

溝間隔の違いによる筆圧変化を活用したシート埋め込み型 ID 認識手法

瀬崎 夕陽* 関口 祐豊* 中村 聡史*

概要. 本研究では、デジタルペンを用いた手書きを補助するものとして、筆圧変化を利用して筆記対象物を識別可能とする手法を実現し、それを用いた支援システムを実装した。具体的には、一定間隔で溝を設けた透明な筆記対象物をディスプレイ上に配置し、筆記時の筆圧変化をもとに筆記対象物の識別を行う、既存のディスプレイとデジタルペンのみで実現可能な新しい筆記対象物識別手法を用いる。評価実験では、溝の幅が異なる 4 種類のシートを作成し、筆圧のピークに基づき判定する手法の精度検証を行った。実験の結果、識別精度 0.78 で推定可能であることがわかった。さらに、本手法の有用性を検証するため、物理カラーパレットや学習支援教材などのアプリケーション例を実装し、実用性を検証することで、分野にとらわれない様々な場所での応用可能性を示した。

1 はじめに

教育のデジタル化によりタブレットが広く配布され、デジタルペンを用いた手書きが急速に普及している。ここでデジタルペンを用いた手書きでは、手書き入力と同時に画面上のメニュー操作を行う必要があるなど、ユーザにとって分かりにくい場合が多い。このような手書き入力の操作性を向上させる方法として Tangible User Interface (TUI) があり、例えば DataTiles[12] では、RFID タグを埋め込んだ透明タイルの認識と、タイル上の溝を活用した入力により、手書きとコンピュータ上での作業を効率化している。また、物理的なブロックを動かして画面内の図形を操作する手法 [5] や、ドーナツ状のオブジェクトを回転させて拡大する手法 [18] などがあり、物理的な制約を利用しつつ操作できるため、専門知識をもたないユーザや子どもでも悩むことなく楽しく使えるものとなっている。

ここで TUI の多くは、物体の存在や種類を認識するために外部カメラや赤外線センサ、あるいは物体自体への電子回路の組込みを前提としている。例えば、Lumino[2] では赤外線光源とカメラで物体を検出しており、SLAP Widget[15] では専用テーブルを用いる必要がある。また、導電パターンや電子部品を組み込み、タッチディスプレイ上で物体識別を行う手法も提案されており、TUIC[16] では高周波のタッチ間隔により、DataTiles[12] では物体に RFID タグをディスプレイにリーダを組み込み、種類や位置の認識を行っている。しかしこのような制約は、設置環境や製造コストの面で、普及や導入の障壁となる。

Acoustic Barcodes[7] はこうした問題を一部解決できるものであり、物体をなぞる際に生じる振動音

を利用して入力を可能としている。しかし、対象物の認識は可能であるものの、それと絡めた操作は困難である。ここで、筆記対象物の表面に凹凸がある場合、ペン入力時に筆圧の微細な変化が生じる。例えば、ザラザラした粗い表面では筆圧が小刻みに変化し、ツルツルした滑らかな表面ではその変化は少ない。こうした表面の凹凸は、TUI としての触覚的フィードバックを生むと同時に、筆圧変化という識別のための信号源にもなり得る。

そこで本研究では、普及しているペン入力デバイスをそのまま活用し、追加デバイスを必要としないシート型 TUI の実現を目的とし、透明なシート上に彫られた溝間隔の違いによる筆圧変化を活用した、シート埋め込み型 ID 認識手法を実現する。具体的には、溝間隔の異なる浅い溝を施した透明アクリル板のシートを筆記面に敷き、ペン入力デバイスで通常の手書きを可能としながら、ペン入力デバイスの筆圧値のピーク数やピーク間隔を用いてシートの種類を推定する。

本手法は識別にとどまらず、その筆記行為自体を入力操作として活用できる点にも特徴がある。また、本手法の実用性と応用可能性を示すため、デザインやエンタテインメント、セキュリティなど幅広い利用シナリオを想定したユースケースを実装し、その具体的な活用例を提示する。これにより、「描く」という日常的行為を基盤に、人間の創造・学習・遊びを支え、Human-Computer Interaction (HCI) 分野への展開可能性を示す。

2 提案手法

2.1 概要

本研究では、タブレットディスプレイ上に敷いた規則的な溝を有するシート上で筆記する際に生じる筆圧変化を利用して、シートの識別を行う手法を提案する (図 1)。具体的には、異なる溝間隔幅をもつ

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学

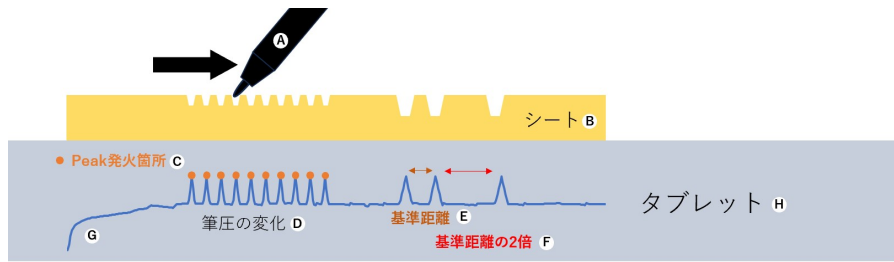


図 1. タブレット (H) 上にシート (B) が置かれており、ペン (A) が溝上を筆記すると、筆圧変化 (D) が生じる。筆記始めは筆圧が急激に上がる (G)。その後、ペンが溝を通過するたびに左右の隣接点よりも筆圧が高くなりピークとして検出される (C)。また、溝の間隔幅によってピークの発生間隔が異なる (E, F)。このように筆圧変化を利用することで、シートの識別を可能とする。

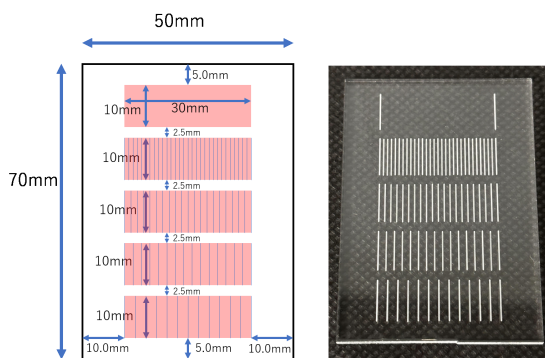


図 2. 異なる溝領域を持つ筆記対象物

アクリル板シート (図 1B) を用い、その上をペン先が通過する際に生じる筆圧の変化パターンに着目する (図 1D)。

ペン先が溝に接触することで生じる筆圧の増減は、溝の設置間隔や規則性に応じて異なる特徴を示すことが予想される (図 1E, F)。例えば、1.0mm 間隔の溝領域では、1.0mm ごとに筆圧値にピーク (図 1C) が生じると考えられる。本手法は、この変化の回数や間隔を利用し溝領域を推定する。

本稿では、このアプローチの実現可能性を検証するため、事前に収集したストロークデータに対して特徴量抽出および識別手法の検証を行う。識別には、ランダムフォレストによる機械学習モデルによって、多様な筆記行動に対する識別性能の評価を行う。

2.2 シート作成

本研究ではシートに溝を施し、その上を筆記することにより生じる筆圧変化を用いてシートの識別を行う。シートに施す溝を特徴的なものにするによって、それに応じた筆圧変化を起こさせることを意図している。今回はシートの素材には厚さ 3mm の透明アクリル板を用い、溝は光学レーザカッター (Trotec) により施す。レーザカッターの出力は 30% で速度は 2%、照射回数は 2 回とし、照射距

離はシートが 35mm 離れた位置で行った。また、溝の深さは 1mm 未満であり、筆記に支障のない深さとした。この方法であれば 2 次元平面であればある程度自由に溝を付与することが可能である。

シートに施す溝間隔に規則性を付与し、例えば、溝の間隔幅を 1.0mm で等間隔に設置すると、筆記時の筆圧変化も 1.0mm の間隔で変化する。また、溝間隔を 1.0, 2.0, 1.0, 2.0 と規則的に変化する間隔幅で溝を施せば、その間隔規則と同じような筆圧変化が起こり、異なる ID として識別可能になる。この特徴を生かし、溝を用いた識別を可能にする。

本稿では、上記条件を満たす 4 種類の溝領域 (図 2) を対象に筆記データを取得し、提案手法の識別精度を検証する。また、その結果を踏まえたシート型 TUI の設計指針および活用可能性について考察する。

2.3 特徴量抽出と前処理

シート推定には、筆圧値のピークの発生回数と発生周期を特徴量として利用する。溝の位置は、ペン先が溝を通過した際に発生する局所的な筆圧変化を利用することで検出する。具体的には、ストローク中の各点において、左右の隣接点よりも筆圧が高く、かつ周囲の点との筆圧差が所定の閾値以上である場合、その点をピークとして検出する。検出されたピークの総数を発生回数と定義し、隣接ピーク間の x 軸方向距離から得られる間隔幅を発生周期と定義する。さらに、発生周期の出現頻度分布を解析することで、溝間隔に依存する特徴を捉え、シートの識別に用いる。なお、ピーク検出、特徴量算出およびシート推定結果を返す API 実装は、GitHub¹ に公開している。

¹ https://github.com/henkakyu/mizo_classifier

3 精度検証

3.1 データセット構築

シートを用いた筆圧データセットを構築するため、特徴量と正解ラベルを同時に収集可能なシステムを Processing により実装した。本システムでは、ペン入力により取得される座標情報、筆圧値、ストローク ID、および使用した溝領域のラベルを記録する。筆記距離を識別特徴量として利用するため、同一座標の連続データは不要と判断し、座標が変化した場合にのみ筆圧を記録する仕様とした。取得したデータは CSV 形式で自動保存し、特徴量抽出および分類モデルの学習、分類式の作成に利用する。

本稿で提案するシートは、先行研究 [17] を参照しつつ初回の試作として構造を単純化するため、縦方向にのみ溝を施した。ここで予備実験 [17] において、1.0mm 未満の溝間隔の場合に筆圧の変化がほとんど観測されなかったことから、溝間隔としては 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm の幅を選定した。なお、溝間隔を規則的に変化させるものも考えられるが、今回は単純化のため等間隔のものに限定した。

なお、縦方向のみ溝を施した制約から、本データセット構築では横方向に一定距離以上の筆記を含むストロークを対象とした。データ収集は先行研究に倣い、表示された横直線を筆記しながらストロークに伴う筆圧データを取得することで行った。

データ収集時には、タブレット上に配置したシートを非利き手で固定し、画面に表示された横直線をなぞるタスクを筆頭著者自身が実施した。ここでは各溝条件につき 100 回の筆記を行い、全 5 種類の溝領域（うち 1 種類は溝無し）で計 500 ストローク分のデータを取得した。筆記には、PC に接続した Wacom One 12 (DTC121) を拡張ディスプレイとして使い、Processing で実装したウィンドウサイズ 2000 × 1000px のシステム上で、付属のデジタルペンを使用した。

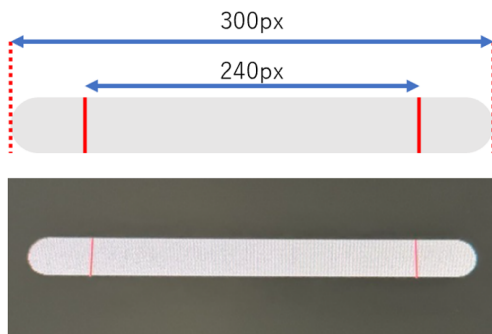


図 3. データセット構築の際の筆記ガイドライン

3.2 推定方法

シートのテクスチャによる筆圧変化を利用して筆記領域の溝の種類を推定するため、収集した筆圧データから特徴量を算出し、ランダムフォレストを用いた分類を行う。

ここで 1.0mm の溝が等間隔で並んでいる場合に、すべての溝でペンの筆圧の変化を適切に検知できるとすると、コンピュータの内部では、この 1.0mm の幅に該当するディスプレイのピクセル数ごとに筆圧が変化することになる。そのため、ピークとピークとの間のピクセル数がどの程度の頻度で出現するかを利用することで、シートの認識が可能となる。

本データセット構築において、溝間隔としては 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm を採用したため、この値を基準として各溝間隔に対応するピクセル範囲を設定した。選定した特徴量は、ストローク内の総ピーク総数と、4つの幅 (1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm) それぞれに相当するピーク数の計 5 つである。

それぞれのピーク間隔における閾値は、基準となる間隔幅 1.0mm をもとに等間隔となるように設定した。具体的には、1.0mm に対応するピクセル数を Δ と定義し、1.5mm, 2.0mm, 2.5mm に対応するピクセル数をそれぞれ 1.5Δ , 2.0Δ , 2.5Δ とした。今回は基準間隔幅 1.0mm の半分の距離、すなわち $\Delta/2$ の間隔で溝を配置した。そのため、本研究では各間隔幅に対して、その半分の距離 $\Delta/2$ を閾値の基準とした。したがって、任意の間隔幅 $n\Delta$ に対するピーク間隔の判定範囲は、

$$n\Delta - \frac{\Delta}{4} \leq interval_n < n\Delta + \frac{\Delta}{4}$$

として定義した。今回用いた Wacom One 12 における 1.0mm がディスプレイ上で 6.53px であったため、 $\Delta = 6.53$ でそれぞれの値を求めた。

ランダムフォレストによる推定では、各条件のデータをランダムに 8 割を学習用、2 割をテスト用に分割し、5 分割交差検証を実施した。いずれの推定においても、1 ストロークあたりのデータのうち、横直線の前後 30px を除外した $x = 280 \sim 520$ の範囲を対象とし、書き始めおよび書き終わりに伴う急激な筆圧変化の影響を排除した (図 3)。ランダムフォレストの実装には Google Colab 上の Python 3.10 および scikit-learn 1.4.0 を使用し、主要パラメータは `n_estimators=100`, `random_state=42` とした。交差検証には StratifiedKFold (分割数 5, `shuffle=True`) を用いた。

3.3 推定結果

各シートの溝条件に対する推定分類精度を表 1 に示す。また、全体の平均正解率は 0.78 であった。

表 1 より、全てのシートの溝条件において 0.65 以上の精度で分類できていることがわかった。特に、

表 1. 各溝の分類精度

| | | 推定溝間隔 (mm) | | | | |
|---------------------|------|------------|------|------|------|------|
| | | None | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 正 誤 差 (mm) | None | 0.93 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 |
| | 1.0 | 0.00 | 0.83 | 0.11 | 0.03 | 0.01 |
| | 1.5 | 0.00 | 0.11 | 0.65 | 0.19 | 0.03 |
| | 2.0 | 0.04 | 0.00 | 0.18 | 0.66 | 0.10 |
| | 2.5 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.82 |

溝間隔 1.0mm では 0.83, 2.5mm では 0.82 の分類精度が得られ, 他条件と比較して安定した識別が可能であった。

3.4 考察

シート全体の識別精度は約 0.78 であり, 本手法が一定の精度で識別可能であることが明らかになった。単回 (シート半往復分のストローク) での識別精度が 0.78 の場合, 往復により識別精度が高まるため, シート 2 往復以上で 90% を超え, 3 往復で 95% を超える。このことから, 筆記を複数回往復させることで実用的に十分高い精度を達成することも可能であると考えられる。

本手法の主要な利点は以下の通りである。

1. 追加のセンサや外部デバイスを必要とせず動作する点
2. 溝をなぞる筆記行為そのものを入力として利用できる点
3. 筆圧変化の座標に基づき, オブジェクトの位置推定が可能である点
4. 実用に耐える水準の識別精度を既存のペン入力環境で実現できる点

以上の利点から, 本手法は TUI 研究における汎用性の課題に対して一つの有効なアプローチとなり得る。この位置づけをさらに明確にするため, 4 章ではシート型 TUI を用いたアプリケーションの応用例を示し, 5 章では関連研究との比較を行うことで, 本研究の実用性および位置づけを行う。

4 アプリケーション例

本研究で提案した溝間隔に基づくシート推定手法は, シートに ID となる溝を彫り, その ID をペンでなぞることでソフトウェア的に読み取り, 活用することができる。そのため追加の電子デバイスを必要とせず, 筆記面の物理的パターンを入力として利用できる点に特徴がある。また, シート自体に色を塗ったり, コンテンツと対応づく絵を描くことにより, ソフトウェアによる操作を意識せずとも機能の切り替えや, コンテンツの対象を指定および操作することが可能となる。そのため, コンピュータの操

作に不慣れなユーザでも抵抗を覚えず操作できるようになると期待される。

4.1 物理カラーパレットインタフェース

筆記という自然な行為をそのまま入力として利用する応用例として, アクリル板の表面に複数種類の溝パターンを施し, 各領域を特定の色に対応させることで物理的なカラーパレットを実現した (図 4A)。この応用例では, ユーザはペン先で該当する溝領域をなぞることで, 溝間隔に基づいて領域を識別し, 筆記色を操作することができる。また, パレット領域をなぞった長さや回数はそのままシステムに入力として渡され, 「なぞった分だけ色が付く」「混ぜた分だけ新しい色が生まれる」といった実際の絵の具のような挙動を再現できる。例えば, 赤と青の領域を続けてなぞると紫が得られ, その際に赤の領域を長くなぞれば, 赤みの強い紫色が生成できる。これにより, 従来の GUI カラーピッカーでは難しかった混色や比率調整を, 実際の絵の具のように触覚的かつ直感的に行うことができる。

4.2 学習支援シートインタフェース

触覚的な行為を通じて, 物体から情報が得られることは認知的理解を高めるとされており, TUI 分野でも多くの研究がなされている [9, 7]。また, 教育現場でスタイラスペンを用いることは一般化されつつある [19]。そこで本応用例では, シート自体を特定の対象物を象った形状とし, ユーザが該当部分をペンでなぞることで, その部分に関する説明および図解を提示する (図 4B)。このように, 教材を触覚的に操作しながら情報を得ることで, 視覚的理解を補完しつつ触覚的体験を伴った教育的インタラクションを提供できる。

4.3 エンタテインメントシートインタフェース

本応用例では, 溝領域や溝そのものを入力として利用することで, 筆記操作を音や映像に変換するエンタテインメント性の高いインタラクションを実現した。図 4C では, 一つ一つの溝領域をピアノの鍵盤に対応させることで, ペンでなぞるたびに鍵盤のように音が鳴り, まるで演奏しているかのように楽しめる。本応用例では, シートにおいて物理的にプリントされた鍵盤上をなぞることで, 連続的な音の変化を楽しむことができる。なお, 鍵盤は本来叩いて音を鳴らすものであるため, よりなぞるに特化した音の鳴らし方にするには, グラスハープなどの楽器を採用することも可能である。また, 本手法では, 溝領域の識別だけでなく, 溝の位置を検知した際にユーザにフィードバックを返すことも可能である (図 4D)。この例では, 筆圧変化を検知した箇所から火花のアニメーションが打ち上がる。これらの仕組みにより, 子供は遊びながらペンを走らせる体験を得

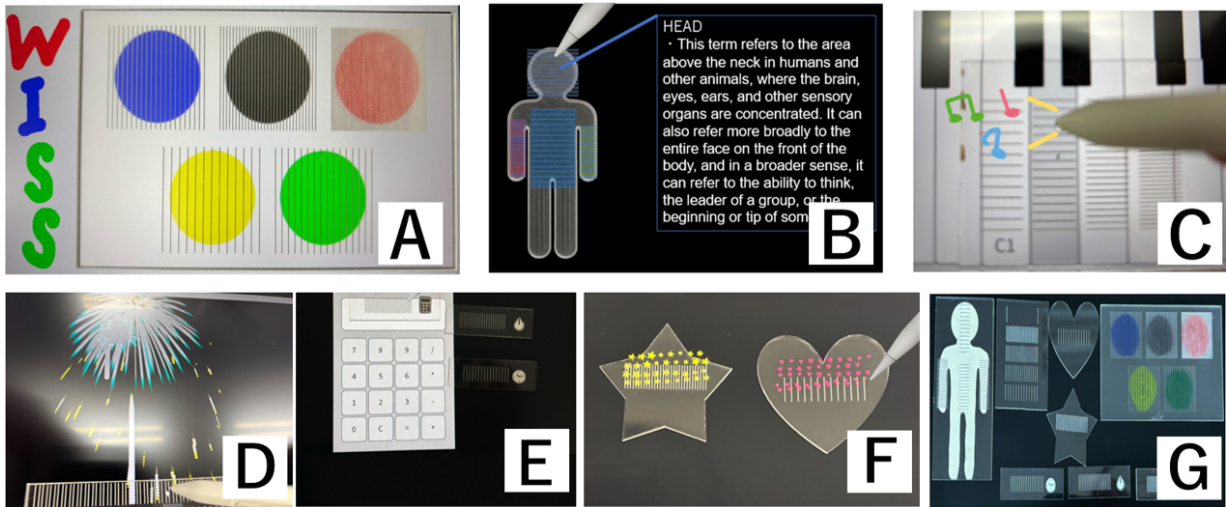


図 4. シート型 TUI を用いたアプリケーション例. (A：物理カラーパレット, B：学習支援, C, D：エンターテインメント, E：UI 格納, F：視覚支援, G：作成シート一覧)

られ、フィードバックを通じて、文字や線を書き始める動機づけとして楽しむことができる。

4.4 認証シートインタフェース

本応用例では、溝領域をタグのように扱い、暗証番号入力に応用するシステムを実装した。ユーザは特定の溝領域を決められた順序でなぞることでロックを解除できる。本応用例は筆圧変化そのものを単独の生体認証と見なすには限界があるものの、ユーザが意図的に設定できる領域のなぞり順序や回数といった行動的シーケンスを認証情報として用いることで、高い組合せ数を持つパスワードを構成でき、単独の生体認証ではなく行動的パスワードや多要素認証の一要素としての応用が期待される。さらに、シート自体が鍵として機能するため、一見すると入力手段であることすら認識されにくいという匿名性を持つことも期待できる。本応用例は、単独の認証方式として利用できるだけでなく、従来のログイン方式（パスワードや PIN コード、生体認証など）と組み合わせることで、多要素認証の一部としてセキュリティを強化できる可能性を持つ。

4.5 UI 格納型シートインタフェース

本応用例では、溝領域を UI の呼び出しタグとして利用し、特定の溝をなぞることで対応するウィンドウやメニュー画面を表示する仕組みを実装した（図 4E）。ユーザは必要に応じて溝領域を操作することで、任意の UI 要素を呼び出し、自由に再配置することができる。また、使用していないときにはシートをディスプレイ外に退避できるため、常に画面上に UI を配置する必要がなく、作業空間を圧迫しないという利点がある。

4.6 視覚支援シートインタフェース

本応用例では、シート自体をユニークな形状に加工し、触覚によって識別できるインタフェースとして利用した。このような形状の違いは、ユーザが視覚に頼らずにシートを区別する手がかりとなり、視覚にハンディキャップをもつユーザに対する操作支援になる。これにより、ディスプレイ上の GUI が提示できない情報を、物理的な形状を介して直感的に伝達できる。またこうしたシートは見た目でも機能が把握しやすいため、図 4F のように、星やハートのような形状のシートの上で手描きをすると、星やハートのブラシで手描きができるといった表現にも応用可能である。

5 関連研究

5.1 物理デバイスを用いた操作支援に関する研究

タブレット上に物理デバイスを配置して操作を支援する TUI 研究には、Bricks[5] や TUIC[16] などがある。Bricks は、物理的なブロックを動かして画面内の図形を操作する手法であり、有線の磁気センサを用いて物理ブロックを識別している。TUIC は、マルチタッチパターンによって人間の指との区別が可能な TUI を実現している。この手法では、オブジェクトの認識により他の操作を妨げず、かつ既存センサのみを用いて認識することを目指しているが、オブジェクト自体に電子回路を組み込んでいるという特徴がある。また、Ohmic-Touch[8] は、オブジェクト内部に抵抗素子やセンサを組み込むことでタッチ面との間の電流変化を利用し、識別や連続入力を可能にしている。音響認識を用いている手法もあり、TapSense[6] や AugmentingTouch[10] は指の異なる部位や物体からのタップを表面にマイクを付与し

たタッチスクリーンで識別している。他にも、実物体に付与した識別パターンをカメラで読み取ることで識別する StructCode[3] や赤外光とカメラを使って認識する IR Rings[13] や Lumino[2] などがある。

これらの研究は、オブジェクトの識別精度が高いという利点がある一方で、オブジェクト側に電子部品や電子回路の組み込みや外部カメラやマイクを用意する必要があり、コストがかかるという課題がある。本手法は、シートに溝を彫るだけでよく、低コストで実現可能である。

5.2 溝の入ったシートを用いた TUI に関する研究

溝を用いた TUI 研究もいくつか行われている。Acoustic Barcodes[7] は、刻み目を持つ物体をなぞる際に生じる振動音をバイナリ ID に変換し、オブジェクトの識別を可能にしている。しかし、得られるのは ID 情報にとどまり、オブジェクトの位置を取得できないため配置が固定されてしまう点や、ユーザにとって溝をなぞる行為自体に強い意味が付与されにくいという課題がある。また、Rekimoto らの DataTiles[12] では、平面ディスプレイ上に RFID タグを埋め込んだ透明なタイルを配置し、電磁波によって識別する手法である。この方式はスタイラスペンでの筆記操作と組み合わせることができ、溝に沿った操作行為に意味を持たせられる点が特徴である。しかし、タイルごとに RFID タグを付与する必要があるほか、RFID センサコイルが配置された領域でしか利用できないという制約を伴う。

本手法は、Acoustic Barcodes の「溝を掘るだけで識別できる」という低コスト性と、DataTiles が示した「筆記操作を入力行為として利用できる」という特徴を備えている。本手法で DataTiles のタイルに溝を彫り、それをなぞることで DataTiles の ID 識別に活用することが可能となるため、DataTiles をより安価で実現可能になると期待される。

5.3 筆記操作を利用した TUI に関する研究

Elkin ら [4] や Song ら [14] は、ペンに複数の入力インタフェースを組み込み、回転や持ち替え、グリップや指のジェスチャといった操作を利用可能にしたが、いずれも入力が入力の物理構造に依存するという制約がある。McGee ら [11] は、紙地図と付箋をセンサーと結びつけることで、紙に描いて貼るという自然な作業をそのまま入力に転用する TUI システムを開発した。Asselborn ら [1] は、小型ロボットを用いて文字の形や書き順を触覚的に提示し、子どもの筆記学習を支援する手法を示している。

本研究も同様に、筆記操作という日常的かつ自然な行為に着目する。また、ペン側に機能を追加するのではなく、書かれるシート側に物理的な溝を設けることで入力空間を拡張し、新たな TUI の可能性を提示するものである。

6 議論

本手法の精度検証および応用例の実装から気づいた点、さらなる改良について議論する。

まず、識別精度は平均 0.78 程度であり、一定の有効性を示す一方で、さらなる改善の余地も残されている。これは、筆記方法やデータ取得方法を工夫することで精度向上を行うことが必要である。また、現状では interval 特徴量の識別力が十分に発揮されていない可能性がある。この点については、筆圧取得デバイスの分解能の影響が大きく、今後のデバイス性能向上により改善されると考えられる。

次に、本研究ではレーザーカッターを用いてアクリル板に溝を加工したが、現状ではアクリル素材のみを対象としている。しかし、Acoustic Barcodes の知見が示すように、浅い溝であれば素材を問わず付与可能であり、本手法はアクリルに限らず多様な素材へ展開できる発展性を持つと考えられる。また、素材ごとにペン先と表面との摩擦や硬さが異なるため、筆圧変化の特徴も変化すると考えられる。この点は単なる識別精度の改善にとどまらず、「素材特性に応じた手書き入力インタラクション」という新しい観点を提供する可能性があり、今後もさらなる調査を行う価値があると考えられる。

最後に、本手法が幅広い応用可能性があることを 4 章において示したが、筆記方法や利用条件に関する制約が今後の課題である。本研究では溝を縦方向に加工し、横方向の筆記に限定して識別を行ったため、縦書きや斜め方向の筆記利用は十分に検証していない。また、溝の形状や深さによって筆圧変化の現れ方が異なり、識別精度に影響を与える可能性がある。今後は、円形の溝や斜線型の溝、さらには深さを変化させた溝など、より多様なデザインを導入することで、筆圧変化に多彩な特徴を与えられる可能性がある。また、筆圧変化を利用する特性上、ユーザの筆記習慣や筆圧特性に大きな個人差が生じると考えられる。そのため、事前キャリブレーションによる補正や個人差を活用したパーソナライズ化した応用例について検討が必要である。

7 むすび

本論文では、溝間隔の違いによる筆圧変化を活用した、追加デバイスを必要としないシート埋め込み型 ID 認識手法を提案した。またシートの識別精度が実用可能性を持つことを明らかにし、実際にシート型 TUI を利用した複数のアプリケーション例を実装し、幅広い応用可能性を示した。今後の課題として、識別精度の向上がある。精度が向上することにより、応用の幅が広がると期待される。また、アクリル板以外の多様な素材への展開や溝構造の多様化を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Asselborn, A. Guneyusu, K. Mrini, E. Yadollahi, A. Ozgur, W. Johal, and P. Dillenbourg. Bringing letters to life: handwriting with haptic-enabled tangible robots. In *Proceedings of the 17th ACM Conference on Interaction Design and Children, IDC '18*, pp. 219–230, 2018.
- [2] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck. Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1165–1174, 2010.
- [3] M. D. Dogan, V. H. Chan, R. Qi, G. Tang, T. Roumen, and S. Mueller. StructCode: Leveraging Fabrication Artifacts to Store Data in Laser-Cut Objects. In *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Computational Fabrication, SCF '23*, 2023.
- [4] L. A. Elkin, J.-B. Beau, G. Casiez, and D. Vogel. Manipulation, Learning, and Recall with Tangible Pen-Like Input. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp. 1–12, 2020.
- [5] G. W. Fitzmaurice, H. Ishii, and W. A. S. Buxton. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '95*, pp. 442–449, 1995.
- [6] C. Harrison, J. Schwarz, and S. E. Hudson. TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp. 627–636, 2011.
- [7] C. Harrison, R. Xiao, and S. Hudson. Acoustic barcodes: passive, durable and inexpensive notched identification tags. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12*, pp. 563–568, 2012.
- [8] K. Ikematsu and I. Siio. Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch through Resistive Objects. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp. 1–8, 2018.
- [9] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '97*, pp. 234–241, 1997.
- [10] P. Lopes, R. Jota, and J. A. Jorge. Augmenting touch interaction through acoustic sensing. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp. 53–56, 2011.
- [11] D. R. McGee, P. R. Cohen, R. M. Wesson, and S. Horman. Comparing paper and tangible, multimodal tools. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '02*, pp. 407–414, 2002.
- [12] J. Rekimoto, B. Ullmer, and H. Oba. DataTiles: a modular platform for mixed physical and graphical interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '01*, pp. 269–276, 2001.
- [13] V. Roth, P. Schmidt, and B. Güldenring. The IR ring: authenticating users' touches on a multi-touch display. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '10*, pp. 259–262, 2010.
- [14] H. Song, H. Benko, F. Guimbretiere, S. Izadi, X. Cao, and K. Hinckley. Grips and gestures on a multi-touch pen. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp. 1323–1332, 2011.
- [15] M. Weiss, J. Wagner, Y. Jansen, R. Jennings, R. Khoshabeh, J. D. Hollan, and J. Borchers. SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '09*, pp. 481–490, 2009.
- [16] N.-H. Yu, L.-W. Chan, S. Y. Lau, S.-S. Tsai, I.-C. Hsiao, D.-J. Tsai, F.-I. Hsiao, L.-P. Cheng, M. Chen, P. Huang, and Y.-P. Hung. TUIC: enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp. 2995–3004, 2011.
- [17] 瀬崎夕陽, 関口祐豊, 中村聡史. 微細な筆圧変化を用いたシート判別手法の提案. ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2025-HCI-211(19):1-8, 2025.
- [18] 青木良輔, 宮下広夢, 井原雅行, 大野健彦, 千明裕, 小林稔, 鏡慎吾. くるみる: 複数導電部もつ枠型物理オブジェクトを用いたタブレット操作. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 6:1-8, 2011.
- [19] 文部科学省. 令和 6 年度学校における教育の情報化の実態等に関する調査結果 (概要) 【速報値】. https://www.mext.go.jp/content/20250829-mxt_shuukyo01-000044325_001.pdf, 2025. 最終アクセス日: 2025-10-17.