論 文

抽出された特徴による手書き漢字構造の再生*

鈴 木 昇 一**

Abstract

There is very little investigation on the process of an input pattern being normalized by making use of the topologically invariant features extracted from it. In this paper, attention will be paid mainly to that a kind of automatically input pattern-normalizing process may be explained by the faculty of reproducing the corresponding input pattern (which is not structured) by making good use of a ready-made mean informational pattern in co-operation with the topologically invariant features extracted from the input pattern, where the reproduced pattern is called a structured informational pattern.

That is, this paper mainly discusses a method of reproducing an input pattern so that the reproduced pattern may be correctly recognized, which is provided with the faculty of automatically normalizing the corresponding input pattern by putting the topologically invariant features to use. In addition, the corresponding reproduced patterns (which remain invariant over an expansion-and-contraction transformation group) of hand-written Chinese characters are determined with a computer simulation and the related explanation is given in detail.

1. まえがき

視覚的なパターンの知覚的認識に関し，ある文献[4]では次の指摘がなされている．1°) 入力パターンを記憶し認識するとは，**その入力パターンから抽出された特徴と一致する特徴を持つ一つの内部表現パターン**を記憶の中で構成し発見することである．

本論文では，この種の認識の働きをむしろ，入力パターンに対する予備処理の一つである“入力パターンの**正規化の働き**”とみる．すなわち，その入力パターンから抽出された特徴と一致する特徴を持つ一つの内部表現パターンこそはその入力パターンの構造を再現したものとしての正規化パターンであり，正規化過程とは入力パターンのこの種の内部的表現を確保する過程であるとみる．この理由を下に説明してみよう．

指摘するまでもなく，2°) 入力パターンを正規化するとはその入力パターンを，この入力パターンの帰属するある一つのカテゴリ（**類概念**）の代表的なパターンにより近づけ (**clustering**)，しかもこの入力パターンの帰属していない他のカテゴリの代表パターンからより引き離す (**separation**) ことであろう．しかしながら，正規化の段階ではもちろんその入力パターンの帰属すべきカテゴリは判明していないゆえ，事実上，次のように指摘されねばならぬであろう．すなわち，3°) 入力パターンの正規化とは，ある**同値関係**（**付録1を参照**）によって，観測されたパターンを類別し，各同値類（付録1を参照）から**代表要素**（**正規化パターン**）**を取り出す過程**である[2]．

問題は，2° の定義による正規化の機能が 1° の定義による機能に転換され得るような，3°でいう同値関係を入力パターンの集合上にどのような形式で持ち込むかであろう．それには次の事実に注目すればよい．抽出された特徴同志が互いに一致する二つの入力パターン φ, η の間の関係を $\varphi \sim \eta$ と書けば，この2元関係$\sim$

* A Reproduction of the Structure of a Handwritten Chinese Character by Making Use of Extracted Features by Shoichi SUZUKI (The Mathematical Information Science 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

は入力パターンの集合 Ψ の上で同値関係を定義する，この際，もし，抽出された特徴が座標系のある種のとり方に依存しないという意味で**位相不変量**[3),6),7),8)]であり，それゆえ，本論文におけるようにパターンの大きさによらないものとすれば，この同値関係$\sim$も実は同様な性質をもつことになる．ならば，いま実際に認識システムが受け取った入力パターン $\varphi\in\Psi$ を含む同値類 $[\varphi]\triangleq\{\psi;\ \psi\sim\varphi, \psi\in\Psi\}$ の内から比較的形の整ったその代表元 $\eta\in[\varphi]$ を取り出すことができれば，この η が**正規化パターン**といえよう．

こういう訳で，**抽出される特徴同志の相等関係によって定義された同値関係$\sim$**に関し，入力パターン集合 Ψ からその商集合 $\Psi/\sim\triangleq\{[\varphi];\ \varphi\in\Psi\}$ を得る過程(付録1でいう商変換過程)が本論文では，正規化の操作とされる．

本論文でなされる研究の目的は，手書き漢字φのこの種の正規化パターン[3),6),7),11)] $\mathfrak{Y}_H\Xi(\varphi)=\Sigma_{l\in L}X_H{}^{[f_l]}(\varphi)\cdot\theta_l(H)\xi$ が実のところ，φ (正確にいえば，同値類 $[\varphi]$) の構造をどの程度反映して再生するかどうかを計算機シミュレーションで検討することにある*．

2.　正規化パターンとしての構造モデル

抽出された特徴の集まりを用いて正認識される程度に入力パターンの構造を再生する過程についての研究は現在ほとんどなされていなくて**，神経生理学や心理学においても研究上の戦略もさだかでないほど未知の領域に属するともいわれている．以下で説明される正規化パターン $\mathfrak{Y}_H\Xi(\varphi)$ は入力パターン φ から抽出された特徴の集合 $\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi)=\{X_H{}^{[f_l]}(\varphi);\ l\in L\}$ を用いて φ の構造を再生して得られたものであり，この意味で，視覚認識システムにおける入力パターン φ の**構造化パターン**[11)]，あるいは**構造モデル**(structured model) に相当すると考えられる***．

平面上の直角座標系 x_1-x_2 をとる．各手書き漢字 φ はこの平面上の関数であり，$\overline{}$を複素共役の意として，内積 $(\varphi,\eta)=\int_{-\infty}^{+\infty}dx_1\int_{-\infty}^{+\infty}dx_2(x_1{}^2+x_2{}^2)^{-1}\cdot\varphi(x_1,x_2)\cdot\overline{\eta(x_1,x_2)}$ が与えられた Hilbert 空間 $\mathfrak{H}$[1)] の元とされる．$\mathfrak{H}$ の元としての φ はそのノルム $\|\varphi\|\triangleq\sqrt{(\varphi,\varphi)}$ が有限である．

各手書き漢字 $\varphi=\varphi(x_1,x_2)$ に対し，$(T_t\varphi)(x_1,x_2)\triangleq\varphi(e^{-t}x_1,e^{-t}x_2)$. $-\infty<t<+\infty$，と定義される**相似変換作用素** T_t は $\mathfrak{H}$ での**ウニタリ作用素**[1)]であり[5)]，**自己共役作用素** $H\triangleq\Sigma_{j=1}{}^2x_j i^{-1}(\partial/\partial x_j)(i\triangleq\sqrt{-1})$を用いて****，$T_t=e^{-itH}\triangleq\Sigma_{n=0}{}^{+\infty}(n\,!)^{-1}(-itH)^n$ と表わされる[5)]．**作用素に対するフーリエ変換法**[3),5)]を適用すると，ウニタリ作用素 e^{-itH} を用いて，理想低域フィルタ $\theta(H)$，各理想帯域フィルタ $\theta_l(H)$ $(l\in L)$，側抑制空間回路 $f(H)$ が**付録2**に示すように構成される[5)]．理論上からは，入力パターンの集合 Ψ とは実は，$\Psi\triangleq\{\varphi;\ \|f(H)\varphi\|<+\infty, \varphi\in\mathfrak{H}\}$ のことであるとされる．

各手書き漢字 $\varphi\in\Psi$ はまず，帯域 S を有する**理想低域フィルタ** $\theta(H)$ で，i°) $\varphi\to\theta(H)\varphi$ と低域制限される．$\theta(H)\varphi=\varphi$ が成立するように，帯域 S を選ぶことが望ましい[5)]．

次に，低域制限された各手書き漢字 $\theta(H)\varphi$ は帯域 S_l を有する**各理想帯域フィルタ** $\theta_l(H)$ で，ii°) $\theta(H)\varphi\to\theta_l(H)\theta(H)\varphi$, $l\in L$ と分解される．ここに，$S=\cup_{l\in L}S_l$, $S_j\cap S_l=\phi$ (空集合) $(k\neq l)$, $S_l\neq\phi(\forall l\in L)$ と選ばれており，よって，$\theta(H)\varphi=\Sigma_{l\in L}\theta_l(H)\varphi$ が成立している．

さらに，上のごとく分解して得られた各成分パターン $\theta_l(H)\theta(H)\varphi$ は**側抑制空間回路** $f(H)$ で，iii°) $\theta_l(H)\theta(H)\varphi\to f(H)\theta_l(H)\theta(H)\varphi$, $l\in L$と強調される．

i°，ii°，iii° の後，各手書き漢字 φ の**特徴量の集合** $\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(\varphi)=\{\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(\varphi);\ l\in L\}$ の各成分 $\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(\varphi)$ が，帯域制限された入力 $\theta(H)\varphi$ と分解・強調された各出力 $f(H)\theta_l(H)\theta(H)\varphi$ とを用いて，iv°) $\varphi\to\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(\varphi)\triangleq(f(H)\theta_l(H)\theta(H)\varphi,\ \ \theta(H)\varphi)/(\theta(H)\varphi, \theta(H)\varphi)$ という形式で求められる．各 $\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(\varphi)$ は**付録 4** に示しているように，H と可換な任意のウニタリ作用素の集合のなす群のもとで**位相不変量**であり，$f_l(H)\triangleq f(H)\theta_l(H)$ と φ とで規定された**測度的不変量**[3)~8)]と称されるものである．

ここで，各手書き漢字 φ の属している各カテゴリ $\mathfrak{C}_j$ の代表パターン $\omega^{(j)}$ にその生起率 $p^{(j)}$ をかけて総和して得られるパターン $\xi=\Sigma_{j\in J}p^{(j)}\cdot\omega^{(j)}$ をもちだす．ξ はカテゴリ集合 $\mathfrak{C}=\{\mathfrak{C}_j;\ j\in J\}$ 上の**平均化**

---

* 本シミュレーションは発表済のシミュレーション[5)]の続編としての意味を持っており，使用される諸記号は文献 3)，5) に従う．

** 古くから行われているモーメントによるパターンの正規化は入力パターンのモーメントが標準的なパターンのモーメントに一致するようにその入力パターンに“同形な”線型変換を施すことであるが，この変換過程は入力パターンの構造の再生過程とは通常，みなされないと著者には思える．

*** 入力パターン φ に対し $\mathfrak{Y}_H\Xi(\varphi)$ を求めれば，本認識システムが φ をどの程度変形し，φ の構造をどのように捕えて認識したかが判明する．

**** H は連続スペクトルのみをもち，$\phi_\lambda(p)\triangleq(2\pi)^{-1/2}\cdot e^{+i\lambda\log_e P}$, $P\triangleq\sqrt{x_1{}^2+x_2{}^2}$ として，$H\phi_\lambda=\lambda\phi_\lambda$ が成り立つので，H のスペクトル λ は変数 $z\triangleq\log_e P$ に関しては角周波数の意味をもつ．

情報パターンと呼ばれる．今，一つの非負定数 $e_H{}^{[l]}$ の集まり $\vec{e}_H{}^{[l]}=\{e_H{}^{[l]};\ \in L\}$ を $0<e_H{}^{[l]}\leqq\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\theta(H)\xi)$ を満たす条件下で，**自己組織化アルゴリズム**[9]で求めておく．$\vec{e}_H{}^{[l]}$ を**閾値の集合**という．というのは，$Y(u)=1(u\geqq0),\ =0(u<0)$ という関数 $Y=Y(u)$ をもちだして，各手書き漢字 φ の特徴量 $\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)$ を $X_H{}^{[l]}(\varphi)\triangleq Y(\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)-e_H{}^{[l]})$ という具合に符号化するからである．2 値**符号化特徴量** $X_H{}^{[l]}(\varphi)$ は特徴量 $\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)$ が最大雑音レベル $e_H{}^{[l]}$ より小か，以上かで真の特徴量が存在しないのか，存在するのかをそれぞれ，0，1で表わしている．この過程は v°) $\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)\to X_H{}^{[l]}(\varphi)$ と表わされ，2値特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[l]}(\varphi)=\{X_H{}^{[l]}(\varphi);\ l\in L\}$ が得られる．

以上の i°～v° を基に，各手書き漢字 φ の構造化情報パターンあるいは**構造モデルとしての正規化パターン** $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が各手書き漢字 φ の**構造の再生過程**

$$\varphi\to\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)\triangleq\Sigma^{l\in L}X_H{}^{[l]}(\varphi)\cdot\theta_l(H)\xi$$

として求められる．ここに，Ξ は $\Xi\triangleq[\overrightarrow{\theta(H)};\ \xi]$ と定義されており，**記憶構造**と称される．$\overrightarrow{\theta(H)}$ は $\overrightarrow{\theta(H)}=\{\theta_l(H);\ l\in L\}$ と定義されている．

$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ の**構造形式**をみてわかるように，各最大雑音レベル $e_H{}^{[l]}$ より小か，以上かで各特徴量 $\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)$ が2値化され得られた各特徴量 $X_H{}^{[l]}(\varphi)=Y(\mathfrak{F}_H{}^{[l]}(\varphi)-e_H{}^{[l]})$ で，記憶構造 $\Xi=[\overrightarrow{\theta(H)};\ \xi]$ 内の各結合要素パターン $\theta_l(H)\xi$ をスイッチして得られたものが $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ であり，各入力手書き漢字 φ の形状の大きさなどはカテゴリ集合 $\mathfrak{C}$ 上の**平均化情報パターン ξ に規格化されている．**

さて，**付録3**によれば，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ は入力手書き漢字 φ と同一の2値特徴量の集合を備えている．つまり，$\vec{X}_H{}^{[l]}(\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi))=\vec{X}_H{}^{[l]}(\varphi)$ が成り立っている[6),11)]．この事態を同値関係，同値類で表現し直してみよう．同値関係 $\varphi\sim\eta$ は等式 $\vec{X}_H{}^{[l]}(\varphi)=\vec{X}_H{}^{[l]}(\eta)$ で定義され，φ を含む同値類 $[\varphi]$ は $[\varphi]\triangleq\{\eta;\ \eta\sim\varphi,\ \eta\in\Psi\}$ と定義される．よって，同値関係～を用いて上述を表現すれば，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)\sim\varphi$ となり，同値類 $[\varphi]$ を用いて表現すれば，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)\in[\varphi]$ となる．これが正規化の操作 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ のもつ**再現性**である*.

それのみならず，**付録4**によれば，次のような**不変性**も成り立っている：相似変換作用素 $T_t=e^{-itH}$ は H と可換な[1)]ウニタリ作用素である．一般に，U を H と可換なウニタリ作用素とすれば，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(U\varphi)=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が成り立ち，当然ながら，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(U\varphi)\sim\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ も成り立っている．

正規化写像 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ のもつ上述の再現性，不変性を心理学的見地から意味づけよう．感覚器官上に与えられる刺激像の特性の変化にもかかわらず，知覚される特性（位置，大きさ，形，明るさなど）が比較的恒常を保つことを心理学では一般に，**知覚の恒常性**と称している．Uを H と可換なウニタリ作用素として，*a*)$U\varphi\sim\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(U\varphi)$（再現性），*b*) $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(U\varphi)\sim\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$（不変性），*c*) $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)\sim\varphi$（再現性）が成り立っていることからわかるように，上で導入された**同値関係～は少なくとも入力手書き漢字 φ の大きさに依存しない形式をもっている**．それで，大きさに関する一種の知覚の恒常性が少なくとも備わった形式で，φ を含む同値類 $[\varphi]$ の代表元つまり正規化パターンが構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ として再生され得られている．

3. 計算機シミュレーション

前章では，視覚認識システムにおける手書き漢字 φ の正規化パターンとしての，構造化情報パターンあるいは構造モデル $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が少なくとも φ の大きさによらない形式（知覚の恒常性）で決定された**．その際，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)=\Sigma_{l\in L}X_H{}^{[l]}(\cdot)\cdot\theta_l(H)\xi$ という正規化写像は入力手書き漢字 φ から抽出された2値特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[l]}(\varphi)=\{X_H{}^{[l]}(\varphi);\ l\in L\}$ を用いて，φ の属する同値類 $[\varphi]$ の代表元 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ を決定する働きを持っていることが指摘された***．本章では，その計算機シミュレーション結果を簡単に説明しよう．

入力パターン集合 Ψ の部分集合として，30個から成る **8 値化手書き漢字** φ_m の集合 $\Phi=\{\varphi_m;\ m=1\sim30\}$ を選んでいる．各 φ_m はその振幅が $-3\sim+4$ のいずれかの値をとる8値化パターンであり，順にカテゴリ $\mathfrak{C}_1,\ \mathfrak{C}_2,\ \mathfrak{C}_3,\ \mathfrak{C}_4,\ \mathfrak{C}_5$ と名付けられる“芝”，“浦”，“工”，“業”，“大”のいずれかの漢字カテゴリに属している．実は，カテゴリ $\mathfrak{C}_j$ に属する漢字パターンの集

---

* $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)=\varphi$ が成立するとき，φ は写像 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ の**不動点**といえるが，**付録3** によれば，精確には，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ は φ の特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[l]}(\varphi)$ と同一の特徴量の集合をもつ，写像 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ の不動点として再現されている，と主張できる．

** 手書き漢字をとくに意識して，認識率を高めるために“大きさの変動のもとで不変な処理”をしようと思った訳ではなくして，これはただ単に著者の興味に基づいている．

*** 一般には相異なるカテゴリに属するパターンが同じ同値類に属することがある．この不都合な事態は本シミュレーションでは生じなかったが，生じると考えられる場合には phase 限定的に完備な[5)-7)]特徴量の集合を導入することで避けられる見通しを持っている．

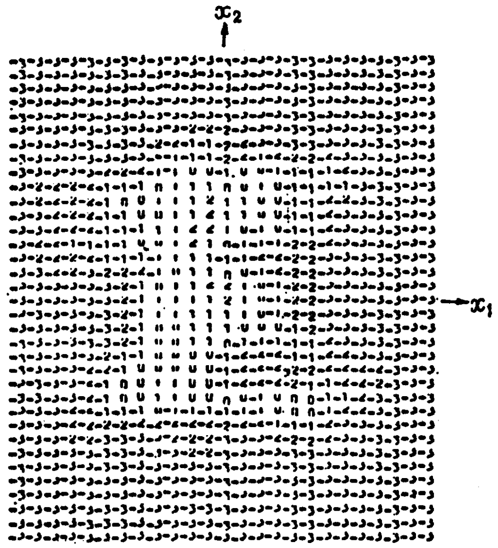

Fig. 1 The mean informational pattern $\xi=\xi(x_1, x_2)$, where the horizontal axis $x_1=0, \pm1, \pm2, \cdots, \pm12$ and the vertical axis $x_2=0, \pm1, \pm2, \cdots, \pm17$.

合 Φ_j は $\Phi_j=\{\varphi_{j+5n}; n=0,1,2,\cdots,5\}$ である．$-12\leqq x_1\leqq +12$, $-17\leqq x_2\leqq +17$ の範囲で示される平面領域の整数値座標上でのみ，各手書き漢字 $\varphi_m=\varphi_m(x_1,x_2)$ の振幅が与えられている．

$\mathfrak{C}_j$ の代表パターン $\omega^{(j)}$ とその生起率 $p^{(j)}$ はそれぞれ，$\omega^{(j)}=\varphi_{15+j}$, $p^{(j)}=1/5$ とされた．全カテゴリ $\mathfrak{C}=\{\mathfrak{C}_j; j=1\sim5\}$ 上の**平均化情報パターン** $\xi=\Sigma_{j=1}{}^5 p^{(j)}\omega^{(j)}$ を **Fig. 1** に示す．

内積 (φ,η) の近似式として $(\varphi,\eta)=\Sigma'_{x_1=-12}{}^{+12}\Sigma'_{x_2=-17}{}^{x_2=+17}(x_1{}^2+x_2{}^2)^{-1}\varphi(x_1,x_2)\cdot\overline{\eta(x_1,x_2)}$, $\overline{}$ は複素共役の意，を採用している．総和記号 Σ' は $x_j=0$ の部分を除いて総和することを意味している．

低域フィルタ $\theta(H)$ を各帯域フィルタ $\theta_l(H), l\in L$ の和として表現するとき，その総数はカテゴリ総数の自乗以下でよいが，本シミュレーションでは，$L=\{1,2,\cdots,25\}$ としている*.

測度的不変量の集合 $\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(\varphi_m)=\{\mathfrak{F}_H{}^{[fl]}(\varphi_m); l\in L\}$ を2値化して，特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi_m)=\{X_H{}^{[fl]}(\varphi_m); l\in L\}$ を得る際に必要とされる最大雑音レベルとしての閾値の集合 $\vec{e}_H{}^{[f]}=\{e_H{}^{[fl]}; l\in L\}$ はある自己組織化アルゴリズム[9]で求められ，それが **Table 1** に示されている．

* $\theta(H)$, 各 $\theta_l(H)$ および採用された側抑制空間回路 $f(H)$ が付録2で説明されている．

Table 1 The mass $\vec{e}_H{}^{[f]}=\{e_H{}^{[fl]}; l=1\sim25\}$ of stimulus threshold values.

l	$e_H{}^{[fl]}$	l	$e_H{}^{[fl]}$	l	$e_H{}^{[fl]}$
1	0.010	11	0.130	1	0.066
2	0.013	2	0.091	2	0.069
3	0.017	3	0.058	3	0.050
4	0.021	4	0.086	4	0.053
5	0.025	15	0.085	25	0.063
6	0.029	6	0.112		
7	0.037	7	0.136		
8	0.049	8	0.081		
9	0.089	9	0.090		
10	0.120	20	0.057		

以上の手続きで得られた 30 個の構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m)$, $m=1\sim30$ の内，ここでは紙面の都合上，$m=11$, 14, 21 についてのみ，考察しよう．

Fig. 3, **Fig. 5**, **Fig. 7** (次頁参照) にそれぞれ，φ_{11} (Fig. 2), φ_{14} (Fig. 4), φ_{21} (Fig. 6) の構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{11})$, $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{14})$, $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{21})$ を示す．

Fig. 2 に示されている手書き漢字パターン φ_{11} は "芝"を表わしており，本シミュレーションでの認識システムによって正しく認識されるけれども，ヒトに認識させた場合，大抵，"工" という誤まった答が跳ね返ってくる．このように，φ_{11}(Fig. 2) は同じ "芝" を表わす φ_{21} (Fig. 6) に比べ，ヒトによって正認識が困難なほどその形状が崩れているが，Fig. 3，Fig. 7 をみてわかるように，それぞれの構造化情報パターン

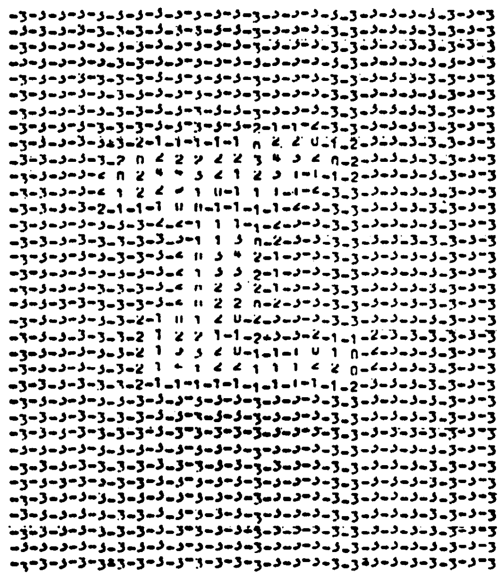

Fig. 2 The eight-valued handwritten Chinese character φ_{11}.

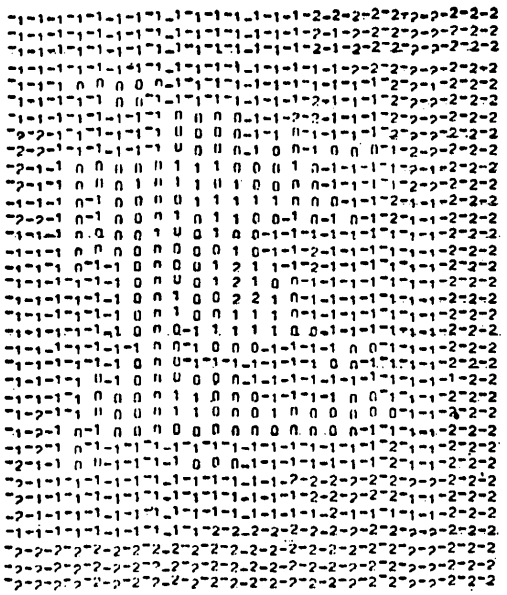

Fig. 3 The corresponding structured informational pattern $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{11})$ of the pattern φ_{11}.

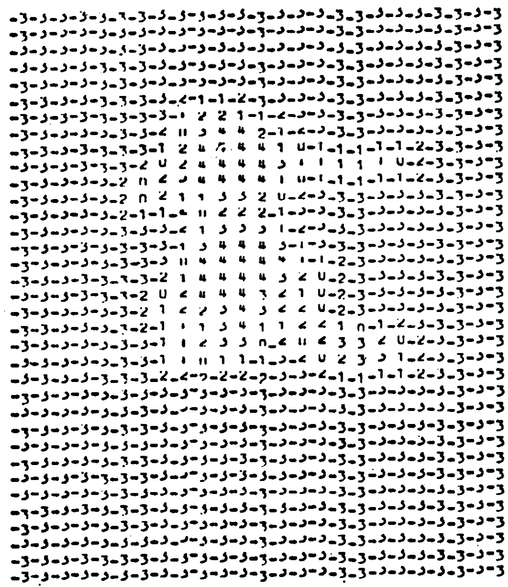

Fig. 4 The handwritten Chinese character φ_{14}.

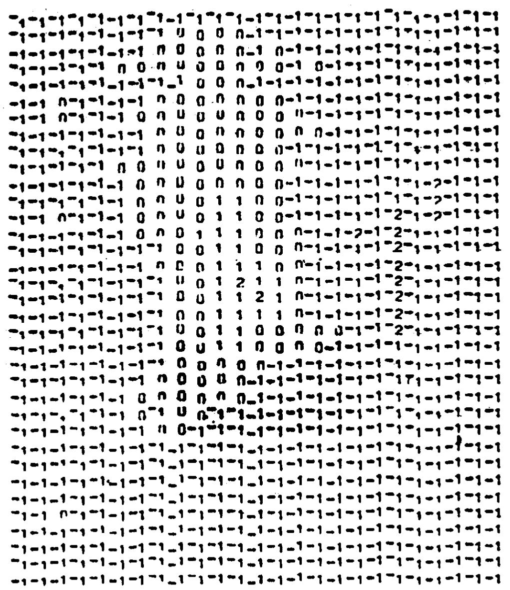

Fig. 5 The structured informational pattern $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{14})$ of the pattern φ_{14}.

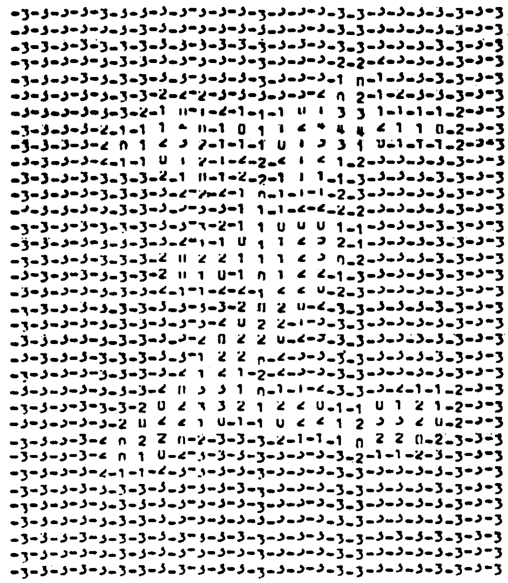

Fig. 6 The handwritten Chinese character φ_{21}.

$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{11})$，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{21})$は互いにほぼ同一のように得られている事実に注目しよう．

以上を考慮し，Fig. 4，Fig. 5 を含めて，全手書き漢字の構造化情報パターンを検討すると，次の主張が可能であることが明らかになった：正規化パターンとしての構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m)$ は抽出された 2 値特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[J]}\varphi_m)$ によって得られるので，通常，**入力としての手書き漢字 φ_m のもつ形状に比べ崩れて得られるが**，入力手書き漢字 φ_m がヒトにより誤認識されるほど，φ_m の形状があまりにも崩れている場合には，**構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m)$ の形状の方が一層整って得られる**．

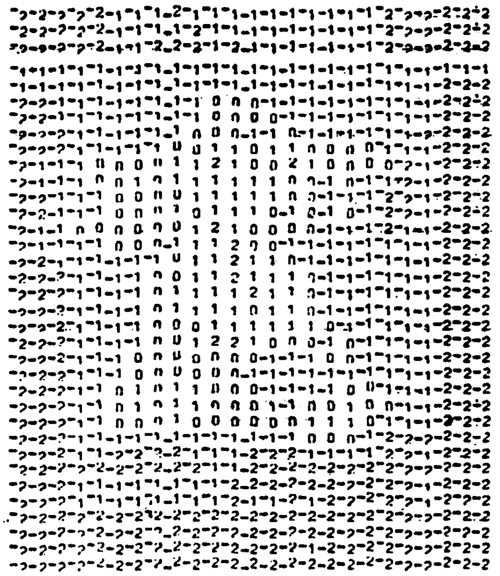

Fig. 7 The structured informational pattern $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_{21})$ of the pattern φ_{21}.

なお，構造化情報パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m)$ を入力手書き漢字 φ_m の正規化パターンとみなして本認識システムで認識させたところ*，**すべての φ_m が正認識される**という結果が得られており，この事実は上の主張を，いいかえれば，**正規化写像** $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ に clustering・separation 双方の機能が存在することをある程度，裏づけている，と考えられる**．それで，この主張を基に今一度，強調していっておけば，次のようになる：**各入力手書き漢字 φ_m が正認識される程度に**，各 φ_m の構造はその構造化情報パターンあるいは構造モデルとしての各正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m)$ に再生されている．

4. む す び

元来，正規化の操作とは入力パターンの多様性を可能な限り軽減する働きをもっているものであり，その結果得られる正規化パターンとは，ある規準で測ってもとの入力パターンと相似ているという意味で，原入力パターンの**モデル**と考えられるべきものである．

本論文での正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ は入力パターン φ から抽出された2値特徴 $\vec{X}_H{}^{[fl]}(\varphi)$ をスイッチとして用いながら記憶構造 $\Xi=[\overrightarrow{\theta(H)};\ \xi]$ から形状成分 $\overrightarrow{\theta(H)}\xi\triangleq\{\theta_l(H)\xi;\ l\in L\}$ が呼び出される形式で φ から無駄な情報が取り除かれ，φ が構造化され得られているという意味合いを込めて，φ の構造化情報パターンあるいは**構造モデル**と称された．$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が原パターン φ と相似ているということの一端は理論的には，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が φ と同一の2値特徴 $\vec{X}_H{}^{[fl]}(\varphi)$ を持っていること（再現性，**付録3**を参照）で端的に指摘される．

本論文では，抽出された特徴を用いて画像の構造を再生する過程をこのように考え，そのシミュレーション結果を報告したが，そのシミュレーション結果を検討すれば容易にわかるように，これはとりも直さず，正認識されるに必要な程度に質が落とされた画像を，その入力画像に対応して復元することがパターン認識技術分野における**画像復元技術としての正規化の操作**であることを明らかにしたことになろう．

謝辞 工学院大・太田芳雄教授，同大・奥野治雄教授，同大・秋山守男教授，同大・斎藤静昭講師，芝工大・古田晋吾教授，電総研・磯道義典主任研究官，電波研・鈴木誠史室長，東大・渡辺茂教授，武蔵野通研・池野信一室長の諸氏，関係者の方々に深謝の意を表わしたい．

参 考 文 献

1) 吉田耕作：近代解析，共立出版 (1963)
2) 上坂吉則：パターン認識と学習の理論，p. 8，総合図書 (1971)
3) 鈴木昇一：認識工学(上)，柏書房 (1975)
4) David Noton: A Theory of Visual Pattern Perception, IEEE TRANS. on SSC, Vol. SSC-6, No. 4, pp. 349～357 (1970)
5) 鈴木昇一：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，情報処理，Vol. 15, No. 12, pp. 927～934 (1974)
6) 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, pp. 531～538 (1972)
7) 鈴木昇一：測度的不変量検出形認識系に関する研究，博士論文（工学院大学）(1975-03)
8) 鈴木昇一：画像情報量とその手書き漢字への応用，画像電子学会誌，Vol. 4, No. 1, pp. 4～12

* $\vec{W}=\{W_l;\ l\in L\}$ を重みベクトルとして，また，$Y_H{}^{[fl]}(\varphi)$ を $Y_H{}^{[fl]}(\varphi)\triangleq 2\cdot X_H{}^{[fl]}(\varphi)-1$ と定義して，$\Sigma_{l\in L}W_l\cdot Y_H{}^{[fl]}(\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi_m))\geq 0$ or <0 かどうかで2分割する方法を必要な回数だけ繰り返した．

** 本シミュレーションで満たされている条件 $\|\theta_l(H)\xi\|\neq 0$, $\forall l$ のもとで，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が φ から抽出された特徴 $\vec{X}_H{}^{[fl]}(\varphi)$ から一意的に定まること[11]を考慮すれば，特徴抽出写像 $\vec{X}_H{}^{[fl]}(\cdot)$ の持つ clustering・separation 双方の機能に関する評価は正規化写像 $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\cdot)$ の持つこの両機能に関する評価ともなることに注意する．

(1975)
9) 鈴木，太田，奥野，斎藤：刺激閾値塊，類別重み塊に関する自己組織化アスゴリズム，芝浦工業大学工学部研究報告，No. 20, pp. 197 ~208 (1976)
10) 鈴木，太田，斎藤，奥野：感覚空間回路の設計と作用素に対するラプラス変換法，工学院大学研究報告，No. 40, pp. 122～134 (1976)
11) 鈴木昇一：構造化情報パターンの四性質，電子通信学会論文誌 D, Vol. J 59-D, No. 12, pp. 937～938 (1976-12)

付 録

付録1 (同値関係，同値類，商集合，商変換)：

一般に，集合 Ψ において定義される2元の間の関係～が3条件，i°) $\varphi\in\Psi$ ならば，$\varphi\sim\varphi$, ii°) φ, $\eta\in\Psi$ で，$\varphi\sim\eta$ ならば，$\eta\sim\varphi$, iii°) φ, η, $\psi\in\Psi$ で，$\varphi\sim\eta$ かつ $\eta\sim\psi$ ならば，$\varphi\sim\psi$ を満たすとき，この関係～を集合 Ψ における**同値関係**と呼ぶ. また，$[\varphi]\triangleq\{\eta;\ \eta\sim\varphi, \eta\in\Psi\}$ を $\varphi\in\Psi$ を含む，同値関係～に関する一つの**同値類**と呼ぶ. 同値類 $[\varphi]$ に含まれている任意の元 $\eta\in\Psi$ は $[\varphi]$ を代表するという. 各同値類のつくる集合 $\Psi/\sim(\triangleq\{[\varphi];\varphi\in\Psi\})$ を同値関係～による集合 Ψ の**商集合**という. また，Ψ から $\Psi/\sim$ の上への写像 $g:\Psi\to\Psi/\sim$ を Ψ の**商変換**という.

付録2 (理想低域フィルタ $\theta(H)$, 理想帯域フィルタ $\theta_l(H)$, 側抑制空間回路 $f(H)$ の説明[5])：

理想低域フィルタ $\theta(H)$ の通過帯域 $-2\pi W\sim+2\pi W$ を，小数第1位で四捨五入して $(\theta(H)\varphi)(x_1, x_2)=\varphi(x_1, x_2)$ が各手書き漢字 φ に対し成立するように選んだ. $2\pi W=10\pi/\log_e 17\fallingdotseq 11.0884$ であればよいことがわかった. $(2W)^{-1}=(10/\log_e 17)^{-1}\fallingdotseq 0.2833$ は**標本化間隔**である.

$-2\pi W\sim+2\pi W$ を 25 個に分割して，同数の**理想帯域フィルタ** $\overrightarrow{\theta(H)}=\{\theta_l(H);\ l=1\sim25\}$ を得たが，この際，各 $\theta_l(H)$ の通過帯域 S_l は $2\pi W_0=0$, $2\pi W_l=\{(2\pi W+\delta)/25\}\cdot\exp[2\times(l-25)/25]\cdot l-\delta$, $\delta=10^{-4}$ として，$S_l\triangleq\{\lambda;\ 2\pi W_{l-1}<|\lambda|\leqq 2\pi W_l\}$, $l=1\sim25$ と選ばれた.

$(e^{+iuH}\varphi)(x_1, x_2)=\varphi(e^{+u}x_1, e^{+u}x_2)$ に注目すれば，**作用素に対するフーリエ変換法**[3),5)]により，各 $\theta_l(H)$, $\theta(H)$ の表現が次のように求められる.

i°) $(\theta_l(H)\varphi)(x_1, x_2)=\int_{-\infty}^{+\infty}du[2W_l\cdot \mathrm{sinc}(2W_l u)-2W_{l-1}\cdot\mathrm{sinc}(2W_{l-1}u)]\cdot(e^{+iuH}\varphi)(x_1, x_2)$, ここに，$\mathrm{sinc}(u)\triangleq(\pi u)^{-1}\cdot\sin(\pi u)$。

ii°) $(\theta(H)\varphi)(x_1, x_2)=\Sigma_{l\in L}(\theta_l(H)\varphi)(x_1, x_2)$, ここに. $L\{1, 2, \cdots, 25\}$.

計算機シミュレーションにあたって必要な実験式は積分キザミ (Δu) を標本化間隔 $(2W)^{-1}$ として，和分変数 u が $-\log_e 17\fallingdotseq-2.833$ から $+\log_e 17$ までの区間を 20 等分した値をとるものとして得られる.

次に，**側抑制空間回路** $f(H)$ は $t=9/(2W)$, $t_1=5/(2W)$, $t_1'=3/(2W)$, $a_0=5$, $a_1=9$, $b_0=0.3$, $b_1=0.2$, $c_0=2$, $c_1=c_2=1$, $\nu_0=0.5$, $\nu_1=4$ として

iii°) $(f(H)\varphi)(x_1, x_2)=\int_0^t d\tau\cdot q(t-\tau)\cdot(g_\tau(H)\varphi)(x_1, x_2)$ と決定された. ここに，$q(t)=\nu_0 e^{-\nu_0 t}\{a_0+b_0^{-1}\cdot\sin(b_0 t)\}+Y(t-t_1)[\nu_1 e^{-\nu_1(t-t_1)}\{a_1+b_1^{-1}\cdot\sin\{b_1(t-t_1)\}\}]$, $g_\tau(H)=c_0+c_1\cdot\cos\{(t+t_1')H\}-c_2\cdot\cos(tH)$ であり，$Y(u)=1(u\geqq0)$, $=0(u<0)$.

このように定義された $f(H)$ は**作用素に対するラプラス変換法**[10)]から詳細な解析がなされ得る. $f(H)$ はその表現式をみてわかるように，生体系の側抑制(入力パターンの各座標成分が互いに他を抑制すること)の働きを模擬している空間回路である.

計算機シミュレーションにあたって必要な実験式は，iii° に示す表現式において，積分キザミ $(\Delta\tau)$ を標本化間隔 $(2W)^{-1}$ に選んで，$t=9\cdot(\Delta\tau)$ として，$\Sigma_{\tau=k\cdot(\Delta\tau)}\cdots(k=1\sim9)$ で積分 $\int_0^t d\tau\cdots$ を和分近似して得られる.

付録3 (正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ の再現性)：

一般に，加法的作用素 A の**定義域** $\mathfrak{D}(A)$ とは，$\mathfrak{D}(A)\triangleq\{\varphi;\ \|A\varphi\|<+\infty, \varphi\in\mathfrak{H}\}$ のことである[1)]. $\mathfrak{H}$ は Hilbert 空間を表わしている.

定理1： $\forall\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ に対し，$\vec{X}_H{}^{[f]}(\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi))=\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi)$, いいかえれば，$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi))=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\varphi)$ が成り立つ[6,11)].

定理2 (不動点定理)：「$\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\psi)=\psi\in\mathfrak{D}(f(H))$ が成り立つ」⇔「ある $\eta\in\mathfrak{D}(f(H))$ が存在して，$\psi\in\mathfrak{D}(f(H))$ は $\psi=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\eta)$ と表わされる」.

(証明) ⇒ は $\psi=\eta$ と考えれば明らか. ⇐ の証明をしよう.

まず，a) $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\psi)=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\eta))$ が成り立つ. ところが，定理1において φ の代りに η を考えれば，b) $\mathfrak{Y}_H\mathfrak{Y}^{\Xi}({}_H{}^{\Xi}(\eta))=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\eta)$ が成り立っている. よって，a, b より $\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\psi)=\mathfrak{Y}_H{}^{\Xi}(\eta)=\psi\in\mathfrak{D}(f(H))$ を得

る．(証終)

定理1，2は次の事実を指摘している：φ の正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{B}(\varphi)$ は φ の特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi)$ と同一の特徴量の集合を持ち，しかも写像 $\mathfrak{Y}_H{}^{B}(\cdot)$ の不動点として再現されている．

付録4 (正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{B}(\varphi)$ の不変性)：

U を H と可換なユニタリ作用素[1]とすれば，任意の $\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ に対し i°) 特徴量の集合 $\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(\varphi)$ の，Uのもとでの不変性 $\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(U\varphi)=\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(\varphi)<\overrightarrow{+\infty}$ が成り立ち，よって，ii°) 符号化された特徴量の集合 $\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi)$ の $U-$不変性 $\vec{X}_H{}^{[f]}(U\varphi)=\vec{X}_H{}^{[f]}(\varphi)$ も成り立つ．結局，

定理3 (ユニタリ群不変定理)： Uを H と可換な任意のユニタリ作用素として，正規化パターン $\mathfrak{Y}_H{}^{B}(\varphi)$ の$U-$不変性 $\mathfrak{Y}_H{}^{B}(U\varphi)=\mathfrak{Y}_H{}^{B}(\varphi)$，$\forall\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ が成り立つ．

以下に，その証明を行うが，i°のみを示せば，ii°，定理3は明らかであろう．

まず，各 $\theta_l(H)$ は $f(H)$ と可換であるから[1]，**a**) $\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ ならば，$\theta_l(H)\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ かつ $f(H)\theta_l(H)\varphi=\theta_l(H)f(H)\varphi$ が成り立つ．また，**b**) 各 $\theta_l(H)$ は自己共役[1]であって，$(\psi,\theta_l(H)\eta)=(\theta_l(H)\psi,\eta)$，$\forall\psi$，$\forall\eta\in\mathfrak{H}$ が成り立つ．さらに，**c**) 各 $\theta_l(H)$ の直交性 $\theta_l(H)\theta_k(H)=0(l\neq k)$ も成り立っている．

以上の三事実 **a**，**b**，**c** から，$f_k(H)\triangleq f(H)\theta_k(H)$ として，$\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ ならば，$(f_k(H)\varphi,f_l(H)\varphi)=(\theta_k(H)f(H)\varphi,\ \theta_l(H)f(H)\varphi)=(\theta_l(H)\theta_k(H)f(H)\varphi,\ f(H)\varphi)=0(k\neq l)$ が成り立つ．いいかえると，**d**) $(f_k(H)\varphi,\ f_l(H)\varphi)=0(k\neq l)$ が成り立つ．

この **d** と，$f(H)=\Sigma_{l\in L}f_l(H)$ とから，$\|f(H)\varphi\|^2=(f(H)\varphi,f(H)\varphi)=\Sigma_{k\in L}\Sigma_{l\in L}(f_k(H)\varphi,\ f_l(H)\varphi)=\Sigma_{l\in L}\|f_l(H)\varphi\|^2$ を得る．いいかえれば，**e**) $\|f(H)\varphi\|^2=\Sigma_{l\in L}\|f_l(H)\varphi\|^2$，$\forall\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ が成り立つ．**e** から，次の 1° が成り立つ．

1°) $\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ ならば，$\varphi\in\mathfrak{D}(f_l(H))$，$\forall l\in L$．

さらに，H と可換なユニタリ作用素Uは各 $f_l(H)$ と可換であるから[1]，次の 2° が成り立つ．

2°) $\varphi\in\mathfrak{D}(f_l(H))$ ならば，$U\varphi\in\mathfrak{D}(f_l(H))$ かつ $f_l(H)U\varphi=Uf_l(H)\varphi$，$\forall l\in L$．

上の 1°，2° から，次の 3° が成り立つ．

3°) $\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ ならば，$U\varphi\in\mathfrak{D}(f_l(H))$ かつ $f_l(H)U\varphi=Uf_l(H)\varphi$，$\forall l\in L$．

H と可換な任意のユニタリ作用素 U と任意の $\varphi\in\mathfrak{D}(f(H))$ に対し，この 3° から，$\mathfrak{F}_H{}^{[f]}(U\varphi)=(f_l(H)U\varphi,U\varphi)/(U\varphi,U\varphi)$ に関し，

4°) $\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(U\varphi)<+\infty$ かつ $\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(U\varphi)=(Uf_l(H)\varphi,U\varphi)/(U\varphi,U\varphi)$，$\forall l\in L$．

ここで，U はユニタリ作用素であり，$(U\psi,U\psi)=(\psi,\psi)$，$\forall\psi\in\mathfrak{C}$ が成り立っているから，この事実を4°に考慮すれば，結局，

5°) $\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(U\varphi)=(f_l(H)\varphi,\varphi)/(\varphi,\ \varphi)=\mathfrak{F}_H{}^{[f_l]}(\varphi)<+\infty$，$\forall l\in L$．

この 5° は $\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(U\varphi)=\vec{\mathfrak{F}}_H{}^{[f]}(\varphi)<\overrightarrow{+\infty}$ を意味している．これで，i°の証明は終った．

(昭和51年9月22日受付)
(昭和52年2月21日再受付)