論文

デジタル画像処理の二相流への適用*

第 1 報—気泡画像の抽出

Bozin Donevski**, 佐賀 徹雄***, 小林 敏雄***, 瀬川 茂樹***

Application of Digital Image Processing in Two-Phase Flow 1st Report-Extraction of bubble image

Bozin Donevski, Tetsuo SAGA, Toshio KOBAYASHI, Shigeki SEGAWA

ABSTRACT

A new method of an automatic image analysis of two-phase flow is presented in this study. The image processing methodology is based upon image processing of high speed motion pictures obtained from the flow field in the region of underdeveloped subcooled flow boiling for a variety of experimental conditions. In the first report, the image processing method which based on the detaching and tracing of edges of bubbles and their background is presented. The production of background, set up of image coordinates, image adjustment and bubble extraction were carried out in this approach.

Key words: Two-phase flow, Digital image processing, Flow visualization, Bubble extraction, Image adjustment

1. まえがき

沸騰を伴う気液二相流は、広く工業プロセスに出現し、この流れ場の解明はきわめて重要な課題となっている。しかし、現象の複雑さから、数値シミュレーションによる解析はもとより実験的にも現象の解明は十分になされていない。そこで、本研究では、気液二相流の解析にデジタル画像処理技術を適用した、実験的な解析手法を提案する。鉛直二重円管内のサブクール沸騰を対象に、管内のヒーター部で発生した気泡の、発生—成長—離脱—凝縮—消滅にいたるまでの一連の過程を高速度撮影し、これを画像解析するシステムを構築した。第 1 報では気液二相流中の気泡部を自動的に抽出する画像処理方法を、第 2 報では抽出した気泡の動的な挙動の解析について、それぞれの詳細を述べる。

2. 流れの可視化と画像処理システム

本研究で対象とするのは、Fig.1 に示すような環状流路をもつ鉛直二重円管内での強制対流のサブクール沸騰である。供試二重円管の内側パイプ(外形 $d = 12.7 \text{ mm}$)の一部に加熱源のヒーターが設置され、外側の管には管路内の流れを可視化するために透明なガラス管(内径 D

$= 25 \text{ mm}$) が用いられている。熱流束、管内流量、流体温度および圧力などは管路に連結された制御機構により設定される。この流れ場は、16 ミリ高速度カメラと水銀ランプの光源(200 w)を供試管路を挟み正対させてトランプ装置上に設置して、撮影・記録される。管路内の

Fig.1 Image processing system for bubble size measurement

* 原稿受付 1996 年 4 月 9 日

** Univ. St. Clement Ohridski

*** 正会員 東京大学

気液二相流の流動を光源からの透過光により高速度撮影するものである。なお、光源からカメラへ入射される光強度分布のむらを減少させるため、コリメートレンズとすりガラスが、光源前部と供試管路の間に設置されている。また、円管壁での屈折率の影響を低減させるため供試管路は矩形のガラス管の内部に配置されている。

16 mm 高速度カメラで撮影された鉛直円管内の気液二相流はテレビジョン/シネマコンバータにより 16 mm フィルムから NTSC 方式のビデオ信号に 1 コマ毎に連続的に変換される。16 mm 高速度カメラの撮影時間間隔は 1/2000 秒である。したがって、ビデオ画像間の時間間隔は 0.5 ms である。変換された NTSC ビデオ信号は一旦、S-VHS ビデオテープに記録され、解析対象となる画像が光ディスク上に記録される。

画像処理システムはアナログ光ディスク (SONY LVS-5000, LVR-5000)、イメージプロセッサ (NEXUS 6410) およびマイクロコンピュータ (NEC PC 9821 AP) で構成されている。ホストコンピュータの指令により、光ディスク上から解析対象となる画像が選択され、順次に画像処理装置に A/D 変換されて入力される。デジタル化された画像は、 512×480 画素の画像分解能と 8 bit の濃度階調をもつ白黒画像である。この画像上で、独自に開発したソフトウェアにより沸騰気液二相流中の気泡の挙動が解析される。

3. 気液二相流中の気泡の画像解析

Fig. 2 に解析対象とする気泡画像 F_0 の一例を示す。画面左側の円筒ヒーター上で発生した気泡は次第に成長し、ヒーター上をスリップしながら上方に移動し、やがてヒーターから離脱する。強制対流中に放出された気泡は、上方に運ばれながら凝縮、消滅していく。管路内のヒーター上では、このような気泡の発生、消滅がずっと繰り返されている。本画像解析は、沸騰により発生する気泡の挙動をその輪郭を抽出し、気泡の成長や凝縮の

Fig.2 An example of bubble image

過程、あるいは熱流体中の気泡の移動速度や移動軌跡などを自動的に解析することにより、サブクール沸騰における熱流動現象を定量化しようとするものである。

画像解析の第 1 ステップは画像上の気泡の抽出である。Fig. 2 の気泡画像の例からもわかるように、気泡部には、照明光の気泡界面での光の屈折により高濃度スポットが出現している。しかもこのスポットの濃度や形状、位置などが気泡の変形に伴って不規則に変化している。同時に、照明光源の強度むら、および管内熱対流により生じる透過光の強度のむらなどが混在している。このような画像の濃度むらの問題の他にも、高速度撮影時のカメラの振動による画像間の相対的な座標ずれの問題が存在する。これらの問題に対処するため、以下に示すような手順で入力画像に前処理を施し、気泡画像を抽出することにした。

3.1 背景画像の作成

本実験では画像の背景濃度分布に対応する画像データが存在していない。そこで、解析対象とする気泡画像 F_0 から背景画像 F_0 を作成し、平均的な背景の濃度分布を対話型の処理により決定した。背景濃度の時間変化が比較的少ないことから、数フレーム分の気泡画像上で、 $M \times N$ 画素のスリット状の画像マスクを画面下から上に気泡を含まないように移動させ、各スリット位置における画像の濃度分布から背景画像 F_0 を合成した。ここでは標準的には 64×480 画素のマスクを用いているが、気泡画像中の気泡の数やサイズに応じてマスク幅や計測位置を変化させている。この F_0 に、(1)、(2)および(3)式のフィルタリング処理を順次に施して、画像のノイズ除去と平滑化が行われる。Fig. 3 にフィルタリング処理に用いた 3×3 画素の画像マスクを示す。

$$g = \min[f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8] \quad (1)$$

$$g = \max[f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8] \quad (2)$$

$$g = \min[f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8] / 9 \quad (3)$$

ここに f はフィルタリング処理前の画像の画素濃度値で、 g はフィルタリング処理後のそれである。Fig. 4 にノイズ処理後の背景画像 G_0 を示す。

3.2 画像座標の基準化

高速度撮影時のカメラの振動により、画像間には相対的な座標位置のずれが生じている。そこで、位置が既知である基準ワイヤー (Fig. 2 の画面右上部に撮影されている棒状のワイヤー、径: $\phi 0.5$) を管路内に設置し、この基準ワイヤーを用いて画像間の座標を基準化し、同時

f_4	f_3	f_2
f_5	f_0	f_1
f_6	f_7	f_8

Fig.3 3×3 convolution mask

Fig.4 Produced background image

に画像と実長との変換係数を定めた。一連の処理対象画像中で基準時刻 t_0 を定め、これを基準画像 F_{b0} とする。この F_{b0} に対して処理対象となる気泡画像 F_{bn} の座標を、基準ワイヤー位置が一致するよう移動させ、画像間の相対的な位置を合わせる。位置合わせに先立ち、まず画像 F_{b0} と F_{bn} のノイズ処理と平滑化が(1)、(2)および(3)により行われ、ノイズ処理された基準画像 G_{b0} と気泡画像 G_{bn} とが作成される。ついで、 G_{b0} と G_{bn} の基準ワイヤーが最もよく一致する位置を、(4)式により G_0 の基準ワイヤーまわりで探査して検出する¹⁾。

$$C_R = \frac{\sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{0i,j} - \bar{d}_{0i,j})(d_{1i,j} - \bar{d}_{1i,j})}{\left\{ \sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{0i,j} - \bar{d}_{0i,j})^2 \sum_{i,j=1}^{n^2} (d_{1i,j} - \bar{d}_{1i,j})^2 \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

ここに、 $d_{0i,j}$ は基準画像 G_{b0} の基準ワイヤーまわりに設置した基準マトリクス M_0 (13×13 画素) 内の画素の濃度値、 $d_{1i,j}$ は処理画像 G_{bn} の基準ワイヤーまわりに設置した探査領域内 (33×33 画素) の参照マトリクス M_m (13×13 画素) の画素の濃度値である。 M_0 に対する M_m の濃度の相互相関係数 C_R が最大値をとるとき、 G_{b0} と G_{bn} の2画像間の基準ワイヤーの位置が最もよく一致する。 C_{Rmax} における M_0 と M_m の中心位置座標 (x_0, y_0) 、 (x_r, y_r) から、 G_{bn} の G_{b0} に対する座標ずれ $e = (x_0 - x_r, y_0 - y_r)$ を算出し、気泡画像 G_{bn} の座標を e だけ座標変換して、2画像間の座標の位置を合わせている。

なお、背景画像 G_0 の作成時にも、基準時刻の気泡画像 G_{b0} に対して、同様の画像間の位置合わせを背景画像の作成に用いる全ての気泡画像に対して行い、画像間の座標を統一している。

3.3 気泡輪郭の抽出

Fig.5 は気泡部の中心線付近の濃度分布の一例である。この濃度分布からわかるように、不均一な濃度の背景上に気泡が存在し、しかもこの気泡部には高濃度スポットが形成されている。気泡はフレーム毎にサイズ、位置、形状が不規則に変化し、それに伴って気泡部の濃度分布、

Fig.5 An example of density distribution of bubble image

高濃度スポットの出現する位置や大きさが複雑に変化している。単純な鮮鋭化処理やしきい値処理では、気泡部を画像の背景から正確に抽出することが困難である²⁾。そこで以下のような処理方法を考案し、気泡部を画像から自動的に抽出した。

気泡の輪郭抽出における最初のステップは背景処理である。まず、気泡画像 G_b と背景画像 G_0 を(5)式のように画像間演算して、背景濃度むらを補正した気泡画像 G_B を作成する。

$$G_B = |G_b - G_0| \quad (5)$$

Fig.6 (a)に画像 G_B を示す。背景の濃度むらは補正されているが、気泡部が微弱となり、しかも気泡の境界付近が高濃度スポットにより途切れかけている。そこで、画像 G_B の気泡部を強調するため、(6)式の鮮鋭化処理を画像 G_B に施して、Fig.6 (b)のような画像 ∇G_B を作成する。

$$g = \max[|f_1 - f_5|, |f_2 - f_6|, |f_3 - f_7|, |f_4 - f_8|] \quad (6)$$

ついで、この画像 ∇G_B を画像 G_B に加算処理して、Fig.6 (c)のような気泡部を強化した画像 G_{Bi} を作成する。

$$G_{Bi} = G_B + \nabla G_B \quad (7)$$

画像 G_{Bi} に対してこの画像強化処理を、気泡境界付近の画像濃度に応じて数回繰り返す。気泡部境界付近の濃度が十分に強化されたと判断されたときこの処理を終了する。

この画像 G_{Bi} にしきい値処理を施して2値画像を得る。2値画像では、気泡内部の穴(0の値をもつ画素)の有無が判定され、穴部が検出された場合には、これらを1の値に置き換える穴埋め処理が行われる。ついで、拡大・収縮処理により気泡境界部の途切れの修復や平滑化がなされ、Fig.7 (a)のような気泡の2値画像を得る。この2値画像に輪郭追跡処理³⁾を施すと、Fig.7 (b)の気泡輪郭線

(a) Bubble image after subtraction operation

(a) Binary image

(b) Enhanced bubble image

(b) Bubble contour

(c) An adjusted bubble image

(c) Bubble contour and bubble image

Fig.6 Bubble image adjustment

Fig.7 Extraction of bubble contour

が抽出され、これを原画像に重ね合わせると Fig.7(c)のようになる。上述の一連の処理により気泡部が正確に検出されたことがわかる。この気泡輪郭の情報に基づいて、沸騰気液二相流の非定常解析が行われる。

4. 結論

沸騰を伴う気液二相流を解析するための画像処理システムを構築した。不規則な濃度分布をもつ気泡画像をその背景画像から自動的に抽出するためのアルゴリズムを開発し、気泡輪郭の抽出に適用できることを確認した。

参考文献

- 1) 森, 服部, 内田: 分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化, 写真測量とリモートセンシング, 21-2 (1982) 4-14.
- 2) Weszka, et al.: A threshold selection techniques, IEEE Trans. on Computer, 23-12 (1974) 1322-1326.
- 3) Eccles, M. J., Mcqueen, P. C., Rosen, D., Analysis of the digitized boundaries of planar objects, Pattern Recognition, Pergamon Press, 9 (1987), 31-41.