円形状抽出による分散粒子の界面計測*

Measurement of Interfacial Configuration of Dispersed Particle using Voting Method

于 笑然** 菊池 貴好** 波津久 達也*** 賞雅 寛而*** 大島 正毅***
 YU Xiaoran KIKUCHI Takayoshi HAZUKU Tatsuya TAKAMASA Tomoji OSHIMA Masaki

Abstract A precise and reliable measurement on superposing particles in multi-phase flow using an image process method is eagerly needed. In our research, we propose a stereo image method compounded with a new voting method, in which, we combine a normal-line algorithm with the voting method for the separating and locating of particles, and also devised a local maximum detection algorithm to improve the voting precision. After evaluating on measurement precision by simulation experiment, we present extensive experimental results on processing actual solid-liquid two-phase flow images using the proposed method. The result reveals that the presented method is effective and applicable for the detection of overlapping solid particles under a high void fraction condition than other methods.

Keywords: Two-phase flow, Solid particle, Superposition, Voting method, Hough transform, Normal-line

1. 緒 言

種々の流動様式の混相流モデル構築のためには相界面の時空間情報が必要である。例えば、各国で精力的な研究が進められている気液二相流界面積濃度輸送方程式の構築には、広範な流動条件下におけるボイド率、界面速度、界面積濃度などの界面構造データが用いられている[1]。高速度ビデオカメラや静止写真画像から界面情報を得る画像処理法は、界面形状を直接測定できることや非接触であるため流れを乱さないなどの利点があるため、コンピューター技術の発達とともに重要な界面計測手法となっている。混相流の画像処理においては一般的に二値化された粒子の輪郭線を求め、個々の粒子の管内位置、径、体積、表面積が計測されている。ここで気泡流などの分散流の画像処理は、低粒子数密度の流れでは非常に有効であるが、粒子や気泡の数密度率が大きくなると、重なりのために分散粒子の分離が困難となり、界面の再構成ができなくなるとい

う計測限界を持つ。

分散粒子の3次元位置再構成及び粒子の同定(ナンバリング)情報の高精度化のために、2つ以上の方向から撮影される画像を同時計測するマルチ計測が行われてきている[2-4]が、粒子の重なりについてはこの場合も分離情報を目視で与える方法が一般的である。従って、多くの場合統計的データの確立には多くの労力が必要であり、また目視による誤差を避けることは困難であった。従来の研究ではテンプレートマッチング法がある[5]。テンプレートマッチング法は画像とその種々仮定した位置にあるテンプレートの間の相関値を求め、相関値の大なる位置に対象とする図形が存在するとみなすことである。この手法の欠点の1つとして、複数の検出対象が重なる場合には検出位置がずれたり、ミスしたことによって処理の精度が低下してしまう。また、撮影状況(撮影の距離や照明)が変わると、対象がテンプレートと同じ形状であっても大きさや明度が

* 2007.6.14 受付

** 東京海洋大学大学院 〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6
 TEL: (03)5245-7475 FAX: (03)5245-7417 E-mail: d052019@kaiyodai.ac.jp

*** 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

異なる対象の処理も苦手である。また、Fujitsuka ら [6] は、この問題を解決するために界面輪郭線の曲率に基づく粒子分離アルゴリズムという画像処理手法を提唱した。この方法は、重なって撮影される粒子境界線を追跡しその変曲点を粒子分離位置としており、この方法をステレオ撮影された気泡流へ適用することにより、重なっている粒子の分離が効率的に行われることを示している。しかしながら、このアルゴリズムでは輪郭線の一部の情報しか用いていないために、重なっている粒子の中心距離が互いに近づくとき界面曲率の極小値を得られないため粒子の分離ができなくなるという計測限界がある。

また二値化された粒子画像処理の実用上の問題として、粒子界面の反射などのために輪郭線濃度に偏分布が生じ、輪郭線が部分欠落する場合がある。従って、粒子輪郭線情報から重なっている粒子を分離する及び欠落している輪郭線を補填する適切なアルゴリズムの開発は、混相流を画像解析するために、また広い流動条件における十分に統計的かつモデル開発に必要な界面情報を得るために重要な課題となっている。

本研究は気泡流の界面計測技術の開発を最終目的としているが、ここではその第 1 段階として、固体球形粒子流を対象に、重なっている粒子の分離及びステレオ画像処理による三次元界面情報取得のためのアルゴリズムを開発し、シミュレーション及び垂直管内水一球形粒子流実験によるアルゴリズムと計測限界の検証を行った。

2. 投票法を用いる円形状抽出法を用いた界面計測技術の開発

ノイズの混入した画像から、パラメトリックに表現できる形（例えば直線やカーブ等）には、古典的なハフ変換法が応用できる [7]。O'Gorman らは画像強度の勾配の大きさを計算する過程を加え、直線の検出における改善法を示唆し、計算時間の短縮が達成されるだけでなく不必要な投票を抑制した [8]。また Ballard らは投票法による円抽出のアルゴリズム [9] を提案し、あらかじめ大きさや位置の分っていない円対象に対して途切れや隠れがあっても検出できる有用な手法を提案した。

投票法において、対象とする画像にはある既知の図形が（一般には複数個）含まれているがその位置は不明とする。また、対象とする図形以外の図形も含まれているものとする。さらに、対象図形は必ず

しも全てが現れておらず、一部は途切れていたり他の図形と重なることもあるものとする。通常は輪郭線抽出処理を行い、得られた点（対象点）を以下の処理の対象とする。画像とは別に対象図形のパラメータ（例えば対象図形が直線の場合その傾きと原点からの距離）に対応するパラメータ空間を設ける。デジタル処理のため必要な精度でそれを区切り、各升目には数値を累算できるようにしておく（累算器）初期値はゼロとする。対象点は必ずしも対象図形の上のものとは限らないが、仮に対象図形上のものとして、その場合のパラメータの可能性をすべて算出する。直線の場合、ある対象点が特定の直線上の上にあるものとする、その点を通るあらゆる傾きの直線が仮定される。このような仮定にもとづきパラメータ空間上の対応する累算器の値に 1 を加える。対象点がすべて特定の位置にある対象図形上のものとは限らないが、そうであるものについては、パラメータ空間上特定の位置にある場合のパラメータ値累算に寄与する。これに反し、そうでない点は特定のパラメータ値には寄与しない。全部の対象点の処理が終わった時点では実際に特定の位置にある対象図形に対応した累算器の値が大きくなり他は小さい。よってこれにより対象図形の位置を検出できる。その重要な利点は、曲線の切れ目や雑音に比較的影響されにくい点である。ただし、実際上の応用領域においては効率が必要しもよくないのが問題である。

2.1 投票法に法線検出法を複合させる手法

本研究では、球形粒子流が対象のため楕円体近似が必要な気泡流よりも単純な円が画像要素となる。そこで画像中の重なっている粒子の分離や欠ける粒子を適切に処理するために投票法による円抽出のアルゴリズムを用い、さらに法線検出法を複合させるアルゴリズムおよび投票の誤差を少なくする極大値検出アルゴリズムを提案し、その有用性を確認する。

Fig. 1 において実線で書かれた円は画像の中に存在する円形状を示す。同図 A 点、B 点はエッジ抽出オペレータによって検出されたエッジ点のうち、この円形状上に存在するものをあらわす。円の径 r はあらかじめ知られているものとする、未知の円の中心 $O(X_c, Y_c)$ は A 点から r だけ離れているから、そのような点の集合は $A(x_a, y_a)$ を中心とする点線円上に存在する。点 $B(x_b, y_b)$ についても同様であるから、未知の中心 $O(X_c, Y_c)$ は A, B を中心とする

Fig.1 Circle extraction using a voting method.

点線円の交点として求められる。エッジ点の内求めるべき円の上に存在する点を中心として円を描けばすべて求める未知の中心を通る。よって、画像より抽出される全てのエッジ点を中心として半径 r の円を描き、その交差する点として、未知の中心点を求める。しかし、実際の画像中のエッジ点はすべてこのような点だけではなく、対象円上以外のエッジや別の円上の点が存在する、このような点に対応するのは投票時に度数が低くなる。よって度数の高い点を求めることにより円の中心を求める。

また、第2の効率化の工夫を前記の投票方法に加える。前記の方法ではエッジ点を中心として円を描くが、本効率化手法はエッジオペレータに関連して得られるグラディエントによりエッジの法線方向を求める。一般に画像は、2次元平面上の座標を表す変数 x, y を引数とする明るさの関数 $f(x, y)$ として記述され、関数の空間1次微分（グラディエント; gradient）は式(1)のようにベクトルで表される。

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} u_x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} u_y \quad (1)$$

ここで、 u_x, u_y はそれぞれ x, y 軸方向の単位ベクトルである。式(1)によると、グラディエントは x および y 座標によって画像の濃淡変化を微分する空間微分のことであり、その強度は

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{f_x(x, y)^2 + f_y(x, y)^2} \quad (2)$$

で与えられ、エッジ強さに相当する量であると考えられる。一方、グラディエントの方向は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{f_y(x, y)}{f_x(x, y)} \right) \quad (3)$$

となり、円辺の垂直方向（法線方向）を表す。画像中の対象とする点におけるグラディエントから法線方向が求まり、それにより法線ベクトルが求められる。

現実的なデジタル画像では、 x, y 座標はとびとびの整数値しかもたないためこれらの数学的な一般式をそのまま適用することはできない。多くの場合、隣接画素同士の差をとる差分演算で微分を近似する。微分演算を行うための隣接画素同士の演算を表現する係数の組を“微分オペレータ”と呼び、いろいろな種類がある。本実験では最も頻繁に用いられる Sobel オペレータによりグラディエントを求めた。 x 方向また y 方向の Sobel オペレータをそれぞれ式(4)に示す。

$$f_x : \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad f_y : \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

円においては各点における法線方向に円の中心があり、エッジ点の内求めるべき円の上に存在する点にて法線を描けばすべて求める未知の中心を通る。本来円上にない点の影響は前記と同様に軽減される。よって、画像より抽出される全てのエッジ点を通じる法線を描き、その交差する点として、未知の中心を求める。

法線投票法のアルゴリズムを Fig. 2 のフローチャートに示す。原画像に輪郭線抽出処理を行い、得られたすべてのエッジ点における法線方向を求めることにより投票を行う。検出円の半径が未知の場合には、すべての法線上の点を投票する。一方、検出する円の径が知られている場合に、すべての法線上の点の代わりに、エッジ点から法線方向 $+r$ または $-r$ の位置点だけを描けば、投票する結果から未知の中心が確定できる。対象が背景より暗い場合は+、明るい場合は-とする。本研究では前者を採用した。検出円の径が既知の場合の原理を Fig. 3 に示す。二つの方法の投票空間の例を Fig. 4 に示す。

投票法では、投票する時に、画像より抽出されるすべてのエッジ点を中心に、投票空間に半径が r の円上の全ての点を投票する。半径が r の円上点の座標の計算式は連続性を持つアナログであるため、座

標計算式により算出した円上点の座標は投票空間の配列（整数値で格納される）と対応できず、投票空間での一つの点に対し座標計算式により複数回投票される可能性がある。従って、通常のプログラム上の処理手法としては、円上の座標を計算し投票する手法の代わりに、画像の走査を行い、画像上全ての点とエッジ点の距離を算出し、その量子化させる結果が円の半径 r と等しければ、この点を投票する。

一方、法線投票法では、一つのエッジ点に対し、投票空間で一つの点だけを投票するため、勾配を計算する等付加的な作業が増えているが、座標計算式

で算出した結果を量子化させる後にそのまま投票すればよいので、画像走査を行う必要がない。その分は効率を向上できる。

本研究の実験条件（CPU: Pentium M 1.8GHz, Memory: 1G, Display Memory: 64M, Image resolution: 640*480）では、56 枚の固液二相流画像上約 800 個半径が 13 画素の模擬粒子に対し投票法と法線投票法を行い、一つの粒子を計測するに平均投票数は、それぞれ $V_{HT} = 4538$ 、 $V_{NHT} = 55$ であり、また計測時間はそれぞれ $t_{HT} = 15748ms$ 、 $t_{NHT} = 138ms$ となり、第 2 の効率化方法により処理効率は約 114 倍に上がった。その理由は、投票法では円上の全ての点を描くに対し、第 2 の効率化方法により大幅に描く点が少なくなるのでその分効率化できると考えられる。なお本実験条件では計算時間は投票数に大きく影響されている。

本研究では半径が一定の固体粒子を使っているため、粒子は画像上での投影はほぼ同じ半径の円であり、径が既知条件下での法線投票法を適用できる。

さらに、画像のゆがみなどから誤って存在しない粒子を認識することを避けるため、本研究では投票点における二値化した画像の輝度値を用い、投票点の有効性を判断する方法を提案した。具体的には、本研究の二値化した二相流画像における背景輝度値と固体粒子輝度値はそれぞれ 255 と 0 であるため、投票点での輝度値は粒子輝度値と相等ならば投票点を有効と判断する。一方、背景輝度値と同じ場合には偽投票点として放棄する。よって、粒子が存在しない場所での投票点を避けることができる。

Fig.2 Algorithm flow chart of normal-line voting method.

Fig.3 Circle extraction using a normal-line voting method.

(a) Voting space of voting method

(b) Voting space of normal-line voting method

Fig.4 Appearance of vote space.

2.2 極大値検出手法

投票空間は、整数の座標値を持つ不連続な点の集まりである。一方、グラディエントの計算式は連続性を持つアナログであり、よって計算された投票点座標により投票空間に投票する時には量子化誤差が生じる。このため、投票法によって取得される円中心の部分は、一般的に数画素の幅を持つ。複数の円を抽出する場合、形が欠損する円の中心投票値が真円のものと比較すると低いので、その投票極大値が真円の中心あたりの候補より少ない場合がある。従って、一つの円が検出された場合は、その近傍の候補を強制的に削除する必要がある。

そこで、本研究では極大値検出手法を提案した。Fig. 5 に示すように、この方法は投票空間で極大値を取る点Aと点Bのそれぞれの隣接する画素の投票値を互いに比較し、極大点のみを抽出する。

Fig.5 Local maximum detection.

2次元版の一例を Fig. 6 に示す、具体的には、まず投票法により得られた投票空間(a)から、すべての投票点について、近傍画素内の比較を行い、投票値が極大となる画素だけを真投票として抽出し、他のものは消去する、その結果を(b)に示す。この極大値検出手法によって、投票空間に関して信頼性が高い投票点を抽出することと真投票値近傍の候補投票点の除去が可能となる。極大値検出手法を加えた前後の投票空間三次元分布の一例を Fig. 7 に示す。左の(a)のように、投票値が極値を取る(投票数は10、11)点の周りの投票は本提案手法により抑制され、投票空間の雑音を除去し、(b)のように投票正確率を向上できる。

極大値検出手法によると、円中心位置が隣接する2つの粒子は、円中心投票値の低いものは捨てられるため、計測可能な距離限界は1画素となった。こ

Fig.6 Voting space before/after local maximum detection.

(a) Before local maximum detection

(b) After local maximum detection

Fig.7 Voting space before/after local maximum detection.

これは考えられる最も短い計測可能距離である。法線投票法に極大値検出手法を加えた手法による円抽出実行結果の一例を Fig. 8 に示す、Fig. 8 (a)では中心距離が1画素の2つの円の抽出結果、(b)では中心距離が2画素の2つの円の抽出結果であり、円中心が2画素の距離以上であれば抽出できるとの望ましい結果が得られた。

3. アルゴリズムの検証

3.1 法線投票法と従来法の各固相体積率条件での抽出可能率の遷移

本研究で提案した法線投票法と従来法の各固相体積率条件での抽出可能率の遷移を調査するため、本番実験の二相流画像粒子を再現できる半径が13画素の二つの重なる粒子を用い、各手法の計測限界のシミュレーション実験および各手法の各固相体

(a) Extraction result of two circles with centre distance of one pixel (b) Extraction result of two circles with centre distance of two pixels

Fig.8 Extraction result using local maximum detection.

積率における抽出可能率のシミュレーション実験を行った。まず、各手法で行ったとき何画素まで抽出できるかを調べるために、画像上での完全に重なる2つの模擬粒子の中心点を1ピクセルずつ離れさせ、見掛け上2個の粒子が存在すると判断できるまでの画素数を求めた。これを手作業時の目視計測限界とした。また、前に検討したように界面曲率法の計測限界は重なる二粒子の界面曲率が極小値を得られなくなる最小中心距離である。Fig. 9 は各手法の計測限界シミュレーション実験の例を示す。本実験では、観測し易くするため、白い背景に半径が13画素（実験画像上粒子の半径画素数）の黒い粒子を使いシミュレーションデータを得た。手作業計測限界の個人差があるため、本実験では10人に対し実

Fig.9 Limitation of each extracting technique.

験した結果より、目の区別できる限界の平均値は2.3画素であることからこれを目視計測限界とした。また、Fig. 9により、本実験条件における2つの粒子の投影の中間くびれが検出できるまでの計測限界は5画素であることが分った。一方、前述より法線投票法に極大値検出手法を加えた抽出手法では、計測限界は1画素と明らかになった。

各固相体積率における抽出可能率の遷移シミュレーション実験は、各固相体積率（粒子密度で調節する）条件で粒子中心の三次元座標を管壁領域内ランダムに発生させ、パラメータとする計測限界より近い粒子は理論的に判定不能とする、その割合を固相体積率と検出限界ごとに求めグラフ化する。ここで、真実の固液二相流を模擬するため、ランダムに発生する粒子の座標値 (x_n, y_n, z_n) は式(5)及び式(6)の制限を満たすものとする。

$$\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} \geq 2r \quad (5)$$

$$\sqrt{(x_n - X_o)^2 + (y_n - Y_o)^2} \leq R - r \quad (6)$$

式中、 (x_i, y_i, z_i) はすでに発生した粒子の三次元座標値、 r と R はそれぞれ粒子とテスト管の半径、

(X_o, Y_o) は管断面における管中心座標である。この制限条件における対象を発生するプログラムを作成した。各固相体積率条件で1000枚の管内に分散する均一系粒子模擬画像を生成させた結果に対する各方法の分離抽出率を平均固相体積率の関数としてFig. 10に示している。図より、本手法(図中の

Fig.10 Transition of extraction rate of each technique.

○)では、管内平均固相体積率が0.3までに法線投票法が98.7%以上の抽出率を達成、目視よりも正確に粒子を抽出していることがわかる。また、粒子の体積率を増やすにつれて粒子の重なりが多く発生することにより、各手法による抽出率が減ることが確認された。粒子の体積率が高い条件では界面曲率法や手作業の検出率がより著しく低減するため、計測した固相体積率を誤評価する可能性が高いと考えられる。また、重なり頻度が増加するため手作業や変曲点検出法の解析難度が高くなる傾向があるものと判断される。

3.2 法線投票法計測精度の検証

投票を用いた画像処理技術の精度を検証するため、追加の固液二相流模擬実験を行った。2つの模擬粒子（粒子径2.381mm、管内径9mm）を用い、位置を固定した粒子1と横方向に250μmずつ移動させる粒子2を撮影し、画像処理により計測した粒子の移動距離と実際粒子の移動距離との比較を定量的に分析することにより、投票法の解析精度を検討する。この実験では、粒子を針金で固定して管内に挿入しているため、トラバースで細かい位置設定が可能である。また、本番の実験条件を模擬するため、管内は水で満たされ、および手作業で針金の投影を

Fig.11 Extraction result of normal-line voting method in the accuracy evaluation experiment.

削除した。精度検証実験に及ぼす固体粒子の抽出結果を Fig. 11 に示す。生画像とそれに検出結果を重ねたものを上下に示している。そこで、投票法の計測精度を詳細に評価するため、粒子 1 と粒子 2 の投票法により解析した円心距離と設定した距離の X 軸方向投影との比較を行った。精度評価の結果を Fig. 12 に示す。グラフの横軸と縦軸はそれぞれトラバースの調節より粒子の設定無次元半径方向位置 r/R と縦軸は投票法により計測した無次元半径方向位置 r/R である。ここで、図中の座標原点においてのみ大きい誤差が発生することが確認される。極大値検出手法の測定限界である 1 画素のみ重なる粒子の測定には誤差が生じるためと考えられる。また、管中心を離れるにつれ管壁付近の誤差が徐々に増加する傾向が確認できる。原因の一つは、管壁面の屈折により計測した粒子の位置が管軸方向に片寄るためと考えられる。また、粒子を針金で固定し管内に動かせるため、トラバースで細かい位置設定が可能であっても、僅かな位置誤差が生じると考えられた。一方、画像処理では画素単位で移動距離を算出するため、量子化誤差も可能な原因と認められる。また、賞雅らはステレオ画像処理法の空間誤差に関する詳細な評価、例えば、ビデオ走査線による画像量子化誤差、レンズ収差・視差による誤差及びシャッタ速度による誤差などの影響を文献[2]に詳述している。なお、本実験の結果は、実際の位置と測定した位置両者の標準偏差は約 0.014 で、本研究に提案した投票法では固体粒子を精度良く検出できること

Fig.12 Accuracy evaluation result of normal-line voting method.

が確認できた。

4. 球形粒子固液二相流の画像解析

4.1 ステレオ画像処理法による固液二相流の撮影

本研究は、実用性および信頼性の高い気泡流の界面計測技術の開発を最終目的とし、気液二相流との比較に及ぼす低密度差の固 - 液系分散流を対象とした実験を行った。本実験における流動パラメータの計測には、短時間で管軸方向および管断面方向の 3 次元界面情報を収集できるステレオ画像処理法 (SIM) を用いている[2]。ステレオ画像処理法は、2 台の面発光ライトおよび 4 枚の表面反射鏡を用いて、垂直 2 方向からの管内流動画像を同時に入手し、それぞれの画像中の界面情報から分散相の管断面位置を再構築することで、分散相体積、界面積などの詳細な局所界面構造を得る測定方法である。Fig. 13 にステレオ画像処理法の装置構造を示す。

テスト管は内径 9 mm のアクリル樹脂製で、ビデオ撮影部は光の屈折をさけるため矩形アクリルで覆われる。通常重力及び微小重力条件で固液二相流画像を軸方向の 4 箇所に設置されたデジタルビデオカメラおよび高速度カメラによってそれぞれ撮影した。計測した画像範囲は 9×21.15 mm であり、画像処理枚数は、1 条件につき 28 枚である。固液二相流実験で取得したデジタルビデオ画像データの代表例を Fig. 14 に示す。本研究で使われる固体粒子は半径が一定の球形であるため、撮影された 720×480 解像度のステレオ画像上で直径が 2.381mm の固体粒子の投影はほぼ同じ形の半径が 13 画素の円でテ

Fig.13 Stereo image taking equipment.

スト管内に分布する。

4.2 実験結果

法線投票法を固一液二相流ステレオ画像に応用した固体粒子の計測結果の一例を Fig. 15 に示す。ここで、ステレオ画像中左右に存在する粒子の軸方向の座標値による同定を行い、同定の結果に及ぼすステレオ画像中同じ番号を付ける粒子の位置情報から、三次元空間座標値を計算する。また、三次元空間座標値情報を用いることにより管断面での粒子分布を構築し、その一例を Fig. 16 に示す。Fig. 15 の二相流画像の左と右の投影は、それぞれ Fig. 16 の下と左方向から撮影したものである。

本手法で測定した粒子の三次元座標情報を用い固液二相流における三次元粒子分布を再構築したものの一例を Fig. 17 に示す。二相流における固体粒

子の空間位置を直観的に観察することや管断面固相体積率に及ぼす影響を具体的に分析することに役に立つモデルの構築に重要な役割を果たすと思われる。

なお、本研究で提案した手法を固液二相流画像上約 800 個の模擬粒子の抽出に応用し、782 個の粒子が正確に抽出された(97.75%)。

5. 結論

固体粒子流において重畳する固体粒子に対する界面分布及び速度解析を可能にするため、ステレオ画像処理法を加え、投票法を発展させ、また法線投票法による効率向上及び極大値検出手法の工夫で

Fig.14 An example image of two phase flow using a stereo image taking equipment.

Fig.16 One example of particle distribution reconstruction.

Fig.15 One example of processing result using normal-line voting method.

Fig.17 3D reconstruction result.

投票精度を向上した上、法線投票法に基づく分散粒子分離計測手法を構築した。また本手法と従来法の計測能力を定量的に比較するため、各手法の抽出可能率の模擬実験を行い、平均固相体積率の増加につれて本手法の計測可能率は他手法より実用性や有効性が高いことを確認した。

一方、本手法の計測精度を検証するため、追加の固液二相流模擬実験を行った。その結果は、測定した位置と実際値両者の標準偏差は小さく、固体粒子を精度良く検出できることが確認できた。

また、実例として、本手法を用いて通常重力における固液二相流ステレオ画像中の粒子を測定し、分散粒子の三次元空間の構築及び管断面固相体積率の平均遷移を検討した。複数の重複した粒子が存在する撮影画像から個々の粒子を分離し、複雑な二相流状態で高速度かつ精度よく固一液二相流流動における固体粒子の中心位置を解析、また粒子の3次元分布を評価できていることが明らかになった。

以上、本研究で提出した法線投票法は分散混相流の界面計測では非常に重要なツールであることを示した。現手法には、テスト管の屈折率や画像素子数による量子化誤差などの原因による解析精度の低下、また雑音に及ぼす影響の評価などいくつかの問題が残される。今後の研究によりこれらの問題を解決する予定である。

本研究では球体固体粒子のみを対象としているが、分散粒子を真円に近似できるような混相流流動条件(たとえば微小重力条件下や細管内の気泡流気泡)には、本研究で提案された法線投票法を応用できると考えられる。また本研究をより広い分散粒子流に適応させるためには、楕円体を対象にしたアルゴリズム(粒子や気泡の形状を偏平楕円体で近似す

る)を開発することが次の課題になるだろう。

参考文献

- [1] Ishii, M., Hibiki, T., Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow, Springer (2005).
- [2] Takamasa, T., Miyoshi, N., Measurements of Bubble Interface Configurations in Vertical Bubbly Flow using Image-Processing Method, Transaction of JSME, Vol.59, No.564, 63-69(1993)(in Japanese).
- [3] Takamasa, T., Kondo, K., Measurement of Interfacial Configurations on Bubbly Flow in 180° -Bent Tube using Image-Processing Method, Transaction of JSME, Vol.61, No.587, 16-22(1995)(in Japanese).
- [4] Takamasa, T., Kondo, K., Kawase, M., Measurement of Interfacial Configuration of Bubbly Flow under Normal and Microgravity Conditions using Stereo Image-Processing Method, Transaction of JSME, Vol.63, No.606, 40-47(1997)(in Japanese).
- [5] Yu, X., Abe, K., Hazuku, T., Takamasa, T., Oshima, M., Measurement of Inverted Churn Gas-Liquid Two-Phase Flow using Optical Flow Method and Dynamic Matching Method, Journal of The Visualization Society of Japan, Vol.26, No.1, 305-306(2006).
- [6] Fujitsuka, T., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Study of Bubble Motion in Gas-Liquid Bubbly Flow in Vertical Pipes, Proceedings of Japanese Society for Multiphase Flow, D110, 155-156(2004).
- [7] Duda, R., Hart, P., Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures, Communications of the Association for Computing Machinery, Vol. 15, No.1, 11-15(1972).
- [8] O'Gorman, F., Clowes, M.B., Finding Picture Edges Through Collinearity of Feature Points, IEEE Trans. Computers Vol. 25, No. 4, 449-456(1976).
- [9] Kimme, C., Ballard, D., Sklansky, J., Finding Circles by an Array of Accumulators, Communications of the Association for Computing Machinery, Vol.18, No. 2, 120-122(1975).