

連続講座

断層映像法の基礎 第19回
画像の位置合わせ篠原 広行¹⁾・桑山 潤²⁾・橋本 雄幸³⁾¹⁾ 首都大学東京健康福祉学部 放射線学科²⁾ 首都大学東京保健科学研究所³⁾ 横浜創英短期大学 情報学科

はじめに

画像の位置合わせは同一の被写体において、異なる時間に撮像した2つの画像を比較する場合や、MRIとPETなど異なる画像間の位置合わせの場合に必要な。画像の変形を伴わない剛体モデルを仮定すると後者のようなイメージング手段の異なる画像間の位置合わせについては、相互情報量 (mutual information) による画像位置合わせが臨床で用いられている。相互情報量は通信分野のエントロピーの考えを利用したものである。第19回では相互相関関数による画像位置合わせを解説する。第20回からは相互情報量による画像位置合わせを解説する。

本稿では、同一の被写体のMRI画像において、撮像した2つの画像に回転と平行移動のずれがあると仮定し、そのずれを相互相関関数によって検出し補正する方法を示し、計算機シミュレーションで確認する。はじめに、これまで解説したフーリエ級数、フーリエ変換では2つの関数 (データ列) の積を積分 (総和) したが、この操作は2つの関数間の類似度の指標 (相関係数) になることを示し相互相関関数の数学的な導入とする。

1. 自己相関関数と相互相関関数
2. 画像の自己相関関数と相互相関関数
3. 原画像と観測画像との相互相関関数
4. フーリエ位相相関法による画像位置合わせ

1. 自己相関関数と相互相関関数

1.1 ベクトルの内積

フーリエ級数、フーリエ変換、相互相関関数は2つのデータ列あるいは関数間の類似度に関係する。類似度はベクトルの内積に由来するので、図1の2次元平面のベクトルの内積について復習する。ベクトル f , g は x 成分、 y 成分を用い次式で表される。

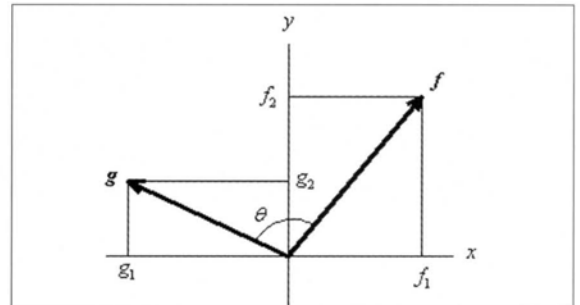


図1 2次元ベクトル空間

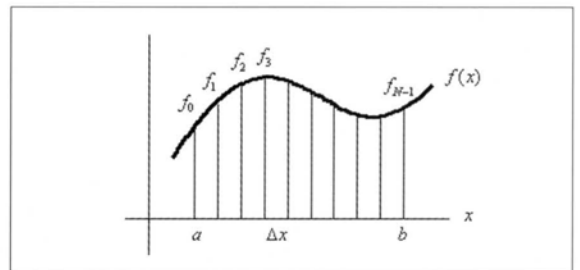
ベクトル f , g は x 成分、 y 成分を用い表される。

図2 関数空間

ある関数 $f(x)$ を区間 $[a, b]$ でサンプリング間隔 Δx で離散化する場合を示す。サンプリングされた N 個のデータの集合は N 次元ベクトル空間とみなすことができる。ここで Δx を無限小にすると元の関数になることから、ベクトル空間との関連で関数空間という。

$$f = \{f_0, f_1\}, \quad g = \{g_0, g_1\}$$

ベクトルの大きさ (ノルム) は各成分の2乗和の平方根で表される。

$$|f| = \sqrt{f_0^2 + f_1^2}, \quad |g| = \sqrt{g_0^2 + g_1^2} \quad (1)$$

ベクトルの内積は f , g の大きさとそれらのなす角度を θ とすると次式で定義される。

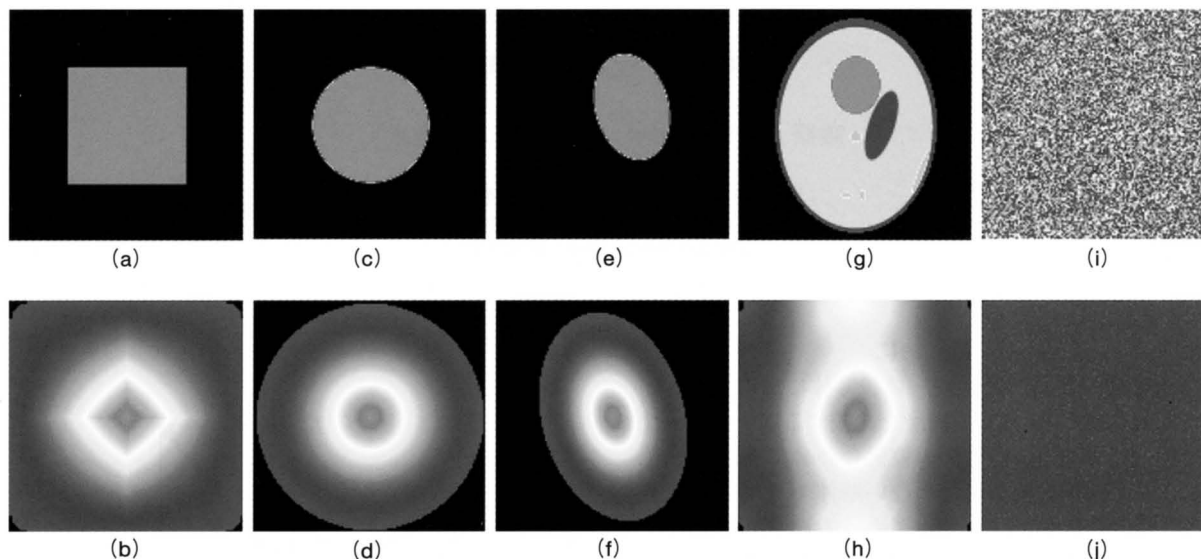


図3 自己相関関数

(a) 矩形画像、(b) 矩形画像の自己相関関数、(c) 円画像、(d) 円画像の自己相関関数、(e) 楕円画像、(f) 楕円画像の自己相関関数、(g) 楕円を組み合わせたファントムの画像、(h) 楕円を組み合わせたファントムの自己相関関数、(i) 乱数画像、(j) 乱数画像の自己相関関数。

$$\langle f, g \rangle = |f| \cdot |g| \cos \theta \quad (2)$$

(2) 式から

$$r = \cos \theta = \frac{\langle f, g \rangle}{|f| \cdot |g|} \quad (3)$$

が得られる。これは相関係数とよばれる。相関係数は $-1 \leq r \leq 1$ であり、 f, g が同じ方向のとき $r = 1$ ($\theta = 0$)、反対方向のとき $r = -1$ ($\theta = 180$) である。 $r = 0$ ($\theta = 90$) のとき2つのベクトルは直交 (orthogonal) という。 f, g の内積は各成分を用いて

$$\langle f, g \rangle = f_0 g_0 + f_1 g_1 \quad (4)$$

で定義される。 f と g が同じベクトルである場合の内積は (3) 式で $\theta = 0$ であるから

$$\langle f, f \rangle = |f|^2 = f_0^2 + f_1^2 \quad (5)$$

となる。相関係数は (5) 式を用い次式で計算できる。

$$r = \cos \theta = \frac{f_0 g_0 + f_1 g_1}{\sqrt{f_0^2 + f_1^2} \sqrt{g_0^2 + g_1^2}} \quad (6)$$

2次元空間や3次元空間ではベクトルは大きさと方向をもつものとして2次ベクトルや3次元ベクトルとして定義される。これを4次元以上に拡張し N 個のデータの集合がある場合には N 次元ベクトル空間と定義する。

$$\begin{aligned} f &= \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}, \quad g = \{g_0, g_1, \dots, g_{N-1}\} \\ \langle f, g \rangle &= f_0 g_0 + f_1 g_1 + \dots + f_{N-1} g_{N-1} = \sum_{j=0}^{N-1} f_j g_j \end{aligned} \quad (7)$$

$$|f| = \sqrt{f_0^2 + f_1^2 + \dots + f_{N-1}^2} = \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} f_j^2}, \quad (8)$$

$$|g| = \sqrt{g_0^2 + g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_{N-1}^2} = \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} g_j^2}$$

ベクトルの大きさを (8) 式で定義するとデータ数 N に依存するため N で除し

$$|f| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j^2}, \quad |g| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} g_j^2}, \quad (9)$$

でベクトルの大きさと定義する。 N 次元空間のベクトルの内積についても同様に N で除し次式で定義する。

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j g_j \quad (10)$$

相関係数は次式で表される。

$$r = \cos \theta = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j g_j}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} g_j^2}} \quad (11)$$

図2はある関数 $f(x)$ を区間 $[a, b]$ でサンプリング間隔 Δx で離散化する場合を示す。するとサンプリングされた N 個のデータの集合は N 次元ベクトル空間とみなすことができる。ここで Δx を無限小にするように N を無限大にしていくと元の関数になり、ベクトル空間との関連性から関数空間という。すなわち Δx を無

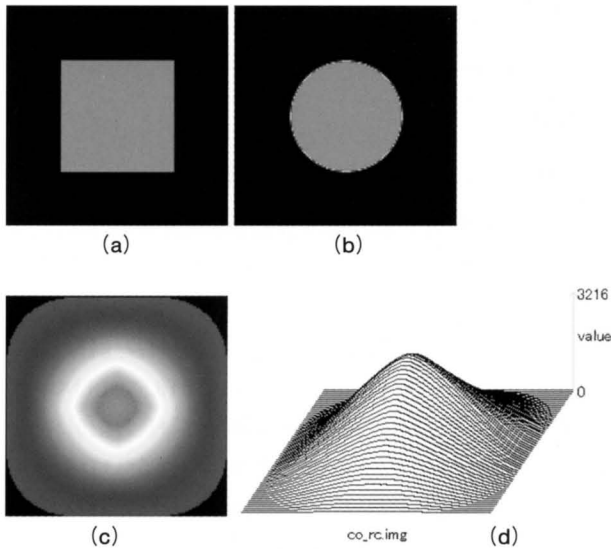


図4 矩形画像と円画像の相互相関関数

(a) 矩形画像、(b) 円画像、(c) 矩形画像と円画像の相互相関関数、(d) 相互相関関数の鳥瞰図。

限小にしベクトル f のデータ数 N を無限大にしたものが $f(x)$ を表すといえる。 N を無限大にした関数空間では(9)式は次式で表される。

$$\|f(x)\| = \sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b f^2(x) dx} \quad (12)$$

内積は

$$\langle f(x), g(x) \rangle = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)g(x) dx \quad (13)$$

で表される。 $f(x)$ 、 $g(x)$ が T を周期とする周期関数であるときは

$$\begin{aligned} \|f(x)\| &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(x) dx}, \\ \|g(x)\| &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g^2(x) dx} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\langle f(x), g(x) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x)g(x) dx \quad (15)$$

から相関係数は次式で表される。

$$r = \cos \theta = \frac{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x)g(x) dx}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(x) dx} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g^2(x) dx}} \quad (16)$$

1.2 相互相関関数

ベクトルの内積をもとに2つのデータ間の類似度を

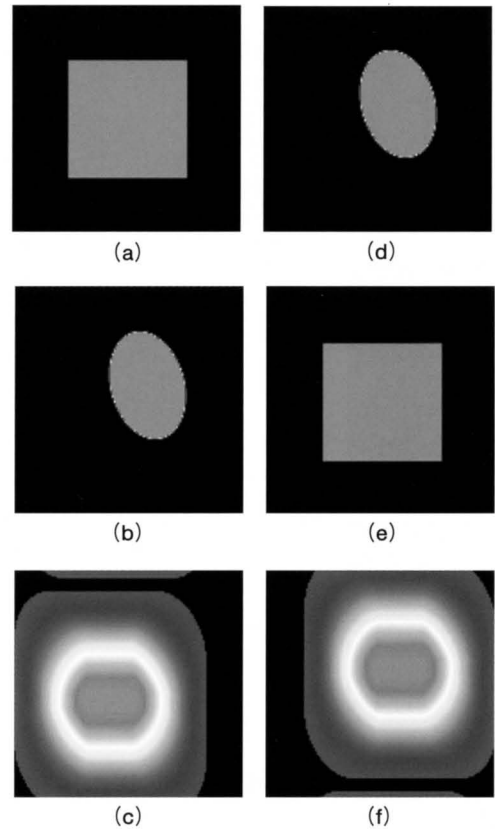


図5 矩形画像と楕円画像の相互相関関数

(a) 矩形画像、(b) 円画像、(c) 矩形画像を $f(x, y)$ とし円画像を $g(x, y)$ としたときの相互相関関数、(d) 円画像、(e) 矩形画像、(f) 円画像を $f(x, y)$ とし矩形画像を $g(x, y)$ としたときの相互相関関数。画像を入れ替えて相互相関関数を求めると、180度反転した画像になる。

表す相関係数について説明した。一方のデータを固定し他方のデータを推移し相関係数を計算すると、相関係数は推移量の関数になる。このように推移量を変数として相関係数を表したものを相互相関関数といい、パターン認識に利用される。 $N = 8$ のデータについてこれまでと異なり以下のように表すことにする。

$$f[j] = \{f[0], f[1], f[2], f[3], f[4], f[5], f[6], f[7]\}$$

$$g[j] = \{g[0], g[1], g[2], g[3], g[4], g[5], g[6], g[7]\}$$

一方のデータを推移して相関係数を求めるには次式の計算を行う。

$$R[x] = \sum_{j=0}^{N-1} f[j] g[x+j] = \sum_{j=0}^{N-1} g[j] f[x+j] \quad (17)$$

ここで、 $f[j]$ 、 $g[j]$ は離散データなので次式の周期性

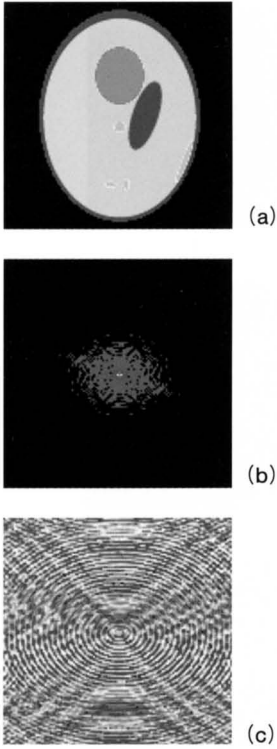


図6 楕円を組み合わせたファントムの周波数空間での振幅と位相の画像

(a) 楕円を組み合わせたファントムの画像、(b) 周波数空間での振幅の画像、(c) 周波数空間での位相の画像。

をもつとする。

$$f[j] = f[j+nN], g[j] = g[j+nN] \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (18)$$

$f[j]$ 、 $g[j]$ が以下のデータで表されるとき

$$f[j] = \{1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1\}$$

$$g[j] = \{1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1\}$$

(18) 式で $n = \pm 1$ とした場合、周期性をもつデータは以下で表される。

$$f[j] = \{1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1\}$$

$$g[j] = \{1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1, 0.5, 0, 0, 0.5, 1\}$$

ここで、太字の数字列ははじめのデータ、左の数字列は $n = -1$ の場合、右の数字列は $n = 1$ の場合を示す。 $n = -1$ とすると

$$f[j] = f[j-N]$$

から

$$f[0] = f[-8], f[1] = f[-7], \dots, f[7] = f[-1]$$

$n = 1$ とすると

$$f[j] = f[j+N]$$

から

$$f[0] = f[8], f[1] = f[9], \dots, f[7] = f[15]$$

周期性を利用すると $h[x + j]$ において $x = 0, 1, \dots, 7$ のそれぞれの推移量に対し j が $j = 0, 1, \dots, 7$ と変化したときの

$$\begin{aligned} R[0] &= f[0]g[0] + f[1]g[1] + \dots + f[6]g[6] + f[7]g[7] \\ &= 1 \times 1 + 1 \times 1 + 0.5 \times 0.5 + 0 \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 0 + 0.5 \times 0.5 + 1 \times 1 = 3.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[1] &= f[0]g[1] + f[1]g[2] + \dots + f[6]g[7] + f[7]g[0] \\ &= 1 \times 1 + 1 \times 0.5 + 0.5 \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 0 + 0.5 \times 1 + 1 \times 1 = 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[2] &= f[0]g[2] + f[1]g[3] + \dots + f[6]g[0] + f[7]g[1] \\ &= 1 \times 0.5 + 1 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 0.5 + 0 \times 1 + 0.5 \times 1 + 1 \times 1 = 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[3] &= f[0]g[3] + f[1]g[4] + \dots + f[6]g[1] + f[7]g[2] \\ &= 1 \times 0 + 1 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0 \times 0.5 + 0 \times 1 + 0 \times 1 + 0.5 \times 1 + 1 \times 0.5 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[4] &= f[0]g[4] + f[1]g[5] + \dots + f[6]g[2] + f[7]g[3] \\ &= 1 \times 0 + 1 \times 0 + 0.5 \times 0.5 + 0 \times 1 + 0 \times 1 + 0 \times 1 + 0.5 \times 0.5 + 1 \times 0 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[5] &= f[0]g[5] + f[1]g[6] + \dots + f[6]g[3] + f[7]g[4] \\ &= 1 \times 0 + 1 \times 0.5 + 0.5 \times 1 + 0 \times 1 + 0 \times 1 + 0 \times 0.5 + 0.5 \times 0 + 1 \times 0 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[6] &= f[0]g[6] + f[1]g[7] + \dots + f[6]g[4] + f[7]g[5] \\ &= 1 \times 0.5 + 1 \times 1 + 0.5 \times 1 + 0 \times 1 + 0 \times 0.5 + 0 \times 0 + 0.5 \times 0 + 1 \times 0 = 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R[7] &= f[0]g[7] + f[1]g[0] + \dots + f[6]g[5] + f[7]g[6] \\ &= 1 \times 1 + 1 \times 1 + 0.5 \times 1 + 0 \times 0.5 + 0 \times 0 + 0 \times 0 + 0.5 \times 0 + 1 \times 0 = 2 \end{aligned}$$

2. 画像の自己相関関数と相互相関関数

画像を2次元の関数で表し、その関数を $f(x, y)$ とする。その $f(x, y)$ の2次元フーリエ変換を $F(\xi, \eta)$ とすれば、その画像のパワースペクトルは

$$F(\xi, \eta) \cdot F^*(\xi, \eta) \quad (19)$$

と表される。また、自己相関関数は

$$F^{-1}\{F(\xi, \eta)F^*(\xi, \eta)\} \quad (20)$$

で与えられる。ここで、 $F^*(\xi, \eta)$ は $F(\xi, \eta)$ の複素共役 (複素数を $x + iy$ で表すとき、その複素共役は $x - iy$) を表し、 F^{-1} はフーリエ逆変換を表す。画像を2次元フーリエ変換しこれと複素共役をとったものとを乗算する。その結果をフーリエ逆変換すれば自己相関関数となる。自己相関関数は実空間において次式で表される。

$$R_H(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') f(x+x', y+y') dx' dy' \quad (21)$$

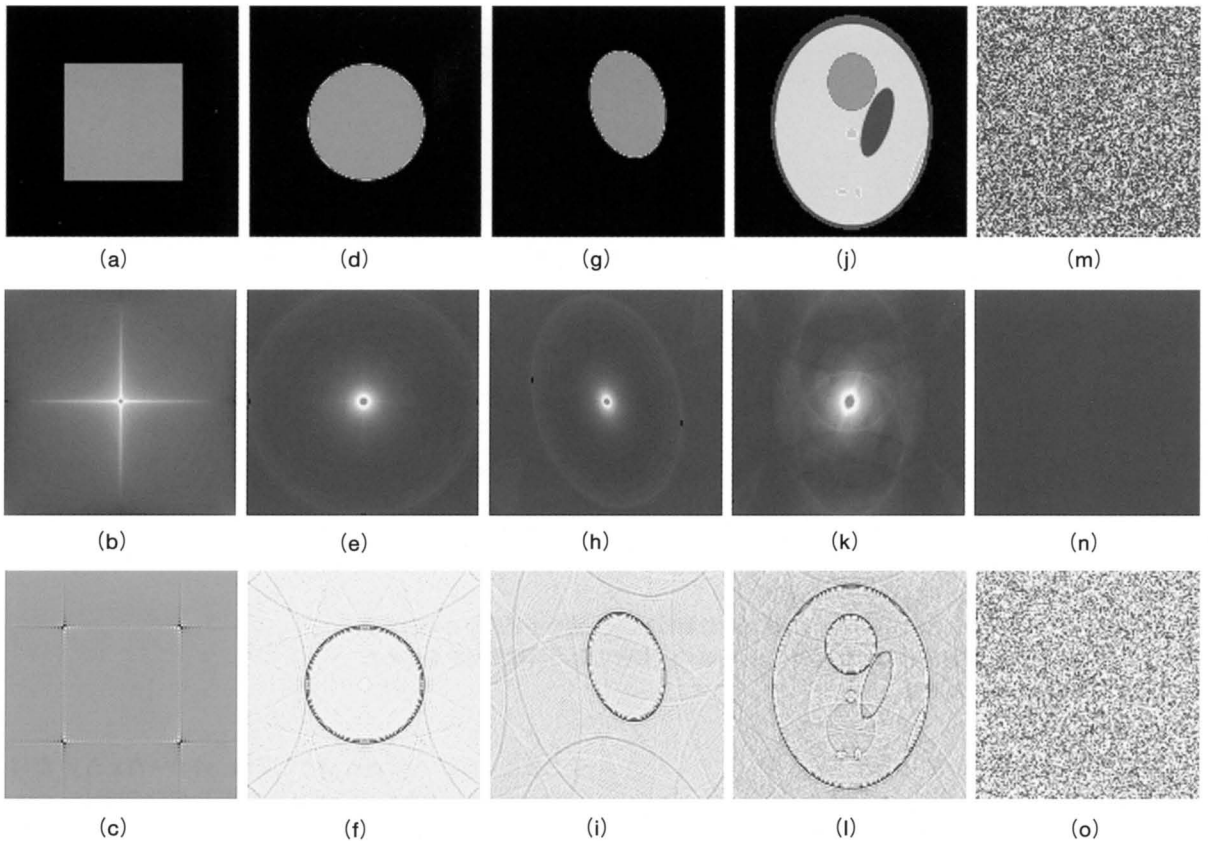


図7 振幅画像と位相画像

(a) 矩形画像、(b) 矩形画像の振幅画像、(c) 矩形画像の位相画像、(d) 円画像、(e) 円画像の振幅画像、(f) 円画像の位相画像、(g) 楕円画像、(h) 楕円画像の振幅画像、(i) 楕円画像の位相画像、(j) 楕円を組み合わせたファントムの画像、(k) 楕円を組み合わせたファントムの振幅画像、(l) 楕円を組み合わせたファントムの位相画像、(m) 乱数画像、(n) 乱数画像の振幅画像、(o) 乱数画像の位相画像。

この式は、画像の関数 $f(x, y)$ を x と y だけずらして掛け合わせ、それを全領域で足し合わせている。よって、自己相関関数は x と y がゼロのとき最も大きな値になる。

様々な画像に対して、その自己相関関数を計算した結果を図3に示す。自己相関関数の場合、実際の計算結果でも中央が最も高く、周りに向かって値が小さくなる。特に乱数画像の場合は、中央の値が周りに比べて極端に大きくなる。

また、自己相関関数の片方の $f(x, y)$ を他の画像の $g(x, y)$ とし、その2次元フーリエ変換を $G(\xi, \eta)$ とすれば、 $f(x, y)$ との相互相関関数となり、

$$F^{-1}\{F(\xi, \eta)G^*(\xi, \eta)\} \quad (22)$$

と表される。これは、それぞれの画像を2次元フーリエ変換し、片方の画像の複素共役をとったものと乗算する。その結果をフーリエ逆変換すれば相互相関関数となる。この相互相関関数は実空間において次式

で表される。

$$R_{fg}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') g(x+x', y+y') dx' dy' \quad (23)$$

相互相関関数の場合、関数 $f(x, y)$ と $g(x, y)$ を入れ替えると、相関関数が変わってくる。式では、

$$\begin{aligned} R_{gf}(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x', y') f(x+x', y+y') dx' dy' \\ &= F^{-1}\{G(\xi, \eta)F^*(\xi, \eta)\} \\ &= F^{-1}\{[F(\xi, \eta)G^*(\xi, \eta)]^*\} \end{aligned} \quad (24)$$

となり、周波数空間では複素共役の形になる。

矩形画像と円画像の相互相関関数を計算した結果を図4に示す。相互相関関数の画像と鳥瞰図が示されている。また、矩形画像と楕円画像の相互相関関数を計算した結果を図5に示す。相互相関関数の場合、画像を入れ替えて計算すると、相互相関関数が180度反転した画像になる。これは、周波数空間で複

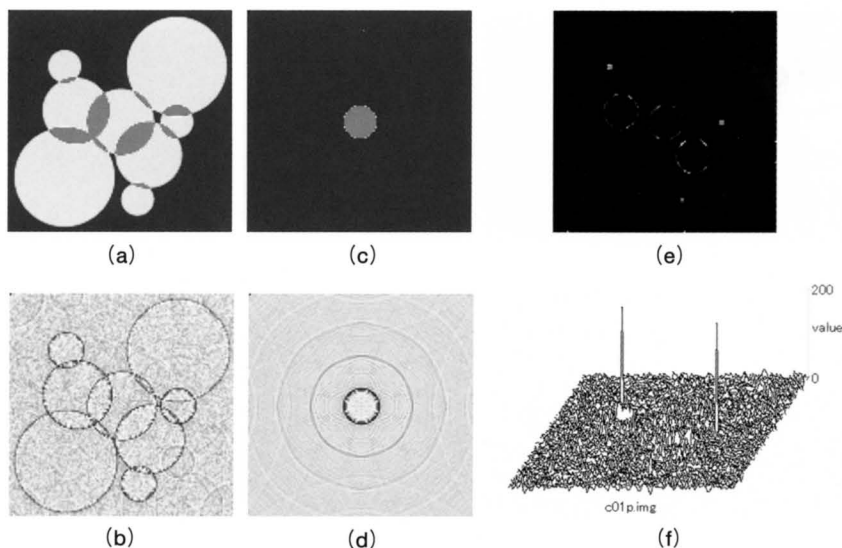


図8 フーリエ位相相関法を用いたパターン認識

(a) 円の組み合わせ画像、(b) 円の組み合わせ画像の位相画像、(c) 最も半径の小さい円を参照画像にした画像、(d) 参照画像の位相画像、(e) 両者の位相画像の相互相関関数を求めた相関画像、(f) 相関画像の鳥瞰図。

素共役をとった形になっている。

3. 原画像と回転および平行移動を生じた観測画像との相互相関関数

相互相関関数は、2つの関数が一致したとき最大となる。よって、2つの画像が回転していた場合、片方を回転して、相互相関関数の最大値を調べ、その値が最も大きくなる回転角が、両者の画像の回転の違いとなる。回転角が一致して、平行移動のみの違いになったら、相互相関関数を改めて求めて、その最大値の位置が平行移動の距離に相当する。また、平行移動の距離は、相互相関関数の重心位置からも求めることができる。関数 $f(x, y)$ の重心座標 (x_G, y_G) は、

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{\iint x \cdot f(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy} \\ y_G &= \frac{\iint y \cdot f(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy} \end{aligned} \quad (25)$$

で求められる。自己相関関数 $R_{ff}(x, y)$ の重心は原点となり、式で表すと、

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{\iint x \cdot R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} = 0 \\ y_G &= \frac{\iint y \cdot R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

となる。(23) 式で $g(x, y)$ として $f(x, y)$ が $(\Delta x, \Delta y)$ だけ平行移動したものとすると、その相互相関関数は、

$$\begin{aligned} R_{fg}(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') f(x - \Delta x + x', y - \Delta y + y') dx' dy' \\ &= R_{ff}(x - \Delta x, y - \Delta y) \end{aligned} \quad (27)$$

となる。この関数の重心を計算すると、

$$x_G = \frac{\iint x \cdot R_{ff}(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy}{\iint R_{ff}(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy} \quad (28)$$

となる。ここで、 $x' = x - \Delta x$ 、 $y' = y - \Delta y$ とにおいて、(28) 式に代入すると、

$$x_G = \frac{\iint (x' + \Delta x) \cdot R_{ff}(x', y') dx' dy'}{\iint R_{ff}(x', y') dx' dy'} \quad (29)$$

となる。これを計算すると、

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{\iint x \cdot R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} + \frac{\Delta x \cdot \iint R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} \\ &= \Delta x \end{aligned} \quad (30)$$

となり、 x 方向の重心と平行移動量が一致する。また、同様に y 方向の重心は、

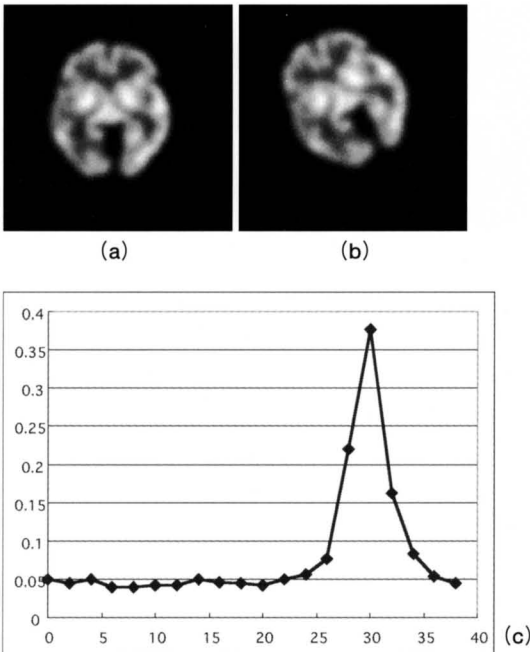


図9 回転角と相互相関関数

(a) 原画像、(b) 原画像を反時計回りに30度回転した画像、(c) フーリエ位相相関で画像を回転しながら計算し、その相関値をグラフにしたもの。30度のところで相関値が最大になっている。

$$\begin{aligned}
 y_G &= \frac{\iint y \cdot R_{ff}(x-\Delta x, y-\Delta y) dx dy}{\iint R_{ff}(x-\Delta x, y-\Delta y) dx dy} \\
 &= \frac{\iint (y+\Delta y) \cdot R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} \\
 &= \frac{\iint y \cdot R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} + \frac{\Delta y \cdot \iint R_{ff}(x, y) dx dy}{\iint R_{ff}(x, y) dx dy} \\
 &= \Delta y
 \end{aligned} \quad (31)$$

となり、y方向の重心と平行移動量も一致する。よって、相互相関関数の重心は、平行移動の移動量に一致する。

4. フーリエ位相相関法による画像位置合わせ

$f(x, y)$ の2次元フーリエ変換 $F(\xi, \eta)$ は、振幅と位相を用いると

$$F(\xi, \eta) = |F(\xi, \eta)| \exp[i\phi(\xi, \eta)] \quad (32)$$

のように表される。ここで、 $|F(\xi, \eta)|$ は振幅、 $\phi(\xi, \eta)$ は位相である。 $|F(\xi, \eta)|$ の実部と虚部をそれぞれ $F_{Re}(\xi, \eta)$ 、 $F_{Im}(\xi, \eta)$ とすれば、

$$|F(\xi, \eta)| = \sqrt{\{F_{Re}(\xi, \eta)\}^2 + \{F_{Im}(\xi, \eta)\}^2} \quad (33)$$

$$\phi(\xi, \eta) = \tan^{-1} \frac{F_{Im}(\xi, \eta)}{F_{Re}(\xi, \eta)} \quad (34)$$

と表される。

Sheppファントムの画像をフーリエ変換し、振幅と位相の画像にした結果を図6に示す。

位相部分のフーリエ逆変換は

$$\begin{aligned}
 f^\phi(x, y) &= F^{-1} \{ \exp[i\phi(\xi, \eta)] \} \\
 &= F^{-1} \left\{ \frac{F(\xi, \eta)}{|F(\xi, \eta)|} \right\}
 \end{aligned} \quad (35)$$

となる。こうして計算された画像を位相画像と定義する。一方、振幅部分のフーリエ逆変換は、

$$f^A(x, y) = F^{-1} \{ |F(\xi, \eta)| \} \quad (36)$$

となり、この画像を振幅画像と定義する。振幅画像は主として原画像の強度に関する情報を表し、位相画像は主として形状に関する情報を表す。

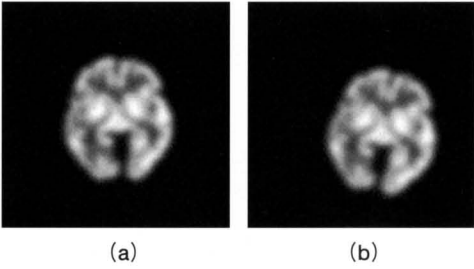
矩形、円、楕円、Sheppファントム、乱数画像の振幅画像と位相画像を図7に示す。これらの画像を比較すると、位相画像はパターンの形状に関する特徴を強調する性質がある。このことから、位相画像はパターン認識に応用されている。画像をフーリエ変換すると、通常低周波数成分の振幅が大きく高周波数になるにつれ振幅は減少するが、位相画像は各周波数における周波数成分をその振幅で割り算している。そのため振幅の周波数分布を平均化して全周波数成分の振幅を1に規格化する。その結果、低周波数成分の振幅は相対的に弱められ、高周波数成分は強められる。

この位相画像を利用して、画像の相関をとりパターン認識に応用する方法をフーリエ位相相関法という。フーリエ位相相関をとりたい2つの画像の位相画像を求め、相関画像を求める。この手順で求めた相関画像を図8に示す。半径の異なる円を組み合わせた画像に対して、半径の最も小さい円を参照画像にし、フーリエ位相相関をとっている。その相互相関関数では、円を組み合わせた画像において最も半径の小さい円が存在する位置に大きな値が生じている。その座標を調べれば、半径の最も小さい円の存在する位置が特定できる。

フーリエ位相相関法を用いて、平行移動と回転を行った2つの画像の移動量と回転角を推定することができる。フーリエ位相相関法では、片方の画像を回転し、その画像との位相相関をとり、相関の値が最も大きな所を回転角と推定している。推定の例を図9に示す。原画像に対して、反時計回りに30度回転させて、平行移動した画像を作成し、原画像と回転移動画像

のフーリエ位相相関関数を計算する。原画像を2度ずつ回転し、フーリエ位相相関をとり、その相関値をグラフにする。そのグラフより、最大になる値が推定した回転角になる。図9では、推定した回転角が実際に回転した角度に一致している。

その回転角の推定アルゴリズムを利用して、移動量と回転角を同時に求めることができる。回転角は、10度おきに相関値を調べて、相関値が最も大きくなる角度周りをさらに1/10の精度で調べる。それを繰り返すことにより、より高い精度で回転角を推定することができる。移動量は、回転角を推定した後に、改めてフーリエ位相相関関数を求め、その重心の座標より推定する。その推定計算の結果を図10に示す。回転角は10.234度回転しているが、推定でも10.234を推定できている。また移動量は、(10.2、-7.3)を移動しているが、推定した値は、(10.1919、-7.3026)とサブピクセル単位まで推定できている。



Angle	[10.234013 degree]
Movement	[10.1919、 -7.3026]

(c)

図10 フーリエ位相相関法を用いた移動と回転の推定
(a) 原画像、(b) 原画像を10.234° 回転し、(10.2、-7.3) だけ移動した画像、(c) 推定の結果を示している。

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター((社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX : 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619