展望・解説

二次元スカラー量分布の画像表示*

吉田 豊 明**

Image Display for Plane Distribution of Scalar Quantity

Toyoaki YOSHIDA

1. まえがき

コンピュータグラフィックス (CG 画像処理・表示) は、科学・工業の研究開発においても、計画・解析・広報等の手段として大変有用であるため、近年あらゆる分野で適用されつつあり、ぼう大な量のデータを的確に迅速に処理して、現象を解明するには、今や必須であるといえよう。流れに伴う物理量を扱う者にとっては、各種の直接的な流れの可視化法を適用できないようなケースにも、CG によって疑似的に流れを表現できるという点できわめて意義深い。

画像処理・表示の系統的で高度な理論の解説、日進月歩するこの方面の機器の紹介等は他に譲るとして、ここでは、実験、数値計算で得られるスカラー量のマトリクス状の分布を二次元分布の画像として表示するという基本的な作業のソフトウェアについて、主として筆者の実施例をもとに、概説する。周知のように画像データは点数が多いので、各々の点に関して施す数学的処理をできるだけ簡単にしないと画像全体の処理時間が大変長くなるが、一方ではオリジナルデータの性質を忠実に表示するよう配慮しなければならない。

2. 値と濃淡・色の対応

着目する領域内の値の最大値と最小値を両極端とし、全点の値を表示するのに、値と濃淡・色をどのように対応させるのか、階調の数をいくつに

するのかは、最も基本的な問題である。濃淡・色の割当てについては、問題とする値の範囲を比例的に拡大、縮小して、装置の具備する階調数のできるだけ多くを表わすようにするのが一般的である。ただし扱う画像の数が複数で、特定のパラメータの違いによる差異を考察する場合は、全データの最大値と最小値を両極端とすべきである。値の桁数の範囲が広い場合は、対数をとった上で比例的に割当てるとよい。またある基準値からの微小な変化を問題とする場合は、基準値を引いた変化分のみを割当ててべきである。階調の数については、連続的階調と階段状階調の2種がある。両者のはっきりとした境界はないが、32階調 (5ビット) 以上で表示はかなり連続的な感じとなる。

濃淡よりも色分けの方が目で識別できる階調数は多く、かつ容易に大小関係が理解できる。しかし色分けの階調でも隣接する階調の境界に等高線を入れなければ、16種程度が限界で、それ以上では複雑で判読できない領域の生じる場合が多い。

(a) 2色合成

(b) 3色合成

図1 合成色作成の例

*原稿受付 昭和60年11月25日

**航空宇宙技術研究所原動機部

濃淡の表示では小さい値を暗く、大きい値ほど明るくするのが一般的であり、場合によっては反転させる。また干渉縞写真のように明暗の変化を繰返して、階調の数を増す方法もある。色表示では、選択できる色の数は工夫によって実用上いくらでも多くとれる。すなわち用いている装置の表示できる色の数が、例えば8色のように比較的少ない場合でも、各点の色を規則的にモザイク状に配置すれば、基本色と異なる色調が得

られる。図1(a), (b)に最も簡単な2種の配置例を示す。(a)は2種、(b)は3種の色を上下左右交互に配置する方法であり、図中に示すような簡単なアルゴリズムで、きわめて多くの色ファイルが得られる。すべての組合せについてあらかじめ色見本を作っておくとよい。色表示において普遍的とみなされる配色はないが、虹の配色に近づけ、赤系を大きい値の方に、紫系を小さい値の方に対応させるのが視覚的に受け入れ易い。濃淡の場合と同様に、適当な数の色調の組合せを繰返してもよい。

作成した画像を写真、プリンターで記録する場合は、ディスプレイ上の画像の色調を忠実に再現しない場合が多い。また標準のNTSC方式ビデオ信号で記録する場合は、一般にオリジナル画像より空間分解能、周波数応答等が悪いので画質が低下する。したがって、いずれにしても結果の画として満足できるような色調、階調で画像表示をすることが重要である。

3. 色塗り、補間

実験、数値計算で得られるスカラー量の検査面(二次元)におけるデータ群は、ビデオ信号の場合を除いて、一定の配置を構成する格子線の交点上における値の集合である。これを画像表示するには、問題とする領域内のすべての画素の値を決めねばならないから、格子点にない大部分の画素については、近傍にある格子点上の値から補間して、その値を求める必要がある。格子線が直線で、直交座標系であるような多くの場合は、画素

(a)データファイル配置

(b)画像

図2 極座標配置データの色塗り

と近傍の格子点との幾何学的関係は簡単であるが、格子線が円弧と直線からなる極座標配置とか、曲線群からなる配置のような場合には、幾何学的関係を表わすのに工夫が必要となる。

図2(a), (b)は極座標配置における塗色法の一例を模式的に示す。画像表示の幾何形状は扇形であるが、データ群は二次元状のマトリクスである場合に、画像内の任意の位置Pとデータファイル内の対応する補間位置P0との関係は、次式を満たす; $\theta/\theta_0 = x/X$, $(r-R_1)/(R_2-R_1) = y/Y$ 。すなわち点Pの r, θ を求めれば、 R_1, R_2, θ, X, Y は既知であるから、点P0の位置 x, y がわかる。したがって、点P0の値(=点Pの値)は、近傍のデータ(例えば二重丸印のデータ)から適当な補間法(後述)で決められる。図3はガスタービンの実機要素試験体において、円環状に配置された静翼の後流で、2枚の翼の後流を含む扇形の検査面内の全圧をピトー管で測定し、翼列の前流にお

図3 画像表示の一例

(タービン静翼後流の全圧損失分布)

ける全圧からの損失量を算出して、無次元値（全圧損失係数）を求めた結果を画像表示した例である¹⁾。この実験では、図示のような画像表示により、翼の外側端面（図の外周部）から吹出す冷却空気的全圧損失に及ぼす影響の解析が大変容易でかつ周到になった。

翼形のように物体の外形が曲線の集まりからなる場合、その物体をとりまく流れとか、物体内の応力、温度等を数値解析するには、外形線に沿って表面近傍では密に、遠く離れるほど間隔をおいて曲線または短い直線のつなぎ（折線）で配置される格子線群と、これらに比較的大きな（垂直に近づく）角度で交わる格子線群とで、計算格子を形成することが多い。図4(a)はこのような場合の一例を模式的に示す。格子線群はそれぞれ J と K で番号付けられる組で配置され、格子点の x, y 座標（Cartesian）とその位置における値（例えば、密度、マッハ数）は、 $x(J, K)$, $y(J, K)$, $D(J, K)$ で与えられる。この場合の塗色法で容易に思いつく方法の一つは、図(b)に示すような4点の格子点で形成される領域を単位要素とし、図(a)に示すように番号付け（ L : 1番目から $(JE-1) \times (KE-1)$ 番目まで、 $L1E=JE-1$, $L2S=JE$, $L2E=2(JE-1)$, など）を施して、単位要素毎に順次色塗りを行う方法である。ここで L 番目の要素の J, K は次の簡単な式で与えられる。 $J=MOD(L, (JE-1))$, ただし $J=0$ なら $J=JE-1$, $K=IFIX((L-1)/(JE-1))+1$ 。したがって要素 L の頂点の座標と値は容易に読み出される。さて要素を四辺形とみなし、その内部または

辺上にある画素を塗色するには、図(b)のように画像座標において要素 L を内部に含む長方形を考え、長方形内の全点について一点毎に要素 L の内部か外かを判定して、内点であれば、その点の座標と4頂点の座標・値とから適当な補間法によりその点の値を定め（塗色し）、外点であれば何もしない、とすればよい。内外点の判定法には、様々な方法が工夫されよう。一つの簡単な方法は、図(c)に示すように P 点と頂点とで形成される四つの三角形の面積和が四辺形の面積に等しければ内点、前者が大きければ外点である、とするものである。なお当然のことながら、オリジナルデータの x, y, D は、適当な段階で画像表示に適した値に変換（スケーリング）する必要がある。

図3に示す例は航空機の翼形まわりの流れをナビエ・ストークスコード NSFOIL²⁾により粘性解析した結果のうち、マッハ数分布の一例をここに述べた方法で画像表示したものであり、 $J=125$, $K=51$ の格子配置で、距離の逆数補間（図5参照）により塗色したものである。

値の既知な点を頂点とする四辺形内の点（画素）の値を定めるのに様々な補間法がある。画像表示をするためのデータ群は、もともと十分な数の点数がなければならないが、逆に多くあれば補間の方法は何であろうとも結果としては大差がないので、簡単なアルゴリズムを用いればよい。実際には、画像表示をしてみて、格子線の配置がわかるような規則性のある縞、段差などが現われたら、その塗色法は適切でないと判断されるが、オリジナルデータにすでにある特質かもしれないの

図4 曲線状格子配置データの色塗り

で、慎重な検討が必要である。

図5に、著者が実施例を知る数種の補間法を掲げた。内挿点数が少ないほど簡単な方法でよいが、ある程度多くても(縦横に20~30点=数百点)比較的なめらかな分布が得られるような方法として(e), (f)がある。また4ヶの格子点からなる四角形が、長方形、扇形でない場合にも、(c), (d)の方法は適用できる。さらに縦と横方向で格子線の配置密度が著しく異なる場合には、それぞれの方向に対して適切な別の補間法を採用するのがよい。

4. 平滑化 (スムージング)

画像信号における分解能の不足、ノイズ、実験・計算における各種誤差などのために、画像がモザイク状であったり、境界線に不自然な段差、ボケがあるような場合は、滑らかな分布にするような処理をすることが望ましい。画像の入力源がビデオ信号で、少なくとも数秒間は同質(定常)である場合は、画像データの積算による信号強化(加算平均)が大変有効である。しかし非定常現象とか、実験・計算結果からの画像の場合は、単一の画像について平滑化処理が必要となる。この処理方法は、画像

図5 画像構成のための各種補間法

データのために確保できるメモリー容量に依存するが、基本的な概念としては、画像全点の一点毎に、その値と近傍の複数の点の値との相加平均を算出し、全点終わったら、処理後のデータをオリジナルデータの有していた最大値と最小値の範囲に一致するようにスケールングする、という手続きである。この処理は満足すべき分布が得られるまで繰返すことができる。また着目点に重みをつけ

図6 画像の平滑化の概念

る加重平均とした方がよい場合もあり、特に画像データでない枠線とか文字の部分に処理を施さないようにしたいとき、有用である。

図6に、メモリー容量が一面分しかないときの平滑化の概念(a)(b)と、平滑化、スケーリングにおける値の模式的な変化(c)を示す。上下左右一点おきのデータ(丸印)の平均値を三角印の位置に格納し(図(a))、三角形のデータ群が揃った後、×印のデータを補間によって求める(図(b))。図(c)では、オリジナルデータが変化の多い波状の線、平滑化後の分布が一点鎖線、スケーリング後の分布がゆるやかな変化の実線で示してある。

図7に平滑化の効果を示す実例を掲げた。オリジナル(図(a))はビデオ信号で、VTRテープを再生して、静止画としたものである。図(b)は平滑化の手順を3回繰返したもの、図(c)は画像データ加算ユニット(インテグレータ)により32枚の画像データの加算平均をとったものである。

5. 等高線挿入

濃淡またはカラーの階段状階調で表示された画像では、定量的表示をより明確にするために、各階調の境界線に等高線を挿入するとよい場合が多い(図3参照)。図8に等高線挿入の概念を示す。オリジナルデータは図(a)のなめらかな山形の分布で示すように連続的である場合が多い。連続的分布のままで、指定する値を特定な色(通常白色)で表示させると、画像座標、画像データがステップ状であるため、図(c)のように等高線が著しく不連続になったり、逆にかなり太い線になったりする。この不都合を避けるには、値自身を図(a)のようにあらかじめ階段状の値に変換し、その後で例えば図(b)に示すアルゴリズムで白点を書かせるとよい。すなわち、着目点と右隣り、下隣

(a) 生データの一静止画像

(b) ソフトウェア(図6)による平滑化

(c) インテグレータによる平滑化

図7 画像の平滑化の実施例

図8 等高線挿入の概念

りの三点の大きさを比較し、全部同じならそのまま、一点が他の二点の値と異なるとき着目点を白くする。ただし着目点の移動（走査）方向は左から右、上から下とする。この方法の例のように画像への等高線挿入は、プロッタ線図のように格子状配置のデータから直接等高線を書かせる場合より格段に容易である。

注目する画像において、分布の変化が急激であるような領域が局所的にあると、そこで書かれる等高線が何本も隣接し、結局太くて白い領域表示となって、オリジナルでは見られた変化の様相を消してしまうこともあるので、等高線挿入がいつもよいとは限らない。

6. グラフ表示

画像データから結果の解析をする際には、様々な値の抽出モードが考えられる。なかでも特定のライン上の分布をグラフ表示することは、多くの場合に有用なモードである。画像表示では、プロッタによるグラフ書きとは異なって、単一の曲線・折線が不連続となったり、色表示の識別が不可能になったりする。これらは用いているシステムの走査方式、画素数、周波数応答等に依存し、高級なシステムでは問題にならない場合もある。

図9(a)に示す例は、この問題を避ける一つの方法である。すなわち複数の分布曲線を重ねて示

図9 グラフ表示方法の例

図10 三次元的（鳥観図的）表示の概念

すのに、一垂直方向において、ある値の位置からすぐ次に大きい値の位置までを、上位の値に対応する色で塗りつぶすという手順を全部の垂直方向に施す。この方法によれば、容易に特定ライン上の分布が識別され、特定位置で値の大きさの相互比較ができる。しかし抽出するライン数が多くなると判別が難しくなる。図(b)の方法は一ラインの分布毎に独立して表示をするもので、単純で見易いが、グラフ表示が小さくなり、値の相互比較にも手間がかかる。

スカラー量の二次元分布を定性的に把握するのに、値を高さで表現し、三次元的（鳥観図的）に表示する方法も有用である。図10にこの方法の概

図11 隠線処理・裏面表示の概念

図12 プロセッサによる三次元的表示

図13 ソフトウェアによる三次元的表示

念を示す。与えられた画像データ(a)を(b)のように、データをシフトして少し傾斜させた後、図(c)のように図の下方の水平線上の分布から順次上方にグラフ書きを重ねる。ただし図11に示すように一垂直線方向の分布で、b—c, d—e, f—gの部分は書かないようにする(隠線処理)。またc—dの部分は裏側であるから表示の色を変えたとよい。抽出する水平線の位置は適当に間隔をあけるべきである。

図12, 図13は、図3に示した画像データを、それぞれ、実時間処理のできる三次元画像表示装置とソフトウェアで作画した例である^{9), 10)}。この例が示すように、値の高低が山と谷で表わされるので、分布の傾向が直感的に容易に理解される。

7. あとがき

画像表示に適切なアルゴリズムは、一般的に有効な方法のみならず、多くの場合、個々の問題に特有のものが必要となるので、実際の作業においては、知恵を絞る楽しさ、苦しさがつきまとう。本稿はこれらアルゴリズムの一部の実施例を紹介したにすぎないが、これらが、秀れた面白いアルゴリズムを考え出すための一助となれば幸である。

文 献

- 1) 臼井・吉田, 流れの可視化, 4-14 (昭59-7), 349
- 2) 河合・廣瀬, 航空宇宙技術研究所報告, TR-816 (昭59-6)
- 3) 神崎, 流れの可視化, 5-18 (昭60-7), 285
- 4) 小林, 日本機械学会誌, 88-799 (昭60-6), 644
- 5) 柳・進藤, 流れの可視化, 5-18 (昭60-7), 289
- 6) 吉田, 日本機械学会誌, 88-799 (昭60-6), 648
- 7) 西田, 同上, 639
- 8) Akima, H., Communications of the ACM, 17-1 (1974-1), 26
- 9) 三村他4名, 航空宇宙技術研究所資料, TM-514 (昭58-6)
- 10) 吉田, 同上, TM-531 (昭59-5)