

3次元 PTV システムの開発に関する基礎的研究

Basic study on a development of 3 dimensional PTV system

北海道大学工学部	○学生員	奥村 悠樹	(Yuhki Okumura)
日本データサービス(株)	正 員	加藤 雅也	(Masaya Kato)
北海道大学工学研究科	正 員	渡部 靖憲	(Yasunori Watanabe)
北海道大学工学研究科	フェロー	佐伯 浩	(Hiroshi Saeki)

1. はじめに

流体運動を解析する手法には、理論解析、物理実験（現地計測を含む）、数値実験等がある。それらの手法のうち、近年のコンピュータ性能の飛躍的な向上を背景として、ナヴィエ・ストークス方程式に基づく数値実験による流体解析が頻繁に行われるようになってきている。海岸工学分野においても、砕波や構造物周辺の流動構造等の比較的複雑な流れ場に対して、三次元ラージ・エディ・シミュレーション等を適用した解析が行われている。しかしながら、数値計算手法が高度化する一方で、その検証のために必要となる実験、あるいは現地観測による実測データが不足していることは、認めざるを得ない。それは、波動場のような非定常な流れ場において、三次元空間に分布した流速や圧力などの物理量の時間変動を、多点同時に、簡便かつ安価に求める手法が現在のところ存在しないためである。したがって、物理実験などにおいては、空間内の一部の時間変動を計測せざるを得ない。例えば容量式波高計や電磁流速計等の一般的な計測機器を用いた場合、経済的制約などにより、その数は概ね十数点にすぎない。また、空間のある断面内の流速の時間変動を計測する手法として、レーザー・シート等を用いた PIV 法¹⁾がある。この手法は、比較的多数の空間情報量の時間変動を得るという点で優れているが、データがレーザー・シート内に限られるため、三次元への拡張が極めて難しい状況である。そこで本研究においては、PIV の三次元化を念頭に置きながら、その最初の段階として、波動場においても、中立粒子の三次元空間座標の時間変化を簡易にかつ精度よくとらえるための 3 次元 PTV システムを提案し、その精度を水理模型実験により検証するとともに、複雑な流れ場への適用も試みた。

2. 測定原理

本手法において、画像データから中立粒子の三次元座標を構成する方法を以下に示す。

図-1 に示す、2 台のデジタルビデオカメラを用いることにより、実空間上の座標 $O_R(x, y, z)$ に対して、2 つの画面上の座標データ $O_{v1}(x_1, z_1)$, $O_{v2}(x_2, z_2)$ が得られる。これらのデータと適当な関数 F_x , F_y , F_z を用いて

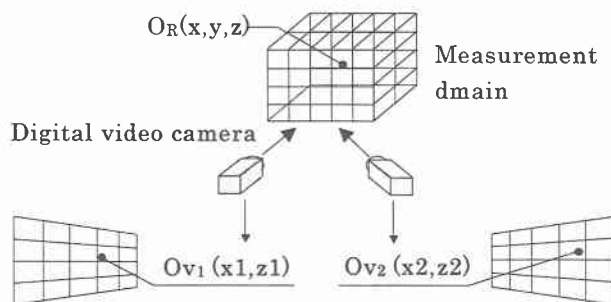


図-1 Recording System

$$x = F_x(x_1, z_1, x_2, z_2)$$

$$y = F_y(x_1, z_1, x_2, z_2)$$

$$z = F_z(x_1, z_1, x_2, z_2)$$

と表されると仮定する。本研究では、データ処理の簡便性を図るため、ある関数系として三次関数を仮定し、また、ビデオ画像から得られる 4 つの情報のうち、3 つの情報 (x_1 , z_1 , x_2) を用いることとした。よって、関数は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} x = & a_0 * x_1 * z_1 * x_2 + a_1 * x_1 * |x_1| * z_1 + a_2 * x_1 * |x_1| * x_2 \\ & + a_3 * |z_1| * z_1 * x_1 + a_4 * |z_1| * z_1 * x_2 + a_5 * |x_2| * x_2 * x_1 \\ & + a_6 * (x_2)^3 + a_7 * (x_2)^3 * a_9 * + a_{10} * x_1 * z_1 \\ & + a_{11} * x_1 * x_2 + a_{12} * z_1 * x_2 + a_{13} * (x_1)^2 + a_{14} * (z_1)^2 \\ & + a_{15} * (x_2)^2 + a_{16} * x_1 + a_{17} * z_1 + a_{18} * x_2 + a_{19} \end{aligned}$$

(y , z についても同様)

関数中の未定係数 $a_0 \sim a_{19}$ を決定するために、事前にキャリブレーションを行った。結果については 2 節で述べる。

2. 検証実験

2-1 システムについて

一方向波浪下の水粒子軌道は波向きに対して 2 次元であるが、図 2 に示す様に波向きに対して斜めから撮影すればカメラの軸に対して 3 次元運動として映像化される。この 3 次元運動を再合成し波向きに対する 2 次元運動に復元

することで本研究で提案するシステムの精度を検証して行く。

2-2 実験方法と条件

実験は図-2 に示す 2 次元造波水路で行った。水路の片側端部には反射吸収型不規則造波装置、他方にはブロックとスロープによる消波装置を設置している。また、実験には蛍光着色をし、比重を 1.0 に合わせた中立粒子を用いた、測定領域を暗室とし、その領域をブラックライトで照射し、中立粒子を発光させ、その流跡を側方 2 台のデジタルカメラで撮影した。また、表-1 に実験に関する波の諸条件を示す。なお、水深 $h=0.45\text{ (m)}$ は一定とした。

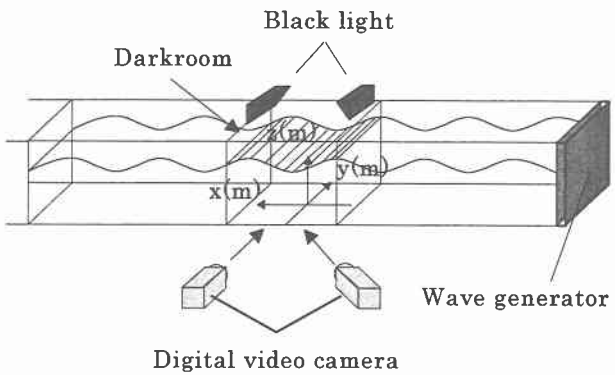


図-2 実験装置(二次元水路)

表-1 実験条件

Case	波高 $H\text{(m)}$	周期 $T\text{(s)}$
1	0.08	1.2
2	0.10	1.2
3	0.12	1.2
4	0.08	1.6
5	0.10	1.6
6	0.12	1.6
7	0.08	2.0
8	0.10	2.0
9	0.12	2.0

2-2 実験結果

最初に本検証実験に先だち行ったキャリブレーションデータに基づく誤差解析の結果を示す。キャリブレーションは $0.50\text{(m)} \times 0.40\text{(m)} \times 0.40\text{(m)}$ の空間を 5cm メッシュに分解した計 891 点について撮影を行い、そこで得られたデータをもとに、最小二乗法により未知係数を決定した。本手法による座標の再現精度はキャリブレーションのデータの数に依存するが、今回の場合は、891 点の全キャリブレーションデータからの逆解析の結果によって、精度の検討を行った。

図-3 は誤差 $\sigma=0.002\text{ (m)}$ での等値面を表している。相対的には底面近傍の水路中心付近においては誤差が比較的大きくなっていることが確認できるが、測定領域全域にわたって誤差の少ない良好な結果が得られた。

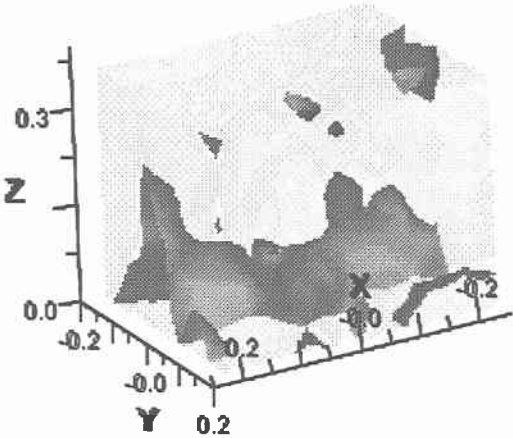


図-3 誤差の等値面($\sigma=0.002\text{(m)}$)

検証の方法は、波動場における中立粒子の軌道をタイムステップごとに追跡し流跡座標を求め、その値を微小振幅波理論による理論値と比較することで精度の検証を行った。なお、各時刻における画像上の粒子の位置は、初期の 2 つの時刻におけるデータを基準として、後述する自動追跡法により時々刻々決定することができる。

図-4 に粒子軌道の長軸と短軸に関する、理論値と実験値との比較を示す。本実験における誤差は概ね $\pm 5\%$ の範囲にはいっており、本手法の妥当性が確認された。

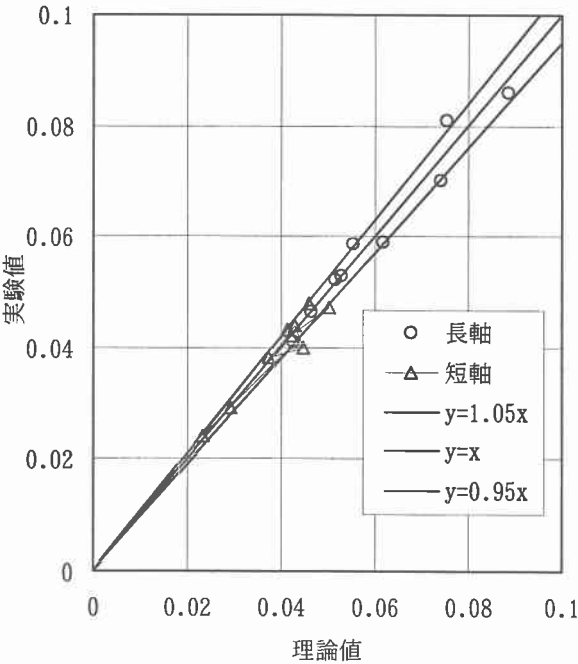
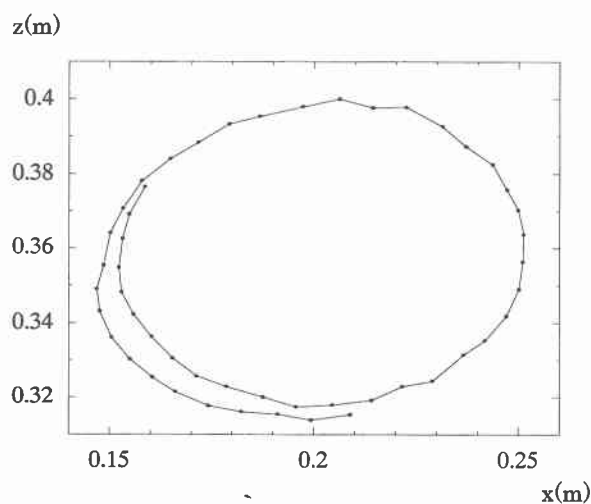
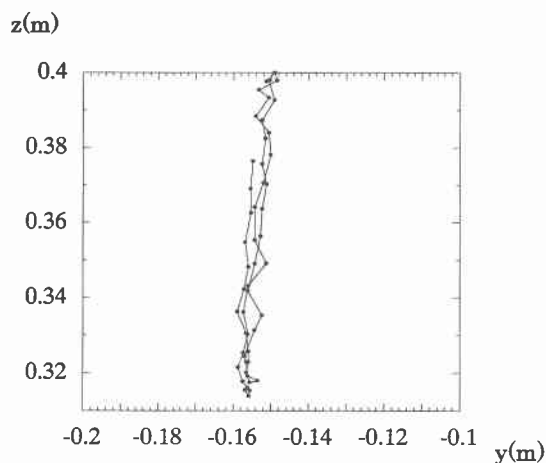


図-4 楕円軌道軸長の比較

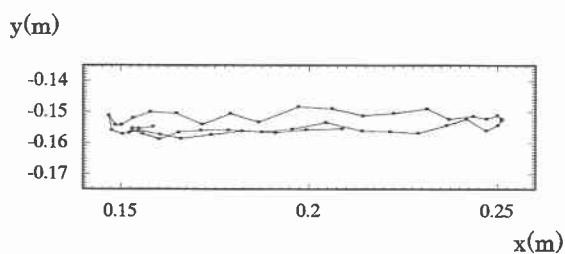
一例として 図-5 に Case3 における追跡線を示す。図からわかるように、本手法により波動場における水粒子の二次元楕円運動を良好にとらえられていることがわかる。



(a) X-Z 断面 (側面からの様子)



(b) Y-Z 断面 (正面からの様子)



(c) X-Y 断面 (上からの様子)

図-5 Case3 における流跡線

3. 中立粒子の自動追跡について

各時間における中立粒子の位置の自動追跡をおこなうには、まず同時刻における 2 画像上の同一粒子の座標判定を行わなければならない。各タイムステップごとの粒子の画像上での座標の推定は、図-6 に示すフロー図にしたが

って行うことができる。すなわち、一つ前のタイムステップでの画像上の座標データと、現在の画像上の座標データから仮の速度を求め、次のタイムステップに粒子が移動すると予想されるピクセルの範囲を設定する。その範囲内で新しいタイムステップでの粒子が検索可能であった場合は、その粒子の座標を次のタイムステップでの粒子位置として特定し、検索できなかった場合は検索範囲の設定を大きく取り直し、改めて位置の特定を行う。この手順を繰り返す事により、粒子が時々刻々移動する座標を自動追跡することができる。なお、粒子が多くなった場合、追跡精度を向上するためには、遺伝的アルゴリズム²⁾や、カルマンフィルターを用いる方法³⁾等を導入する必要がある。

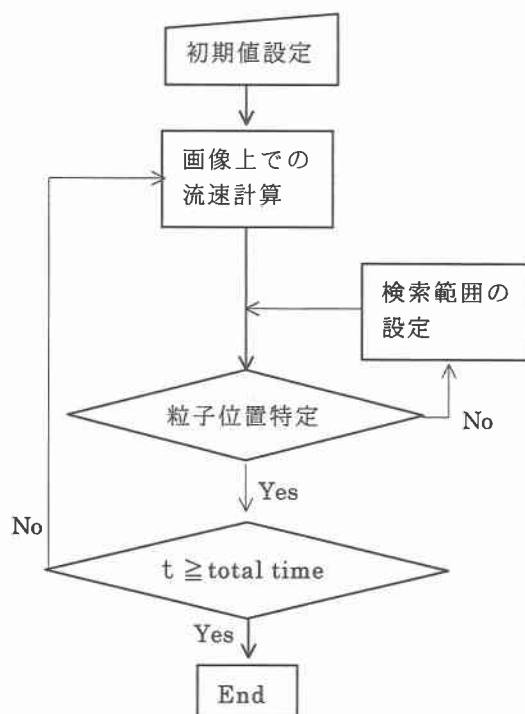


図-6 自動追跡のフローチャート

4. 複雑な流れ場への適用例

4-1 実験方法

本手法を防波堤堤頭部近傍における流れ場への適用を試みた。図-7 に示すように、片側の防波堤堤頭部のアクリルケース内に設置したデジタルカメラと、岸側から堤頭部に向かって設置した水中カメラとで撮影された 2 つの画像を用いて防波堤堤頭部近傍での流跡を追った。

実験は水深 $h=0.25(\text{m})$ 、波高 $H=0.083(\text{m})$ 、周期 $T=1.0(\text{s})$ 波向きは防波堤に対して垂直に入射する方向について行った。なお、この条件で、開口部の大きさはおおむね 1 波長に相当する。実験に使用した平面水槽および模型の緒元は、文献 4) と同じである。実験において、2 次元水槽の場合と同様に、室内を暗くし撮影領域にブラックライトを照射して、発光中立粒子の流跡を 2 台のカメラで撮影した。

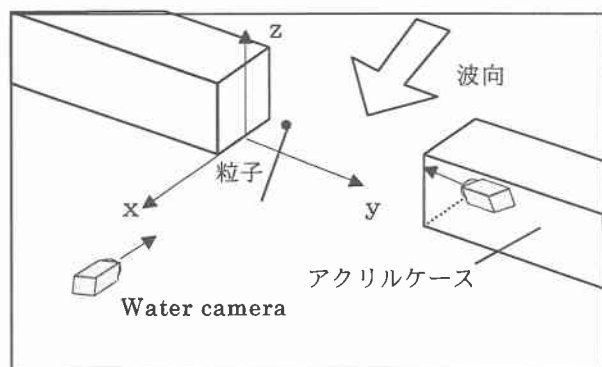


図-7 実験装置

最初に、キャリブレーションについて、2節の測定原理にしたがって、それぞれのカメラにおいて空間メッシュの撮影を行い、そのデータをもとに未定係数の決定を行った。本計測条件におけるキャリブレーションデータからの精度検証を行ったところ、誤差の空間平均は $\sigma=0.002(\text{m})$ であった。

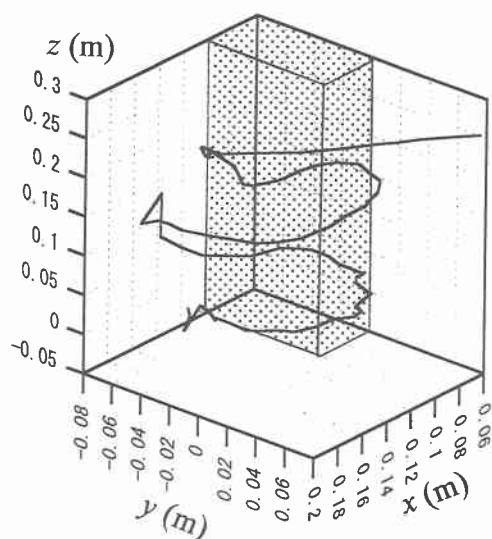
4-2 実験結果

図-8に3周期分の流跡の計算結果を示す。図-8(a)状況を実際の画像で見ると図-8(b)のようになっている。この結果より、構造物の近傍において回転と上昇をともなった乱れた流れが生じているのがわかる。この現象は実際のビデオ画像において見られる運動とほぼ一致している事から、3次元の波動場解析においても、本手法の拡張性が高いことを確認できた。

5. 結論

- (1) キャリブレーションデータの逆解析結果から本手法による座標の再現精度を示した。
- (2) 微小振幅波理論によって実験値の検証を行うことで、本手法の2次元的な流動場での妥当性を明らかにした。
- (3) 本手法を複雑な波動場において適用することで、3次元的水粒子軌道を計測する方法を提案した。

以上のように本研究では波動場においても中立粒子の三次元空間座標の時間変化を簡易にかつ精度よくとらえるための3次元PTVシステムを提案することができた。しかしながら実際の流動構造を把握するためには、さらに多くの点での空間情報量の時間変動を得るということが必要であると考えられる。今後は本手法をベースにPIV等の動画画像解析手法と結びつけ、さらに広範囲にわたっての流体運動を把握して行きたい。



(a) 計算結果



(b)実際の画像

図-8 防波堤堤頭部

参考文献

- 1) 小林敏雄監修：PIVの基礎と応用，シュプリンガー・フェアラーク東京、2000/
- 2) 近江和生，吉田直弘：PTVの粒子追跡に適した遺伝的アルゴリズム，可視化情報全国講演会講演論文集，vol.20, pp139-142、2000.
- 3) 江藤剛治，竹原幸生：多数のトレーサー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) 加藤雅也，奥村悠樹，渡部靖憲，佐伯浩：防波堤堤頭部近傍の流動構造に関する実験的研究：土木学会北海道支部論文報告集，第56号(B)，pp.2-7、2000.