

Yarnkey : 導電糸による2次元パターンのタッチセンシング を利用した太股上ウェアラブル入力デバイス

柴田 謙¹ 鳴海 紘也²

概要: 近年、時計やメガネ、衣服などを利用したウェアラブルな文字入力デバイスが普及しつつあるが、それらの多くは「いつでも・どこでも」というユビキタスな利用を考えた場合に、姿勢や外見などに関するいくつかの制約を抱えている。本論文では、それらの問題点を解決するため、ウェアラブル入力デバイス Yarnkey を提案する。Yarnkey はズボンの太股部分に縫い付けられた導電糸により6点のタッチセンシングを行い、英語アルファベットに対応した2次元パターンを認識する。Yarnkey の利点として、片手の指1本で、着座でも起立状態でも使用でき、目立たず小型軽量で、短時間で学習が可能だという点が挙げられる。本論文ではまず Yarnkey の実装について述べ、その後、上記の利点を検証するために実施したユーザスタディについて詳述する。

Yarnkey: A Thigh-worn Wearable Input Device for 2D Alphabetic Patterns using Conductive-threads-based Touch Sensing

KEN SHIBATA¹ KOYA NARUMI²

1. はじめに

スマートフォンに代表されるモバイルデバイスの普及により、我々の身の回りに存在する計算機の数は一躍的に増大した。それと同時に、計算機やインタフェースを日常の物体に「織り込む」[1] ユビキタス・コンピューティングの実現に向けて、時計・メガネ・衣服など、我々が生活の中で装着しうる物体を利用したウェアラブルな入力デバイスが利用されつつある。その一方で、ウェアラブル入力デバイスに関する既存の研究事例や製品には、その手法ごとにいまだいくつかの問題点が存在すると考えられる：

1. 両腕の占有：スマートウォッチや Levi's Trucker Jacket [2] など腕装着型デバイスの場合、デバイスを保持する腕と入力を行う腕の両方が必要になる
2. 姿勢の制約：腕装着型デバイスや、HoloLens [3] などのジェスチャ入力デバイスの場合、満員電車内のような姿勢が制限される環境では使いづらい
3. 外見的差異・重量・体積：ヘッドマウントディスプレイ

イなどを装着した場合、デバイスを使用していない人との外見的な差異が大きい。また、大型のキーボードなどを搭載したデバイスの場合、一定時間装着するデバイスとしては重量や体積が大きくなる

4. 学習コストの高さ：文字などの入力を目標とする場合、手書きやキーボードなどの従来手法と大きく異なる入力方法を利用すると学習コストが高くなる

これらの問題点を低減する手法として、過去にいくつかの提案がなされている。例えば TipText [4] では、薄膜タッチセンサを指先に巻きつけ、指同士のタップにより入力を行う。このデバイスは軽量で装着しやすい一方で、外見的差異が大きく、入力を必要としない場合にも指先が塞がれるという欠点がある。その他、Katayama らは左右に分割されたキーボードを両側の太股に装着し入力する手法を提案している [5]。しかしこの手法を用いた場合も、キーボードがそのまま衣服に貼り付けられているため外見的差異が大きい。また、硬く重いキーボードが貼り付けられているため、ユーザの装着体験は通常の上着を装着する場合と大きく異なると考えられる。TelemetRing [6] では、無電源のコイルを指輪型デバイスとして各指に装着し、タップ動作に

¹ William Lyon Mackenzie Collegiate Institute

² 東京大学大学院工学系研究科

よる磁界の変化を腕輪型のコイルにより検出する。この手法を用いた場合、指輪の側にバッテリーを装着する必要がないため指先の重量やサイズは小さくすることが可能であるが、一定の重量とサイズを持つ腕輪型デバイスの装着が必須になるため、ユーザの負担は残る。最後に、篠田らは、導電糸の刺繍により作製された1次元容量式タッチセンサアレイを用いて手書きの文字入力を行う手法を提案している [7]。この手法を利用すると、センサをズボンに直接刺繍して実装できるため軽量で目立ちにくいという長所が存在するが、一次元の入力からテンプレートマッチングを行い検出をするという性質上、b と h など、一部区別しにくい文字が存在しユーザの学習が難しいという問題点がある。

そこで本論文では、ズボンの太股部分を利用してアルファベットに対応する2次元パターンを入力するウェアラブルデバイス「Yarnkey」を提案する。Yarnkey はズボンに縫い付けられた導電糸で6点の抵抗式タッチセンシングを行い、30種類の手描きパターンを認識する。

Yarnkey の利点は以下の通りである：

1. 片手の指1本を動かすだけで入力できる
2. 着座・起立状態など生活上の多くの状況で手と太股を近くに置くことができるため、様々な姿勢と環境で利用できる。予備実験では、筆者が実際に振動の多いバスの中で Yarnkey を使用したが、通常時とほとんど同様の入力が行えた
3. 表面に露出するセンサ部が1から2 mm² の導電糸の糸玉だけであるため目立たず軽量で持ち運びしやすく、指の側に装着するセンサがないため外見的差異が小さい
4. アルファベットに似た一筆書きの2次元パターンを用いるため、入力方法が覚えやすい

以降の章では、Yarnkey の実装について詳述する。その後、本提案の有効性を検証するために実施した定量的・定性的ユーザ実験の結果を報告する。最後に、今後の展望を述べて本論文を締めくくる。

2. Yarnkey の設計と実装

2.1 設計

図1に示すように、Yarnkey は衣服の太股部分に刺繍された導電糸による6点のタッチセンシングにより、アルファベットに類似した一筆書きの文字を認識する。

ここで、複数点のタッチセンサ同士を結ぶようなストロークにより英語アルファベットを表現することを考え、文字の入力に必要なグリッドサイズを考察する。例えば2×2グリッドにて2点から4点を結ぶストロークを検出するとすると、 $4P_2 + 4P_3 + 4P_4 = 60$ 通りのパターンが表現でき、26文字の英語アルファベットを区別するのに十分である。しかし、2×2のグリッドでは入力ストロークがアルファベットと大きく異なったパターンとなることが

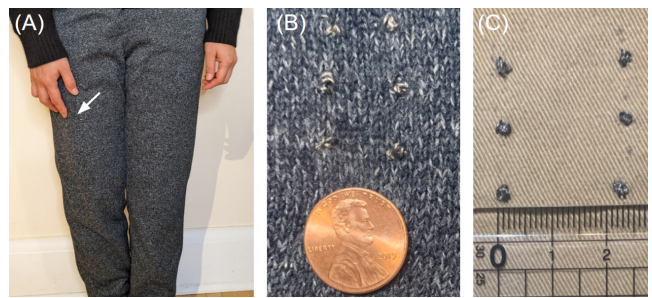


図1 Yarnkey。(A) 試作品1の全体図と(B) センサー部分の拡大図。(C) 試作品2(試作品1とは生地が違う)の拡大図。

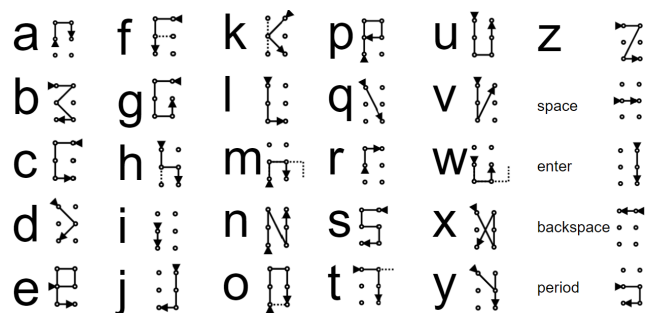


図2 英語アルファベットに対応した2Dの認識パターン。

あり、ストロークとアルファベットの対応に関する学習コストが高くなることが予想される。したがって本論文では横2点、縦3点の2×3のグリッド状のタッチセンサを用いることとした。グリッドには図2に示す、アルファベットに似た2Dストロークパターンを対応させた。

2.2 タッチセンサのハードウェア

導電糸を用いた抵抗性のタッチ・センシングの原理を図3に示す。点Aは指で触れるセンサ部であり、点Bは太股に直接接触したグラウンドである。まず、点Aに指が接触していない場合には点Aの電圧は抵抗で V_{DD} にプルアップされている。指が点Aに触れるとAB間に接触抵抗 R_2 が挿入され、プルアップ抵抗と人体の接触抵抗の分圧比で点Aの電圧が下がる。この電圧の低下をマイコン(Adafruit ItsyBitsy M4 Express)に内蔵のAD変換器で検出することで、指の接触を検出した。

本論文では、人体とセンサの接触抵抗が最大で数M Ω あることを考慮して、抵抗 R_1 は20M Ω とした。また、容量 C に関しては60Hzの誘導性雑音を低減するために、大きな値が望ましい。しかし、容量が大きすぎると接触時の電圧変化の時定数が大きくなり、一定以上の速度で入力されたストロークを検出できなくなる。それら2点を考慮して容量 C は1nFとした。

なお、点Aと太股が直接接触すると誤動作の原因となるため、本論文では点Aの背面にプラスチックテープを貼りそれを低減している。

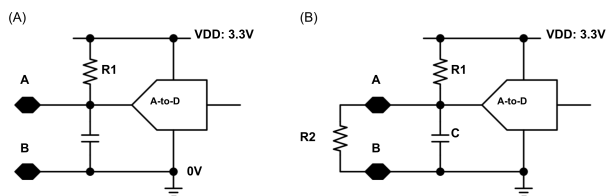


図 3 回路構成。(A) 指が触れていないとき (B) 触れているときの抵抗式タッチセンサの回路モデル。

2.3 ソフトウェア

マイコン上のソフトウェアは常に 6 つの AD 変換器の出力を監視し、その出力に応じて文字を送信する。各点に接続された AD 変換器の出力が一定値を超えると、該当する点が触られたと認識し、配列に記録する。センサ点が最後に触られた時点から一定時間（タイムアウト期間）が経過すると、文字入力完了とみなす。完了時点での配列のデータを元を文字に変換し、文字をコンピュータに送信し、配列を初期化する。

なお、現時点の実装では、タイムアウト時間をユーザごとに手で決定している。これは、ユーザの入力速度によって最適なタイムアウト時間が異なるためである。例えば時間が短過ぎると文字を書いている途中で文字入力期間が終わり、長過ぎると文字が早く打てなくなる。そのため、後述の実験ではユーザに合わせて 0.5 s から 0.7 s の間で調整を行った。

2.4 動作

図 4 に、Yarnkey からスマートフォンに “hello” の文字列を入力する様子を示す。このように、指先の細かい動きで入力が可能であることがわかる。

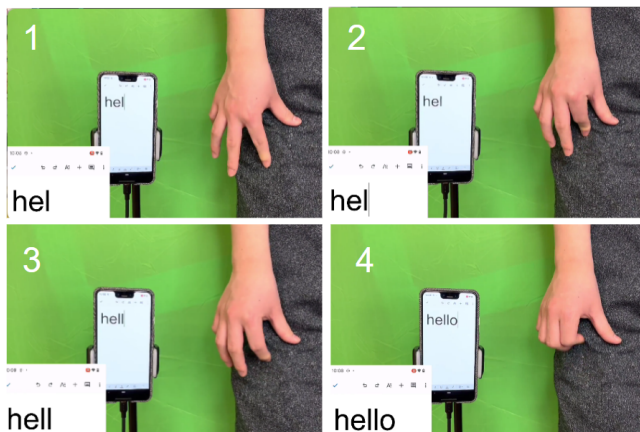


図 4 Yarnkey からスマートフォンに “hello” を入力する様子。

また、図 5 には、Yarnkey を太股ではなく腕に装着した場合に、スマートウォッチへ文字を入力する様子を示す。このように、画面の小さなデバイスの入力範囲を擬似的に拡張し、入力と出力がオクルージョンすることを防止することも可能である。

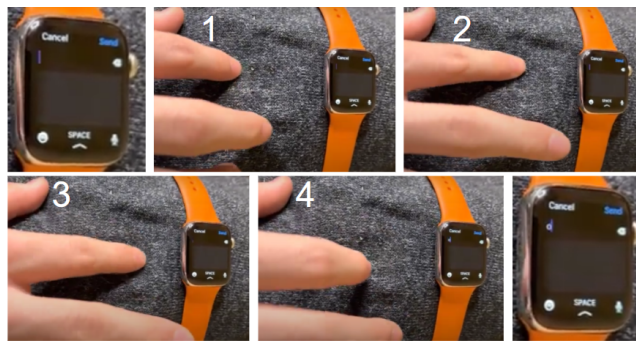


図 5 Yarnkey からスマートウォッチに “ok” を入力する様子。

3. 実験と評価

本章では、Yarnkey の入力速度・エラー率・学習速度・姿勢による入力体験の変化・入力パターンによるエラー率の違い・使いやすさなどを検証するために行ったユーザテストについて述べる。

3.1 ユーザテスト用アプリケーション

まず、ユーザテストで使用するために、Svelte [8] を用いて図 6 に示すウェブアプリケーションを作成した。このアプリケーションでは、ユーザが入力すべき例文が表示され、ユーザの実際の入力の正誤により色分けされた出力を返す。我々はこのアプリケーションをユーザの学習とデータ取得に利用した。なお、表示される例文は、文字入力手法の性能評価用に Mackenzie らが開発したフレーズ集合 [9] から無作為に選ばれるようにした。取得されたデータはサーバへ転送し解析に利用した。

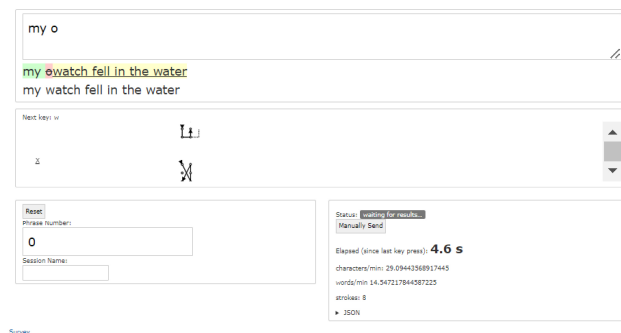


図 6 ユーザテスト用ウェブアプリケーション。

3.2 手順と条件

実験は、カナダのオンタリオ州において以下の手順で実施した：

1. 5 分程度で、Yarnkey の概要と使い方を説明する
2. 参加者に着座してもらう
3. 実験用アプリケーションを用いて参加者に使用方法を学習してもらう（15 分間）
4. 入力できる文字数とエラー率の測定を行う（Test #1）

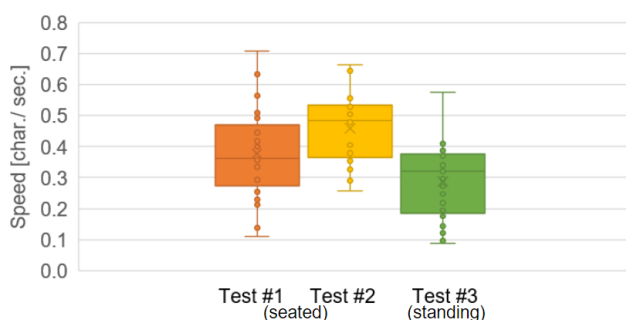


図 7 Yarnkey の入力速度 ($n = 5$)。エラーバーは最大値と最小値 (外れ値は除く)。箱の上下は 75%および 25%パーセンタイル。

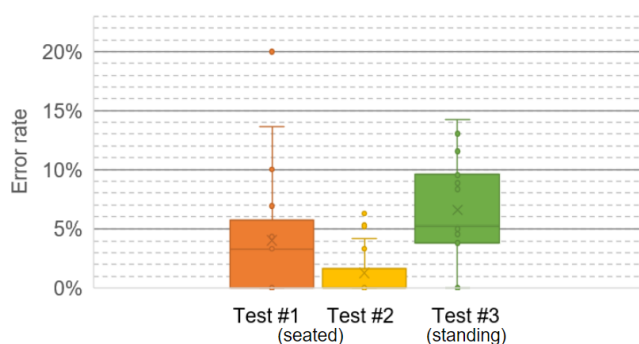


図 8 Yarnkey のエラー率 ($n = 5$)。エラーバーは最大値と最小値 (外れ値は除く)。箱の上下は 75%および 25%パーセンタイル。

5. 再び学習のセッションを設ける (15 分間)
6. 再び入力できる文字数とエラー率の測定を行う (Test #2)
7. 同様の計測を、起立した状態で行う (Test #3)
8. 以下の項目についてアンケートに回答してもらう
 - System Usability Scale (SUS) [10] (使いやすさの評価、5 段階評価: 1-非常にそう思わない, 3-どちらともいえない, 5-非常にそう思う)
 - 性別 (male, female, other, not prefer to answer) と年齢
 - 普段キーボードを使うか、使うならばどのようなデバイス (パソコンやスマートフォン) をどのくらいの頻度で使うか

この手順を、5 人の参加者 (18 歳-64 歳、平均 47 歳、男性 2 人、女性 3 人、その他 0 人) に対して実施した。

3.3 評価結果

3.3.1 入力速度とエラー率

図 7 および図 8 に、ユーザテストで得られた Yarnkey の入力速度とエラー率を示す。まず、図 7 の入力速度の結果に示すように、Test #1 と Test #2 では、平均入力速度は 0.37 char./sec と 0.46 char./sec であった。[11] によれば、小学 2 年生の手書き入力の平均速度は 0.40 char./sec である。手書きと比較した場合、Yarnkey の入力速度は Test #1 で小学校 2 年生の平均値の 93%、Test #2 では 115%

であるため、合計約 40 分の使用時間で小学 2 年生の手書きの入力速度と同等のレベルに到達できることがわかる。また、Test #1 から約 15 分の練習を挟んだ Test #2 では、平均入力速度が 24% (= 0.46/0.37) 向上しており、短い練習時間でも入力速度が向上し、初期の学習がある程度容易であることがわかる。一方、起立状態で入力を行った Test #3 では、入力速度が 0.29 char./sec と低下した。これは、センシングポイントの位置を目視で認識することが難しいことや、センサーが配置された布部分に凹凸があることが理由だと考えられる。それでも、立った状態でも着座時にある程度近い速度での入力が可能であることが示された。

また、図 8 に示す入力エラー率は、Test #1 では平均 4% であったが、Test #2 では平均 1% に減少しており、これらの結果でも短期間での学習が可能であることが確認された。一方、起立状態での平均エラー率 (7%) は、着座状態よりも増加した。これは入力速度の議論と同様に目視が難しいことや布の凹凸が原因だと考えられる。

表 1 それぞれのアルファベットを入力した際の文字別エラー率のランキング。Target は入力回数、Actual はそのうちの正当回数を示す。

Rank	Character	Error Rate	Target	Actual
0	a	0.0 %	51	51
1	c	0.0 %	51	51
2	d	0.0 %	51	51
3	e	0.0 %	51	51
4	f	0.0 %	51	51
5	i	0.0 %	51	51
6	j	0.0 %	51	51
7	k	0.0 %	51	51
8	l	0.0 %	51	51
9	m	0.0 %	51	51
10	n	0.0 %	51	51
11	o	0.0 %	51	51
12	q	0.0 %	51	51
13	t	0.0 %	51	51
14	u	0.0 %	51	51
15	w	0.0 %	51	51
16	x	0.0 %	51	51
17	b	2.0 %	51	50
18	g	2.0 %	51	50
19	h	2.0 %	51	50
20	p	2.0 %	51	50
21	z	2.0 %	51	50
22	s	3.9 %	51	49
23	v	3.9 %	51	49
24	y	3.9 %	51	49
25	r	7.8 %	51	47
26	space	NaN	0	0

3.3.2 入力パターン

その後、各文字ごとのエラー率を求めるため、5 人のう

ち2人のユーザに追加実験を依頼した。表1は、spaceを除く全てのアルファベットに対応するパターンをユーザに合計51回入力してもらい、そのエラー率をランキングとして表示したものである。これを見ると、例えばR・Y・V・Sなどのエラー率が相対的に高くなっていることがわかる。これらの文字のエラー率が高い理由として、以下の要因が考えられる：

- Rのパターンを書く方向が、Rの文字を書く方向と異なる（Rの文字を書く場合は上から下へと書いてから右上に書くが、Rのパターンは下から右上へと書く）
- Yのパターンには対角線が含まれ、それを書く際に周りの点を触りTなどのパターンと誤認識される
- Vは最長の対角線を書く必要があり、難易度が高い
- Sは細かい曲がり角が3つあり、それを書く際に周りの点を触り別のパターンと誤認識される

以上の考察から、入力するパターンの今後の改善策として(1) 実際の文字とストロークの方向を一致させユーザにとってより直観的なパターンとする、(2) 対角線を含むパターンは極力減らし対角線以外の部分を単純化する、(3) 指の太さのばらつきを考慮したセンサのサイズとする、の3点を考察した。

3.3.3 ユーザビリティ

表2は、実験後のアンケートの結果をまとめたものである。これを見ると、YarnkeyはQ1を除く全ての質問に対して平均4以上（ただし点数が低い方が望ましい質問に対しては2以下）の点数を得ている。特に、Q3（使いやすさ）、Q7・Q10（学習の容易さ）、Q8（サイズの小ささ）に関していずれも良好な結果を得ていることから、Yarnkeyが目標とする要件を満たしていることがわかる。なお、Q1（高い頻度で使用したいか）に対して、P3が1（非常にそう思わない）のスコアをつけている。この点についてP3にインタビューを実施したところ、P3はデスクに向かっていないときにはコンピュータを一切使用せず、Yarnkeyを利用する必要性を感じないからだということがわかった。

I am almost never in a situation where I want to interact with my computer but am not at my desk. That is why I, personally, do not believe I would use it.

表2 アンケートの質問項目と、それに対するスコアの分布 ($n = 5$)。

Question	# of scores					Ave. score
	1	2	3	4	5	
Q1 I think that I would like to use this keyboard frequently.	1	0	1	2	1	3.4
Q2 I found the keyboard unnecessarily complex.	3	2	0	0	0	1.4
Q3 I thought the system was easy to use.	0	0	0	2	3	4.6
Q4 I think that I would need the support of a technical person to be able to use this keyboard.	4	0	1	0	0	1.4
Q5 I found the various functions in this system were well integrated.	0	1	0	2	2	4.0
Q6 I thought there was too much inconsistency in this system.	1	3	1	0	0	2.0
Q7 I would imagine that most people would learn to use this keyboard very quickly.	0	0	0	2	3	4.6
Q8 I found the keyboard very cumbersome to use.	2	2	1	0	0	1.8
Q9 I felt very confident using the keyboard.	0	1	0	2	2	4.0
Q10 I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.	3	1	1	0	0	1.6

3.3.4 その他の考察

その他、ユーザテストで判明した課題として、タッチセンサのプルアップ抵抗 R_1 をユーザに合わせて適切に選択しなければならないということがある。肌の抵抗値は個人差や環境により大きく変化するため、実験の際に適宜プルアップ抵抗を調整する必要がある。将来的には、個別部品を用いたバッファ回路を作製するか、ソフトウェア側でキャリブレーションの手順を導入することで改善できる可能性がある。

また、P3からのフィードバックとして、Yarnkeyは外見的な差異の小ささを活かして、自然な振る舞いを要求されるフィールドスタディや公共交通機関の中で使うゲームコントローラに使えるというコメントがあった：

One of the neat things about Yarnkey is its stealth—you can imagine a ... field scientist finding that feature useful. ... I can also imagine it being very popular as a game controller, for use on a bus or train.

4. 今後の課題

4.1 キャリブレーション機能

前述の通り、本論文では認識に用いるタイムアウト時間およびプルアップ抵抗 R_1 をユーザに合わせて変更する必要があった。今後はユーザに合わせてキャリブレーションの機構を導入することを検討している。

4.2 タッチ点数の拡張

現状の実装では、ユーザは入力の際にセンサの点にぴったりと指を配置しなければいけない上、タッチ点数が少ないことによりアルファベットのパターンが元の形状から乖離している場合があった。そのため、今後の改良として、タッチ点数を増やし、パターンの相対的な位置ずれを吸収できる認識を行うことが考えられる。また、タッチ点数を増やすことにより、入力パターンの形状の自由度を増やしてより自然な入力を行えるようになる可能性がある。

4.3 使用感向上と別用途への応用

その他、細かい改善案としてマイコンとデバイス間の無線化などが考えられる。また、点字が特定の配置の点を利用するという共通点を利用することにより、点字入力デバイスとして利用できる可能性もある。

5. 結論

本論文では、導電糸による6点の抵抗式タッチセンサを使用して英語アルファベットに似た2Dパターンを入力するウェアラブルデバイス Yarnkey を提案した。Yarnkeyは片手の指1本で入力ができ、目立たず小型軽量である。また、ユーザスタディの結果、着座・起立状態の条件下でも平

均 0.29 char./sec 以上の速度および平均 10%以下のエラー率での入力が可能であることが示された。さらに、数十分の学習時間で入力速度とエラー率の向上が見られた。

最後に、デモ動画や本論文の英語版等が以下 URL^{*1}にアップロードされているため、適宜参考にしてほしい。

謝辞 本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構グローバルサイエンスキャンパス (GSC) 「情報科学の達人」育成官民協働プログラム (国立情報学研究所、情報処理学会、情報オリンピック日本委員会) の支援のもと実施したものです。「情報科学の達人」プログラムのメンターや2期生の方々、河原林健一教授をはじめとする情報科学の達人の皆様からは多くの助言、刺激、支援をいただきました。また、公益財団法人 孫正義育英財団には、プロジェクトの部品代等を支援していただきました。最後に、関連技術および内容に関する助言をくださった Abby Kim さんおよび篠田和宏さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Weiser, “The computer for the 21st century,” *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, vol. 3, no. 3, pp. 3–11, 1999.
- [2] “Jacquard by Google - Levi’s®.” [Online]. Available: <https://atap.google.com/intl/ja-jp/jacquard/products/levi-trucker/>
- [3] “Microsoft HoloLens — Mixed Reality Technology for Business.” [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/hololens/>
- [4] Z. Xu, P. C. Wong, J. Gong, T.-Y. Wu, A. S. Nittala, X. Bi, J. Steimle, H. Fu, K. Zhu, and X.-D. Yang, “TipText: Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard,” in *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ser. UIST ’19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019, p. 883–899. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3332165.3347865>
- [5] T. Katayama, T. Terada, K. Murao, and M. Tsukamoto, “A Text Input Method for Half-Sized Keyboard Using Keying Interval,” in *Proceedings of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, ser. MUM ’12. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2406367.2406375>
- [6] R. Takahashi, M. Fukumoto, C. Han, T. Sasatani, Y. Narusue, and Y. Kawahara, *TelemetRing: A Battery-less and Wireless Ring-Shaped Keyboard Using Passive Inductive Telemetry*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, p. 1161–1168. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3379337.3415873>
- [7] 篠田和宏, 原田珠華, 佐野由季, 安斉周, 矢谷浩司, “導電糸を用いたウェアラブルデバイス向け手書き文字入力デバイス,” in 電子情報通信学会総合大会, 2021.
- [8] “Svelte • Cybernetically enhanced web apps.” [Online]. Available: <https://svelte.dev/>
- [9] I. S. MacKenzie and R. W. Soukoreff, “Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques,” in *CHI ’03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI EA ’03. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003, p. 754–755. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/765891.765971>
- [10] “System Usability Scale.” [Online]. Available: <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html>
- [11] L. Hamstra-Bletz and A. W. Blöte, “Development of handwriting in primary school: a longitudinal study,” *Perceptual and Motor Skills*, vol. 90, no. 3, Jan 1990.

^{*1} <https://shibata.nyiyui.ca/yarnkey>