

第 1 部

円形シフト法による三次元計測装置

目次

1. 研究概要	3
2. 研究の背景(目的)	4
3. 円形バイアス法について	5
3.1 運動立体視の原理	5
3.2 運動立体視の拡張	6
4. 画像解析方法	10
4.1 らせんの解析方法	11
4.2 軌跡の自動切り出し	12
5. 計測実験	18
5.1 物体の形状計測	18
5.2 流体の三次元計測	24
6. まとめ	28
7. 今後の展開	29

参考文献

付録

公表論文

1. 研究概要

TV カメラによる計測は、非接触かつオンライン計測が可能のため工業分野において広く利用され始めている。中でも、画像解析による流れ場の計測は、流れの状態を定量的に捉えることができる方法として有効であり、造船や航空機産業などにおいて注目を集めている。一般的には流れの中に混入されたトレーサ粒子を TV カメラで撮影し、コンピュータで粒子運動を追跡することで流速を求めることが行われている。^{1) - 14)} 二次元計測に関しては多くの計測例があり、既に実用段階であると思われる。しかしながら、三次元計測に関しては、未だ実用的な計測器が存在しない。

現在利用されている三次元画像計測手法には、2 台の TV カメラを用いたステレオ視による方法とレーザスリット光を用いた光切断法がある。ステレオ視による方法は 2 台のテレビカメラによって撮影された計測点をカメラ間で対応させ三角測量の原理を用いて三次元位置を計測する方法である。本手法は人間の視覚構成に似ているためロボットの視覚として利用される場合も多い。ステレオ視による流体計測の試みもなされているが、何ら特徴の無いトレーサ粒子を TV カメラ間で対応付けし、時系列的に運動を追跡する処理^{15) - 21)} が難しく、実際の流れに適用するには多くの問題点が存在する。また、光切断法は、レーザなどのスリット光を計測対象に照射し、スリット光が照射される断面ごとに計測を行うものであり、全体の三次元計測をする場合、レーザスリット光を対象全体で走査させる。スリット光が走査する間、計測対象は静止しておく必要がある。そのため、流れの状態が随時変化するような非定常流れや微小生物運動の計測には適用できない。

本研究では、1 台の TV カメラと画像の回転機構を用いて粒子や微小生物運動を計測するまったく新しい装置を開発した。TV カメラの前に、合わせ鏡を設置し、撮影される計測点を変位させる。この変位量は、TV カメラから計測点までの距離に反比例し、TV カメラに近いほど大きく変位する。また、合わせ鏡を高速に回転させることで計測点は TV カメラの受像面上で円軌跡を描き、この円軌跡の径は TV カメラから計測点までの距離に反比例する。撮影される円軌跡を画像処理によって解析することで計測点の三次元位置を計測することができる。本装置で流体中を運動するトレーサ粒子を撮影し、非定常流れも含む三次元流れを計測することが可能になった。

また、流体計測以外の応用例としてマルチレーザスポットを用いた物体形状計測を試みた。マルチレーザスポット光を物体表面に照射し、本計測装置で撮影すると、レーザスポット光は円軌跡を描く。撮影される円軌跡の径は TV カメラから計測点までの距離に反比例するため、円軌跡を画像処理によって解析することで、スポット光の三次元位置を計測することができる。画像上のすべての円軌跡を解析することで物体形状を三次元的に把握することができる。1 枚の画像にすべての計測点の三次元位置を記録することができるので、対象が動いている場合でも計測が可能である。

本手法と一般的なステレオ法による手法との性能比較を行い、有効性を確認した。

2. 研究の背景（目的）

一台のTVカメラのみを用いて奥行きを含んだ三次元情報を抽出する方法に、運動立体視（能動視覚）と呼ばれる方法がある。^{42) -43)}この方法は、意識的に動かしたTVカメラからの見かけの変位量が近くにあるものほど大きく、遠くにあるものほど小さくなることを利用して、この変位量よりカメラからの奥行きを判断するものである。多眼立体視による方法と比較して、TVカメラが一台ですむために、カメラ間の校正が必要ないことや、装置がコンパクトになり可搬性に優れている等の利点をもつ。しかし、この運動立体視は、三次元空間中に静止した物体を計測対象とするのが一般的であり、運動している流体の計測には、不向きである。さらに、三次元流体計測を一台のTVカメラを用いて行う方法として、三つの微小ホールを持つマスクをカメラの開口部に設け、各ホールを通して受像面の3箇所写される同一トレーサ粒子像の位置関係から、距離を判断する方法が提案されている。²¹⁾この方法はトレーサ粒子が少数の場合は有効であるが、粒子数が増加するにつれ、同一トレーサ粒子に対する3点の粒子像を画像から選択する処理が困難となる。

本研究では、一台のTVカメラに撮影される映像をTVカメラの受像面に平行な面上で高速に円運動させる測定方式を開発した。^{(44), (45)}撮影されるトレーサ粒子の軌跡は粒子運動に円形速度バイアスが加えられて、らせん形となり、そのらせん軌跡は、運動立体視の理論より、カメラからの奥行き情報を持つ。即ち、遠くにあるトレーサ粒子ほど小さならせん軌跡を描き、近くにあるトレーサ粒子ほど大きならせん軌跡を描く。また、らせん軌跡の径の変化量は、トレーサ粒子の奥行き方向速度を示し、撮影された1枚の画像からでも、トレーサ粒子の位置と速度の三次元情報が得られる。本方式では、トレーサ粒子の移動は、らせん軌跡として表されるために、従来の計測方法のように、粒子点と粒子点の対応を求める処理が不要となり、信頼性の高い結果が得られる特徴がある。また、トレーサ粒子の三次元的な挙動が直接画像として記録されるので、視覚的にも流れの状態を把握することができる特徴がある。

以下では、計測方法及び画像の解析方法について述べた後、テスト水槽内で生じる三次元流れを計測した結果を紹介する。

3. 円形バイアス法について

3.1 運動立体視の原理

本計測手法は運動立体視の原理に基づく。運動立体視はカメラを計測対象に対し、平行に運動させた場合のみかけの変位量から奥行きを計測するもので、以下にその原理を説明する。

図1において、TVカメラから距離 D にある計測対象がTVカメラの受像面と平行な面上でTVカメラに対し相対的に x だけ移動した場合を考える。ここで、

x は計測対象のTVカメラに対する相対的な移動量であるから、静止している計測対象に対してTVカメラが x だけ移動した場合も同じとなる。

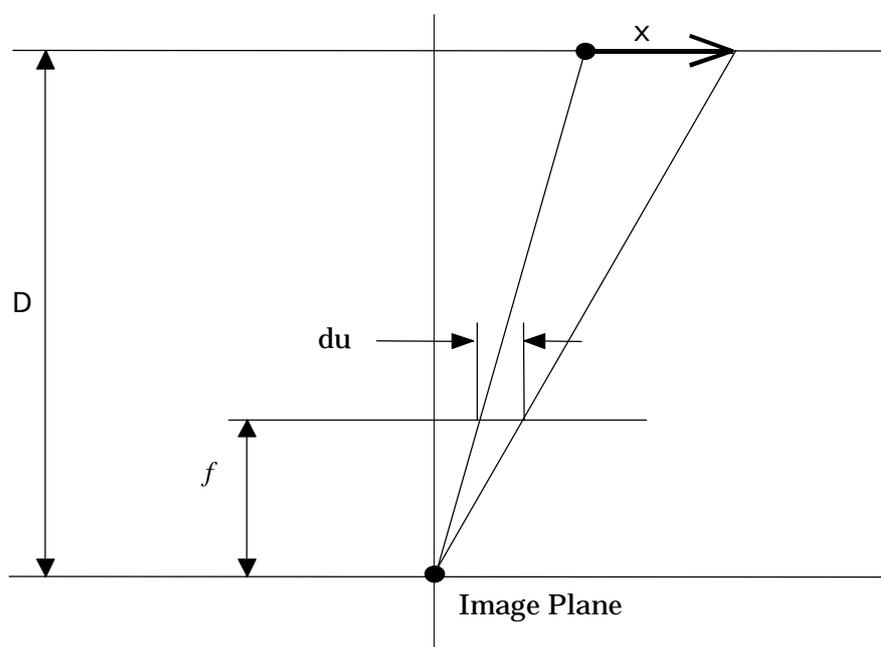


図1 運動立体視の原理

このときに、TVカメラの受像面に現れる計測対象の視差を du とすると、

$$du = \frac{f \cdot \Delta x}{D} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 f はTVカメラの焦点距離である。

上式より、カメラから見える計測対象の視差は計測対象の移動量に比例し、TVカメラから計測対象までの距離に反比例する。つまり、TVカメラを意識的に移動させ、受像面上に現れる視差を計測することによって、TVカメラから計測対象までの距離を計測することができる（運動立体視）。ただし、この方法は計測対象とTVカメラがともに移動している場合には、何らかの工夫が必要となる。

3.2 運動立体視の拡張

以上のように運動立体視では、対象が運動している場合に適用できない。そこで、画像をTVカメラの受像面と平行な面上で、計測対象の動きよりも十分速い速度で円運動させることを考える。トレーサ粒子の画像に円形の色バイアスが加えられ、円軌跡が撮影される。この円軌跡の径により、TVカメラからトレーサ粒子までの距離を求めることができる。(図2参照)

図3にこの考えに基づく、流れ場の三次元計測装置の略図を示す。TVカメラの前には、合わせ鏡が外側を歯切りした筒内に傾けて設置されている。モータによって筒を高速に回転することで、トレーサ粒子像は合わせ鏡で屈折されて、円形の色バイアスが加えられる。このように、合わせ鏡を高速回転させることで、TVカメラを受像面と平行な円周に沿って高速に移動させたのと同じ映像を得ることができる。

また、合わせ鏡の代わりに光の屈折を利用した装置を図4に示す。撮影される映像は合わせ鏡を用いた場合と同じで、装置をコンパクト化することができる。

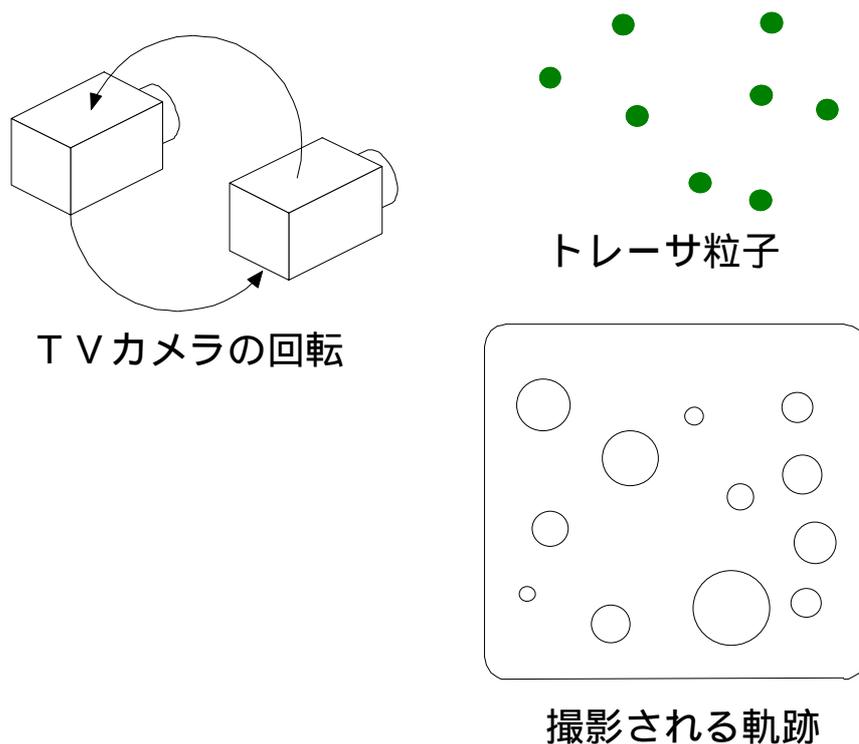


図2 TVカメラの回転による立体視

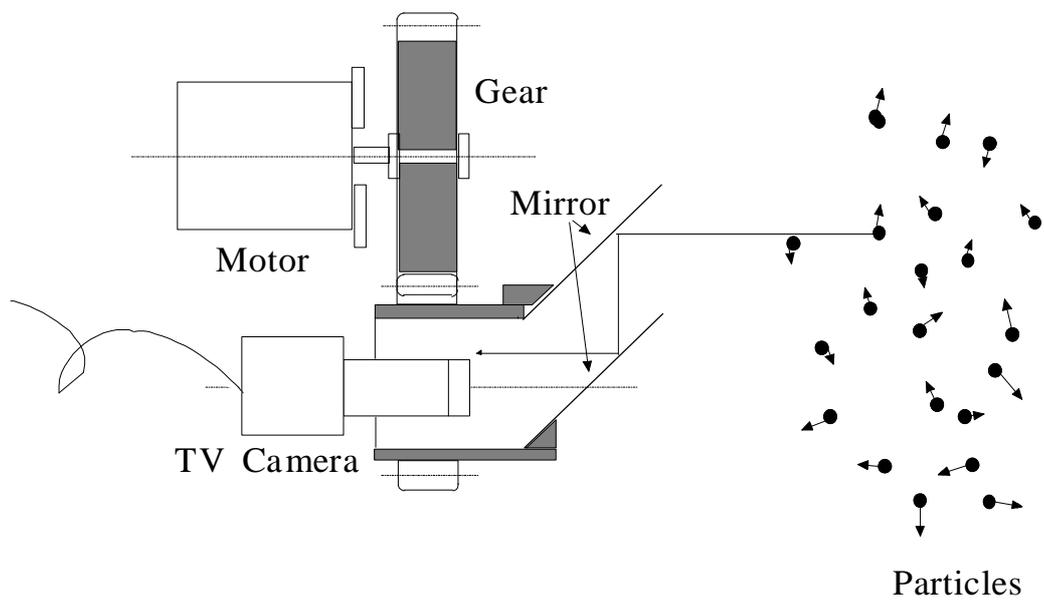


図3 合わせ鏡を用いた装置

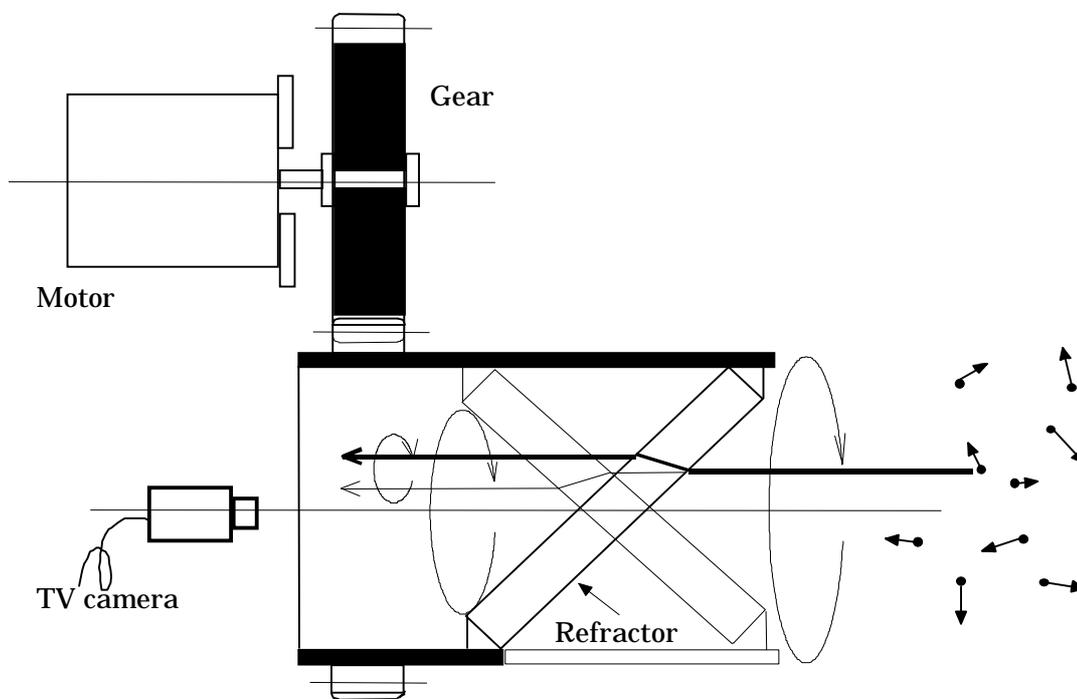


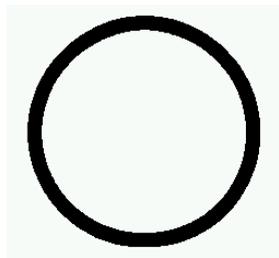
図4 屈折レンズを用いた装置

図5に、撮影された軌跡の例を示す。トレーサ粒子が静止している場合は、円軌跡となり、その径はカメラからの距離が短いほど大きな円となる。TVカメラで計測される円軌跡の径を r 、カメラからトレーサ粒子までの距離を D とすれば、式(1)より、

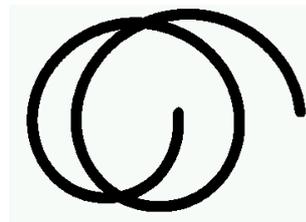
$$r = \frac{f \cdot d}{D} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 d は屈折板による画像の変位量で、 f はTVカメラの焦点距離である。前もって、位置が既知の点を計測することで r と D を算出し、そのデータを元に積 fd を簡単に校正することができる。

また、トレーサ粒子が移動している場合には、撮影される軌跡は、トレーサ粒子の運動状態に応じたらせん状の軌跡を描く。



Fixed particle



Moving particle

図5 らせん軌跡の例

トレーサ粒子の軌跡による流れ場の計測方法としては、2次元流れ場に対してではあるが、比較的長い露光時間でトレーサ粒子を撮影し、撮影された直線的な流跡線の長さから、速度を計測する流跡線法がある。この方法は流跡線の始点終点が判別できないために、カメラと計測対象の間に揺動する鏡を設置し、流体の流れによる粒子の移動に、鏡の揺動による一定の速度バイアスを加え、得られる流跡が常に正方向となるようにする速度バイアス法が提案されている。ここで提案する方式は、屈折板の回転により円形速度バイアスを加えることで、速度バイアス法と同じ効果を得ると同時に三次元位置と速度についても測定しようとするものである。

写真1、2に開発した計測装置の写真を示す。

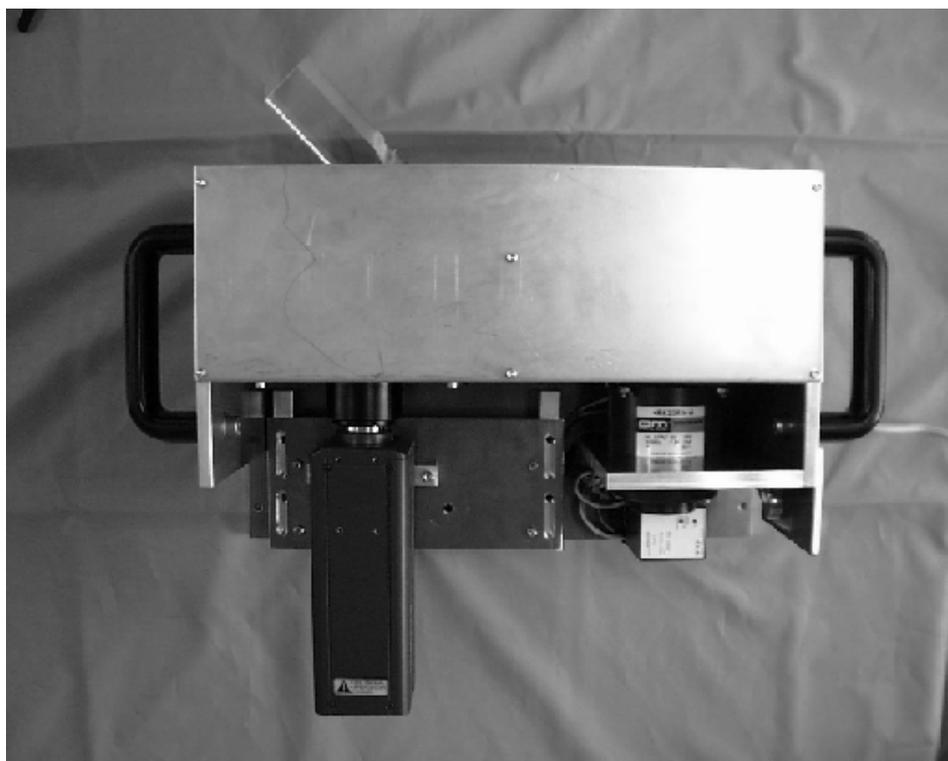


写真1 三次元計測装置（上方）

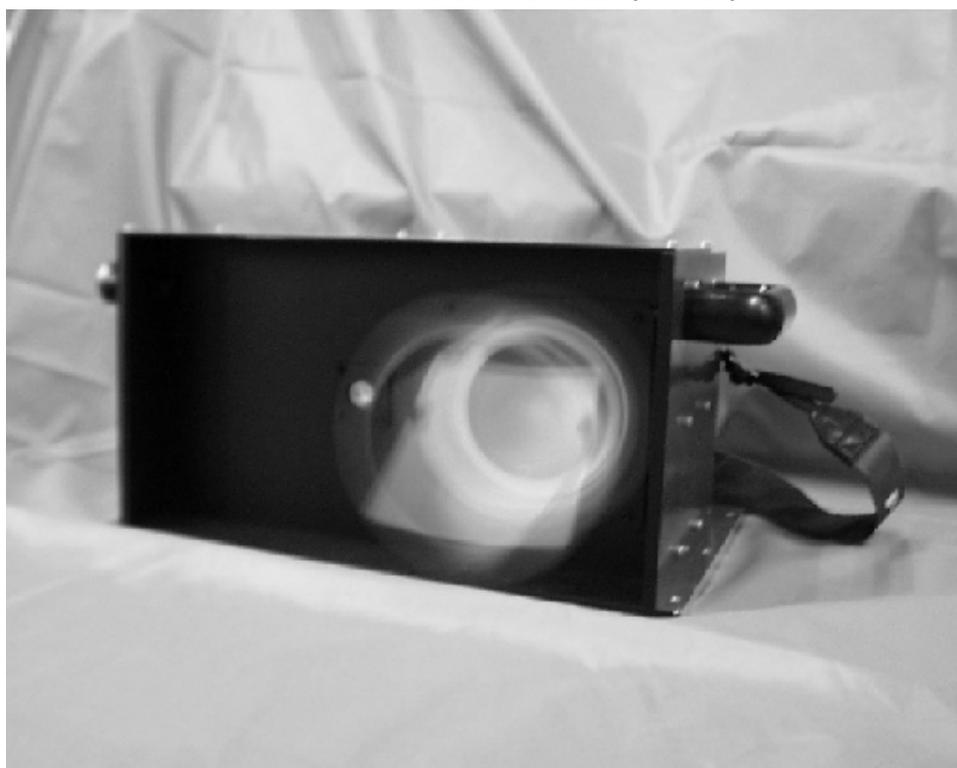


写真2 三次元計測装置（正面）

4. 画像解析方法

4.1 らせん軌跡の解析方法

本装置によって撮影されるらせん軌跡の方程式は、露光時間が十分短い場合には、カメラ座標を (x_i, y_i) とすると次のようになる。

$$\begin{aligned} x_i &= (r_{i0} - v_{ri} \cdot t) \cos \omega t + x_{i0} + v_{xi} \cdot t \quad \dots\dots\dots (3) \\ y_i &= (r_{i0} - v_{ri} \cdot t) \sin \omega t + y_{i0} + v_{yi} \cdot t \end{aligned}$$

ここで、 x_{i0}, y_{i0}, r_{i0} は画像上でのトレーサ粒子の初期位置、また、 v_{xi}, v_{yi}, v_{ri} はトレーサ粒子の速度を示す。画像から各々のトレーサ粒子のらせん軌跡を取り出し、パターンマッチングにより、上記の6つのパラメータを決定する。画像の取り込みの際に、屈折板の回転周期をTVカメラのフィールド周期(1/60[s])に同期させた。これにより、各画像上に撮影されるトレーサ粒子によるらせん軌跡は1周期の形状を持ち、以下の処理を簡単にする。

一枚の画像から、パターンマッチングにより6つのパラメータを一度に求めることも可能であるが、高速化のために連続して測定された2枚の画像を用いて、次のように2段階に分けて処理を行った。

[一段階目の処理]

まず、連続する2枚の画像間で同一のトレーサ粒子によるらせん軌跡を抽出し、画像間での変化量を求めることにより、各粒子の速度成分(v_{xi}, v_{yi}, v_{ri})を決定する。そのために、まず、1枚目の画像1に含まれる各らせん軌跡を図6のようにラベリング処理により抽出する。

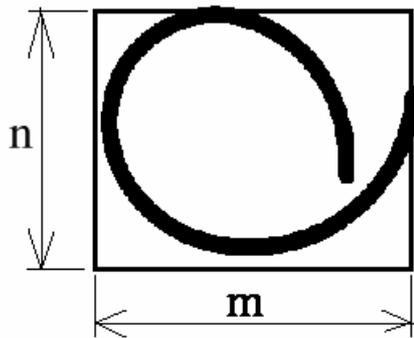


図6 抽出されたらせん軌跡

その際、らせん軌跡の重なりや輝度変化により、1部の軌跡が抽出できない場合があるが、そのような軌跡に対しては、オペレータがマニュアルで修正する。次に、画像1において抽出された各らせん軌跡につながるらせん軌跡を画像2から選択することを行う。その際に、粒子の奥行き方向の速度によるらせん軌跡の拡大縮小を考慮して、画像1で得られたらせんパターンに拡大係数 を導入した次

の相関関数によりパターンマッチングを行う。

$$R_{12}(\Delta i, \Delta j, \alpha) = \sum_{i=-m/2}^{m/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} (f_{i,j}^{(1)} - f_{\alpha(i+\Delta i), \alpha(j+\Delta j)}^{(2)})^2 \dots (4)$$

ここで $f_{i,j}^{(k)}$ は、画像 k 上の、パターンマッチングを行う小領域 $m \times n$ 内の第 (i, j) 画素における輝度である。(4)式において、 R_{12} を最小にする $i, j,$ がそれぞれらせん軌跡の x, y 軸方向の移動量、およびらせん軌跡の拡大率であると考えられる。これらの値より、フィールド周期(画像の回転周期)を考慮して、(3)式の v_{xi}, v_{yi}, v_{ri} は

$$\begin{aligned} v_{xi} &= \Delta i \cdot \frac{\omega}{2\pi} \\ v_{yi} &= \Delta j \cdot \frac{\omega}{2\pi} \dots\dots\dots (5) \\ v_{ri} &= r_{io}(\alpha - 1) \cdot \frac{\omega}{2\pi} \end{aligned}$$

となる。ただし、残りのパラメータ x_{io}, y_{io}, r_{io} については、次に示す2段階目のパターンマッチングで決定する。

[2段階目の処理]

2段階目の処理では、らせん軌跡を詳細に調べ、(3)式のらせん軌跡のパラメータ x_{io}, y_{io}, r_{io} を決定する。

らせんの軌跡は各画素毎に明暗を持ち、軌跡線の中心線付近の画素が明るくなっている。そこで、パラメータの決定に際しては、(3)式のらせん軌跡の方程式に沿って、輝度を加算した次の関数を用いる。

$$\phi(x_{io}, y_{io}, r_{io}) = \sum_{t=t_0}^{t_0 + \frac{2\pi}{\omega}} f_{x_i, y_i}^{(1)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $f_{x_i, y_i}^{(1)}$ は (x_i, y_i) 画素における輝度である。

らせんパラメータ x_{io}, y_{io}, r_{io} が真の値に一致する場合には、上記の関数が最大値をとると考えられ、真の x_{io}, y_{io}, r_{io} を が最大となるように定める。

らせんパラメータ x_{io}, y_{io}, r_{io} が求まると、その粒子の3次元位置は式(2)の関係よりカメラの焦点位置を原点とする座標上で次のように表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{d}{r_{io}} \begin{pmatrix} x_{io} \\ y_{io} \\ f \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

次に述べる実験では、上式で得られた数値を水槽に固定された座標上に換算して用いている。

4.2 軌跡の自動切り出し

画像内に多数の計測点が存在する場合、撮影される軌跡が互いに重なり合う場合があり得る。撮影される軌跡の形状が円軌跡に近い場合は、自動的に軌跡を切り出し、解析することが可能である。重なった円軌跡からそれぞれの円を切り出すために、まず、それぞれの円軌跡の中心を算出し、次にその中心から、円軌跡までの距離を算出した。以下にその手順を示す。

まず、画像のすべての位置における差分を求め、円の輪郭を抽出するためのしきい値を設定する。次に円軌跡の中心位置を得るため、輪郭に対して法線を求める。法線の傾きは、画像上の輝度の勾配より次式で計算される。

$$\theta = \tan^{-1}(g_y/g_x) \quad (8)$$

ここで、 g_x 、 g_y は微小領域における輝度勾配を表す。また、法線のデータはパラメータ領域に蓄積される。抽出された円軌跡の輪郭と描かれた法線を図7に示す。図に示すように、法線は円軌跡の中心付近に集まるため、パラメータ領域に蓄積された法線の重なる部分にピークが現われ、このピークを円の中心と仮定できる。このピークを含む集合部分を抽出するため、パラメータ領域にもしきい値を設け、その後パラメータ領域におけるピークの部分をラベリングし、そのピークを円の中心とする。これらの手順により、円軌跡の中心を重なった軌跡から切り出すことができる。

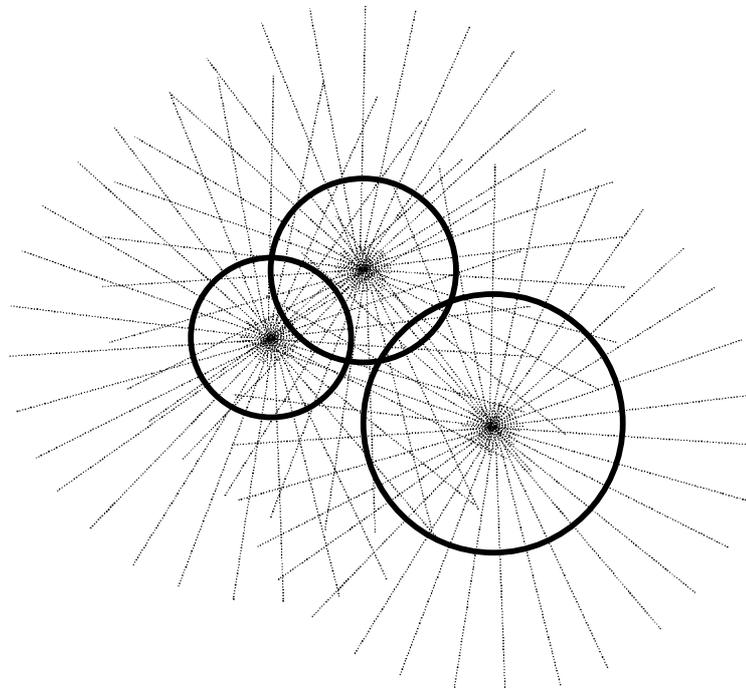


図7 円軌跡とパラメータメモリ上の法線

本手法において、パラメータメモリには、法線上の全ての点が蓄積されることになる。円軌跡が鮮明でかつ周りにノイズが存在しない場合は、本手法によっても円軌跡の中心

を算出できるが、実際の計測においては、円の中心部以外にもノイズなどの影響でピークが存在する場合もある。そこで、各法線上で最も円の中心部に位置する可能性がある点のみをパラメータメモリに蓄積する方法を採用した。図8において、 O_c は法線上にある円軌跡中心の候補点である。この候補点が円の中心に位置するかどうかを中心 O_c 、半径 \overline{OcPe} の参照円を描くことで判断する。 O_c が円軌跡の中心である場合は、参照円は円軌跡と重なるはずである。点 P_e における法線上の全ての点に対し、参照円を導入することによって円軌跡の中心に位置するかどうかを判断する。参照円と円軌跡のずれは以下の式によって評価される。

$$\phi_{Oc} = \sum_{\theta=0}^{2\pi} |f_{Pe} - f_{p\theta}| \quad (9)$$

ここで、 f_{pe} と $f_{p\theta}$ はそれぞれ点 Pe と 点 P_θ における輝度値である。法線上で ϕ_{oc} を最も小さくする点 O_c は円軌跡の中心にあると判断できる。図9は、パラメータ上のデータをディスプレイ上に表現したものである。本手法により、円軌跡の中心が正確に検出できる。

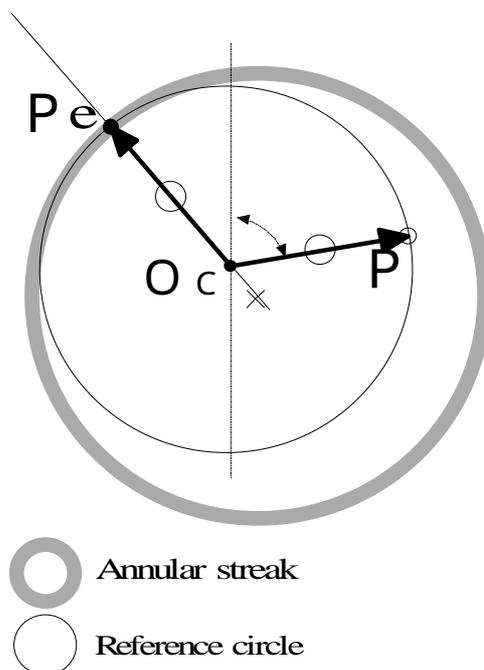
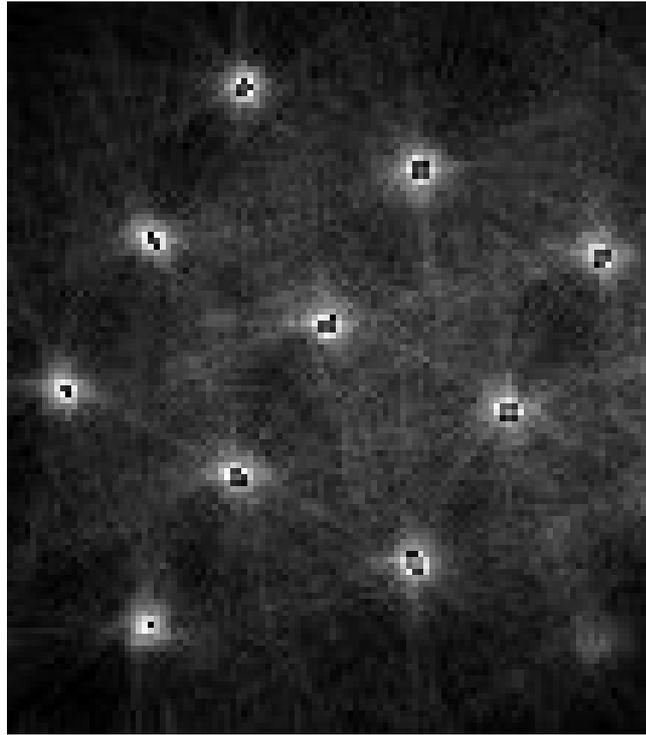
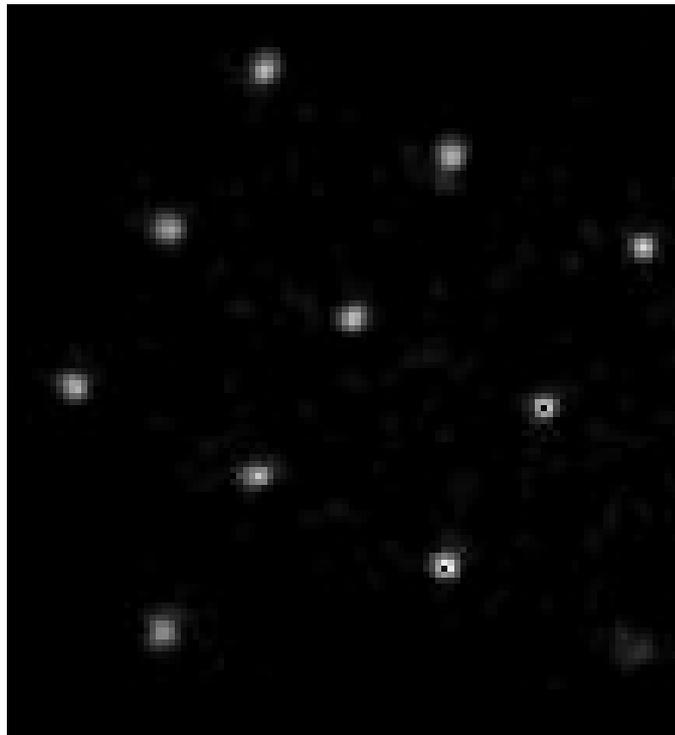


図8 円の中心の検出



a.



b .

a . 法線上の全ての点をパラメータメモリに蓄積した場合 .

b . 法線上から選択された候補点のみをパラメータメモリに蓄積した場合 .

図9 パラメータメモリ上のデータ

以上の手続きにより，円軌跡の中心位置を精度良く算出することができるが，参照円と円軌跡のずれを評価するのに膨大な時間を要す問題がある．現場での使用を考え，以下のように浮動するしきい値を導入することで高速化をおこなった．図10は，式(9)の計算過程における ϕ_{oc} の増加曲線を示す．参照円が円軌跡と重なっていない場合は，増加曲線は計算の初期段階で急激に増加し，() () () のように，しきい値を早い時期に超える．この場合は， ϕ_{oc} の計算をすぐに中断し，次の候補点の評価に移るべきである．また，() のように計算が終了するまで，しきい値を越えない場合は，しきい値を新しい値， ϕ_{oc}' に設定し，次の候補点の評価に移る．この浮動するしきい値を導入することで，処理速度を2倍以上増加することができるようになった．

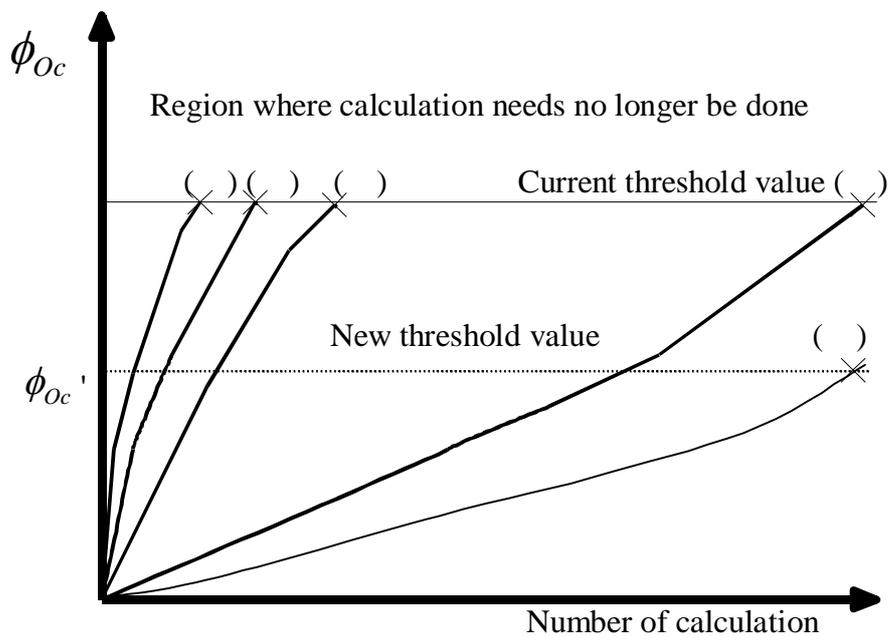


図10 参照円と円軌跡のずれの計算過程増加曲線

これらの手続きで，パラメータ平面上に円軌跡の中心付近に中心候補点が蓄積され，小さな塊が生じる．コンピュータはこれらの塊にラベル付けを行い，塊内でのピークを以下の式によって求める．

$$x_c = \frac{\sum x \cdot f_p}{\sum f_p} \quad f_p > \text{しきい値} \quad (10)$$

$$y_c = \frac{\sum y \cdot f_p}{\sum f_p}$$

ここで， p は (x, y) に位置する点で， f_p はパラメータ平面上に蓄積された候補点の数である．円軌跡の中心位置が認識されると，重なった円軌跡からもそれぞれの円

軌跡を簡単に切り出すことが可能となる。

円軌跡の径は、軌跡が円形であることより、異なる角度で複数回計測を行い最終的に平均をとることにより正確に計測できる。この手順を単純化するため以下の方法による処理を行う。

まず、最初に中心から r だけ離れた距離における輝度の累積を次式で計算する。

$$F(r) = \sum_{\theta=0}^{2\pi} f(r, \theta) \quad (11)$$

ここで、 $f(r, \theta)$ は (r, θ) における輝度を表す。また、この方法を図 1 1 に示す。次に(11)式により計算された結果のグラフを図 1 2 に示す。このグラフは円軌跡の径にあたる r_p においてピークを持ち、この値は以下の式で算出される。

$$r_p = \frac{\sum F(r) \cdot r}{\sum F(r)} \quad (12)$$

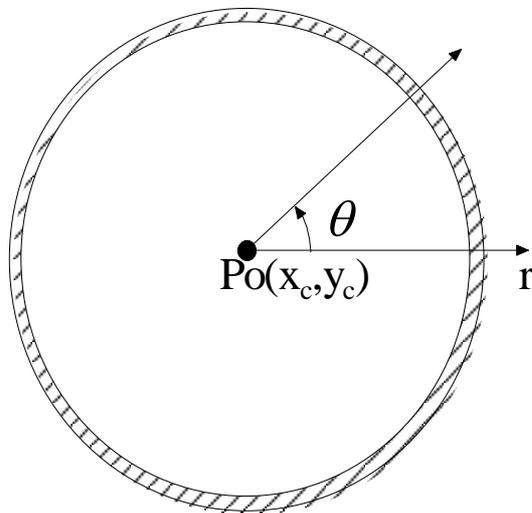


図 11 円軌跡径の算出

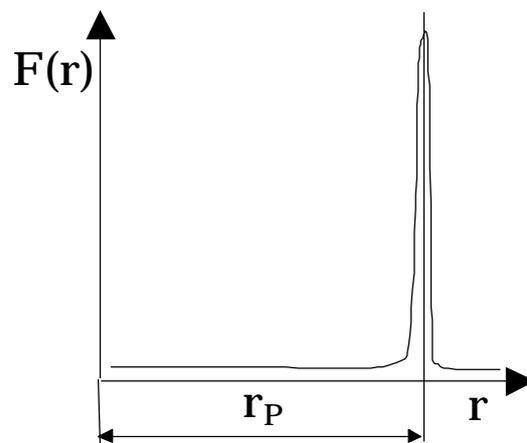


図 1 2 r 軸上に蓄積された輝度値

円軌跡の中心 (x_c, y_c) と半径 r_p は、以下の式によって三次元絶対座標 (x_w, y_w, z_w) に変換される。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \frac{d}{r_p} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、 d は屈折レンズまたは、合わせ鏡による画像のシフト量また f は、TVカメラの焦点距離である。

5 . 計測実験

5 . 1 物体の形状計測

マルチスポットレーザ光を物体表面に照射し，物体表面での反射光を本計測器で計測した．図13に物体形状計測の構成を示す．それぞれのレーザスポット光はTVカメラの受像面上で円軌跡を描く．これらの円軌跡は，カメラから，レーザスポット光までの距離に反比例する．画像処理によって円軌跡の径を算出することで，計測点の三次元位置を計測することができる．すなわち，一枚の映像から多くの計測点の三次元位置を算出できる．本装置ではマルチレーザスポット光として(株)モリテックス製の19×19ドット，20mW半導体レーザを用いた．

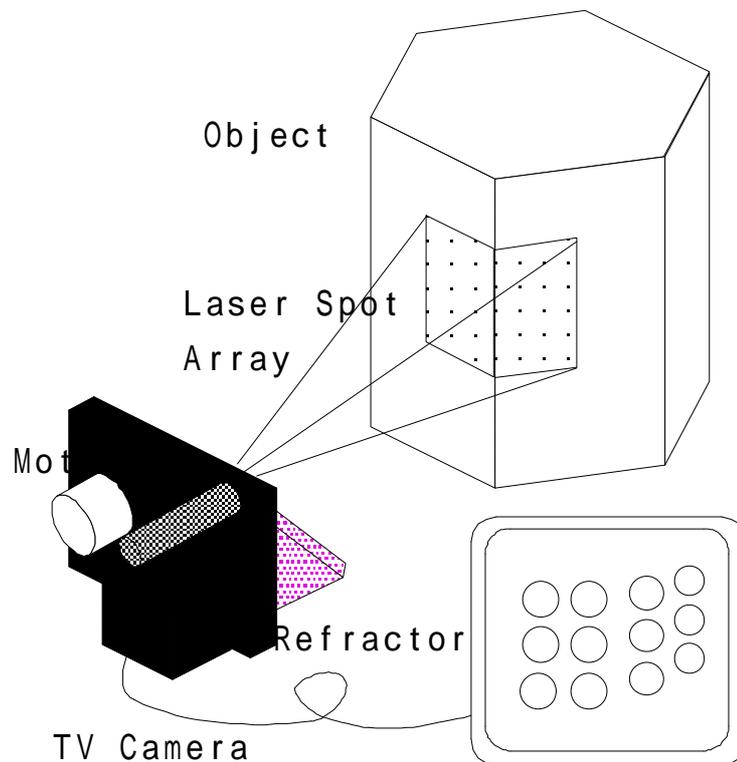


図13 物体形状計測システム構成

図14は距離の異なる位置に置かれた木片にマルチスポット光を投光した映像である。また、図15は三次元計測器によって映像を円形にシフトした映像である。左側の物体がTVカメラから見て遠方に位置しているために小さな円を描いていることが確認できる。

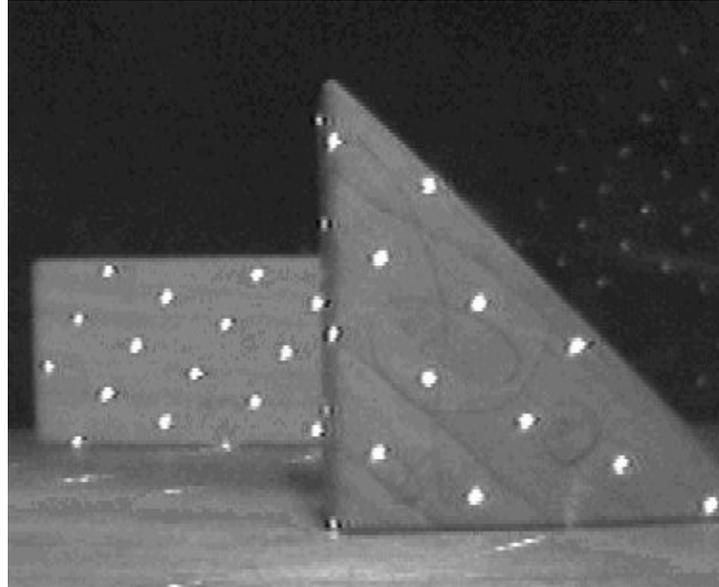


図14 物体表面に照射されたマルチスポット光

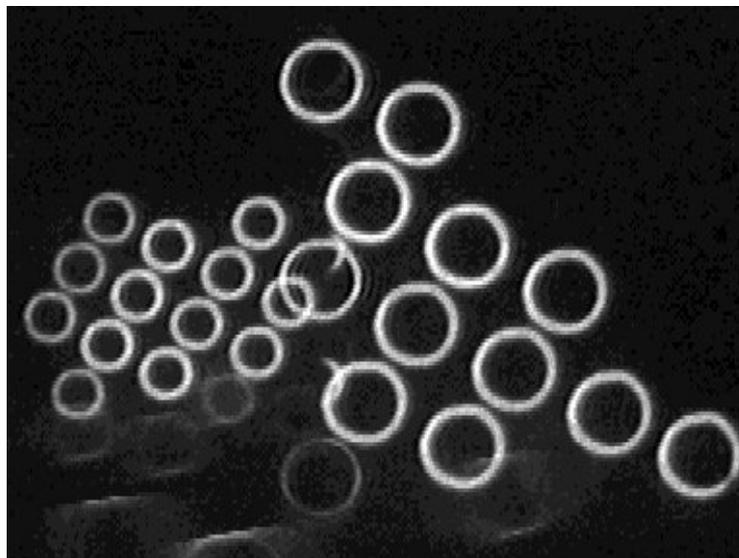


図15 三次元計測器によって撮影されたマルチレーザースポット光の軌跡

図16は、開発したアルゴリズムで、パラメータメモリに蓄積された円軌跡の候補中心である。また、図17は、切り出された円軌跡の解析結果に基づき、ディスプレイ上に円を描いた画像である。

本計測装置の計測性能に検定するために、カメラから、様々な距離においた平板にレーザ光を照射し、実験を行った。図18は、奥行き方向計測性能の検定結果で、図19はカメラの受像面に対し平行な方向の検定結果である。図の点線は、同一の条件の基でステレオ法によって計測を行った場合のデータである。今回開発した計測器はステレオ法で計測した場合と比較して、精度の点で高い性能を有することがわかる。

図20、21は、平板上に置かれた貝殻にマルチスポット光を照射し、各マルチスポット光の三次元位置を計測することで貝殻表面の三次元形状を計測したものである。図20は、計測された三次元データを基に貝殻の形状をディスプレイ上に表現したものである。

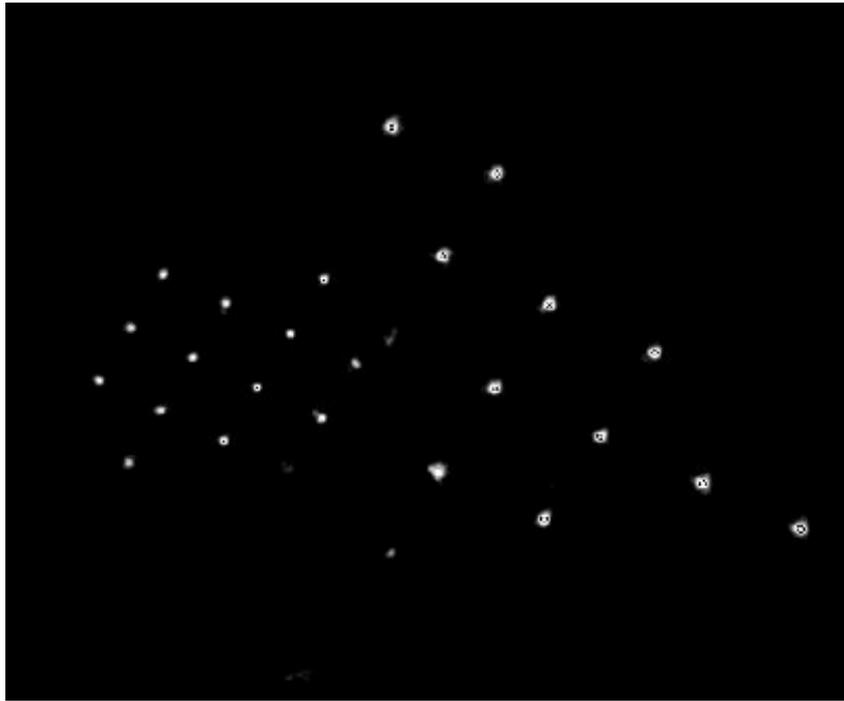


図16 パラメータメモリに蓄積された円軌跡の中心候補点

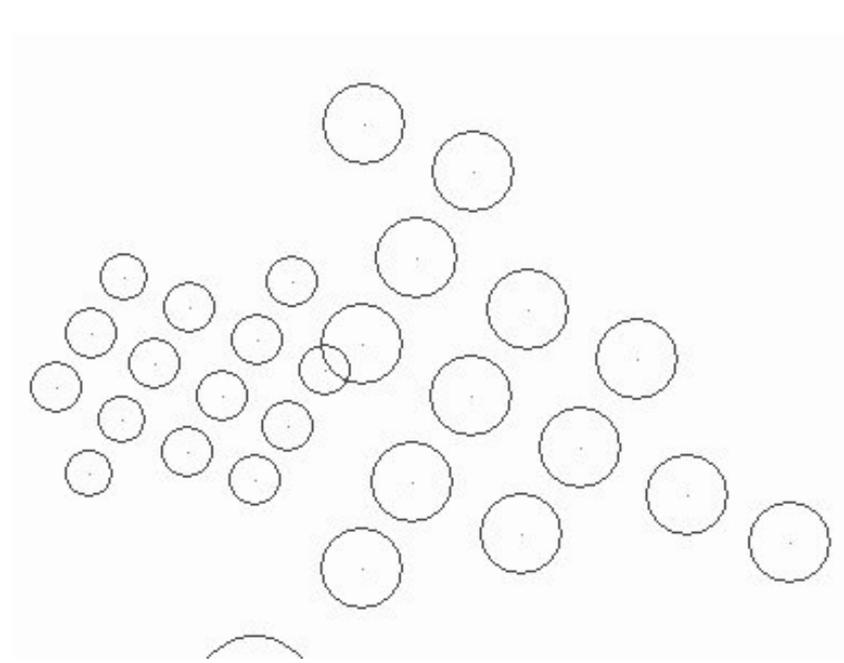


図17 認識された円軌跡

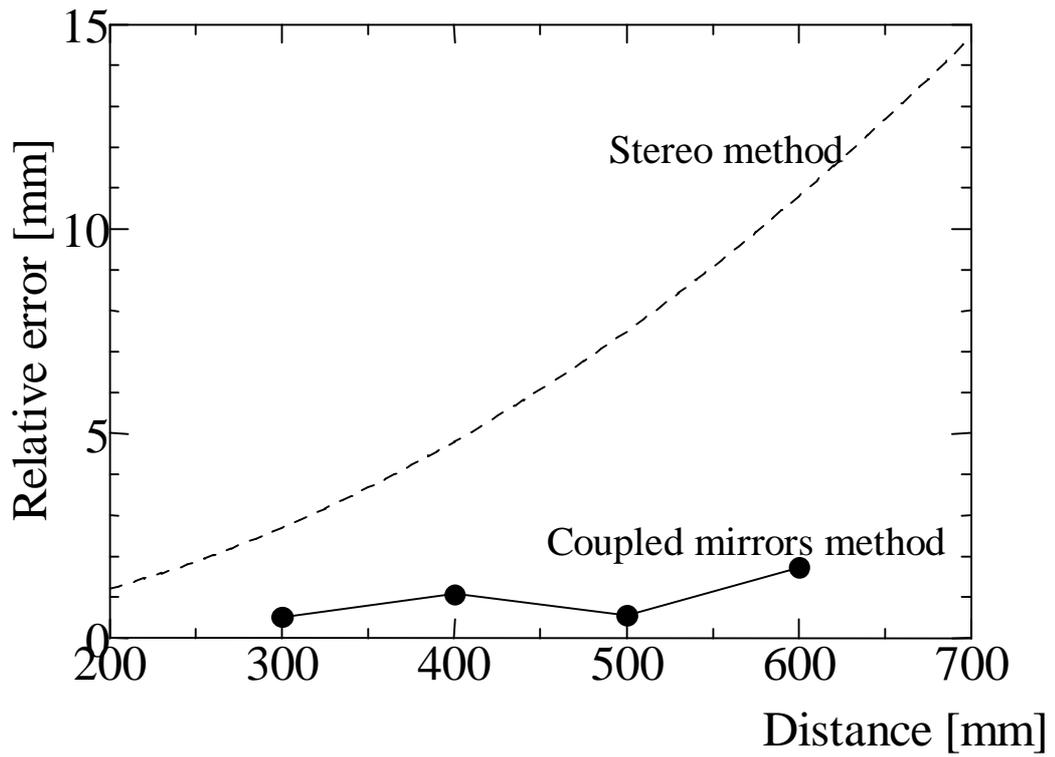


図18 奥行き方向計測性能(ステレオ法との比較)

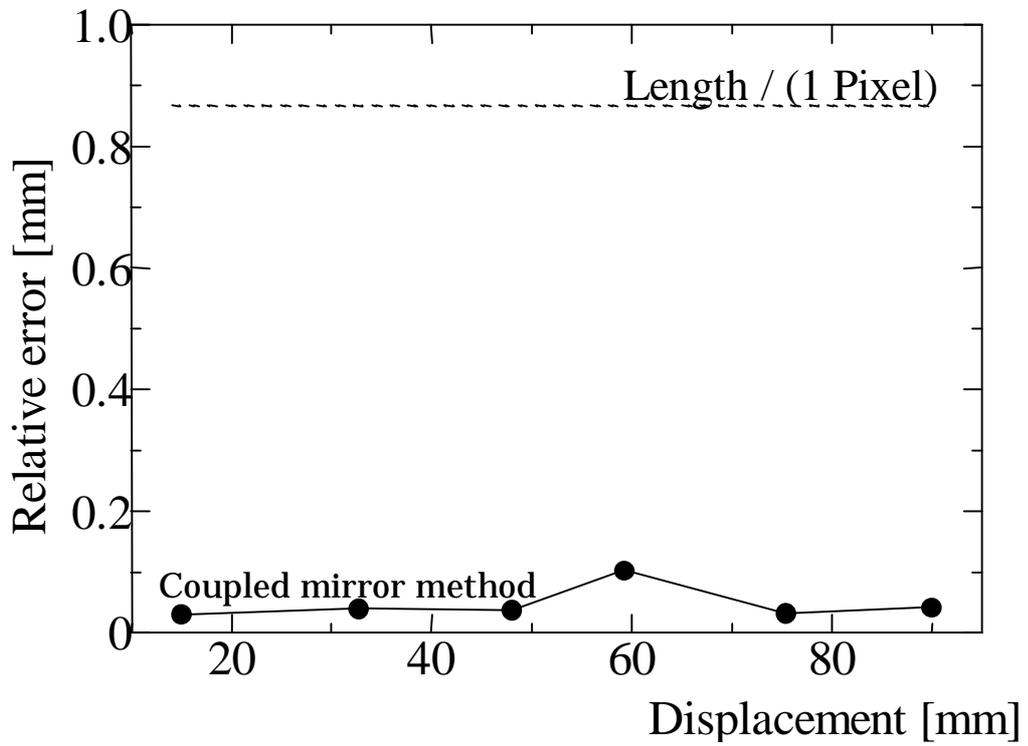


図19 TVカメラの受像面と平行な方向の計測性能(ステレオ法との比較)

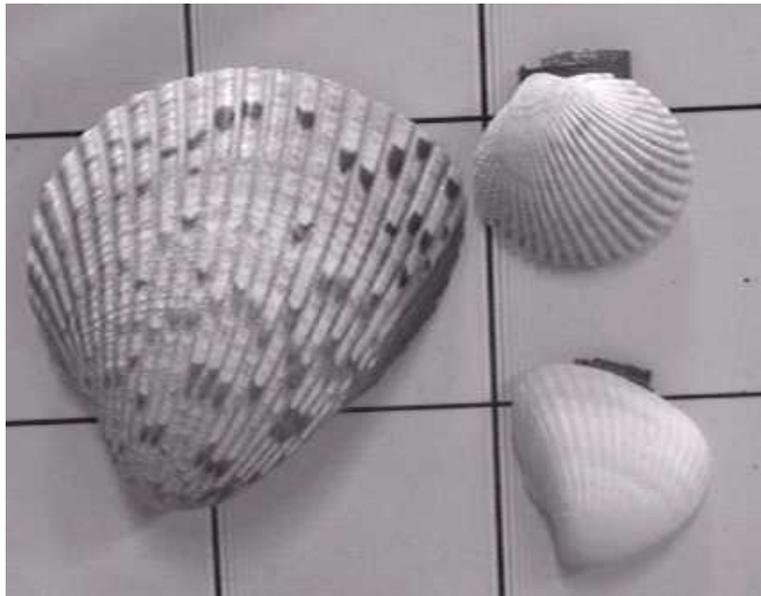


図20 計測対象(貝殻)

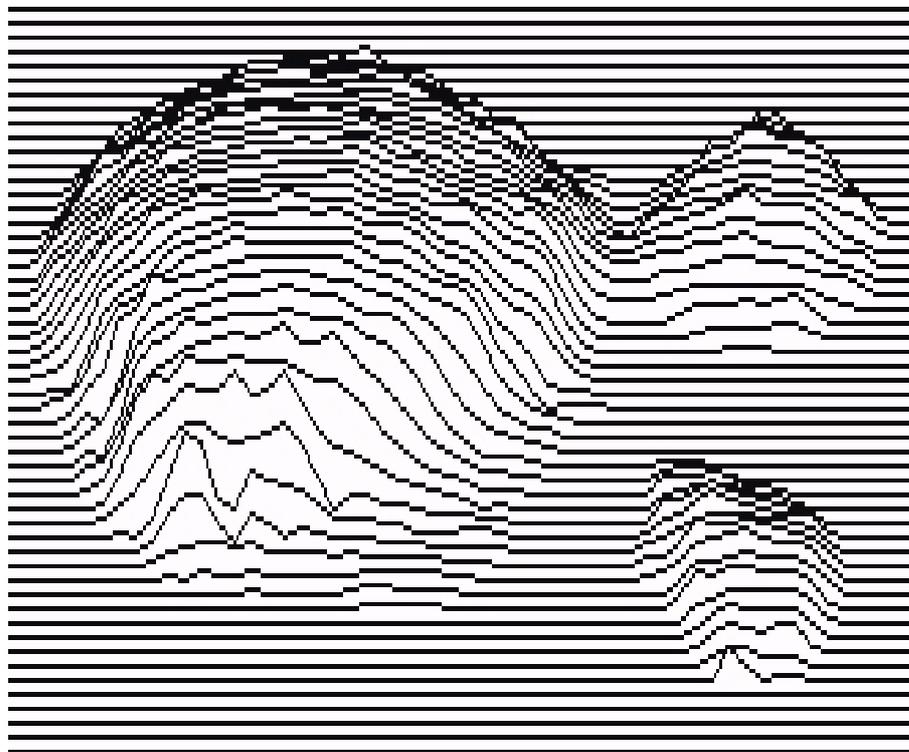


図21 計測結果に基づきディスプレイ上に再現された貝殻

5.2 流体の三次元計測

図 2 2 に示すアクリル製の水槽 (400×250×250mm) 内で生じる三次元流れを本装置を用いて計測した。ポリスチレン粒子 (径約 0.5mm, 比重 1.02) を混入した流体は左手前より流入し, 右上後方から流出する。光源にはハロゲンランプを用い, 横方向から照射した。

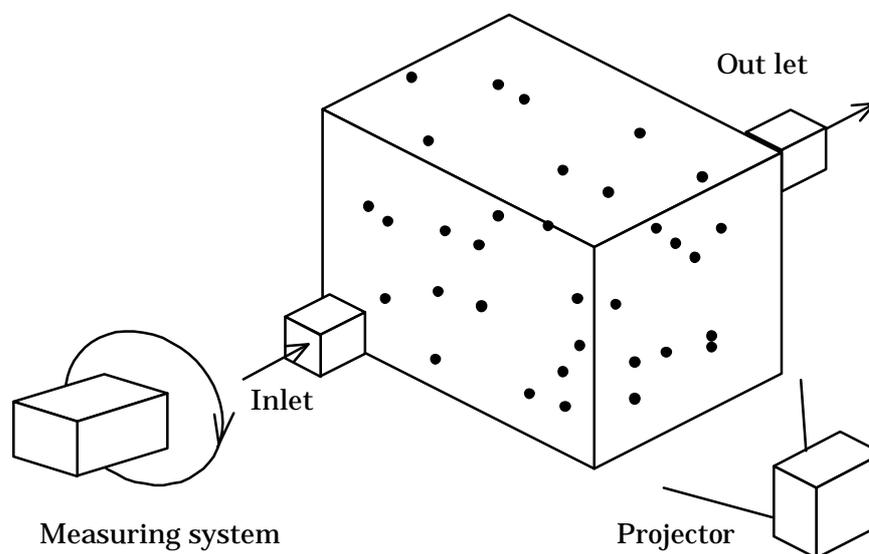


図 2 2 実験水槽構成

TVカメラからの信号はフレームメモリ (マイクロテクニカ製: 分解能 512×256/Field) に取り込まれ, パーソナルコンピュータによって解析される。撮影されたトレーサ粒子の画像を図 2 3 に示す。図 2 4 は, 各円軌跡の中心付近に現れたパラメータメモリ上でのピークである。また, 図 2 5 は, 円軌跡の解析結果に基づきディスプレイ上に表現された円である。流入口 (10×10mm) での流量が 30 [cm³/s] の場合に, 連続する 6 画像 (1/60 秒×6) を取り込み, 処理して得られた速度分布を図 2 6 に示す。ただし, 図 2 6 では, 測定で得られた速度ベクトルを補間して, 格子点上の速度ベクトルを表示している。水槽内で流れが回転していることが確認される。この実験でトレーサ粒子が TVカメラに最も近い位置から遠い位置まで, 250 mm 移動する場合に, (3) 式におけるらせんの径 r_{i0} は約 18 から 5 ピクセルまで変化した。(6) 式の計算過程における r_{i0} の刻み幅は 0.1 ピクセルとしたので, 本実験における奥行き方向の分解能は 2 mm 程度である。TVカメラの受像面と平行な面上では, 測定幅約 250mm に対し, 分解能は 256 ピクセルであるので, 同じ測定幅で約 13 ピクセルの奥行き方向分解能と比較すると 20 倍程度良いと考えられる。研究の背景で紹介した微小ホールをカメラの開口部に設け三次元計測を行った論文でも, 奥行き方向の精度は受像面と平行な面上での精度と比較して 40 倍程悪いと記述されており, 単眼で計測を行う場合の限界で

あると考えられる。

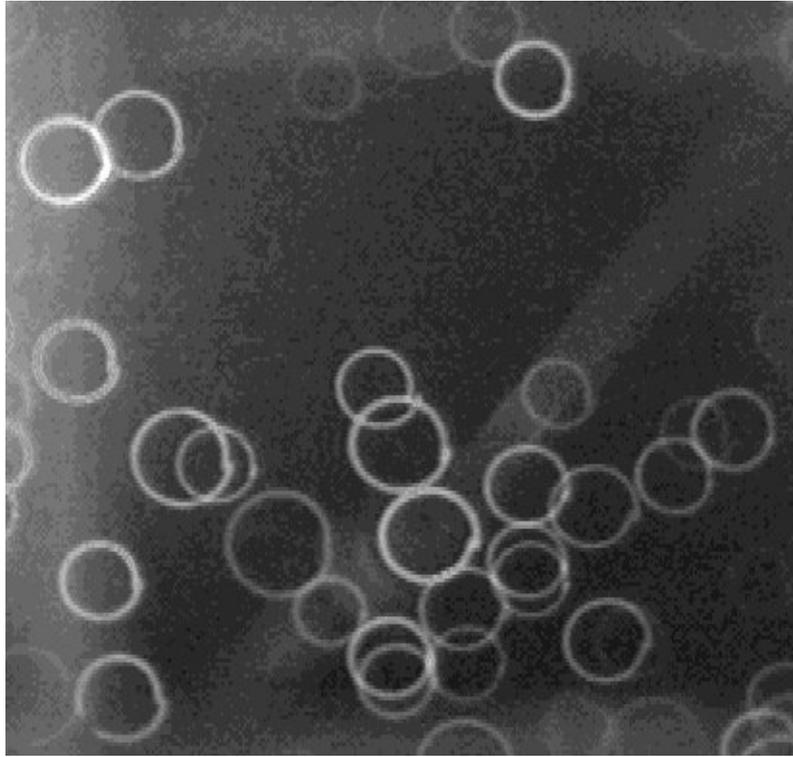


図 2 3 実験水槽内トレーサ粒子の軌跡



図 2 4 円中心に表れたピーク (パラメータメモリ)

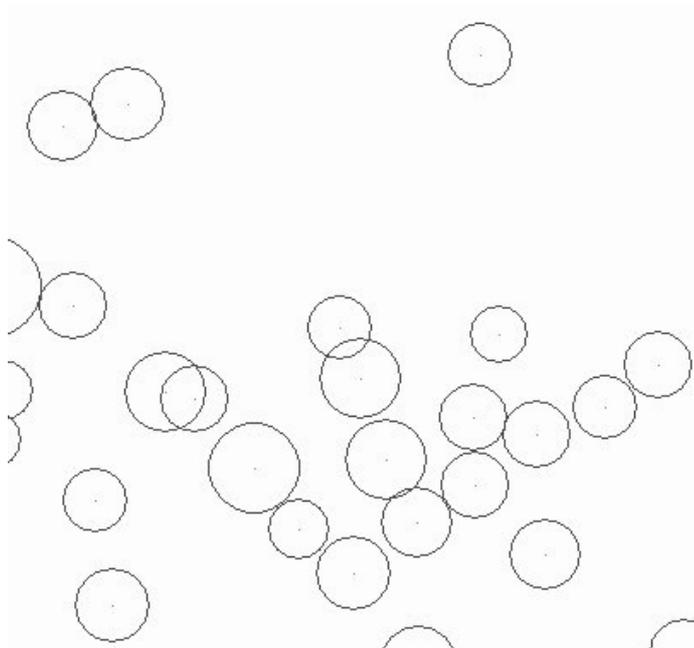


図 2 5 円の解析結果に基づいて表示された円

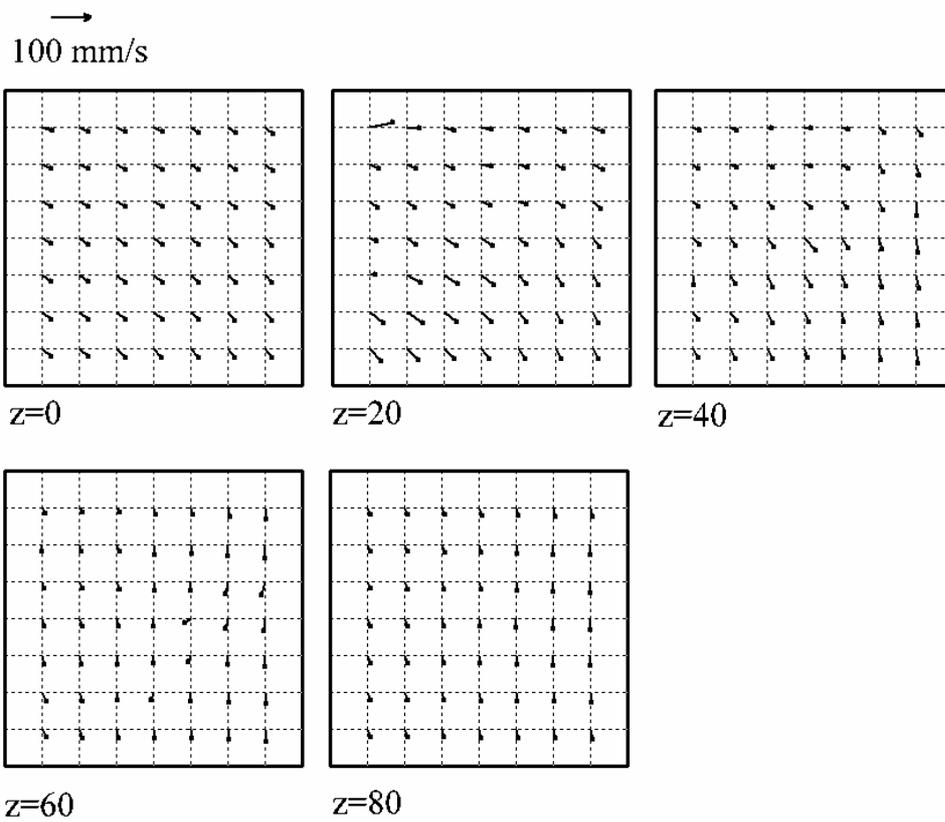
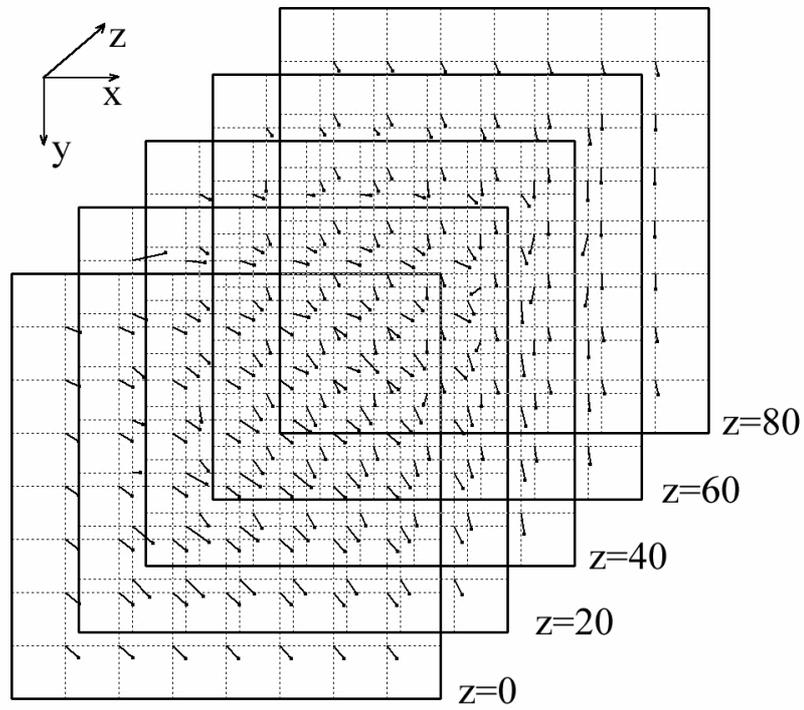


図26 試験水槽内の速度分布

6. まとめ

本研究では、撮影される画像をTVカメラの受像面に平行な面上で高速に円運動させ、撮影されるトレーサ粒子のらせん軌跡を解析することで流れ場の三次元計測を行う手法を提案した。また、マルチスポット光を用いて物体形状計測に応用した。TVカメラ自体を円運動させる代わりにTVカメラの前に屈折板を設置し、屈折板を高速に回転させることで、円形速度バイアスを加えた。また、テスト水槽内で生じる三次元流れを計測し、本方式の有効性を確認した。

本方式の特徴は以下のようにまとめられる。

1. 撮影されるトレーサ粒子の軌跡を解析することにより、トレーサ粒子の位置と速度を同時に計測できる。
2. 一台のTVカメラのみを使用するために、トレーサ粒子を異なる角度からとらえられた画像間で一つ一つ対応させる処理が必要ない。
3. 円形速度バイアスを加えることで、その回転方向から流跡線の始点終点が判別でき1枚の画像からでも流れの方向を判断することができる。

奥行き方向の精度は、受像面と平行な面上での精度と比較して、20倍程度悪く、さらに高精度の計測が要求される場合には、他の方法と組み合わせて計測する必要がある。現在、装置を2台用いて互いに奥行き方向の計測を補う方式を検討している。

流れが高速になると撮影される軌跡が円形から、螺旋形となる。今後の課題としては、互いに重なったらせん軌跡から、それぞれのらせん軌跡を自動的に抽出する方法を見いだすことである。

従来までの画像処理技術では、寸法計測、パターン認識などの静止画処理を中心に研究されていが、今後TVカメラの特徴を活かして動画処理技術が進展していくものと思われる。流れ場の画像計測においても、流れの可視化写真から定量的な情報を得ることから始まり、TVカメラの連続画像を処理する動画処理へと進展している。動画の処理ではTVカメラから毎秒60枚の周期で送られてくる連続画像をコンピュータで遅れることなく全て処理することが理想であるが、それを実現するには、さらなる演算速度の向上が要求される。“可視化画像をTVカメラで撮影しながら、速度ベクトル場の変化の様子をディスプレイ上にリアルタイムで動的に表示する。”というのが本研究の最終的な目標であるが、近年のコンピュータ処理速度の向上状況を考えると、近い将来実現できるものと確信する。

また、本研究で開発した装置が、造船や流体関係等、多くの研究機関で流れ現象を解析する有効なツールとして利用されることを期待する。

7. 今後の展開

本研究により、三次元計測装置の試作及び改良品の製作、解析プログラムの開発を行うことができた。今後、本装置の商品化を目標として開発を進めていくにあたり、より高精度の計測を行うため、装置の機構の見直しを行うと同時に、外観のデザイン等の検討を行う。さらに、解析精度の向上及び解析の自動化、計算処理時間の短縮等、プログラムの改良を進めていくことにより、より付加価値の高い商品を目指す。また、その成果を学会などで積極的に公開すると同時に市場調査を行い、反応を見ながら装置の開発を進めていく予定である。同時に、船舶用プロペラの後方の流れなど、現在のところ報告例のない対象物に対して計測を行うことにより、本装置の使用される可能性を提案する。

さらに、従来の計測装置のみを単体で販売する方法でなく、(株)西日本流体技研の製品として既に存在する小型回流水槽を改良し、今回開発を行った三次元計測装置を組み合わせることにより、物体のまわりの流れを簡単に精度良く計測できる三次元流場計測システムとして展開することができる。現在、画像処理による流場計測の分野は大きく発展しており、様々な分野に応用されている。特に三次元流れに関しては、最も要求が高く、様々な研究機関において研究が試みられている。現段階においては、二次元的な流れを複数組み合わせることにより三次元的に表現する方法が主流であるが、本手法によると、流れを瞬時に空間的に捉えることができる唯一の手法になり得る。しかも従来の製品と比較すると、計測技術もそれほど必要とせず、また、価格的にもかなり抑えることができるため、一般企業や研究機関における研究用だけでなく、大学、高校での基礎教育用としても利用される可能性を持つ。

参考文献

- 1) 今市, 近江: 画像処理を適用した流れの定量的解析, 流れの可視化, 4-14, pp.207-212, 1984
- 2) 近江: 二次元流れ場の流跡写真の画像処理, 流れの可視化, 6-20, pp.19-27, 1986
- 3) 村田, 串山, 木瀬, 前田: 一枚の流跡線画像における流れ方向自動判定法, 日本機械学会論文集 (B編), 56-524, pp.157-162, 1994
- 4) 村田, 佐久間, 田島: 三次元流れ方向自動判定法, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.331-333, 1992
- 5) S.Murata, H.Kise: Automatic method for determining flow directions by using a neural network model, FLUCOME'91, pp.657-662, 1991
- 6) J.A.Walter, C.J.Chen: Flow visualization of particle streaks in offset channel flow by a direct CCD imaging process, Vol.85, Flow Visualization, pp.115-120, 1989.
- 7) Luke.J.Chen, Ramiro Bravo, Ching-Jen Chen: Flow visualization and Numerical simulation of flow in a cubic chamber with offset inlet and outlet, AIAA 2nd fluid dynamics, plasma dynamics & lasers conference, 1991
- 8) B. Khalighi: Study of the intake tumble motion by flow visualization and particle tracking velocimetry, Experiments in Fluids 10, pp.230-236, 1991
- 9) 藤原, 宇田, 伊木, 広瀬: 流れのカラー可視化写真の画像処理方法, 日本機械学会論文集 (B編), pp.58-66, 1990
- 10) R.J.Adrian: An image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed laser velocimetry, APPLIED OPTICS, Vol.25, pp.3855-3858, 1986
- 11) L.Lourenco, Application of laser speckle and particle image velocimetry in flows with velocity reversal, Bull.Amer.Phy.Soc., Vol.31, No.10, 1986
- 12) Lourenco, L., Krothapalli, A., Particle Image Velocimetry, Lecture Notes in Engineering: Advances in Fluid Mechanics Measurements, edited by M.Gad-el-Hak, Springer-Verlag, Berlin, pp.128-199, 1989
- 13) C.Shih, L.Lourenco, L.Van Dommelen, A, Krothapalli: Unsteady flow past an airfoil pitching at a constant rate, AIAA Journal, Vol.30, pp.1153-1161, 1992
- 14) C.Shih, L.M.Lourenco, Z.Ding: Control of unsteady separation over an impulsively started circular cylinder, AIAA Shear Flow Conference, July 6, 1993
- 15) 岡本: 流速ベクトルとヒストグラムによる3次元流速測定, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.328-330, 1992
- 16) Koji Okamoto, H. Madarame, R.Shioya: Measurement of velocity distribution in a tank by velocity vector histogram, FLUCOME'91, pp.601-607, 1992
- 17) 植村, 白井, 山本, 井口: 3次元PTVのためのトレーサ粒子の位置計測法に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.337 - 339, 1992
- 18) 佐藤, 佐田, 笠木, 高村: 気流計測における三次元画像処理流速計の評価, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.346-348, 1992
- 19) 西野, 笠木, 平田, 佐田: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機械学会論文集

- (B), 55-510, pp.404-412, 1989
- 20) K. Nishino, N. Kasagi, M. Hirata: Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, Transactions of the ASME, pp.384-390, 1989
- 21) C.E. Willert, M. Gharib: Three-dimensional particle imaging with a single camera, Experiments in Fluids 12, pp.353-358, 1992
- 22) R.F. Boucher, M.A. Kamala: Near real-time particle image velocimetry (PIV) by streak analysis, FLUCOME'91, pp.443-447, 1991
- 23) Y.A. Hassan, R.E. Canaan: Full-field bubbly flow velocity measurements using a multiframe particle tracking technique, Experiments in Fluids 12, pp.49-60, 1991
- 24) 植村, 長谷川: 画像相関を利用した二次元流れ場の準実時間計測法の開発, 流れの可視化, 8-30, pp.143-146, 1988
- 25) 植村, 山本, 幸川: 二値化相関法, 流れの可視化, 10-38, pp.196-202, 1990
- 26) Fujio, Yamamoto: A new particle identification method for 3-D PTV, FLUCOME'91, pp.617-622, 1991
- 27) 小林, 佐賀, 瀬川, 神田: 二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発, 機械学会論文集(B), 55-509, pp.107-115, 1989
- 28) Mark P. Wernet: Two-dimensional particle displacement tracking in particle image velocimetry, APPLIED OPTICS, Vol.30, No.14, pp.1839-1846, 1991
- 29) 加賀, 井上, 山口: 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報 Vol.14, pp.38-45, 1994
- 30) 木村, 高森, 井上: 相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測 - 円柱後流の変動渦への適用 -, 計測自動制御学会論文集, 23-2, pp.101-107, 1986
- 31) 木村, 高森: 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, 7-26, pp.163-166, 1987
- 32) 木村, 山下, 黒江: ニューラルネットワークによる過誤ベクトルの判定, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.310-312, 1992
- 33) 時空間相関法を用いた流れ場の三次元速度ベクトル分布計測に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, pp.313-315, 1992
- 34) I. Kimura, Y. Kohno: Measurement of three-dimensional velocity vectors in a flow field based on spatio-temporal image correlation, FLUCOME'91, pp.609-615, 1991
- 35) Utami, R.F. Blackwelder: Cross-correlation technique for velocity field extraction from particle visualization, Experiments in Fluids 10, pp.213-223, 1991
- 36) Luke J. Chen, Ching-Jen Chen: Visualization of three-dimensional flow in a cubic chamber with digital correlation method, FLUCOME'91, pp.407-412, 1991
- 37) 茂里, 二宮, 堀田: 流れの可視化と画像処理を用いた流場の同時多量計測法の開発, 日本造船学会論文集 第162号, pp.81-89, 1989
- 38) K. Wozniak, G. Wozniak: Particle-image-velocimetry applied to thermocapillary convection, Experiments in Fluids 10, pp.12-16, 1990
- 39) T.S. Wung, F.G. Tseng: A color-coded particle tracking velocimeter with application to

natural convection, Experiments in Fluids 13, pp.217-223, 1992

40) I.Grant, A.Liu: Directional ambiguity resolution in particle image velocimetry by pulse tagging, Experiments in Fluids 10, pp.71-76, 1990

41) 津田・ほか: 画像処理を用いた高Re数流れの可視化システムの開発, 可視化情報, 11-Supple.1, pp.181, 1991

42) A. M. Waxman, S. Sinha: Dynamic stereo: Passive ranging to moving objects from relative image flows, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, VOL. PAMI-8, No.4, pp.406-412, 1986

43) A.M. Waxman, J.H. Duncan: Binocular image flows: Steps toward stereo-Motion fusion, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, VOL. PAMI-8, No.6, pp.715-729, 1986

(44) K. Kawasue, O. Shiku, T. Ishimatsu, "Range finder using circular dynamic stereo", Proceedings of International conference of pattern recognition, 1998.8, pp.774-776

(45) K. Kawasue, "Position and motion measurement using circular dynamic stereo", Proceedings of international conference on control, automation, robotics and vision, 1998.12, pp.1583-1587

付録

公表済み文献