

PTV と数値計算を併用した流れ解析手法の開発

学位論文内容の要旨

近年、ピトー管、熱線流速計、レーザードップラー流速計に次ぐ新たな流速計として、画像処理流速計(Particle Image Velocimetry, PIV)が注目されている。PIVは、計測対象となる流れの中に目印となる微小なトレーサ粒子を投入し、その可視化画像を解析することで流速分布を得ようとする流速計である。従来からの流れの可視化技術に加え、CCDカメラやパーソナルコンピュータなどの電子技術、ハード的あるいはソフト的な画像解析技術、トレーサ粒子の追跡アルゴリズム、など最新の技術と手法を融合することにより発展してきている。PIVに関する研究は、1980年代初頭にComputer Aided Flow Visualizationという内容で始まっており、海外ではIllinois大学のR. J. Adrian教授らが、国内では東京大学の小林教授らが手法の開発や可能性の検討を行ったのが最初とされている。それ以降、撮影手法や追跡アルゴリズムに関するさまざまな研究が行われ、種々のPIVシステムが構築されてきた。取得流速ベクトルに対する信頼性が向上し、現在では市販されているPIVシステムも存在することから、実用的計測器として広く用いられつつある。

PIVが持つ従来からの流速計にはない最大の特徴は、多点同時計測が可能であるという点である。理想的には3次元空間に広がる無数の点で、3次元流速ベクトルが同時に取得可能である。また、PIVはピトー管や熱線を必要としない非接触の計測手法であり、理想的には流れを乱すことがなく、本来の流速ベクトルの取得が可能である。PIVが注目されている理由は、上記の特徴が示すように、ある瞬間における流れ場の構造や空間相関を知ることができる唯一の実用的手法であるからである。例えば、乱流場に対してはTaylorの凍結乱流の仮説を用いることなく流れ場の3次元構造を解析することが可能となる。ただし実際には、信頼性の高い情報を得るために解決すべきさまざまな問題点が、現在もなお多数残されている。

PIV手法に関する従来の研究においては、高精度で高効率なトレーサ粒子の対応付けアルゴリズムの開発に主眼が置かれていた。これは、トレーサ粒子の対応付け結果の信頼性が流速ベクトルの正確さと精度を左右する要因であると同時に、この処理がコンピュータによる処理時間の大部分を占めていたためである。現在までに種々のPIVアルゴリズムが提案された結果、計測対象となる流れ場に対する個々の手法の適・不適はあるものの、取得流速ベクトルに対する信頼性は全体的に向上してきている。

しかし、PIVは他の流速計に比べ計測値の信頼性に若干欠けているとされる。これは、PIVには特有の計測誤差を発生させる要因がハード的に含まれているからである。その一つが、トレーサ粒子の流れへの追従性の問題である。トレーサ粒子の持つ慣性力が影響し追従性が問題となる場合には、通常のPIVが行っているように、計測値であるトレーサ粒子速度を流体粒子速度そのものとしてみなすことができなくなる。これは突発的過誤ベクトル

を除去するように、周辺の数値ベクトルから類推して一部分だけを削除することで解決できる問題ではなく、何らかの方法で速度ベクトルの補正を行う必要のある問題である。

次に、取得した速度場が流れの支配方程式を必ずしも満足していないという問題である。この問題の主な原因は、粒子追跡アルゴリズムにある。ほとんどのPIV手法が、輝度値の相互相関値のピーク値を基準として速度ベクトルを算出するなど、何らかの形で可視化画像に対する拘束条件を用いている。つまり、流体そのものに対する拘束条件であるNS方程式や連続の式を用いていない。よってこの問題を解決するためには、粒子追跡アルゴリズムに流れの支配方程式を組み込むか、物理的条件を満足するように何らかの手法で得られた速度場を修正する必要がある。

本研究は上記の二点の問題を解決することを主な目的としている。

第一のトレーサ粒子の追従性に関する問題に対しては、流体と粒子との力学的関係式をアルゴリズムに取り入れ、トレーサ粒子速度から流速を推定する手法を開発した。この手法では、非線型確率システムに対する状態変数の準最適推定手法である拡張カルマンフィルタを採用している。

第二の速度場の修正に関する問題に対しては、計測手法であるPIVと計算手法であるCFDを組み合わせたハイブリッド手法を開発した。この手法では、CFD手法として移動最小二乗法を用いたグリッドレススキームを採用し、HSMAC法による収束計算を行なう。

本論分は第1章から第6章まで全6章で構成されている。各章の概要について以下に記す。

第1章は本論分の序論であり、PIV手法の開発に関する従来から研究を紹介し、本研究の動機と目的について述べる。

第2章では、カルマンフィルタ型PTV手法とその他代表的なPIV手法について述べる。

第3章では、トレーサ粒子の追従性の影響を補正する手法として開発した、拡張カルマンフィルタを用いた速度ベクトルの推定手法について述べる。また、適用例として密度変化のある流れ場に対する数値シミュレーション結果について示す。追従性の問題を調べた研究は多々あるが、その影響を補正する手法を提案している研究は、筆者らの研究以外には国内外を問わず皆無と思われる。

第4章では、速度場の修正手法として開発した移動最小二乗法を用いたCFD-PTVハイブリッド手法について述べる。ハイブリッド手法に関する研究は、海外では皆無に近い研究であるが、国内では他にも行われている。ハイブリッド手法の可能性と目的を示し、本手法以外の手法についても紹介する。

第5章では、開発したハイブリッド手法の実際の流れ場に対する適用例を示す。対象とした流れ場は、PIV標準化・実用化委員会が企画した“標準実験”流れ、自由表面の自励振動が生じている矩形容器内二次元非定常流れ、一方が回転し一方が静止している二平行円盤間内の三次元定常流れである。

第6章は本論分の結論であり、本研究で得られた主要な結果についてまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 飯 田 誠 一
副 査 教 授 井 上 良 紀
副 査 教 授 木 谷 勝
副 査 助 教 授 小 河 原 加 久 治

学位論文題名

PTV と数値計算を併用した流れ解析手法の開発

画像処理流速計(PIV)は、流れの瞬時3次元構造を把握することが可能な新たな計測器として注目されてきている。PIVの計測原理は流れに投入したトレーサ粒子の軌跡から画像解析により速度ベクトルを計測するというものであり、トレーサ粒子像の対応付け手法に関する研究が数多く行われてきた。にもかかわらずPIVは他の流速計に比べ計測値の信頼性に若干欠けているとされ、解決すべきさまざまな問題点が多数残されている。

本論文では、トレーサ粒子の流れに対する不追従から生じる問題と、得られた流れ場が必ずしも流れの支配方程式を満足するわけではないという問題に着目し、これらの計測誤差を補正するための二つの手法を新たに提案することで、上記問題の解決を図っている。

その結果、本論文では以下のような結論を得ている。

- (1) トレーサ粒子の不追従から生じる計測誤差を補正する拡張カルマンフィルタ型PTV手法を開発した。
 - ・この手法では、非線型確率システムに対する状態変数の準最適推定手法である拡張カルマンフィルタを採用し、流体と粒子との力学的関係式を状態方程式に取り入れた。
 - ・この手法は、誤差を含んだ観測値から流速を推定するPIVの後処理手法である。
 - ・トレーサ粒子の不追従が顕著な斜め衝撃波を伴う流れ場(数値シミュレーション)に対し手法を適用し、このような場合でも流れ場の再構築が可能であることを示した。
- (2) 流れの支配方程式を満足するようにPIVで得られた速度場を修正するPTV-CFDハイブリッド手法を開発した。
 - ・計測手法と計算手法を組み合わせるハイブリッド化の意義と可能性を示した。
 - ・この手法では、情報の再配置を行なうために移動最小二乗法を用いたグリッドレススキームを採用し、流速修正を行なうためにHSMAC法を用いた収束計算を採用した。
 - ・この手法は、計測値の反映された数値解析結果を取得することを可能とした新しい流れ解析手法である。
 - ・矩形容器内二次元定常流れ、自由表面の自励振動を伴う矩形容器内二次元非定常流れ、一方が回転運動する平行二円板間内の三次元準定常流れ、の三種類の流れに手法を適用し、速度場と圧力場の推定を行うことで手法の有用性を示した。

以上のように、本論文では、計測値を数値計算を用いて補正するシリーズ的手法だけでなく、測定実験と数値実験とを併用した新たなパラレル的流れ解析手法を提案し、種々の流れ場に手法を適用することで、そのハイブリッド手法の意義や可能性について検討している。このことは流体力学のみならず他の学問分野においても寄与するところが大きい。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。