

Crystalline Flowに基づく輪郭線図形の近似手法

A Method for a Contour Figure Approximation based on a Crystalline Flow

○杉本光伸*, 本谷秀堅*

○Mitsunobu Sugimoto*, Hidekata Hontani*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード : 輪郭線図形 (Contour figure), 多重解像度解析 (Multi-scale analysis),
Crystalline flow, 曲率流 (curvature flow)

連絡先 : 〒992-0038 米沢市城南5丁目 山形大学大学院 理工学研究科 電子情報工学専攻
杉本光伸, E-mail: g02543@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

コンピュータで人間の視覚機能を実現するための研究はコンピュータビジョンと呼ばれている。対象の「形」を認識することは視覚にとって重要な機能の一つであり、認識に適した形状モデルを作成することは、コンピュータビジョンにとって本質的である。²⁾ 本研究は輪郭線図形の形状特徴を、大きさの違いに基づき階層的に記述する手法を提案する。

形状特徴を大きさの違いに基づき記述する手法として、多重解像度解析が良く知られている。³⁾ 解像度とは、対象を観測する際に区別可能な特徴の大きさの限界を示すものである。解像度を少しずつ低くしていくと、対象の細部が次第に区別できなくなっていく。多重解像度解析とは、解像度を連続的に変化させたときの対象の変化に基づき、対象の形状特徴を記述する手法である。解像度の変化のさせ方や形状特徴の抽出手法などについて、

数理的、工学的に活発な研究活動がなされている。
1)5)6)7)8)

輪郭線図形の多重解像度解析手法として、輪郭線の曲率流に基づくものが広く利用されている。曲率流とは輪郭線上の各点を法線方向に曲率 κ で定まる速度 V で移動させたときに得られる集合である。特に

$$V = \kappa \quad (1)$$

であるときは、任意の単純な(すなわち自己交差しない)閉曲線が有限時刻に円へと収束することや凹凸の境界すなわち曲率の変極点の個数が増えないことなどが数学的に証明されている。Fig.1に $V = \kappa$ のときに得られる図形の変化を示す。変化が進むにつれて解像度が低くなり、図形の細部が消去されていくことが分かる。

これまでの多重解像度解析における研究のほぼ全ては、与えられた輪郭線を滑らかな曲線であり、何回でも微分できるものと仮定してきた。しかし、

実際に画像により与えられる輪郭線は滑らかな曲線ではなく、多角形である場合が多い。近年、結晶学の分野を起点として、滑らかでない曲線に対する曲率流に関する数理的研究が進んできた。本研究ではそれら成果を画像における形状解析へと応用する。



Fig. 1 curvature flowの例. 左端が元図形. 変化とともに細部が消去されていく。

2. Crystalline Flow⁴⁾

Crystalline Flowとは、多角形の各辺をその法線方向に移動することにより得られる図形の集合である。画像上の輪郭線図形の多くは、チェーンコードにより表現することができ、多角形である。Crystalline Flowは曲率流を離散化したものであり、画像中の輪郭線と相性が良い。曲率流においては輪郭線上の各点が、曲率 κ に依存する速度で移動する。ここで曲率 κ は各点における微分値により定義される局所的な量である。

輪郭線が滑らかであるならば曲率も定義できるが、多角形はほとんどいたるところ直線で曲率ゼロであり、角においては微分ができない。従来の手法では、画像中の多角形を滑らかな曲線で補間することにより曲率流を求めていた。一方crystallineにおいては多角形の各辺における非局所的曲率 Λ を定義し、 Λ に依存する速度で各辺が移動する。Crystallineに用いられる曲率 Λ は各辺の長さにより定まる。曲率 κ は内接円の半径 r との間に $\kappa = \frac{1}{r}$ の関係をもつ (Fig.2)。Crystalline flowにおいては、円の代わりにWulff図形と呼ばれる多角形が曲率の定義に用いられる。Wulff図形は凸多角形であり、Wulff図形を1つ定めると、定められたWulff図形に対応する

Crystalline flowが求められる。定められたWulff図形に基づき、admissible crystalと呼ばれる多角形が定義される。Admissible crystalとは、全ての辺がWulff図形が有する辺のいずれかと平行であり、なおかつ隣接する2辺が、Wulff図形において隣接する2辺とそれぞれ平行であるような多角形である。Admissible crystalの辺 i の曲率 Λ は次式により定義される。(Fig.2)

$$\Lambda_i = \chi_i \frac{\Delta_i}{L_i} \quad (2)$$

ただし χ_i は辺の i の凹凸を表す指標であり、凸のとき $\chi_i = -1$ 、凹のとき1、それ以外のとき0とする。(Fig.3) Δ はWulff図形の辺 i の長さであり、この辺 i はadmissible crystalの辺 i と平行である。曲率流の場合と同様に、例えば $V_i = \Lambda_i$ のとき任意のadmissible crystalが凸になることなどが証明されている。(Fig.4)

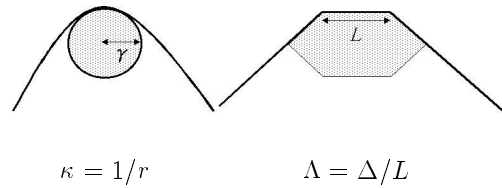


Fig. 2 局所的な曲率と非局所的な曲率

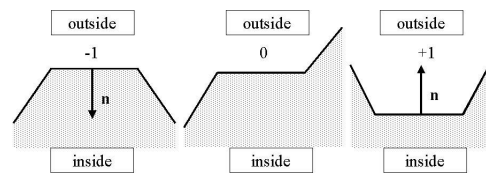


Fig. 3 Shape Index χ_i



Fig. 4 Crystalline flowの例. Fig.1の離散版. 多角形のまま形の細部が消えていく。

3. Crystalline Flowによる形状解析

曲率流においては、時間 t の経過とともに輪郭線図形の凹凸の数が単調に減少する。より遅い時刻まで消えずに残る凹凸の構造は、より大きな凹凸とみなすことができる。このため時間 t のパラメータは凹凸構造の大きさを測るスケールパラメータと呼ばれる。横軸が弧に沿ったパラメータ、縦軸がスケールパラメータ t である空間はスケールスペースと呼ばれる。スケールスペースは、スケールの変化に対する図形の形状変化を観測する上で有用である。各スケール t において各位置で求めた形状特徴をスケールスペースにプロットし、形状特徴の変化をスケールに沿って追跡する。

Crystalline flowにおいては、任意のadmissible crystalが凸になる。すなわち各辺の凹凸を示す指標 χ の値が-1になる。本稿では、与えられた図形の辺番号 i を横軸とし、縦軸をスケールパラメータ t としたスケールスペースに、各スケールにおける各辺の凹凸の指標 χ の値をプロットする。先に述べたとおり χ の値は-1, 0, 1のいずれかである。(Fig.3参照) Fig.5に χ の値をスケールスペースにプロットする様子を示す。スケール t が増加するとともに、 $\chi=0$ の辺が隣接する辺と融合することで、辺の数は減少していく。Fig.8にFig.4に対応する χ のスケールスペース表現を示す。次第に凹の箇所が減り凸多角形へと変化していく様子が、 t の増加とともに黒の領域が減少し白の領域が増えていくことにより示されている。本稿では各辺の長さが1の正八角形をWulff図形とする。このとき、チェインコードにより表現される輪郭線図形は、全ての辺がWulff図形のいずれかの辺と平行である。Wulff図形が正八角形であるとき、Fig.6において、(A), (B)はAdmissible Crystalであるけれども、(C)はAdmissible Crystalではない。○で示されている辺が、Wulff図形が有する辺のいずれかと平行であるが、隣接する2辺が、Wulff図形において隣接する2辺とそれぞれ平行で

ないからである。図形がAdmissible Crystalでない場合、Fig.7に示すように、Admissible Crystalに近似する。

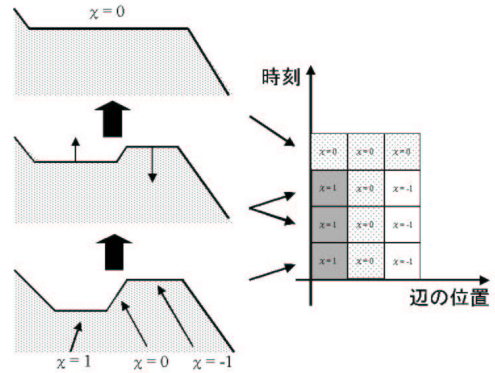


Fig. 5 χ のスケールスペース表現。左図は発展する曲線、そして右図は対応しているスケールスペース表現を示す。

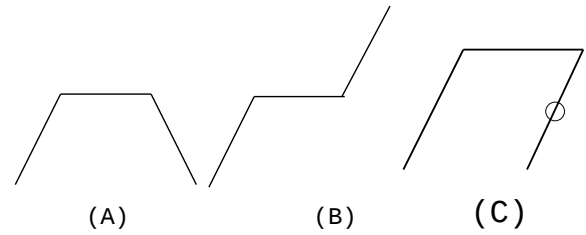


Fig. 6 Admissible Crystalについて(A), (B)はAdmissible Crystalであるが、(C)は3辺の内、中央の辺と○のついた右隣の辺が、Wulff図形における隣接する2辺とそれぞれ平行でないでAdmissible Crystalでない。

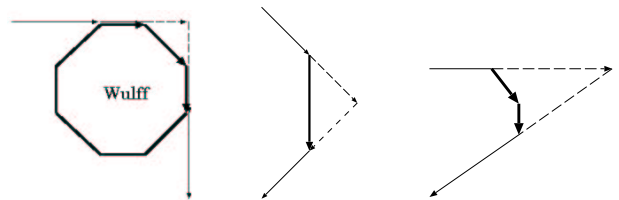


Fig. 7 Admissible Crystalでない図形はAdmissible Crystalに近似する。

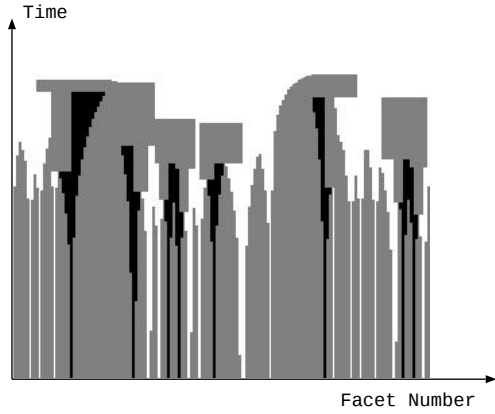


Fig. 8 Fig.4 に対応するスケールスペース表現. 白い領域は $\chi = -1$, 黒い領域は $\chi = 1$, 灰色は $\chi = 0$ を示す.

2.1 大局的な角の抽出

Crystalline flowを利用して, 与えられた輪郭線図形より大局的な角を抽出する. 基準スケール t_0 における重要な凹凸を抽出する操作を示す.

- 1) 与えられた図形をadmissible crystalで近似する.
- 2) 近似した図形のcrystalline flowを求め, $\chi_i(t)$ のスケールスペース表現を得る.
- 3) Fig.9に示すように, スケールスペースに $\chi_i(t)$ の値をプロットする. 異なる χ が接する箇所を境界とする.
- 4) 基準スケール t_0 とし, 直線 $t = t_0$ の一部を含みかつ, $t = 0$ に対応する辺を角として抽出する.
- 5) 基準スケール t_0 を0から連続的に変化させ, t_0 の変化に対する角の抽出結果の変化を観測する.

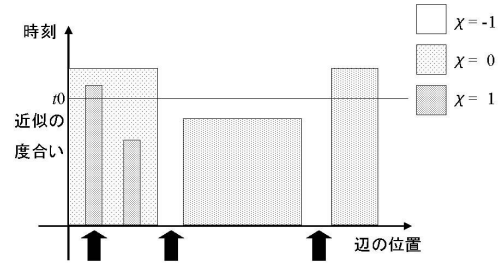


Fig. 9 スケールスペースを用いて大局的な角の抽出を行う.

3. 実験結果

遅い時刻まで消えずに残っている特徴のみをもつ多角形を作成. 近似図形とする. Fig.10にFig.4に対応する近似図形を示す. スケールの増加とともに, より大局的な近似図形が得られることがわかる.

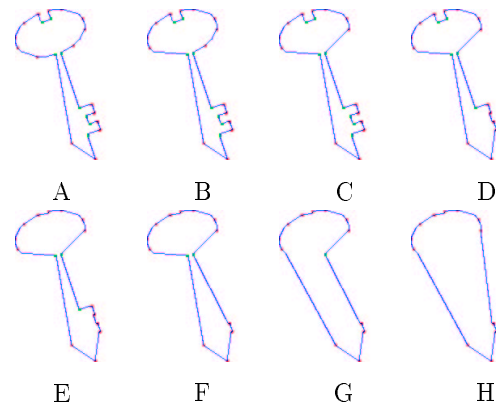


Fig. 10 提案手法による近似結果, 一番上の左端が最初に得られる近似図形, 次の近似図形は右となる

Fig.11に, 横軸に近似スケール, 縦軸に抽出された角の数をとり近似結果の変化の様子を示す. 図の中に示されている各文字は, Fig.10と対応する. Fig.11より, 得られた近似図形の中でどれが安定で, どれが不安定であるかが判断できる. 近似図形AおよびFは, 次に抽出される近似図形まで間がある. 一方, 直観にあわないような近似図形Gなどは次の近似図形が抽出されるまで時間がかからない. 安

定な近似図形は、次の近似図形に変化するまで間があるが、不安定な近似図形は、次の近似図形にすぐに変化する．Fig.11より、Fig.10の得られた近似図形の中で一番安定な近似図形は、A、一番不安定な近似図形は、D、と判断できる．

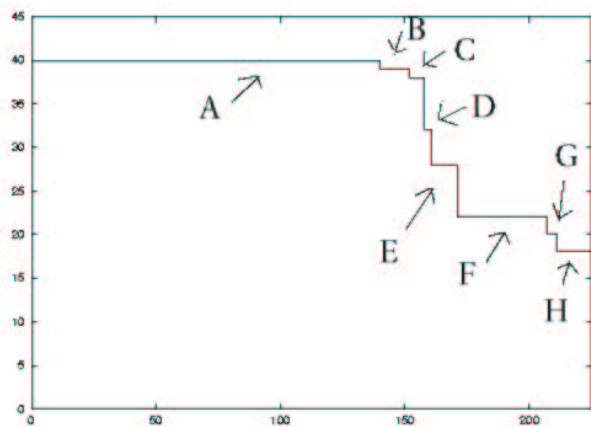


Fig. 11 近似図形の変化の様子．縦軸は時刻，横軸は抽出される角の数．

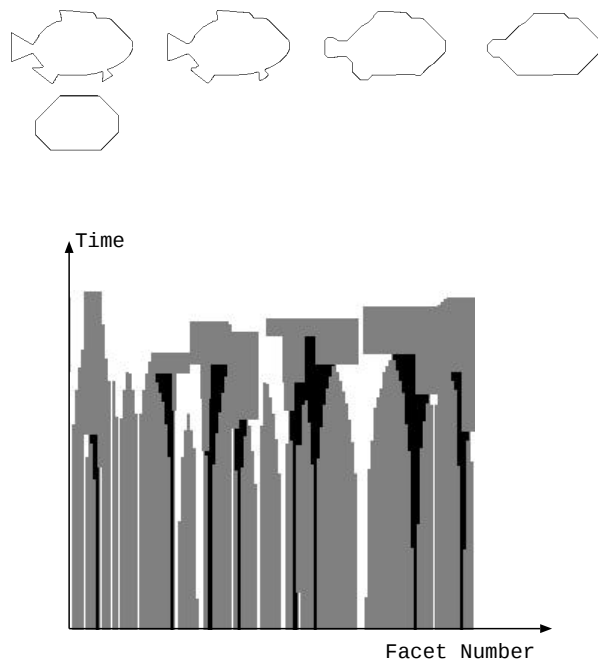


Fig. 12 対象図形の変化の過程とその対象図形のスケールスペース

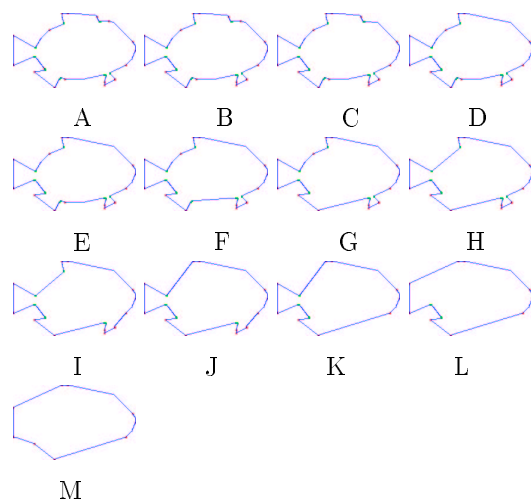


Fig. 13 提案手法による近似結果，一番上の左端が最初に得られる近似図形，次の近似図形は右となる

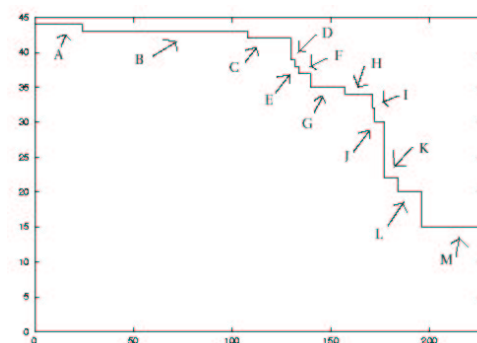


Fig. 14 近似図形の変化の様子．縦軸は時刻，横軸は抽出される角の数．

Fig.12, Fig.13, Fig.14, Fig.15, Fig.16, Fig.17は別の実験結果を示す．Fig.12, Fig.15では，輪郭線図形が平滑化されていく様子と原図形を平滑化して作成されたスケールスペースを示す．Fig.13, Fig.16は提案手法による近似結果を示す．そして，Fig.14, Fig.17では，横軸に近似スケール，縦軸に抽出された角の数を取り抽出される近似図形の変化の様子を示す．

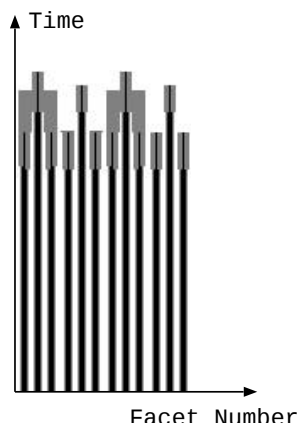


Fig. 15 対象図形の変化の過程とその対象図形のスケールスペース

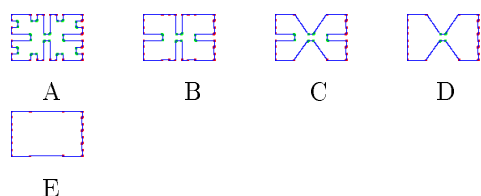


Fig. 16 提案手法による近似結果, 一番上の左端が最初に得られる近似図形, 次の近似図形は右となる

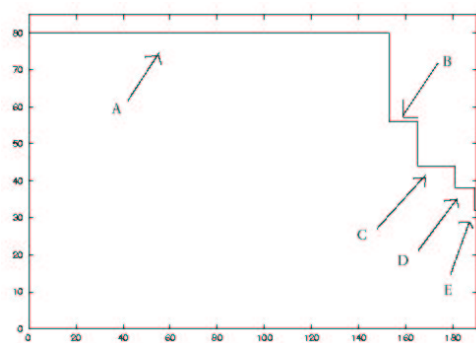


Fig. 17 近似図形の変化の様子. 縦軸は時刻, 横軸は抽出される角の数.

4. おわりに

本稿では輪郭線図形の形状解析にCrystallineを導入した. 従来の曲率流では曲率の正確な計算ならびに輪郭線上の点の追跡が容易ではなかったが, Crystalline flowではいずれも容易に実現可能である. スケールスペースに各辺の凹凸を示す指標 χ をプロットすることにより, 与えられた図形の大域的な近似図形を得ることができる.

参考文献

- 1) 本谷秀堅, 出口光一郎: スケールスペース解析に基づく局所ぼけ変換を用いた輪郭線図形のマルチスケール近似, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No9, pp. 1722-1731(1994)
- 2) デビッド・マー(安藤広志, 乾敏郎訳): ビジョン-視覚の計算理論と脳内表現-, 産業図書(1987)
- 3) 守田了: スケールスペースとその応用, 第7回画像センシングシンポジウムチュートリアル講演会テキスト, pp. 13-23
- 4) M.-H. Giga and Y. Giga, Motion driven by nonlocal curvature in the plane, In Asymptotics in Nonlinear Diffusive Systems, (eds. Y. Nishiura et al.), Tohoku Math. Publ. 8(1998), pp. 75-83
- 5) Mokhtarian, F. and K. Mackworth, A.: A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-14, No. 8, pp. 789-805(1992)
- 6) Mokhtarian, F. and K. Mackworth, A. : Scale Based Description and Recognition of Panar Curves and Two-Dimensional Shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 1, pp. 34-43(1986)
- 7) Yuille, A. L. and Poggio, T. A. : Scaling Theorems for Zero Crossings, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 1, pp. 15-25(1986)
- 8) Mokhtarian, F. : Fingerprint Theorems for Curvature and Torsion Zerocrossings, Proc. IEEE CVPR(San Diego, CA), pp. 269-275(1989)