

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

受動触覚を用いた
タッチタイピング学習支援手法

高倉 礼

指導教員 志築 文太郎

2020年2月

概要

コンピュータへ文字を入力する方法として、キーボードを用いた入力为主に用いられている。キーボードを用いた入力の技術として、キー配置を覚えることにより、手元を見ることなく正しい運指にて入力を行うタッチタイピングが存在する。タッチタイピングによる入力を行うことによって、ユーザはコンピュータの画面に表示されている情報のみに集中することができる。したがって、タッチタイピングを使用しているユーザはコンピュータと効率よく対話を行うことができる。しかしながら、タッチタイピングの習得は難しく、効率の良い学習手法は確立されていない。本研究では、受動触覚を用いることにより、ユーザのタッチタイピングの学習支援を行う手法を提案する。提案手法は、ユーザが次の文字の入力に使用するべき指に先行して振動刺激（受動触覚）を与える。ユーザは、与えられた振動を手がかりに打鍵をすることにより、画面を見続けながらコンピュータへ文字を入力することができる。本論文では、提案手法の設計、提案手法がタッチタイピングの学習へ及ぼす効果を調べるために行った実験の結果、提案手法を用いることにより、ユーザはより短い時間にてキー配置を記憶できることが明らかとなった。また、ユーザへ与える振動の情報量を増加させることにより、明確にキーの位置を提示した場合、ユーザがタッチタイピングの学習に集中できなくなる可能性があることがわかった。したがって、提案手法により与える触覚刺激の最適な情報量を調査することが今後の課題である。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	受動触覚	2
1.3	受動触覚を用いた学習	2
1.4	目的とアプローチ	2
1.5	貢献	3
1.6	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	受動触覚を用いた学習の研究	4
2.1.1	受動触覚を用いたピアノの演奏の学習	4
2.1.2	受動触覚を用いたモールス信号の学習	4
2.1.3	受動触覚を用いたテンキーの学習	5
2.2	フルキーボードにおけるタイピングの研究	5
2.2.1	手元を隠した状態においてタッチタイピングの学習を行わせる研究	5
2.2.2	タイピング時の視線の移動を調査した研究	6
2.2.3	タイピング時の運指をフィードバックする研究	6
2.2.4	拡張現実感を用いてタイピング学習を支援する研究	7
2.3	並列タスクの研究	7
2.3.1	並列タスクにおける認知負荷の研究	7
2.3.2	並列タスクにおける作業負荷の研究	8
第3章	受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法	9
3.1	提案手法の設計	9
第4章	第1試作システムの実装および評価	11
4.1	第1試作システムの実装	11
4.1.1	触覚刺激提示グローブ	11
4.1.2	タイピングアプリケーション	11
4.1.3	触覚刺激提示グローブとタイピングアプリケーションの連携	14
4.2	実験	15
4.2.1	実験参加者	15

4.2.2	実験器具	15
4.2.3	実験設計	16
4.2.4	実験結果	16
4.2.5	議論	19
4.3	学会参加者からのコメントに基づく議論	20
4.3.1	WISS 2019 におけるデモ体験者からのコメント	20
4.3.2	OzCHI 2019 におけるデモ体験者からのコメント	20
第 5 章	第 2 試作システムの実装および評価	21
5.1	第 2 試作システムの実装	21
5.1.1	触覚刺激提示グローブ	21
5.1.2	タイピングアプリケーション	22
5.1.3	提示する触覚刺激	24
5.2	実験	24
5.2.1	実験参加者	24
5.2.2	実験設計	25
5.2.3	実験結果	27
5.2.4	議論	30
第 6 章	今後の展望	33
第 7 章	終わりに	34
	謝辞	35
	参考文献	36
	業績リスト	39
付 録 A	実験に用いた英文データセット	40
A.1	学習タスクにおける英文データセット	40
A.2	テストタスクにおける英文データセット	41

目 次

3.1	提案手法において、次に入力すべきキーをユーザへ通知するための仕組み。ユーザが次に入力すべきキーが‘c’である時、DVORAK 配列における‘c’のキーは右手中指を用いて入力すべきキーであるため、提案手法のシステムはユーザの右手中指に触覚刺激を提示することにより、右手中指を用いて入力することをユーザへ促す。	10
4.1	第1試作システムにおける触覚刺激提示グローブ。触覚刺激提示グローブはマイクロコントローラ (Arduino Nano)、および4つの振動アクチュエータから構成される。親指を除いた各指には振動アクチュエータが1つずつ取り付けられる。	12
4.2	振動アクチュエータの取り付け位置。振動アクチュエータは各指の橙帯部分にマスキングテープを用いて取り付けられる。	12
4.3	第1試作システムの触覚刺激提示グローブの回路図。各振動アクチュエータには逆起電力による影響を防ぐために、ダイオードが並列に接続されている。振動アクチュエータを駆動させるマイクロコントローラ (Arduino Nano) はコンピュータと USB ケーブルを用いて接続されており、Serial 通信によりデータの交換を行う。	12
4.4	提案手法にて使用したタイピングアプリケーションのウィンドウ。一番上の行には課題文が表示され、ユーザはテキストボックスに課題文と同じ英文を入力する。画面に表示されているキーボード配列にはどのキーをどの指で押すべきかわかるように色付けされており、キーボード配列表示の下部分にはその色に対応するように色が塗り分けられた指が表示されている。	13
4.5	実験において、練習タスクを行っているユーザ。実験参加者が手元のキーボードを確認できないように、実験参加者は板を用いて手元を隠された状態にて打鍵を行った。実験参加者は両手に触覚刺激提示グローブを装着した。	15
4.6	テストタスクのウィンドウ。実験参加者はランダムに1文字ずつ表示されるアルファベット26文字の入力を行う。実験参加者が表示されている文字のキーを打鍵すると次のアルファベットが表示される。画面下部にはこれまでに入力した文字の数が表示されている (例えば、アルファベット2文字を入力し終わっている場合、2/26)。	16

4.7	実験手順. はじめに, 実験参加者は提案手法を用いる群, および提案手法を用いない群に分けられた. 実験において, 実験参加者は学習タスクとテストタスクから構成されるセッションを, 5セッション行う. 各セッション終了後, 実験参加者には使用感などのコメントが求められた. 各セッション間には1分以上の休憩が設けられた.	17
4.8	学習タスクにおける1文字あたりのキー打鍵数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1文字あたりのキー打鍵数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1文字あたりのキー打鍵数を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.	18
4.9	学習タスクにおける1分間あたりの入力文字数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1分間あたりの入力文字数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1分間あたりの入力文字数を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.	18
4.10	テストタスクにおけるキー配置正答率. 縦軸はテストタスクにおける実験参加者のキー配置正答率であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとのキー配置正答率を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.	18
5.1	第2試作システムにおける触覚刺激提示グローブ. 親指を除く各指には振動アクチュエータが2つずつ瞬間接着剤により取り付けられている. 3Dプリンタにより作成されたケースには, マイクロコントローラ (Adafruit Feather 32u4 Bluefruit LE), およびリチウムイオンポリマー電池が格納されている. マイクロコントローラにはリチウムイオンポリマー電池から3.7Vの電圧で電力が供給されている.	22
5.2	振動アクチュエータの取り付け位置. 各指には振動アクチュエータが2つ取り付けられる. 1つが手の甲側の第2関節, および第3関節の間 (黄), もう1つが手の平側の第1関節部分 (赤) である.	22
5.3	第2試作システムの触覚刺激提示グローブの回路図. マイクロコントローラから供給される電圧が振動アクチュエータの動作電圧を満たさないため, 電圧を増幅させるために, トランジスタが各振動アクチュエータに接続されている. また, 振動アクチュエータの逆起電力による影響を防ぐために, 各振動アクチュエータには, ダイオードが並列に接続されている.	23
5.4	実験において練習タスクを行っている実験参加者. 実験参加者は画面に表示される課題文の入力を行う. 手元のキーボードを見ることによりキー配置の情報を手に入れることができないように, 実験参加者は無刻印キーボードを用いて入力を行った.	24

- 5.5 実験手順. はじめに実験参加者は、指の先の振動アクチュエータのみを使用する群 (PH1), 指の先と付け根の振動アクチュエータを両方使用する群 (PH2), および振動アクチュエータを使用しない群 (Control) に分けられた. 学習タスク, およびテストタスクを1回ずつ行うことを1セッションとし, 各実験参加者は1日に5セッション, 3日間で合計15セッション行った. セッション間には少なくとも1分間以上の休憩をとり, 実験日間は22-26時間のインターバルが挟まれた. 各セッション間の休憩時間中, 実験参加者からはタスク中に思ったことを自由にコメントしてもらった. 実験参加者が実験1日あたりにかかった時間はおよそ40分であった. 26
- 5.6 テストタスクのウィンドウ. 実験参加者は, 画面に表示される課題文の入力を行う. 実験参加者が入力した文字は●として表示されるため, 実験参加者は入力した文字を確認することができなかった. 課題文, および入力した文字の上下の表示位置が揃っているため, 実験参加者は次に入力すべき文字が何かを知ることができた. 27
- 5.7 学習タスクにおける1文字あたりのキー打鍵数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1文字あたりのキー打鍵数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1文字あたりのキー打鍵数を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である. 28
- 5.8 学習タスクにおける1分間あたりの入力文字数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1分間あたりの入力文字数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1分間あたりの入力文字数を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である. 28
- 5.9 テストタスクにおけるキー配置正答率. 縦軸はテストタスクにおけるキー配置正答率であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとのキー配置正答率を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者においてロジスティック成長モデルに基づいた近似を行った近似曲線である. 29
- 5.10 テストタスクにおける1分間あたりの入力文字数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1分間あたりの入力文字数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1分間あたりの入力文字数を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である. 29

第1章 はじめに

本論文にて、受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法を示す。本章では、まず背景としてタッチタイピング、およびこれまでのタイピング学習システムにおける問題点を示す。次に、本研究の目的とアプローチ、本研究にて取り扱う受動触覚の説明、本研究の貢献、および本論文の構成を示す。

1.1 背景

コンピュータへ文字を入力する方法として、キーボードを用いた入力方法が一般的である。キーボードを用いた入力方法には大きく分けて2つ存在する [武田 05]。それらは、手元を見ずに正しい運指にて打鍵を行うタッチタイピング、およびキーボードを見ながら打鍵を行うサイトタイピングである。タッチタイピングを用いることにより、ユーザはコンピュータの画面とキーボード間において視線を動かすことがなくなるため、コンピュータの画面に表示されている情報のみに集中することができる。加えて、視線の移動において発生する時間がなくなることから、時間あたりの生産性を向上させることができる。したがって、タッチタイピングはユーザがコンピュータと効率よく対話を行うための重要な技術である。

タッチタイピングはユーザが手元のキーボードを見ずに打鍵を行うこと、および正しい運指によってそれぞれのキーを打鍵することにより実現される技術である [高岡 14]。しかしながら、ユーザは全てのキー配置と指の動かし方を覚える必要があるため、タッチタイピングの修得は困難である [YEYG03]。タイピングの技術は練習を重ねることにより誰でも修得できるため、正しい運指による打鍵が行われていなくても、ユーザは手元のキーボードを見ずに打鍵を行うことが可能である。しかしながら、間違った運指によるタイピングを行っているユーザが、正しい運指による打鍵に矯正することは、タイピングの経験のない状態からタッチタイピングの学習を行うよりも数倍から数十倍の時間がかかる [村田 90]。そのため、タッチタイピングの学習においてタイピングの経験のない状態から正しい運指を正確に修得することが重要である。

タッチタイピングの学習を支援することを目的としたシステムがいくつか存在する。例えば、和文のタイピング学習システムとして、myTyping¹、および e-typing²、英文のタイピング学習システムとして、Typing.com³、および Typing Fu⁴が挙げられる。これらのシステムは、

¹<https://typing.twil.me/> (閲覧日: 2020 年 2 月 20 日)

²<https://www.e-typing.ne.jp/> (閲覧日: 2020 年 2 月 20 日)

³<https://www.typing.com/> (閲覧日: 2020 年 2 月 20 日)

⁴<https://type-fu.com/> (閲覧日: 2020 年 2 月 20 日)

次に打鍵されるべきキーおよびそのキーの入力に使用されるべき指をユーザに提示することにより、ユーザが正しい運指によって打鍵することを促す。しかしながら、これらの手法において、入力のヒントとなる表示、および編集している文章の間をユーザの視線が頻繁に移動するため、ユーザは編集している文章に集中し続けることが難しい。したがって、タッチタイピングの習得を支援するための手法として、編集している文章にユーザの視線を集中させつつ、次に打鍵されるべきキー、およびそのキーの入力に使用されるべき指をユーザに提示できる手法が求められる。

1.2 受動触覚

受動触覚とは Rodríguez ら [RVDVs⁺19] の研究における定義に基づいている。Rodríguez らは、人が認知する触覚を皮膚感覚と力覚に分けて考えている。皮膚感覚とは、圧力、せん断力、および振動などによって得られる感覚であり、力感覚とは、筋肉、腱、関節の動きによって得られる感覚である。加えて、Rodríguez らは、ユーザが自ら動くことによって得た触覚を能動的な触覚（能動触覚）とし、ユーザが動くことなく、触覚デバイスなどを介して与えられた触覚を受動的な触覚（受動触覚）と定義した。Rodríguez らの研究において、受動触覚がどのような情報提示を得意とするか調査した結果、ユーザは受動触覚を用いることにより、位置、および方向の情報をユーザが十分に区別できることが示された。

そのため、受動触覚が位置および方向の情報をユーザへ十分に通知できることから、我々は受動触覚がタッチタイピングにおける正しい運指の情報をユーザへ十分に通知できると考えた。

1.3 受動触覚を用いた学習

受動触覚を用いることにより、ユーザの学習を支援する研究がこれまでに行われてきた [HYS08, SRHSS16, SDZ⁺17]。しかしながら、受動触覚を用いてユーザの学習を支援する研究において、コンピュータの入力に用いられるフルキーボード（QWERTY 配列、および DVORAK 配列 [Dvo43] 等）を対象にした調査は行われていない。そのため、本研究では、フルキーボードを用いたタッチタイピング学習においても、受動触覚がユーザの学習を支援できるか調査した。

1.4 目的とアプローチ

本研究では、編集している文章にユーザの視線を集中させつつ、次に打鍵されるべきキーおよび使用されるべき指をユーザに提示する学習支援手法の実現を目的とする。この目的を実現するために、受動触覚によりユーザへ正しい運指の情報を通知する2つの試作システムを作成し、それぞれがユーザのタッチタイピングの学習を支援できるか調査した。

1.5 貢献

本研究の貢献を以下に挙げる

- 受動触覚がユーザのタッチタイピングの学習を支援できることを実験により明らかにした.
- 受動触覚によりユーザへ与える触覚情報が曖昧であることが、学習に貢献していることを実験により明らかにした.

1.6 本論文の構成

1 章では、研究の背景であるタッチタイピングの学習、および既存のタイピング学習システムの問題点、ならびに本研究の目的とアプローチ、および本研究の貢献を示した。2 章では、本研究に関連のある研究を述べる。3 章では、本研究における受動触覚、および提案手法の原理を説明する。4 章では、提案手法を実現するために実装した第 1 試作システムの実装、およびシステムを用いた実験を述べる。5 章では、第 1 試作システムにおける改善点から実装した第 2 試作システム、およびシステムを用いた実験を述べる。6 章では、提案手法に対する今後の展望を示す。7 章では、本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究は、受動触覚を用いて、タッチタイピング学習を支援することを目的としている。本章では、これまでに行われてきた研究として、受動触覚を用いた学習の研究、フルキーボードにおけるタイピングの研究、および並列タスクの研究を順に述べる。

2.1 受動触覚を用いた学習の研究

受動触覚を用いた学習に関する研究として、これまでにピアノ [HYS08], モールス信号 [SRHSS16], およびテンキー [SDZ⁺17] を対象に行われてきた。本節では、これらを順に述べる。

2.1.1 受動触覚を用いたピアノの演奏の学習

Huang ら [HYS08] はピアノの演奏の学習における受動触覚の効果を調査した。Huang らの実験において、実験参加者は2つの楽曲のうち、1曲目の学習には次に打鍵されるべき鍵盤に対応する指に先行して触覚刺激が与えられ、もう1曲の学習には触覚刺激が与えられなかった。Huang らは、両曲とも同じ学習時間だったにもかかわらず、触覚刺激を与えて学習させた楽曲を実験参加者は誤打鍵なく演奏できた一方で、触覚刺激を与えられずに学習させた楽曲では、誤打鍵が多く、最後まで演奏できない実験参加者が存在したと報告した。加えて Huang らは、全実験参加者が今後とも受動触覚を用いて学習したいとコメントしたことを報告した。

Huang らの結果から、次に打鍵されるべきキーに対応するユーザの指へ先行して触覚刺激を与えてキーの配置を学習させることにより、ユーザの誤打鍵が減少することから、ユーザの学習におけるモチベーションを維持させることができると考えられる。

本研究は、ピアノではなくフルキーボードにおける学習の調査である。そのため、この研究と異なり、本研究においてはユーザの指が左右のみでなく前後にも移動する。

2.1.2 受動触覚を用いたモールス信号の学習

Seim ら [SRHSS16] はモールス信号の学習において、触覚刺激を用いることによりユーザの学習が促進されるか調査を行った。Seim らは、Google Glass¹を用いて、実験参加者の頭部に触覚刺激を与えることにより、実験参加者がアルファベット26文字のモールス信号を入力できるか、および知識としてモールス信号を習得したか評価した。Seim らは、実験の結果か

¹<https://www.google.com/glass/start/> (閲覧日: 2020年2月20日)

ら、触覚刺激を与えられた群が高い精度にてモールス信号を入力できること（受動触覚を与えられた群のエラー率：6.0%，与えられなかった群のエラー率：53.0%）を報告した．加えて、実験参加者に記述式のテストを回答させた結果、触覚刺激を与えられた群がモールス信号を知識として修得できたことが示された（受動触覚を与えられた群の正答率：98.0%，与えられなかった群の正答率：59.0%）ことも報告した．

本研究は、触覚刺激を与える対象が頭部ではなく、ユーザの両手の指（親指を除く 8 本）である．したがって、提案手法では、ユーザは与えられた振動と次の入力に使うべき指が対応づけしやすいという特徴がある．

2.1.3 受動触覚を用いたテンキーの学習

Seim ら [SDZ⁺17] はキーがランダムに配置されたテンキーにおけるキー配置の学習において、触覚刺激を用いることによりユーザの学習が促進されるか調査した．Seim らの実験において、実験参加者は、次に入力すべきキーに対応する指へ触覚刺激を与えられた群と触覚刺激を与えられない群に分けられ、それぞれテンキーの配置の学習した．実験の結果、触覚刺激を与えられた群は、触覚刺激を与えられなかった群と比較して、キーの打鍵時にテンキーを視認する回数が少なかったことが示された．

Seim らのと湯さの結果から、次に入力すべきキーに対応するユーザの指へ触覚刺激を与えてキーの配置を通知することにより、ユーザが手元を見ずに打鍵することを支援できると考えられる．

本研究は、キーを打鍵させる点では Seim らと同様であるが、フルキーボードにおけるアルファベット 26 文字の配置をユーザに学習させる点で異なる．

2.2 フルキーボードにおけるタイピングの研究

フルキーボードにおけるタイピングの研究として、ユーザの手元を隠した状態においてタッチタイピングの学習を行わせる研究 [川島 89]、タイピング時の視線の移動を調査した研究 [田村 12]、タイピング時の運指をフィードバックする研究 [田村 13]m、および拡張現実感を用いてタイピング学習を支援する研究 [辻本 11] が行われている．本節では、これらを順に述べる．

2.2.1 手元を隠した状態においてタッチタイピングの学習を行わせる研究

川島 [川島 89] は、箱を用いてユーザの手元を覆うことによって、タッチタイピングの学習において手元を見ないことの影響があるか調査した．川島は、実験参加者を手元を隠された群と隠されない群に分け、タイピング学習をさせた．その結果、川島は、手元を隠された状態においてタイピング学習を行った実験参加者は、手元を隠されずにタイピング学習を行っ

た実験参加者よりも、打鍵の速度が高くなり、さらにキー配置をより多く記憶できたと報告した。

川島の研究から、ユーザの手元を隠した状態にてタッチタイピングを学習させることにより、ユーザの打鍵速度の向上させ、かつユーザのキー配置の学習を支援できると考えられる。

本研究の4章の実験では、この研究と同様にユーザの手元を隠すことに加え、ユーザの指に触覚刺激を与えることによって正しい運指による打鍵をユーザへ促すことにより、学習効果を向上させることを試みた。

2.2.2 タイピング時の視線の移動を調査した研究

田村ら [田村 12] は、実験参加者の視線の動きを動画として撮影し、実験参加者の視線の動きを解析することにより、打鍵速度および視線の動きの関係を調査した。田村らは、キーボードを見ながら打鍵していた実験参加者のうち、キーボードを見た回数が多い実験参加者ほど打鍵速度が高かったことを報告した。一方で、キーボードを見ながら打鍵していた実験参加者よりも、全くキーボードを見ずに打鍵していた実験参加者の打鍵速度がより高かったことも報告した。また、田村らは、キーボードを見た回数が多いほど、すなわち視線の移動が多くなるほど目の負担が大きくなるため、タイピング時の疲労の原因になることを指摘した。

この研究から、タッチタイピングを修得することにより、ユーザは視線の移動回数が少なくすることができるため、打鍵速度を向上、および目の疲労を軽減できると考えられる。

本研究では、箱または無刻印キーボードを用いることによって、ユーザが手元を見ることによりキー配置の情報を得られない設計にした、この設計により、タッチタイピングの条件である手元を見ずに打鍵することをユーザに促す。

2.2.3 タイピング時の運指をフィードバックする研究

田村ら [田村 13] は、実験参加者の指の動きを追跡し、正しい運指による打鍵を実験参加者へ促すシステムを作成した。田村らのタッチタイピング学習システムは、実験参加者の指に貼ってあるシールの色を区別することにより、実験参加者が打鍵時に使用した指を特定した。正しい運指によって打鍵されなかった場合は画面に注意を表示することによって、異なる指による打鍵が行われたことを実験参加者にフィードバックした。田村らは、実験参加者をシステムを用いる群と用いない群に分けられ、タイピング学習をさせた。実験後、正しい運指を行うように意識したか実験参加者に回答させた結果、システムを用いた群の方が正しい運指による打鍵を意識して打鍵を行ったことが示された。

本研究では、正しい運指による打鍵をユーザへ促すために、フィードバックではなくフィードフォワードを採用している。そのため、ユーザはフィードフォワードとして与えられる触覚刺激に従うことにより正しい運指を意識しながら打鍵できると考えられる。

2.2.4 拡張現実感を用いてタイピング学習を支援する研究

辻本ら [辻本 11] は実験参加者の手と使用しているキーボード，およびそれらに重ねるように入力すべきキーの位置を表示する，拡張現実感を用いたタイピング学習システムを作成した．辻元らは，ユーザがこのシステムを用いることにより，入力速度は改善しないものの正しい運指を意識するようになり，誤打鍵を減らすことができたと報告した．

本研究では，次に入力すべきキーの情報を提示する方法として，振動アクチュエータを用いてユーザの指を直接振動させることにより，正しい運指による打鍵をユーザへ促している．そのため，ユーザは振動刺激に従うことにより，正しい運指を意識しながら打鍵できると考えられる．

2.3 並列タスクの研究

タッチタイピングとは画面を見続けることにより情報を入手しつつ，手を動かすことにより打鍵を行う技術である．タッチタイピングの熟練者は，視覚から情報を獲得しつつ打鍵を行うため，タッチタイピングは並列タスクとして考えられる [大野 95]．本節では，タッチタイピングが並列タスクであることに着目し，以下に，並列タスクの認知負荷，および並列タスクの作業負荷の研究を順に述べる．

2.3.1 並列タスクにおける認知負荷の研究

Wickens は [Wic02] 人間の情報処理の機構を，4次元で表現しそれぞれの次元は2分された注意の資源を持つと考えた．第1の次元は情報の知覚段階である．この次元では，知覚と反応にそれぞれ別の注意資源が割り当てられる．例えば，テレビを見ながら（知覚）そのテレビの内容の感想を話すこと（反応）は同時に行えるが，テレビを見ながら（知覚）ラジオを聴くこと（知覚）は困難である．第2の次元は情報の知覚モダリティである．この次元では，視覚と聴覚に別の注意資源が割り当てられる．例えば，絵本を読みながら（視覚）音楽を聴くこと（聴覚）はできるが，2人が同時に話していることを聞き分けること（どちらも聴覚）は難しい．第3の次元は情報の明確性である．この次元では，情報の取得に集中（すなわち，耳を傾ける，注視すること）を必要とするか否かによりそれぞれ別の注意資源が割り当てられる．例えば，本を読みながら（注視が必要な情報）廊下を歩いている周囲の様子を把握すること（注視のいらぬ情報）はできるが，本を読みながら新聞を読むことはできない（どちらも注視が必要な情報）．第4の次元は情報の表現形式である．この次元では，空間的なもの（例えば画像，人の動きなど空間的なイメージを捉えたもの）と言語（例えば，話している言葉，文字など言語的な意味を持つもの）に別の注意資源が割り当てられる．

この研究では，認知資源が分散されるシステムを設計すれば，認知負荷が低減されると述べられている．この研究に基づけば，ユーザが編集しているテキスト，次に入力されるべきキーの位置，および次の打鍵に使用されるべき指が全て画面に表示される従来のタイピング学習システムは，視覚の認知負荷が高いという問題があると考えられる．

本研究では、触覚刺激が視覚の認知負荷とならずに付随する情報をユーザへ通知できることに基づき [SS99], 次の打鍵に使用されるべき指へ先行して触覚刺激を与えることにより、タッチタイピング学習システムにおける視覚の認知負荷の低減を試みる。

2.3.2 並列タスクにおける作業負荷の研究

藤井ら [藤井 13] は、視覚的タスクと並列して実行するタスクとして、視覚的タスク、聴覚的タスク、および触覚的タスクのどのタスクの作業負荷が少ないかを調査した。この研究において、実験参加者はターゲットを視覚的に追跡するメインタスクに並列して、感覚刺激が提示された時にボタンを押すというサブタスクを行った。サブタスクにおける感覚刺激には視覚刺激、聴覚刺激、および触覚刺激のうちいずれかがユーザに提示された。サブタスクの各刺激におけるボタン入力までの時間を計測することにより、どの刺激が視覚情報と並列に用いる刺激として適しているか調査した。藤井らは、サブタスクにおいて触覚刺激が最も早い反応時間を示したことから、触覚刺激が視覚情報に対して干渉が少ないため、情報提示方法として並列に用いる刺激として適していると報告した。

藤井らの研究から、本研究では、振動刺激を用いて正しい運指の情報をユーザに提示することにより、視覚情報への干渉を抑えることによって、ユーザのタッチタイピング学習における作業負荷の低減を試みる。

第3章 受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法

提案手法は、ユーザが次の打鍵に使用するべき指へ先行して触覚刺激を与えることにより、ユーザが編集している文章に集中しながら、正しい運指によるタイピングを行うことを促す学習支援手法である。本章では、提案手法の設計を述べる。

3.1 提案手法の設計

提案手法では、ユーザの手元を隠した状態、または無刻印のキーボードを用いた状態にて打鍵させる。これは、ユーザが手元を見てもキーボード配列の情報を得られない状態にすることにより、手元を見ずに打鍵することをユーザへ促すためである。提案手法ではこれらの状態にて、次の打鍵に使用されるべき指をユーザへ通知するために触覚刺激を利用する。なお、提案手法において使用する触覚刺激は、振動アクチュエータを用いた振動刺激である。ユーザが“interaction”という単語を入力する場合において、提案手法が入力を支援する手順を例として示す。

1. ユーザが‘a’のキーを打鍵する。
2. 次の文字である‘c’のキーの打鍵に使用されるべきユーザの指に振動が与えられる(図3.1左)。
3. ユーザは振動が与えられた指の付近にあるキーを探索し、目的のキーである‘c’のキーを振動が与えられた指により打鍵する(図3.1右)。
4. 次の文字である‘t’のキーの打鍵に使用されるべきユーザの指に振動が与えられる。
5. 以降、1～3を繰り返す。

このようにして、ユーザは入力ごとに与えられる振動刺激を手がかりとして、正しい運指による打鍵を行うことができる。

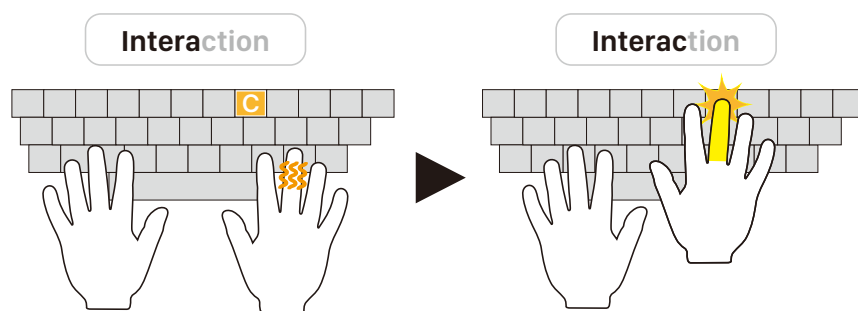


図 3.1: 提案手法において、次に入力すべきキーをユーザへ通知するための仕組み. ユーザが次に入力すべきキーが 'c' である時, DVORAK 配列における 'c' のキーは右手中指を用いて入力すべきキーであるため, 提案手法のシステムはユーザの右手中指に触覚刺激を提示することにより, 右手中指を用いて入力することをユーザへ促す.

第4章 第1試作システムの実装および評価

提案手法がタッチタイピングの学習へ及ぼす効果を調査するために、第1試作システム作成した。本章では、第1試作システムの実装、システムを用いた実験、および実験の結果を示し、議論を述べる。

4.1 第1試作システムの実装

本節では、提案手法の評価を行うために作成した触覚刺激提示グローブ、およびタイピングアプリケーションの実装、ならびに触覚刺激提示グローブとタイピングアプリケーションの連携を説明する。

4.1.1 触覚刺激提示グローブ

提案手法では、Seim ら [SDZ⁺17]、および Huang ら [HYS08] の実験にて用いられている実験器具を元に、触覚刺激提示グローブを作成した（図 4.1）。なお、Seim ら、および Huang らとは異なるマイクロコントローラ、異なる振動アクチュエータを用いている。

作成した触覚刺激提示グローブは、軍手、軍手に縫い付けられたマイクロコントローラ（Arduino Nano）、および4つの振動アクチュエータから構成される。なお、Huang [HYS08] らが用いた触覚刺激提示グローブと同様に、ユーザがグローブを装着した状態においても指先の感覚を保つため、および指先を動かしやすくするために軍手の指先部分を取り除いた。それぞれの振動アクチュエータは親指を除いた軍手の各指の第1関節、および第2関節の間（図 4.2）にマスキングテープを用いて取り付けられた。

触覚刺激提示グローブの回路図を図 4.3 に示す。触覚刺激をユーザの指に提示するための振動アクチュエータとして、LBV10B-009（Nidec Copal Corporation）を採用した。LBV10B-009 は、直流電圧3Vで動作する偏心質量振動方式の振動モータである。グローブに取り付けられたそれぞれの振動アクチュエータには、逆起電力による影響を防ぐためにダイオードが並列に接続されている。

4.1.2 タイピングアプリケーション

タッチタイピングを学習するためのシステムとして、タッチタイピング練習用のアプリケーション（タイピングアプリケーション）を作成した。タイピングアプリケーションのウィン

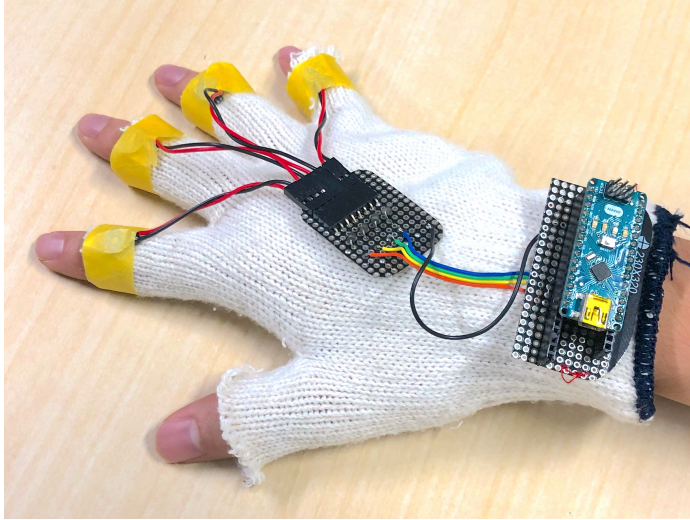


図 4.1: 第 1 試作システムにおける触覚刺激提示グローブ。触覚刺激提示グローブはマイクロコントローラ (Arduino Nano), および 4 つの振動アクチュエータから構成される。親指を除いた各指には振動アクチュエータが 1 つずつ取り付けられる。



図 4.2: 振動アクチュエータの取り付け位置。振動アクチュエータは各指の橙帯部分にマスキングテープを用いて取り付けられる。

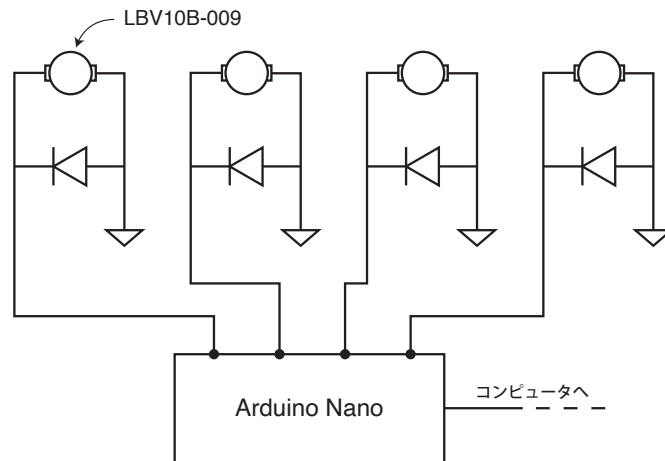


図 4.3: 第 1 試作システムの触覚刺激提示グローブの回路図。各振動アクチュエータには逆起電力による影響を防ぐために、ダイオードが並列に接続されている。振動アクチュエータを駆動させるマイクロコントローラ (Arduino Nano) はコンピュータと USB ケーブルを用いて接続されており、Serial 通信によりデータの交換を行う。



図 4.4: 提案手法にて使用したタイピングアプリケーションのウィンドウ。一番上の行には課題文が表示され、ユーザはテキストボックスに課題文と同じ英文を入力する。画面に表示されているキーボード配列にはどのキーをどの指で押すべきかわかるように色付けされており、キーボード配列表示の下部分にはその色に対応するように色が塗り分けられた指が表示されている。

ドウを図 4.4 に示す。実験に際して、タイピング学習の初期段階のユーザに対する学習効果を調査するためにユーザにとって初めて経験するキーボード配列を選択する必要があった。そのため、第 1 試作システムにおけるタイピングアプリケーションは DVORAK 配列 [Dvo43] を学習するためのアプリケーションとして実装された。提案手法では、武田ら [武田 05] および高岡ら [高岡 10] の手法と同様にユーザが手元を隠した状態において打鍵することを想定している。そのため、ユーザが手元を見ずともキーボード配列を確認できるように、画面上には常にキーボード配列が表示されている。加えて、画面に表示されているキーボード配列にはどのキーをどの指で押すべきかわかるように色付けされており、キーボード配列表示の下部にはその色に対応するように色が塗り分けられた指が表示されている。

タイピングアプリケーションにおいて、MacKenzie の英文データセット [MS03] から無作為に選択された英文を課題文とした。課題文はウインドウの最初の行に表示される。例えば、図 4.4 においては、“buckle up for safety” が課題文である。ユーザが誤入力をした場合、ユーザが文章を入力している行のテキストボックスが赤くなることにより、入力した文章に誤りがあることがユーザに通知される。ユーザは、“delete” キーを打鍵することによってのみ、誤入力した文字を削除することができる。ユーザの入力した文章が課題文と一致した時、ユーザの編集している行のテキストボックスの文字が全て消去され、すぐに次の課題文が提示される。したがって、ユーザが最終的に入力する文章は課題文と常に一致しており、各課題文が表示される時点では必ずテキストボックスが空になる。ユーザが入力し終えた課題文数、および 1 回のタスクにおいて入力すべき課題文数は常にウインドウの下部に表示される。例えば、図 4.4 においては、0/3 と表示されている。分子がこれまでに入力し終わった課題文数であり、分母が 1 回のタスクにおいて入力すべき課題文数である。

タイピングアプリケーションは以下のデータを記録する。

- ユーザが最初の文字を打鍵してからの経過時間
- キー打鍵間に要した時間
- ユーザが打鍵したキーの文字
- これまでに入力した英文数

4.1.3 触覚刺激提示グローブとタイピングアプリケーションの連携

両手の触覚刺激提示グローブはタイピングアプリケーションを実行しているコンピュータとそれぞれ USB ケーブルを用いて接続され、シリアル通信により情報の通信を行う。ユーザが正しい文字を入力すると、タイピングアプリケーションは次に入力すべき文字を両手の触覚刺激提示グローブに送信する。もし、ユーザが誤った文字を入力した場合は、タイピングアプリケーションは文字を送信しない。各触覚刺激提示グローブに装着されているマイクロコントローラは、タイピングアプリケーションから送られてきた文字からキーの打鍵に使用すべき指を判断し、その指の振動アクチュエータを 300 ms 間振動させる（振動時間は Seimra [SCD+14] の実験における最も短い振動時間である）。



図 4.5: 実験において、練習タスクを行っているユーザ。実験参加者が手元のキーボードを確認できないように、実験参加者は板を用いて手元を隠された状態にて打鍵を行った。実験参加者は両手に触覚刺激提示グローブを装着した。

4.2 実験

第1試作システムを用いたタッチタイピングの学習の効果を調査するために、英文を入力させる研究室内実験を行った。本節では、実験参加者、実験器具、実験設計、および実験結果を述べる。

4.2.1 実験参加者

実験にあたり、6名（平均 23.00 歳, 標準偏差 1.67 歳）がボランティアとして参加した。実験参加者は全員男性であり、これまでに DVORAK 配列のキーボードを使用したことがなかった。実験参加者は全員が情報学部の大学生、またはコンピュータサイエンス専攻の大学院生であり、日常的に QWERTY 配列のキーボードを用いたタイピングを行っていた。

4.2.2 実験器具

実験において、著者のラップトップコンピュータ（Apple, 13-inch Macbook Pro, CPU : Intel Core i5 2.7 GHz, メモリ : 8 GB）、日本語キーボード（DELL, SK-8175）、液晶ディスプレイ（DELL, 21.5 インチ）、実験参加者の手元を隠すための板、および触覚刺激提示グローブ2つを用いた。

実験全体を通して、実験参加者は両手に触覚刺激提示グローブを装着し、手元のキーボードを視認できないようにダンボール製の板を用いて手元を隠された（図 4.5）。

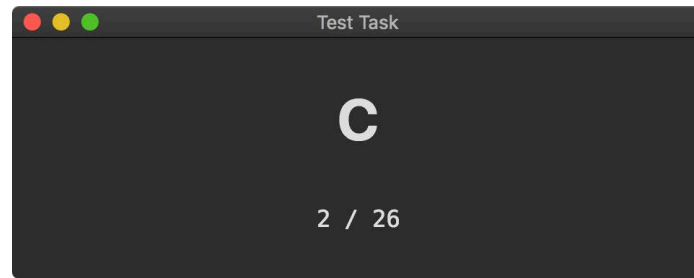


図 4.6: テストタスクのウインドウ．実験参加者はランダムに 1 文字ずつ表示されるアルファベット 26 文字の入力を行う．実験参加者が表示されている文字のキーを打鍵すると次のアルファベットが表示される．画面下部にはこれまでに入力した文字の数が表示されている（例えば，アルファベット 2 文字を入力し終わっている場合，2/26）．

4.2.3 実験設計

実験の手順を図 4.7 に示す．実験において，実験参加者は提案手法を用いる群（PH, 3 名），および提案手法を用いない群（Control, 3 名）の 2 群に分けられた．実験は学習タスク（図 4.4），およびテストタスク（図 4.6）の 2 種類のタスクから構成された．

学習タスクは，MacKenzie の英文データセット [MS03] からタイピングアプリケーションにより無作為に選択された 3 文の英文（課題文）を入力するタスクである．実験参加者は課題文をできる限り素早く，かつ正確に入力するように指示された．PH は，学習タスクにおいて受動触覚が提示された．学習タスク終了後，実験参加者がキー配列を覚えているか確認するためにテストタスクを行った．テストタスクは，ランダムに提示されるアルファベット 26 文字全てを 1 文字ずつ打鍵するタスクである．テストタスクの間，キー配列は画面上に表示されず，実験参加者には受動触覚が提示されなかった．

学習タスク，およびテストタスクを 1 回ずつ行うことを 1 セッションとし，実験参加者は 5 セッション行った．実験参加者はセッション間に少なくとも 1 分間以上の休憩をとるように指示された．各セッション間の休憩中，実験参加者からはタスク中に思ったことを自由にコメントしてもらった．実験参加者 1 人あたりにかかった時間はおよそ 30 分であった．

4.2.4 実験結果

実験から英文 90 文分のデータを収集した（実験参加者 6 人 × 英文 3 文 × 5 セッション）．タッチタイピングの文字入力精度，入力速度，および学習の推移を評価するために次の 3 つの評価基準を用いた．

- 学習タスク
 - 1 文字あたりのキー打鍵数
 - 1 分間あたりの入力文字数

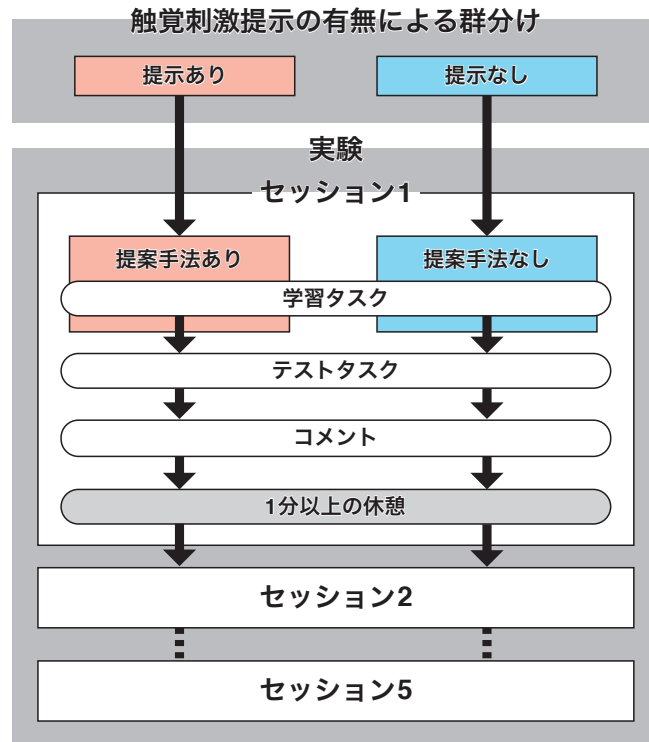


図 4.7: 実験手順。はじめに、実験参加者は提案手法用いる群、および提案手法を用いない群に分けられた。実験において、実験参加者は学習タスクとテストタスクから構成されるセッションを、5セッション行う。各セッション終了後、実験参加者には使用感などのコメントが求められた。各セッション間には1分以上の休憩が設けられた。

- テストタスク
 - － キー配置正答率

なお、1文字あたりのキー打鍵数、および1分間あたりの文字入力数は[AS09]における計算方法に準ずる。1文字あたりのキー打鍵数の実験結果のグラフを図4.8、1分間あたりの入力文字数の実験結果のグラフを図4.9、およびキー配置正答率の実験結果のグラフを図4.10に示す。それぞれのグラフの横軸はセッション数、縦軸はそれぞれの評価基準の値である。提案手法の有無により学習効果に違いが生じるかを評価するために、手法間において実験により得られた全データを用いてウィルコクソンの順位和検定を行った。本実験の検定において、 p 値が0.05未満であることを統計的に有意とみなした。検定の結果、1分間あたりの文字入力数において有意差が検出された($p < 0.05$)。さらにセッション間における学習の推移を調べるために、セッション間においてフリードマン検定を行った結果、1分間あたりの文字入力数($\chi^2(4) = 20.67, p < 0.001$)、およびキー配置正答率($\chi^2(4) = 22.48, p < 0.001$)において主

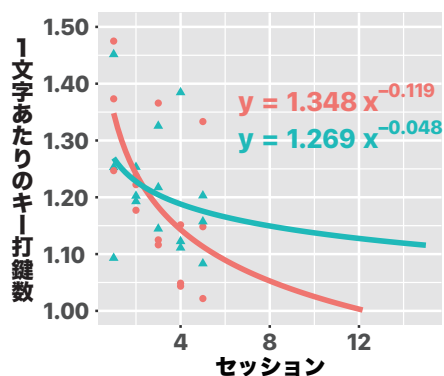


図 4.8: 学習タスクにおける 1 文字あたりのキー打鍵数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の 1 文字あたりのキー打鍵数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの 1 文字あたりのキー打鍵数を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.

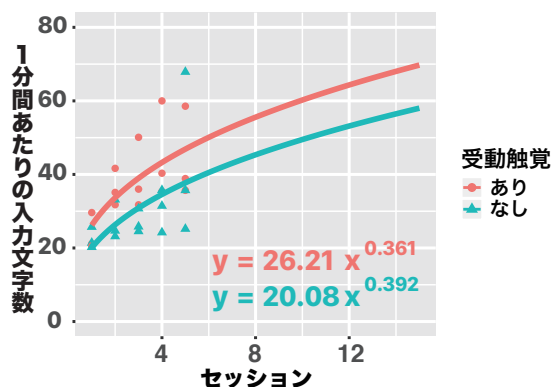


図 4.9: 学習タスクにおける 1 分間あたりの入力文字数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の 1 分間あたりの入力文字数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの 1 分間あたりの入力文字数を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.

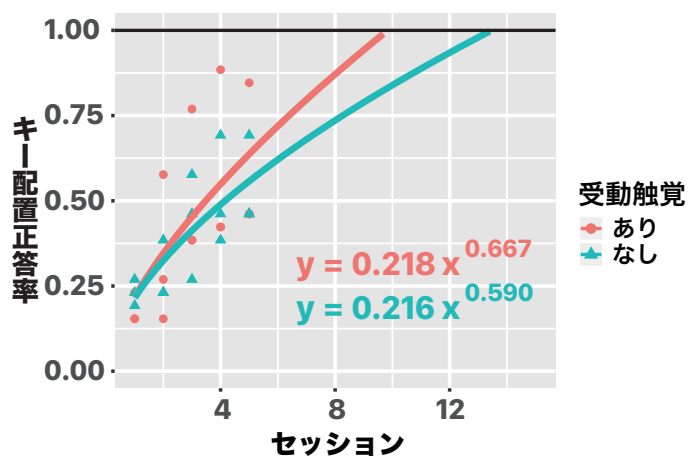


図 4.10: テストタスクにおけるキー配置正答率. 縦軸はテストタスクにおける実験参加者のキー配置正答率であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとのキー配置正答率を表しており, 実線はそれぞれの手法において累乗近似を行った近似曲線である.

効果が検出された。この結果に基づき、スティール＝ドゥワス検定を行った結果 1 分間あたりの文字入力数 ($p < 0.05$)、およびキー配置正答率 ($p < 0.05$) におけるセッション 1 およびセッション 5 の間に有意差が検出された。

4.2.5 議論

本節では、実験から得られた結果に対して、1 文字あたりのキー打鍵数、1 分間あたりの文字入力数、およびキー配置正答率の順に考察を行う。

1 文字あたりのキー打鍵数

1 文字あたりのキー打鍵数において、手法間における有意差は検出されなかった。キー配置正答率同様に、累乗近似を用いて手法間における比較を行った (図 4.9)。その結果、最初のセッションにおいては PH が、Control よりも 1 文字あたりのキー打鍵数が多く、最後のセッションにおいては PH が、Control よりも 1 文字あたりのキー打鍵数が少ないことが見て取れる。このことから、ユーザは受動触覚を用いて学習を行うことにより、誤打鍵数をより低減できると考えられる。

1 分間あたりの文字入力数

実験において、PH が Control よりも常に高い入力速度を示した。PH の実験参加者は、振動が与えられた指の周辺のみを探索すれば良いため、目的のキーを短い時間にて打鍵することができたと考えられる。この結果はすなわち、ユーザが受動触覚を用いて学習を行うことにより、用いない場合と同程度の時間にて、より多くの文章を入力できることを示している。同程度の時間の学習を行う場合においては、試行できる回数を多くすることにより、学習に良い効果があるため [Sch85]、受動触覚がユーザのタッチタイピングの学習を支援できると考えられる。

キー配置正答率

今回の実験において最終的な (すなわち、第 5 セッション終了時) キー配置正答率は、PH において 59.0% (SD = 18.2%)、Control において 53.8% (SD = 16.3%) であった。この結果は、両群ともに 5 回のセッションではキー配置を全て覚えることができなかったことを表している。そのため、実験参加者が全てのキー配置を正確に回答できるまでに必要なセッション数を予測するために、ユーザの学習における推移が累乗に従うこと [Jon57, CEB78] に基づき、累乗近似を用いて両群の比較を行った (図 4.10)。その結果、実験参加者が全てのキー配置を正確に回答できる (すなわち、近似曲線が 100% に達する) までに必要なセッション数が PH において 9.84 セッション、Control において 13.46 セッションであった。この予測による

結果は、PHがControlよりも短い時間にてキー配置を覚られることを示している。すなわち、受動触覚がユーザのタッチタイピング学習を支援したと考えられる。

4.3 学会参加者からのコメントに基づく議論

第1試作システムにより得られた研究成果を第27回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS 2019)、および31ST AUSTRALIAN CONFERENCE ON HUMAN-COMPUTER-INTERACTION(OzCHI 2019)にて、デモ発表を行った。本節では、それぞれのデモ体験者からのコメントを述べる。

4.3.1 WISS 2019におけるデモ体験者からのコメント

デモ体験者の多数が、「文字を入力した瞬間に振動したため、振動に対して注意を向けることができず、どの指が振動されたのかわからなかった」とコメントした。これは第1試作システムにおいて、ユーザが正しいキーを打鍵した後、間もなく次の打鍵に使用するべき指が振動されることが問題であると考えられる。そのため、Seimら[SCD⁺14]およびPescaraら[PPSB19]の調査における触覚刺激提示方法と同様に、ユーザによりキーが打鍵されてから、数百ミリ秒後にユーザの指へ振動を与えるシステムを作成する必要があると考えられる。キー打鍵後の振動を遅延させることにより、ユーザは振動に注意する状態へ移行することができるため、どの指に振動が与えられたかわからない問題を解決できると考えられる。

4.3.2 OzCHI 2019におけるデモ体験者からのコメント

デモ体験者の多数が、「振動からキーボードの上段、中段、下段のどこに目的のキーがあるか即座に判断できない」とコメントした。第1試作システムにおいて、ユーザは各指ごとに振動アクチュエータが1つずつのみ割り当てられていた。したがって、ユーザは振動を与えられたとしても、少なくとも3つのキーから1つのキーを選択する必要があったため、目的のキーを即座に判断できなかったと考えられる。そのため、キーボードの上段、中段、下段ごとに対応した異なる振動を用いることにより、振動からどの段のキーであるか区別できるようなシステムを作成する必要があると考えられる。

第5章 第2試作システムの実装および評価

第1試作システムを用いた実験の結果から、第2試作システムを作成した。本章では、第2試作システムの実装、システムを用いた実験、および実験の結果を示し、議論を述べる。

5.1 第2試作システムの実装

本節では、第2試作システムにおける触覚刺激提示グローブ、およびタイピングアプリケーションの実装を述べる。その後、第1試作システムからの提示する触覚刺激の変更点を述べる。

5.1.1 触覚刺激提示グローブ

与えられた振動からキーボードの上段、中段、下段のどこに目的のキーがあるかをユーザが区別できるように、新しく触覚刺激提示グローブを作成した(図5.1)。第2試作システムにおける触覚刺激提示グローブは、綿手袋、マイクロコントローラ(Adafruit Feather 32u4 Bluefruit LE)、8つの振動アクチュエータ、およびリチウムイオンポリマー電池から構成される。第1試作システムの触覚刺激提示グローブと同様に、綿手袋の指先部分を取り除き、振動アクチュエータとしてLBV10B-009(Nidec Copal Corporation)を採用した。振動アクチュエータの取り付け位置は、1つが手の甲側の第1関節、および第2関節の間(指の先の振動アクチュエータ、図5.2黄)、もう1つが手の平側の第3関節部分(指の付け根の振動アクチュエータ、図5.2赤)である。各指に2つの振動アクチュエータを取り付けることにより、触覚刺激提示グローブは各指に対して3通り(指の先のみ振動、指の付け根のみ振動、両方振動)の振動刺激を提示することができる。これにより、ユーザは与えられた振動刺激からキーボードの上段、中段、下段を区別できると考えられる。

第2試作システムにおける触覚刺激提示グローブの回路図を図5.3に示す。それぞれの振動アクチュエータには逆起電力による影響を防ぐためにダイオードが並列に接続されている。マイクロコントローラの制御電圧が振動アクチュエータの動作電圧を満たさなかったため、それぞれの振動アクチュエータには、電圧を増幅させるためのトランジスタとして2SC1815L(UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD)が1つずつ接続されている。グローブの親指を除いた各指には、それぞれ2つの振動アクチュエータが瞬間接着剤を用いて取り付けられている。

また、第1試作システムでは、USBケーブルを用いて触覚刺激提示グローブとコンピュータを接続していたため、手を動かすともう片方の手にケーブルが当たることから操作性が悪くなるという問題があった。この問題を解決するために、第2試作システムではBluetooth Low

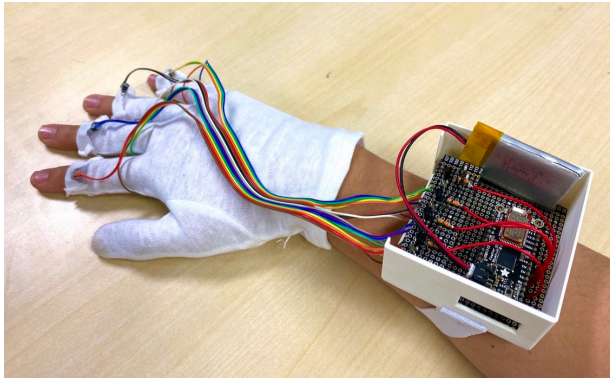


図 5.1: 第 2 試作システムにおける触覚刺激提示グローブ。親指を除く各指には振動アクチュエータが 2 つずつ瞬間接着剤により取り付けられている。3D プリンタにより作成されたケースには、マイクロコントローラ (Adafruit Feather 32u4 Bluefruit LE)、およびリチウムイオンポリマー電池が格納されている。マイクロコントローラにはリチウムイオンポリマー電池から 3.7 V の電圧で電力が供給されている。

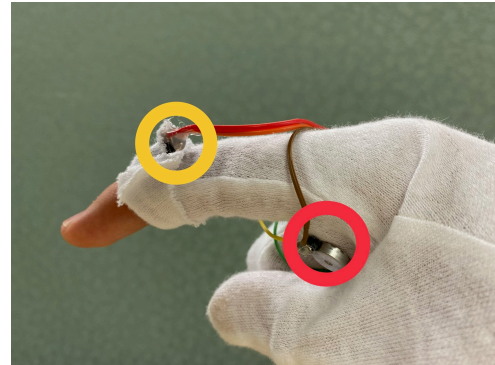


図 5.2: 振動アクチュエータの取り付け位置。各指には振動アクチュエータが 2 つ取り付けられる。1 つが手の甲側の第 2 関節、および第 3 関節の間 (黄)、もう 1 つが手の平側の第 1 関節部分 (赤) である。

Energy (BLE) を用いて、触覚刺激提示グローブとコンピュータが無線通信できるように変更した。システムの無線通信化に際して、USB ケーブルからの給電ができなくなったため、システムの電源としてリチウムイオンポリマー電池を使用した。リチウムイオンポリマー電池はマイクロコントローラへ直流電圧 3.7 V を供給することができる。なお、マイクロコントローラ、リチウムイオンポリマー電池を 3D プリンタにより作成したケースに格納し、ケース下部に取り付けられたゴムバンドを用いてユーザの腕の上に装着させた。

5.1.2 タイピングアプリケーション

第 2 試作システムにおけるタイピングアプリケーションは第 1 試作システムにおけるタイピングアプリケーションと同様のものであるが、使用するデータセットを変更した。第 1 試作システムの実験において、打鍵される回数が極端に少ないキーがあったことから、第 2 試作システムにおけるタイピングアプリケーションの課題文データセットとして、全てのアルファベットを 1 文字以上含む英文 (英文パングラム) のみから構成される英文データセットを用いた。本論文の付録 A に英文データセットの詳細を掲載する。

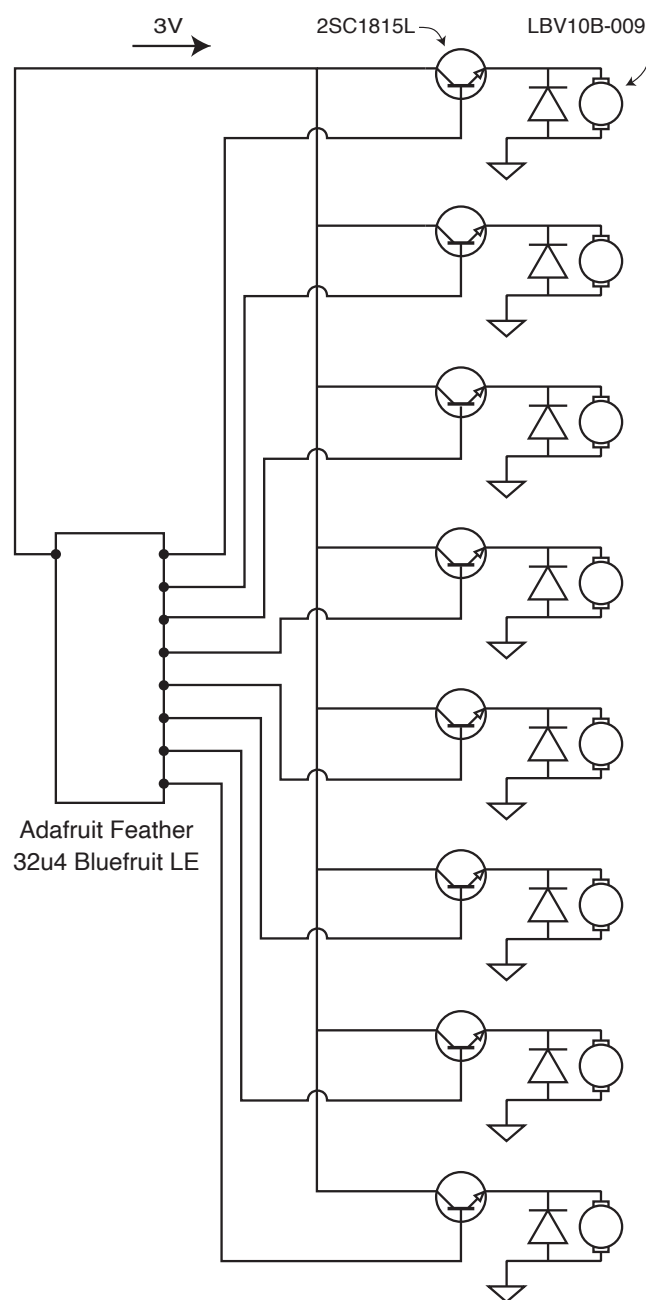


図 5.3: 第 2 試作システムの触覚刺激提示グローブの回路図。マイクロコントローラから供給される電圧が振動アクチュエータの動作電圧を満たさないため、電圧を増幅させるために、トランジスタが各振動アクチュエータに接続されている。また、振動アクチュエータの逆起電力による影響を防ぐために、各振動アクチュエータには、ダイオードが並列に接続されている。



図 5.4: 実験において練習タスクを行っている実験参加者。実験参加者は画面に表示される課題文の入力を行う。手元のキーボードを見ることによりキー配置の情報を手に入れることができないように、実験参加者は無刻印キーボードを用いて入力を行った。

5.1.3 提示する触覚刺激

触覚刺激提示グローブの振動アクチュエータは、タイピングアプリケーションから送られてきた文字からキーの打鍵に使用するべき指を判断し、その指の振動アクチュエータを 100 ms 後に 400 ms 間振動させる（振動時間、および振動させるまでの遅延時間は Seim ら [SQS14] の実験における振動時間、および遅延時間である）。この時、次に打鍵すべき文字のキーが、キーボードの上段のキー（例えば、DVORAK 配列において ‘p’, ‘g’, ‘c’）である時は指の先の振動アクチュエータ、キーボードの下段のキー（例えば、DVORAK 配列において ‘k’, ‘m’, ‘w’）である時は指の付け根の振動アクチュエータ、そしてキーボードの中段のキー（例えば、DVORAK 配列において ‘u’, ‘h’, ‘t’）である時は指の先、および付け根両方の振動アクチュエータを振動させる。

5.2 実験

第 2 試作システムを用いたタッチタイピングの学習の効果を調査するために、研究室内実験を行った。本節では、実験参加者、実験設計、および実験結果を述べる。

5.2.1 実験参加者

実験にあたり、6 名（平均 22.66 歳, 標準偏差 0.82 歳）がボランティアとして参加した。実験参加者は全員男性であり、これまでに DVORAK 配列のキーボードを使用していない。

実験参加者全員が情報学部の大学生，またはコンピュータサイエンス専攻の大学院生であり，日常的に QWERTY 配列のキーボードを使用していた．実験参加者のタイピング歴（1 週間に平均 1 回以上キーボードに触れたことがある期間）は平均 80.00 ヶ月（標準偏差 24.78 ヶ月）であった．6 人の実験参加者（P₁-P₆）のうち，これまでに運指情報を提示するタイピング学習システムを用いて学習を行ったことがある実験参加者は 3 名（P₃, P₅, P₆）だった．該当する 3 名とも，使用したことがある程度であり，タッチタイピング習得までは至っていないと報告した．実験参加者は全員，QWERTY 配列のキーボードにて画面を見続けながらタイピングを行えるが，正しい運指ではタイピングできないと報告した．

5.2.2 実験設計

実験において，実験参加者は指の先の振動アクチュエータのみを使用する群（PH1），指の先と付け根の振動アクチュエータを両方使用する群（PH2），および振動アクチュエータを使用しない群（Control）に分けられた．実験参加者は無刻印キーボードを用いてタイピングを行った．これは，実験中に手元のキーボードを確認しても，キーボード配列の情報を得られないようにするためである．全実験参加者は両手に触覚刺激提示グローブを装着した（図 5.4）．

実験の手順を図 5.5 に示す．実験は学習タスク，およびテストタスク（図 5.6）の 2 種類のタスクから構成される．学習タスクは，学習タスク用の英文データセット（付録 A.1）からタイピングアプリケーションにより無作為に選択された 3 文の英文（課題文）を入力するタスクである．PH1 および PH2 は，学習タスクにおいて受動触覚が提示された．PH1 では，次の打鍵に使用されるべき指の先端の振動アクチュエータが振動した．PH2 では，次の打鍵に使用されるべき指の 2 つの振動アクチュエータのうち，打鍵されるべきキーが上段であれば指の先，下段であれば指の付け根，中段であれば指の先と付け根の振動アクチュエータが同時に振動した．学習タスクにおいて，実験参加者はキーボード配列を覚えるように心がけてタイピングするよう指示された．

学習タスク終了後，実験参加者がキー配列を覚えているかを確認するためにテストタスクを行った．テストタスクは，画面に表示される英文を入力するタスクである．テストタスク用のデータセットも英文パングラムから構成される英文データセットである（付録 A.2）．テストタスクにおける課題文は決まった順番により提示される．テストタスクの間，キー配列は画面上に表示されなかった．実験参加者が入力した文字は画面上では●として表示された．課題文，および入力した文字の上下の位置が揃っているため，実験参加者は次に入力すべき文字が何かを知ることができた．実験参加者はテストタスクにおいて，確実に間違えたと思った場合は‘delete’キーによる修正を行うこと，およびキー配置がわからない場合はキーがあると思う場所を打鍵することを指示された．

学習タスク，およびテストタスクを 1 回ずつ行うことを 1 セッションとし，各実験参加者は 1 日に 5 セッション，3 日間で合計 15 セッション行った．セッション間には少なくとも 1 分間以上の休憩をとり，実験日間は 22-26 時間のインターバルが挟まれた．各セッション間の休憩時間中，実験参加者からはタスク中に思ったことを自由にコメントしてもらった．実験参加者が実験 1 日あたりにかかった時間はおよそ 40 分であった．

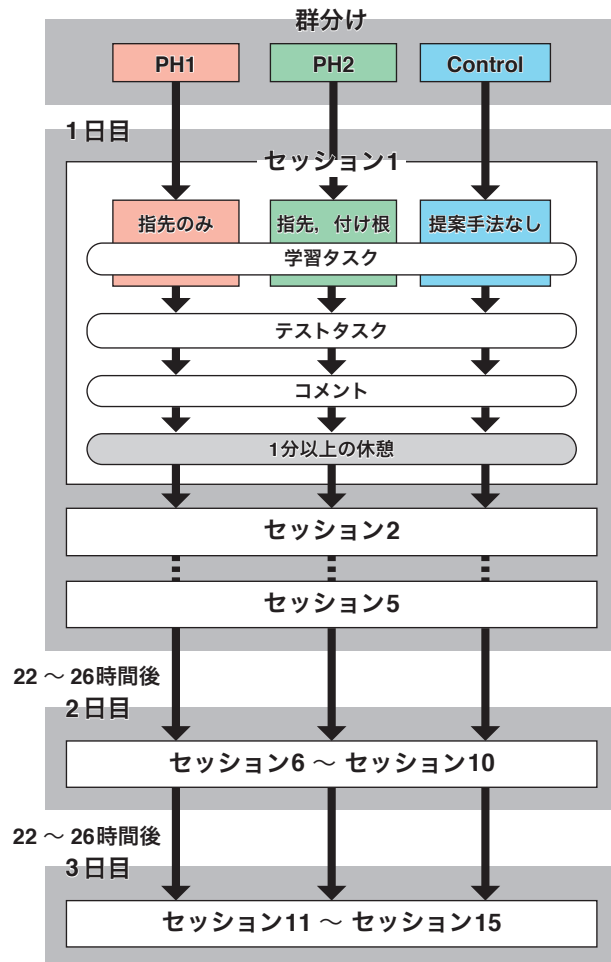


図 5.5: 実験手順. はじめに実験参加者は, 指の先の振動アクチュエータのみを使用する群 (PH1), 指の先と付け根の振動アクチュエータを両方使用する群 (PH2), および振動アクチュエータを使用しない群 (Control) に分けられた. 学習タスク, およびテストタスクを1回ずつ行うことを1セッションとし, 各実験参加者は1日に5セッション, 3日間で合計15セッション行った. セッション間には少なくとも1分間以上の休憩をとり, 実験日間は22-26時間のインターバルが挟まれた. 各セッション間の休憩時間中, 実験参加者からはタスク中に思ったことを自由にコメントしてもらった. 実験参加者が実験1日あたりにかかった時間はおよそ40分であった.

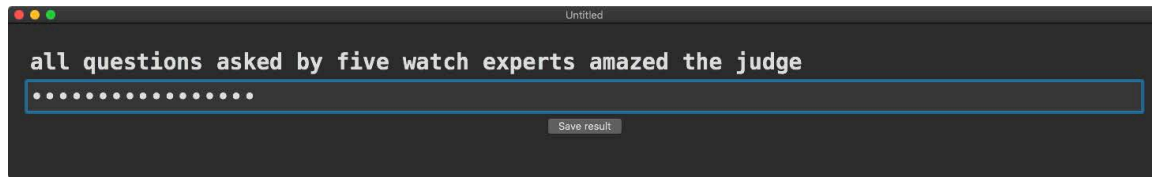


図 5.6: テストタスクのウィンドウ。実験参加者は、画面に表示される課題文の入力を行う。実験参加者が入力した文字は●として表示されるため、実験参加者は入力した文字を確認することができなかった。課題文、および入力した文字の上下の表示位置が揃っているため、実験参加者は次に入力すべき文字が何かを知ることができた。

5.2.3 実験結果

実験から、学習タスクにおいて英文 270 文分のデータ（実験参加者 6 人 × 英文 3 文 × 15 セッション）、およびテストタスクにおいて英文 90 文分（実験参加者 6 人 × 英文 1 文 × 15 セッション）のデータを収集した。タッチタイピングの入力精度、入力速度、および学習の推移を評価するために、次の 4 つの評価基準を用いた。

- 学習タスク
 - 1 文字あたりのキー打鍵数
 - 1 分間あたりの入力文字数
- テストタスク
 - キー配置正答率
 - 1 分間あたりの入力文字数

学習タスクにおける 1 文字あたりのキー打鍵数の結果のグラフを図 5.7、および 1 分間あたりの入力文字数の結果のグラフを図 5.8 に示す。テストタスクにおけるキー配置正答率の結果のグラフを図 5.9、および 1 分間あたりの入力文字数の結果のグラフを図 5.10 に示す。それぞれのグラフの横軸はセッション数、縦軸はそれぞれの評価基準の値である。キー配置正答率を除いた各グラフには累乗近似に基づく回帰曲線と回帰式、およびキー配置正答率のグラフにはロジスティック成長モデルに基づく上限値を 1.0 とした回帰曲線と回帰式が描かれている。加えて、キー配置正答率を除いた各グラフにはデータを対数変換したのち線形回帰した場合における決定係数 (R^2)、およびキー配置正答率のグラフには Nagelkerke の R^2 値 [Nag91] が書かれている。

各評価基準において手法間に差があるか調べるために、実験により得られた全データを用いて、各評価基準を従属変数、および各手法を独立変数とした検定を行った。本実験の検定において、 p 値が 0.05 未満であることを統計的に有意とみなした。クラスカル・ウォリス検定の結果、1 分間あたりの入力文字数 ($\chi^2 = 29.12, p = 4.751 \times 10^{-7} < 0.05$)、キー配置正答

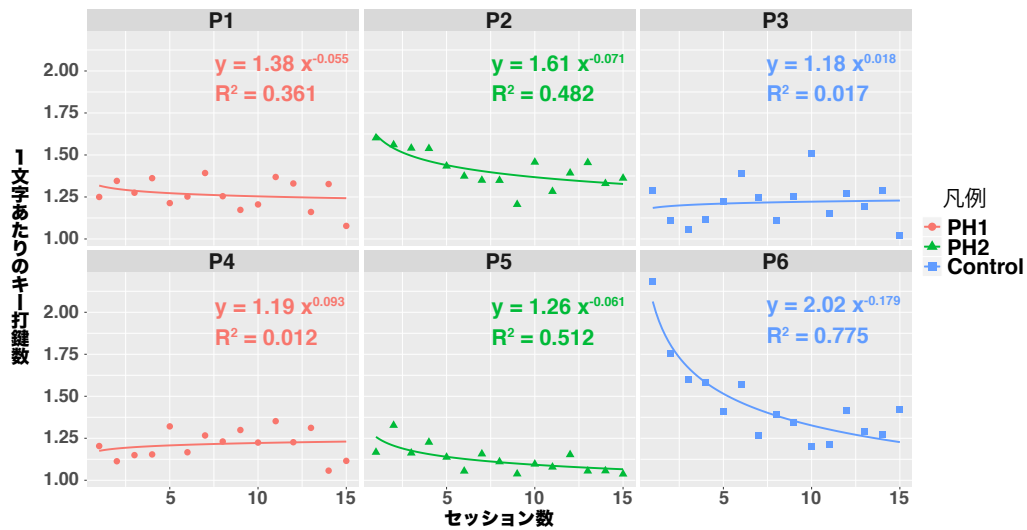


図 5.7: 学習タスクにおける 1 文字あたりのキー打鍵数。縦軸は学習タスクにおける実験参加者の 1 文字あたりのキー打鍵数であり、横軸はセッション数である。グラフ中の点は実験参加者ごとの 1 文字あたりのキー打鍵数を表しており、実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である。

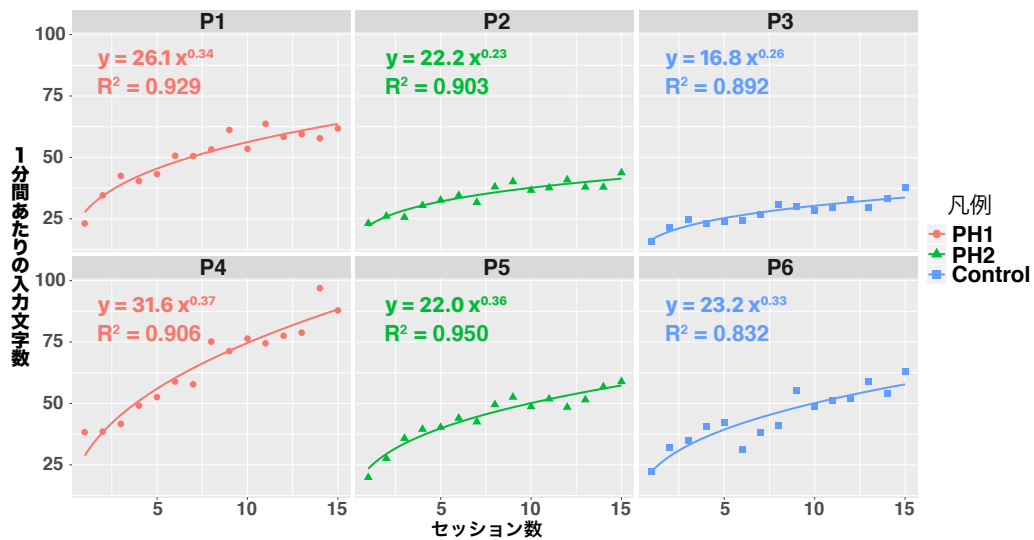


図 5.8: 学習タスクにおける 1 分間あたりの入力文字数。縦軸は学習タスクにおける実験参加者の 1 分間あたりの入力文字数であり、横軸はセッション数である。グラフ中の点は実験参加者ごとの 1 分間あたりの入力文字数を表しており、実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である。

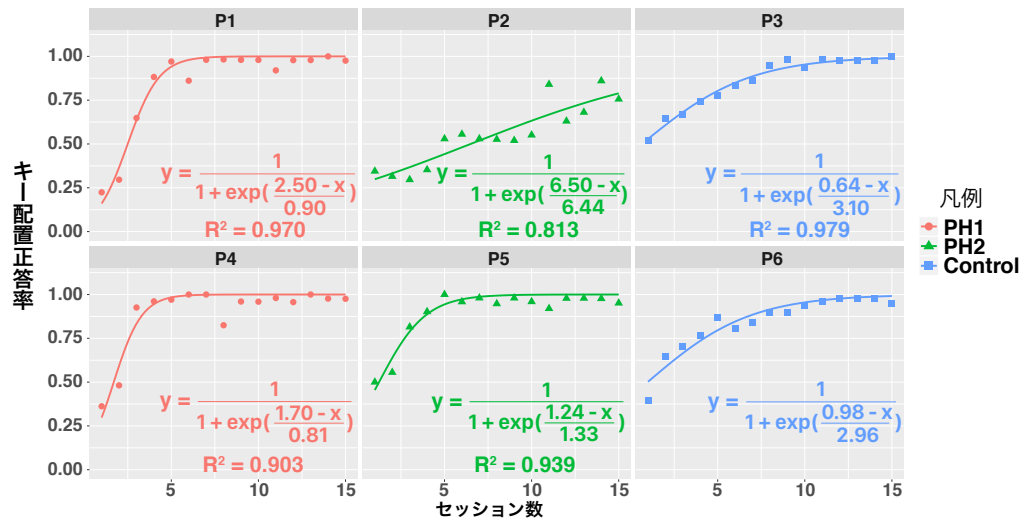


図 5.9: テストタスクにおけるキー配置正答率. 縦軸はテストタスクにおけるキー配置正答率であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとのキー配置正答率を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者においてロジスティック成長モデルに基づいた近似を行った近似曲線である.

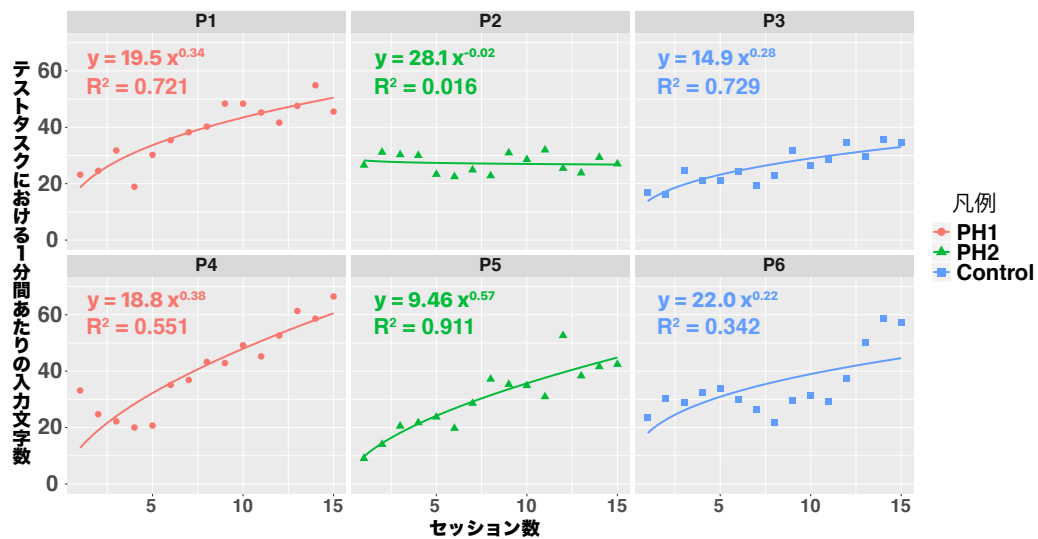


図 5.10: テストタスクにおける1分間あたりの入力文字数. 縦軸は学習タスクにおける実験参加者の1分間あたりの入力文字数であり, 横軸はセッション数である. グラフ中の点は実験参加者ごとの1分間あたりの入力文字数を表しており, 実線はそれぞれの実験参加者において累乗近似を行った近似曲線である.

表 5.1: キー配置を覚えるまでに必要なセッション数. 各実験参加者の近似曲線が 99%を超えるまでに必要とするセッション数を, キー配置を覚えるまでに必要とするセッション数とした.

実験参加者	手法	キー配置を覚えるために必要なセッション数
P1	PH1	6.636
P2	PH2	36.09
P3	Control	14.89
P4	PH1	5.422
P5	PH2	7.351
P6	Control	14.58

率 ($\chi^2 = 9.124, p = 0.010 < 0.05$), およびテストタスクにおける 1 分間あたりの入力文字数 ($\chi^2 = 12.75, p = 1.701 \times 10^{-3} < 0.05$) に主効果が検出された. 次に, どの手法間において差があるのか調べるために, 主効果が検出された評価基準においてスティール=デュワスの多重比較検定を行った. 1 分間あたりの入力文字数において PH1 と PH2 ($p = 2.740 \times 10^{-5} < 0.05$) および PH1 と Control ($p = 7.712 \times 10^{-6} < 0.05$), キー配置正答率において PH1 と PH2 ($p = 0.016 < 0.05$), およびテストタスクにおける 1 分間あたりの入力文字数において PH1 と PH2 ($p = 3.300 \times 10^{-3} < 0.05$) および PH1 と Control ($p = 0.010 < 0.05$) に有意差が検出された.

5.2.4 議論

本節では, 実験から得られた結果に対して, キー配置正答率, 1 文字あたりのキー打鍵数, および 1 分間あたりの文字入力数の順に議論を行う. その後, 実験参加者からのコメントをもとに議論を行う.

キー配置正答率

それぞれの実験参加者の回帰式が 99%を超えるまでに必要とするセッション数を, 全てのキー配置を覚えるまでに必要とするセッション数とし, 実験参加者が全てのキー配置を覚えるまでに必要とするセッション数を調べた. 表 5.1 にそれぞれの実験参加者がキー配置を覚えるまでに必要とするセッション数を示す. 表 5.1 から, P_2 が全てのキー配置を覚えるまでに必要とするセッション数が多く, かつキーを覚えるまでに必要なセッション数が実験において行ったセッション数を超えていることが見て取れる. そのため, 外れ値であるか調べるためにスミルノフ・グラブス検定を行った結果, 外れ値であることが示された ($p = 0.019 < 0.05$). そのため, 受動触覚の有無による学習への影響の議論を P_2 の値を除外して行い, その後 P_2 への受動触覚による学習への影響の議論を行う.

各群における全てのキー配置を覚えるまでに必要とするセッション数は、PH1において平均 6.03 セッション、PH2（すなわち、 P_4 ）において 7.35 セッション、Control において平均 14.73 セッションだった。4 章のキー配置正答率における予測結果と同様に、受動触覚を用いた実験参加者がより早く全てのキー配置を覚えられることが示された。PH1、および P_2 を除いた PH2 の手法間において、キー配置を覚えるまでに必要とするセッション数に大きな差がないことから、振動アクチュエータの数を増やしても、ユーザのタッチタイピング学習をより強く支援できるわけではない可能性が示された。

P_2 は、セッション 6 の後において、「次のキーを入力するまで振動アクチュエータが振動し続けてほしい」、「人差し指と中指の振動の区別ができない」、および「振動を受けた指を考える時間が必要である」とコメントした。このコメントから、 P_2 は編集している文章よりも振動される指に対して集中していたと考えられる。すなわち、振動アクチュエータの数を増やしたことにより、触覚刺激が与える情報量が多くなったことから、 P_2 はキー配置の学習へ集中することが難しくなったため、キー配置の学習がうまく進まなかったと考えられる。

1 文字あたりのキー打鍵数

P_3 、および P_4 における回帰式において、1 文字あたりのキー打鍵数がセッションが進むにつれて増える傾向が見られた。しかし、決定係数の値が低いこと、およびそれぞれの実験参加者には打鍵することが苦手なキーが存在しうること [高岡 14]、および学習タスクにおいてはセッションごとに異なる課題文が提示されることから、各セッションにおける実験参加者の誤入力数が安定していないと考えられる。また、統計的にも手法間に差があることが認められなかったことから、1 文字あたりのキー打鍵数（すなわち、誤入力数）を低減させるためには受動触覚を用いた手法とは異なるアプローチが必要であると考えられる。

1 分間あたりの入力文字数

学習タスクにおいて、PH1 は他の 2 群よりも常に高い入力速度を示した。この原因は、4 章における実験結果と同様に、実験参加者は振動が与えられた指の周辺のみを探索するため、探索時間を削減できたことであると考えられる。しかし、PH2 と Control の間に有意差が見られなかった。この原因は、PH2 の実験参加者は振動の意味するキーの位置を考える時間が必要だったことであると考えられる。

また、触覚刺激が与えられないテストタスクにおいても、PH1 が他の 2 群よりも常に高い入力速度を示した。これは、学習タスク時の入力速度が高い実験参加者はテストタスクにおいても入力速度が高くなる可能性があることを示唆している。そのため、受動触覚を用いたタイピング学習が、振動による支援のない通常のタッチタイピングの修得に貢献できると考えられる。ただし、個人差による影響を考える必要があるため、実験参加者を増やして実験を行うべきである。

実験参加者からのコメント

実験参加者は全員が実験中に「タイピング時の疲労を感じた」と述べた。このことから、タッチタイピングの学習は実験参加者にとって高い作業負荷があると考えられる。一方で、P₄ および P₅ はセッション 6 から「実験タスクが楽しい」とコメントした。したがって、提案手法がユーザのタッチタイピング学習における作業負荷を軽減している可能性がある。しかしながら、第 2 試作システムを用いた実験において、提案手法のユーザビリティの評価を行っていない。そのため、実際に提案手法がユーザの作業負荷を軽減しているか調査する必要がある。

P₂, P₅, および P₆ は実験中に似たような単語が登場していることを報告した。報告の通り、今回作成したデータセットには似たような単語が多く、とりわけ“quick”, および“daft”が頻出している。そのため、英単語の出現頻度も考慮したデータセットを作成し、練習する単語に偏りが発生しないようにする必要があると考えられる。

また、P₄ は、「普段使用しているキーボード配列 (QWERTY 配列) におけるタイピングの運指練習のために、提案手法を使用したい」とコメントした。ユーザがすでに間違った運指を身に付けてしまっていた場合、間違った運指を正しい運指へ矯正することは困難である [村田 90]。したがって、ユーザが日常的に使用しているキーボードにおいて、提案手法を用いることにより運指の矯正に効果があるのかを調査したいと考えている。

第6章 今後の展望

本研究の実験において、試作システムはユーザの指に対して少なくとも振動アクチュエータ4個分の情報を提示した。振動アクチュエータの数を増やすことによって、より明確に情報を提示しても、学習が促進されることがないことを本研究において明らかにした。一方で、本研究において、振動アクチュエータの数を4個よりも減らした時におけるユーザの学習の調査は行っていない。例えば、ユーザの両手に振動アクチュエータを1つずつだけ取り付け、どちらの腕の指を用いて打鍵するべきかをユーザに通知するだけでも、ユーザへ正しい運指を促すことができる可能性がある。もし、この手法がユーザの正しい運指によるタッチタイピングの学習を支援できるならば、振動刺激を提示する装置をより簡素にできるため、触覚刺激提示グローブを小型にすることによって、装着感によるタイピングへの影響を軽減することができる。そのため、今後の展望として、ユーザへ正しい運指を促すことができる振動アクチュエータの数を調査する予定である。

第2試作システムを用いた実験において参加者全員が疲労感を報告したが、提案手法が作業負担を軽減している可能性が考えられた。しかしながら、第2試作システムを用いた実験において、提案手法のユーザビリティの評価を行っていない。そのため、実際に提案手法がユーザの作業負担を軽減しているか調査する必要がある。その調査において、提案手法と、視覚的に運指の情報を提示するタイピング学習システム（例えば、myTyping¹ および e-typing²）とのユーザビリティの比較を行う予定である。

¹<https://typing.twil.me/>（閲覧日：2020年2月20日）

²<https://www.e-typing.ne.jp/>（閲覧日：2020年2月20日）

第7章 終わりに

手元を見ることなく正しい運指にて入力を行う技術であるタッチタイピングの学習を支援するために、受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法を考案した。提案手法を用いた実験を行った結果、提案手法を用いたユーザはより短い時間にてキー配置を記憶できることが明らかとなった。したがって、提案手法は、ユーザのタッチタイピングの学習を支援できることが示唆された。また、ユーザへ与える振動の明確さを向上させた場合、明確さを向上させない方が良い学習効果をもたらすことが示された。しかし、提案手法における振動の明確さがすでに高いという可能性が考えられるため、より明確さの少ない振動を与えた場合の学習効果を調べる必要がある。また、ユーザが日常的に使用しているキーボードの正しい運指の学習において、提案手法がユーザの学習を支援できるか調査を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生には多くのご意見とご指導を頂きました。研究の進め方を基礎からご指導いただいたのみならず、研究の相談や論文執筆に関して多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の同輩、先輩方には研究活動において様々なご助言を頂きました。また、WAVE チームの皆様にはチームゼミにおいて的確なご意見を多く頂きました。これらのご意見が研究を進める上で頼れる道標となりました。大変感謝しております。特に、八箇恭平氏には研究方針や論文執筆など本研究に対して多くの重要なご助言を頂いたのみならず、共著者として数えきれないほどのご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。また、実験に参加していただいた皆様には、長時間の実験にご協力頂きましたことを大変感謝しております。最後に、研究生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [AS09] Ahmed Sabbir Arif and Wolfgang Stuerzlinger. Analysis of Text Entry Performance Metrics. In *Proceedings of 2009 IEEE Toronto International Conference - Science and Technology for Humanity (TIC-STH '09)*, pp. 100–105, 2009.
- [CEB78] Stuart K. Card, William K. English, and Betty J. Burr. Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics*, Vol. 21, No. 8, pp. 601–613, 1978.
- [Dvo43] August Dvorak. There is a Better Typewriter Keyboard. *National Business Education*, Vol. 12, No. 2, pp. 51–58&66, 1943.
- [HYS08] Kevin Huang, Ellen Yi-Luen Do, and Thad Starner. Piano Touch: a Wearable Haptic Piano Instruction System for Passive Learning of Piano Skills. In *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC '09)*, pp. 41–44, 2008.
- [Jon57] J. R. De Jong. The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards. *Ergonomics*, Vol. 1, No. 1, pp. 51–60, 1957.
- [MS03] I. Scott MacKenzie and R. William Soukoreff. Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*, pp. 754–755, 2003.
- [Nag91] N. J.D. Nagelkerke. A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. *Biometrika*, Vol. 78, No. 3, pp. 691–692, 1991.
- [PPSB19] Erik Pescara, Tobias Polly, Andrea Schankin, and Michael Beigl. Reevaluating Passive Haptic Learning of Morse Code. In *Proceedings of the 2019 International Symposium on Wearable Computers (ISWC '19)*, pp. 186–194, 2019.
- [RVDVs⁺19] José Luis Rodríguez, Ramiro Velázquez, Carolina Del-Valle-soto, Sebastián Gutiérrez, Jorge Varona, and Josué Enríquez-Zarate. Active and Passive Haptic Perception of Shape: Passive Haptics Can Support Navigation. *Electronics*, Vol. 8, No. 3, 2019.

- [SCD⁺14] Caitlyn Seim, John Chandler, Kayla DesPortes, Siddharth Dhingra, Miru Park, and Thad Starner. Passive Haptic Learning of Braille Typing. In *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC '14)*, pp. 111–118, 2014.
- [Sch85] Walter Schneider. Training high-performance skills: Fallacies and guidelines. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 27, No. 3, pp. 285–300, 1985.
- [SDZ⁺17] Caitlyn Seim, Nick Doering, Yang Zhang, Wolfgang Stuerzlinger, and Thad Starner. Passive Haptic Training to Improve Speed and Performance on a Keypad. In *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT '17)*, Vol. 1, pp. 1–13, 2017.
- [SQS14] Caitlyn Seim, David Quigley, and Thad Starner. Passive Haptic Learning of Typing Skills Facilitated by Wearable Computers. In *Proceedings of CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '14)*, pp. 2203–2208, 2014.
- [SRHSS16] Caitlyn Seim, Saul Reynolds-Haertle, Sarthak Srinivas, and Thad Starner. Tactile Taps Teach Rhythmic Text Entry: Passive Haptic Learning of Morse Code. In *Proceedings of the 2019 International Symposium on Wearable Computers (ISWC '19)*, pp. 164–171, 2016.
- [SS99] Aaron E. Sklar and Nadine B. Sarter. Good Vibrations: Tactile Feedback in Support of Attention Allocation and Human-Automation Coordination in Event-Driven Domains. *Human Factors*, Vol. 41, No. 4, pp. 543–552, 1999.
- [Wic02] Christopher D. Wickens. Multiple Resources and Performance Prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Vol. 3, No. 2, pp. 159–177, 2002.
- [YEYG03] Eldad Yechiam, Ido Erev, Vered Yehene, and Daniel Gopher. Melioration and the Transition from Touch-Typing Training to Everyday Use. *Human Factors*, Vol. 45, No. 4, pp. 671–684, 2003.
- [高岡 10] 高岡詠子, 橋本知佳. タッチタイピング学習システムを用いたタッチタイピング訓練法に関する研究. 情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告, Vol. 106, pp. B1–B10, 2010.
- [高岡 14] 高岡詠子, 杉浦学, 小宮仁志. タイピング動作特性の解析. 情報処理学会研究報告, Vol. 125, No. 9, pp. 1–14, 2014.
- [川島 89] 川島大司. ブラインド・タッチの学習方法について. 情報処理学会第 39 回全国大会, pp. 45–46, 1989.

- [村田 90] 村田俊和, 竹田尚彦, 河合和久, 大岩元. 打鍵速度制御型タイピング教育システム-有効性の検討-. ヒューマンインタフェース, Vol. 29, No. 2, pp. 1-10, 1990.
- [大野 95] 大野健彦. 打鍵作業における熟練度と作業過程の関係. ヒューマンインタフェース, Vol. 63, No. 6, pp. 31-36, 1995.
- [辻本 11] 辻本進, 曾我真人, 瀧寛和. 拡張現実感を用いたタイピングスキル学習支援環境の構築. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 126, pp. 149-153, 2011.
- [田村 12] 田村啓, 高岡詠子. タイピングにおける動作特性の解析. 情報教育シンポジウム, pp. 155-160. 情報処理学会, 2012.
- [田村 13] 田村拓也, 曾我真人, 瀧寛和. 運指の誤りの診断とアドバイスを与えるタイピングスキル学習支援環境. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 6, pp. 29-34, 2013.
- [藤井 13] 藤井達史, 吉田周平, 内藤宏, 篠原一光. 視覚的注意分割を要する課題の精神的作業負荷. 日本認知心理学会発表論文集, Vol. 2013, pp. 149-149, 2013.
- [武田 05] 武田林太郎, 松澤芳昭, 大岩元. タイピング教育の現状と和文タイピング練習環境の構築. 情報教育シンポジウム 2005 論文集, Vol. 8, pp. 191-196, 2005.

業績リスト

本論文の主な内容は，下記にて公表済みである．

- 査読なし論文
 - 高倉礼, 八箇恭平, 志築文太郎. 受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法の検討. 第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, 日本ソフトウェア科学会, 2019 年 9 月.
- 査読あり論文
 - Rei Takakura, Kyohei Hakka, and Buntarou Shizuki. 2019. Exploration of Passive Haptics Based Learning Support Method for Touch Typing. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction (OzCHI '19)*, December 2–5, 2019, Fremantle, WA, Australia. ACM, NewYork, NY, USA, pp. 529–533.

付 録 A 実験に用いた英文データセット

本論文にて行った第2試作システムを評価するための実験において，英文データセットを作成した．本付録では，作成したデータセットの英文を示す．

A.1 学習タスクにおける英文データセット

文	文字数
pack my box with five dozen liquor jugs	39
few quips galvanized the mock jury box	38
jackdaws love my big sphinx of quartz	37
the five boxing wizards jump quickly	36
how quickly daft jumping zebras vex	35
bright vixens jump dozy fowl quack	34
vjump the lazy dogs quick brown fox	35
quick wafting zephyrs vex bold jim	34
quick zephyrs blow vexing daft jim	34
sphinx of black quartz judge my vow	35
waltz bad nymph for quick jigs vex	34
abc def ghi jkl mno pqr stu vwx yz	34
how vexingly quick daft zebras jump	35
two driven jocks help fax my big quiz	37
quick zephyrs blow vexing daft jim	34

A.2 テストタスクにおける英文データセット

文	文字数
all questions asked by five watch experts amazed the judge	58
five or six big jet planes zoomed quickly by the tower	54
six of the women quietly gave back prizes to the judge	54
ban foul toxic smogs which quickly jeopardize lives	51
the jukebox music puzzled a gentle visitor from a quaint valley town	64
the public was amazed to view the quickness and dexterity of the juggler	68
my faxed joke won a pager in the cable tv quiz show	51
how razorback jumping frogs can level six piqued gymnasts	53
by jove my quick study of lexicography won a prize	50
a large fawn jumped quickly over white zinc boxes	49
cozy lummoX gives smart squid who asks for job pen	50
adjusting quiver and bow zompyc killed the fox	46
the quick onyx goblin jumps over the lazy dwarf	47
the quick brown fox jumps over the lazy dog	43
the jay pig fox zebra and my wolves quack	41