

学位論文題名

カルマンフィルタ型三次元 PIV の開発と応用

学位論文内容の要旨

近年、工学で取り扱う流れは急速に複雑化の度合いを強め、それとともに流れの把握に必要な情報量も大幅に増加しつつある。特に、三次元的な流れの構造やその時間的推移に関する情報は重要性が高く、現在このような情報を精度良く抽出できる計測手法として三次元 PIV (Three-Dimensional Particle-Imaging Velocimetry) が注目されている。三次元 PIV は、トレーサ懸濁法による流れの可視化、デジタル画像処理、多視点ステレオ計測を組み合わせた新しい計測手法であり、次のような際だった計測上の利点を持っている：(1) 三次元速度ベクトルの瞬時広域計測が可能、(2) 非接触型の計測法であるため流れに攪乱を与えない、(3) 個々のトレーサ粒子のラグランジュ的な履歴が得られる、(4) 座標の校正は必要であるが、速度の校正を必要としない。

これらの三次元 PIV の特徴は、従来の流れ計測法では不可能あるいは困難であった様々な流れ解析を可能にするものである。しかし、三次元 PIV は計測手法としてまだ完全に確立されているわけではなく、解決が急がれる深刻な問題も少なくない。中でも次の問題は重要である：(1) 速度計測の精度がトレーサ粒子座標の計測誤差（カメラの配置に強く依存する）に大きく影響されること、(2) 空間粒子密度を高めると多数のゴースト（ステレオ計測の誤りで発生する架空の粒子）が現れるため、空間解像度の向上が困難であること、(3) ダイナミックレンジが狭い、すなわち測定空間に大きな速度勾配があると粒子追跡の誤りが増加すること、(4) 局所的に急激な流れ方向の変化や加減速がある場合、粒子追跡の誤りが頻繁に発生すること。以上のような問題は、三次元 PIV の適用範囲を大幅に制限するものである。したがって、三次元 PIV を計測手法として確立し、これを様々な流れ解析に応用するためには、これらの問題点の解決が必須の課題となる。

本研究では、これらの問題に対する具体的な解決の指針を与えることを第一の目的として、カルマンフィルタを応用した独特の速度計測・粒子追跡アルゴリズムを持つカルマンフィルタ型三次元 PIV の開発を行った。本方法の特徴は次の通りである：[1] カルマンフィルタによる状態推定法に基づき、ノイズを含む粒子座標などの測定値から粒子の座標、速度、加速度が推定される、[2] カルマンフィルタの時間更新・観測更新アルゴリズムを利用した予測型の粒子追跡を行う、[3] 粒子座標以外の情報を状態推定と粒子追跡に反映することができ、これにより計測精度と追跡性能がさらに向上する。

以上のようなカルマンフィルタ型三次元 PIV の特徴を利用することによって、上述した四つの問題点を大幅に改善できることを、数値シミュレーションに基づく定量的な性能評価を行って確認した。以下に得られた主要な成果をそれぞれの特徴ごとに列挙する：[1] ノイズの影響が無視できない状況においても高精度の速度計測が可能である。[2] ノイズの影響が小さい高精度の予測が行えるため、従来の予測型粒子追跡手法に比べて高い性能が得られる。また、粒子追跡に考慮する時刻数を増すことで追跡精度がさらに向上し、ゴ

ースト除去率も高められる。[3]空間的な速度の変化や局所的に作用する加速度に関する情報を考慮した粒子追跡が可能である。つまり、空間的な速度差の大きい流れや局所的に方向・速度が急変する流れに対しても高い追跡性能を維持できる。

さらに本研究では、カルマンフィルタ型三次元PIVの有効性を実際の流れ計測を通して検証することを第二の目的として、三視点ステレオ計測を行う計測システムを構築し、二次元円柱後流を対象とする三次元計測を行った。ただし、本研究においては円柱後流の速度場の計測にとどまらず、本方法が粒子追跡に基づく測定手法であることを利用して、ラグランジュ的な解析手法により円柱後流における粒子拡散の特徴を調べた。時空間的に大規模な速度変動をとまなう物体後流の拡散問題に対しては、長時間粒子追跡が困難なことから、このような三次元PIVによる解析が適用された例がない。本研究ではこの解析手法に基づいて、主流に垂直な方向への粒子の変位が、過去に通過した領域によってどのように異なるかを詳細に調べた。これにより得られた主要な知見を以下に示すが、特に[2]は本解析手法によって初めて明らかにされたものである：[1]後流内部の粒子は平均的に見ると後流中心軸に向かって平面的に移動する。[2]後流中心軸に近い領域を通過した粒子ほど変位量の分散が大きく、その円柱半径方向の変化はガウス曲線で近似できる。[3]後流内部における粒子変位量の分散が下流方向に直線的に増加する。

本論文は第1章から第7章までの全7章で構成されている。第1章では従来の三次元PIVの適用例を紹介するとともに、三次元PIV特有の利点と問題点、そして本研究の目的などについて述べている。

第2章では、カルマンフィルタの概要を述べ、これを三次元PIVの速度計測・粒子追跡アルゴリズム導入するための具体的な方法を示している。ここでは、粒子座標のみを用いて追跡を行う「座標観測型カルマンフィルタによる粒子追跡法」を開発し、従来型の粒子追跡法との性能比較を行って本方法の優位性を示した。

第3章では、「座標観測型カルマンフィルタによる粒子追跡法」のゴースト除去能力を調べている。そして、多時刻間で状態推定を行いながら最適な軌跡を探索することでゴースト除去率が向上し、高空間解像度の三次元計測が可能になることを示した。

第4章では、速度計測のダイナミックレンジ向上を目的として、粒子座標だけでなく速度情報も考慮できる「座標・速度観測型カルマンフィルタによる粒子追跡法」を開発した。ここでは画像上の粒子の軌跡から速度情報を抽出する場合について検討し、粒子速度の大きさ(方向は不要)を速度情報として与えればよいこと、本方法を用いることでダイナミックレンジの向上が可能であることを示した。

第5章では、「加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡法」の開発を行うとともに、局所的に大きな加速度が作用し、急激な流れ方向の変化や加減速が生じる場合においても本方法が高い追跡性能を維持できることを示した。本方法は二段階の粒子追跡プロセスから成っており、第一段階で空間的に変化する速度・加速度に関する統計量を求め、第二段階でこれらの情報を考慮した粒子追跡が行われる。

第6章では、カルマンフィルタ型三次元PIVを用いて円柱後流の速度場を測定し、既存の測定結果との比較を行って本方法の速度計測手法としての妥当性を示した。さらに、個々のトレーサ粒子を追跡するラグランジュ的な解析手法によって円柱後流における粒子拡散の特徴を調べ、カルマンフィルタ型三次元PIVの有効性を明らかにした。

第7章では結論として、本研究で得られた主要な結果についてまとめるとともに、本研究に関する今後の課題や展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 ・ 教 授 飯 田 誠 一
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎
副 査 教 授 木 谷 勝
副 査 助 教 授 小 河 原 加 久 治

学 位 論 文 題 名

カルマンフィルタ型三次元 PIV の開発と応用

三次元 PIV は、流れの三次元構造やその時間的な推移など、従来の計測手法では入手困難であった様々な情報を精度良く抽出できる計測手法として期待されている。現在、三次元 PIV の実用化にむけて、トレーサ座標計測誤差に対する速度計測精度の強い依存性、高空間解像度の三次元瞬時広域計測が困難であること、速度計測のダイナミックレンジの不足、局所的な速度ベクトルの急変がある流れに対する計測性能の低下などの深刻な問題を解決することが重要な課題になっている。

本論文で開発された「カルマンフィルタ型三次元 PIV」は、カルマンフィルタを応用した独特の粒子追跡・速度計測アルゴリズムを有することに最大の特徴がある。また、本方法の有効性は数値シミュレーションに基づく性能試験によって定量的に検討されており、以下のような結論を得ている。

(1)カルマンフィルタを用いた三つのタイプの粒子追跡法：「座標観測型」、「座標・速度観測型」、「加速度対応型」は、速度計測・粒子追跡がノイズに影響されにくく、高精度の三次元計測が可能である。

(2)カルマンフィルタ型三次元 PIV は、多時刻粒子追跡で考慮する時刻数を増すことにより高空間解像度化が可能である。

(3)トレーサ粒子の座標とともに速度情報を考慮できる「座標・速度観測型」の採用により、速度計測のダイナミックレンジが向上できる。

(4)局所的な速度ベクトルの急変がある流れに対しては、空間的な加速度の変化に対応できる「加速度対応型」の採用により、高水準の粒子追跡性能が維持できる。

さらに本論文では、円柱後流を対象とした速度場および拡散場の三次元計測を行って以下の結論を得ており、実験的にもカルマンフィルタ型三次元 PIV の有効性を明らかにしている。

(1)カルマンフィルタ型三次元 PIV による速度場の測定結果を既存の結果と比較することによって、本方法の速度計測手法としての妥当性を確認した。

(2)従来実現が困難であった粒子追跡に基づくラグランジュ的な解析手法によって、後流中心軸に近い領域を通過した粒子ほど変位量の分散が大きく、その円柱半径方向の変化はガウス曲線で近似できるなど、新たな知見を得ることに成功した。

以上のように、著者は、新たにカルマンフィルタ型三次元 PIV を開発し、三次元 PIV が直面していた大きな障害に対して具体的な解決の指針を提示している。さらに、実際の流れ計測を通じて実験的にも新手法の有効性を明らかにしている。このことは、流体計測のみならず流体工学の進歩に貢献するところ大である。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。