

風洞試験画像データの解析による数値特性量の抽出

鈴木 剛夫* 仲井 敬一** 佐藤 真知子***

Determination of Numerical Characteristics from Image Data Obtained in Wind Tunnel Tests

Masuo SUZUKI Keiichi NAKAI Machiko SATO

abstract

A distance and an angle have been determined by using images obtained in wind tunnel tests. The images have been taken with a video camera, and been converted to digital images with a video capture board in a computer. Two kinds of images, visualized by the oil-flow technique and the temperature-sensitive liquid-crystal technique, are processed. Gray-scaled and colored images are used in the processes of oil-flow pictures and liquid-crystal pictures, respectively. Results show satisfactory agreements between the values directly measured from the pictures and those by image processing. However, special cares are needed when pictures are taken for improving the accuracy of the determination and simplifying the image processing.

1. はじめに

科学技術実験における写真・ビデオなどのデータは、従来、現象の定性的把握を目的として使用されることが多かった。しかし、近年におけるコンピュータ処理能力の向上及び撮像技術の進歩により、画像データを手軽にコンピュータで扱うことが出来るようになったため、画像としてと取り込んだデータをコンピュータで処理して、定量的な測定に用いようという試みが数多く見られるようになってきている^{6),7),9),11),14)}。このような手法では従来、限られた測定点のみで得られたデータが面データとして得られるため、各方面への応用が期待されている。しかし、有意義な結果を得るためには、対象となる画像データと要求される測定量

を、十分検討して個々のケースに即した処理を行う必要がある。

本研究では、空気力学分野における、風洞実験で得られた画像データから流れの状態を示す特性量を数値的に抽出する手法を検討する。具体的には、物体まわりの流れの可視化画像から流れの状態の変化する場所を認識し、その位置を数値的に求めることを目的とした。

2. 可視化画像及びその数値特性量

風洞実験は二次元風洞⁵⁾を用いて行い、風洞中に設置した円柱模型まわりの流れの様子を調べる。模型に流れ可視化用媒体を塗布し、風洞内に風を吹かせると、円柱周囲の流れの状態によって、円柱表面に塗布した媒体のパターンに変化が生じる。この様子を上方よりビデオカメラで撮影した(図1)。

本研究では、このパターンの変化点(エッジ)を特性点とし、円柱の軸に垂直な断面内のエッジ

* 東京工芸大学大学院工学研究科画像工学専攻

** (株) ジェムコ

*** 東京工芸大学工学部画像工学科

1997年9月17日 受理

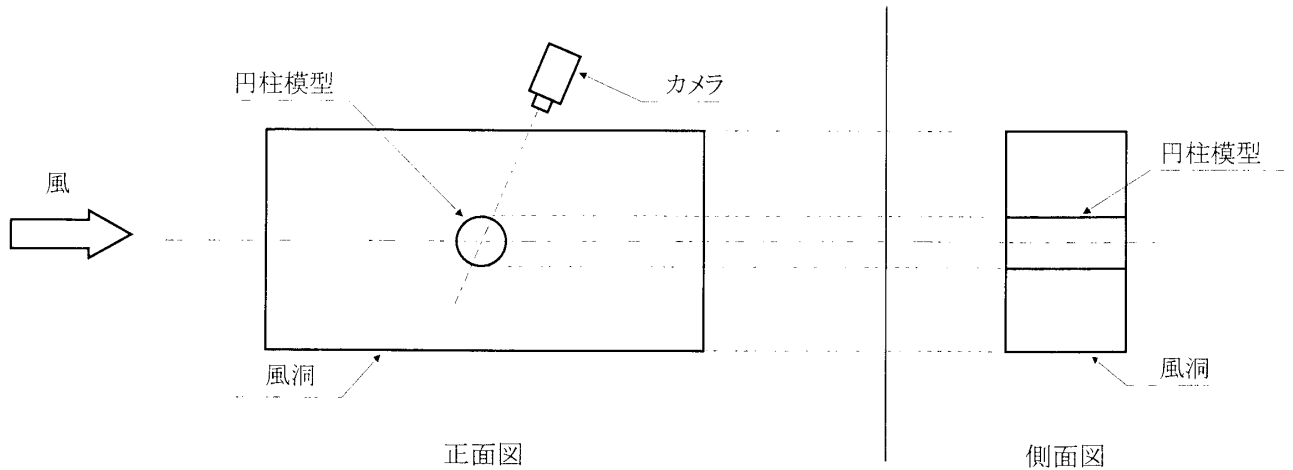


図1 風洞実験

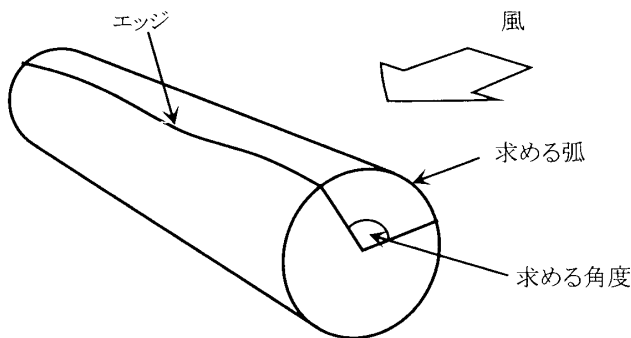


図2 特性量

の位置を数値特性量として求める。具体的には水平方向から円柱断面に沿って測ったエッジまでの弧の長さ、断面内において、エッジ位置が水平方向となす中心角を計算する(図2)。

3. 数値特性量抽出方法

風洞実験により得られたビデオ画像は、パーソナルコンピュータに取り付けたビデオキャプチャボードで、横 640 画素、縦 480 画素、RGB 各 256 階調にデジタル化し、ワークステーションを用いて処理を行った。

3.1 オイルフローによる可視化画像

オイルフローとは、模型に塗布したオイルにより流れを可視化する方法である。オイルには流動パラフィンを用い、観察・記録に適したパターンを保存するために、顔料(二酸化チタン)を混ぜて用いる。

処理手順を図3に示す。

- ・濃淡画像への変換・関心領域の切り出し

オイルフローによる可視化画像には色的な特徴が現れていないので、以後の処理は濃淡画像として行えば十分である。従ってまず、RGB 画像から濃淡画像(256 階調)に変換する。更に、不必要な部分を切除するが、この時、模型の両端に近い部分は風洞内壁の影響により、流れに乱れが生じている。また、画像により円柱の写っている位置が多少違うことを考慮して、上下、左右を切り落として、縦 120 画素、横 250 画素の画像とした(図

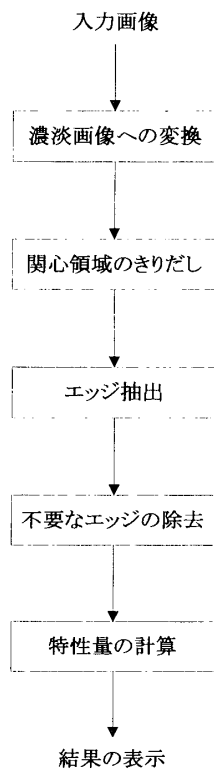


図3 オイルフローによる可視化画像の処理手順

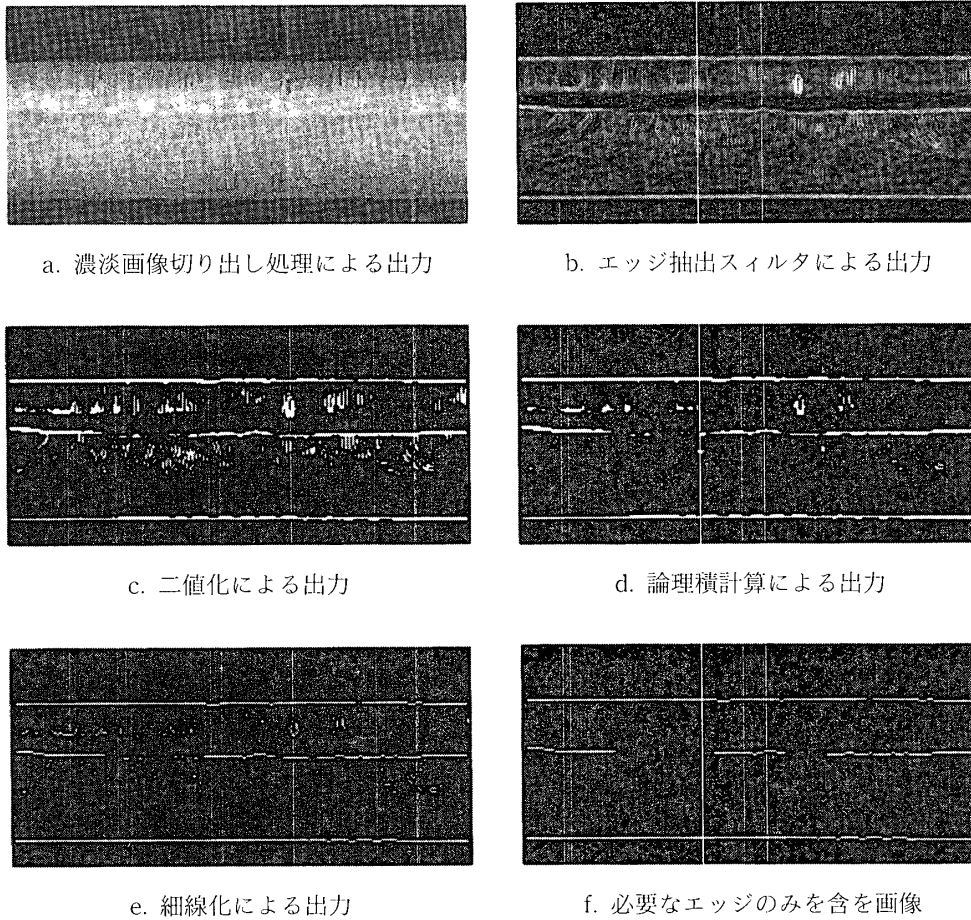


図4 処理画像 (中間結果)

4 a).

・エッジ抽出

エッジ抽出フィルタには、ソーベルフィルタ、ラプラシアンフィルタ、ロビンソンフィルタ、プレウィットフィルタ等があるが^{2),14)}、本研究ではソーベルフィルタを用いた。特性量を計算するために必要なのは、流れの変化点を示すエッジ及び円柱と背景の境界であるが、画像中にはこの他に流れの状態を示すエッジが多数存在する。これらは本来の目的には不必要なエッジであるため、出来る限り少ないことが望ましい。ソーベルフィルタの出力は、他のエッジ抽出フィルタの物と比べ、比較的余分なエッジが少なく、目的のエッジがはっきり現れている (図4 b)。

・二値化

閾値を70としてエッジ画像を二値化する (図4 c)。閾値は濃度ヒストグラムに基づいて画像ごとに定める方法が一般的により結果を与えるが^{3),7)}、エッジ画像内でのエッジの強さにばらつき

表1

サンプルNo.	エッジ部濃度値	背景部濃度値	円柱部濃度値
No.1	70以上	36以下	90以下
No.2	90以上	30以下	75以下
No.3	70以上	25以下	60以下
No.4	60以上	20以下	60以下
No.5	70以上	20以下	60以下
No.6	70以上	20以下	50以下
No.7	70以上	20以下	50以下
No.8	70以上	20以下	50以下

があり、ヒストグラムで谷が判別できなかった。そのため、今回はエッジ抽出フィルタにより処理した8種類の画像において、エッジ部、円柱表面、背景の各画素値を調べ、経験的に最も適当と考えられる値を閾値とした (表1)。

・不必要なエッジの除去

本研究で必要なエッジは円柱の位置を示すエッジと流れの変化点を示すエッジのみである。それ以外のエッジは、操作を妨げるばかりでなく、結果にも影響を与えるため、極力取り除くことが望ましい。ここでは以下のような二段階の操作によって、不必要なエッジを取り除いている。

まず、風の吹いた方向によるエッジは主に縦方向にあることを利用して、二値化画像と、それを横方向に1画素分移動させた画像との間で、論理積を計算する。この方法では、横方向に連結性のあるエッジを損なうことなく、縦方向に連結性のあるエッジのみを除去することができる(図4d)。

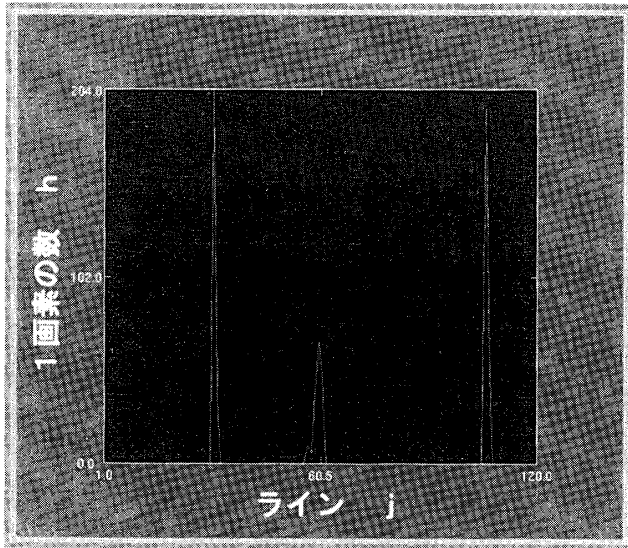


図5 ライン毎の1画素の数

ここで、上記操作による出力画像を細線化する(図4e)。本研究で必要なエッジは横方向で比較的長いものである。そこで細線化後の画像中のエッジをラベリングし、連結成分数の少ないエッジを除去する事で、ほぼ必要なエッジのみを含む画像を得ることが出来た。ここでは20画素以下のエッジを除去することとした(図4f)。

・特性量の計算

不必要なエッジを除去した画像には、円柱の位置を示すエッジと流れの変化点を示すエッジのみが現れている。この画像から流れの変化点の位置を以下の方法により求める。

まず、画像の横方向各ライン毎に、白画素の数を数える。これを図示すると図5のようになるが、図中3つの山は円柱の両端、流れのパターンの変化を表すエッジに対応するものと考えられる。3つの山のピークがエッジの位置を表すものとするれば、次式によりそのラインの位置を計算する事が出来る。

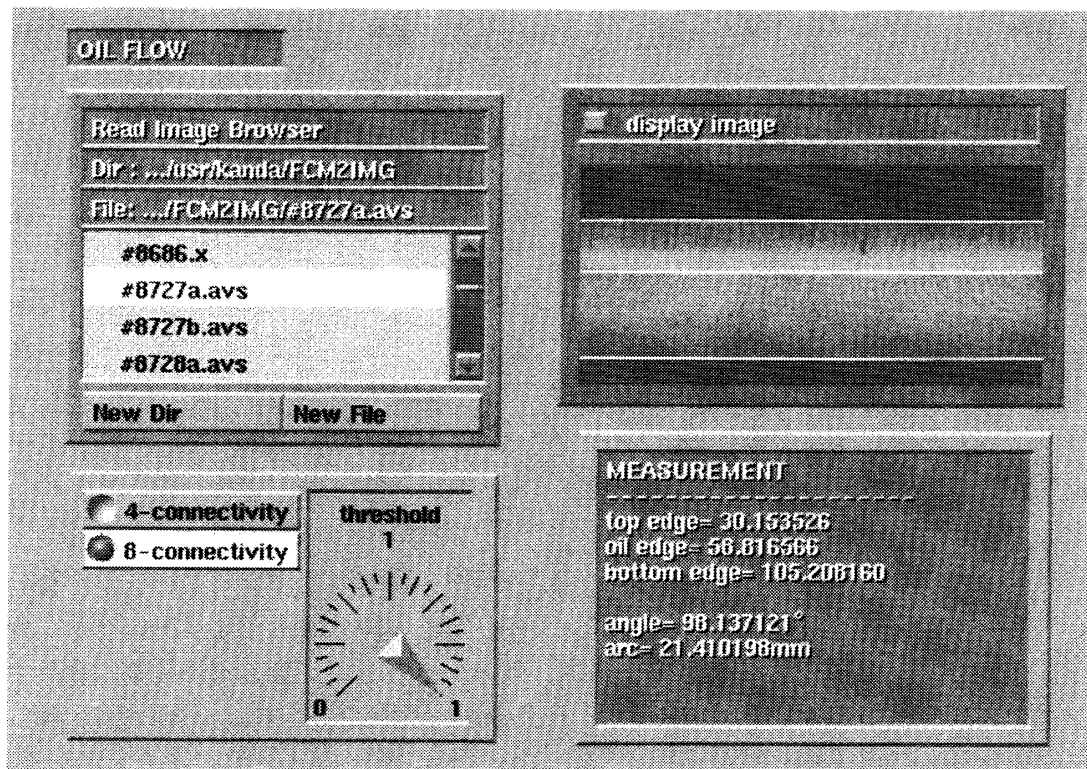
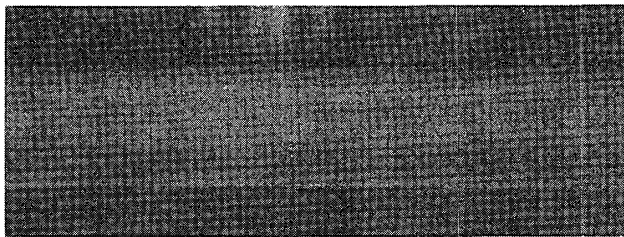


図6 処理結果

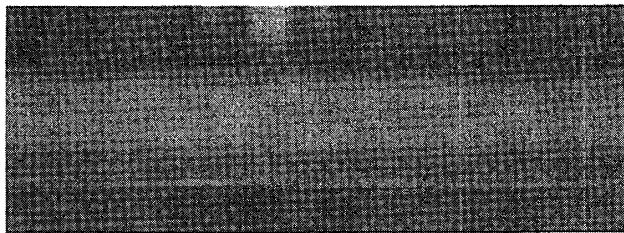
$$\begin{aligned} \bar{j} &= T_n/Q_n \\ T_n &= \sum_{j=j_{\min,n}}^{j_{\max,n}} jh(j) \\ Q_n &= \sum_{j=j_{\min,n}}^{j_{\max,n}} h(j) \end{aligned} \quad (1)$$

($n=1, 2, 3, \dots$)

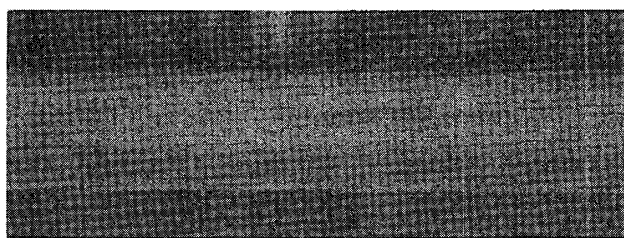
ただし、 n は3つの山を表し、 j はライン番号、 j_{\min} , j_{\max} はそれぞれ各ピークが属する山の存在するライン番号の最小値、最大値、 $h(j)$ はライン上



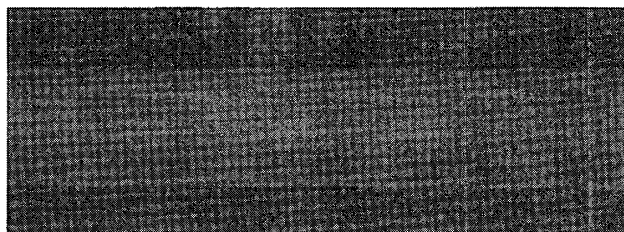
RGB 合成画像



R 成分



G 成分



B 成分

図7 RGB空間で表わした感温液晶可視化画像

の白画素の数とする。

以上により求めた値と、円柱の直径 25 mm を用いて、数値特性量を計算する。図6に結果の一例を示す。図中には計算に基づく流れのパターンの変化位置が原画像に重ねて表示されている。

・感温液晶可視化画像

感温液晶とは、温度に反応して色が変わる液晶のことで、オイルフロー実験と同じ模型にこの液晶を塗布し、流れの可視化実験を行った¹⁵⁾。

感温液晶による可視化画像では、流れの状態が色の変化として表されており、オイルフローによる可視化画像とは違った処理方法が必要となる。色情報に基づいて処理を行うにあたっては、どの色空間を用いるかによって、結果の善し悪しが左右されるので、各種色空間に変換した場合の処理について検討した^{8),9),11),12),13),10)}。

まず、RGB色空間による目的物の抽出を試みた。RGB色空間では、カラー画像をR, G, B, 各256段階の3成分画像に分解する。各成分画像について、流れの変化点前後の画素値を調べた結果、どの成分画像についてもあまり大きな差異は現れていなかった。そのため、本研究でエッジを抽出するには向いていない。

次に、HSV色空間による目的物の抽出を試みた。理論的には輝度変化に対して色相は影響を受けにくいだが、実験画像ではビデオキャプチャボードの性能や光源反射などの原因で、輝度が色情報に影響してしまう。そのため、色相、彩度に変換しても、青と緑などのように極端な変化以外は、ノイズによる画像の乱れもあってあまり大きな差異が現れない。よって、微妙な違いも検出しなければならぬ本研究には向いていない(図8)。

更に、均等色空間での目的物抽出を試みた。輝度情報を含まない色情報に基づいた識別を考えると、色の知覚的な違いを定量的に表した国際照明委員会(CIE)の定める均等色空間であるCIE L*a*b*, CIE L*u*v*の両色空間が有効であることが多い。一般的に産業界で広く使われているのは、CIE L*a*b*色空間であるが、ディスプレイ表

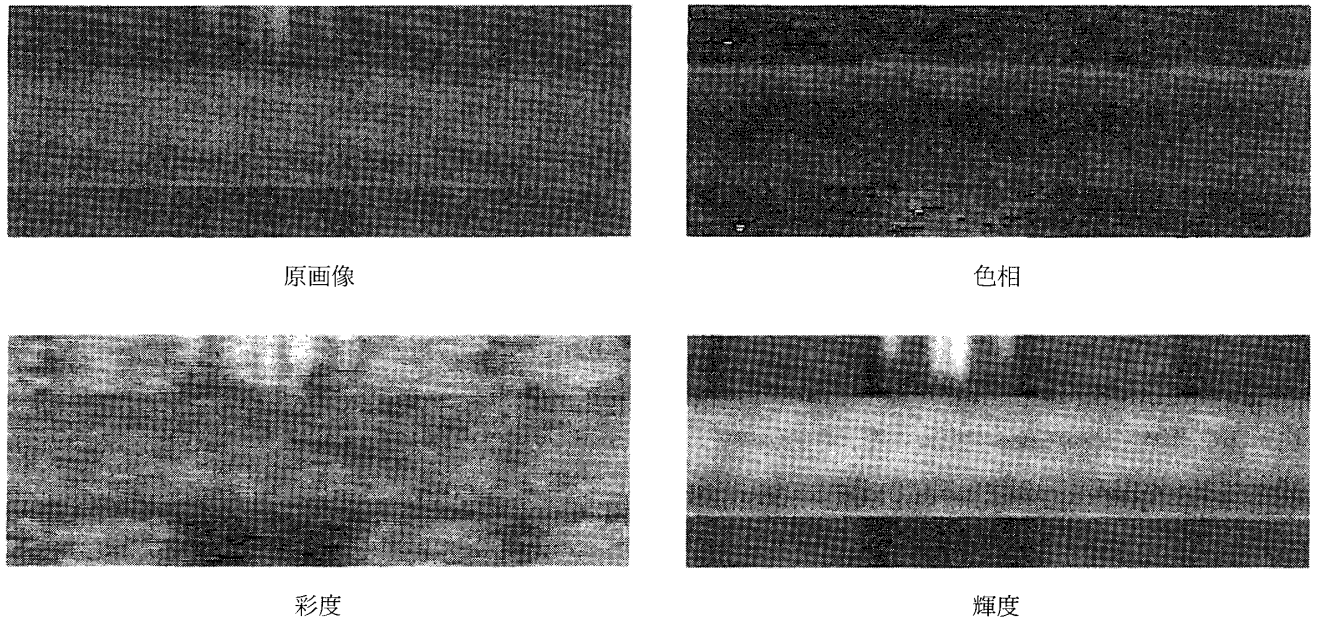


図8 HSV 色空間で表わされた感温液晶による可視化画像

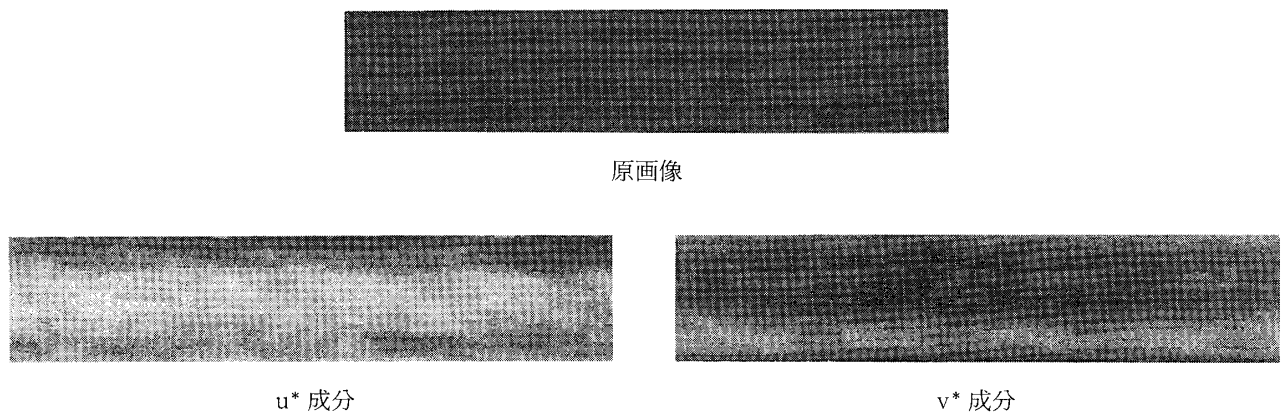


図9 CIE L*u*v* 空間で表わされた感温液晶による可視化画像

示などには、CIE L*u*v* 色空間が適していると言われている^{1),4)}。両色空間への変換を試みた結果、比較的明瞭な画像が得られた CIE L*u*v* 色空間への変換が有効であると判断した。

また、入力画像中には、青っぽい画像と緑っぽい画像が混在しており、CIE L*u*v* 色空間に変換しても、両者を同一の手法で処理することは困難であった。そこで、本研究では両者を別の手法で処理することとした。具体的には青っぽい画像は u* 成分のみの画像、緑っぽい画像は風を吹かせる前の画像との L*u*v* 空間での色差を計算した画像を用いて、処理を行っている。

特性量を得るための処理手順を図 10 に示す。

・関心領域の切り出し

与えられた入力画像に対しては L* 成分の画像から作成したマスクを用いて円柱部分のみを切り出す。また、画像の左右両端も切除する。マスクは L* 画像からソーベルフィルタによりエッジ抽出し、二値化、細線化処理を加えて作成した。

・分類

青っぽい画像、緑っぽい画像のどちらに属するかを決定するには、次式を用いる。ここで、各画素の G 値を G_i 、B 値を B_i とする。

$$\sum_{i=1}^n (G_i - B_i) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ただし、 n は画像中の全画素数である。

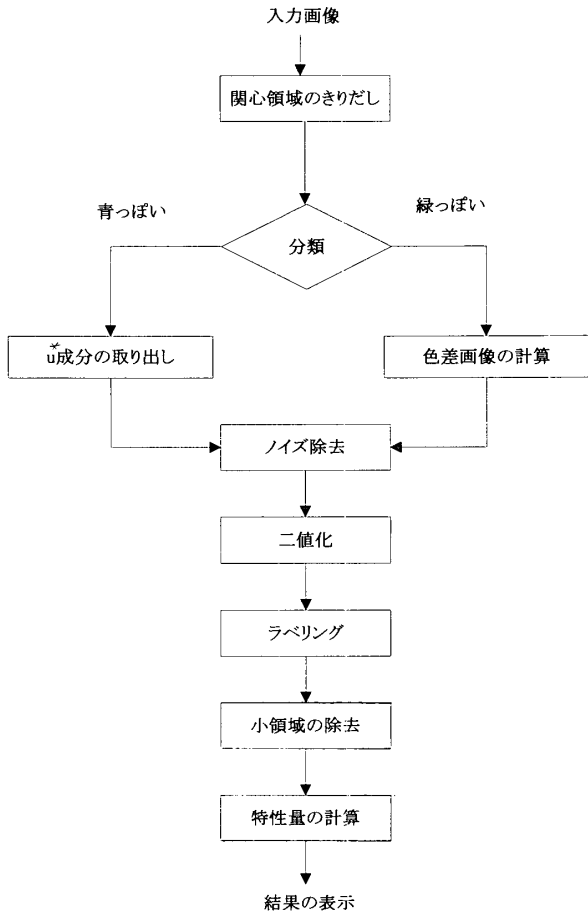


図 10 感温液晶による可視化画像の処理手順

分類後、青っぽい画像なら u^* 成分のみを表した画像、緑っぽい画像なら風を吹かせる前の画像との色差を計算した画像を、それぞれ作成する。

・ノイズ除去

ノイズ除去のためにメディアンフィルタを適用する。この時のフィルタサイズは 13×3 とし、横方向のエッジを損なわないようにした。

・ラベリング、小領域の除去

流れの状態が変化する前と後の領域を区別するため、画像を閾値 90 として二値化する。この時の閾値は、オイルフローと同様、経験的に決定した。二値化の処理により得られる画像は、白黒の二値画像であり、流れの状態が変化する前の領域が黒、変化した後の領域が白となっている。しかし、画像の性質上、黒い領域に小さな白い領域が残る。そこで、ラベリングを施し、連結成分数の少ない領域を除去する。

・境界点の抽出

境界点の抽出は、画像中で 2 領域の境界線の位

置を調べることにより行う。円柱の横軸方向の位置により、境界点が多少ばらつくが、全ての値の平均値を境界点の位置とする。

・特性量の計算

数値特性量は流れの変化点を示すエッジ位置よりオイルフローの場合と同様に計算する。

図 11 に結果の一例を示す。流れの変化点の抽出位置は、ほぼ妥当な位置を示している。

4. 考 察

本研究のように、画像から被写体上の点の位置を求める手法を用いる場合は、精度面から検討を十分に行う必要がある。撮像の原理上、カメラの光軸と平行方向（奥行き方向）の距離は、画像から定める事が出来ない。従って、2 点の位置関係がこれに近いときには、画像を用いて 2 点間の距離を求めるのは好ましくない。例えば、本研究の例では撮影された円柱の軸に垂直な断面内円周上の画素の大きさは、上下端で 2.88 mm, 中央で 0.33 mm に相当し、これを中心角に換算すると、それぞれ 13.2 度, 1.5 度となる。従って、測定したい位置によって、カメラの配置を十分考慮する必要がある。

また、画像データを用いる場合、位置は画素番号で指定することになるため、精度を高めるためには画像の精度を高めると共に、撮影時の視野調整に注意を払わねばならない。ただし、本研究では被写体、カメラとも固定されているので、これは不可能であった。また、処理にあたっては、背景の不均一な模様や、余分な物体の写り込み、目的物と背景が似たような色であったりするなど、不利な要因がいくつも見られた。更に、画像によって円柱の位置、倍率が違っていたために光ムラの除去が不可能であった。これは色情報を用いた目的物抽出の際に、陰影が色情報に影響するため大きな問題となった。

これらのことから、数値を読みとるための画像データは、画像撮影時に後の画像処理を意識した作成方法をとる必要があると考えられる。データとして画像を用い、更にその画像から数値を読みとろうとする場合には、要求される精度をふまえ

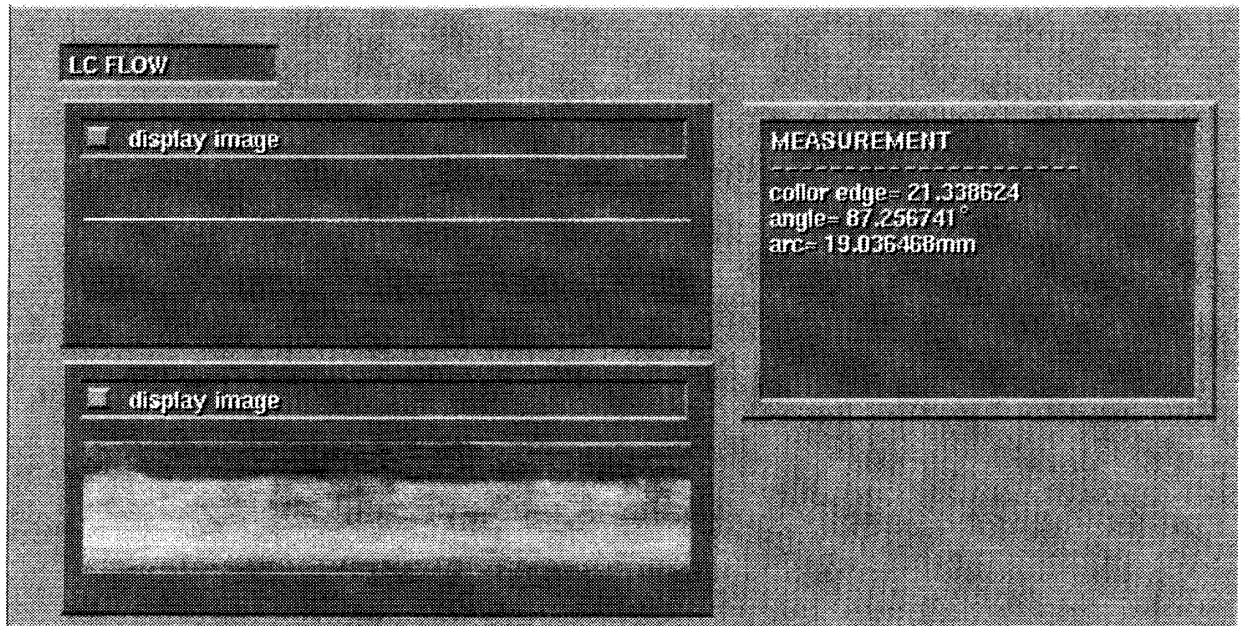


図 11 処理結果

て、撮像装置を選択し、これを適切に配置する。また、不必要な処理を極力省くために、背景、照明等にも十分配慮することが重要である。

画像処理においては、個々の手法は確立されているものの、手法の選択及び各種閾値は、扱う画像に大きく依存する。従って、全ての処理を自動化するよりも、必要な場合にはインタラクティブな処理を可能とするようなシステムとする方が信頼の置ける結果が得られるものと考えられる。

5. 終わりに

風洞実験で得られる2種類の可視化画像について画像処理より特性量を求める方法を示した。結果は両者とも妥当なものであったが、精度、その他については、今後、従来方法によって得られたものと比較検討する必要がある。

また、本研究のように画像を測定用のデータとして用いる場合、よい結果を得るためには、処理方法以前に、良い画像を得ることが重要であることを、改めて認識することとなった。

謝辞

本研究を行うにあたり、科学技術庁航空宇宙技術研究所、空力性能部二次元風洞研究室の方々と、重見仁室長に様々な方面で御協力頂いたことを感

謝する。

文献

- 1) 日本色彩学会：色彩科学ハンドブック，東京大学出版社，1980.
- 2) 手塚慶一・北橋忠宏・小川秀夫：デジタル画像処理工学，日刊工業新聞社，1985.
- 3) 画像処理ハンドブック編集委員会編：画像処理ハンドブック，昭光堂，1987.
- 4) 川上元郎：新版色の常識，日本規格協会，1987.
- 5) 遠藤浩：航技研二次元風洞について，日本航空宇宙学会誌，Vol. 26, No. 226, pp. 611-617, 1987.
- 6) テレビジョン学会編：画像工学，コロナ社，1989.
- 7) 安居院猛・中嶋正之：画像情報処理，森北出版株式会社，1991.
- 8) 木村秀人・金森克洋・麓照夫：色領域抽出を目的とした色空間座標系の検討，第8回色彩工学コンファレンス，pp. 171-174, 1991.
- 9) 篠原克幸・南敏：L*a*b*均等色空間におけるカラーエッジ抽出法，テレビジョン学会技術報告，Vol. 15, No. 29, pp. 19-24, 1991.
- 10) 大田登：色彩工学，東京電気大学出版局，1993.
- 11) 小沢武：カラー画像からの特定色彩領域の抽出法，神奈川県工業試験研究報告，No. 64, pp. 5-8, 1993.
- 12) 光永知生・戸塚卓志：対象物輪郭抽出のための適応的カラーエッジ検出方法，第4回ソニーリサーチフォーラム，pp. 177-182, 1994.
- 13) 加藤直哉：マルチメディアにおけるカラーマネージメ

ント, カラーフォーラム, Japan '95, チュートリアル,
pp. 23-37, 1995.

14) 谷尻豊寿: パソコンによる最新画像処理入門, 技術評
論社, 1996.