筆圧履歴を用いた書字作業の身体負担評価

倉元 昭季^{*1}, 平内 和樹^{*2}, 瀬尾 明彦^{*3}

Workload estimation of handwriting tasks using time series of pen pressure

Akisue KURAMOTO^{*1}, Kazuki HIRANAI^{*2} and Akihiko SEO^{*3}^{*1,*3} Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan^{*2} Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan

Received: 11 November 2019; Revised: 6 April 2020; Accepted: 7 June 2020

Abstract

Pen comfort is an important factor in selection of pen for handwriting. In handwriting, a pen receives an impact when it contacts to paper placed on a desk. To hold the pen, fingers have to resist the impact. The greater impact, the greater mechanical workload on fingers associated with the grip strength to hold. Therefore, time series data of pen pressure is supposed to indicate the physical workload in handwriting task. As a preliminary step for the pen comfort evaluation, this study aims to evaluate the physical workload in handwriting tasks using time series of pen pressure. To judge whether pen tip contacts with paper, a probabilistic analysis method of time-series pen pressure was built first. Next, several indices of impacts such as average pen pressure and duration per stroke, and number of touchdowns per second were calculated. Finally, the product of the indices was defined as the normalized physical workload. For multiple four-character idioms with different stroke counts, pen pressure was recorded and the indices and the evaluation value were calculated. The results indicate that the normalized physical workload was larger in writing idioms with longer duration per stroke. In holding and moving a pen against the paper, it is considered that keeping pen pressure requires larger workload than resisting fluctuation of the pen pressure.

Keywords : Physical workload, Handwriting, Pen pressure, Binary Bayes Filter, Impulse, Four character idiom, 6DoF force and torque sensor

1. 緒 言

近年、文房具の技術開発が盛んである。特に新たな機構や機能による筆記具の高付加価値化が著しい。一方で消費者は筆記具の選定にあたり、実物を手に取れる文具店等において、書き心地に重点を置いて商品選定をしている (Enomoto and Matsuzaki, 2012)。すなわち、店頭での試し書きにおける書き心地が商品選定に重要である。この書き心地に寄与する商品特性としてペン先での書字抵抗の少なさ (Wann and Nimmo-Smith, 1991) や把持部の太さ (Udo et al., 2000)、形状 (横山他, 2016) が挙げられている。これらの研究では筆記具の書き心地の議論にあたり、筆記具の握圧や筋電図などが評価指標として用いられていた。すなわち筆記具の書き心地は、書字中のペン先動作を実現するための手や指における生体力学的な身体負担と関係すると予想される。

この生体力学的な身体負担の評価にあたり、多指モデルを用いての逆動力学解析も考えられる (Ivaldi et al., 1989) が、その実施は容易ではない。指は多くの自由度を有するうえ、書字時のペン先の操作には、筆記具と指、手、腕の非常に複雑な協調動作による機械的インピーダンス制御が求められるからである (Schomaker and Plamondon, 1990)。そこで議論を簡単にするため、書字中のペン先動作を手や腕の動作によるものと、手に対する筆記具の動作によるものの2つに分解する考え方がある (Lacquaniti et al., 1987)(Dounskaia et al., 2000)。特に上肢の動作が小さい状態の書字動作の評価では、指先力や親指を駆動する拇指球筋の筋電図の変動が小さくなり、書字速度が向上すると報告されている (Naider-Steinhart and Katz-Leurer, 2007)。ただし、筆圧の強弱の変化が速いほど指先力による筆記具の握圧の変動も大きくなるという報告もある (Latash et al., 2003)。これは強い筆圧時に、手や指に対する筆記具のずれを防ぐため握圧が増加していることを示唆している。また、指先力を発揮するためには手首の屈筋と伸筋も共活性化させ手首を安定させる必要がある (Chang et al., 2015) が、これは書字時に疲れや痛みを感じやすくさせる (Werremeyer and Cole, 1997)。ところで店頭での試し書きは多くの場合、予め用意された小さい紙で行われる。ここでは手や腕の動作は比較的小さいため、相対的に筆圧の強さとその変化の頻度が、試し書き時の身体負担、ひいては筆記具の選定に影響すると考えられる。

書字作業では、ペンは机の上に置かれた紙に当たると撃力を受ける。その際に指は、ペンの位置を保持するためにその撃力に抵抗する力を生む必要がある。ペンを紙に押し当て、十分な筆圧を継続しながらペン先を移動する際は、指や手に力学的な作業負担が求められる。すなわち全体として筆圧が大きいほど、保持する握力に関連する指の力学的な作業負担が大きくなると予想される。さらに、拇指球筋の筋電図と筆圧を同時測定した研究からは、高い筆圧時に指先力も強まることが示されてもいる (Naider-Steinhart and Katz-Leurer, 2007)。そのため、筆圧の時系列データのみから、書字作業の身体負担を見積もることが可能と考えられる。特に試し書きを想定したシーンにおける書字動作に伴う身体負担を評価するためには、筆圧の変動の頻度や、書字時間を把握する必要がある。

書字作業中の筆圧や書字時間を測定した研究の多くは、それぞれペン型の測定装置を新たに製作して試験に用いている。例えば内蔵した MEMS センサによる筆記具の位置や方位の測定 (Zheng et al., 2005) や、光学センサを用いた筆記具の傾きの測定 (Shimizu et al., 2004) から書字動作や時間を評価したり、内蔵したひずみゲージを用いての筆圧の測定が行われている (Hook et al., 2003)。しかしいずれも市販の筆記具とは寸法や重量が大きく異なるため、通常の書字作業の動作や負担の評価には適さない (Hooke et al., 2008)。すなわち試し書きにおける身体負担を見積もるためには、可能な限り普通の筆記具を用いて試験を行い、動作や筆圧の変動を筆記具外部のセンサを用いて評価する必要がある。

本研究では、ペンの書き心地評価の予備段階として、筆圧の時系列データを使用して書字作業の身体負担のための新しい評価値を得ることを目的とする。紙の下部に設置した 6 軸力覚センサを用いて筆圧を測定し、書字作業の身体負担を見積もり比較する手法の初期的検討を行う。特に筆圧の時系列データから、ペン先の紙への接触判定を行い、書字動作全体のうちペン先が紙に接触している時間の把握可能にする。さらに書字中にペンを持つ指が受ける撃力と継続時間およびその頻度を用いて、人間が書字作業時に受ける負担の評価を試みる。

2. 書字時間の判定と負担評価値の定義

2.1 ペン先と紙の接触判定

時刻 t_i において 6 軸力覚センサで測定される筆圧 (以下、ペン先力) $f_{xyz}(t_i)$ は、その時刻におけるセンサ各軸方向の分力 $f_x(t_i)$, $f_y(t_i)$, $f_z(t_i)$ から以下のように求められる。

$$f_{xyz}(t_i) = \sqrt{f_x(t_i)^2 + f_y(t_i)^2 + f_z(t_i)^2} \quad (1)$$

ペン先の紙への接触 (タッチダウン) の有無を、 $f_{xyz}(t_i)$ がある閾値以上か否かで二値的に判別する手法も考えられる。ただし力覚センサのデータにはノイズが多く乗ることがあるため、閾値を一意に定めることは難しい。ローパスフィルタやハイパスフィルタ後の値には減衰が生じるため、やはり適切な閾値の設定が難しい。そこで、ある対象の 0 または 1 の状態をベイズフィルタを使って認識するアルゴリズムである Binary Bayes Filter (Thrun et al., 2005) を用い、各時刻におけるタッチダウンの有無を確率的に推定する。まず、ある時刻 t_i におけるペン先接触状

態の事前確率 $q(t_i)$ を以下の式で定義する.

$$q(t_i) = \frac{1}{1 + \exp(-a(f_{xyz}(t_i) - f_{th}))} \quad (2)$$

$q(t_i) = 0$ のとき非接触, $q(t_i) = 1$ で接触しているとする. a は確率の立ち上がり方を決めるゲイン, f_{th} は $q(t_i) = 0.5$ の時のペン先力を表す定数とする.

次に, $q(t_i)$ に対応する対数オッズ $l(t_i)$ を以下の式で求める.

$$l(t_i) = \sum_{j=i}^{i+N} \left(\ln \frac{q(t_j)}{1 - q(t_j)} \right) - \ln \frac{q_0}{1 - q_0} \quad (3)$$

上式右辺の第一項は, i フレーム目以降の N フレーム文を考慮した確率の対数和である. これはペン先が紙から離れたタイミングを事後的に考慮する目的で設定した. また, 上式の最後の項は事前確率 q_0 に対応した対数オッズであり, 推定対象の状態が観測状態に関係なく既知の一定値をとる場合に用いられる. ただし今回は, 観測無しの場合にはペン先の接触状態が不明であり確率を $q_0 = 0.5$ としかみなせない. したがってこの最後の項は 0 となり無視される. 得られた $l(t_i)$ から, 時刻 t におけるペン先接触状態の事後確率 $p(t_i)$ を以下の式で求める.

$$p(t_i) = \frac{\exp(l(t_i))}{1 + \exp(l(t_i))} \quad (4)$$

この $p(t_i)$ を用いて, ペン先への接触状態 $s(t_i)$ を以下のように判定する.

$$s(t_i) = \begin{cases} 1 & (p(t_i) > p_{th}) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

すなわち $p(t)$ が閾値 p_{th} 以上のとき, 書字作業に伴いペン先が紙に接触した状態でデータが測定されたものとみなした. 本報告では経験的に, $a = 100$, $f_{th} = 0.35[\text{N}]$, $p_{th} = 0.55$ と設定した. また, 式(3)の N は, 連続した 0.05 秒間が計算対象になるよう定めた.

2.2 各種評価値の定義

2.2.1 ペン先の接触時間

サンプリングのフレーム間隔を Δt , 試験時間全体でのフレーム数を M としたとき, 試験全体の時間 T_{all} , 試験中にペン先が接触した時間 T_c , 試験時間全体のうちペン先が紙に接触していた時間の割合である書字時間率 $\overline{T_c}$ はそれぞれ以下の式で求められる.

$$T_{all} = M\Delta t \quad (6)$$

$$T_c = \sum_{i=0}^{M-1} s(t_i)\Delta t \quad (7)$$

$$\overline{T_c} = \frac{T_c}{T_{all}} \quad (8)$$

2.2.2 ペン先で受けた力積

試験時間全体での力積の総和 I_c が, その試験条件でのペン先の運動量の総変化量を指す. I_c は以下の式で求められる.

$$I_c = \sum_{i=0}^{M-1} f_{xyz}(t_i) s(t_i) \Delta t \quad (9)$$

2.2.3 ペン先接触中の平均ペン先力

力積が同じ場合, ペン先と紙 (下の板) の衝突時間が短いほど, ペン先力が多い. 試験時間全体でのペン先接触中の平均ペン先力 $\overline{f_{xyz}}$ を以下の式で求める.

$$\overline{f_{xyz}} = \frac{I_c}{\sum_{i=0}^{M-1} s(t_i) \Delta t} \quad (10)$$

2.2.4 単位時間あたりのタッチダウン回数

試験時間全体でのペン先のタッチダウンの回数を n_d とすると, 単位時間あたりのペン先の接触回数 $\overline{n_d}$ は次式で求められる.

$$\overline{n_d} = \frac{n_d}{T_{all}} \quad (11)$$

2.2.5 タッチダウンごとの評価

連続して $s(t_i) = 1$ となる一連のフレームが, 一回のタッチダウンを表す. j 回目に連続して $s(t_i) = 1$ となるフレーム数を m_j とするとき, j 回目のタッチダウンにおけるペン先の接触時間 T_j と力積 I_j は以下のように求められる.

$$T_j = m_j \Delta t \quad (12)$$

$$I_j = \sum_{i=j_0}^{j_0+m_j-1} f_{xyz}(t_i) \Delta t \quad (13)$$

なお $j_0, j_0 + m_j - 1$ はそれぞれ j 回目のタッチダウンの開始時刻と終了時刻のフレーム番号を表す. T_j と I_j から, j 回目のタッチダウンにおける平均のペン先力 $\overline{f_j}$ は以下のように求められる.

$$\overline{f_j} = \frac{I_j}{T_j} \quad (14)$$

ある文字条件について, 試験全体で n_d 回タッチダウンがあった場合, タッチダウン毎のペン先力の平均 $\overline{f}$ と平均接触時間 $\overline{T}$ は以下になる.

$$\bar{f} = \sum_{k=0}^{n_d-1} \frac{\bar{f}_j}{n_d} \quad (15)$$

$$\bar{T} = \sum_{k=0}^{n_d-1} \frac{T_j}{n_d} \quad (16)$$

2.2.6 身体負担の評価値

ペン先力や握圧の強さやその変化の頻度が試し書き時の身体負担に影響する可能性を評価するために、 $\bar{T}$, $\bar{f}$, $\bar{n}_d$ を用いて以下のように身体負担の評価値 E を設定する.

$$E = \bar{T} \bar{f} \bar{n}_d \quad (17)$$

$\bar{T}$ と $\bar{f}$ の積は、一回のタッチダウンによって手が受ける平均の力積である. ここに、1 s あたりにペン先が紙と衝突する回数 $\bar{n}_d$ をかけることで、単位時間あたりに手が受ける力積が模される.

3. 書 字 試 験

大学生および大学院生 17 名を被験者として、四字熟語の書き取り試験を実施した. 被験者の性別の内訳は女性 4 名、男性 13 名であった. うち左利きの被験者は 1 名であった.

3.1 文字条件

実験条件として 4 種類の四字熟語(「自由自在」, 「相関関係」, 「一生懸命」, 「旧態依然」)を設定した. 選定手順を以下に示す. まず「NOVITA 頻出四字熟語学習プリント (2019)」に掲載されている四字熟語からいくつかを無作為に抽出した. その後、縦画や横画に対する斜画の比率や総画数から、選定した四字熟語の分布表を図 1 に示すように作成した. このうち、分布の中心にある「一生懸命」と、縦画や横画の比率が高く画数が少ない「自由自在」の 2 つを文字条件としてまず選定した. また一画あたりが短い文字条件として、「れんが」や「したところ」が含まれる「旧態依然」, 「もんがまえ」の内側に着目して「相関関係」の 2 つを文字条件に追加し、全 4 条件とした.

3.2 試験装置と測定環境

図 2(a) に示すように試験装置を製作した. 中央部には静電容量型 6 軸力覚センサ (PFS080YA501U6S, Leptorino 社) を埋め込んである. サンプリングレートは 1200 Hz とした. 用いた 6 軸力覚センサのレンジと分解能をに表 1 に示す. 筆記作業中に筆記エリア内にペン先だけでなく手が乗ってしまった場合、全体の接触力が 100 N 程に達する場合がある. センサ中心から筆記エリア端の最大距離が $53(= \frac{7.5}{2} \sqrt{2})$ mm であるため、最大モーメントは 5.3 N・m に達する. これに対応できる余裕をもち (安全率 3), かつコスト面を含め総合的に考慮した結果、本センサを選定した. また、実験中にペン先力測定部に手が触れることを避け、正しいペン先力が測定できるよう、アクリル製の天板と 6 軸力覚センサの間には 0.5 mm の間隙を設けた (図 2(b)). 試験装置の天板は机の上面と異なる高さとなるため、試験時に被験者の普段の書字姿勢に近くなるように椅子の高さを調整した. 具体的にはまず、上肢を下垂した状態で肘高が試験装置の天板高さとも一致するよう被験者ごとに調整を実施し、そのうえで書字姿勢をとってもらい微調整を加えた.

Fig. 1 Distribution of the selected four-character idioms. First, the central one and the one with less slash-like components were selected. In addition, two with characteristic radicals were also selected.

(a) overview

(b) cross section of pen pressure measuring device

Fig. 2 Test environment and pen force measurement device. The writing area is a flat square with 7.5 cm side length.

Table 1 Specifications of the 6DoF force and moment measurement sensor. The selected sensor can withstand the moment of hand collision during writing.

	f_x, f_y (in-plane direction of the writing plane)	f_z (normal direction of the writing plane)
Load rating [N]	250	500
Allowable moment [N · m]	20	20
Resolution	1/4000	

3.3 書字試験

書字用の筆記具として使用したシャープペンシルのスペックを表2に示す。書字対象は、75 mm 四方のラベルシールに選定した四字熟語を薄く印刷したものである（図2(a)左下部参照）。このシールを6軸力覚センサ上面に取り付けられたアクリル板上に貼付し、被験者に書字してもらった。なおシールは文字条件毎に交換している。被験者には、シールに薄く印刷された文字よりも筆跡が濃く残るようなペン先力で書くよう教示した。一条件につき四字熟語は7回書いてもらった。書字速度は被験者の任意とした。各被験者には、全ての条件の書字作業をランダムな順に提示した。なお本実験は、首都大学東京日野キャンパス研究安全倫理委員会の承認を得て実施した（受理番号 No.277）。

なお書字速度、すなわちペン先の移動速度の評価には、ペン先の移動距離が必要である。しかし今回の試験ではペン先の位置測定は行っておらず、直接的にはペン先の移動距離の評価が行えない。ただし、今回の実験では書字対象としたラベルシールに印刷した文字をトレースしてもらっているため、この文字の画素数が移動距離の目

Table 2 Specifications of the mechanical pen used in the test. The pen is commercially available.

Total length	146 mm
Diameter of the grip area	10.1 mm
Lead diameter	0.5 mm
Weight	14.8 g

Fig. 3 Examples of pen tip contact state judgment result. The proposed method appropriately judges touchdown even when there is large noise.

標値に応じた値として代用できると考えられる。そこで、書字試験に用いた4種類の文字条件の文字領域の面積（実験で使ったMS明朝・18ptでの文字領域の画素数） S を計算した。各文字条件の S と、「自由自在」の時に對する各文字条件での S の比を表3に示す。文字条件の画数が多いほど、 S の比が大きくなっていた。そこで本稿では以降、この文字条件間での S の比は、文字条件を一回書字する際の「ペン先の移動距離」の比に近いとみなす。

Table 3 The S under each character condition and its ratio to the S of 「自由自在」. The larger number of strokes in the character condition, the larger the ratio was.

文字条件	S [px]	Ratio
自由自在	1187	1.0
一生懸命	1254	1.1
旧態依然	1669	1.4
相関関係	1867	1.6

4. 結 果

4.1 ペン先の接触判定

ペン先接触判定の妥当性検証のため、予備試験における各時刻のペン先力とペン先の接触判定を試した。結果の一例を図3に示す。 f_{xyz} の測定データについて、ノイズの少ない場合だけでなく、ノイズの多い場合でも f_{xyz} が立ち上がるタイミングでペン先が接触したと判定されている。また、 f_{xyz} が立ち下がるタイミングでもペン先が離れたと判定されている。これらのことから、提案したペン先接触判定手法はおおむね妥当に機能していると考えられる。なお本実験では、実験中のペン先力のデータ記録時に、図3(b)のような非常に大きなノイズが含まれていないことを確認済みである。

4.2 ペン先の接触時間

試験中にペン先が接触した時間 T_c と、書字時間率 $\bar{T}_c$ の箱ひげ図をそれぞれ図4(a), (b)に示す。なおこれ以降に図示する箱ひげ図はすべて、被験者の全数に対するものである。被験者1名につき各文字条件を7回ずつ書いて頂いたが、この7回をまとめて1試行として扱ってデータを処理した。すなわち箱ひげ図の範囲は、各文字条件

Fig. 4 Pen contact time in handwriting test. The larger the number of strokes, the longer the total touchdown time. However, the ratio of the total touchdown time to the total test time was almost the same between the idiom conditions.

について 17 試行 (17 名) のデータにおける 25 および 75 パーセンタイルを表し、外れ値を除いた最大値と最小値がバーの上下になっている。画数の多い文字条件ほど T_c は増加する傾向にあったものの、 $\overline{T_c}$ は文字条件間で大きな差異はみられなかった。

各文字条件の T_c の平均値と、「自由自在」の時にに対する各文字条件での T_c の平均値を表 4 に示す。文字条件ごとの T_c の平均値の結果は、画素数 S の結果と類似している。つまり、画数が多い文字条件ほど書字時間とペン先移動距離が同様に長くなっている。以上のことから書字速度すなわちペン先の移動速度は文字条件の影響をあまり受けていないことが示唆される。すなわち、書字速度は文字条件間でほぼ同じであったと考えられる。

Table 4 The average of T_c under each character condition and its ratio to the average of T_c of 「自由自在」. The larger number of strokes in the character condition, the larger the ratio was.

文字条件	Average of T_c [s]	Ratio
自由自在	41.2	1.0
一生懸命	53.6	1.3
旧態依然	57.7	1.4
相関関係	67.9	1.7

4.3 ペン先で受けた力積

試験時間全体での力積の総和 I_c の箱ひげ図を図 5 に示す。 T_c と同様に、画数の多い文字条件ほど I_c は全体として増加する傾向がみられた。

4.4 ペン先接触中のペン先力の平均

試験全体でのペン先接触中の平均ペン先力 $\overline{f_{xyz}}$ の箱ひげ図を図 6 に示す。 $\overline{f_{xyz}}$ の平均値は文字条件「自由自在」では他よりも大きく、その他の文字条件間では顕著な差はみられなかった。ただし $\overline{f_{xyz}}$ の分布の中央値は、画数が多くなるほど小さくなる傾向もみられた。

4.5 単位時間あたりのペン先の接触回数

書字試験中のペン先力の履歴より、単位時間あたりにペン先が紙に接触したと判定された回数 $\overline{n_d}$ の箱ひげ図を図 7 に示す。画数の多い文字条件ほど、単位時間あたりに筆記具を紙に押し付ける頻度が高くなる傾向がみられた。

Fig. 5 Sum of impulses at the pen tip I_c . The I_c increases as the number of strokes increases, but there was no significant difference.

Fig. 6 Average pen force throughout the test $\overline{f_{xyz}}$. The $\overline{f_{xyz}}$ of the idiom condition 「自由自在」 was larger than of the other idiom conditions, but there was no significant difference.

Fig. 7 Number of touch downs of the pen tip per second $\overline{n_d}$. The $\overline{n_d}$ increases as the number of strokes increases, but there is no significant difference.

4.6 タッチダウンごとのペン先力と接触時間

図 8 に、各試験におけるタッチダウンごとのペン先力の平均 $\bar{f}$ と平均接触時間 $\bar{T}$ を示す。 $\bar{f}$ の平均値については、 $\overline{f_{xyz}}$ の平均値と同様に、文字条件「自由自在」では他よりやや大きく、その他の文字条件間では顕著な差はみられなかった。 また、 $\bar{T}$ についてはすべての文字条件間で顕著な差がみられなかった。

Fig. 8 Averages of pen force and contact time for each touchdown. The $\bar{f}$ of the idiom condition 「自由自在」 was larger than of the other idiom conditions, but there is no significant difference. On the other hand, the $\bar{T}$ was almost the same between the idiom conditions.

Fig. 9 Physical workload evaluation value E calculated from pen force history during handwriting. The E decreases as the number of strokes increases, but there is no significant difference.

4.7 身体負担の評価値

$\bar{T}$, $\bar{f}$, $\bar{n}_d$ の積を用いて設定した身体負担の評価値 E の箱ひげ図を図9に示す. 文字条件「自由自在」で, 他の文字条件よりも評価値 E の値が大きくなっていた. その他の文字条件でも, 総画数が多くなるほど評価値 E の値は小さくなる傾向がみられた.

5. 考 察

今回の試験で被験者として協力頂いた大学生および大学院生においては, 書字作業中のペン先の総接触時間 T_c と文字条件の印刷画素数 S の結果より, 画数が多いほど書字時間とペン先の移動距離が同じように大きくなっていることから, 書字速度すなわちペン先の移動速度はほぼ影響を受けていないことが示唆される. 多少のペン先移動速度の変更は筆圧とペン握力に影響しない, とする Gatouillat らの報告もある (Gatouillat et al., 2017). これらのことを総合すると, 今回の試験において, 画数に応じた書字速度のわずかな違いは筆圧の差異に影響していない, とみなすことができる. 加えて, 今回の書字試験では書字範囲が狭く, 数回の筆記具の持ち替えや手の位置の変更はみられたものの, 大きな上肢の動作はみられていない. また図10に示すように, タッチダウン一回あたりの平均ペン先力 $\bar{f}$ の標準偏差 $\sigma_{\bar{f}}$ も, 文字条件間で大きな差異がみられていない. したがって, 一連の試験で書字作業中の指先力の変動も, 文字条件間では同程度であったと考えられる (Katash et al., 2003).

ペン先で受けた力積の総和の結果からは, 画数が多く書字にかかる時間が長くなるほど, 書字作業全体での身体負担が多くなることが示唆されている. 一方, 画数が多いほどペン先が紙に接触している間の平均ペン先力の分

Fig. 10 Variance of average pen force for each touchdown. This indicates that the fingertip force during writing in a series of tests was similar between character conditions.

布は、小さい方へオフセットしていく傾向がみられる (図 8(a)). さらに、単位時間当たりのペン先の接触回数は、画数が多いほど多くなっていた。今回の試験では書字速度のわずかな違いが筆圧の差異には影響していないことを考慮すると、上記のこれらの傾向が示唆するのは、「画数が少ない文字では強いペン先力をキープして一画を書き、一方で画数が多い文字では相対的に弱いペン先力で一画を短時間に書いている」ということである。確かに、画数の少ない文字条件の漢字は、画数の多い文字条件の文字と比較して一画が長い傾向にある。また、画数の多い文字条件（「旧態依然」、「相関関係」）には一画が短い「れんが」や「したごころ」、「関」の「もんがまえ」の内側などの部分が含まれているが、ここでは全体的にペン先力が弱いため (図 8(a)), ペン先力自体の変動も大きくなっていない (図 10)。また、タッチダウン一回あたりの継続時間は画数の少ない文字条件の方が長い (図 8(b))。そのうえで、単位時間当たりの身体負担を評価する値である E は、画数の少ない文字条件で相対的に大きくなる傾向がみられた (図 9)。以上のことから、書字時間率が同程度の条件における書字時の手や指の負担は、一画あたりが長い文字を書字する際にペン先力の維持のために筆記具を紙に押し付け保持する負担の方が、一画あたりが短い文字を書字する際に生じるペン先力の小さな変動に抵抗するための負担よりも大きいことが示唆された。

本論文ではセンサの付いていない普通の筆記具を用いる実験でも、書字作業における身体負担の評価値を得ることを可能にした。今回は種類の筆記具のみで実験を行ったが、形状や重さの異なる複数の筆記具を比較することは今後の課題である。また、本論文では書字動作のうち筆記具のペン先を紙に押し付ける際の撃力に抵抗するための指や手の負担に着目し、ペン先力の測定を通して書字中の身体負担の議論を行った。しかし、書字時には紙と筆記具の摩擦に伴う仕事も生じていると予想される。筆跡を測定するための手法はいくつか提案されているが、専用のデジタルデバイスを前提とした手法 (Shimizu et al., 2004)(Wang et al., 2013)、事後に紙をスキャンする手法 (Saran et al., 2015) など、多くは筆跡そのものの評価にとどまっており、筆記具がペン先で受ける力と筆跡を紐づけた議論は少ないのが現状である。書字動作には他にも、ペン先を紙から離して移動させる動作も含まれる。この動作では、筆記具という軽量の作業ツール自体の重力やそれに起因するモーメントが身体負担に影響すると考えられる。そのため筆記具の動作そのものの測定は、過去の研究でも指摘された (Hook et al., 2003) ように書字動作の負担評価にあたり重要である。しかし、被験者に違和感を与えることなく書字時のペン先力や筆記具の動作を総合的に測定するためには、市販されている状態の筆記具に手を加えることなく、筆記具の動作を測定可能なシステムの整備が今後必要である。これらの点についての考慮は今後必要である。

さらに、本論文で提案した評価値を、他の身体負担の評価値の比較を行う必要があると考えられる。各種センサ付きの筆記具から得られる評価値との比較や、限られた条件のもとでの表面筋電図の利用も検討する余地がある。特に表面筋電図については、書字作業中の各筋の筋活動は最大筋活動量の 11% 以下と非常に小さいうえ、平均筋活動量はそれよりもさらに小さい。そのため測定ノイズとの切り分けが困難であり、単位時間あたりの負担を筋電図から定量的に評価するのは難しい (de Almeida et al., 2013)。ただし書字時の疲労が相対的に大きいケース、

すなわちペンを強く握る被験者や筆圧の高い被験者であれば、指先力の発揮に伴う等尺性筋収縮の評価が行える可能性もある。また、今回の実験は被験者の年齢層が限定的であった。全体としての傾向を確認するには対象の年齢層を広げた実験計画も必要である。この点についての考慮も今後の課題である。

6. 結 言

筆記具の選定に重要となる書き心地に関わる身体負担を、筆圧の測定から評価することを試みた。具体的には、筆記具を紙に押し付ける際に受ける撃力に着目し、指や手に対する筆記具の位置がずれないように筆記具を保持するための握力に伴う負担を筆圧の履歴から評価することを試みた。筆圧の評価にあたり、ペン先の紙との接触の有無を確率的に判定する手法を構築した。そのうえで、一画あたりの平均筆圧と継続時間、単位時間当たりのタッチダウン回数を算出し、それらの積を負担評価値として定義した。画数が異なる複数の文字条件で比較した結果、書字速度が同程度の条件では、一画あたりが長い文字を書字する際にペン先力の維持のために筆記具を紙に押し付け保持する負担の方が、一画あたりが短い文字を書字する際に生じるペン先力の小さな変動に抵抗するための負担よりも大きいことが示唆された。

文 献

- Chang, S. H., Chen, C. L. and Yu, N. Y., Biomechanical analyses of prolonged handwriting in subjects with and without perceived discomfort, *Human movement science*, Vol.43 (2015), pp. 1–8.
- de Almeida, P. H. T. Q., da Cruz, D. M. C., Magna, L. A. and Ferrigno, I. S. V., An electromyographic analysis of two handwriting grasp patterns. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol.23, No.4 (2013), pp. 838–843.
- Dounskaia, N., Van Gemmert, A. W. A. and Stelmach, G. E., Interjoint coordination during handwriting-like movements, *Experimental Brain Research*, Vol.135, No.1 (2000), pp. 127–140.
- Enomoto, S. and Matsuzaki, G., A Study on the characteristics of stationery products, *BULLETIN OF JSSD*, Vol.59 (2012), pp. 276–277.
- Gatouillat, A., Dumortier, A., Perera, S., Badr, Y., Gehin, C. and Sejdic, E., Analysis of the pen pressure and grip force signal during basic drawing tasks: The timing and speed changes impact drawing characteristics, *Computers in Biology and Medicine*, Vol.87 (2017), pp. 124–131.
- Hook, C., Kempf, J. and Scharfenberg, G., New pen device for biometrical 3D pressure analysis of handwritten characters, words and signatures, *Proceedings of the 2003 ACM SIGMM workshop on Biometrics methods and applications* (2003), pp. 38–44.
- Hooke, A. W., Park, J. and Shim, J. K., The forces behind the words: development of the kinetic pen, *Journal of biomechanics*, Vol.41, No.9 (2008), pp. 2060–2064.
- Lacquaniti, F., Ferrigno, G., Pedotti, A., Soechting, J. F. and Terzuolo, C., Changes in spatial scale in drawing and handwriting: kinematic contributions by proximal and distal joints, *Journal of Neuroscience*, Vol.7, No.3 (1987), pp. 819–828.
- Latash, M. L., Danion, F., Scholz, J. F., Zatsiorsky, V. M. and Schöner, G., Approaches to analysis of handwriting as a task of coordinating a redundant motor system, *Human movement science*, Vol.22, No.2 (2003), pp. 153–171.
- Mussa Ivaldi, F. A., Morasso, P. and Zaccaria, R., Kinematic networks: A distributed model for representing and regularizing motor redundancy, *Biological Cybernetics*, Vol.60 (1989), pp. 1–16.
- Naider-Steinhart, S. and Katz-Leurer, M., Analysis of proximal and distal muscle activity during handwriting tasks, *The American Journal of Occupational Therapy*, Vol.61, No.4 (2007), pp. 392–398.
- NOVITA, 頻出四字熟語学習プリント, available from <<http://novita-study.com/790/>>, (参照日 2019年1月27日).
- Saran, V., Kumar, S., Nigam, K., Ahmed, S. and Gupta, A. K., Automated measuring tool for handwriting examination, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Vol.4, No.3 (2015), pp. 10964–10967.
- Schomaker, L. R. B. and Plamondon, R., The relation between pen force and pen-point kinematics in handwriting, *Biological Cybernetics*, Vol.63, No.4 (1990), pp. 277–289.

- Shimizu, H., Kiyono, S., Motoki, T. and Gao, W., An electrical pen for signature verification using a two-dimensional optical angle sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.111, No.2-3 (2004), pp. 216–221.
- Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D., *Probabilistic robotics (Intelligent robotics and autonomous agents)*, Cambridge, MA, USA: MIT Press (2005).
- Udo, H., Otani, T., Udo, A. and Yoshinaga, F., An electromyographic study of two different types of ballpoint pens—investigation of a one hour writing operation, *Industrial Health*, Vol.38, No.1 (2000), pp. 47–56.
- Wang, J. S., Hsu, Y. L. and Chu, C. L., Online handwriting recognition using an accelerometer-based pen device, In *proceedings of 2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering* (2013), pp. 229–232.
- Wann, J. and Nimmo-Smith, I., The control of pen pressure in handwriting: A subtle point, *Human movement science*, Vol.10, No.2-3 (1991), pp. 233–246.
- Werremeyer, M. M. and Cole, K. J., Wrist action affects precision grip force, *Journal of Neurophysiology*, Vol.78, No.1 (1997), pp. 271–280.
- 横山清子, 楯千弘, 藤巻吾朗, 安藤敏弘, グリップ表面の凹凸形状の握り心地評価, *人間工学*, Vol.52, No.4 (2016), pp. 165–171.
- Zheng, G., Shi, G., Luo, Y., Wong, H., Li, W. J., Leong, P. H. W. and Wong, M. Y., Towards an ubiquitous wireless digital writing instrument using MEMS motion sensing technology, In *Proceedings of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (2005), pp. 795–800.

References

- Chang, S. H., Chen, C. L. and Yu, N. Y., Biomechanical analyses of prolonged handwriting in subjects with and without perceived discomfort, *Human movement science*, Vol.43 (2015), pp. 1–8.
- de Almeida, P. H. T. Q., da Cruz, D. M. C., Magna, L. A. and Ferrigno, I. S. V., An electromyographic analysis of two handwriting grasp patterns. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol.23, No.4 (2013), pp. 838–843.
- Dounskaia, N., Van Gemmert, A. W. A. and Stelmach, G. E., Interjoint coordination during handwriting-like movements, *Experimental Brain Research*, Vol.135, No.1 (2000), pp. 127–140.
- Enomoto, S. and Matsuzaki, G., A Study on the characteristics of stationery products, *BULLETIN OF JSSD*, Vol.59 (2012), pp. 276–277.
- Gatouillat, A., Dumortier, A., Perera, S., Badr, Y., Gehin, C. and Sejdic, E., Analysis of the pen pressure and grip force signal during basic drawing tasks: The timing and speed changes impact drawing characteristics, *Computers in Biology and Medicine*, Vol.87 (2017), pp. 124–131.
- Hook, C., Kempf, J. and Scharfenberg, G., New pen device for biometrical 3D pressure analysis of handwritten characters, words and signatures, *Proceedings of the 2003 ACM SIGMM workshop on Biometrics methods and applications* (2003), pp. 38–44.
- Hooke, A. W., Park, J. and Shim, J. K., The forces behind the words: development of the kinetic pen, *Journal of biomechanics*, Vol.41, No.9 (2008), pp. 2060–2064.
- Lacquaniti, F., Ferrigno, G., Pedotti, A., Soechting, J. F. and Terzuolo, C., Changes in spatial scale in drawing and handwriting: kinematic contributions by proximal and distal joints, *Journal of Neuroscience*, Vol.7, No.3 (1987), pp. 819–828.
- Latash, M. L., Danion, F., Scholz, J. F., Zatsiorsky, V. M. and Schöner, G., Approaches to analysis of handwriting as a task of coordinating a redundant motor system, *Human movement science*, Vol.22, No.2 (2003), pp. 153–171.
- Mussa Ivaldi, F. A., Morasso, P. and Zaccaria, R., Kinematic networks: A distributed model for representing and regularizing motor redundancy, *Biological Cybernetics*, Vol.60 (1989), pp. 1–16.
- Naider-Steinhart, S. and Katz-Leurer, M., Analysis of proximal and distal muscle activity during handwriting tasks, *The American Journal of Occupational Therapy*, Vol.61, No.4 (2007), pp. 392–398.
- NOVITA, Frequent 4-character idiom learning print, available from <<http://novita-study.com/790/>>, (accessed on 27 January, 2019).

- Saran, V., Kumar, S., Nigam, K., Ahmed, S. and Gupta, A. K., Automated measuring tool for handwriting examination, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Vol.4, No.3 (2015), pp. 10964–10967.
- Schomaker, L. R. B. and Plamondon, R., The relation between pen force and pen-point kinematics in handwriting, *Biological Cybernetics*, Vol.63, No.4 (1990), pp. 277–289.
- Shimizu, H., Kiyono, S., Motoki, T. and Gao, W., An electrical pen for signature verification using a two-dimensional optical angle sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.111, No.2-3 (2004), pp. 216–221.
- Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D., *Probabilistic robotics (Intelligent robotics and autonomous agents)*, Cambridge, MA, USA: MIT Press (2005).
- Udo, H., Otani, T., Udo, A. and Yoshinaga, F., An electromyographic study of two different types of ballpoint pens- investigation of a one hour writing operation, *Industrial Health*, Vol.38, No.1 (2000), pp. 47–56.
- Wang, J. S., Hsu, Y. L. and Chu, C. L., Online handwriting recognition using an accelerometer-based pen device, In *proceedings of 2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering* (2013), pp. 229–232.
- Wann, J. and Nimmo-Smith, I., The control of pen pressure in handwriting: A subtle point, *Human movement science*, Vol.10, No.2-3 (1991), pp. 233–246.
- Werremeyer, M. M. and Cole, K. J., Wrist action affects precision grip force, *Journal of Neurophysiology*, Vol.78, No.1 (1997), pp. 271–280.
- Yokoyama, K., Tate, T., Fujimaki, G. and Ando, T., Evaluation of grip comfort with concavo-convex surface profile, *The Japanese journal of ergonomics*, Vol.52, No.4 (2016), pp. 165–171 (in Japanese).
- Zheng, G., Shi, G., Luo, Y., Wong, H., Li, W. J., Leong, P. H. W. and Wong, M. Y., Towards an ubiquitous wireless digital writing instrument using MEMS motion sensing technology, In *Proceedings of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (2005), pp. 795–800.