

砕波帯内の 3 次元流速の実験的評価

——拡張型 3 次元ステレオグラム PTV の開発と応用——

奥村 悠樹*・渡部 靖憲**・加藤 雅也***・佐伯 浩****

1. はじめに

海洋沿岸域における流体運動構造は多くの場合三次元性を有しており,中でも砕波帯や構造物近傍においては,乱流をとまう顕著な三次元流速場となり,海底砂の移動や物質の拡散を通じて,海岸構造物や海域環境等に様々な影響を及ぼす.特に砕波帯においては,砕波後に生成される乱流構造が砕波の進行とともに急激に発達し,それにより海底砂の浮遊,巻き上げ,侵食といった問題に大きな影響を与えると考えられる.しかしながら,砕波帯内においては気泡混入域の水粒子速度の計測が困難であり,また,流体運動が渦や乱れを伴い時空間的に急激に変化するため,瞬間流速場を評価するのが困難であり,実験によるこの領域の三次元流速に関する報告が極めて少ないのが現状である.

著者ら(1999, 2000)は,三次元 Large Eddy Simulation (LES)により砕波後の流体運動の三次元的な遷移機構を調べ,様々な方向の渦成分が組織的に生成され発達するメカニズムを報告している.Christensenら(2000)もまた LESにより砕波後の三次元流体運動について計算を行い,その結果を報告をしている.しかしながら,砕波帯のような非定常で複雑な三次元流れ場における,物理量の時空間変動を,面的かつ連続的に計測可能な数値計算手法が現在のところ存在しないため,これらの数値計算結果に対しても正当な検証が行えない.

三次元流速を測定する手法としてレーザードップラー流速計や熱線式流速計などがあるが,これらは測定できる点に限りがあるため,瞬時流速場での面的な流速情報を得ることができない.

面的な流速分布を得るには,動画像解析手法が有利である.三次元計測が可能な動画像処理法として,ホログラムやステレオグラム法をベースとした三次元 PIV 法が提案されているが,これらの手法は薄いレーザーシート内の領域の計測に限定されるため実験水路内の横断方向流速分布が十分に測定できず,横断方向に激しく変化

する砕波後の流体運動を調べる上で不可欠な三次元情報が欠落してしまう.また,これらの手法はレーザーシートの導入が必要であり,コスト的にも不利である.本研究においてはステレオグラム法を拡張し,ビデオカメラの全撮影領域の流体運動を計測可能とする PTV 法を提案し,妥当性を検証すると共に,従来計測が非常に困難であった砕波後の気泡混入域を含む大規模渦近傍(特に斜行渦に注目して)の水粒子軌道及び速度の時空間特性を明らかにしようとするものである.

2. 三次元 PTV 法

(1) 実験装置

実験は,図-1に示す延長 24 m,幅 60 cm,高さ 1 m の二次元造波水路で行われ,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が設置された.実験には蛍光着色し比重を約 1.0 に合わせられた中立粒子(径 2 mm)がトレーサーとして採用された.測定領域を囲む暗室を設置し,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る.中立粒子の流跡は暗室内に設置された 3 台のデジタルカメラで撮影された.カメラの解像度は 640×480 ピクセル,256 色で,撮影周波数は 30 Hz である.撮影した画像は 1 ビットのアスキーデータに変換して解析を行った.なお,検証実験における入射波の条件は,水深 $h=0.45$ (m),波高 $H=0.12$ (m),周期 $T=1.2$ (s)であった.

(2) 粒子位置決定法

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-2に示す様に,3 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 (x, y, z) に対して,左,真ん中,右のカメラ上の画像座標としてそれぞれ (x_l, z_l) (x_c, z_c) (x_r, z_r) が得られる.実座標 (x, y, z) は,これらの画像座標の関数として表されるはずであり,両者は以下の関数を持つと考えられる.

$$\begin{aligned}x &= f_{x1}(x_r, z_r, x_l, z_l) = f_{x2}(x_r, z_r, x_c, z_c) \\ &= f_{x3}(x_c, z_c, x_l, z_l) \cdots \cdots \cdots (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y &= f_{y1}(x_r, z_r, x_l, z_l) = f_{y2}(x_r, z_r, x_c, z_c) \\ &= f_{y3}(x_c, z_c, x_l, z_l) \cdots \cdots \cdots (2)\end{aligned}$$

* 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
** 正 会 員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科
*** 正 会 員 日本データサービス㈱総合解析室
**** フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科

$$z = f_{z1}(x_r, z_r, x_i, z_i) = f_{z2}(x_r, z_r, x_c, z_c) \\ = f_{z3}(x_c, z_c, x_i, z_i) \dots\dots\dots (3)$$

線形近似による中心投影を基本とする手法は、水路側面のガラスやカメラのレンズの屈折等により誤差が生じる可能性がある。本研究では、この屈折や視軸のずれによる問題を低減するため、以下の様な三次代数方程式を仮定し、画像座標と実座標を関連づける。

$$x = a_0 x_r z_r x_r + a_1 x_r / x_r / z_r + a_2 x_r / x_r / x_i + a_3 z_r / z_r / x_r \\ + a_4 z_r / z_r / x_i + a_5 x_i / x_i / x_r + a_6 x_i / x_i / z_r + a_7 x_r^3 + a_8 z_r^3 \\ + a_9 x_i^3 + a_{10} x_r z_r + a_{11} x_r x_i + a_{12} z_r x_i + a_{13} x_r / x_r / \\ + a_{14} z_r / z_r / + a_{15} x_i / x_i / + a_{16} x_r + a_{17} z_r + a_{18} x_i + a_{19} \\ \dots\dots\dots (4)$$

$$y = b_0 x_r z_r x_r + b_1 x_r / x_r / z_r + b_2 x_r / x_r / x_i + b_3 z_r / z_r / x_r \\ + b_4 z_r / z_r / x_i + b_5 x_i / x_i / x_r + b_6 x_i / x_i / z_r + b_7 x_r^3 + b_8 z_r^3 \\ + b_9 x_i^3 + b_{10} x_r z_r + b_{11} x_r x_i + b_{12} z_r x_i + b_{13} x_r / x_r / \\ + b_{14} z_r / z_r / + b_{15} x_i / x_i / + b_{16} x_r + b_{17} z_r + b_{18} x_i + b_{19} \\ \dots\dots\dots (5)$$

$$z = c_0 x_r z_r x_r + c_1 x_r / x_r / z_r + c_2 x_r / x_r / x_i + c_3 z_r / z_r / x_r \\ + c_4 z_r / z_r / x_i + c_5 x_i / x_i / x_r + c_6 x_i / x_i / z_r + c_7 x_r^3 + c_8 z_r^3 \\ + c_9 x_i^3 + c_{10} x_r z_r + c_{11} x_r x_i + c_{12} z_r x_i + c_{13} x_r / x_r / \\ + c_{14} z_r / z_r / + c_{15} x_i / x_i / + c_{16} x_r + c_{17} z_r + c_{18} x_i + c_{19} \\ \dots\dots\dots (6)$$

関数中の定数 ($a_0, a_1, \dots, c_{19}$) は、キャリブレーションを経て決定される。キャリブレーションは、辺長 5 cm の立方体グリッドからなる 0.60(m) × 0.45(m) × 0.50(m) の領域について行われ、総グリッド数 1430 点が撮影され、得られた画像座標と実座標の関係から、(4)~(6) 式に対して最小二乗法を適用し、上記係数行列を決定した。これらの定数を用い、(4)~(6) 式より任意位置の粒子に対して各カメラの画像座標のみで実座標を合成することができる。

(3) 粒子追跡法

カメラ上の2つの画像座標から実空間における座標を正確に算出することは、時間ごとの粒子追跡を行うにあたり最も重要な作業である。多粒子が画像座標系上に現れた場合、両画像座標の注目する粒子投影が一意的実座標系上の粒子に対応していない場合、最も大きな誤差を生む(ミスマッチ)。本手法においては、実座標の算出においてこうした誤算が生じるのを防ぐために、以下に定義する関数を用いる。

$$\varepsilon_{12} = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon_{13} = (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon_{23} = (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここで x_i, y_i, z_i は式 (1)~(3) における f_{xi}, f_{yi}, f_{zi} のそれぞれの計算結果に対応する。これらの式は異なる視差を持つ画像の組み合わせによる実座標値の差の程度

を示す。本手法では、計算結果がこれらの誤差の程度において一定の基準値を満たした場合においてのみ、その結果を実空間の座標値として適用する。PTV では完全な粒子軌道を構築することで正確な粒子軌道を得ることができる。粒子の追跡は、3つの連続したタイムステップにおいて注目する粒子近傍の粒子に対して、加速度最小原理を適用し、以下の流速定義に基づき追跡を行った。

$$u = (x(t + \Delta t) - x(t)) / \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

上述した方法を用いると、原理的に2台のカメラの画像情報があれば実空間における粒子座標を決定できる。しかしながら、多粒子の投影が画像中にある場合(ここでは2粒子で考える)図-3に示す様に、左右のカメラの

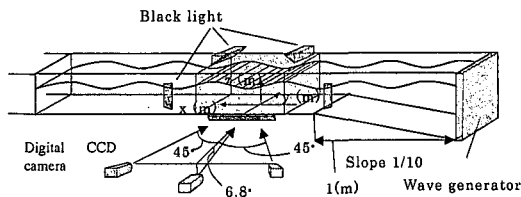


図-1 実験装置

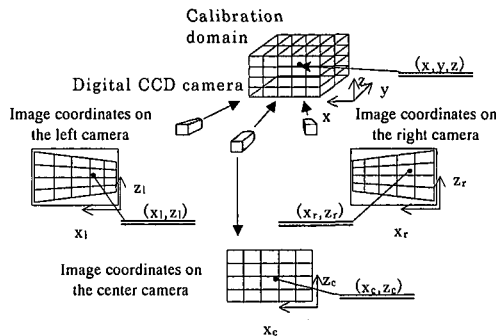


図-2 キャリブレーションシステム

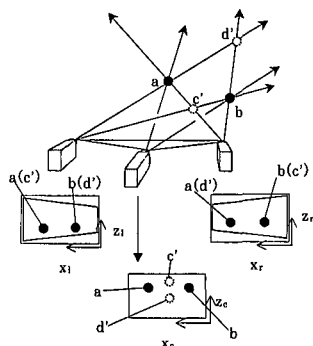


図-3 '幻影'の消去のためのシステム

みでは、計算結果として実際に存在する粒子 a 、 b 以外に、 a 、 b と同一平面上に、 c' 、 d' のような実際には存在しない‘幻影’を検出してしまう。

そこで、中心に視軸の角度を変えたカメラをもう一台設置する事で、計算結果にこのような‘幻影’が生じるのを防ぐことが可能になる。

3. 検証結果

本手法の妥当性を確認するため、以下の粒子位置及び運動に関する検証を行った。

(1) 粒子位置の算定

2.(2)における手法で求めた座標の計算結果 (x', y', z') と実際の座標値 (x, y, z) を使って誤差 δ を以下の式により定義する。

$$\delta = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \dots\dots\dots (11)$$

また、以下の式はキャリブレーション間隔に対する δ の割合を表す ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$)。

$$\rho = \frac{\delta}{\Delta x} \dots\dots\dots (12)$$

図-4 は計測領域全体における $\delta = 2 \text{ mm}$ ($\rho = 0.04$) の等値面を表す。相対的には底面近傍の水路中心付近において誤差が比較的大きくなっているが、測定領域全域にわたって誤差の少ない結果が得られた。この時の最大誤差は $\delta = 6 \text{ mm}$ であったが、実際に計測が行われる計測領域外縁を除く領域において、良好な計算結果が得られることが確認できる。

(2) 粒子軌道算定

二次元水路内において、水粒子軌道は波向きに対して断面二次元的な楕円運動を示すことは良く知られている。この二次元軌道を斜めから撮影すれば(図-1 参照)カメラの視軸に対しては三次元運動として映像化される。このカメラの視軸に対する三次元運動を2.(3)における手法により再合成することで波向きに対する二次元運動に復元し、その結果を微小振幅波理論による理論値と比較することで本手法の精度の検証を行うことができる。

図-5 は、本手法によって合成された水粒子軌道であり、完全な断面二次元的な楕円運動を示していることがわかる。図-6 は楕円軌道の長軸と短軸の長さを、計算結果と理論値とで比較した結果である。本手法の粒子軌道の算定値は、楕円軌道の理論値を95%以上の精度で再現している。これらの結果から、提案する三次元 PTV システムによる三次元粒子位置、粒子軌道の計測の妥当性が証明された。

4. 砕波帯内の流体運動

砕波帯内では、ジェットの着水により大規模鉛直渦や

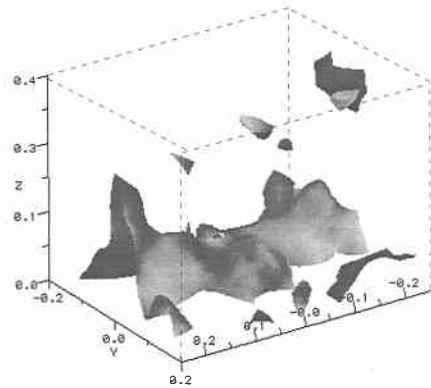
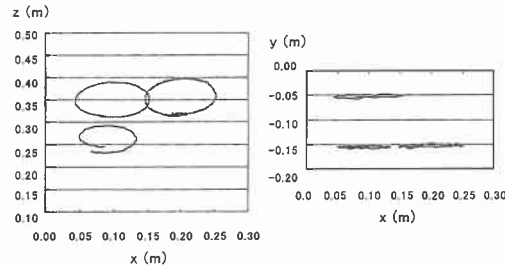


図-4 誤差の等値面 ($\delta = 2 \text{ mm}$, $\rho = 0.04$)



(a) $x-z$ 断面 (b) $x-y$ 断面

図-5 粒子追跡の計算結果
(水深 $h = 0.45 \text{ m}$, 波高 $H = 0.12 \text{ m}$, 周期 $T = 0.12 \text{ s}$)

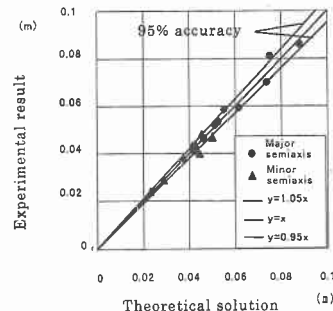


図-6 楕円軌道軸長の比較

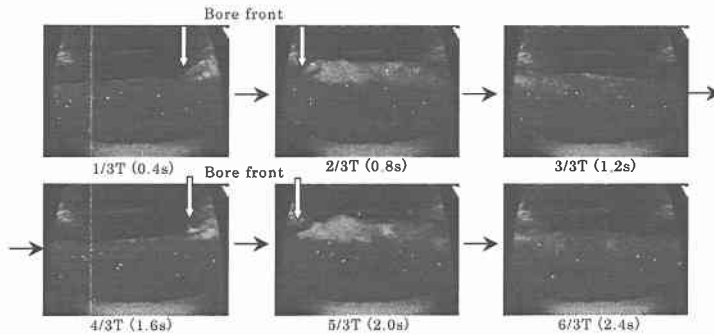
斜行渦を中心とした複雑な三次元渦構造が形成される。こういった三次元渦構造に関しては、実験水路側方からの混入気泡の軌道等の観測を元に報告がされているが(例えば Nadaoka et al., 1989), 三次元渦構造の生成及び発達過程における三次元流体運動に関する定量的評価は十分にされていない。

この章では、提案する三次元 PTV 法を用い、砕波後のポア領域における水粒子の挙動と流速を定量的に調べ、その特性について論議する。なお、波の諸元は、波高: $H = 0.15 \text{ m}$ 水深: $h = 0.40 \text{ m}$ 周期: $T = 1.2 \text{ s}$ であり、砕波点は勾配終端に一致した(図-1 参照)。

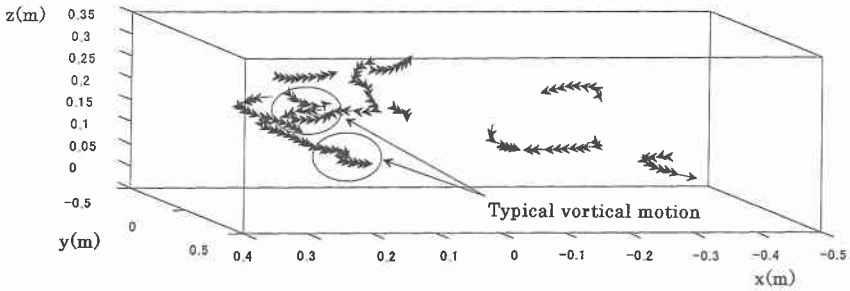
図一7 は、3 台のカメラの内、中心に設置されたカメラの 1/3 周期ごとの元画像である。発光中立粒子の反射強度が他の領域の明るさよりも卓越していることから、混

入気泡からの反射を伴ったボアフロントにおいても、適切な閾値を与えることで粒子の抽出が可能である。

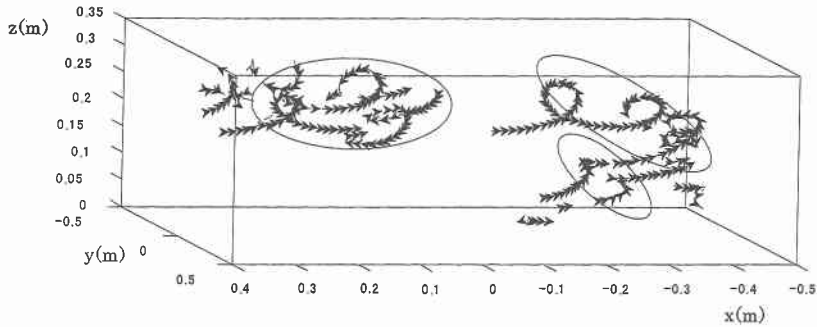
図一8 は図一7 と同時刻帯における水粒子の三次元移



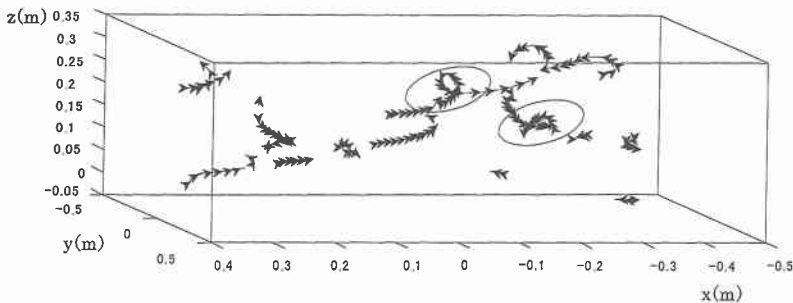
図一7 中心に設置したカメラの 1/3 周期ごとの元画像



図一8 鉛直方向に軸をもった三次元回転運動



図一9 種々の方向に軸をもった三次元回転運動



図一10 水平方向に軸をもった三次元回転運動

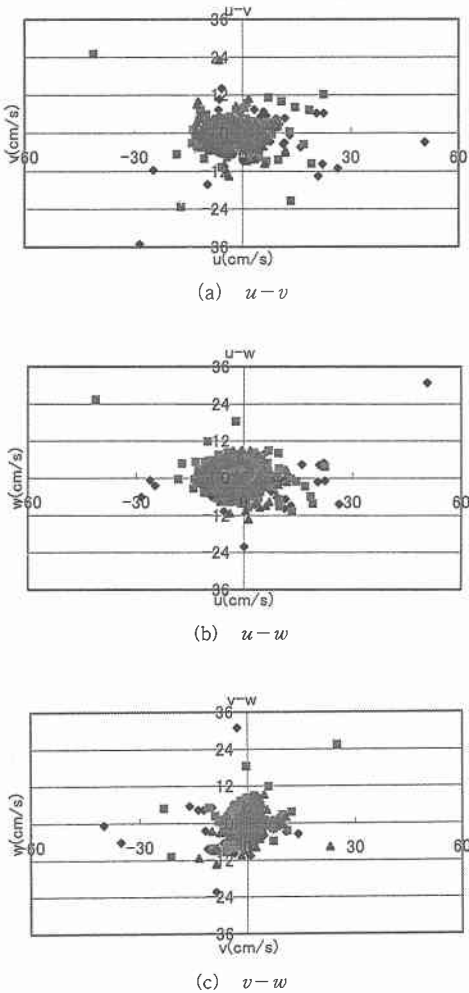


図-11 全粒子におけるオイラーの流速成分

動軌跡を表したものである。各矢印間の時間は1/30秒である。砕波後のポアフロント通過後に複雑に分布する鉛直渦に巻き込まれ回転しながら下降する水粒子の連続した軌道を計測することができた(図-8の○内参照)。この回転運動は砕波後に生成された斜行渦に起因するものと考えられる。

図-9, 10は連続した砕波下の水粒子軌道を表す。初期位置や波の位相によっては、鉛直方向軸だけでなく、様々な方向に軸を持った回転運動が確認できた。これらの結果から、粒子の回転運動は、このように0.1~1.0秒の準周期性を有すると考えられる。この様に、砕波により発生した大規模渦構造は、種々の回転軸や種々の時間スケールを有する回転運動から構成され、その中で粒子は非常に複雑な回転運動を伴う軌道を形成することがわかる。

図-11は今回の実験での全粒子に対するオイラー流速成分を表す。大規模渦構造の下、水平流速 u と鉛直方向流速 w が卓越するだけでなく、砕波前においてはほとんど値を持たなかった水槽奥行方向流速 v についても、他の成分と同オーダーの値が確認できる。この結果は、砕波後の大規模渦構造の生成、発達に伴い水槽奥行方向流速 v が急速に発達する事を表している。

5. おわりに

- ・三次元空間座標において、水粒子軌道及び三次元流速場を、広域にわたり簡易に精度良く捉えるための三次元PTVシステムを提案した。
- ・提案する手法は粒子位置及び粒子軌道の算定について95%以上の高精度を持つ。
- ・本手法を砕波後の流体運動に適用し、多粒子に対して連続した粒子軌道を決定することができる。
- ・砕波帯において種々の方向をもった旋回性の流体運動が存在する砕波帯の大規模渦構造は鉛直渦や斜行渦以外にも、様々な渦構造の相互作用により様々な方向に軸を有する大規模渦が生成される。

本研究において提案した三次元PTV法は砕波帯以外にも、海岸構造物周辺の三次元流体運動の測定等にも低コストで実用可能であり、非常に有効と考える。

参考文献

- 渡部靖憲・松本靖治・佐伯 浩 (1998): 砕波帯内の三次元的水粒子軌道の実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 136-140.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (1999): 大規模旋回渦, 斜行渦, 3次元砕波ジェットの生成及び発達機構, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 141-145.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (2000): 砕波後の大規模渦の整構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 141-145.
- 奥村悠樹, 加藤雅也, 渡部靖憲, 佐伯 浩 (2001): 3次元PTVシステムの開発に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第57号, pp. 486-489.
- Christensen, E. D., and Deigaard, R. (2001). "Large eddy simulation of breaking waves", *Coastal Engineering*, Vol. 42, pp. 53-86.
- Adrian, R. J. (1991). "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics" *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 261-304.
- Lawson, N. J. and Wu, J. (1997): "Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system" *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1455-1464.
- Virant, M. and Dracos, T. (1997): "3D PTV and its application on Lagrangean motion" *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1539-1552.
- Zhang, J. Tao, B. and Katz, J. (1997): "Turbulent flow measurement in a square duct with hybrid holographic PIV" *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 373-381.