

手書き文字の合成モデル*

保原 信**

Abstract

The author is carrying on a preliminary research of human handwriting process to introduce a new method to the handwriting pattern recognition or to the traditional grapho-analysis. This system must be considered to be associated with the active facilities that allow itself to synthesize handwriting patterns whenever necessary. These ideas led the author to the proposal of the dynamic model of handwriting process.

In this paper, some results from EMG studies of actual human handwriting movements are reported. Further, the behaviors of pencil point pressure during handwriting movement are measured experimentally, and it is found that effects of the writing pressure play an important role in actual human handwriting process.

1. はじめに

音声が人間の発声機構による内的拘束を強く受けているのに比べて、たとえば、手書き文字の場合には、人間が書くという発生上の拘束以外に、社会的・外的(象形など)な拘束の方がより大であるといわれている。そのため音声識別の研究においては、その識別パラメタが常に人間の発声機構に関連して選択されているのに対して、文字の場合には、その発生理学的特質を考えに入れることは、ほとんど無意味なものとしてきた。われわれがここで、文字発生メカニズムを改めて研究対象として取り上げたのは、おもにつきのような理由からである。まず、手書き文字の変形の多様性のため、十分な成果をあげていない現在の手書き文字識別の研究状況から、文字発生メカニズムを追求することによって、手書き文字に固有な特質を見出し、最終的には手書き文字の合成による分析(Analysis by Synthesis; A-b-S)¹⁾を基本とする能動的分析法を、手書き文字識別のモデルとして導入することであり、第二に従来定性的な議論に終わっていた伝統的筆跡学に対し、より定量的な手法を導入し、新しく自動筆跡鑑定への基礎的な接近を試みようとするものである。この能動的分析法は、音声研究における指導原理として提出された考え方^{1),2)}であるが、人間による手書き文字の認識過程の問題とも深く関連して

いる³⁾と同時に、とくに筆跡学の立場からは、大いにその重要性が期待できるものと思われる。このような考え方から、まず人間の手書き過程のモデルを設定するために、オランダの Denier van der Gon⁴⁾が医学の立場から、最初に提出した手運動の力学モデルに注目し、実験的に追試してみた。MITの MacDonald⁵⁾もこのモデルに基づいたシミュレータを作って、実際に手書き文字の合成実験を試みたが、本論文の目的は、さらに進んで、手書き運動に伴って観測される手の筋肉の筋電流を調べ、実際の人間の手書き過程に則して、このモデルの有効性を定量的に確認するとともに、新しく筆圧の効果も考慮に入れ、その影響を検討することである。

2. 手書き過程の A-b-S モデル

手書き文字による情報伝達過程を、一般的な通信系として原理的に考えてみると、通常の手書きによる通信では、情報源と考えられている物理的空間図形としての文字そのものは、実は、より根源的な各種の情報を、人間の手書き過程という特殊な符号化過程によって符号化した符号化信号であることがわかる。しかも、その符号化過程が運筆者個人に固有な手書き過程によってのみ実現されている。情報伝達手段としての手書き文字は、多種類の情報をになっているが、対象とする情報の種類に応じて、図形そのものよりも、さらに本質的な形の情報信号の存在を仮定することができよう。これをいわゆる情報要素と考えることができ

* A Synthetic Model of Handwriting letters, by Makoto Yasuhara (The University of Electro-Communications)

** 電気通信大学

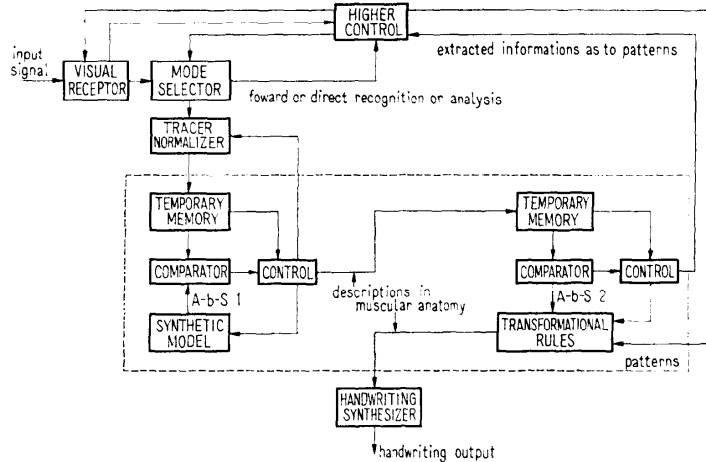


図 1

る。この要素が何であるかは、手書き文字をどのようなレベルで考えるか、換言すると、どのような次元(座標系)で文字を記述するかによって異なってくる。そこで人間の手書き過程の基本的なレベルを列記してみよう。

- (1) 運動指令 (Neurophysiological Motor Command)
- (2) 筋肉活動 (Muscular Activity)
- (3) 運筆運動 (Handwriting Dynamics)
- (4) 文字図形 (Physical Signal)

ここで重要なことは、手書き文字の符号化機構である手書き過程との関連で、異なったレベル間での情報要素間の対応関係を明らかにすることである。このような考え方から、まず図1のような系を考えてみよう。

この系は内部に A-b-S 回路を含んでいるが、その出力(手書き信号を生み出す)を入力に結合することにより、全系がフィードバック回路をなし、全体的にも A-b-S 系となっている。これによって実際の筋肉制御と、分析によって抽出される筋肉制御との比較が可能になり、能動的階層構造(Hierarchical Structure)が実現される。

そこで、もし適当な手書き過程のモデルを設定できれば、この階層を逆に登ってより上のレベルにおける情報要素をつかまえることができよう。そこで、充分精度の高い、すなわち、実際の手書き過程を十分に説明しうるモデルが必要となる。

3. 手書き運動の分析装置

MacDonald は筆点の位置を時間的に観測して、種々の知見を得ているが、運筆時の筆圧、および運動に関与する筋肉の活動を考慮に入れていないために、モデルの有効性を実際の手書き過程に則して検討することができなかった。そこで、まず筆点の座標を時間関数として測定すると同時に、筆圧変動も測定できる手書き分析装置(付録I)を試作し、これと筋電計とを並列に用いた図2のような実験システムを用意し、手書き過程の実験的解析を多角的に行なった。なお、筋電流の誘導法、その他については付録IIにまとめてあ

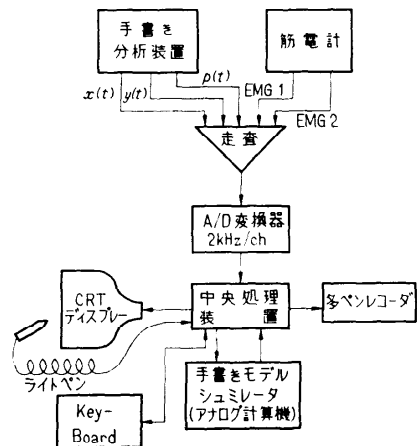


図 2 手書き文字の分析、合成系

る。被験者には右手首を固定し、自身の好む筆速・筆圧で固定した手首を軸とした左右の周期的往復運動、だ円運動および書字運動をしてもらった。

4. 手書き過程のモデル

4.1 Van der Gon の力学モデル

まず Van der Gon のモデルの物理的な意味を明確にするために、簡単にモデルの説明を行なっておく。図3は人間の手、および筋肉のモデル図である。筋肉の持つ弾性、運動に伴う内部摩擦力を考慮して、前者は一定の弾性率を持ったばねで代表させ、後者には負

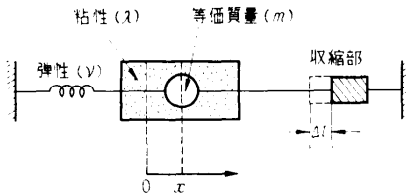


図3 手書き過程の力学モデル

荷が粘性流体内に置かれていると考えている。負荷は筋肉、骨格、腱、関節などを含めて考え、これを等価質量mで代表させている。いま筋肉が Δl だけ収縮した状態での負荷の行なう運動を考えてみると、つぎの運動方程式に従うことは明らかである。

$$\begin{cases} \ddot{x} + r_x \dot{x} + k_x x = h \Delta l_x = F_x(t) \\ \ddot{y} + r_y \dot{y} + k_y y = h \Delta l_y = F_y(t) \end{cases} \quad (1)$$

ただし

$$\begin{cases} r_x = \frac{1}{m} \{ \lambda_x + \mu_x p(t) / v \} \\ r_y = \frac{1}{m} \{ \lambda_y + \mu_y p(t) / v \} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_x(t) = f_x(t) / m \\ F_y(t) = f_y(t) / m \end{cases} \quad \text{正規化筋力}$$

$$p(t) \quad \text{筆圧}$$

$$v = (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1/2} \quad \text{筆速}$$

$$k_x = \nu_x / m, \quad k_y = \nu_y / m$$

$$\lambda_x, \lambda_y \quad \text{粘性係数}$$

$$\mu_x, \mu_y \quad \text{摩擦係数}$$

$$\nu_x, \nu_y \quad \text{弾性係数}$$

ここで、筆圧 $p(t)$ および筆速 v が、時間によらず一定であると仮定すると、 r_x, r_y はつぎのように定数 (T^{-1} の次元を持つ) となる。

$$\begin{cases} r_x = \frac{1}{m} (\lambda_x + \mu_x P / V) = R_x \\ r_y = \frac{1}{m} (\lambda_y + \mu_y P / V) = R_y \end{cases} \quad (3)$$

さらに、筋肉の固有振動数が充分小さいと考えれば、弾性率 k を無視することができ

$$\begin{cases} \ddot{x} + R_x \dot{x} = F_x(t) \\ \ddot{y} + R_y \dot{y} = F_y(t) \end{cases} \quad (4)$$

で表わされる簡単な線型モデルを得ることができる。これが Van der Gon のモデルであり、結果的に彼のモデルは筆圧および筆速を一定とし、筋肉の弾性率を無視したモデルであるということができる。

われわれは、まずこのモデルを採用し、実験によって R_x, R_y を具体的に推定[†]し、さらに直線の過渡特性を持った Forcing 関数を仮定して、文字の合成実験を試みた。

以下ここでは、まず筆圧の影響を調べ、さらに筋肉の EMG を基礎としたモデルの検討を行なう。

4.2 筆圧の影響

図4(a)は手首の周期的な左右運動を行なった場合の筆点の時間的変位 $x(t)$ 、および筆圧 $p(t)$ の波形を示したものである。筆圧の波形をみると、まずゆっくりとした周期的変動が認められるが、これは紙面上の筆記具を握った手との相対的位置関係から生ずる機構的な原因によるものと思われる。いまこの機構的な原因による筆圧変動分を $p_m(t)$ とし、人為的な筆圧変動分を $p_s(t)$ とすると、観測される筆圧変動は

$$p(t) = p_s(t) + p_m(t) \quad (5)$$

で表わすことができる。そこで $p_m(t)$ をモデル的に

$$p_m(t) = p_0 - d [\{ x(t) - x_0 \}^2 + \{ y(t) - y_0 \}^2]^{1/2} \quad (6)$$

なる式で近似してみよう。左辺の第2項は紙面上の定点 (x_0, y_0) からの距離に比例した成分である。そこで(6)式の妥当性を確かめるために、以下のような実験を行なってみた。まず(5)、(6)式より

$$p_s(t) = p(t) + d [\{ x(t) - x_0 \}^2 + \{ y(t) - y_0 \}^2]^{1/2} - p_0 \quad (7)$$

となるが、実験により $x(t), y(t)$ および $p(t)$ は測定可能であるから、 p_0, d および (x_0, y_0) を適当に選ぶことによって、 $p_s(t)$ を計算によって求めることができる^{††}。図4(a)の最下段はこのようにして計算された $p_s(t)$ である^{††}。

また、図4(b)は筆点のだ円運動の場合について同様な手続を行なった結果である。

† 個人差があるが、ある成人男子の場合で、18~20 (T^{-1}) であった⁹⁾。

†† まず $p(t)$ の周期成分が消えるように $d, (x_0, y_0)$ を選び、さらに $p(t)$ と $p_s(t)$ の平均が一致するように p_0 を決めた。

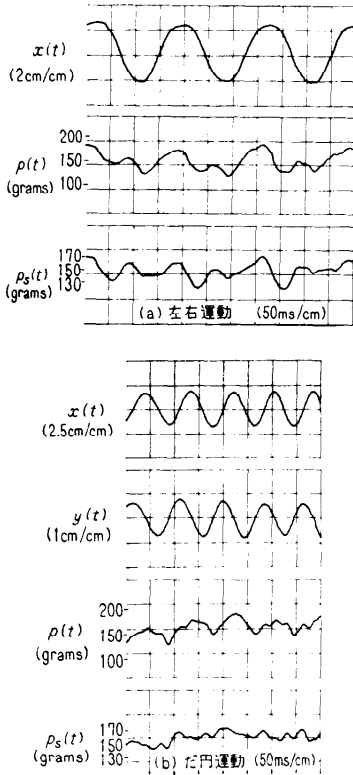


図 4

これら2例の結果からもわかるように、いずれの場合もゆるやかで、大きな周期的変動がな消えており、機構的筆圧成分が観測される筆圧変動に重畳されていることがわかる。

そこで、 $p_s(t)$ の変動を調べてみると、筆点が左右上下いずれかの端点(すなわち $\dot{x}(t)=0, \dot{y}(t)=0$ となる時点)に達する若干手前で、ほとんど例外なく $p_s(t)$ に極大点が現われているのが観察される。これは筆点が端点に近づくと、減速のための筋力が作用する以外に、筆圧を上げ、紙面と筆点との間の動摩擦力を増加させることによって減速を助けるという、人為的な作用が働いているものと解釈することができよう。しかしながら、その $p_s(t)$ の変動は、 $p_m(t)$ の変動に比較すると $1/2 \sim 1/4$ の程度であり、また、平均筆圧に対しても、かなり小さいことなどから、 $p_s(t)$ の手書き運動への影響は、それほど大きくはないものと考えられる。しかし、書字動作でしばしば見られるように、最後で、あるいは途中で、一時的に筆点を静止させるような場合には、明らかに $p_s(t)$ が大きく作

用することが考えられる。このような場合を除けば、筆圧変動の第一義的な成分は、筆点と筆記具を握った手との相対的位置関係から生ずる変動であると考えることができよう。

そこで、筆圧を考慮した手書きモデルとして一応次式

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} + r_x \dot{x} &= F_x(t) \\ \ddot{y} + r_y \dot{y} &= F_y(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} r_x &= \frac{1}{m} \{ \lambda_x + \mu_x p(t) / v \} \approx \frac{\mu_x}{m} p(t) / v \\ &= n_x p(t) / v \\ r_y &= \frac{1}{m} \{ \lambda_y + \mu_y p(t) / v \} \approx \frac{\mu_y}{m} p(t) / v \\ &= n_y p(t) / v \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

を覚えておき、この $p(t)$ および v の扱い方については、目的によって考慮する必要がある。少なくとも、筆跡の解析を目的とする場合には、 $p(t)$ を無視することはできない。

つぎに、 n の値を推定する方法を考えよう。一次元的な左右運動の場合には

$$v = |\dot{x}| \quad (10)$$

となるので、(9) 式より

$$r_x = n_x p(t) / |\dot{x}| \quad (11)$$

である。したがって、モデルの式としては、 x 成分について考えればよいので

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} \pm n_x p(t) &= F_x(t) \\ \dot{x} &\equiv 0 \text{ (複号同順)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

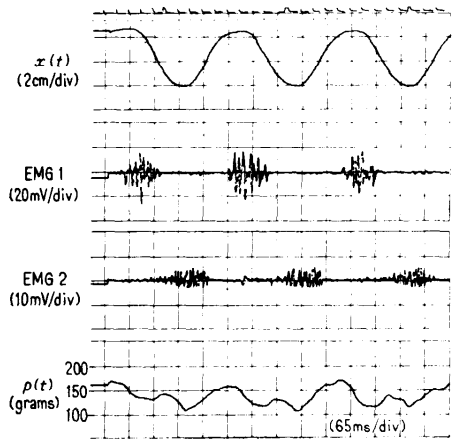


図 5

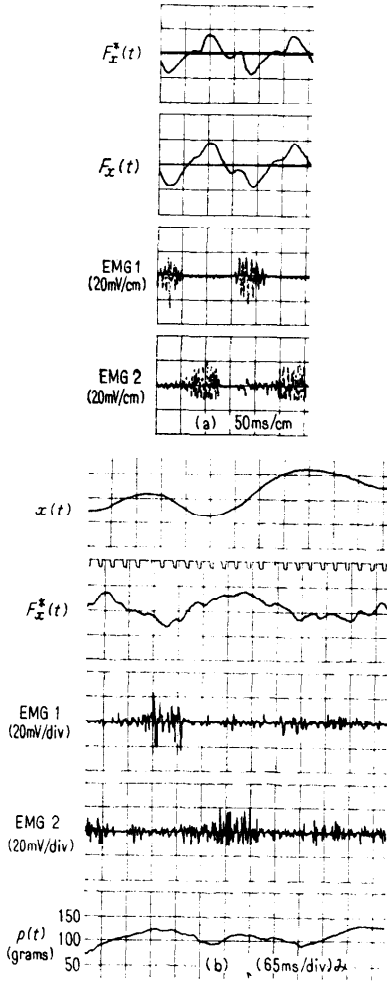


図 6

となる。図5はある被験者(成人男子)に手首の周期的な左右運動をしてもらったときの筆点の座標 $x(t)$ 、筆圧 $p(t)$ および筋肉の EMG パタンである。 $\ddot{x}(t)$ 、 $p(t)$ および $F_x(t)$ が既知である場合には、(12)式に従って最適な n_x を推定することが可能である。ところで、 $\ddot{x}(t)$ および $p(t)$ については、図5の実験から直ちに求めることができるが、 $F_x(t)$ を EMG パタンから直接求めることは困難である†††。

そこで、筋電流パタンの中央で筋力が極大になるも

††† 筋内の活動電流を誘導する方法には種々あるが、中でも表面電極法により誘導された筋電図の振幅は、筋収縮力とかなりよい相関を示すといわれている。しかし、いずれにせよ、活動電位から収縮の強さの厳密な定量を期待するのは困難であり、むしろ筋肉活動の消長に関する時間的情報の方が、比較的容易に定量できるといわれている。

のと考え、この時点に(12)式から算出される $F_x(t)$ の極大点が一致するように n_x を決定してみた。図6(a)の $F_x^*(t)$ は、その結果を示したものである。なおこのときの n_x^* は $3\sim 5$ (LT^{-2}/g) であった。

一般に、筋肉の活動電流は、実際の筋力より若干先行するが、このことを考慮すると、 $F_x^*(t)$ と EMG パタンとは、細かい点までかなりよい対応を示している。

筋力の立ち上り部分が急しゅんでるのは、静止摩擦力の影響を考えれば説明できよう。同図の $F_x(t)$ は筆圧を一定と仮定した Van der Gon のモデル(4式)において、 $R_x=18$ (別の実験から、測定された)として、図5の実験から計算によって求めた推定筋力である。EMG パタンとの平均的対応は認められるが、細かい部分については、 $F_x^*(t)$ と比較するとやはり充分ではない。このことから、筆圧変動が手運動に微妙な影響を与えていることがうかがえよう。ここでは簡単な左右往復運動の場合に対する筆圧の影響は、それほど決定的でないが、以前にものべたように、運動が一時的、あるいは最終的に静止する場合には、その時点より若干手前で筆圧が大きく上昇するので、これをもはや無視でなくなる。これについては5.2でさらに実験的に確認できよう。

最後に、実際に書いたひらがな“み”について(8)(9)式のモデルから推定される筋力 $F_x^*(t)$ および、書字の際の EMG パタンを図6(b)に示す。単純な左右運動の場合には、必ずしもはっきりしなかった筋肉の拮抗作用が見られるが、 $F_x^*(t)$ と EMG パタンとの対応がよく認められよう。

5. 手書き文字の合成

5.1 筋力に関する指数関数モデル

(8)、(9)式によって、筆圧を考慮した手書き文字の合成を行なう場合、Forcing 関数として、 $F_x(t)$ および $F_y(t)$ を具体的に規定しなくてはならない。

まず、筋肉の活動状態が、その活動の開始時間と持続時間とで規定できるものと考えよう。そこで、 $M_1(t)$ 、 $M_2(t)$ を左右それぞれの向きに作用する x 方向の筋力とし、 T を筋肉活動の持続時間とすると、図7の太線で示したように、筋肉活動の様相を矩形波として表わすことができる。実際の筋力は、このように単純な矩形波ではなく、ある一定の過渡性をもっているものと考えられる。MacDonald は簡単に直線的な過渡特性を仮定したが、これは加速度の波形が静止

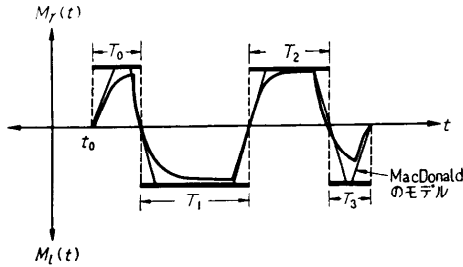


図 7 筋力のモデル

摩擦力の影響のために台形波で近似できるという理由によるものであった。††††。

しかし、この考え方は速度に比例する項を無視している点で疑問を残しているが、ここではこの点を考慮して、過渡特性を静止摩擦力の影響も含めて、指数関数で近似するモデルを採用することにした。図 6 (a) の $F_x^*(t)$ について、過渡部分を指数関数で近似し、その立上りおよび立下りの時定数を求めてみると、それぞれ 45ms, 60ms であることがわかる。

5.2 合成実験

まず、被験者にひらがなを書いてもらい、その筆点の座標 $x(t)$, $y(t)$ を計算機に読み込み、CRT 上に表示する。一方、ライトペンによって与えられる筋肉活動の時間点および持続時間に基づいて $F_x(t)$, $F_y(t)$ を数値計算し、アナログ計算機に与える。アナログ計算機は与えられた Forcing 関数に従って (8), (9) 式を解き、その結果はデジタル計算機に読み取られ、上述の場合と同一の CRT 上に表示される。このように、実際に書かれた文字と合成された文字の比較を時間領域で行ない、両者ができるだけ一致するようにライトペンによって、筋肉活動の状態を変えながら繰り返す (以上図 2 参照)。このような、いわゆる、時間領域におけるマッチングを行なうことによって、最終的に最適な筋肉活動状態が求められ、同時に Forcing 関数も計算される。以上の手続きによって合成された文字と実際に手書きされた文字の比較が図 8 に示されている。合成文字を見ると“る”の下部のループの部分が局部的に手書きされたそれと一致していないことが認められる。図 8, 図 9 から原文字 (手書きされた文字) に対する書字のようすがうかがえるが、最後の部分で筆圧が急上昇し、その後筆点が静止している。これは 4.2 でも述べたように、人為的な筆圧の上昇が作用しているためであるが、合成文字の場合に

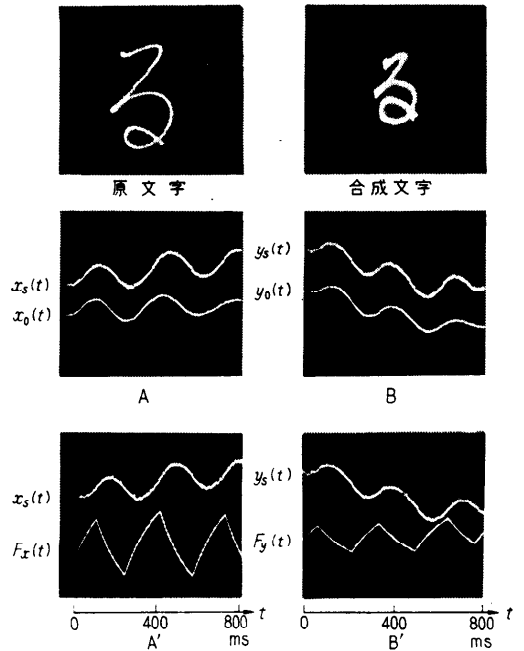


図 8 合成実験

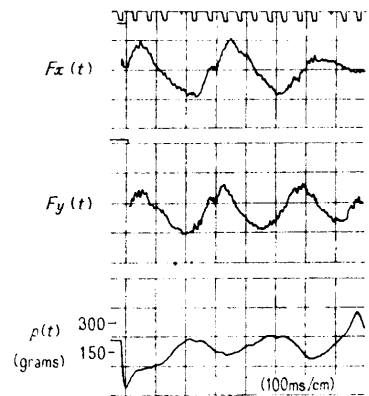


図 9 原文字“る”に対する推定筋力および筆圧

は、人為的な筆圧変動分を考慮していないために、最後の部分で動摩擦力が作用してループが小さくなり、同時に筆点が静止するという効果が現われないためであると解釈できる。図 9 は原文字に対する $x(t)$, $y(t)$ および $p(t)$ からモデルを使って計算された筋力であるが、この図と図 8 (A'), (B') を比較すると、やはり最後の部分を除けば、非常によく対応が認められる。また、筋力の立上りを指数関数で近似するモデルの妥当性も図 9 からうかがうことができる。

†††† 図 11-2 の $p(t)$ から台形波で近似できそうなことがわかる。

6. 終わりに

ここで問題を整理してみよう。

- (1) 手書き運動における筆圧変動には、人為的変動と、機構的変動分とがあり、一般的には前者は後者の $1/2 \sim 1/4$ の程度であるが、書字中に筆点が一時的に、あるいは最終的に静止する場合には、その時点より若干手前で、人為的な筆圧が大きく上昇し、運筆に大きな影響を与えている。
- (2) したがって、このような場合には、とくに Van der Gon のモデルに、筆圧変動を考慮した修正を加える必要がある。
- (3) 筆跡の解析を目的とする場合には、筆圧自体が重要な情報要素であるばかりではなく、より細かい点まで精度の高いモデルを得るために、筆圧を独立変数として、対等に扱う必要がある。実際、筆圧の項を導入することにより、かなり微妙な点まで改善されることが実験によって明らかにされた。

以上、筆圧を新しく独立変数として扱うことにより、図1の手書き文字合成モデル、あるいは手書き文字合成器として、われわれのモデルが充分役立つことがわかった。

謝辞

最後に、日ごろご鞭撻下さる佐藤 洋電気通信大学教授、並びにご指示下さる藤村 靖東京大学教授に感謝するとともに、筋電流の測定に際して、ご指示・ご助力下さった東大医学部音声言語医学研究施設の広瀬、島田の両氏に感謝する次第である。

参考文献

- 1) K. N. Stevens: Toward a model for speech recognition, J. acoust. Soc. Amer. Vol. 32, pp. 47~51, 1960.
- 2) N. Lindgren: Machine recognition of human language, Part III, IEEE Spectrum, pp. 104~116, May 1965.
- 3) 保原 信. Active Recognition と文字認識のモデルについて, 通信研究施設年報, 電気通信大学, 1965.
- 4) J. J. Denier van der Gon, J. Ph. Thuring; A Handwriting Simulator, Phys. Med. Biol, Vol. 6, pp. 407-414, 1962.
- 5) J. S. MacDonald; Experimental studies of handwriting signals, Tech. Report 443, MIT, 1966.
- 6) M. Yasuhara; Handwriting analyzer and analyses of human handwriting movements,

Japanese Psychol. Res. Vol. 11, No. 3, pp. 103-109, 1969.

- 7) G. H. Bourne: The structure and functions of muscle, Vol. I, II, Academic press, 1960.

付録 I 手書き分析装置⁶⁾

手の運動を解析するためには、X-Y 面上にできる運動パタンの位置情報だけではなく、時間関数としての位置情報 $x(t)$, $y(t)$ および筆圧情報 $p(t)$ を測定する必要がある。この要求を満たすために、下記のような原理に基づいた実時間型の図形入力装置を試作した。

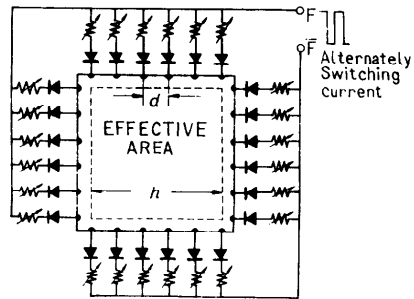


図 I

原理 パイレックスガラス基板上に SnO₂ の抵抗皮膜を作り、これに図 I のように、点電極を等間隔 ($d=1\text{ cm}$, $h=10\text{ cm}$) に設け、ダイオードを通して交番短形波電圧を与える。これにより抵抗膜面上に時分割的にできる $x(t)$, $y(t)$ に比例した電位を高入力抵抗 (10M Ω) の検出器で検出する。また、筆圧はパイレックス基板の四端を非接着型のストレンゲージで支え、この出力の和を用いている。

付録 II 筋電流の誘導法

手首の外回転および内回転の際に、中心的に関与する筋肉は、それぞれ尺側手根屈筋、尺側手根伸筋であるが、これらはともに上肢筋肉群の浅層に位置しているので、本実験の場合には、表面電極法によって筋電流を誘導した。具体的には、直径 10 mm の円型銀電極を、筋肉の軸方向に中心を約 25 mm はなして、皮膚の上から導電ベストと絆創膏で固着させ、これにより誘導された筋肉の活動電位を差動増幅している。なお、身体は耳介を通して接地する (図 II-1)。図 II-2 は手首を軸とした左右の周期的な往復運動を行なった場合の変位 $x(t)$, 速度 $\dot{x}(t)$, 加速度 $\ddot{x}(t)$, EMG 1 (左

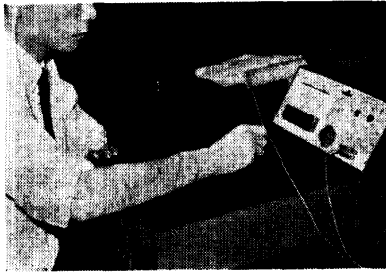


図 II-1

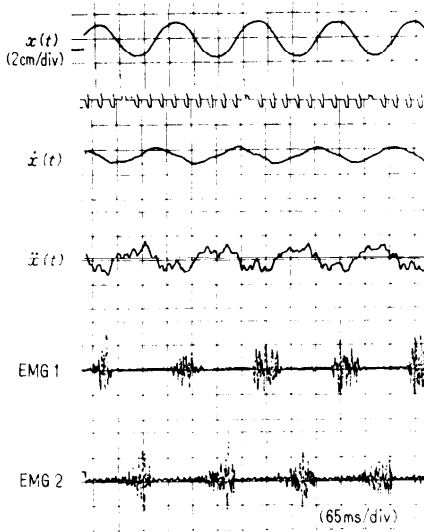


図 II-2

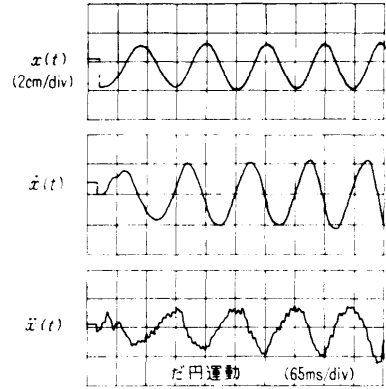


図 II-3

向き：尺側手根伸筋), EMG 2 (右向き：尺側手根屈筋)である。まず、筆点の左右運動に対応して、明確に分離した筋肉の活動が観察されよう。また、速度が零となる近傍で加速度の波形にくぼみが見られるが、これについては MacDonal⁵⁾ も報告しているが、図 II-3 を見てもわかるように、だ円運動の場合には見られない現象であり、明らかに静止摩擦力の影響であると思われる。

(昭和 45 年 5 月 2 日 受付)