波形パターンの構造照合について

5E−5

伊藤泰雅　和田俊和　佐藤誠
東京工業大学　精密工学研究所

1 まえがき

波形間の対応する部分を求めるという波形の照合問題は，信号処理やステレオ・ビジョンなどの分野における重要な課題である．波形の凹凸領域は，尺度空間フィルタリングを用いて階層的にとらえることができる[1][2]．このような階層構造を対応付けることにより，安定で効率のよい対応付けが可能になる．

そこで本報告では，波形の階層構造そのものを対応付ける「構造照合」という問題を提案し，2次零交差線の包含関係を用いて波形の階層構造を表わした場合の，構造照合の定式化と解法について論じた．

2 尺度空間フィルタリングと構造点

尺度空間フィルタリングとは，波形を様々な尺度でとらえた波形集合に拡張する処理である．この波形集合を一般化波形と定義する．

［定義1］一般化波形

変数 $x \in (-\infty, \infty)$ 上の波形 $f(x)$ に対して

$$f(x,\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\zeta)\, w(x-\zeta,\sigma)\, d\zeta \tag{1}$$

を $f(x)$ の一般化波形と呼ぶ．ただし関数 $w(x,\sigma)$ は，パラメータ σ を持つガウス関数である．すなわち，

$$w(x,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right) \tag{2}$$

一般化波形の例を図1に示す．この一般化波形 $f(x,\sigma)$ について，

［定義2］一般化波形のn次零交差線

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} f(x,\sigma) = 0 \tag{3}$$

の解集合として与えられる曲線を $f(x,\sigma)$ のn次零交差線と呼ぶ．2次の零交差線を用いると，一般化波形の山と谷の領域を表わすことができる．2次の零交差線は一般化波形の変曲点の集合であり，この曲線を境界として隣合う領域は，互いに波形の凹凸が異なっている．この零交差線で区切られる領域の包含関係によって波形の凹凸領域の階層構造を表わすことができる．

パラメータ σ の値を小さくしていくとき，新たに2次零交差線で区切られる領域が現われる点は，その σ で波形を観測したときに，一般化波形上で凹構造，または凸構造が発生する点である．この点を波形の構造点として次のように定義する．

［定義3］構造点

一般化波形 $f(x,\sigma)$ 上の点 (x_0,σ_0) が

$$f_{xx}(x_0,\sigma_0) = f_{x\sigma}(x_0,\sigma_0) = 0 \tag{4}$$

を満足するとき，(x_0,σ_0) を一般化波形の構造点と呼ぶ．

原波形上の凹凸領域の対応付けは，2次零交差線の階層構造の対応付けによって行うことができる．2次零交差線の対応付けは，構造点の対応付けに相当する．つまり構造点を対応付けることによって原波形上の凹凸領域を対応付けることができる．

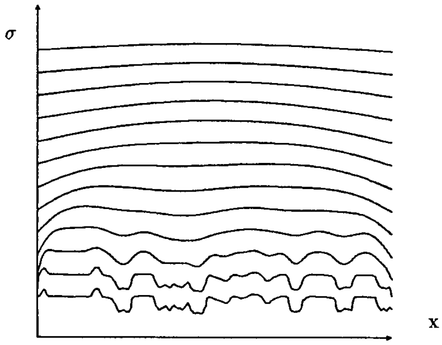


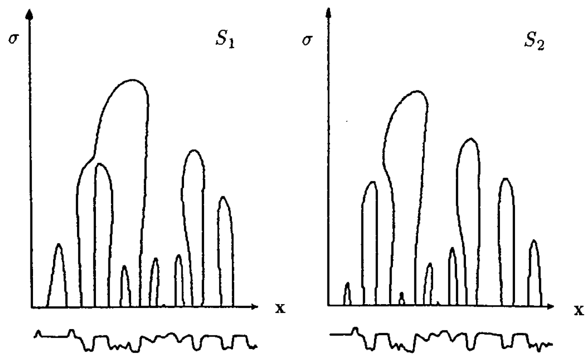
図1．一般化波形

3 波形構造の形態変化

一般的に，異なる波形間には変形が存在する．波形間の変形は，変形の程度及び位置に応じて尺度空間上で次のようにとらえられる．(図2参照)

- 変形が小さいときには，構造点の座標位置は微小移動するが2次零交差線の階層構造は変化しない．
- 変形が大きいときには，構造点の座標位置の移動及び，2次零交差線の階層構造が変化する．

つまり，尺度空間上で波形の階層構造を調べることにより，波形間の変形を推測することが可能である．この変形がランダムなものでなく，両眼視における見えかくれのように，問題によって起こり得る変形が，あらかじめわかっている場合がある．そこで問題に応じた変形のモデルから，尺度空間上の構造点がどのように移動するか（どの様に対応付けられるべきか）が確率分布として与えられていれば，この分布をもとに階層構造の変化を吸収した波形の照合処理が可能となる



(a) $f_1(x)$　(b) $f_2(x)$

図2．2次零交差線の形態変化

On a Structural Matching for Waveforms

Yasumasa ITOH, Toshikazu WADA, Makoto SATOH
Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

4 波形の構造照合

4.1 構造照合問題

構造照合問題とは，波形の階層構造そのものを対応付ける問題である．ここでは，波形の階層構造を２次零交差線の包含関係を用いて表わし，構造照合問題を定式化する．

4.2 確率論的定式化

構造照合を行ないたい波形 $f_1(x), f_2(x)$ から得られる尺度空間を，それぞれ S_1, S_2 とすると，波形 $f_1(x)$ と $f_2(x)$ との構造照合は尺度空間 S_1, S_2 上での構造点の対応付けとして扱うことができる．この構造点の対応付けは S_1, S_2 を重ねて１つの尺度空間Sで表わしたとき，構造点の移動としてとらえることができる．尺度空間 S_1 上の点 $(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)})$ が S_2 上の点 $(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)})$ に対応付くときの確率，すなわちS上で $(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)})$ にある構造点が $(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)})$ に移動するときの確率P

$$P\left(\left(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)}\right) \rightarrow \left(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)}\right)\right) \tag{5}$$

が問題により与えられるとする．これは，波形を扱っている問題の統計的性質が確率モデルで表わされるということである．

それぞれの尺度空間上の構造点が次のように与えられるとする．

$$\left\{(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)}) \mid i = 1, 2, \ldots N_1\right\} \tag{6}$$

$$\left\{(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)}) \mid j = 1, 2, \ldots N_2\right\} \tag{7}$$

すると波形の対応付けは，ｉとｊの組合せを表わす構造点の対応付け関数 C(i)=j から得られる対応付け尤度 L(C)

$$L(C) = \prod_i P\left(\left(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)}\right) \rightarrow \left(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)}\right)\right) \tag{8}$$

を最大にするような対応関数Ｃをを求めるという最尤推定問題として扱うことができる．いま式（8）の対数をとっても，L(C) の値を最大にするＣは変わらない．つまり対応付けの対数尤度 logL(C) は

$$\log L(C) = \sum_i \log P\left(\left(x_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)}\right) \rightarrow \left(x_j^{(2)}, \sigma_j^{(2)}\right)\right) \tag{9}$$

と表わされ，

$$\log L(C^*) = \max_{C \in \Sigma_C} \log L(C) \tag{10}$$

となるような C^* という対応関数を求めればよいことになる．(ただし，Σ_C は，波形を扱っている問題に応じて許容される対応付けの集合を指す.)

4.3 構造照合の最適化

構造点の対応付けは，Σ_C の中から最適な対応付け C^* を求めるという組合せ最適化問題として解くことができる．構造点の対応付け方は組合せ的に生じるが，全ての組合せについて尤度を計算することは効率的でない．そこで組合せ最適化の手法として一般的な，分岐限定法を採用する．また，計算効率を上げるために σ の大きい構造点から順に組合せを調べるようにする．

以上により構造点の対応付けが求められたら，２次零交差線の階層関係をチェックし，波形上の対応点を決定する．

5 具体例

両眼立体視法では，左右の画像の同じ高さの走査線上の対応点を求め，その位置のずれから奥行きを計算する．この左右の走査線波形の対応付けを例にとる．右走査線の尺度空間 S_R 上の点 (x^R, σ^R) が，左走査線の尺度空間上の点 (x^L, σ^L) と対応付くときの確率分布 $P((x^R, \sigma^R) \rightarrow (x^L, \sigma^L))$ が

$$P = \frac{1}{2\pi s_x s_\sigma} \exp\left(-\left(\frac{\left(x^L - \tilde{x}\right)^2}{s_x^2} + \frac{\left(\sigma^L - \tilde{\sigma}\right)^2}{s_\sigma^2}\right)\right) \tag{11}$$

と与えられたとする．これは，(x^R, σ^R) から推定される $(\tilde{x}, \tilde{\sigma})$ という座標を平均とする，ｘ方向の分散 s_x^2，σ 方向の分散 s_σ^2 のガウス分布である．よって logL(C) は，(C(i)=j)

$$\log L(C) = -N \log\left(2\pi s_x s_\sigma\right) - \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\left(x_j^L - \tilde{x}\right)^2}{s_x^2} + \frac{\left(\sigma_j^L - \tilde{\sigma}\right)^2}{s_\sigma^2}\right) \tag{12}$$

ここで $(\tilde{x}, \tilde{\sigma})$ は

$$\tilde{\sigma}\left(x_i^R, \sigma_i^R\right) = \sigma_i^R - 2A_\sigma x_0 \cdot d \tag{13}$$

$$\tilde{x}\left(x_i^R, \sigma_i^R\right) = x_i^{(R)} + d \tag{14}$$

$$\tilde{x}_0 = \frac{1}{2}\left(x_j^L + x_i^R\right), \quad \tilde{\sigma}_0 = \frac{1}{2}\left(\sigma_j^L + \sigma_i^R\right) \tag{15}$$

としている.（d:定数)

以上の処理を，図３の両眼視画像の走査線に適用した結果を図４に示す．

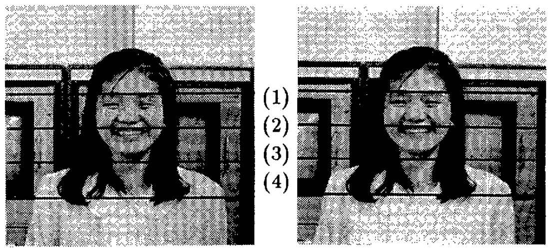


図３．(a) 左画像　図３．(b) 右画像

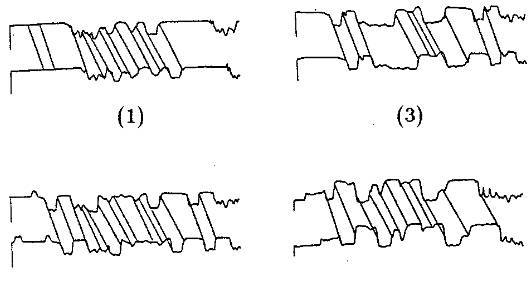


図4．対応結果

6 まとめ

尺度空間上での構造解析をもとにした波形の構造照合問題を，確率論の立場から定式化した．これにより，構造照合が波形間の構造点の組合せ最適化問題として扱えることを示した．

今後は構造点の対応付けの探索効率，精度の向上，両眼立体視法への具体的応用を考えている．

謝辞　両眼視画像の提供など御協力いただきましたグラフィックス・コミュニケーション・テクノロジーズの大山公一氏に深謝致します．

7 参考文献

[1] A.P.Witkin: *"Scale Space Filtering"*, Proc. of 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1019–1022, Karlsruhe, 1983

[2] 佐藤，和田: "構造線による一般化波形の階層表現"，信学論 (D), J70-D, 11, pp.2154–2159, 1987