

動体の空間認識と3次元視のための高度画像処理系の構築

Development of an advanced image processing system for recognition of 3D object motion

主任研究員名： 近江 和生

分担研究員名： 平塚 彰

1. 研究背景と目的

現在の高度IT化社会において、画像情報処理の技術は理工学のような分野だけでなく、医学・薬学や社会学・心理学等の広範な分野で活用されている。言うまでもなく画像情報処理技術の主たる活用目的は、人間単独の眼では詳細を観察しにくい対象物のマクロやミクロな構造、あるいは人間の眼にとって通常不可視である生体内部等の構造を鮮明かつ的確に捉え、その構造を特徴付ける大きさや数量、形状、面積や体積、位置と傾き等の特徴量を人手に拠らず計測することにある。このような画像処理技術の実用例の多くは、その処理対象が2次元または3次元の静止した対象物であるが、近年の画像処理技術の高度化に伴い、3次元的に運動する対象物の構造や挙動を明らかにするための応用技術も次第に実用化しつつある。本研究では、このように3次元的な運動挙動を調べるための画像処理に関して、複数の方法論を新たに開発展開し、その各々の方法に適した実用例への適用結果の検証を通して、より実用的かつ統合的な高度画像処理系の構築を試みることを目的とする。

2. 平成26年度の研究成果

3年間継続が予定される本研究の平成26年度における研究では、2系統の3次元画像処理の新技术を駆使した流体现象解明のための新たな処理系の開発を試みる。このうち第1の処理系では、ライトフィールド画像処理を応用した小規模旋回流の3次元流速分布の解析を開発目的とし、第2の処理系ではトモグラフィ画像処理を応用した水竜巻流現象の時系列的な3次元視と挙動解析を開発目的としている。これらの3次元画像処理に共通する特徴を挙げれば、肉眼視や単純な撮影カメラによる記録では、観察方向の制限や前方の流体による遠方の遮蔽等によって複雑な流体運動の3次元的なメカニズムの解明に大きな困難を伴うのに対し、ライトフィールド画像処理やトモグラフィ画像処理では、撮影した画像結果を後処理的にあらゆる観察方向から再現し観察することによって、前述のような複雑な3次元メカニズムの解明が飛躍的に容易になるという特徴を挙げることができる。一方これらの手法における問題点を挙げれば、本来2次元な撮影画像データを1画素毎に解析し、さらにその結果を異なる観察方向からの撮影データにより積み上げて3次元画像の輝度場を再現するという解析方法であるため、その実現のために高度な画像処理の技法が必要になること、時間的にただ1シーンの3次元場の再現においてさえ多大

の計算処理時間が必要になること等が挙げられる。このような観点から、平成26年度はライトフィールド画像処理とトモグラフィ画像処理による3次元挙動解析の実用化に向けた、基本手法の展開に研究の主眼点をおいて実施した。

2.1 ライトフィールド画像処理を応用した小容器内旋回流の3次元視と挙動解析

ライトフィールド画像処理法を適用して、様々な3次元計測を行う手法が注目されている。流体画像計測の分野でも、近年、種々の方式のライトフィールドカメラを用いた3次元流速測定の見られるが、多くの報告例において粒子の奥行の決定方法は、ライトフィールド画像処理法に特有のリフォーカス機能を用いて個々の被写体の奥行を定量的に関連付ける方法、またはライトフィールドカメラの撮影画像から複数の視差画像を生成し、それらをトモグラフィ画像処理して得られる3次元光強度分布から被写体である粒子の奥行を求める方法が一般的である。これに対して本研究ではより直接的な奥行計測方法として、まずライトフィールドカメラの奥行校正を多項式関数による校正式を用いて実験的に行い、その校正結果に基づいて粒子の奥行を計測する方法を試みた。さらに時系列の画像データから粒子の3次元位置の時間的変化を調べ、そのことから3次元流速分布の時系列計測を試みた。

本年度の研究で使用するライトフィールドカメラは、Ren Ngのベンチャー企業で開発・販売された民生用廉価モデルのLytroである。このライトフィールドカメラは、通常のデジタルカメラ内部の主レンズとCCDセンサーに加えて、CCDの直前に 330×380 エレメントのマイクロレンズアレイが設置されている。下部のCCDセンサーの解像度は 3280×3280 であり、それゆえマイクロレンズの各エレメントは約 $9 \times 8 = 72$ 画素のCCD領域をカバーする。したがってCCDセンサーが記録する原画像のデータから抽出される視差画像は同じく72面、その解像度は 330×380 画素となり、この程度の解像度の視差画像からどの程度の精度でマイクロ粒子の画像計測が行えるかを調べるのが今年度の研究目的の一つであった。

この検証を実験的に行うため、ライトフィールドカメラの主レンズ面から約110～120mmの距離に縦横 $160 \times 150 \text{mm}^2$ 、カメラ光軸方向の厚さ10mmの小水槽を置き、その内部にシード粒子を混入した水を満たして微弱な攪拌流を発生させ、側面方向からレーザーシートで照明しながら粒子像の画像撮影を行った。そしてその記録画像から、個々の粒子の奥行位置と面内位置の計測を行い、さらにその時系列データからPIVの粒子追跡の解析を行った。

この実験で得られた画像から粒子の奥行計測を行うため、実験で用いたライトフィールドカメラの奥行校正を行った。具体的な校正方法として、正方格子状のドットパターンによる校正点画像を準備し、その画像を水平スライダに取り付けたLytroカメラにより40～240mmの21段階の距離位置で順次撮影した。次に各撮影画像の生データから画像処理により、縦横72面（マイクロレンズの各エレメントがカバーするCCD画素数と同数）の視差画像を抽出し、その抽出画像中で各校正点の重心位置を計測した。なお重心位置の計測においては、まず校正点の画像を2値化して輝度の重み付き平均による重心

計算を行い、次にガウス関数を用いたピークフィッティングによるサブピクセル解析を行って、高精度の重心位置測定を行った。

全校正点の重心をすべての視差画像について計測した後、水平および垂直方向に隣接するすべての視差画像間で、校正点重心の x および y 方向シフトを計算した。その際、マイクロレンズ周辺部での歪収差を考慮して、縦横 72 面の視差画像中から中央部の $7 \times 6 = 42$ 面の画像のみを用いて、隣接画像間の重心シフト計算を行った。よって各校正点の重心のシフトは $6 \times 5 = 30$ 箇所計算される。カメラの奥行校正における具体的な校正式としては、カメラ主レンズの表面から校正点画像までの距離 z を、視差画像中での校正点の重心位置 (x, y) と重心シフト (dx, dy) の 4 変数に関する 3~5 次の多項式関数で表したものを使用した。この多項式関数の各係数を最小 2 乗法により決定することでカメラ校正は完了し、その後は計測対象点の視差画像中での重心位置と重心シフトを校正式に代入することで、その計測対象点の奥行を評価することができる。

ライトフィールドカメラの奥行校正の完了後、実験用小水槽を用いた粒子画像の撮影を同じカメラにより行った。この撮影画像における計測対象は個々の点状の粒子に他ならないので、校正点の重心シフトの場合と同様の計算方法により各粒子の重心シフトを計算し、そこから校正式を用いて奥行を計算した。この実験の実際の結果については次節の報告で述べる。ライトフィールドカメラによる 3 次元計測の原理は以上の通りであるが、この手法では使用するカメラの固体毎に綿密な校正を行う必要があること、視差画像間での校正点や着目点のシフト量が微小であり、それに対する高精度のサブピクセル解析が必須であること等の問題がある。そのため精度を維持したリアルタイム計測は困難であるが、実際の流体実験における乱流計測のように実験解析法自体が計測値の後処理計算を前提とし、リアルタイム処理が重要ポイントでない応用分野では、システムのコンパクト性や低廉性から有用な 3 次元計測法と考えられる。

2.1 トモグラフィPIVにおける水竜巻流現象の3次元視と挙動解析

本研究では水竜巻流の実験用として、外径 800mm、内径 780mm、高さ 1000mm の大きさの大型アクリル製水槽を使用した。水竜巻流の発生のため、水槽上部の水面下に 2 段式の回転羽根車を設置し、水面を覆う波消し板の中央に設けた軸穴を通して DC サーボモータにより回転させた。この回転羽根車は上下二段構造で、全体の外径は 50mm (水槽内径の約 1/16)、羽根車の羽根は上下とも 4 枚で、周方向に 90° 間隔の配置である。ただし下段の羽根の迎え角は 45° 、上段の羽根の迎え角は 90° であり、上下各 4 枚の回転羽根は、周方向に 45° の位相差角をもって接合されている。羽根車の厚みは上下とも 5mm である。

一方、トモグラフィ PIV 実験のための画像撮影装置として、デジタル高速度ビデオカメラ 3 台を使用した。このカメラのセンサー解像度は 1280×1024 画素、量子化数は 12 ビットである。また最大フレームレートは毎秒 670 コマであるが、本実験では毎秒 200 コマ程度の比較的低速度で撮影を行った。カメラ用レンズとして焦点距離 30mm の単焦点レンズを使用し、Scheimpflug 配置を実現するためにチルトアダプタに取り付けて使用した。3 台のカメラは水槽上部円形壁の上部に周方向 120° の間隔で設置し、水面の透明波

消し板を通して水槽内部の竜巻状上昇流の様相を斜め上方から撮影した。

3次元トモグラフィ方式のPIVは、従来の3次元ステレオ方式のPIVに比べて、得られる3次元速度の分布が2次元的な平面から3次元的な空間に広がる大きな特色である。すなわち、ステレオPIVは複雑な3次元流の限られた一断面しか観察できないのに対し、トモグラフィPIVは一定空間内の流れを見通すことができる点で非常に有利となる。このトモグラフィPIVの第1ステップでは、カメラ撮影画像の各画素の輝度データから、元の撮影空間内に定義した3次元ボクセル空間における輝度分布を再現(再構成)する。この輝度分布の再現の原理は以下に示す通りである。

一般にカメラ画像の記録時において、カメラの画素*i*に記録された輝度 P_i は、図7に示すように、画素*i*の視線(line of sight)上の各ボクセルの輝度 I_j と、画素*i*に対する各ボクセル*j*の寄与率である重み係数 W_{ij} との積の総和で表現される。これを数式表現すれば

$$P_i = \sum_j W_{ij} I_j \quad (1)$$

となる。ここで重み係数 W_{ij} は、カメラ画素*i*に対するボクセル*j*の輝度の寄与率を表し、カメラの各画素を起点とするピクセル視線と、観測空間でのボクセルとの位置関係により決定される。この重み係数の具体的な評価は、カメラの校正データをベースとして、ピクセル視線と、それに交差するボクセルとの間の3次元幾何パラメータを用いて行う。

これに対してトモグラフィ画像処理では、撮影カメラの各画素における輝度が既知であり、その既知のデータを用いて元の観測空間における未知のボクセル輝度の再現計算を行う。すなわち(1)式での既知数と未知数の関係が逆になり、数学的には非線形方程式の未知数行列を求める問題となる。このような問題では、未知数であるボクセル輝度を初期値設定した後、何らかの漸近更新式を用いて、全ボクセルの輝度が定常値に達するまで更新計算を繰り返すという計算手法、すなわち代数計算型トモグラフィが一般的に解法として用いられる。

この代数計算型トモグラフィの代表的計算手法であるMART(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)では、繰り返し数*k*におけるボクセル*j*の輝度 I_j^k に対して、その更新値である I_j^{k+1} を(2)式のような乗算型の代数計算式で与える。

$$I_j^{k+1} = I_j^k \left(\frac{P_i}{\sum_j W_{ij} I_j^k} \right)^{\mu W_{ij}} \quad (2)$$

ここで μ は緩和係数で、通常1.0~2.0程度の値とする。このボクセル輝度の更新計算は、(1)式と同じ考え方によって、カメラのピクセル視線に沿って行われる。そしてこのピクセル視線に沿ってのボクセル輝度更新は、カメラの全画素に対して繰り返し行われる。さらに撮影カメラは複数であるので、カメラの台数分、この全画素に対するボクセル輝度の更新が行われる。さらに以上すべての手順を、観測空間の全ボクセル輝度が定常値に達するまで数10回程度繰り返す。

以上の計算処理により得られたボクセル輝度分布を適切な閾値で 2 値化すれば、PIV 実験における多数のシード粒子の瞬時的な 3 次元位置やパターンが可視化され、画像撮影を時系列的に行えば、様々な観察方向や局面から流体の複雑な 3 次元挙動を粒子の動きを通して観察することができる。しかし竜巻上昇流の 3 次元挙動をよりの確に観察し、そこから誘起される様々な流体力学的特徴量を数値的に見積るためには、時間的に連続な各局面での 3 次元流速分布を求める必要がある。これを行うための最も一般的な方法は、時間的に連続する 2 時刻におけるボクセル輝度分布を相互相関解析する方法である。

しかし(3)式の相互相関係数の計算を検査領域全体で繰り返して CC_{3D} が最大になる位置を総当たりの的に求める計算は、3 重ループ内で輝度の分散を計算する等、時間を要する演算の繰り返しが必要で、高密度の流速分布を時系列で求める場合には非常に負荷の大きい計算となる。このような観点から、最近では式(3)の 3 次元相互相関を近似的により高速で計算する手法が幾つか考案され、それらの手法の中から本研究では Bilsky et al. (2011) による直交 3 方向投影相互相関法を適用して相互相関解析を行った。

この手法は、トモグラフィ再構成で得られた観測空間での輝度分布を薄い層状の輝度分布に切り分け、その各層の輝度分布を単一面に投影して 2 次元の相互相関解析を行うもので、この手順を x - y 平面方向、 y - z 平面方向、 x - z 平面方向の 3 方向に繰り返すことで、全体として 3 次元流速分布を得ようとするものである。この手法では前記のように 2 次元相互相関の計算を 3 方向に繰り返す必要があるが、2 次元相関自体が 3 次元相関に比して格段に低負荷であるため、総体的な計算時間は大きく短縮される。

トモグラフィ画像処理による 3 次元 PIV の計測原理は以上の通りであるが、実際の水竜巻流の PIV 実験の結果については次節で述べる。この手法は複数台のカメラの配置や光軸調整、さらにそれらに対する精密なカメラ校正等、システムとしての複雑さや設定の煩わしさが問題点であるが、粒子分布の許容密度内で 3 次元計測空間の内部の詳細を最も明確に見通し得る手法であるという点で実用的価値は非常に高いと考えられる。

ライトフィールド画像処理による粒子計測システムの開発

近江 和生 (デザイン工学部情報システム学科)

研究概要

ライトフィールドカメラの前面から約110~120mmの距離に縦横160×150mm²、厚さ10mmの小水槽を置き、その内部に粒径約250 μ mのシード粒子を混入した水を満たして微弱な攪拌流を発生させ、照明用のレーザ装置により3次元PIVのための画像撮影を行った。そしてこの撮影画像から、前述の計測原理により個々の粒子の奥行位置と面内位置の計測を行った。さらに同一の処理を時間的に連続する撮影画像に対して行い、連続2時刻のデータから粒子追跡により3次元PIVの解析を行った。この実験において、実際に小水槽内のマイクロ粒子をライトフィールドカメラで撮影した画像の一例（正確には原画像より抽出した視差画像中の1枚）を図1に示す。また視差画像に対する画像処理により計測した各粒子の奥行と撮影面内の2次元座標から決定した粒子の3次元位置分布を図2に示す。この図における3次元粒子分布は連続2時刻（時間間隔は約1.0秒）にわたって計測した結果を示している。

実計測によるカメラの主レンズ先端から小水槽までの奥行距離は、水槽の内断面部で110~120mmの範囲であり、ライトフィールドカメラによる奥行計測結果もこの範囲に限定されるはずであるが、実際には重心点の計測誤差や奥行校正式の精度の影響で、上記の範囲をやや逸脱した奥行データが幾らか発生している。このような逸脱データは、簡便な民生用ライトフィールドカメラによる測定精度の限界を表すものとも考えられるが、カメラの奥行校正が40~240mmの距離範囲で行われており、その範囲に対して最大2%程度の逸脱という点を考慮すれば、計測用途によっては実用上の許容範囲である場合も考えられる。

図3は、図2における2時刻の3次元粒子分布から、自己組織化マップの手法によるマッチングアルゴリズムで求めた3次元粒子移動ベクトル、すなわち3次元PIVの結果である。小水槽内での旋回流動の特徴はよく捉えられているものの、速度の奥行方向成分に関しては部分的に正負のランダムな変動が観察され、実験で使用した民生用ライトフィールドカメラの奥行分解能の限界も垣間見える。

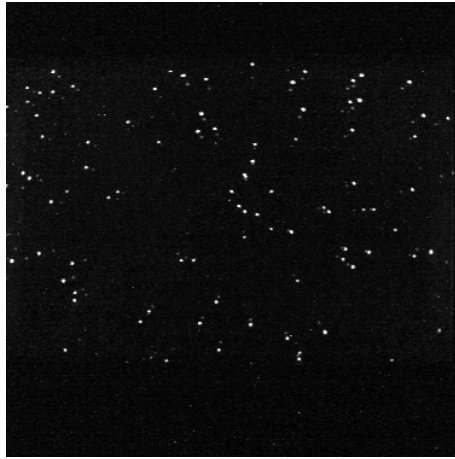


図1 ライトフィールドカメラによる粒子の撮影画像

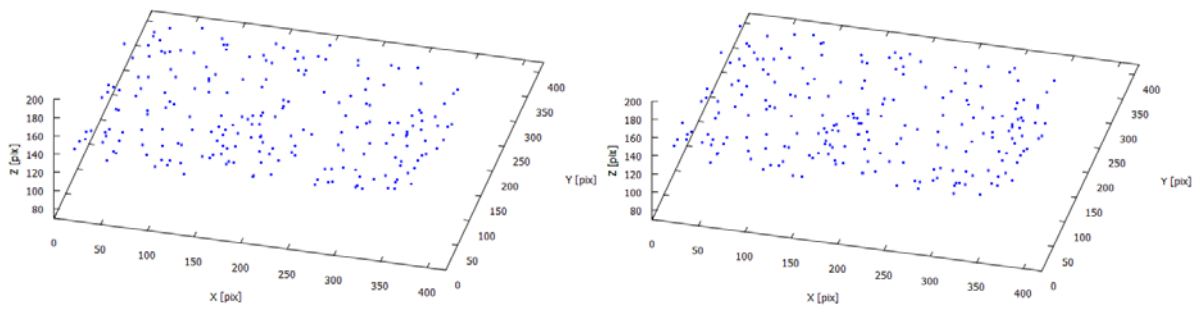


図2 ライトフィールド画像処理による粒子3次元分布の復元結果

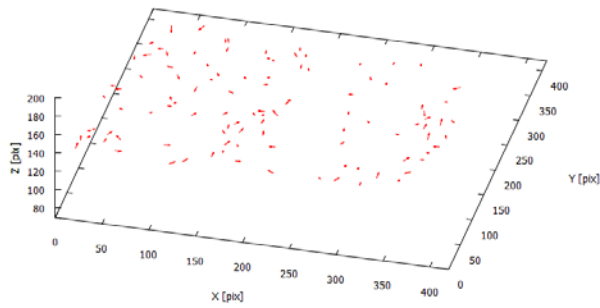


図3 図2の時間連続結果から得られたPIV結果

トモグラフィ法による人工水竜巻の3次元PIV実験

平塚 彰 (工学部都市創造工学科)

研究概要

第1段階の実験として、水竜巻流の実験水槽を使用し、水位 800mm, 羽根車の水面深さ 50mm, 羽根車回転数 1200rpm の条件において、粒径の大きい (250 μ m 程度) シード粒子を用いた流れの直接的な可視化を行った。その結果によれば、羽根車始動後の水竜巻の発達には、竜巻上昇流の初期形成、竜巻流の安定発達に続く渦崩壊(vortex breakdown)、旋回流の周囲拡散に続く竜巻上昇流の再形成という時間的プロセスをたどり、さらにこの一連のプロセス自体が周期的に繰り返される。また竜巻上昇流の安定初期から螺旋状の蛇行上昇が観察され、その発達に伴って集中性の高い強力な竜巻流が形成された後、ほどなくして突如渦崩壊の現象が観察される。このように上記実験条件における流れの可視化結果は、竜巻上昇流の代表的な挙動の特徴をよく捉えているので、第2段階としてトモグラフィ画像処理による PIV 実験を同じ実験条件で行い、その内部構造等の特徴をさらに詳しく調べた。

上記の流れの可視化実験において、竜巻上昇流の安定発達から渦崩壊の過程段階に着目し、渦崩壊の発生直前の水位断面における PIV 実験を行って、トモグラフィ画像処理により得られたボクセル輝度分布を図1に示す。この図中における青色のドット点が実験時におけるシード粒子の瞬時3次元分布を表す。この図から粒子の時間的な動き(=流れ)は観察できないが、粒子分布の偏り模様から中央付近に竜巻状上昇流が強力なコア領域を形成しながら発生している点が見て取れる。

さらに同実験における連続2時刻でのボクセル輝度分布を用いて、前記の3次元相互相関による PIV 解析を行い、計測空間中における粒子の移動速度(=水の流速)の分布を示した結果を図2に示す。この結果から明らかなことは、図1の粒子の瞬時分布結果において竜巻中央部の粒子の密集度が高い部分では、図2の流速分布結果においても水流速度の高い環状の旋回領域が存在している点である。このことから、渦崩壊直前の十分に発達した竜巻上昇流では、中心部の流れが集中的な旋回モードにあることが認識される。これは水竜巻の渦崩壊後における、旋回流の周囲拡散状態における拡散的な旋回モードの流れと明確な対比を成している。

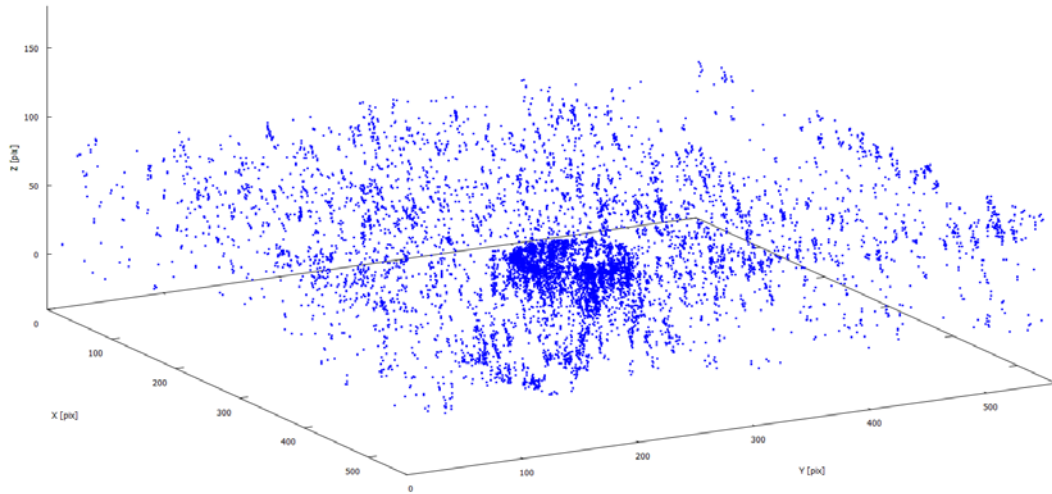


図1 トモグラフィ画像処理による水竜巻流での瞬時粒子分布

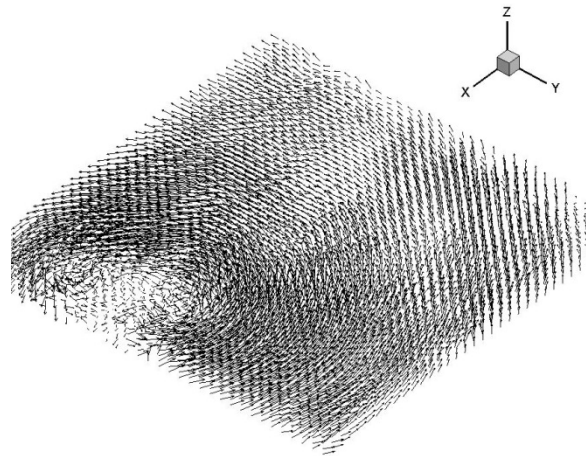


図2 3次元相互相関によるPIVの流速分布結果