
 論 文

 手書き漢字の側抑制効果的分解とその
 計算機シミュレーション*

鈴木 昇 一**

Abstract

For the present the notion of taking in the excellent picture-resolving and-contrasting faculty of biological visual systems is of fundamental importance in processing Chinese characters. In this paper a kind of spatial circuits are designed, which is possessed of two faculties of resolving and contrasting pictures. By the computer simulation we shall experimentally confirm whether or not the faculties of the designed spatial circuits are satisfactory for the above purpose. The aim in this paper is to find that the circuits are useful for constructing the recognition system of handwritten Chinese characters.

We shall explain a technique for converting the analog information-processing system into a digital information-processing system by means of the Fourier transformation for additive operators. The study is characterized by our having attached great importance to that the recognition with invariance under the expansion-and-contraction transformation group is able to be carried out by using the above-mentioned circuits.

1. まえがき

生体系のすぐれた情報処理機能に注目し、これを技術として確保しようとする試みが、近年盛んになっている³⁾⁴⁾⁶⁾¹¹⁾。これらの一連の研究は、生体系の巧妙なメカニズムの模倣が高度な情報処理を機械に代行させる方面にかなり貢献するだろうという思想に支えられ、始められている。そのための前段階として、他の感覚系に比し、より基本的な役割を果たしている視覚系の心理学的諸性質が説明できるようなモデルを構成することも試みられている⁵⁾¹¹⁾。そんなわけで、たとえば、生体視覚系における画像分解（受容器付近のおおの神経細胞塊が画像のそれぞれの成分に反応すること）、画像強調（画像成分とたとえば背景との差が強められること）という、すぐれた情報処理機能を漢字処理に取り入れることは、むろん現段階では無意味で

ないと考えられる。

本研究では、この様な情勢に鑑み、相似変換群 $\{T_i\}_{-\infty < i < +\infty}$ に不変な画像処理技術を確立するため、画像としての手書き漢字情報パターンを各成分パターンの直和に直交分解し、しかも、背景との差を強調するという空間回路塊（画像分解・強調空間回路塊） $\overline{f}(H) \triangleq \{f_i(H); i=1\sim 25\}$ を設計する。ここに、 $T_i = e^{-i \cdot H}$, $i = \sqrt{-1}$, $H = x_1 \cdot i^{-1}(\partial/\partial x_1) + x_2 \cdot i^{-1}(\partial/\partial x_2)$, $f_i(H) \triangleq f(H) \cdot \theta_i(H)$ である。その後、本回路塊が所期の機能を具備しているかどうかを計算機シミュレーションにより確認する。

本研究の目的は、測度的不変量検出理論⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁴⁾に従い、単機能としての手書き漢字認識システムのハード化のための基礎を確保することである。作用素のフーリエ変換法 (p. 934 付録参照)、作用素のラプラス変換法¹⁰⁾に基づき、画像分解回路塊 $\overline{\theta}(H) \triangleq \{\theta_i(H); i=1\sim 25\}$ 、画像強調回路としての生体視覚系側抑制効果模倣回路 $f(H)$ が相似変換群 $\{T_i\}$ に不変な認識機能の具体的実現化という面をとくに重要視して、設計されたことが本研究の特色である。

* A Method of Resolving Handwritten Chinese Characters, and Its Computer Simulation. by Shoichi SUZUKI The Mathematics, Science and Information Section, the Computer Center, Shibaura Institute of Technology,

** 芝浦工業大学 計算機センター 数理情報研究室

2. 手書き漢字の作成¹⁵⁾

電算機による画像処理においては、連続値画像関数の近似表現法が必要とされる。いいかえれば、ある種のデジタル情報(デジタル画像関数¹³⁾)に変換するために、振幅の量子化とスペクトル帯域の圧縮に伴う標本化とが必要になり¹³⁾、本研究では、前者に関しては次のごとく配慮する。標本化を達成するための技術については3章で説明しよう。

男女あわせて30人(約半数は女性)に、グラフ用紙内の7cm(縦寸法)×5cm(横寸法)の大きさの中に「芝浦工業大学の計算機…」なる字列を鉛筆で書いてもらった。その際、きれいに書くようにとか、長方形一杯にしかも真中に書くようにとかの指示は一切与えなかった。その内、最初の五文字のみを採用する。30人の内から、5人分を無作為に採り、代表パターン集合としての1人分は、比較的形の整ったのを選定する。

それぞれの漢字をヒトの目で0.2cm×0.2cmの方形(一絵素領域)に漢字成分があれば“1”,なければ“0”とし、2値化パターンηに変換する。このようにして、30個の2値化パターン集合{η_m; m=1~30}が作成されることになる。一例としてη₂₁=η₂₁(x₁, x₂)をFig. 1に示す。(x₁, x₂)直角座標系を採

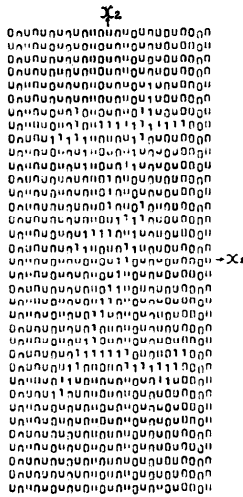


Fig. 1 η₂₁=η₂₁(x₁, x₂)=0 or 1 that is, an example of two-valued informational patterns, which are used to represent handwritten Chinese characters. The axis x₁ and the axis x₂ are horizontal and vertical respectively.

用し、-12≤x₁≤+12, -17≤x₂≤+17なる平面領域をパターンが存在場としている。x₁, x₂はそれぞれ横軸、縦軸で、ともに整数値座標値上でのみパターンの振幅が与えられている。

ゆらぎなどで質が低下した画像情報らしくするためもある(実は3章で説明するようにスペクトル帯域の圧縮を計るのが直接的な目的である)、各η_mを

φ_m ≡ φ_m(x₁, x₂) ≡ Y{k · (B_{i,t}η_m)(x₁, x₂)}_{0⁷-3.0} (1)

と変換する。これが実際に入力した漢字パターンである。ここに、Y(u)_{0⁷}=u for 0≤u≤7, =0 for u<0, =7 for u>7で

(B_{i,t}η)(x₁, x₂) = (2πt)⁻¹ ∑_{y₁=-12}⁺¹² ∑_{y₂=-17}⁺¹⁷ exp[-{(x₁-y₁)²+(x₂-y₂)²}/2t] · η(y₁, y₂), k=(16π/10) · exp[10/16]. t=8/10 (2)

である。k, tの値は(x₁-y₁)²+(x₂-y₂)²=1を満足する座標点(y₁, y₂)は固定座標点(x₁, x₂)に重み1で寄与するごとく決めてある。つまり、k · (2πt)⁻¹ · exp[-1/2t]=1となるように決定している。各φ_mは-3~+4の内のいずれかの値をとる8値化パターンで、φ₂₁をFig. 2に示す。

画像関数値を量子化する場合100程度の量子化レベルが画像が本物らしくみえるために必要であるが¹³⁾, 32, 16, 8, 4, 2などのレベル数も実用的である。本研究では入力画像パターンの振幅を8レベルとして表現していることになる。

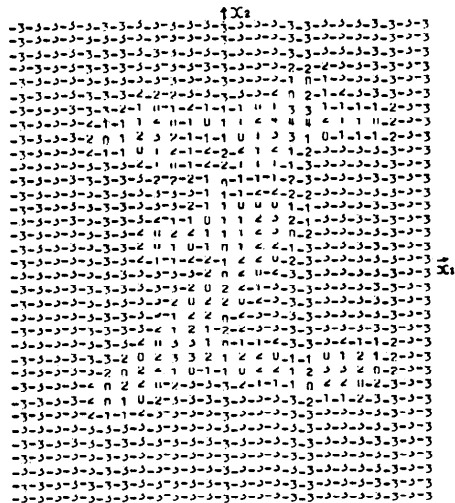


Fig. 2 An example φ₂₁ of the eight-valued input patterns.

なお、以下では諸々の積分表示式を和分表現式に変換するが、この変換に関する意味づけは次のとおりである。理論上、積分表示式においては両座標軸 x_1, x_2 がともに実数値をとるものとしているゆえ、生体視覚系の受容器付近の神経細胞群が連続無限個の細胞からなりたっていることになる。しかしながら、 $|x_1| \leq 12$ $|x_2| \leq 17$ なる平面領域での整数値座標系 (x_1, x_2) をいずれにしろ設定したことは一絵素に一つの細胞が対応しているとして、 $25 \times 35 = 876$ 個の細胞で上の神経細胞群を“近似表現”したことになる。

3. 相似変換群による低域フィルタの表現とスペクトル帯域の圧縮

画像に対する有用な操作の一つは“大きさに不変”な性質、つまり、平面上の一点に対するその効果が、原点に関する画像の大きさによらない性質をもたねばならない。本研究では、測度的不変量検出理論に基づき、“画質”をよくするため、画像を“なめらか”にしたり(画像の平滑化)、“尖鋭”にしたり(画像の強調)する情報処理機能を相似変換群に不変なごとく構成する。本章では、前章、(1)式に示すごとく、2値化画像 η を8値化画像 φ へと変換したことにより画像スペクトル帯域が圧縮され、低域制限されたこと(平滑化)も説明しよう。

まず、漢字画像パターンの位相代数的表現を $\varphi = \varphi(x_1, x_2)$ 、 $-\infty < x_1, x_2 < +\infty$ としよう。パターン φ 、 ψ 間の内積 (φ, ψ) を空間点 (x_1, x_2) に $(x_1^2 + x_2^2)^{-1}$ なる重みを付し、 $(\varphi, \psi) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dx_2 (x_1^2 + x_2^2)^{-1} \cdot \varphi(x_1, x_2) \cdot \overline{\psi(x_1, x_2)}$ と設定する。一は複素共役の意味である。 φ のノルム $\|\varphi\| \triangleq \sqrt{(\varphi, \varphi)}$ を導入し、 $\|\varphi\| < +\infty$ なるパターン φ のみを取り扱う。この様な φ の集まりに、加法、定数倍という二種類の代数的演算を持ち込む。かくのごとき φ の集合をヒルベルト空間 \mathfrak{H} と称しておこう。 $\|\varphi - \psi\| = 0$ となる φ, ψ は同一漢字(位相代数的構造に関して)を表わす。

$x_1 = p \cos q$, $x_2 = p \sin q$, $0 \leq p < +\infty$, $0 \leq q < 2\pi$ とし、 (p, q) 極座標系をも導入する。パターン φ に対する相似変換作用素 T_t を

$$\varphi(x_1, x_2) \rightarrow (T_t \varphi)(x_1, x_2) \triangleq \varphi(e^{-t} p \cos q, (e^{-t} p) \sin q) \quad (1)$$

のごとく定義すると、内積はこの相似変換群 $\{T_t\}_{-\infty < t < +\infty}$ に対して不変である。具体的には $(T_t \varphi, T_t \psi) = (\varphi, \psi)$ 、 $-\infty < t < +\infty$ 、 $\varphi, \psi \in \mathfrak{H}$ と表現される。こ

の事実は $(x_1^2 + x_2^2)^{-1} dx_1 dx_2 = p^{-1} dp dq$ を利用して容易に確かめられよう。そんなわけで、 $\{T_t\}$ は \mathfrak{H} 上でのユニタリ作用素のつくる1パラメータ群¹²⁾であることが判明する。 T_t は連続スペクトルのみを有する自己共役作用素 $H \triangleq p \cdot i^{-1}(\partial/\partial p) = x_1 \cdot i^{-1}(\partial/\partial x_1) + x_2 \cdot i^{-1}(\partial/\partial x_2)$ を用い、 $T_t = \exp(-itH)$ と表わされる(H のスペクトル表現については文献12)参照)。測度的不変量検出法によれば、 H を $\{T_t\}$ から導かれた特徴抽出作用素という。

さて、付録によれば、 $0 \sim 2\pi W$ [rad] の角周波数帯域を有する理想低域空間フィルタ $\theta(H)$ は

$$(\theta(H)\varphi)(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} du \cdot 2\pi W \cdot \pi^{-1} \cdot (2\pi Wu)^{-1} \cdot \sin(2\pi Wu) \cdot \varphi(e^{*u} x_1, e^{*u} x_2) \quad (2)$$

と表現される。このアナログ表現式に対するデジタル表現式を

$$(\theta(H)\varphi) = \sum_{u=-\log_e 17}^{+\log_e 17} (\Delta u)^{-1} \cdot (V_0 - \delta) \cdot \pi^{-1} \cdot \{(V_0 - \delta) u\}^{-1} \cdot \sin\{(V_0 - \delta) u\} \cdot \varphi(e^{*u} x_1, e^{*u} x_2) \quad (3)$$

と決定する。ここに、帯域 $V_0 - \delta$ は $2\pi W = V_0 - \delta \triangleq 10\pi / \log_e 17 \doteq 11.0884$, $\delta = 10^{-4}$ で、キザミ Δu を $\Delta u = (2 \cdot \log_e 17) / 20 \doteq 0.2833$ とし、和分変数 u は $-\log_e 17 \doteq -2.833$ から $+\log_e 17$ までの区間を20等分した値をとる。総和の上限 $\log_e 17$ は $\text{Max}\{|x_1|, |x_2|\} = 17$ に関係している。

そうすれば、小数第一位で四捨五入するとして $(\theta(H)\varphi)_m = \varphi_m$, $m=1 \sim 30$ がなりたち、動径 p の長さを自然対数で目盛った u 軸に関し標本化間隔 $1/2W = \Delta u$ で、ほぼ低域制限されていることが判明したのである。これが振幅拡散作用素 B_{ii} を施し得られたスペクトル帯域の圧縮効果である。一例を Fig. 3 (次頁参照)に示すが、Fig. 2 と全く同一物である。しかしながら、 B_{ii} による帯域圧縮効果は以前からよく知られていたことであり、本研究でもこの効果を立証したことになる。

なお、 B_{ii} を、前章(2)式のごとく和分表現しない前の正確な式は $H_j \triangleq i^{-1}(\partial/\partial x_j)$ として

$$\begin{aligned} \psi_t \triangleq (B_{ii} \eta)(x_1, x_2) &= \exp[-(H_1^2 + H_2^2)/2] \cdot \eta(x_1, x_1) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} dy_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dy_2 (2\pi t)^{-1} \exp[-\{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 + y_2)^2\}/2t] \cdot \eta(y_1, y_2), \quad t > 0 \end{aligned}$$

であり、これは初期条件 $\psi_{t=0} = \eta$ での拡散型偏微分方程式 $(\partial/\partial t)\psi_t = 2^{-1} \cdot (\partial^2/\partial x_1^2)\psi_t + 2^{-1} \cdot (\partial^2/\partial x_2^2)\psi_t$ の解

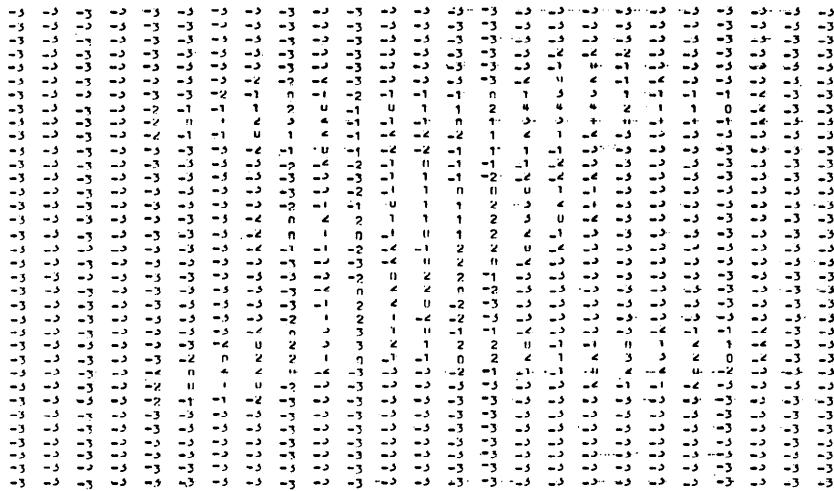


Fig. 3 The output pattern $\theta(H)\varphi_{21}$ from the ideal low pass filter $\theta(H)$.

である^{11,2)}. このような B_{ii} は 文献11) でも生体系の側抑制効果(情報処理機能が横方向に互いに抑制しあっていることから生じる効果)の表現の一部として用いられている. B_{ii} が画像の平滑化に有用な事実は B_{ii} が

$$(\beta_{ii}\eta)(x_1, x_2) = (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda_1 \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda_2 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^{-1} \cdot e^{+i(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2)} \cdot (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \cdot e^{-i(\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2)/2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dy_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dy_2 (y_1^2 + y_2^2)^{-1} \cdot e^{-i(\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2)} \cdot (y_1^2 + y_2^2) \cdot \eta(y_1, y_2)$$

と表現され⁷⁾, この表現式にはパターン η の振幅スペクトルを重み $(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)e^{-i(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2)/2}$ で抑制する働きが示されていることから明らかであろう.

4. 側抑制画像強調回路の設計

高周波成分を低周波成分に比し増幅し画像を尖鋭化するには, たとえばエッジ検出のためにラプラシアン $\partial^2/\partial x_1^2 + \partial^2/\partial x_2^2$ を画像に施すなど³⁾, 様々な手法が存在する. 本節では相似変換群 $\{T_i\}$ の重み付加法的表現でもって生体系の側抑制効果を取り入れられた画像強調回路(尖鋭回路) $f(H) = T_G[q](t)$ を構成する. ラプラシアンなどが単に画像の前処理とのみ密接な関係をもっているに過ぎないのに比し, 本画像強調回路は画像の有する性質, 特徴を測定的不変量として計量化する技法, 特徴抽出技法に直接結びつき, 相似変換群に不変な正規化(位相情報復元可能定理⁷⁾), 特徴抽

出, 類別を行なうのに適している意味で構成される.

さて, インパルス応答 $q(t)$, 空間回路 G_i をそれぞれ

$$q(t) = \nu_0 e^{-\nu_0 t} \{a_0 + b_0^{-1} \sin(b_0 t)\} + Y(t-t_1) \{ \nu_1 e^{-\nu_1(t-t_1)} \{a_1 + b_1^{-1} \sin\{b_1(t-t_1)\}\} \}$$

$$G_i = c_0 + c_1 \cos\{(t+t_1')H\} - c_2 \cos(tH)$$

として

$$T_G[q](t)\phi \triangleq \int_0^t d\tau q(t-\tau) G_\tau \phi \tag{1}$$

と定義される情報処理機能 $T_G[q](t)$ ¹⁰⁾ を考えよう. ここに, $Y(t) = 1$ for $t \geq 0$, $= 0$ otherwise.

q と G との畳み込み積分で表わされている上の $T_G[q](t)$ を具体的に書き改めれば

$$(T_G[q](t)\phi)(x_1, x_2) = \int_0^t d\tau \{ a_0 \nu_0 \cdot e^{-\nu_0(t-\tau)} + b_0^{-1} \cdot \nu_0 \cdot e^{-\nu_0(t-\tau)} \cdot \sin b_0(t-\tau) + Y(t-t_1-\tau) \{ a_1 \nu_1 \cdot e^{-\nu_1(t-t_1-\tau)} + b_1^{-1} \nu_1 \cdot e^{-\nu_1(t-t_1-\tau)} \cdot \sin b_1(t-t_1-\tau) \} \} \cdot \{ c_0 \phi(x_1, x_2) + c_1 \cdot 2^{-1} \cdot \phi(e^{-(t+t_1')} x_1, e^{-(t+t_1')} x_2) + c_1 \cdot 2^{-1} \cdot \phi(e^{+(t+t_1')} x_1, e^{+(t+t_1')} x_2) - c_2 \cdot 2^{-1} \cdot \phi(e^{-t} x_1, e^{-t} x_2) - c_2 \cdot 2^{-1} \cdot \phi(e^{+t} x_1, e^{+t} x_2) \}$$

となる. 上式においては, ν_0, ν_1 はともに減衰振動の時定数の逆数, $2\pi b_0^{-1}, 2\pi b_1^{-1}$ はともに固有振動の周期, t_1 は遅れ定数, t, t_1' はともに受容野の領域(注目している一点での出力に寄与する平面部分領域)の広がりの程度を表わすパラメータ, などと解釈できよう. $Y(t-t_1-\tau)$ が乗せられている項は $t \geq t_1 + \tau$ で始めて機能するものであり, また, 空間回路 G_i が表わ

している上式内の項は、二つの同心円間の振幅の差を、もとの空間点での振幅に加え込む機能を有していることなども容易に読み取れよう。出力 $T_c(q)(t)$ の一点 (x_1, x_2) での振幅は他の同心円上の空間点での振幅にも依存して決まり、まさに、 $T_c(q)(t)$ は生体系側抑制効果を模擬している空間回路である。

実は $a_j > b_j^{-1} > 0, j=0, 1; c_0 \geq c_1 + c_2; \nu_0, \nu_1, c_0, c_1, c_2 > 0$ なる条件を常に付加している。そうすれば、任意の $t > 0, \lambda$ に対し $q(t) > 0, g_t(\lambda) \triangleq c_0 + c_1 \cos(t + t_1')\lambda - c_2 \cos t\lambda \geq 0$ を得、

$$f(\lambda) \triangleq \int_0^t d\tau q(t-\tau)g_t(\lambda) \geq 0 \quad (3)$$

がなりたつ。よって $f(H) = T_c(q)(t)$ は正值¹⁾自己共役作用素となる。むろん、 $t, t_1, t_1' > 0$ としている。この様な $f(H)$ は測度的不変量検出法では特徴抽出作用素 H で構成された情報処理機能と称せられ、 $f(\lambda)$ は $f(H)$ の自己構造式(空間角周波数特性)と呼ばれる。

本シミュレーションでは諸パラメータの値を試行錯誤の後、 $t=9/2W \doteq 2.5, t_1=5/2W \doteq 1.4, t_1'=3/2W \doteq 0.8; a_0=5, a_1=9; b_0=0.3, b_1=0.2; c_0=2, c_1=c_2=1; \nu_0=0.5, \nu_1=4$ と選定したが、この場合の角周波数特性を $|\lambda| \leq V_0 \doteq 11.0885$ なる範囲で Fig. 4 に示す。Fig. 4 から $f(H)$ の最小増幅率, 最大増幅率はそれぞれ, 18.6, 44 であることがわかる。情報処理機能 $f(H)$ の、入力画像 $\theta(H)\phi$ に対する画像強調機能(コントラスト機能)は $\lambda=0$ なる成分である直流分を背景成分と想定すれば(Fig. 3を参照)、空間角周波数 $\lambda(\neq 0)$ の成分については $f(\lambda)/f(0)$ なる如き比で測られるとみてよい。ならば、 $f(H)$ に画像強調機能を強くもたすためには、 $f(\lambda)$ のグラフが $f(0)$ なる値を中心にしてできるだけ上下に激しく振動するように $f(\lambda)$ 内の諸パラメータの値を選定しなければならない。このため、(3)式の右辺の具体形を求めておかねばならないが、これについては作用素に対するラプラス変換法¹⁾²⁾⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾を適用して求めると便利である。Fig. 4のグラフもこのようにして得られた式¹⁰⁾から計算機で数値計算したものである。実は、Fig. 4のグラフはこのような観点から、試行錯誤をくりかえして決定したものである。たとえば、 $\lambda=V_5$ については $f(\lambda)/f(0)=42.7/30.1=1.086$ という直流分、背景に対する増幅率が得られている。

$f(H) = T_c(q)(t)$ については、キザミ $\Delta\tau$ を $\Delta\tau \triangleq \Delta u = 1/2W \doteq 0.2833$, 受容野パラメータ t を $t=9 \cdot \Delta\tau$ なる

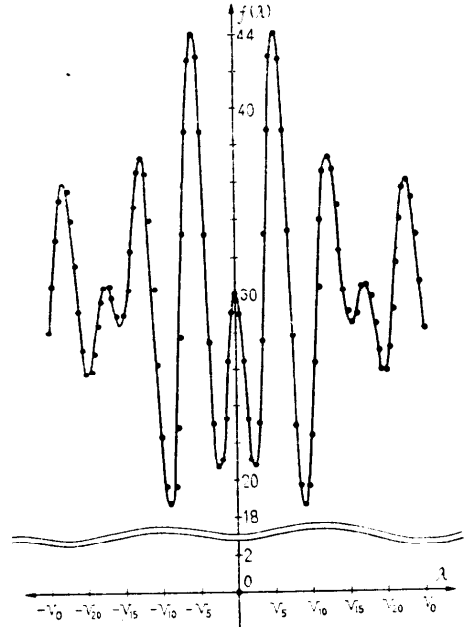


Fig. 4 The angular frequency characteristic of the picture-contrasting circuit $f(H)$, that is, the graph of $f(\lambda)$ where λ ranges through rad numbers such that $|\lambda| \leq V_0 \doteq 11.0885$, and $v_i \triangleq 2\pi W_i + 5$.

どとして、さらに積分変数 τ は $k \cdot \Delta\tau (k=1 \sim 9)$ なる値をとるとして、(2)式を和分近似し表現する。

出力振幅は、やはり小数第一位で四捨五入するものとして、パターン $\theta(H)\phi_{21}$ (Fig. 3参照)を $f(H)$ で強調し得られたパターン $f(H)\theta(H)\phi_{21}$ を Fig. 5 に示す。 $\theta(H)\phi_{21} \in \mathbb{R}$ を考慮し、原点での出力振幅は強制的に0としている。パターン $\theta(H)\phi_{21}$ の最小振幅, 最大振幅はそれぞれ, $-3, +4$ で、出力パターン $f(H)\theta(H)\phi_{21}$ のそれらは、それぞれ, $-30+38$ であるゆえ、確かに $f(H)$ で漢字成分と背景との差が強調される。簡単には、画像 $\psi = \psi(x_1, x_2)$ の振幅に関するコントラストの度合い c_ψ は $a \triangleq \text{Max}/\psi(x_1, x_2), b \triangleq \text{Min}/\psi(x_1, x_2)$ として、 $(a-b)/(a+b)$ で測られると考えてよいゆえ、情報処理機能 $f(H)$ の備えている側抑制の働きの画像 $\theta(H)\phi_{21}$ に対するコントラスト効果は、その出力画像 $f(H)\theta(H)\phi_{21}$ のコントラストの度合い(計算してみると、 $(+38-30)/(38+(-30))=8.5$ である)が入力画像 $\theta(H)\phi_{21}$ コントラストの度合い(計算してみると、 $(4-(-3))/(4+(-3))=7$ である)よりも大であることでも説明される。Fig. 5の背景振幅はFig. 3のその約10倍になっているが、漢字成分の振幅については必ずしも

$\theta_{22}(H)\varphi_{21}$ from the picture-contrasting circuit $f(H)$.
 そうでない箇所が多数見られる。いいかえれば、 $f(H)\theta(H)\varphi_{21}$ の最大振幅は 4 (入力パターンの最大振幅) $\times 44$ ($f(H)$ の最大増幅率) = 176, 最小振幅も -176 に近くなってよいはずであるが、これらがそれぞれ, 38, -30 であり, かなり違いがある事実は一空間点での振幅が, 他の空間点での振幅に抑制されて決定されるという側抑制効果を $f(H)$ が有している事柄の一端を示している。

Fig. 5 The output pattern $f(H)\theta(H)\varphi_{21}$ from the picture-contrasting circuit $f(H)$.

5. 画像分解・画像強調空間回路塊
 現在のところ, 画像を分解する一般的な手法は存在しないと考えられている¹³⁾。本節の画像分解法は, 分解成分の総和がもとの画像に等しくなり, さらに, それぞれの画像成分が互いに直交している性質 (直交直和分解性質) を有しており, 一見, 他愛のない原理からの産物である (しかしながら, この両性質は相似変換群に不変な認識情報処理としての正規化・特徴抽出・類別を達成する上において, 基本的な役割を果たす⁷⁾⁹⁾¹⁴⁾)。理想帯域空間フィルタ $\theta_i(H)$ を相似変換群 $\{T_i\}$ の重みつき一次結合で表現し, 画像分解機能を達成しようとするところに, その特異性があるのである。

さて, 漢字画像パターン φ の分解は
 i) $\varphi(x_1, x_2) = (\theta(H)\varphi)(x_1, x_2) = \sum_{l \in L} (\theta_l(H)\varphi)(x_1, x_2)$ (直和分解)
 ii) $(\theta_k(H)\varphi, \theta_l(H)\varphi) = 0$ ($k \neq l$) (直交分解)
 なるごとく, 理想帯域空間フィルタ塊 $\theta(\vec{H}) \triangleq \{\theta_i(H); l \in L\}$ を構成し, $\varphi(x_1, x_2) \rightarrow (\theta(\vec{H})\varphi)(x_1, x_2) \triangleq \{(\theta_i(H)$

Table 1 The supremum $2\pi W_l$ of the angular frequency band $S_l \triangleq \{|\lambda|; 2\pi W_{l-1} < |\lambda| \leq 2\pi W_l\}$ of the l th filter $\theta_l(H)$ in the family $\theta(\vec{H}) = \{\theta_i(H); l=1 \sim 25\}$ of ideal band pass spatial filters.

l	$2\pi W_l$	l	$2\pi W_l$	l	$2\pi W_l$
0	0	9	1.1098	8	4.5603
1	0.0649	10	1.3358	9	5.2146
2	0.1408	11	1.5918	20	5.9462
3	0.2288	2	1.8812	1	6.7635
4	0.3306	3	2.2077	2	7.6758
5	0.4476	4	2.5755	3	8.6930
6	0.5819	15	2.9893	4	9.8265
7	0.7355	6	3.4542	5	11.0884
8	0.9106	7	3.9758		

$\varphi(x_1, x_2); l \in L\}$ のごとく行なわれる。 $\theta(\vec{H})$ を画像分解回路塊と称する。5個の漢字カテゴリを対象としているゆえ, 測度的不変量検出理論⁷⁾によれば, 全カテゴリ

総数の自乗, つまり $25(=5^2)$ 個のフィルタを構成すれば, 認識処理にとって十分である¹⁴⁾。

そんなわけで, 全角周波数帯 $S \triangleq \{|\lambda|; |\lambda| \leq 2\pi W\}$ を互いに交差しない 25 個のスペクトル帯 $S_l \triangleq \{|\lambda|; 2\pi W_{l-1} < |\lambda| \leq 2\pi W_l\}$, $l=1 \sim 25$ に分割し, 各 S_l をその通過帯域とする理想帯域フィルタ $\theta_l(H)$ を構成すればよい。実は, $2\pi W_0=0$, $2\pi W_l=(V_0/25) \cdot (e^{(l-25)/25})^2 \cdot l - \delta$ ($l=1 \sim 25$) と選定しており, これが **Table 1** に示されている。

$\theta_l(H)$ の理論式は付録に記している。シミュレーションに必要な和分表現式は 3 章における (2) 式から (3) 式への変換と同様にして求められる。

$\theta(H)\varphi_{21}$ (Fig. 3) の, 22 番目の理想帯域フィルタ $\theta_{22}(H)$ からの出力パターン $\theta_{22}(H)\theta(H)\varphi_{21}$ を **Fig. 6** に示す。やはり小数第一位で四捨五入した関係上, -1, 0, +1 なる 3 値のみが出力されている。このままでは漢字成分が抽出され分解された様子を見て取るとはかなり困難であるが, この漢字成分が $f(H)$ で強調された波形 $f(H)\theta_{22}(H)\theta(H)\varphi_{21}$ を見れば明らかになる。この浮かび上がってきた漢字画像成分を **Fig. 7** に示す。ほぼ二つの長方形がパターン $\theta(H)\varphi_{21}$ から分解回路 $\theta_{22}(H)$ で抽出され, これの各座標振幅成分が強調回路 $f(H)$ の有する側抑制効果で互いに抑制せられて得られている。

また, たとえば, $\theta_4(H)$ が漢字の $x_1 > 0, x_2 > 0$ の部分と $x_1 < 0, x_2 < 0$ の部分とを他の二つの部分に比し抽出し, $\theta_{13}(H)$ が漢字の左下から右上に向かう斜

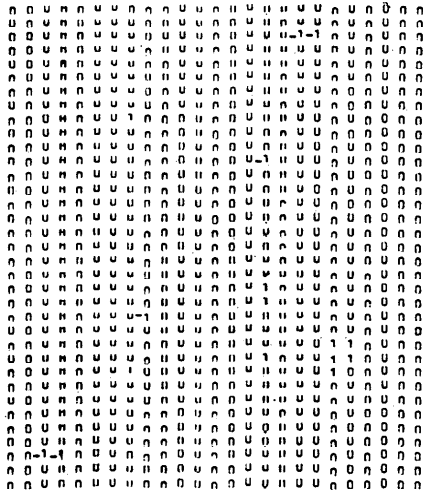


Fig. 6 The output pattern $\theta_{22}(H)\varphi_{21}$ from the 22nd ideal band pass spatial filter $\theta_{22}(H)$.

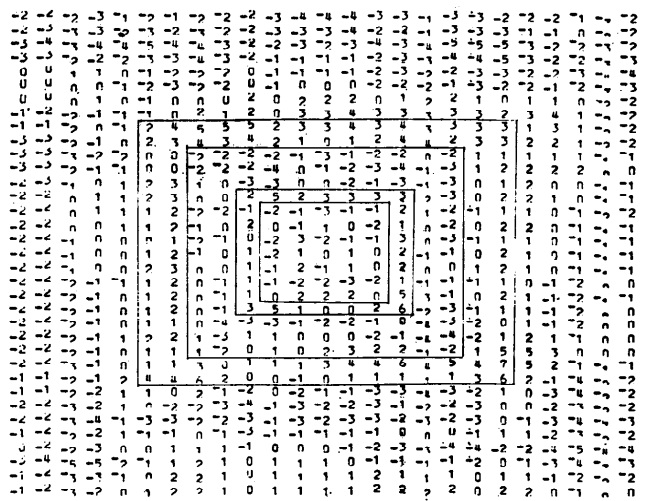


Fig. 7 The output pattern $f(H)\theta_{22}(H)\theta(H)\varphi_{21}$ from the picture-contrasting spatial circuit $f(H)$.

線を抽出する傾向がある事実も判明している。これらの事実は、むしろ特徴抽出作用素 H が相変換群 $\{T_i\}$ から決定されていることに本質的に関係するものである。 $f_i(H) \triangleq f(H) \cdot \theta_i(H)$ として、 $f(H) \triangleq \{f_i(H); i=1 \sim 25\}$ を画像分解・強調空間回路塊と称するが、 $i=4, 13, 22$ 以外の $f_i(H)$ の機能については上述のごとく簡単にいい表わされ得ないものが多いことを指摘するのみで、その詳細は紙数上割愛せざるを得ない。

以上、紙面の都合上、21番目の漢字 φ_{21} の処理結果のみを説明した。他の29個の漢字についてもほぼ同様である。この実験事実は、理論的には、i), ii) のそれぞれにおいて φ の代りに $f(H)\varphi$ を考えて得る二つの関係式が意味するところの画像分解・強調性質からいえること（この両性質が基になって、漢字 φ の特徴の塊まりが $(f_i(H)\theta(H)\varphi, \theta(H)\varphi)/(\theta(H)\varphi, \theta(H)\varphi)$, $i=1 \sim 25$ なるごとく具体的に抽出され、漢字パターンの大きさによらない認識処理へと結びつくのである）である。最後に、本計算機シミュレーションはTOSBAC-3400のFORTRANプログラムでなされたことを付言しておく。

6. むすび

本計算機シミュレーションは相変換群に不変な性質を有する画像処理技術を確立するための基礎となるものである。測度の不変量検出理論⁷⁾⁻¹⁰⁾¹²⁾¹⁴⁾に基づいた正規化・特徴抽出・類別のシミュレーションについ

ては、別の機会に説述するつもりである。たとえば、類別については、本研究での30個の漢字パターンがすべて正認識されるという結果も得ているし、正類別されるに必要な程度に質が落とされた画像を“復元”する問題、いわゆる画像復元問題¹³⁾に関しても、位相情報復元可能定理⁷⁾を援用して良好な結果が得られている。4章で説明したところの側抑制回路 $f(H)$ による画像強調効果は、視覚的にはよく捕えられていないが、画像の良好な復元が可能になるのは $f(H)$ の特性が Fig. 4のごとく直流分に比し、振動していることにも関係しているのである。

更に高度な認識は、平行移動、回転、相変換などの移動変換群¹²⁾に不変な認識システム⁷⁾¹⁵⁾、平均類似度法に基づく認識システム⁷⁾⁸⁾、phase限定的に完備な特徴量塊を採用した認識システム⁷⁾⁹⁾らを並列構成し、各種自己組織化過程を導入し、達成されるだろうというのが著者の考えである¹⁴⁾。

謝辞 工学院大学太田芳雄教授、同奥野治雄教授、電通大岡田幸雄教授、樋渡潤二NHK基礎研究所長、ならびに芝浦工大の卒論学生の諸氏、関係者の方々に深謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 吉田耕作：近代解析，共立出版（1963）
- 2) 溝畑茂：偏微分方程式論，岩波書店（1965）
- 3) 福島邦彦：アナログ多層回路網による特徴抽出，電子通信学会論文誌C，Vol. 51-C，No. 7（1968）

- 4) 藤井克彦, 森田竜弥: 視覚神経系を模擬した手書き文字認識機構, 電子通信学会論文誌C, Vol. 52-C, No. 7 (1969)
- 5) 高浜幸太郎, 栗岡豊: 同化および対比現象の受容域モデルによる解析, 電子通信学会論文誌D, Vol. 55-D, No. 1 (1972)
- 6) 渡部敏: 視覚系における情報処理, 情報処理, Vol. 14, No. 2 (1973)
- 7) 鈴木昇一: 測度的不変量検出形認識系の構成理論, 電子通信学会論文誌D, Vol. 55-D, No. 8 (1972)
- 8) 鈴木昇一: 平均類似度の概念に基づく位相不変的特徴抽出・類別法, 芝浦工業大学研究報告, Nol 18 (1974)
- 9) 鈴木昇一: 認識システムの集まりとその情報処理機能, 芝浦工業大学研究報告, Nol 18(1974)
- 10) 鈴木昇一: 同化対比効果をもつ受容域モデルの具体的構成, 電子通信学会パターン認識と学習研究会資料, PRL 72-59 (1972-10)
- 11) 安田稔, 樋渡消二: 網膜における時空間の情報処理過程のモデル, 電子通信学会論文誌C, Vol. 53-C, No. 11 (1970)
- 12) 鈴木昇一: 同形変換と特徴抽出回路 (画像処理回路の研究), 昭和47年度電気関係学会関西支部連合大会, G 9-14 (1972)
- 13) A. ローゼンフェルド: 電子計算機による画像処理, 石田ほか共訳, 共立出版 (1971)
- 14) 鈴木昇一: 認識工学, 柏書房, (1974)
- 15) 鈴木, 磯谷: ボカされた手書き漢字の正規化可能性とその電算機シミュレーション, 電子通信学会電子計算機研究会資料, EC 72-59 (1973-03)

付録 作用素に対するフーリエ変換法⁹⁾¹⁴⁾

自己共役作用素 H の関数 $g(H)$ を考えよう.

$$h_g(u) \triangleq (2\pi)^{-1} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda e^{i\lambda u} g(\lambda) \quad (A-1)$$

として,

$$\sup_{\lambda} |g(\lambda) - \int_{-n}^{+n} du h_g(-u) e^{i\lambda u}| \rightarrow 0 (n \rightarrow +\infty) \quad (A-2)$$

が成立するような, つまり $\int_{-n}^{+n} du h_g(-u) e^{i\lambda u}$ が $g(\lambda)$ に一様収束するような関数 $g(\lambda)$ を考えよう. この場合, φ を任意のパターンとして

$$g(H)\varphi = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_{-n}^{+n} du h_g(-u) (e^{i u H} \varphi) \quad (A-3)$$

がなりたつと考えてよい. これを作用素に対するフーリエ変換法と称する. この事柄の詳細については文献9), 14)にある. このフーリエ変換法と作用素論的相関関数法との関係に関する具体的な詳述も省略するが, たとえば, この変換法を適用すれば, 入力 φ と

$g(H)$ からの出力 $g(H)\varphi$ との規格化相関の程度, つまり $g(H)$ の定める測度的不変量¹⁷⁾ $(g(H)\varphi, \varphi) / (\varphi, \varphi)$ は

$$(g(H)\varphi, \varphi) / (\varphi, \varphi) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} du h_g(-u) (e^{i u H} \varphi, \varphi) / \int_{-\infty}^{+\infty} du \cdot 2W \cdot S_g^{(W)}(u) (e^{i u H} \varphi, \varphi)$$

と表わされ, $g(H)$ として $f_l(H)$ を採用すれば, 漢字 φ の l 番目の特徴量 $(f_l(H)\varphi, \varphi) / (\varphi, \varphi)$ に対する作用素論的表現が得られることを指摘しておこう (未定義記号については以下を参照).

上のフーリエ変換法では $h_g(u)$ を自己共役作用素 H の関数 $g(H)$ の自己構造関数という. この様に, H で構成された情報処理機能 $g(H)$ はある場合, ウニタリ作用素のつくるパラメータ群 $\{T_u\}_{-\infty < u < +\infty}$ の加法的1次結合の極限で表現される. ここに, $T_u \triangleq e^{-i u H}$ である.

画像を分解する機能を有する空間回路塊を構成するのには, H のスペクトル帯 S の成分のみをそのまま通し, 他のスペクトル成分を完全にシャ断する空間フィルタ $\theta(H)$ が必要である. $\theta(H)$ のフーリエ変換法による表現を求めよう. $S \triangleq \{\lambda; |\lambda| \leq 2\pi W\}$ とすれば, $\theta(\lambda) = 1$ for $|\lambda| \leq 2\pi W$, $= 0$ otherwise であるゆえ, その構造関数 $h_\theta(u)$ は

$$h_\theta(u) = (2\pi)^{-1} \cdot \int_{-2\pi W}^{+2\pi W} d\lambda e^{i\lambda u} \cdot 1 = 2W \cdot S_g^{(W)}(u)$$

と求められる. $S_g^{(W)}(u)$ は標準化関数で, $S_g^{(W)}(u) \triangleq (2\pi W u)^{-1} \cdot \sin(2\pi W u)$ である. よって,

$$\theta(H)\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} du \cdot 2W \cdot S_g^{(W)}(u) \cdot e^{i u H} \varphi \quad (A-4)$$

と表現できる. この表式は (A-2) なる条件が成立しないが, パターン φ が $\lambda = \pm 2\pi W \in \sigma(H)$ (H のスペクトル系¹³⁾) なるスペクトル成分を含まない限り正しいとみてよい.

同様に, $S_l \triangleq \{\lambda; 2\pi W_{l-1} < |\lambda| \leq 2\pi W_l\}$ を通過帯域とする理想帯域空間フィルタ $\theta_l(H)$ についてはその構造式 $\theta_l(\lambda)$ は $\theta_l(\lambda) = 1$ for $2\pi W_{l-1} < |\lambda| \leq 2\pi W_l$, $= 0$ otherwise であるゆえ, ウニタリ作用素群 $\{T_u\}$ による積分表示式として

$$\theta_l(H)\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} du (2W_l \cdot S_g^{(W_l)}(u) - 2W_{l-1} \cdot S_g^{(W_{l-1})}(u)) \cdot e^{i u H} \varphi \quad (A-5)$$

を得る.

(昭和48年11月28日受付)

(昭和49年6月12日再受付)