



# 技能学習を促すメタ触覚共有インターフェース (第2報) -触覚情報提示部位の検討-

Meta Haptic Sharing Interface to Promote Skill Learning (Part 2)  
-Investigation of Body Parts for Presenting Tactile Information-

鶴岡萌捺<sup>1)</sup>, 湯川光<sup>1)</sup>, 兒玉隆之<sup>2)</sup>, 小田桐匡<sup>2)</sup>, 佐藤正幸<sup>3)</sup>, 武田美智也<sup>3)</sup>, 倉地雅彦<sup>3)</sup>, 田中由浩<sup>1)</sup>

Moena TSURUOKA, Hikari YUKAWA, Takayuki KODAMA, Masashi ODAGIRI,  
Masayuki SATO, Michiya TAKEDA, Masahiko KURACHI and Yoshihiro TANAKA

1) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町,

m.tsuruoka.325@stn.nitech.ac.jp, yukawa.hikari, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)

2) 京都橘大学 (〒 607-8175 京都府京都市山科区大宅山田 34, kodama-t, odagiri@tachibana-u.ac.jp)

3) コニカミノルタ株式会社 (〒 100-7015 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JP タワー,  
masayuki.satou1, michiya.takeda, masahiko.kurachi@konicaminolta.com)

**概要:** 熟練技能者の減少に伴い, 効果的な技能習得の手法が求められる。我々は, 技能者と学習者自身の触覚情報を交互に提示することで学習を促す, メタ触覚共有インターフェースを開発している。本研究では触覚情報の提示部位としてこめかみと左手首に着目し, 技能学習に効果的な部位を検討した。実験の結果, 筆記圧の類似性には差異がなかったものの, こめかみの方がダイナミックレンジが広く, 主観的にも学習をしやすいと評価された。

**キーワード:** メタ触覚共有, 技能学習

## 1. 緒言

生産年齢人口の減少および技能者の高齢化に伴い, 技能の伝承は喫緊の課題である [1]。現在の技能伝承は, 技能者の作業の観察や口頭および直接的な動作の指導の他, 映像を用いたオンデマンド学習教材や, 視聴触覚情報を伴うシミュレーターによるトレーニングを用いて行われている。さらに我々は, 技能者の触覚情報を活用した技能学習手法として, メタ触覚共有インターフェースを提案した。この手法では学習者の作業中に, 手本となる技能者の手指の振動触覚情報と学習者自身の手指の振動触覚情報のフィードバックを交互に提示する。これにより, 技能者の触覚と自身の触覚の状態を客観的に捉え, 自身の技能との比較・修正を行うことで, 技能学習が促進すると考えた。従来の多くの技能学習手法では, 技能者の動作自体の模倣を目指してきた。一方で我々の手法では環境とのインタラクションで生じる, 相手の身体感覚の情報(触覚)を手掛かりに, 自身の身体に合わせた学習を目指しているため, 個々人の身体の高齢性を包含しうると考えられる。

我々の先行研究では, メタ触覚共有インターフェースを提案し技能者役の筆記圧を模倣する学習実験を行った。その結果, 技能者役の筆記圧の強弱のタイミングを模倣できると示唆された。この実験では, それぞれの振動触覚刺激をこめかみに提示していた。その理由は, こめかみは装置による作業を

阻害しづらく, 視覚情報と統合しやすいと考えたためである。ただし, こめかみは手指と身体部位が離れているため, 触覚情報を手指の運動へ, より活用しやすい提示部位が存在する可能性がある。そこで本稿では, こめかみに加えて手首を提示部位に採用し, 学習への効果を検証する。本稿の目的は, 提示部位の違いによる技能学習への効果の差異を調査し, メタ触覚共有インターフェースにおける適切な触覚提示部位を検討することである。実験では, 学習者の筆記時の筆記圧(押下圧)を計測し, 学習による技能者役の筆記圧との類似性の変化を調査する。さらに, 学習者への主観的なアンケートにより, 技能の特徴の認識しやすさ, 自身の運動への活用しやすさ, 振動による作業の阻害性を評価する。

## 2. こめかみと手首のダイナミックレンジの比較

本実験での提示部位に対し, 触覚情報が知覚できるダイナミックレンジを計測した。振動子にホワイトノイズを流し, アンプ(フォスター電機株式会社, AP05mk2)で大きさを調整した。触覚情報の最大値は, 実際の作業時に触覚情報が支障とならず活用できる大きさ(加速度  $49.8\text{m/s}^2$  のときの振動刺激)を事前に実験者が調整した。測定は, オンロスコープ(Tektronix, TDS 2024C)に加速度センサ用のアンプ(昭和電気株式会社, VIBRATION METER MODEL 1607)を繋ぎ, 加速度センサ(昭和測器株式会社, 2302B)を

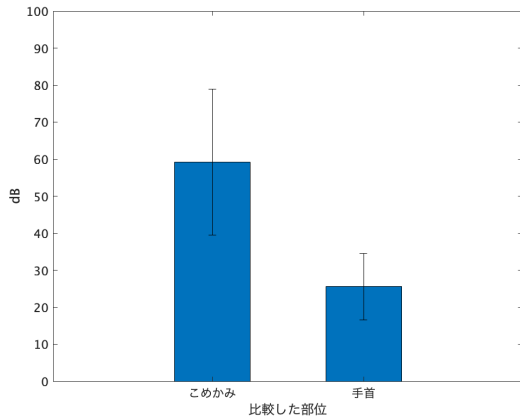


図1: こめかみと手首の触覚情報のダイナミックレンジ

振動子（ヘッドフォン型、腕輪型）に固定し行なった。今回の実験で使用した振動子は、こめかみに提示するヘッドフォン型（NIDEC, sprinter  $\gamma$  内蔵）と手首に提示する腕輪型（フォスター電機株式会社, AP05mk2639897 内蔵）の2種類である。なお、実験はノイズキャンセル機能のついたヘッドフォンを装着し、ブラインド状態で行った。

実験参加者は21-23歳の男性3名であった。触覚情報を感じられる値とその強度が飽和する値までの範囲を測定した。最小値を最大値で除した値 ( $20 \times \log(\text{最大の加速度}/\text{最小の加速度})$ ) をダイナミックレンジとして図1に示す。これは、各条件におけるdBの平均値と標準偏差を示している。その結果、全ての被験者で手首よりもこめかみの方が大きい値となった。また、こめかみの方が知覚し始める値が小さく、ダイナミックレンジが広いことがわかった。

### 3. 実験

#### 3.1 実験装置

本実験で使用したメタ触覚共有インタフェースは、先行研究[2]で用いたものと同様の構成になっている(図2)。このシステムには、「技能者モード」と「学習者モード」が存在し、任意にモードを切り替えることができる。学習者は、手指に触覚センサ[3]を装着しており、前者では触覚センサで取得した値が閾値を超えたときに、あらかじめ収録した技能者役の触覚が提示され、後者では触覚センサで取得した学習者の触覚がそのまま提示される仕組みになっている。それらの触覚情報は、アンプ（フォスター電機株式会社, AP05mk2）とミキサー（YAMAHA, MG06X）、イコライザ（株式会社モリダイラ楽器, M108S 10-Band Graphic-EQ）を介して振動子から提示される。

#### 3.2 実験内容

先行研究と同様に技能者役の筆記時の強弱のリズムを模倣するタスクを行った。筆記する文字は「水」とし、スタイラスペン（Apple, Apple Pencil（第2世代））と表面にフィルム（エレコム株式会社, TB-A21SFLAPL）を貼ったタブレット型端末（Apple, iPad mini）を用いた。タブレット型端

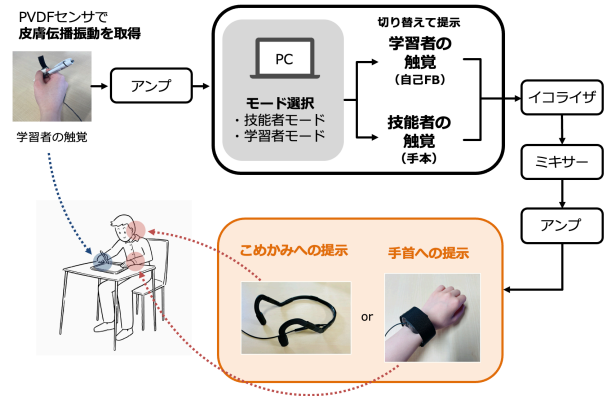


図2: システム構成



図3: 実験の様子（ヘッドフォン型振動子装着時）

末の下に6軸力センサ（ATI Industrial Automation, F/T Sensor Gamma SI-32-2.5）を設置し、筆記時の押下圧を計測した(図3)。今回の実験では、2条件の部位（こめかみ、手首）への提示を同一参加者に対して行った。手首への振動提示は、ハウリングを避けるため、非利き手である左手首に行った。なお、学習による影響を防ぐため、条件ごとに異なる技能者役のデータを用いた。技能者役は女性2名（22歳, 23歳, 右利き）とし、振動触覚情報と筆跡、および押下圧を、実験前に記録した(図4)。振動触覚情報は、右手の第2指腹部に触覚センサを装着した状態で筆記を行い、その時の振動を計測した。記録した振動情報は、MATLABを用いてwavファイルに変換し、音声データとして振動子から提示する。技能者役2名の筆跡と押下圧、振動データを示す(図5-6)。サンプリング周波数は、押下圧1000Hz、振動情報2500Hzでそれぞれ収録した。

評価指標には、押下圧の類似性と学習者の主観的な評価を用いた。押下圧の類似性の評価には、波形の形状を考慮して類似性を算出するDDTW（Derivative Dynamic Time Warping）[4]を利用した。技能者役の押下圧のデータと、学習者の押下圧のデータのDDTWを算出し、それらを条件間で比較し検証した。学習者の主観的な評価は3つの質問によって行った。それぞれの質問項目（1.自分と他者の筆跡の違いが分かりやすいと感じましたか、2.振動刺激を活用しやすと感じましたか、3.振動刺激があることで混乱するよう感じましたか）を7段階のリッカート尺度（非常に当

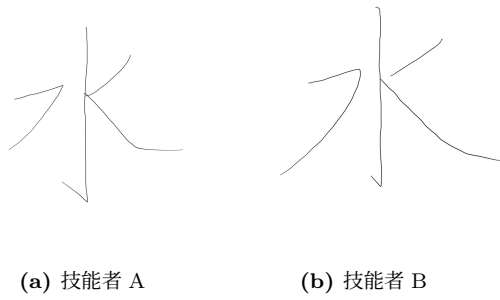


図 4: 技能者の筆跡

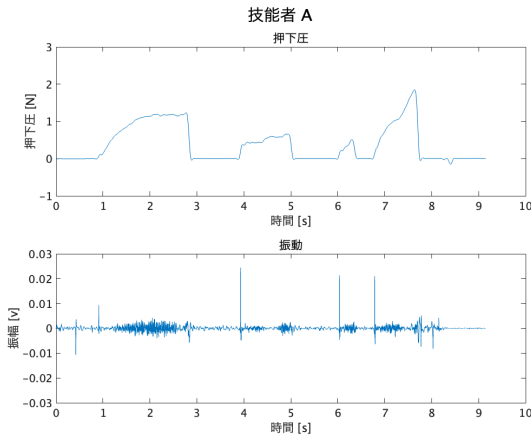


図 5: 技能者 A の筆記データ

てはまる, とても当てはまる, やや当てはまる, どちらでもない, やや当てはまらない, とても当てはまらない, 非常に当てはまらない) で回答させ、-3 から +3 までの数値を割り当てて参加者の平均値を算出した。

学習者役の実験参加者は 23-24 歳の男性 4 名, 全員右利きであった。学習者には, 手本となる技能者役の触覚刺激を提示し筆圧の強弱を模倣するように指示した。実験を始める前に, 技能者役と学習者役の振動強度のキャリブレーションを行なった。キャリブレーションには, 学習者が 1N の力で

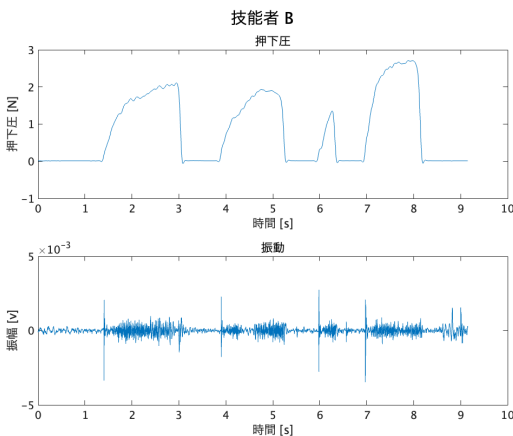


図 6: 技能者 B の筆記データ

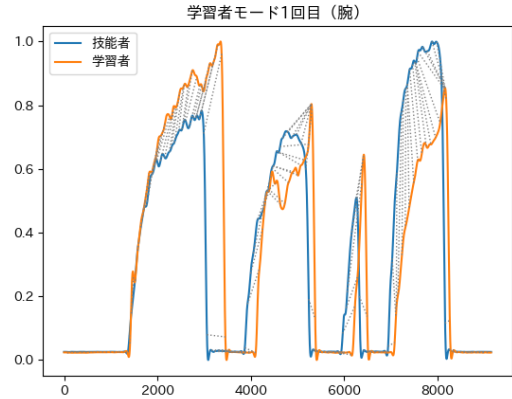


図 7: 技能者と学習者の押下圧の DDTW

円を書いた際の振動強度に, あらかじめ収録しておいた, 技能者役が 1N の力で円を書いた振動の強度をミキサーのボリュームによって主観的に合わせる手法を用いた。学習者は技能者役と同様に右手の第 2 指腹部に触覚センサを装着した状態で, 振動触覚情報を提示されながら, タブレット型端末に表示された技能者役の筆跡の上をなぞった。学習者の筆記時の押下圧は, 力センサにより計測した。なお, 実験装置の使用法に慣れるため, 学習者の押下圧の計測は, 条件ごとに 3 回練習した後に行った。学習者は 1 条件につき, 技能者モードで 3 回, 学習者モードで 3 回を連続して筆記する流れを 3 回繰り返し, 合計 18 回の筆記を行った。この試行が終わった後, もう一つの部位で同様に 18 回の試行を繰り返した。なお, 学習者ごとに, 提示部位と提示する技能者役の情報の組み合わせ, および提示順のカウンターバランスを考慮した。

#### 4. 結果

##### 4.1 押下圧の類似性

学習者および技能者役の押下圧の DDTW を算出し, 押下圧の類似性を調査した。DDTW 算出の例として, 参加者 1 名の学習者モード 1 回目のグラフを示す (図 7)。青色が技能者, オレンジ色が学習者で, 灰色の破線は, 技能者と学習者の波形と各点間のコストを求め, そのコストの合計が最小となる経路の対応する点同士を結ぶ線である。なお, 今回の実験では, 力の絶対的な強弱ではなく相対的な強弱のタイミングに着目したため, 押下圧のデータは最大値で除し, 0 から 1 に正規化したデータを用いた。図 8 に, 学習者モードのみの, こめかみと手首の DDTW を示す。平均値はグラフに, 標準偏差はエラーバーに示す。グラフをみると, 非常に緩やかではあるものの, 回数を重ねるごとに値が減少している。一方でこめかみと手首の結果を比較すると, 初回は手首の方が値が小さいものの, 終了時には差がみられなかった。

##### 4.2 学習者の主観評価

図 9 に, 学習者の主観的な評価の平均を示す。Q3 の結果から, 振動刺激による作業の混乱はほぼ生じず, Q1 の結果か

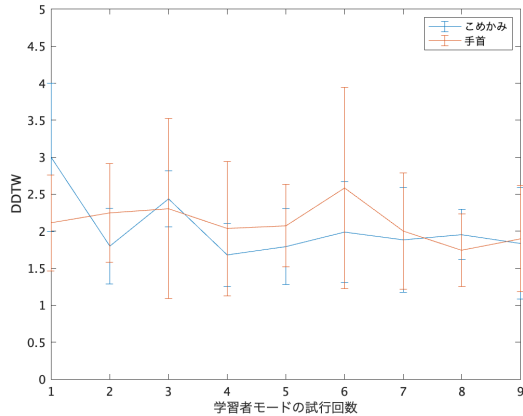


図 8: 学習者モードのみの DDTW

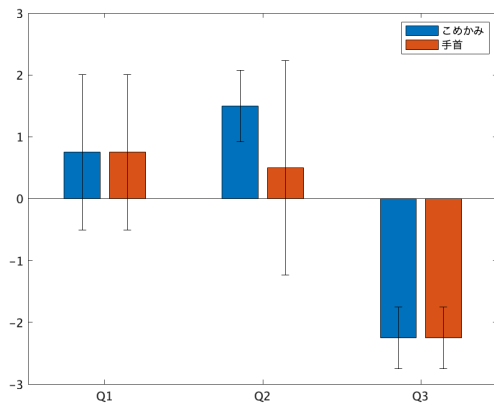


図 9: 学習者の主観評価

ら、振動提示によって自分と他者の筆記の違いを多少感じる傾向がみられた。これらの結果は、いずれも部位による違いはなかった。一方で、Q2の結果から振動刺激の活用については、手首よりもこめかみの方が活用しやすい傾向となった。

## 5. 考察

主観評価の結果から、手首よりもこめかみの方が振動刺激を活用しやすい傾向が確認された。またダイナミックレンジの結果をみると、こめかみの方が手首よりもダイナミックレンジが広く、触覚刺激を感じられる最小値も小さかった。このことから、こめかみの方が振動触覚刺激の微細な差異を感じられやすく、学習者が作業に活用しやすいと感じた可能性が考えられる。一方で、押下圧の類似性を示す DDTW の結果からは、こめかみと手首で大きな差異はみられなかった。この原因として、今回のタスクの難易度が容易であった可能性がある。押下圧の DDTW はどちらの条件でも、初回から最終回にかけて緩やかな減少傾向ではあったが、その下り幅は小さかった。これは、計測前に技能者モードと同様の状態で 3 回の練習を行なったことで、既にある程度技能を習得が進んでいたと考えられる。図 7 から、学習者モードの初回で、押下圧の波形は大きく異なることがわかる。すなわち、

今回の実験のタスクは極めて少ない試行回数で習得できるほど容易なタスクであったため、初回から最終回の DDTW の減少が少なく、かつ、こめかみと手首の習得レベルにも差異が生じなかったと考えられる。そのため、より微細な調整が必要となる難易度の高いタスクで実験を行った場合、部位ごとの差異が生じる可能性がある。

## 6. 結言

他者と自身の触覚情報を交互に繰り返し提示することで、筆記圧の学習が進むことがわかった。事前の筆記練習がなければ、さらに学習が進んでいた可能性がある。今回、触覚情報を提示した、こめかみと手首では筆記圧の学習効果に大きな差は生じなかったものの、こめかみはダイナミックレンジが広く、主観的に振動刺激を活用しやすいという結果になった。今後は、筆記練習なしや学習前の押下圧の計測を検討し学習効果を確認した上で、システムの応用や改良をおこなってきたい。

**謝辞** 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 Cybernetic being プロジェクト (JPMJMS2013) の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] 総務省: 平成 28 年度版情報通信白書, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd101100.html>
- [2] 湯川光, 海老名里紗, 兒玉隆之, 小田桐匡, 佐藤正幸, 武田美智也, 倉地雅彦, 田中由浩, 技能伝承を促す「メタ触覚共有インタフェース」の提案, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022 in Sapporo, 2022
- [3] Y.Tanaka, D.P.Nguyen, T.Fukuda, A.Sano, Wearable skin vibration sensor using a PVDF film, Proceedings of the 2015 IEEE World Haptics Conference, pp.146-151, 2015
- [4] E.Keogh, Pazzani, "Derivative Dynamic Time Warping," in First SIAM International Conference on Data Mining. Chicago, Illionis, 2001.