

氏名	SAPKOTA ACHYUT (さぷこた あちゅた)
本籍地	ネパール連邦民主共和国
学位	博士 (工学)
学位記番号	工博第12号
報告番号	甲第26号
学位授与年月日	平成21年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻名	工学研究科生産システム工学専攻博士後期課程
学位論文題目	Intelligent Matching Algorithms for Particle Tracking Velocimetry
論文審査委員	主査 教授 能勢 和夫 教授 藤井 信夫 教授 陳 洛南

論文内容の要旨

流れの可視化は実験力学の分野では欠かせないツールとなりつつある。静圧ピトー管と熱線流速計は流れ場測定のための古くからの方法として知られている。しかし、これらの手法は流れにプローブを挿入することで流れを乱す危険性を持つ。その後のレーザー技術の発明により、レーザードップラー流速計と呼ばれる新しい測定手法が開発され、この手法のレーザープローブは流れを乱すことなく速度測定を可能にしている。しかしこの方法においても、得られる測定結果はビームの交差点における単一点の速度情報でしかない。

これらの手法に対して、粒子画像流速測定法 (PIV) は、画像情報に基づく流れ場の測定方法であり、流体計測のための信頼すべき新技術として広く受け入れられている。この測定法では、パルスレーザーによるシート光がトレーサ粒子を散布した流れ場の照明に用いられ、パルス光の瞬間毎に粒子の位置をデジタルCCDカメラで記録する。カメラの撮影画像は流れ場の移動ベクトルマップを得るために解析される。このようにして得られた移動量を画像撮影の時間間隔で除算することにより、速度場の情報が得られる。そして今必要であるのは、このような速度ベクトルマップを得るための強力で信頼性の高いPIV画像解析アルゴリズムである。したがって本研究では、PIVのための信頼性と効率性に富んだアルゴリズムを、既存の様々な方法論を精査しながら新たに開発することを目標としている。

本論文は5つの章に分かれている。

第1章： 序論

本章はPIVについての一般的な解説、および流れ計測におけるPIVの意義について述べる。基本的にPIVと呼ばれる計測手法には、統計的な信号処理法（相互相関法）をベースとする狭義のPIV法と、個々の粒子追跡を行うPTV法がある。PTV法が狭義のPIV法に優る利点は2つある。最初の利点は、PTV法では粒子の追従性が保証される限りにおいて、流れ速度の局所値を得ることができることである。これに対して狭義のPIV法では、一定領域内にある全粒子の平均的な速度が計算される。また第2の利点は、PTVの測定技術はステレオ立体視計測法と組み合わせることにより、3次元流速測定法へ拡張することが容易であることである。そのためこの研究では、PTVのアルゴリズムに関連する新手法に焦点をあてて研究を行う。

第2章： 2次元PTV

2次元PTVのための新しいアルゴリズムが提案されている。既存の2次元PTVアルゴリズムのほとんどは、流速の最大値や最小値のような流れの先験的な知識の入力を必要とします。このような先験的知識を必要としないアルゴリズムも幾つか存在するが、そのほとんどは非常に長い計算時間がかかるか、または粒子数の増加とともに急速に正確さを失うアルゴリズムである。本研究では、この問題を組み合わせ最適化問題としてモデル化しており、物理的な制約条件の形で表現した目的関数が定義されている。このアルゴリズムは、他の多くのアルゴリズムのように流れの先験的知識を必要としないし、低密度から高密度の粒子画像まで様々な粒子分布条件で精度が保たれる。また計算時間も他のアルゴリズムに比して大幅に改善されている。

第3章： 3次元PTV

3次元PTVシステムでは、粒子の3次元的な時間移動の解析を行うのに先立って、2台の（あるいは3台以上の）カメラで撮影されたすべての時刻のステレオ画像中で、個々の粒子同士を正しく対応付けねばならない。このプロセスは、個々の粒子の3次元座標を正確に計算するために必要不可欠のものである。このステレオ画像での粒子対応付けを行う際に、従来の方法では通常、他カメラによる粒子の投影視線（エピポラー線）との最近傍判定法が適用されるが、この方法で実用的な対応付けの精度を得るためには、しばしば3台以上のカメラの使用が必要となる。カメラの追加は、より制御効率の高い高価なハードウェアとソフトウェアを必要とし、システム要件の面で粒子対応付けのプロセスもさらに複雑になる。より単純な2台カメラの方式により正確な粒子対応付け結果を得られるの

であれば、それば3次元PTVにとってシステム簡略化のための最善の解決策となる。

この章では粒子対応付けの方法として、粒子のエピポーラ線幾何学と粒子対応の一意性に基づく計算モデルを提案する。このアルゴリズムは粒子対応付けの精度向上とアルゴリズム自身の簡素性を目標としており、またステレオ立体画像撮影時の様々な光学的配置や、様々な粒子密度による撮影画像にも対応し得るような適応度の広さを目指している。

第4章： データの誤り検出

速度ベクトルを取得するためのPTVデータ処理技術のいかなる手法も、過誤データの発生とは無縁でない。このような過誤データは速度場の定量情報の質を低下させ、流れ速度から派生的に計算される渦度、流れ関数、発散のような物理量を誤って評価することになる。ここで提案する過誤データの検出法では、粒子対応付けの一次結果をファジィ論理プロセッサへ入力値として処理する。ルール型のファジィ論理プロセッサでは、近い距離で隣接する速度ベクトルの対ごとに、適切なメンバーシップ関数を与える。これらの速度ベクトルは、粒子移動の局所的整合性から考えられる複数の拘束条件に照らして、その有効・無効が判定される。この判定アルゴリズムを様々な種類の流れに適用し、その結果として今回のファジィ論理プロセッサは正しい速度データを最後まで保持しながら、過誤の速度データを適切に除去する手法として非常に有効であることを確かめる。

第5章： 結論

最後に本章で研究全体を通しての結論を述べる。上記のような議論に基づく計算手法を改めて提案し、それが精度および信頼性において優れており、しかも従来のアルゴリズムと比較して計算負荷が小さい手法であることを明らかにする。

論文審査結果の要旨

本論文はPTV（粒子追跡流速測定法）のための知的対応付けアルゴリズムについての研究をまとめたものであり、得られた結果は次の通りである。

1. 代表的な相互結合型ニューラルネットワークであるHopfield Networkの原理に基づきながら、その欠点を巧みに修正したCellular Networkによる粒子対応付けの新たなアルゴリズムを開発した。
2. その新アルゴリズムを2次元PTVにおける時間差2画面間の粒子対応付けに適用し、

従来の対応付け手法と同等、あるいはそれ以上の流速測定精度と計算処理時間の短縮を実現した。

3. さらにPTVとは原理の異なる画像計測法である相互相関PIV（粒子画像流速測定法）の手法をアルゴリズムの一部に取り入れ、相互相関PIVで得られる粒子の集合的な速度を近似予測値として活用することによって、PTVの対応付けで得られる粒子速度の測定結果に対する信頼度を高めた。
4. 一方、3次元のPTVに関しても、時間差画面間の対応付けに先立って必要となる立体視2画面間の粒子対応付けに、開発した新アルゴリズムを効果的に活用して、簡便で実用性の高い3次元PTVのシステムを構築した。
5. 画像計測法であるPIVやPTVの手法で避けられない誤り対応付けによる過誤の速度結果の発生に対して、ファジィ論理を応用したValidationの手法を新たに考案した。
6. そしてValidationの結果に基づいて、過誤の速度結果を自動的に削除または修正することにより、Cellular NetworkによるPTVの流速測定値の信頼度をさらに高めた。

以上のように本研究の成果は計算機科学の学術上でも、また画像計測法の実用上でも寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

