展望・解説

流れ場の三次元画像解析*

土井 淳 多**

Three-dimensional Analysis of Flow Field Image

Junta Doi

1. まえがき

流れの可視化は当初は流れ場を大域的に把握することからはじめられているが、画像処理技術を援用して可視化画像の定量化への努力が行われている。近時は、さらに三次元的な流れ場の解明を目指した試みが行われるようになった。

可視化画像による流れの三次元計測・解析は、現今では画像入力の高速化が容易なことから、非定常現象の解明に当って最も期待される手法と考えられる。

本稿では主に多重画像を用いた流れ場の三次元解析の試みを中心に若干の紹介を行いたい。

2. ステレオ画像による方法

画像は対象の三次元像を二次元に縮退して記録したものであるから、一つの画像からもとの三次元像を再構成することは原理的に不可能である。そこで、二つの画像を用いて、対象の位置を知る方法が広く採用されている。カメラのレンジファインダーによる測距がよく用いられている例で三角測量の原理に基づいている。可視化画像の場合でも、トレーサ粒子などの位置計測として用いられている。

図1がその原理図で、2台のステレオカメラあるいはビデオカメラ等撮像装置の視点を C_1 および C_2 、それぞれの画像を D_1 および D_2 とする。対象である点 P （例えばトレーサ粒子）が二つの画像

図1 画像による位置計測の原理

D_1 と D_2 上で、それぞれ p_1 、 p_2 とし、前もって2台のカメラそれぞれについて、三次元空間内の位置、光軸の方向あるいは倍率・画角などのカメラパラメータが定められているとすれば、 $\angle C_2 C_1 P$ 、 $\angle C_1 C_2 P$ および基線 $\overline{C_1 C_2}$ を用いて P の位置を決めることができる。

この方法の基本は対応点 p_1 と p_2 を見出すことで、成否はこの対応点（ステレオペア）の同定にかかっている。

図1の画像 D_2 における、視点 C_1 と対象 P を結ぶ直線($C_1 P$)の投影が l の如くとすれば p_1 の対応点 p_2 はこの l 上に存在することから、 p_1 の対応点を見出すためには、画像 D_2 の全域にかえてこの l （視線像、エピポーラ epipolar）についてのみ調べればよい。 p_2 の対応点についても同様にその D_1 上における対応点は、 $\overline{C_2 P}$ の D_1 におけ

*原稿受付 昭和60年12月2日

**東京大学農学部

るエピポーラについて調べればよい。

このことは、両画像 D_1 および D_2 を基線 $\overline{C_1C_2}$ とそれに直交する座標系で基準化すれば、対応点は後者について同じ座標値をもつことを意味する。ステレオカメラはこのような構成を機構的に備えたものである。さらに、2台のカメラを対象を中心として相互に直交させれば、直感的に位置を求めることが可能になる。

微小トレーサ粒子のように対象を点として扱える場合は別として、対象の表面の形状まで測定する場合には、両画像の広い範囲にわたって対応点を求める必要がある。しかし、これは特殊な場合を除いて極めて困難である。

そこで図1のような、いわゆる受動的な方法にかえて投光を用いる能動法が考えられている。

これは、図1の $\overline{C_1P}$ を例えばレーザービームとして点 P をスポット投光する方法がその一例である。すなわち、既知のレーザービームは D_2 上でエピポーラ l であり対応点 p_2 は鮮明なスポット像として P の位置決めをする方法である。

ここで、このレーザービームで対象を走査すれば広い範囲にわたって対象の位置が求められる。また図2のように、ビームにかえてシート光（スリット光）を投影して、対象表面の形状を求めることが可能になる。通常はシート光を挟んで両側にカメラを設置し対象形状によらず、どちらかのカメラで入力ができるようにしている。また、シート光を走査することで対象の広い範囲を計測する

ことができる。さらに、正方形や交互のシート光など既知のパターンをもつ光源を用いることも試みられている。

図1は2台のカメラを用いる場合であるが、さらに、カメラ台数を増すことにより複数のエピポーラの関係を用いて、位置計測の効率化を図ることも試みられている。

この方法を注入トレーサの位置測定に応用した例として攪拌円筒容器（直径0.914m、水位0.914m）内の流れを解析した報告を以下に紹介する¹⁾。

この例では、上記容器中の水に直径0.4~0.6mm、比重1.02のトレーサを入れ攪拌時の挙動を調べる目的で、毎秒400フレームの16mmシネカメラでステレオレンズを用いて撮影し、現像フィルムを2048×2048画素、濃度256レベルのデジタルデータに変換して処理している。この例では、対象のトレーサ粒子を二値化像とし、個々の粒子のステレオペアを次の条件で定めている。すなわち、水平、垂直（水深）方向の座標を X, Y 、ステレオ画像につき左および右側画像にそれぞれ L, R の添字を付して表すとき次式の D_S 、

$$D_S = w_1 - (Y_{CR} - Y_{CL})^2 + w_2 (I_R - I_L)^2 + w_3 \{ (N_{XR} - N_{XL})^2 + (N_{YR} - N_{YL})^2 \} \quad (1)$$

を最小とするような粒子像の組合せをもってステレオペアとみなす試みである。ただし、 Y_C は粒子の中心の Y 座標で、前記のエピポーラの条件に対応するものである。また I は粒子像のフィルム濃度で N_X および N_Y は粒子像を形成する画素の X および Y 座標の大きさ（画素数）である。

また、次の二つの式

$$|Y_{CR} - Y_{CL}| < T \quad (2)$$

$$D_{min} < X_{CR} - X_{CL} < D_{max} \quad (3)$$

の条件も付している。(2)式はエピポーラ上でのずれの許容範囲 T を、そして(3)式は同一粒子が左右両画像内で矛盾なく存在し得る範囲を規定したものである。カメラおよび実験装置に依存して定められる量である。(1)式の条件はエピポーラの関係の他に同一粒子は同じフィルム濃度でなることと、フィルム上の粒子像も同じ大きさをもつという条件で、それぞれに重み付けをしてステレオペア構成の最尤度を表わす考え方である。

この例ではさらに、連続する各フレーム間、す

図2 シート光による形状計測の原理

なわち、1/400秒間隔で連続する画像間について、同一粒子の移動量の最大値を流れ場の流速として考えられる上限値以内に設定している。すなわち

$$|Y_{CL}^F - Y_{CL}^{F-1}| < L_1 \quad (4)$$

$$|X_{CL}^F - X_{CL}^{F-1}| < L_2 \quad (5)$$

ここで、添字 F 、 $F-1$ はシネカメラのフレーム番号である。

次に、各粒子の速度および方向が、この撮影速度のもとではフレーム間で極端に変わらないという条件をステレオペアとして同定する要素にしている。

すなわち、 $F-1$ と F 番目のフレームから求められる粒子位置の変化量 $\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$ と勾配 $\Delta X/\Delta Y$ について、 F と $F+1$ 番目のフレームにおけるそれらとの対比を調べ変化の小さいものを選ぶ考え方をとっている。

図3がその原理図で ($F-1$) 番目の画像中の点“-2”に着目するとき、次の F 番目の画像中で対応し得る粒子像は、上記(4)および(5)式の条件から“-2”を中心に X 方向に $\pm L_2$ 、 Y 方向に $\pm L_1$ の範囲であり、具体的にそれは点“01”、“02”および“03”の何れかである。いま、点“01”が“-2”の移動先とすればこの間での移動量と勾配が、それぞれあまり変化しないような次の移動先が存在するはずである。すなわち、($F+1$) 番目の画像中に“-2”と“01”を結ぶ直線の延長上で等距離の点

図3 連続する3フレーム間の粒子追跡シーケンス

に近いとみなし得る粒子像が存在しなければならない。このような粒子像の存在範囲が図3の斜線で囲った領域である。

しかし、($F+1$) 番目の粒子像が同図の“+1”、“+2”、…、“+5”の如くとすれば、何れもこの斜線領域には存在していないから遡ってこの“01”を“-2”の移動先とは認定できない。

図4 ステレオ画像による粒子軌跡(連続する4フレーム分)

図5 直交2カメラによる水素気泡ラインの追跡

この図の例では、移動が“-2”→“02”→“+5”の経路をたどるのが起り得る場合と判定する。

図4では、このようにして同定したトレーサ粒子について連続する4駒の移動状況を示している。

この例ではステレオペアの同定は、一駒の画像当たり約200個の粒子が存在する場合で、そのうち150個について可能であったと報告されている。なお、画像入力に際し、容器が円筒であることに起因する光学ひずみを避けるため、この容器をさらに一辺が1.04mの角筒容器に入れその間に水を満している。流れ場では粒子の重なりも生じ得るが、通常の二値化手法のみで98%の粒子を画像上で識別できたとされている。

以上みてきたように、この方法ではトレーサ粒子像の類似性とエピソードの関係および流れの連続性から解析するプロセスをとっている。粒子移動の追跡の観点からは、移動速度に比して相対的に高速の撮影速度とし画像間での粒子移動量を小さくすることが、アルゴリズムの簡略化と精度の向上につながることになる。

次に、直交して置かれた2台のカメラを用いた三次元計測の例として、水素気泡ラインの追跡例がある²⁾。このあらましは図5に示した如くで、水素気泡ラインを上方と下流方向とからそれぞれビデオカメラにより記録し、そのハードコピーをタブレットデジタイザーを用いて手でコンピュータに入力し、気泡ラインの経時変化を三次元的に表示する試みである。

図6は計測の構成を示したもので、開水路の底面近くの電極から発生する水素気泡ラインを、鉛直上方約50cmの位置に設けたビデオカメラと、

図6 開水路における可視化画像の入力システム

図7 水素気泡ラインのデジタル化入力

図8 水素気泡ラインの形状

下流側12cmのところに設けた光ファイバーレンズを介したビデオカメラを用いて入力している。視野は6mm×6mmである。照明は毎秒120フレームの同期したストロボ光で露光時間は10μsである。単発の水素気泡ラインをこのストロボ光で追跡・入力し、図7のように水路断面方向(Z)

の参照線毎にデジタル化している。

両カメラの画像はほぼ直交しているが、カメラパラメータの校正を行うため気泡ライン発生位置の底部直下に正方形の刻線を施した厚さ1 mmのガラス板を置き、入力像を補正アルゴリズムで修正している。

図8はそのビデオカメラ像をタブレットデジタルイザで線化して入力・表示した例で図の上部が水路上部のカメラ像に、下部が気泡ライン下流部からの入力像に対応している。図9は三次元化した気泡ラインの経過変化を斜眼表示したものである。

この例でも水素気泡の発生方法と照明の仕方の工夫が必要で、鮮明な画像を得ることが基本である。また、間けつ発生と発生位置の制御でタイムラインおよび流線の三次元的把握が可能になる。

一般に、乱れの大きいところでは気泡ラインの

図9 水素気泡ラインの経時変化の斜眼表示

図10 多眼視による三次元形状の計測・再構成

途切れや線幅の不規則な変化がある。この例では手動入力で対処しているが、入力の自動化に際しては連続化や細線化などの配慮が必要になる。また、この例では気泡ラインを線化した扱いであるが、流れ場の再現のためには、入力画像通りの有限の大きさをもった形状として把握することも必要になろう。この方法の基本的考え方はスパークラインやスモークラインに対しても同様である。

3. 多重画像による方法

ステレオペアによる対応付けによらないで三次元形状を計測・再構成する方法として、図10のように多眼視により対象の存在可能空間を規定する方法がある。この方法は基本的には特別の光源を必要としないことから流れ場にも応用の可能性がある^{3),4)}。

原理は同図の如くで、カメラ視点 C_i およびそれらカメラによる画像 D_i 上の対象像（図の斜線部分）とて構成される無限の錐体域を考える。それら全錐体に共通な空間領域を対象の三次元領域と考える方法である。この共通な空間領域を表現する方法として、空間の立体格子 VOXEL や線分を用いた記述も考えられているが、構成面について表裏の情報と各点・各稜線相互の接続関係を保有するソリッドモデルとして境界表現する方法が最も汎用性がある。

図10の画像 D_i 上の対象像は元来 PIXEL 表示の画像であるが、この輪郭を二値化等適当な方法で抽出し、線分近似で構成される面、すなわち閉多角形として近似すれば、対象は複数個の半無限の角錐の相貫領域となり多面体として表現されることになる。

この多面体を面の表裏（対象の存在する側の識別）の情報を付した各面、および各稜線の接続関係をつけて空間内の座標値で表示すればソリッドモデル化ができる。

この方法では、どの画像の輪郭線にも現れないような凹部が存在する場合には、その部分の再現ができないが、実用上支障のない場合も多い。対象が凸な物体の場合には、方向数の増加と各画像について輪郭線の近似度を増すことにより、忠実な形状再構成ができる。

図11が流れと等密度のポリスチレントレーサ粒子を、この方法で連続的に追跡した例で連続する36個分を表示している。互にほぼ直交して設置された3台のCCDカメラを用いて入力し、トレーサ粒子の形状を面数約20程度の多面体で近似したもので、入力を5秒間隔で行い各時刻毎の位置・形状を表示している。同図の左側は各時刻のトレーサ粒子の位置を再構成された多面体の重心位置として表示したもので、各時刻の重心位置を連ねた軌跡は同時に同粒子の5秒間の平均の速度ベクトルに対応し、さらに、空間的な差分値を計算することにより加速度ベクトルが求められる。なお、この例のトレーサは直径3 mmの単一粒子が対象で、一辺100 mmのガラス製立方体容器中の攪拌流中での移動である。

図12 魚モデルの三次元化（上段：多面体表示，下段：断面表示）

図11 トレーサ粒子の三次元形状再構成と追跡

この方法では、トレーサの位置だけでなく、その三次元形状や姿勢角をも把握できるので、大きさや形を変えながら、流体中で移動する物体の挙動を把握できる可能性がある。図12はこの方法で得られた魚モデルの参考例で、面数417、稜線数1,245および頂点数830から構成される多面体である。同の下段は、 y - z 平面および x - z 平面に沿って切断した断面の表示で、右側の図は視点を x - z 平面内で 30° 、 z 軸廻りで 50° それぞれ回転した位置に移した場合の表示である。複雑な形状をもつ物体廻りの流れ場の数値解析や、物体が流れ場から受ける外力の影響を求める構造解析に際して、境界形状の自動入力法として利用できる可能性がある。

流れ場に多数のトレーサ粒子ないし着目すべき物体が存在する場合には、前述のような粒子（物体）の同定法と併用した利用が考えられる。この方法ではまた、多方向からの火炎画像を基にしたろうそく火炎の形状計測や、同じく多方向からのレーザ干渉法による干渉縞パターンを用いて、アルコール芯火炎の形状計測など燃焼場への応用も試みられている。

流れ場への応用としては、他にタフトの三次元形状を計測・再構成する試みが行われている。これは上記のトレーサ粒子と同様に3台のビデオカメラで流れの中のタフトの画像を入力し、空間内に存在するタフトの三次元形状を再構成し湾曲した形状等も流れ場の解析に利用しようとする試みである⁵⁾。

4. むすび

流れ場の解析においては、三次元空間内の任意の点において任意の時刻における圧力、流速、温度など流れのパラメータを把握することが基本である。

可視化画像による流れ場の把握は、測定点を移行して行う、いわゆるトラバース計測等に比して大域的理解に便利で、高速・非定常の現象が対象となる場合には、掛替えのない方法であるが画像のもつ基本的性質、すなわち、画像は二次元情報であってもとの三次元情報を完全には復元できないという制約をもっている。このことから、複数の画像の利用が必須になってくる。しかし、このことは同時に、同一現象を対象として鮮明な画像を別個に多数得ることは困難であるという実施面での制約を生じる。一般に、画像計測に際しては鮮明で精度のよい画像を得ることが必須条件であるが、三次元計測では特にこのことが重要である。

近時の半導体ビデオカメラは、解像度と幾何学的ひずみにおいてかなりの実用性を有しており、廉価な32ビットCPUの供給に代表されるデータ処理機能の向上・普及と相まってハードウェア面の障害は少なくなっている。基本的問題はやはり可視化手法それ自身の改良・開発に負うべき部分が多い。

三次元処理のアルゴリズム・ソフトウェアについては、近似のパターン認識・コンピュータビジョン研究がこの分野にシフトしており、知識工学の援用など幅広い角度から進められていることから、本題の目的に利用できる成果も期待できる。

人間は流れ場の状況を直観的に、かつ、三次元

に把握する能力をもつが、反面その定量性には欠けるうらみがある。当面はコンピュータによる画像処理の定量化を生かした補完的な利用が主であると思われるが、本稿で紹介した事例の中には、システム化することで実用性をもつものもあると考えられる。

今後の三次元解析は前述の一部の事例にもみられるように、流れ場の計測・解析から始まって三次元パラメータのデータベース化とCAD (Computer Aided Design) から流れ場の数値解析・CAE (Computer Aided Engineering) へと統合的な展開をもつ方向に発展すると考えられる。そして将来的には、人間の直観の補完的位置付けから流れ研究と産業応用への主役になることが期待される。

文 献

- 1) Chang, T. P., Tatterson, G. B., An Automated Analysis Method for Complex Three Dimensional Mean Flow Fields, Flow Visualization III (Proc. 3rd Int'l Symp. on Flow Visualization, 1983), 236, Hemisphere-Springer, 1985
- 2) Smith, C. R., Paxon R. D., A Technique for Evaluation of three-dimensional Behavior in Turbulent Boundary Layers Using Computer Augmented Hydrogen Bubble-wire Flow Visualization, Experiments in Fluid, 1, 43 (1983)
- 3) 三宅・土井, 立体形状の多面体近似システム, 情報処理学会論文誌, 25-5 (1984), 745
- 4) Doi, J., Miyake, T., Asanuma, T., Three dimensional Flow Analysis by On-line Particle Tracking, Flow Visualization III (Proc. 3rd Int'l Symp. on Flow Visualization, 1983), 14, Hemisphere-Springer, 1985
- 5) Three-dimensional Analysis of Time Varying Tuft Behavior by its Successive Geometric Shape Modelling from Video Camera Images (to appear)