

II-188

透明矩形水槽中の粒子3次元位置の計測法

近畿大学理工学部 正員 江藤剛治

近畿大学理工学部 正員○竹原幸生

1. はじめに

ビデオ画像による流れ計測法は2次元空間の計測が可能であり、さらに他の計測法に比べ3次元空間計測への拡張が容易である。今後ビデオ画像を用いた流れ計測法が主流となると考えられる。著者らはPTVのための自動粒子追跡手法の1つとしてカルマンフィルタと χ^2 検定からなるアルゴリズムを開発し、熱対流乱流場等の2次元場の計測に適用し、その有用性を示した。本アルゴリズムは3次元場の適用に関しても同様に行えるものである。

画像による粒子の3次元位置の一般的な計測法としてステレオ法がある。ステレオ法とは、2台のビデオカメラ（カメラの位置、回転、方向、焦点距離等は既知）で撮影した画像から同一粒子を同定し、三角測量の原理で粒子の3次元位置を求める方法である。

現在良く行われているスリット断面の2次元場の計測では、ある平面だけを撮影しており、奥行き方向への変化がないためキャリブレーション時に空気-透明壁-水の屈折率の変化の影響も入れて一担変換係数を求めておけば、屈折率の変化は問題とならない。しかし、ステレオ法では三角測量の原理で3次元位置を計測するため、奥行き方向の屈折率の変化で粒子位置の方向が曲げられ、測定精度に大きな影響を及ぼす。

一般的な空気中での撮影では屈折率の変化はあまり問題にはならず、画像上の位置と3次元空間での位置の関係は陽な方程式系で表される。しかし水理実験等のように、空気中から透明壁を通して水中の粒子位置を求める場合、陰な方程式系となる。透明壁が平板の場合、一般的な関係式が簡単化されるため、画像上の位置と3次元空間での位置関係の式を整理しておくのは実用上便利である。

本報告ではステレオ法により、平面透明壁を通した水中粒子の3次元位置を屈折率の違いを考慮に入れ精度よく計測する手法を提案する。

2. 本手法の特長

本手法ではステレオ法を用い、以下の点を考慮した手法を提案する。

- (1)同一粒子の同定法、(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手法、(3)カメラ画像上での粒子の重なるの分離法

(1)は粒子数が少ない場合（数個程度）問題とならないが、粒子数が増えてくると（数十個以上）になると非常に困難となる。これに対処する方法として3台のビデオカメラを用い、その精度を向上させる方法がある。本手法でも3台のビデオカメラを用い、以下のような考えによりカメラをセットする。

2台のビデオカメラは立体視で用いる撮影法と同様に、カメラ光軸の交差角が 10° 以下の位置でほぼ同じ方向から撮影する。得られた2枚の画像の粒子分布パターンは類似したものとなり、同一粒子の同定は比較的簡単に行われる。この2台のビデオカメラだけでも粒子の3次元位置を決定することができるが、奥行き方向の精度は悪く、カメラ光軸に対して直角方向の精度に比べ1桁精度が落ちる。奥行き方向の精度を上げるため、もう1台のカメラで2台のカメラの光軸に対してほぼ直角方向から対象を撮影する。

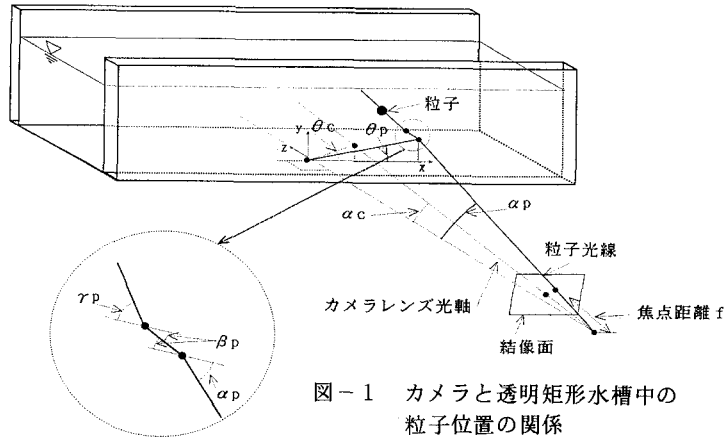
(2)の屈折率の違いを考慮した計測法は、一般的な場合に適用するには複雑な計算が必要となる。しかし、水理計測における透明平面壁を通した水中粒子位置の計測にのみ限定すれば、屈折率を考慮した計測法は比較的簡単なものとなる。

(3)の画像上での粒子の重なりは1台のカメラ画像上で生じていても、他のカメラ画像上では生じていない場合が多い。もし、1台の画像で重なりが生じたとしても、その粒子画像が重なっているかどうか判断できれば計測が可能となる。粒子画像の重なるの可能性を得られた粒子の縦横比の平均値からのズレ、輝度分布のピーク等の情報を用いて客観的に判断する。

3. 矩型透明水槽中の粒子位置とカメラ画像上での粒子位置の関係

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線を粒子光線と呼ぶ）。また、空気、透明壁、水のそれぞれの媒体は均質、等方性であるとし、光線は空気－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－1 カメラと透明矩形水槽中の粒子位置の関係

図－1 に示すような水槽（ここでは水路等も含む）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。カメラの画像と実空間との関係を求めるのに必要な条件（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(α, θ, ϕ)、焦点距離 f 、レンズ歪 κ 、画像中心位置(X_0, Y_0)であり、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。カメラ定数に関しては、カメラの特性（設置条件には無関係）である内部定数(f, κ, X_0, Y_0)と設置条件により決まる外部定数($x_0, y_0, z_0, \alpha, \theta, \phi$)がある。今回のキャリブレーションでは内部定数と外部定数とは別個に行った。キャリブレーション法としては、あらかじめ正確に3次元位置の分かっている対象物を撮影し、カメラ定数を変数とし実測の画像位置と本手法で推定される画像位置との誤差が最小となるように決定する。最小値の求め方としては Powell 法を用いた。

粒子光線は、水中、透明壁中、空気中の3本の直線で表される。空気中の粒子光線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線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線が求められ、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。

具体的な水中粒子位置の3次元位置計測法は以下の通りである。

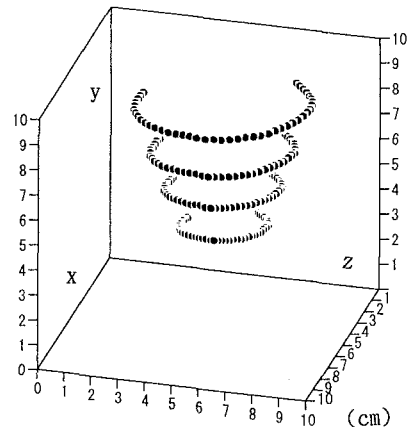
(1) ほぼ同方向から計測している2台のカメラ画像を用いる。

1台のカメラ画像の粒子位置から一旦水中の粒子光線に変換し、さらにもう1台のカメラ画像上へ投影を行う。得られた粒子光線画像の周りがある範囲の粒子像に対して同一粒子の判定を行う（同一粒子の同定）。客観的な同定法として粒子光線像からのズレばかりでなく、粒子径、輝度のピーク等の情報のズレを1ステップ前に得られた全画面の誤差の平均値で正規化し、判断する。

(2) 2台で得られた3次元粒子位置を残りのカメラ画像上に投影し、上記と同様な手法で同一粒子を同定する。

4. 適用例

実験には、縦 10 cm、横 10 cm、深さ 15 cm の透明アクリル製水槽を用い、水中の回転体上の点を追跡した。図－2 は上記の3次元位置計測法を用い水中の3次元位置を計測し、その結果を自動粒子追跡ソフトで追跡した結果である。



図－2 3次元粒子追跡結果の例