

# PP-Undo: 筆圧の制御により付与されたストロークの確信度に基づく Undo/Redo 手法の提案

関口祐豊<sup>1</sup> 植木里帆<sup>1</sup> 中村聡史<sup>1</sup>

**概要:** デジタルな手書きの機能のひとつに Undo/Redo 機能がある。しかし、既存の Undo/Redo 機能では、筆記順序に対して逐次的に行うことしかできず、筆記テストにおける解答と下書きのメモのような確信度に差があるような状況において、その確信度が低い下書きのメモだけをあとから削除するといったことはできない。そこで本研究では、筆記情報の中でも筆記の最中に調整可能なパラメータである筆圧を利用することで、確信度の高い箇所を並行して残し、その確信度ベースで Undo/Redo 機能を可能とする手法を提案する。またプロトタイプシステムを実装し、デジタル手書き支援への応用可能性を調査する。その結果、本手法を用いることでユーザの筆圧の分布が変化し、最終的にノートに残されているストローク量が大きく減少することを明らかにした。また、数名のユーザに5日間利用してもらったところ、1回の提案手法 Undo で削除しているストロークの割合が増加する傾向にあることがわかった。

**キーワード:** 手書き, 筆圧, Undo, Redo, タブレット, スタイラスペン

## 1. はじめに

文部科学省が実施した学校における教育の情報化の実態に関する調査[1]によると、学校におけるタブレット端末の整備台数は2014年に72,678台であったのに対し、3年後の2017年には約5倍の373,475台に増加している。また、文部科学省が2021年に実施した端末活用状況等の実態調査[2]によると、全自治体のうち96.2%が児童生徒に向けた学習者用端末を整備しており、義務教育段階における学習者用端末一台あたりの児童生徒数は1.0人となっている。そのため、タブレット端末の使用率は今後も増加すると考えられる。それにとれない紙製のノートではなく、タブレット端末を用いた手書き入力を行う機会も増加すると考えられる。

紙製ノートの手書きとタブレット端末やスタイラスペンを用いた手書きの相違点は様々なものがあるが、なかでも直前に行った操作を元の状態に戻す Undo/Redo の有無は大きな違いであり、部分的な書き直しを簡単にするなどでも便利なものである。Undo/Redo については、Yang[3]が提案した従来の Undo モデル (図1) では、操作の系列を逆順で逐次 Undo するものである。また、Kawasaki ら[4]の Regional Undo モデル (図2) のように指定した領域で行う Undo を可能とするものもあり、領域に分けて作業する場合には便利なものである。

こうした Undo モデルでは、図3のように数学の問題を解いている際に、空間的に切り分けられておらず、時系列順ではない一時的なメモ書きや予想などをまとめて戻して削除することは困難である。空間的に切り分けられておらずまた時系列順ではないものを Undo する方法として、タブレットを用いた手書きのイラスト作成などにおいて、下書きレイヤと、清書レイヤとに分けることによって、Undo や一括削除を手軽にする方法はあり、多用されている。し

かし、問題を解いたり、ノートなどを取ったりする際にはレイヤの切り替えの手間があるうえ、ミスが生じる可能性も高い。

ここで、タブレット端末とスタイラスペンを用いた手書き入力では、様々な筆記情報を取得できる。例えば、株式会社ワコム[5]の Wacom MobileStudio Pro では筆圧、ペンの



図1 従来の Undo/Redo モデル

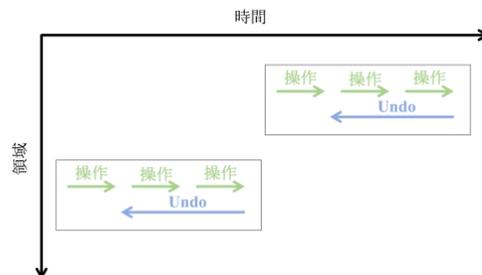


図2 Regional Undo モデル

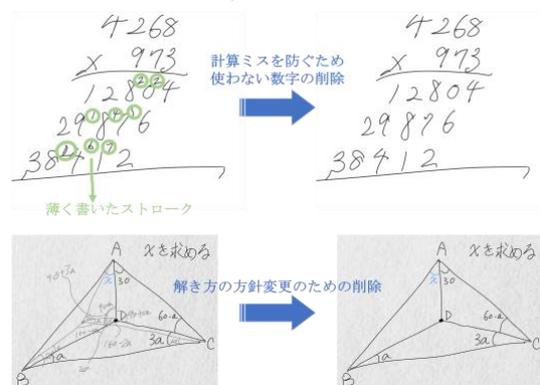


図3 既存のノートでは難しいストローク削除の例

<sup>1</sup> 明治大学  
Meiji University

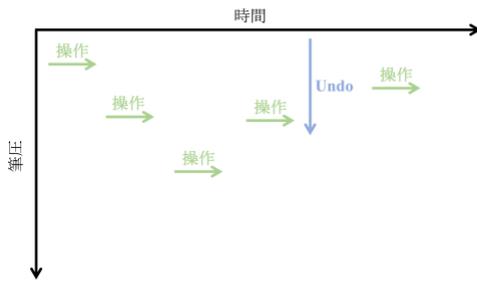


図4 本研究で提案する Undo モデル

傾き、入力時刻などの筆記情報が取得可能である。また、ユーザは手書きをしながら確信度や重要度に応じて、明示的に筆圧を変化させることが可能であることが知られている[6]。

そこで我々は、この筆圧の強弱を Undo/Redo を行う軸として導入する手法を提案する。具体的には、手書き入力において、ユーザに重要な箇所や自信のある箇所の筆圧を強くし、一方で重要ではなくあとで消すような下書きや計算における自信のない箇所などの筆圧を弱くするなど、確信度や重要度の大小に応じて筆圧をコントロールして記述してもらうことで、筆圧が弱いストロークから削除を行う Undo を可能とするものである。また、Undo 時に消されたストローク群を保存し、選択インタフェースによりストローク群をまとめて再表示させる Redo 機能も実装する (図4)。

本研究では、提案手法をシステムとして実装するとともに、筆圧をもとにした Undo および Redo の機能がユーザの操作においてどのような影響を及ぼし、どういった利点、欠点があるのかを計算問題やパズルを解く実験から明らかにする。また数日間利用してもらうことにより、システムへの慣れとその効果について検証を行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 手書き文字の筆圧に関する研究

手書き入力における筆圧に関して、Yu ら[7]は、一般に筆圧と筆記速度はある程度相関があり、筆圧が弱い時には筆記速度が速く、筆圧が強い時は筆記速度が遅くなる傾向になることが多いと述べている。加藤[8]は、筆圧の変化率は肉体的負荷が大きい作業では正の方向に変化し、精神的負荷が大きい作業では負の方向へ変化することを明らかにした。鈴木ら[9]は、ペンを握る力と筆圧を組み合わせたインタラクションの手法を提案し、ペンを握る力と筆圧の間には相関関係があることを明らかにした。

これらの研究から、筆圧情報は様々な特性をもっており、筆記情報の中でも幅広い場面に応用ができるデータの1つであると我々は考え、計測された筆圧情報を応用する手書

き入力時の新たなインタフェースを提案した。

### 2.2 Undo/Redo に関する研究

Undo/Redo モデルは Yang[3]の従来の Undo モデル案をもとに現在まで様々な場面および方法で使われている。Berlage[10]や Myers ら[11]は、過去のアプリケーションの操作履歴から特定の履歴を選択することでその履歴の状態に戻るような選択的 Undo 機能を実装し、選択的な Undo はユーザにとって自然に扱える Undo 機能であることを明らかにした。このように選択的な Undo を行うことで従来の Undo 操作よりも操作量が減少することが考えられる。しかし、これらの研究も時系列に沿って Undo するものであり、書いた文字の順序によらずに部分的な Undo を行いたい際に用いることはできない。Knister ら[12]は、特定の操作範囲を Undo 可能とする Regional Undo モデル[4]を参考に、Undo/Redo が適用される範囲をあらかじめ指定し、その範囲においてのみ Undo/Redo を適用するシステムである DistEdit を実装し、システムの有用性を検証した。しかし、高レベルの操作を行う際に多くの Undo コマンドが必要になってしまい、ユーザにとっての使いやすさを損ねるものとなってしまった。Seifried ら[13]も同様に、専用の電子ホワイトボードを用い、領域毎の入力の取り消しややり直しを可能とするいくつかの Undo 機能を比較した結果、ユーザの視野にもとづいた Undo 機能が最も評価が高かったことを示した。田野ら[14]は、デザイン描画において、1ストローク単位よりも細かな Undo が必要であると述べ、4種類を実装したところ、全操作量のうち10%が Undo に関する操作であること明らかになった。4種類の Undo は空間的選択や時間的選択などを行っているが、それぞれの選択範囲内では1つ1つもとに戻るような逐次的な Undo となってしまっており、書いた順序に影響を受けてしまう。

本研究ではこれらの研究とは異なり、Undo/Redo 操作において、時系列によらず自信の有無や重要度の大小に応じて付与された筆圧を軸として Undo を可能とするものである。

## 3. 提案システム

### 3.1 提案手法

数学問題を解いている際に、図形に辺の長さや角度などの予想を書き入れたり、途中計算をメモ書きしたりする場面は多く存在しており、こうしたメモ書き程度の記述のみを予想が間違っていたために消したいという状況がよくある。しかし、消したい部分は時系列順ですぐ戻れるところにあるわけではないため、Undo で消したい部分だけを消すことはできず、またそうした部分についてストロークを細かく選択しながら削除することは容易ではない。

そこで我々は自信度と筆圧の関係と、筆圧の意識的な制御が可能であるという特性[6]を応用し、タブレットとスタ

イラストペンを用いた手書き入力においてレイヤなどを用いることなく重要度の高い箇所のみを簡単かつ明確に残し、そうでない部分を手軽に削除できるような新たな Undo 機能を提案する。

本提案手法では、ユーザには、後で消す候補となる自信のない部分や下書きなどを弱い筆圧で記述しつつ、自信のある部分を筆圧強めに記述してもらう。また、ユーザは必要に応じて筆圧弱めに記述した自信のない部分を、筆圧指定インターフェースによりまとめて消すことを可能とする。さらに、その Undo ポイントを記録しておき、適切に Redo 可能とするというものである。

本研究における Undo 機能の利用によって、計算ミスが少なくなったり、解答の試行錯誤が用意になったり、要点をまとめたノートを簡単に作成できるようになると期待される。またログを用いた Redo 機能によって簡単に重要度の低い場所の見返しができるようになれば、タブレット端末とスタイラスペンを用いた手書き入力機能の幅が広がるのが期待される。

提案手法のイメージを図 3 に示す。この図では、筆算計算において、薄く書いた繰り上がりの数字のみを削除し、それ以外のストロークを残している。

### 3.2 システム概要

本研究で提案する Undo/Redo 機能をもつ Web アプリケーション PP-Undo を実装した。

本システムのフロントエンドは Web アプリケーションフレームワークの Next.js、バックエンドは Go 言語、データベースは MySQL を使用して実装した。また、CSS フレームワークとして、Tailwind CSS を用いた。

システム画面を図 5 に示す。ユーザがログインすると、ノートやフォルダを作成できるノート作成画面が表示され、新規ノートの作成または過去のノートを選択することでノート画面に遷移する。また、ノート画面では、ペンの太さ・色の変更機能、消しゴム機能、従来の Undo/Redo 機能、提案手法である筆圧を用いた Undo 機能およびログを用いた Redo 機能が配置されている。

提案手法である筆圧の強弱に応じた Undo 機能を使用してもらうにあたり、筆圧を可視化することが重要であると考えられる[6]。そのため、図 5 右に示すようにノート画面

の右側に提案手法である Undo/Redo 機能及び筆圧値などを可視化する。なお、本稿における「筆圧値」は、1 ストロークにおける時間あたりの筆圧（筆圧の強弱を 0~1 の範囲に正規化したものであり、0 と 1 はそれぞれハードウェアの検出できる最小圧力と最大圧力である）の平均値とする。可視化の方法について具体的には、ノート画面の右側中央に二つの円グラフをユーザに提示した（図 6）。「now」と記されている水色の円グラフでは直前に書いたストロークの筆圧値が表示されており、ユーザがストロークを書いた直後に自分の筆圧を把握することができる。また、「avg」と記されている桃色の円グラフでは過去に記述した全てのストロークの筆圧値を平均した値が表示されており、ユーザは表示された値を参考にすることで、今までの筆圧に比べて筆圧を強めたり弱めたりすることが容易になると考えられる。

ノート画面の右上には折れ線グラフとレンジスライダをユーザに提示した（図 7）。折れ線グラフは、横軸が筆圧値、縦軸がストローク数となっている。ユーザはこのグラフから、各筆圧値にどの程度ストロークが分布しているかを把握し、またレンジスライダを操作することで Undo の閾値となる筆圧を手軽に指定可能となっている。なお、レンジスライダは左端が 1、右端が 0 となるような値を取り（以降、レンジスライダの取る値を「スライダ値」と記す）、1 からスライダ値を引いた値未満の筆圧値であるストロークを削除する。このシステムにより、ユーザは折れ線グラフと照らし合わせながら筆圧による Undo を行うことができる。また、ノート画面の右下には、レンジスライダを動かしてスライダ値が確定した時に、レンジスライダ操作前のノート画面のデータを保存及び表示するログ画面を用意した（図 8）。表示されているログをクリックすると画面上にダイアログとして画面に大きく選択したログが表示され、change ボタンをクリックすると選択したログ画面まで戻ることができる。実際に本システムを利用している様子を図 9 に示す。

## 4. 実験

我々は、本提案手法である筆圧に基づいた Undo 機能の



図 5 システム画面（左：ノート作成画面，右：ノート画面）

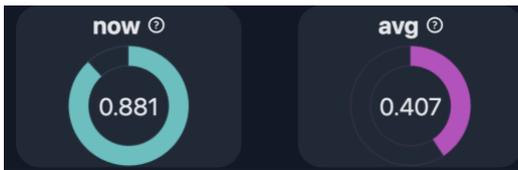


図6 筆圧値を示す2つの円グラフ



図7 筆圧値分布グラフとUndo用操作UI



図8 ノート画面のログ表示領域



図9 レンジスライダを動かすことで消した様子

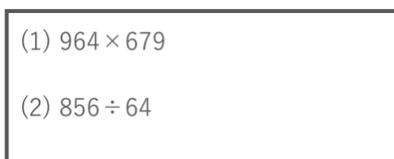


図10 基礎計算タスクの例

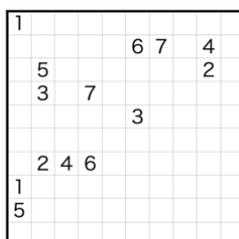


図11 ナンバーリンクタスクの例

利用により、ユーザの手書き入力がどのように変化するか調査する。具体的には、筆記を多用する問題において提案手法でのUndo/Redoを用いるグループとそうでないグループに分けて比較を行うことで、提案手法の有用性を確かめる。

#### 4.1 実験概要

実験では、基礎計算タスク（筆算をとまなうような掛け算と割り算が2問表示されるタスクを練習1タスク、本番3タスク、分数計算が1問表示される本番1タスク）とナンバーリンクタスク（練習1タスク、本番3タスク）の2種類のタスクを実験参加者に依頼した。

それぞれのタスクの例を図10, 11に示す。基礎計算タスクは指定された黒枠の範囲内で計算をするタスクであり、ナンバーリンクタスクは、複数の線が交差せず全てのマスを埋めるように同じ数字を線で結ぶタスクである。これらのタスクは、回答するまでに確信度や重要度が変化する場面が多く、提案手法の有用性を確かめるのに適していると考えられるため、これらのタスクを実験に用いた。

なお実験参加者は、提案手法群、従来手法群の2群に分け、提案手法群では提案手法を用いたシステムを利用して実験を行ってもらい、従来手法群では図5のノート画面右側に表示されている機能を非表示にした状態のシステムを利用して実験を行ってもらった。

#### 4.2 実験手順

実験ではまず、システムの操作方法に関して実際にシステムを用いながら実験参加者に説明した。提案手法群の実験参加者には、確信度や重要度に応じて筆圧を制御できることを説明した。次に、システムの操作に慣れてもらうために、基礎計算タスクとナンバーリンクタスクの練習問題をそれぞれ1タスクずつ行ってもらった。その後、本番として基礎計算タスク4問とナンバーリンクタスクを3問解いてもらった。なお、各タスクの制限時間は10分とした。全タスク解答後、アンケートに回答してもらい、実験は終了とした。

実験では、株式会社ワコム[5]のWacom MobileStudio Pro 13とWacom Pro Pen slimを用いた。

### 5. 実験結果

実験参加者は男性12名、女性8名の計20名であり、提案手法群、従来手法群それぞれ10名ずつとなった。以下では、実験の結果について述べる。

#### 5.1 正答率と回答時間に関する結果

提案手法を用いることで、筆圧を制御することに集中してしまいタスクの正答率や回答時間が下がってしまうことが考えられるため、提案手法を用いた実験参加者と従来手法を用いた実験参加者の正答率および平均回答時間に関して分析を行った。その結果を表1に示す。提案手法は従来

表 1 提案手法と従来手法の正答率と平均回答時間

	提案手法	従来手法
正答率	76%	79%
回答時間	242s	219s

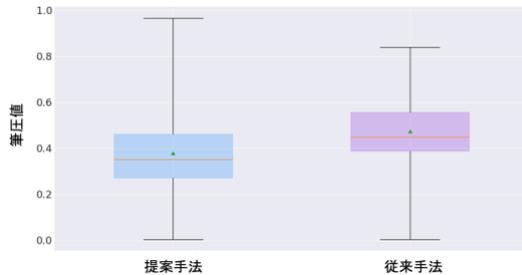


図 12 各ストロークにおける提案手法・従来手法の筆圧値分布

表 2 実験参加者の筆圧値の標準偏差

	提案手法	従来手法
math	0.135	0.064
number	0.132	0.062
平均	0.139	0.068

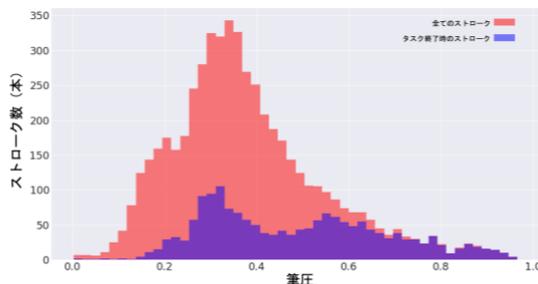


図 13 提案手法における全てのストロークとタスク終了時のストロークの筆圧値分布

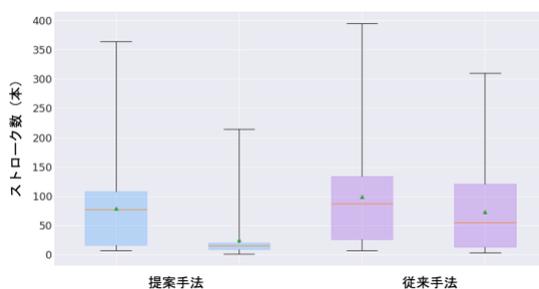


図 14 各タスクの全てのストローク量と終了時におけるストローク量分布

手法に比べ 3%正答率が低かったが、大きな差はみられなかった。また、提案手法は従来手法に比べ平均回答時間が 23 秒遅くなった。

## 5.2 筆圧に関する結果

提案手法と従来手法における筆圧値の分布を図 12 に示す。この図から提案手法は従来手法に比べ筆圧値が低いストロークが多くなり、筆圧値が幅広く分布することがわかった。提案手法と従来手法のそれぞれについて、各タスクにおける実験参加者ごとの筆圧値の標準偏差の平均をそれぞれ表 2 に示す。ここでは、基礎計算タスクは **math**、ナンバーリンクタスクは **number** と表記している。この表から、提案手法を用いた実験参加者は、従来手法を用いた実験参加者に比べ筆圧値の標準偏差が高く、筆圧が広く分布する傾向にあることがわかった。

提案手法における全てのストロークの筆圧値の分布とタスク終了時の筆圧値の分布を図 13 に示す。図 13 から筆圧値の低いストロークが多く削除されるなど、提案手法を活用できていることが示唆された。

## 5.3 ストロークに関する結果

各タスクにおける記述された全てのストローク数とノートに残されていたストローク数を分析した。その結果を図 14 に示す。図 14 から、従来手法に比べ提案手法の方が多くのストロークを削除している傾向にあることがわかった。また従来手法に比べ提案手法は、タスク終了時にノートに記されているストローク量が少ない傾向にあることがわかった。ウィルコクソンの順位と検定を行った結果、提案手法と従来手法の間に有意差がみられた ( $p < 0.01$ )。

提案手法 (user1~10) と従来手法 (user11~20) のストローク数と筆圧値の分布を図 15 に示す。この図から、提案手法と従来手法では、ストロークの分布が大きく異なることがわかる。また、user6 のように提案手法群でも従来手法群と類似した結果になっている実験参加者がいることもわかった。

## 5.4 提案手法の使用に関する結果

提案手法である Undo を用いた場面の例を図 16 に示す。基礎計算タスクではスペースが限られていた為、図 16 のように計算過程の筆圧を弱く、答えの筆圧を強く書くことによって、重要である答えを残して次の計算用スペースを作るという使い方をしている実験参加者が多くみられた。また、ナンバーリンクタスクにおいて自信のある箇所を残し、自信のない箇所の筆圧を弱めて記述するという使い方がみられた。さらに、ログを確認することで、提案手法 Undo によって消した途中過程を再度確認する実験参加者も数名存在した。提案手法の実験参加者と従来手法の実験参加者のタスク終了時のノート画面を図 17 に示す。この図から、従来手法に比べ提案手法の方が重要な箇所を明確に残すことができていることがわかった。

従来手法群と提案手法群の従来手法 Undo の使用回数と、提案手法 Undo のタスク時間 (タスク解答にかかった時間を 0~1 に正規化したもの) に応じた削除したストローク数を図 18 に示す。この図から、提案手法は従来手法に比べ多

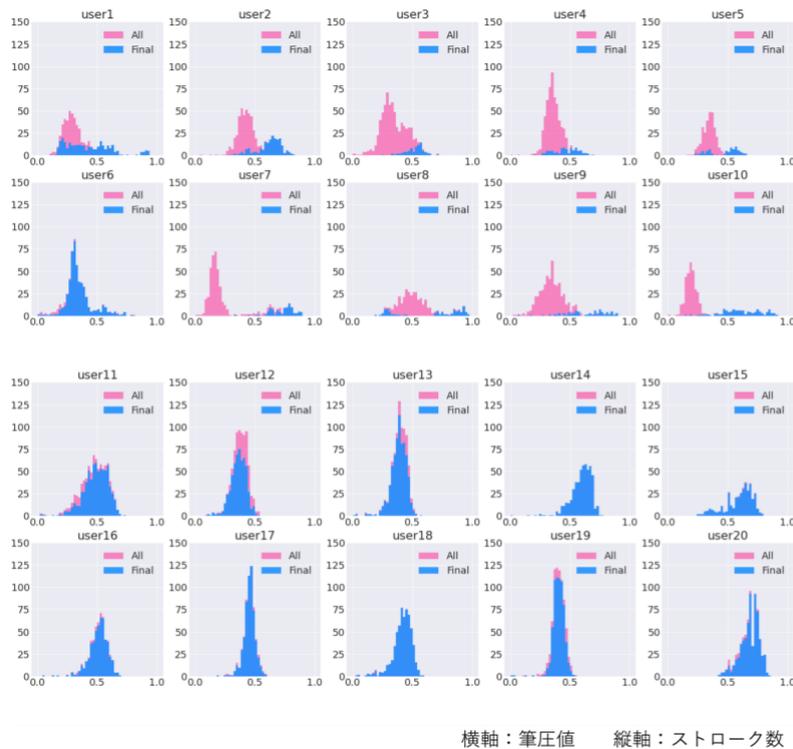


図 15 実験参加者ごとの全てのストロークとタスク終了時のストロークの筆圧値分布

くのストロークを削除できることがわかった。使用回数に関して、合計で従来手法群では 338 回、提案手法群では 182 回の Undo が行われた。また、提案手法群における提案手法 Undo の使用回数は 230 回と従来手法 Undo の使用回数を上回っており、提案手法を実験参加者が多く使用していたことがわかった。

### 5.5 アンケート結果

実験後、提案手法を用いた実験参加者に、Undo の使用感、

Redo の使用感、筆圧の可視化、筆圧制御における不快感、重要な箇所を残せたかどうかなどに関するアンケートを実施した。アンケートの結果、Undo や Redo、筆圧の可視化や重要な箇所を残せたという点については全体的に高い評価を得られたが、筆圧制御における不快感について評価が分かれており、筆圧を制御することに対して不快感を抱く実験参加者がいることも明らかになった。

## 6. 考察

### 6.1 正答率と平均回答時間の比較

正答率に関する結果から、提案手法を用いた実験参加者は正答率が若干低くなるという結果が得られた。これは、筆圧を制御するという意識を行ったために、考えることが余計に増えてしまったことが原因として考えられ

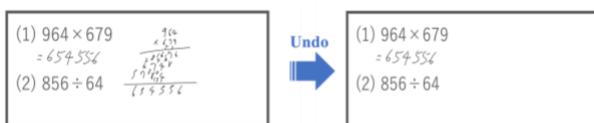


図 16 提案手法 Undo の実際の使用例

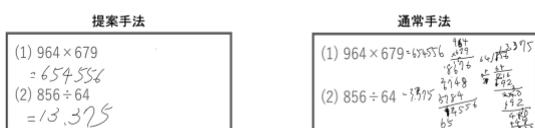
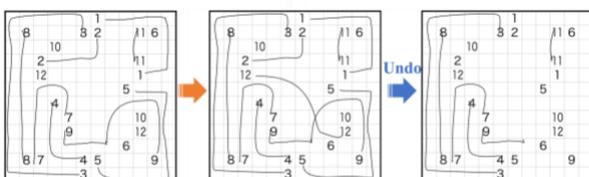


図 17 提案手法と従来手法のノート

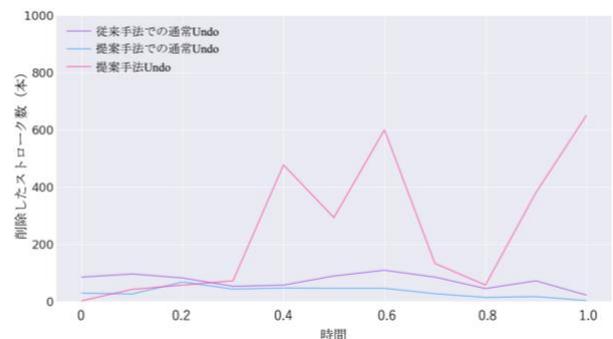


図 18 従来の Undo と筆圧を用いた Undo のタスク時間に応じた削除したストローク数の比較

る。ここで、ナンバーリンクタスクについては経験の少ない人がおり、中には制限時間以内に解き終わらない実験参加者がいた。そのため、実験参加者ごとの学習知識の差やナンバーリンクタスクに対する経験の差も影響したことが考えられる。また、平均回答時間に関しても同様に従来手法を行った実験参加者の中に極端に正答時間が早く、全てのタスクにおいて全実験参加者の回答時間の上位3位までに入っている実験参加者が存在した。そのため、正答率と同様に実験参加者の得意・不得意の差が、今回の結果に影響したと考えられる。この点に関しては、参加者内比較実験を行い今後調査していくことを検討している。

## 6.2 筆圧分布に関する比較

筆圧値の分布に関する結果から、提案手法の方が従来手法に比べ筆圧値が広く分布し、筆圧値の標準偏差が高くなる傾向にあることがわかった。実際に提案手法を用いた手書きでは、提案手法を用いるために確信度や重要度に応じて意図して筆圧の強弱をつけて書くような行動がみられた。なお、この行動は表2からも多くのユーザが行える簡単な設計であることが示唆された。しかし、一部の実験参加者は、提案手法を用いても従来手法を用いた実験参加者の筆圧値の標準偏差とほとんど変わらなかった。このことから、人によっては筆圧の制御に慣れるまでに時間が生じてしまう可能性が考えられる。

図13, 15の結果から、提案手法では筆圧値の低いストロークが多く削除され、全体的にも多くのストロークが削除されるなど、ほとんどの実験参加者が提案手法を意図通りに利用できていることが示唆された。しかし、user6のように提案手法である筆圧を用いたUndoをうまく利用できなかった実験参加者もいた。このことから、ユーザによっては提案手法を使いこなせるようになるまで時間を要する可能性があると考えられる。

## 6.3 ストローク量に関する比較

ストローク量に関する結果から、提案手法を用いてノートを書くことで最終的なストローク数が従来のタブレット端末を用いた手書きノートよりも減少することが明らかになった。これは、多くの実験参加者が筆圧を制御して提案手法Undoを用いることができたためであると考えられる。実際に図16, 17から提案手法を用いることで確信度や重要度の高い箇所を明確に残すことができることが示唆された。

## 6.4 提案手法の使用法および使用感

本実験において、図16のような狭いスペースでは重要度を判断して筆圧を制御し、提案手法を用いることで新たなスペースを作成するような操作や、ナンバーリンクタスクにおいて自信のある状態をログとして残しておくことで何度も自信のある状態にRedo可能とする操作、基礎計算タスクにおいて解き終わった際に見直しとしてログ画面の確認をするような操作などがみられた。基礎計算タスクと

ナンバーリンクタスクの2種類のタスクで実験を行ったためにこのような使用方法が多くみられたが、タスクを変更することで本実験ではみられなかった使用方法も得られるのではないかと考えられる。

またアンケート結果から、本提案手法をユーザにとって価値のある新たなインターフェースとして提供できる可能性が示唆された。しかし、筆圧を制御することに対して不快感を覚えている実験参加者もみられた。そこで今後どのような不快感を抱いたのかを明らかにしつつ、不快感を低減するための方法を模索し、システムの再構築について検討していく予定である。また、今回の実験のタスク量ではPP-Undoの使用感に慣れるまでに至らなかった可能性もあるため、追加で5日間の利用実験を実施することにした。

## 7. 模写のための利用実験

これまでの結果を踏まえ、PP-Undoの使用に慣れる必要性が示唆されたため、4章と同様のシステムでタスクを変更し模写を数日にわたって行う実験を行った。

### 7.1 利用実験概要

4章と同様のシステムを用いて、キャラクタを模写するタスクを5日間(1日2回の計10回)行った。利用実験では、男性1名、女性1名の2名の実験参加者に行ってもらった。

### 7.2 利用実験結果

提案手法Undo使用毎に削除したストロークの割合の実験日推移を図19に示す。図19から、利用実験が後半になるにつれ、1回の提案手法Undoで削除しているストロークの割合が増加する傾向にあることがわかった。

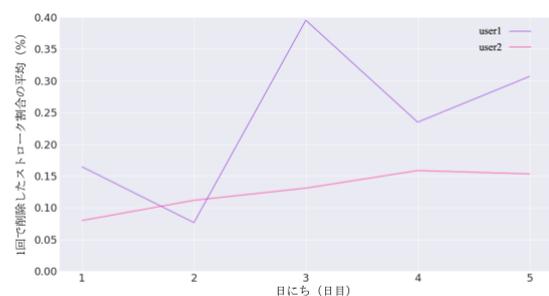


図19 提案手法使用毎に削除したストローク割合の平均



図20 模写タスクにおける提案手法Undo使用例

一方で、ストロークの筆圧値分布を調査した結果、2名の実験参加者ともに10回の模写タスクの間で大きな差はみられなかった。

模写タスクにおける提案手法 Undo の使用例を図20に示す。この図のように、実験参加者は全ての模写タスクにおいて下書きや迷い線を弱い筆圧で筆記し、提案手法 Undo で下書きを削除するような使い方をしていた。図20の下側に描画されているように寸法を予測するような下書きも模写タスクの後半ではみられるようになっていた。

### 7.3 利用実験考察

利用実験に関する結果から、提案手法 Undo を使用する回数はあまり変化しないことがわかった。しかし、提案手法に慣れることによって、1度に削除するストロークの割合が増加する傾向にあることがわかった。これは、提案手法に慣れたことで、どのようなストロークをどのように Undo できるかということを理解できたためだと考えられる。一方、今回は模写であったが、ノートを取ったり、問題への解答をしたりといった状況では本システムが効果的に働く可能性がある。そのため今後は、日常的にノートを取る場合や試験に解答する場面での検証を行っていく予定である。

## 8. まとめ

本研究では、ユーザに重要な箇所や自信のある箇所の筆圧を強くし、一方で重要ではなく、あとで消すような下書きや計算における自信のない箇所などの筆圧を弱くするなど、確信度や重要度の大小に応じて筆圧をコントロールして記述してもらうことで、筆圧が弱いストロークから削除を行うことを可能とする PP-Undo を提案した。また、PP-Undo の利用により、ユーザの手書き入力がどのように変化するか調査するため、PP-Undo と従来のノートシステムの比較実験を行った。具体的には、筆圧値に応じてストロークを削除できる Undo とログでストロークの状態を戻すことが可能な Redo を提案し、基礎計算タスク4問とナンバーリンクタスク3問を解いてもらう実験を行い調査した。

本実験の結果から、提案手法を用いて確信度や重要度に応じて筆圧を制御することで、Undo/Redo 順序を調節することが可能であることが明らかになった。また、従来のノートシステムに比べ最終的に残るストローク数に有意差があり、ノートの重要な要点のみをまとめることが可能であることが明らかになった。しかし、筆圧を調整することに不快感を抱いた実験参加者も存在した。これは普段、筆圧を調整して書く機会が少なく、慣れるまでに時間がかかるためであると考えられる。また、利用実験から PP-Undo は慣れるまでに時間がかかる可能性はあるが、有用性の高いものであることが示唆された。

今回、本研究で提案した PP-Undo を使用してもらうこと

でその有用性を検証したが、筆圧の制御に不快感を抱いていた実験参加者が数名存在した。そのため今後は、PP-Undo の筆圧値を連続値として扱うのではなく、離散値として扱うことで、削除されるストロークをより明確化することを検討している。また、小林ら[15]は、筆圧の強弱によるストロークの濃淡の必要性を明らかにしているが、本研究では筆圧によってストロークの濃淡を変化させていなかったため、その点に関する実装を行う予定である。さらに、筆記情報を可視化してユーザに表示することは高評価であったため、より他の筆記情報の可視化やより高度な可視化を行うことで筆記負担を減らすことを検討している。

## 参考文献

- [1] 文部科学省：学校における教育の情報化の実態等に関する調査。https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00400306&tstat=000001045486, (参照 2022-9-30).
- [2] 文部科学省：端末利活用状況等の実態調査（令和3年7月末時点）。https://www.mext.go.jp/content/20211125-mxt\_shuukyoku01-000009827\_001.pdf, (参照 2022-12-12).
- [3] Y. Yang. Undo support models. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1988, vol. 28, no. 5, p. 457-481.
- [4] Y. Kawasaki and T. Igarashi. Regional Undo for Spreadsheets. *User Interface Software and Technology (UIST)*, 2004.
- [5] 株式会社ワコム。https://www.wacom.com/ja-jp, (参照 2022-7-18).
- [6] 東孝文, 金井秀明. 切り絵の裁断スキルの向上を目的とするなぞり描き練習システムによる筆圧制御の効果. *情報処理学会 論文誌*, 2018, vol. 59, no. 11, p. 1978-1985.
- [7] K. Yu, J. Epps, and F. Chen. Cognitive load evaluation of handwriting using stroke-level features. *IUI'11: Proceedings of the 16<sup>th</sup> international conference on Intelligent user interfaces*, 2011, p. 423-426.
- [8] 加藤貞夫. 筆圧特性の基礎的研究. *日本経営工学会誌*, 1980, vol. 31, no. 4, p. 424-427.
- [9] 鈴木優, 三末和男, 田中二郎. ペンを握る力と筆圧を組み合わせたインタラクション手法. *情報処理学会 全国大会講演論文集*, 2010, vol. 72, no. 4, p. 23-24.
- [10] T. Berlage. A selective undo mechanism for graphical user interfaces based on command objects. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 1, no. 3, p. 269-294.
- [11] B. A. Myers, R. G. McDaniel, R. C. Miller, A. S. Ferency, A. Faulring, B. D. Kyle, A. Mickish, A. Klimoitski, and P. Doane. *The Amulet Environment: New Models for Effective User Interface Software Development*, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1997, vol. 23, no. 6, p. 347-365.
- [12] M. Knister and A. Prakash. DistEdit: A Distributed Toolkit for Supporting Multiple Group Editors. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 1990, p. 343-355.
- [13] T. Seifried, C. Rendl, M. Haller, and S. Scott. Regional Undo/Redo Techniques for Large Interactive Surfaces, *Proc. of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2012)*, 2012, p. 2855-2864.
- [14] 田野俊一, M. D. Hamzah, 岩田満, 橋山智訓. デザイナ・学生・ナレッジワーカーのための知的活動を活性化させるペン UI 開発事例と今後の課題. *情報処理学会 研究報告*, 2004, vol. 2004, no. 51, p. 55-62.
- [15] 小林沙利, 植木里帆, 関口祐豊, 中村聡史, 掛晃幸, 石丸築. デジタルペンの筆圧による濃淡表現の有無が正答率に及ぼす影響. *HCG シンポジウム*, 2022.