D 2 1 4

法線ハフ変換法を用いた固液二相流の相界面構造の計測

于笑然[○], 菊池貴好(海洋大院), 大島正毅, 波津久達也, 賞雅寛而(海洋大)

Measurement of Solid-liquid Two-phase Flow Interface Structures using a Normal-line Hough Transform Method

Xiaoran YU, Takayoshi KIKUCHI,
Masaki OSHIMA, Tatsuya HAZUKU, Tomoji TAKAMASA

ABSTRACT

A precise and efficient measurement method on overlapped particles in solid-liquid two-phase flow using an image process method is urgently needed. In our research, we propose a stereo image method compounded with a new Hough voting method, in which, we combine a normal-line gradient algorithm with the voting method for the separating and position fixing of particles. After evaluating the measurement precision using a simulation experiment, we present a Monte Carlo method to compare the particle extraction probability of our method with that of past ones, our method is proved to be an efficient and available one than other methods.

Keywords: Solid-liquid two-phase flow, Spherical solid particle, Overlap, Stereo image method, Voting method, Gradient

1. 結 論

近年、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⁾。そこで、各流動様式における混相流相界面の時空間情報が必要である。高速度ビデオカメラや静止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、または高時空間分解能を持ち、界面情報を短時間に得ることができるなどの利点があるため、コンピュータ技術の発達とともに重要な界面計測手法となっている。

しかしながら、固体粒子球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多くなると、重なりのため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。ま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原因により粒子画像の輪郭線濃度に偏分布が生じ、二値化された粒子画像の輪郭線が部分欠落する現象がある。従って、重なっている粒子の輪郭線情報から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、混相流の画像解析において、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ますます重要な課題となっている。

本研究では円対象に対し途切れや隠れがあっても検出できる有用な手法として法線ハフ変換法を提案し、固液二相流中の分散粒子の界面情報の計測を試みた。また、法線法における検出結果とトラバース実際の移動距離との比較を行い、提案した方法の精度を詳細に評価した。さらに、モンテカルロ法によって管内に分散する均一系粒子に対する本手法と従来法の分離抽出率を平均ボイド

率の関数として、粒子の重なりでの計測限界についてシミュレーションを行い、提案した手法の有効性が明らかにした。

2. 法線ハフ法を用いる界面計測技術の開発

本研究では、球形粒子流が対象のため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ハフ変換法^{2,3)}による円抽出のアルゴリズムを用い、さらに法線グラディエント法を複合させる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 s 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 $\{x_a, y_a\}$

Fig. 1 Circle extraction using Hough method.

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に半径 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も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ハフ投票法に加える。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

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{f_y(x, y)}{f_x(x, y)} \right) \quad (2)$$

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。その後、円上の各点における法線方向に円の中心がある特性を利用し、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。

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ハフ変換投票法と法線ハフ変換投票法を行い、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。

3. 法線ハフ変換法計測精度の検証

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 250 μm 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。精度検証実験に及ぼす固体粒子の抽出結果を Fig. 2 に示す。精度評価の結果を Fig. 3 に示す。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、本研究に提案した手法では固体粒子を精度良く検出できることが確認できた。

Fig. 2 Extraction result of normal-line Hough method in the accuracy evaluation experiment.

Fig. 3 Accuracy evaluation result of normal-line Hough method.

4. 法線ハフ変換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、輪郭線の変曲点検出から分散粒子の分離を行う方法（藤垣ら⁴⁾）及び目視による方法を用いた、粒子の重なりで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検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. 5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. 5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は式3及び式4の制限を満たすものとする。

$$\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} \geq 2r \quad (3)$$

$$\sqrt{(x_n - X_o)^2 + (y_n - Y_o)^2} \leq R - r \quad (4)$$

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手法の分離抽出率を平均固相体積率の関数としてFig. 6に示している。図より、本手法（図中の○）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

(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. 4 Extraction result of two superposing circles.

Fig. 5 Limitation of each extracting technique.

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。

Fig. 6 Transition of extraction rate of each technique.

5. 実験結果

次に、実用性および信頼性を検証するため、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、賞雅らが提案した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^{5,6)}。

法線投票法を固-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. 7およびFig. 8に示す。Fig. 7には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. 8に示す。

6. 結論

本研究は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、ハフ変換法を発展させ、法線検出による効率向上の工夫で法線ハフ変換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。

一方、モンテカルロ法によって管内に分散する均一系粒子に対する各方法の分離抽出率を、平均ボイド率の関数としてシミュレーション実験を行い、提案した手法は重なる粒子の計測に、その有効性が明らかになった。

Fig. 7 One example of processing result using normal-line Hough method.

Fig. 8 One example of particle distribution reconstruction.

さらに、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を行った。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-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。

参考文献

- 1) Ishii, M. and Hibiki, T.: Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow, Springer (2005).
- 2) 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(1972) pp. 11-15.
- 3) Yu, X., Abe, K., Hirose, Y., Hazuku, T., Takamasa, T., Oshima, M.: Measurement of Solid-liquid Two-phase Flow Using a New Robust Normal-line Hough Transform Method, Proc. 5th ISMTMF, Vol. 1(2006) pp. 335-340.
- 4) 藤埴, 細川, 富山: 鉛直円管内気液二相気泡乱流における気泡運動に関する研究, 混相流学会講演集, D110(2004) pp. 155-156.
- 5) 賞雅・近藤・川瀬, ステレオ画像解析法による微小重力/通常重力下の気泡流界面測定, 機論, Vol. 63, No. 606, B (1997) pp. 40-47.
- 6) 賞雅, 三好: 画像処理法による上昇気泡流の管内気泡径分布測定, 日本機械学会論文集, Vol. 59, No. 564, B(1993) pp. 63-69.