 度カメラを把持させることで、取得画像から操作しているユーザも同時に認識できるため、ユーザが部屋のどこにいても、もしくは移動していてもユーザを認識し、対応したコンテンツを提供できる。さらに操作者の周囲にいるユーザも同時に認識できることから、その場のグループに適したコンテンツの推薦やユーザ同士の位置関係に応じたコンテンツ再生など、スマートデバイスを介したよりインタラクティブな協調作業の実現も期待される。

本稿では、360 度カメラで取得した画像からユーザとその視線方向を検出し、注視点を推定する手法の詳細を述べ、ユーザ実験によって注視点推定の精度を検証する。

2 関連研究

環境内の電化製品をまとめて操作するための汎用リモコンについて多くの研究が行われてきている。

Copyright is held by the author(s).

* 北海道大学

† NTT サービスエボリューション研究所

‡ 現 長崎大学 情報データ科学部

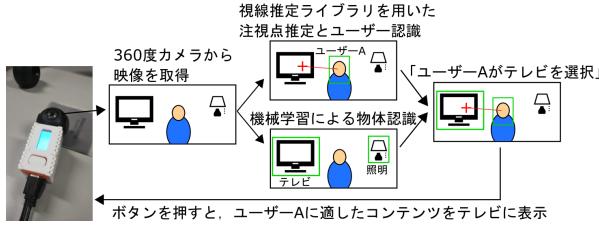


図 2. ORANGE の処理の流れ

XWand[7] は小さな杖のような形のデバイスであり、予め部屋に設置された赤外線カメラによって Wand の位置と向きを追跡し、Wand の延長線上にある物を操作対象として選択している。Point&Control[1] はスマートフォンをリモコンとして用い、Kinect と機械学習を用いて人間のボーンをリアルタイムに推定し、スマートフォンを持った腕の延長にある機器を操作対象としている。CRISTAL[6] は天井カメラで取得した映像に映る電化製品の操作が可能である。これらのリモコンは操作対象を選択できる一方で、センサやカメラを環境に設置する必要があり、このため、利用範囲が限定される。

そこで最近では、あらかじめセンサ等を設置しておく必要のない手法が検討されている。例えば Scenariot[3] ではスマートフォンに搭載した UWB RF Unit による SLAM で周囲のスマートデバイスの位置を把握して、AR システムに反映する。スマートフォンのカメラを通して画面上に映ったスマートデバイスの近くに UI が表示され、ユーザはそれを用いて操作を行う。WorldGaze[5] ではスマートフォンのフロントカメラでユーザの顔の向きを取得し、リアカメラに映っている物のどれを注視しているかを認識している。これらの手法は、スマートフォンを用いた個人的な操作を提供するものであり、リビングなどで想定される複数のユーザが共有して利用するリモコンとしての検討はなされていない。また、既存デバイスを用いることからカメラの画角などは製品ごとにばらつきがあり、統一的なシステムデザインが困難である。

3 提案手法：ORANGE リモコン

上記研究背景のもとに、我々は 360 度カメラを搭載したユニバーサルリモコン ORANGE を提案する。ORANGE の目標は、環境に設置されたセンサを利用せず、単体のデバイスで環境中に配置されている複数の機器を操作することである。また、カメラを有しているという利点を活かし「誰が操作しているのか」までを考慮したシステムの実現を目指す。

ORANGE の処理の流れを図 2 に示す。360 度カメラから得られた画像に対し、機械学習ライブラリによる画像認識を行い、ユーザ認識・物体認識・注目点推定を行う。得られたそれぞれの情報からユー

ザと周囲の物体、注目点の空間位置を推定することで操作対象を選択し、操作を行う。注目点の算出方法として、XWand のようにリモコンの向きの延長線上に位置する対象を検出する方法や WorldGaze のようにユーザの顔向きによって検出する方法が考えられるが、我々はユーザの視線によって対象を検出する手法に着目した。

360 度カメラで取得した画像から操作ユーザを認識し、注視点を算出する流れを図 3 に示す。Step 1 では、360 度カメラで取得された Dual FishEye 画像を正距円筒図法によって変換し、画像の各画素の座標がカメラを中心とした空間角度（水平方向-180 度から 180 度、垂直方向 0 度から 180 度）に対応する長方形画像を取得する。Step 2 では、この長方形画像に対して OpenCV による顔認識を行って操作ユーザを認識し、OpenVINO¹を用いて操作ユーザの顔位置座標と視線ベクトルを算出する。最後に Step 3 として顔位置と視線ベクトルを 3 次元極座標空間に反映し、注視点を推定する。以下では操作ユーザの認識、および注視点推定の詳細を述べる。

3.1 操作ユーザの認識

長方形画像に対して顔認識を行い、360 度カメラの正面方向に最も近いユーザをリモコンを使う操作ユーザと判定する。顔認識には OpenCV を利用した公開ライブラリ²を用いる。ユーザ個人の認識は事前の撮影と学習が必要であり、学習されていないユーザはゲストとして認識される。この認識結果をもとに、再生するコンテンツの切り替えなど、操作ユーザに適した機器操作を実現する。

3.2 注視点推定

我々は小西ら [8] と同様に、360 度カメラを中心とする仮想球を想定したアプローチによって注視点を算出する。仮想球の半径を R とし、ユーザの顔と注視点はともに仮想球表面に存在するものと仮定する。このとき注視点は、仮想球中心を起点としてユーザの顔へ向かう顔ベクトル \vec{F} と、ユーザの顔を起点とした視線単位ベクトル \vec{d} の半直線と仮想球表面の交点で表される。この時、仮想球を起点として注視点に向かう注視点ベクトル \vec{P} は次式で表される [8]。

$$\vec{P} = \vec{F} + t\vec{d} \quad (t \neq 0) \quad (1)$$

この式をもとに、我々はパラメータ t を以下のように算出する。途中の式は小西ら [8] と異なるため、

¹ <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/internet-of-things/solution-briefs/openvino-toolkit-product-brief.html>

² <https://github.com/Mjrovai/OpenCV-Face-Recognition>

ORANGE: 360 度カメラと画像認識技術によるユニバーサルリモコン

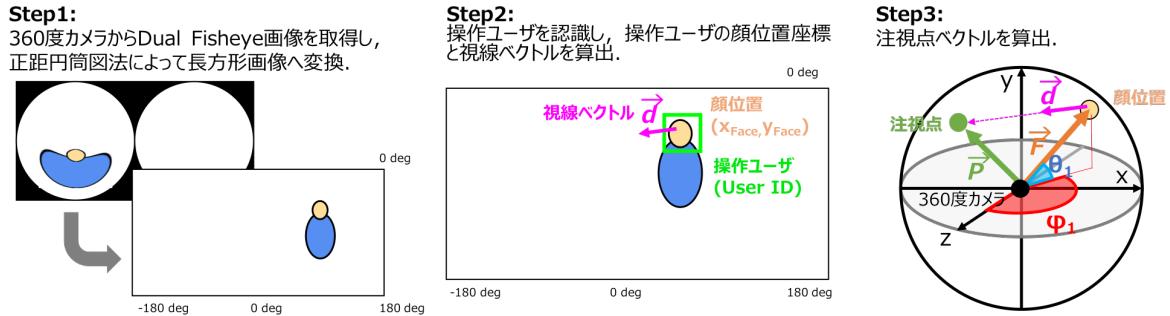


図 3. 注視点の推定方法

最終的に導出される t は先行研究とは異なっている。

$$\begin{aligned} |\vec{P}| &= R \\ \vec{P} \cdot \vec{P} &= R^2 \\ \vec{F} \cdot \vec{F} + 2t\vec{F} \cdot \vec{d} + t^2\vec{d} \cdot \vec{d} &= R^2 \\ \vec{d} \cdot \vec{d}^2 + 2\vec{F} \cdot \vec{d} &= 0 \quad (\because \vec{F} \cdot \vec{F} = R^2) \\ t &= -\frac{2(\vec{F} \cdot \vec{d})}{|\vec{d}|^2} \quad (\because t \neq 0) \end{aligned}$$

3.2.1 顔ベクトルの算出

360 度カメラを中心とした世界座標系を図 3 の Step3 図のように定義し、仮想球中心から仮想球表面上の顔位置までの顔ベクトル \vec{F} を次式より算出する。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \pi \frac{y_{Face}}{H} \quad (0 \leq \theta_1 \leq \pi) \\ \phi_1 &= 2\pi \frac{x_{Face}}{W} - \pi \quad (-\pi \leq \phi_1 \leq \pi) \\ \vec{F} &= \begin{pmatrix} R \sin \theta_1 \sin \phi_1 \\ R \cos \theta_1 \\ R \sin \theta_1 \cos \phi_1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで H, W は正距円筒図に変換後の長方形画像の縦・横のサイズである。また、 (x_{Face}, y_{Face}) はユーザの顔位置座標であり、長方形画像に対して OpenVINO で顔認識を行い、検出された顔の両目の座標の平均を取ることで算出する。

3.2.2 視線ベクトルの算出

360 度カメラを中心とした世界座標系での視線単位ベクトルを \vec{d}' とする。OpenVINO から得られる視線単位ベクトル \vec{d}' の座標系は、ユーザの顔とカメラ中心を結ぶ直線を z 軸、顔に対して垂直方向を y 軸、それに直行する方向を x 軸とする右手系で算出される。この座標系を図 3 右端に示す世界座標系に対応させるため、顔ベクトル \vec{F} を求める際に算出した θ_1, ϕ_1 を用いて変換する（図 4）。OpenVINO

から得られる視線単位ベクトル \vec{d}' から世界座標系での視線単位ベクトル \vec{d} は次のように求められる。

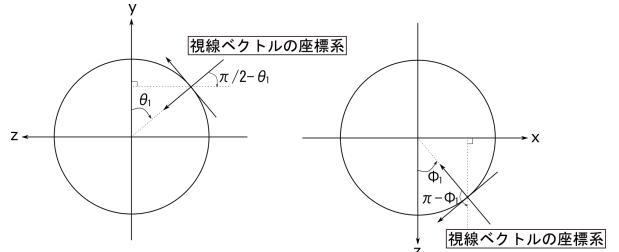


図 4. 左:x 軸の回転による補正 右:y 軸の回転による補正

$$\begin{aligned} \vec{d} &= \mathbf{R}_x\left(-\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)\right) \mathbf{R}_y(\pi - \phi_1) \vec{d}' \\ \mathbf{R}_x(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\beta) &= \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

以上で求めた顔ベクトル \vec{F} と視線単位ベクトル \vec{d} から式 (1) によって注視点ベクトル \vec{P} を算出する。上記プログラムを C++ を用いて実装し、ORANGE リモコンのプロトタイプを作成した。

4 プロトタイプ実装

本節では ORANGE リモコンのプロトタイプの物理的な構造と操作ユーザの認識処理について述べ、Dual FishEye 画像から長方形画像への変換を行う際に角度を正確に変換するためのパラメータ設定に関する予備実験について説明する。

4.1 デバイス構成

プロトタイプのリモコン部分は M5Stick-C³の先に 360 度カメラ (Insta360 Air⁴) が位置する構造とし、筐体をレーザカッターで作成した。360 度カメラと M5Stick-C はそれぞれ USB ケーブルによって解析用デスクトップ PC に接続し、360 度カメラから Dual FishEye 画像を、M5Stick-C からはユーザのボタン入力をリアルタイムに取得する。

4.2 予備実験：360 度カメラの画角設定

Insta360Air は、画角 180 度の魚眼レンズを装着したカメラを表裏に合わせ、Dual FishEye 画像を取得する。取得した Dual FishEye 画像の全範囲を対象として正距円筒図に変換すると 2 つのカメラの端では画像にオーバラップが生じ、角度が正確に表現されない。そのため、正距円筒図に変換する対象範囲を FishEye 画像を中心とした半径 r の円として制限する必要がある。事前実験として、カメラに対して 90 度位置に設置したターゲットを撮影し、パラメータ r を変化させて正距円筒図に変換し、ターゲットのオーバラップや欠損が生じないパラメータ r を算出した。

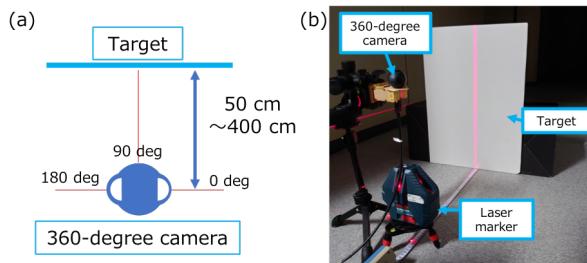


図 5. (a) 予備実験設定、(b) 実験の様子

図 5 に実験設定と実験の様子を示す。360 度カメラの直下にレーザマーカを設置し、ターゲットに垂線を投影する。360 度カメラの 90 度方向をレーザの垂線方向と一致させ、ターゲットとカメラの距離を 50 cm, 100 cm, 200 cm, 400 cm の 4 段階に変化させて Dual FishEye 画像を取得した。パラメータ r を、取得した画像の高さを 1 とした場合の半径 $r = 0.500$ を基準として 0.05 刻みで変化させ、各距離ごとにターゲットに投影される垂線に目視でオーバラップや欠損が生じない r を算出した。

実験の結果、 $r = 0.455$ とした際にいずれの距離でも垂線のオーバラップや欠損が生じなかったことから、本システムでは $r = 0.455$ を用いて正距円筒図への変換を行った。

³ <https://www.switch-science.com/catalog/6350/>

⁴ <https://www.insta360.com/jp/product/insta360-air>

5 注視点推定の性能評価実験

本稿で開発した注視点推定手法の性能評価を行う。実験参加者は 12 人（うち男性 9 人、女性 3 人）で全員裸眼もしくはコンタクトレンズ着用である。

5.1 第 1 実験：先行研究との比較

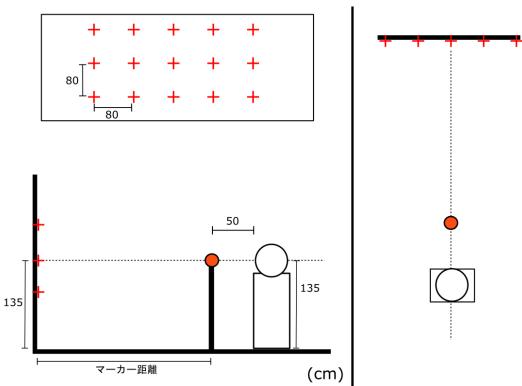


図 6. 実験条件

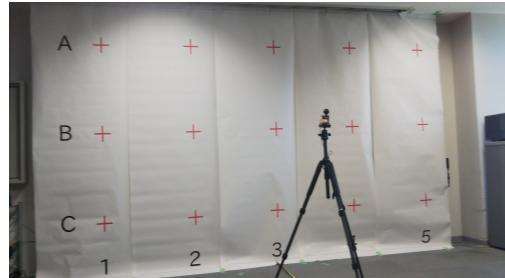


図 7. 第 1 実験の様子

最初の実験では関連する先行研究として、顔向きを用いてユーザの注目点を算出する WorldGaze[5]との精度比較を行う。そのため実験条件は以下の通り WorldGaze と同様のものを用いる。実験条件を図 6 に、実験の様子を図 7 に示す。壁に十字マーカを 80cm 間隔で 3 × 5 に 15 個設置し、実験参加者にはそれらを指示された順に注視してもらい、ユーザとマーカの間に配置した 360 度カメラで動画撮影する。注視するマーカの指示は実験参加者の隣に置いた PC の画面に表示され、実験参加者は指示を確認後、該当マーカを注視した状態で PC のキーを押す。キーが押されて 4 秒後、次の指示が提示され、実験参加者は同じ作業を繰り返す。これを 15 個のマーカに対して各一回ずつ行う。360 度カメラと実験参加者の視点の高さは、中央のマーカの床からの高さに合わせて 135cm とした。360 度カメラと実験参加者の距離は 50cm とし、カメラとマーカの距離（以下マーカ距離）は 1m, 2m, 4m の 3 段階に

変化させて実験を行った。マーカの十字の大きさは 4m 離れた距離で中央のマーカが視角 1 度に収まるよう、縦横 14cm とした。

図 8 に注視点推定の誤差を示す。Distance は全実験参加者・全マーカの誤差の中央値をマーカ距離ごとに示している。Horizontal と Vertical は、全実験参加者・全マーカ距離における誤差の中央値をそれぞれマーカの列と行ごとにまとめたものである。中央値を採用したのは分散が非常に大きかったためである。分散が大きい理由として、WorldGaze は顔向き、我々は視線から注視点の推定を行っており、視線はまばたきの影響やサッカードの影響を受けやすいためと考えられる。注視点は実験参加者がキーを押した時点から 15 フレーム分（撮影動画が 30FPS のため約 0.5 秒分）の動画に対して注視点ベクトルを推定し、そのベクトルの平均をマーカ平面に射影することで取得した。その際指示されていたマーカ座標と注視点座標のユークリッド距離を誤差とした。注視点ベクトルは WorldGaze と同様に、各マーカ距離、各実験参加者ごとにすべてのデータに対する注視点の平均と標準偏差を一旦計算し、誤差が $mean + 3SD$ 以上のデータを外れ値としてフィルタリングした。

全実験参加者・全パラメータのデータに対する誤差は WorldGaze が $0.71m (SD = 0.47)$ であったのに対し、ORANGE では $1.8m$ であった。図 8 の Distance から、マーカ距離が伸びるにつれ誤差が大きくなること、さらに、Horizontal・Vertical から中央のマーカからの距離が離れるにつれ誤差が大きくなることがわかる。この傾向は WorldGaze と同様である。距離に応じて精度が低下する要因として、注視点ベクトルをマーカ平面へ射影した座標を注視点座標としている点が考えられる。これは、カメラからあるマーカを見た角度を θ 、注視点ベクトルの角度誤差を θ_e とするとマーカ平面上の注視点の座標は $\tan(\theta + \theta_e)$ から計算されるため、マーカ距離が大きくなるにつれて、あるいは θ が大きくなるにつれ θ_e の影響が大きくなることによる。

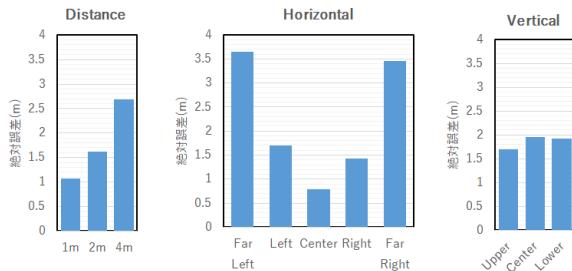


図 8. 実験 1 の結果

5.2 第 2 実験：本システムの性能評価

次に注視点推定の分解能を角度ベースで測定するため、および ORANGE の適切な把持姿勢を調査するための実験を行う。実験参加者から 2 m 離れた位置に 60 インチのディスプレイを設置し、ディスプレイに 3×5 の 15 点の格子点を配置した。各試行ごとに乱数を用いてその格子点のいずれか 1 つを選択してマーカを表示させ、ユーザには出現したマーカを注視しながら隣に置いた PC のキーを押すよう指示した。キー入力後、1.5 秒のインターバルで次の格子点がランダムで選択され、マーカが表示される。この試行を 100 回繰り返し、360 度カメラで動画撮影した。マーカにはマルタ十字 [4] を使用し、色は黒背景に対して視感度の高い緑色、大きさは実験 1 と同じ縦横 14cm とした。格子点は、360 度カメラから見た角度が等間隔となるよう、縦横ともに 8 度間隔で配置した。360 度カメラと実験参加者との距離は 50cm とした。ORANGE の把持姿勢を調査するため、360 度カメラの床に対する設置角度を垂直・45 度（実験参加者側のカメラが上向き）の 2 パターンでそれぞれ実験を行った。

注視点推定を行った実験参加者ごとの誤差の中央値を表 1 に示す。表上段の番号は実験参加者を表す番号である。実験参加者がキーを押した時点から 15 フレーム分の注視点をマーカ平面に射影した場合のカメラ中心からの角度と、その際指示されていたマーカ一点の角度との差を誤差とする。こちらも実験 1 の評価と同様にすべてのデータに対する平均と標準偏差を一旦計算し、誤差が $mean + 3SD$ 以上のデータは外れ値としてフィルタリングした。

全実験参加者・カメラ角度 45 度のデータに対する誤差の中央値は横方向 : 16.6 deg、縦方向 : 10.8 deg である。全実験参加者・カメラ角度 90 度のデータに対する誤差の中央値は横方向 : 17.3 deg、縦方向 : 12.5 deg である。全実験参加者・全パラメータのデータに対する誤差の中央値は横方向 : 16.9 deg、縦方向 : 11.6 deg である。表 1 を見るとどちらも縦よりも横方向の誤差が大きいが、これはマーカーを表示する範囲が横長であったためと考えられる。一方で、カメラの角度による精度の差はあまりみられなかった。45~90 度の間では把持姿勢による精度に対する影響は少ないと考えられる。また誤差の程度については個人差が大きい。

6 議論

実験の結果わかったことは以下の通りである。

- 注視点を平面上に射影した場合、顔の向きだけを利用する WorldGaze と比較して視線を利用する我々の手法は倍程度の誤差がある
- 推定される注視点のばらつきも比較的大きい

表 1. 実験 2：実験参加者毎のカメラ角度に対する縦横方向の誤差（度）

カメラ角度	誤差（度）	実験参加者 ID											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
45 度	横方向	20.6	17.3	30.3	17.0	17.1	12.3	19.8	13.9	9.0	18.1	21.5	9.2
	縦方向	6.6	26.6	4.3	15.5	10.6	7.7	5.8	10.1	19.2	11.9	19.6	6.7
90 度	横方向	16.0	16.0	24.8	18.1	17.9	12.2	21.0	17.9	18.4	25.3	11.2	15.0
	縦方向	15.3	4.6	10.5	8.3	11.5	9.9	17.5	18.1	11.2	4.3	15.4	22.3

- 360 度カメラの角度は 45 度～90 度であれば精度に大きな影響はない
- 注視点の分解能はカメラ中心に対して平均 14.3 度である

今回の検討を通してわかったことは、360度カメラで取得した画像に対しても射影変換と仮想球を用いたベクトル計算を行うことで、通常のカメラ画像を対象とした視線推定ライブラリによる注視点推定が可能だということである。先行手法である WorldGaze はスマートフォンのカメラを用いて顔の向きのみを取得しており、また非常に簡単な評価実験の結果が示されているだけであるため直接的な比較評価は難しいが、我々の手法はより正確な情報を取得することを目的として視線を扱っており、このため瞬きやサッケードの影響を受けやすく、比較としては誤差が大きい結果となったと考えている。

一方で、実験の結果から 1箇所を注視していても推定される注視点には大きなばらつきがあることがわかった。そのため、精度向上のために注視点を計算する際に前後の時系列情報を用いた平滑化の処理が必要と考えられる。さらに、視線ベクトルの取得精度・注視点の推定精度には個人差が大きいこともわかった。この個人差は、正面マーカを見てもらった場合の誤差が最小になるように、視線ベクトルを均一に回転させるといったようなキャリブレーションをユーザ登録の際などに行うことで軽減できると考えられる。

注視点推定の精度向上の他のアプローチとして、視線ベクトルに加えて ORANGE リモコンの端末向きや顔向きなどの情報を複合的に用いる手法も考えられる。また、動的エリアカーソル法を視線インターフェースに拡張した Bubble Gaze Cursor 法 [2] のように、操作対象候補の位置によって空間をボロノイ分割し、注視点が含まれる領域から操作対象を判定することで、注視点推定の精度を補う手法も考えられる。様々な技術を総合的に検討・統合していくことで、安定した視線入力技術が実現できると考えている。

7 むすび

本稿では 360 度カメラと画像認識ソフトウェアからなるユニバーサルリモコンシステム ORANGE の視線による物体選択を行うための注視点推定手法を提案し、その精度を実験・評価した。推定された注視点の分解能はカメラ中心に対して平均 14.3 度である。しかし、ばらつきや精度の個人差が大きいため平滑化処理やキャリブレーションなどが重要であることがわかった。

参考文献

- [1] M. Budde, M. Berning, C. Baumgärtner, F. Kinn, T. Kopf, S. Ochs, F. Reiche, T. Riedel, and M. Beigl. Point & Control – Interaction in Smart Environments: You Only Click Twice. In *Proc. UbiComp '13 Adjunct*, p. 303–306, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [2] M. Choi, D. Sakamoto, and T. Ono. Bubble Gaze Cursor + Bubble Gaze Lens: Applying Area Cursor Technique to Eye-Gaze Interface. In *In Proc. ETRA '20*, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [3] K. Huo, Y. Cao, S. H. Yoon, Z. Xu, G. Chen, and K. Ramani. Scenariot: Spatially Mapping Smart Things Within Augmented Reality Scenes. In *Proc. CHI '18*, p. 1–13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [4] G.-A. Koulieris, B. Bui, M. S. Banks, and G. Drettakakis. Accommodation and Comfort in Head-Mounted Displays. *ACM Trans. Graph.*, 36(4), July 2017.
- [5] S. Mayer, G. Laput, and C. Harrison. Enhancing Mobile Voice Assistants with WorldGaze. *Proc. CHI '20*, p. 1–10, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [6] T. Seifried, M. Haller, S. D. Scott, F. Perteneder, C. Rendl, D. Sakamoto, and M. Inami. CRISTAL: A Collaborative Home Media and Device Controller Based on a Multi-Touch Display. *Proc. ITS '09*, p. 33–40, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [7] A. Wilson and S. Shafer. XWand: UI for Intelligent Spaces. *Proc. CHI '03*, p. 545–552, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [8] 小西 優実, 益子 宗, 落合 裕美, 小池 英樹. 全天球カメラを用いた視線推定技術の提案. インタラクション 2020 論文集, pp. 755–757. 情報処理学会, 2020.

時間および範囲をもとに認識する凝視に基づく操作手法

磯本 俊弥 * 山中 祥太 † 志築 文太郎 *

概要. 新たな凝視の認識手法による、凝視に基づく操作手法を示す。従来手法における凝視の認識が「対象の中に視線座標が一定時間（以降、凝視時間）以上留まっていること」を条件に行われていたことに対し、本手法では「視線座標がある範囲（以降、凝視範囲）に凝視時間以上留まっていること」を条件に行われる。凝視の認識に凝視時間および凝視範囲を用いることにより得られる利点は、主に、対象内に視線座標が入っているが視線が移動している場合に生じるミダスタッチ問題の軽減である。これにより、例えば、ユーザがウェブページのリンクを読んでいる際や、動画プレイヤのサムネイルを見ている際に生じるミダスタッチの軽減が可能である。著者を参加者とした実験の結果から、本手法を用いた場合に従来手法と同じ様に対象選択ができ、かつミダスタッチの問題を軽減できる可能性を示した。

1 はじめに

本稿において、視線に基づく操作手法における新たな凝視の認識手法を提案する。従来手法では、視線座標（視線認識機器によって認識されたユーザが見ている位置）がある対象内に一定時間（凝視時間）以上留まっているかを条件に凝視が認識される[7]（図1a-f）。そして、凝視が認識された際に視線座標が入っている対象へ選択操作（マウス操作での左クリックや、タッチ操作でのタップと同等の操作）が実行される。つまり、従来手法は、対象を選択したいというユーザの意志を、視線座標が対象内に凝視時間以上留まっていることに紐付けている。対して、本手法は、対象の有無に依らず、視線座標のばらつきがある範囲（以降、凝視範囲）に凝視時間以上留まっているかを条件に凝視を認識する（図1g-l）。

凝視範囲の決定は、ユーザが意図的にある点を見続ける際に生じる視線座標のばらつきにもとづいて行う。この視線座標のばらつきには、人間がある1点を見つめている（注視をしている）際に生じるトレモルやドリフト、フリッカリング[1]や、視線認識機器のノイズによって生じるばらつきが含まれる。そして、凝視が認識された際に視線座標群の重心に対して選択操作が実行される。つまり、ユーザの対象を選択したいという意志を、視線座標がある点に凝視時間以上留まっていることに紐付けている。なお、本手法においても、従来手法と同様に凝視を認識するための条件として凝視時間を用いる。

以降、本稿では、まず視線座標のばらつきが凝視範囲に凝視時間以上留まっていることを条件に凝視を認識することの利点を述べる。その後、凝視範囲の決定方法を述べ、著者を参加者とした実験の結果から、本手法が実際に動作することを示す。

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学

† ヤフー株式会社

2 本手法による利点

凝視を認識する条件を「視線座標がある対象の中に凝視時間以上留まる」から「視線座標が凝視範囲内に凝視時間以上留まる」とすることによる主な利点は、ミダスタッチ問題の軽減である。ミダスタッチ問題とは、凝視に基づく操作時にユーザの意図しない対象選択が生じるという問題である[7]。これは、例えば対象内の文章を読んでいる際や画像を見ている際のように、ユーザに選択する意思はないが視線座標が対象内に入っている際に生じる。

ミダスタッチ問題の解決は、視線に基づく操作の普及に必要なことであり、これまでに多くの研究がされてきた。それらは、凝視時間の調整（例[11, 16]）、専用のUIの使用（例[8, 10, 17]）、輻輳効果の使用（例[9]）、追跡眼球運動の使用（例[15]）が多かった。ただし、これらの研究では、視線が移動しているかという情報は考慮されてこなかった。また、ミダスタッチの問題の発生に関して、対象内に文字を表示しないことが有効であることも示されている[12]。そのため、これまでの研究での実験における対象は、無地もしくは単語、簡単な画像が表示されたものであり、対象内での視線移動が誘発されない・必要ないような実験設計がされていることが多い。

しかし、マウスやタッチでの操作に使われるようなUIでは、ユーザにとって未知な情報が表示されている対象が多く、また、対象には横長なものもあるため、凝視時間の長さに依らずミダスタッチ問題が生じる可能性がある。例えば、ウェブページにおけるリンクや動画プレイヤにおけるサムネイル（画像もしくは動画）は選択可能対象となっていることが多い。ユーザはこれらの対象群の中から、探索および考え方をしながら1つの対象を選択する。この時、何らかの情報をるために視線が移動しているとしても、視線座標が対象内に留まるため、従来手法ではミダスタッチ問題が生じる。

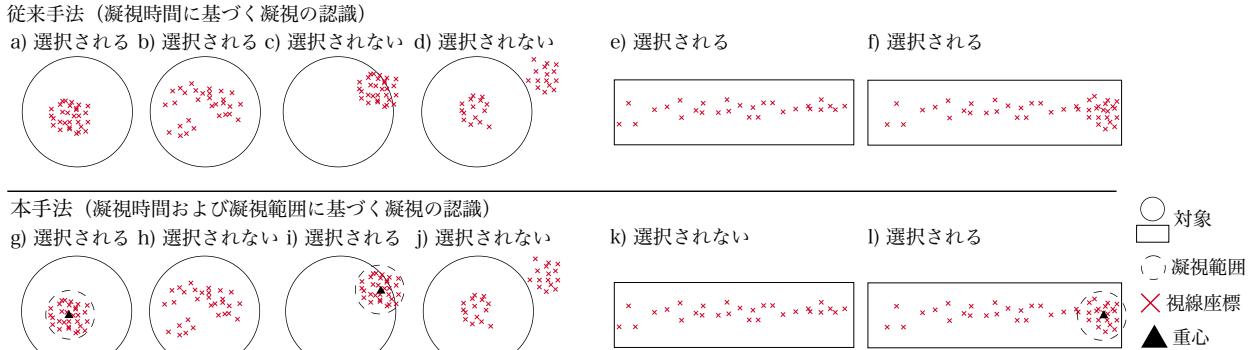


図 1. 凝視の認識方法の例. a-f) 従来手法. 対象内に視線が入り続けた場合に凝視が認識され (a, b, e, f), その対象が選択される. g-l) 本手法. 視線座標のばらつきがある範囲内に留まり続けた場合に凝視が認識され (g, i, l), 視線座標群の重心が含まれている対象が選択される. 対象内に視線座標が入り続けたとしても, 視線座標がばらついている場合は凝視は認識されない (h, j, k).

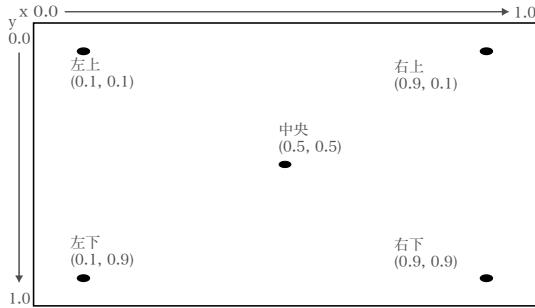


図 2. 凝視範囲を決定するためのキャリブレーションに使用した画面.

対して, 本手法では, 対象内の情報を見るために視線が移動している際に生じるミダスタッチ問題を軽減できる. 例えば, 文章を読んでいる際もしくは画像を見ている際はユーザの興味に合わせて視線座標が移動する[13]. 結果として, 視線座標のばらつきが大きくなるためミダスタッチ問題は生じない. 加えて, これまでに行われてきた凝視時間の調整を本手法に適用することにより, さらにミダスタッチ問題を軽減できる可能性がある.

3 凝視範囲の決定方法

本研究では凝視範囲を, ある点を見ている際の視線座標のばらつきをもとに決定する. ある点を見ている際の視線認識の正確さ(ユーザが実際に見ている場所と視線座標との距離)および精度(視線座標のばらつき)は, 視線認識機器によって示されている. そして, これらを調査した研究もある(例[3]). また, ユーザの注視を推定する研究も多く行われてきている(例[14]). 凝視範囲の決定方法をこれらを参考に行う.

凝視範囲を決定する1つの方法としては, 視線認識の精度を用いることが考えられる. 例えば, Tobii Pro X3-120の視線認識の正確さおよび精度は公表されている¹. このように, 使用する認識機器に応じて凝視範囲を決めることにより, 利用環境に適した値を求めることができる.

また, もう1つの方法として, 視線認識機器へのキャリブレーションと同じ様に凝視範囲をキャリブレーションを通じて決定することも考えられる. 視線認識機器へのキャリブレーションは, 図2のように画面上の複数箇所に表示された点をユーザが見つめることにより行われる. この際に収集される視線座標のばらつき, つまり, ある点を見つめている際の視線座標の標準偏差をもとに凝視範囲を求める. 例えば, 視線認識の正確さと精度から適切な対象の大きさを求めている研究[3]では, 収集される視線座標の95%が入るような対象の大きさを式1から求めている.

$$S_{w/h} = 2(O_{x/y} + 2\sigma_{x/y}) \quad (1)$$

式1を用いると, 対象の幅 S_w と高さ S_h を, 表示された点から視線座標(xおよびy座標)までの距離 $O_{x/y}$ およびばらつき(標準偏差) $\sigma_{x/y}$ から求められる. 凝視範囲も同様に, キャリブレーションを通じて収集した視線座標を用いて, $2\sigma_{x/y}$ とすることが1つの案である. なお, 公表されている視線認識機の視線認識の精度を σ として用いた場合, キャリブレーションを行わずに凝視範囲を決定できる.

凝視範囲の大きさは凝視時間と同様に, 操作性能およびミダスタッチ問題の発生とトレードオフの関係にあるため, 各ユーザもしくは各場面において,

¹ <https://www.tobiipro.com/pop-ups/accuracy-and-precision-test-report-x3/?v=2.1.7> 最終閲覧 2020年11月15日

時間および範囲をもとに認識する凝視に基づく操作手法

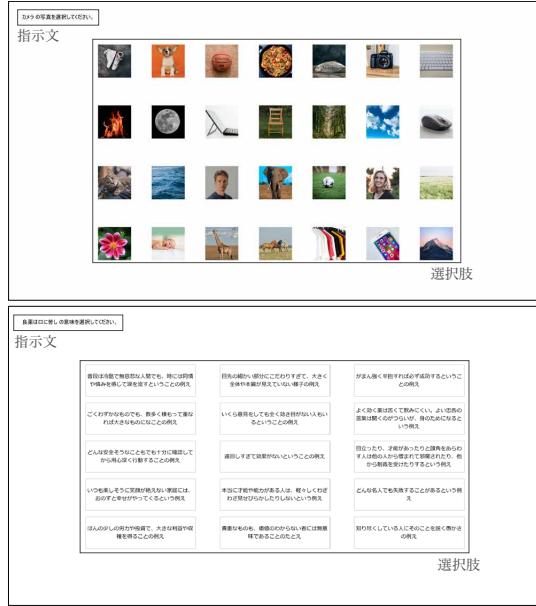


図 3. 実験に用いた UI 設計. (上) 画像タスク. (下) 文章タスク. 両画面における対象の大きさは、キャリブレーションによって決定される

どちらを優先するかによって変更するとよい。例えば、よりミダスタッチ問題の発生に対して堅牢な操作を求める場合は $1\sigma_{x/y}$ を、より誤った操作をある程度許容し簡単な操作を求める場合は $3\sigma_{x/y}$ を採用するなどである。

4 実験

本実験の目的は 2 つである。1 つは、凝視範囲を用いた本手法が従来手法と同じように対象選択が可能であることを示すことである。もう 1 つは、マウスでの操作に使用されているような UI 設計において、凝視範囲を用いることによりミダスタッチ問題をどれだけ軽減できるかを示すことである。

実験に用いた UI 設計は、図 3 (上) に示すような複数ある画像の中から 1 つを選択する場面 (例えば、動画プレイヤのサムネイルが表示された画面や、画像検索結果が表示された画面など)、および図 3 (下) に示すような複数表示された文章の中から 1 つを選択する場面 (例えば、ウェブでの検索結果を示す画面) を想定したものである。そのため、実験に使用した対象は、塗りつぶされた円といった単純な対象ではなく、実験参加者に探索を求めるような、内部に画像および文字列が表示されている対象である。本実験の参加者は本稿の第 1 著者である。なお、第 1 著者は視線に基づく操作の研究を 4 年間行っており、凝視に基づく操作手法に極めて慣れている。

実験に使用した視線認識機器はプロライセンスを付与した Tobii Eye Tracker 4C (サンプリング

レート : 90 Hz (つまり、約 11.11 ms ごとに 1 サンプルの取得) である。これを 27 インチ (解像度 : 3840×2160 ピクセル) のディスプレイ下部に取り付け使用した。実験参加者の頭部を固定せず、移動しないようになどの指示は特にしなかった。実験参加者とディスプレイの距離は約 65 cm である。この条件下において視野角 1° は約 1.1 cm に対応する。

実験開始前に、視線認識の性能を高く保つために、視線認識機器のキャリブレーションを行った。その後、凝視範囲のキャリブレーションを行い凝視範囲および対象の大きさを決定した後に、図 3 の UI 設計を用いたタスクを行った。

4.1 凝視範囲のキャリブレーション

凝視範囲を決定するためのキャリブレーションを行った。加えて、式 1 を用いて実験に使用する対象の大きさを決定する。

キャリブレーションには図 2 に示す画面を用いた。実験参加者は対象へ視線を移した後、スペースキーを押下する。その後、実験参加者は 2 秒間回転し続ける点を見続け、この間の視線座標が収集される。

各点を見つめている際の視線座標を収集 ($2,000 \text{ ms} / 11.11 \text{ ms} \simeq 180 \text{ サンプル}$) し、冒頭 500 ms ($\simeq 45 \text{ サンプル}$) を除いた 1,500 ms ($\simeq 135 \text{ サンプル}$) を用いて各点を見つめている際の視線座標のばらつき (σ') を以下の式から計算した。

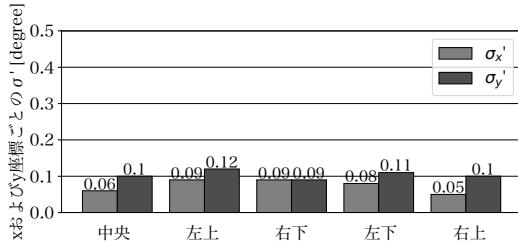
$$\sigma' = \frac{1}{m-n+1} \times \sum_{i=1}^{m-n+1} \text{SD}([P_i : P_{i+n-1}]), \quad (2)$$

P_i は i 番目の視線座標、 m は計算に用いるサンプル数 (135)、 n は凝視時間 (この例では 1,000 ms) に対応するサンプル数 ($90 \simeq 1,000 \text{ ms} / 11.11 \text{ ms}$) である。つまり、90 サンプル分の視線座標の標準偏差 (SD) を 1 サンプルずらしながら計算し、46 区間分の平均を σ' とした。また、各点を見つめている際の視線座標とその点の距離 (O') を、以下の式から求めた。

$$O' = \frac{1}{m-n+1} \times \sum_{i=1}^{m-n+1} \text{Ave.}([D_i : D_{i+n-1}]), \quad (3)$$

D_i は i 番目の視線座標と点までの距離、 m および n は式 2 と同じである。つまり、90 サンプル分の視線座標と点までの距離の平均 (Ave.) を 1 サンプルずらしながら計算し、46 区間分の平均を O' とした。

各点における x 座標、 y 座標ごとの σ' を図 4 に示す。本実験の目的の 1 つは、本手法が従来手法と同様に動作することを示すことである。そこで、式 1 を用いた際に、より簡単に操作が可能となる、より大きな σ' を σ 、より大きな O' を O として用いる。座標軸に依らずもっとも大きな σ' である 0.12° (約 0.14 cm) を σ 、もっとも大きな O' である 1.61° を

図 4. 図 2 の各点における視線座標のばらつき (σ')。

O (約 1.82 cm) とした。これらを式 1 に当てはめ、対象の大きさを 3.70° ($2 \times (1.61 + 0.12 \times 2)$) とし、凝視範囲を 2σ である 0.24° とした。

4.2 実験タスク

実験参加者は、図 3 それぞれの画面において指示された対象を選択するタスクを行う。なお、図 3 (上) の対象の 1 辺を 3.78° とし、図 3 (下) の対象の高さを 3.78° 、幅を表示される文章に合わせて 11.0° (約 12.4 cm) とした。

図 3 (上) を用いたタスク (以降、画像タスク) では、指示文に示された、例えば「カメラを選択する」という指示に従い、「カメラ」が表示されている画像を選択する。指示は 28 種類であり、指示に対応した 28 種類の対象 (選択肢) が表示される。全 28 種類の指示に対して、正誤問わずいずれかの対象を選択すると画像タスクは終了する。

図 3 (下) を用いたタスク (以降、文章タスク) では、指示文に示された、例えば「良薬は口に苦しの意味を選択する」という指示に従い、「良薬は口に苦し」の意味が書かれている文章を選択する。指示は 28 種類であり、それぞれの指示に対して 15 個の対象 (選択肢) が表示される。全 28 種類の指示に対し、正誤問わずいずれかの対象を選択を行うと文章タスクは終了する。指示は全て、ことわざの意味を選択させるものである。

両タスクにおいて、タスク開始時は指示文のみが表示されている。実験参加者が指示を読んだ後にスペースキーを押下すると対象が表示され、いずれかの対象が選択されると、対象を非表示とし次の指示が表示される。両タスクともに指示の順番はランダムである。各対象の位置は指示ごとにランダムとし、指示に対して選択すべき対象の位置が重複しないようにした。スペースキーが押下され対象が選択されるまでの時間を選択に要した時間とし、また指示に対して誤った対象が選択された回数を記録した。

実験参加者には、ミダスタッチ問題が生じない様に意識し、かつ素早くタスクを行うよう指示した。例えば、第 1 著者は頻繁に視線を動かすよう意識することにより、ミダスタッチが生じないよう工夫した。実験を行った順番は、画像タスク (本手法 → 従来手法)、文章タスク (本手法 → 従来手法) で

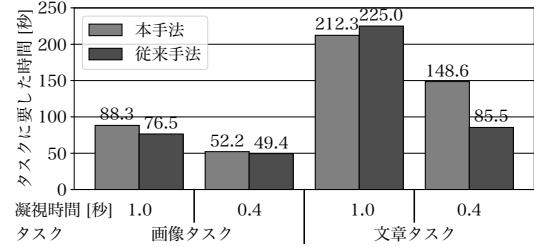


図 5. 選択に要した時間。

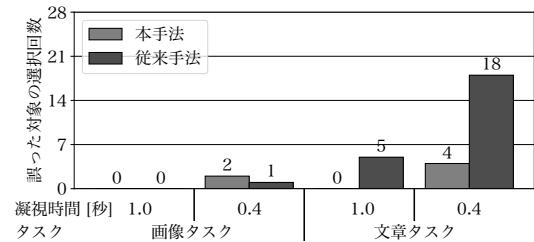


図 6. 誤った対象が選択された回数。

ある。凝視時間を 1 秒とした実験を行った後に、同一の手順にて凝視時間を 0.4 秒とした実験を行った。なお、0.4 秒は凝視時間の調整する研究において下限の値として用いられている時間 [11] であり、さらに長い時間として 1 秒での実験も行った。

4.3 実験結果

実験結果を図 5 および図 6 に示す。画像タスクにおいては凝視時間を 1.0 秒、0.4 秒とした場合において、選択に要した時間および誤った対象が選択された回数に大きな差は見られなかった。対して文章タスクにおいて、誤った対象が選択された回数は凝視時間を 1.0 秒とした時に本手法では 0 回であり従来手法では 5 回、凝視時間を 0.4 秒とした時に本手法では 4 回であり従来手法では 18 回であった。また、文章タスクでの凝視時間が 0.4 秒の場合、選択に要した時間は本手法では 148.6 秒であるのに対し、従来手法では 85.5 秒であった。この結果において従来手法の選択に要した時間が小さくなった理由は、従来手法では誤った対象が選択された回数が多いためであると考えられる。つまり、ミダスタッチ問題が発生し誤った選択が生じたことにより、実験参加者が適切な回答を探索し終わる前にタスクが終了することが多く生じたために、選択に要した時間が小さくなっていると考えられる。

また、文章タスクでは、誤った対象が選択された回数が本手法の方が少なくなった。文章タスクでは画像タスクと比べ、実験参加者は適切な対象を選択するためにより長い時間の探索が求められる。そのため、選択に要した時間は大きくなる。また、指示に対して、回答を考えながら文章を読むため、対象

内に視線座標が入り続ける時間は増える。従来手法では、対象内に視線座標が入っている時間をもとに凝視を認識するため、ミダスタッチ問題が多く発生したと考えられる。対して本手法では、文章を読んでいる際、つまり対象内を視線座標が移動している際は凝視が認識されないため、ミダスタッチ問題の発生が少なくなったと考えられる。

凝視時間を0.4秒とした場合、本手法においても誤った対象選択は生じた。この誤った対象選択が生じた際の視線移動の軌跡を調べたところ、文章を読んでいるように視線は移動していた。文章を読んでいる際の注視に要する時間は平均0.25秒であり0.1–0.5秒内に収まる[13]。そのため、凝視時間を0.5秒以下とした場合は、凝視範囲を用いたとしても、必然的に誤った対象選択は生じる。対して、凝視時間を1.0秒とした場合、本手法では両タスクにおいて誤った対象選択は生じていない。

これらの結果から、画像タスクのように視線が大きく移動しないような場合では、本手法と従来手法は同様に対象選択が行え、文章タスクのように視線が大きく移動するような場合では、従来手法においてある程度長い凝視時間(1秒)を用いても軽減できなかったミダスタッチ問題を、本手法は軽減できることがわかった。しかし、今回行った実験では著者のみが実験参加者であったため、今後さらに実験規模を大きくした調査を行う必要がある。

5 今後の発展

本手法の今後の発展に関して述べる。

5.1 ミダスタッチ問題のさらなる軽減

本手法は凝視時間の調整を行わず、凝視範囲を用いることによりミダスタッチ問題を軽減している。そこで、本手法においても凝視時間の調整(例[11, 16])を行うことにより、さらなるミダスタッチ問題の軽減を試みる。なお、凝視範囲を用いることにより、凝視範囲の調整を行ってきた研究における選択対象であった、無地もしくは単語、簡単な画像が表示された円や正方形以外の、より一般的に使用されているようなUI設計での対象選択への調査も可能となる。

5.2 文脈に沿った操作の実現

本手法では凝視の認識は対象の外でも行える。そのため、対象選択以外の操作を凝視により可能となる。例えば、対象外にて凝視が認識された際に、メニュー表示(マウスでの操作時における右クリックに近い操作)や、表示したメニューの非表示ができる。このように、操作の文脈によって凝視により可能な操作を変えることは、視線ジェスチャの開始点の決定[6]や、視線での描画時の開始点および終了点の決定[4]においても行われてきた。しかし、これらの研究では対象の選択は行われていない。

ただし、対象外への操作を凝視により行う場合は、ミダスタッチ問題の発生を防ぐための工夫が必要である。例えば[6]では視線ジェスチャが完了するまで操作を行わないようにしており、[4]ではミダスタッチ問題が発生しないように音声や視覚的なフィードバックを用いて視線を移動するよう促している。まずミダスタッチ問題の解決をする必要があるが、凝視範囲を用いることにより文脈に沿った操作が可能となることは、視線に基づく操作への大きな貢献となるだろう。

5.3 操作性能の向上

ミダスタッチ問題の軽減に加え、凝視に基づく操作性能の向上を目的とした手法(例[2, 18])を取り入れることもできる。これらの多くは、マウスでの操作性能を向上させる手法を従来手法に取り入れたものである。従来手法と比べ用途がマウスでの操作に似ている本手法においては、これらの研究で得られた知見を特に享受しやすいだろう。

フィルタを適用することにより、視線認識時に生じるマイクロサッカードなどを抑えることができる[3]。そのため、視線認識を行う機器や人、環境が与える、ある点を見つめている際の視線座標のばらつきへの影響を少なくすることができるだろう。しかし、フィルタの種類によっては遅延が生じる。そのため、適切なフィルタを選択する必要がある。

5.4 短い凝視時間の使用

凝視時間を0.4秒としたところ、本手法においても誤った選択が生じた。本手法、従来手法ともに、0.4秒以下の短い凝視時間を用いる場合、専用のUIの使用(例[10, 17])、輻輳効果の使用(例[9])、追跡眼球運動の使用(例[15])が必要となるだろう。もしくは、対象へ視線を移す時の視線移動の軌跡を観察すること(例[2, 5])が考えられる。

6 まとめ

本稿において、新たな凝視の認識手法による、凝視に基づく操作手法を示した。従来手法が「対象の中に視線座標が凝視時間以上留まっていること」を条件に凝視を認識していたことに対し、本手法では「視線座標のばらつきが凝視範囲に凝視時間以上留まっていること」を条件とする。本手法によって主に、対象内に視線座標が入っているが視線が移動している場合に生じるミダスタッチ問題の軽減できる。例えば、ウェブページのリンクを読んでいる際や、動画プレイヤのサムネイルを見ている際に生じるミダスタッチ問題の軽減が可能である。本稿では、著者による実験を通じて、本手法は従来手法と同じ様に操作ができ、対象内に視線座標が入っているが視線が移動している場合に生じるミダスタッチ問題を軽減できる可能性を示した。

これまで従来手法におけるミダスタッチ問題の軽減や性能向上を目的とした手法は、本手法においても適応可能である。さらに、本手法はマウスやタッチでの操作と似た操作であるため、従来手法に比べよりこれらの操作に関する研究にて得られてきた知見を享受することができるだろう。著者らは、凝視範囲を用いた凝視に基づく操作手法により、視線に基づく操作の可能性がさらに広がり、より視線に基づく操作手法が普及すると考えている。

謝辞

本研究は、公益財団法人立石科学技術振興財団の2020年度研究助成(C)[博士後期課程対象]を一部受けたものです。

参考文献

- [1] W. Abd-Almageed, M. S. Fadali, and G. Bebis. A Non-intrusive Kalman Filter-based Tracker for Pursuit Eye Movement. In *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, Vol. 2, pp. 1443–1447. IEEE, 2002.
- [2] M. Choi, D. Sakamoto, and T. Ono. Bubble Gaze Cursor + Bubble Gaze Lens: Applying Area Cursor Technique to Eye-Gaze Interface. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ETRA '20, pp. 11:1–10. ACM, 2020.
- [3] A. M. Feit, S. Williams, A. Toledo, A. Paradiso, H. Kulkarni, S. Kane, and M. R. Morris. Toward Everyday Gaze Input: Accuracy and Precision of Eye Tracking and Implications for Design. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1118–1130. ACM, 2017.
- [4] A. J. Hornof and A. Cavender. EyeDraw: Enabling Children with Severe Motor Impairments to Draw with Their Eyes. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '05, pp. 161–170. ACM, 2005.
- [5] T. Isomoto, T. Ando, B. Shizuki, and S. Takahashi. Dwell Time Reduction Technique Using Fitts' Law for Gaze-based Target Acquisition. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '18, pp. 26:1–26:7. ACM, 2018.
- [6] T. Isomoto, S. Yamanaka, and B. Shizuki. Gaze-based Command Activation Technique Robust Against Unintentional Activation using Dwell-then-Gesture. In *Proceedings of the 46th Graphics Interface Conference on Proceedings of Graphics Interface 2020*, GI '20, pp. 24:1–11. CHCCS, 2020.
- [7] R. J. K. Jacob. What You Look at is What You Get: Eye Movement-based Interaction Techniques. In *Proceedings of the 1990 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, pp. 11–18. ACM, 1990.
- [8] Y. Kammerer and W. Beinhauer. Gaze-Based Web Search: The Impact of Interface Design on Search Result Selection. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, ETRA '10, pp. 191–194. ACM, 2010.
- [9] S. Kudo, H. Okabe, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto. Input Method Using Divergence Eye Movement. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pp. 1335–1340. ACM, 2013.
- [10] C. Lutteroth, M. Penkar, and G. Weber. Gaze vs. Mouse: A Fast and Accurate Gaze-Only Click Alternative. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 385–394. ACM, 2015.
- [11] A. Nayyar, U. Dwivedi, K. Ahuja, N. Rajput, S. Nagar, and K. Dey. OptiDwell: Intelligent Adjustment of Dwell Click Time. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '17, pp. 193–204. ACM, 2017.
- [12] A. M. Penkar, C. Lutteroth, and G. Weber. Designing for the Eye: Design Parameters for Dwell in Gaze Interaction. In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference*, OzCHI '12, pp. 479–488. ACM, 2012.
- [13] K. Rayner. Eye Movements and Cognitive Processes in Reading, Visual Search, and Scene Perception. In J. M. Findlay, R. Walker, and R. W. Kentridge eds., *Eye Movement Research*, Vol. 6 of *Studies in Visual Information Processing*, pp. 3–22. North-Holland, NLD, 1995.
- [14] D. D. Salvucci. Inferring Intent in Eye-Based Interfaces: Tracing Eye Movements with Process Models. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 254–261. ACM, 1999.
- [15] M. Vidal, A. Bulling, and H. Gellersen. Pursuits: Spontaneous Interaction with Displays Based on Smooth Pursuit Eye Movement and Moving Targets. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, pp. 439–448. ACM, 2013.
- [16] O. Špakov and D. Miniotas. On-Line Adjustment of Dwell Time for Target Selection by Gaze. In *Proceedings of the 3rd Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 203–206. ACM, 2004.
- [17] C. Ware and H. H. Mikaelian. An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input. In *Proceedings of the 1987 CHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*, CHI '87, pp. 183–188. ACM, 1987.
- [18] 崔 明根, 坂本 大介, 小野 哲雄. Bubble Gaze Cursor : バブルカーソル法の視線操作への適用. 情報処理学会論文誌, 61(2):221–232, 2020.

ベイズ情報利得を用いたスクリーンキーボードカーソルの効率的移動手法

中嶋 誠 * 勝 世聰 * 五十嵐 健夫 *

概要. 本稿では、方向キー操作によるスクリーンキーボードにおいて、ベイズ情報利得を用いた効率的なカーソル移動手法を提案する。スクリーンキーボードの改善としては、盤面レイアウトを最適化する手法が提案されているが、ユーザの学習コストが問題となる。本手法は、レイアウトは変更せず、カーソルの動きだけを変更する。方向キーを押したときに、単純に上下左右にカーソルが1つ移動するのではなく、方向キーを押す回数が確率的に最も少くなるように、最適な位置へカーソルがジャンプする。ジャンプ先の計算には、ベイズ実験計画法をユーザインタラクションに応用した BIG(Bayesian Information Gain) アルゴリズムを用いる。さらに既存の BIG アルゴリズムに加えて、新たに探索と活用の両方を考慮した目的関数を設定することで、一度の方向キー押下で1マス以上カーソルが移動するシステムを実現した。数値実験により、提案手法を用いることで、目的入力文字への到達に要するボタン押下数を1文字あたり平均0.54回削減できることが示された。

1 はじめに

コンピュータ黎明期から現在に至るまで、文字の入力はヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)における基本的なトピックの1つであり、様々な手法が提案されてきた。一般に、デスクトップコンピュータにおいては文字入力のデバイスとしてハードウェアキーボードを利用することが多い。一方で近年普及の見られる小型の携帯端末等では、筐体スペースの問題でハードウェアのキーボード機構を備えることが難しく、代わりに画面に表示された文字をタップで選択するスクリーンキーボードがよく用いられている。またテレビや据置型ゲーム機のように画面と視聴者の距離があり、タッチパネルの利用が難しい場合は、リモコンやコントローラーの方向キーによってスクリーンキーボード上のカーソルを移動し、入力対象文字を選択する方法が一般的である。

本稿では、方向キー操作によるスクリーンキーボードの入力高速化手法を提案する。提案手法では、方向キーを押したときに、単純に上下左右にカーソルが1つ移動するのではなく、方向キーを押す回数が確率的に最も少くなるように、最適な位置へカーソルがジャンプする。これにより、目的の入力文字へ到達するまでに要する方向キー押下回数を削減できる。カーソルのジャンプ先の計算については、ベイズ実験計画法の観点から、ユーザの方向キー操作によってシステムから見た入力文字の曖昧さが減少すると考え、そのエントロピー減少をベイズ情報利得とし、一度の入力で最も多くの情報利得を得られるカーソル位置を効率の良い移動先として選択する。

提案手法が対象とする方向キーによる文字入力は、

標準的なキーボード入力と比較してボタンが少ないため操作の自由度が低く、ユーザ側の習熟による速度向上の伸びしろが少ない。そのためアルゴリズムによる支援の意義があると考えられる。特に、赤外線リモコンと低スペック端末の組み合わせなどで、方向キーを押してから画面上のカーソルが移動するまでに遅延がある場合には、押下回数削減の効果が大きいと考えられる。また別の文脈として、方向キー入力によるスクリーンキーボードは、身体機能に制限がある人々の意思疎通手段として利用される場合がある。そういう利用シーンでは、方向キーを1回クリックするにも多大な労力が必要であり、本研究によって押下回数を削減することが大きな価値を持つといえる。加えて、研究の立ち位置という観点から、本研究は文字入力という HCI 分野ではある意味研究し尽くされた分野であっても、近年の確率的機械学習のコンセプトを取り入れることで、新しいインタラクションの可能性があることを例示するものである。

2 関連研究

HCI分野において、テキスト入力の支援手法が多数研究してきた。特にタッチ操作によるスクリーンキーボード入力の分野では、画面上のキー配列を一般的な QWERTY 配列より効率的な配置に変更することで、入力操作に要するコストを減らす手法が提案してきた。メトロポリスキーボード[24]は、英単語中の文字出現確率を考慮することで、文字入力時の指移動量を最小化するキー配列手法である。Dunlop ら[5]は、指移動量の最小化に加えて、既存の QWERTY 配列との共通度を考慮することで、入力コストが少なく、かつユーザの学習コストが少ないキー配列手法を提案した。また同様のキー配列最

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学, JST CREST



図 1. (a) 一般的なスクリーンキーボードのカーソル移動手法では目的文字 w への到達に 4 回の方向キー押下を要するが、(b) 提案手法では 3 回の押下で到達する。

適化手法を、スクリーンキーボード上をなぞって文字入力するジェスチャータイピングに応用する手法が提案されている [21, 3]。しかしこれらの手法は、ユーザが新しいキー配列に習熟するまでに学習コストがかかるという根本的な問題があり、世間一般に普及するには至っていない。そのため、キー配列を維持したまま、文字ごとのタップ判定範囲を変更することで入力エラーを減らす手法が提案されている [7]。

我々の提案手法が対象とする、カーソル移動と決定操作によるスクリーンキーボード入力についても、効率化手法が提案されてきた。Barrero ら [1] は、方向キー操作を用いるデジタル TV 環境での文字入力エラーについて分析した。Bellman ら [2] は、入力される確率の高い文字をグリッドの左上から順に配置し、方向キー移動で文字を選択し、一文字入力ごとにレイアウトを再配置する手法を提案した。また、方向キーに限らず、自由度の低い操作デバイスでの文字入力手法も研究されている。松野ら [14] は、スクリーンキーボードの盤面を再帰的に分割・選択することで、少ない操作ボタンでも効率的なテキスト入力手法を提案した。田中ら [22] は、4 ボタンそれぞれにいくつかの文字を割当て、ユーザが押したボタンの組み合わせから可能性のある単語を入力する手法を提案した。

限られた操作によるテキスト入力手法は、身体機能に制限があるユーザを支援する技術としても研究されている [15]。Semantic keyboard[16] は、身体の不自由なユーザらがスクリーンキーボードを 2D ポインタで操作する際に、文字の登場確率に応じて Semantic pointing[4] の考え方を取り入れることでカーソル移動量を削減した。DUCK keyboard[18, 17] は、視覚の不自由なユーザが読み上げ式スクリーンキーボードを利用するにあたって、不正確な入力を許容して候補の単語を予測することで入力速度を向上した。

本稿の提案手法は、ユーザの入力に応じてシステムが持つ入力文字についての知識を更新するという観点で、Interactive Machine Learning (IML)[6] の一種と捉えることができる。インタラクティブな機械学習アプリケーションにおいて、近年ではベイズ的な手法の利用が見られる。その中の一つのアプローチ

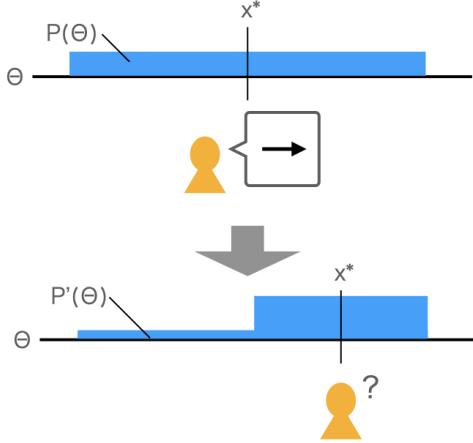


図 2. 二分探索タスクを例にすると、提示されたビュー x^* に対するユーザの反応 y (この場合は \rightarrow) によって、システムが持つ探索対象の確率分布 $P(\Theta)$ が $P'(\Theta)$ に更新され、エントロピーが減少する。

チが、ベイズ最適化によってインタラクティブにデザイン空間の探索を行う研究である [5, 10, 9]。また別のアプローチとして、ユーザとソフトウェアのインタラクションをベイズ実験計画法 [11] の枠組みで捉えることで、システムがユーザに提示する情報を最適化する手法がある。Liu らは一連の研究 [12, 13] で、情報理論の観点から、ユーザの操作が探索対象の曖昧さを減少させる点に着目し、その期待値を最大化する画面をユーザに提示する手法を提案した。本稿の提案手法は、同様の仕組みをスクリーンキーボード操作に応用したものである。

3 提案手法

我々の提案手法は、方向キー操作で画面上のカーソルを移動するタイプのスクリーンキーボードにおいて、ユーザが方向キーを押した際のカーソル移動を効率化することで、文字入力に要するキー押下数を削減する手法である。通常のスクリーンキーボードでは、ユーザが方向キーを押した方向に 1 マス分カーソルが移動し、目的の文字に到達するまでその操作を繰り返す (図 1a)。一方提案手法では、ユーザが方向キーを押した際のカーソル移動量が 1 マス分に固定ではなく、入力文字候補を効率的に絞り込む位置へと適応的にカーソルが移動する (図 1b)。

カーソル移動先の計算には、ベイズ実験計画法を利用した期待情報利得の最大化を考慮する。その要点は、ユーザの反応から最も多くの情報を引き出せる地点 x^* にカーソルを移動することである。ここでいう情報とは、目的の文字についての確率分布の変動量である。簡単のため一次元の例で説明すると、単純な二分探索タスクにおいて、システムがユーザ

にある地点 x^* を見せて、探索対象は現在位置の左右どちらにあるか尋ねるとする(図2)。最初の時点ではシステムは、探索対象の位置については何の知識も持たないため、その確率分布 $P(\Theta)$ は一様分布である。ここでユーザがUI操作で→と回答することで、システムは探索対象が現在位置より右にあることを知り、確率分布を絞り込み $P'(\Theta)$ へと更新できる。ここで $P(\Theta)$ と $P'(\Theta)$ の間で減少したエントロピーを、一度の操作で獲得した情報量とすると、その期待値が最大になる地点 x^* をユーザに提示する地点(ビュー)として選択するのが、探索という観点からは最も効率が良い戦略だと言える。これが提案手法の背後にあるアイデアである。例のような単純な二分探索では、ビュー x^* をパラメータ空間 Θ の中点とすることで十分だが、事前分布 $P(\Theta)$ が一様分布でない場合や、ユーザの行動 y に複数の選択肢があり、かつ確率的である場合に、最適なビュー x^* をどのように選択するかは自明でない。そこで提案手法では、獲得する情報量の期待値計算に基づくアルゴリズムによって x^* を決定する。

4 アルゴリズム

提案手法のアルゴリズムは、ベイズ実験計画法をヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)に応用したものである。以下に我々の利用するベイズ実験計画法の概要と、提案手法への適用方法を述べる。

4.1 ベイズ実験計画法

元来のベイズ実験計画法は、物理実験など複数回の実験を経て特定のパラメータを同定する場面で、トータル試行回数を少なくするために、毎回の実験設定を適切に制御する手法である[11, 25]。Liuら[12, 13]はベイズ実験計画法における実験(experiment)と実験設定(configuration)を、アプリケーションにおけるユーザの操作(interaction)とGUIの状態(view)に対応づけることで、HCI分野への応用方法を示した。この形式でのベイズ実験計画法のHCIへの応用を、本稿ではLiuら[12, 13]に倣い、Bayesian Information Gain(BIG)アルゴリズムと呼ぶものとする。

BIGアルゴリズムは、インタラクティブシステム上で行われる探索的タスクにおいて、システムがユーザに提示するGUIの状態(ビュー)を、そこから得られる情報利得の期待値が最大となるように最適化する手法である。ここでのビューは、探索中のパラメータ空間における1点、または1範囲に相当する。それを見たユーザが、UI上の操作(アクション)によって、現在地は目的地より上か下かといった判断結果を伝えることで、システムは探索対象の存在範囲を絞り込むことができる。つまり探索対象の確率分布についてエントロピーが減少する。このエント

ロピー減少を情報利得とし期待値を考えることで、システムがユーザに判断を仰ぐ価値のある点はどこかを求め、最適なビューとして提示するというのがBIGアルゴリズムの要点である。

定量的に考えると、ユーザのアクションによって得られる情報利得は、そのアクション前後における探索対象の確率分布の差としてKLダイバージェンスにより計算できる。以下で情報利得とその期待値計算についての定式化を述べる。今、探索対象がある離散パラメータ空間中で θ に位置する確率を、確率変数 Θ を用いて $P(\Theta=\theta)$ とし、その確率分布を $P(\Theta)$ とする¹。また、 X をシステムが取り得る全てのビュー状態の集合、 Y をユーザが取り得る全てのアクションの集合とすると、ユーザはシステムが提示したビュー $x \in X$ に基づき、アクション $y \in Y$ を行うことになる。これにより探索対象の確率分布 $P(\Theta)$ が、ビュー x とアクション y を与えられた場合の条件付き確率分布 $P(\Theta | x, y)$ へと更新される。すると、ユーザに提示する最適のビュー x^* は、何らかの形でコストを定義するユーティリティ関数 $u(\cdot)$ と、期待値 $E[\cdot]$ を用いて、

$$x^* = \underset{x \in X}{\operatorname{argmax}} E[u(\theta, x, y)],$$

と定義される。対象探索タスクにおいては、ユーティリティ関数を事前分布と事後分布のKLダイバージェンス²とすることが一般的である[19]。その場合ユーティリティ関数は、

$$\begin{aligned} u(x, y) &:= -D_{\text{KL}}(P(\Theta | x, y) \| P(\Theta)) \\ &:= \text{IG}(x, y), \end{aligned}$$

と定義され、これを情報利得(Information Gain: IG)と呼ぶ。この関数はユーザが選択したアクション y に依存するが、ユーザの選択を事前に知ることは一般的に不可能であるため、取り得る全ての選択肢 $y \in Y$ についての期待値を計算することで、期待情報利得(Expected Information Gain: EIG)とする。

$$\begin{aligned} E[u(x)] &:= - \underset{y \in Y}{E}[D_{\text{KL}}(P(\Theta | x, y) \| P(\Theta))] \\ &:= \text{EIG}(x). \end{aligned}$$

これにより、ユーザに提示する最適なビュー x^* の選択を、期待情報利得の最大化問題として定義できる。

$$x^* = \underset{x \in X}{\operatorname{argmax}} \text{EIG}(x). \quad (1)$$

¹ 本稿では表記を簡潔にするため、以降 $P(\Theta = \theta)$ を $P(\theta)$ と表記する。一言でいうと、 $P(\Theta)$ はパラメータ空間 Θ 全体の確率分布であり、 $P(\theta)$ は具体的な θ が与えられた時にそれが目標地点である確率である。また同様に、 $P(X=x)$ を $P(x)$ 、 $P(Y=y)$ を $P(y)$ と表記する。

² x が離散的であるときに、確率分布 $f(x)$ 、 $g(x)$ 間のKLダイバージェンス $D_{\text{KL}}(f(x) \| g(x)) = \sum_x f(x) \log_2 \frac{f(x)}{g(x)}$ である。

Liu ら [12, 13] の先行研究では式 (1) を用いているが、これはベイズ最適化問題における探索 (Exploration) と活用 (Exploitation) の、探索だけを考慮した目的関数設計といえる。しかし我々のアプリケーションで検証したところ、探索だけを目的関数とした場合、キーボード盤面の端で到達できないマスが生じるため、活用もコストとして算入する必要があることがわかった。そのため我々は k を任意の定数として ($k = 0.3$)、位置 x の文字が探索対象である確率 $P(x)$ を活用コストとして加えた、

$$x^* = \operatorname{argmax}_{x \in X} (\text{EIG}(x) + kP(x)), \quad (2)$$

を解くべき最適化問題とした。

最適ビューの選択にあたっては、今回はビューの総数 $|X|$ が高々アルファベットの文字数程度のため、総当たりで全てのビュー $x \in X$ について式 (2) のコスト項を計算し、最大となるビューを提示する。また本稿で対象とするパラメータ空間 Θ は離散的であるため、 $\text{EIG}(x)$ に含まれる期待値計算は単純な足し合わせによって行うことができる。

$$\begin{aligned} \text{EIG}(x) &= \sum_{y \in Y, \theta \in \Theta} P(y, \theta | x) \log_2 P(\theta | x, y) \\ &\quad - \sum_{\theta \in \Theta} P(\theta) \log_2 P(\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) に含まれる事後確率 $P(\theta | x, y)$ は陽的に求めることができないため、ベイズの定理

$$P(\theta | x, y) = \frac{P(y | \theta, x)P(\theta)}{P(y | x)},$$

を用いて式変形すると、

$$\begin{aligned} \text{EIG}(x) &= \sum_{y \in Y, \theta \in \Theta} P(\theta)P(y | \theta, x) \log_2 P(y | \theta, x) \\ &\quad - \sum_{y \in Y} P(y | x) \log_2 P(y | x), \end{aligned} \quad (4)$$

となり、ここで

$$P(y | x) = \sum_{\theta \in \Theta} P(y | \theta, x)P(\theta),$$

である。 $P(\theta)$ は事前確率であり、 $P(y | \theta, x)$ を後述するモデル化したユーザのアクション確率として与えることで、式 (4) の全ての項を数値的に計算可能となる。

実際のインタラクションにおいては、ユーザが探索対象に到達するまでに、システムによる最適ビュー x_i^* の提示と、ユーザのアクション y_i 、それに応じた確率分布 $P_i(\Theta)$ の更新を繰り返し行うことになる。確率分布の更新はベイズの定理を用いて、全ての $\theta \in \Theta$ について、

$$P_{i+1}(\theta) = P_i(\theta | x_i, y_i),$$

表 1. モデル化したユーザのアクション確率

x と θ の 位置関係	各ボタンを押す確率 (%)				
	\leftarrow	\rightarrow	\uparrow	\downarrow	OK
同じ	1.25	1.25	1.25	1.25	95
右	1.25	95	1.25	1.25	1.25
右上	2	47	47	2	2
上	1.25	1.25	95	1.25	1.25
左上	47	2	47	2	2
左	95	1.25	1.25	1.25	1.25
左下	47	2	2	47	2
下	1.25	1.25	1.25	95	1.25
右下	2	47	2	47	2

を計算する。それによって得られた確率分布 $P_{i+1}(\Theta)$ を新しい事前分布として、次に表示するビュー x_{i+1}^* を計算する。

4.2 BIG キーボード

前項で説明した BIG アルゴリズムの枠組みにより、スクリーンキーボードカーソルを効率的に移動する手法を述べる。任意のアプリケーションに BIG アプリケーションを適用するには、そのパラメータ空間 Θ 、初期の確率分布 $P(\Theta)$ 、隠れ変数である探索対象の位置 θ 、モデル化されたアクション確率 $P(y | \theta, x)$ を定義する必要がある。提案手法のスクリーンキーボードにおいては、それぞれ以下に対応する。

- パラメータ空間 Θ : 入力可能なアルファベット文字全体 (a-z, カンマ, ピリオド)
- 事前分布 $P(\Theta)$: 一様分布もしくは文字の登場確率に応じた分布
- 隠れ変数 θ : ユーザが入力の目的とする文字
- ビュー x : カーソルの位置
- アクション y : ユーザの押したボタン (上下左右、決定)

また、モデル化したアクション確率 $P(y | \theta, x)$ のテーブルによって、カーソル現在位置が x で、目的文字が θ の時にユーザが各ボタンを押す確率を定義しておく (表 1)。ユーザは画面上で x から見た θ の位置によって、一定確率で方向キー ($\leftarrow\rightarrow\uparrow\downarrow$)、または決定キー (OK) を押すが、目的文字がカーソル現在位置の (i) 斜め方向にある、(ii) 垂直または水平方向にある、(iii) 同じ位置にある、場合で行動の割合が異なる。我々は経験的に、ユーザは約 95% の確率で正しいボタンを押すものとしてモデル化を行った。ここでの正しいボタンとは上のパターン分けそれぞれの場合において (i) 対象の方向ボタン 2 つのうちいずれか、(ii) 対象の方向ボタン 1 つ、(iii) 決定ボタン、である。

ベイズ情報利得を用いたスクリーンキーボードカーソルの効率的移動手法

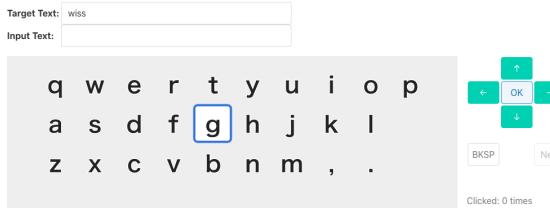


図 3. 提案手法を実装したスクリーンキーボード。

5 結果

我々は提案手法のスクリーンキーボードを実装し、基本的な挙動を確認した(図3)。一例としてキーボードで文字 w を入力する場合の挙動を示す。まずカーソルの初期位置は g にあるものとする。標準のスクリーンキーボードでは、g から ← を 3 回、↑ を 1 回押して、合計 4 回の押下で w に到達する。提案手法の BIG キーボードでは、まず g から ← を押して d に移動、← を押して s に移動、最後に ↑ を押して合計 3 回の押下で w に到達する。

同様に、初期位置から開始して、ユーザがミスなく操作して各文字へ到達するのに要する方向キーの押下回数を計算により求めると、標準スクリーンキーボードでは 1 文字あたり平均 3.0 回、BIG キーボードでは 1 文字あたり平均 2.46 回であった。よって提案手法では、押下回数を 1 文字あたり平均 0.54 回削減できることができることが示された。

我々の提案手法では、最適ビューの選択に探索と活用両方のコストを考慮する改良を行ったが、これによる既存手法との挙動の違いについても述べる。特に問題となるのは目的入力文字が p の場合である。既存手法(式1)では、初期位置から ↑→→ の入力で o に到達し、さらに → を押してもカーソルはそれ以上右に移動せず、結果として文字 p を入力することができない。提案手法(式2)では、初期位置から ↑→→ の入力で o に到達し、さらに → を押すことで、問題なくカーソルが p に移動する。既存手法が上手く動作しないのは、探索の観点からすると、p の地点に行ってユーザの判断を仰いだとしても、それ以上候補文字の絞り込みに貢献しないため、移動する価値がないとしてカーソルが o に留まる結果になるためである。提案手法では、探索への貢献だけでなく、探索によって目的文字である確率が高いとされた場所に移動する行為(活用)にも価値を与えることで、意図した挙動となった。

6 むすび

本稿では、ベイズ実験計画法をユーザインタラクションに応用した BIG アルゴリズムによって、スクリーンキーボードにおけるカーソル移動を効率化する手法を提案した。そのために必要なパラメータを

定義し、作成したユーザアクションの確率テーブルを利用して、必要な計算が実際に可能であることをプロトタイプにより示した。また理論面で、既存研究で用いられた BIG アルゴリズムの目的関数に、探索だけでなく活用のコストを算入することで、キーボード盤面の端における挙動が正しくなることを確認した。計算による検証では、目的文字に到達するために必要な方向キー押下数が、1 文字あたり平均 0.54 回削減できることができた。

今後の課題としては、ユーザスタディによって、単純な押下回数削減だけでなく、ユーザエクスペリエンスが改善されているか検証の必要がある。提案手法は標準的なキー配列と操作方法であるため学習コストは低く、その点については問題が少ないと思われる。一方で、初期位置付近にある f や h といった文字の入力時に、カーソルの挙動が非直感的になる場合があり、それによって引き起こされるユーザの誤操作がパフォーマンスに悪影響を及ぼす可能性がある³。またユーザアクションの確率モデルについて、本稿では経験的にそれらしい値を設定して利用したが、十分な根拠のある数値とは言い難い。これについては実際のユーザ行動について統計データを集めることで、より正確なモデル化が可能になるものと思われる。

最後に将来的な改善可能性について述べる。まず自然な拡張として、ひらがな五十音のスクリーンキーボードのように、より大きな盤面に対して BIG アルゴリズムを適用することで、削減される押下回数のインパクトが大きくなると予想される。またユーザインターフェースとして、DriftBoard[20] と組み合わせて小さなディスプレイでの利用が考えられる。アルゴリズム面では、文章の入力を想定した場合、現在入力されている文字に応じた、次の文字の登場確率を事前分布 $P(\Theta)$ として導入することで、パフォーマンス向上が想定される。既存の確率的アプローチを、ヒューリスティックなパラメータ調整に頼らず自然な形でシステムへ導入できることは BIG アルゴリズムの利点である。加えて、現在の実装では毎回カーソルを同じ初期位置に戻しているが、直前の文字や、これまで入力した文章を元に、より良い初期位置へ自動的に移動することで、方向ボタンの押下回数をさらに削減できると考えられる。

BIG アルゴリズム自体に関する問題として、現在のアルゴリズムは情報理論の観点から最適な挙動であっても、ヒューマンインターフェースとしては最適な挙動ではない可能性がある。そのため、操作を行うのが機械ではなく人間であることを考慮した目的関数設計の余地がある。具体的には、ユーザにとっては目的地を通り過ぎてから戻るようなジグザグの軌跡をとるカーソル挙動は非直感的で、慣れるまで

³ f の入力は ←→ の 2 押下、h の入力は →← の 2 押下を要する。

予想がつきにくい。結果として、一般的なカーソル移動手法ではスタートからゴールまでに必要な操作を最初に頭に思い浮かべて一括実行できるのに対し、提案手法では毎回の移動ごとに現在位置を確認し適切なアクションを判断する認知的コストが細切れに発生する。このような人間の認知コストを考慮に入れた数値的最適化とユーザインタフェースのデザインは、既存の心理学的認知モデル等と合わせることで[8, 23]、今後 HCI 分野における発展可能性が残されていることが考えられる。

謝辞

本研究は JST CREST JPMJCR17A1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] A. Barrero, D. Melendi, X. G. Paneda, R. Garcia, and S. Cabrero. An Empirical Investigation Into Typing Errors in Interactive Digital Television Applications. *Int. Journal of HCI*, 31(3):210–225, 2015.
- [2] T. Bellman and I. S. MacKenzie. A Probabilistic Character Layout Strategy for Mobile Text Entry. In *Graphics Interface*, 1998.
- [3] X. Bi and S. Zhai. IJQwerty: What Difference Does One Key Change Make? Gesture Typing Keyboard Optimization Bounded by One Key Position Change from Qwerty. CHI ’16. ACM, 2016.
- [4] R. Blanch, Y. Guiard, and M. Beaudouin-Lafon. Semantic Pointing: Improving Target Acquisition with Control-Display Ratio Adaptation. CHI ’04, p. 519–526. ACM, 2004.
- [5] M. Dunlop and J. Levine. Multidimensional Pareto Optimization of Touchscreen Keyboards for Speed, Familiarity and Improved Spell Checking. CHI ’12, p. 2669–2678. ACM, 2012.
- [6] J. A. Fails and D. R. Olsen Jr. Interactive machine learning. IUI ’03, pp. 39–45. ACM, 2003.
- [7] A. Gunawardana, T. Paek, and C. Meek. Usability Guided Key-Target Resizing for Soft Keyboards. IUI ’10, p. 111–118. ACM, 2010.
- [8] B. E. John. Using Predictive Human Performance Models to Inspire and Support UI Design Recommendations. CHI ’11, p. 983–986. ACM, 2011.
- [9] Y. Koyama, I. Sato, and M. Goto. Sequential Gallery for Interactive Visual Design Optimization. *ACM Trans. Graph.*, 39(4), 2020.
- [10] Y. Koyama, I. Sato, D. Sakamoto, and T. Igarashi. Sequential Line Search for Efficient Visual Design Optimization by Crowds. *ACM Trans. Graph.*, 36(4), 2017.
- [11] D. V. Lindley. On a Measure of the Information Provided by an Experiment. *The Annals of Mathematical Statistics*, 27(4):986–1005, 1956.
- [12] W. Liu, Rafael Lucas D’Oliveira, M. Beaudouin-Lafon, O. Rioul. BIGnav: Bayesian Information Gain for Guiding Multiscale Navigation. CHI ’17, p. 5869–5880. ACM, 2017.
- [13] W. Liu, O. Rioul, J. McGrenere, W. E. Mackay, and M. Beaudouin-Lafon. BIGFile: Bayesian Information Gain for Fast File Retrieval. CHI ’18. ACM, 2018.
- [14] S. Matsuno, S. Chida, N. Itakura, T. Mizuno, and K. Mito. A method of character input for the user interface with a low degree of freedom. *Artificial Life and Robotics*, 24(2):250–256, 2019.
- [15] O. Polacek, A. J. Sporka, and P. Slavik. Text input for motor-impaired people. *Universal Access in the Information Society*, 16(1):51–72, 2017.
- [16] M. Raynal, I. S. MacKenzie, and B. Merlin. Semantic Keyboard: Fast Movements between Keys of a Soft Keyboard. *Computers Helping People with Special Needs*, pp. 195–202. Springer, 2014.
- [17] M. Raynal and P. Roussille. Use of DUCK Keyboard for a Daily Use. ICCHP ’18, pp. 399–406. Springer, 2018.
- [18] P. Roussille, M. Raynal, and C. Jouffrais. DUCK: A DeDUCtive Soft Keyboard for Visually Impaired Users. IHM ’15. ACM, 2015.
- [19] K. J. Ryan. Estimating Expected Information Gains for Experimental Designs With Application to the Random Fatigue-Limit Model. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 12(3):585–603, 2003.
- [20] T. Shibata, D. Afergan, D. Kong, B. F. Yuksel, I. S. MacKenzie, and R. J. Jacob. Drift-Board: A Panning-Based Text Entry Technique for Ultra-Small Touchscreens. UIST ’16, p. 575–582. ACM, 2016.
- [21] B. A. Smith, X. Bi, and S. Zhai. Optimizing Touchscreen Keyboards for Gesture Typing. CHI ’15, p. 3365–3374. ACM, 2015.
- [22] K. Tanaka-Ishii, Y. Inutsuka, and M. Takeichi. Entering Text with a Four-Button Device. COLING ’02, p. 1–7. Association for Computational Linguistics, 2002.
- [23] D. P. Wallach, S. Fackert, and V. Albach. Predictive Prototyping for Real-World Applications: A Model-Based Evaluation Approach Based on the ACT-R Cognitive Architecture. DIS ’19, p. 1495–1502. ACM, 2019.
- [24] S. Zhai, M. Hunter, and B. A. Smith. The Metropolis Keyboard - an Exploration of Quantitative Techniques for Virtual Keyboard Design. UIST ’00, p. 119–128. ACM, 2000.
- [25] 松井 孝太, 金森 研太, 豊浦 和明, 竹内 一郎. ベイズ最適化の基礎と材料工学への応用. まてりあ, 58(1):12–16, 2019.

JoyFlick: フリック入力に基づくゲームパッド向けかな文字入力手法

横山 海青^{*} 高倉 礼[†] 志築 文太郎[‡]

概要. 本稿では、ハードウェアキーボードが接続されていない家庭用ゲーム機において、ゲームパッドを用いてかな文字を入力する手法である JoyFlick を示す。JoyFlick は、スマートフォンのかな文字入力手法として利用率の高いフリック入力に基づくことにより、ユーザの学習コストを抑えている。9名を参加者とした実験により、JoyFlick が限られた練習量において現在の家庭用ゲーム機に搭載されている手法と同程度の入力速度（36 CPM）に到達すること、またユーザのフリック入力の経験が JoyFlick の習熟に良い影響を与えることが分かった。

1 はじめに

家庭用ゲーム機のユーザは、SNSへの投稿およびゲーム内においてチャットなどのために、日本語の文字入力をを行うことがある。その際、多くのゲーム機では、ハードウェアキーボードを接続して文字入力に用いることができる。しかし、ハードウェアキーボードは机の上の手の届く空間の一部を占有する。さらに、文字入力の前後において、ゲームパッド（本稿においては、2本のスティックと多数のボタンを持ち、ゲームの操作のために設計された、両手把持される機器を指す）とハードウェアキーボードの2つの入力装置を適宜切り替える必要がある。

一方、ゲームパッドのみを用いてかな文字を入力するためのソフトウェアキーボードを使用する方法がある。PlayStation 4（ソニー・インタラクティブエンタテインメント）および Nintendo Switch（任天堂）などの家庭用ゲーム機は、50音表および1つのカーソルを利用したソフトウェアキーボード（以下、50音キーボードと呼ぶ）を提供している。50音キーボードを用いることにより、ユーザはゲームパッドのみを用いてかな文字入力を実現する。しかし、この入力手法を用いた場合、カーソルの現在位置と入力したいかな文字の距離に応じてボタンやスティックを操作する回数が増え、入力に要する時間が増える。

これらの問題を解決する入力手法として、我々は “JoyFlick” を示す。JoyFlickにおいて、入力されるかな文字は2本のスティックの状態により選択される（濁音、半濁音および捨て仮名は変換にて入力される）。1文字を入力するのに必要な操作は2回以下であるため、ユーザは50音キーボードよりも少ない操作数によるかな文字の入力が可能である。また、学習コストを抑えるために、JoyFlickのキーはスマートフォンのフリックキーボードに基づいて配

置されている。フリックキーボードは利用率が高いため [12]、ユーザが使い慣れている入力手法であると考えられる。

本研究では、実験により JoyFlick を用いたかな文字入力の速度、精度および SUS [3] のスコアを既存手法と比較した。またユーザのフリック入力の経験が、JoyFlick を用いた文字入力に与える影響を調査した。本研究の貢献を以下に示す。

- フリック入力に基づくゲームパッド向けのかな文字入力手法である JoyFlick を示した。
- 限られた練習量において現在の家庭用ゲーム機に搭載されている手法と同程度の入力速度（36 CPM）に到達することを実験により示した。
- ユーザのフリック入力の経験が習熟に良い影響を与えることを実験により示した。

2 関連研究

JoyFlick はゲームパッド向けのかな文字入力手法であり、なおかつフリック入力に基づくかな文字入力手法である。本節では、この2つの側面についてそれぞれ関連研究を述べる。

2.1 ゲームパッドなどを用いた文字入力手法

JoyFlick と同じく、左右のスティックにそれぞれ複数の操作を割り当てるにより、ユーザがソフトウェアキーボードに対して行える操作の数を増やすというアプローチを用いて、ゲームパッドを用いた高速な文字入力を可能とする研究がなされている [6, 8]。

PizzaText [8] はゲームパッドを用いたアルファベット入力手法である。ユーザは左スティックを倒して文字のグループを選び、その後右スティックを倒してグループの中から実際に入力する文字を選ぶ。文字のグループはアルファベット順に基づいて決定されており、4文字ずつのグループが7グループ存在

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学情報科学類

† 筑波大学情報理工学位プログラム

‡ 筑波大学システム情報系

する。JoyFlick も片方のスティックで文字のグループを選び、もう片方のスティックでグループ内から入力する文字を選択する。ただし、JoyFlick にて入力できる文字はアルファベットではなくかな文字である。なお、一般に、かな文字は母音と子音の組み合わせにより一意に定まる。この規則の存在によって、かな文字はアルファベットよりも、まず文字のグループを選び、グループ内から実際に入力する文字を選択するという入力方式に適していると考えられる。

IToNe [6] は、ゲームパッドを用いたかな文字入力手法である。ユーザは片方のスティックを倒して子音を選び、もう片方のスティックを倒して母音を選ぶことにより入力する文字を選択する。母音と子音の選択順は任意である。その後、どちらかのスティックを無操作状態に戻すことにより文字が入力される。キー配置は 50 音表に基づいており、左スティック上部には「あ」「か」「さ」「た」「な」、右スティック上部には「は」「ま」「や」「ら」「わ」が左から右にこの順に配置されている。左右のスティックの下部には、どちらも「あ」「い」「う」「え」「お」の 5 つの母音が左から右にこの順に配置されている。したがって、それぞれのスティックのパイメニューには 10 分割された領域が存在する。

IToNe の左右のスティック下部には、どちらも 5 つの母音が並んでいる。JoyFlickにおいてはこの重複をなくすこと、およびスティックの無操作状態・押し込み操作にキーを割り当てることによりパイメニューの分割数を減らし、ひとつひとつの領域の内角をより大きく取った。これによりユーザの操作に要求される精度が下がり、より高速な入力ができるようになっている。

中村らの手法 [11] は、2 つのトラックボールマウスを用いたかな文字入力手法である。ユーザは左手に把持したマウスのトラックボールを用いて子音を選択し、右手に把持したマウスのトラックボールを用いて母音を選択する。一方、JoyFlick は母音および子音の選択にゲームパッドのスティックを用いる。

2.2 フリック入力に基づくかな文字入力手法

JoyFlick と同じく、フリック入力に基づくかな文字入力手法がこれまでに多く提案されている。

井川らの手法 [9]、および Fukatsu らの手法 [5] は、母音選択のみならず子音選択にもフリック操作を用いている。どちらの手法もタッチパネルを持つ端末向けに考案された。一方、JoyFlick はゲームパッド向けに考案されている。

竹永らは、VR 空間におけるフリック入力に基づいた入力手法 [10] を提案している。この手法は片手持ち VR コントローラのために開発されたものである。また福仲らは、VR 空間に於けるフリック入力を用いたインターフェース [13] を提案している。

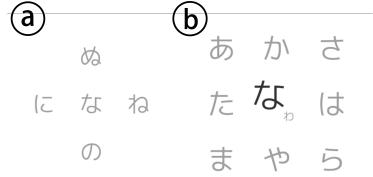


図 1. 左右のスティックが無操作状態にあるときの JoyFlick の画面表示。



図 2. 「ひ」を選択した状態の a) 画面表示、および b) コントローラへの操作順。

この手法はコントローラを使用せず、手指のトラッキングを用いて VR 空間上のキーを操作する。これらの手法に対し、JoyFlick は入力にゲームパッドを使用する。

3 JoyFlick

JoyFlick はフリック入力に基づくゲームパッド向けのかな文字入力手法である。左右のスティックが無操作状態（スティックが押し込まれておらず、かつその傾斜角度が一定の閾値以下である状態）にあるときの JoyFlick の画面表示を図 1 に示す。選択されている母音および子音に対応する文字は拡大され、かつ文字色が灰色から黒色に変わる。（図 2a）。

3.1 文字の入力方法

ユーザはまず子音を選択し、次に母音を選択し、最後にゲームパッドの左スティックを無操作状態に戻して入力を確定する。

3.1.1 子音選択

子音の選択には、ゲームパッドの右スティックを操作する。右スティックが無操作状態にある場合には、子音「な」が選択される。「な」および「わ」を除く 8 つの子音は、それぞれ図 1b の対応する方向に右スティックを倒すことにより選択される。「わ」は右スティックを押し込むことにより選択される。子音の選択状態が変化する毎に、ゲームパッドのバイブレーション機能を用いてユーザへ振動フィードバックが与えられる。

JoyFlick: フリック入力に基づくゲームパッド向けかな文字入力手法



図 3. JoyFlick において使用するボタンおよびスティックの位置 (Nintendo Switch Pro コントローラー). a) 側部, b) 上部.

3.1.2 母音選択

母音の選択には、ゲームパッドの左スティックを操作する。左スティックが無操作状態にある場合には、母音は選択されない。「あ」を除く4つの母音は、それぞれ図1aの対応する方向に左スティックを倒すことにより選択される。「あ」は左スティックを押し込むことにより選択される。母音の選択状態が変化する毎に、ゲームパッドのバイブルレーション機能を用いてユーザへ振動フィードバックが与えられる。ただし左スティックを無操作状態に戻す際、すなわち文字入力の際にはこの振動フィードバックが与えられない。

3.1.3 入力

ユーザは子音および母音を選択した状態(図2b)から、左スティックを無操作状態に戻すことにより、選択した文字を入力できる。

3.1.4 特殊入力

文字入力後、ZLボタンまたはZRボタン(図3a)を押すことにより入力した文字を濁音化、半濁音化、または捨て仮名化できる。ボタンを押すことによる変化は濁音化、半濁音化、捨て仮名化、清音化の順に起こる。該当する文字が存在しない場合、直後の変化が適用される。例えば半濁音のない「つ」の場合は「つ→づ→っ→つ」の順に変化する。

Bボタン(図3b)を押すことにより、最後に入力した文字を消去できる。

3.2 JoyFlick の設計の特徴

JoyFlick の入力は、スマートフォン向けのかな文字入力手法として広く普及しているフリック入力に基づくため、多くのユーザにとって習熟が容易であることが期待される。

また、スティックの無操作状態および押し込み状態にもキーを割り当てることにより、母音および子音の選択に用いるパイメニューの領域数が IToNe よりもさらに少なくなっている。これにより各領域の内角が大きくなり、ユーザはより粗い操作による入力が可能になる。これに伴って高速な入力が期待される。

なお、母音のキー配置は、Gboard [7] の日本語フリックキーボードの実装に倣った。子音のキー配置も同様に可能な限り Gboard の日本語フリックキーボードの実装に倣った。ただし、子音「わ」の表示位置はフリック入力と異なる。

4 実験

JoyFlick と既存手法の文字入力の速度 (CPM: Characters Per Minute), トータルエラー率 [1], および SUS [3] のスコアを測定した。

比較対象として選んだ既存手法は、IToNe および 50 音キーボードである。ユーザが 2 つのスティックを動かすことにより入力する文字を選択する点、ならびにゲームパッドのみを用いてかな文字入力を行う点が JoyFlick と共に通するため、IToNe を比較対象とした。また、JoyFlick の使用が想定される環境において広く用いられているかな文字入力手法であるため、50 音キーボードを比較対象とした。

4.1 実験参加者

著者らと同じ研究室に所属する、21歳以上27歳以下 ($M=23$ 歳, $SD=1.8$ 歳) の大学生および大学院生9名を参加者とした。すべての参加者は右利きかつ男性であった。スマートフォンのフリック入力の使用頻度について、参加者のうち5名は「日常的に使用する」、1名は「ときおり使用する」、1名は「まれに使用する」、2名は「まったく使用したことがない」と回答した(以降、前者5名を熟練者、それ以外の4名を非熟練者)。JoyFlick および IToNe を用いた文字入力経験のある参加者はいなかった。

4.2 実験に用いた装置・ソフトウェア

実験に用いたゲームパッドは、Nintendo Switch Pro コントローラー(図3)である。また、JoyFlick を含む実験用のアプリケーションを、Rust を用いて MacBook Pro (macOS 10.15.6) 上にて実装した。実験用のアプリケーションが表示する画面の例を図4に示す。

4.3 実験内容

実験参加者はまず、年齢、性別、利き手、スマートフォンのフリック入力の使用頻度についてのアンケートに回答した。

実験中に行われたセッションの内容は、以下の通りであった。まず、実験参加者は 28 文の短文からな

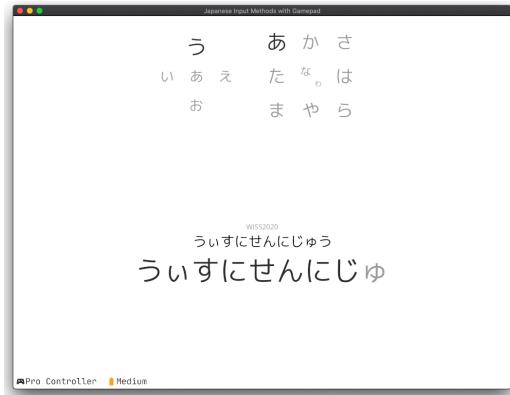


図 4. 実験用のアプリケーションが表示する画面の例.

る合計 289 文字の練習文を入力する練習を行った。習熟の様子を評価するため、参加者は練習中の入力速度を測定された。練習文の入力が終わったのち、参加者は 24 文の短文からなる合計 167 文字の課題文を入力した。練習文および課題文には、50 音、濁音、半濁音、捨て仮名および長音記号からなる、意味のある短文を用いた。参加者には高速かつ正確に入力するよう依頼した。その後、実験参加者はセッションにおいて使用した入力手法に対する SUS および自由記述からなるアンケートに回答した。

参加者はセッションを入力手法ごとに 1 回ずつ、合計 3 回行った。すべてのセッションは参加者が椅子に座った状態において行われた。各セッションの間に、参加者は 5 分以上の休憩を行った。実験に要した時間は 90 分以下であった。

セッションの実行順はラテン方格法を用いて参加者ごとに決定された。練習文および課題文はいずれの手法および参加者においてもそれぞれ共通のセットが用いられた。ただし、出題順はセッションごとにランダムである。

4.4 実験結果

実験により明らかになったそれぞれの手法の入力速度、トータルエラー率、SUS のスコア、および習熟の様子を示し、またそれらの分析結果を述べる。統計解析のため、それぞれの評価指標に対して入力手法およびフリック入力の使用頻度を独立変数とした二元配置分散分析を行ったのち、Tukey の多重比較法を用いて事後検定を行った。2 群検定には t 検定を用いた。また、有意水準は 0.05 とした。なお、課題文に対する入力のみを検定の対象とした。

4.4.1 入力速度

各入力手法の入力速度の平均はそれぞれ、JoyFlick が 36 CPM (SD=9.0 CPM), 50 音キーボードが 34 CPM (SD=9.9 CPM), IToNe が 23 CPM (SD=5.7 CPM) であった。

統計解析の結果、JoyFlick と IToNe ($p=1.4 \times 10^{-2}$) および IToNe と 50 音キーボード ($p=4.8 \times 10^{-2}$) 間に有意差が示された。JoyFlick と 50 音キーボード間に有意差は示されなかった。

フリック入力の熟練者と非熟練者の間には、JoyFlick の入力速度に有意差が存在することが t 検定により示された ($p=1.9 \times 10^{-2}$)。それぞれの参加者の JoyFlick の平均入力速度は、熟練者が 42 CPM (SD=8.0 CPM), 非熟練者が 29 CPM (SD=2.3 CPM) であった。

4.4.2 トータルエラー率

各入力手法のトータルエラー率の平均はそれぞれ、JoyFlick が 6.9 % (SD=3.1 %), 50 音キーボードが 4.0 % (SD=2.9 %), IToNe が 11 % (SD=4.3 %) であった。

統計解析の結果、IToNe と 50 音キーボード ($p=3.7 \times 10^{-3}$) 間に有意差が示された。JoyFlick と 50 音キーボードおよび JoyFlick と IToNe 間に有意差は示されなかった。

また、t 検定の結果、フリック入力の熟練者と非熟練者の間には、JoyFlick のトータルエラー率に有意差は示されなかった。

4.4.3 SUS のスコア

各入力手法の SUS のスコアの平均は、JoyFlick が 48 (SD=8.8), 50 音キーボードが 60 (SD=7.8), IToNe が 36 (SD=10) であった。

統計解析の結果、JoyFlick と IToNe ($p=4.3 \times 10^{-3}$), IToNe と 50 音キーボード ($p=5.0 \times 10^{-6}$), JoyFlick と 50 音キーボード ($p=5.6 \times 10^{-3}$) 間に有意差が示された。

また、t 検定の結果、フリック入力の熟練者と非熟練者の間には、JoyFlick の SUS のスコアに有意差は示されなかった。

4.4.4 習熟

練習中および測定中の、手法ごとの平均入力速度の変遷および近似曲線を図 5 に示す。また、練習中および測定中の、フリック入力の熟練者と非熟練者の JoyFlick の入力速度の変遷および近似曲線を図 6 に示す。

4.5 考察

本節では、実験により明らかになったそれぞれの手法の入力速度、トータルエラー率、SUS のスコア、および習熟の様子を考察する。

4.5.1 入力速度

平均入力速度および図 5 より、限られた練習量においても、JoyFlick を用いた入力は 50 音キーボードを用いた入力と同程度の入力速度に達すると言え

JoyFlick: フリック入力に基づくゲームパッド向けかな文字入力手法

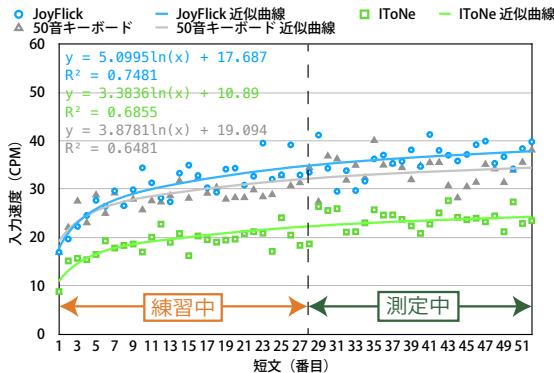


図 5. 練習中および測定中の、手法ごとの平均入力速度の変遷および近似曲線。

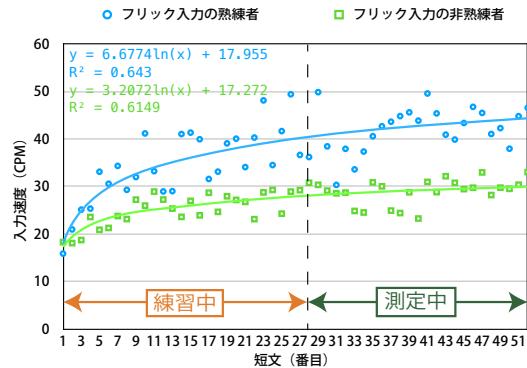


図 6. 練習中および測定中の、JoyFlick の平均入力速度の変遷および近似曲線。

る。また、入力速度に対して JoyFlick と IToNe 間に有意差が認められたことおよび平均入力速度より、限られた練習量においては JoyFlick の方が IToNe よりも高速に入力ができると言える。

さらに、JoyFlick を用いた入力の速度に対して、フリック入力の熟練者と非熟練者の間に有意差が示されたこと、および両者の平均入力速度から、フリック入力の経験が JoyFlick の入力速度に良い影響を与えることがわかる。このことは、JoyFlick のフリック入力に基づくキー配置が、設計において意図されたように学習コストの軽減に寄与したことを示唆している。

4.5.2 トータルエラー率

トータルエラー率に対して JoyFlick と 50 音キーボード間に有意差が認められなかったことから、限られた練習量においても、JoyFlick は 50 音キーボードと同程度に正確な入力ができると言える。

4.5.3 習熟

フリック入力の熟練者は、非熟練者に比べて JoyFlick の習熟が早いと考えられる（図 6）。

4.5.4 使用感

Bangor らの letter grade scale [2]において、JoyFlick および IToNe の SUS のスコアは最低評価の F である。すなわち、ユーザは JoyFlick および IToNe を使いづらい、あるいは覚えづらいと評価していることが示された。

また、参加者全員が、JoyFlick のスティックを押し込む操作を不便だと報告した。さらに、スティックを押し込む際に誤ってスティックを倒した、子音「わ」および子音「な」と他の子音との操作の違いに違和感を覚えたという意見があった。これらは、スティックの押し込み操作が JoyFlick の使いづらさの原因の 1 つであることを示唆している。

5 議論と今後の展望

本節では、JoyFlick のさらなる改善、発展、および活用方法を述べる。

5.1 母音および子音の入力順

JoyFlick における母音および子音の入力順は子音、母音の順である。これは、JoyFlick がスマートフォンのフリック入力に基づいているためである。しかし、ユーザが JoyFlick を用いたかな文字入力に習熟するに従って、母音選択と子音選択の間隔が短くなり、2つの選択がほぼ同時に、あるいは逆の順に行われることが予想される。しかし、現在の JoyFlick においてユーザがこれらの入力を行った場合、意図した通りの文字入力をを行うことができない。そのため、母音および子音の入力順を限定しないという改良を検討している。この改良により、母音および子音の入力順に起因する誤入力が減り、削除と再入力の回数が減ることにより、エラー率、入力速度およびユーザビリティが改善する可能性がある。

5.2 パイメニューの領域の最適化

ゲームパッドのスティックを倒す操作について、0 度、90 度、180 度、および 270 度の方向への操作は 45 度、135 度、225 度、および 315 度の方向への操作に比べて精度が高いという調査結果がある [4]。スティックを倒すよう指示された方向と、実際にスティックが倒された方向およびスティックを倒すのに要した時間の関係を調べることにより、JoyFlick のパイメニューの領域の内角および方向を最適化できる可能性がある。

5.3 スティックの押し込み操作の影響および改善案の検討

参加者全員がスティックを押し込む操作の不便さを指摘していた。このことは入力誤り率にも現れていた。実験において、入力すべき文字を誤って入力する率は 7.7% であるのに対して、入力にスティック

クの押し込み操作が必要な、あ列の文字およびわ行の文字の場合、その率はいずれも 12 % だった。これらは、スティックの押し込み操作が参加者の誤入力の原因の 1 つであることを示唆している。

また、参加者の 1 人が、押し込みの際に意図せずスティックを倒してしまい、「わ」ではない子音が選択されたことがあったと報告した。この現象は、無操作状態の判定に用いる傾斜角度の閾値を調整することにより改善できると考えられる。したがって、さらに多くの参加者から入力例を集め、最適な閾値を調査する必要がある。

5.4 JoyFlick の利点および活用

JoyFlick はカーソルを用いない入力手法であるため、習熟したユーザは図 1 のような画面表示を見ずにかな文字入力を行える可能性がある。この場合、かな文字入力のための画面表示を省略できるため、入力した文字列および予測変換を表示する領域を除く、画面の殆どの領域を文字入力以外の用途に用いることが可能となる。余った領域の活用法としては、例えばオンラインゲームにおいて自他のキャラクタおよびフィールドを表示するなどが考えられる。

若年層の人々の多くは PC の QWERTY キーボードを用いた文字入力に不慣れであることが指摘されている [12]。一方、大学生の 90 % がスマートフォンのかな文字入力手法としてフリック入力を用いており、フリック入力に基づいて開発された JoyFlick はそのような人々にとって有力な文字入力手法の選択肢になりうると考えられる。

また、VR 向けのコントローラには 2 本のスティックを有するものがあるため、VR 環境においても JoyFlick を利用できると考えられる。

6まとめ

本稿では、ハードウェアキーボードの接続されていない家庭用ゲーム機において、ゲームパッドを用いてかな文字を入力する手法である JoyFlick を示した。また、9 名を参加者とした実験により、JoyFlick が限られた練習量において 50 音キーボード手法と概ね同じ入力速度 (36 CPM) に到達することを示し、またユーザのフリック入力の経験が JoyFlick の習熟に良い影響を与えることを示した。今後は 5 節に述べた議論および展望をもとに、JoyFlick の改善および発展を図る。

参考文献

- [1] A. S. Arif and W. Stürzlinger. Analysis of Text Entry Performance Metrics. In *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity*, TIC-STH '09, pp. 100–105, 2009.
- [2] A. Bangor, P. Kortum, and J. Miller. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3):114–123, 2009.
- [3] J. Brooke. SUS: A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [4] K. Fris. Touch Typing on a Gamepad. <https://darkshadow.io/2020/07/07/touch-typing-on-a-gamepad.html>. 最終確認日：2020 年 9 月 30 日.
- [5] Y. Fukatsu, B. Shizuki, and J. Tanaka. No-look Flick: Single-Handed and Eyes-Free Japanese Text Input System on Touch Screens of Mobile Devices. In *the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MoblieHCI '13, pp. 161–170, 2013.
- [6] K. Go, H. Konishi, and Y. Matsuura. IToNe: A Japanese Text Input Method for a Dual Joystick Game Controller. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '08, pp. 3141–3146, 2008.
- [7] Google, LLC. Gboard - Google キーボード - Google Play のアプリ. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.inputmethod.latin&hl=ja>. 最終確認日：2020 年 9 月 30 日.
- [8] D. Yu, K. Fan, H. Zhang, D. Monteiro, W. Xu, and H. Liang. PizzaText: Text Entry for Virtual Reality Systems Using Dual Thumsticks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(11):2927–2935, 2018.
- [9] 井川洋平, 宮下芳明. アイズフリーで速記できる「方向のみ」のフリック入力手法. インタラクション 2013, pp. 651–656, 2013.
- [10] 竹永正輝, 橋本直. 片手持ち VR コントローラのための日本語入力 UI の提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, pp. 12–16, 2019.
- [11] 中村聰史, 塚本昌彦, 西尾章治郎. ウェアラブルコンピューティングのためのダブルマウスを用いた文字入力方式. 情報処理学会研究報告 (1999-HI-86), pp. 63–68, 1999.
- [12] 長澤直子. 大学生のスマートフォンと PC での文字入力方法—若者が PC よりもスマートフォンを好んで使用する理由の一考察—. コンピュータ & エデュケーション, pp. 67–72, 2017.
- [13] 福仲伊織, 謝浩然, 宮田一乗. VR 環境におけるフリック入力形式インターフェースの開発. 情報処理学会研究報告 (2019-HCI-182), pp. 1–8, 2019.

画面に映っている食品の味を再現して味わえる味ディスプレイの開発

宮下 芳明*

概要. 本稿では、画面に映っている食品の味を再現して味わえる「視聴覚+味覚の提示装置」という意味として味ディスプレイを再定義し、視聴覚+味覚コンテンツを記録・編集・再生する仕組み全体を整理・考察した。さらにウェアラブル型やタッチパネル一体型も新規に試作した。

1 視聴覚+味覚コンテンツのための「味ディスプレイ」再定義

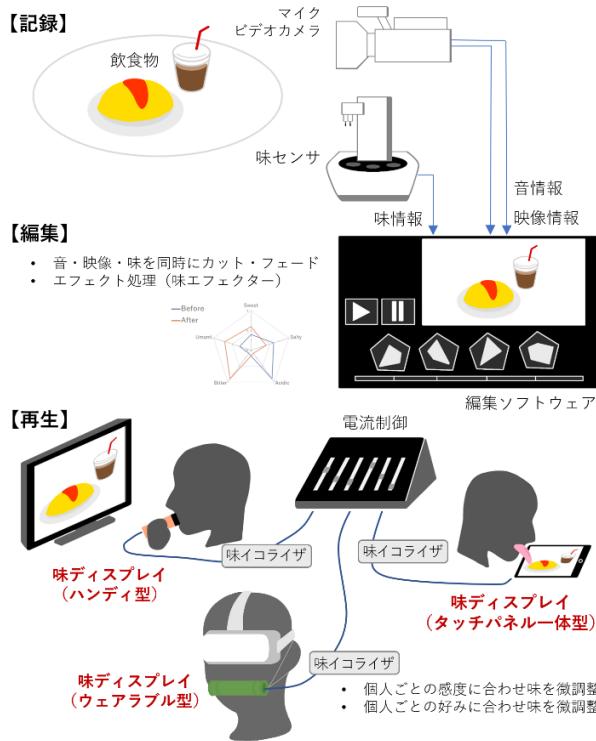


図1. 視聴覚+味覚コンテンツの制作フロー

著者は[4]で基本五味の組み合わせとして任意の味を提示可能なデバイスを提案し、[9]ではこれを味センサと連携させ、実際の飲食物の味を測定・再現する仕組みを提案した。これらの研究で「味ディスプレイ」という用語は、「味を提示するデバイス」を意味していた。鳴海らの「擬似味覚ディスプレイ」

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

という用語もあり[8]、筆者らによる風覚インターフェースの論文[11]においても、風覚情報を取得・提示するデバイスを「風覚カメラ・風覚ディスプレイ」と呼称して問題はなかった。しかし、[4][9]の発表や報道に基づく反響の中では、ディスプレイという言葉にひきずられ、視覚的な情報提示と併用して味情報を呈示するデバイスだと理解する人も多かった。本稿では、画面に映っている食品の味を再現して味わえる「視聴覚+味覚の提示装置」という意味として味ディスプレイを再定義し、視聴覚+味覚コンテンツを記録・編集・再生する仕組み全体を整理・考察している。さらに[4][9]にはなかったウェアラブル型やタッチパネル一体型の味ディスプレイも本稿で新規に試作した。

図1に示すのは、本稿で提案する視聴覚+味覚コンテンツの制作フローである。飲食物を視聴覚だけでなく味覚も記録し（ビデオカメラと味センサを用いる）、同時に編集したり、エフェクトをかけたりする。それを、テレビを見ながら手に持った提示デバイスから味を得たり、HMDを見ながらウェアラブルな提示デバイスから味を享受したり、あるいはタブレットを直接舐めることによって味を感じることができる。

2 原理

本研究は電気刺激や電気味覚の研究ではない。食塩水などの水溶液に陰極の電気をかけると味の感じ方が抑制されることを古くから知られており、龜井[10]、Hettinger[1]らが詳細を調査、中村ら[2]が応用している。この現象は、溶質が電解質の場合、味の種類にかかわらず起こり、逆に溶質が非電解質の場合には全く起こらない[3]。つまり舌への電気刺激、いわゆる電気味覚は関係なく、水溶液内での物理的なイオン濃度変化が原因である。溶液に電極を入れて電気を流せば、陽イオンは陰極の方に引き寄せられるため、陽極の周りからは当然、陽イオンが減る。ストローに陰極を、体に陽極をつけて溶液を口内に

含んだとき、舌はまさにこの陽極と同じ状態になる。舌は自らの周辺の陽イオンが減ることを感知するため「味が薄くなる」わけである。本現象は、基本五味を感じさせる5種の電解質すべてで起こることが知られており、電流を強くするほど味の抑制効果が大きくなり、その様は線形に表せることが、青山らによる実験で確認されている[3]

著者は「任意の味を表現する味提示装置の開発」を目的として、この現象および実験結果に着目した。まず実践してみたのは、記載されていた5種類の電解質水溶液(塩化ナトリウム1%, クエン酸0.5%, 塩化マグネシウム0.5%, グルタミン酸ナトリウム0.5%, グリシン5%。濃度は[3]と同一)をストローに入れ寒天で固めることであった。食塩とゼラチンによる実験はすでに例があるが[10]、電気をかけてみると、やはり電流の強さとともに味が抑制された。ゲル同士はストローで絶縁されているので、束ねても混ざり合うことはなく、個別に電気をかけることによって個別にその味の強さを変えられた。さらにストローを隣接させて舌に当てたとき、それらの味は混ざって感じられた。

以上のことから、イオン泳動の原理を応用した、ハンディ型の味提示装置 Norimaki Synthesizer を試作した[4]。デバイス表面の電極を手で握り、先端のゲルに舌を触ることで回路が形成される仕組みになっている。5種のゲルを束ね、外側に銅箔テープを巻いて陽極とする。それぞれのゲルには、溶解を防ぐために白金電極を刺し、電源装置につなぎ、各電流量を調整できるようにした。すると、通電せずにそのまま舌に当てた場合は5つの味が同時に感じられるが、電流をかけていくことで、該当するゲルの味を個別に弱めることができ、基本五味の比率を任意に調整することができた。

Norimaki Synthesizer で電流を増減させると、舌はこれを刺激として感知してしまう。イオン濃度の増減で味を表現する手法からすると、この刺激は邪魔であるし、特に、本原理では弱い味を表現するために強い電流を用いるので、知覚としての混乱を生みかねない。そこで、あえてもうひとつ、何も味がついてない「無味ゲル」を追加した[9]。このゲルには、「他の5本のゲルに流れる電流の合計を、0.5mAから引いた電流」を流す。つまり、6本のゲルに流れる電流の総和を常に一定(0.5mA)に保つことで、基本五味の変化に集中できるようにした。無味でありつつ導電性が必要なので、ほぼ無味の電解質としてフェニルアラニンをわずかに加えている。刺激が消えるとまではならないものの、従来は電流が流れていらない状態から流れている状態に移行する際の強い刺激があったのを、多少緩和しているように感じられる。緩和効果については未評価である。

また、無味ゲルに関する調整も含め、細やかな電流制御をコンピュータから行えるシステムを開発した。デジタルミキサーのムービングフェーダで可変抵抗を動かして各ゲルへの電流を MIDI 制御している。また、タッチパネルで動作するアプリケーションも制作し、五角形のレーダーチャートをタッチ入力でドラッグする UI を実装した。

3 味センサとの連携

[9]で実施・発表した味センサとの連携について説明する。近年、味センサが実用化され、飲食品の味覚評価のための測定器として普及し始めている。都甲らが開発した脂質膜型味センサ[5]は、人間の舌を模した複数の脂質/高分子膜を用い、その応答電位出力から基本五味に対応する味質を数値化している。

「広域選択性(global selectivity)」が大きな特徴で、異なる物質であっても、人にとって同じ味として感じられるものに対して同じ反応を示す[5]。筆者は、5種の電解質が味センサでそれぞれどのような味強度として測定されるかを調べた。甘味については、耐久性と多様な糖・人工甘味料評価に定評があるAlphaMOS社のASTREEを、他の味では都甲らによる味センサ TS-5000Z を用いた。

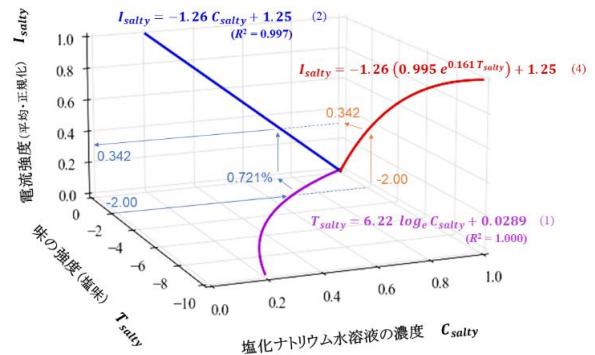


図2. 味センサにおける塩化ナトリウム水溶液濃度と、塩味の強度、味提示装置が出すべき電流強度（正規化済）の関係

図2の紫線は、0.2%から1.0%の塩化ナトリウム水溶液における「塩味の強さ」を味センサで測ったものである。横軸が実際の濃度 C_{salty} (%), 縦軸が塩味の強さ T_{salty} である。味センサは、測定時に比較対象となる液体が必要で、いわば原点になり、それより味が濃いものが正の値、味の薄いものが負の値となる。この計測においては1.0%塩化ナトリウム水溶液を比較対象としている。グラフをみると、薄くなるほど数値が下がり、その関係性は対数的で、感覚量と刺激量の関係であるウェーバー・フェヒナーの法則が現れている。これを対数で近似する。式(1)は、

画面に映っている食品の味を再現して味わえる味ディスプレイの開発

濃度 C_{salty} の塩化ナトリウム水溶液において味センサで測定される塩味 T_{salty} を表す式である。

$$T_{salty} = 6.22 \log_e C_{salty} + 0.0289 \quad (R^2 = 1.000) \quad (1)$$

図2の青線は、青山らによる実験[3]の結果である。この実験では1.0%の塩化ナトリウム水溶液にどれだけの電流をかければ0.8%, 0.6%, 0.4%, 0.2%の塩化ナトリウム水溶液と同じ濃さに感じるか、ということを被験者に調整させている。濃度 C_{salty} (%), 電流の強さ I_{salty} の関係は線形近似でき、 C_{salty} の濃度と同等の塩味を表現するために必要な電流の強さ I_{salty} を表す式(2)が得られる。

$$I_{salty} = -1.26 C_{salty} + 1.25 \quad (R^2 = 0.997) \quad (2)$$

味センサの大きな特徴は広域選択性である。有機物だろうが混合物だろうが代替調味料だろうが、物質として異なっていても同じ味であれば同じ数値が測定されると期待できる。仮に、成分未知のスープを味センサで測定したときに、塩味の強さが $T_{salty} = -2.00$ だったとしよう。この塩味が「塩化ナトリウム水溶液換算で何%に相当するか」は、式(1)の逆関数となる指数関数(3)で求まる。

$$C_{salty} = 0.995 e^{0.161 T_{salty}} \quad (3)$$

式(3)の T_{salty} に-2.00を代入すると $C_{salty} = 0.721\%$ 塩化ナトリウム水溶液に相当する強さの塩味であることがわかる(水色矢印)。この塩味を再現することを考える。1.0% 塩化ナトリウム水溶液(ゲル)にどれくらいの電流をかけば0.721% 塩化ナトリウム水溶液に相当する塩味が出せるかというと、これは式(2)を用いて推定できる。式(2)の C_{salty} に0.721を代入すると、求める電流の強さ $I_{salty} = 0.342$ であることがわかる。すなわち、味センサで測定された塩味の強さ T_{salty} を味提示装置で再現するために必要な電流の強さ I_{salty} は、式(1)の逆関数である式(3)に式(2)を代入して、以下のように表せる。

$$I_{salty} = -1.26 (0.995 e^{0.161 T_{salty}}) + 1.25 \quad (4)$$

このように 基本五味を提示する電解質水溶液の濃度を変えながら、その味の強さを測定すれば、味の強さと電解質水溶液の濃度の関係式が得られ、味センサと味提示装置の入出力を対応させられる。式(5)～(8)はそれぞれ酸味・苦味・旨味・甘味において同様の測定(図3, 4)と導出で得られた式である。

$$I_{acidic} = -2.40 (0.498 e^{0.161 T_{acidic}}) + 1.23 \quad (5)$$

$$I_{bitter} = -2.29 (0.579 e^{0.170 T_{bitter}}) + 1.21 \quad (6)$$

$$I_{umami} = -2.29 (0.445 e^{0.156 T_{umami}}) + 1.18 \quad (7)$$

$$I_{sweet} = -0.244 (5.58 e^{0.162 T_{sweet}}) + 1.33 \quad (8)$$

(4)～(8)の式を用いれば、味センサで記録された基本五味の強さ(各 T)を再現するための電流の強さ(各 I)が得られる。味提示装置の電源制御ソフトウェアはこの数式に基づいた制御を行っている。(正確にはオームの法則に基づいて可変抵抗の値を算出しているがここでは割愛する)。

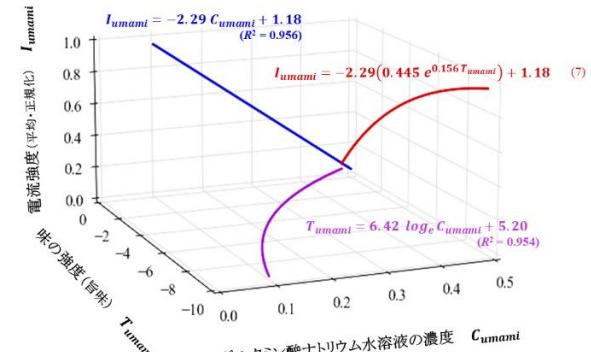
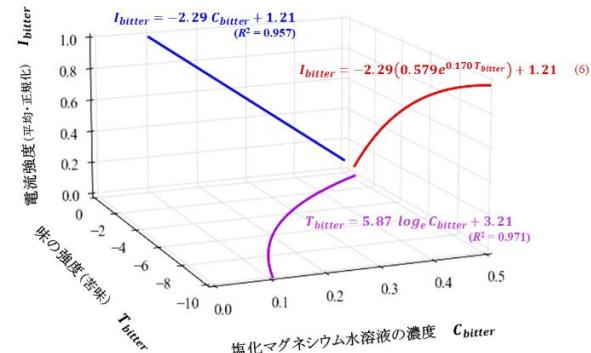
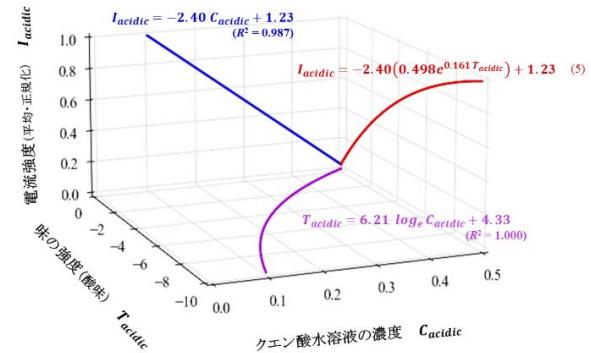


図3. 味センサにおけるクエン酸・塩化マグネシウム・グルタミン酸ナトリウム水溶液濃度と酸味・苦味・旨味の強度、および味提示装置が出すべき電流強度(正規化済)の関係

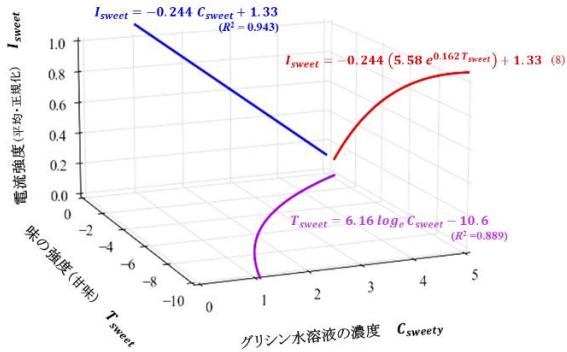


図4. 味センサにおけるグリシン水溶液濃度と甘味の強度、および味提示装置がすべき電流強度（正規化済）の関係

4 味も編集可能な動画編集ソフト

[9]では視聴覚+味覚コンテンツが編集できるソフトウェアを開発した。複数の動画ファイルを読み込み、その動画に対応する基本五味の分布をタッチペンで入力、映像に沿って味を変化させることができ。味と味の変化はクロスフェードを行っており、フェードイン・フェードアウトも行える。



図5. 味も編集可能な動画編集ソフト。味の時系列的な変化をコンテンツとして記録・編集・再生できる。

コンテンツの例として、紅茶を淹れ、レモンを入れる動画をこのソフトで編集した（図5）。まずは、無糖の紅茶、レモン果汁5%の水溶液、レモン果汁5%のレモンティーを用意し、前章と同様な手法（比較対象は5種類の電解質を溶かした溶液）によって味センサで測定した。無糖と比べると、レモンティーは苦味が薄れ、酸味が強まっていた。味提示装置の再現域を超えていたところは最大値・最小値で表現することとして、実際の映像編集に利用した。するとたしかに、レモンを入れると酸味が増す過程が体験できた。また、味センサから取得されたデータではなくなるが、甘味の要素を増強することによって、無糖ではなく加糖の紅茶を表現するなど、調整やアレンジの可能性があることが確

認された。レモン水の計測データは、厳密に無糖紅茶とレモンティーの差になっていないが、他の食品にレモンを加えたときの「レイヤー」として利用価値があると考えており、今後はマルチレイヤー化を検討している。

5 味エフェクタ・イコライザの開発

[9]では、5つの味強度に特殊な効果を施す「味エフェクタ」を複数開発した。まず、基本五味のうち最も強い味のチャンネルが、味提示装置で表現可能な最大値にまで持ち上がる「ノーマライズ」エフェクトを作成した。これによって、味提示装置の表現力を最大限活かすことができる。また、基本五味の全ての値を平均してしまう「平均エフェクト」、それに次第に近づけたり離したりする「ブラー」エフェクト」「シャープ」エフェクト、チャンネルの置換、およびネガ反転エフェクトを用意した。たとえば、加糖のレモンティーは、苦味・酸味・甘味を伴う味だが、これにネガ反転エフェクトを加えると、塩味と旨味が混じったスープのような味になる。

味コンテンツを鑑賞する際の調整機構として「味のイコライザ」も開発した。酸味に敏感で苦手な人向けに酸味の出力を抑えたり、濃い塩味が好きな人向けに塩味の出力をブーストさせたりすることによって、各個人に合った味の楽しみ方ができるようになる。味覚の感度が落ちたり、味の違いが区別しにくくなったりしている人に対しては、味センサで計測された実際の値よりも出力値を強めたり、味の違いを際立たせたりすることによって、味における「メガネ」や「補聴器」のようなものにできるのではないかと考えている。

6 タッチパネル一体型・ウェアラブル型の味ディスプレイの試作

図6は本稿で試作した、新たな形態の味ディスプレイである。3mm厚の三角形ゲルが6つ（基本五味+無味）、液晶ディスプレイ上に載っており細い白金線（陰極）が刺してある。陽極部はタッチパネルの周りに導電性の枠を設けて持たせるなど工夫の余地があるが、今は電源装置からねばした陽極の線を手に持ち、6つのゲルが集中している箇所に舌を当てて使う。本稿で提案する3つの味ディスプレイのうち、このタッチパネル一体型のみ、ゲルの透明度が問題になってくるはずだが、幸いにも画面ON時に視認性をあまり損っていない。

本稿で提案している味ディスプレイは全て同一原理であり、舌を当て続けた状態で任意の味の組み合わせを再現したり変化させたりすることができるが、舌を当てるべき場所は一箇所に固定である。しかし、

画面に映っている食品の味を再現して味わえる味ディスプレイの開発

このタッチパネル一体型のデザインについては、画面の様々な場所に舌を当てたくなってしまう。もしさういったインターフェースも許容するよう改良するのであれば、2次元平面上の異なる場所で異なる味が楽しめる構造を検討する必要がてくる。その場合は、最終的には「画素」と同様に「味素」が2次元平面上に一様に分散していることが理想であろう。こう考えた場合は、ゲルの小型化が必要であるため、アルギン酸ナトリウムやシトラスペクチンによる人工イクラの手法を用いて試作を始めている（図6下）。現在は安定して固めることも難しく、調査とノウハウ蓄積を行っている。

なお現状では、静電容量式タッチパネルのタッチ入力は全くうまく動作しない。ゲルを載せるとき、舌をあてるとき、そして通電するときに様々なタッチ入力が発生してしまうからである。舌はひとつしかないとするならばマルチタッチにこだわる必要もないのに、今後は感圧式のタッチパネルなどを利用したいと考えている。

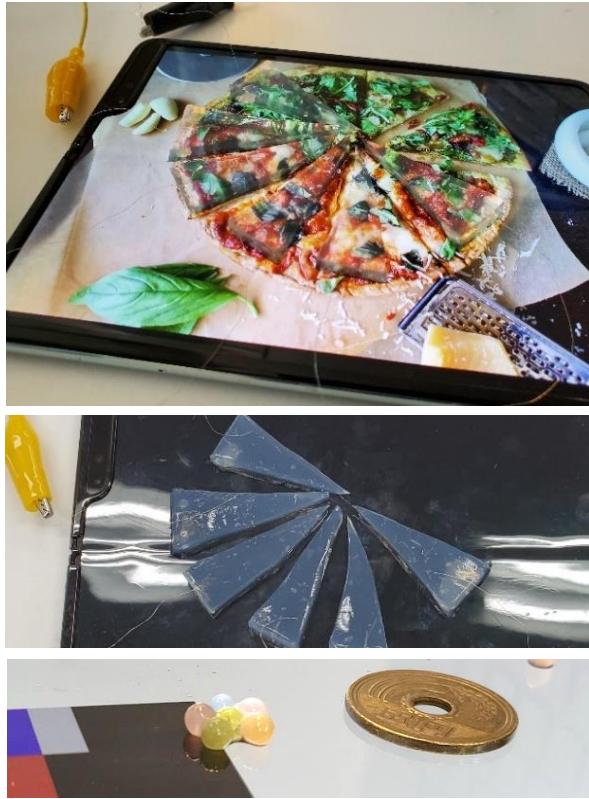


図6. タッチパネル一体型の味ディスプレイ（上：画面ON
中：画面OFF 下：人工イクラの手法での試作）

さらに、味ディスプレイ形状については、ハンズフリーで用いることができるウェアラブル型も開発中であり、AR・VRコンテンツに向いた利用ができると考えている。図7のように、漫画『鬼滅の刃』の竈門禰豆子の口枷のような形状をしている。陽極

は、頸部に貼り付ける方法をとっており、電極には首専用低周波治療器 Panasonic EW-NA12 のものを流用して使っている。



図7. ウェアラブル型の味ディスプレイ

7 制約と展望

コロナ禍のため大規模な評価実験は投稿時点では未実施である。5%に薄めた特徴的な3種類の醤油の弁別を行ってみたところ、明確に区別することができ、それがどの醤油を指しているのかを当てることはできた（この予備実験については[9]に記載されている）。ある程度の有用性があり、それを実証するめどは立っているといえる。

WISSのワークショップとしての側面を考え、プロトタイプを作成した現時点でいくつかの制約や展望がわかっているため報告する。

まず、味の再現域についてである。原理上、味提示装置はゲルの味の濃さが最大値となる。先行研究[3]の実験結果を用いるために同一の濃度に設定しているので、塩味だと1%の塩化ナトリウム水溶液が最大になる。たとえば味噌汁の味を表現する場合、2%程度ぐらいまでは出せるようになりたい。このためには[3]と同様な実験を実施しなくてはならず、そのときに同じく線形近似ができるかも未知である。むしろ今の濃度のままで、陰極刺激停止の際の味覚増強効果[2]や連続矩形波刺激[6]を活用する方向性も考えられるかもしれない。

味提示装置におけるゲル間の距離については予備調査の段階では十分に味が混ざって感じられるものであり、[7]の知見とも符合するが、もっと近づけることによってさらに混ざった知覚として感じられるかもしれない。検証ていきたい。

電流制御装置については、著者の実装能力の都合によりムービングフェーダで可変抵抗を動かすという力技で作られている。しかしづれてくることがあったり、故障したりすることも多い。将来はデジタル

ルポテンショメータを用いた精密な制御に発展させたい。

鳴海らの「味覚ディスプレイ」は、味覚を直接変えるアプローチが困難である前提に立ち、味覚を制御しない代わりに視覚のみならず嗅覚を同時提示することによって味の感じ方を変えるものである[8]。実際に味覚を変えることができる本稿とも共存可能で、よりリアリティを倍加させると考えている。

現状入手できる味センサはどれも高価、巨大、なうえ、使用にもノウハウが必要で万能ではない、という状況である。味提示装置と味センサは、メディアとしてみたとき、テレビとカメラの関係のようなものなので、入手しやすく可搬性があり扱いやすくなることで、味コンテンツの世界は大きく広がるはずなので、その発展にも大いに期待している。

参考文献

- [1] Thomas P. Hettinger and Marion E. Frank. Salt taste inhibition by cathodal current, *Brain Research Bulletin*, 80(3), 107–115, 2009.
- [2] Hiromi Nakamura and Homei Miyashita. Controlling saltiness without salt: Evaluation of taste change by applying and releasing cathodal current. In *Proceedings of the 5th international workshop on Multimedia for cooking & eating activities*, 101–105, 2013.
- [3] Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, Hideyuki Ando. Galvanic Tongue Stimulation Inhibits Five Basic Tastes Induced by Aqueous Electrolyte Solution. *Frontiers in Psychology*. 8:2112, 2017.
- [4] Homei Miyashita. Norimaki Synthesizer: Taste Display Using Ion Electrophoresis in Five Gels, Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts (CHI'20), pp.1-6, 2020.
- [5] Kiyoshi Toko. Taste sensor with global selectivity, Materials Science and Engineering: C, 4(2), 69-82, 1996.
- [6] Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Akinobu Morishima, Taro Maeda, and Hideyuki Ando. Taste controller: galvanic chin stimulation enhances, inhibits, and creates tastes. In ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (SIGGRAPH '18), 18:1–2, 2018.
- [7] Juyun Lim, Barry G. Green. Tactile Interaction with Taste Localization: Influence of Gustatory Quality and Intensity, *Chemical Senses*, 33(2), 137–143, 2008.
- [8] 鳴海拓志, 牧野祐也, 梶波崇, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 模似味覚ディスプレイのための視覚・嗅覚・味覚間相互作用の評価. 電気学会研究会資料. CHS, ケミカルセンサ研究会, 1, 77-82, 2011.
- [9] Homei Miyashita. Taste Display that Reproduces Tastes Measured by a Taste Sensor, Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'20), 1085–1093, 2020.
- [10] 龜井俊夫. 味覚ニ關スル實驗的研究(第2報)電氣味覺ニ關スル研究, 岡山醫學會 48(2), 339-34, 1936.
- [11] 宮下芳明, 小坂崇之, 服部進実. 没入型三次元風覚ディスプレイのためのコンテンツ開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12(3), pp.315-321, 2007.

未来ビジョン

マイクで音を録音してスピーカーで再生する技術が発明されたことで、人類の生活は大きく変わった。音楽演奏の記録が時代を超えて楽しめるようになった。遠く離れていてもコミュニケーションがとれる音声通信が生まれた。ラジオのようなマスメディアが生まれた。難聴者のために補聴器が発明された。イコライザによって、人々は各自の好みに合わせて音楽を聴けるようになった。シンセサイザーやエフェクタを使えば、現実世界で聞くことのできないような音体験を提供することも可能になった。

カメラで映像を記録してディスプレイで再生する技術も、人々の生活に同様の影響を与えた。そして、音と映像は一体となり、体験その

ものを記録・再生するメディアとして 20 世紀に活用されるようになった。視聴覚メディアはさらにヘッドフォンやヘッドマウントディスプレイ (HMD) といったウェアラブルなものへと進化し、その場にいるかのように、バーチャルな追体験ができるまでになった。

本稿では、味を記録して再現するシステムを提案しているが、これはラジオやテレビに続く、「味メディア」の到来であると考えている。今後、視聴覚メディアと同様に、世界中の美味しい食べ物の味を記録し、好きな時に味わうことができるようになる。映像を見て音を聞くだけでなく、味を味わうことができる新しいテレビの発明につながる。当然ながら、五感の体験を再現するバーチャルリアリティ技術もさらに推進できるだろう。

散布図選択による多次元データ可視化へのグラフ彩色問題の適用

伊藤貴之 *中林明日香 *萩田真理子 *

概要. 現実社会のデータの多くは多変数・多次元である。限られたディスプレイ空間に多次元データの特徴を表現する手法として、選択的な散布図表示が有効である。閲覧する価値のある重要な散布図を選択するための指標は既にいくつか提案されており、これらの多様な指標を同時に参照して多様な散布図を選択することが、データの特徴を網羅的に理解する上で有効であると考えられる。この考えにもとづいて本報告では、多数の指標を同時に参照した散布図選択手法を提案する。本手法では多数の指標の各々に沿って散布図のスコアを算出し、スコアの類似度が高い散布図を接続することで、散布図群をノード群としたグラフを生成する。このグラフに彩色問題を適用することで、非常に類似した複数の散布図を同時に選択しないように散布図を選択する。本報告ではアパレル小売店の販売情報と気象情報の関係をあらわす多次元データへの適用事例から提案手法の有効性を議論する。

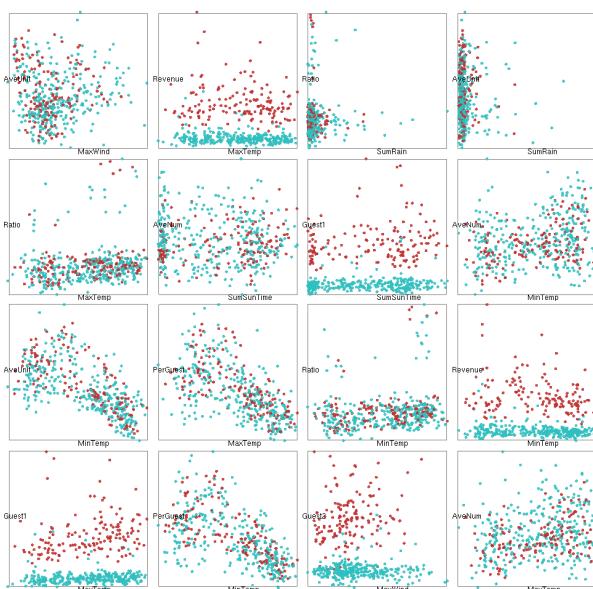


図 1. 提案手法による散布図選択結果の例。次元間の相関、クラスタや例外点の分離性、クラス間の分離性、といった多様な指標に沿って单一の多次元データから多様な散布図を選択している。

1 はじめに

タッチパネルデバイスの普及や、ウェブブラウザ上の対話操作技術の発達などに影響を受けて、情報可視化システムのデザインにも変化が生じている。ダッシュボードと呼ばれる情報一覧型のデザインがその典型例である。ダッシュボードでは広大な表示空間に多数の可視化画面を並べて表示することで、

単純なスクロール操作だけで多様な情報を閲覧できる仕組みを提供している。このようなデザインの普及により、情報可視化技術においても、従来の探索的・反復的なインタラクションだけでなく、閲覧する価値のある多数の可視化結果を最初から全部選出しておき、スクロール操作だけでそれを全部閲覧する、という手軽なインタラクションの実現が容易になった。逆に言えば、このような単純なインタラクションだけで重要な現象を全て閲覧できるようになるためには、多数の有用な可視化結果を適切に自動選択することが重要な研究課題となる。

多次元データ可視化は情報可視化の最重要課題の一つである。多次元データ可視化手法には、散布図行列 (SPM: ScatterPlot Matrix) や平行座標プロット (PCP: Parallel Coordinate Plots) のように座標軸を明示した幾何学的な手法の他に、アイコンベースの手法や画素ベースの手法が知られている。幾何学的な多次元データ可視化手法の研究では近年、次元選択を施すことによって重要な次元だけを重点的に可視化する手法 [5, 19, 21] が多数発表されている。

一方で、多数の散布図を用いた多次元データ可視化手法の研究の一環で、散布図の価値を数値評価する手法がいくつか発表されている。その代表例である Scagnostics [18] は、これまで多くの散布図選択手法 [17, 10, 22] に適用してきた。Scagnostics には多数の数値指標が提案されているが、その中の単一の指標にもとづいて散布図を選択しただけでは、データに潜む多様な現象を網羅的に発見できるとは限らない。ある時は次元間の相関性に興味深さが潜んでいるかもしれないし、またある時にはクラスタやクラスの分離性に興味深さが潜んでいるかもしれない。そこで、多様な指標に沿って多様な散布図を選択することで、データ中の多様な現象を網羅的に可視化できる可能性が高まると考えられる。

Copyright is held by the author(s).

* お茶の水女子大学

本報告では、多様な指標にもとづいて高速に散布図を選択する一手法を提案する。提案手法では任意の2変数を2軸とした多数の散布図を生成する。統いて、各散布図について、複数の指標に沿って複数のスコアを算出し、そのスコア群を並べたベクトルを生成する。そしてベクトル間の類似度が一定値以上である散布図を連結することで、散布図のグラフを生成する。このグラフに彩色問題を適用して、エッジで連結された隣接散布図には異なる色を割り当てる。その結果として、同一色が割り当たられた散布図群は「互いに一定以上の非類似度を有する多様な散布図群」を構成する。そこで、同一色が割り当たられた散布図の中から、ユーザ指定の個数の散布図を選出して画面表示することで、図1に示すように多様な散布図をユーザに提示することができる。

本報告では、アパレル小売店の販売実績と気象情報から構成される多次元データを用いた適用事例を紹介し、提案手法の有効性を議論する。

2 関連研究

2.1 多次元データ可視化のための次元選択

次元選択は多次元データの中から興味深い部分のみを可視化する手段として広く議論されてきた。Claessen ら [2] は多次元データを散布図と平行座標プロットで、Suematsu ら [15] は低次元平行座標プロットの集合で、Zheng ら [22] は少數の散布図の集合で可視化する手法を提案し、その中で次元選択を適用してきた。しかしこれらの手法では次元選択のための対話操作を搭載していないため、可視化結果を動的に調節することはできなかった。

多次元データ中の低次元空間を適応的に可視化するための対話操作を備えた手法も近年になっていくつか報告された。Lee ら [6] と Liu ら [7] は多次元データから抽出した低次元空間に次元削減を適用する手法を提案した。Nohno ら [11] は平行座標プロットにて表示する軸の数を適応的に調節する手法を提案した。Itoh ら [5], Watanabe ら [17], Nakabayashi ら [10] の一連の手法では、画面に表示される低次元平行座標プロットの規模や散布図の数を単純なスライダー操作で調節する手法を提案した。また、これらの操作を支援するために次元間の関係を可視化する機能を備えた多次元データ可視化手法 [5, 19, 20] も報告されている。

以上のように、多次元データ可視化のための次元選択手法は多数発表されている。しかし、多様な指標を同時に参照することで有限個の多様な散布図を選ぶ、という考え方にもとづいて多次元データ中の多様な現象を表現する手法は見当たらない。本報告はこの点に注目した手法を提案する。

2.2 散布図の数値評価

散布図の特徴を数値評価する手法も既にいくつか発表されている。その中でも最も有名な Scagnostics [18] では、散布図を構成する点群の分布から9種類の指標を算出する手法を提案している。Scagnostics の改良手法として、次元間の相間に着目した改良手法 [4, 13] や、クラスの分離性に着目した改良手法 [1, 12, 14] が報告されている。また Wang ら [16] は、視覚認知を考慮した Scagnostics の改良手法を提案している。

多次元データから生成した多数の散布図群の概観と探索を目的とした手法もいくつか発表されている。Dang ら [3] は多数の散布図群から類似する散布図を発見するための探索的な可視化手法を提案している。Matute ら [8] は多数の散布図群の分布を一覧するための可視化手法を提案している。本論文の提案手法はこれらの手法と目標設定が近いが、提案手法はディスプレイ空間の制約を考慮して有限個の散布図を選択表示するという点でこれらの手法と異なる。

3 散布図選択へのグラフ彩色問題の適用

本章は提案手法による散布図選択の処理手順を示す。本手法では多次元データから生成された散布図群の各々に対して、複数の指標に沿って複数のスコアを算出し、それをベクトルとして扱う。提案手法による散布図選択の概念を図2に示す。提案手法では以下の要件を満たすようにベクトル群を選択し、それらに対応する散布図群を表示する。

要件1: 距離の近すぎるベクトル群を選ばずに、距離の離れたベクトル群を選ぶことで、多様な散布図を選ぶことができる。

要件2: 長いベクトルを選ぶことで、特徴的な散布図を選ぶことができる。

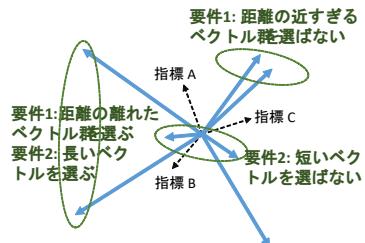


図2. 提案手法による散布図選択の概念を示すために、複数の指標を座標軸とした多次元空間を描いた図。青い矢印で描かれたベクトルが各散布図に対応する。提案手法では要件1,2を満たすように有限個の散布図を選択する。

3.1 データ構造

本報告では提案手法が解くべき問題を以下の通り定式化する。 m 次元データ A は n 個の標本 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ を持つておる、 i 番目の標本 a_i は m 次元ベクトル $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ を有するとする。また各標本には 1 個以上のクラスが割り当てられている場合もあるものとする。そして、このデータから N 個の散布図 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ が生成されるとする。また、各散布図について M 種類の指標に沿ってスコアを算出し、そのスコアを M 次元ベクトル $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM})$ として格納する。本章では i 番目と j 番目の散布図のコサイン類似度を $d_{ij} = (s_i \cdot s_j) / (|s_i||s_j|)$ と記述する。

3.2 散布図選択のための指標

提案手法では複数の指標に沿って散布図のスコアを算出する。現時点では実装されている指標を以下に示す。

3.2.1 相関

筆者らの実装では k 番目の散布図の 1 番目のスコアを単純に以下の式で算出する。

$$s_{k1} = |S_{pear}(i, j)|^2 \quad (1)$$

ここで $S_{pear}(i, j)$ は散布図の 2 軸となる i 番目と j 番目の次元間の Spearman 順位相関係数である。この値が大きいほどが正または負の相関が高く、閲覧するに値する散布図であると評価される。

3.2.2 細さ

散布図上で点群が細長い領域を構成していると、その点群はモデル化が容易である場合が多い。そこで点群が集中する領域の細長さを指標とする。筆者らの実装は Wilkinson ら [18] の実装に準じるものである。具体的には、点群を接続する Delaunay 三角メッシュを生成し、閾値以上の長い辺をもつ三角形を削除した上で、以下の値を算出する。

$$s_{k2} = 1 - \sqrt{4\pi A_{rea}(T) / P_{perimeter}(T)} \quad (2)$$

ここで $A_{rea}(T)$ は三角メッシュ T の総面積であり、 $P_{perimeter}(T)$ は T は外周を構成する三角形辺の長さの合計値である。

3.2.3 クラスタや例外点の分離性

散布図を構成する点群が有限個のクラスタに明確に分離する場合や、あるいは明らかに例外とみられる点が存在している場合も、閲覧することで知見が得られる場合が多い。これらを検出するために、筆者らの実装では分離性に関する Wilkinson ら [18] の Clumpy という指標に沿って、以下の値を算出する。

$$s_{k3} = \max(1 - \text{length}(e_l) / \text{length}(e_{l+1})) \quad (3)$$

ここで前項で論じた通り、筆者らの実装では点群を連結する Delaunay 三角メッシュを生成し、メッシュを構成する三角形辺をその長さでソートする。長い順に l 番目と $l + 1$ 番目の辺の長さから、上述の式が最大となる値を算出する。

3.2.4 クラスの分離性

特定のクラスを有する点群がほかの点群から明確に分離している散布図も、閲覧することで知見を得られる場合が多い。筆者らの実装では情報エントロピーにもとづいてクラスの分離性を数値化している。具体的には、 i 番目と j 番目の次元から構成される散布図について、以下の値を算出する。

$$H(i, j) = -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{c=1}^C p(y_k = c | (a_{ki}, a_{kj})) \log p(y_k = c | (a_{ki}, a_{kj})) \quad (4)$$

ここで y_k は k 番目の標本のクラス、 (a_{ki}, a_{kj}) は k 番目の標本の座標値、 C はクラスの数である。筆者らの実装では散布図を L 個の部分領域に分割し、 l 番目の部分領域におけるエントロピー $H(i, j)_l$ を上述の式により算出する。そして最終的に、以下の式により k 番目の散布図のスコアを算出する。

$$s_{k4} = (H_{max} - \sum H(i, j)_l) / H_{max} \quad (5)$$

ここで H_{max} は $\sum H(i, j)_l$ の最大値である。

3.3 グラフ彩色問題の適用

グラフ彩色問題は組み合わせ最適化に関する多様な問題に適用されおり、筆者らも写真選択の組み合わせ最適化のためにグラフ彩色問題を適用している [9]。提案手法では散布図選択のためにグラフ彩色問題を適用する。

散布図の集合 S と散布図ペアを接続するエッジの集合 E で構成されるグラフ $G = \{S, E\}$ があるとする。提案手法では、 i 番目と j 番目の散布図が有するベクトルのコサイン類似度 d_{ij} が閾値 d_{thres} よりも大きいときに、この 2 つの散布図をエッジで接続する。

続いて G を構成する各散布図に固有の色を割り当てる。この時、エッジで隣接する 2 つの散布図には必ず別々の色を割り当てるという制約を与える。この制約により、類似度の高い散布図には必ず異なる色が割り当たる。結果として、同一の色を割り当たられた散布図群は互いに一定以上の非類似度を有する散布図で構成される。図 3 にこの工程を示す。提案手法ではまず $|s_k|$ の値が最大である散布図の 1 つを選び出し、この散布図に色識別子 $c_k = 0$ を与える。続いて提案手法では、幅優先探索によって散布図を再帰的に探索し、各散布図に色識別子を割り当てる。このとき、 j 番目の散布図について、そ

れとエッジで接続している隣接散布図群に既に割り当てられている色識別子を羅列し、どの隣接散布図にも割り当てられていない色識別子のうち値が最小であるものを散布図 j に割り当てる。例えば散布図 j の隣接散布図に色識別子 0, 1, 3 が割り当てられていれば、散布図 j の色識別子は $c_j = 2$ となる。

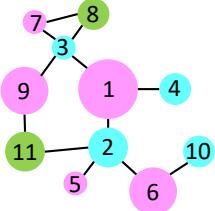


図 3. グラフの彩色。エッジで接続された隣接散布図には必ず別の色を割り当てる。

続いて提案手法では、ユーザが指定した個数の散布図を自動選択して表示する。ここで提案手法では、同一の色識別子が割り当てられた散布図群の中から所定の個数を選択する。同一の色識別子が割り当てられた散布図群は互いに一定以上の非類似度を有する。よって、この中から散布図を選択することで要件 1 を満たす。また、同一の色識別子が割り当てられた散布図群の中から、スコアの最大値 $\max(s_{k1}, s_{k2}, s_{k3}, s_{k4})$ が大きい順に散布図を選ぶことで要件 2 を満たす。

以上をまとめると、提案手法は以下の処理手順で散布図を自動選択する。

1. コサイン類似度 d_{ij} が一定値以上である散布図 i と j をエッジで連結する処理を反復することで、グラフ G を生成する。
2. ベクトルの長さ $|s_k|$ が最大である散布図の 1つを選択し、探索の出発点とする。
3. グラフ G を構成する散布図を幅優先探索し、その各々に色識別子を割り当てる。このとき色識別子には、エッジで連結された隣接散布図に割り当てられたいずれの色識別子とも異なるものを選ぶ。
4. 同一の色識別子を有する散布図を集めて、 $\max(s_{k1}, s_{k2}, s_{k3}, s_{k4})$ の値が大きい順に、ユーザ指定の個数だけ散布図を選ぶ。

4 適用事例

本章では、アパレル小売店の販売情報と気象情報を提案手法で可視化した事例を示す。本事例では説明変数（気象値）を散布図の横軸に、目的変数（販売値）を散布図の縦軸に割り当てている。表 1 に各変数を示す。この可視化結果では、2016 年 5 月 1

日から 2017 年 7 月 31 日までの記録を、散布図中にて 457 個の点群で示している。点群のうち青色は平日の記録を、ピンク色は休日の記録をあらわしている。なお、このデータは現実のデータに微小な乱数値を加算したものであり、現実の販売実績とは異なる値を可視化している点に注意されたい。

表 1. 説明変数（気象値）と目的変数（販売値）。

説明変数 (気象値)	
MinTemp	最低気温
MaxTemp	最高気温
SumRain	降水量
SumSunTime	日照時間
MaxWind	最大風速

目的変数 (販売値)	
Revenue	総売上額
Guest1	販売者数
Guest2	訪問者数
Ratio	販売率
PerGuest	販売者あたり売上額
AveUnit	商品あたり金額
AveNum	販売者あたり商品数

図 1 は提案手法による散布図選択結果の例である。いくつかの散布図からは次元間相関が見受けられ、またいくつかの散布図からはクラスタや例外が明確に見受けられる。またいくつかの散布図は青色とピンク色の点群が明確に分離している。この図から、提案手法が多様な散布図を自動選択していることがわかる。

図 4, 5, 6 はそれぞれ、相関、クラスの分離性、クラスタや例外の分離性、の各々のスコアが高い値を有する 4 つずつの散布図を示したものである。図 4 に示す散布図は、横軸が MinTemp または MaxTemp で縦軸が PerGuest または AveUnit である。この散布図から当該小売店では、夏場には単価の安い商品が売れるか 1 人当たりの購買額が低い傾向があり、年の平均よりやや寒い時期（3 月や 12 月頃）に単価の高い商品が売れるか 1 人当たりの購買額が高い傾向がある、という明確な相関が見受けられる。図 5 に示す散布図は、縦軸が Revenue, Guest1, Guest2 のいずれかである。つまり当該小売店では、総売上額、販売者数、購買者数において平日と休日に明確な差があることがわかる。図 6 ではクラスタや例外が明確にみられる散布図が選ばれている。この中で左から 2 番目の散布図では、縦軸に Ratio が割り当てられており、購買率が異常に高い日（購買せずに帰った人の割合が低い日）を明確に見つけることができる。提案手法による図 1 の散

布図選出結果は、このような多様な特徴を有する散布図をバランスよく選出した結果であることが見受けられる。

一方で、4種類のいずれのスコアも高くない散布図の例を図7に示す。これらの散布図を注意深く観察しても、当該小売店の販売実績に関する興味深い現象を示しているように見受けられない。提案手法はこのような散布図を選ばないことに成功している。

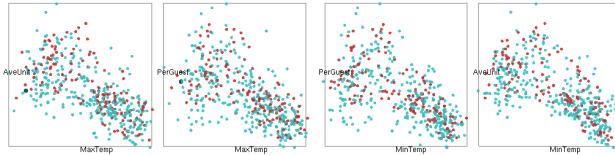


図4. 「相関」のスコアが高い4つの散布図。

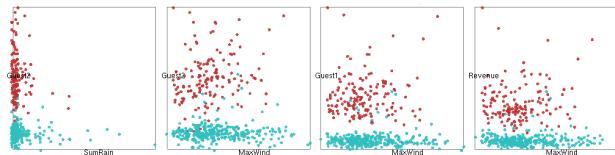


図5. 「クラスの分離性」のスコアが高い4つの散布図。

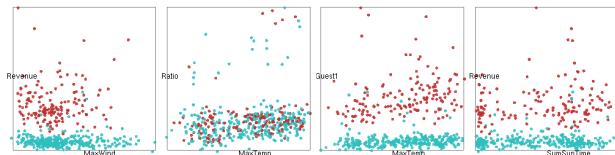


図6. 「クラスタや例外の分離性」のスコアが高い4つの散布図。

図1に示された16個の散布図について、正規化した4つのスコアを可視化した結果を図8に示す。この結果からも、提案手法が多様なスコアを有する16個の散布図を選択できていることがわかる。

提案手法による散布図選択結果は閾値 d_{thres} の選択に大きく依存する。閾値 d_{thres} を小さくすると多数のエッジが生成され、結果として色数も多くなる。図1に示したデータにおけるエッジ数と色数の変化を表2に示す。ここで、色数が多くなるほど「非常に類似した複数の散布図」の選択を避けることが容易になるが、代わりに同一の色を割り当てられた散布図の数が減少するので、スコアの低い散布図も選出せざるを得なくなる可能性が高まる。閾値 d_{thres} の調節に対する $\max(s_{k1}, s_{k2}, s_{k3}, s_{k4})$ の変化を図9に示す。この図からも、提案手法では閾値 d_{thres} を注意深く調節する必要があることが示唆される。

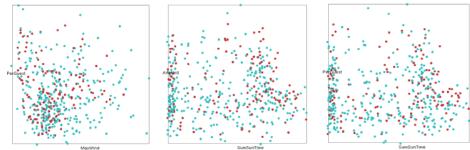


図7. いずれのスコアも高い値を有さない散布図の例。

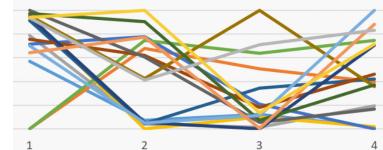


図8. 図1に示された16個の散布図のスコア分布。

5まとめ・今後の課題

本報告ではグラフ彩色問題を用いた散布図選択手法を提案した。提案手法では複数の指標に沿って算出された散布図のスコアからベクトルを構成し、そのベクトルの類似度にもとづいて散布図のグラフを生成する。そしてこのグラフに彩色問題を適用し、同一の色を割り当てられた散布図の中から所定の個数の散布図を選択する。本報告ではアパレル小売店の販売実績のデータに提案手法を適用した事例を紹介し、提案手法の有効性を議論した。

今後の課題として、まずスコア算出のための指標の改善や追加があげられる。2.2節で論じた通り、Scagnosticsには多くの指標があり、いくつかの改良手法が提案されており、これらを追加実装することが可能である。一方で、適切な散布図の個数は入力データの次元数とスコア算出のための指標数に依存する。そこで、スコア算出の指標数が少ないために十分な個数の散布図を選べないという状況が生じるのを避けるためにも、スコア算出の追加実装が重要であると考えられる。また、スコア算出の各指標の重要度はデータの数値分布や可視化の用途に依存することから、スコア算出に際して指標に重みをつけてデータに応じて調節することも有用であると考えられる。

さらに、提案手法の拡張性を検証したい。特に、より多くの次元数や標本数を有するデータでのテストを試みたい。また、適切な散布図の個数と配置について、データの数値分布の観点だけでなく、インタラクションの観点からも検証したい。これらの改良と検証を試みたのちに、より多様なデータで提案手法の適用事例をつくり、さらにユーザ評価実験にも着手したい。

参考文献

- [1] M. Aupetit and M. Sedlmair. Sepme: 2002 new visual separation measures. In *IEEE Pacific Vi-*

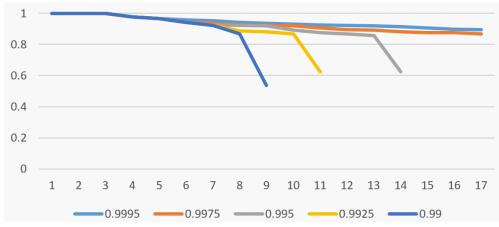
図 9. 閾値 d_{thres} を調節した際の順位の変動。

表 2. 生成されたグラフのエッジ数と色数

d_{thres}	0.9995	0.9975	0.995	0.9925	0.99
エッジ数	5	19	39	60	83
色数	2	3	5	6	7

- sualization Symposium 2012, pages 43–52, 2016.
- [2] J. H. T. Claessen and J. J. van Wijk. Flexible linked axes for multivariate data visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(12):2310–2316, 2011.
 - [3] T. N. Dang and L. Wilkinson. Scagexplorer: Exploring scatterplots by their scagnostics. In *IEEE Pacific Visualization Symposium 2014*, pages 73–80, 2014.
 - [4] L. Harrison, F. Yang, S. Franconeri, and R. Chang. Ranking visualizations of correlation using weber’s law. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(12):1943–1952, 2014.
 - [5] T. Itoh, A. Kumar, A. Klein, and J. Kim. High-dimensional data visualization by interactive construction of low-dimensional parallel coordinate plots. *Journal of Visual Languages and Computing*, 43(1):1–13, 2017.
 - [6] J. H. Lee, K. T. McDonell, A. Zelenyuk, D. Imre, and K. Muller. A structure-based distance metric for high-dimensional space exploration with multidimensional scaling. *IEEE Transaction on Computer Graphics*, 20(3):351–364, 2013.
 - [7] S. Liu, B. Wang, P.-T. Bremer, and V. Pascucci. Distortion-guided structure-driven interactive exploration of high-dimensional data. *Computer Graphics Forum*, 33(3):101–110, 2014.
 - [8] J. Matute, A. C. Telea, and L. Linsen. Skeleton-based scagnostics. *IEEE Transaction on Computer Graphics*, 24(1):542–552, 2017.
 - [9] N. Morishita, M. Hagita, H. Shioya, and T. Itoh. Graph coloring algorithms for photo selection. In *Conference on Applied Mathematics (in Japanese)*, pages 106–109, 2016.
 - [10] A. Nakabayashi and T. Itoh. A technique for selection and drawing of scatterplots for multi-dimensional data visualization. In *23rd International Conference on Information Visualisation (IV2019)*, pages 62–67, 2019.
 - [11] K. Nohno, H.-Y. Wu, K. Watanabe, S. Takahashi, and I. Fujishiro. Spectral-based contractible parallel coordinates. In *18th International Conference on Information Visualisation*, pages 7–12, 2014.
 - [12] M. Sedlmair, A. Tatu, T. Munzner, and M. Tory. A taxonomy of visual cluster separation factors. *Computer Graphics Forum*, 31(3):1335–1344, 2012.
 - [13] L. Shao, A. Mahajan, T. Schreck, and D. J. Lehmann. Interactive regression lens for exploring scatter plots. *Computer Graphics Forum*, 36(3):157–166, 2017.
 - [14] M. Sips, B. Neubert, J. P. Lewis, and P. Hanrahan. Selecting good views of high-dimensional data using class consistency. *Computer Graphics Forum*, 28(3):831–838, 2009.
 - [15] H. Suematsu, Y. Zheng, T. Itoh, R. Fujimaki, S. Morinaga, and Y. Kawahara. Arrangement of low-dimensional parallel coordinate plots for high-dimensional data visualization. In *17th International Conference on Information Visualisation*, pages 59–65, 2013.
 - [16] Y. Wang, Z. Wang, T. Liu, M. Correll, Z. Cheng, O. Deussen, and M. Sedlmair. Improving the robustness of scagnostics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(1):759–769, 2020.
 - [17] A. Watanabe, T. Itoh, M. Kanazaki, and K. Chiba. A scatterplots selection technique for multi-dimensional data visualization combining with parallel coordinate plots. In *21st International Conference on Information Visualisation (IV2017)*, pages 78–83, 2017.
 - [18] L. Wilkinson, A. Anand, and R. Grossman. Graph-theoretic scagnostics. In *IEEE Symposium on Information Visualization*, pages 157–164, 2005.
 - [19] X. Yuan, D. Ren, Z. Wang, and C. Guo. Dimension projection matrix/tree: Interactive subspace visual exploration and analysis of high dimensional data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12):2625–2633, 2013.
 - [20] Z. Zhang, K. T. McDonnel, E. Zadak, and K. Muller. Visual correlation analysis of numerical and categorical data on the correlation map. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(2):289–303, 2015.
 - [21] Z. Zhang, K. T. McDonnell, and K. Mueller. A network-based interface for the exploration of high-dimensional data spaces. In *IEEE Pacific Visualization Symposium 2012*, pages 17–24, 2012.
 - [22] Y. Zheng, H. Suematsu, T. Itoh, R. Fujimaki, S. Morinaga, and Y. Kawahara. Scatterplot layout for high-dimensional data visualization. *Journal of Visualization*, 18(1):111–119, 2015.

1対多遠隔コミュニケーションにおける聴衆反応の集合的提示

前田 清洲 * 曜本 純一 *†

概要. オンラインでのコミュニケーションの機会は増えているが、特にオンライン講義やウェビナーといった1対多の状況では、対面コミュニケーションに比べて話者が聴衆の反応を一度に確認することができず、話しづらさを感じてしまう。既存の研究では、聴衆がアイコンボタンを押すことでアクションを送る方法や、視線を中心とした非言語情報の計測と提示が行われてきたが、前者は聴衆が明示的に操作しなければならず、後者は聴衆側に専用の機材を設置する必要があり、導入が困難だった。本研究では、webブラウザで利用できる視線追跡技術を使用することで、特別な装置を必要とせず聴衆の視線を取得し、多人数の聴衆の視線位置をヒートマップとして集合的に話者に提示する手法を提案する。この手法により、話者が画面共有している資料のうち聴衆がどこを見ているかなどを直感的に把握できるようになる。本手法を用いたオンラインでの実験を実施して、話者の話しやすさが改善されるかどうかを検証した。

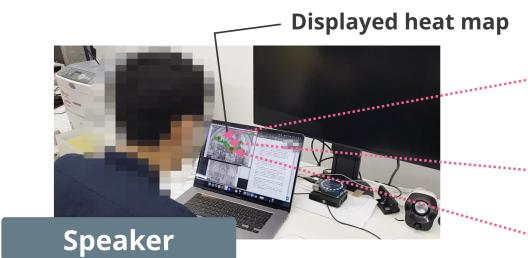


図 1. ヒートマップを見ながら話す人

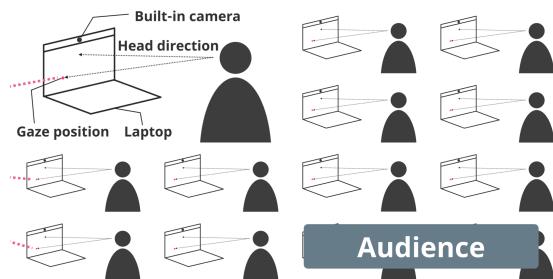


図 2. 視線をトラッキングされながら話を聞く聴衆

1 はじめに

近年我々はオンライン会議ツールなどを利用して遠隔でのコミュニケーションをする機会が増えていく。オンラインコミュニケーションは物理的制約を受けてどこからでもアクセスできる利点もある一方で、対面でのコミュニケーションと比べ視線やジェスチャーといった非言語情報が欠落することで相手の反応を読みづらいといったデメリットも存在する[1]。特にオンライン授業やウェビナーといったリアルタイムでの1対多のコミュニケーションでは聞き手はビデオをオフにすることがほとんどで、話者は視線や表情、ジェスチャーから読み取れる聴衆の反応を知ることができない。こうした状況では、話者はオフラインと比べて話しづらさを感じることになる。

遠隔コミュニケーションツールによってはテキストや絵文字を用いて話者に対してアクションを送ることができるが、こうしたリアクションは聞き手の明示的なアクションが必要であるため聞き手にとっ

て面倒となる。一方で視線やジェスチャーのような非明示的な非言語情報は聞き手に負担を強いることなく取得することが可能である。

遠隔講義システムにおいて視線を利用して集中力といった生徒の状態を把握できることが知られている[26]。ただしこうした研究で生徒の視線情報は主に講義視聴完了後の分析か、集中力が途切れたことを生徒に提示するために使用される。生徒の反応を知るためにリアルタイムで教師や話者へフィードバックすることはなかった。遠隔コミュニケーションにおけるリアルタイムな視線情報の共有によるコミュニケーション支援の試みがなされてきたが、多くの場合1対1の状況に限られる[3]か、ノートPCに加えてアイトラッカーが必要であるため聴衆の数が数人に限定される[25]。大人数の聴衆が同時に視聴するようなオンライン授業やウェビナーで使用することは難しい。

そこで本研究では図1,2のように、ノートPCに内蔵されるカメラのみを使用するwebベースの視線トラッキングライブラリを用いることで大人数の聴衆の視線を話者側にリアルタイムでヒートマップとして集合的に表示する手法を提案する。このシス

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学

† ソニーコンピュータサイエンス研究所京都研究室

テムでは視線トラッキングのための追加の機材を必要としないため、低コストで導入が容易であり大規模なオンラインでの使用に適している。そのため多数の聴衆の視線を同時に取得し話者に提示することができる。また今回は視線位置に加えて聴衆の頭の動きも提示した。これにより話者は聞き手のうなづきといった反応も知ることができる。実際の使用場面として話者がディスプレイ上で何らかの資料を共有し講義や発表、説明を行う場面を想定した。こうした場面で聴衆が共有した資料のどこを観ているかが分かることによって聴衆の反応や興味を持っている部分を理解でき、話者の話しやすさが改善されるかを実験により検証した。

2 関連研究

本項では、視線を共有することによる遠隔コミュニケーションの促進、MOOC(massive open online course)のようなオンライン講義システムにおける視線の活用について関連研究を紹介する。Johansenの分類[10]に基づけば、前者は「同じ時間・違う場所」、後者は「違う時間・違う場所」におけるコミュニケーション形態を指す。

2.1 遠隔コミュニケーションにおける視線共有

対面でのコミュニケーションではお互いに相手が見ている場所を知ることができる[12]が遠隔での会話では難しい。ここではリモートコミュニケーションにおいて1対1でのどちらか一方、もしくは両方の視線共有と1対多、もしくは三人以上の遠隔コミュニケーションでの多から1への視線共有に関する研究について紹介する。

お互いの視線を共有することは1対1の遠隔コミュニケーションで有効であることが報告されており、これまでにはリモートペアプログラミング[3]、特定の物体を共同で探す作業[2, 8]などで視線の共有が行われている。

1対多のオンラインコミュニケーションでプログラミング課題を解いている生徒の視線を教師側に表示することによって教師が生徒の理解度を把握するのに役立つことを明らかにした研究[25]や、講義と演習中に教師・生徒の視線をお互いに共有した研究[22]が存在する。また、GAZE Groupware System[23]は、複数人のオンラインコミュニケーションにおいて視線は誰が誰に話しかけているかを把握することができるシステムである。

しかし、既存研究では視線トラッキングのためにノートPC以外に機材を必要としており聴衆の人数を増やすことは困難である。実際にAngeloら[25]やSpakovら[22]は聞き手の人数が4人であり人数が増えた際の技術的な難しさに言及している。また人数が増えることで視線表示は話者にとって気の散るものになり得る。

本研究ではwebベースの視線トラッキング手法を用いることで人数の限界を超えて大人数の聴衆の視線を話者に表示するシステムを提案する。

2.2 オンライン講義における非言語情報の取得

近年、MOOCをはじめとするオンライン講義システムが充実している一方で、集中力の低下などの理由からごく少数の学生しかオンライン講義を最後まで視聴しないといった学習効率の悪さも課題となっている[11]。

そこで視線と認知状態の関係性[17]に基づき、講義ビデオを視聴中の生徒の集中力の低下を視線を用いて検知する研究が多くなってきた[9, 24]。

またMOOCにおける生徒の視線は生徒が授業についてこれているかを判断する手がかりにもなり得ることが分かっている[21]。

以上のような既存研究ではリアルタイム性とプライバシーの侵害に課題があることが指摘されている[19]。リアルタイム性とプライバシーの保護を志向したいくつかの研究ではwebブラウザ上で完結する視線トラッキングライブラリを利用してMOOC視聴者の集中力の低下を検知している[26]。

ただしこれらの研究では録画された講義ビデオを閲覧する学生が対象であることがほとんどであるため、視聴者に対して集中力が低下したことなどをその場で知らせる[18, 20]ことはあっても話者へのフィードバックについては考慮されていない。リアルタイムで行われるオンライン講義やウェビナーでは話者が聞き手の非言語情報から聞き手の反応を知ることは極めて重要な要素となる。

3 システム設計

3.1 聴衆の視線・顔の向きの推定

大人数の聴衆の視線を話者に提示するためにウェブベースのオープンソース視線トラッキングライブラリであるWebGazer.js¹[16]を採用した。WebGazer.jsの使用例として、遠隔講義を視聴している生徒の集中力低下の検知[26]やWebGazer.jsを拡張したライブラリであるSearchGazer.jsを用いてweb検索中のユーザの視線を追跡した研究[15]、またタッチタイピストと非タッチタイピストの違いに焦点を当てて視線とタイピングの関係を調査した研究[14]などがある。Tobii²などのアイトラッカーと比べて精度は高くないもののノートパソコンの内蔵カメラで使用できる点、リアルタイム性に優れる点から大人数での講義に適していると考えられる。

リアルタイムで推定される聞き手の視線位置はその精度からちらつきの多いものとなる。この問題を解決するために、話者へと送信する視線位置は聞き

¹ <https://webgazer.cs.brown.edu>

² <https://www.tobiipro.com/ja/product-listing/>

手の数フレーム分の推定された視線位置の平均値とした。これにより話者は聞き手が注視している場所をより把握しやすくなる。また聞き手と話者とのディスプレイの大きさの違いを考慮して送信される視線位置はディスプレイの相対位置となる。

WebGazer.jsを使用する場合、視線位置とディスプレイ上のカーソル位置の関連性に基づいてwebブラウジング中にユーザが継続的に行うマウスと視線の動きからキャリブレーションを行い精度を高めることができる。しかし今回は聴衆が受動的に話を聞く場合を想定しているため継続的なキャリブレーションは行わない。代わりにユーザは最初にキャリブレーションを行う。図3のようにWebGazer.jsを組み込んだwebアプリケーションを立ち上げたのち画面上に配置された8つの円をマウスの位置と視線を合わせながら数回クリックすることでキャリブレーションを行う。

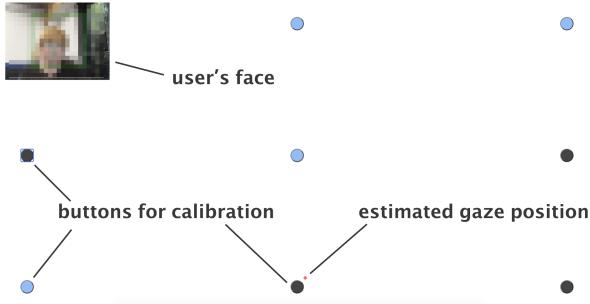


図3. 視線トラッキングの様子

また、聞き手の顔の向きを推定するためにWebGazer.jsで取得される顔の特徴点の位置を利用した。図3の左上のように聴衆の顔にはリアルタイムで特徴点が重ね合わせて表示されている。この中から鼻の先端位置を元に顔の向きを推定した。

3.2 話者への視線・顔の向きの表示

相手の視線を表示する方法にはヒートマップ、カーソル、お互いに同じ場所を見ている時にのみ表示されるマーカーなどがある[5]。相手の視線がリアルタイムで画面に表示される場合、話者の気を散らす可能性があることが指摘されている[4]。今回は聞き手の数が大人数であることを想定しているため、カーソルやマーカーで表示するだけでは話者の認知的負荷を上げ気の散るものとなる。本研究では多数の聴衆の見ている場所を図4のようにヒートマップとして話者に提示することにする。赤い部分はより多くの聴衆が同時に見ている部分であり、逆に緑や青、透明な部分は見ている聴衆があまりいない部分となる。ヒートマップ表示をする利点として話者が気を散らすことなく聴衆の反応を確認しやすいこと、全体的な傾向として見ている人が多い部分が直感的

に分かるので視線トラッキングの精度が高くないという欠点を補えることが挙げられる。聴衆の顔の向きは聞き手の人数分のカーソルを用いて図5のように表現した。個々のカーソルがまとまって動くことによって話者はうなずきや否定のリアクションを確認することができる。例えば図5の左の場合は顔の向きがばらけているため聴衆の反応を読み取ることは難しい。一方で図5の右の場合は全体的に顔の向きが縦に振れているため多くの聞き手が頷いていることが分かる。顔の動きを確認することは1対1の遠隔コミュニケーションにおいて研究されていたが[7]、1対多の遠隔コミュニケーションにおいて聞き手の集合的な顔の向きの提示が話者にとって有益か検証する必要がある。

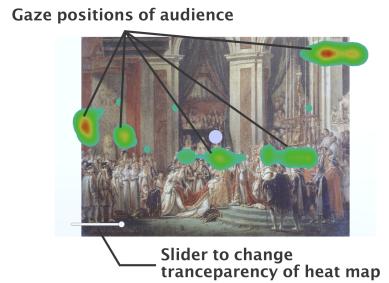


図4. 話者側の視線ヒートマップ

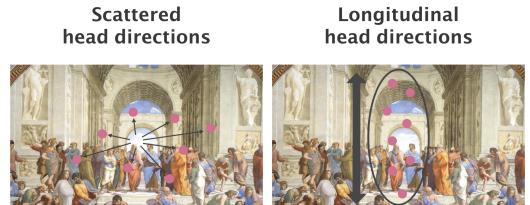


図5. (左) ばらけている顔の向き (右) 縦方向に動く顔の向き

各ピクセルの色は以下のように決定される。ディスプレイの左上の角から数えて横方向に x 個分、縦方向に y 個分だけ進んだ位置にあるピクセル $P(x, y)$ について、まず n 人分の視線位置との距離を考える。ある視線位置 g_i とピクセル P の近さを表す指標を p_i とし、 p_i を

$$p_i = \frac{\max((r - d_i), 0)}{r} \quad (1)$$

のように定義する。ここで d_i は g_i と P の距離、 r は任意の視線位置が考慮するピクセルとの距離の最大値である。この p_i を用いてピクセル P が全視線から受ける影響 P_{xy} は

$$P_{xy} = \sum_{k=1}^n p_k = \sum_{k=1}^n \frac{\max((r - d_k), 0)}{r} \quad (2)$$

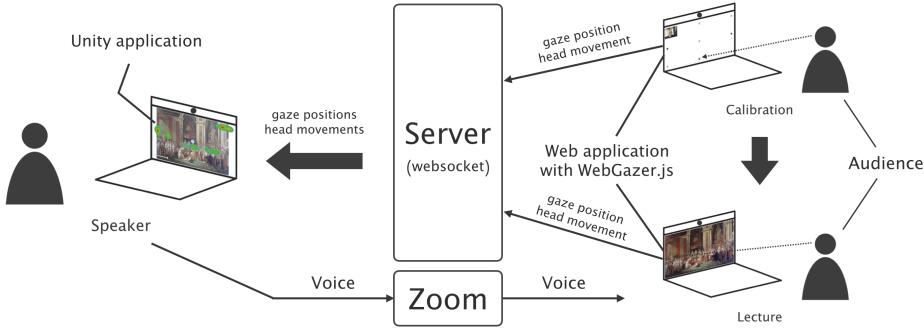


図 6. システム構成

と表すことができこの P_{xy} がある閾値 t より大きい場合、ピクセル P は赤で描画される。 t より小さくなるにつれてピクセルの色は青色に近くなる。

実際には新しい視線位置を受信した場合、 n 個の視線位置の中から最も古いものと入れ替え(2)の計算を行う。計算対象のピクセルは新しい視線位置と最も古い視線位置との距離が r 以下のものだけだけでよい。話者はディスプレイ左下にあるスライダーを用いてヒートマップの濃さを調整できる。

ヒートマップの描画には Unity2018.4.22f1 を使用し、ウィンドウを透過させることによって話者が共有する資料と重ね合わせて表示させることができる。

3.3 全体的な構成

システムの全体的な構成は図 6 のようになる。聴衆は WebGazer.js を組み込んだ web アプリケーションを立ち上げてキャリブレーションを行った後、web アプリにあらかじめ埋め込まれた話者の資料を閲覧できる(図右部分)。web アプリケーションにより取得された聴衆の視線位置と顔の向きは数フレームおきにサーバを経由して話者へと送信される。話者側では Unity アプリケーションがデータを受信するたびにヒートマップを更新する(図左部分)。通信には websocket を使用し、プライバシーの観点からサーバへ送る情報は視線位置と顔の向きのみとした。聞き手側から何秒おきにデータを送信するかは事前に設定することができる。また、音声はオンライン通話ツールである zoom を用いて伝達される。

4 実験

本研究で提案するシステムを用いて聴衆の反応を見られるようになると話者が話しやすくなるかどうかを検証するためにオンラインで実験を行った。被験者は話者役 2 人と聞き手役 6 人に分かれており、いずれの被験者も 21~24 歳の大学生である。話者はどちらも普段オンラインでのコミュニケーションの経験はあるが、オンラインで不特定多数の聴衆に話した経験はなかった。

4.1 実験の概要と結果

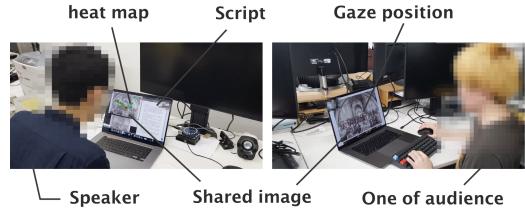


図 7. 実験の様子 (左) 話者 (右) 聴衆の一人

実験の概要は図 7 のようになる。話者はある画像に登場する人物について説明を 2 回行う。1 回目は聴衆からのフィードバックなし、2 回目は聴衆の視線と顔の向きがリアルタイムで画像に重ね合わせて提示される。この際聴衆は説明を聴きながら web アプリ上で画像を観ている。画像はパブリックドメインの絵画で話す内容は決まっているが、話者は重ね合わせて表示された反応から聞き手が画像のどこに興味を持っているかを類推して話す順番を自由に変えたり、聴衆の視線を誘導したりできる。実験は 2 人の話者にそれぞれ一回の説明あたり 5 分間の説明時間が与えられ、聞き手は合計 10 分間画像の説明を受けた。今回一人の聞き手からのデータ送信頻度は 0.3 秒間に一回とした。そのため話者側は一秒間に 20 個のデータを受信することになる。

実験終了後には話者に対して以下の 4 つの質問に回答してもらった。

- Q1: システムは聴衆の反応を知るのに役に立ったか
- Q2: 聴衆の視線・顔の向きの表示は邪魔にならなかったか？
- Q3: 視線と顔の向きが表示されない場合と比べて話しやすさを感じたか？

- Q4: 視線と顔の向きが表示されることで話す方はどのように変化したか?

Q1, Q2, Q3 は最高 7 点としてリッカート尺度を用いた。Q4 は自由記述で回答してもらった。

結果は以下の表 1 のようになった。Q4 で話者は、「視線が表示されることで人物に注目しながら読むことを意識できた」や「自分の発言に聴衆が追いついているかどうかが、大まかに分かった」と回答した。

表 1. システムに関する質問の回答結果(7段階リッカート尺度による)

	speaker1	speaker2
Q1	5	6
Q2	7	7
Q3	6	5

本研究が提案する大人数の聴衆の視線と顔の向きを重ね合わせて表示するシステムは話者にとって説明する際に邪魔にならず、聴衆の反応を知るのに役立った。話者は、画像右側の人物について説明した後に左側の人物の説明に移った際にヒートマップも右から左へ移ったことによって聴衆の反応を知ることができたことも報告した。既存の研究[22]と同様に話者の話し方の変化を示す客観的尺度は用意されなかったが、今回のこうしたヒートマップの移動は今後話者の話し方の変化を分析する上で重要な手がかりとなる可能性がある。

今回話者役の被験者はオンラインで不特定多数の人々に話す経験のない人であった。今後の実験ではオンライン講義経験のある教師にシステムを使用してもらい話しやすさを評価する必要がある。実際、SyncClass[6]では、オフラインでの大人数の授業中に生徒が授業にどれだけついていけているかをモニターに可視化して教師にフィードバックするシステムの有用性は教師の指導経験によって異なることが明らかになっている。オンラインでも同様に話者に対する聴衆の非言語情報の可視化の有用性は講義経験によって異なると考えられる。

5 議論

5.1 精度とキャリブレーションによる課題

WebGazer.js は継続的なクリックによるキャリブレーションで精度を高める事が可能であるが、今回は事前のキャリブレーションしか行わなかった。そのため、聞き手の姿勢が変化することなどを考慮すると長時間の使用に向かない。キャリブレーション後にも共有された資料を聞き手がクリックするなどしてキャリブレーションを行えるようにすると長い講義でも使用でき実用性が増すと考えられる。

5.2 視線以外の非言語情報の取得

本研究では大人数の聴衆の非言語情報として視線と顔の向きだけに注目したが、今後の研究では表情などの視線以外の非言語情報から感情[13]といったより複雑な情報も話者へ提示できると考えられる。1 対 1 の遠隔コミュニケーションにおいて Facetop[7] のようにワークスペースと相手の顔やジェスチャーを重ね合わせて表示するシステムが存在するが、1 対多の文脈でこれらの情報を集合的に話者に提示する方法についてはまだ検証されていない。複雑な非言語情報を話者に提示することで話者はより話しやすくなるのか、それとも認知的負荷が上がるのか検証する必要がある。

5.3 聞き手に対する他の聴衆の非言語情報の提示

今回大人数の聴衆の視線と顔の向きを提示するのは話者のみであったが、聞き手に対してもリアルタイムに提示することで聞き手は他の聴衆が注目している部分が分かるため、集中力が低下したり聞き手は授業についていけなくなったりすることが減る可能性がある。この他者の非言語情報の可視化が自分自身の非言語情報の可視化[20]と比較してどの程度有効なのか調査する余地がある。

またリアルタイムでの使用にとどまらず、講義ビデオを視聴中の人に対して過去にそのビデオを観た人たちの視線位置の蓄積が提示されることによって講義中の注目しなければならないタイミングや場所を把握することができると考えられる。

6 むすび

本研究では、web ベースの視線トラッキングライブラリを使用してオンラインコミュニケーションにおいて大人数の聴衆の視線と顔の向きを話者へ集合的に提示するシステムを提案し実験を行った。このシステムにより話者は気を散らされることなく聴衆の反応を知ることができるようになった。今後は視線と顔の向きに加えて表情といった複雑な非言語情報を集合的に提示すると同時に聞き手自身に対する非言語情報のフィードバックについても検証することも目指す。

参考文献

- [1] K. Betts. Lost in translation: Importance of effective communication in online education. *Online Journal of Distance Learning Administration*, 12(2), 2009.
- [2] S. E. Brennan, X. Chen, C. A. Dickinson, M. B. Neider, and G. J. Zelinsky. Coordinating cognition: The costs and benefits of shared gaze during collaborative search. *Cognition*, 106(3):1465–1477, 2008.

- [3] S. D'Angelo and A. Begel. Improving communication between pair programmers using shared gaze awareness. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 6245–6290, 2017.
- [4] S. D'Angelo and D. Gergle. Gazed and confused: Understanding and designing shared gaze for remote collaboration. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2492–2496, 2016.
- [5] S. D'Angelo and D. Gergle. An eye for design: gaze visualizations for remote collaborative work. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2018.
- [6] K. Fujii, P. Marian, D. Clark, Y. Okamoto, and J. Rekimoto. Sync Class: Visualization system for in-class student synchronization. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, pp. 1–8, 2018.
- [7] K. Gyllstrom and D. Stotts. Facetop: Integrated semi-transparent video for enhanced natural pointing in shared screen collaboration. *May*, 15:1–10, 2005.
- [8] K. Higuchi, R. Yonetani, and Y. Sato. Can eye help you? Effects of visualizing eye fixations on remote collaboration scenarios for physical tasks. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5180–5190, 2016.
- [9] S. Hutt, J. Hardey, R. Bixler, A. Stewart, E. Risko, and S. K. D'Mello. Gaze-Based Detection of Mind Wandering during Lecture Viewing. *International Educational Data Mining Society*, 2017.
- [10] R. Johansen. *Groupware: Computer support for business teams*. The Free Press, 1988.
- [11] K. Jordan. Initial trends in enrolment and completion of massive open online courses. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 15(1):133–160, 2014.
- [12] A. F. Monk and C. Gale. A look is worth a thousand words: Full gaze awareness in video-mediated conversation. *Discourse Processes*, 33(3):257–278, 2002.
- [13] M. Mukhopadhyay, S. Pal, A. Nayyar, P. K. D. Pramanik, N. Dasgupta, and P. Choudhury. Facial Emotion Detection to Assess Learner's State of Mind in an Online Learning System. In *Proceedings of the 2020 5th International Conference on Intelligent Information Technology*, pp. 107–115, 2020.
- [14] A. Papoutsaki, A. Gokaslan, J. Tompkin, Y. He, and J. Huang. The eye of the typer: a benchmark and analysis of gaze behavior during typing. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, pp. 1–9, 2018.
- [15] A. Papoutsaki, J. Laskey, and J. Huang. Searchgazer: Webcam eye tracking for remote studies of web search. In *Proceedings of the 2017 Conference on Conference Human Information Interaction and Retrieval*, pp. 17–26, 2017.
- [16] A. Papoutsaki, P. Sangkloy, J. Laskey, N. Daskalova, J. Huang, and J. Hays. Webgazer: Scalable webcam eye tracking using user interactions. In *Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence-IJCAI 2016*, 2016.
- [17] K. Rayner. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3):372, 1998.
- [18] T. Robal, Y. Zhao, C. Lofi, and C. Hauff. Intelli-Eye: Enhancing MOOC Learners' Video Watching Experience through Real-Time Attention Tracking. In *Proceedings of the 29th on Hypertext and Social Media*, pp. 106–114. 2018.
- [19] T. Robal, Y. Zhao, C. Lofi, and C. Hauff. Webcam-based attention tracking in online learning: A feasibility study. In *23rd International Conference on Intelligent User Interfaces*, pp. 189–197, 2018.
- [20] K. Sharma, H. S. Alavi, P. Jermann, and P. Dillenbourg. A gaze-based learning analytics model: in-video visual feedback to improve learner's attention in MOOCs. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, pp. 417–421, 2016.
- [21] K. Sharma, P. Jermann, and P. Dillenbourg. “With-me-ness”: A gaze-measure for students' attention in MOOCs. In *Proceedings of international conference of the learning sciences 2014*, No. CONF, pp. 1017–1022. ISLS, 2014.
- [22] O. Špakov, D. Niehorster, H. Istance, K.-J. Räihä, and H. Siirtola. Two-Way Gaze Sharing in Remote Teaching. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 242–251. Springer, 2019.
- [23] R. Vertegaal. The GAZE groupware system: mediating joint attention in multiparty communication and collaboration. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 294–301, 1999.
- [24] F. Yang, Z. Jiang, C. Wang, Y. Dai, Z. Jia, and K. Hirota. Student Eye Gaze Tracking During MOOC Teaching. In *2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, pp. 875–880. IEEE, 2018.
- [25] N. Yao, J. Brewer, S. D'Angelo, M. Horn, and D. Gergle. Visualizing gaze information from multiple students to support remote instruction. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6, 2018.
- [26] Y. Zhao, C. Lofi, and C. Hauff. Scalable mind-wandering detection for MOOCs: a webcam-based approach. In *European Conference on Technology Enhanced Learning*, pp. 330–344. Springer, 2017.

askTA：消極的な受講生でも質問可能なオンライン演習講義支援システム

又吉 康綱* 中村 聰史*

概要. 大学で開講される初年次必修プログラミング教育では、TA が必要不可欠である。対面講義でもあった積極性を發揮できず質問できない受講生の問題は、COVID-19 の影響により大学の講義がオンラインになったことで、より大きな問題となっているといえる。また、それに加え質問の順番待ちや質問対応などの制御や、TA にとって質問に対応できるだろうかという精神的な負荷も大きな問題となりうる。そこで本研究では、受講生の質問へのハードルを下げつつ、TA の精神的負荷も軽減するため、受講生が TA に直接質問をするのではなく、受講生はシステムに対して質問を行い、また TA は質問を事前に確認し、対応可能な場合に呼び出して入室を促す手法を提案し、実装した。また、実際のオンライン講義で計 1600 分運用し、受講生および TA から高い評価を得ることができた。

1 はじめに

大学の初年次必修プログラミング教育では、数十人から数百人の受講生を一度に指導する必要がある。例えば、我々が所属している明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科では、100 人以上の受講生がプログラミングの必修講義を同時に受講している。プログラミングは、受講生によって得意不得意や理解度などに大きなばらつきがあるうえ、基礎になるタイピング速度も違うため、多面的なサポートが必要となる。

我々はタイピング速度や基礎力向上に向けて、写経とタイピングゲーム、動的な実行を組み合わせた *typing.run*[1]を実現し、実際に予習として課すことでその有用性を明らかにしてきた。一方、講義中のサポートを適切に行うには、TA（ティーチングアシスタント）の存在が不可欠である。一般的に、初年次教育においては TA の数は不十分であり、1 人の TA が受講生 10 人以上を担当することは珍しくなく、工夫が必要となる。

ここで対面型の講義では、質問したい受講生が手を挙げて TA を呼び、受講生は画面と一緒に見ながら質問を解決し、TA は資料を指しながら指導することになる。受講生からの質問が多い場合には、手が上がった順番を考慮しながら対応していくことが可能である。しかし、順番を飛ばされることや、手を上げ続けることが大変などの問題もある。また、TA に対してこんなことを質問していいのかといった不安や、質問している様子を他者に見られることが恥ずかしいなど、積極性を出せないことによる問題もあった。さらに、TA も質問で呼ばれ対応したものの、解決できず困るという問題もあった。

Copyright is held by the authors.

* 明治大学

世界を激変させた COVID-19 の影響により、大学の講義がオンラインで行われることになったことで、講義において TA がいかに支援するかという点はより大きな問題となっている。一般的に、TA と受講生は多対多の関係で、受講生の数が圧倒的に多いため、オンラインコミュニケーション用のシステムにある挙手機能などを使って支援することは容易ではない。また、オンライン上に質問部屋を用意して TA に待機してもらい、その部屋に入室することで質問対応する方法も考えられるが、質問部屋の中に誰がいるのか、TA がどういう状況にあるのか、どんなことを喋っているのかなどを把握することができず、入室をためらってしまうという問題もある。さらに、オンライン上では距離に違いがないため、順番待ちを行うのは容易ではない。一方、TA も得手不得手があるため、質問を即座に解決することができなくて時間を浪費し、その結果精神的な負荷がかかるといった問題がある。

そこで本研究では、受講生の質問へのハードルを下げつつ、TA の精神的負荷を下げる事が可能なオンライン上の質問応答システムの実現を目指す。ここでは、TA に質問するハードルを下げるため、TA に対して直接質問をするのではなく、システムに対して具体的な質問を投げかけ、受講生自身のタイミングではなく、TA のタイミングで呼び質問の対応を行う。また、TA には、質問をシステム上で事前にチェックできるようにし、自分が対応可能である場合にシステム経由で受講生を呼び出し、質問対応することによって、精神的負荷も下げる。

以上のことにより、オンライン講義で受講生が TA に質問するハードルが上がってしまう問題を解決するとともに、TA の得手不得手を配慮しながらの質問対応を可能にし、さらには順番が来たときには受

講生に通知を行うことによって気付かせ、講義を円滑にすることができると期待される。

本研究では、提案システムを askTA として実装するとともに、オンラインのプログラミング演習講義で実運用を行うことにより、その有用性を検証する。また、実運用から可能性や問題点などについても明らかにする。

2 関連研究

大学におけるプログラミング演習授業を支援する研究は多く存在する。井垣ら[2]は、課題に対する取り組み速度などを利用し、サポートを必要とする受講生を早期に検出できるシステムを提案している。また市村ら[3]も、受講生の操作やエラーログから、授業中につまずいている受講生を早期に発見するとともに、共通する問題点を明らかにするシステムを提案している。さらに加藤ら[4]は、模範解答との比較により、問題を抱える受講生の学習状況を教員がリアルタイムに把握できるプログラミング演習向け授業システムを提案している。これらは、受講生の理解状況を把握することを可能にするものであり、本研究の TA への質問のハードルを下げることは別のアプローチではあるが、組み合わせることにより授業をよりよくすることが可能になる。

栗原ら[5]は、消極的な人でも快適に使える情報技術のデザインを「消極性デザイン」と呼んでおり、研究会活動も行っている。また西田ら[6]は、実名と匿名の長所を併せ持つ傘連判状を用いたコミュニケーションプロトコルを提案しており、意見に圧力のかかる状況でも発言が可能であることなどを報告している。本研究も、コミュニケーションがより難しくなるオンラインにおいて、受講生の TA への質問時や TA 自身が消極的な場合でも使えるようなシステムデザインを目指しており、一致する方向性である。

3 提案手法

先述の通り、オンラインでは、受講生の質問ハードルはより高まると考えられる。また、TA も質問に対応する精神的負荷も高まると考えられる。さらに、こうした質問を適切にさばくための順番待ちなどの仕組みが重要になってくる。

そこで、システムの実現にあたり、質問するハードルを下げる仕組みと、質問対応のハードルを下げる仕組み、質問の順番待ちを円滑に行うための仕組みについて述べる。

3.1 質問するハードルを下げる仕組み

オンライン上で実施されている演習講義では、TA などによる質問対応用にコミュニケーションスペー

ス(質問部屋)を用意することがよく行われている。受講生は、質問するためにはそうしたスペースに入室する必要があるが、対面環境とは異なり、オンライン環境では部屋の中に誰が居るのか、どんな状況にあるのか、何を喋っているかなどを覗き見ることができないサービスが多く、入室のハードルがあがり、結果的に質問するハードルもより高くなってしまう。また、質問のハードルを下げる方法として、受講生からの質問を Web フォームやチャットなどで受け付け、順次対応する方法も考えられるが、質問が多数ある場合に、誰がどれに対応するかの割り当てが難しく、また質問対応で別システムが必要となるなどの問題がある。

以上の、質問するハードルが高い問題を、まず TA に直接質問するのではなく、一旦システムに対して質問を投稿し、その質問を見た TA に呼んでもらうこと、「TA に呼ばれたから質問できる」と立場を変え、気軽に質問できるようにする。

3.2 質問対応のハードルを下げる仕組み

TA の業務は、どんな受講生の質問に対しても回答することであるが、TA 個人にもレベル差や分野の得意不得手があり、質問の内容を聞くまで TA 自身が答えられる質問かどうかがわからない。もし不得意な分野の質問を受講生から受けた場合、回答に時間がかかることによるプレッシャーが焦りにつながり、精神的負荷が高まるという問題が発生する。

そこで、TA が質問対応の前に、質問の内容をある程度把握出来るようにし、TA 自身が回答できない内容であれば、その質問を別の TA に頼むことが出来るようにする。こうすることで、必ず質問が来たら対応しないといけない TA の義務感を軽減することができる。

3.3 順番待ちを円滑に行うための仕組み

受講生からの質問が増加すると、質問の順番待ち行列が発生し、その行列を適切に管理する必要がある。また、受講生によっては、TA が対応するのを待っている間に自己解決できる可能性もある。ここで、自己解決したら順番を抜けられるようにすることは二度手間をなくすためにも重要である。

そこで、システムで質問された順番を管理し、順番が回ってきた受講生に対して、通知を行うことで質問の場への誘導を促す。また受講生の意思で順番から抜けられるようにする。これにより、受講生が自分の質問順番に気付かない問題、TA が受講生に連絡をする手間や通知が飛ばない問題、自己解決しているのに順番を抜けられない問題を解決することが出来る。

4 askTA

提案手法を講義において実運用することを目指し、Web サービスとして実装を行った。なお、受講生や TA を識別するため、大学発行のメールアドレスによる認証システムを使い、ログインを行ってもらうようにした。

4.1 実装

質問のハードルを下げつつ、事前にどのような質問なのかを把握可能とするため、質問投稿フォーム

(図 1) では、質問する課題の番号、質問の種類、質問の概要、できたところまでのプログラムという入力項目を設け、システムへの質問の投稿を可能にした。なお、質問の種類は、「ヒント」「ヘルプ」「問題文に関する質問」「採点に関する質問」「その他」の 5 つを用意し、選択式にした。

ダッシュボード(図 2) では、投稿された質問の状況を一覧で見ることができ、受講生が他の受講生の質問の概要を見れるようにした。ここで、1 つの質問には、質問の種類、質問者の名前、対応した TA の名前、質問の概要という情報をもたせ、質問のステータスは、「TA 待ち」「TA 対応中」「TA 終了」「TA 保留」「学生キャンセル」の 5 つを設けることで、質問対応状況を可視化した。

TA が質問に対応する際には、そのプログラムなどの把握が重要である。そこで質問ごとにシェアエディタ(図 3) を生成し、TA と受講生が同じ URL

(質問 ID) にアクセスすることで、プログラムの共有と共同編集、実行、音声通話を可能とした。また、この画面上で質問の対応開始や、質問の取り下げ(図 4) を設定可能とした。なお、対応中の TA の名前や互いのマウスのカーソルも表示することで、質問対応を容易化している。また、不正行為防止のため、受講生は他者の質問の中身を見れないようにした。

図 5 は、受講生に質問の順番が回ってきたことを知らせる通知である。ここで単純な通知では気づかない可能性があるため、5 秒程度の効果音も鳴らすことで気づきを促した。

本システムでは、当学科のプログラミング教育に Processing が採用されていることから、Web 上で実行を行える Processing.js を Processing と同じような挙動を行うように改良して実現した。なお、Web 上で実行する前にサーバ側の Processing でコンパイルし、実行可能かどうかについて確認を行った。

4.2 使い方

受講生は、システムにログインしたうえで、質問投稿フォームより解決したい質問を投稿する。質問を投稿した後は、自動的にシェアエディタに遷移し、TA が対応可能となるまで、ブラウザのタブとして

システムを開いておいて順番待ちをすることになる。

図 1. 受講生が課題番号や質問の種類、概要、プログラムを入力して質問を投稿するフォーム



図 2. 投稿された質問の状況や内容が一目で分かるダッシュボード (個人氏名はモザイク加工)



図 3. 受講生と TA がプログラムの共有や実行をし音声通話をしながら質問を解決するシェアエディタ

質問キャンセル

図 4. 受講生が質問を取り下げる事が出来る質問キャンセルボタン



図 5. 受講生に順番が来たことを伝えるトースト通知

TA はシステムにログインすると、ダッシュボードを確認でき、質問対応待ちや対応済みなどの質問リストを把握することができる。また、質問をクリ

ックすることでシェアエディタ画面に移り、質問の概要とプログラムを確認できる。ここで、質問やプログラムの内容から対応可能であると判断した場合は、ステータスを「TA 対応中」に変更することで、質問対応を始めることできる。対応不可だと判断した場合は、他の質問をチェックしていくことになる。

TA が「TA 対応中」にステータスを変更すると、受講生には通知が飛び、呼び出しがされる。その後、シェアエディタ上でやり取りを行うことにより質問の解決を行う。なお、受講生が質問の順番までに自己解決できた場合は、シェアエディタ右上の「質問キャンセル」ボタンをクリックすることで質問を取り下げることができる。

5 運用と分析

5.1 運用形態

明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科のプログラミング演習 I の講義において、2020 年 7 月 1 日から 27 日までの毎週月曜日と水曜日に全 8 回の運用を行った。プログラミング演習 I の履修者は学部 1 年生と再履修の学生による 111 名で、TA は主著を含む、大学院生 9 名だった。オンライン講義のためのツールとしては、受講生が複数あるテーブルを自由に移動ができる Remo Conference を使用し、共著者が主として講義を実施していた(図 6)。

講義(100 分の 2 コマ)では、typing.run[1] や予習資料などをもとに予習してきたことを前提に、スライドを用いて説明を行い、講義時間終了までに提出する必要がある課題を課した。受講生は、課題解答中は Remo Conference 上で指定されたテーブルで作業を行い、簡易的な質問は同じテーブルの受講生で助け合い、解決できない質問については askTA で質問してもらった。

5.2 利用状況の結果と分析

運用期間中にされた質問の回数は 367 回だった。そのうち 15 回は、TA が対応する前に受講生によってキャンセルされていた。質問した人と質問回数の関係のグラフを図 7 に示す。1 回以上システムを使って質問した人は 61 名おり、そのうち 5 回以上質問した人は、39.3% にあたる 26 人だった。一番質問回数が多い人は、28 回質問していた。

図 8 は、受講生が質問を投稿した時間と TA が「対応中」にステータスを変更した時間の差を取ることによって、受講生の質問に TA が反応するまでの待ち時間(分)の分布を求めたものである。この結果より、51.6% の質問は、1 分以内に TA が対応していたことが分かる。

図 9 は、TA が「対応中」と「対応終了」にステー

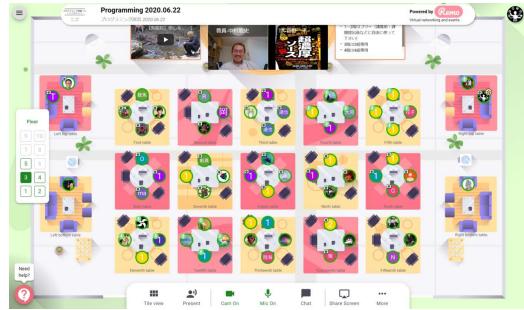


図 6. 中央のテーブルに受講生が座り、周りに TA が質問の待機している講義中の Remo Conference の様子

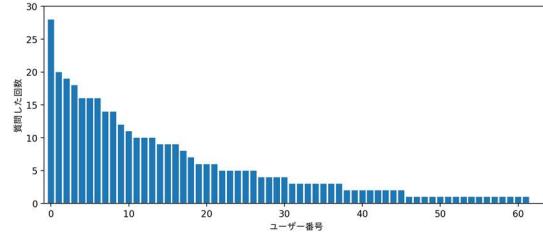


図 7. 質問した人とその回数の関係

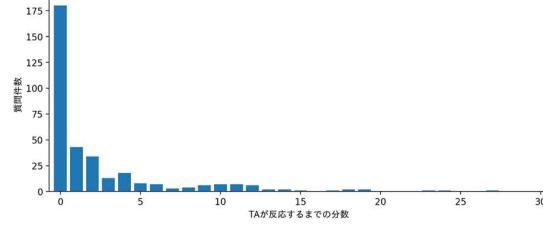


図 8. 受講生の質問に TA が反応するまでの待ち時間(分)の分布

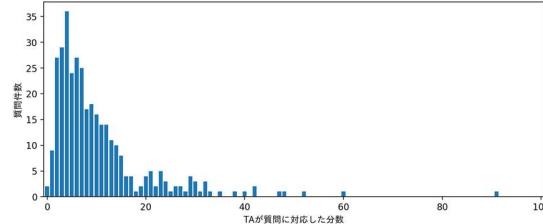


図 9. TA が受講生の質問に対応した時間(分)の分布

タスを変更した時間の差を取り、TA が受講生の質問に対応した時間(分)の分布を求めたものである。この結果より、対応時間が 4 分台の質問がもっとも多かったことが分かる。また、ほとんどの質問は 20 分以内には対応が終わっていることも分かる。

なお、講義中の休憩時間(10 分程度)もシステムを運用しており、図 8 では待ち時間、図 9 では対応時間に休憩時間を含む質問があった。

5.3 受講生アンケートの結果と分析

運用終了後にシステムを使った受講生にアンケートを行った。アンケートでは、54 名 (askTA の利用者は 61 名) から回答を得た。表 1 はそのアンケート

表 1. 受講生のアンケート項目とその分布と平均

質問項目	評価値の分布					平均
	-2	-1	0	1	2	
使った満足度は高いですか？	0	0	3	14	32	1.58
TAに質問する抵抗感が低くなりましたか？	0	3	17	14	16	0.91
プログラミング講義で今後も使いたいですか？	0	0	1	13	35	1.66

表 2. TAのアンケート項目とその分布と平均

質問項目	評価値の分布					平均
	-2	-1	0	1	2	
使った満足度は高いですか？	0	0	1	4	3	1.25
プログラミング講義で今後も使いたいですか？	0	0	1	1	6	1.63

トの結果である。なお、アンケートでは質問に対する5段階評価（-2:全く当てはまらない～2:とても当てはまる）での回答と、自由記述で感想を求めた。

表1より、システムを使って満足度が下がった人や今後の利用はしたくない人はいないことが分かるうえ、回答者の半数以上について、質問への抵抗感を下げることができていることが分かる。

自由記述のポジティブな意見として、「質問を端的に伝えられた」「オンライン講義での質問のしにくさの不安が解消された」「質問することのハードルがかなり下がった」などのように、我々が意図した意見が得られた。また、「プログラムの共有が役に立った」「プログラムを実行できるのが助かった」などの機能に関することも多かった。一方、ネガティブな意見では、「質問を投稿する時に書く概要がうまくまとめられなかった」「プログラムの共有だけでいいと思った」と言った意見も得られた。また、「TAのカーソルが目立つようにしてほしかった」「ボタンを押し間違えた」「実行結果がシステム上では違った」など、実装に関することも多かった。

5.4 TA アンケートの結果と分析

運用終了後に、システムを使ったTAのうち、著者を除く8名にアンケートを行った。アンケートでは5段階（-2:全く当てはまらない～2:とても当てはまる）で評価してもらうとともに自由記述での感想を求めた。

アンケートの結果を表2に示す。この結果から、システムを使うことの満足度が高く、今後も使いたいとTAが感じていると言える。

また、自由記述のポジティブな意見としては「どれぐらいの人がどこで困っているのかが一覧でわかった」「質問状況とその内容をから溜まっている質問の量とその内容を確認できた」「挙手よりも質問に気づきやすい」という提案手法の質問をシステムに投稿することや共有することによるものと思われる意見や、「通知機能ですぐに受講生が来た」という通知

機能によるもの、「受講生が修正する様子がカーソルで見える」「プログラムがリアルタイムに共有されるのでカーソルで指をさせる」「行番号が助かった」「通知機能でも来ない人に対して通話機能で話しかけられた」というシェアエディタの実装に関することが多いことが分かった。また、「askTA単体でTA業務が成り立つ」という意見もあった。一方、ネガティブな意見として、「TAの引き継ぎができないため、他のTAが指導した続きを教えるのがキツかった」「TAも自由に楽に編集できるので教えすぎてしまうことがあった」というオンライン特有の意見や、「TA側にも通知機能が欲しかった」「図を使って説明したかった」「実行環境にバグがあった」という実装に関する意見もあった。また、「askTAに頼り切りな人がいた」という対面講義時と同様にTAに頼り切る受講生がいたこともわかった。

6 考察

6.1 利用状況の考察

図1より、システムを利用した人は受講生の約半分であり、広く利用されていたことが分かる。同じ人が何回もシステムを使って質問していることに関しては、対面講義でもよく見られる現象であるが、TAがヒントを一度与えて、もう一度来るよう指導したことも原因として考えられる。なお、質問回数が最も多かった受講生は再履修生であり、単位を取りるために質問を繰り返していた可能性がある。

図2より、ほとんどの質問は1分以内にTAが対応するが、数分や数十分待つことになった質問もあったため、本手法の通知機能が活躍したと考えられる。なお、TAが質問対応を行うかの選択が可能であるがTA全員が対応しなかった質問はなかった。

また図3より、質問の対応に長く時間がかかることもあります、TAが指導の順番を把握するのは困難であったと言え、システムで順番を管理することでTAの負担を下げる事ができた可能性がある。

askTA を運用した 8 回のうち 1 回の講義で、最初の 30 分以降、Remo Conference に接続できなくなり、最後まで復帰しないトラブルが発生した。しかし、askTA により、特に大きな支障なく受講生は課題に取り組み、TA もその時間に質問された 51 件について十分に質問対応を行うことができていた。

6.2 受講生アンケートの考察

表 1 の結果より、受講生は今後も利用したいと感じており、また TA への抵抗を下げることができていることも示唆された。

自由記述で得られたポジティブな意見は、提案手法の質問するハードルを下げる効果が出ていると言える。一方、ネガティブな意見から、質問投稿時の概要の記述が難しいと感じていることがわかった。実際に、質問の概要には、「よくわからない」「だめなところがわからない」「2 行目がおかしい」「エラーが起こる」などが一定数あった。これは、受講生に概要の書き方を指導しなかったことで起こったと考えられるため、指導により改善可能である。なお、質問の概要是講義実施者である教員が、課題解決にどういった問題が発生しているかをダッシュボードから容易に把握できるため、適切なタイミングで全体向けのヒントを提示することにつながっていた。

6.3 TA アンケートの考察

表 2 の結果より、TA はシステムを好意的に捉えていたことが分かる。また、自由記述からは、提案手法の順番待ちをしっかりと行えること、質問が事前に分かること、通知機能が評価されていることが分かった。さらに、カーソル位置の共有や通話機能などのシステムの細かい実装や些細な工夫が評価されていた。しかし、同じ受講生に対して同じ TA が対応できないことや、システムを使うことによって受講生に教えすぎてしまうことは、オンライン特有の柔軟性がない点やアクセスのしやすい点に起因していると考えられる。一方、TA も質問が来たことの通知が欲しいなどの機能に関する意見は、実装に反映し改善を行った。TA によってシステムの使い方や重視する機能が異なると考えられるため、意見を収集しながら機能や GUI 改善を行っていきたい。

7 まとめと今後

本研究では、大学のプログラミング演習型のオンライン講義において、受講生が TA へ質問するハードルが上昇してしまう問題と TA が精神的負荷を覚える問題、質問の順番待ちを円滑に行う必要がある問題に対して、質問をシステムに投稿し呼んでもらうことで、質問する心理的ハードルを下げるとともに、TA 側も事前に質問を把握することで精神的負

荷を下げることができる手法を提案および実装し、実際の講義における運用でその有用性を明らかにした。また、学生の困っていることを俯瞰できること、オンライン講義のためのシステムが落ちても対処できることなどの副次的な効果もあった。

今後は、質問を投稿する時に書く概要が難しいという意見に対して、著者らが以前取り組んでいた、抽象的思考を用いた受講生と TA のプログラミング教育円滑化手法[7]を応用し活用することで、プログラムを思考する力を鍛え、自己解決を支援するとともに、TA が指導しやすくする手法を実現していく予定である。また、実現したシステムを様々な大学で利用してもらうことにより、オンラインにおける学びを支援していきたい。

謝辞

本システムを講義で活用してくれた明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科の 8 期生及び、対応してくださった TA のみなさまに感謝します。

参考文献

- [1] 又吉康綱, 中村聰史. typing.run: 初学者のプログラミング学習を支援するプログラムタイピングシステムの提案と実践. 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI). Vol.2020-HCI-189, No.1, pp.1-8, 2020.
- [2] 井垣宏, 齋藤俊, 井上亮文, 中村亮太, 楠本真二. プログラミング演習における進捗状況把握のためのコーディング過程可視化システム C3PV の提案. 情報処理学会論文誌. Vol.54, No.1, pp.330-339, 2013.
- [3] 市村哲, 梶並知記, 平野洋行. プログラミング演習授業における学習状況把握支援の試み. 情報処理学会論文誌. Vol.54, No.12, pp.2518-2527, 2013.
- [4] 加藤利康, 石川孝. プログラミング演習のための授業支援システムにおける学習状況把握機能の実現. 情報処理学会論文誌. Vol.55, No.8, pp.1819-1930, 2014.
- [5] 栗原一貴, 西田健志, 濱崎雅弘, 築瀬洋平, 渡邊恵太. 消極性デザイン宣言 - 消極的な人よ、声を上げよ。……いや、上げなくてよい。ビーエヌエヌ新社, 2016.
- [6] 西田健志, 五十嵐健夫, 傘連判状を取り入れたコミュニケーションプロトコル. 情報処理学会論文誌. Vol.51, No.1, pp.45-53, 2010.
- [7] Y. Matayoshi, S. Nakamura. Abstract Thinking Description System for Programming Education Facilitation. In Proc. HCII '20, Vol. 12206, 2020.

視覚・聴覚フィードバックによるフィールドホッケーの プッシュ練習支援システムの提案と実装

岩本宗大 * 大西鮎美 * 寺田 努 * 塚本昌彦 *

概要. フィールドホッケーはスティックと硬球を用いて行われる球技でありスティック操作が難しいが、日本では指導者が少ない。また、初心者はスティック上のボールの位置を自己把握できない。本研究では、フィールドホッケーの基本動作であるプッシュ技術を向上させるために、スティック上のボールの接触位置の移動経路を可視化、可聴化するシステムを提案、実装した。提案システムでは、プッシュ動作時にボールが通る軌道上に圧力センサを配置し、ボールとの接触判定を行ってスティック上のボールの移動経路を検出し、移動経路情報を可視化・可聴化してユーザに提示する。評価実験の結果、視覚フィードバックを与えたときには有意にボールの移動距離が長くなったため、提案システムを用いた視覚フィードバックの有効性を確認できた。聴覚フィードバックでは、フィードバックの有無で移動経路に顕著な変化はみられなかった。

1 はじめに

フィールドホッケーはイングランド発祥のスティックと硬球を用いて行われる11人制の球技である。男子は1908年、女子も1980年よりオリンピックの正式種目となるほど世界的に人気のあるスポーツであり、ヨーロッパなどではプロリーグも存在する。

フィールドホッケーはスティックを用いた基本動作が難しく初心者は上達に時間がかかるため手厚い指導が必要である。しかし、日本では幼少期の競技人口が少ないとことから、高校や大学の部活動などではほとんどが初心者で構成されたチームが多く[1]、初心者に対して的確なアドバイスができる指導者や経験者が少ないといった問題がある。

フィールドホッケーの基本動作の中の一つにプッシュと呼ばれる動作がある。プッシュはスティックにボールをつけたまま押し出す動きにより、ボールを地面に沿って浮かさずに打ち出す動作で、正確さの求められるパスを打つときに用いる。ゴルフのようにスイングするヒットという打ち方と比較してボールを打ち出すまでの動作時間が長く、味方へ正確なパスを送ることができる。強いプッシュを打ち出すには図1のようにボールとスティックの接触を保ちながら、ボールをスティックの根本から先へ向かうように押し出す動作が理想とされるが、初心者は自分ではボールの接触位置がどこであったのかを把握することは難しい。また、第三者からも詳細なスティック上のボールの接触位置の移動経路はわからないため、ボールの移動経路が把握できず、それが上達への第一の障壁となっている。そこで、ボール接触位置の移動経路がわかれればスティックの扱い方の改善点がわかり強いプッシュを打ち出せるようになると



図 1. プッシュ動作時のボール移動

考え、本研究ではフィールドホッケー初心者のプッシュ技術向上のためにボールをスティックで打った時の打面上におけるボールの接触位置の移動経路を可視化、可聴化するシステムを提案する。これにより、フィールドホッケー初心者でも微妙な接触位置の違いやスティックの扱い方がわかるためプッシュ技術向上が期待できる。

本研究の貢献は以下の2つである。

- フィールドホッケーのスティック打面上のボールの移動経路を可視化・可聴化するシステムを提案、実装した。
- 初心者に対して行った評価実験から視覚フィードバック手法が有意にスティック上のボールの移動を増加させることを確認した。

以下、2章では関連研究について述べ、3章では提案システムについて紹介する。4章では実験結果について議論し、5章で本論文をまとめる。

Copyright is held by the author(s).

* 神戸大学大学院工学研究科

2 関連研究

2.1 センシング技術を用いたスポーツ上達支援

センシング技術を用いたスポーツ上達支援に関する研究は数多く行われており、様々なセンシング・フィードバックシステムが考案されている。ゴルフスイングをセンシングする研究として、穂刈らは、手、腕、腰、肩に加速度センサを装着し、ドライバースイング中の身体のそれぞれの回転運動を計測するシステムを提案した[2]。実験により、コック運動、ロール運動、ねじれ運動の定量化を実現し、初心者と経験者との差を比較できることを示した。さらに穂刈らは、その後の研究で身体のねじれ運動に加えて、光センサとハイスピードカメラを用いてスイングスピードとボールの初速を計測しゴルフの平均スコアを推定するシステムを提案した[3]。22名のアマチュアゴルファーに対してドライバースイングの諸運動から得られる情報を用い、誤差3%で平均スコアが推定できた。ゴルフとフィールドホッケーはそれぞれクラブ、スティックといった道具をスイングする点で類似していることから、ゴルフで行われている手法はフィールドホッケーに応用できる可能性がある。しかし、フィールドホッケーは動きながら競技するスポーツであるため、ゴルフとは違い静止状態で計測できるわけではない。

増田らは、テニスにおいて初心者がコーチ無しでも上達できる環境の構築のためにウェアラブルモーションセンサとアドバイス画面によるフィードバックシステムを提案した[4]。実験により、振り切り、手打ち、スイングスピード、足の停止、ボールの凝視、テイクバックの6つの課題において、初心者に対して正しいアドバイスを送る判定が行えることを示した。また、邵らは小型9軸ワイヤレスモーションセンサを用いて、異なる競技レベルのバドミントンプレイヤーがバドミントンコートでシャトルを打ち合う際、双方のラケットの加速度を計測するシステムを提案した[5]。実験により、上級者は初心者、中級者と比べて動き出しが早いことがわかり、上達するためには予測能力を鍛える必要があるということがわかった。このようにフィールドホッケーと同じように道具を用いたスポーツにおいて、視覚情報によるフィードバックを用いた上達支援や、初心者と上級者との違いを検出し初心者の上達のための必要なスキルを調べる研究が行われている。したがって、スティックを使用するフィールドホッケーに対しても同様に、センシング技術とフィードバックシステムを用いた初心者の上達支援を行うことができると考えられる。

2.2 フィールドホッケーのセンシング

センシング技術を用いたフィールドホッケーの研究として、Tremayneらは、フィールドホッケーの

スティックに加速度センサを装着し、スイングに関する練習を数週間課した前と後のスイング時のスイングスピードを測り、比較することでヒット練習の有用性を調べた[6]。実験により、スイングスピード向上のために有用な練習と成果の得られない練習があることを示した。Thielaらは、1回のスイングにかかる時間を計測するため、スティックに加速度センサを装着し、初心者と経験者のスイング時間と比較した[7]。その結果、初心者と経験者ではスイングの時間に大きな差があることがわかり、スイング時間の違いで提案する練習メニューを変えられるようになった。Meulmanらは、フィールドホッケーの上級者向けに応用動作であるドラッグフリックのトレーニング装置を作成し、ドラッグフリックの上達と床反力計を用いて足にかかる負担を調査した。実験の結果、トレーニング装置を使うことでボールのスピードが上昇し足にかかる負担も軽減されたことからトレーニング装置がドラッグフリック上達と身体への負担軽減に役立つことを示した[8]。このように、フィールドホッケーに関しては、加速度センサを用いて選手の技術レベルの差を測る研究や上級者向けのトレーニングツールによる上達支援の研究は行われているものの、スキル上達のための初心者に向けた研究は行われていない。

Jenningsらは、フィールドホッケーのスティックの先端に加速度センサ、ボールが通るスティック上の軌道に沿って圧力センサを装着し、シュートで使われるドラッグフリックを打つ時のボールの位置と力の加わり方を調べるシステムを提案した[9]。その結果、ボールの位置とスティックにかかる圧力はドラッグフリックをする際に重要であることがわかった。このドラッグフリック動作はプッシュの応用的動作であるため、初心者がプッシュを学ぶ際にそのまま適応できないと考えられるが、プッシュ動作に対して圧力センサを用いることは有効であると考えられる。よって本研究では、フィールドホッケーのプッシュ動作におけるスティック上のボールの移動経路をスティックの打面上に圧力センサを配置して検知する。

3 提案システム

プッシュ技術向上のためにスティック打面上におけるボールの接触位置の移動経路を可視化、可聴化するシステムについて述べる。

3.1 機能設計

プッシュ技術を向上させるシステムを設計するにあたり、

- 対象者のレベル
- 現状の把握と矯正
- フィードバック方法と提示タイミング

視覚・聴覚フィードバックによるフィールドホッケーのプッシュ練習支援システムの提案と実装

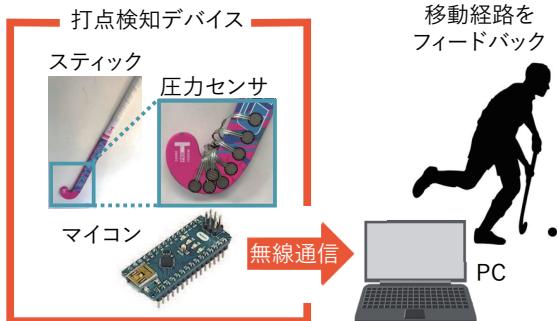


図 2. 提案システムの構成



図 3. 圧力センサの配置

を考える必要がある。

対象者のレベルは全く競技を経験したことのない初心者、競技歴が短い初心者、中級者、上級者が考えられるが、フィールドホッケーは1章でも述べたように、初心者の上達に課題がみられることから本論文では初心者を対象としたシステムを設計する。

プッシュ技術を向上させるために、ユーザへのフィードバックはユーザ自身の現状を把握させることと、矯正を促すものの2パターンが考えられる。プッシュはスティックにボールをついたまま押し出す動きにより、ボールを地面に沿って打ち出す動作であり、強いプッシュを打ち出すためには図1に示すように、打つ際にスティック打面上でのボールの移動経路を長くして、身体全体の力をボールに伝える必要がある。しかし、本論文で対象とする初心者は、自分自身で接触位置の移動経路を認識するのが難しい。スティック打面上におけるボールとの接触位置の移動経路がわかれればスティックの軌道や向きを修正することができるため、まず接触位置を把握させることが改善に有効と考え、どのように接触位置を移動させながらプッシュを打ち出しているのかという現状をユーザ自身に把握させる。

フィードバックの種類は、一般に視覚、聴覚、触覚によるものが考えられる。本研究ではボールの移動経路をユーザに提示するため、触覚より一度に提示できる情報量の多い視覚と聴覚フィードバックを採用する。

フィードバックのタイミングは、ヒットの動作中にリアルタイムでユーザの状態を知らせる方法と、動作後にその動作の結果を提示する方法が考えられる。視覚フィードバックでは提示画面を見ながらプッシュ動作を行うことは困難であることから、動作後にその都度移動経路を提示する。聴覚フィードバックではスティック上をボールが移動している感覚をつかみやすいようにプッシュ動作によりボールがスティックに触れているときに打点ごとに異なる音が鳴るリアルタイムフィードバックを行う。

3.2 システム構成

提案システムの構成を図2に示す。提案デバイス

では図3のようにプッシュ動作時にボールが通るとされるスティック上の軌跡に8つの圧力センサを配置する。8つのセンサ値がマイコンを通じてPCに送信され、その値に基づきユーザはボールの移動経路のフィードバックを受ける。提案デバイスでは、スティックにGryphon社のターピング SAMURAI(ヘッド形状: オーバーサイズマキシ, サイズ: 37.5インチ), 圧力センサはInterlink社のFSR402, マイコンはArduino社のArduino Nanoを用いた。センサのサンプリング周波数は20Hzである。

接触位置の経路移動の検出方法

スティックとボールの接触はスティック上の圧力センサ値から判定する。接触判定では、センサ値が閾値を超えたときに接触とする。この接触判定をスティック上の各センサに対して行うことで、8つのセンサとボールの接触の有無から移動経路が検出できる。なお、今回は空気抵抗などによる雑圧を除去するため閾値を0から255まであるセンサ値のうちの2とした。押し出しが強くコントロールの良い理想的なプッシュは、本システムの圧力検知領域では図3における0-3番で接触し始め、4-6番でボールを押し出す動作となる。7番までボールが移動してしまうと、リリース前にスティック先端から外側へボールが離れてしまい、狙った位置に飛ばないことがあるため、6番までにボールが離れることが望ましい。

視覚フィードバック手法

視覚フィードバックでは、プッシュ動作後にボールが通った接触位置の移動経路とリリース時の圧力値を図4(a)のようにPCの画面上に提示する。例えば、図3における2, 3, 5番にボールが触れてボールが押し出された際、図4(a)のように接触したスティック上の位置に色がついて表示される。ユーザは自分がスティック上のどの位置からボールを接触させ始めどの位置でどれくらいの力でボールを押し出したかを目視で把握することができるため、移動経路が長くなることが期待できる。



図 4. フィードバック方法

聴覚フィードバック手法

聴覚フィードバックでは、リアルタイムでボールの接触した位置に応じて図4(b)のように装着した圧電スピーカにより異なった音程の音を鳴らし、ユーザーに接触位置のフィードバックを行う。音の音階は、ボールが接触した位置が0番では低い音(C4)が鳴るように、7番では高い音(C5)が鳴るように、番号が大きくなるにつれて一音ずつ高い音となるように設定した。リアルタイムに音が鳴るため、ユーザは接触位置と音の対応からスティック上のボールの位置やその移動の感覚がつかみやすくなると考えた。これによりスティックの扱い方が上達し、移動経路が長くなることが期待される。

4 実験

4.1 予備調査

上手く打ったときに期待通りに移動経路が長くなることを確認するため、予備調査としてフィールドホッケー経験者1名(競技歴3年半)を経験者としてフィードバック無しで10回プッシュ動作を行わせ、その際のボールの移動経路を記録した。結果を図5に示す。グラフの縦軸はボールが通ったスティック上のセンサの番号を示しておりボールがリリースされた点で線が途切れている。図中では、10回分のデータを色分けして示している。なお、見やすくするために各データを少しずらし重ならないように表記している。スティック上の移動経路に関して、経験者はほぼ全ての試行においてスティックの先端(センサ番号4, 5, 6番)にボールが移動しながらプッシュ動作ができており、スティックの押し出す力を上手くボールに伝えられている。また、ボールが当たり始めたときのセンサ番号とリリースされたときのセンサ番号の差を移動距離とし、その合計を試行回数で割った値を平均移動距離とすると経験者の平均移動距離は3.0であった。このように経験者だと想定通りにスティック上の理想的な移動経路が検出できていることを確かめた。

4.2 評価実験

提案システムを用いてプッシュを行った際に移動経路が長くなるかを確かめるため、図6のように評

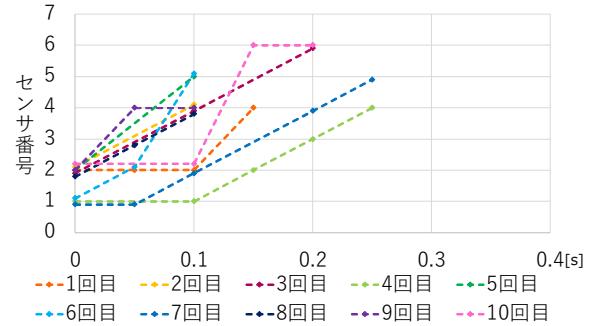


図 5. 経験者のボールの移動経路



図 6. 実験の様子

価実験を行った。被験者はプッシュ技術を習得できていない初心者の男性3名、女性1名である(被験者A, B, C, D)。被験者は約3分間のプッシュ練習を行った後、システムによるフィードバック無し、有り、無しの順でそれぞれプッシュを10回ずつを行い、そのときのボールのスティック上の移動経路及び平均移動距離を記録し、評価を行った。フィードバック無しの2回目はシステムの機能利用をやめた後でも上達が維持されているかどうかを調べ、システムからの離脱可能性を評価するために行う。実験順序の影響を考慮するため被験者A, Bは先に視覚フィードバックの実験を、被験者C, Dは先に聴覚フィードバックの実験を行った。また、フィールドホッケーは利き手にかかわらず持ち方、スイングが同じであるため、利き手に関する議論は行わない。使用したボールは、Daito Baseballのサンドボール(質量: 150g、直径: 48mm)である。

4.3 結果と考察

プッシュ実験におけるスティック上のボールの接触位置の移動経路の結果を表1に、被験者Aの具体的なボールの移動経路を図7、図8に示す。初心者は経験者と異なり、プッシュ動作の中でボールがスティックに当たった位置から移動せずリリースされる結果が多くみられた。以下、個々の結果を議論する。

視覚・聴覚フィードバックによるフィールドホッケーのプッシュ練習支援システムの提案と実装

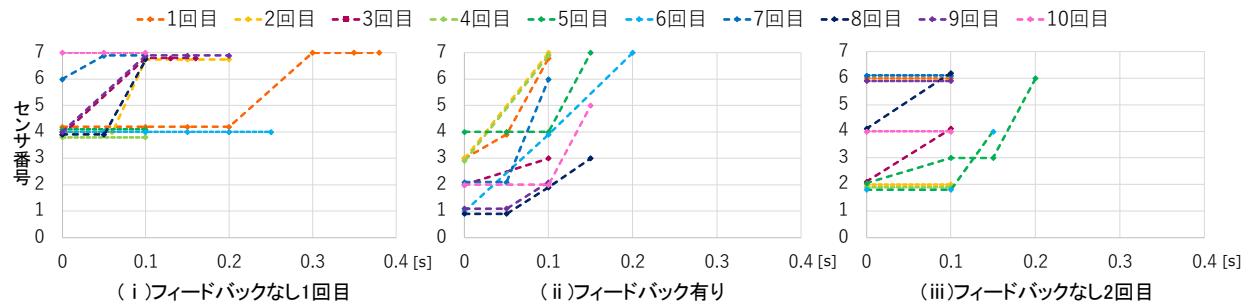


図 7. 被験者 A の視覚フィードバック実験結果

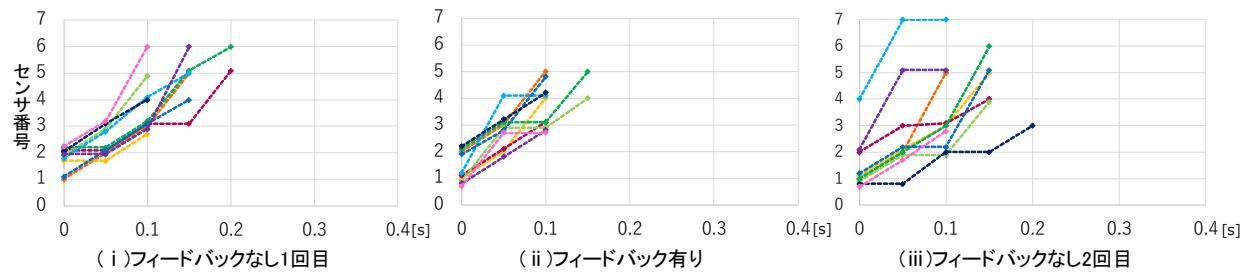


図 8. 被験者 A の聴覚フィードバック実験結果

表 1. 平均移動距離

方法	提示の有無	A	B	C	D
視覚	無し 1回目	1.7	1.8	3.7	1.4
	有り	3.2	3.1	3.8	1.6
	無し 2回目	1.0	2.0	3.5	1.3
聴覚	無し 1回目	3.1	1.8	3.4	1.7
	有り	2.9	2.4	3.8	1.9
	無し 2回目	3.2	1.8	3.8	1.2

視覚フィードバック

視覚フィードバックについて、表1に示すように、フィードバックのないときの平均移動距離が短くなっているのに対し、フィードバック有りのときの平均移動距離が長くなっていることから視覚フィードバックは被験者にとって理想的なプッシュ動作の習得に役立っていると考えられる。また、これら平均移動距離をそれぞれフィードバック無し1回目、フィードバック有り、フィードバック無し2回目を条件とし、被験者それぞれの平均移動距離を標本として被験者内一要因分散分析を行った結果、有意差がみられた($F(2, 6) = 4.31, p < 0.05$)。さらに、LSD法を用いて多重比較を行ったところ、フィードバック有りのときの移動距離がフィードバック無し2回目の移動距離より有意に大きかった($MSe = 0.246, p < 0.05$)。詳細なグラフをみると、被験者Aはフィードバック

無しの時は図7に示されるように、ステイック上のボール移動を伴わないままリリースされた試行や移動距離の少ない試行が多くみられた。しかし、フィードバックを行うと移動距離の大きいボールが先端に向かって移動しており、この傾向はほかの被験者にもみられた。また、フィードバック無しではボールが4-6番接触し始めることが多かったのに対して、フィードバック有りでは1-3番で接触し始めることが多く、かかるべき場所にボールが当たっていることがわかる。したがって、視覚フィードバックが移動距離の増加に寄与することが確認できた。しかし、フィードバック無し2回目での試行では移動経路が再び短くなってしまっておりフィードバックの効果が維持できていなかったことがわかる。その理由としては、今回の10回というフィードバック有り試行の回数が上達が定着するほど長くなかったことが考えられるため、今後は長期の実験を行いフィードバックがある状態の練習回数を増やし、繰り返しシステムを利用することでフィードバック無しの際でも上達が見られるようになるかを評価し、離脱可能なシステムを目指す。

聴覚フィードバック

聴覚フィードバックについて、表1に示すようにフィードバック有りのときに最も移動距離の長いプッシュを行えていたが、フィードバックなしのときと比べて大きな変化はみられなかった。視覚フィードバック時と同様に被験者内一要因分散分析を行った結果、有意差はみられなかった。実際に、図8のよ

うに接触位置の移動経路についてはフィードバック無しと有りで目立った変化はみられず、すべての動作においてスティック上のボールの移動が伴っていた。また、聴覚フィードバックから先に行つた被験者C, Dについてもフィードバックの有無で大きな変化はみられなかったことから聴覚フィードバックは初心者のユーザにとってあまり有用でない可能性がある。

4.4 議論

検定の結果からシステム利用中の効果としては、視覚フィードバックが効果があることがわかった。一方、フィードバックの効果はフィードバックなし2回目には維持されなかった。しかし、これはフィードバック有りの試行回数が少ないために実際に上達するまでには至らなかつた可能性があることから、今後はフィードバック有りの回数を増やし評価を行う。

被験者Cのボールの移動経路は経験者と同様全体的に3以上と長かったが、ボールが押し出されるスピードは比較的遅かった。本研究ではボールの移動経路を長くする提示手法を提案しその有効性を確かめたが、移動経路の長さはプッシュの上達に必要な要素のひとつで、かつ第一段階である。移動経路が長くなつた後にはさらにスイングを速くすることや下半身の体重移動、重心を落とすことの要素に着目し、スティックによる押す力をボールに効率的に伝えることができるよう支援することが望ましい。

聴覚フィードバックについて、フィードバックによりスティック上のボールの移動経路が長くならなかつた理由として、出力される音階の幅が全体で1オクターブと狭すぎたために当たつた位置と場所が対応付けできなかつたのではないかと考えられる。プッシュ自体が約0.2秒ほどで完了する動作であるため音の違いがはっきり聞こえるよう音階の幅を広げると効果が出る可能性がある。

5 まとめ

本研究では、フィールドホッケーの基本動作であるプッシュ技術を向上させるために、スティック上のボールの接触位置の移動経路を可視化、可聴化するシステムを提案、実装した。提案システムでは、プッシュ動作時にボールが通る軌道上に圧力センサを配置し、スティック上のボールの移動経路を検出する。移動経路の視覚フィードバックでは、検出したボールの移動経路および接触の強さをPC画面上に表示し、ユーザは打った後に画面上で経路を確認する。聴覚フィードバックでは、スティックに搭載した圧電スピーカでリアルタイムに当たつた位置に応じて異なる音程の音を出力する。実験の結果、視覚フィードバックを与えたときには有意にボールの移動距離が長くなつたため、提案システムを用いた視覚フィードバックの有効性を確認できた。聴覚

フィードバックでは移動経路に大きな変化はみられなかつた。

謝辞

本研究の一部は、JST CREST(JPMJCR18A3)および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 久保和之, 柳承辰, 守能信次:マイナー競技種目の社会化:実業団ホッケー選手に着目して, 中京大学体育学論叢, Vol. 38, No. 2, pp. 37–43 (Mar. 1997).
- [2] 穂苅真樹, 土岐仁, 鳴尾丈司, 蘆田浩規:ゴルフクラブスイング時の身体回転運動の計測とスキル評価, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 715, pp. 850–856 (Mar. 2006).
- [3] 穂苅真樹, 渡辺嘉二郎:ドライバースイングとゴルフスキル—ニューラルネットワークを用いた平均スコア推定—, スポーツ産業学研究, Vol. 9, No. 2, pp. 35–45 (Sep. 1999).
- [4] 増田大輝, 田坂和之, 大岸智彦, 小花貞夫:ウェアラブルセンサを用いたテニス上達支援システムにおけるスイングフォーム分析手法の改善と評価, 研究報告モバイルコンピューティングとペイペイシブシステム(MBL), Vol. 14, pp. 1–8 (Nov. 2015).
- [5] 邵建雄, 張禎, 金謙樹, 藤巻裕昌, 湯海鵬:バドミントンのストロークにおける予測に関する研究, バイオメカニズム学会誌, Vol. 43, No. 2, pp. 134–139 (June 2019).
- [6] M. Tremayne, D. V. Thiel, and S. Nottle: Accelerometer Measures of Field Hockey Skills Development, *Journal of the Sports Technology*, Vol. 4, No. 3–4, pp. 122–127 (Aug. 2011).
- [7] D. V. Thiel, M. Tremayne, and D. A. James: Monitoring Stick Speed and Ball Control in Field Hockey Drills Using a Stick-Mounted Inertial Accelerometer, *Journal of the Procedia Engineering*, Vol. 34, pp. 574–579 (Mar. 2012).
- [8] H. N. Meulman, M. A. M. Berger, M. V. Zande, P. M. Kok, E. J. C. Ottevanger, and M. B. Crucq: Development of a Tool for Training the Drag Flick Penalty Corner in Field Hockey, *Journal of the Procedia Engineering*, Vol. 34, pp. 508–513 (Mar. 2012).
- [9] M. J. Jenningsa, I. Blanchonettea, S. R. Lucasa, S. W. Morganb, R. J. N. Helmera, and C. Yangc: Instrumentation of a Field Hockey Stick to Detect Stick and Ball Interaction during a Drag Flick, *Journal of the Procedia Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 2979–2984 (June 2010).

SectionsNote: セクションを考慮してレイアウトおよび閲覧できるデジタルノート

越後 宏紀 * 五十嵐 悠紀 *

概要. 本稿では、多くの教科で利用されているノートに着目し、従来のノート学習を中心とした授業を行いつつ、授業準備の改善や授業中の把握を容易とすることを目的としたタブレット端末で利用するデジタルノートシステム「SectionsNote」を提案する。提案システムでは、ノートのレイアウトを容易に制作でき、教師の授業準備の時間短縮が期待できる。また、教師が授業中に児童のノートを閲覧する際、読み取りやすく、かつ把握しやすい適切な表示方法について実験を行い、4-6名分のノートを1画面で表示する方法が適切であることが示唆された。加えて、小学校に勤務する教師にインタビューを行い、教育現場で実際に利用するためのシステムの改良について議論した。

1 はじめに

日本の小学校の教育現場では、ノートを使用した授業が主流である。ノートを中心とする授業の特徴は、児童が授業の振り返りをするとき、一目で授業の内容を把握できることである。また、板書だけではなく「自分の考え」や「友達の考え方」、「気づいたこと」といったことがらをノートに記述しておくことで、児童自身の思考の整理ができ、授業内容の理解や学習活動が促進される。

日本ではGIGAスクール構想が進み、1人1台端末環境の実現や学校のICT環境設備が進んでいるものの[1]、ノートを中心とした授業形態を維持することが望ましいと多くの教師は考えているため、デジタル機器を授業中に効果的に使用している教師はほとんどいない。PISA2018の調査によると、日本は学校の授業におけるデジタル機器の利用時間がOECD加盟国(37か国)中最下位であることが分かっている[4]。

そこで我々は、ノートを中心とした授業形態が可能であり、かつ円滑な授業が行えるデジタルノート「SectionsNote」の実現を目指す。このシステムでは、「自分の考え方」や「気づいたこと」といった、ノートに記述する際の大まかなまとまりに着目し、このまとまりのことを本稿では「セクション」と呼ぶ。

ノートは文部科学省の観点別学習状況の評価において、思考力・判断力・表現力等の観点において重要な位置づけであるものの、従来の紙媒体のノートではいくつもの問題点がある(図1)。

本稿では、システム開発の初期段階として、授業例として推奨されている21種類のノートのレイアウト[14]を参考に、開発したシステムでレイアウトすることが可能であるか検証し、21種類すべてのレ

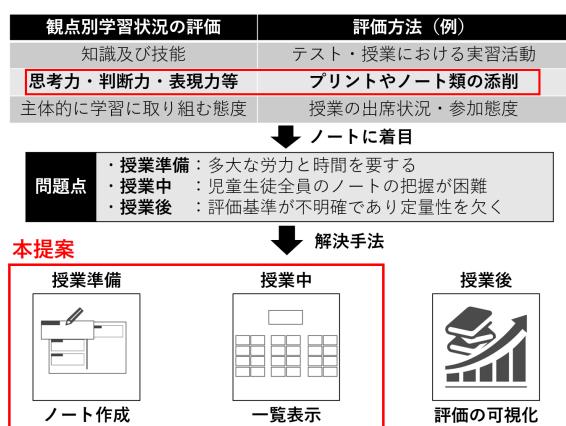


図 1. 提案システム「SectionsNote」が解決したい問題と本稿の位置づけ。

イアウトが制作できることを確認した。また、授業中にタブレット端末上に表示する人数を4種類用意し、どの人数が授業中に閲覧しやすいかについて13名のユーザ実験により明らかにした。加えて、2名の小学校教師にインタビューを行い、本システムの有効的な活用方法について議論した。

本稿の貢献は、ユーザが本システムを利用することで、セクションを考慮して様々なノートのレイアウトを作成できることを確認したこと、および教師が授業中に閲覧する際の適切な表示手法について評価したことである。

2 日本の教育スタイル

2.1 ノートのレイアウト

2.1.1 セクション分け

ノートのレイアウトについて明確な決まりはないものの、特に小学校の算数では、図2のように「問

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学

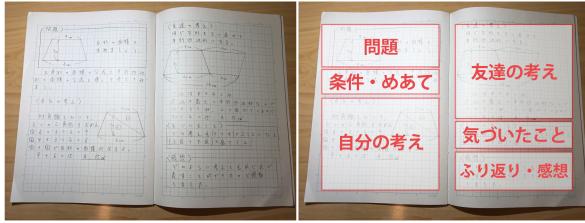


図 2. 実際に小学校の児童が記入したノート. セクションごとに分けて構成していることがうかがえる.

題」「めあて」「自分の考え」「友達の考え」「気づいたこと」「ふり返り・感想」といったセクションを組み合わせながら、ノートのレイアウトを構成することが多い[10, 11, 14]. これは、児童自身の思考の整理に役立つことや、復習時に見やすいことが要因であると考える. 本稿では、このセクションを組み合わせてレイアウトを構成する方法を参考とした.

2.1.2 見開き 1 ページ

算数の教科では、1960 年代ごろから秋田県を中心にシート学習と呼ばれる学習方法がある[16]. シート学習とは、1 回の授業でシート 1 枚ずつを児童全員に配布し、そのシートに児童が書き込むことで授業を展開するというものである. シートはセクションごとに枠が設けられており、その枠内に児童が書き込むようになっている. このシート学習は、ノート学習が主流になったことで現在はほとんど使われていないものの、現在のノート学習はシート学習の利点を受け継いでいる. 現在は、図 2 のように 1 回の授業で見開き 1 ページにまとめるというノートを中心とした学習方法を多くの教師が取り入れている[14]. この学習方法の主な利点として、以下の 3 つがあげられる.

- 授業の「めあて」が 1 回の授業につき 1 つに絞られ、学習活動が促進される
- 児童が自分の考えを表現することができ、自己解決型の授業が可能となる
- 児童自身が授業後に振り返りやすい

一方で、この学習方法に適したノートのレイアウトを毎回の授業準備で制作するためには、多大な労力と時間が必要である. そのため、様々な見開き 1 ページのレイアウトを容易に制作できるシステムを開発した.

2.2 授業中の机間指導

日本ではまた、授業中に机間指導と呼ばれる教育方法がある. 机間指導とは、児童が個々で問題に取り組んでいる間に教室の中を歩き回り、児童の記述しているノートを立ち止まって見ながら、アドバイスをしたり、児童の意見を聞いたりと、教室全体の

問題に取り組んでいる様子を把握するというものである. 机間指導は多くの授業で行われているものの、1人の教師が授業中に教室にいる児童全員のノートを把握することは困難である. この問題を解決するために、本稿では複数人のノートをまとめて表示するインターフェースについて調査を行った.

また LoiLoNote[2, 8] や、MetaMoji Classroom[3] を利用することで、児童と教師がリアルタイムに共有することができるものの、授業全体を通した児童自身の思考の整理が捉えづらく、ノート学習を支援することはできていない. 我々の目指すシステムは、従来のノート学習の利点を生かしつつ、これらの授業支援システムと同様に教師と児童とのリアルタイムの共有を行うことができるシステムである.

3 提案システム 「SectionsNote」

本稿で提案するデジタルノート「SectionsNote」は iPad(Apple 社製 iPad 第 7 世代) とデジタルペン (Apple 社製 Apple Pencil) を使用することを想定したシステムである. iPad は GIGA スクール構想に伴い、価格や性能から 1 人 1 台の端末として選択する学校が多いと想定されているため採用した. SectionsNote には、(1) セクションを考慮してノートのレイアウトを制作できる、(2) セクションごとに閲覧することができる、といった 2 つの特徴がある.

セクションは、図 2 にあるような算数の授業を参考とし、「問題」、「めあて・条件」、「自分の考え」、「友達の考え方」、「気づいたこと」、「ふり返り・感想」の 6 つのセクションを組み合わせて設計することとする. SectionsNote は Unity で制作している.

3.1 レイアウト作成

教師は、SectionsNote を使用して、教室で授業を行う前に、ノートのレイアウトを考えながら計画する. 図 3 にレイアウトする過程を示す. SectionsNote には、システムの左側にセクションパネル、右側にレイアウトパネルがある. セクションパネルには、ノートのレイアウトに使用する 6 つのボタン、画面切り替えボタン、および保存ボタンがある(図 3(a)). レイアウトパネルは方眼紙のようなデザインになっている. これは、日本の小学校で広く利用されている既存の紙媒体のノート[5] を参考とした.

教師はまず、セクションパネルにあるボタンを選択し、デジタルペンをレイアウトパネルに向かってドラッグすることでセクションを配置する位置を決める(図 3(b)). セクションの大きさは方眼紙の 1 行ごとに調整が可能であり、教師の自由な大きさに調整することが可能である(図 3(c)). この動作を各セクションで繰り返し、ノートのレイアウトを完成させていく(図 3(d)). システムの左下にある保存ボタンを選択すると、レイアウトが保存され、児童はこのレイアウトを使用して書くことができる.

SectionsNote: セクションを考慮してレイアウトおよび閲覧できるデジタルノート

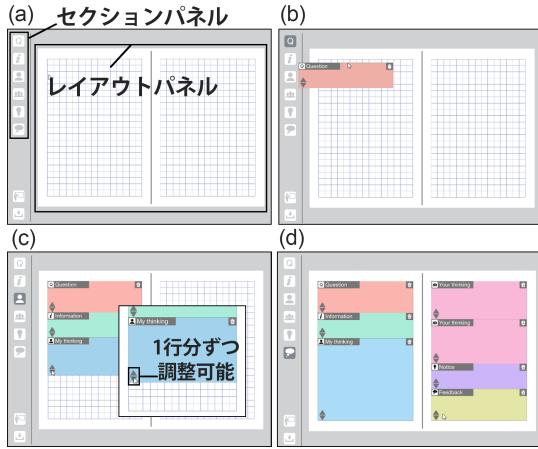


図 3. SectionsNote でレイアウト作成している画面.

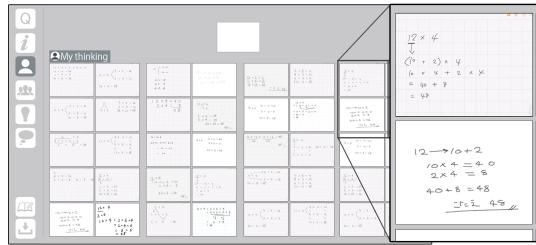


図 4. 閲覧画面例.「自分の考え」を選択し、教室全体を閲覧している様子.

3.2 セクションごとの閲覧

教師は、児童が各セクションの領域で書いている内容をリアルタイムで確認することができる(図4).閲覧する画面では、システムの左側にセクションパネル、右側は閲覧パネルがある。閲覧パネルに表示されているものは、教室を上から俯瞰していることを想定して表示している。例えば、教師が「自分の考え」のボタンを選択すると、教師は児童全員の「自分の考え」の領域で書き込んでいる内容がリアルタイムで確認できる。

セクションごとに分かれて閲覧できることで、教師は授業中に知りたい状況を瞬時に把握することができ、円滑に授業が進めることができると考える。しかしながら、この閲覧パネルでの表示方法については、1人あたりの表示が小さいことで見づらい点や、1度で得られる情報が多くなることで教師が把握することを妨げてしまう可能性などが考えられる。そのため、適切な表示方法について実験を行うこととした。この実験内容については5章に記す。

4 レイアウトの検証

我々は、3.1節で述べたレイアウト作成システムが、実際の授業で用いられているレイアウトを実現

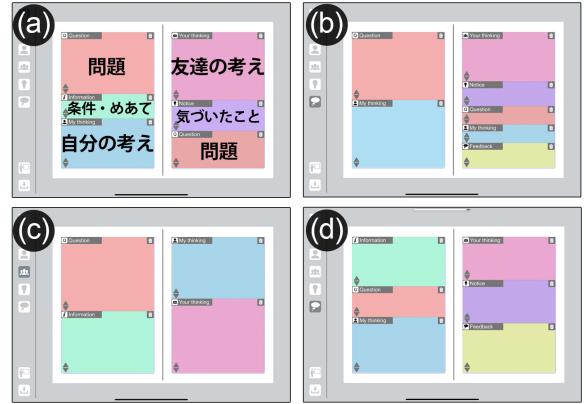


図 5. レイアウト作成例.

できるのかについて検証した。小学校の算数の授業で推奨されているノートのレイアウト[14]を参考に、21種類のレイアウトを、システムを用いて制作した。制作したレイアウトの例を図5に示す。

図5(a), (b)の作成例は一般的に使用されるレイアウトであり、問題から始まり、授業を展開しながら授業のねらいを児童自身に気づかせる。最後に練習問題を児童に解かせ、授業の内容を理解しているかどうかを評価する。図5(c)は複数時間が必要な単元の前半でよく使用されるレイアウトであり、「気づいたこと」や「感想」などのまとめがなく、児童の考えを共有して終わっているのが特徴的である。対照的に図5(d)は複数時間が必要な単元の後半でよく使用されるレイアウトであり、前回の授業で学んだことをまず復習し、そこから新たな問題に取り組んでいく、という授業をする際に使用される。

この検証結果から、本システムで実際の授業で使用されるレイアウトを制作可能と確認できた。また、どのレイアウトも2分以内に制作出来ており、紙媒体のノートで定規を使用しながら制作するより容易にレイアウトすることができていると考える。

5 閲覧の表示方法の検証

2.2節で述べたように、教師は授業中に机間指導をすることが多い。これは、閲覧表示が可能であったとしても、児童の近くで考えを聞いたり、児童が集中して授業に取り組んだりするうえで重要である。そのため、教師は電子黒板やプロジェクタでの表示だけではなく、手元で児童のノートの画面を閲覧しながら机間指導する必要がある。

また、本システムはデジタルペンを利用して記述することを想定しているものの、実際の教育現場では、デジタルペンを用いずに指で記述する児童や、テキストで記述したほうが書きやすいという児童もいると考える。加えて、ノートを閲覧する教師側にとって、表示されるフォントの違いによって把握の

表 1. 実験時の 1 人あたりの画面サイズ。縦横比は 4:3 であり、4-6 分割では 16 人分を 4 分割、24 人分を 6 分割としている。

分割数	1	4	6	20	40
サイズ(インチ)	10.2	5.1	3.4	2.04	1.275

しやすさにどのような影響があるのかを調査する必要があると考えた。

のことから、本稿では読み取りやすく、かつ把握しやすい(1)分割数および(2)文字のフォントを検証する。まず、分割数は日本の学級編成を参考として、児童は1教室あたり最大で40名が在籍できることや、4-6人ずつの班ごとで考える授業もあるため、閲覧する画面上には1分割、4および6分割(以降、4-6分割とする)、20分割、40分割の4パターンを用意した(表1)。次に、文字のフォントはデジタルペンで記述した場合、指で記述した場合、キーボードによる活字で記述した場合の3パターンを用意した。これらのデータ作成および実験方法、実験結果について述べる。

5.1 検証方法と実験の流れ

検証する方法として、「算数の問題を解いている映像を見て、その考え方があらかじめ用意されている解き方のどれに分類されるかを選択する」というタスクを40名分やってもらい、(1)40名分のデータをすべて分類するまでの時間、(2)分類の模範解答例との正答率、(3)アンケートによる評価、の3つから把握のしやすさと読み取りやすさを判断する。

このタスクは、算数の授業を実際にしているときに教師が意識している状況を参考にしている。算数の問題は、文字と式で考え方を表現することができ、答えに至る過程が複数存在する。そのため、教室内にいる多くの児童のノートから児童の解き方をある程度分類し、その情報をもとに授業を展開することが多々ある。40名分のノートとなるべく早く、かつ正確に分類できることが重要であることから、本稿ではこのようなタスクで検証することとする。

実験の流れを図6に示し、実験システムの画面を図7に示す。実験のシステムはProcessingで制作し、実験参加者が各自のパソコンで参加できるようにした。アンケートの内容は表2に示す。12条件終了後、自動で記録していた分類中の時間と分類した数を収集し評価を行った。

5.2 実験結果と考察

算数の問題を閲覧し、分類するというタスクは本来教師が行うため、20代以上の成人を実験の対象とした。実験には21-23歳の男女13名が参加した。実験参加者の視力は全員0.5以上であった。

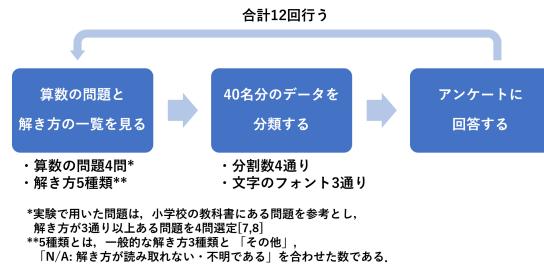


図 6. 実験システムの流れ。

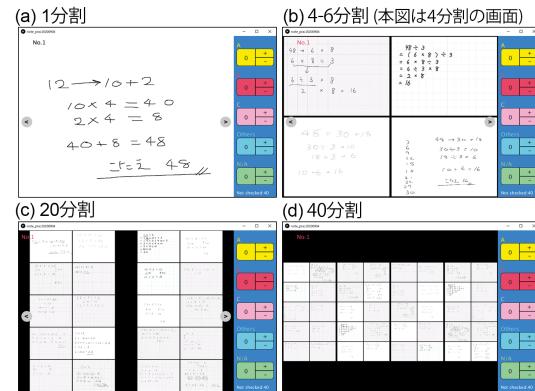


図 7. 実験システムの分類する画面。

5.2.1 分類時間による評価

実験参加者が分類するまでに要した各条件の平均時間を表3に示す。フォントの違いおよび分割数の違いによる分散分析をそれぞれ行った結果、どちらも有意な差はみられなかった。そのため、フォントおよび分割数によって、把握するまでの時間に大きな差はないと考える。

5.2.2 正答率による評価

次に、40名分を分類した平均正答率を表4に示す。フォントによる正答率の違いはほとんどなかっ

表 2. 実験の質問一覧。

Q1	閲覧していたデジタルノートの文字は読み取りやすかったですか？ (5段階のリッカート尺度)
Q2	Q1のように感じた理由を教えてください。 (自由記述)
Q3	今回の分割によるデジタルノートの閲覧方法は40人分把握するのに適していると感じましたか？ (5段階のリッカート尺度)
Q4	Q3のように感じた理由を教えてください (自由記述)
Q5	なにか感じしたことやおもったことなどがあれば自由に記入してください (自由記述)

表 3. 分類に要した平均時間(秒).

分割数	ペン	活字	指
1分割	289.43	270.08	280.29
4-6分割	270.02	238.95	303.41
20分割	243.25	300.89	303.41
40分割	272.11	262.55	286.92

表 4. 40名分を分類した平均正答率.

分割数	ペン	活字	指
1分割	0.98	0.98	0.99
4-6分割	0.93	0.93	0.93
20分割	0.90	0.93	0.88
40分割	0.74	0.83	0.75

表 6. Q1 の評価値の平均.

分割数	ペン	活字	指
1分割	4.23	3.92	3.85
4-6分割	3.92	4.15	3.69
20分割	2.69	3.69	2.62
40分割	1.31	2.69	1.31

表 7. Q3 の評価値の平均.

分割数	ペン	活字	指
1分割	2.46	2.54	2.31
4-6分割	3.31	3.46	3.62
20分割	3.15	3.77	3.31
40分割	1.54	3.00	2.08

表 5. 「N/A」の合計数. () 内は分類した実験参加者数.

分割数	ペン	活字	指
1分割	0(0人)	0(0人)	0(0人)
4-6分割	3(1人)	5(1人)	6(2人)
20分割	17(1人)	1(1人)	22(3人)
40分割	51(7人)	6(1人)	33(3人)

た。分割数によって正答率は下がっているが、これは「N/A. 解き方が読み取れない・不明である(以降、N/Aとする)」に分類した数が増えていることが影響していると考える。各条件で「N/A」に分類した数の合計を表5に示す。40分割で表示している際、活字の場合は他のフォントと比べて「N/A」に分類している数が少なかったため、読み取りやすかったのではないかと考える。

5.2.3 アンケート結果による評価

実験参加者に各条件の読み取りやすさについて5段階で回答させた評価値の平均を表6に示す。20分割および40分割の場合、1分割や4-6分割に比べて評価値の平均が低くなっているが、読み取りにくくと考える。ただし、活字は他のフォントに比べて評価値の平均が高くなっていた。その理由として「文字が太字であったため」「デジタルの文字であったから読むのには問題なかった」という意見があった。

次に、閲覧方法が適していると感じたかどうかについて5段階で回答させた評価値の平均を表7に示す。1分割および40分割は評価値の平均が低くなっているが、適していないと感じた実験参加者が多かったと考えられる。1分割が適していないと回答した理由として、「1人ずつ確認するのが面倒だった」、40分割が適していないと回答した理由として「文字が小さすぎて確認するのが難しい」「40人全体を一気に見ることは難しいと感じた」といった意見であった。これらのことから、把握のしやすい分割数はフォントに関わらず4-6分割および20分割が適していると考える。

6 議論

4章および5章の結果を踏まえて、小学校に勤務する50代教師2名にインタビューを行った。2名とも算数を専門としており、20年以上の教師経験があ

る。そのインタビューで頂いた意見をもとに、今後のシステムについて議論する。

6.1 レイアウトの改良

本システムでは、6つのセクションを用意したが、これに「予想・見通し」「まとめ」「練習問題」の3つのセクションを追加したほうが使いやすいと助言を頂いた。これは、これまでのセクションで補えるものの、別のセクションとして用意した方が授業の計画が立てやすいとのことであった。また、「練習問題」は授業の最後に理解度を確認するためのものであり、児童を評価する際に重要なセクションであるため、分けておいた方がいいとのことであった。

次に、児童の自由記述欄を設けることである。本システムは教師が利用しやすいことを目的としているが、ノートは児童が授業中に思いついたことを自由に書くことができるところが特徴の一つである。この自由記述欄は、授業中に教師が見ることはほとんどなく、ノートを回収したときや児童個人が授業を振り返るときに重要であると助言を頂いた。そのため、紙のノートの上に付箋を貼るように、システム内で吹き出しマークのスタンプを自由に押せるようにし、その枠内に思いついたことを書けるように改良することを予定している。

6.2 閲覧方法の改良

インタビューをした教師に5章の実験を行ってもらい、閲覧方法について助言を頂いた。まず、読み取りやすさという観点では、活字よりもペンや指で記述している方が考えている途中経過が見ることができて良いとのことだった。また、分割数については、20分割や40分割は児童がほとんど書き終わってからでないと分類しづらいとのことであった。一方で、4-6分割の場合は画面上のどこからでも確認でき、かつ「班ごとに考える」という授業展開をよくするため、班ごとに見ることができるのとても良いとのことであった。加えて、40分割の状態を通常にし、班ごとに拡大しながら表示できると一番授業中に使いやすいとの助言を頂いた。これは、教室全体の進行状況を確認しつつ、班ごとに閲覧して考え方の分類をしていきたいという理由であった。

これらの助言や5章の結果を踏まえ、40分割を通常の状態にしつつ、4-6分割で拡大表示しながら

分類できるようなシステムに改良する予定である。

7 関連研究

ノートを作成するシステムはこれまで提案されてきている。重森ら[13]はビデオカメラを用いて板書を撮影し、そこにデジタルペンで書き込み可能なノート作成支援システムを提案し、受講者がノートをとる負担を軽減している。北島ら[15]は、講義スライドやWeb上の情報などを好きな場所に配置可能なノート作成システムを提案している。Liuら[9]はオンラインの講義ビデオを視聴しながらメモを取ることができるNoteStructを提案している。これらのノート作成システムは、個人で振り返る際には有用であるものの、小学生が利用するためにはレイアウトの自由度が高すぎることや、教師が授業前に考えた授業中の「めあて」や授業の流れが伝わりづらくなってしまう可能性がある。本研究では教師がノートのレイアウトを作成し、そのデザインに基づいて児童がノートをとることで、紙媒体のノートを行っていた授業の利点をいかしている。

教師が複数人のノートをまとめて閲覧する表示方法は、Zooming User Interface(ZUI)の一例である。ZUIは大きなスクリーンから閲覧したい箇所を拡大することで可視化するインターフェースであり、このインターフェースを利用しているシステムとして、Pad++[6]やKotodama[7]などがあげられる。栗原ら[12]は、このZUIを活用したBorderless Canvasを提案しており、ユーザはデジタルペンを用いてズーム機能や書き込みなどが行える。このインターフェースは、本研究の提案するノートのセクションごとに抽出して共有するという手法とは異なるものの、スライドを拡大・縮小し閲覧するという動的なユーザインターフェースは本研究に応用できると考える。また、Borderless Canvasのようにデジタルペンを用いて書き込まれたものを児童と教師が共有するといったユーザインターフェースにおいても、本研究に応用できると考える。

8 むすび

本稿では、システム開発の初期段階として、セクションを考慮してノートのレイアウトを制作するシステム「SectionsNote」を試作した。システムを用いて算数の授業で使用される21種類のレイアウトを制作できることを確認した。また、教師が授業中に閲覧する際の適切な表示手法について実験を行った。実験の結果や教師とのインタビューから、4-6分割で表示すると、フォントに関わらず読み取りやすく、かつ把握しやすいことが分かった。システムの改良およびセクションを考慮して授業後の評価の可視化ができる機能を追加し、教育現場での実証実験を行い、システムの完成を目指していく。

謝辞

実験に協力してくださった皆様、インタビュー・助言していただいた教師の方に感謝する。本研究は、JSTさきがけ(JPMJPR16D1)、明治大学科学技術研究所重点研究Bの支援を受けたものである。

参考文献

- [1] GIGA スクール構想の実現について. https://www.mext.go.jp/a_menu/other/index_00001.htm, (2020-09-30 確認).
- [2] LoiLoNote School. <https://n.loilo.tv/en/>.
- [3] MetaMoji Classroom. <https://product.metamoji.com/education/index.html>.
- [4] OECD 生徒の学習到達度調査 2018年調査(PISA2018)のポイント. https://www.nier.go.jp/kokusai/pisa/pdf/2018/01_point.pdf.
- [5] ジャポニカ学習帳 ジャポニカセクション.
- [6] B. B. Bederson and et al. Pad++: A Zooming Graphical Interface for Exploring Alternate Interface Physics. UIST '94, pp. 17–26, 1994.
- [7] K. Kurihara. A Study on Software Tools for Flexible Presentations. UIST '06, pp. 31–34, 2006.
- [8] H. Kurokami and et al. Development and Effectiveness of Digital Graphics Organizers. In *International Journal for Educational Media and Technology*, pp. 57–64, 2018.
- [9] C. Liu and et al. NoteStruct: Scaffolding Note-taking while Learning from Online Videos. CHI EA '19: Proceedings of Extended Abstracts of the 2019 CHI Conferences on Human Factors in Computing Systems, pp. 1–6, 2019.
- [10] 一松信ほか59名. みんなと学ぶ 小学校算数3年上・文部科学省検定済教科書. 学校図書株式会社, 2020.
- [11] 一松信ほか59名. みんなと学ぶ 小学校算数4年上・下. 文部科学省検定済教科書. 学校図書株式会社, 2020.
- [12] 栗原一貴他. スライド提示型プレゼンテーション方法論の拡張手法を定量的に評価する研究. 情報処理学会論文誌, pp. 391–403, 2010.
- [13] 重森晴樹他. 講義への集中を目的としたノート作成支援システム. 情報処理学会研究報告, pp. 17–24, 2004.
- [14] 小学館「教育技術」編著. 新学習指導要領対応!国語・社会・算数・理科・体育の授業5・6年. 小学館, 2020.
- [15] 北島圭他. PCによる柔軟な講義ノート作成システム. 第26回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 324–326, 2010.
- [16] 湊三郎他. 半世紀を経た秋田の算数シート学習—教職の専門職化. 東北数学教育学会, pp. 27–48, 2014.

著者索引

- 浅川 智恵子, 1
五十嵐 健夫, 91
五十嵐 悠紀, 37, 49, 133
池松 香, 19, 31
石井 紗郁, 19, 31
磯本 俊弥, 85
伊藤 貴之, 109
岩本 宗大, 127

越後 宏紀, 133

大西 鮎美, 13, 127
奥谷 文徳, 43
小野 哲雄, 79
折原 征幸, 67

勝 世聰, 91
粥川 青汰, 1, 7
川口 一画, 61
川原 圭博, 43

木ノ原 中也, 79
桐野江 高太, 13

栗林 雅希, 1
栗原 聰, 7
栗原 彩花, 49

齋藤 圭汰, 61
坂本 あゆみ, 37
坂本 大介, 79

椎尾 一郎, 19, 31, 73
志築 文太郎, 61, 85, 97
島元 謙, 25

蕭木 啓伸, 1, 7
蕭倉 礼, 97
高田 英明, 79
高橋 伸, 61
田中 波輝, 31

塚田 浩二, 25, 67
塚本 昌彦, 13, 127

寺田 努, 13, 127

長岡 雄一, 7
中嶋 誠, 91
中林 明日香, 109
中村 聰史, 121
鳴海 紗也, 43
西井 遥菜, 55
野間 裕太, 43
萩田 真理子, 109
平塚 義宗, 7
福島 真花, 31
双見 京介, 55
前田 清洲, 115
巻口 誉宗, 79
又吉 康綱, 121
的場 やすし, 31
宮下 芳明, 103
宮武 陽子, 73
村尾 和哉, 55
森島 繁生, 1
山中 祥太, 85
山中 優太朗, 7
横山 海青, 97
曆本 純一, 115

日本ソフトウェア学会 研究会資料シリーズ ISSN
1341-870X No. 88 2020年12月16日発行

第28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 (WISS 2020) 論文集