

VDT作業時における手指動作解析とその評価

——加速度センサを用いての基礎実験——

香山 瑞恵

1章 はじめに

オフィスにコンピュータ関連機器が導入されてから、VDT (Visual Display Terminal) 作業従事者の肩こり、上肢の痛み、手指のしびれなどの頸肩腕障害が労働衛生上大きな問題になった。その原因は、むしろ機器そのものにあるとしても、従事者の高いキー押し下げ圧と不自然な姿勢によるものともある、と報告されてきた。だが、最近のOA機器は人間工学上の改良が加えられ、キータッチも軽く、薄型で機器本体から分離した型になり操作しやすくなってきている。このため、以前多かった重症の頸肩腕障害は減少し、問題は解決したかのようにみえた。従事者の健康診断の結果からも重症な頸肩腕障害者は減少したと報告されている⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

しかし、最近でも以前程重症ではないにしても、頸肩腕障害や腱鞘炎が増加しており、健康管理上の対策が必要になってきている。これらの症状は、ハンディタイプのワープロやラップトップ、ブック型またはノート型コンピュータとよばれている可搬型VDTが急速に普及し、そのキーボードおよびキーの形状や配置に原因があると考えられている。

このような問題を改善し予防するための1つのアプローチとして、VDT作業時における腕及び手指の基礎的な動作を解析するという方法がある。現段階では、下述のことがらが検討課題としてあげられており、情報工学、生体工学、医用電子工

学、人間工学など様々な分野で研究がなされている。

- 1) キーを押し下げる指の力、ならびにその際の手指の速度および加速度の変化
- 2) 指先と各関節の3次元的な動態
- 3) 手首の置く位置と関節にかかる力との関係
- 4) 肘の高さと各関節の疲労度との関係
- 5) 局所筋負担の差を知るための各部表面筋電図

この中で我々は、1)の命題である「キーを押し下げる指の力、ならびに打鍵動作中の手指の速度および加速度の変化」に着目し、まず基礎実験として被験者の指先に加速度を検出するセンサを装着し、打鍵動作中の指の速度および加速度変化の解析を試みた。以下、2章では今回の実験方法を、3章ではその実験結果について述べたい。

なおこの実験は筆者が信州大学工学部情報工学科に在籍中におこなったものである。

2章 実験方法

(1) 概要

この実験では、加速度センサを用いてVDT作業時の手指動作における指先の加速度を検出し、その速度および加速度変化から個人的特徴を抽出できるかを検討する。

今回の基礎実験ではセンサからの出力を8mmビデオに記録した。またキーボード操作中の手指動作の様子も8mmビデオに同時記録した。手指動作を画像とセンサ出力の両面とから記録するこ

とで、打鍵動作をTVモニタで確認しながら、センサ出力に各種の信号処理をほどこすことが可能になる。更に、画像を見ながら必要なデータを検索することもできる。

(2) 加速度センサ

一般的な測定実験に用いられている加速度センサは3つの方向軸を備えているが、そのほとんどは大型である。しかし、本実験では装着箇所が指先ということで、センサはできる限り小型のものが望ましい。そこで、センサの寸法や重さなどを基準にして、使用する型式を検討した。その結果、圧電式1次元超小型加速度ピック・アップ（以下、PUセンサと略記）を使用することにした。圧電式の特徴としては、1)簡易な構造でありながら精度が高い、2)一般に小型である、3)外部電源を必要としない、4)加速度とセンサからの出力の線型の相関が高い、などがあげられる²⁾。

圧電式センサの動作原理（圧電素子に力が加わったときに生じる電荷を検出して加速度を求めるもの）は、加えられた力と発生電荷の間に比例関係が成立することを利用して加速度を求める。発生電荷を電荷感度（pC/G）で校正して検出加速度とし、その値を電圧感度（mV/G）で補正して電圧変化として出力している。

センサの装着指は右手中指とする。右手使用時の打鍵頻度は人差指が一番高く、ついで中指、薬指、小指、親指の順であるといわれている。この場合、人差指に装着すると、たとえば中指などの他指が打鍵している際にはセンサが邪魔になることが予想される。手の形から、中指装着は非センサ装着指への影響が一番少なくなると考えられる。PUセンサを右手中指の指先と第一関節との間に、指先方向とセンサの検出軸方向が一致するよう取り付け付けた（図1参照）。

(3) ブロック・ダイアグラム

本実験の信号収集装置および解析装置のブロック・ダイアグラムを図2に示す。

PUセンサ（RION PV-90B）の出力は、

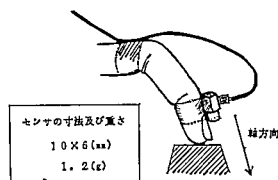


図1 加速度センサ装着図

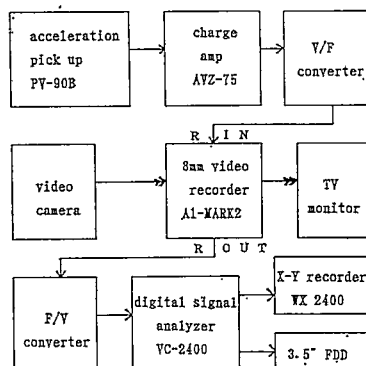


図2 ブロック・ダイアグラム

このままでは信号レベルが低いためチャージ・アンプ（AKASHI AVZ-75）で増幅される。

次に、電圧信号として表されるPUセンサ出力を高周波信号に変換する。この処理は記録媒体として用いる8mmビデオの音声帯域に信号レベルを合わせるためにおこなうものである。PUセンサの出力は直流成分も含め、0Hz~250Hzという位信号変化の度合いが低いため、8mmビデオにはこのままでは記録できない。ビデオの音声帯域が50Hz~15kHzであるため、中心周波数を6kHzとし、+1Vが8kHzに、-1Vが5kHzに対応するよう調節した。

ここで用いている周波数⇄電圧（以下、V/FまたはF/Vと略記）変換器は自研究室で作成したもので、可変抵抗により中心周波数を自由に設定できる構造になっている。

V/F変換器（自作）からの出力は、8mmビデオカメラ・レコーダ（Canon A1-MARK2）に音声チャンネルから記録される。キーボードを操作する手指の動きを画像チャンネルから同時記録する。

再生時には8mmビデオレコーダの出力に対して、時間軸積分、パワー・スペクトル分析などのデジタル信号処理が可能になるように、F/V変

換器（前出）で電圧信号に復調する。その復調した電圧信号をデジタル・シグナル・アナライザ（HITACHI VC-2420）に取りこむ。このとき、TVモニターによって各被験者の打鍵特徴をとらえ、手指動作を確認できる。処理結果は、X-Yレコーダ（GRAPHTEC WX2400）で記録すると共に、3.5インチディスクにも保存される。

(4) 被験者

実験対象者をデータ入力作業の経験年数により初心者、中堅者、熟練者の3グループに分けた。各グループ間での差異が生じるかみるためである。

本実験ではキーパンチャーとして所定の教育を受けている女性作業員を対象にした。経験年数はそれぞれ4カ月未満（初心者）、2年未満（中堅者）、10年以上（熟練者）である。各グループ2名に対して実験をおこなった。6名すべての被験者の経歴を表1に示す。

(5) キー入力

データ採取時間は5分以上とした。これは、センサを装着している指がキーを打鍵しているときのデータを確保するためと、PUセンサを装着する際の違和感を軽減するためである。

図3は、単位時間における、キーボード上のす

表1 被験者各自の経歴

グループ	被験者名	入社年度	備 考
初 心 者	A	H 02.04	
	B	H 02.04	
中 堅 者	C	H 01.04	
	D	H 01.04	アルバイト
熟 練 者	E	S 59.05	入社以前に経験あり
	F	S 55.02	

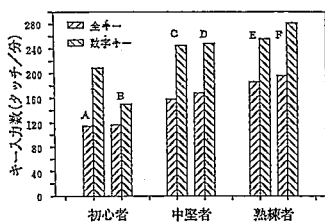
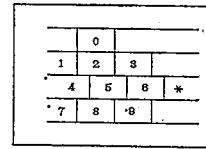


図3 単位時間のキー入力回数

キーボード中央 4段



*:リリース（数の区切り毎に打鍵）

図4 テンキーの配列

べてのキー（以下、全キーとする）の入力数と、リリース・キーを含む数字キーの入力数とを示している。このうち、全キーの入力数はK社資料に基づく。数字キー入力数は全キー入力数より平均で約30%増加する傾向をみせる。この増加傾向は経験年数に関係なく前述の3グループともほぼ同じ割合になった。このことから、数字キー入力の方に注目しても、打鍵動作中の手指動作解析の妨げにならないといえる。全キーを用いて入力する一般的な打鍵動作とは異なり、本実験ではこのような結果から、数字キー入力のみを対象とする。

入力データには、数字を羅列しただけの売り上げ伝票を使用した（K社で通常作業に使用されているもの）。入力は通常の作業通りキーボード中央にある専用テンキーでおこなった。実験時のテンキーに配置を図4に示す。誤まった入力には通常の作業と同様のやり方で対処した。測定時の被験者の姿勢、キーボードと手の位置関係、椅子の高さなどは、各被験者の通常作業時と同じ条件にした。

3章 実験結果

図5は、初心者、中堅者、熟練者各1名のキー入力時間の度数分布を示す。入力作業を開始して、1分30秒後から3分30秒後までの連続した2分間

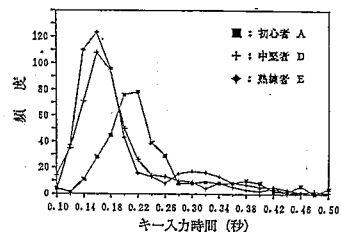


図5 キー入力時間の度数分布（2分間）

をカウントの対象とした。1つの連続したデータを入力する際に、データの最初の数字キーを打鍵してからリリース・キーを打鍵するまでの手指動作の速さはキー入力時間度数の最瀬値として示される。被験者個々の最瀬値をとる時間は、中堅者と熟練者は0.14秒から0.16秒というようにほぼ同じであるが、初心者は0.22秒である。なお平均値はそれぞれ、初心者は0.23秒、中堅者は0.18秒、熟練者は0.18秒となる。最瀬値の場合と同様に、平均値でも熟練者と中堅者には差が表れないが、初心者は他の2者に比べ大きな値を示す。最瀬値と平均値のどちらで比べても初心者が打鍵する時の指の速度は遅いことが判る。最瀬値と平均値との両方について熟練者と初心者の値差を単位時間あたりのキー入力数に換算すると、両方とも約130タッチ/分となる。これは図3から読み取れる値とほぼ一致する。

図6は、打鍵動作中の手指の加速度と速度のパワー・スペクトルのピーク周波数である。この図から、中堅者と熟練者に差はみられないが、それに比べ初心者は低いことが判る。ここでの熟練者と初心者のピーク周波数差を単位時間あたりのキー入力数に換算すると、約120タッチ/分となる。

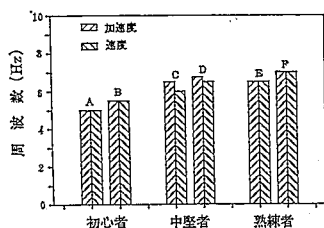


図6 加速度、及び速度パワースペクトルのピーク周波数

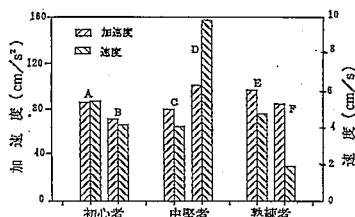


図7 ピーク周波数での加速度及び速度

この値も図5からの計算値と同様に、図3からの値とほぼ一致する。

図7は、図6のときの加速度および速度の大きさを示す。単位はそれぞれ cm/s^2 、 cm/s とした。パワー・スペクトルのピーク周波数については同じ様な値を示す被験者でも、加速度、速度の大きさにはかなり個人差がでている。熟練者と中堅者は、図3の単位時間あたりのキー入力数はほぼ同程度であり、図6のピーク周波数も同じ様な値であるが、速度の大きさは、被験者Fを基準とすると、被験者Cは約2倍、被験者Dは約5倍、被験者Eは約3倍となっている。実際に画像データで調べると、被験者Dは他の被験者と比べ、打鍵前のホームポジションが高く、打鍵時にもかなり強くキーに触れていることが確認される。それに対して、被験者Fの特徴は、ホームポジションは他の被験者に比べかなり低く、打鍵もやわらかい。このことから、打鍵前の手のホームポジションや打鍵動作の大きさなどが、この加速度や速度の値に大きく反映しているといえる。

これらのデータ(図6、図7)と画像データを組み合わせて解析することにより、障害原因が明らかになる可能性があると考えられる。

以上のように、基礎実験として加速度センサを右手中指に装着し、指先の動作解析の可能性を探った。

今回の実験では次の2点が問題として残った。

- 1) 打鍵動作中の指の位置と動作速度との関係は、手指の3次元解析によって可能となるもので、今回のように1次元センサを用いての実験では、1軸方法のみの部分的な解析にとどまった。
- 2) 画像データとセンサ信号とは信号収集段階までは完全に同時記録されており、センサ信号から画像データの、またはその逆の検索が可能であるが、解析段階では8mmビデオとアナライザ内とに分離してしまい、データの検索がしにくい。

4章 おわりに

以上みてきた基礎実験の結果からもわかるように、打鍵動作中の手指の速度ならびに加速度変化から、被験者個々の打鍵の際の特徴をとらえることができる。この特徴から頸肩腕障害の原因が見いだせるのではないかと推測できる。

しかし、前章でふれた問題点などを考慮すると実験システムとしてかなりの改良を要することが判明した。その結果、次の実験への準備として、信号の記録再生をするための新しい装置を作る必要がある。その仕様としては、多チャネル入力为实现されるようになり、信号の記録再生・データ解析がパーソナルコンピュータを介しておこなえる、ということである。多チャネル入力为实现されると、1次元センサを数カ所に装着しそれらの出力を同時記録することが可能になる。更に、小型の多次元センサを1ヶ所ならびに数カ所に装着しそれらの軸方向の出力を同時記録することも可能になる。

センサ出力信号と画像データとを同期させ、記録するという方式は、一連のデータから必要な箇所を取り出す際に、有用なのではないかと考えられる。

このように、動作解析を進めていくと、次にはキーと指先の接触時間、接触圧などを考慮しつつ本論を展開していくことが必要となり、更には人間の感覚器と大脳の中樞神経との関係の追究にむかうことになる。

謝 辞

未熟な私を温かく御指導下さった、信州大学情報教育講座 米沢義道教授、伊東一典助教諭、岡島英男助手の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本研究に対して誠意を持ってご協力頂いた俣ヶイケン エンジニアリングシステム データ作成部の皆様に深謝致します。

また、本論文をまとめるにあたり貴重な参考意見等寄せてくださった本学情報科学研究室 清水道夫助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 菅野思樹：鍵盤楽器演奏における指・腕協調運動の分析とそのロボットへの適用、バイオメカニズム学会、Vol. 12 No. 9 pp231-240 (1988).
- (2) 藤本勝巳他：トランジスタ技術スペシャル、No. 12 pp106-123 (1990).
- (3) 中村政俊：2次元画面視標追跡による手の随意運動機能の記録処理方法、医用電子と生体工学、Vol. 12 No. 1 pp9-17 (1990).
- (4) 労働省：労働者の健康状況調査結果概要、(1988).
- (5) 大橋俊夫他：振動障害における局所循環障害の発生機構、自律神経、Vol. 16 No. 12 (1978).
- (6) 佐藤俊輔：生体信号とスペクトル解析法、BME学会、Vol. 4 No. 2 pp51-57 (1990).
- (7) 菅野思樹：多自由度人間形人工の手の開発、バイオメカニズム学会、Vol. 8 No. 7 pp114-124 (1984).
- (8) 阿部真雄：VDT作業における環境管理、労働衛生、Vol. 30 No. 6 pp70-72 (1989).
- (9) 野田一雄：VDT作業と健康問題、住友産業衛生、Vol. 25 No. 4 pp1-12 (1989).