

PPUndo: 筆圧を軸とした Undo 機能のための ストローク群に対する一括筆圧情報付与手法の提案とその評価

関口祐豊¹ 中村聡史¹

概要: 手書きにおいて、確信度や重要度ベースでストロークをまとめて削除することは既存の Undo や消しゴムでは手間である。我々はこれまでの研究において、筆圧を利用することで確信度ベースで Undo を可能とする PP-Undo を提案してきた。しかし、これまでの PP-Undo はストロークごとの筆圧を Undo の軸としているため、文字単位での削除や文章や図形などの意味的なまとまりごとでの削除ができないという問題があった。そこで本稿では、長期的な利用により得られた 36,465 本のストロークを分析し、筆圧値のブレが大きくなっていく状況が生じてしまうことが明らかになった。また、グループの最初のストロークでグループの筆圧を設定する手法および、筆圧設定を失敗した場合に筆圧を再設定する手法を提案し、その精度を調査した。その結果、平均および上位 25% を利用した筆圧設定の精度が高く、最初に筆圧を調整することはユーザにとって容易であることが明らかとなった。

キーワード: 手書き, ストローク, 筆圧, Undo

1. はじめに

コンピュータの普及にともない、紙製ノートと鉛筆を用いた手書きに加え、キーボード入力やタブレット端末を用いた手書き入力を行う機会が増加している[1]。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[2]によると、学校におけるタブレット端末の整備台数は 2014 年から 2017 年の 3 年間で約 5 倍増加している。2020 年に日本能率協会マネジメントセンターによって行われた COVID-19 流行下における手書き量および機会の変化に関する調査[3]では、COVID-19 流行前から手書きを行う習慣があった人のうち、68.6% の人が「今年も手書き量は変わらない」と回答し、21.9% の人が「今年は手書き量が増えた」と回答した。これらのことから、手書きを行う機会は無くならないと考えられる。

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、中でも直前に行った操作を元の状態に戻す Undo[4]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とても便利なものである。しかし、これまでの Undo モデルでは、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。我々はこの問題を解決できるような新たな Undo 手法を提案し、それを用いた手書き支援システムの実現を目指している。

我々はこれまでの研究において、筆圧の強弱を Undo の軸として導入した手法 PP-Undo (図 1) を提案してきた[5]。この PP-Undo は、手書き入力において、重要でない箇所や後に消すような下書き、自信のない箇所のストロークに対する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 (Undo) を可能とするものである。この PP-Undo を用いて実験を行った結果、ユーザは筆圧の

制御が可能であること、最終的にノートに残るストローク数が減少することが示唆された。一方、筆圧をコントロールすることに不快感を抱くユーザが一定数いることが明らかになった。また、図 2 のように予期せずに筆記中の筆圧が弱くなってしまったストロークが消えてしまったり、筆圧が強くなってしまったストロークが残ってしまったりするなど、ユーザが想定していなかったストロークが削除されてしまう問題が生じていた。

そこで本研究では、筆圧の強弱による Undo をより良いものにするため、まずは、PP-Undo システムの長期的な利用により、問題点を洗い出す。次に、ユーザに負荷をかけずユーザの想定した筆圧で書けるようにするため、グループの最初のストロークでグループの筆圧を設定する手法および、筆圧設定に失敗した場合に筆圧を再設定する手法を提案し、その精度の検証を行う。

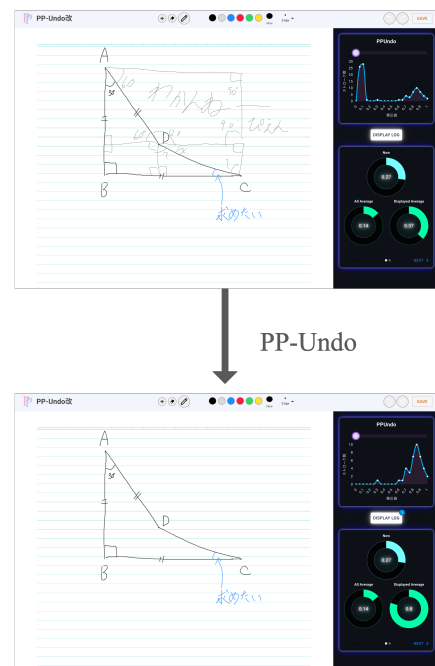


図 1 PP-Undo の実際の画面

¹ 明治大学
Meiji University

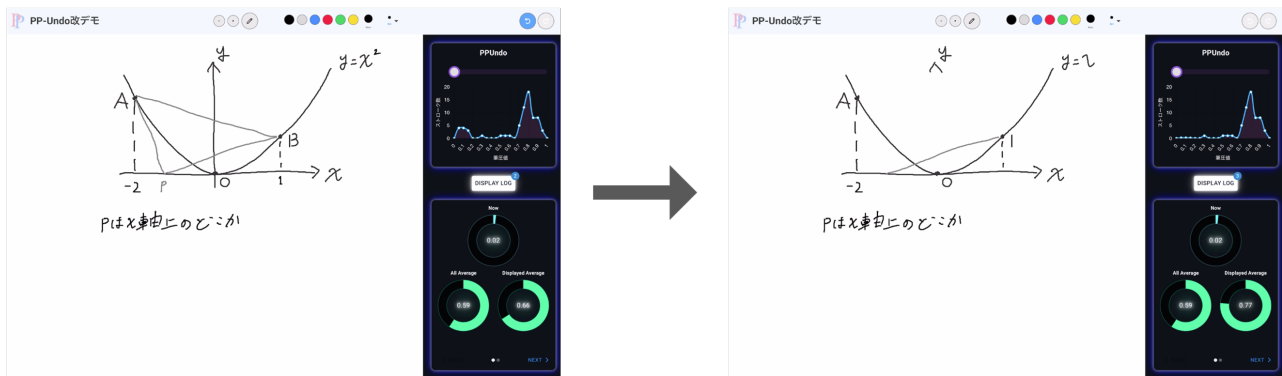


図2 予期せぬストロークが消えてしまう例

2. 関連研究

2.1 Undoに関する研究

Undo モデルは Yang[4]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[6]や Myers ら[7]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ている. Knister ら[8]は, 特定の操作範囲をUndo 可能とする Regional Undo モデル[9]を参考に, Undo 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 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.

田野ら[10]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, 「ボタンによる 1 ストローク単位の Undo」, 「スライダによる 1 ストローク単位より細かい Undo」, 「Undo の対象をある選択領域内の描画のみとした空間的选择による Undo」, 「Undo の対象をある選択時間内の描画のみとした時間的选择 Undo」の 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が明らかにしている. これらの Undo 機能は手書き入力において効果的であると考えられるが, 空間的选择や時間的选择のそれぞれの選択範囲内では 1 つ 1 つもに戻るといった逐次的な Undo となってしまっており, 書いた時系列に影響を受けてしまう.

しかし, これらの研究は時系列に沿ってジャンプしつつ Undo するものであり, 書いた文字の時系列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. これは PP-Undo とは大きく異なる点である.

2.2 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[11]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[12]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[13]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ている. 高橋ら[14]は, 筆圧や筆記速度, 加速度, ストロークの時間間隔や距離から筆記時の行為が作文などの創作的行為であるか書き写し行為であるかを推定する手法を提案した. その結果, オンライン筆記データから筆記者の書き写し行為を推定する可能性を示した. これらのことから, 筆圧情報は様々な特性を持っており, 筆記情報の中でも幅広い場面に応用できるデータの 1 つであると考えられる.

3. PP-Undo の長期利用とその分析

我々はこれまでの研究で, 手書き入力における筆圧に着目し, 重要度や確信度に応じて各ストロークの筆圧の強弱をコントロールすることで, 筆圧を軸とした Undo 手法を提案してきた. しかし, 筆圧をコントロールすることに不快感を抱くユーザが一定数いることが明らかになった[5].

そこで本研究では, まず筆圧の強弱による Undo 手法の問題点を明らかにするため, 提案手法をサービスとして実装^aし, 講義のノートや研究メモなど長期的に利用を行うことでその検証を行った. 利用期間は 2023 年 4 月 8 日から 2023 年 7 月 1 日であり, その間に作成されたノート数は 42, ストローク数は 36,465 本であった.

次に, 長期的な利用により書かれたストロークに対して意味的なまとまりごとにグルーピングを行った. 各グループの平均筆圧の強弱からグループを弱・中・強の 3 段階に

*a <https://ppundo.nkmr.io>

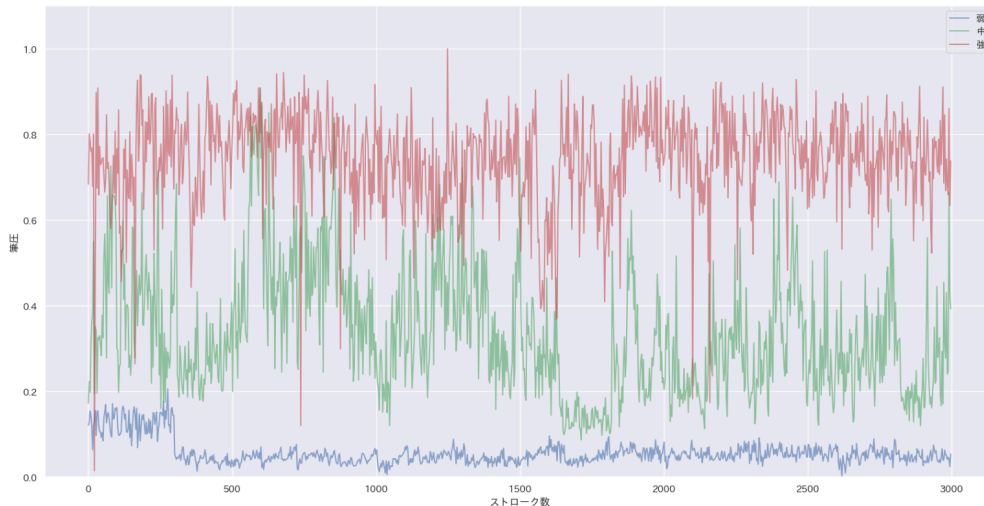


図3 各ストロークグループ内のストロークの筆圧値

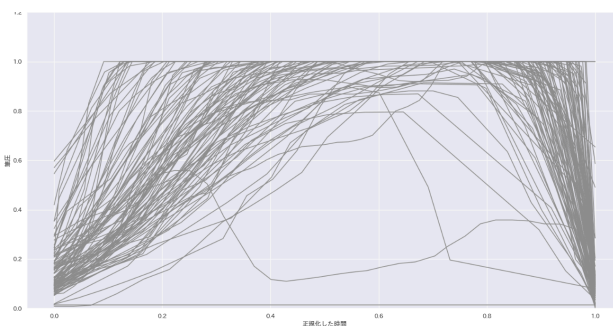


図4 各ストローク内の筆圧推移

分けた際のストロークごとの筆圧値分布を図3に示す。この図では、長期的な利用における弱・中・強のストロークを時系列順に、3,000本ずつピックアップし、その順を横軸に、その時の筆圧の値を縦軸として折れ線グラフで提示したものである。また、それぞれの色は赤が筆圧の強いグループ、緑が中くらいの筆圧のグループ、青が筆圧の弱いグループを意味している。

この図より、平均筆圧値が弱いグループのストロークは、ある程度筆圧値がブレずに描画できていることがわかる。しかし、筆圧値が中くらいや強いグループは筆圧値のブレが大きくなってしまっていることがわかる。あるノートにおける強い筆圧値グループのストローク内の筆圧分布を図4に示す。図4から、ストロークを強く書こうとしても、ストローク内の最初と最後の筆圧が弱くなってしまいうことがわかる。このことから、今までのPP-Undoでは、ユーザの意図した筆圧値で記述するのが難しい可能性があることや筆圧をコントロールすることに不快感を抱くことに繋がっている可能性が考えられる。また、筆圧のブレが大きい状態ではグルーピング判定を行うことも容易ではない。

4. 提案手法

4.1 ストローク群に対する一括筆圧情報付与

これまで実現していたPP-Undoは各ストロークに対して筆圧の平均値を筆圧値としていたため、意味的なまとまりのあるストローク群に対してブレのない筆圧値を付与することができていなかった。そこで、ユーザが負荷なく常に筆圧の強弱を意識せず、値にブレの生じない自信度や確信度を付与することができるようにするため、時間的・空間的な近さをもとにグルーピングされるストローク群の最初のストロークのみに着目し、最初のストロークの筆圧値をそのストローク群全体に付与できる手法を提案する。これにより、同じ意味をもつグループ内での筆圧のブレがなくなり、また筆圧のコントロールに対する負荷が大幅に軽減することなどが期待される。

一方、あるストローク群の最初のストロークの筆圧値を全体に付与する手法では、最初に筆圧値を付与し忘れることや、ユーザの想定と異なった筆圧値を設定してしまう問題が生じる。そこで我々は、あるストローク群に対して付与した筆圧値を、あるストロークを書いている最中にスタイルスペンの動きを止め、その間の筆圧を制御することで、そのストローク群に筆圧を再設定するようなジェスチャ手法も実現する。

なお、本研究ではストローク内のポイントごとに筆圧がわかるようにストロークの書き初め位置の左上に毎ポイントごとの筆圧値に関するゲージをリアルタイム表示し、現在の筆圧がわかるようにした(図5)。

4.2 特定のストロークにおける筆圧の設定

我々はこれまで、ストロークに対する筆圧の付与について、ストローク内の筆圧の平均値をそのストロークの筆圧値として利用してきた。しかし、図4のようにストローク内の筆圧の最初の値と最後の値が小さくなったり、ブレが

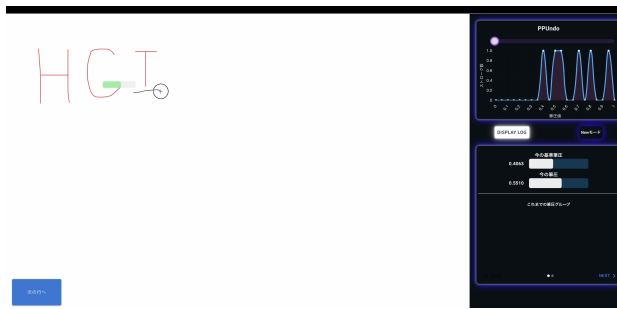


図5 システムイメージ図

大きくなったりしているため、平均値をストロークの筆圧値として扱うことが適切であるのかどうかについても本研究では調査する。

ここでは具体的に、下記のような方法をそれぞれの考えのもと提案し、どの手法が妥当かについて検討する。

- **筆圧の平均値:** これまでの研究で提案していた筆圧の平均による手法
- **筆圧の最大値:** 筆圧を平均的に付与することは難しいと考え、最も強い筆圧を利用する手法
- **筆圧の強さが上位 25%のポイントの平均値:** 筆圧をすべてのストロークに対して付与することは難しいと考え、そのストローク区間の筆圧上位 25%部分のみの平均を使う手法
- **中間の 50%部分の平均値:** 図 4 から最初と最後には筆圧を強く付与することが難しいという問題意識から、中盤の 50%部分を使用する手法

この筆圧付与手法を、実験によりユーザの手書きを収集し、他と比較することにより精度の検証を行う。

5. 実験

本実験では、本提案手法であるグループ内の最初のストロークの筆圧値をグループ全体の筆圧値とする手法における使用感と筆圧値の取り方による精度の違いについて調査する。また、ジェスチャによる筆圧値の再設定手法などの精度についても調査する。

5.1 実験デザイン

実験では、実際の文字列などの手書きを行うときにおける筆圧アノテーションの付与、また筆圧アノテーションの修正と、単独のストロークにおける筆圧付与それぞれについて実験を行い検証する。

ここでは、連続的な手書きを行うシチュエーションとして、筆圧登録タスク（与えられた文章や文字を改行ごとにグループとし、それぞれ 1 番最初のストロークの筆圧を指示された筆圧の強さで記述するタスク）と、筆圧再設定タスク（登録タスクと同様の事をした後にグループの途中で長押しジェスチャを行い、筆圧値を再設定するタスク）

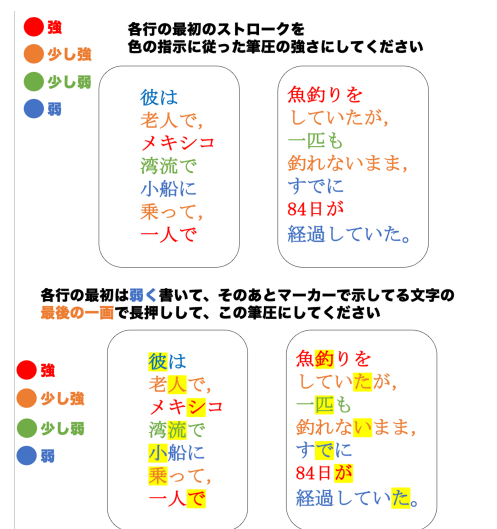


図6 実験で行ったタスクの例

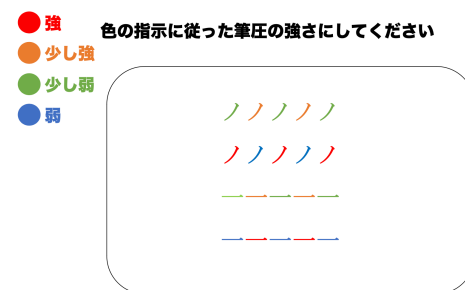


図7 文字ごとに筆圧を調整する登録タスクの例

を実験協力者に依頼した。実験で使用したタスクの例を図 6 に示す。

また、単独のストロークに対する筆圧付与のため、図 7 に示すような短いストロークに対する筆圧付与タスクを用意し、実験協力者に依頼するものとした。

一方、手書きにおける筆圧ベースのジェスチャの可能性について検討を行うため、筆圧の強弱を 1 ストローク内で波打つように繰り返す手法も追加で実装し、文章のみを提示したうえで、筆圧の強弱を変化させながら書く筆圧波打ちタスクも行った。

5.2 実験手順

実験では、まずシステムの操作方法や仕様に関して実際にシステムを用いながら実験協力者に説明した。その後、筆圧登録タスク 11 試行、筆圧再設定タスク 11 試行、波打ち筆圧タスク 2 試行を行った。全タスク終了後、アンケートに回答してもらい、実験は終了とした。実験にかかった時間は 1 時間～1 時間半程度であった。

なお、実験に使用したデバイスとしては、株式会社ワコム[15]の Wacom MobileStudio Pro 13 と Wacom Pro Pen slim を利用した。

表1 ストロークの分類精度

	平均値	最大値	上位 25%平均	中盤 50%平均
User1	0.930	0.831	0.803	0.845
User2	0.662	0.761	0.789	0.718
User3	0.887	0.873	0.887	0.859
User4	0.733	0.944	0.972	0.930
User5	0.845	0.746	0.789	0.803
User6	0.901	0.944	0.944	0.915
User7	0.901	0.944	0.944	0.915
User8	0.704	0.563	0.606	0.592
User9	0.887	0.944	0.944	0.901
User10	0.831	0.662	0.662	0.803
User11	0.873	0.873	0.859	0.887
User12	0.930	0.901	0.944	0.901
User13	0.803	0.761	0.761	0.718
User14	0.761	0.676	0.775	0.775
平均	0.832	0.816	0.834	0.826

6. 実験結果

実験協力者は情報系の大学生・大学院生の男性9名，女性5名の計14名であった。以下では，実験の結果について述べる。

6.1 登録タスクに関する結果

今回の提案手法を用いることで，筆圧のブレは軽減できることが期待される。一方で，どの程度の精度でユーザは想定している筆圧で書くことができるのか，また，1ストロークの筆圧値はどのように設定すべきであるのかを調査する必要があるため，それらに関する分析を行った。

今回の分析では，4.2節の4つの取得方法で設定した。また，ユーザ内のストロークの強さに対してk-means法を用いて筆圧の強弱に関するクラスタリングを行った。その後，各クラスタの中心点から，クラスタの筆圧の強弱を判定し，推定したクラスタ内のデータと実際に実験協力者に指示した筆圧の強弱が一致するかどうかを分類し，その精度を求めた。その結果を表1に示す。

この表から，どの筆圧設定手法においても精度の平均は80%を超えており，筆圧に応じた分類がある程度できていることがわかった。精度が最も高い手法は，ストロークの平均値と，ストローク内のポイントのうち，筆圧の強さが上位25%のポイントの平均値から筆圧値を算出する手法の2つであった。個人に注目したとき，最も高い精度は97.2%であり，最も低い精度は56.3%であった。

6.2 再設定タスクに関する結果

スタイラスペンを長押ししながら筆圧を調整することで，最初に設定した筆圧値を取り消し・再設定を行う再設定タスクでは，どの程度長押しというジェスチャを行うこ

とが可能であるのかを調査するため分析を行った。

実験の結果を図8に示す。図8の棒グラフでは，再設定後の筆圧値が実験協力者に指示した筆圧の強弱と一致しているかどうかをk-means法を用いて推定した結果の精度を表している。一方，折れ線グラフは再設定するための長押しを行うことができなかった回数を示している。この図から，精度が実験協力者によってばらつきがあることや長押しを失敗した回数が極端に多い実験協力者などがあることが明らかになった。精度が最も高い実験協力者は97.2%である一方で，最も低い実験協力者は60.6%であった。

6.3 筆圧波打ちタスクに関する結果

筆圧の強弱を1ストローク内で波打つように変化させることも1つのジェスチャとして扱える可能性が期待される。一方で，1ストローク内で筆圧の強弱を複数回変化させることはユーザにとって可能な行為であるのかを調査する必要があるため，分析を行った。

実験の結果を図9に示す。図9は実験協力者ごとに左側が1つ目の筆圧波打ちタスク，右側が2つ目の筆圧波打ちタスクとなっており，正規化した時間を横軸とした筆圧値

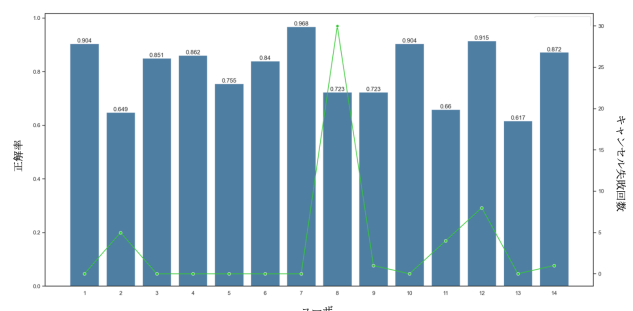


図8 実験協力者ごとの再設定の精度と失敗回数

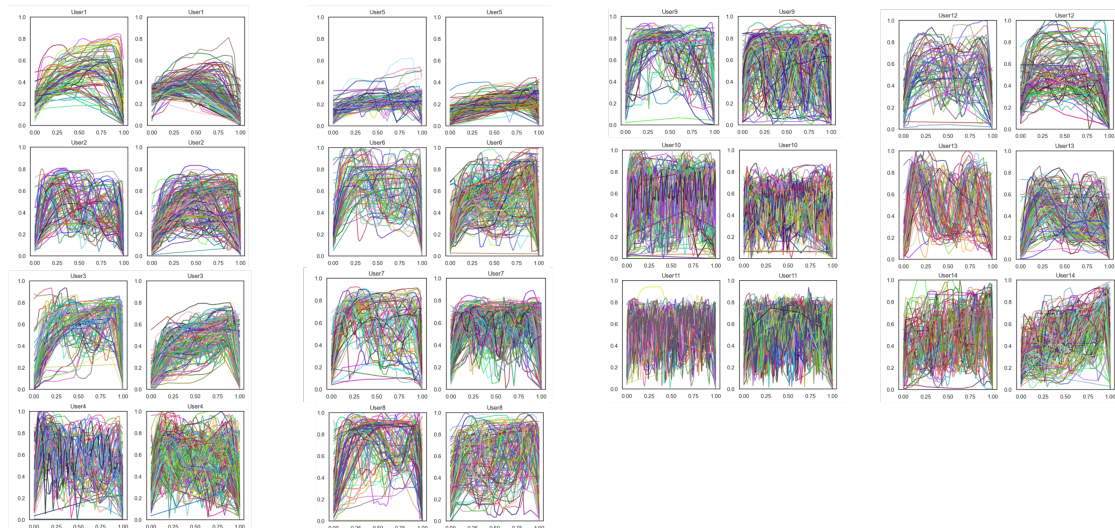


図9 1ストロークごとの波打ちタスクの筆圧分布（縦軸：筆圧値，横軸：正規化した時間）

の変化推移を表している。この図の筆圧値の推移を見ると、多くの実験協力者が筆圧を1ストローク内で変化させながら書くことは可能であるということがわかった。

6.4 アンケートに関する結果

ユーザがどのような使用感で提案手法を使用していたのかを調査するため、実験後アンケートを行った。アンケートでは、それぞれのタスクで行った操作に対する容易性に関して-2 から+2 までの5段階のリッカート尺度で調査を行った。

アンケート結果を表2に示す。この表から、登録タスクのように、最初にストロークを調整するのは容易であったが、長押しを行うことは多少難しかったことがわかった。また、筆圧の強弱を波打つように調整することは多くの実験協力者が容易と感じていないということがわかった。さらに、筆圧の強弱を最初だけ調整することに関して不快感を覚えるかどうかという設問に対して、75%以上の実験協力者が不快感を覚えていないということがわかった。

7. 考察

7.1 登録タスクの結果に関する考察

登録タスクに関する結果から、どの筆圧設定手法においても正解率の平均は80%を超えており、筆圧に応じた分類がある程度できていることがわかった。また、正解率の平均値が最も高い手法は、ストローク内のポイントのうち、筆圧の強さが上位25%のポイントの平均値から筆圧値を算出する手法であった。最も高い精度は97.2%であり、最も低い精度は56.3%であった。しかし、平均筆圧が大きくストロークの点の数が少ないストロークを有するようなUser8やUser10のような特徴を持つユーザに対しては上位25%の筆圧の平均値を取るのではなく純粋な平均値を採用した方が精度が高くなると考えられる。

表2 アンケート結果

	筆圧登録 タスク	筆圧再設定 タスク	波打ち タスク
評価	0.871	-0.36	-1.00

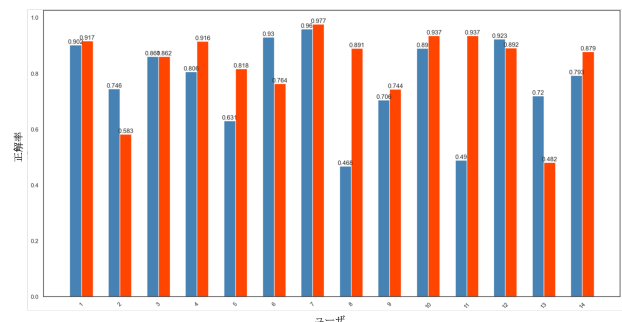


図10 再設定タスクにおける前半と後半の精度

7.2 再設定タスクの結果に関する考察

再設定タスクに関する結果から、実験協力者によって精度にばらつきがあることや、長押しを失敗した回数が極端に多い実験協力者などがいることが明らかになった。これは、実験協力者が長押しのジェスチャの機能に慣れるまでに時間がかかる可能性があることが考えられる。

各実験協力者の再設定タスク前半と再設定タスク後半の精度を図10に示す。この図は、横軸が実験協力者、縦軸がその実験協力者による精度を表しており、青い棒グラフがタスクの前半、赤い棒グラフがタスクの後半の精度を表している。この図から、多少例外はあるが、後半になるにつれ精度が増加している実験協力者が多いことがわかる。つまり、長押しの操作に慣れるには多少の時間がかかるが、慣れることができれば十分にユーザにとって利便性の高いものになると考えられる。

7.3 筆圧波打ちタスクの結果に関する考察

筆圧波打ちタスクに関する結果から、多くの実験協力者が筆圧を1ストローク内で変化させながら書くことは可能であることがわかった。しかし、実際に波打ちタスク終了時の実験協力者のノートから、ストロークが曲がってしまっており、普段書いている文字が書けなくなってしまうことがあることもわかった。また、アンケート結果からも好意的に見られていないことがわかった。このことから、筆圧の強弱を変動させながらストロークを書くことは可能であるが、実際の手書きの場面で筆圧を変動させながら記述することは、実現可能性が低いと考えられる。

7.4 アンケート結果に関する考察

アンケート結果から、最初のストロークのみ筆圧値を調整するのは多くのユーザにとって容易であると考えられる。一方で、長押しや筆圧の強弱を繰り返すような動作は容易ではないと考えられる。ここで、再設定タスクは取り消す位置を指定していたが、実際に今後 PP-Undo に導入する際は、最初のストロークの筆圧制御を失敗した場合にグループの筆圧値を再設定するために利用する。そのため、長押しの動作を繰り返し何度も行うことは多くないと考えられるため、長期利用していくことによって負荷は徐々に軽減されていくと考えられる。

8. まとめ

本研究では、これまで提案してきた筆圧の強弱に基づく Undo 手法について、その問題を改善し、筆圧の強弱の付与を容易にするため、長期的な利用により問題点を洗い出した。具体的には、長期的な講義などでの利用により書かれたストロークに対し、意味的なまとまりごとにグルーピングを行い、各グループの平均筆圧の強弱からグループを弱・中・強の3段階に分け分析を行った。その結果、今までの PP-Undo では、ユーザの意図した筆圧値で記述するのが難しい可能性があることや、筆圧をコントロールすることの手間と難しさが、不快感を抱くことに繋がっている可能性が示唆された。そこで、我々は、ストロークグループの最初のストロークのみに着目し、最初のストロークの筆圧値をそのストローク群全体に付与できる手法や、筆圧値を途中で再設定するための長押しジェスチャに関する手法を提案するとともに、ストロークの筆圧値の定め方や筆圧波打ちジェスチャなどを検討し、筆圧登録タスク 11 試行、筆圧再設定タスク 11 試行、筆圧波打ちタスク 2 試行する実験を行った。

実験の結果から、ユーザにとって最初のストロークのみを調整することは筆圧を制御する不快感を軽減することやストローク内のポイントの筆圧の平均をそのストロークの筆圧値とすることが高い精度で分類できることが明らかになった。1本のストロークの長さが短いユーザに対しては

平均値以外の値が利用できる可能性が示唆された。また、長押しジェスチャについては精度に大きなブレがあることが明らかになった。しかし、筆圧再設定タスクを前半と後半に分けて分析を行ったところ、前半に比べ後半の方が精度の高い実験協力者が多くいることがわかった。このことから、長押しジェスチャについては慣れるまで時間が必要であるが、慣れれば十分に活用できる可能性が示唆された。筆圧波打ちタスクに関しては、多くの実験協力者が筆圧を1ストローク内で変化させながら書くことは可能であるとわかった。しかし、実験協力者のアンケート結果や実験後のストロークの形状から、ユーザにとって容易に使用できるジェスチャとは言い難いと考えられる。

今回、本研究ではユーザに負荷をかけずユーザの想定した筆圧で書けるようにするため、グループの最初のストロークでグループの筆圧を設定する手法および、筆圧設定に失敗した場合に筆圧を再設定する手法を提案し、精度の検証を行ったが、実際にリアルタイムで書いたストロークに対してグルーピングを行う機能は実装していない。また、小林ら[16]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、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] 辛島光彦, 西口宏美. 大学講義における学生のノートテイキングに関する考察. 人間工学, 2016, vol. 52, no. Supplement, pp. S268-S269.
- [2] 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).
- [3] 手書きで手帳やノートに感情を吐き出すと、コロナストレスのケアに? コロナ禍で、女性はより強いストレス増の傾向. https://www.jmam.co.jp/topics/1261808_1893.html, (参照 2022-7-18).
- [4] Y. Yang. Undo support models. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1998, vol. 28, no. 5, pp. 457-481.
- [5] 関口祐豊, 植木里帆, 中村聡史. 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 手法の提案. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2023, vol. 2023-HCI-201, no. 15, pp. 1-8.
- [6] T. Berlage. A selective undo mechanism for graphical user interfaces based on command objects. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 1, no. 3, pp. 269-294.
- [7] 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, pp. 347-365.
- [8] M. Knister and A. Prakash. DistEdit: A Distributed Toolkit for Supporting Multiple Group Editors. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 1990, pp. 343-355.
- [9] Y. Kawasaki and T. Igarashi. Regional Undo for Spreadsheets. User

Interface Software and Technology (UIST), 2004.

- [10] 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するペン UI 開発事例と今後の課題. 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 2004, vol. 2004, no. 51, pp. 55-62.
- [11] K. Yu, J. Epps, and F. Chen. Cognitive load evaluation of handwriting using stroke-level features. IUI'11: Proceedings of the 16th international conference on Intelligent user interfaces, 2011, pp. 423-426.
- [12] 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, pp. 424-427.
- [13] 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, pp. 23-24.
- [14] 高橋梓帆美, 井本和範, 山口修. オンライン筆記データを用いた書き写し行為の推定. 研究報告コンピュータと教育 (CE), 2015, vol. 2015-CE-129, no. 17, pp. 1-8.
- [15] 株式会社ワコム. <https://www.wacom.com/ja-jp> (参照 2023-7-12) .
- [16] 小林沙利, 植木里帆, 関口祐豊, 中村聡史, 掛見幸, 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, 2022, no. C-5-5, pp. 1-8.