

画像の局所的構造特徴空間を利用した画像表現と部分マッチング

Image Representation and Partial Matching
by Using the Local Structural Feature Space of Images

田宮 誠司 渡辺 弥壽夫
Seiji TAMIYA Yasuo WATANABE

金沢工業大学

Kanazawa Institute of Technology

あらまし 本稿では、画像の構造的な特徴を表す空間を用いて、画像の表現と部分パターンマッチングの問題について述べている。まず、グラジエント、ラプラシアン、ヘシアンや、構造線などの幾何学的に不変な特徴を取上げ、このような特徴量を軸に持つ局所的構造特徴空間を定義し、画像表現の観点から画像の再構成について論じている。また、部分パターンマッチングは、画像に対応する特徴空間における2つの曲面の存在度の量を導入することにより、2つの曲面が同時に存在する度合いが大きいところを見つけるパラメータの、対応づけを行なうものである。

Abstract The paper describes the image representation and partial matching by means of the structural features of images. First of all, the local structural feature space is defined by such geometrically invariant features as gradient, Laplacian, Hessian and structure lines etc., and we discuss image reconstruction by using the structure spaces from the viewpoint of image representation. Secondly, the existence probability of the both surfaces corresponding to the both images in the structure space is introduced in order to solve the problem of partial matching of images. And then we present the method for searching the maximal spaces and corresponding the parameters.

1. はじめに

画像処理において、不必要な情報を取除き、画像の本質的な特徴を取出すことは有用である。このとき、画像の特徴として、幾何学的不変性、及び表現力を考慮することが重要である。本稿では、まず、画像を十分滑らかな曲面として考えたとき、その局所的構造を与える局所的構造特徴空間を定義する。これは、幾何学的に不変な特徴量を軸にもつ多次元空間であり、画像は、その空間において曲面として表される。

また、画像のマッチングは、画像 ϕ と画像 ψ に対応する、構造特徴空間における曲面のマッチングとしてとらえ、 ϕ 上の位置 (x, y) と ψ 上の位置 (s, t) での特徴間のcostが最小になる特徴の位置を求めることによって対応づける。

2. 局所的構造特徴空間

画像を構造化するために、画像の本質的な性質、即ち座標系の平行移動や回転に不変な幾何学的特徴量を用いる。例えば、グラジエント、ラプラシアン、ヘシアン等がある。このような特徴量を座標系にとった空間を、局所的構造特徴空間とよぶ。

2.1 幾何学的に不変な特徴抽出オペレータ^[1]

局所的構造を表し、かつ線形変換に対して不変な特徴量として

$$X = |\nabla\phi|^2 = \phi_x^2 + \phi_y^2 = \alpha(x, y) \quad (2-1)$$

$$Y = \nabla^2\phi = \phi_{xx} + \phi_{yy} = \beta(x, y) \quad (2-2)$$

$$Z = |H| = \phi_{xx} \cdot \phi_{yy} - \phi_{xy}^2 = \gamma(x, y) \quad (2-3)$$

がある。ただし、画像 $\phi(x, y)$ は C^2 -級であり、 $|H|$

はヘシアン行列を表す。この3式は、連立偏微分方程式であり、 ϕ が定数項、及び座標軸の平行移動や回転の自由を除いて決定される。ここでは、境界条件が与えられないこと、画像空間と特徴空間が可能な限り1対1対応がとれる特徴量をとることを考慮して(2-1)~(2-3)式を与えた。

また、特徴量はこのようなものに限るわけではなく、次の様な構造線オペレータでも可能である。

$$X' = D(\phi) \\ = \phi_{yy} \cdot \phi_x^2 - 2\phi_{xy} \cdot \phi_x \cdot \phi_y + \phi_{xx} \cdot \phi_y^2 \quad (2-4)$$

$$Y' = E(\phi) \\ = \phi_{xx} \cdot \phi_x^2 + 2\phi_{xy} \cdot \phi_x \cdot \phi_y + \phi_{yy} \cdot \phi_y^2 \quad (2-5)$$

$$Z' = C(\phi) \\ = (\phi_{yy} - \phi_{xx}) \phi_x \cdot \phi_y - (\phi_y^2 - \phi_x^2) \phi_{xy} \quad (2-6)$$

これら構造線オペレータと、グラジエント、ラプラシアン、ヘシアンには、次の様な関係がある。

$$E(\phi) + D(\phi) = |\nabla\phi|^2 \cdot \nabla^2\phi \quad (2-7)$$

$$E(\phi) \cdot D(\phi) - C(\phi)^2 = |\nabla\phi|^4 \cdot |H| \quad (2-8)$$

2. 2 特徴抽出

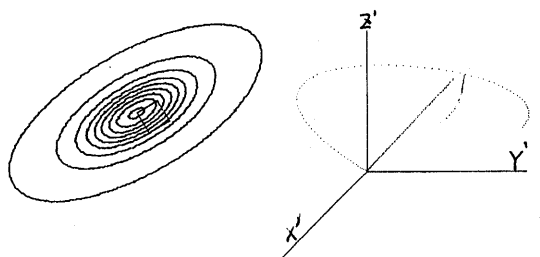
2.1節で述べたオペレータを用い、画像空間(x,y)から特徴空間(X,Y,Z)へ写像する。これは、x,yをパラメータとする曲面を定義したことになる(図1)。この曲面の構造が、画像の大域的構造を反映していると考えられる。

これに対して、フーリエ展開のような空間周波数領域への変換法では、画像を各周波数成分を軸とする特徴空間中の1点として捕える。この方法は、もちろん幾何学的不変性を満たしているが、一般に次元が多くなり、構造的特徴は反映されない。

3. 画像の再構成

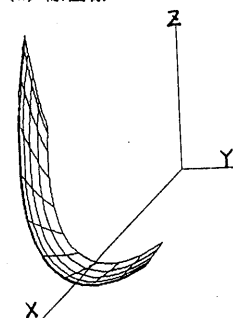
特徴空間より元の画像が復元できれば、選出した特徴は良いものといえる。これを、特徴空間の次元を上げることによって対応すると表現が複雑になり、特徴抽出オペレータを高次にするると雑音に弱いものとなる。そこで、特徴空間、特徴オペレータが低次であり、かつ、画像が復元できることを考慮し、2章で述べたオペレータを用いた。ここでは、特徴抽出オペレータからの画像の再構成について述べる。

(2-2)式は、ポアソン方程式とよばれ領域内の任意の位置について成立つ局所的関係のため、解く領域の境界に関する条件が規定されなければ、解は得られない^[2]。通常、画像の場合、境界線の形は矩形で与えられるため、

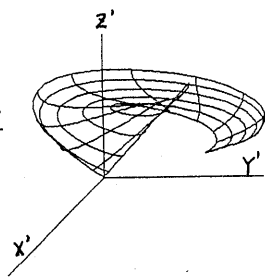


(a) 原画像

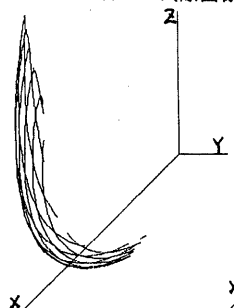
(e) 構造線オペレータ (= 0)



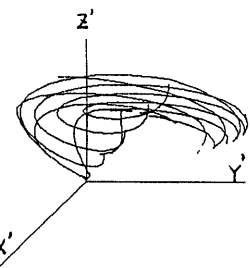
(b) グラジエント、ラプラシアン
ヘシアン、オペレータ(原画像)



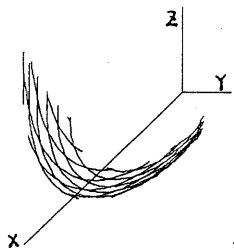
(f) 構造線オペレータ
(原画像)



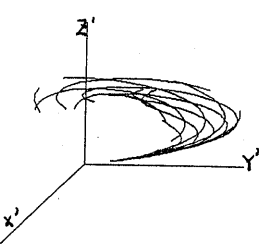
(c) グラジエント、ラプラシアン
ヘシアン(移動・回転画像)



(g) 構造線オペレータ
(移動・回転画像)



(d) グラジエント、ラプラシアン
ヘシアン(移動・回転画像
で一部重なった領域)



(h) 構造線オペレータ
(移動・回転画像
で一部重なった領域)

図1 局所的構造特徴空間の例

固定境界条件として境界線上で ϕ_x や ϕ_y が必要となる。また、(2-1) 式の形で境界条件を与えるならば、境界線が ϕ の等高線でなければならない。ここでは、境界条件が与えられないとの前提で、(2-1)~(2-3)を連立偏微分方程式とみなす。

今、画像中に特徴抽出オペレータを施して、

$$\phi_x^2 + \phi_y^2 = \alpha(x, y) \quad (3-1)$$

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} = \beta(x, y) \quad (3-2)$$

$$\phi_{xx} \cdot \phi_{yy} - \phi_{xy}^2 = \gamma(x, y) \quad (3-3)$$

の様に与えられると、(3-2) 式は、さらに、

$$2(\phi_x \cdot \phi_{xx} + \phi_y \cdot \phi_{xy}) = \alpha_x \quad (3-4)$$

$$2(\phi_x \cdot \phi_{xy} + \phi_y \cdot \phi_{yy}) = \alpha_y \quad (3-5)$$

と分解される。これらより ϕ_y は、

$$\begin{aligned} & (\alpha_x^2 + \alpha_y^2) \phi_y^4 - (4\beta \alpha_x \alpha_x^2 + \alpha_y) \phi_y^3 \\ & + (4\beta^2 \alpha_x^2 + 4\beta^2 \alpha_x^2 \alpha_y^2 - \alpha_x \alpha_x^2 \alpha_y^2) \phi_y^2 \\ & + (4\beta \alpha_x^2 \alpha_x^2 + \alpha_y^2 - 4\beta \alpha_x^2 \alpha_y - 16\beta \gamma \alpha_x^3 \alpha_y) \phi_y \\ & + [16\gamma^2 \alpha_x^4 + \{\alpha(\alpha_x^2 + \alpha_y^2)\}^2 + 8\gamma \alpha_x^3 (\alpha_x^2 + \alpha_y^2) \\ & - 4\beta^2 \alpha_x^3 \alpha_y^2] = 0 \end{aligned} \quad (3-6)$$

となり、 ϕ_y の4次式となる。 $\alpha, \beta, \gamma, \alpha_x, \alpha_y$ は既知であり、(3-6) 式の解の存在は保証されている。したがって、 ϕ の再構成が可能となる。同様に、 ϕ_x についても求められる。

また、構造線オペレータからの画像復元は、(3-1)~(3-3)の特徴抽出オペレータと関連づけて考えることができる。力線方向(u 方向)、等高線方向(v 方向)に基ベクトルをもつ局所座標系u-v での曲面を $\psi(u, v)$ とすると、構造線オペレータは、

$$D = \psi_{vv} \cdot \psi_u^2 - 2\psi_{uv} \cdot \psi_u \cdot \psi_v + \psi_{uu} \cdot \psi_v^2 \quad (3-7)$$

$$E = \psi_{uu} \cdot \psi_u^2 + 2\psi_{uv} \cdot \psi_u \cdot \psi_v + \psi_{vv} \cdot \psi_v^2 \quad (3-8)$$

$$C = (\psi_{vv} \cdot \psi_{uu}) \psi_u \cdot \psi_v - (\psi_v^2 - \psi_u^2) \psi_{uv} \quad (3-9)$$

となる。さらに、原点において $\psi_v=0$ なので、

$$D' = \psi_{vv} \cdot \psi_u^2 \quad (3-7')$$

$$E' = \psi_{uu} \cdot \psi_u^2 \quad (3-8')$$

$$C' = \psi_{uv} \cdot \psi_u^2 \quad (3-9')$$

となる^[3]。また、これと同じ方法で、

$$\psi_u^2 = \alpha(u, v) \quad (3-1')$$

$$\psi_{uu} + \psi_{vv} = \beta(u, v) \quad (3-2')$$

$$\psi_{uu} \cdot \psi_{vv} - \psi_{uv}^2 = \gamma(u, v) \quad (3-3')$$

の様に与えられる。両者ともに $\psi_{vv}, \psi_{uu}, \psi_{uv}$ で表されることがわかる。 $\psi(u, v)$ が既知であるとする、

$\psi(u+\Delta u, v+\Delta v)$ は、

$\psi(u+\Delta u, v+\Delta v) \approx \psi(u, v) + \psi_u \Delta u$

$$+ \frac{1}{2} \psi_{uu} \Delta u^2 + \frac{1}{2} \psi_{vv} \Delta v^2 + \frac{1}{2} \psi_{uv} \Delta u \Delta v \quad (3-10)$$

となり、 $\psi(u+\Delta u, v+\Delta v)$ を求めることができる。

4. 画像の部分マッチング

画像 $\phi(x, y)$ に対して ϕ の部分画像を $\psi(s, t)$ とする。ただし、 ψ は ϕ に対して、平行移動、回転、及び定数項の付加を許す。いま、 $\phi(x, y), \psi(s, t)$ に対応する局所的構造特徴空間の曲面を $\Phi(x, y), \Psi(s, t)$ とする。 ϕ と ψ の部分マッチングは、 Ψ が Φ の一部に重なり合っているかを見つけ、 $(x, y) \leftrightarrow (s, t)$ の対応を決定することになる。通常、 Φ と Ψ が完全に重なり合うことはないので、 Φ と Ψ の曲面の存在度の量を導入する。これは、2つの曲面 Φ, Ψ が同時に存在する度合いが大きいところを見つけるものである。

4.1 局所的構造特徴空間における曲面存在度

特徴空間の点 (X, Y, Z) で画像空間の点 (x, y) が存在する度合、特徴空間の点 (X, Y, Z) で画像空間の点 (s, t) が存在する度合をそれぞれ、

$$d\phi(X, Y, Z; x, y) = \exp\left[-\left\{\frac{(X - \phi^x(x, y))^2}{2\sigma^2} + \frac{(Y - \phi^y(x, y))^2}{2\sigma^2} + \frac{(Z - \phi^z(x, y))^2}{2\sigma^2}\right\}\right] \quad (4-1)$$

ここで、 $\phi = (\phi^x, \phi^y, \phi^z)$

$$d\psi(X, Y, Z; s, t) = \exp\left[-\left\{\frac{(X - \psi^x(s, t))^2}{2\sigma^2} + \frac{(Y - \psi^y(s, t))^2}{2\sigma^2} + \frac{(Z - \psi^z(s, t))^2}{2\sigma^2}\right\}\right] \quad (4-2)$$

ここで、 $\psi = (\psi^x, \psi^y, \psi^z)$

とすると (X, Y, Z) について曲面が存在する度合は、

$$\bar{d}\phi(X, Y, Z) = \iint d\phi(X, Y, Z; x, y) dx dy \quad (4-3)$$

$$\bar{d}\psi(X, Y, Z) = \iint d\psi(X, Y, Z; s, t) ds dt \quad (4-4)$$

となる。したがって、これら2つの曲面 Φ, Ψ が同時に存在する度合は、 $\bar{d}\phi \cdot \bar{d}\psi$ となる。ここで、

$\bar{d}\phi \cdot \bar{d}\psi \rightarrow \max$ なる X, Y, Z を求めると、

$$X = \frac{(\phi^x(x, y) + \psi^x(s, t))}{2} \quad (4-5)$$

$$Y = \frac{(\phi^y(x, y) + \psi^y(s, t))}{2} \quad (4-6)$$

$$Z = \frac{(\phi^z(x, y) + \psi^z(s, t))}{2} \quad (4-7)$$

となり、ある (x,y) に対して、

$$d\phi \rightarrow \max, \quad d\psi \rightarrow \max$$

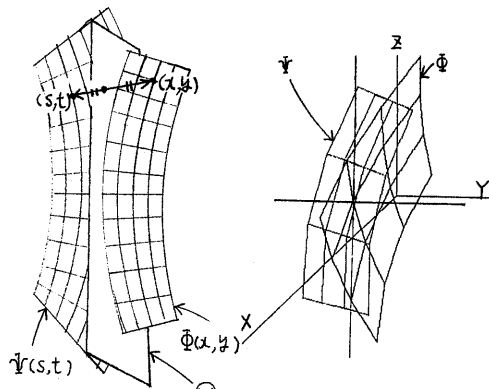
であるような (s,t) は、

$$|\phi(x,y) - \psi(s,t)| \rightarrow \min \quad (4-8)$$

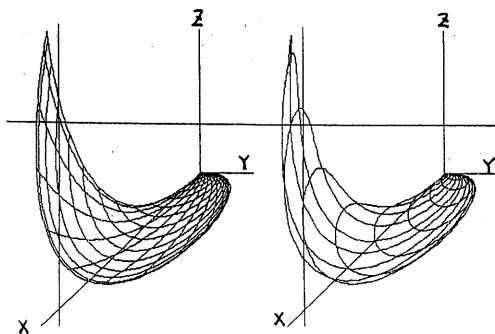
を満たすものとなる。そこで、 $\phi(x,y)$ 、 $\psi(s,t)$ の共有部分が存在するか否かは、 $\bar{d}\phi \cdot \bar{d}\psi$ にしきい値を設定し、それ以上の空間領域に対して存在するものとする。全領域に対しては、この操作を繰り返さない、 $\bar{d}\phi \cdot \bar{d}\psi$ の尾根追跡をする。

4.2 局所的構造特徴空間における曲面の対応

2つの曲面 $\phi(x,y)$ 、 $\psi(s,t)$ の特徴空間上での $(x,y) \leftrightarrow (s,t)$ の対応は、 $\bar{d}\phi \cdot \bar{d}\psi$ によって、曲面 ϕ と ψ の間に存在度が大きい空間的極値の曲面 θ ができる。この曲面上の1点を決めると、(4-8)式を満たす (x,y) 、 (s,t) が一意に求まる。即ち、 θ 上にある1点 (i,j) を決め、 (i,j) 、 (x,y) 間の最小costを探せば ϕ 上の1点が求まる。そして、 (i,j) 、 (s,t) 間のcostが、 (i,j) 、 (x,y) 間と等しい点を探せば ψ 上の1点が求まる(図2)。



(a) 曲面の対応の概念 (c) ϕ 、 ψ の対応



(b) ϕ 画像の位置 (d) ψ 画像の位置

図2 曲面の対応例

5. おわりに

画像のパターン認識において、局所的構造の認識から大域的構造への認識という階層性を考えた場合、本稿で提案した局所的構造特徴空間は、極めて有効な概念である。さらに、画像を復元することが可能であり、十分な表現力をもつ。

また、パターンマッチングは、その空間において、単に曲面のマッチングとして行なえばよい。さらに、画像の中に、同じ部分画像が散在する場合にも拡張可能であると思われる。

最後に、今後の課題として、次の様なことを上げておきたい。局所的構造特徴空間を抽出するオペレータは、微分にもとづいているので、画像の分解能やボケとの関連性を考慮しておく必要がある。また、パターンマッチングでは、空間的な演算が非常に多くでてくるので、効率の良いアルゴリズムを考える必要がある。

参考文献

- [1] 渡辺, 榎本: "幾何学的に不変な特徴に基づく画像の合成と認識", 信学技報, IE82-40 (1982)
- [2] 榎園正人: "境界要素解析", 培風館
- [3] 榎本, 片山, 鶴見, 伊藤: "特徴線・輪郭線・分割線のプログラムとその応用", 情報処理学会プログラムシンポジウム, (1973)