円柱後流渦に関するモアレパターンの画像処理[†]

高 森 年*・小 南 真 也*・米 持 政 忠*

Computer-Aided Image Processing of Moiré Pattern of Vortices behind Cylinders in Steady Flow

Toshi TAKAMORI* and Shinya KOMINAMI* and Masatada YONEMOCHI*

This paper describes the computer-aided image processing of a moiré pattern of vortices behind cylinders in steady flow.

Moiré topography has been paid attention as an effective way to visualize fluid phenomena, because three dimensional objects are recognized by this method.

But, in general, moiré fringes on fluid phenomena include many noises and the contrast of the image is weak because of the faint reflection of light on the surface of fluid.

Besides, when the moiré fringes are overlapped or tore off, it is necessary to modify these fringes.

For these reasons, it is difficult to get necessary informations in the moiré fringes on fluid phenomena by applying the usual image processing algorithm.

In order to solve these problems, we have developed a new algorithm for the computer-aided automatic image processing of the moiré pattern.

This algorithm consists of a filter part and an analysis part.

In the filter part, the image contrast is emphasized, the noises are excluded, and the lack of fringes is corrected.

In the analysis part, the center lines of fringes and the center points of vortices are picked out and the fringe numbers are determined.

In this paper, we explain the principle of this algorithm and show the results of its application to some moiré patterns of vortices behind cylinders in steady flow.

Keyword: Moiré Pattern Vortex Flow, Image Processing Computer-aid, Algorithm

1. ま え が き

モアレトポグラフィ法は、得られるモアレ縞等高線より種々の物体の表面形状の認識が高速かつ容易に得られるため、最近、浅底水槽における渦の分布の可視化^{1),2)}、タービンブレード近傍における渦の分布の可視化³⁾など、渦現象の可視化の有効な手段として注目されつつある。しかし、可視化されたモアレ等高線から現象を解析するために必要な情報を抽出するための手段としては、現状では手作業に頼ることが多く、情報抽出のための労力と精度などの点に問題がある。本研究は、筆者らがこれまでに実験的研究を進めてきた円柱後流の渦現象に関するモアレ画像^{1),2)}の計算機による自動解析アルゴリズムについて考察を行ったものである。一般に流体現象を対象としたモアレ縞は流体表面における反射が弱い、渦と背景とのコントラストが弱く、かつ、ノイズが多いため既存の画像処理ソフトウェアでは適切な情報抽出が困難となることが多い。また、縞と縞とが接続したり切断した画像もあり、縞の解析のためにオペレータの判断が必要とされることがしばしば発生する。本稿では、以上の点を考慮した自動画像解析アルゴリズムとその適用例について述べる。

2. 画像処理システムと画像入力

Fig. 1 に画像処理システムの全体構成を示す。システムは試作された画像入力装置⁴⁾と計算機(MEL-COME 70/30)、外部記憶装置(フロッピーディスク)、画像出力装置(XYプロッタ)から構成される。本画像入力装置により、濃淡レベル 8 bit (256 階調)、空間分解能縦 80×横 80 点のデジタルデータとして計算機に入力される。**Photo. 2** は **Photo. 1** に示す原画像(円柱後流渦)を本システムに入力した画像を、26 濃淡レベルごとに 10 階調に丸めて、そのまま出力した結果である。

[†] 第 17 回フルイディスクシンポジウムで発表(昭 57・10)

* 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町 1

* Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received November 15, 1982)

(Revised July 11, 1983)

Fig. 1 Block diagram of image processing system

Photo. 1 Original wake image by moiré topography

Photo. 2 Digital processing image of the original wake image

3. 画像のフィルタ処理

一般にモアレ縞は、2枚の格子の光干渉により生成されるが、流体表面では縞と背景とのコントラストが

Fig. 2 Flow chart of filter processing

弱く、さらにその格子の影響のためノイズが多い。そのため、入力されたままの画像から必要な情報を正確に抽出することは困難である。そこで本システムでは、入力画像の小領域ごとに特徴に応じたフィルタ処理を行うことにより、以後の解析処理を容易にするための画像改善を行う。このフィルタは、Fig. 2のフローチャートに示すように、(1)ヒストグラム平滑法による濃度強調、(2)小領域濃度補正処理、(3)ノイズ除去と2値化処理、の三つの部分からなる。

3.1 ヒストグラム平滑法による濃度強調

一般に入力される画像の濃度分布は未知である場合が多いため、濃度ヒストグラム平滑法⁵⁾により、画像の強調を行う。Fig. 3(a)の入力画像ヒストグラムにこの方法を用いてFig. 3(b)のヒストグラムを得る。このようにすれば、各濃度値をとる画素数がほぼ同じになる。しかし、モアレ画像は中間の濃度値の少ない特殊な画像であるため、その特徴を考慮しなければならない。そこで、Fig. 3(b)のヒストグラムの両端を加え合わせ、新たに Fig. 3(c)の10階調のヒストグラムに変換し、濃度強調する。

3.2 小領域濃度補正

一般に画像上の縞の分布は一様ではないため、全画像について一つのフィルタ処理では、画像のさまざまな特徴を抽出しきれない。そこで、Fig. 4に示すように、ある画素 X_0 に対して周囲の8画素（以後8近傍と呼ぶ）の小領域ごとに濃度値のばらつきを求め、その割合により適用すべきフィルタの選択を行う。まず、次式により各画素とその8近傍の画素との偏差 d が1以下の画素は、縞の疎な領域上であるので、高

a) on original wake image b) on averaged image
c) on emphasized image

Fig. 3 Histogram of density

Fig. 4 Neighbors of image element X_0

Fig. 5 3×3 matrix for averaging

Fig. 6 5×5 matrix for sharpening

d を求める.

$$\text{偏差 } d = \prod_{i=1}^8 |X_0 - X_i| \quad (1)$$

周波成分を除去する目的で, Fig. 5 の 3×3 のマトリクスによる平均化処理を施す. また, d が 2 以上の画

Photo. 3 Image after filter processing

素は, 縞と背景との境界, もしくは縞の密な領域上であるので急激な変化を抽出する目的で, Fig. 6 の 5×5 のマトリクスによる鋭化処理を施す(注1).

3.3 ノイズ除去と2値化処理

3.1, 3.2 の処理により, 画像上に孤立点や欠落点が強調されたまま残される. これらは画像ノイズと考えられるため, 次式により除去および補修を行う.

$$X_o = \begin{cases} 1 & \text{if } X_o = 0 \text{ and } \prod_{i=1,3,5,7} X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_o > 0 \text{ and } \sum_{i=1}^8 X_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

以上の処理の後に残された画像は有効なモアレ縞であると考えられるので, 次式により2値化画像に変換し, 以下に述べる解析処理のための原画像として用いる.

$$X_o = \begin{cases} 1 & \text{if } X_o > 0 \\ 0 & \text{if } X_o = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Photo. 3 は Photo. 1 の画像に対し, 以上の三つのフィルタ処理を行った結果である.

4. 画像の解析処理

フィルタ処理によって得られた2値化画像に対し, (1)モアレ縞の中心線抽出, (2)モアレ縞次数の判定, (3)渦の中心点抽出, を行うための解析処理方法について述べる. この場合のフローチャートを Fig. 7 に示す. ただしここでは説明を容易にするため, Fig. 8 に示す2値化画像テストパターンを解析処理のための原画像と考える. このテストパターンには, 実際の画像において処理を必要とする諸点, すなわち, 明・暗縞の渦中心, 共通次数をもつ縞および縞ノイズを模擬的に含ませている.

(注1) d の値による各処理 (平均化および鋭化) の判別については, 10 種の画像データにつき 70 件のサンプルを取ることににより, 経験的に定めた.

Fig. 7 Flow chart of analysis processing

Fig. 8 Test pattern for explaining moiré image analysis method

4.1 モアレ縞の中心線抽出

ここでは、削除方式による細線化処理⁵⁾に基づいてモアレ縞の中心線を求める。つまり、幅のあるモアレ縞に対し両境界線より画素を順次取り去ることによって中心線を残す方法である。その手順を以下に示す。

- ① 尖鋭化マトリクス (Fig. 6 参照) を用いて明・暗縞の境界上の画素を求める。
- ② この画素の連結数⁶⁾ N_c が 1 であれば、その画素を 0 要素に変換する。
- ③ ①, ② を繰り返す、対象となる画素がなくなるまで行う。

ただし、ここに用いる連結数 N_c は次式で示される。これは、ある画素 X_i の 8 近傍に 1 要素の画素の集合が何個存在するかを表わしている。

$$N_c = \sum_{i=1,3,5,7} (\bar{X}_i - \bar{X}_i \cdot \bar{X}_{i+1} \cdot \bar{X}_{i+2}) \quad (4)$$

(ただし、 $\bar{X}_i = 1 - X_i$, また $i=7$ のとき $\bar{X}_{i+2} = \bar{X}_1$)

この細線化処理により、ループ状の暗縞は中心線として、塊り状の暗縞は中心点として抽出される。その結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 Center lines of moiré fringe

Fig. 10 Marking image for determination of fringe number

4.2 モアレ縞次数の判定

(1) 1 次縞の判定

まず、Fig. 9 の画像の最外縁にマーク付けを行う。つぎに、0 要素についてその 4 近傍のいずれかにマークがあれば、その 0 要素にもマークを付ける。この処理を繰返すと Fig. 10 となり、4 近傍にマークのある 1 要素が一次縞となる。

(2) 2 次以上の縞の抽出

Fig. 9 の中心線図から 1 次縞を取り除けば、2 次以上の縞の中心線が得られる。ところが、Fig. 9 の右下部のように中心線が二つの次数を重ねもつ場合は、一次縞中心線を取り除くと、2 次縞の中心線が部分的に切断される。また、Fig. 9 の左上部に示されるように、一次縞中心線上のノイズが画像上に残される場合もある。したがって、この切断部の補修が必要か否かの判断が必要となる。ここでは、切断された中心線に残っている部分の画素数 R と、切断部の端点間の距離 L を比較し、 $R \geq 2L$ のとき補修が必要であると判断する。補修が必要ならば、1 次縞中心線との重複部分をそのまま用い、不必要ならば、その不要な縞中心線を消去する。以上の処理を繰返すことにより、さらに高次の縞の判定が順次可能となる。Fig. 11 は以上の処理によって得られた結果である。なお、同図における数字は縞次数を表わす。

4.3 渦の中心点抽出とその縞次数の判定

渦の中心部が明縞である場合、4.1, 4.2 の方法では

Fig. 11 Center lines image with fringe number

Fig. 12 Marking image for determination of vortex centers

Fig. 13 Image after processing for analysis

中心点とその縞次数は求められない。したがってここでは、渦中心部の0要素（明縞）の集合を抽出することにより、その中心点と縞次数を求める。まず、最外縁にマーク付けを行うと共に1次以外の縞中心線の4近傍にもマーク付けを行う。つぎに4近傍にマークがある0要素にマーク付けを行う。この処理を繰返すことにより、Fig. 12に示すような渦中心部の0要素の画素の集合が抽出される。つぎに、この画素の集合とFig. 8との論理積集合を求め、これに対し4.1の方法を適用することにより渦中心点が求められ、これに1.5次の縞次数を割り当てる。以下同様に、順次マーク付けの初期状態を変えることにより、各次数の渦中心点が最大誤差1画素以内で求められる。これらをFig. 11に加え合わせると、Fig. 13が得られる。同図における英文字は、おのおの渦中心点と縞次数（ $A=1.5$ 次、 $B=2.5$ 次、 $C=3.5$ 次、……）を表わす。

Fig. 14 Result of analysis on vortices behind a cylinder

5. 円柱後流渦のモアレ画像解析結果

ここでは、4節において明らかにしたアルゴリズムの妥当性を検証するため、実際のモアレ画像について解析を行った結果について考察する。

Fig. 14はPhoto 1に示される一円柱後流渦のモアレ画像について本アルゴリズムを適用した結果である。図中のF.N.は縞次数を、V.C.P.は渦中心点を、C.C.P.は円柱の中心点をそれぞれ意味する。縞の中心線、縞次数、渦の中心点が、本アルゴリズムによりいずれも明瞭に求められることがわかる。また、同図におけるグラフは円柱中心点と中央の大きな渦中心点を結ぶ断面の形状を表わすものである。つぎに、比較的複雑な画像の例として、二円柱後流渦に関するモアレ画像(Photo. 4)を解析した結果をFig. 15に示す(注2)。この場合についても良好な結果を得ており、本アルゴリズムの有効性が示されている。なお、

Photo. 4 Original moiré image of vortices behind two cylinders

(注2) この場合の円柱中心点は両円柱の中心点を結んだ直線の midpoint で代表している。

Fig. 15 Result of analysis on vortices behind two cylinders

以上 2 例についての結果は、すでに報告した結果²⁾と良く一致することが確かめられた。

6. あとがき

本研究では、円柱後流渦のモアレ画像を対象として、その自動解析システムのアルゴリズムについて明らかにすると共に、そのアルゴリズムを実際のモアレ画像に適用することにより、その有効性を確かめた。

しかしながら、本アルゴリズムでは、①流動現象のなかでもカルマン渦のようにモアレ縞が常に閉ループ状であり、かつ流体表面の変化が基準面（基準縞）に対し一方向性をもつ場合に限定される。②渦の強さや円柱に加わる流体力などの絶対測定ができない、などの問題があるため、今後さらに改良することが必要であると考えられる。

最後に本研究を遂行するにあたり、多大の協力をいただいた藤野明彦氏（ミノルタカメラ KK）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 米持, 木村, 北林, 新家: モアレ干渉法によるエッジトーン発振現象の考察, 第 13 回フルイディクスシンポジウム講演論文集, A 9 (1978)
- 2) 古賀, 米持, 重松, 木村: モアレトポグラフィによる並列 2 円柱後流の研究, 第 14 回フルイディクスシンポジウム講演論文集, A 12 (1979)
- 3) 大橋, 石川, 山藤: 加熱シュリーレン法およびモアレ法による非定常流れの可視化, 第 1 回流れの可視化シンポジウム講演論文集, 49/52 (1973)
- 4) 高森: 画像入力装置の試作と流体計測への応用, 流れの計測懇談会第 16 回研究討論会テキスト, 11/19 (1981)
- 5) 安居院, 中島: コンピュータ画像処理, 電子科学シリーズ 84, 産報出版
- 6) 横井, ほか 2 名: 標本化された 2 値図形のトポロジカルな性質について, 電子通信学会論文誌, 56-D-11 (1973)