

パラメトリックテンプレート空間の圧縮

田中 弘一 佐野 睦夫 大原 秀一 奥平 雅士

NTT ヒューマンインタフェース研究所

〒180 東京都武蔵野市緑町3-9-11

あらまし

カメラ画像内で個体変動や環境変動などの変動要因をもつ対象物を探索する手法であるパラメトリックテンプレート法を、与えられるテンプレート集合が冗長性をもつ場合に拡張した。また、そのパラメトリック空間を圧縮することで探索信頼性を保ったまま、より高速に検索を行なうためのパラメトリックテンプレート空間圧縮法を提案した。冗長性をもつテンプレート画像集合を例に実験をおこない、その有効性を確かめた。

キーワード：パラメトリックテンプレート、正規化相関、圧縮、固有値分解

Parametric Template Space Compression Method

Koichi TANAKA Mutsuo SANO Syuichi OHARA Masashi OKUDAIRA

NTT Human Interface Laboratories

Midori-Cho 3-9-11, Musashino-shi, Tokyo 180.

abstract

Parametric template method is a technique by which we can search for a target object with individual differences or environmental changes. In the present paper, we expanded this method when a set of template images has the redundancy. Moreover, we proposed the parametric template space compression method. By using this compression method, it is possible to search at higher speed than the search using the original template space without ruining the reliability of the search. The effectiveness of the method was confirmed by experiments using redundant template images.

Key words : Parametric template, normalized correlation, compression, eigen value decomposition.

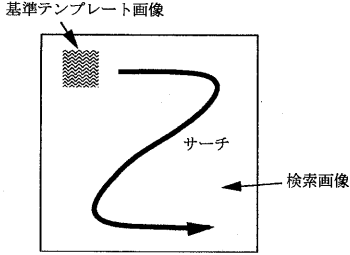


図 1: 正規化相関マッチング

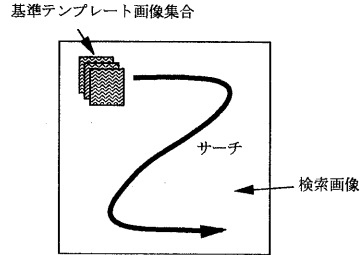


図 2: パラメトリック正規化相関マッチング

1. まえがき

従来、カメラ画像内で対象物を探索し位置を推定する方法として、図1のように対象物を表す規準テンプレート画像を作成し、この規準テンプレート画像を探索画像内で動かしながら正規化相関値が一番高い場所を見つけるテンプレートマッチング法が広く用いられている。このテンプレートマッチング法では、大きな探索画像に対しては探索時間がかかり過ぎる、探索結果がピクセル単位の精度でしか得られない、対象物に変動がある場合には追従できず探索が不安定になるという問題がある。

この問題点を、前回の報告 [1] ではテンプレート集合のなすパラメトリック空間と参照画像とのマッチングというパラメトリックテンプレート法の枠組で統一的に解決できることを示した (図2参照)。このパラメトリックテンプレート法では、変動要因を表すテンプレート集合の選択により様々なパラメトリックテンプレート空間を構成することができる。構成されたパラメトリックテンプレート空間は探索対象の個体変動 (位置ずれ、スケール、回転、歪み) や環境変動 (照明変動等) をパラメトリックに表現している。表1は端点テンプレートとそれにより張られるパラメトリックテンプレート空間でのマッチング効果をまとめたものである。

しかしながら前回の報告では、冗長性をもつテンプレート集合に対しては提案したパラメータ推定式をそのまま適用することが出来なかった。また、計算コストはテンプレート空間を張る端点テンプレート数に比例するため、テンプレート空間の効率的な圧縮法 (端点テンプレート数の削減法) が望まれていた。今回の報告では、冗長性をもつテンプレート集合が与えられた場合においても適

表 1: パラメトリックテンプレート適用例

端点テンプレート t_1, \dots, t_m	効果
並進方向に粗サンプリングされた画像	coarse-to-fine 推定
並進方向に1ピクセル離れた画像	サブピクセル推定
回転方向にサンプリングされた画像	回転推定
スケール変化画像	スケール不変マッチング
あおり画像	あおり角推定
照明変動画像	照明変動を許容するマッチング
歪み変動画像	歪み変動を許容するマッチング

用可能なパラメータ推定式およびそれを応用したテンプレート空間圧縮によるより高速なマッチング法について述べる。

2. パラメトリックテンプレート

画像サイズ $l_x \times l_y$ である2つの画像 g, t の正規化相関値 ρ は以下で定義される。

$$\rho \equiv \frac{\sum_{(k,s) \in TW} (\Delta t) \times (\Delta g)}{\sqrt{\sum_{(k,s) \in TW} (\Delta t)^2} \sqrt{\sum_{(k,s) \in TW} (\Delta g)^2}} \quad (1)$$

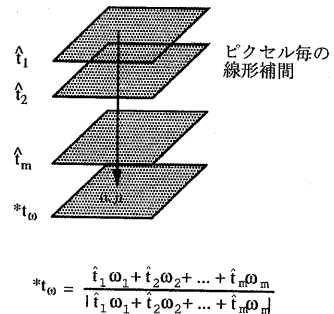


図 3: テンプレートの線形結合によるパラメトリックテンプレート空間の構成

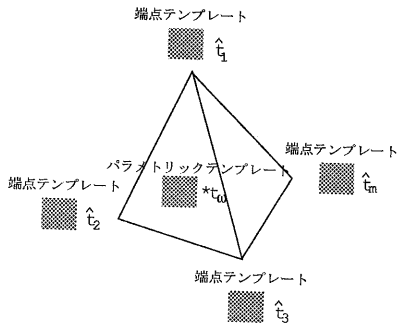


図 4: 端点テンプレート $\hat{t}_1, \dots, \hat{t}_m$ によって張られたパラメトリックテンプレート $*t_\omega$

$$\Delta t \equiv t[k, s] - \bar{t} \quad (2)$$

$$\Delta g \equiv g[k, s] - \bar{g} \quad (3)$$

$$TW \equiv \{ (k, s) | 1 \leq k \leq l_x, 1 \leq s \leq l_y \} \quad (4)$$

ここで、 $t[k, s]$ 、 $g[k, s]$ で位置 (k, s) での画像の輝度値を表す。また、画像 g に対する \bar{g} は、

$$\bar{g} \equiv \frac{\sum_{(k,s) \in TW} g[k, s]}{\sum_{(k,s) \in TW} 1} \quad (5)$$

で定義される画像の平均値である。画像 g の正規化 \hat{g} を

$$\hat{g}[k, s] \equiv \frac{\Delta g}{\sqrt{\sum_{(k,s) \in TW} (\Delta g)^2}} \quad (6)$$

で、 \hat{g} 、 \hat{f} の相関演算 (\hat{g}, \hat{f}) を

$$(\hat{g}, \hat{t}) \equiv \sum_{(k,s) \in TW} \hat{g}[k, s] \times \hat{t}[k, s] \quad (7)$$

で導入し、正規化相関値 ρ 以下のように書く。

$$\rho = (\hat{g}, \hat{t}) \quad (8)$$

正規された画像 \hat{g} は以下の正規化条件

$$\sum_{(k,s) \in TW} \hat{g}[k, s] = 0.0 \quad (9)$$

$$\sum_{(k,s) \in TW} \hat{g}[k, s] \times \hat{g}[k, s] = 1.0 \quad (10)$$

を満たす。

さて、以上の準備のもとに 2 画像間の正規化相関をパラメトリックな空間と対象画像間の正規化

相関に拡張を行なうことを考える。 t_1, \dots, t_m を $l_x \times l_y$ サイズのテンプレート画像としたとき、正規化されたテンプレート $\hat{t}_1, \dots, \hat{t}_m$ をから線形に張られるテンプレート空間を m 個のパラメータ ω_i ($1 \leq i \leq m$) を導入することにより

$$\sum_{i=1}^m \omega_i \hat{t}_i \quad (0.0 \leq \omega_i \leq 1.0, \sum \omega_i = 1.0) \quad (11)$$

として構成することが出来る (図 3、4 参照)。こうして構成されたテンプレートを大きさ 1 に正規化し、

$$*t_\omega \equiv \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \hat{t}_i}{\|\sum_{i=1}^m \omega_i \hat{t}_i\|} \quad (12)$$

としてパラメトリックテンプレート $*t_\omega$ を定義する。すなわち、この空間内のテンプレートはパラメータ ω をもちいて $*t_\omega$ と表すことができ、任意のテンプレートサイズの画像 g とパラメトリックテンプレート $*t_\omega$ との正規化相関値は、

$$(*t_\omega, \hat{g}) \quad (13)$$

と計算することができる。

3 最適パラメトリックテンプレートの推定

3.1 最適化方程式

パラメータ ω を持つパラメトリックテンプレート $*t_\omega$ と正規化テンプレート \hat{g} との正規化相関値 ρ は、

$$\rho(\omega) = (*t_\omega, \hat{g}) \quad (14)$$

$$= \frac{\omega^T \cdot \mathbf{g}}{\sqrt{\omega^T \cdot \mathbf{H} \cdot \omega}} \quad (15)$$

である。ここで、

$$\mathbf{H} \equiv \begin{bmatrix} (\hat{t}_1, \hat{t}_1) & \dots & (\hat{t}_1, \hat{t}_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\hat{t}_m, \hat{t}_1) & \dots & (\hat{t}_m, \hat{t}_m) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{g} \equiv \begin{bmatrix} (\hat{g}, \hat{t}_1) \\ \vdots \\ (\hat{g}, \hat{t}_m) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$(18)$$

である。

画像 g に一番高い正規化相関値をもつパラメトリック空間内のテンプレートは、

$$\rho(\omega) \rightarrow \max \quad \left(\sum_i \omega_i = 1 \right) \quad (19)$$

なるパラメータ ω に対応するテンプレートである。このパラメータ ω はラグランジュの未定常数法により

$$\frac{\partial \rho(\omega) + \lambda(\mathbf{n}^T \cdot \omega - 1)}{\partial \omega} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho(\omega) + \lambda(\mathbf{n}^T \cdot \omega - 1)}{\partial \lambda} = 0 \quad (21)$$

なる方程式の解として求めることができる。ここで、

$$\mathbf{n}^T \equiv [1 \ \dots \ 1] \quad (22)$$

である。これから ω は、

$$(\omega^T \cdot \mathbf{H} \cdot \omega) \mathbf{g} - (\omega^T \cdot \mathbf{g}) \mathbf{H} \cdot \omega = 0 \quad (23)$$

を満たさなければならない。この方程式をテンプレート最適化方程式とよび、以下この方程式を ω に対して解く事を考える。

3.2 冗長性のない場合の最適解

パラメトリックテンプレート空間に冗長性がない場合、すなわち \mathbf{H} の逆行列 \mathbf{H}^{-1} が存在する場合は \mathbf{H}^{-1} を式 (23) に掛け、以下の ω の解を得る。

$$\omega = \frac{\mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{g}}{\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{g}} \quad (24)$$

これが冗長性のないテンプレートに対しての最適解である。

3.3 冗長性がある場合の最適解

解の表式 (24) はパラメトリックテンプレート空間に冗長性がある場合 (\mathbf{H}^{-1} が存在しない場合) には用いることができない。冗長性がある場合には異なるパラメータ ω が同じパラメトリックテンプレートを表示するため正規化相関値を最大にする ω が一意に決まらない。実際にはこの冗長性のあるパラメータ表現のうち一つの解 ω を求めるだけで十分である。式 (24) を眺めることにより、冗長性のある場合にも可能な解として \mathbf{H}^{-1} の替わりに一般化逆行列 \mathbf{H}^- を用いることが考えられる。以下このことを確かめる。

\mathbf{H} は対称行列であるから直交行列 \mathbf{U} を用いて対角化することができる。

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{U} \quad (25)$$

ここで \mathbf{U} は直交行列であり、 \mathbf{D} は固有値を値の降順に並べた対角行列

$$\mathbf{D} \equiv \begin{bmatrix} d_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & d_k \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_k > 0 \quad (27)$$

である。一般化逆行列 \mathbf{H}^- は

$$\mathbf{H}^- = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{D}^- \cdot \mathbf{U} \quad (28)$$

$$\mathbf{D}^- \equiv \begin{bmatrix} 1/d_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/d_k \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

である。ベクトル記法で \mathbf{t} を

$$(\mathbf{t})_i \equiv \hat{t}_i \quad (30)$$

で導入すると、

$$((\mathbf{U} \cdot \mathbf{t})_i, (\mathbf{U} \cdot \mathbf{t})_j) = \left(\sum_l U_{il} \hat{t}_l, \sum_k U_{jk} \hat{t}_k \right) \quad (31)$$

$$= (\mathbf{U} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{U}^T)_{ij} \quad (32)$$

$$= \mathbf{D}_{ij} \quad (33)$$

$$= \begin{cases} d_i \delta_{ij} & (1 \leq i \leq k) \\ 0 & (k < i \leq m) \end{cases} \quad (34)$$

であるから、($k < i \leq m$) において $(\mathbf{U} \cdot \mathbf{t})_i$ はゼロである。よって、

$$\mathbf{g} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g} \quad (35)$$

となる。

さて、式 (24) の \mathbf{H}^{-1} を一般化逆行列 \mathbf{H}^- で置き換えた式

$$\omega = \frac{\mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g}}{\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g}} \quad (36)$$

を最適化の方程式 (23) に代入し整理すると、式 (35) より

$$\text{式 (23)} = \frac{(\mathbf{g}^T \cdot \mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g})}{(\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g})^2} (\mathbf{g} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^- \cdot \mathbf{g}) \quad (37)$$

$$= 0 \quad (38)$$

となり、式 (36) の ω が冗長性がある場合の最適化方程式 (23) の解になっていることが分かる。

4 直交テンプレートによる表現

テンプレート \hat{t}_i から以下のように直交正規化テンプレート t_i^o を構成する。添字の o は直交 (orthogonal) の意味でつけた。

$$t_i^o \equiv \frac{\sum_j U_{ij} \hat{t}_j}{\sqrt{d_i}} \quad (39)$$

このように定義された直交正規化テンプレート t_i^o と \hat{g} との正規化相関値 g_i^o は

$$g_i^o \equiv (t_i^o, \hat{g}) \quad (40)$$

$$= \frac{\sum_j U_{ij} g_j}{\sqrt{d_i}} \quad (41)$$

となる。ここで ω_i^o を、

$$\omega^o = \sqrt{D} \cdot U \cdot \omega \quad (42)$$

で定義する。ここに、

$$\sqrt{D} \equiv \begin{bmatrix} \sqrt{d_1} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \sqrt{d_k} & \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

である。計算により

$$\sum_{i=1}^m \omega_i t_i = \sum_{i=1}^k \omega_i^o t_i^o \quad (44)$$

となるから、

$$*t_\omega = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \hat{t}_i}{\|\sum_{i=1}^m \omega_i \hat{t}_i\|} \quad (45)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i^o t_i^o}{\|\sum_{i=1}^k \omega_i^o t_i^o\|} \quad (46)$$

がなり立つ。すなわち、 $\omega_i^o (1 \leq i \leq k)$ はテンプレート $t_i^o (1 \leq i \leq k)$ から張られるパラメトリックテンプレート空間のパラメータである。これにより、パラメトリックテンプレート空間 $*t_\omega$ が冗長性のある m 枚のテンプレート $\hat{t}_i (1 \leq i \leq m)$ で張られる表現から、冗長性を除いた k 枚のテンプレート $t_i^o (1 \leq i \leq k)$ で張られる表現に変換される。

このパラメータ ω^o の表示で与えられた正規化画像 \hat{g} とパラメトリックテンプレート $*t_\omega$ との最大正規化相関値 ρ は

$$\rho = (*t_\omega, \hat{g}) \quad (47)$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^k g_i^o g_i^o} \quad (48)$$

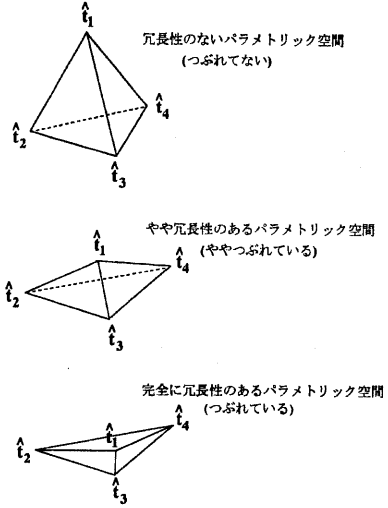


図 5: 冗長性を持つパラメトリック空間

となる。

5 優位テンプレートによるパラメトリックテンプレート空間の圧縮

5.1 パラメトリック空間の冗長性

図 5 にあるように、冗長性はパラメトリックテンプレート空間の膨らみの程度として現れる。パラメトリックテンプレート空間を張るという目的からは冗長な自由度を入れておく意味はない。逆にマッチングコストはテンプレート数に比例するため冗長自由度を取り除く方が望ましい。図 6 は冗長自由度の消去を示す模式図である。完全冗長自由度は取り除いてもパラメトリック空間は変わらない。やや冗長な自由度を取り除くことは偏平な空間を押し潰した空間で近似することを意味する。

5.2 優位テンプレートによる近似パラメトリック空間の近似度の見積り

図 7 にあるように、対象画像がテンプレート空間の張る内部にあれば正規化相関値は 1.0 であり、離れるに従い相関値は低くなる。そこでパラメトリック空間を低次元のパラメトリック空間で近似する場合、元パラメトリック空間内の画像に対して値 1.0 に近い相関値を算出するほど近似パラメ

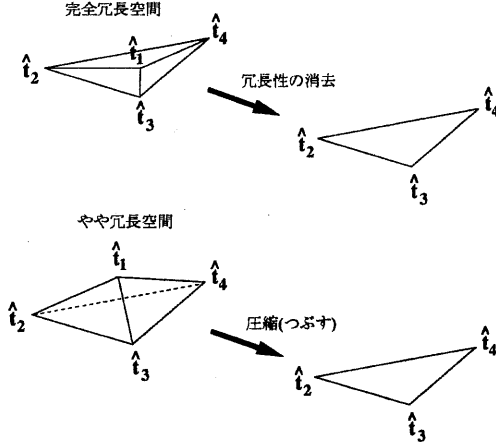


図 6: 冗長自由度の消去

トリック空間の近似精度は高いと考えられる(図8参照)。すなわち、元パラメトリック空間内の画像 \hat{g} に対して近似パラメトリック空間が算出する正規化相関値を $\rho^s(\hat{g})$ としたとき、この正規化相関値 $\rho^s(\hat{g})$ の元パラメトリック空間内平均 $\langle \rho^s \rangle$

$$\langle \rho^s \rangle \equiv \frac{1}{V} \int_{\beta_1 + \dots + \beta_m = 1, \beta \geq 0} \rho^s(\hat{g}) d\beta_1 \dots d\beta_m \quad (49)$$

$$V \equiv \int_{\beta_1 + \dots + \beta_m = 1, \beta \geq 0} d\beta_1 \dots d\beta_m \quad (50)$$

$$\hat{g} \equiv \frac{\sum_i \beta_i \hat{t}_i}{\|\sum_i \beta_i \hat{t}_i\|} \quad (51)$$

が値 1.0 に近いほど近似精度は良い。問題は、どのようにして具体的に近似パラメトリック空間を構成するかである。直交正規化テンプレートでパラメトリック空間を表現した前節の結果の式(48)は、行列 \mathbf{H} の固有値のうち最少のゼロ固有値に対応する直交正規化テンプレート $t_i^0 (k < i \leq m)$ は正規化相関値の計算に効かないことを示す。このことより固有値の大きいものほど正規化相関値の計算式(48)において効果があると考えられる。以下このことを確かめる。

直交正規化テンプレート t_i^0 の第 s 項までで張る部分テンプレート空間のパラメトリックテンプレートを $*t_\omega^s$ とする。すなわち

$$*t_\omega^s \equiv \frac{\sum_{i=1}^s \omega_i^0 t_i^0}{\|\sum_{i=1}^s \omega_i^0 t_i^0\|} \quad (52)$$

このパラメトリックテンプレートで計算した正規

化相関値は式(48)より

$$\rho^s = \sqrt{\sum_{i=1}^s \mathbf{g}_i^0 \mathbf{g}_i^0} \quad (53)$$

となる。正規化テンプレート \hat{g} を近似したい元パラメトリックテンプレート空間内のテンプレートとして部分空間の正規化相関値 ρ^s の値を計算してみる。式(40)より、

$$\mathbf{g}_i^0 = \left(\frac{1}{\sqrt{d_i}} \sum_l \mathbf{U}_{il} \hat{t}_l, \frac{\sum_j \beta_j \hat{t}_j}{\|\sum_j \beta_j \hat{t}_j\|} \right) \quad (54)$$

$$= \frac{(\sqrt{\mathbf{D}} \cdot \boldsymbol{\alpha})_i}{\sqrt{\boldsymbol{\alpha}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\alpha}}} \quad (55)$$

ここで、

$$\boldsymbol{\alpha} \equiv \mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\beta} \quad (56)$$

とおいた。よって、

$$\rho^s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i \alpha_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i \alpha_i^2}} \quad (57)$$

すなわち、 $*t_\omega^s$ はもとのパラメトリックテンプレート $*t_\omega$ を

$$\rho - \rho^s = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i \alpha_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i \alpha_i^2}} \quad (58)$$

の程度でよく近似していることがわかる。前述したように $\langle \cdot \rangle$ でパラメトリック空間内の平均を表すとしたならば、

$$\langle \rho - \rho^s \rangle \simeq 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i \langle \alpha_i^2 \rangle}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i \langle \alpha_i^2 \rangle}} \quad (59)$$

$$\simeq 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i}} \quad (60)$$

と見積もることができる。厳密には積分(49)を実行して評価する必要がある。この最後の式(60)に現れる $\langle \rho^s \rangle$ の近似評価式を $\langle \rho^s \rangle_{ap}$ を呼ぶことにする。

$$\langle \rho^s \rangle_{ap} \equiv \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i}} \quad (61)$$

さて、ここで固有値の最初の s 項の和がそれ以降に対して十分大きいとする。すなわち、

$$\sum_{i=s+1}^m d_i \ll \sum_{i=1}^s d_i \quad (62)$$

表 2: テンプレート集合に対しての \mathbf{H} 行列の値

1.000	0.706	0.698	0.407	0.711	0.618
0.706	1.000	0.450	0.584	0.644	0.517
0.698	0.450	1.000	0.235	0.649	0.571
0.407	0.584	0.235	1.000	0.648	0.707
0.711	0.644	0.649	0.648	1.000	0.848
0.618	0.517	0.571	0.707	0.848	1.000

表 3: パラメトリックテンプレート $*t_\omega$ とテンプレート t_1, \dots, t_6 間の正規化相関値

\hat{t}_i	1	2	3	4	5	6
ρ	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

とする。このときは、

$$\langle \rho - \rho^s \rangle \simeq 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s d_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_i}} \quad (63)$$

$$\simeq 0 \quad (64)$$

となる。このように、条件 (62) が成りたつときは、元パラメトリック空間は近似パラメトリック空間で十分近似することが出来る。この意味で最初の s 枚のテンプレート t_i^s ($1 \leq i \leq s$) を優位テンプレートと呼ぶ。式 (61) は簡単な計算により優位テンプレート空間を決定する (s の値を評価する) のに便利である。パラメトリックテンプレートのマッチングにはテンプレート空間を張る正規化テンプレートの枚数に比例した処理時間がかかるのでテンプレート空間の圧縮、すなわちテンプレート空間の次元を減らすことはマッチングの効率化をもたらす。

6 実験

図 9 に示した 6 枚のテンプレート画像 (ゴム板上の文字 H の刻印画像) を用いてテンプレート空間の圧縮による正規化相関値の変化を調べた。これらテンプレートに対して計算を行なった \mathbf{H} 行列を

表 4: テンプレート集合に対しての \mathbf{U} 行列の値

0.421	0.394	0.365	0.361	0.460	0.435
-0.357	-0.071	-0.612	0.672	0.039	0.194
-0.290	-0.750	0.271	0.021	0.230	0.473
0.544	-0.212	-0.638	-0.361	0.210	0.277
0.540	-0.369	0.103	0.470	-0.580	-0.052
-0.144	0.306	0.019	-0.253	-0.593	0.684

表 5: 直交テンプレート $t_1^o \sim t_6^o$ の固有値 $d_1 \sim d_6$

t_i^o	1	2	3	4	5	6
d_i	4.03	0.873	0.570	0.224	0.181	0.119

表 6: s 項までの部分空間に対しての正規化相関値 $\langle \rho^s \rangle$ と近似式による見積り値 $\langle \rho^s \rangle_{ap}$

s	1	2	3	4	5	6
$\langle \rho^s \rangle$	0.937	0.965	0.983	0.990	0.996	1.000
$\langle \rho^s \rangle_{ap}$	0.819	0.904	0.955	0.974	0.989	1.000

表 2 に示す。この表よりテンプレート相互の正規化相関値はテンプレート t_3 と t_4 の間で計算したとき値 0.235 となり最少である。もし探索のための規準テンプレートとして一枚のテンプレート t_3 を採用するとしたならば、テンプレート t_4 の画像に対してこの低い相関値 (0.235) のために探索洩れを起こす可能性が大である。しかしながら、この 6 枚のテンプレートをテンプレート集合としてパラメトリックテンプレート空間を構成し、構成されたパラメトリックテンプレートで探索するならば、表 3 に与えられるようにテンプレート t_1 からテンプレート t_6 までの画像は相関値 1.0 で探し出すことが出来る。

\mathbf{H} 行列を対角化した結果の直交行列 \mathbf{U} 、固有値 d_i を表 4、5 に、直交化したテンプレート t_i^o を図 10 に示す。直交行列 \mathbf{U} の第一行は式 (39) より、直交テンプレート t_i^o の重みを表すが、表 4 よりこれはすべてのテンプレート t_1, \dots, t_6 に対してほぼ等しい値をもつ。すなわち、直交テンプレート t_i^o はこれらの平均テンプレートである。また、表 5 からわかるように固有値は最初第一項目にくらべ他の項の数値は小さい。第一項は第六項の約 40 倍である。このことはテンプレート集合に大きな冗長性があることを示す。条件 (62) を満たしているので、低次元のパラメータ空間で良い近似が行なえる。

部分パラメトリックテンプレート空間を固有値の大きなものから s 枚の直交テンプレートを用いて構成し、これと元パラメトリックテンプレート空間のテンプレートとの正規化相関値を計算した結果を表 6 に示す。 $\langle \rho^s \rangle$ は式 (57) を数値的に積分を評価して求めた値、 $\langle \rho^s \rangle_{ap}$ は式 (61) の近似評価式である。この表から、最初一枚ですでに 0.937 の相関値を得ることが出来ることがわかる。テン

プレート t_4 のみを用いたときの 0.235 と比べられたい。また、近似評価式は相関値に対して控えめな評価を与えることがわかる。実際は式 (61) で計算するよりも高い相関値を部分パラメトリックテンプレート空間は与える。

このようにテンプレート空間に冗長性が存在するかどうかは \mathbf{H} 行列の固有値 d_i を計算することによりわかり、その冗長性を取り除いた部分パラメトリック空間は優位テンプレート (大きな固有値に対応する直交テンプレート) によって与えられ、その部分パラメトリックテンプレート空間の近似程度を表す尺度は簡易には式 (60) で、より厳密には式 (49) の積分を評価することにより与えられる。

7 むすび

カメラ画像内で個体変動や環境変動などの変動要因をもつ対象物を探索する手法であるパラメトリックテンプレート法を、与えられるテンプレート集合が冗長性をもつ場合に拡張した。また、そのパラメトリック空間を圧縮することで探索信頼性保ったまま、より高速に検索を行なうためのパラメトリックテンプレート空間圧縮法を提案した。冗長性をもつテンプレート画像集合を例に実験をおこないその有効性を確かめた。

謝辞

研究の機会を与えていただいた木暮賢司知能ロボット研究部長に深謝します。また、日頃御討論頂く研究グループの皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 田中、佐野、大原、奥平、“パラメトリックテンプレート法とそのサブピクセルマッチングへの応用” 情処研報 CVIM 106-24, pp. 179-186, July 1997.

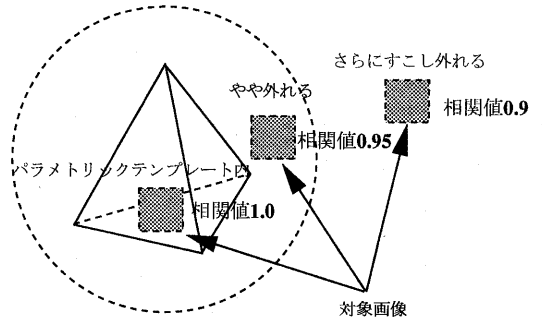


図 7: 対象画像のパラメトリック空間との位置関係による相関値の違い

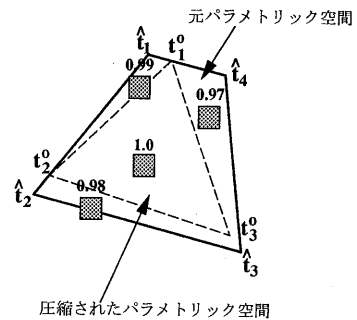


図 8: 圧縮されたパラメトリック空間の近似精度。元パラメトリック空間内の画像に対して 1 に近い相関値を出すほど圧縮パラメトリック空間の近似はよい

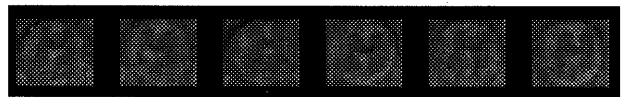


図 9: テンプレート集合 (左から t_1, \dots, t_6)



図 10: 直交テンプレート集合 (左から t_1^0, \dots, t_6^0)