キーボード強打警告システムとその評価*

鈴木 郁**

1. はじめに

近年では、マウスなどのポインティングデバイスとウィンドウシステムの一般化により、通常の事務作業に関しては打鍵作業の比重が低下したものと思われる。しかしながらこれは、打鍵に関係した腕や手首の不具合などの解消を意味するものではない。事実、コンピュータを利用する事務作業者に見られる、腕や手首を含む筋骨格系の不具合について論じた発表¹⁾などが、近年の国際会議においても行われている。一方で腕や手首の不具合については、用いられる力との関係が示唆されている²⁾。従って打鍵強度を評価することの意義は、未だ薄れてはいない。筆者は、打鍵強度の簡便な評価方法³⁾などについて検討を行ってきた。本報告では、同評価方法の応用例として作成した強打警告システム⁴⁾の概要と、強打警告の効果について調べた実験について述べる。

2. 強度評価の方法³⁾と警告システムの概略⁴⁾

打鍵強度の評価方法としては、打鍵に伴いキーボードに生じる振動を加速度センサにより検出する方法を用いた。この方法には、得られる値がキーボードの振動特性などへの依存性を有するという難点はあるが、作業者の自然な振る舞いを損ねることがなく、一方で極めて簡便に評価値が得られるという利点がある。また、限られた実験条件下においてではあるが、評価方法としての妥当性についても検証済みである。

今回の実験において打鍵強度の評価に用いた装置は、図1に示すようにキーボードケース表面に装着された加速度センサ、および同センサとパーソナルコンピュータとの間に接続されたDSP（デジタルシグ

図1 キーボードに装着された加速度センサと DSP モジュール

Fig. 1 The acceleration sensor attached to a keyboard and the DSP module.

ナルプロセッサ) モジュールから構成されている。前者は、アナログデバイス社の半導体素子 (ADXL 05) を利用したものであり、 $\pm 5\text{ G}$ の範囲で加速度に応じた電圧を出力する。一方で後者は、テキサスインスツルメンツ社の DSP 評価用モジュール (TMDS 3200051) を利用したものであり、DSP の他に入力電圧を数値列に変換する A/D コンバータ、およびパーソナルコンピュータとの通信用の RS-232 C インタフェースを備えている。加速度センサから出力された信号は、まず同モジュール内の A/D コンバータにより標本化周波数 5 kHz 、量子化ビット数 14 bit で数値列に変換される。次に加速度センサが発する雑音成分を除去すべくディジタルローパスフィルタ (位相直線性の良い FIR 型) により、その数値列は遮断周波数 400 Hz で低域濾波される。濾波後の値については、その最大値と最小値が逐次更新され、保持される。打鍵が行われたことを示す合図がパーソナルコンピュータから RS-232 C 経由で送られて来た時点で、それら両者の差として求めた当該打鍵についての加速度最大振幅値が、同じく RS-232 C 経由でパーソナルコンピュータへと返送される。この返送された値は、

* 1998 年 4 月 14 日受付

** 法政大学 工学部経営工学科
College of Eng., Hosei Univ.

当該打鍵に対する強度評価値として用いられる。一方、DSP 評価用モジュール側に保持された最大値および最小値は、次の打鍵に備えてリセットされる。なお、加速度の数値列にはデジタルローパスフィルタ内で遅延が生じるため、打鍵を示す合図をも DSP モジュール上でソフトウェア的に遅延させることにより、時間軸上における整合性の維持を図っている。

加速度センサおよび DSP モジュール、そして同モジュール上のソフトウェアによる処理については、上述のとおりであるが、打鍵強度の記録あるいは強打に対する警告は、直接的にはパーソナルコンピュータ上のソフトウェアにより行われる。このソフトウェアは、パーソナルコンピュータ用のウィンドウシステム（マイクロソフト社製の Windows 3.1 または 95）上で動作し、一度起動されると同ソフトウェアを明示的に終了させるか、あるいはウィンドウシステムの終了時まで常駐し、打鍵強度の記録および強打に対する警告などを行う。このソフトウェアは、ウィンドウシステム自身および動作中のウィンドウ全て（MS-DOS プロンプトを除く）に対するキー入力を監視しており、それを検出すると DSP モジュールへ合図を送る。次にこのソフトウェアは、打鍵されたキーの種別と共に、同モジュールより返送されて来た加速度最大振幅値をファイルに記録する。また、その数値列をデジタルローパスフィルタにより遮断周波数 0.012 Hz で低域濾波し、濾波後の値が予め定めておいた閾値を越えている間は、アクティブタイトルバー（最も手前にあるウィンドウの最上部に位置するバー）の色を変え、これにより強打に対して警告を発する。この低域濾波は、個々の打鍵に対して過敏に応答することを防ぐためのものである。一方でこのソフトウェアあるいはウィンドウシステムが終了された時点では、図 2 に例を示すように、キーリピートによるものを除く打鍵回数と、平均および最大の打鍵強度評価値が表示される。なお、上述の閾値には 3 段階の値があり、どの段階の閾値を越えているかに応じて、表 1 に示すよ

うにアクティブタイトルバーの色は 4 種類のいずれかとなる。また、最小の警告閾値は 9 段階（0.13, 0.18, 0.25, 0.35, 0.50, 0.71, 1.00, 1.41, 2.00）のいずれかに設定可能であり、図 3 に例を示すように、強打警告の有無などと共に本ソフトウェアのウィンドウ（通常はアイコン化しておく）のメニューを介して設定可能である。前述のように本評価方法では、振動の加速度最大振幅値を以て評価値としている。従って図 2 あるいは表 1 にも見られるように、評価値は力の単位（N あるいは kgf）ではなく、加速度の単位

表 1 現在値が閾値を越えた際に生じるアクティブタイトルバーの変色

Tab. 1 Changes in color of an active title bar when the current value exceeds one of the thresholds.

Thresholds		Changes in color
Ratio relative to the minimum	Example (unit : G)	
1.0 (minimum)	0.5	Blue → Green
2.0	1.0	Green → Yellow
4.0 (maximum)	2.0	Yellow → Red

図 3 強打警告システムのソフトウェアによるウィンドウ表示の例

Fig. 3 An example of the window displayed by the warning system software.

図 2 終了時に表示される打鍵回数と打鍵強度評価値の要約の例

Fig. 2 An example of the closing summary showing the number of keystrokes and the keystroke intensity.

(m/s^2 あるいはG、ここでは後者を使用)を有することとなる。

3. 実験と結果

強打警告の効果を調べる目的で、21歳から23歳の男子大学生7名を被験者として、打鍵強度の比較実験を行った。実験時に打鍵の対象とするソフトウェアとしては、ウィンドウシステム上で動作する様々なアプリケーションソフトウェアが候補たり得るが、ここでは簡易ワードプロセッサソフトウェア(Windows 3.1付属のWRITE)を用いた。実験手順の概略は、以下のとおりである。

- 1) 強打警告なしの状態では原稿を見ながら650文字の漢字かな混じりの文章を、ローマ字漢字変換を用いて入力する練習を行わせ、当該被験者の打鍵強度評価値を調べる。
- 2) 調べられた打鍵強度評価値に基づき最小の警告閾値を設定した上で、教示を与えた後に強打警告ありの状態と同様に650文字の文章を入力させる。教示の内容は、「タイトルバーの色は、貴方にしては打鍵強度が大きい場合に変わるので、その場合には強度を下げて下さい」というものである。
- 3) 再度、強打警告なしの状態と同様に650文字の文章を入力させる。

比較は上記の2と3の試行で得られた結果の相互間で行うこととし、順序効果への配慮から約半数の被験者(被験者A~C)については2と3の試行順序を逆にした。打鍵を行う文章の長さ650文字は、実験者自らを被験者とした予備実験の結果に基づき所要時間が

30分程度となるよう定めたものである。また、2における各被験者ごとの最小の警告閾値は、1で得られた個々の打鍵強度評価値の対数値の平均 μ と標準偏差 σ (標本数Nは十分に多く、ここでは推定値扱いしない)を算出し、 $\mu - 0.8\sigma$ の逆対数値に最も近いものを前述の9段階(0.13~2.00)より選んで設定した。ここで対数を用いている理由は、上述の予備実験の結果において、打鍵強度評価値そのものよりも、統計的検定では棄却されたものの、その対数値の方がより正規分布に近い分布を示したためである。一方で前出の定数0.8は、警告発生が頻度が主観的に妥当と感じられるよう、同じく予備実験により定めたものである。なお、実験時におけるイスの高さなどについては推奨値⁵⁾に準じたものとし、ディスプレイ上の文字の寸法については視距離(約60cm)に対して十分な大きさである5mmとした。

実験の結果を、各試行ごとの所要時間および打鍵強度評価値の平均について図4に示す。この図に示した平均は、個々の打鍵強度評価値の対数値を平均し、その逆対数値として求めたものである。また図中の矢印は、練習としての試行の結果に基づき各被験者ごとに設定された、最小の警告閾値を表している。なお、各被験者の各試行ごとの打鍵数は、キーリピートによるものを除き2000から2700程度であった。

この図より、程度の差こそあるものの被験者Gを除く全ての被験者について、強打警告ありで試行した場合の方が、打鍵強度評価値の平均は低いことがわかる。各試行ごとの打鍵数(標本数)が多いため、図上での差があまり大きくなくとも統計的に有意な差となりやすく、実際に検定(対をなさない標本に対する平均値の差のt検定)すると、被験者Gを除く全ての

図4 各被験者ごとの平均打鍵強度評価値および打鍵所要時間

Fig.4 The averaged keystroke intensity and the elapsed time for each subject.

被験者について有意水準1%で差が認められた。また、各試行ごとの平均値を各試行の代表値として、被験者全体について検定（対をなす標本に対する平均値の差の t 検定）すると、有意水準5%で差が認められた。以上は強打警告の有無に関する検定であるが、試行順序の影響を見るべく同様な方法により、強打警告の有無とは無関係に先の試行と後の試行に関して検定すると、有意な差は認められなかった。従って今回の実験条件下においては、強打警告には打鍵強度を低減させる効果があったといえる。一方で所要時間については、強打警告ありで試行した場合の方が長い時間を要する傾向があり、被験者全体について検定（対をなす標本に対する平均値の差の t 検定）すると、有意水準5%で差が認められた。ただし、差が僅かな被験者や逆の傾向を示した被験者もあり、この傾向はさほど顕著なものではない。

この実験においては、実験終了後に簡単な質問用紙への回答を求めた。その結果によれば、強打警告の打鍵強度低減効果に関して肯定的に回答した被験者は、7名中6名であった。また、被験者自身にとっての打鍵強度低減の意義に関して肯定的に回答した（打鍵強度低減が自らに利点ありとした）被験者は、7名中5名であった。ちなみに否定的に回答した被験者の一方は、図4において強打警告の効果が少なかった被験者Eである。この被験者は自由回答欄に、“ブラインドタッチができないため、ディスプレイに集中できなかった”と回答しており、これらの回答は、同被験者に強打警告の効果が少なかったことと符合している。また、強打警告の有無で打鍵強度評価値に統計的有意差が認められなかった被験者Gは、“あまりコンピュータを使っていない”と回答しており、このことは全ての試行において同被験者の所要時間が長かったことと符合している。この被験者は、強打警告の効果が現れにくいであろう順序、即ち強打警告ありで先に試行しており、さらに間を空けずに強打警告なしで試行していることから、順序効果が影響した可能性も考えられる。しかしながら、同様な順序でかつ連続的に試行した別の被験者Dに強打警告の効果が明らかに表れていること、ならびに被験者Gの自由回答や試行所要時間を勘案すると、同被験者に有意差が認められなかった理由については被験者Eの自由回答と同様であろう。

5. 検討とむすび

打鍵強度の簡便な評価方法の応用例として、強打警告システムを作成し、限られた条件下においてではあ

るが、その効果を調べるための実験を行った。その結果、強打警告ありの試行に際して極めて明示的な教示を与えてこそいるものの、今回の実験では打鍵強度低減効果に関する有効性が示唆された。打鍵に極めて不慣れな被験者には効果がなかったが、仮に強打警告システムが実用化されたならば、その利用者は打鍵に伴う筋骨格系の不具合を自覚あるいは危惧する程に打鍵量が多く、打鍵にも極めて慣れていると考えられ、このことは特に問題とはならないであろう。その一方で今回の実験では、さほど顕著ではないものの、強打警告の使用に伴う打鍵所要時間の伸長傾向が見られた。そこで以下ではこの点について、少し検討を加えることとする。

打鍵強度を低減させるためには、指先がキーを押し下げる時点における運動速度を減じる必要が生じる。その方法としては、指あるいは手の動き全体の速度を減じる方法と、指がキーに触れる直前に急制動する方法が考えられる。後者には、打鍵速度の低下なしに打

(a) Slow Finger movement

(b) Fast finger movement without increasing keystroke intensity

図5 1回の打鍵で指伸筋付近より得た筋電図
Fig.5 EMGs obtained around the M. extensor digitorum for a stroke.

鍵強度を減じる可能性がある反面、急制動のための筋力発生など新たな負担を腕や手の筋骨格系にもたらす可能性もある。図5は、薬指による打鍵時に指伸筋付近から得た筋電図を両者で比較した例であるが、より大きな筋放電が見られるのは後者である。この例は上述の実験とは全く別に補足的に試みた際のものであり、この図のみから断定することはできない。しかしながら、打鍵強度の低減方法としては前者の方が一般に容易と思われ、原稿の読みとりや思考など、狭い意味での打鍵以外に要する時間が削減できないならば、打鍵強度を下げようとした場合に打鍵所要時間が長くなることは自然な傾向といえる。所要時間の伸長そのものは一般に好ましいとはいえないが、仮に腕や手の不具合などを防ぐ上で打鍵強度低減の方がより重要であるならば、やむを得ないものと考えるべきであろう。

今回の実験結果は、実験室的条件下において少人数の被験者より得られたものであり、強打警告の効果が長期的に維持される得るか否かなど、不明な部分が残されている。また、強打警告のより良い与え方など、強打警告システムそのものについても改良の余地がある。一方で今回の実験結果は、打鍵強度の低減と打鍵所要時間の伸長という、難しいトレードオフの存在を暗示するものでもあった。今後、これらについての検討を重ねると同時に、強打警告システムの実用化を目指していきたい。

最後に、強打警告の与え方についての示唆をいただいた Knut Inge Fostervold 氏、ならびに実験を担当された法政大学学生（当時）の河原田雄基君に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Conway, F. T., Smith M. J., LeGrande, D., and Cahill, J.: Physiological Stress and Musculoskeletal Health, In Salvendy, G., Smith, M. and Koubek, R. (Eds.): Human-Computer Interaction, 21 A, 493~496, Elsevier Science Publishers B. V., 1997.
- 2) Kuorinka, I. and Forcier, L. (Eds.): Work Related Musculoskeletal Disorders (WMSDs): A Reference Book for Prevention, 46~53, Taylor & Francis, 1995.
- 3) 鈴木 郁: 振動測定に基づく打鍵強度の簡便な評価方法について, 人間工学, 33 (2), 117~122, 1997.
- 4) Suzuki, K.: A Warning System for Excessive Keystroke Intensity, Poster Sessions: Abridged Proceedings of HCI International '97, 101, 1997.
- 5) 野呂影勇(編): 図説エルゴノミクス, 427~429, 日本規格協会, 1990.