

ヒルベルト曲線を利用した対話型多次元画像 解析システム

新見 道治

鎌田 清一郎

河口 英二

九州工業大学工学部

〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1

あらまし リモートセンシングなどの多次元画像の解析には、特徴空間の線形変換がよく用いられる。しかし、この方法では原データと変換したデータとの1対1対応をとるのが困難となる。本論文では、1対1対応でかつ、できるだけ2点間近傍関係を保存するヒルベルト曲線を使った多次元画像の対話型解析システムについて述べる。本解析法は多次元空間に分布するデータをヒルベルト曲線により1次元直線上に展開し、ユーザとの対話によってクラスタ抽出、すなわちカテゴリ分類を行う方法である。実際にランドツサト画像のカテゴリ分類に適用した結果、データテーブル作成に数分かかるが、その後の対話操作における応答は数秒で行えることが確認できた。

和文キーワード 多次元画像, カテゴリ分類, ヒルベルト曲線, リモートセンシング

An Interactive System for Multi-dimensional Image Analysis Using A Hilbert Curve

Michiharu Niimi

Seiichiro Kamata

Eiji Kawaguchi

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology,

1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu-shi, 804 Japan

Abstract It is natural way to reduce space dimensions in order to analyze multi-dimensional images. In this paper, we present an interactive system for multi-dimensional image analysis using a Hilbert curve which is one-to-one mapping and preserves the neighborhood as much as possible. The process of this method is based on a mapping of N-dimensional data to one-dimensional images by using interactive analysis from the display of hierarchical histogram expression for the one-dimensional space. In the experiments, it is confirmed that the user can get the real time response from the system after once making the data table.

英文 key words Multi-dimensional image, Category classification, Hilbert curve, Remote sensing

1 まえがき

リモートセンシングや医療用 CT などにおける多次元画像を扱った研究が近年活発に行われている。多次元画像の解析には、画像の特徴空間をより少数次元空間へ変換することが必要となる。よく用いられる方法は主成分分析などの線形変換である。工藤等⁽⁵⁾は多次元データの解析方法として線形変換による3次元ヒストグラム解析法を提案し、気象衛星 NOAA のマルチスペクトル画像解析に応用した。しかし、これらの方法では画像データの1対1対応をとるのが困難となり、様々な角度からの線形変換が必要となる。また、工藤等⁽⁶⁾はチャンネル輝度値の重心-辞書順グラフと呼ばれる参照表を使った5チャンネルのマルチスペクトル画像(1画素あたり5ビットを対象)の同時解析方法を提案しているが、1画素あたりのビット数が多い場合や、次元数が増えた場合への対処、さらに、NOAA のデータ固有の特性を知識として組み込んでおり、他の多次元データへの適用が困難である。

本論文では1対1対応でかつ、できるだけ2点間近傍関係を保存するヒルベルト曲線を使った多次元画像の対話型解析法について述べる。ヒルベルト曲線はある空間を満たすすべての格子点を一度だけ通るような曲線の一種であり⁽²⁾、この曲線を使ってカラー画像表示における代表色決定、画像表示の走査方向、情報圧縮など様々な研究がなされている^{(4),(9),(10)}。本解析法の特徴は N 次元空間において距離計算などの処理を必要としないで詳細な分類が行えることである。本解析法は N 次元空間におけるデータをヒルベルト曲線により1次元直線上に展開し、この直線上でヒストグラムを作成し、画面上に表示されたヒストグラムから画像との対応関係を見ながらユーザとの対話によってクラスタ抽出、すなわちカテゴリ分類を行う方法である。

2点間近傍関係が保存できない部分には N 次元空間上の位置情報をビット系列として表すアドレスを参照して、距離計算を行わない比較処理によって対処する。ヒストグラムは全データの分布状態を把握しやすいように階層的な表現を用いる。各層のヒストグラム作成に必要な情報(アドレス等)はデータテーブルとして保存する。また、アドレスは各層のデータテーブル作成においても有効な情報となる。2.ではまず、ヒルベルト曲線におけるアドレスの設定と2点間近傍関係について述べる。次に、3.ではヒルベルト曲線を利用した階層的ヒストグラム表現方法と2点間近傍関係が保存できない部分への対処について述

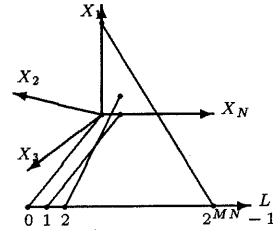
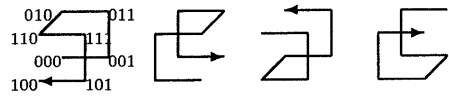


図 1: N 次元空間と1次元空間の各格子点対応



(a) 2次元の場合



(b) 3次元の場合

図 2: ヒルベルト曲線の例

べる。さらに、4.ではデータテーブルを利用したランドサット画像の対話型解析法を示し、5.で実験を通してその有効性を確認する。

2 ヒルベルト曲線⁽²⁾

N 次元ヒルベルト曲線を利用すると N 次元超立方体の各格子点を1次元直線上の点に変換させることができる。 N 次元空間の座標軸を X_1, X_2, \dots, X_N 、変換された1次元空間の座標軸を L とすると、各格子点の対応は図1のようになる。任意の格子点 (x_1, x_2, \dots, x_N) は或る M ビットの2進数として

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{M,1} \cdots x_{3,1} x_{2,1} x_{1,1}, \\ x_2 &= x_{M,2} \cdots x_{3,2} x_{2,2} x_{1,2}, \\ &\vdots \\ x_N &= x_{M,N} \cdots x_{3,N} x_{2,N} x_{1,N}. \end{aligned}$$

と表わされ、これらの格子点は次のような MN ビットの2進数として表すことができる。

$$z(x_1, x_2, \dots, x_N) = \underbrace{x_{M,1} x_{M,2} \cdots x_{M,N}}_N \underbrace{x_{M-1,1} \cdots x_{M-1,N}}_N \cdots \underbrace{x_{1,1} x_{1,2} \cdots x_{1,N}}_N$$

MN

ただし、 $x_{M,1}, \dots, x_{1,N}$ は0または1の値をとる。これを1辺の長さ 2^M の N 次元超立方体における各格子点のアドレスとする。図2は1辺の長さ1の2, 3次元ヒルベルト曲線の例である。

ここで l に対応するアドレスを $a_M^N(l)$ とすると, 図 2(a) 左の場合は,

$$\begin{aligned} a_1^2(0) &= z(0, 0) = 00 \\ a_1^2(1) &= z(0, 1) = 01 \\ a_1^2(2) &= z(1, 1) = 11 \\ a_1^2(3) &= z(1, 0) = 10 \end{aligned}$$

となる. 本論では N 次元ヒルベルト曲線について 1 対 1 対応のとれた Butz⁽¹⁾ による計算法を利用する. これは任意の l (2 進数表現) から, $a_M^N(l)$ (2 進数表現) を求める方法である (その逆変換も可能である).

ヒルベルト曲線は他の走査方法に比べて, 1 次元直線上における距離と, 対応する N 次元空間での距離に関して興味深い性質を有する. 1 次元直線上のある点 l と近傍点との距離を Δl , それぞれに対応する N 次元空間内の格子点間距離を Δd とすると, 次の性質が成り立つ.

性質:

$$\Delta l \text{ が小ならば } \Delta d \text{ は小となる.}$$

しかし, 逆は必ずしも成り立たない. ヒルベルト曲線はこの性質に関して, 画像処理などでよく利用される他の走査方法に比べて最も優れている⁽⁷⁾.

3 N 次元ヒルベルト曲線を使った階層的ヒストグラム表現

3.1 超立方体に対するアドレス割当⁽³⁾

N 次元ヒルベルト曲線の特徴は, 超立方体 (1 辺の長さ 2^m) を 2^N 分割によって得られる一つの超立方体 (1 辺の長さ 2^{m-1}) から他の超立方体 (1 辺の長さ 2^{m-1}) へ連続して走査が移動する (すなわち, 常に隣接した超立方体へ移動する) ことである⁽³⁾. 本論ではこの超立方体にアドレスを以下のように割当てる. N 次元空間において, 1 辺の長さ 2^M の超立方体が与えられた場合にそれを均等に 2^N 分割する. 分割後の各超立方体の 1 辺の長さは 2^{M-1} となる. このとき, 各超立方体はヒルベルト曲線でたどる順番にアドレス $a_1^N(0), a_1^N(1), \dots, a_1^N(2^N - 1)$ をもつものとする. 同様に, 分割された各超立方体 (1 辺の長さ 2^{M-1}) に対してそれぞれ 2^N 等分割して得られる各超立方体 (1 辺の長さ 2^{M-2}) のアドレスはヒルベルト曲線でたどる順番に $a_2^N(0), a_2^N(1), \dots, a_2^N(2^{2N} - 1)$ となる.

以上の分割処理を M 回繰り返すと, 2^{MN} 個の超立方体 (1 辺の長さ 1) が得られ, それぞれにアドレス {

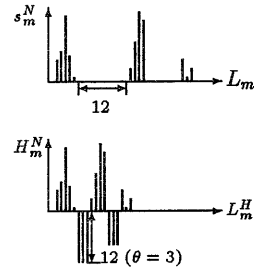


図 3: s_m^N から H_m^N への変換例

$a_M^N(l), l = 0, 1, \dots, 2^{MN} - 1$ } が割当てられる. この場合の超立方体は格子点そのものとなる.

3.2 階層的ヒストグラム表現

本論文で述べるヒストグラムは 1 辺の長さ 2^m の超立方体 $a_m^N(l_m)$ ($l_m = 0, 1, \dots, 2^{mN} - 1$) 内に含まれるデータ数を $s_m^N(l_m)$ とすると, ヒルベルト曲線で辿る順番に 1 次元直線上に列べた $s_m^N(0), s_m^N(1), \dots, s_m^N(2^{mN} - 1)$ である. すなわち, ヒストグラムの横軸は L_m , 縦軸は頻度である. しかし, 一般には次元数 N が大きくなると, ヒストグラムには $s_m^N(l_m) = 0$ の部分が多く存在するようになる. これは画面上でヒストグラム表示を行う上では, 不必要な部分である. そこで, 連続 0 値の部分 $s_m^N(l_m) = 0, l_m = l'_1, \dots, l'_2$ に対して, $l'_2 - l'_1 + 1$ がある閾値 θ よりも大きいときは $s_m^N(l_m) = l'_1 - l'_2 - 1, l_m = l'_1, \dots, l'_1 + \theta - 1$ としてマイナス表示し, $s_m^N(l_m), l_m = l'_1 + \theta, \dots, l'_2$ の部分を除けばよい. この操作により生成されるヒストグラムを H_m^N とし, H_m^N の横軸を L_m^H とする. 図 3 は s_m^N と H_m^N の関係を一例として示したものである.

H_m^N は m の値が小さいときには全体概略を, 大きいときには詳細部分を示す階層的なヒストグラムとなる. ここで, m を階層レベルと呼ぶ.

3.3 2 点間近傍関係が保存できない部分への対処

N 次元ヒルベルト曲線は N 次元空間を強制的に分割した領域を辿る. そのため, ヒルベルト曲線を利用して N 次元空間を 1 次元直線上に変換した場合, N 次元空間において 1 つのクラスタが, ヒストグラム上ではいくつかのクラスタに分かれてしまう場合が起こる. 本論ではこの領域を強制的分割領域と呼ぶ. 図 4 において P_1 と P_2 は隣接点であるにも拘らず, ヒストグラム上での対応する 2 点は離れた位置になってしまう. つまり, P_1 と P_2 は強制的分割領域である. この問題は前述のアドレスを参照することにより解決

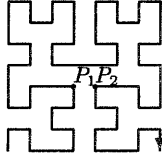


図 4: 強制的分割の例

できる。

1 辺が 2^M の N 次元空間におけるある座標軸 X_i について考える。ヒルベルト曲線の性質より X_i 軸の値が

$$B(m) \cdot 2^{m+1} + 2^m$$

と

$$B(m) \cdot 2^{m+1} + 2^m - 1$$

は強制的分割領域となる。ただし、

$$m = 1, 2, \dots, M-1$$

$$B(m) = 0, 1, \dots, 2^{M-1-m} - 1$$

である。ここで、 $B(m)$ は m の値により 2^{M-1-m} 個の値を持つ変数である。つまり、強制的分割のペアは

$$\sum_{i=1}^{M-1} 2^{M-1-i}$$

個存在する。 $M=3$ (1 辺の長さが 8) の場合、強制的分割は X_i 軸の値が、3 と 4、2 と 1、6 と 5、で生じる。また、 m の値が大きいくほど L 上での 2 点間距離は大きくなる。

以上のように強制的分割領域は軸の値により決まる。座標値情報はアドレスに保存されているので、例えばクラスタ中に

$$z(x_1, x_2, \dots, 4, \dots, x_N)$$

(または、 $z(x_1, x_2, \dots, 3, \dots, x_N)$)

のアドレスを持っているデータが存在すれば、

$$z(x_1, x_2, \dots, 3, \dots, x_N)$$

(または、 $z(x_1, x_2, \dots, 4, \dots, x_N)$)

のアドレスを持つデータを探せばよい。このような操作を各軸に対して行えば強制的分割領域へ対処できる。つまり、距離計算をせずにアドレスを参照することで近傍領域を求めることができる。

4 マルチスペクトル画像の解析法

本章ではヒルベルト曲線を利用したヒストグラム表現を LANDSAT5 により得られたマルチスペクトル画像 (ランドサット画像) 解析へ適用した場合の処理方法について述べる。

4.1 N 次元濃度値空間

N 次元濃度値空間は N 枚のマルチスペクトル画像 (横: ζ_{max} , 縦: η_{max}) の濃度値をそれぞれ、 X_1, X_2, \dots, X_N 軸に対応させたものである。各バンドの画像の縦横の位置を (ζ, η) ($1 \leq \zeta \leq \zeta_{max}$, $1 \leq \eta \leq \eta_{max}$) とすると、画素 (ζ, η) の濃度値は N 次元濃度値空間の 1 点として表せる。つまり、各バンドの濃度値を $g_1(\zeta, \eta), g_2(\zeta, \eta), \dots, g_N(\zeta, \eta)$ とすると、 N 次元濃度値空間の対応する座標値は

$$(x_1, x_2, \dots, x_N) = (g_1(\zeta, \eta), g_2(\zeta, \eta), \dots, g_N(\zeta, \eta))$$

となる。各濃度値 x_1, x_2, \dots, x_N の範囲は最大 2^M であるので、1 辺の長さ 2^M の超立方体が解析の対象となる。また、データの個数は $\zeta_{max} \times \eta_{max}$ である。この N 次元濃度値空間に出現する高い頻度の集まりがクラスタである。

4.2 データテーブルの作成

前述のように本解析法は階層的なヒストグラム表示を行うため、必要な情報をデータテーブルを保存しておけば、ヒストグラム作成が容易となる。データテーブルに保存するデータは H_M^N 上で正の頻度を有する点である。保存する情報は、 L_M 上の座標値 (l_m)、 L_m^H 上の座標値 (l_m^H)、点 l_m に対するアドレス ($a_m^N(l_m)$)、点 l_m に対する頻度 ($s_m^N(l_m)$) と、画像の位置 (ζ, η) を $\eta_{max} \times (\zeta - 1) + \eta$ として表した Ptr である。ここで、 l_m はデータテーブル内で昇順に列べられているものとする。また、便宜的にデータ番号 (k_m) を付ける。

まず、 H_M^N に対応するデータテーブルはマルチスペクトル画像より表 1 に示されるように作成する (これを $DT(M, k_M)$ とする)。

次に、 H_{M-1}^N に対応するデータテーブル $DT(M-1, k_{M-1})$ は $DT(M, k_M)$ 上のアドレスを参照することにより、次の手順で表 2 のように作成できる。ただし、この表において Ptr はその点に対応する $DT(M, k_M)$ 内の点列を k_M の始点 k_M^1 と終点 k_M^2 で表したものである。

- a) $k_M \leftarrow 1, k_{M-1} \leftarrow 1$
- b) $DT(M, k_M)$ における $a_M^N(l_M(k_M))$ の上位 $N \times (M-1)$ ビットを w_{k_M} とする。
- c) $a_M^N(l_M(k_M))$ の上位 $N \times (M-1)$ ビットが w_{k_M} となる k_M の範囲 k_M^1, \dots, k_M^2 を求める。
- d) w_{k_M} から $l_{M-1}(k_{M-1})$ を Butz のアルゴリズムを使って求める。

表 1: データテーブル $DT(M, k_M)$

k_M	l_M	l_M^H	$a_M^N(l_M)$	$s_M^N(l_M)$	Ptr(画像位置)
1	123	3	01...001000	7	1,2,3,4,5,140,141
2	124	4	01...001001	8	6,7,8,9,10,11,160,161
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

表 2: データテーブル $DT(M-1, k_{M-1})$

k_{M-1}	l_{M-1}	l_{M-1}^H	$a_{M-1}^N(l_{M-1})$	$s_{M-1}^N(l_{M-1})$	Ptr(始点 k_{M-1}^1 , 終点 k_{M-1}^2)
1	18	3	01...00	15	1,2
2	19	4	01...01	18	3,5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

- e) $DT(M-1, k_{M-1})$ において次のように登録する.
 $a_{M-1}^N(l_{M-1}(k_{M-1})) \leftarrow w_{k_M}$
 $s_{M-1}^N(l_{M-1}(k_{M-1})) \leftarrow \sum_{k'=k_{M-1}^1}^{k_{M-1}^2} s_M^N(l_M(k'))$
 $\text{Ptr}(k_{M-1}) \leftarrow (\text{始点 } k_{M-1}^1, \text{終点 } k_{M-1}^2)$
- f) $k_M \leftarrow k_{M-1}^2 + 1, k_{M-1} \leftarrow k_{M-1} + 1,$
- g) $DT(M, k_M)$ 内のデータがある場合 b) へ, データがない場合終了.

同様の操作を $(M-1)$ 回繰り返せば, データテーブル $DT(m, k_m), m = 1, 2, \dots, M$ が得られる.

$DT(m, k_m)$ からヒストグラム H_m^N の作成を行う場合は, $k_m = 1$ から順番に l_m^H 値を見ながら, 対応する頻度をヒストグラムの横軸に割り当てればよい.

4.3 データの対話型解析法

本解析法は前述のように N 次元空間において距離計算などを行わずに, ユーザとの対話によってクラスタ抽出が行えることを特徴とする. 本解析法の処理手順は初期表示, クラスタ候補の範囲指定, 確定処理に大きく分けることができる (図 5 参照). 以下, それぞれの処理について詳しく述べる.

4.3.1 初期表示

ユーザはランドサット画像とヒストグラムを見て, ヒストグラム上のクラスタ候補がランドサット画像のどの部分に対応するかを調べながら, カテゴリ分類を行う. ここで, クラスタ候補の対応部分を示す画像を原画像とは別に表示し, これを対応画像とする (対応部分は原画像と区別可能な赤色を使って表示する). ヒストグラム表示では横軸の長さが画面サイズにより制限される. 画面上に表示できるヒストグラムの

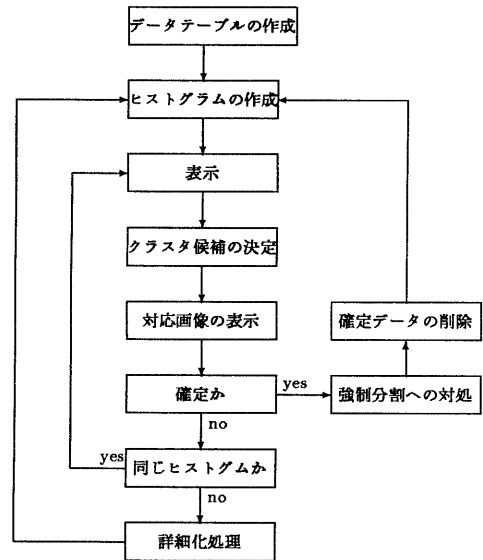


図 5: 実験システムの処理手順

横幅を B_{max} , ヒストグラム H_m^N に要する横幅を Λ_m とすると, 本解析システムは $\Lambda_m \leq B_{max}$ となる最大の m を求め (これを m^* とする), そのときのヒストグラム $H_{m^*}^N$ を最初に表示する.

4.3.2 クラスタ候補の範囲指定

ヒストグラム H_m^N に対して, いくつかのクラスタ候補が存在するため, ユーザはそれぞれのクラスタ部分が画像上のどの部分に対応しているかを対応画像で調べながら, カテゴリを特定できそうな高い頻度のク

ラスト部分 ($H_m^N(l_m^H), l_m^H = l_1^H, \dots, l_2^H$) を範囲指定する。解析システムはユーザの指示部分に対応する原画像上の領域を対応画像として逐次表示する。ユーザは範囲指定したクラスタ部分の対応画像を見ながら、海などの一つのカテゴリに明らかに対応していれば確定処理に移る。しかし、その部分に複数のカテゴリが存在している場合には、その部分の階層レベルを上げて詳しく解析を行う（詳細化処理）。階層レベル m における範囲指定した部分ヒストグラムの横幅を Λ_m^{part} とすると $\Lambda_m^{part} \leq B_{max}$ となる最大の m を求め（これを m_{part}^* とする）、そのときのヒストグラム $H_{m_{part}^*}^N$ を表示する。 $m_{part}^* = m$ の場合、現在の指定範囲より狭い範囲を H_m^N 上で再指定する。また、詳細化処理を繰り返し適用した後でも、全体概略ヒストグラムを再表示し最初から解析を始められる。

4.3.3 確定処理

本解析法ではクラスタ候補をカテゴリとして確定する場合に、強制的分割への対処を行う。強制的分割の発生している部分が同じヒストグラム上であれば、マーカを付けてデータの分布状態を把握しやすくする。

クラスタ候補中に強制的分割を示すアドレスをもつデータが存在した場合は、そのペアとなるアドレスを持つデータを同じ階層レベル上で探索する。もしそのデータが存在すれば、データに対応する画像上の領域を着色してクラスタ候補領域と同様に対応画像に表示する。強制的分割領域とクラスタ候補領域が同一のカテゴリであると認められる場合には（ユーザの判断に依存する）、強制的分割領域とクラスタ候補領域を統合する。そうでない場合には、クラスタ候補領域のみカテゴリとして決定する。

確定処理においてカテゴリとして確定した部分のデータはデータテーブルより取り除き、その部分に関しての解析はその後行わないこととする。確定処理終了後は初期表示の処理に移り、全体概略ヒストグラムを再表示し、クラスタ候補の範囲指定に処理が移される。

カテゴリとして確定した部分には予め与えられているカテゴリ名を付ける。また、すべてのクラスタ抽出処理が修了した後、解析システムはカテゴリ名を基にランドサット画像を配色し、それを最終結果として表示する。

表 3: m に対するデータテーブル内のデータ数とヒストグラムの長さ ($\theta = 3$ の場合)

m	データ数	H_m^N ヒストグラム長
1	21	51
2	140	332
3	754	2060
4	3791	10883
5	20560	55430
6	83536	244035
7	148744	553845
8	178354	678128

5 実験

5.1 実験システム

本実験では、1987年11月16日の北九州上空のLANDSAT5より得られたTMデータを使用する（図6参照）。TMデータは7枚のスペクトル画像（横512、縦400）からなり、その分解能は8ビット/画素である⁽¹¹⁾。そこで本解析では7枚のスペクトル画像を使用する。したがって、次元数は7となり、解析対象は1辺の長さ256の超立方体である。使用したワークステーションはSUN Sparc Station 10である。ランドサット画像からすべてのデータテーブル作成には148秒を要した。階層レベル m に対するデータテーブル内のデータ数を表3に示す。

5.2 評価実験

ヒストグラムの横軸の最大長は $B_{max} = 1024$ である。表3より、このデータではまず $m = 2$ のときがヒストグラム表示される。図6はその初期表示画面である。ヒストグラムの破線で囲まれた範囲に対応する原画像上の領域を灰色にしている（実際の画面上では赤色表示している）。このクラスタは原画像上の大半を占める領域に対応していることが分かる。この部分をさらに解析すると、図7のヒストグラム（下部）が得られる。図においてヒストグラム上の点線で囲まれた部分を調べると、対応画像（図7の上部）において水域に相当することがわかる。

実験システムをリモートセンシングに関する知識のある1人の被験者(A)、知識のない3人の被験者(B,C,D)に対して、実際に利用してもらい、その操作性、処理時間について評価した。カテゴリは水域、市街地、山（緑地を含む）、雲（煙を含む）、不明である。表4は評価結果である。表において操作性はアンケート形

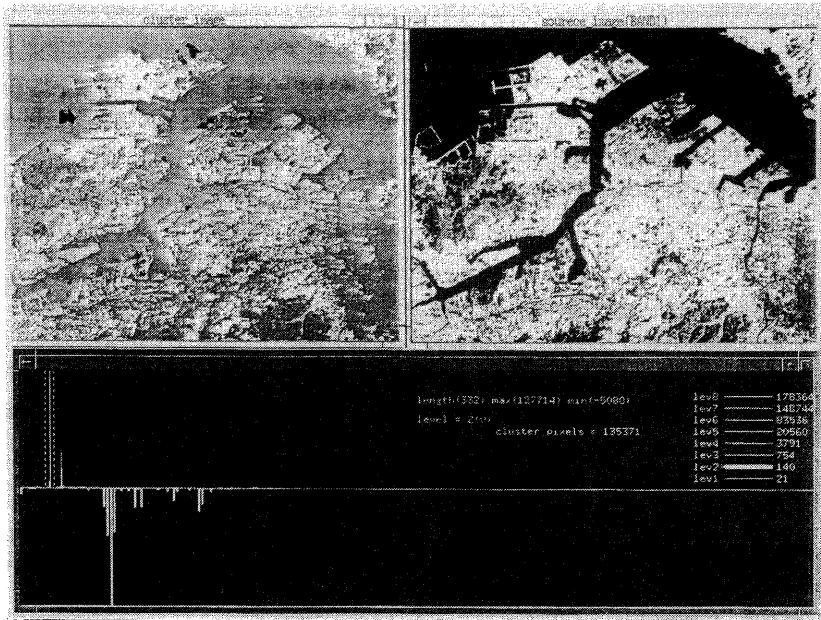


図 6: 初期表示例



図 7: 対話型解析の一例

式で 4 段階評価（簡単、やや簡単、やや複雑、複雑）としたが、いずれの被験者も簡単であるという評価を得た。この表において K1 は詳細化を行った回数、K2 は確定処理を行った回数、K3 は強制的分割処理を行った回数、K4 は強制的分割処理により同一カテゴリに統合された画素数であり、Nd(t) は操作時間 t(分) 後における未確定画素数である。K2 と K3 よりクラス

表 4: 被験者に対する評価結果

被験者	A	B	C	D
操作性	簡単	簡単	簡単	簡単
K1	47	36	81	32
K2	38	28	64	28
K3	37	27	63	27
K4	72661	60138	92190	40766
Nd(5)	42120	63924	86563	108097
Nd(10)	19463	19373	45214	23873
Nd(15)	2501	10633	23874	16754
Nd(20)	-	4786	17771	7923
全操作時間 (分)	16	21	35	27

タ候補のほとんどが強制的分割領域を含み、K4 より全画素数の 20～40% が強制的分割処理によりクラス候補に統合されていることがわかる。また、Nd(t) の関係から最初の数分で未確定画素数が急激に減少していることがわかる（原画像の画素数:204800）。最終的に全画像のカテゴリ分類操作は 20～40 分程度で終了している。

対話操作の途中で被験者は以下のことが確認できた。前述の水域に関してはスペクトル変動が少ないため簡単に抽出できる。しかし、川や道路や工場においては変動が激しく、画素レベルの分類になってしまう。また、解析途中で被験者は川が海の海岸線とほぼ同じスペクトルであることを認識した。ヒストグラム上での範囲指定から対応画像を求める処理あるい

はヒストグラムの詳細化処理に要する時間は数秒以内であることが確認できた。データテーブル作成に若干の時間がかかる。しかし、データテーブルを一度作成すれば、その後の対話操作におけるユーザの指示に対する応答は数秒で行えることがわかった。

5.3 考察

従来の多次元画像データの解析法⁽⁶⁾はデータ数が約 3000 程度の重心-辞書グラフを作成し、分析を行っているが、本実験で使用しているデータはデータ数が約 17 万もあり、このままでの重心-辞書グラフによる解析は困難であり、何らかの工夫が必要である。また、この表現では頻度情報がないため、どの部分から優先的に調べればよいかははっきりしないという問題もある。一方、本解析法では頻度情報を有効に活用できるため、操作時間に対するカテゴリ確定画素数が数分で急激に増加しており、頻度情報による円滑なクラスタ抽出ができています。また、本解析法は強制的分割による対処を付加することによって、同一カテゴリのクラスタが効率よく抽出できています。

操作時間は平均 25 分程度であるが、ユーザが対応画像領域とカテゴリの関係を判断するのにかなりの時間を要している。特に、カテゴリ境界の部分では判断時間をかなり要していた。4 人の被験者では約 90 % のカテゴリ分類の一致を見た。しかし、カテゴリ境界が誤分類の主原因になっており、それに対する対策が必要であるが、1 画素内にどちらのカテゴリが多く存在するかは判読が困難である。この場合は別の情報により分類せざるを得ない。

本論では、強制的分割領域への対処にクラスタ候補中に強制的分割のペアの一方が存在した場合に、他方をヒストグラムより探索し、その点に関してのみクラスタ候補に統合するかどうかを決定した。しかし、ペアの他方の近傍もクラスタ候補の近傍であるので、その部分の解析も同時に行わなければならない。このことに関しては今後の課題とする。

6 むすび

本論文ではヒルベルト曲線を使ったヒストグラム表現に基づく多次元画像の一解析法について述べた。本解析法は N 次元空間における距離計算などを行わずに、1 次元直線上のヒストグラムを参照することによりクラスタ抽出が行えることを特徴とする。また、階層的ヒストグラム表現を高速に行うために、ア

ドレスを付加したデータテーブルを利用した。実験の結果、データテーブル作成に若干の時間がかかるが、一度作成すれば、その後の対話操作は円滑に行えることが確認できた。

今後は強制的分割領域をマルチウィンドウ表示するなどの改良を行い、データ分布状態をより把握しやすい対話型解析システムの構築を目指す。

謝辞

本研究は一部、文部省研究費補助金の補助を受けた。

参考文献

- (1) A.R.Butz, "Convergence with Hilbert's Space Filling Curve," *Journal of Computer and System Science*, vol.3, pp.128-146(1969).
- (2) D.Hilbert, "Ueber die stetige abbildung einer linie auf ein flachenstück," *Mathematische Annalen*, vol.38, pp.459-460(1891).
- (3) 鎌田, ベレス, 河口, "N次元空間を充てんするヒルベルト曲線の二計算法", *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol.J76-DII, No.3, pp.797-801(1993).
- (4) S.Kamata, R.O.Eason and E.Kawaguchi, "An implementation of Hilbert scanning algorithm and its application to data compression", *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol. E76-D, no.4, pp.420-428(1993).
- (5) 工藤, 根元, 野口, "3次元ヒストグラムの効率的な表示方法", *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol.J75-DII, No.6, pp.1031-1037(1992).
- (6) 工藤, 根元, 野口, "気象衛星ノアから得られるマルチスペクトル画像の同時解析法", *情報処理学会論文誌*, Vol.33, No.7, pp.897-904(1992).
- (7) 新見, 鎌田, 河口, "多次元特徴空間におけるヒルベルト曲線を利用したクラスタリング", *信学技報 PRU92-103*, pp.9-16(1993).
- (8) H. Samet, "The design and analysis of spacial data structures," p.14, Addison-Wesley Pub.(1990).
- (9) W. Skarbek, T. Agui and M. Nakajima, "Compression of dithered binary images using Hilbert scan," *Trans. of IEICE*, vol.E72, no.11, pp.1235-1242(1989).
- (10) R.J. Stevens, A.F. Lehar and F.H. Preston, "Manipulation and presentation of multi-dimensional image data using the peano scan," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.PAMI-5, pp.520-526(1983).
- (11) 土屋, "リモートセンシング概論", 朝倉書店(1990).