

PTV のための新アルゴリズムの開発

竹原幸生¹・江藤剛治²・村田 滋³・道奥康治⁴

¹正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江3-4-1)

²正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

³工博 京都工芸繊維大学助教授 工学部機械システム工学科 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

⁴正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

PTVのための新しいアルゴリズムを開発した。画像中の多数の粒子の自動追跡のためにカルマンフィルターと χ^2 検定による自動粒子追跡アルゴリズムを提案した。追跡途中で現れた粒子に対する粒子の情報を推定するためにドローネ三角形網を用いた内挿法を提案した。ビデオカメラを用いた3次元PTVのために、透明平面壁を通した水中粒子の3次元位置の計測法を再検討した。これらを熱対流乱流場の計測等に適用した。

Key Words: PTV, flow visualization, velocity measurement, Kalman filter, χ^2 test, Delaunay net

1. はじめに

著者らは画像解析による速度場の計測法 (Imaging Velocimetry, IV, 補遺 I) のために新しい技術を開発してきた^{1),2)}。本論文では粒子画像計測のための自動粒子追跡アルゴリズムを提案する。

IVには以下のような長所, 短所がある。

(長所)

① 各瞬間の流速ベクトルの2~3次元空間分布が得られる。② 水中にセンサーを挿入する必要がないので流れを乱さない。③ 連続画像を使えば時系列データが得られる。

(短所)

① 画像処理に大きな計算機容量, 計算時間がかかる。② トレーサーにより, 水の物性が多少変わる可能性がある。③ 測定対象の場が透明でなければならない。

すでにいくつかのIVによる流速計測法が提案されており, その一部は市販化されている。現在, 流れの画像計測分野では, 3次元乱流等にも適用できるような計測法の開発が活発に進められている。

著者らは, IVの中でも, 各トレーサー粒子を個別に追跡するPTV (Particle Tracking Velocimetry) のために, カルマンフィルターと χ^2 検定による自動粒子追跡アルゴリズムを開発した^{3)~6)}。本手法はこれまで提案されている手法に比べて, 理論的基礎が明確な確率・統計学的手法を用いて, 次ステップの粒子情報の予測, 粒子の対応付け等を行っている。

PTVにおいては, 水流中の粒子位置を水槽の外から撮影した画像から推定する。この場合, 空気-透明壁-水の屈折率が違うため, 通常の3次元画像計測法で用いられる方法に屈折率の影響を考慮した手法を導入す

る必要がある。著者らの研究を含めて既にいくつかの研究結果が発表されている。これらの研究は用いる基本的な原理について差異はないが, 式の取りまとめ方や考慮した事項, 例えば, レンズの歪, 撮像面の歪等をどこまで取り入れるか等で見かけ上かなり異なったものとなっている。

本論文では, PTVのため著者らがこれまで開発した自動粒子追跡アルゴリズムおよび矩形水槽中の粒子3次元位置計測法について取りまとめて紹介し, 流れ場計測への適用例を示す。

第2節では画像解析速度計測法に関してこれまで提案された手法について分類し, それぞれについて簡単に紹介する。第3節では著者らが開発したPTVアルゴリズムについて説明する。第4節では画像による矩形透明水槽中の粒子3次元位置計測法について述べる。まず, これまでに開発された手法を紹介し, 著者らがやっている計測法との関係を明らかにした後, 著者らの計測法について説明する。第5節では2次元場の熱対流乱流場, および3次元場の水槽中の回転棒上のマーカーの追跡例を示す。

2. 画像解析速度計測に関する既往の研究

(1) 手法の分類

画像解析による速度計測に関する研究のレビューまたは分類は例えば参考文献8)~11)で行われている。これらの多くは, 各論文の著者の研究成果等を中心にレビューしたものである。現在も非常に多くの手法が開発・検討されている。それらを全般的にレビューし, 現時点で個々の手法の特徴を明確にすることは, 非常に重要な検討課題である。また, 用語, 分類等は各研究

表-1 画像解析速度計測法 (IV) の分類

分類	画像解析計測法		計測に必要な画像数	露光もしくは照明法	撮影法	これまでに提案されているアルゴリズム	精度	計測速度	自動化	時系列	2 次元発元程用度	3 次元化	備考		
		マーカー													
画像解析速度計測法	線的計測					水素気泡法 レーザー励起蛍光法	○ ○	○ ○	○ ○		R R	△ △			
		面的計測	濃度画像解析法	連続分布画像 (染料画像)	単一画像	多重露光	凍結撮影	多重露光法							連続分布画像の手法は粒子画像に使用可能
	連続画像			単一露光	凍結撮影	相関法 時空間微分法 フーリエ変換法 逐次棄却法 カルマンフィルター法	□ □ □ □ □	○ ○ ○ ◎ ○	○ ○ ○ ○ ○	M R R R R	△ △ △ △ △				
	粒子画像		単一画像	多重露光	凍結撮影	レーザースペックル法	◎	△	△	△	R	△	△	上記、CCIVで記入された手法については省略	
			連続画像	単一露光	凍結撮影										
	粒子追跡法	粒子画像	単一画像	単一露光	流し撮影	流跡線法	△	○	○	○	R	△			
				多重露光	凍結撮影	多重露光法									
			連続画像	単一露光	凍結撮影	流し+凍結撮影	始点終点強調法	○	○	○	○	R	△		
				単一露光	凍結撮影	最近法 4時刻追跡法 二値化相関法 カルマンフィルター法 遺伝的アルゴリズム法 ヒストグラム法 木下らの方法 3時刻パターンマッチング法	△ ○ □ ◎ ○ ○ ○ ○ ○	○ ◎ ◎ △ △ △ △ △ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ △ △ ○	R M R R D R R M	◎ ◎ ◎ ◎ ◎ ◎ □ △	二値化相関法と粒子追跡法の組み合わせ			

◎:非常に通している, ○:通している, □:中程度, △:あまり通していない, M:市販化されている, R:研究用, D:開発中

者により異なり, まだ確立したものは無い。よって本節でこれらを取りまとめて整理し, これまで開発された手法の特徴を明確にする。

表-1 に画像解析速度計測法の分類を示す。また以下で著者らが用いる用語については, 補遺 I に取りまとめて示している。

トレーサーの違いによる分類

- (i)濃度画像速度計測法 (Concentration Image Velocimetry, CIV)
- (ii)粒子画像速度計測法 (Particle Image Velocimetry, PIV)

粒子をトレーサーとしている場合でも濃度画像として解析することで速度を計測する場合は CIV に含まれる。染料などの連続的に分布する画像を処理・解析する方法を連続濃度画像速度計測法 (CCIV: Continuous Concentration Image Velocimetry), 粒子画像を濃度画像として処理・解析する方法を粒子濃度画像速度計測法 (PCIV: Particle Concentration Image Velocimetry) と区別して呼ぶ。

個別の粒子画像を解析して速度場を計測する手法を個別粒子画像速度計測法 (Individual Particle Image Ve-

locimetry: IPIV) と呼ぶ。そのうち, 短いシャッターリング (凍結撮影) で撮影された個々の粒子を追跡する手法を粒子追跡速度計測法 (Particle Tracking Velocimetry: PTV), 比較的長いシャッターリング (流し撮影) で撮影された粒子軌跡を解析する手法を流跡線法 (Particle Streak Velocimetry: PSV) と呼ぶ。

PCIV と IPIV を合わせて粒子画像速度計測法 (PIV: Particle Image Velocimetry) と呼ぶことにする。

以下の露光回数, 露光時間, 画像数による 3 種の分類は基本的に Adrian による¹¹⁾。

1 枚の画像撮影における露光回数による分類

- (i)単一露光 (Single Exposure)
- (ii)多重露光 (Multi Exposure)

露光法には, カメラのシャッターによる方法や, カメラのシャッターを開放にしてストロボ照明や連続パルスレーザーを用いる方法がある。レーザー光を音響光学セル (AOM) により偏向し, 時間的にパルス状のシート光を照射する方法¹²⁾も提案されている。

ビデオカメラとストロボ照明もしくはレーザーパルス光を用いる場合は, 1/30 秒間隔で連続的に撮影されるのでビデオカメラの撮影タイミングに同期させて照

明光を照射する必要がある。

1 回のシャッターリングにおける露光時間による分類

(i) 流し撮影 (Long Shuttering)

(ii) 凍結撮影 (Short Shuttering)

1 時点の速度分布計測に必要な連続画像数による分類

(i) 単一画像から速度ベクトルを求める方法

(ii) 連続画像から速度ベクトルを求める方法

(2) 主要な手法

a) 濃度画像速度計測法 (CIV)

CIV では一般的に単一露光・凍結撮影法 (Single Exposure/Short Shuttering) で得られた連続する数枚の画像から画像中のある領域のトレーサーパターンの移動を計測し、速度を推定する。このトレーサーの分布パターンをトレースするアルゴリズムとして現在までに提案されている手法について取りまとめて説明する。

相関法¹⁴⁾は最もよく用いられる手法である。これはほぼ確立された技術となっており、市販化された相関法による計測装置¹⁵⁾には、画像の相関をとる専用の IC を独自に開発し、リアルタイムの計測を可能にしたものもある。

時空間微分法 (またはオプティカルフロー法)¹⁶⁾は、画像の輝度分布の空間微分および時間微分からテイラー展開を利用して輝度分布の移動量を求めるものである。

フーリエ変換法¹⁷⁾は、連続する 2 枚の画像をフーリエ変換し、その比を取れば移動量に対応したフーリエ成分しか残らない。さらに得られた画像をフーリエ変換すると移動した点にピークを持つ関数となり、そのピーク位置から流速ベクトルを求める方法である。

大場ら¹⁸⁾は、輝度分布パターンの移動をカルマンフィルターにより予測・推定する手法を提案している。

CIV の長所、短所を以下に示す。

(長所)

① PTV に比べて処理速度が早い。② 染料等の連続分布画像での計測に限らず、粒子画像の計測も可。粒子画像の場合は解像力が上がる。

(短所)

① 直接、3 次元撮影を行うことが困難である。② 輝度分布パターンは変化しないことを仮定しているため、フレームレートに対して時間変動の大きな流れには適用できない。

多重露光・凍結撮影法 (Multi Exposure/Short Shuttering) による単一フィルム画像から流速場を計測する方法としてレーザー-speckle 法がある^{19), 20)}。レーザー-speckle 法では、微細な粒子をトレーサーとし、レーザーシート光を短時間に 2 回パルス的に照射すると、写真フィルム上に粒子散乱光の不規則な干渉によって生じるランダムな斑点模様 (speckle パターンと

呼ばれる) の二重露光像ができる。その写真フィルム上の探索領域にレーザー光を照射し、その通過光をフーリエ変換光学系で変換した映像を処理し、速度場を計測する。この計測法の長所、短所は以下の通りである。

(長所)

① フィルムを使用するため解像度が高い。② 1 枚のフィルムから速度場を計測できる。

(短所)

① 現在の段階では解像度の問題上、フィルムを用いなければならない。② フィルムを使うのでカメラの機構に機械系が含まれる。同時に 2 重露光を行うため、同期等の問題から時系列データとして計測するのが困難である。

b) 個別粒子画像速度計測法 (IPIV)

IPIV の中で単一露光・流し撮影法で単一画像から速度場を計測する手法として流跡線法 (PSV) がある。流跡線法の利点として、1 枚の画像から流速場を得ることができるという点が上げられる。しかし、流跡線法には以下の短所がある。

① 流跡線の始点位置および終点位置を正確に計測するのが困難である。② 得られた流跡線画像から流速の方向がわからない。③ 粒子数が増えると流跡線の交差が生じ、その分離が困難である。

上記①について補足する。2 次元画像計測ではシート光照明を用いることが多いが、流れの 3 次元性のために、粒子がシート光を横切って出入りする。このためカメラのシャッターリングや照明時間とは無関係に、流跡線が生じたり消えたりする。

①、②の欠点に対処する方法として小林ら²¹⁾は始点と終点を凍結画像で撮影し、その間を流し画像で撮影する多重露光法を提案している。この方法により粒子の正確な移動量を解析することができる。

②に対処するため、村田ら²²⁾はドゥローネ三角形網とニューラルネットワーク理論を用いた自動流向判定法を提案している。

粒子追跡法 (PTV) で一般的に用いられる方法は、単一露光・凍結撮影された連続する数枚の画像上の同一粒子を対応付けることにより流速ベクトルを求める方法である。この場合、連続する数枚の画像上の同一粒子の追跡法 (APT: Automatic Particle Tracking) が問題となる。これまで提案されてきた APT について以下に説明する。

c) 自動粒子追跡アルゴリズム (APT)

粒子数が数点と少なければ、最近法や粒子の色調等の情報を用いて自動的に追跡することは容易である。すでに 3 次元で計測できる装置が市販されている⁵⁷⁾。しかし、流れ場の計測に適用する場合、少なくとも 100 点程度の追跡が必要となる。このため、以下のような

種々のアルゴリズムが工夫されている。

Changら²³⁾は4時刻追跡法を提案している。ある検索領域内の粒子を対象とし、その粒子が連続4枚の画像を通して対応付いた粒子を同一粒子とみなす。これを用いて笠木・西野²⁴⁾は3次元チャンネル内の乱流測定を行っている。Changらの手法²³⁾では、粒子の探索領域や粒子軌跡の棄却条件などが経験的に決められているのに対し、その後笠木らは多時刻追跡の効果などについて系統的に検討し、ラグランジュスペクトルを用いて統計的に算出した閾値、追跡スキームを用いて手法を改良している。また、笠木ら^{59)~61)}は流れ場の状況によっては、必ずしも4時刻追跡が最良でなく、むしろ2時刻追跡が良い場合が存在することも示している。

植村らは二値化相関パターンマッチング法²⁵⁾を提案している。この方法では、連続する2枚の粒子画像をあるいき値で二値化し、粒子のみを抽出した画像で相関を取る方法である。相関は粒子像の重心同士を重ね合わせ、その重心周りの領域の二値化相関をとる。粒子像の重心を重ねた場合のみの相関値を比較するため、CIVではなく、PTVに分類される。

西野ら²⁶⁾は二値化相関法と4時刻追跡法の原理を組み合わせて3時刻パターンマッチング法を提案している。

著者ら³⁾、家合ら²⁷⁾はトレーサー粒子の移動をカルマンフィルターにより予測する手法を提案している。著者らの提案した手法との違いは3.(1)で詳しく述べる。

その他、遺伝的アルゴリズムにより粒子の空間的対応付けを行う方法²⁸⁾、流速ベクトルヒストグラム法²⁹⁾等がある。

以下に、PTVの長所、短所を示す。

(長所)

- ① 3次元計測への拡張が容易である。
- ② ビデオカメラを用いて長い時系列データを得ることができる。
- ③ 高速ビデオカメラが使えるので高時間分解能での計測が可能である。
- ④ 一般的にCIVに比べて解像度がよい。

(短所)

- ① CIVに比べて処理速度が遅い。
- ② 粒子画像等のトレーサーを個々に分離できる画像に限られる。
- ③ トレーサー粒子が流れの物性に影響をおよぼす可能性がある。
- ④ ビデオカメラを用いるのでフィルムに比べて空間解像度が落ちる。

ビデオカメラの解像度については近い将来ハイビジョン等の高解像度のビデオカメラが科学技術実験にも使えるようになるのでフィルムと同等の解像度で計測が可能となる。

d) 誤対応の検出法とその修正法

表-2にこれまで提案されている誤ベクトルの検出法とその修正法を示す。CIVでは得られるベクトルは格子点上のデータであり、PTVで得られるベクトルはラ

表-2 誤対応の検出法とその修正法

画像解析	検出法	修正法	研究者	3次元化
CIV	8近傍評価法	相関領域を拡大して再度相関をとる。	木村ら ³⁰⁾	△
	F分布検定法	なし	加賀ら ³²⁾	△
	連続条件判定法	正しいと判断されたベクトルからSOLA法により修正	藤田ら ³¹⁾	○
PTV	周辺比較・比発散量比較法	なし	加賀ら ³²⁾	○
	ダブルチェック法	2番目に大きな相関係数をもつ粒子対応付け	山本ら ³⁴⁾	△
	4時刻追跡法	なし	Changら ²³⁾	○
	χ^2 分布検定	ドゥローネ三角形による線形補間	著者ら ³⁾	○

ンダムな配置の点上のデータである。このため、CIVとPTVで用いられる誤対応検出法はお互いに直接用いることはできない。

格子点上ベクトル分布図から誤ベクトルを検出する方法として8近傍評価法、F分布検定法、連続条件判定法がある。

木村らによる8近傍評価法³⁰⁾は、注目している格子点の回りの8点のベクトルの終点で囲まれる領域内に、注目している点のベクトルの終点が存在しない場合誤ベクトルであると判断する。誤ベクトルを検出した場合は相関領域を拡大して再度相関法を適用する。

藤田らによる連続条件判定法³¹⁾は、流体の連続条件式を判断基準にする方法である。さらに正しく対応付いたベクトルをもとにSOLA法による流速補正法を提案している。

F分布検定法は加賀ら³²⁾の提案している逐次棄却法で用いられている方法である。

ランダムに配置されたベクトル図から誤ベクトルを検出する方法とし周辺比較・比発散量比較法、ダブルチェック法、 χ^2 検定法がある。

周辺比較・比発散量比較法³³⁾とは、ランダムな点から格子点へベクトル量を内挿し、格子点のデータからランダムな点のベクトルを比較していく方法である。まず、周辺のベクトルと比較して明らかに誤っているベクトルを除去した後、比発散量(=発散量/流速)の比較により連続条件を乱しているベクトルを除去する二段階選択法を用いている。

ダブルチェック法³⁴⁾は二値化相関法を対象に誤ベクト

ルの検出法として提案されたものである。ダブルチェック法では二値化相関領域での対応する粒子像の重なりと各粒子像のズレの2つの指標をもとに誤ベクトルかどうかを判断する。もし誤ベクトルが検出されれば第2番目に大きな相関係数を持つものと対応付ける。

χ^2 検定法³⁾は著者らの提案している方法であり、3.(3)節で詳しく述べる。

e) 性能比較

これらの手法の特徴、問題点、ふさわしい適用分野等についての比較検討は重要な検討課題である。現在、全国の関連研究者により、比較検討のための研究が開始されようとしている。そのとき、著者らが提示した表-1がその機運を高めることになった⁵⁸⁾。優劣比較については、今後の研究で明かにされるものと考えられる。よって現時点での著者らの判断は差し控えることにした。

(3) 土木工学分野での応用

土木工学分野でも古くから、画像解析速度計測法が有効に利用されてきた。以下にそれらのいくつかを紹介する。

木下³⁵⁾は洪水流の表面流速を、カメロン効果を用いて計測する方法を提案した。

木下³⁶⁾、宇民・上野³⁷⁾は実河川の洪水流の航空写真を用いて、泡や濁流の模様等をトレーサーとして相関法で表面流速を計測している。相関法では、はじめ相関領域を粗く取り、ある程度大きな領域の動きを調べた後に、段階的に相関領域を小さくしていき空間分解能を上げていくアルゴリズムを提案している。これにより、誤対応ベクトルを減らすばかりでなく、計算時間の短縮化も計っている。

福津³⁸⁾は4時刻追跡法により、開水路複断面の水平2次元断面の流れ場の計測を行っている。

藤田³⁹⁾は流木や表面の微細な波をトレーサーとしてビデオ画像から相関法により測定する方法を提案している。特に、実河川を上空から撮影するのではなく、河岸の斜めから撮影した画像から表面流を推定する方法を提案している。

長尾⁴⁰⁾は孤立波砕波内部の流れ場を、4時刻追跡法および相関法で計測している。4時刻追跡法のトレーサーとしては加熱処理により比重調整したポリスチレン粒子、相関法のトレーサーとしては砕波により混入した気泡を用いている。また、粒子追跡法と相関法の適用範囲などについても検討している。

真野⁴¹⁾も砕波帯気泡混入領域の流れ場を気泡をトレーサーとして相関法によって計測している。

佐藤⁴²⁾は砕波点付近の砂粒子の挙動をビデオから相関法で計測している。計測では水を黒色のポスター

カラーで染め、壁面近傍の浮遊砂のみが可視化できるようにし、浮遊砂粒子の移動を計測している。

小林⁴³⁾はビデオ画像からフーリエ変換法を用いて砕波帯付近の流れ場を計測している。

3. カルマンフィルターと χ^2 検定による自動粒子追跡アルゴリズム - KC法 -

(1) KC法の概要

著者らは当初から乱流場の高精度3次元画像計測を目標として画像計測手法を開発してきた。よって、3次元流れ場の計測への拡張が容易なPTVを対象としてアルゴリズムを開発してきた。

本手法は、現在注目している粒子の情報(位置、速度、加速度、粒子径、輝度、等)から次時刻の粒子の情報をカルマンフィルターにより予測し、予測粒子と実測粒子の同定の指標として χ^2 -値を用い、同一粒子である確率を χ^2 検定により客観的に判断するという手法である。よってこれをAPT-KC法(Automatic Particle Tracking by the Kalman filter and the Chi-square test)もしくは単にKC法と呼ぶことにする。

レーザーシート照明により2次元断面を計測する場合、流れの3次元性が増すに従い、レーザーシート断面を横切る粒子が多くなる。カルマンフィルターによる粒子情報の予測では、後述(3.(4)節)のように、新たに粒子が現れると、次のステップでのその粒子の位置等を予測するためには、あらかじめその粒子の速度、加速度等の粒子情報の近似値を与える必要がある。これを与える方法として、1時刻前の画面と現画面上で対応付いた粒子位置を頂点とするドローネ三角形網を作り、各三角形中に新たに現れた粒子があれば、その三角形の頂点位置の粒子情報を用いて、新たに現れた粒子の粒子情報を内挿して与える方法を提案している。

カルマンフィルターを用いたIVが、著者らとほとんど同時期に家合²⁷⁾、大場¹⁸⁾によっても提案されている。それぞれのIVの違いを表-3に示す。大場らの方法は輝度分布パターンの移動を推定する方法でありCIVに分類され、基本的に著者らの手法と異なる。家合らの方法では現在注目している粒子の位置、速度、加速度から次時刻の粒子位置を推定する部分は著者らの考え方と同じであるが、著者らは更に粒子の大きさ等の他の粒子情報も予測する。また、家合らは同一粒子の対応付けに4時刻追跡法を用いている。著者らは χ^2 検定を用いて同一粒子の対応付けを行っている(補遺II参照)。 χ^2 検定の方が理論的背景がしっかりしており、対応確率等を客観的に求めることができる。

以下、著者らの提案しているカルマンフィルターと χ^2 検定から成るAPTについて説明する。

表-3 これまでに提案されているカルマンフィルターを用いたIV

研究者	画像解析法の分類	状態量ベクトル	観測量ベクトル	対応付け		発表年月
大場ら ⁴³⁾	濃度画像解析法 (CIV)	輝度分布の時間偏微分値と空間偏微分値を結び付ける係数	観測マトリックス内の各画素の時間偏微分値	逐次最小2乗法	モデルが未知であるとし、適応カルマンフィルターを用いてモデルの同定をしながら速度推定を行う。	1990年7月
家合ら ²⁷⁾	粒子追跡法 (PTV)	座標, 速度, 加速度	座標	4時刻追跡法	予測位置からの距離がしきい値以下で一番近いものを対応付ける。	1991年10月 (1989年8月, 注1)
著者ら ²⁾	粒子追跡法 (PTV)	座標, 粒子径, 輝度, 各々の変化量, およびその変化量	座標, 粒子径, 輝度, 各々の変化量	χ^2 検定法	それぞれの予測粒子情報と実測の粒子情報との誤差を同一の指標で比較可能にするため, χ^2 値を使う。	1990年2月

注1) 日本機械学会流体工学講演会にて発表

(2) カルマンフィルターによる粒子情報予測

カルマンフィルターは動的システムを線形で表せ、システムのノイズが白色雑音である場合、時々刻々の観測データからシステムの状態を表す量の最小2乗推定値を逐次与えるものである⁴⁴⁾。カルマンフィルターはこれまで得られたデータを全て記憶する必要はなく、時々刻々に得られるデータのみで最適推定値を得ることができるため、工学分野で広く応用されている。水工学の分野でも、カルマンフィルター⁴⁵⁾が提案されてから(1961年)、比較的早い時期(1973年)に日野⁴⁶⁾によって水文流出予測に応用された。著者の1人⁴⁷⁾は1978年に低平地都市河川網の動的応答解析に適用した。

一般的に離散型線形動的システム方程式は次式で表される。

$$h(t+1) = F(t+1;t)h(t) + D(t)u(t) + \xi(t) \quad (1)$$

$$m(t+1) = H(t)h(t) + \zeta(t) \quad (2)$$

ここで、 $h(t)$ は時刻 t の状態量ベクトル、 $m(t)$ は時刻 t における観測量ベクトル、 $u(t)$ は時刻 t における制御入力ベクトル、 $F(t+1;t)$ は状態遷移行列、 $D(t)$ は駆動行列、 $H(t)$ は観測行列、 $\xi(t)$ 、 $\zeta(t)$ はそれぞれ誤差ベクトルである。本研究では制御入力はないものとし、式(1)の右辺第2項($D(t)u(t)$)は省略した。

カルマンフィルターでは状態量ベクトル $h(t)$ の最小2乗推定値を時々刻々得られる観測量ベクトル $m(t)$ から逐次推定し、次時刻の状態量の最適推定値 $\hat{h}(t+1;t)$ を予測することができる。逐次計算を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} K(t) &= P(t;t-1)H^T(t) \\ &\quad [H(t)P(t;t-1)H^T(t) + R(t)]^{-1} \\ \hat{h}(t;t) &= \hat{h}(t;t-1) \\ &\quad + K(t)[m(t) - H(t)\hat{h}(t;t-1)] \\ \hat{h}(t+1;t) &= F(t+1;t)\hat{h}(t;t) \\ P(t;t) &= P(t;t-1) - K(t)H(t)P(t;t-1) \\ P(t+1;t) &= F(t)P(t;t)F^T(t) + Q(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $P(t)$ は状態量の真値と推定値の差 $h(t) - \hat{h}(t;t)$ の共分散行列、 $Q(t)$ はシステム方程式での誤差の分散行列、 $R(t)$ は観測方程式での誤差の分散行列である。

本研究では、カルマンフィルターによりある時点までの粒子情報を用いて次の時刻の粒子情報を予測する。粒子情報としては、粒子の (x, y, z) 座標や各方向の速度成分・加速度成分、輝度や粒子径(面積)等がある。以下の説明では座標、速度、加速度を粒子情報として取り扱っている。輝度情報等が入っても基本的なアルゴリズムは同じである。

まず、状態方程式について説明する。説明では x 方向のみの説明を行う。他の方向の運動および粒子情報の変化についても全く同様な方程式を得ることができる。

時刻 $t+1$ の粒子情報を時刻 t のまわりにテイラー展開する。ここで、1時刻間隔(画像のサンプリング間隔)は小さいものとする。

$$x(t+1) = x(t) + v(t)\Delta t + a(t)\Delta t^2/2 + O(\Delta t^3) \quad (4)$$

Δt は画像のサンプリング間隔、 $x(t)$ は時刻 t における粒子位置、 $v(t)$ は時刻 t における粒子の速度、 $a(t)$ は時刻 t における粒子の加速度である。 $O(\Delta t^3)$ は離散化にともなう Δt の3次以上の項となり、 $O(\Delta t^3)$ は式(1)の $\xi(t)$ の中に含める。画像のサンプリング間隔 Δt は一定とし、状態量ベクトルとして次の3つを選んだ。

- ① 粒子位置 $x(t)$,
 - ② 1ステップ間の移動量 $\delta_{xv}(t) (= v(t)\Delta t)$,
 - ③ $\delta_{xv}(t)$ の1ステップ間の変化量 $\delta_{xa}(t) (= a(t)\Delta t^2/2)$
- 状態方程式は次式のようにおいた。

$$\begin{Bmatrix} x(t+1) \\ \delta_{xv}(t+1) \\ \delta_{xa}(t+1) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \delta_{xv}(t) \\ \delta_{xa}(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

また観測量ベクトルとしては実測の粒子位置、および1ステップ間の移動量を選び、状態量ベクトルと区別

するため $m(t) = \{X(t), \delta_{Xv}(t)\}$ と大文字で書く。観測方程式は次式のようにおく。

$$\begin{Bmatrix} X(t) \\ \delta_{Xv}(t) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \delta_{xv}(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

上記の説明では、 x 方向のみについてシステム方程式を示したが、 y, z 方向、粒子輝度、および粒子径等についても同様のシステム方程式となる。

以上の状態方程式、観測方程式に基づいて、カルマンフィルターにより状態量ベクトルに対して観測値を用いて最適推定値を求め、次ステップの状態量ベクトルを予測する。

(3) χ^2 検定による同一粒子の対応付け

カルマンフィルターにより予測された粒子情報（粒子位置、大きさ、輝度等）と実測された粒子情報から同一粒子の対応付けを行う必要がある。それぞれの粒子情報の誤差の分散値が異なるため、単に誤差の2乗和の小さいものを対応付けしてしまうと、数値的に誤差の大きい1~2の粒子情報のみを優先して判断することになり、誤差の客観的総合的評価ができない。例えば、輝度の誤差が x, y, z 方向の位置の誤差に比べて数値上大きな値であると、輝度の誤差だけで粒子の対応付けをすることになる。

それぞれの粒子情報の誤差が平均値0の正規分布に従う場合、各時刻の誤差を、その誤差の標準偏差で割れば、平均値0、標準偏差1の規準化正規分布となり、全ての粒子情報の誤差を同一の尺度で測れる。その規準化された誤差の2乗和を取れば χ^2 分布に従うことがわかっている。よって、予測粒子情報と実測粒子情報とが対応する確率を χ^2 検定により客観的に評価することができる（図-1 参照）。

ここで、それぞれの粒子情報の誤差の標準偏差が必要になるが、幸いカルマンフィルターの計算アルゴリズム中に観測量ベクトルの最適推定共分散行列 $P(t+1; t)$ を計算するプロセスがある。各観測粒子情報間の相関が低い場合には、近似的にその対角行列が各観測誤差の分散となる。その平方根を取れば各観測量の標準偏差がわかる。

観測量ベクトルの内、時刻 $(t+1)$ における観測値 $X(t+1) = \{X(t+1), Y(t+1), Z(t+1), S(t+1), B(t+1)\}$ を使う。それぞれカルマンフィルターにより予測された最適推定値 $\hat{x}(t+1, t), \dots$ の周りに正規分布すると考えられる。ここで、 $S(t)$ は時刻 t での粒子画像径、 $B(t)$ は粒子画像の平均輝度とする。例えば、 x 方向の座標について、

$$\chi_x = \frac{X(t+1) - \hat{x}(t+1, t)}{\sigma_x} \quad (7)$$

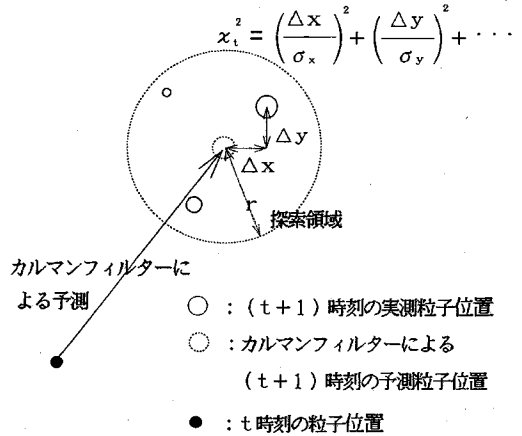


図-1 χ^2 検定による粒子の対応確率の客観的評価

は平均値0、標準偏差1の規準化正規分布に従う。同様に $\chi_y, \chi_z, \chi_S, \chi_B$ を求める。それぞれの2乗値は自由度1の χ^2 分布に従う。 χ^2 分布の再生性により、次式は自由度5の χ^2 分布に従う。

$$\chi_t^2 = \chi_x^2 + \chi_y^2 + \chi_z^2 + \chi_S^2 + \chi_B^2 \quad (8)$$

カルマンフィルターにより $\{x(t+1) - \hat{x}(t+1, t)\}$ の共分散行列が計算されているので、近似的に $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_S^2, \sigma_B^2$ は対応する共分散行列の値を用いればよい。

以後の計算は次のような手順による。

- (1) カルマンフィルターにより t 画面上のある粒子の $(t+1)$ 画面上での位置 $\hat{x}(t+1, t)$ を推定する。
- (2) $(t+1)$ 画面上で $\hat{x}(t+1, t)$ から半径 r 以内にある全ての粒子について χ_t^2 を計算する。 χ_t^2 が最小となるものを仮の対応する粒子とする。このときの χ_t^2 値を $\chi_{t \min}^2$ とする。ここで、半径 r は次のようにして求める。

$$r = \alpha \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (9)$$

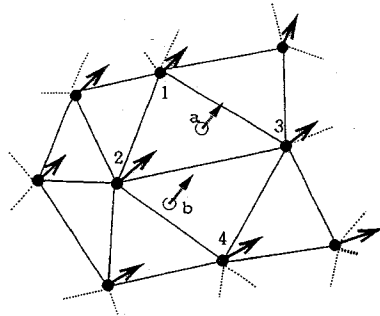
α は係数で今回は3とした。

- (3) $\chi_{t \min}^2$ がある棄却水準以下であれば同一粒子と確定する。棄却水準以上であれば対応する粒子がないものとする。

以上の計算を t 画面上の全ての粒子に対して行なう。

(4) 新たに現れた粒子に対するドゥローネ三角形網を用いた粒子情報の推定法

カルマンフィルターを用いて、次時刻の粒子情報を推定する場合、状態量として現在の粒子情報が必要である。新たに現れた粒子に対して粒子の位置 x は得ることができるが、時刻間の変化量 δ_{vx}, δ_{ax} は得ることが



- : 新たに現れた粒子
- : 対応付いた粒子
- : 推定されたベクトル
- ➔ : 実測されたベクトル

図-2 ドローネ三角形網による粒子情報の推定法
 aの粒子情報は1, 2, 3の粒子情報から内挿。
 bの粒子情報は2, 3, 4の粒子情報から内挿。

できない。その粒子情報を推定する必要がある。これが必要になるのは以下のケースである。

- ①追跡途中で新たに現れた粒子に対する粒子情報
- ②計算の第1ステップでの粒子情報

著者らのアルゴリズムでは上記の問題点に対して以下のような方法を適用している。以下、 x 方向のみで説明する。

追跡途中で新たに現れた粒子の場合

対応付いた粒子に対し、ドローネ三角形網を生成する。ドローネ三角形とはランダムに配置された多数の点のうち、ある3点を選びその3点で決まる円内に他の点が存在しないとき決定される三角形である。よりわかりやすく言うと、外縁部を除き、できる限り偏平でない三角形で全領域を覆うことに相当する。3次元領域を四角錐で覆う場合も理論的には全く同じになる。プログラムも容易に拡張できる。水文学の分野で用いられるティーセン図と対をなすものであり、ティーセン網に対して観測点を結ぶ三角形網に対応する。ドローネ三角形網の自動生成は第3著者のプログラム²²⁾を用いた。

新たに現れた粒子が、対応付いた点で形成されたドローネ三角形網のいずれかの三角形に含まれる場合、三角形の3つの頂点の粒子情報で決まる1次の内挿式(10)で粒子情報を与える(図-2参照)。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{vx}(t) &= a_{vx}X + b_{vx}Y + c_{vx} \\ \delta_{ax}(t) &= a_{ax}X + b_{ax}Y + c_{ax} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、係数 $a_{vx}, b_{vx}, c_{vx}, a_{ax}, b_{ax}, c_{ax}$ は対応付いた3つの粒子情報から決定される。

各画面の周辺部のドローネ三角形網の外縁部に現れた粒子については、全画面を $m \times n$ の領域に分割し、その領域内で対応付いた粒子の情報の平均値を求め、新たに現れた粒子が含まれる領域の平均値を粒子情報として与える。今回の追跡では 4×4 の領域(16分割)で平均値を求めた。

第1時刻と第2時刻の同一粒子の対応付け

第1時刻については全く粒子情報がないため、まず、粒子数を十分少なくし、最近法により大まかな速度場を求める。今回は粒子径を基準とし、第1, 2画面に対し、全体の粒子数の1割程度になるように閾値を設定し、閾値以上の粒子に対して最近法により対応付けた。これを用いて残りの9割の粒子については上記のドローネ三角形網を用いた内挿法により、初期情報を与える。

第1ステップでの粒子情報の内挿には相関法等を用いてもよい。

4. 矩型透明水槽中の3次元粒子位置計測アルゴリズム

(1) 既往の研究

画像による3次元計測にはステレオ法、光切断法、カラスリット法などがある。

本研究ではビデオカメラを用いたステレオ法による透明矩形水槽中の粒子3次元位置計測法について検討を行う。この場合、以下の技術が必要である。

- ①カメラ定数の同定
- ②空気、水、透明壁(ガラス、アクリル板など)の屈折率の違いを考慮した粒子光路の式の導出
- ③カメラの光軸方向の測定精度の向上
- ④複数台のカメラで得られた画像間での同一粒子の同定法
- ⑤カメラ画像上での粒子の重なり分離法
- ⑥ピンボケによる影響

以下、①~⑥についての既往の研究を取りまとめて示し、残された問題点を説明する。関連する既往の研究を表-4に示す。

①カメラ定数の同定

①のカメラ定数(写真測量学の分野ではカメラ標定要素と呼ばれる)にはカメラ自身の特性によって決まる内部定数と、カメラを設置した時に決まる外部定数がある。写真測量専用のカメラはその内部定数が高精度で測定、調整されており、内部定数は既知の値として与えられている。よって、外部定数(レンズ中心位置(自由度3)、カメラ姿勢(自由度3)、計6個の未知数)が決まれば3次元位置を測定できる。

ビデオカメラを用いた場合、一般的に測量専用器の

表-4 画像解析による3次元位置計測に関する既往の研究

計測対象	研究者	撮影装置	カメラ定数		空気、水、透明壁の屈折率の違いを考慮した粒子光路導出	備考	
			カメラ定数の同定	キャリブレーション法			
大気中3次元位置計測	村井ら ⁴⁹⁾	非測定用フィルムカメラ	(内部定数) 画像中心、レンズ歪系数、フィルムのたわみに関する係数(計10個) (外部定数) レンズ中心位置、レンズ光軸方向(計6個) (合計16個)	観測方程式を線形化し撮影した基準点と観測方程式から得られる点の残差の2乗和が最小になるようにカメラ定数を最適化	考慮なし	非測定用カメラ定数の設定について検討フィルム面とレンズ光軸は直交と仮定	
	Tsai ⁵⁰⁾	非測定用ビデオカメラ	村井らと同様な方法撮像素子の各受光素子の配置間隔とアナログ信号のサンプリング間隔の関係から実空間の画像座標へ変換する係数をカメラ定数に追加	内部定数については非線形方程式となるため繰り返し計算で決定外部定数については座標系の取り方により線形化し、既知点を撮影し、一意に決定	考慮なし	撮像素子からのアナログ信号をAD変換したデジタル画像の場合の計測法を提案ビデオ信号に変換される前の信号をAD変換	
透明壁を通した水中3次元位置計測	透明平面壁	吉野ら ⁵³⁾	非測定用フィルムカメラ	19個のカメラ定数(測定可能なものは測定)フィルム面とレンズ光軸のなす角を考慮フィルムは平面と仮定	3次元的な位置関係が精度良くセットされた標点板を撮影し、得られた画像から3次元空間に投影した座標と実測値の残差の2乗和が最小になるようにシンプレックス法により最適化	空気、透明平面壁、水の屈折率の違いを考慮して射影関数を導出	空気、透明平面壁、水の屈折率の違いを考慮した水中3次元粒子位置の計測法を提案
		西野ら ⁵⁴⁾	非測定用ビデオカメラ	村井らの方法	屈折率の違いによる見かけ上の位置を算出することでカメラ定数の最適化	空気、透明平面壁、水の屈折率の違いを考慮し、粒子光路をベクトル式で導出	フィルムカメラでも同様
		植村ら ⁵²⁾	非測定用ビデオカメラ	内部定数のみを考慮外部定数については、光学特性の等しいカメラを用い各カメラの視線が交わり、かつ、2台のカメラの画面は同一球面に接するようにセットする。	基準点を2台のカメラで撮影し、1台のカメラ上の粒子をもう1台のカメラに投影した直線上になるようにカメラ定数を修正	屈折率の違いの影響をレンズ中心位置を計算上移動させることで簡易的な計測法を提案	フィルムカメラでも同様
		著者ら ⁶⁾	非測定用ビデオカメラ	村井らと同様な方法ビデオ画像(NTSC信号)により位置を計測する場合、内部定数に縦横比を入れることを提案	基準点を撮影し、得られた画像の座標と投影された座標の残差の2乗和が最小になるようにPowell法で最適化	空気、透明平面壁、水の屈折率の違いを考慮し、物理的に理解しやすい形で粒子光路式を導出	
	任意明形状の	二宮ら ⁷⁾	非測定用ビデオカメラ	村井らの方法	村井らの方法水槽をセットする前に大気中で既知点を用いてキャリブレーションを行い、その後水槽をセット	任意の形状をした透明平面壁を通した粒子光路の導出法を提案	フィルムカメラでも同様

ように光学特性が高精度で調節、測定されていないので、カメラ定数にどのようなものを選べばよいか(カメラ定数の選択)、またそのカメラ定数をどのように測定すればよいか(カメラ定数のキャリブレーション法)が問題となる。

カメラ定数の同定に関しては表-4のような既往の研究がある。

②空気、水、透明壁の屈折率の違いを考慮した水中光路の式の導出

②の屈折率の違いを考慮した計測法を一般的な場合に適用するには複雑な計算が必要となる。この影響を

避けるため、西野ら²⁴⁾は水路の側壁の外側に補助水槽を設置し、その補助水槽中に防水加工されたレンズ部分を浸し、画像計測を行った例がある。また、小村ら⁵¹⁾は船のプロペラ周りの3次元流れ場を実測するため、船体外の水中に3台のビデオカメラ、ストロボ装置、レーザー放出装置を取付け計測を行った例がある。しかし、このように実際にカメラのレンズ部を水中に浸すことは一般的ではない。

計測対象を水理実験に限れば、一般的に透明平面壁を通した水中粒子3次元位置を計測するケースが多い。この場合、屈折率を考慮した計測法は比較的簡単なもの

となる。

水理実験を対象とし、空気、水、透明壁の屈折率の違いを考慮した粒子光路の導出に関する既往の研究についても表-4中にとりまとめている。

③カメラの光軸方向の精度向上および④複数台のカメラで得られた画像間での同一粒子の同定法

③のカメラの光軸方向の測定精度の向上には、3台以上のカメラを用いれば良い。単に精度の向上を目的にする場合は、3台のカメラ光軸の交角はできるだけ大きい方がよい。すなわち、各 90° に配置する場合が最も高精度となる。例えば、西野ら²⁴⁾は互いに約 60° に配置した3台のビデオカメラで測定している。

一方、カメラ光軸の交角が大きいと、2台のカメラで撮影された2つの画面上の粒子の配置が全く異なったものとなり、第④の問題点、すなわち粒子の対応付けに困難をきたす。これは、粒子数が多くなると非常に大きな問題となる。これを避けるためには、2台のカメラの光軸の交角はできるだけ小さい方がよい。最大でも 10° 以下とする必要がある。このとき視差が小さくなり、 z 方向の精度が大きく低下するので2台のカメラの光軸とほぼ直角な方向に3台目のカメラをセットするのが实际的である。本論文でのセッティングはこれを採用している。

⑤カメラ画像上での粒子の重なる分離法および⑥ピンボケによる影響

⑤、⑥については現在技術開発を続けている。

以上の水中粒子3次元位置計測に必要な技術のうち、

①～④について著者らの研究成果を示す。①については4.(2)節、②については4.(3)節、③、④については4.(4)節で説明する。

(2) カメラ定数の同定

a) カメラ定数の選択

本節では上記①のカメラ定数の選択について述べる。

ビデオカメラによって得られる画像から3次元位置を計測するには、カメラレンズの光学中心位置、レンズ光軸の方向、レンズ光学中心から撮像面までの距離(画面距離)、画像中心位置、レンズ歪等のカメラ定数を設定する必要がある。

(1) フィルム面のわん曲とレンズ光軸とフィルム法線方向のズレ角の影響

これまで、非測定用のフィルムカメラに対するカメラ定数の設定に関して村井ら、吉野らが検討を加えている(表-4参照)。

彼らの相対精度(測定領域に対する誤差の比)を比較すると、吉野らの計測で x, y, z 方向に対してそれぞれ0.00027, 0.00044, 0.0027で、村井らの方法(フィルムわん曲を考慮しない場合)ではそれぞれ0.00012,

0.00083, 0.00126とほぼ同程度の精度と言える。

両者の扱いで大きく異なる点の1つは、吉野らはフィルム面法線と光軸のなす角を考慮している点である。上記の結果から、これによる差はあまりないと予想される。また吉野らの測定結果でも、フィルム面法線と光軸のなす角は -0.17° と小さい値となっている。また、村井らのフィルム面のわん曲を考慮しない場合でも十分な精度が得られる。

ビデオカメラでは固体撮像素子は極薄いシリコン結晶膜上に形成され、それが非常に精密に作られたパッケージ上に張り付けられている。よって、フィルム面のわん曲に相当するもの影響はないと予想される。むしろフィルム面法線とレンズ光軸の平行関係の方が心配であるが、上記の吉野ら、村井らの計測結果の比較から、これについても今回は一旦無視して考えることにした。

(2) ビデオカメラを用いることによって生じる問題と縦横比

画面座標の読み取りに関して、村井らや吉野らはフィルムから実際に座標読取装置により座標を読み取っている。本研究では、ビデオ画像による計測を対象にしており、画像座標を読みとる場合問題が生じる。

測定用ビデオカメラではCCD撮像素子上の各画素の受光信号をそのままデジタル信号として出力し、どの画素がどれだけの光を受けたかわかるようにしているものもある。また、各画素の絶対的な位置がわかっている。よってこの場合、フィルム面から直接座標を読み取るのと同じ操作を電子計算機上で行うことになる。

一方、一旦NTSC信号に変換する場合は、NTSCの走査線間隔と、CCD上のフォトセンサーの鉛直ピッチや、NTSCのサンプリング間隔と、フォトセンサーの水平ピッチが異なる等のため、結像面上での絶対的な位置は不明となる。よって、以下のような工夫が必要となる。

Tsai⁵⁰⁾はNTSC信号に変換される前のアナログ画像信号をA/D変換し、サンプリング間隔と撮像素子のフォトセンサー配置間隔の関係から実際の画面座標を算出している。

本研究では、NTSC信号をA/D変換したデジタル画像のピクセル座標系をそのまま画面座標とした。信号変換過程はブラックボックスとした。このとき画面に歪が生じるとすれば、縦横の縮尺比に影響が出る可能性が最も高い。よって内部定数として新たに画面の縦横比 a を加えた。また、その際計算される画面距離 f は実際の値ではなく、NTSC信号をA/D変換した最終的なデジタル画像をレンズ光軸上に置いたと考えた場合の見かけ上の長さとなる。

(3) レンズ歪係数

レンズの半径方向と接線方向に分けられるが, Tsai⁵⁰⁾の論文によれば, 半径方向の歪が接線方向に比べて十分大きく, 接線方向の歪は無視できるとしている. よってレンズ歪に関しては画像中心からの距離 R に依存し, $X = X_d(1 + \kappa_1 R^2 + \kappa_2 R^4 + \dots)$ で表される. Tsai によれば, 半径の 2 乗の項のみ考慮すればよい. 著者らも Tsai に従い, 半径方向の歪のみについて考慮することにし, 次の補正式を用いる.

$$\left. \begin{aligned} X &= X_d(1 + \kappa_1 R^2) \\ Y &= Y_d(1 + \kappa_1 R^2) \\ R &= \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで, (X, Y) はレンズ歪を修正した画面座標, (X_d, Y_d) はレンズ歪を含む画面座標, κ_1 はレンズ歪係数である.

以上より, 本研究では以下のカメラ定数に関する仮定を用いた.

- (1) ビデオカメラの撮像面はレンズ光軸と直交し, 撮像面は平面である.
- (2) 画像の縦横比は変化する.
- (3) レンズ歪は半径方向のみに, 半径の 2 乗に比例して生じる.

以下に本研究でのカメラ定数を示す.

カメラ内部定数: 画面中心 (X_c, Y_c) , 画面距離 f , レンズ歪に関する係数 κ_1 , 画面縦横比 α
 カメラ外部定数: カメラレンズ中心 (x_0, y_0, z_0) , カメラ姿勢 $(\alpha_c, \theta_c, \phi_c)$

以上の仮定により, カメラ定数は 11 個となる.

b) カメラ定数のキャリブレーション法

本節では, 前節の①のうち, カメラ定数のキャリブレーション法について述べる.

カメラ定数のキャリブレーションは, 内部定数についてキャリブレーションを行った後に, 外部定数のキャリブレーションを行う.

キャリブレーション法としては, あらかじめ精度よく設置された既知の点を撮影した画像中の粒子位置と, 計算された画像上の粒子位置とのズレの自乗和が最小となるようにカメラ定数を最適化する. 最適化手法としては Powell 法を用いた.

まず, カメラ内部定数のキャリブレーション法について述べる.

カメラ内部定数は画像原点 (X_c, Y_c) , 焦点距離 f , レンズ歪係数 κ_1 , 画面縦横比 α の 5 つである. また, 測定に用いるレンズの中心位置および光軸方向を厳密に求めることができないため, 外部定数であるカメラレンズ中心 (x_0, y_0, z_0) と光軸の方向 $(\alpha_c, \theta_c, \phi_c)$ も未知数として同時に最適化する. 未知数の数は 11 個となる.

実際に 11 個を同時に最適化したところ, z_0, κ_1 と α が発散してしまい, 最適解が得られなかった. このため, κ_1 と α については, まず, それぞれ 0 と 1 において他の内部定数を決定した後, 最適化した.

よって, 最初に (X_c, Y_c) , f , (x_0, y_0, z_0) , $(\alpha_c, \theta_c, \phi_c)$ の計 9 個のカメラ定数をキャリブレーションで決定した. その後, 得られたカメラ定数を固定して, κ_1, α の 2 個のカメラ定数をキャリブレーションで決定した.

内部定数のキャリブレーションを行う場合は, 3 台のカメラとレンズの組み合わせ, およびレンズ焦点位置を測定時と同じに固定して行った.

カメラ内部定数のキャリブレーションの例は 4.(5) に示す.

カメラ外部定数のキャリブレーション法について以下に示す.

カメラの外部定数はカメラレンズ中心位置 (x_c, y_c, z_c) , カメラレンズ光軸の方向 $(\alpha_c, \theta_c, \phi_c)$ の 6 つである. キャリブレーション法は上記の方法と同様に既知点による最適化を Powell 法により行う. 外部定数のキャリブレーションはカメラを測定時の状態に設置し, 水槽中にセットした既知点を撮影する.

(3) 空気, 水, 透明壁の屈折率を考慮した粒子光路の式の導出

a) 画面粒子位置から水中粒子位置への投影

本節では前節の②のうち, 画像粒子位置から水中粒子位置への投影の導出について述べる.

本研究で用いる手法は基本的に吉野ら⁵³⁾と同じである (補遺 III 参照). 吉野らは画面上の粒子像から透明平面壁を通して水中のある平面への射影関数を一般化して導出している.

粒子光路導出の基本的な考え方を以下に示す (図-3 参照). カメラ定数は既知のものとする. カメラ定数の求め方については前節で述べた.

- (1) 座標系は透明平面壁に平行な面に x - y 平面をとり, その面と直角方向に z 軸をとる. 原点はカメラレンズ中心位置とする.
- (2) カメラの姿勢からレンズ光軸の方程式を求め, 光軸上にレンズ中心位置から画面距離 f の点を求める.
- (3) 画面と光軸とは直交すると仮定し, 画面の方程式を求める.
- (4) 画面上の 2 次元座標での粒子座標をカメラレンズ中心を原点とする 3 次元空間の座標系に変換する.
- (5) レンズ中心と (4) で求めた画像の粒子点を結ぶ線 (空気中での粒子光路と呼ぶ) が透明平面壁の空気側面と交わる点を求める.
- (6) 空気と透明平面壁の屈折率からスネルの法則により, 壁面中での粒子光路の方向を求め, (5) で求め

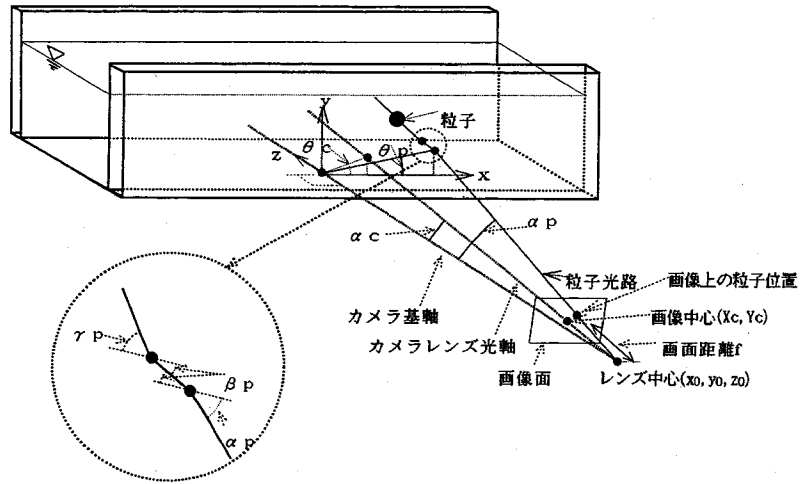


図-3 水中光路の導出

た点を通る直線の方程式を求める。求めた直線の方程式と透明平面壁の水側面との交点を求める。

(7)透明平面壁と水の屈折率から(6)と同様に水中での粒子光路の方程式を求める。この粒子光路上に粒子は存在する。

b) 水中粒子位置から画面粒子位置への投影

本節では前節の②のうち、水中粒子位置から画面粒子位置への投影の導出について述べる。

後述のカメラ定数のキャリブレーションや複数台のカメラによる水中粒子位置計測法では、逆に、水中の粒子位置が与えられたとき、空気中でのレンズ中心を通る光路を求める必要がある。原理的には3次元水中粒子位置から2次元画面座標系への変換は上記の手順を(7)から(1)に逆の手順で行えば求められる。ただし、次の問題が生じる。

粒子から出発しカメラ側に向かう水中光路を設定すると、これがガラス両面で屈折し、最終的にレンズ中心を通らなければならない。レンズ中心を通るという条件式は、水中光路と水側ガラス面の法線とのなす角 γ_p のtanの和や平方根で表されており(補遺(III-12)式参照)、水中光路の方向を陽な式で表すことができない。よって、繰り返し計算が必要となる。著者らはPowell法を用いて、上記の条件式を0と置いたときの左辺の2乗が最小となるように γ_p を決定するという方法を用いている。

繰り返し計算時の未知数として、どれを選ぶかは未知数の消去の仕方により変わるので、上記の γ_p である必要はない。また、繰り返し収束計算のための手法もPowell法である必要はない。これらの選択により、吉野ら、西野らと著者らの方法は見かけ上異なっている。

著者らはできる限り物理的イメージが把握しやすいという観点から、上記の未知数と手法を選択した。

(4) カメラの光軸方向精度向上と複数のビデオカメラで得られた画像間での同一粒子の同定法

a) 基本的な考え方

本節では前節の③、④について著者らの用いた方法を述べる。

カメラ1およびカメラ2はほぼ同じ方向からレンズ光軸が 10° 以下の角度で交わるように設置する。本手法では厳密に 10° にセットする必要はなく、レンズ光軸も交わる必要はない。カメラ1および2によって得られた画像上で、同一粒子は近接し、かつ輝度やピンボケの程度等もほぼ同じとなるので、その対応付けは大きな角度を持つ別方向から得られた画像での同定に比べれば簡単となる。

2画面間の同一粒子の同定には画像上の粒子位置だけでなく、粒子の大きさ、粒子輝度等の情報も用いる。それぞれ誤差を正規化するために1時刻前の同一粒子の同定で得られた各情報の標準偏差により正規化し、その2乗和(χ^2 値)を求め、 χ^2 検定により同一粒子である確率の評価を客観的に行う。 χ^2 値を評価規準に取り入れたのは著者らの独自の方法である。

カメラ1および2によって求められた粒子光線の組により、水槽中での粒子の3次元位置は求められる。奥行き方向の精度を増すためカメラ3をカメラ1,2のレンズ光軸にほぼ直交するように設置する。カメラ3の画像中の粒子との対応付けはあらかじめカメラ1,2で求めた粒子の3次元位置からカメラ3の画像へ投影し、その投影点回りにある検索領域を設け同一粒子の同定

を行う。この時も粒子位置だけでなく他の粒子情報も同定の評価に加える。原理的には1組の粒子光線は3本とも一点で交わる。しかし、実際には一点で交わることはない。本手法では3光線までの距離の和が最小となるような3次元空間での点を粒子位置と決めた。

b) 手順のまとめ

3台のビデオカメラから求められた画像から同一粒子を同定する手順を以下に示す。

- (1) カメラ1の画像上の粒子像に対して水槽中の粒子光線を求める。
- (2) (1)で求めた各粒子光線をカメラ2の画像上に投影する。この投影された粒子光線は短い線分となる。
- (3) (2)の線分回りに前時刻で求めた粒子位置のズレの標準偏差をk倍した範囲を検索領域として χ^2 値を求め、 χ^2_{\min} を仮の対応付いた粒子とする。 χ^2 検定により2画面間の同定を客観的に評価する。
- (4) 2本の水槽中の粒子光線から水槽中の粒子3次元位置を求め、カメラ3の画像に投影する。
- (5) 投影された点回りに前時刻の同定された点の粒子情報に関する誤差の標準偏差を用いて χ^2 値を求め、 χ^2 検定により同定を行う。

以上の操作をある時刻に得られた3枚の画像に対して行い、3次元の粒子位置を求める。

(5) キャリブレーションの例

4.(4)の手法により、実際にキャリブレーションを行ってみた。また、透明壁の厚さや屈折率、水の屈折率などの既知定数の誤差が最終的な計測誤差に与える影響について検討した。

ビデオカメラは東芝製1/2インチ CCD ビデオカメラ (IK-32K) を用いた。水槽は外形 10 cm 立方形アクリル製透明水槽である。アクリル板の厚さは 0.5 cm であった。水は水道水を用いた。屈折率はアッペ屈折率計により測定した。

内部定数 (X_c, Y_c), f , κ_1 , a のキャリブレーションは大気中で行った。水平微動装置にビデオカメラと、縦横とも 1.0 cm ピッチで直径 1.0 mm の点を 20 個 (4×5) 打った板を置き、距離を 0~10 cm の間で移動させた。外部定数は同じ板を水を満たした水中に入れて同定した。

次に精度検証のために、細い釣り糸 (直径 0.1mm 以下) に直径約 2mm の重りを 4 個つけ、水槽上方から吊るし、水中の 3 次元位置計測を行った。重りの位置は水平面で 4 箇所移動させ、計 16 点を撮影した。あらかじめ、重りの位置は正確に計測しておいた。

まず、カメラ 1 および 2 で 3 次元計測を行った。x-y 平面での平均的な誤差 (標準偏差) は 0.12 mm, z 方向 (奥行き方向) 0.58 mm と小さかった。一方、カメラ 1 および 2 から求めた z 方向位置とカメラ 3 からの求め

表-5 実験条件

	Theory	Symbol	z_0 (cm)	W_0 (cm/s)	θ_0 (°)	H_0 (°Ccm/s)	Pe
Case 1	———	●	9	0.610	0.139	0.0850	2719
Case 2	■	4	0.182	0.028	0.0507	490
Case 3	▲	4	0.209	0.037	0.0077	562
Adrian's Experiments			○ Pe = 3,864 ~ 12,152				

た水中粒子光路との誤差は最大 1.0mm 程度と大きくなった。その理由を調べる過程で次のようなことがわかった。

- ① 所与定数のうち、水および透明壁の屈折率の計測値が 0.02 程度の誤差があってもキャリブレーションの過程で調整されるので、最終的な計測精度にはほとんど影響しない。
- ② 透明壁の厚さに 0.5mm 程度の測定誤差があっても、計測精度にほとんど影響しない。
- ③ 水槽壁面の成す角度に計測誤差があると、最終的な計測誤差に影響する。

今回用いた水槽の場合は 90° から 0.5° 程度ずれていることが判明した。当初、これを 90° と仮定して計算したので、z 方向に最大 1.0mm 程度の誤差が生じた。

流速を測定するときは、計測座標値の差になるので誤差はほとんど生じない。しかしその流速が生じている点の座標値に誤差が生じる。上記の誤差は通常の計測では全く問題にならないが、壁面付近の流速測定などにおいては注意が必要となる。

5. 適用例

(1) 熱対流乱流場 (2 次元計測)

a) 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は底面寸法 25×25cm のガラス製矩形水槽である。水深は 4cm に固定し、上面は固定壁面である。底面には一定の熱量を供給するためラバーヒーターを設置した。壁面からの熱の放射を避けるため、底面と可視化を行う面以外は発泡スチロールで覆った。トレーサー粒子としては、芯物質が水、膜物質がポリスチレンとエチレン酢ビコポリマーの混合物 (比重 1.0 に調整) のマイクロカプセルを用いた²⁾。

撮影には東芝製 1/2 インチ CCD ビデオカメラを用いた。照明はレーザースリット光を用い、水槽の中心を通る鉛直 2 次元断面を照射した。

画像処理は画像処理装置 (NEXUS6510) とパーソナルコンピュータ (PC9801VM) を用い、粒子情報として粒子座標と粒子径を求めた。粒子追跡は EWS(SUN SPARC-STATION IPX) で行った。

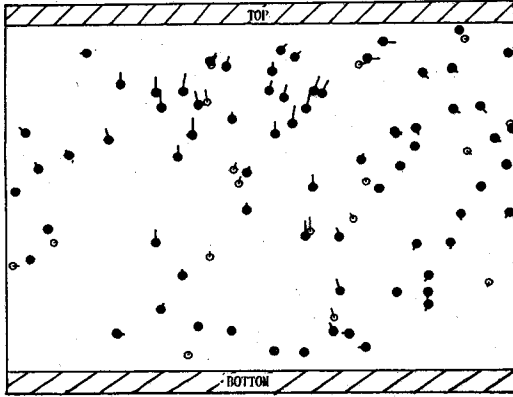


図-4 流速ベクトル分布図

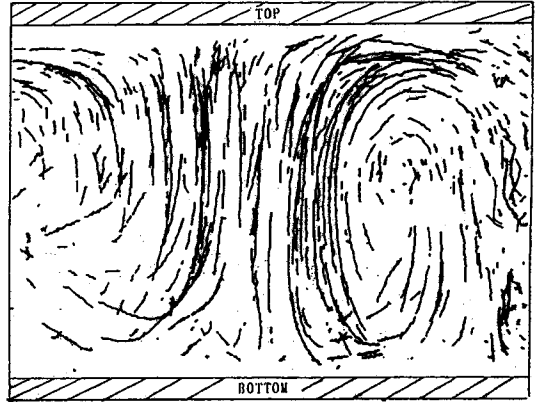


図-5 流速分布(図-4)を合成して得られた流跡線図

本実験における水理条件を表-5に示す。同表中、 $z^* = h$: 層厚、 $w^* = (\alpha H_s g h)^{1/3}$: 対流の代表速度、 $\theta^* = HS/w^*$: 温度の代表スケール、 H_s ($^{\circ}\text{C cm/sec}$): 底面から供給される単位面積あたりの温度フラックス、 α : 熱膨張係数、 g : 重力加速度、 $Pe = w^* z^* / \kappa_T$: ペクレ数、 κ_T : 熱拡散係数、である。

(z^* , θ^* , w^*) は対流層スケールの現象に着目した場合の長さ、温度、速度の外部変数である。一方、壁付近の底層に着目した場合には、各量に関して内部変数(z_0 , θ_0 , w_0)を代表量とした規準化を施す。ここで、 $z_0 = \kappa_T / w_0$, $\theta_0 = H_s / w_0$, $w_0 = (\alpha g H_s \kappa_T)^{1/4}$ 、と定義される。

画像のサンプリングは、対流層スケールでは1/3秒間隔で約30秒間、境界層スケールでは1/30秒間隔で約3.5秒間とした。

b) 追跡性能の定性的検討

図-4に流速ベクトル分布の例を示す。図中の●印は対応付いた粒子、○印は新たに現れた粒子である。

図-5に約30秒間の対応付いた粒子の軌跡を示す。中央部に底壁面から上壁面にかけて強い上昇流があるのがわかる。

図-6に画像から得られた全粒子数と追跡できた(連続する2枚の画面上で対応付いた)粒子数の時系列を示す。図中の△印は画像中の全粒子数、◇印は追跡できた粒子数を表す。横軸の数字はステップ数であり、1ステップ間は1/3秒である。今回用いたデータは2次元性が良く、すべてのステップを通して画像中の全粒子数に対する追跡できた粒子数の比は80~90%程度であった。

c) 乱れ速度に関する定量測定

マイクロカプセルトレーサー画像を粒子追跡して得られた乱流強度の水平・鉛直成分の分布(外部変数表示)を図-7a), b)に示す。LDVによるAdrianら⁵⁵⁾の

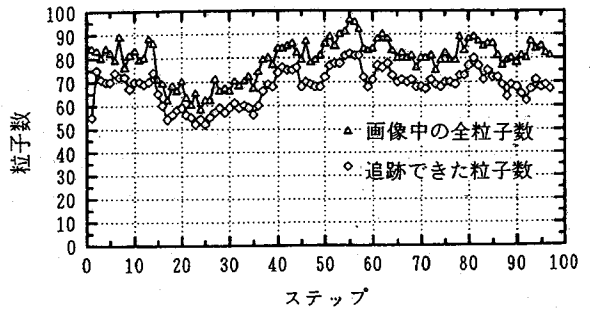


図-6 粒子追跡で対応付いた個数

実験値を○で併記している。第4著者による相似解⁵⁶⁾を曲線で示している。これは1/3秒間隔で約30秒間粒子を追跡した結果である。

d) 考察

外部変数表示した乱流強度の水平成分 σ_u (図-7a))は、 Pe の増加一すなわち対流強度の増加とともに増加している。表-5に示すように、Adrianの実験は約4,000以上の高ペクレ数に対して行われた。本実験は562~2,719の低いペクレ数に対して行った。本実験中ペクレ数が最も高い2,719の場合、水平乱れ強度の絶対値もAdrianの実験結果と良く一致している。これより、マイクロカプセルトレーサー粒子が熱密度流場においても良好に追跡し、粒子追跡による計測が妥当であることが推察される。

一般に熱対流を含む乱流の計測は非常に難しい。例えば、LDVを用いる場合でも、空気中から発射された2本のレーザー光線は、水中光路中で水の密度の揺らぎ

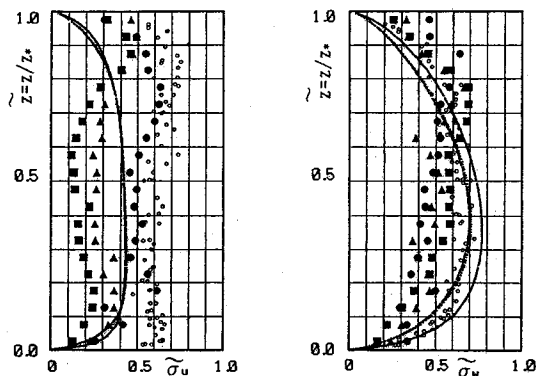


図-7 乱流強度分布図

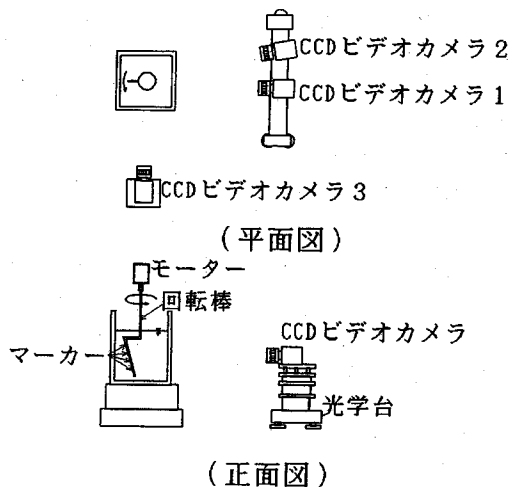


図-8 実験装置の概略図

のために僅かな方向変化を生じるので、これらを精密に水中で交差させることは難しい。このような理由もあって、第4著者は当初、理論解とAdrianの実験結果の差は実験技術の問題に起因する可能性が高いと考えていた。一方、文献2)の2.(2)c)で示したように水中の粒子から出発した光の、画像上で揺らぎの影響(シュリーレン効果)は水平方向については無視できる程度に小さい。今回のPTV計測結果とAdrianの計測結果がおおむね一致したことで、理論解に何らかの改良を加える必要がある可能性の方が高いことがわかった。

(2) 回転棒状の点の運動(3次元計測)

a) 実験装置

実験装置およびカメラの配置を図-8に示す。水槽は長さ10cm、幅10cm、深さ15cmの透明アクリル製矩形

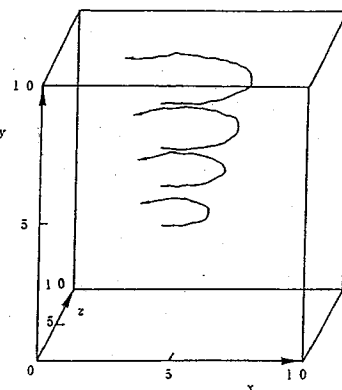


図-9 追跡結果 (単位: cm)

水槽である。追跡対象として図中に示すような形状をした回転棒上に5点を着け、その棒を水槽の水に完全に浸かるようにし、回転させた。3台のビデオカメラ(東芝製1/2インチCCDビデオカメラ)を写真のように配置し、水中移動物体の3次元位置を計測した。3台のビデオカメラは同期装置(TOSHIBA JK-SD16A)を用いて撮影のタイミングを同期させた。

b) 追跡結果

計測結果および追跡結果を図-9に示す。最下部の点は1台のビデオカメラで部分的にしか写っていなかったため追跡は4点で行った。

6. 結言

PTVのための新しい自動粒子追跡アルゴリズムとして確率統計理論に基づいてカルマンフィルターと χ^2 検定から成るアルゴリズムを提案した。ビデオ画像計測による透明矩形水槽中の3次元粒子位置計測法を再検討、整理した。それらのアルゴリズムを熱対流乱流場の2次元計測、攪拌槽内の回転棒上のマーカーの3次元追跡に適用した。

第2節では画像解析流速測定法(IV)の分類を行い、これまで提案されている計測法を紹介した。得られた成果を以下に示す。

- ① トレーサーによる画像解析速度計測法(IV)の分類法を提案した。
 - ② 濃度画像速度計測法(CIV)に関する既往の研究を取りまとめて紹介し、CIVの長所と短所を明らかにした。
 - ③ 粒子追跡法(PTV)に関する既往の研究を取りまとめて紹介し、PTVの長所と短所を明らかにした。
 - ④ 計測における誤対応の検出法とその修正法に関する既往の研究を取りまとめて表に示し、紹介した。
- 第3節ではPTVのための新しい自動粒子追跡アルゴ

リズムを提案した。得られた成果は以下の通りである。

- ⑤カルマンフィルターと χ^2 検定により画像中の多数の粒子を自動的に追跡させるアルゴリズムを提案した。これをKC法と名付けた。
- ⑥2次元シート照照明等で問題となる粒子の出入りに対して、ドローネ三角形網を用いた粒子情報の推定法を提案した。

第4節では上記の自動追跡アルゴリズムによる3次元計測に必要なビデオ画像による透明矩形水槽中の粒子の3次元位置計測法、およびカメラ定数のキャリブレーション法について述べた。得られた成果は以下の通りである。

- ⑦画像計測による3次元位置計測法に関する既往の研究を取りまとめて表に示し、残された問題点を明らかにした。
- ⑧水理実験を対象とした空気、透明壁、水の屈折率の違いを考慮した、水中粒子3次元位置計測のための粒子光路導出法を検討した。
- ⑨ビデオ画像を対象として位置計測を行う場合、カメラ内部定数に縦横比を加えることを提案した。
- ⑩複数のビデオカメラで得られた画像間での同一粒子の対応付けに粒子位置だけでなく、粒子の大きさや輝度等の情報も含めて χ^2 値を評価規準とすることを提案した。
- ⑪実際のカメラ定数のキャリブレーション法で生じた問題点を示し、実測での注意事項を明らかにした。

第5節では、第3節、第4節で提案した手法を用いて実測に適用した例を示した。

- ⑫2次元場計測の適用例として、熱対流乱流場の計測を行った。得られた結果はAdrianらによるLDVを用いた計測結果とよい一致を示した。
- ⑬3次元場への適用例として回転棒上のマーカーの追跡を行った。

補遺 I 画像解析速度計測法に関する用語

本論文で著者らが提案した画像解析速度計測法の分類に関する用語とその英語訳をまとめて示す。これらは以前から使われてきた手法であるが、用語としては、本論文ではじめて用いられるものがほとんどである。例えば、IVという略語もこれまで使われていない。表-1に示す分類の過程で、新たに用語を定義することが必要になった。

- IV:画像解析速度計測法 (Imaging Velocimetry)
- CIV:濃度画像速度計測法 (Concentration Image Velocimetry)
- CCIV:連続濃度画像速度計測法 (Continuous Concentration Image Velocimetry)

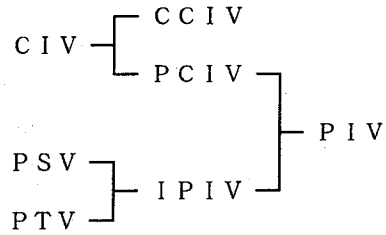


図-10 IVの関係

- PCIV:粒子濃度画像速度計測法 (Particle Concentration Image Velocimetry)
- IPIV:個別粒子画像速度計測法 (Individual Particle Image Velocimetry)
- PSV:流跡線法 (Particle Streak Velocimetry)
- PTV:粒子追跡速度計測法 (Particle Tracking Velocimetry), 略して粒子追跡法
- APT:自動粒子追跡 (Automatic Particle Tracking)
- PIV:粒子画像速度計測法 (Particle Image Velocimetry)=PCIV+IPIV
- SE:単一露光 (Single Exposure) Adrian¹¹⁾によれば Single Pulse
- ME:多重露光 (Multi Exposure) Adrian¹¹⁾によれば Multiple Pulse
- SS:凍結撮影 (Short Shuttering)
- LS:流し撮影 (Long Shuttering)
- SF:単一画像 (Single Frame)
- MF:連続画像 (Multi Frame)

補遺 II IVへのカルマンフィルターの適用の経緯

カルマンフィルターと χ^2 検定を用いた自動粒子追跡のアイデアを、1989年2月の水工学論文集に投稿する予定であった。しかしながら、概要審査の段階で委員会から課題(乱流)と異なるので次年度の画像計測の課題で出すようにとの指摘があった。1年後の1990年2月の水工学論文集³⁾には掲載された。現在のところ、1990年でも、いわゆるフルペーパーとしてはこの論文がIVにカルマンフィルターを導入した最初の論文である。その後文献調査の結果、1989年8月の日本機械学会流体工学部門講演会で、家合らがカルマンフィルターを用いたAPTのアイデアを口頭発表していることがわかった。研究においてはオリジナリティが重要であると考えているので、以上の経緯を補足した。

補遺 III 透明矩形水槽中の水中粒子 3 次元位置計測法

(1) 概要

著者らは独自に透明平面壁を通した水中粒子の 3 次元位置をビデオ画像により計測する手法を開発した⁶⁾。その後、文献調査を行ったところ吉野ら⁵³⁾によって同様な考え方で水中粒子 3 次元位置を計測する手法が提案されていることがわかった。

吉野らの方法で用いられる式の導出では、射影関数の考え方に基づいており式の導出過程で示されている関係式が持つ物理的イメージを理解できない部分があった。

通常の論文では他の研究者が既に導出した式と同様な式の導出について紙面を割かないが、今後他の研究者や技術者による本手法の実用化の過程で式の追跡は不可欠であるので、著者らの導出過程を以下に示す。

(2) 基本的な考え方

光路は均質、等方性の媒体の中では直進する。例えば、空気中のような均質、等方性媒体中での粒子のカメラ画像上での像は粒子とカメラレンズ中心を結ぶ直線が結像面と交わる位置となる(以下、粒子からレンズ中心を通り、結像面までに到る光路を粒子光路と呼ぶ)。また、空気、透明壁、水のそれぞれでの媒体は均質、等方性であるとし、光路は空気-透明壁、透明壁-水の界面のみで屈折し、各媒体中では直進するものとする。

図-3 に示すような矩形の水槽(水路等も含む)中の粒子位置とカメラ画像上での位置との関係について考える。レンズ中心から透明平面壁に下ろした垂線をカメラ基軸、レンズ中心と結像面中心とを結んだ直線をレンズ光軸とする。 x - y 平面を透明壁と平行に取り、 z 軸をカメラ基軸と平行に取る。

カメラ画像と実空間との関係を求めるのに必要なカメラの条件(以下、カメラ定数と呼ぶ)は、レンズ中心位置 (x_0, y_0, z_0) 、方向 $(\alpha_c, \theta_c, \phi_c)$ 、焦点距離 f 、画像中心 (X_0, Y_0) 、レンズ歪 κ であり、後述の方法によりあらかじめキャリブレーションにより求めるものとする。

1つの粒子光路は、水中、透明壁中、空気中の3本の直線で表され、その空気中の粒子光路と結像面との交点がカメラ画像上での粒子像の位置となる。水、透明壁、空気の屈折率が分かれば、それぞれの媒体中での粒子光路の関係は求められる。つまり、画像上での粒子像位置から実空間の水中での粒子光路が求められ、また水中の粒子位置から画像上の粒子像の位置が求められる。

以下の説明では画像座標と3次元実座標を区別するため、画像座標は大文字、3次元実座標は小文字で表した。

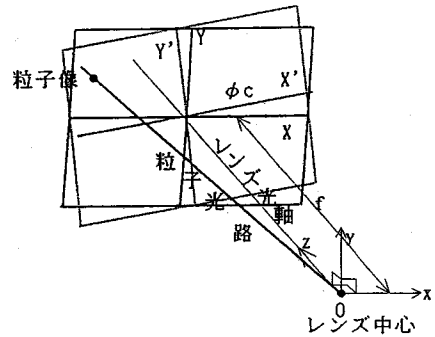


図-11 結像面と粒子光路の関係

(3) カメラ画像上の粒子像から透明平面壁を通した水中粒子 3 次元位置への変換

a) 粒子像の画像座標から実空間への変換

画像座標での粒子位置 (X_{Fp}, Y_{Fp}) が与えられた場合、水槽中の粒子光路を求める。以下の説明では計測対象のデカルト座標系からレンズ中心位置へ平行移動したデカルト座標系で示す。最終的に求めた水中粒子の光路の方程式は計測対象の座標系に変換する必要がある。

まず、結像面のレンズ光軸回りの回転角 ϕ_c を考慮し、カメラ画像上での粒子位置を3次元位置に変換する(図-11 参照)。

$$\begin{Bmatrix} X'_{Fp} \\ Y'_{Fp} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\phi_c) & \sin(-\phi_c) \\ -\sin(-\phi_c) & \cos(-\phi_c) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{Fp} \\ Y_{Fp} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} x_{Fp} = X'_{Fp}e_{xx} + Y'_{Fp}e_{yx} + x_{Fc} \\ y_{Fp} = X'_{Fp}e_{xy} + Y'_{Fp}e_{yy} + y_{Fc} \\ z_{Fp} = X'_{Fp}e_{xz} + Y'_{Fp}e_{yz} + z_{Fc} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

ここで、 $e_x = (e_{xx}, e_{xy}, e_{xz})$ 、 $e_y = (e_{yx}, e_{yy}, e_{yz})$ はそれぞれ画像上の X, Y 軸方向の3次元空間での単位ベクトル、 (x_{Fc}, y_{Fc}, z_{Fc}) はレンズ光軸と結像面との交点である。

b) 空気中での粒子光路

空気中の粒子光路はレンズ中心と結像面上の粒子像を結んだ直線で表され、一意に次式で表される(図-12 参照)。

$$\frac{x}{\tan \alpha_p} = \frac{y}{\tan \alpha_p \tan \theta_p} = \frac{z}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \quad (\text{III.3})$$

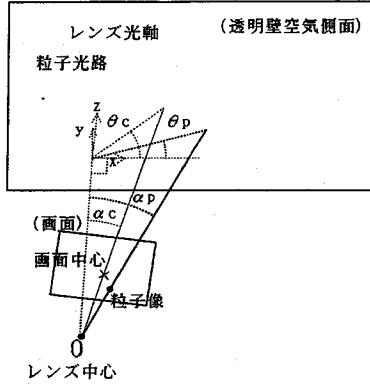


図-12 空気中の粒子光路

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p &= \tan^{-1} \frac{\sqrt{x_{Fp}^2 + y_{Fp}^2}}{z_{Fp}} \\ \theta_p &= \tan^{-1} \frac{y_{Fp}}{x_{Fp}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.4})$$

ここで、 (x_{Fp}, y_{Fp}, z_{Fp}) 結像面上の粒子像の座標である。

空気中の粒子光路は水槽透明壁の前面まで直進する。 (x_{Gf}, y_{Gf}, z_{Gf}) は、空気中の粒子光路と透明壁空気側面との交点であり、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_{Gf} &= L_a \frac{\tan \alpha_p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \\ y_{Gf} &= L_a \frac{\tan \alpha_p \tan \theta_p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \\ z_{Gf} &= L_a \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5})$$

ここで、 L_a はレンズ中心から透明壁までの距離である。

c) 透明壁面中での粒子光路

空気中の粒子光路は透明壁と空気の屈折率の違いにより進路を曲げられ、透明壁内を直進する(透明壁中の粒子光路)。透明壁中の粒子光路は空気と透明壁の屈折率、透明壁への空中粒子光路の入射角度および交点からスネルの法則により決定される(図-13 参照)。

$$\frac{x - \frac{r_{Gf}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}}{\tan \beta_p} = \frac{y - \frac{r_{Gf} \tan \theta_p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}}{\tan \beta_p \tan \theta_p} = \frac{z - z_{Gf}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \quad (\text{III.6})$$

上式中の β_p はスネルの法則により次式で表される。

$$\tan \beta_p = \frac{\frac{n_g}{n_a} \sin \alpha_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_a}{n_g}\right)^2 \sin^2 \alpha_p}} \quad (\text{III.7})$$

ここで、 n_a :空気の屈折率(1.003)、 n_p :透明壁の屈折率である。

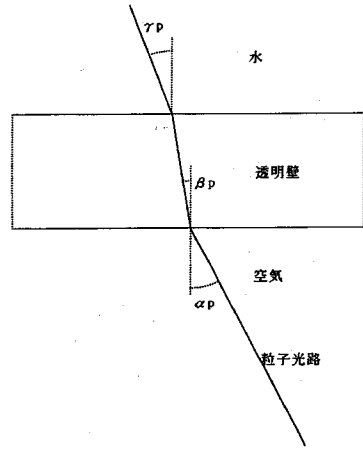


図-13 透明壁面中の粒子光路

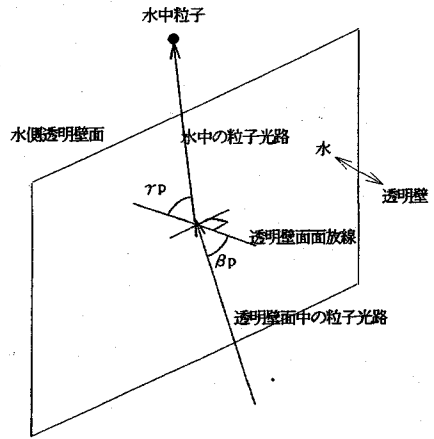


図-14 水中の粒子光路

(x_{Gr}, y_{Gr}, z_{Gr}) は、空気中の粒子光路と透明壁水側面との交点であり、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_{Gr} &= \frac{L_g \tan \beta_p + r_{Gf}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \\ y_{Gr} &= \frac{\tan \theta_p (L_g \tan \beta_p + r_{Gf})}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \\ z_{Gr} &= L_g \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.8})$$

d) 水中での粒子光路

同様に透明壁中から水中粒子光路も決定され、次式で表される(図-14 参照)

$$\frac{x - \frac{r_{Gr}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}}{\tan \beta_p} = \frac{y - \frac{r_{Gr} \tan \theta_p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}}{\tan \beta_p \tan \theta_p} = \frac{z - z_{Gr}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \quad (\text{III.9})$$

上式中の γ_p はスネルの法則により次式で表される。

$$\tan \gamma_p = \frac{\frac{n_w}{n_p} \sin \beta_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_w}{n_p}\right)^2 \sin^2 \beta_p}} \quad (\text{III.10})$$

ここで、 n_p :透明壁の屈折率、 n_w :水の屈折率(1.333)である。

以上の式により、画像上の粒子位置から水槽中の粒子光路が一意に決定される。

(4) 水槽中の粒子3次元位置からカメラ画像への変換

上記(3)の場合と逆に、水槽中の粒子位置(x_p, y_p, z_p)が与えられた場合、画像上の粒子位置を求める。

空気中での粒子光路が式(3)で表され、その光路と結像面との交点が画像上での粒子位置となり、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_{Fp} &= \frac{x_{Fc} \tan \alpha_c + y_{Fc} \tan \theta_c \tan \alpha_c + z_{Fc} \sqrt{1 + \tan^2 \theta_c}}{\tan \alpha_c + \tan \theta_c \tan \alpha_c \tan \theta_p + \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_c} \sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}{\tan \alpha_p}} \\ y_{Fp} &= \tan \theta_p x_{Fp} \\ z_{Fp} &= \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}}{\tan \alpha_p} x_{Fp} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.11})$$

水槽中の粒子位置から画像上の粒子位置を求めるには、 α_p, θ_p がわかればよい。 θ_p は屈折率の影響を受けないので、粒子の水中3次元位置から求めることができる。屈折率の影響を受ける α_p は γ_p が決まればスネルの法則により決まる。しかし、レンズ中心を通るという条件を満たす γ_p を与えられた水中3次元位置からだけでは求めることができない。よって、次式を満足するような α_p を繰り返し計算で求めなければならない。

$$\sqrt{x_p^2 + y_p^2} = L_a \tan \alpha_p + L_g \tan \beta_p + (z_p - L_a + L_g) \tan \gamma_p \quad (\text{III.12})$$

α_p と β_p, γ_p の関係は式(III.7), (III.10)で求められるので、実質的には未知数は α_p 1つとなる。

参考文献

- 1) 江藤剛治, 竹原幸生: 高速ビデオカメラの現状と水工学への適用, 土木学会論文, No.533/II-34, 1996.
- 2) 江藤剛治, 竹原幸生, 横山雄一, 井田康夫: 水流の可視化に必要な関連技術の開発 - 比重整合・屈折率整合・多波長計測 -, 土木学会論文集, No.533/II-34, 1996.
- 3) 江藤剛治, 竹原幸生: 多数のトレーサ粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発, 水工学論文集, 第34巻, pp. 689-694, 1990.
- 4) 竹原幸生, 江藤剛治: 自動粒子追跡アルゴリズム, 可視化情報, Vol. 12, Suppl. No. 1, pp. 79-82, 1992.
- 5) 竹原幸生, 江藤剛治, 道奥康治, 島崎正則: 自動粒子追跡アルゴリズムの改良とその適用, 可視化情報, Vol. 13, Suppl. No.2, pp. 115-118, 1993.
- 6) 竹原幸生, 江藤剛治, 道奥康治: 粒子追跡による流れ計測のための新技術の開発, 水工学論文集, 第38巻, pp.689-696, 1994.
- 7) 二宮尚, 秋山光鷹, 杉山均: 三次元画像処理流速計による複雑形状流路内流れの測定, 可視化情報, Vol.15, No.59, pp.46-51, 1995.

- 8) 小林敏雄: Particle-Imaging-Velocimetryの実用化に関する調査研究, 平成3年度科学研究費補助金(総合研究(B))研究成果報告書, 1992.
- 9) 山本富士夫, 植村知正: PIVの基礎と応用, 混相流, Vol.6, No.1, pp.65-79, 1992.
- 10) 奥野武俊: 流場計測技術と画像処理, 造船学会誌, 第716号, pp.9-15, 1990.
- 11) Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp.261-304, 1991.
- 12) 津田宜久, 小林敏雄, 佐賀徹雄: 画像処理を用いた高Re流れの可視化システムの開発, 可視化情報, Vol.11, Suppl.No.1, pp.181-184, 1991.
- 13) 例えば, 小林敏雄, 佐々木伸夫, 石原智男, 佐賀徹雄, 上村康幸: 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れへの適用, 流れの可視化, Vol. 2, Suppl., pp.41-46, 1982.
- 14) 例えば, 箕原亮: トレーサ画像の相関処理による流速測定, 流れの可視化, Vol.3, No.10, pp.189-192, 1983.
- 15) 清水雅夫, 桑島茂純: 相関法を用いたリアルタイム多点同時速度ベクトル計測システムの開発, 可視化情報, Vol.11, Suppl. No.1, pp.165-168, 1991.
- 16) 例えば, 奥野武俊, 中岡淳: 可視化画像の時空間微分を利用した流場の画像計測, 関西造船協会誌, 第215号, pp.69-74, 1991.
- 17) 例えば, 奥野武俊: フーリエ変換を利用した画像解析による流場の画像計測, 関西造船協会誌, 第208号, pp.61-67, 1988.
- 18) 大場光太郎, 石原正, 猪岡光: 適応カルマンフィルタによる速度推定法, 可視化情報, Vol.12, No.45, pp.52-55, 1992.
- 19) 川橋正昭, 細井健司: デュアルビームスチープ・レーザスペックル流速計の開発, 可視化情報, Vol.10, Suppl.No.1, pp.19-22, 1990.
- 20) 奥野武俊, 山口英明: レーザースペックル写真法による流場計測について, 関西造船協会誌, 第210号, pp.27-33, 1988.
- 21) 小林敏雄, 石原智男, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 斎藤誠: 画像処理に適した流れの可視化法, 流れの可視化, Vol. 3 No.10, pp.193-198, 1983.
- 22) 村田滋, 串山正, 木瀬洋, 前田貴史: 1枚の流跡線画像における流れ方向自動判定法, 機械学会論文集, 第524号B編, pp.157-162, 1990.
- 23) Chang, T. P. and Tatterson, G. B.: An automated analysis method for complex three dimensional mean flow field, *Proc. of ISFV3*, pp.266-273, 1983.
- 24) 西野耕一, 笠木伸英: 三次元画像処理流速計による二次元チャンネル乱流の乱流統計量の測定, 日本機械学会論文集(B編), Vol.56, No.525, pp.1338-1347, 1990.
- 25) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄: 2値化相関法-粒子追跡法の高速度画像解析アルゴリズム-, 可視化情報, Vol.10, No.38, pp.58-64, 1990.
- 26) Nishino, K. and Torii, K: A fluid-dynamically optimum particle tracking method for 2-D PTV; Triple pattern matching algorithm, *Transport Phenomena in Thermal Engineering*, Begell House Inc. Publishers, pp1411-1416, 1993.
- 27) 家合克典, 小河原加久治, 飯田誠一: カルマンフィルターを用いた画像処理による三次元流れ計測, 日本機械学会論文集(B編), Vol.57, No.542, pp. 308-315, 1991.
- 28) 大山龍一郎, 高木敏幸, 築地孝昭, 中西祥八郎, 金古喜代治: 遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた流れ場の速度計測-粒子追跡に関する考察-, 可視化情報, Vol.13, Suppl. No. 1, pp.35-38, 1993.
- 29) 岡本孝司, 班目春樹, 塩谷隆二: エキスパートシステムを用いた粒子画像流速測定法, 可視化情報, Vol. 11 Suppl.

- No.1, pp.189-192, 1991.
- 30) 木村治央, 木村一郎, 高森年: 相関を利用した流れの画像計測-過誤の速度ベクトルの補正処理-, 流れの可視化, Vol.7, No.26, pp.297-300, 1987.
 - 31) 藤田一郎, 河村三郎: 相関法における異常ベクトルの検出と流速補正の新技术, 可視化情報, Vol.12, Suppl. No.1, pp.43-46, 1992.
 - 32) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 逐次棄却法を用いたパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報, Vol. 13, Suppl. No. 2, pp.119-124, 1993.
 - 33) 木村幸茂, 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人, 吉川: トレーサ粒子追跡による気流速度の三次元計測-発散量を判断基準とした誤ベクトル削除-, 可視化情報, Vol.10, Suppl. No.2, pp.91-94, 1990.
 - 34) 山本富士夫, 植村知正, 小川邦康, 近江和夫: 二値化相関法 PTV の正対応率と測定精度の向上, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 57 巻, pp.3414-3419, 1990.
 - 35) 木下良作: 「写真測量法」による河川および模型水路の流速測定, 流れの可視化, Vol.1, No.3, pp.262-269, 1981.
 - 36) 木下良作, 上野鉄男, 宇民正: 相関法による洪水流航空写真の画像解析, 可視化情報, Vol. 11, Suppl. No.1, pp.161-164, 1991.
 - 37) 宇民正, 上野鉄男: 写真画像処理による洪水流解析, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.1-17, 1994.
 - 38) 中川博次, 福津家久, 佐伯賢一, 阿部崇: Particle-Image Velocimetry(PIV) による複断面開水路流れの流速計測, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.697-702, 1994.
 - 39) 藤田一郎, 川村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.733-738, 1994.
 - 40) 長尾昌朋, 神保誠二, 沢本正樹: トレーサ追跡法と相関法を用いた孤立波砕波の流速分布測定, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.161-165, 1994.
 - 41) 真野明, 神尾成也: 相関法による砕波気泡混入領域の流動解析, 土木学会論文集, 第 423 号/II-14, pp.171-180, 1990.
 - 42) 佐藤慎司, 久保田洋次: ビデオ画像を用いた砕波点付近の浮遊漂砂現象の解析, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.251-255, 1991.
 - 43) 小林智尚, 日野幹雄, 疋田賢七, 萩原秀規: フーリエ変換を用いた画像処理による砕波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.56-60, 1992.
 - 44) 片山徹: 応用カルマンフィルター (第 7 版), 朝倉書店, 1989.
 - 45) Kalman, R.E. and Bucy, R.C.: New results in linear filtering and prediction theory, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. 82D, No. 1, pp.95-108, 1961
 - 46) 日野幹雄: 水文流出予測へのカルマン・フィルター理論の適用, 土木学会論文報告集, 第 221 号, pp.39-47, 1973.
 - 47) 江藤剛治, 西村克己: 低平地都市河川網における動的応答解析の一手法, 土木学会論文報告集, 第 271 号, pp.27-35, 1978.
 - 48) 保谷忠男: 写真測量, (社)日本測量協会, 190pp., 1993.
 - 49) 村井俊治, 奥田勉, 中村秀至: 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, 29, 6, pp.165-209, 1981.
 - 50) Tsai, R. Y.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3, 4, pp.323-344, 1987.
 - 51) 小村隆士, 山口一, 加藤洋治: 多点 TV 撮影による流速測定法に関する研究-第 2 法 実船伴流分布の計測-, 日本造船学会誌, 第 170 号, pp.33-44, 1991.
 - 52) 植村知正, 臼井尚, 山本富士夫, 井口学: 3 次元 PTV のためのトレーサ粒子の位置計測法に関する考察, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.920-68, pp.337-339, 1992.
 - 53) 吉野章男, 若良二, 来住裕, 水川博史: ガラス窓越しに見た水中被写体の写真測量-可視化三次元流速測定のための基礎-, 写真測量とリモートセンシング, 27, 6, pp.11-22, 1988.
 - 54) 西野耕一, 山根徹, 鳥居薫: 3 次元 PTV のカメラ校正, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.920-68, pp.334-336, 1992.
 - 55) Adrian, R.J. et al: Turbulent thermal convection in wide horizontal fluid layers, *Experiments in Fluids*, Vol.4, pp.121-141, 1986.
 - 56) 道奥康治, 島崎正則: 熱対流場における熱輸送と乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.27-35, 1994.
 - 57) (株) 応用計測研究所: Quick MAG System カタログ
 - 58) Etoh, T. and Takehara, K.: Development of a new algorithm and technologies for PTV, *Proc. of the International Workshop on PIV - Fukui '95*, pp.91-106, 1995.
 - 59) Sata, Y. and Kasagi, N.: Improvement toward high measurement resolution in three-dimensional particle tracking velocimetry, *Proc. of ISFV6*, pp.792 - 796, 1992.
 - 60) Kasagi, N. and Sata, Y.: Recent developments in three-dimensional particle tracking velocimetry, *Proc. of ISFV6*, pp.832 - 837, 1992.
 - 61) 笠木伸英: 三次元 PTV, 日本機械学会講習会教材, No.930-19, pp.23 - 36, 1993.

(1995. 4. 10 受付)

DEVELOPMENT OF A NEW ALGORITHM FOR PTV

Kohsei TAKEHARA, Takeharu ETOH, Shigeru MURATA and Kohji MICHIOKU

A new automatic particle-tracking algorithm for PTV is developed, which consists of Kalman's filtering theory and the Chi-square test. In addition, Delaunay triangulation method is employed for interpolation of particle-information of newly appeared particles. The algorithm is applied for measurements of thermal convection.