

ベクトル場への均一な流線描画に関する一考察

河合 直樹

大日本印刷株式会社 情報コミュニケーション研究開発センター

E-mail: Kawai-N@mail.dnp.co.jp

流れの場の画像表現は、サイエンティフィックビジュアルイゼーションや芸術分野、産業分野などにおいて有用な技術である。流れに沿って流線を均一に生成するための手法が種々提案されているが、ベクトル場における発散の変化に起因して完全に均一に配置することは困難であり、幅や濃度を調整して視覚上均一に表現する提案もされている。本研究では、生成された流線群を破線化しながらラスタライズすることで、視覚的にも密度的にも均一な流線配置を行う手法を提案する。

A Study for Uniform Drawing of Streamlets onto Vector Field

Naoki Kawai

Media Technology Research Center, Dai Nippon Printing Co., Ltd.

Representation of vector field is useful technique for scientific visualization, art and industrial applications. While some techniques for uniform streamline placement are proposed, it is difficult to place streamlets perfectly uniform due to fluctuation of divergence of the vector field and some techniques propose to adjust width or intensity of each streamlet. We propose a method for drawing streamlets uniformly both in appearance and in density by rasterizing generated streamlines as broken lines.

1. はじめに

ベクトル場の可視化は、流体や電磁界などの解析結果を分かりやすく表示するために有用な技術である。代表的な表現手法として、場の流れに沿った多数の曲線（流線）を描くベクタープロットがあげられ、場の容易な理解に有効である。より直感的な表現手法として、流線の幅調整や濃度変化、矢印の併用[1]なども試みられている。これらの表示技法は、科学技術分野だけでなく、気象予報などの身近な分野でも利用されている。コンピュータグラフィクス（CG）の分野では、可視化技術自体の研究の他、芸術表現や産業分野への応用も報告されている。産業デザインへの応用とし

て、筆者らは所定の演算で得た流線群を微細な凹凸として実体化することで、異方性反射により立体形状を実物体上に表示する手法を提案した[2]。ここでは、立体形状の法線分布に基づいて演算されたベクトル場に沿う流線をベクタープロットで描いているが、流線が集中して塊になる領域や密度が疎になり空虚となる領域が出現する。異方性反射の効果や意匠上の観点から、流線群は対象面全体で均一な密度で配置され、相互に一定の間隔が維持されることが理想であるが、これを一般的なベクトル場で実現することは困難である。

本研究では、任意のベクトル場に沿って生成された流線群をラスタライズする際に、個々の流線を破線として表現することにより、対象領域に均一の密度で描画する手法を提案する。まず流線を実

線でラスタライズした画像を平滑化し、流線密度分布を評価する。次に各位置における流線密度を参照しながら流線を点線としてラスタライズすることで、視覚的に均一な表現が可能であることを示す。最後に、一定長の連続成分を確保しながら生成密度の偏りを拡散してラスタライズすることで、孤立点の発生を回避した破線で均一な密度で描画可能であることを示す。

2. 関連研究と課題設定

ベクトル場の代表的な可視化手法のひとつとして Line Integral Convolution (LIC) が提案されている。LIC では対象領域に生成したノイズを基に、ベクトル場に沿った畳み込み積分を行うことで、場の流れの様子を表示する[3]ため、流れに沿ったストローク調の画像が得られ、可視化だけでなく絵画調レンダリングへの利用も提案されている[4]。LIC はベクトル場を忠実にトレースするが、結果は中間色を含む多値の画像となるため、2 値画像で連なった流線を得ることは困難である。

ベクタープロットによる流線群は 2 値画像で得られるが、均一な密度での描画は困難であり、流線の適切な配置法や配置後の補正法が提案されている。Mebarki らは領域全体を走査して最大の内接円を持つ未描画領域を求め、その中心を通過する流線を順次追加することで、所望の数の流線群を描画する手法を提案している[5]。この手法は合理的であるが、流線の端点において間隔が不連続となり巨視的な密度の不連続を回避できない。Turk らはベクタープロットで描画した流線群画像の低周波成分により流線群の密度分布を評価し、この評価結果を参照しながら流線群に 2 次的な操作を加えることで均一に補正する手法を提案した[6]。この手法では生成した流線の位置を操作する他、流線の追加や削除、流線の幅を先端に向かって細くするテーパリングなどを行うことで漸次的に均一な分布に近づける。Saito らは曲面へのハ

ッチングの研究の中で、テーパリングの有効性に触れている他、流線の濃度変化により視覚上の密度を均一にできることも示している[7]。

筆者らが提案した異方性反射による立体表現方法では、流線群の 2 値画像を実体化した溝（または土手）のエッジが微小な異方性反射素子として作用している。従って流線群には視覚的な均一性ではなく、単位面積に含まれるエッジ長が一定であることが望まれる。流線を画素幅 1 で描画した場合、この課題は単位面積の流線画素数を一定にすることと等価となる。この用途には流線群の 2 値画像が必要であり、濃度補正では対応できない。また幅の補正は、エッジの数に作用しない。

本研究では、2 値画像であること、幅が一定であること、漸次的でなく直接的であることを目標として、流線群の均一な描画を試みる。

3. 提案手法

3. 1. 手法の概要

提案手法では任意の方法で生成された流線群をラスタライズする過程で破線化することで、均一な密度の流線群画像を生成する。提案手法の概要を図 1 に示す。はじめに、与えられたベクトル場に基づいてベクタープロットなどの手法で流線群を生成する。ここで流線群は形状の骨格となる点列等のベクター形式で与えられるものとし、後のステップで所定の解像度でラスタライズされる。Step1 では、まず流線群を幅 1 画素の実線でラスタライズする（実線画像）。続いて Step2 で実線画像にローパスフィルタを作用させる（低周波画像）。Step3 では低周波画像に除算を施すことにより、流線を均一にするために各画素に実際に線を描画すべき確率（可描画確率）を計算する。Step4 では得られた可描画確率に基づいて、流線群を破線としてラスタライズすることで、均一な密度の流線群画像を生成する。

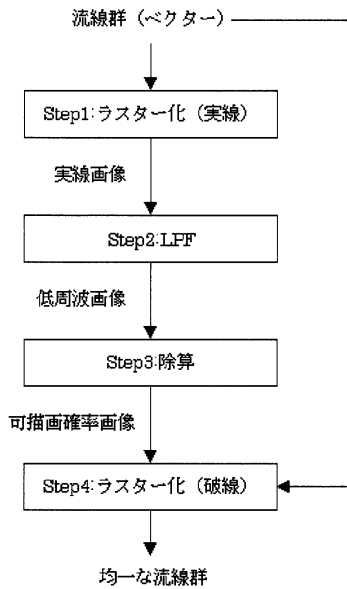


図1 処理の概要

3. 2. 流線群の可描画確率

Step1にてラスタライズした実線画像では、流線密度の高い部分と低い部分が混在している。Step2で生成される低周波画像ではTurkの指摘のように各画素の近傍での流線密度が評価できる。本研究の着眼点から換言すれば、その位置の近傍における流線エッジ密度を表している。したがって低周波画像の濃度が高い部分ほど間引いてラスタライズすることで、流線群画像は均一に近づくと予測できる。Step3では、低周波画像を基に各画素における可描画確率を求める。破線化の処理では、流線の密度を高くする操作は不可能であるため、低周波画像中の最低密度を目標として、式(1)により可描画確率を求める。

$$P(x, y) = \frac{D_{\min}}{D(x, y)} \quad (1)$$

ここで、 $P(x, y)$ は位置 (x, y) における可描画確率、 $D(x, y)$ はその位置における低周波画像の画素値、 D_{\min} は低周波画像の最小値を表す。

得られた可描画確率は、 D_{\min} を基準とした相対

的な密度の逆数であり、最大で1となり密度が高いほど小さな値となる。したがって流線群を破線化することで均一に表示するために、その画素を通過する流線を実際に(間引かないで)描画すべき確率を表している。

3. 3. 画素単位の破線化

可描画確率を考慮したラスタライズ処理の単純な方法として、流線が通過する画素全てに、独立して可描画確率を考慮した描画判断を行う。流線が画素 (x, y) を通過する場合、一様分布乱数 rnd ($0 \leq rnd \leq 1$)を生成し、その画素の可描画確率 $P(x, y)$ との大小を比較し、以下の操作を行う。

```

    if(rnd < P(x,y))
        then その画素に描画する
    else
        その画素に描画しない
  
```

この操作により、各画素に対応した可描画確率で流線が描画され、全体として均一に流線群が描画されると予測できる。

3. 4. セグメント長を確保した破線化

前節の破線化では、画素ごとに独立に描画を判断しているため、結果として1画素の孤立点が多数生成される。本研究で用途に想定している異方性反射効果に対しては、孤立点は全方位にエッジを持つため異方性反射素子として作用しない。そこで流線を実際に描画する連結した画素群(セグメント)に一定の長さを確保しながら可描画確率を反映する改善手法を示す。ここでは可描画確率に対し、ハーフトニングにおける誤差拡散法の考え方を適用し、流線に沿って誤差を分散させる。

セグメント長を確保した破線のラスタライズ手順を図2に示す。ここでは、ある流線について描画を開始したら規定画素数に達するまで描画を継続する。この間、既定の可描画確率と実際に描画したことによる誤差を累積する。規定画素数連続

して描画した後に累積した誤差を参照し、描画を継続するか破線の切れ目として描画を中断するかを判断する。非描画中は累積した誤差を減じていき、誤差が相殺された時点で描画を再開する。

ひとつの流線についての描画手順を示す。ここで、この流線が通過する画素列 (x_i, y_i) があらかじめ求められており、通過する画素の総数を L とする ($1 \leq i \leq L$)。また、セグメントは最低 N 画素が連結するものとする。

- ① 初期条件として、カウンタ $i := 1$ 、累積誤差 $Err := 0$ 、連続描画画素長 $Lc := 0$ とする。流線の描き始めを不揃いにする必要がある場合は、 Err に乱数を設定する。
- ② 流線を対象画素 (x_i, y_i) に描画する。累積誤差、および連続描画画素長を更新する。
 $Err := Err + \{1 - P(x_i, y_i)\}$
 $Lc := Lc + 1$
 $i := i + 1$
 i が全流線長 L を超過したら終了する。
- ③ 連続描画画素長 Lc が規定長 N 未満であれば②に戻る。
- ④ 累積誤差が0未満であれば、②に戻って描画を続行する。0以上であれば描画を中断する(⑤へ進む)。
- ⑤ 流線を対象画素 (x_i, y_i) に描画せずスキップする。累積誤差、および連続描画画素長を更新する。
 $Err := Err - P(x_i, y_i)$
 $Lc := 0$
 $i := i + 1$
 i が全流線長 L を超過したら終了する。
- ⑥ 累積誤差が0未満であれば、②に戻って描画を再開する。0以上であれば継続して非描画とする(⑤へ戻る)。

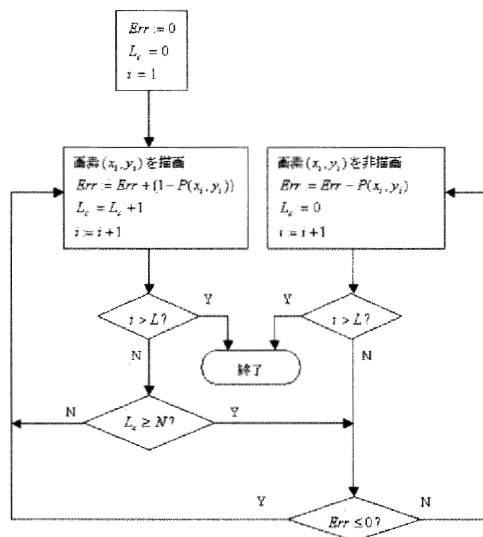


図2 セグメント長を確保した破線の描画手順

4. 実験結果と考察

4. 1. 予備実験

本節では、単純なベクトル場を利用して、3章に示した手法の有効性を確認する。図3に流線群を生成した例を示す。この例では中央に向かって流入するベクトル場に対し、相互の間隔を一定範囲内に限定して生成した流線を、 200×200 画素の範囲に1画素の幅で描画している。この流線群はMebarkiの手法による結果と同一であるが、一定間隔で環状の密度差が確認できる。

この例では中心からの距離に応じて隣接する流線との間隔が確定できるので、各画素の可描画確率を計算で求めた。図4に3.3節に示した画素単位での破線化結果を示す。図4に描画された流線の密度は図3と比較して均一に近づいている一方、孤立画素の出現が確認できる。次に3.4節に示した手順で、5画素のセグメント長を確保した破線化結果を図5に示す。ここでは孤立画素の発生を回避しながら、全体としては流線が均一に描画されていることが確認できる。

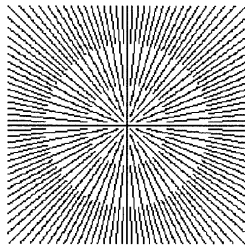


図3 生成した流線群

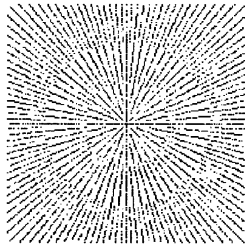


図4 画素単位での破線化結果

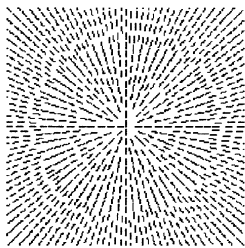


図5 誤差拡散によるセグメント長確保例

4. 2. 一般的なベクトル場での実験

次に、より一般的なベクトル場の例として、筆者らの提案している異方性反射表現で利用する流線群で効果を検証する。図6に所定の演算により得た、ティーポットの蓋のつまみ部分に対応するベクトル場の例を示す。ここでは各画素の濃淡が当該位置に配置されるべき流線の勾配を示し、この例では水平方向を基準として $\pm 45^\circ$ の範囲をグレースケールで表現している。

図7にベクタープロットにより生成した流線群を、図8に画素ごとに破線化した流線群を、図9に5画素のセグメント長を確保して破線化した流線群の例を示す。これらの結果から、提案手法

が一般的なベクトル場に対しても有効に作用することが、目視により確認できる。

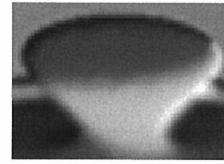


図6 一般的なベクトル場の例

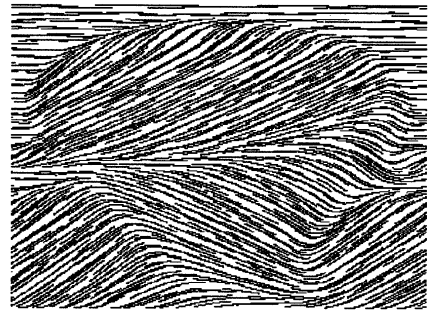


図7 生成した流線群

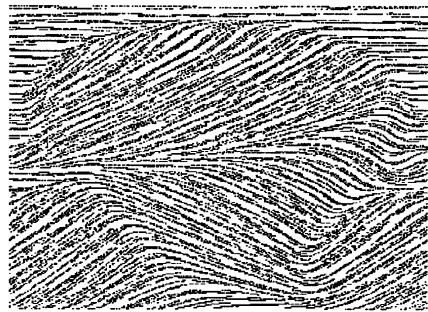


図8 画素単位での破線化結果

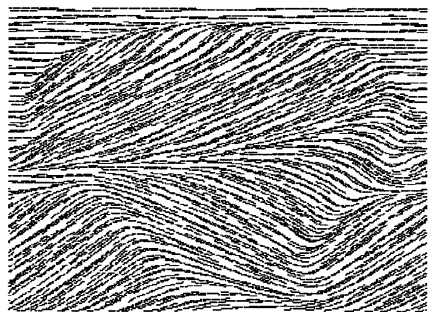


図9 誤差拡散によるセグメント長確保例

4. 3. 実験結果の考察

完全に均一に描画された流線群では、その低周波画像は全面で一様となる。したがって流線群の低周波画像から画素値の分散を計算することで、生成した流線群の均一性を定量的に評価できる。図3～図5までの流線群画像に9×9画素のガウシアンフィルタを作用し、それぞれの低周波画像について画素値の分散を求めた結果を表1に示す。同様に、図7～図9までの流線群画像から求めた分散を表2に示す。

表1 予備実験の均一性評価

	処理	分散
図3	生成された流線群	60.5
図4	画素ごとの破線化	17.2
図5	セグメント長の確保	10.5

表2 一般的なベクトル場での均一性評価

	処理	分散
図7	生成された流線群	214.3
図8	画素ごとの破線化	50.1
図9	セグメント長の確保	100.8

表1および表2に示した結果より、本提案による破線化により、流線群の密度が均一に近づくこと、セグメント長を確保した場合も、一定の効果を得られることが定量的に示された。

5. まとめ

本研究では、ベクトル場に沿って生成した流線群の密度を考慮しながら破線化することで、より均一に流線を描画する手法を提案した。流線を描画する画素単位で実描画判断することで均一な密度で描画が可能であり、さらに流線セグメントの連結画素数を考慮することで孤立点の発生を回避できることを示した。提案手法では単位面積の流線エッジ数が一定になるため、異方性反射による

立体表現にも有用であることが期待できる。本手法で生成された流線セグメント群は、流線の濃度や幅を制御した場合と同様に視覚上の均一性も確保されているので、一般のビジュアライゼーションや芸術分野のアプリケーションへの応用も期待できる。提案手法では流線の幅を1画素としてラスタ化・破線化しているが、目的に応じて破線化後の流線に所望の幅を付与することやテーピング処理の併用も可能である。

提案手法は破線化により密度の高い部分を間引くのみであり、高密度な描画には流線の追加も併用した手法が必要であると考えられる。また、長い流線の表示が必要な用途には提案手法は有効に作用せず、別のアプローチが必要になる。

参考文献

- [1] Ware, C., Toward a Perceptual Theory of Flow Visualization, ACM CG&A Vol.28 No.2, pp.6-11, 2008.
- [2] Kawai, N., Bump mapping onto Real Objects, ACM SIGGRAPH 2005 Sketches, 2005
- [3] Stalling, D and Hege, H., Fast and Resolution Independent Line Integral Convolution, Proceedings of Siggraph 1995, pp.249-256, 1995
- [4] 茅曉陽, 長坂好恭, 山本茂文, 今宮淳美, LIC法を利用した鉛筆画の自動生成法, 芸術科学会論文誌, Vol.1 No.3, pp147-159, 2002
- [5] Mebarki, A., Alliez, P. and Devillers, O., Farthest Point Seeding for Efficient Placement of Streamlines, Proceedings of IEEE Visualization 2005, pp.479-486. 2005
- [6] Turk, G and Banks, D., Image-Guided Streamline Placement. Proceedings of Siggraph 1996, pp.453-460, 1996
- [7] Saito, T. and Takahashi, T., Comprehensible Rendering of 3-D Shapes, Proceedings of Siggraph 1990, pp.197-206, 1990