

多階調画像の特徴を利用した動画画像の解析と

流体計測への応用

二宮伸治

1995年3月

①

# 目次

1 緒論	3
1.1 流体計測分野における画像計測の沿革	3
1.2 2次元画像と多階調画像	7
1.3 研究目的	8
2 多階調画像の特徴を利用した動画画像の解析と 流体計測への応用	10
2.1 多階調画像の特徴	10
2.1.1 解析手法の選定	10
2.1.2 画像処理・解析方法の分類	11
2.1.3 画像変換の線形性およびシフト不変性	11
2.1.4 エッジ、線成分の抽出	12
2.1.5 領域の抽出、分割、統合方法	13
2.1.6 線成分の定義	13
2.2 本研究で適用する画像変換方法	16
2.2.1 ノイズ除去処理	16
2.2.2 エッジ強調処理	18
2.2.3 階層化処理	19
2.3 逐次追跡による線図形の抽出方法	23
2.3.1 連続画像に対する逐次追跡法	23
2.3.2 離散画像に対する逐次追跡法	26
2.3.3 階層化画像を用いた線成分の取り込み処理	27
2.3.4 始点の決定方法	28
2.4 相互相関係数の評価による各線量の抽出方法	34
2.4.1 テンプレートマッチングの改良	34
2.4.2 特徴空間の含括による誤検出の防止	34
3 二次元面内を移動する物体の運動計測	38
3.1 面内移動物体追跡システムの概要	39
3.2 自作装置を用いた二次元運動の計測方法	42
3.3 計測結果	43
3.4 考察	52

二宮 伸治

1995年3月

# 目次

1 緒論	3
1.1 流体計測の分野における画像計測の沿革	3
1.2 2値化画像と多階調画像	7
1.3 研究目的	8
2 多階調画像の特徴とその解析方法	10
2.1 多階調画像の特徴	10
2.1.1 解析手法の差異に基づく2値化画像と多階調画像の定義	10
2.1.2 画像処理・解析方法の分類	11
2.1.3 画像変換の線形性およびシフト不変性	11
2.1.4 エッジ、線成分の検出方法	12
2.1.5 領域の識別、分割、照合方法	13
2.1.6 線成分の定義	13
2.2 本研究で適用する画像変換方法	16
2.2.1 ノイズ軽減処理	16
2.2.2 エッジ強調処理	18
2.2.3 階層化処理	19
2.3 逐次追跡による線図形の抽出方法	23
2.3.1 連続画像に対する逐次追跡法	23
2.3.2 離散画像に対する逐次追跡法	26
2.3.3 階層化画像を用いた線成分の絞り込み探索法	27
2.3.4 始点の決定方法	28
2.4 相互相関係数の評価による移動量の検出方法	34
2.4.1 テンプレートマッチングの概念	34
2.4.2 特徴空間の参照による誤照合の検出方法	34
3 2次元面内を移動する物体の運動計測	39
3.1 面内移動物体追跡システムの概要	39
3.2 自走模型船の2次元運動の計測方法	44
3.3 計測結果	48
3.4 考察	57

4	変形する表面形状の計測	58
4.1	表面形状の可視化方法	58
4.1.1	柔構造円柱表面の可視化方法	58
4.1.2	弾性振動翼表面の可視化方法	60
4.2	表面形状画像の特徴および解析上の問題点	65
4.3	離散画像の逐次追跡による表面形状の解析方法	69
4.3.1	始点の決定方法	69
4.3.2	終点の決定方法	70
4.3.3	2分探索の深さの選択	70
4.3.4	逐次追跡を行う階層の選択	71
4.3.5	階層化方法の選択	71
4.4	計測結果	77
4.4.1	弾性振動翼の形状計測への適用	77
4.4.2	柔構造円柱表面の形状計測への適用	78
4.5	考察	79
5	波高分布の計測	91
5.1	気相界面可視化法	91
5.2	水中表面反射法	95
5.3	物体表面座標の同定方法	96
5.3.1	船体表面座標の計算方法	96
5.3.2	船体表面座標の平面表示と平面の特定	97
5.4	計測結果	100
5.4.1	波高分布計測への適用	100
5.4.2	船側波高計測への適用	100
5.5	考察	102
6	面内流場の流速計測	108
6.1	気泡トレーサーによる可視化方法	109
6.2	輝度分布波形の特徴抽出による流速計測方法	118
6.2.1	流脈輝度分布波形の解析方法	119
6.2.2	流跡輝度分布波形の解析方法	120
6.3	計測結果	122
6.3.1	流脈画像を用いた低速流場計測への適用	122
6.3.2	流跡画像を用いた高速流場計測への適用	123
6.4	考察	125
7	結論	140

# 第 1 章

## 緒論

画像処理技術は、その初期の発達段階においてパターン認識及びシーン解析等に対する必要性から2値化画像の特徴抽出技術を中心として発達してきた。これらの技術は工学上極めて重要で、これまでに多くの研究がなされ、実用に供されているが、画像生成過程において特徴抽出処理の特性が十分に考慮された環境が必要となるのも事実である。しかし、流体力学の分野で扱う可視化画像は、必ずしもこのような2値化画像の特徴抽出処理に適したものは限らず、多階調画像として輝度分布の連続的な情報を有効に利用しなくてはならない場合がほとんどである。むしろ、可視化画像を多階調画像として扱うことにより画像計測の適用範囲は飛躍的に広がると考えられる。

本章では、これまでの画像計測技術の発達を流体計測の視点から概観し、多階調画像の解析技術の必要性及び本研究の方向付けについて述べる。

### 1.1 流体計測の分野における画像計測の沿革

自然現象の空間的情報を、投影平面上で連続的に変化する輝度分布情報（画像）に変換する技術は、「画像センシング技術」と呼ばれ、医学用CT装置、人工衛星などによるリモートセンシング、電子顕微鏡などへの応用が良く知られている。これらの画像情報は、計算機処理のため最近では投影平面上の正方格子接点に分布する離散情報として扱われる。画像情報の量子化が機器の進歩と共に一般化するに従い、画像センシング技術と、その解析技術（画像解析技術）を利用して、従来定性的判断に用いられていた画像から何等かの定量情報を抽出する技術が発達して来た。最も初期の応用は、文字の自動読み取りや工業製品の自動検査などに代表されるパターン認識の分野である [1]。

この分野における代表的手法は2値化画像に対する特徴抽出処理である。パターン認識は、特徴すなわち異なったクラスのメンバー間の区別に有効な測定量を抽出することによって可能になるが、物体の画像から得られた情報を用いて対象をある空間上の一点とみなすには、特徴抽出処理の過程で発生する様々な誤差が、無視できる程小さいことが前提となる。画像の2値化は、多くの情報を持つ画像（当然多くの誤差成分を含む）から、パターン認識の主たる目的である視覚検査、物体検出、物体認識に必要な輪郭情報のみを抽出する。また、2値化画像はその処理が単純であるため、対象の面積、位置、向きといった簡単な幾何学的特徴を高速に抽

出、符号化するのに適している。

これらの技術を何等かの計測に応用するものは画像計測と総称されている。この新しい計測技術は次に示す特徴を持つ。

### 1. 非接触性

ほとんどの場合、計測用のセンサーを必要としない非接触・遠隔計測となる。このため、センサの設置が不可能である対象に対する計測が可能となる。

### 2. 同時多量性

測定対象はTVカメラなどを使って記録されるため、ある時刻における広い範囲に対して瞬間的に同時計測することが可能である。つまり従来の点計測を面計測（あるいは空間的同時計測）にする。

### 3. 簡便性

広い空間内に分布する物理量を一般的な点計測用センサで計測するには、移動装置の設置、センサの位置精度の保持に多大な労力が必要である。画像計測では、イメージセンサの位置精度、量子化の際の分解能、画像処理アルゴリズムが計測精度を決定するが、これらの要素の維持は点計測に比べて容易である場合が多い。また、過渡的現象の計測に対しても点計測に対して同時多量計測システムの構成が容易となる。センサを用いた計測では、その計測値の信頼性は様々な要因に依存する。例えば物理量を電圧に変換するセンサの場合、その計測値は増幅器の温度特性の影響を多少なりとも受けることになる。回路のノイズ対策が不十分な場合には種々のノイズの影響を受けるため、その定量的評価が困難な場合も生じる。一方、画像計測は光学的計測であるため誤差の要因は、撮像デバイスの電気的特性などを除けば光学的なものに限られる。これらは光学系の特性が既知であれば補正可能であり、測定の無人化、高精度化、高速化に有利である。

これらの優れた特長を持つことから、画像計測技術の応用範囲は急速に広がりつつある。流体計測の分野においても、定性的な流れの把握に主として用いられてきた流れの可視化技術と組み合わせて、速度ベクトル場を求める試みがなされ、多くの解析アルゴリズムが提案されてきた。これらの内、2次元の面内での計測（3次元流場の計測も試みられている）についていくつかの代表的な手法を以下に列挙する [2]。

#### 1. タイムライン利用法

細い白金線を使って水を電気分解した時に発生する微小な水素気泡や、細線に油を塗って加熱した時に発生する煙などをトレーサーとして利用する方法は、電気制御トレーサー法として流脈の可視化に用いられてきた。直流電源として矩形パルス発生器を用いることにより、流れを直角に横切るように線状のトレーサーを瞬時に発生させてタイムラインを作ることもできるが、このタイムラインの各部分は流れの速度に応じて下流方向に移動するので、タイムラインの形より速度分布を推測することが可能である。したがって、このタイムラインの形状を多重露光などの方法によって記録すれば、タイムラインの移動距離から流速を求めることができる。

この場合の画像処理には、タイムラインを明瞭に抽出するなどの比較的簡単で、基本的なもので充分である。また、この方法の応用として光によって蛍光を発生する物質を流体中に懸濁し、パルス状に照射されるレーザービームを用いてタイムラインを発生するなどの方法も提案されている（レーザー誘起蛍光法）。この方法は流体中に電極細線を設置する必要が無いため細線後流の影響をなくすることができる点で優れているが、発生する蛍光が非常に弱いため取扱いの難しい映像増強装置が必要であるなど実験上の難点も多い [3]。

## 2. 流跡線追跡法

流れの中に何等かのトレーサー（ポリスチレン粒子など）を懸濁しておき、これによって可視化された流れを適当な時間露光して撮影すれば、個々の粒子は流跡線となって写る。この流跡線の長さや方向からその点の速度ベクトルを求めることができる。この方法は、流跡線の長さから流速値を求めるものであるから、原理的に一枚の流跡写真のみから流速の方向を決定することができる。

この手法について先駆的な役割を果たしたのものとして小林らの研究がある [4]。小林らは、逆流のある流れにも適用可能な、流跡の撮影開始点と終了点を区別する方法を開発した。また、重複した流跡線を分離させるための処理アルゴリズムとして流跡線の輪郭形状を抽出して判定する新しい方法を提案して成功を収めている。ただ、これらの手法は複数台のカメラと複雑な処理アルゴリズムを必要としている。

流跡線画像の量子化には、かつてはデジタイザを使って人間がデータを入力したり、プロッタを画像読み取り装置に利用するなど多大な時間と労力を必要としたが、最近では、ほとんどの場合、TVカメラと画像入力装置により簡便に行うことができるためこのような複雑な解析方法が可能となった。

## 3. トレーサー追跡法

流跡線追跡法では、流跡像に複雑な重複が生じるとその分離に複雑なアルゴリズムが必要となる。したがって、1画像中のトレーサー個数を増加させると処理時間が急増することが多い。そこで、小林らは、連続する4時刻の瞬間画像を用いて、適当な判定条件により4時刻分の同一トレーサーを選別する方法を開発した [5]。評価関数としては、各フレーム間の粒子の移動距離、4時刻間の各粒子の移動距離の分散、移動角度の分散を用い、これらが最小となる組み合わせの粒子経路を同一トレーサ粒子の軌跡として認定する。

この方法は比較的遅い流れ（ $0.1\text{m/s}$ 以下）で成功を収めている。ただし、画像中の粒子密度がさらに大きくなる場合や、速度が急変する流れ場においてはやはり誤追跡の可能性もある。この手法は探索木による再帰的探索を行うため、トレーサ粒子の数が増えると候補となる組み合わせは急増する。3次元への適用は計算速度の面で困難と思われるが、笠木らは、この手法を3次元に拡張して乱流場の精密計測に成功している [6],[7]。

## 4. 局所輝度相関を同定に利用する方法（テンプレートマッチング）

流跡線追跡法は瞬間的に撮影した一枚の画像から流速ベクトルを求めようとしたものである。しかし逆流のある流れにも対応させるためには、時系列で撮影された複数の画像を使わなければならない。

微小時間間隔で撮影された2枚の画像を積極的に使う方法として良く知られているものとしては、連続する画像間の局所的な輝度分布の差を最小にする変位を求める方法がある。すなわち、連続する2枚の画像の局所的な領域(8×8画素あるいは16×16画素程度)を少しずつずらしながら、輝度分布の相関が最大となる変位(画像の差が最小となる)を探す方法である。この場合のアルゴリズムは非常に簡単で、局所相関を評価する領域を限定すれば計算時間も短くなる。しかし、画像内のトレーサーが多い場合は、相関が極大となる変位が多数検出されるため、対応するトレーサーを同定することが困難となる。また、トレーサーの移動量が大きい時には計算時間が長くなる。そのため、流場計測への応用例は少ない。

## 5. 相関法

複数の画像を用いる方法として、流れのある点の時系列的な輝度分布情報が近傍の他の点に一定の時間遅れで現れるということを利用する方法が考えられる。すなわち、連続する2つの画像の2点に関して相互相関を求め、時間差 $\Delta t$ を求める方法である。

筧はこの方法を使って、流場を32×32の画素からなる小ブロックに分割し、この中で個々のトレーサー粒子追跡は行わず、画像の濃度パターンの変化を相関関数として表現し、流速ベクトルを求めた[8]。木村らはこの手法を発展させ、ブロックの画素数を減らすことや、この手法の問題点などを詳しく検討している[9],[10]。また、植村は、解析時間を短縮する目的で、2値化画像を対象とした相関係数の計算アルゴリズムを開発した[11]。

相関法の特徴は、個々のトレーサーを同定することなく、画像の変化やトレーサーの移動を画像間の相関係数で表現するところにある。したがって、解析アルゴリズムは比較的簡単明瞭となる。しかし、多階調画像に適用する場合には解析時間が長いという欠点も有している。また、流れが急変したり、画像のS/N比を十分に取れない時の計測誤差が比較的大きくなるため、計測誤差を評価するための対策が必要となる。

## 6. 時空間微分法

相関法では、流場をある大きさのブロックに分割し、その処理領域内の平均流速ベクトルを求める。これらの方法は空間分解能が低く、複雑な流れを解析するには適当ではない。そこで、ある一点の座標についての流速を求めることが可能な、画像の時空間微分に基づく方法も提案されている。

この方法では、画像の時間変化要因を運動のみに限定し、画像の時間的なずれの量が小さく、かつ局所的に一定と近似できると仮定して微小時間間隔で得られた2枚の画像の輝度分布の変化を時間微分、空間微分の項に分解して速度分布を得る。

この手法は原理的に非常に分解能の優れた手法である。しかし雑音の影響を受けやすいという欠点がある。

これらの方法を概観すると、可視化方法については、初期のタイムライン利用法を除き、ほとんどの実験例ではトレーサー粒子を流体中に定在させる懸濁法が用いられている。これは、実験の簡便さ、汎用性および流れの攪乱を少なくする目的から選択されたものであるが、懸濁法の問題点としては次の点が挙げられる。

### 1. トレーサーの追従性の問題

粒子の比重が流体と異なる場合、または粒子径が大きい場合にはトレーサー粒子は正確に流体に追従しない。一般にトレーサー粒子の材質としては比重が水に近いポリスチレン粒子か、またはラテックス粒子が使用されることが多いが、いずれにせよ流体と完全に比重を等しくすることは困難である。また、トレーサー追跡法の場合、粒子の径を極端に小さくすると粒子の位置の決定が困難になるため、追従性はある程度犠牲にして比較的大きな径(0.2mm~1.0mm)の粒子が使用される。相関法では、個々の粒子を追跡しないため、追従性に優れたさらに小さな粒子を使用することが可能である。

### 2. トレーサーの粒子密度の問題

計測の同時多量性を重視すると、トレーサーの粒子密度は高い方が望ましい。しかし、輝度相関を用いる方法では、トレーサーの存在による輝度分布パターンの特徴の変化を検出するため、トレーサー密度が高すぎても、低すぎても信頼できる結果は得られない。また、トレーサーの局所的粒子密度は流場に依存するため、適切な粒子密度の制御は困難である。

一方、トレーサー追跡法では、粒子密度が低いほど対応付けの誤りが発生しにくくなり、計測精度は向上するが、同時多量性を確保するため密度を高くすると誤追跡の可能性が高くなるため複雑な処理が必要となる。

これらの解決には、より散乱光の強度が高く、比重の制御が容易なトレーサーを開発する必要がある。

いずれにせよ、画像計測技術の流体計測の分野への応用研究は、高速な画像処理装置の普及とあいまって数多く行われるようになったが、現状では低速のよく制御された流場に適用されるに留まっている。また適用される画像解析手法も、相関法を除いて2値化画像の輪郭情報の解析を軸とするものがほとんどであり、この手法の持つ本質的な制限(2値化しきい値の依存性など)により可視化方法に厳しい制約があるのが現状である。

## 1.2 2値化画像と多階調画像

前節で示すように流体計測の分野に適用される画像解析手法の多くは、2値化画像に対する特徴抽出技術を基礎としたものである。2値化画像の処理・解析の手法は、画像処理の初期の発達段階において幾何学的特徴の認識や意味理解の分野で著しい発展を遂げ、かなり体系的な方法論が確立している。

2値画像は、多階調画像に比べ、記憶のために必要とする容量が少なくすみ、処理の負担も小さい。画像処理を効率良く進める上で非常に有用である。また物体の大きさや位置のような幾何学的特徴を簡単に計算する事が出来る。物体が2つ以上ある場合の個々の物体のラベル付け等も容易である。

流体計測の分野においても、輪郭形状より重心点を算出する処理によりトレーサーの座標を簡便に決定できるという利点がある。しかし2値化画像に含まれる情報は物体の輪郭形状のみであるため、質の良い解析を行うためには元の画像上で物体と背景の間に高いコントラスト

が必要である。コントラストが充分でない場合に適用するため様々な最適しきい値の選定方法が提案されているが、一般にトレーサー等の懸濁物によって可視化された流れの画像等のヒストグラムは明確な2峰性を示さない場合が多い。

さらに、対象の複雑さが輪郭形状から推定できるレベルを越えた時には極めて複雑で不確定要素の多い処理が要求される。例えば、トレーサー粒子の移動方向の決定や流跡が交差する場合が該当する。時系列画像で同じトレーサーを同定する場合でも、誤った同定結果を客観的に判断することは輪郭形状の情報のみでは困難である場合が多い。

一方、画像に本来含まれている情報は輪郭形状のみでなく、物体の陰影、表面の特性、濃度等多岐にわたっている。そこで、多階調画像の輝度分布を連続関数として扱う手法を軸として流体計測に適合する画像計測の手法を捉え直すことで、より汎用性および精度の高い画像計測の手法を確立できる可能性があると考えられる。もちろん多階調画像の情報量の多さは処理効率の低下、ノイズと有効な情報の分離の困難さを引き起こすが、多岐にわたる多階調画像の特徴抽出処理の技法を適切に選択または新しい工夫を加えることによって、従来の画像計測で適用が困難であった分野に用いる手法の開発が行える余地があると思われる。

流体計測で、多階調画像の輝度分布を直接扱う手法の利点が生かせる適用分野としては、マーカーの設置できない対象の運動計測、輝度分布が時系列で変化するか、または輪郭が不鮮明なトレーサーを用いた流速場計測等が挙げられる。次節で、これらの分野に対して本研究で行った具体的なアプローチ及び目的について述べる。

### 1.3 研究目的

本研究の目的は、2値化画像の解析技術の適用が困難な対象に対して、多階調画像の特徴に関する考察に基づく新しい画像計測方法を提案し、その有効性及び問題点を検証することである。

本研究の基礎となる新しい手法として、1) 表面形状や流脈に代表される線成分の正確かつ確実な抽出と、線成分上の輝度分布曲線の積極的な利用により線画像の持つ有効な情報を最大限に取り出す方法、2) 時系列画像で対象を追跡する方法として、従来からあるテンプレートマッチングの手法に、誤った照合を検出する方法を組み合わせ対話的に処理する方法を提案する。

本論文は7つの章で構成されている。第1章では、流体計測の分野における画像計測技術の沿革から、本研究の位置付けと目的について述べる。

第2章では、画像解析の対象として多階調画像を捉えた時の特徴を概観し、多階調画像における線成分の扱い方を定義する。また本研究で適用したいいくつかの画像変換の手法を説明する。次に、輝度分布を連続関数とした時の線成分の定義に基づく輝度分布尾根線の新しい逐次追跡方法について説明する。さらに、画像の階層化と絞り込み探索により効率良く複雑な線成分を抽出する手法の詳細を述べる。最後に、相互相関係数の評価によるテンプレートマッチングの誤った照合を検出する考え方について説明する。

第3章では、テンプレートマッチングの手法と、特徴空間の領域分割により誤った照合結果を検出するシステムを組み合わせ、効率良く対象の座標同定を行う具体的なシステムの構築方法について説明する。また、このシステムを、自走模型船の2次元運動計測に適用し、本方

法の応用性及び適用限界について評価する。

第4章では、受動変形する表皮や弾性翼の任意の2次元断面の可視化画像から表面形状の時系列変化を、画像の階層化と絞り込み探索により連続的に定量化する手法について述べる。さらにこの方法を適用した際の効果および問題点について考察する。

第5章では、波高を実用上十分な精度で簡便に計測する方法として、まず新しい波面（および船側波形）の可視化方法及びその画像の画像処理による計測法を提案し、可視化方法、解析方法について述べる。

第6章では、気泡トレーサーの特徴を積極的に利用した可視化方法、解析方法を提案する。具体的には、水素気泡を用いた場合、低速域では流脈画像の輝度が下流方向に減衰する分布になることを利用して、連続画像の逐次追跡と輝度分布波形解析による速度場の計測を行う。高速域では、輝度が鋸波状に変化するLLS光源を試作し、高速移動する気泡の一本の流跡に時系列の情報を残して、流跡上の輝度分布波形の検出により速度場を計測する。これらの方法では、その輝度分布波形の形状より流向も容易に判定できるので、従来複雑なアルゴリズムを必要とした同一トレーサーの対応付けや交差する流跡の分離などの判定が容易になる等の利点が考えられる。上記の方法を船体後部の流場計測に適用し、気泡トレーサーの面内流側場計測への適用性について検討する。

第7章では、第6章までに得られた結果を総括し、本研究で新しく提案した手法の評価および今後の課題について考察する。

## 2.1 多階層画像の特徴

画像計測の適用が困難であるに對して多階層画像の概念と採用した解析手法の考察とを目的として、多階層画像そのものに含まれる階層数が減少し、減少するものとする。その解析手法も従来とされた階層に基づいては非常に困難である。しかし、解析手法的な手法の組み合わせは一層の階層をもち、手法の多層的な適用性に対する評価を施すことも可能である。

そこで本章では2次元画像の階層ごとの比較に際して多階層画像の特徴および処理・解析手法の分類を行い従来の手法を評価する。

### 2.1.1 解析手法の差異に基づく可視化画像と多階層画像の定義

画像平面的な任意の位置を  $(x, y)$  とし、画像平面的な輝度分布の連続画像表現を  $I(x, y)$ 、変換画像を  $I'(x, y)$  とし、画像変換後の輝度分布と変換画像表現は特性画像  $H(x, y)$  として、(2.1)式で表される。

$$I'(x, y) = I(x, y) \otimes H(x, y) \quad (2.1)$$

特性画像を任意の定義を用いて(2.1)式で表した時、この特性画像が示す画像は可視化画像と表される。

$$H(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) \geq T \\ 0 & \text{if } I(x, y) < T \end{cases} \quad (2.2)$$

これは、画像平面的な任意の部分で抽出する特徴値として階層ごとの階層に相当する。

## 第 2 章

# 多階調画像の特徴とその解析方法

計測精度と実験の利便性の相反する要求を満足する画像計測システムを構築するには、得られた画像の持つ情報を最大限に活用する必要がある。そのためには階調画像から直接特徴抽出する手法の適用が不可欠であると考えられる。本章では、多階調画像を画像解析の対象として扱う時の特徴を考察し、それに基づいて本研究で適用、または新しく考案した多階調画像に対する特徴抽出および照合の手法の詳細について述べる。

### 2.1 多階調画像の特徴

画像計測の適用が困難な対象に対して多階調画像の特徴を利用した解析手法のを考える場合、多階調画像そのものに含まれる情報量が極めて膨大なものとなるため、その解析手法も統一された理論に基づくことは非常に困難である。しかし、対症療法的な手法の積み重ねは一般性を欠き、手法の客観的な妥当性に対する評価を難しくするものと考えられる。

そこで本節では 2 値化画像の場合との比較に重点を置いて多階調画像の特徴および処理・解析手法の分類を行ない従来手法を概観する。

#### 2.1.1 解析手法の差異に基づく 2 値化画像と多階調画像の定義

画像平面の任意の位置を  $(x, y)$  とし、画像平面の輝度分布の連続関数表示を  $I(x, y)$ 、変換関数を  $f$  とした時、画像変換後の輝度分布を表わす関数表示は特性関数  $b(x, y)$  として、(2.1) 式で表わされる。

$$b(x, y) = f(I(x, y)) \quad (2.1)$$

特性関数を任意の定数  $c$  を用いて (2.2) 式で表わす時、この特性関数が示す画像は 2 値化画像と称される。

$$b(x, y) = \begin{cases} 1 & \cdots I(x, y) \geq c \\ 0 & \cdots I(x, y) < c \end{cases} \quad (2.2)$$

これは、画像平面の明るい部分を抽出する対象物として背景と区別する処理に相当する。

2値化画像は、多階調画像に比べ、獲得、蓄積、処理が容易であるため、画像処理を効率良く進める上で非常に有用である。また簡単な演算により物体の大きさや位置のような幾何学的特徴を得ることが可能であるため非常に広い分野で解析の対象となっている。

しかし2値化画像の画像処理は、物体と背景の間に高いコントラストが必要であり、その画像に含まれる情報は物体の輪郭形状のみである。これには物体全体の形状、あるいは空間における姿勢についての情報はほとんど含まれていない。そのため、2値化画像の画像処理は様々な局面で多用されているが、可能なことと不可能なことに関してはかなり明確に区別できる。

一方、(2.1)式で定義できる画像を多階調画像と称する。2値化画像は、多階調画像のある特別なケースと考えることもできるが、本研究では画像解析の対象として画像を分類するので多階調画像と区別して考える。

### 2.1.2 画像処理・解析方法の分類

2値化画像と多階調画像に対する代表的な画像処理・解析方法の分類を Fig. 2.1に示す。2値化画像では、その輪郭形状が一意的に決定される為、画像における物体の大きさや位置などの幾何学的特徴を計算する事ができる。また、物体が複数ある場合にも、物体の数やと穴の数の差のような位相幾何学的性質を決定する事ができる。輪郭形状の一意性により領域の分割も一意的に可能であるため、物体のラベル付けによる分類識別なども比較的容易である。さらに、2値化画像に対するマスク処理により細線化画像や輪郭画像などより特徴が明瞭な画像に変換する事ができる。

一方、多階調画像では、含まれる情報が物体の陰影、表面の特性など多岐にわたり、さらに撮像系の電氣的ノイズなどが少なからず混入しているため処理・解析方法も非常に多く、処理内容そのものも計測対象に依存した複雑なものになる。代表的な処理・解析内容を次に示す。

- 画像変換（ノイズ除去、強調などのフィルタリング処理）
- エッジ、線成分の検出（輝度勾配の不連続性の検出処理）
- 領域の識別、分割、照合
  - － 表面特性（反射率分布、テクスチャなど）の解析
  - － 小領域の相互相関係数の評価（テンプレートマッチング）

実際の解析では対象に応じてこれらの手法を適宜組み合わせ用いられる場合が多い。次節からそれぞれの手法の概要を示す。

### 2.1.3 画像変換の線形性およびシフト不変性

画像変換とは、多階調画像を線形演算によって新しい多階調画像に変換することを指す。このような操作の目的は通常、ノイズ除去、強調などである。また、画像解析の前段階として解析に有利な画像を生成するための前処理として利用される。その代表的な例としてはエッジ抽出に用いられる偏微分操作である。これらの手法は1次元信号のための信号解析の手法を2次

元に拡張したもので、入力画像と変換画像との関係を (2.3) 式のように定める時、(2.4),(2.5) 式に定義される関係を満足する演算を扱う。(α,β は任意の定数)

$$\begin{aligned} b_1(x, y) &= f(I_1(x, y)) \\ b_2(x, y) &= f(I_2(x, y)) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\alpha b_1(x, y) + \beta b_2(x, y) = f(\alpha I_1(x, y) + \beta I_2(x, y)) \quad (2.4)$$

$$b(x - \alpha, y - \beta) = f(I(x - \alpha, y - \beta)) \quad (2.5)$$

(2.4) 式による変換は線形性、(2.5) 式による変換はシフト不変性を表す。厳密には、実際の画像では生成段階において線形の変換がなされていないため、その画像に対する変換も線形の演算では十分に対処出来ない場合もある。また画像は有限な領域に範囲が限られるためシフト不変性も限られた平行移動量に対してのみ成立する。光学的な収差による歪みもシフト不変性を破綻させる要因となる。

#### 2.1.4 エッジ、線成分の検出方法

エッジ、線成分の検出は、偏微分演算子を用いたエッジ強調処理などの画像変換と、生成された中間画像に対するしきい値処理による位置の検出で構成される場合が多い。しかしこの方法はノイズ成分の影響を受けやすく、また、しきい値処理により連続する線成分も断片的な線分として抽出されることもあるため、エッジ近傍における濃度勾配や対象の形状に関する不完全な予備知識から断片的な線成分を連結する処理が必要となる。

しきい値に依存しない検出方法としては、画像上の線成分のパラメータ表現を用いる方法が提案されている [12]。画像上の線成分が直線であることがあらかじめ判っている時には Hough 変換が有効である。しかし形状曲線が特定出来ない場合にはパラメータ空間の次元数が増加するため処理の負担が大きくなる。形状の知識があらかじめ与えられている場合には、その形状に適合する図形を直接探索することも可能であり、円形の重なり合った粒子像の分離などの適用例がある [13]。

対象とする線成分が滑らかに変化し、明暗差が十分に大きい場合には、滑らかさや近傍領域での明暗差を評価するためのエネルギー関数を導入し、その関数の評価値を最小にする曲線を探索する手法が適用できる。

対象が閉曲線の時には有力な手法として SNAKES が提案されている [12]。この方法では曲線座標  $s$  上の座標値  $x(s), y(s)$  から輪郭のパラメータ表現  $v(s)$  を (2.6) 式で定義する時、(2.7) 式で示す輪郭形状の評価関数  $E_{snake}$  の最小化問題を解くことにより輪郭の位置を決定する。

$$v(s) = (x(s), y(s)) \quad (2.6)$$

$$E_{snake} = \int \{E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{con}(v(s))\} ds \quad (2.7)$$

ここで、 $E_{int}$  は線成分上の輝度変化のパラメータ、 $E_{image}$  は線成分上の明るさのパラメータ、 $E_{con}$  は対話的に与えられる拘束力のパラメータである。

### 2.1.5 領域の識別、分割、照合方法

領域の識別、分割、照合の手法は、画像を構成する面を記述する有用なデータの抽出を目的とする手法（画像解析）と、抽出された情報を用いて画像中に存在する対象の記号記述を行う手法（シーン解析）から成る。

2値化画像を対象とした特徴抽出では輪郭形状から決定される位相幾何学的表現や形状計量による表現が用いられるのに対して、多階調画像を対象とする場合にはモーメントによる表現やテクスチャによる表現を用いるのが一般的である。

画像の輝度分布を表わす特性関数が  $b(x, y)$  で与えられる時  $m \times n$  画素で構成される小領域の離散的な  $(p+q)$  次のモーメント  $M_{pq}$  を (2.8) 式、重心回りのモーメント  $\hat{M}_{pq}$  を (2.9) 式に示す。モーメントによる表現では輪郭形状に関する明確な情報が得られない場合においても対象の平行移動、回転、相似変換に不変な特徴量を記述することができる [13]。

$$M_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M x^p y^q b(x, y) \quad (2.8)$$

$$\hat{M}_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q b(x, y) \quad (2.9)$$

ここで、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  は、 $m \times n$  画素の小領域内の特性関数の重心である。

複数の局所的な領域の照合には相互相関係数の評価によるテンプレートマッチングの手法がよく用いられる。これは基準となる画像のパターンと対象画像との相関処理によって識別を行う方法である。

相互相関係数はパターンの平行移動に対して不変な特徴量であるが、対象とする画像がノイズなどの影響によって変化する場合や照明条件によってコントラストが変化する場合には適用が難しい。2値化画像に対する相互相関係数の評価ではコントラスト変化の問題は若干軽減されるが、多階調画像に適用する時には適切な画像変換によってノイズの影響を軽減するなどの対策が必要となる。

### 2.1.6 線成分の定義

ノイズや非線形性を有する画像に対して有効であると考えられる SNAKES の概念を援用するには、多階調画像上における線成分の定義を明確にする必要がある。線成分は Fig. 2.2 に示すように、同一領域内の任意の2点 A, B を結ぶ道程  $s$  とみなすことができる。線成分の極大集合は領域を示すことになる。

2値化画像では輪郭が一意的に存在するため線成分は (2.10) 式に示すように輪郭を横断しないという条件を満足しなければならない。

$$\begin{cases} b(x, y) \geq C_1 \\ \frac{\partial b}{\partial x} = \frac{\partial b}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

多階調画像では領域の境界にあいまいさがあるため、(2.10) 式を拡張することを考える。まず Fig. 2.2 に示すように曲線  $s$  上の任意の点を原点とした相対的な極座標を  $(r, \theta)$  と置き、多階調画像  $f(x, y)$  における線成分を (2.11)-(2.13) 式で定義する。

$$f(x, y) \geq C_1 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial f}{r \partial \theta} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} \leq C_2 \quad (2.13)$$

この定義はノイズに対して敏感だが、(2.14)式に示すように輝度分布関数である  $f(x, y)$  の代わりに線上の任意の点を原点にとり、そこから(2.14)式で示す半径方向に  $R$  の長さで積分した値  $g(\theta)$  および(2.15)式で示す半径方向の輝度変化の自乗和  $h(\theta)$  を用いて(2.16)-(2.18)式のように定義し直すと、線成分の延長方向のノイズ成分を平滑化する効果があり実状に即した形式となる。本研究では以後(2.16)-(2.18)式を線成分の定義として用いる。

$$g(\theta) = \int_0^R f(r, \theta) dr \quad (2.14)$$

$$h(\theta) = \int_0^R \left\{ \frac{\partial f(r, \theta)}{\partial r} \right\}^2 dr \quad (2.15)$$

$$\frac{g(\theta)}{R} \geq C_1 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial g(\theta)}{r \partial \theta} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial g(\theta)}{\partial r} \leq C_2 \quad (2.18)$$

$C_1, C_2$ は領域を区分するためのしきい値となる。

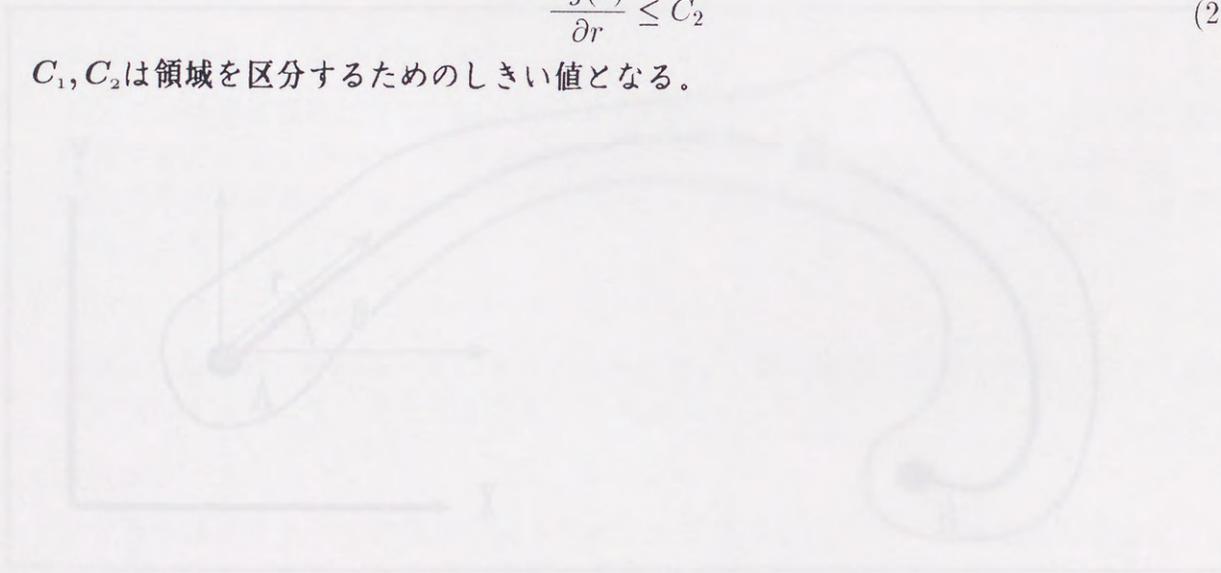


Fig. 2.2. Schematic image of radial suspension point

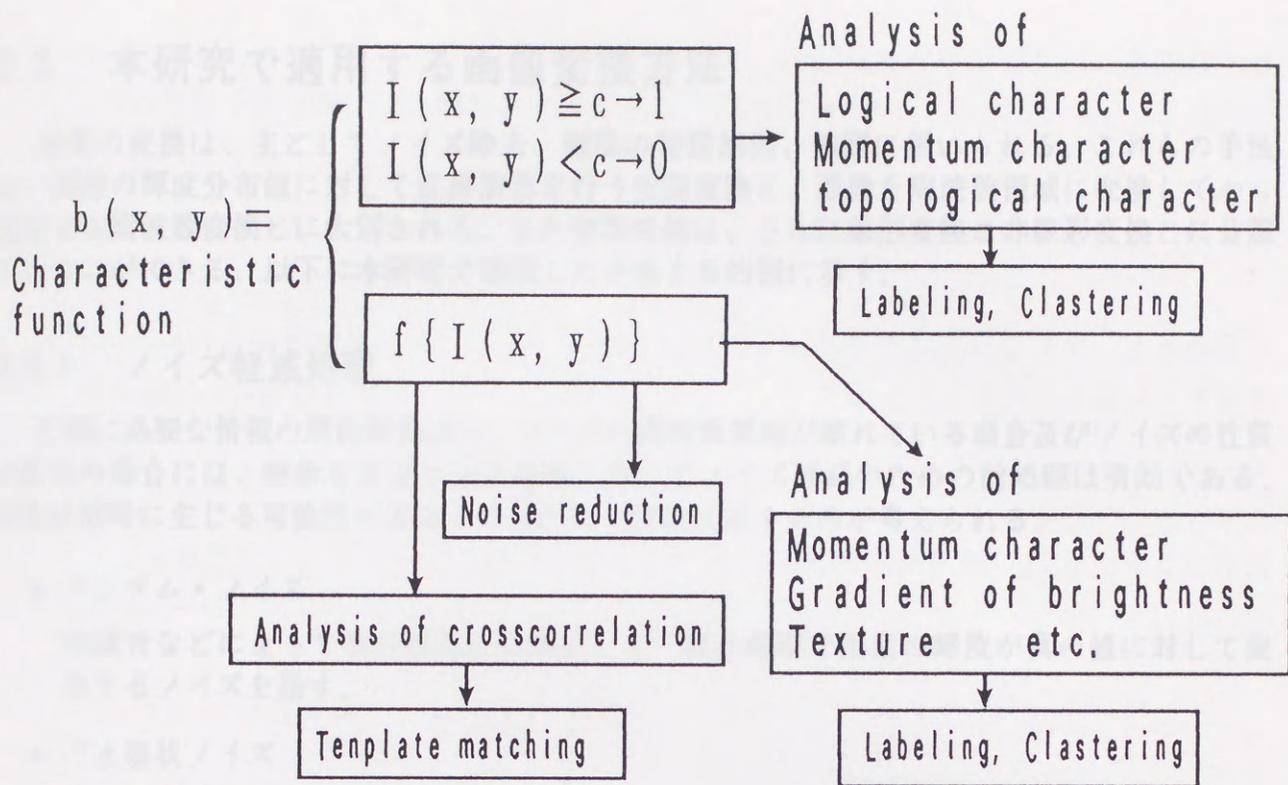


Fig. 2.1: Classification of image processing and analysis methods

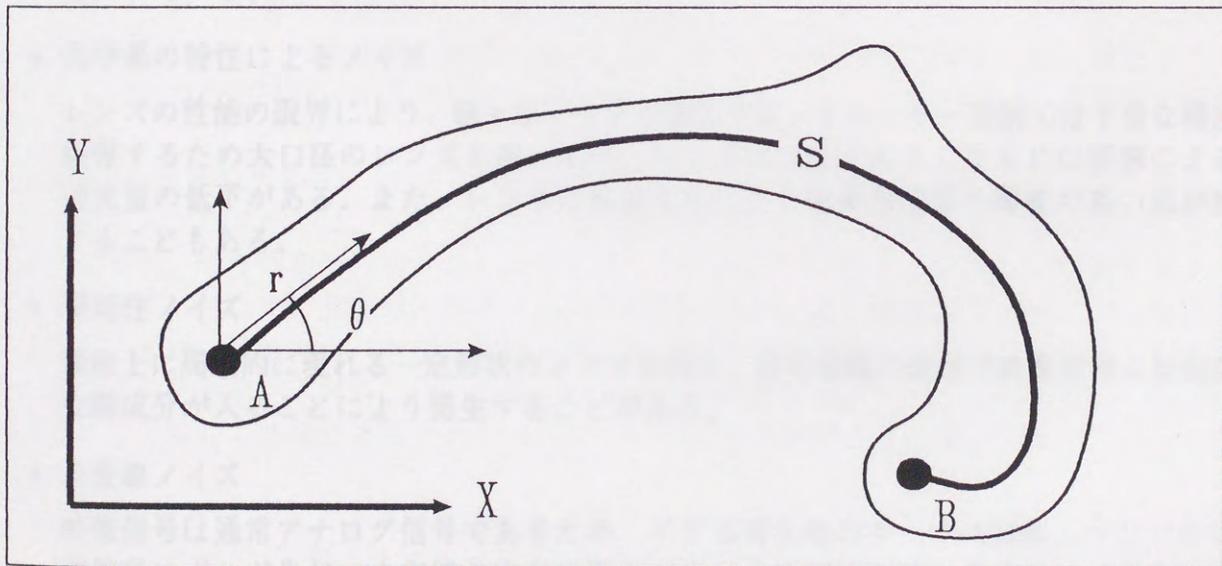


Fig. 2.2: Schematic image of connected components

## 2.2 本研究で適用する画像変換方法

画像の変換は、主としてノイズ除去、画像の特徴抽出、強調に用いられる。これらの手法は、画像の輝度分布値に対して直接演算を行う空間変換と、画像を周波数領域に変換してから処理する周波数変換とに大別される。また空間変換は、さらに線形変換と非線形変換とに分類することができる。以下に本研究で適用した手法を目的別に示す。

### 2.2.1 ノイズ軽減処理

計測に必要な情報の周波数領域と、ノイズの周波数領域が離れている場合及びノイズの性質が既知の場合には、解析を安定させる意味においてノイズ軽減のための前処理は有効である。画像計測時に生じる可能性のあるノイズとしては次に示すものが考えられる。

- ランダム・ノイズ

熱雑音などによって他の画素とは独立して一定の確率で画素の輝度が真の値に対して変化するノイズを指す。

- ごま塩状ノイズ

白黒の斑点状の雑音成分を指す。映像信号が微弱な時などに画面全体に発生する。

- 撮像装置固有の特性によるノイズ

撮像管では画面の中心部の感度が高く、周辺部が低いという非均一性がある。CCD等の固体撮像素子では原理上このようなノイズは発生しないが、輝度レベルが極端に高い部分がある時、走査線の法線方向に白い帯状のノイズが発生することがあり、スメア現象と呼ばれている。

- 光学系の特性によるノイズ

レンズの性能の限界により、様々なノイズが発生する。トレーサー追跡では十分な輝度を確保するため大口径のレンズを用いるが、レンズの口径が大きくなると口径蝕による周辺光量の低下がある。また、レンズの収差などにより画像周辺部の輝度の高い点が変形することもある。

- 周期性ノイズ

画像上に周期的に現れる一定形状のノイズを指す。信号増幅の過程で映像信号に低周波の変動成分が入ることにより発生することがある。

- 走査線ノイズ

映像信号は通常アナログ信号であるため、VTR再生時のテープの回転ムラなどから同期信号にずれが生じ、走査線の方向に画像がずれることがある。系統的にずれる場合はスキュー歪みと呼ばれる。また、動きのある画像では、1フレームの画像が奇数番の走査線と偶数番のそれとで食い違いが生じることがある。これはNTSC方式と呼ばれる映像信号の仕様が1/60sec間隔で奇数番と偶数番のフィールドを交互に表示することに起

因するもので厳密にはノイズではないが、なるべく高い解像度を得るために動画像をフレーム単位で扱う時には広義のノイズと見なすこともできる。

- 外的要因によるノイズ

光源の照度の不均一性により輝度分布にむらが発生する。また流体中に懸濁する微細なゴミなどはランダムなノイズを発生させる。

本研究で扱う多階調画像に関しては、これらのノイズの中でランダムノイズ、ごま塩状ノイズ、走査線ノイズが解析結果に若干の影響を与える。ランダムノイズ及びごま塩状ノイズを除去する方法としては、線形フィルタを用いて近傍領域の集合平均をとる方法と同一条件で取り込まれた複数画像の画素毎の時間平均をとる方法がある。近傍領域の画素の荷重平均を変換後の値とする線形フィルタは平滑化処理と呼ばれている。領域を処理を行う画素  $(i, j)$  を中心とする  $3 \times 3$  画素とし、処理前の階調値を  $I(i, j)$ 、処理後の階調値を  $b(i, j)$  とすると、変換式  $b(i, j)$  は (2.19) 式で定義される。

$$b(i, j) = \frac{\{k_{11} \cdot I(i-1, j-1) + k_{21} \cdot I(i, j-1) + k_{31} \cdot I(i+1, j-1) + k_{12} \cdot I(i-1, j) + k_{22} \cdot I(i, j) + k_{32} \cdot I(i+1, j) + k_{13} \cdot I(i-1, j+1) + k_{23} \cdot I(i, j+1) + k_{33} \cdot I(i+1, j+1)\}}{\{k_{11} + k_{21} + k_{31} + k_{12} + k_{22} + k_{32} + k_{13} + k_{23} + k_{33}\}} \quad (2.19)$$

ここで  $\{k_{11} \cdots k_{33}\}$  は各画素の階調値にかける定数で、マスクパターンと呼ばれる。この値の設定によって平滑化などの様々な処理が可能となる。

Fig. 2.3にいくつかの平滑化マスクパターンを示す。Fig. 2.3(a)は、領域の単純平均である。このマスクによるフィルタリングは、ランダムノイズを軽減すると同時に画像の鮮明さも失われる。これを改善する目的で、Fig. 2.3(b)のように注目する画素からの距離によって係数に重みをつけるという考え方もある。ノイズのレベルが比較的高い場合には、満足できる結果を得るためにさらにフィルタリングの領域を広く設定するか、 $3 \times 3$ のマスク処理を複数回実行する。

処理効率を優先すると、Fig. 2.3(c)に示すように注目画素を無視するマスクも考えられる。このマスクパターンは、インパルス的な入力がかウス分布で拡散する本来の平滑化処理の概念から外れ、輝度分布の特徴そのものを変えてしまう恐れがある。しかし、単独の画素に存在するノイズに対してより有効に作用するのも事実である。また除数がビットシフト演算で置換できることや、同等のノイズ軽減効果を得るための処理の回数が少なくなるという利点もある。逐次追跡を安定して行うには、突発的なノイズの除去が輝度分布の1画素単位での微細な特徴の保存に対して重要であるため、本研究では平滑化の必要がある場合には(c)のマスクを用いる。

走査線のずれによるノイズが画面全体に発生する時には、周期性ノイズとなるので周波数フィルタリングによって除去することができる。しかし周波数フィルタリングでは、画像に保存されるべき輪郭部の輝度分布情報が部分的に損なわれる恐れがある。Fig. 2.4に走査線のずれが生じた時、周波数フィルタリングによって輪郭部の情報がどのように変化するかを模式的に示す。単純化のため2値化画像として考える。対象が矩形の時にはFig. 2.4(a)で示すように

輝度分布形状から得られる対象の長さは  $L_1$  となるが、走査線のずれが生じた画像に周波数フィルタリングを行うと走査線方向の端部の情報が失われて、その輝度分布形状から得られる長さ  $L_2$  は走査線のずれた幅だけ短くなる。この影響を避けるには奇数フィールド又は偶数フィールドのみの画像を取り込むのが妥当であるが、フィールド画像は縦方向の解像度が半減するため輝度分布情報を利用した解析に用いるには好ましくない。そこで奇数フィールドあるいは偶数フィールドを基準として両方のフィールドの情報がある程度保存される処理を導入する。

本研究では、走査線ノイズを含む画像に対して (2.20) 式に示す簡便な選択的縦平滑化マスク処理を適用する。この式では、 $M \times N$  画素の原画像の輝度分布を  $I(i, j)$  において  $\{n = 2, 4, 6, \dots, N/2\}$  とした時、偶数フィールドの画像の輝度分布  $I(i, 2n)$  の走査線ノイズを選択的に平滑化して変換画像  $b(i, 2n)$  とする。時系列画像として扱う場合には奇数フィールドの時刻の画像とみなす。

$$\text{if } (I(i, 2n) \leq \min\{I(i, 2n-1), I(i, 2n+1)\}) \rightarrow b(i, 2n) = \frac{I(i, 2n-1) + I(i, 2n+1)}{2} \quad (2.20)$$

## 2.2.2 エッジ強調処理

計測を必要とする対象は必ずしも線成分で構成される画像とは限らず、むしろ面的な領域で構成されている場合もある。5章で扱う水中表面反射法で得られる画像がそれに該当する。このような画像に対して、面的な領域の境界となる輪郭形状（エッジ）を強調する処理を前処理として施すことにより本研究で扱う線成分の検出手法の適用が可能となる。

対象とする物体が1つの面的な領域を持つ時、その輪郭では、輝度分布勾配が極大値となる。離散化された輝度分布  $I(i, j)$  を持つ画像に対して差分近似により横方向の輝度分布勾配の分布  $B_x$  を求める式を (2.21) 式に、縦方向の輝度分布勾配  $B_y$  を求める式を (2.22) 式に示す。

$$B_x = I(i, j+1) - I(i, j-1) \quad (2.21)$$

$$B_y = I(i+1, j) - I(i-1, j) \quad (2.22)$$

さらに、平滑化フィルタリングと差分フィルタリングを線形合成することにより、ノイズの影響を軽減できる。代表的なものとして Sobel フィルタが知られている。これらの差分演算をテンプレートで表現したものを Fig. 2.5 に示す。

エッジ抽出処理で生成された中間画像に対してしきい値処理により線成分を検出する手法では、上述の空間微分による方法で増幅されるノイズが問題となるため、ガウス分布関数による平滑化とラプラシアンを組み合わせたゼロ交差法や、エッジの方向性を考慮した弛緩法による手法も提案されている。これらは本研究の範囲を逸脱するので詳述は避けるが、非常に多くの処理時間と記憶容量が必要となる。

本研究では線成分を (2.10) 式で定義するため、その存在のあいまいさの代償としてノイズに対する許容度はしきい値処理を前提にしたものより緩和されるものと考えられる。したがって本研究ではエッジ強調処理としては簡便な Sobel フィルタを適用する。Sobel フィルタを水中表面反射法による可視化画像に適用した例を Fig. 2.6 に示す。Fig. 2.6(a) が原画像、Fig.

2.6(b) がエッジ強調処理された画像である。ノイズ成分も強調されているが、波面の形状も明瞭に可視化されている。

### 2.2.3 階層化処理

画像計測の最小誤差は、画像を構成する1画素のサイズで決定される量子化誤差である。したがって高い精度で計測するためには十分な解像度を確保しなければならない。しかし線成分の検出やテンプレートマッチングなどの探索に必要な処理時間は解像度が増えると共に著しく増大する。

探索を効率良く進めるためには、画像の構造化が有効である。そのための構造化の1つとしてピラミッド構造と呼ばれる画像の階層化方法がある。ピラミッド構造による画像の階層化の概念を、Fig. 2.7に示す。この処理では、 $2^n \times 2^n$ の領域を持つ画像に対して、 $2 \times 2$ の領域を1レベル上の1画素に投影させて、 $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ の領域の画像をつくる操作を繰り返す。階層化された画像のあるレベルに対して処理を行い、その結果を下のレベルに逐次対応させることで処理を効率良くすすめることができることから、このような画像の階層化は画像処理の様々な分野で用いられている。

この方法では上の階層になるほど情報が失われるので画像の特徴を保つ階層から探索を始めることが重要である。上の階層への変換方法はいくつか考えられるが、本研究では次に示す2つの変換方法を用いる。

- 平均値による階層化

$2 \times 2$ 画素の平均値を1レベル上の画素に投影する方法である。平滑化フィルタリングと同様の処理であるため、ノイズ成分は上の階層に伝播しにくい。画像の特徴も失われやすい。画像の特徴はレベルが上がるに従って全領域が平均的に減衰する。

- 最大値による階層化

$2 \times 2$ 画素の最大値を1レベル上の画素に投影する方法である。画像の特徴（特に線成分）は、輝度分布のピークに代表されるため、ノイズ成分も上の階層に伝播する。この方法では強いノイズ成分が全領域に分散している場合には、元の画像とは異なる特徴を持つ画像に変換する可能性があることに注意する必要がある。

また、画像の階層化は高速化のためだけではなく、ノイズによる探索の誤りがある程度防ぐという意味でも有用であることに留意する必要がある。

$k_{11}$	$k_{21}$	$k_{31}$
$k_{12}$	$k_{22}$	$k_{32}$
$k_{13}$	$k_{23}$	$k_{33}$

$$/ \{k_{11}+k_{12}+k_{13}+k_{21}+k_{22}+k_{23}+k_{31}+k_{32}+k_{33}\}$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

(a)

1	1	1
1	2	1
1	1	1

(b)

1	1	1
1	0	1
1	1	1

(c)

Fig. 2.3: Mask patterns of noise filtering process

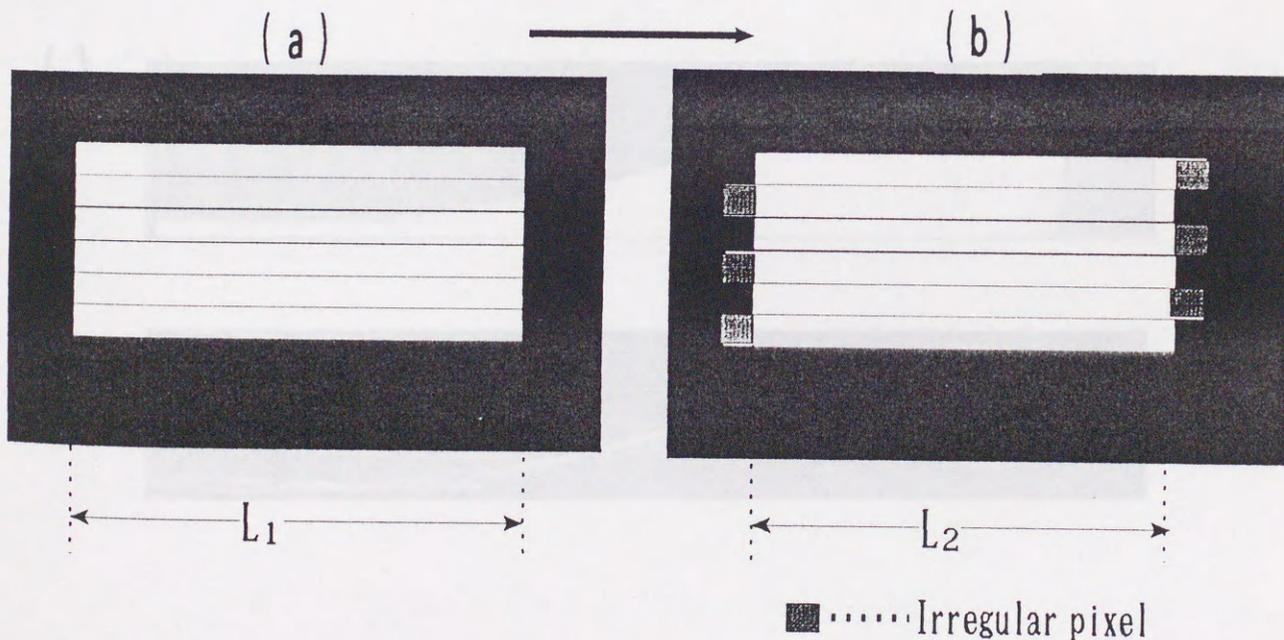


Fig. 2.4: Schematic images of slippage of scanning lines

Gradient  
operator

-1	0	1
----	---	---

→ X →

↓ Y ↓

-1
0
1

Sobel  
filter

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

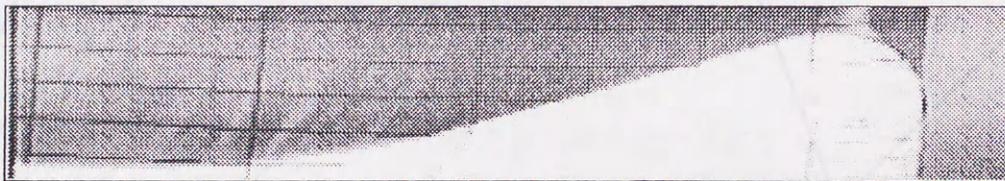
$\Delta x$

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

$\Delta y$

Fig. 2.5: Computational gradient of intensity distribution

(a)



(b)



Fig. 2.6: Sample pictures of edge detecting process (visualized by wetted-surface illumination method)

### 2.3 逐次追跡による線図形の抽出方法

この逐次追跡による線図形の抽出方法は、線図形の抽出方法を記述する骨格線を抽出する過程としては、線図形のアルゴリズムが一般的である。その基本的な考え方は、線図形を形成している線素を、図形の連続性を保つという条件のもとで1点ずつ追跡させていくことである。連続性を保った追跡経路では、通常は注目する点を削除した時に1方向の連続性が確保される多次のパターンを生成し、そのパターンと合致する部分を抽出する処理を繰り返す。

この方法では条件付マスク処理を2次元のピラミッドに対して繰り返す必要がある。多大な計算量を生ずる。また、抽出された線成分が途切れている場合や枝状に分岐が存在する場合には、線成分の接続や不連続点を検出する処理が必要となり、実際の処理は非常に複雑で時間コストの大きなものとなる。また、抽出された線成分が途切れている場合や枝状に分岐が存在する場合には、線成分の接続や不連続点を検出する処理が必要となり、実際の処理は非常に複雑で時間コストの大きなものとなる。

しかし、実際の処理は非常に複雑で時間コストの大きなものとなる。また、抽出された線成分が途切れている場合や枝状に分岐が存在する場合には、線成分の接続や不連続点を検出する処理が必要となり、実際の処理は非常に複雑で時間コストの大きなものとなる。

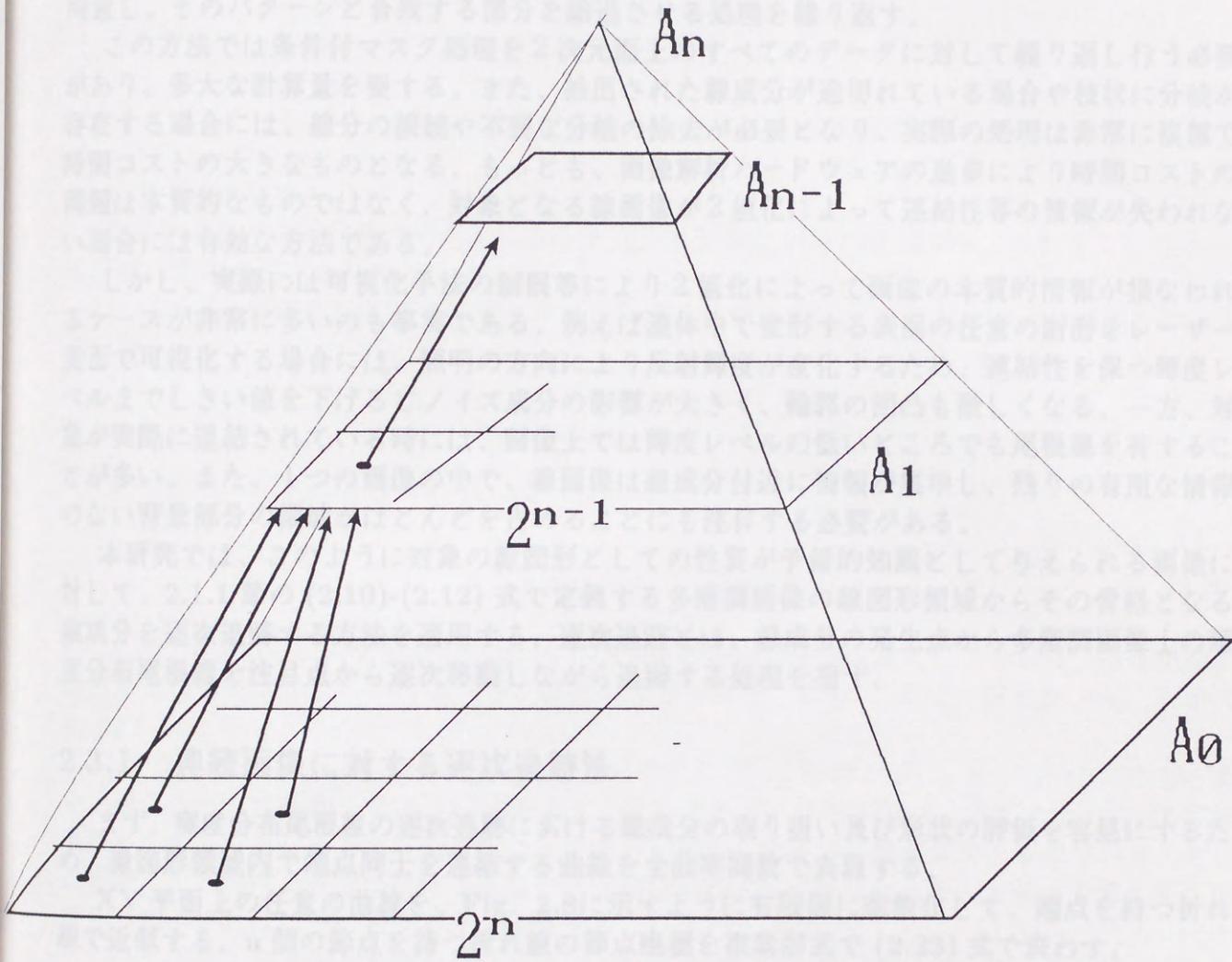


Fig. 2.7: Schematic image of pyramid structure

## 2.3 逐次追跡による線図形の抽出方法

2値化画像の特徴抽出技法により線画像の特徴を記述する骨格線を抽出する処理としては、細線化のアルゴリズムが一般的である。その基本的な考え方は、輪郭を形成している画素を、図形の連結性を保つという条件の元で1点ずつ縮退させていくことである。連結性を保った縮退処理では、通常は注目する点を削除した時に1方向の連結性が確保される多数のパターンを用意し、そのパターンと合致する部分を縮退させる処理を繰り返す。

この方法では条件付マスク処理を2次元面上のすべてのデータに対して繰り返し行う必要があり、多大な計算量を要する。また、抽出された線成分が途切れている場合や枝状に分岐が存在する場合には、線分の接続や不要な分岐の除去が必要となり、実際の処理は非常に複雑で時間コストの大きなものとなる。もっとも、画像解析ハードウェアの進歩により時間コストの問題は本質的なものではなく、対象となる線画像が2値化によって連結性等の情報が失われない場合には有効な方法である。

しかし、実際には可視化手法の制限等により2値化によって画像の本質的情報が損なわれるケースが非常に多いのも事実である。例えば流体中で変形する表面の任意の断面をレーザー光面で可視化する場合には、照明の方向により反射輝度が増減するため、連結性を保つ輝度レベルまでしきい値を下げるとノイズ成分の影響が大きく、輪郭の凹凸も激しくなる。一方、対象が実際に連結されている時には、画像上では輝度レベルの低いところでも尾根線を有することが多い。また、1つの画像の中で、線画像は線成分付近に情報が集中し、残りの有用な情報のない背景部分の領域がほとんどを占めることにも注目する必要がある。

本研究では、このように対象の線図形としての性質が予備的知識として与えられる画像に対して、2.1.1節の(2.10)-(2.12)式で定義する多階調画像の線図形領域からその骨格となる線成分を逐次追跡する方法を適用する。逐次追跡とは、線成分の発生点から多階調画像上の輝度分布尾根線を注目点から逐次移動しながら追跡する処理を指す。

### 2.3.1 連続画像に対する逐次追跡法

まず、輝度分布尾根線の逐次追跡における線成分の取り扱い及び形状の評価を容易にするため、線図形領域内で端点同士を連結する曲線を全曲率関数で表現する。

XY平面上の任意の曲線を、Fig. 2.8に示すように有限個に離散化して、端点を持つ折れ線で近似する。n個の節点を持つ折れ線の節点座標を複素形式で(2.23)式で表わす。

$$z(j) = x(j) + iy(j) \quad (j = 0 \cdots n) \quad (2.23)$$

この時、曲線の長さ  $s(j)$  は、(2.24)式で示される。

$$s(j) = \sum_{k=1}^j |z(k) - z(k-1)| \quad (j = 0 \cdots n) \quad (2.24)$$

ここで  $z(0)$  と  $z(n)$  は曲線の端点の座標、 $s(0) = 0$ 、 $s(n)$  は曲線の全長となる。

さらに Fig. 2.8に示すように節点における偏角  $\alpha(j)$  を線分  $z(j) - z(j-1)$  と  $z(j+1) - z(j)$  のなす角度とすると、偏角の集合  $\alpha(0), \alpha(1) \cdots \alpha(n-1)$  を用いて全曲率関数  $\theta$  を次のように定義することができる。

$$\begin{cases} \theta(0) = \alpha(0) \\ \theta(j) = \theta(j-1) + \alpha(j) \quad (j = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (2.25)$$

この全曲率関数を用いることにより、折れ線の節点の座標点列は、

$$z(j) = z(j-1) + \{s(j) - s(j-1)\} \exp(i\theta(j)) \quad (2.26)$$

または

$$z(j) = z(0) + \sum_{k=1}^{j-1} (s(k+1) - s(k)) \exp(i\theta(k)) \quad (2.27)$$

と表すことができる。

全曲率関数 $\theta(j)$ と曲線の端点からの長さ $s(j)$ 及び端点 $z(0)$ の座標が与えられることにより、曲線は一意的に決定される。

さらに、注目点を等間隔で移動させて追跡する状態に対応させるため節点の間隔を次のように置く。

$$l = s(j) - s(j-1) \quad (2.28)$$

この時、(2.27)式は(2.29)式の形になる。

$$z(j) = z(0) + l \cdot \sum_{k=1}^{j-1} \exp(i\theta(k)) \quad (2.29)$$

以上の準備のもとに曲線を(2.29)式で示す等間隔の全曲率関数として、輝度分布尾根線を検出する具体的方法について述べる。探索の概要を Fig. 2.9に、処理の流れを Fig. 2.10に示す。

まず適当な方法で始点 $z(0)$ が与えられるものとする。この時、2.1.1節の(2.16)-(2.18)式を拘束条件として逐次延長方向を決定することを考える。探索半径 $R$ 、移動ステップ $l$ は初期条件としてあらかじめ与えられるものとする。もちろん対象が自然画像であるので、ノイズ等の影響により拘束条件を満足する延長方向は複数存在すると考えられる。その中で最も延長可能性の高い方向は以下に示す方法で決定する。

まず、2.1.1節で述べた拘束条件の他に、曲線の滑らかさのパラメータである内部の拘束力を導入する。曲線の滑らかさは単位長さ当たりの偏角で近似できるので、(2.30)式に示す拘束条件を加える。これは探索方向を、その直前の延長方向を軸に制限することに相当する。

$$|\alpha(j)| \leq \alpha_{max} \quad (2.30)$$

次に、現在の節点を中心に、探索半径 $R$ 、探索範囲を前に定めた $\pm\alpha_{max}$ で探索を行ない、延長方向の輝度積分値 $g(\alpha)$ 、輝度微分値の自乗和 $h(\alpha)$ を得る。

$g(\alpha)$ の分布から、Fig. 2.9右側に示すように(2.16),(2.17)式を満足する偏角 $\alpha$ を選択する。

単純にこれらの偏角の組の中で最も輝度分布積分値の大きな方向を延長方向としてもよいが、輝度分布積分値のみを評価の基準にすると、他の線成分への乗り移りや、突発的な輝度の

高いノイズが発生した時には誤った方向を追跡してしまうことが考えられる。そこで、輝度微分値の自乗和  $h(\alpha)$  の分布を用いて、延長方向の候補として上げられた偏角の中であらかじめ設定したしきい値  $C_2$  を越える偏角 ((2.18) 式を満足しない) を棄却する。さらに、延長方向の候補となる偏角が複数残る場合には、 $h(\alpha)$  の小さい順に優先順位を付け、順位の最も高い偏角を注目点の移動方向とする。他の偏角は、リストに登録され、優先順位の高いものの追跡が終了した後、再度用いられる。

以上の処理を繰り返すことにより追跡を続ける。(2.16)-(2.18) 式を満足する偏角が無くなった時は終点に達したとみなして追跡を終了する。

候補となる全曲率関数の組み合わせは、しばしば複数となる。その時には折れ線が木構造となり、すべての延長可能性のある分岐の組み合わせの中から最良のものを探索することになる。探索のための評価関数としては、線の全長における輝度分布の平均値、全曲率関数の分散、線成分の長さ等を用いることができる。

これらの重みつき線形和を評価関数として採用することがまず考えられるが、別の線成分に何等かの原因で乗り移る誤追跡が発生した時には、線成分の全長をパラメータとすると誤った結果を得る。また、本研究で対象とする線画像では線上の輝度分布の変動にある程度の自由度を許容しているため、輝度分布の平均値や変動量の積分値は評価のためのパラメータとしては必ずしも適切ではないと思われる。

以上の考察により、本研究では形状の複雑さを表わす全曲率関数の分散のみを評価のためのパラメータとして採用する。全曲率関数の分散  $V$  の定義を (2.31) 式に示す。

$$V = \sum_{j=1}^N (\theta(j) - \theta(j-1))^2 \quad (2.31)$$

誤追跡が発生する時は高周波のノイズ成分が支配的になり、ランダムな迷走状態になる。このため本方法は誤追跡の検出には極めて有効である。

流脈画像のように線成分の形状が時系列で緩やかに変化する時には、前の画像の追跡結果を参照することで、より正確に追跡することができる。具体的には、1時刻前の全曲率関数  $\theta(j, t-1)$  が与えられる時、(2.32) 式に示すような制限をさらに加えて延長方向の候補を限定する。

$$|\theta(j, t) - \theta(j, t-1)| \leq \theta_{max} \quad (2.32)$$

この制限方法では、始点からの距離が大きくなるにつれて制限が緩くなるので、流脈画像の特徴とよく合致している。この制限を加えることにより探索木の分岐は著しく限定され、処理効率は向上する。

ところで、これまで述べた手法は輝度分布を連続関数としているが、画像解析において扱われる画像は離散化されているためそのまま適用することはできない。逐次追跡の概念を忠実に実行するには連続画像上のある座標における輝度を、その近傍の離散化された数点の輝度分布から補間する必要がある。本研究では、計算効率を優先して面積補間法で連続画像上の輝度を推定する。画像を連続関数として扱うことは、浮動小数点演算が必要となるため計算効率上は好ましくないが、離散的画像を解析する時の量子化誤差による最小誤差の制限が緩和されるという利点がある。

### 2.3.2 離散画像に対する逐次追跡法

現在ではパソコンレベルでも浮動小数点演算の性能が劇的に向上し、計算効率向上のために整数演算に固執する積極的な意味は薄れているが、処理のハードウェア化を将来考える時には、やはり離散化された画像を前提とした整数演算によるロジックが有利である。

離散化された画像に対して輝度分布尾根線の逐次追跡処理を行うことを考える場合、最も高速かつ簡便な方法は、注目する点から8点近傍あるいは4点近傍で最も輝度の高い点を検出し、その座標へ注目点を移動させていく処理を繰り返すことである。しかしこの方法は、輝度分布の勾配がなだらかな部分が存在する場合、その部分で必ずしも正しい尾根線を追跡するとは限らず、誤った方向を決定した結果、閉ループになるか、完全に尾根線から外れて迷走する事例が多く、あまり実用的ではない。

より精度良く尾根線の延長性を逐次決定する方法として、前に示した方法と同様に注目点を中心とした半径方向の複数画素の輝度積分値及び輝度変化の積分値等の条件から延長方向を逐次求める方法をそのまま離散化された画像に適用することが考えられる。しかし、この方法は拘束条件として用いるパラメータが極めて多く、特に形状変形の自由度が大きな画像では、Fig. 2.9における注目点の移動方向を走査するための走査半径  $R$  の最適値が局所的に著しく異なることが問題となる。

形状の予測が難しく時系列での変形が大きい対象に対して最も確実にその形状を追跡する方法は、始点から延長可能な方向を拘束条件の制限なしで全域にわたって走査し、その中で最も形状を正しく追跡していると思われるものを、ある評価関数を設けて選択する方法である。この考え方は、結局線成分を探索木と見なして最適解を求めることになるが、4点隣接の曲線で  $n$  画素の長さを走査する場合には  $4^n$  通りの組み合わせから解を探索することになるため、曲線の長さが長くなると極端に効率が低下してあまり実用的な方法とは云えない。

探索木を用いた組み合わせ最適化問題をあらゆる場合に効率良く解くには一般的な方法がなく、対象とするデータの構造や問題の形式に応じて「深さ優先的手法」と「広さ優先的手法」及び「発見的的手法」を適宜選択あるいは組み合わせ用いられることが多い。

そこで、追跡される曲線を有限長さで分割し、その分割された長さ毎に探索を順次繰り返す方法が考えられる。これは分割長さを探索のレベルと見なすと、広さ優先探索法に相当する。こうすることにより、曲線の長さを  $m$  画素、分割された長さを  $n$  画素とすると曲線全体にわたって探索すべき組み合わせの総数  $d$  は、バックトラック処理を考慮しないとすると (2.33) 式で示すことができる。

$$d = \frac{m \cdot 2^n}{n} \quad (2.33)$$

ここで  $m=512$  画素、 $n=8$  画素とすると総数  $d$  は 16384 通りとなり、現実的な時間で追跡が可能である。

広さ優先探索法は、コンピュータに蓄えられている情報の物理的構造にその効率が依存することが知られている。効率が悪い場合とは、誤った探索が発生してバックトラック処理が必要となる時である。画像情報の物理的構造は、情報の局所性と冗長性から、多くの場合広さ優先探索法の適用に有利な配置になっていると考えられる。

追跡の方法としては、2分探索に適應させるため、画像上の任意の点を基準として4点近傍の各点を延長可能性の候補とし、その中から2点を逐次選択する。逐次選択の考え方を Fig.

2.11に示す。

まず左上に、隣接点の Chain Code を示す。追跡された線成分はこの Chain Code で表される。注目点  $O$  に対して、その前のステップの注目点の点列を  $\{P_0, P_1, \dots\}$  とする。追跡の履歴による探査方向の制限を加えることで、内部の力による拘束条件を近似的に実現できる。

探査方向の参考にする追跡の履歴の深さを Level 1-3 とする。

Level 1 では、注目点  $O$  に対して参考とする履歴は  $P_0$  のみである。Fig. 2.11の例では追跡の方向は 1-3 の 3 方向である。2 と 3 は線成分の延長方向の軸対称となるので、ここでは 1 と 3 のみについて考える。実際には画素の輝度の高いものから順に 2 通り選ぶことになる。

Level 2 では、参考とする履歴は  $P_0$  と  $P_1$  の 2 つになる。Fig. 2.11の例では  $P_0, P_1 = 1, 1$  あるいは  $P_0, P_1 = 1, 4$  の 2 組のみが存在する。 $\{P_0, P_1\} = \{1, 1\}$  の場合には Level 1 と同様に 3 方向が候補となるので、輝度の高いものから 2 通りを選ぶ。

$\{P_0, P_1\} = \{1, 4\}$  の場合には、方向を 1 か 4 の 2 方向のみとする。この操作は追跡のループ化を防ぎ、前に述べた内部の力による拘束条件を実現する。

Level 3 では、Level 2 で分けられた 2 つのパターンがさらに 2 方向に分岐する。 $\{P_0, P_1, P_2\} = \{1, 1, 1\}$  の場合では、3 方向の候補の中で輝度の高いものから 2 つ選ぶ。

それ以外の  $\{P_0, P_1, P_2\} = \{1, 1, 4\}$ 、 $\{P_0, P_1, P_2\} = \{4, 1, 1\}$ 、 $\{P_0, P_1, P_2\} = \{4, 1, 4\}$  の 3 通りでは、移動方向の候補を 1, 4 に限定する。

以上の処理では、Level を適宜選択することによって内部の力による拘束力の効果を変えることもできる。

より一般化して考えると、Level 1 のパターンは線幅 0 の折り返しを制限し、Level 2 のパターンは線幅 1 の折り返しを制限する。さらに Level 3 のパターンでは線幅 2 の折り返しを制限することになるであろう。したがって、追跡する長さが 8 画素の時には、Level 3 までのパターンで追跡の経路が閉じることはない。本研究では、Level 3 までのパターンを適用する。

Fig. 2.11の例では、Level 3 までの追跡のパターンは 4 通りであるが、延長方向の軸対称にさらに 4 通り存在し、Level 1 における直前の追跡点が  $P_0 = \{1, \dots, 4\}$  と 4 通りあるので、結局 Level 3 までで 32 通りのパターンが存在する。これは若干多いようにも思われるが、アルゴリズムを適切に組むことにより比較的単純な形となるので処理効率は非常に良好なものとなる。

### 2.3.3 階層化画像を用いた線成分の絞り込み探索法

前に述べた 2 分探索木を用いた逐次追跡では、輝度分布のピーク値を示す幅が 1 画素であるという前提があるが、実際の画像では、輝度分布ピーク値の領域は、撮像系による高周波成分の減衰や、増幅系の非線形性の影響などで 1 画素以上の線幅を持つ場合が多い。

そこで、2.2.3 節で説明した画像の階層化を行い、線幅が 1 となるレベルの画像に対して逐次追跡を行う方法が考えられる。逐次追跡を行ったレベルの追跡情報を順次下のレベルの画像の尾根線検出の参照情報とすることにより元の解像度を持つ画像 (Fig. 2.7における  $A_0$ ) の線成分を確実に検出することが可能である。本研究ではこれを階層化画像に対する絞り込み検索と称する。

絞り込み検索は、非常に簡便な処理となる。その具体的な方法を Fig. 2.12に示す。

まず注目点の直前の画素の Chain code が 1 の場合を例にする。この時、延長可能な方向は (A) … (C) の 3 方向となる。注目点の下のレベルの画像は、注目点 1 画素あたり 4 個の画素で構成される。その画素を各々  $a \dots d$  とする。4 点隣接の定義が保存されるため、絞り込み検索のパターンは非常に限定されたものとなる。

(A) の場合では、前のステップの隣接する 2 画素の内 1 画素が尾根線として選択されているとすると実線で示す 2 本の経路と点線で示す 2 本の経路のみが選択枝となる。(B), (C) の場合も同様に直前に選択された画素の座標によりそれぞれ 2 本の経路が存在する。

すべての経路に共通する特徴は、直前に選択された画素に近い方の 1 画素が決定されると経路が一意的に決定されることである。たとえば、(A) では、 $a$  が選択されると経路  $a \rightarrow b$  が、 $c$  が選択されると経路  $a \rightarrow c \rightarrow d$  が自動的に選択される。このことは、最適の経路を発見するためにすべての画素を探索対象にする必要がないことを示しており、処理の効率が非常に向上する。この絞り込み検索を最下レベルの画像まで順次適用することにより、4 点隣接の尾根線を得る。離散化画像に対する単純化した逐次追跡と絞り込み検索の組み合わせでは、前に示した連続画像の逐次追跡と比較して、人為的パラメータが少ない点と処理効率の高さの点で非常に実用的である。

#### 2.3.4 始点の決定方法

端点は、その線上で 1 方向にのみ延長可能性のある点と定義できる。追跡の方向によって線成分の両端の点は始点と終点に分けることができる。これまでに述べた逐次追跡法における終点は、線成分の定義にあてはまる延長方向がなくなる時点で決定することもできるが、始点は対象となる画像の状態にあわせて何等かの基準を設けて一意的に定める必要がある。

始点を決定する方法としては、次に示す 3 つの方法が考えられる。

- 人為的決定

流脈の画像等は、発生点が画面内にある時には、その座標が必ず始点となる。このような場合には始点は人為的に 1 回指定してやるだけでよいはずである。

- しきい値処理による決定

2 値化画像の輪郭形状の情報から始点を推定する方法が考えられる。もちろん輪郭形状から推定した始点の位置は、輝度分布の尾根線にあるとは限らないので、しきい値処理と輝度分布の極大値検出処理を適宜組み合わせる必要がある。

また走査軸に対して小さい角度で交わる場合は線成分の端点ではないので、こういうケースを棄却する何等かの判定基準が必要である。

- 延長可能性の探索による決定

多階調画像における線成分の定義に最も忠実に始点を決定する方法は、画像のすべての領域に対して延長可能な方向が 1 方向に限定される点を探索することである。ただしこの処理には非常に多くの時間を要するのであまり現実的ではない。

本研究では、Fig. 2.13に示すようにしきい値処理によって得た線の幅方向の両端点の推定位置と、輝度分布尾根線の位置との幅 $\delta_1, \delta_2$ に適当なしきい値を設定し、端点でない場合を棄却する方法を用いた。

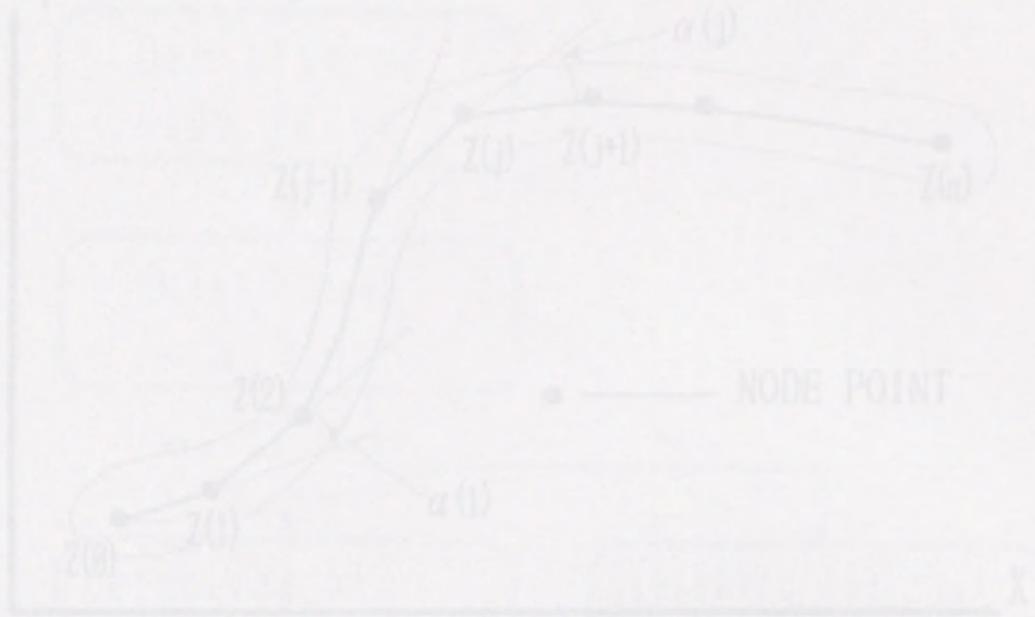


Fig. 2.8. Coordinate system of tracing process

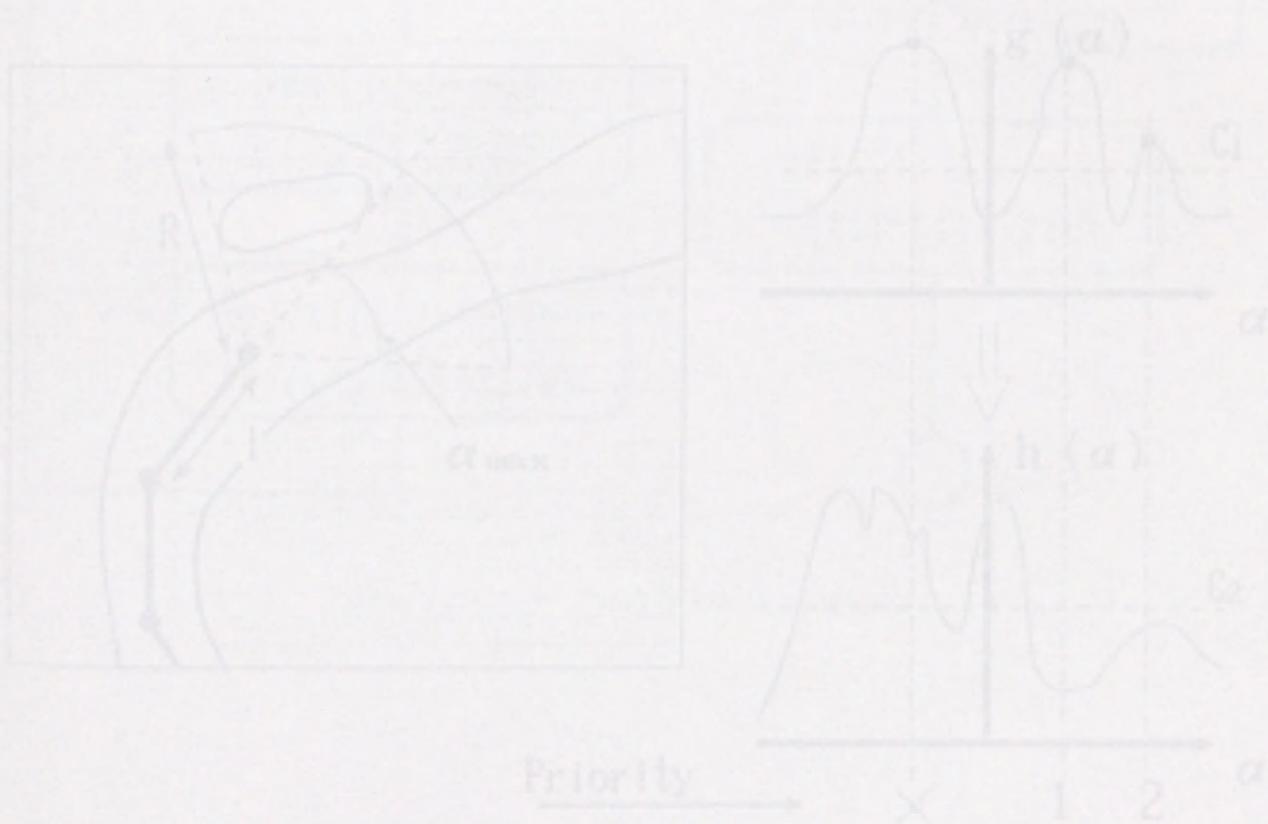


Fig. 2.9. Decision of an angle of testing direction

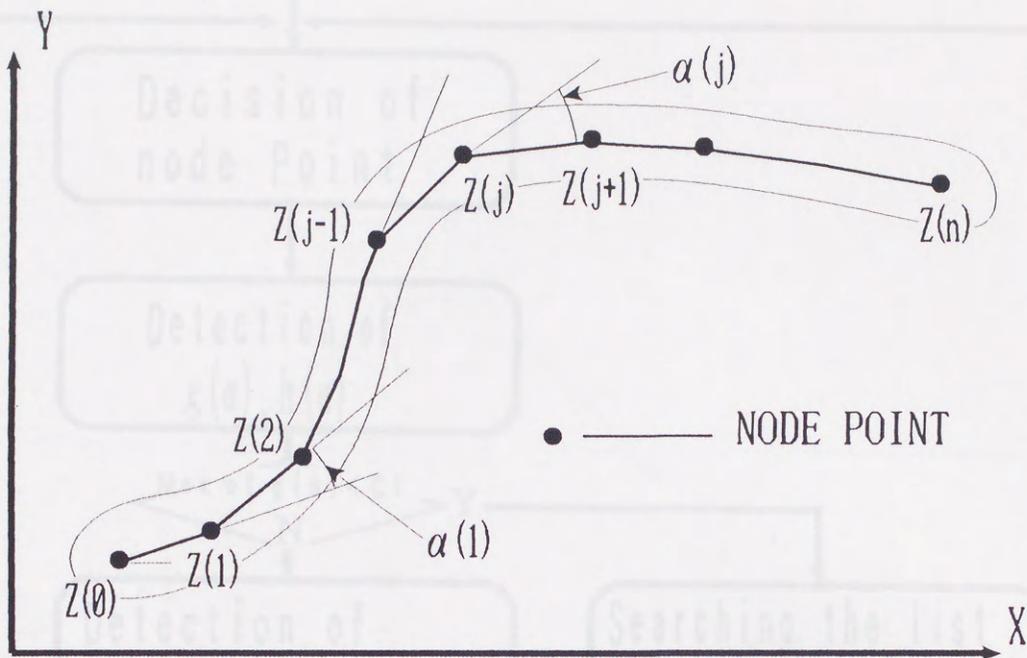


Fig. 2.8: Coordinate system of tracing process

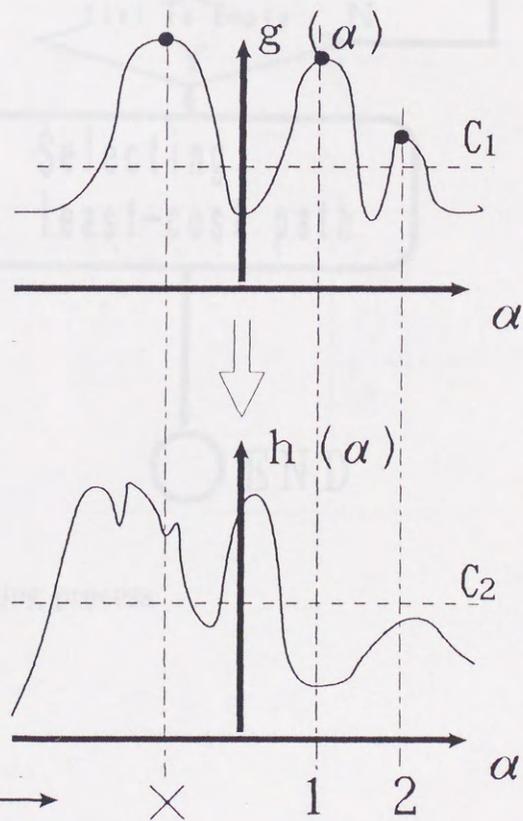
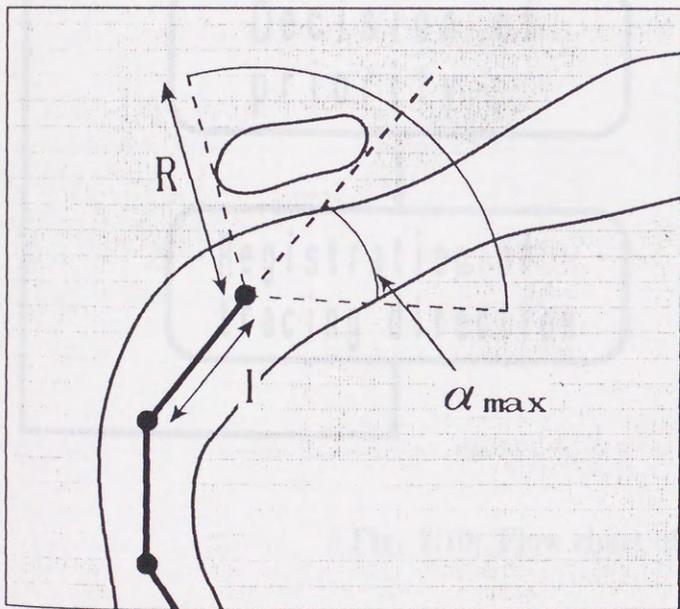


Fig. 2.9: Decision of an angle of tracing direction

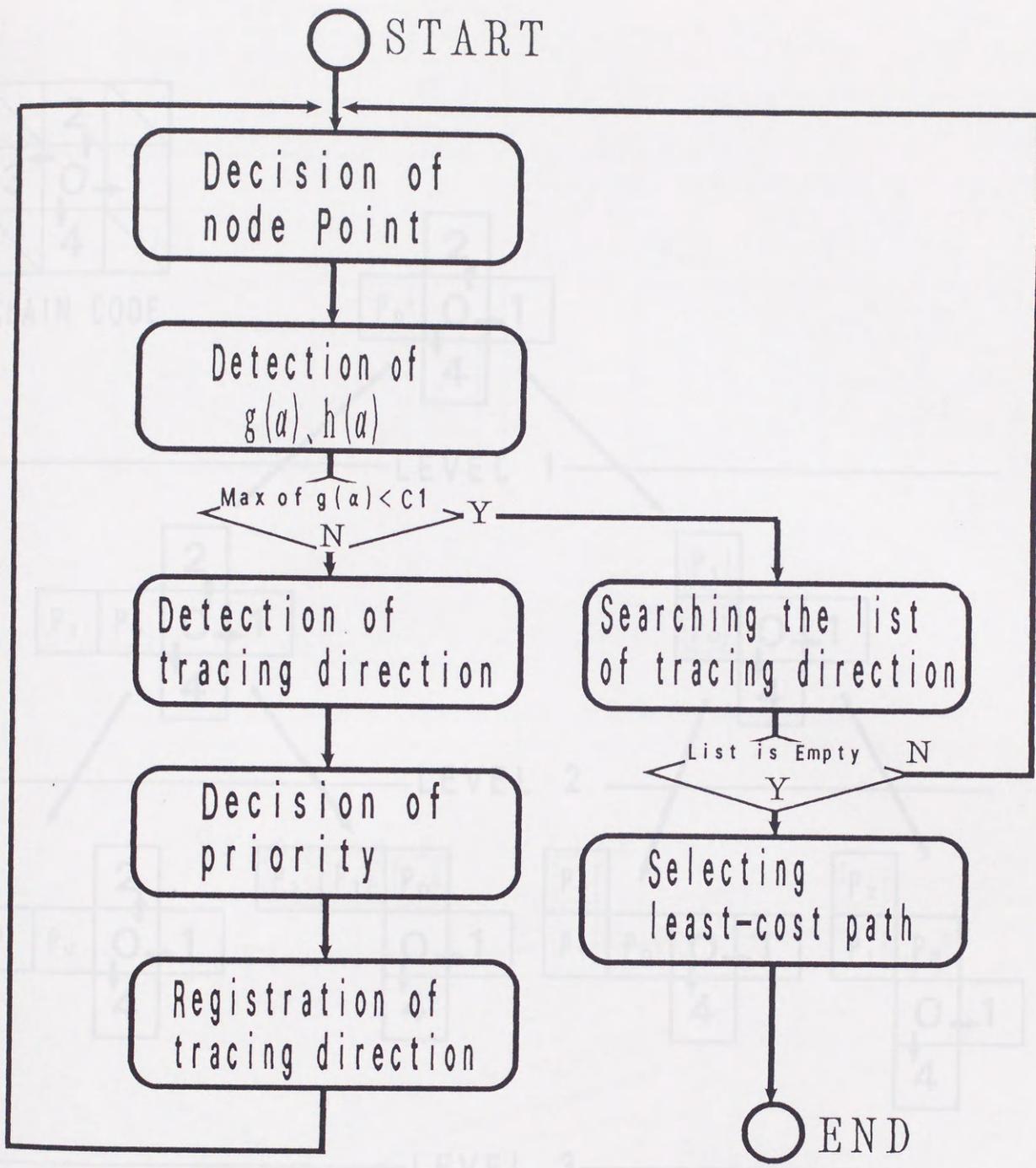


Fig. 2.10: Flow chart of tracing process

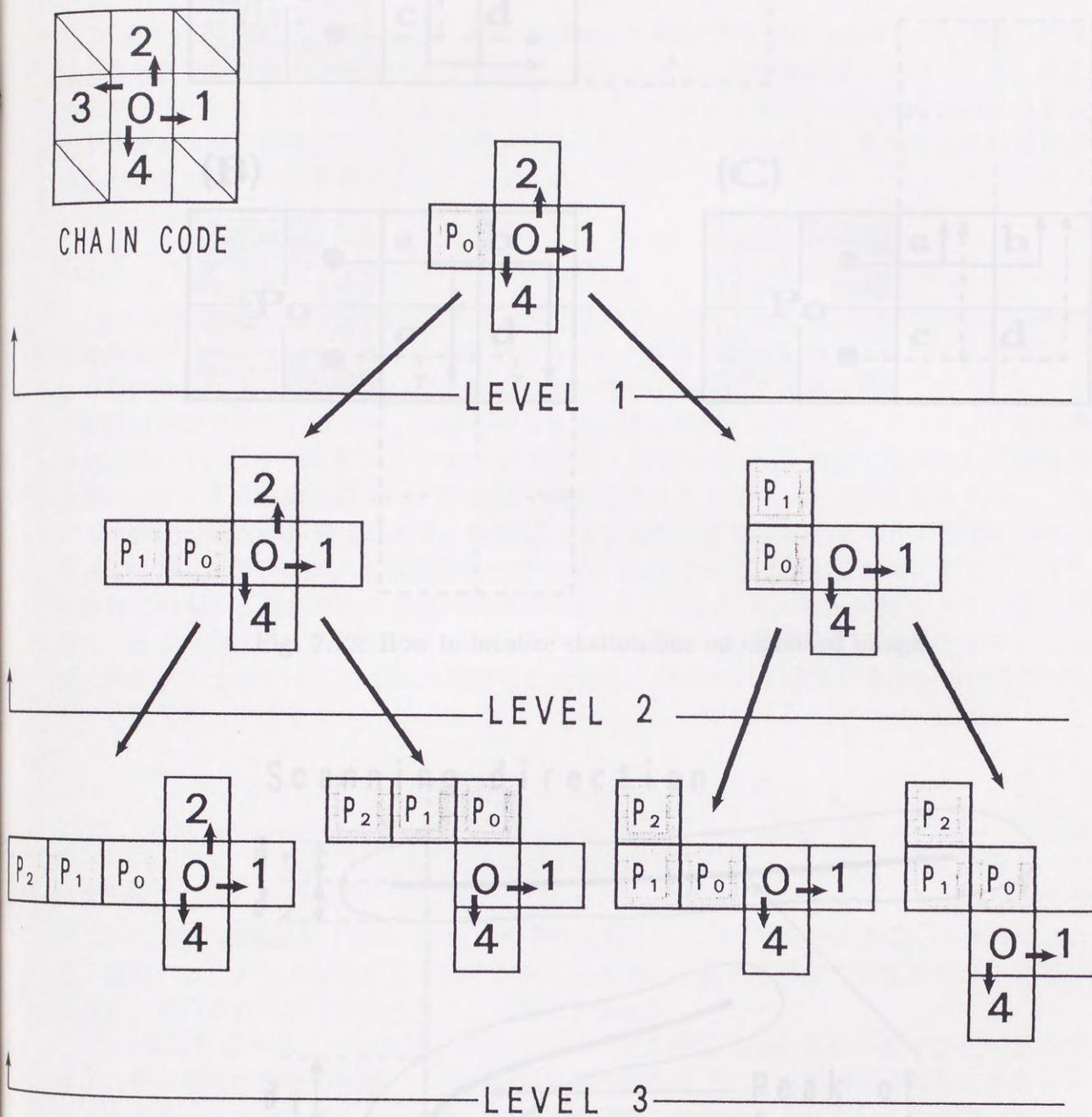
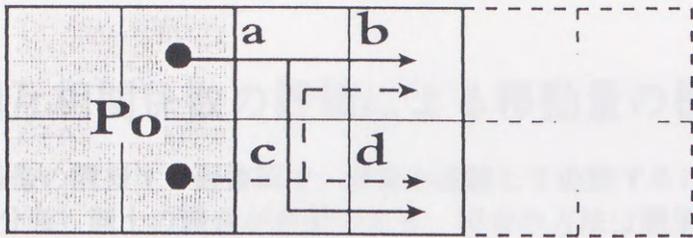
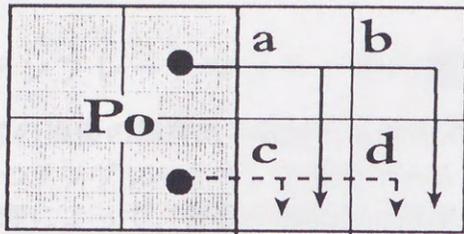


Fig. 2.11: How to trace on quantized image

(A)



(B)



(C)

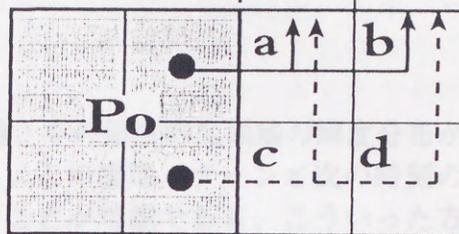


Fig. 2.12: How to localize skelton line on classified images

Scanning direction

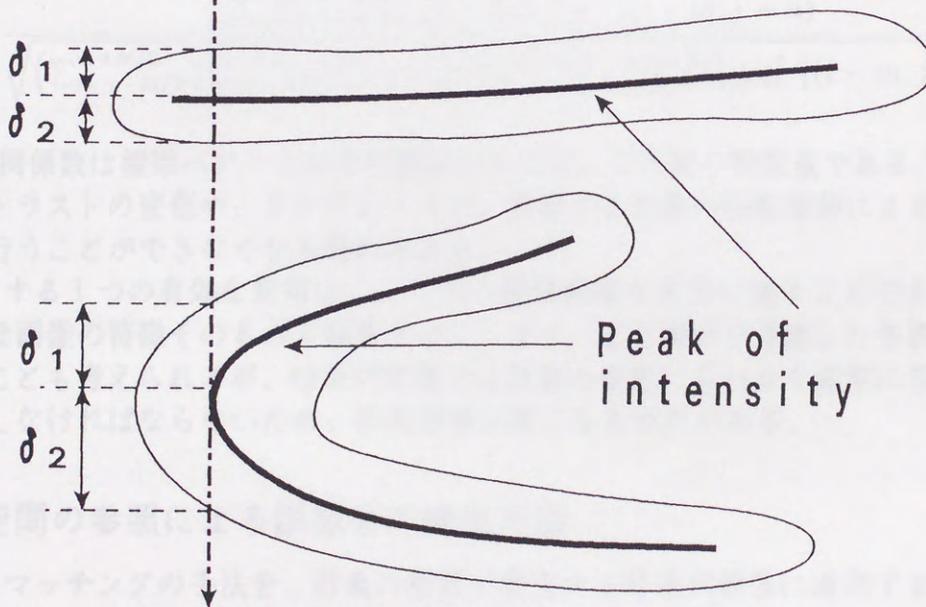


Fig. 2.13: Detection of end point

## 2.4 相互相関係数の評価による移動量の検出方法

時系列画像の隣接する画像間で、対象を連続して追跡するには、識別すべき対象（局所的な部分の輝度分布）同士の照合が必要である。照合の方法は識別論的なアプローチと、構造解析的なアプローチとに分類することができるが [13]、本節では前者の識別論的な照合方法の代表的手法である相互相関係数を用いたテンプレートマッチングの手法を適用する際の問題点およびその回避方法について述べる。

### 2.4.1 テンプレートマッチングの概念

ある時刻の画像の局所的な領域を時系列で追跡する時、その局所的な領域の輝度分布が十分な特徴を持つテンプレートとして特定できるものとする。この標準パターンと次の時刻の画像との相関処理によって、対象の移動先の座標を特定することが可能である。こういった方法は一般的にテンプレートマッチング法と呼ばれる [13]。テンプレートマッチングの手法の概念図を Fig. 2.14 に示す。時刻  $T-1$  で  $Y, X$  方向にそれぞれ  $P \times Q$  画素で構成される画像の輝度分布を  $f_{t-1}$ 、その画像上の  $M \times N$  画素で構成されたテンプレートの輝度分布を  $g_{t-1}$ 、次の時刻  $T$  の画像の輝度分布を  $f_t$  とする。時刻  $T-1$  におけるテンプレートの中心座標を  $(m_0, n_0)$ 、時刻  $T$  におけるテンプレートの照合先の中心座標を  $(m, n)$  とする。この時、テンプレート  $g_{t-1}$  と画像  $f_t$  の間の正規化された相互相関係数は (2.34) 式となる。 $R_{corr}$  の値が大きいほど相関が強く、画像の  $(m, n)$  を中心として標準パターンに類似した画像パターンが存在することを表す。画像  $f_t$  の上で予め与えられた範囲内を走査し、相関が最も強くなる  $(m, n)$  をテンプレートの移動先として決定する。

$$R_{corr}(m, n) = \frac{\sum_{i=m-M/2}^{m+M/2} \sum_{j=n-N/2}^{n+N/2} f_t(i, j) g_{t-1}(i-m, j-n)}{\sqrt{\left(\sum_{i=m-M/2}^{m+M/2} \sum_{j=n-N/2}^{n+N/2} f_t^2(i, j)\right) \left(\sum_{i=m-M/2}^{m+M/2} \sum_{j=n-N/2}^{n+N/2} g_{t-1}^2(i-m, j-n)\right)}} \quad (2.34)$$

さて、相互相関係数は標準パターンの平行移動のみに対して不変の特徴量である。したがって、画像のコントラストの変化や、ランダムノイズ、移動する対象の回転運動による歪みにより正しい照合を行うことができなくなる恐れがある。

この問題に対する1つの有効な対策は、ノイズの軽減処理を十分に施すことであるが、ノイズの軽減処理は画像の特徴そのものも減衰させてしまう。また変形を考慮した多数のテンプレートを用いることも考えられるが、時系列画像では対象の変化に合わせて非常に多くのテンプレートを用意しなければならないため、処理効率が悪くなる恐れがある。

### 2.4.2 特徴空間の参照による誤照合の検出方法

テンプレートマッチングの手法を、対象の形状が変化する時系列画像に適用することを考える。この時、相互相関係数の持つ性質から、多数の誤った照合が発生する可能性がある。もちろん対象の変化のパラメータがすべて予測可能で、処理に組み込むことが出来れば誤った照合を防止することが出来るが、計測対象を変更する毎に多くのパラメータを設定するのは必ず

しも効率のよい方法ではない。そこで、解析の全行程を機械的判断に任せるのではなく、照合結果が疑わしい時には人間の判断を優先するという対話的な方法が考えられる。これは、対象の変化を表現するパラメータが多数で、なおかつ未知の場合には最も現実的な選択であると思われる。

誤った照合を防止する最も単純な方法は、Fig. 2.15(a)に示すように相関係数の評価によって得られた移動先座標の候補を別の判定基準で検査し、誤った照合と判定された時には人為的判断で正しい座標を指定する方法である。人為的判断によって示された判断基準は逐次登録され、次の判断に反映される。これを繰り返すことにより次第に人間の判断に近い基準で判定が可能になると考えられる。時系列の追跡の初期の段階では厳しい検査基準を予め初期条件として与える必要がある。この方法は簡便で実現が比較的容易であるが、照合はあくまで相関評価のみによって行われ、照合の判定にのみ人間の判断が反映される点で限界があり、人間の目視による追跡の支援システムとしての位置付けが妥当である。

さらにこの方法を発展させて Fig. 2.15(b)に示すように、人為的判断の結果を正誤判定だけではなくテンプレートマッチングそのものに反映させることも考えられる。しかし、複数の判定基準をテンプレートマッチングの処理にどのように重み付けて盛り込むかという点で難しい問題が残る。

本研究では、学習による自動照合、追跡システムを構成するための第1段階として、Fig. 2.15(a)に示す目視追跡の支援システムの構築に焦点を絞り、確実な正誤判定が可能な判定基準及び方法について考える。

照合の正誤判定を行うために、特徴空間 (Characteristic area) と、その領域分割の概念を導入する。特徴空間の概念を Fig. 2.16に示す。ここでは判定基準となる  $n$  個の特徴パラメータ  $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  を用意し、その特徴量を軸とした  $n$  次元の特徴空間を定義する。説明のため  $n=2$  とした2次元の特徴空間とする。

人為的判断によって示された正誤判定のしきい値となる特徴パラメータの組を特徴ベクトル (Characteristic vector) と呼ぶことにする。特徴ベクトルの散布状況によって正しい照合と判定される領域を ( $T$ )、誤った照合と判定される領域を ( $F$ )、その中間的な領域を ( $O$ ) とする。特徴空間はこの3つの領域に分割することができる。判定する対象の特徴量が ( $T$ ) の領域に投影されなかった場合をすべて誤りと判定すると単純なしきい値処理となるが、これでは正しい照合が行われた場合も誤りと判定する場合が多く発生する。そこで ( $O$ ) の領域のしきい値 (図中の点線部分) も変更可能なパラメータの1つとみなして、適当な基準を設定して更新する。

簡便化のため以上の手続きを、登録された特徴ベクトルのリストに対する選別の操作で近似させる。まず  $n$  個の特徴ベクトルの組が次のように与えられたものとする。

$$(r_1(i), r_2(i)) \quad \{i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2.35)$$

上記の特徴ベクトルは正しい判定がなされた時のパラメータの組とする。この時、領域  $T$ ,  $O$  を構成する特徴ベクトルの集合を (2.36), (2.37) 式で定義する。

$$T \cup O = \{R_{OT} \mid (R_1 \geq r_1(i)) \cap (R_2 \geq r_2(i))\} \quad (2.36)$$

$$T = \{R_T \mid R_{OT}(1) \cap R_{OT}(2) \cap \dots \cap R_{OT}(n)\} \quad (2.37)$$

ここでは、特徴パラメータ  $r_1(i)$ ,  $r_2(i)$  をしきい値とする領域をそれぞれ  $R_1$ ,  $R_2$ 、その両方の重なる矩形領域を  $R_{OT}(R_1, R_2)$  とし、矩形領域  $R_{OT}$  の論理積となる領域を  $R_T$  とする。

(2.36), (2.37) 式で表される領域分割の様子を Fig. 2.17 に図式化して示す。領域は特徴ベクトルを縁点に持つ矩形領域の重ね合わせで表現される。各々の小領域の数字は重ね合わせの個数である。この数字を正誤判定のための変更可能なしきい値とする。特徴空間上で以上の処理を繰り返すことで比較的簡便に、ある程度人間の判断に近い正誤判定が可能となるものと思われる。

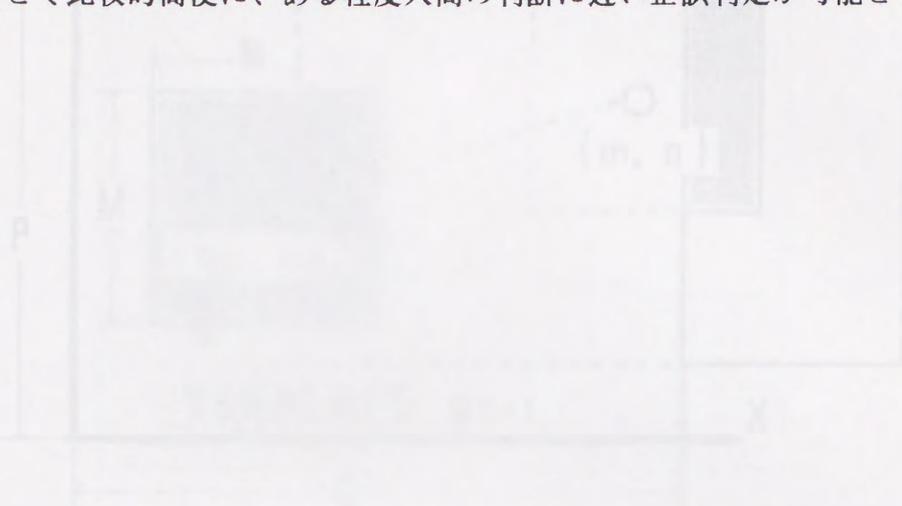


Fig. 2.17: Overlapping rectangles and their intersection.

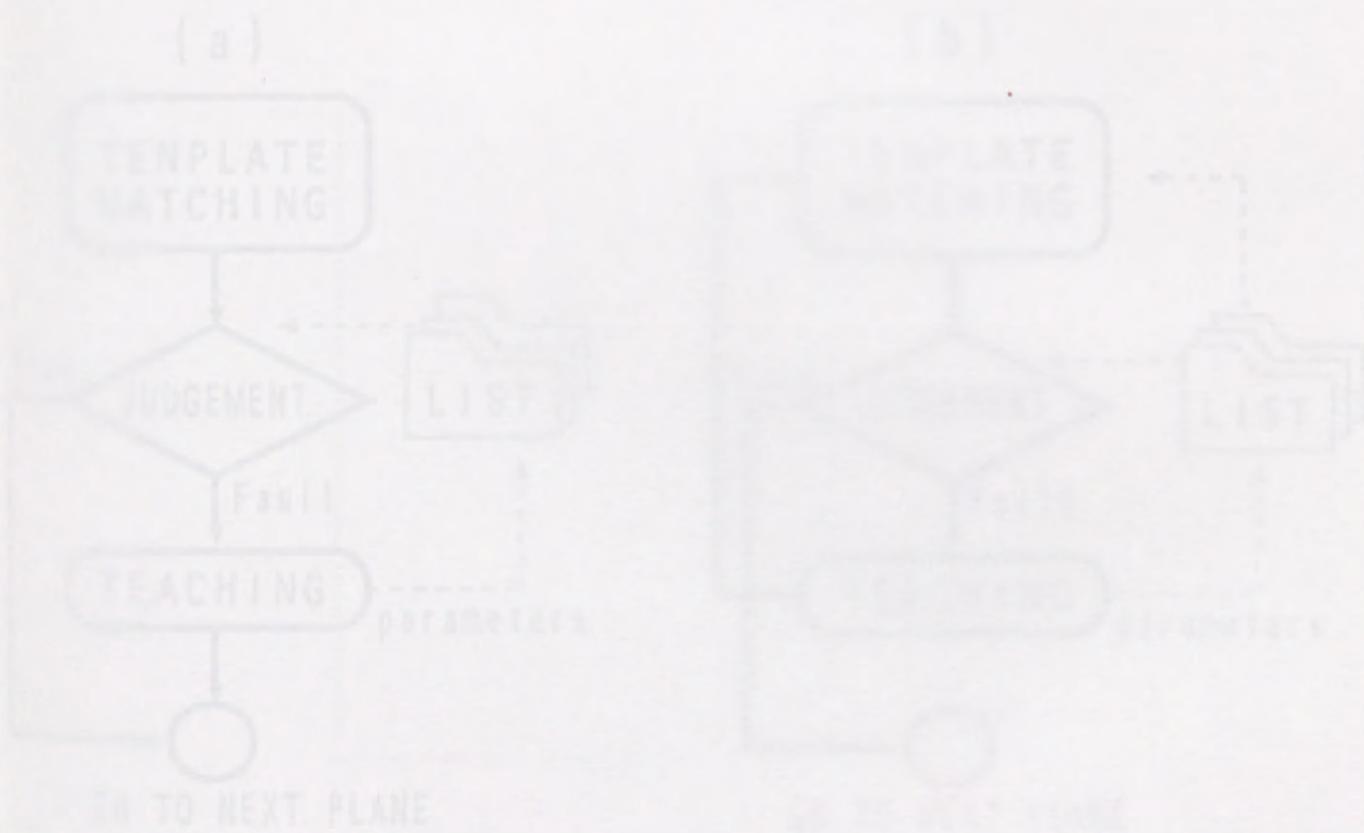


Fig. 2.18: Flowchart of the learning process.

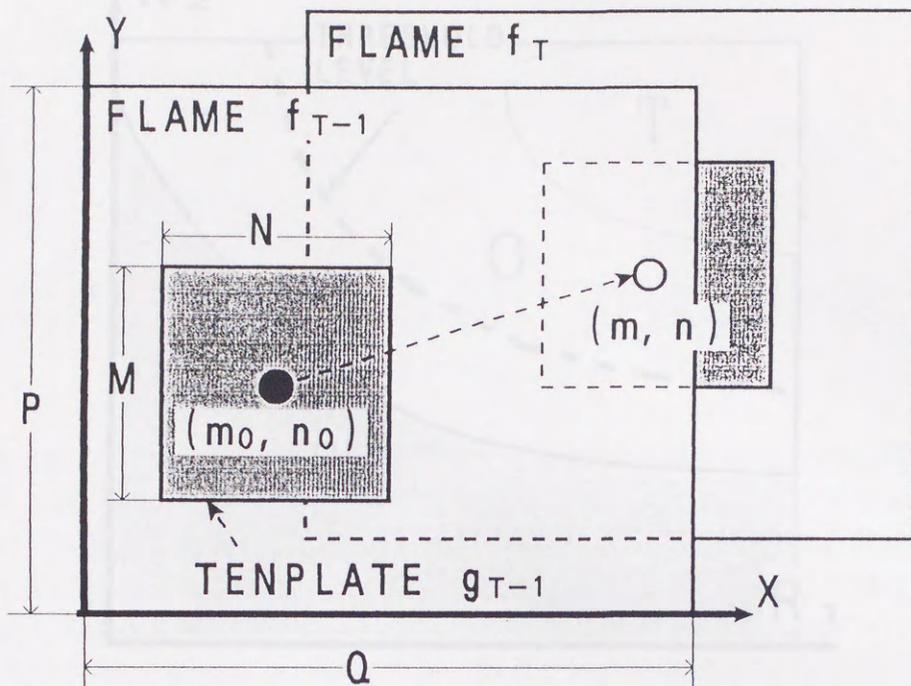


Fig. 2.14: Schematic image of template matching

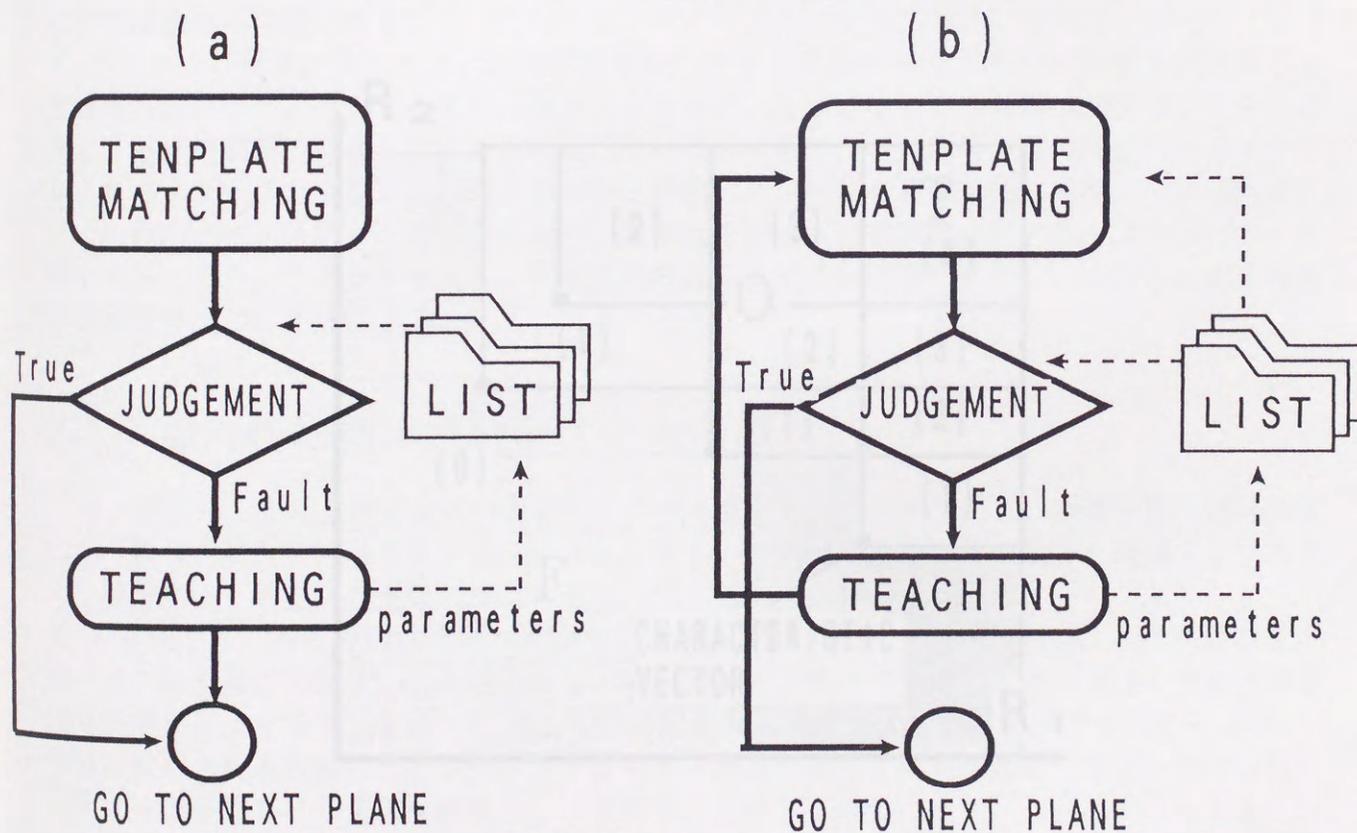


Fig. 2.15: Flow chart of error detection

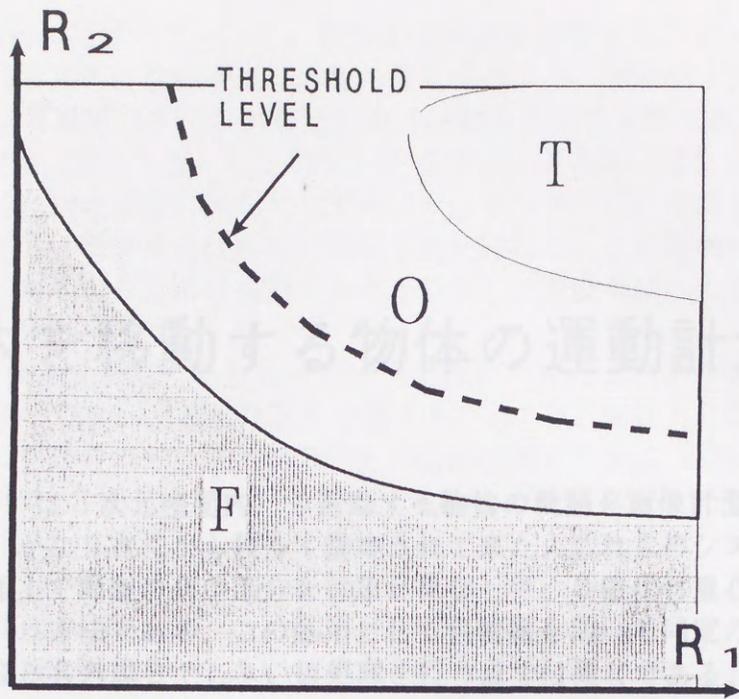


Fig. 2.16: Schematic image of characteristic area

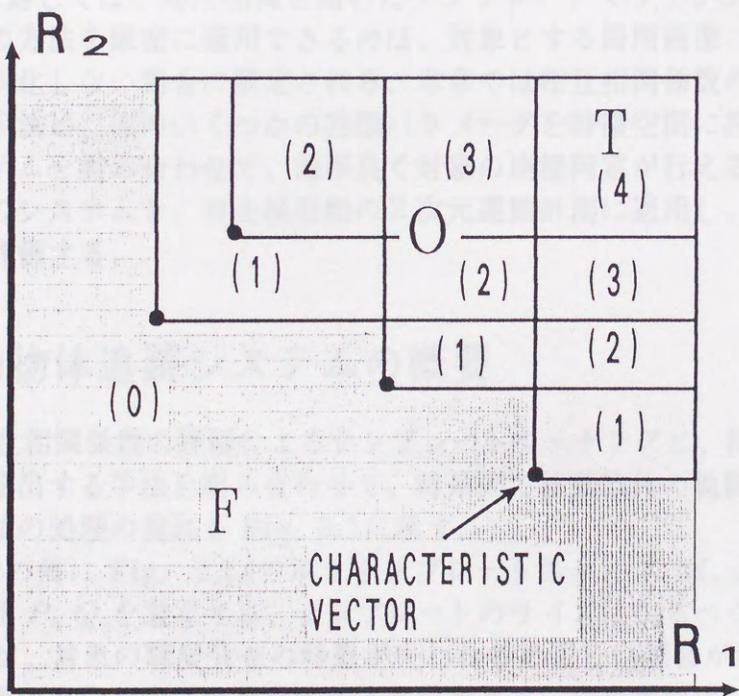


Fig. 2.17: Logical division of characteristic area

## 第 3 章

# 2次元面内を移動する物体の運動計測

2次元面内（あるいは3次元空間内）で運動する物体の軌跡を画像計測技術により非接触計測するシステムは、かなり古くから数多く構築されて来た。これらのシステムの多くが採用している手法は、画面上で輝度の高い部分を対象と見なして、2値化と重心検出等により対象の座標を同定するという方法である。この応用として色情報を用いて同定の精度を上げる方法も考えられるが、RGB各色成分でしきい値処理を行う点では同じである。

従来のこれらの手法の利点は単に輝度の高い画素を検出するのみなので処理効率が極めて高い点であるが、その反面、対象の輝度が十分に高く、かつ対象の特徴を覆い隠すようなノイズ成分が画像に混入しないことが前提となるため、そのような良好な画像が得られない対象に対しては適用が困難になる。

このような対象に対しては、局所相関を用いたテンプレートマッチングの手法の適用がまず考えられるが、この方法を厳密に適用できるのは、対象とする局所画像（テンプレート）の輝度分布が時系列で変化しない場合に限定される。本章では相互相関係数の評価によるテンプレートマッチングの手法と、他のいくつかの特徴パラメータを特徴空間に投影して誤った対応付けを検出するシステムを組み合わせ、効率良く対象の座標同定が行えるシステムについて説明する。また、このシステムを、自走模型船の2次元運動計測に適用し、本方法の応用性及び適用限界について評価する。

### 3.1 面内移動物体追跡システムの概要

2.4節で示した相互相関係数の評価によるテンプレートマッチングと、特徴空間の領域分割により誤った照合を検出する手法を組み合わせ、時系列で移動物体の軌跡を追跡するシステムを構築する。本方法の処理の流れを Fig. 3.1に示す。

本方法では、解析の前に Fig. 2.14で示すテンプレートのサイズ  $M$ ,  $N$  と相関係数を評価するための探査範囲  $P$ ,  $Q$  を設定する。テンプレートのサイズはなるべく小さくする方が空間分解能が向上するが、対象の輝度分布の特徴が失われると正しい照合ができなくなるので、特徴が保存される程度の十分な大きさを設定する必要がある。走査範囲は、対象が次の時刻に移動すると予想される領域を確保しなければならない。これらのパラメータはどちらも小さい方が処理効率は向上する。本研究では、これらのパラメータは対象に応じて試行錯誤的に決定

した。

テンプレートの最初の標準パターンは、画面上で対象を指定することで登録される。登録が終わるとシステムは自動的に次の時刻の画像に対してパターンマッチングを行なう。照合が行われた先のパターンと標準パターンの輝度分布の特徴を用いて計算される特徴ベクトルが、Fig. 2.17で示した特徴空間内で正しいと判定される領域にある時にはテンプレートの標準パターンを更新し、さらに次の画像に対してパターンマッチングを行う処理を繰り返す。特徴空間による正誤判定で正しい照合が行われたと判定された時には、その特徴パラメータの情報は既に特徴空間に登録されているものと等価であると仮定し、特徴空間への登録は行わずに次の処理に移る。

特徴空間による正誤判定で誤った対応付けと判定された時には、その判定の妥当性を人間が判断する。本システムでは、人間の判断を支援するため CRT 画面上で2時刻前までのテンプレートのパターンの履歴を表示する。画面構成と追跡の様子を Fig. 3.2に示す。人間により正しいと判断された時には、システムはその時刻におけるテンプレートと照合先の輝度分布から求められる特徴パラメータの組を特徴空間上に登録する。人間による判断においても誤っていると判定された時には、照合先の座標の決定を人間の判断に委ねることになる。この時には特徴パラメータは保存されない。

正誤判定に用いる特徴パラメータとして、本方法ではテンプレートと照合先の領域のそれぞれの平均輝度、輝度の分散、 $X, Y$ 方向に微小なずれが生じた時の相互相関係数から得られる評価関数を用いる。以下にそれぞれのパラメータの内容とその意味について説明する。

まず、時刻が1ステップ進む時に照明の状態により全体のコントラストが変化すると、正しい照合の場合でも相関係数の値は低くなることが考えられる。この時には相互相関係数は低くても正しい照合が行われている可能性がある。したがってコントラストの変化がある場合には、相関係数がある程度低くても正しい照合となるように判定するべきである。照合先およびテンプレートの領域のコントラストは、その領域の輝度分布の平均値と分散を用いて表現する。時刻  $t$  における輝度分布の特性関数を  $b_t(i, j)$  とする時の輝度分布の平均値  $A_t$  および分散  $V_t$  を (3.1), (3.2) 式に示す。

$$A_t = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_t(i, j) / (N \times M) \quad (3.1)$$

$$V_t = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b_t(i, j) - A_t)^2 \quad (3.2)$$

ここで、 $m, n$  は Fig. 2.14 で示す照合先の領域の中心座標、 $M, N$  はテンプレートのサイズである。

照合する元の画像の時刻を  $t-1$ 、照合先の画像の時刻を  $t$  とし、(3.1), (3.2) 式を用いることにより、コントラストの変化を表すパラメータとして平均輝度の変化率  $C_{AVR}$  および輝度の分散の変化率  $C_{VARI}$  をそれぞれ (3.3), (3.4) 式で表す。

$$C_{AVR} = 1 - \frac{|A_t - A_{t-1}|}{b_{max}} \quad (3.3)$$

$$C_{VARI} = 1 - \frac{|V_t - V_{t-1}|}{b_{max}^2} \quad (3.4)$$

ここで、 $b_{max}$ は輝度のとり得る最大値とする。

次に、走査範囲の領域内でテンプレートの輝度分布の特徴に類似した別の領域が出現する場合について考える。たとえば細長い形状を標準パターンに選んだ時には、背景の棒状の映像や航跡の反射などは比較的良好な相関を示してしまう場合がある。この時単純に相関評価のしきい値を高く設定すると、正しい照合も誤ったものとして判定を厳しくしすぎる点で好ましくない。ここで相関係数はテンプレートの領域全体における平均的な類似度のパラメータであることに留意すると、局所的な類似度を強く評価する判定基準が妥当であると考えられる。そこで、相関評価で選択された正しい照合の候補の領域の中心座標をX、Y方向に微小移動させた時の相関係数の変動を特徴パラメータとして用いる。これは、対応付けられた組の輝度分布形状の輪郭部をより強く評価するという考えに基づく。X、Y方向に微小移動させた時の相関係数の低下率  $C_{XSHIFT}$ 、 $C_{YSHIFT}$ を(3.5),(3.6)式に示す。

$$C_{XSHIFT} = \frac{R_{corr}(m+1, n)}{R_{corr}(m, n)} \quad (3.5)$$

$$C_{YSHIFT} = \frac{R_{corr}(m, n+1)}{R_{corr}(m, n)} \quad (3.6)$$

ここで、 $R_{corr}(m, n)$ は、(2.34)式で示した相互相関係数、 $(m, n)$ は照合先の領域の中心座標である。以上に示した4個の特徴パラメータと相互相関係数の合計5軸の特徴ベクトルを持つ空間を特徴空間として正誤判定に用いる。さらに画像のモーメントや、重心位置の変化等も特徴パラメータの候補として挙げられるが、画像は3次元空間から2次元平面に投影されて生成されるため、対象が3次元物体である場合には、これらの特徴は対象の位置によって著しく変化するので、本研究では適用しなかった。

これまでに述べたコントラストの変化や輪郭部の形状を考慮した方法としては、画像に微分処理を施した後で相関評価を行う方法も考えられるが、画像の微分処理はノイズ成分も強調してしまうため、適用範囲が限られる。本方法では正誤判断の基準を人間との対話的操作で次第に設定を絞り込む点でより適用範囲が広がると思われる。

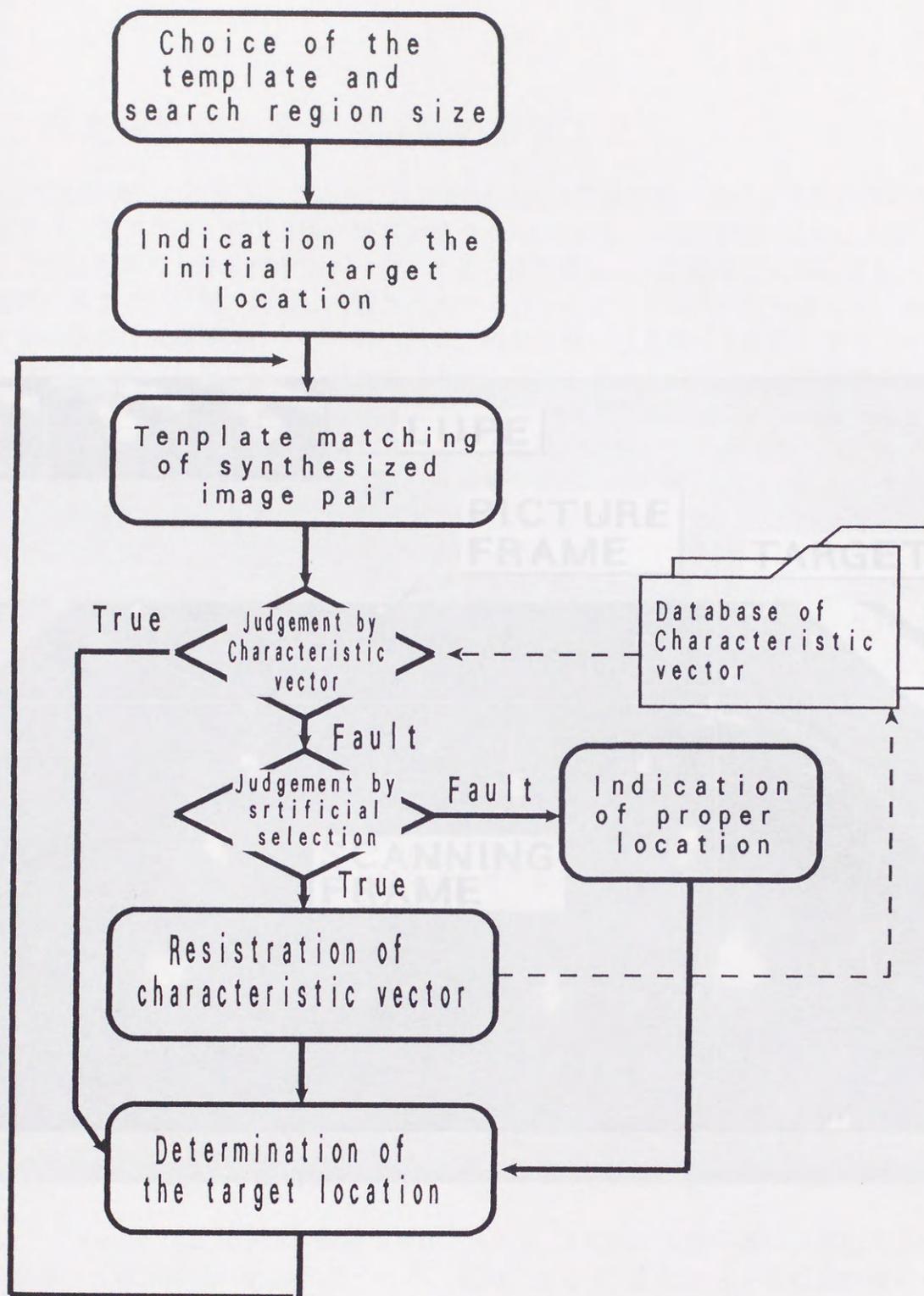


Fig. 3.1: Procedure of template matching and error detection

### 3.2 二次元画像処理の2次元画像処理の方法

この章では、二次元画像処理の方法について、具体的な処理手順を説明する。まず、入力画像の取得から始まり、画像の補正、特徴抽出、マッチング、そして最終的な結果の表示までの流れを詳しく解説する。特に、LUPE、PICTURE FRAME、TARGET、SCANNING FRAMEといった各処理段階の役割と実装方法を重点的に扱う。

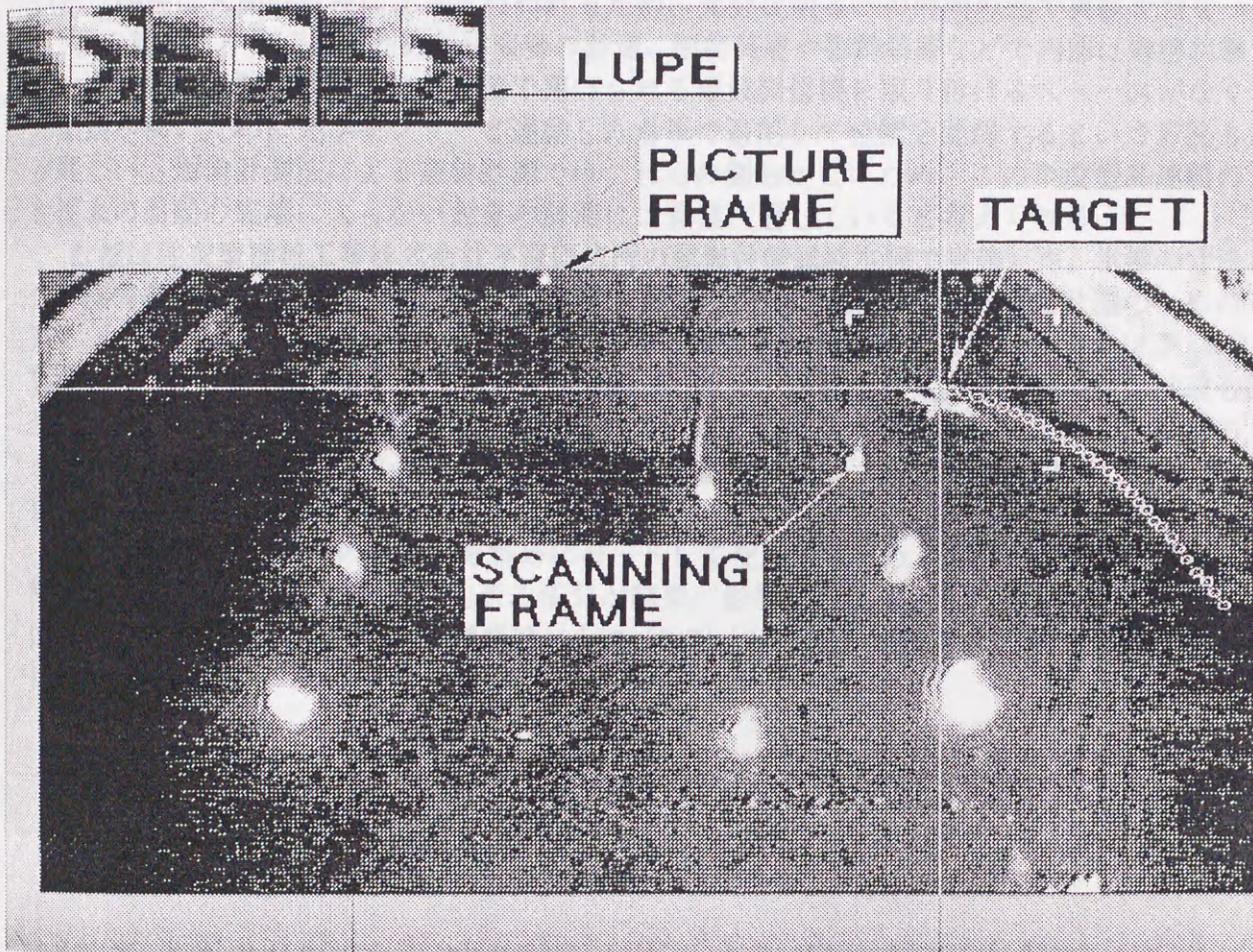


Fig. 3.2: Sample picture of target and search region

## 3.2 自走模型船の2次元運動の計測方法

本研究で開発した追跡システムを、半没型高速船の旋回試験における運動計測に適用した。供試模型は、長さ  $2m$ 、幅  $0.3m$ 、排水容積  $0.0656 m^3$  と、自走模型としてはかなり小さく、また走行中は船体の大部分が水面下に没水する。走行速度は、直進時で  $1.5m/s$  以上とかなり速い部類に属する。姿勢の制御は内蔵されたマイコンにより自動的に行われるが、推進器の回転数と舵の制御は無線操縦によって行われる。画像計測には周囲を全暗黒とすることが望ましいが、操縦は人間の目視によって行われるため、十分な明るさの照明の元で実験を行なった。

この模型は小型であるため船体姿勢の計測、制御装置や駆動装置などで内部は過密状態であり、通常自走試験における位置計測で用いられる電波発信機を取り付けるスペースがなく、また船速が高いために光学センサーと連動した台車で追尾して位置を計測するという方法も適用が難しい。画像計測法による運動計測ではこれらの制約がないため、この半没型高速船のような従来の船舶の範疇に入らない対象の計測には非常に適していると考えられる。

計測は住友重機械工業株式会社平塚研究所の航海性能試験水槽で実施した。水槽の寸法および計測装置の配置を Fig. 3.3 に示す。水槽の長さは  $50m$ 、幅は  $30m$ 、画像計測のための CCD カメラは水面から高さ約  $10m$  の位置に設置した。本計測で使用した CCD カメラ (SONY 製: CCD-MC1) は、焦点距離  $3.6mm$  で画角  $67$  度と、市販されているものの中では最も画角が広い。しかしカメラの設置高さが制限されているためカメラを斜めにセットし、軌跡の全体を収めるために、Fig. 3.3 の一点鎖線部分に示すように底辺  $22m$ 、上辺  $12m$ 、高さ  $25m$  の台形領域を計測領域とした。

本計測では、超広角のレンズを斜めにセットして使用するため、通常の画像計測ではあまり問題とならないさまざまな光学的歪み成分が結果に影響を与える。したがって本研究では、画像平面から実空間へ投影する座標変換として (3.7)、(3.8) 式に示す3次の項を含む変換式を適用した。

$$x = A_{00}^1 + A_{10}^1 u + A_{01}^1 v + A_{11}^1 uv + A_{20}^1 u^2 + A_{02}^1 v^2 + A_{21}^1 u^2 v + A_{12}^1 uv^2 + A_{30}^1 u^3 + A_{03}^1 v^3 \quad (3.7)$$

$$y = A_{00}^2 + A_{10}^2 u + A_{01}^2 v + A_{11}^2 uv + A_{20}^2 u^2 + A_{02}^2 v^2 + A_{21}^2 u^2 v + A_{12}^2 uv^2 + A_{30}^2 u^3 + A_{03}^2 v^3 \quad (3.8)$$

ここで、 $(u, v)$  は画像平面の画素座標値、 $(x, y)$  は対応する実空間の座標値である。本研究ではなるべく精度の高い変換を行うため、既知である13点の対応する画素座標と実座標の組を用いて最小二乗法で誤差を拡散させることにより変換係数を決定した。

本計測で変換係数決定のために用いた較正用の画像を Fig. 3.4 に示す。航海性能試験水槽では常設の設備として水槽上の任意の位置に移動できる台車があり、極めて高い精度で位置の制御が可能である。この台車を計測範囲内で広い範囲に移動させ、台車の同一点を較正用の座標とした。Fig. 3.4 の例では9箇所に移した台車の画像を重ねあわせて表示した。

これらの較正点より求められた変換係数を用いて較正画面上に実空間で正方格子となるメッシュを重ねあわせたものが Fig. 3.5 である。本計測で得られる画像がかなり激しい光学的歪みを伴っていることがわかる。

# SIDE VIEW

この時の真値に対するばらつき（標準偏差）は X 方向では  $0.089m$ 、Y 方向では  $0.064m$  となった。本計測における精度の限界である量子化誤差が  $0.0719m$  であることを考えると満足できる変換精度であると考えられる。

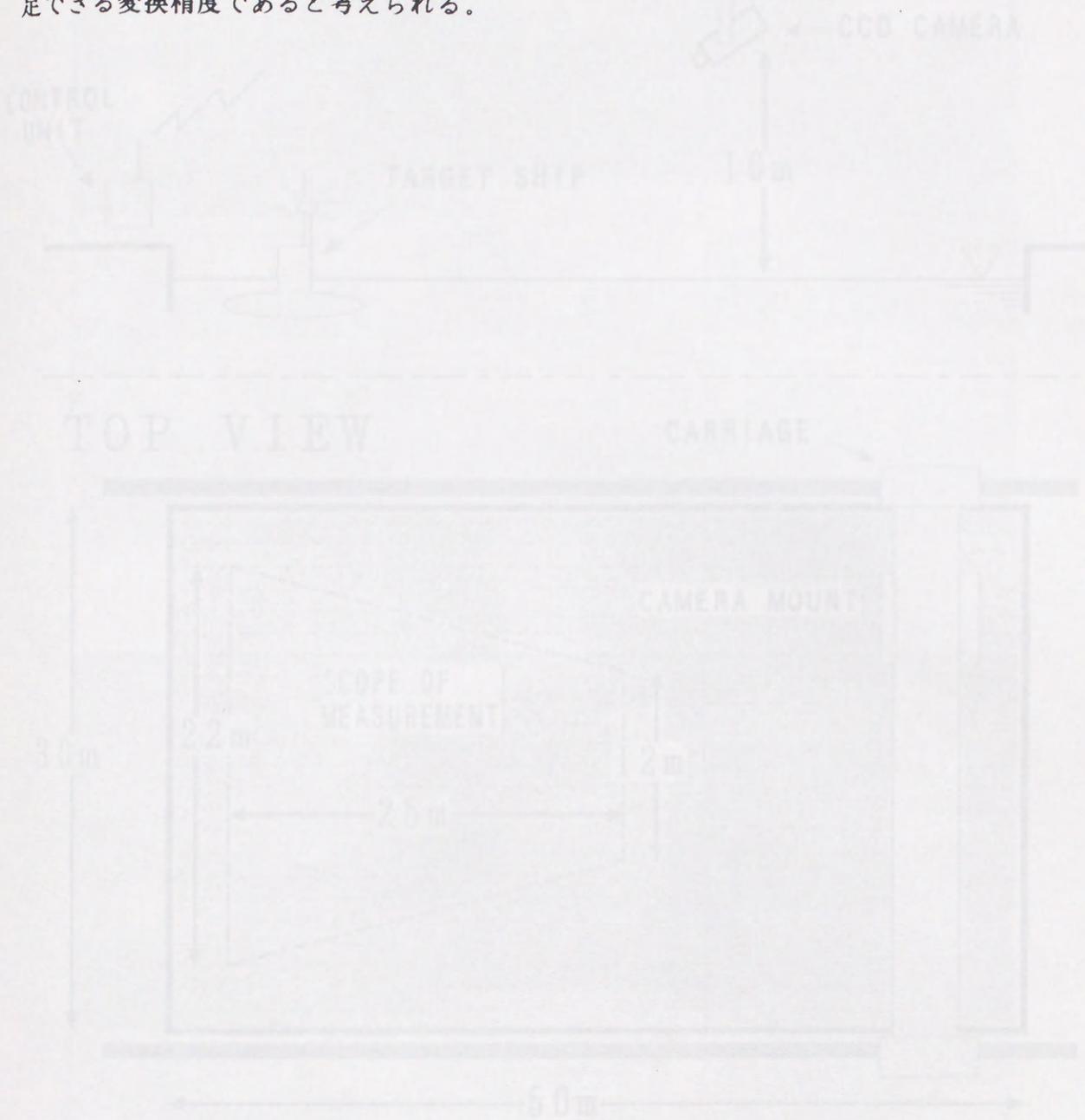
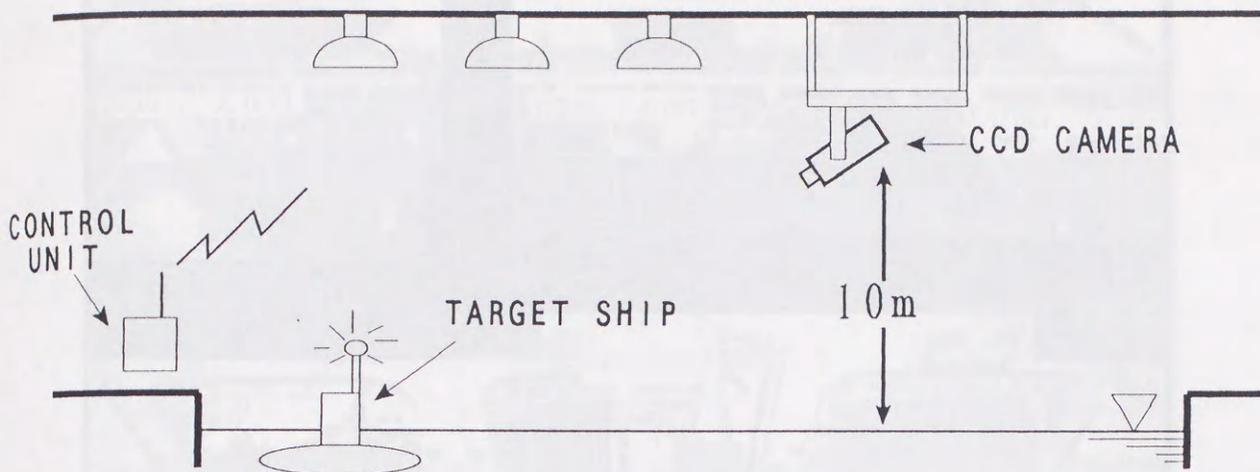


Fig. 3.1: Schematic view of experimental facility

# SIDE VIEW



# TOP VIEW

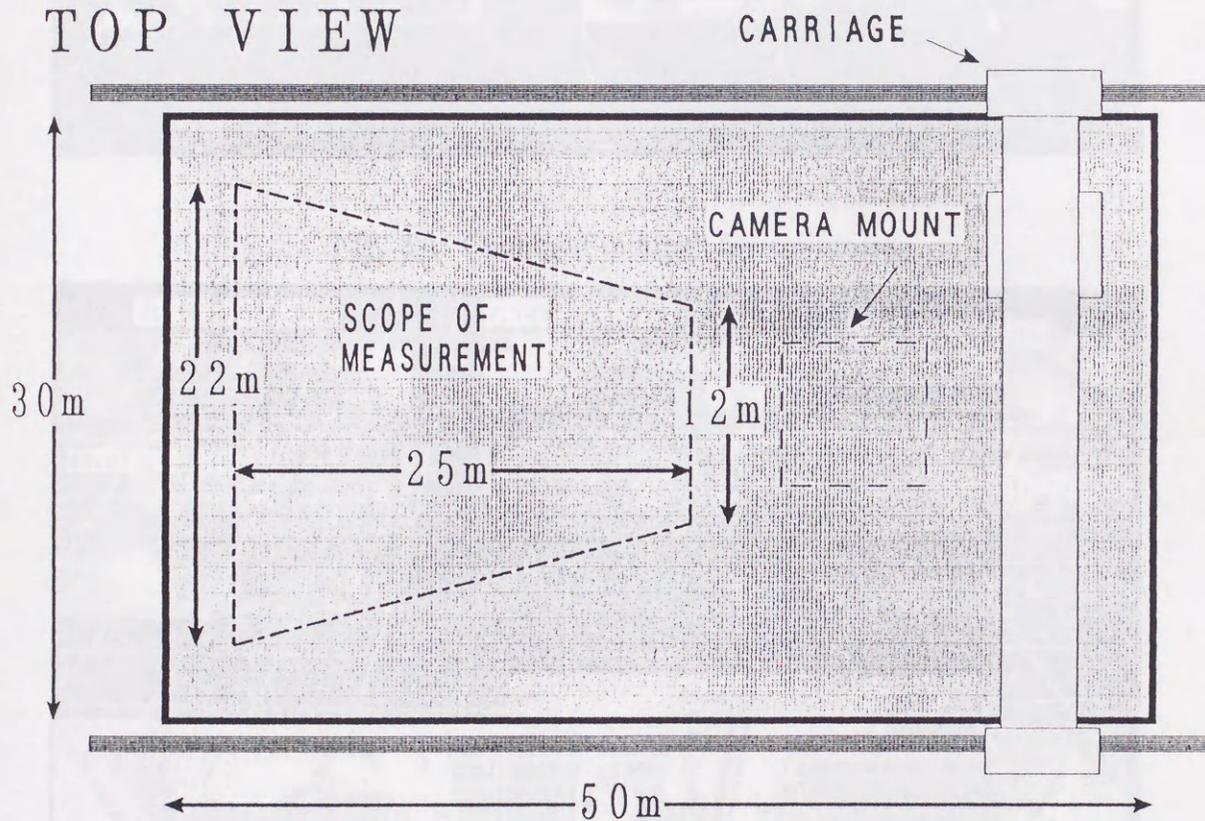


Fig. 3.3: Schematic view of experimental facility

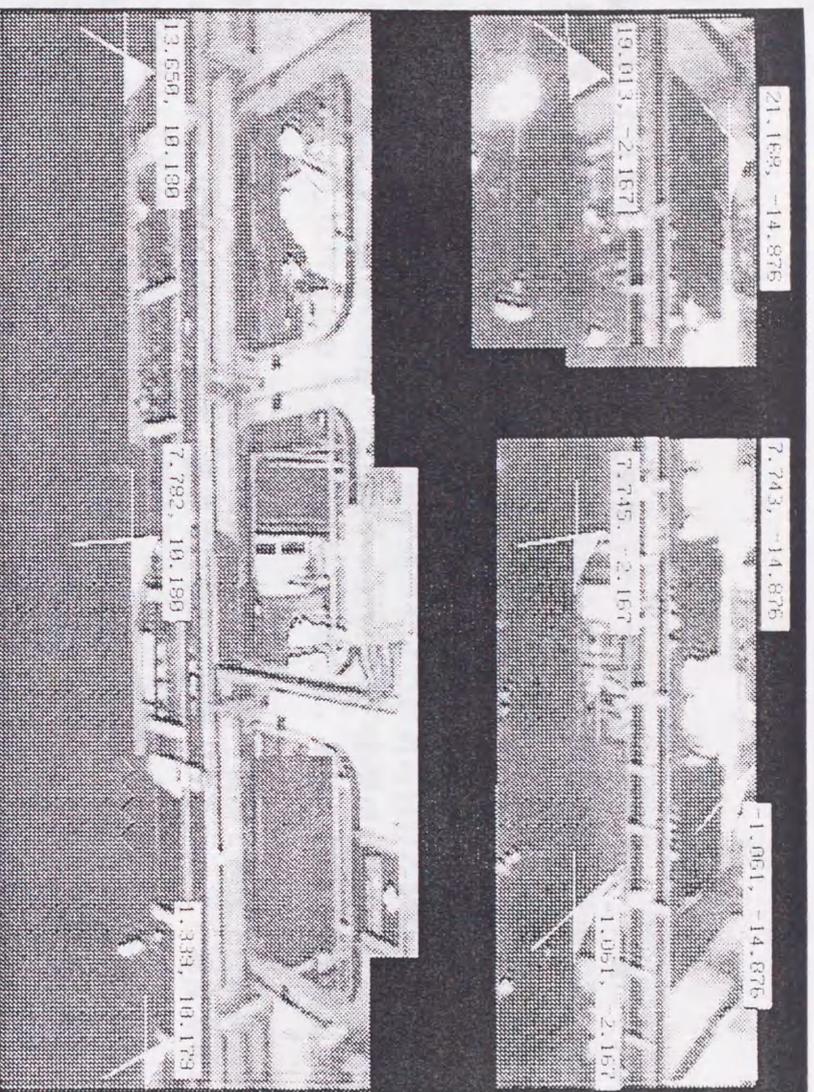


Fig. 3.4: Combined pictures for calibration

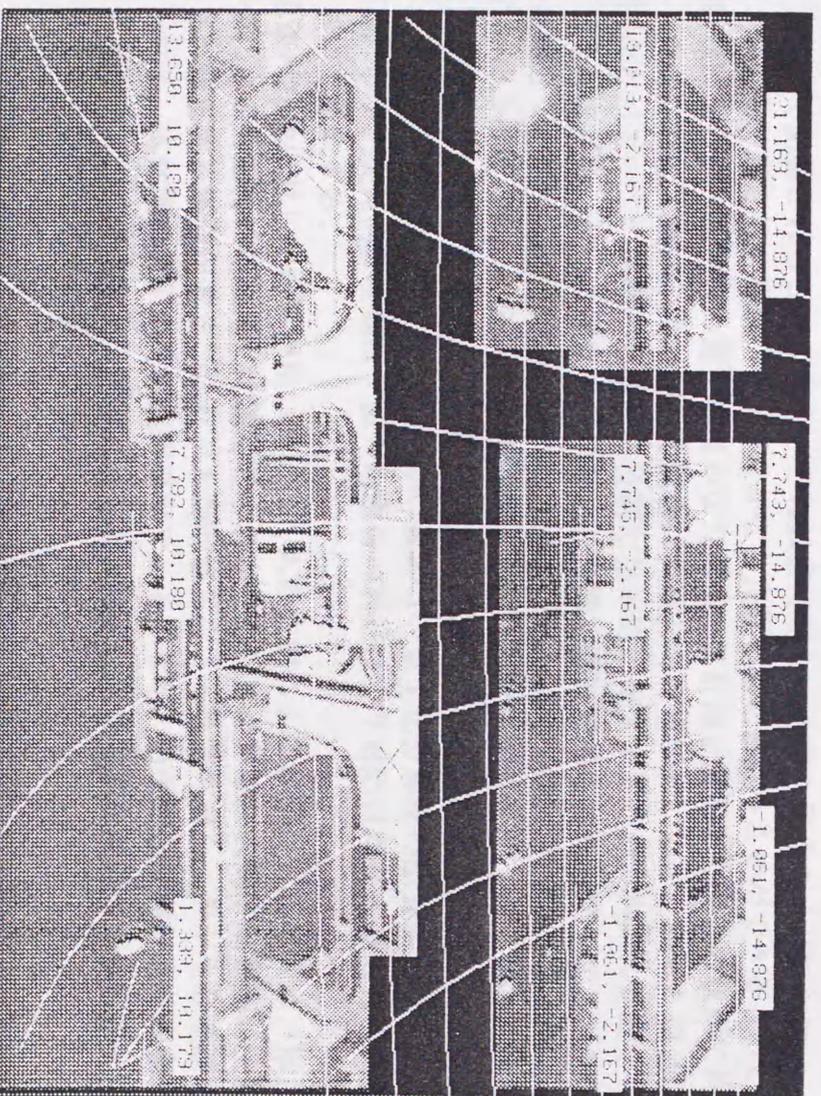


Fig. 3.5: Transformed rectangular mesh on photographic plane

### 3.3 計測結果

旋回時における計測対象の局所的な画像（テンプレートの標準パターン及びその周辺部）の3秒毎の変化の様子を Fig. 3.6に示す。本計測で得られた画像は、水平面に対してかなりの傾斜角で超広角レンズを用いて撮影されているため、模型船の形状を示す画像のパターンは旋回及びカメラとの距離の変化によって拡大縮小、回転変形を受ける。また、計測に有害な照明の存在により、水面の反射や明るさの変化など急激なノイズ成分が突発的に生じる。

本研究で用いる解析システムは3.1節で述べたように対応付けの評価には相互相関係数のみを用いるため、1時刻後の画像の拡大縮小、回転変形の影響が充分小さくなるようにタイムステップを細かくしなければならない。今回の計測では、解析の利便性も考慮して0.2sec間隔で追跡を行った。

低速で舵角度を3度、5度、8度として旋回を行った時の軌跡を画像上に直接描画したものをそれぞれ Fig. 3.7(a)-(c)に示す。低速では航跡の反射が少ないことと輝度分布パターンの変化が小さいことから安定した追跡を行うことができた。

高速で舵角度5度、8度の旋回を行った時の軌跡をそれぞれ Fig. 3.8(a),(b)に示す。高速旋回では模型船は没水するため航跡の反射は低速旋よりもさらに小さくなるが、船体を示す輝度分布が不鮮明になるため相互相関係数を用いた追跡は困難になる。しかし、いずれの状態においても計測が破綻することなく最後まで追跡することができた。

テンプレートマッチングによる追跡方法では標準パターンを時系列で更新するため、追跡の過程において1度でも誤った追跡を正しいものと判断すると、対象と異なるパターンが標準パターンとして記憶されることにより、それ以後は正しい追跡を行うことができない。このことから、本研究で設定した特徴パラータはかなり良好な判定を行うことができるものと思われる。相関評価による誤った照合の発生率はかなり高く、本計測を適用した全ての状態で約16%程度であった。これは7点に1点の割合で照合に失敗していることになるが、誤った照合は外乱の生じる所などパターンの特徴が急変する位置で集中的に発生するため、実際に追跡を行っている時にはそれほど多いという印象は受けない。特徴空間に登録された特徴ベクトルの個数はいずれの状態も20個から30個前後であり、比較的少ない学習回数で判定できることも判明した。

Fig. 3.9-Fig. 3.13に各々の状態における軌跡の実座標を示す。マークは1秒毎の模型船の位置を示している。カメラからの距離が遠い領域（図の下側に相当する）で、軌跡にかなりののがたつきが発生している。軌跡の細かい変動は、量子化分解能の限界によって生じるものと推定されるが、突発的な変動は、誤った照合の判定により対応付けが人為的判に委ねられた箇所において発生する。

画像の特徴に対して画素が粗い時には、人の主観による最適な対応付けと、相互相関係数の評価による対応付けの結果とで若干のずれが生じることがある。人間は無意識に主観的に正しい方向へ修正する傾向がある。これが人為的修正によつて軌跡のがたつきが生じる原因の1つと考えられる。本計測の対象が定常旋回運動であることか、局所的な変動は統計的棄却や軌跡の平滑化を行うことにより大きな問題とはならないが、より複雑な運動をする対象を計測する場合にはなんらかの対策が必要である。

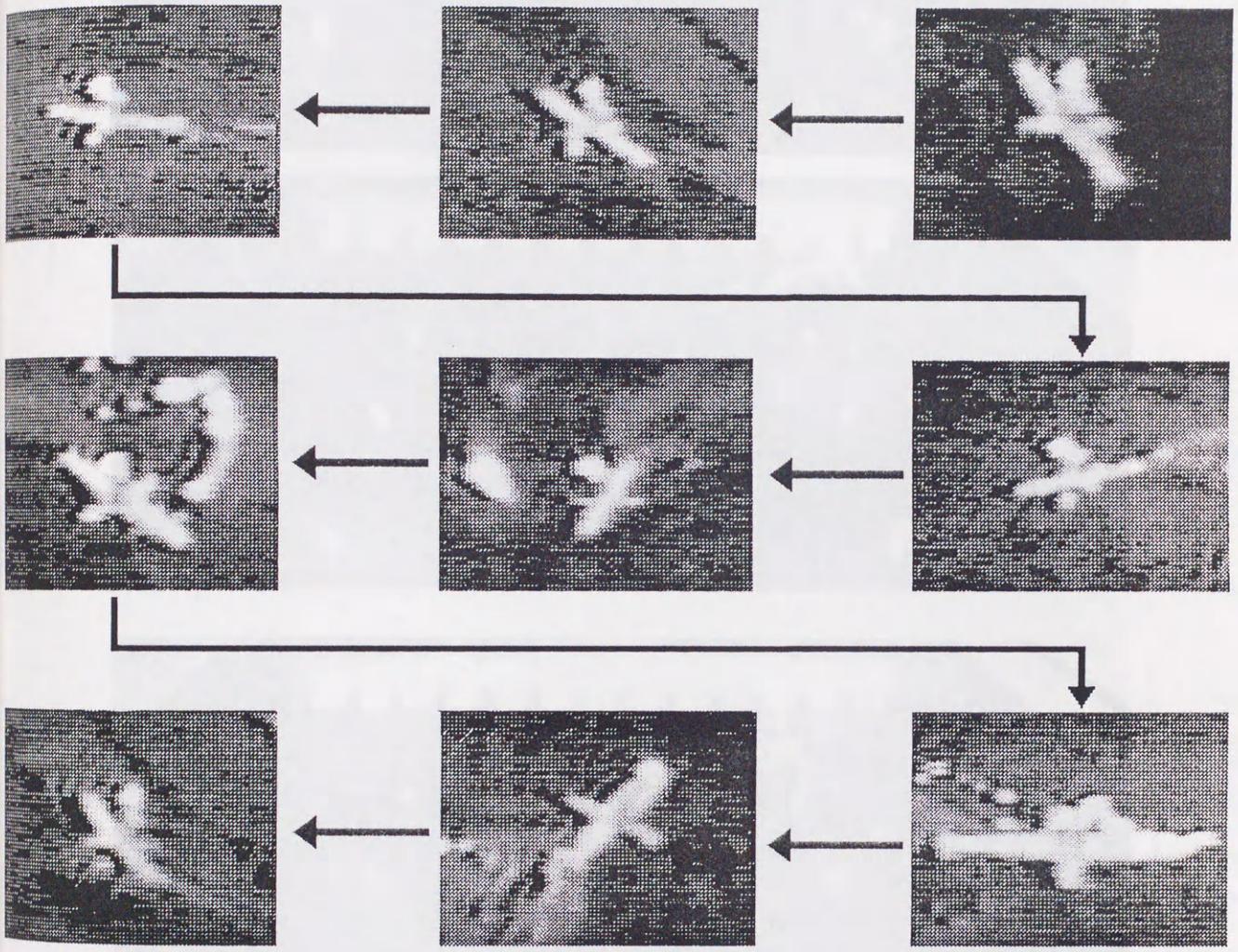
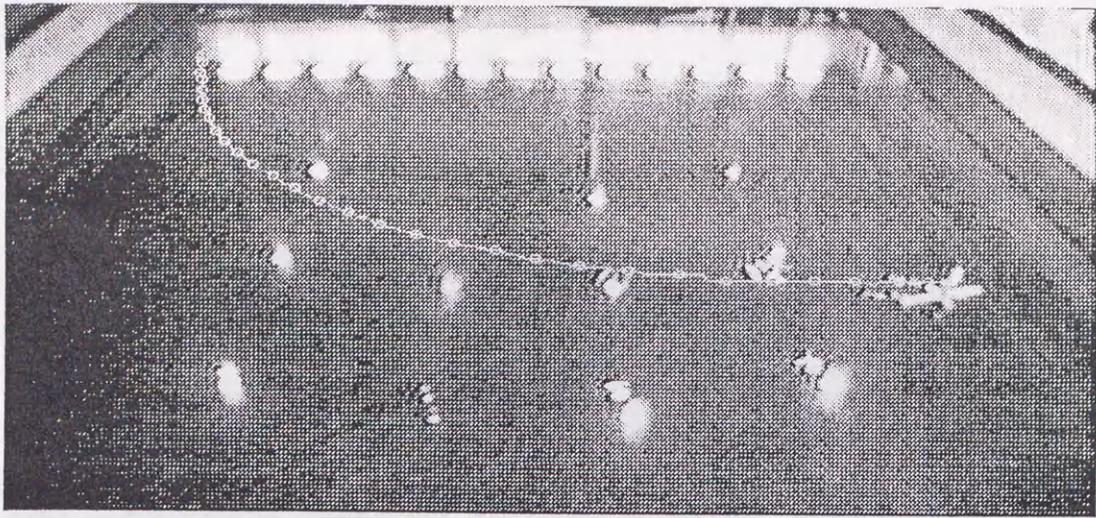
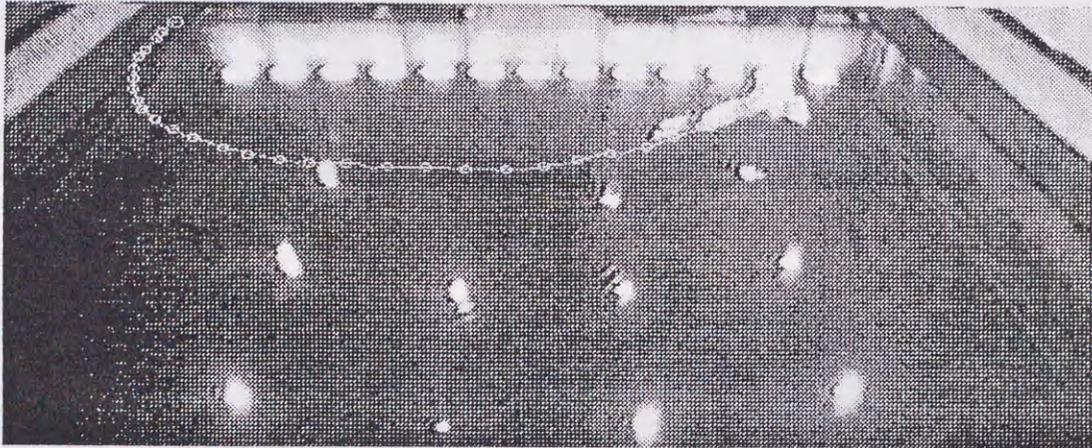


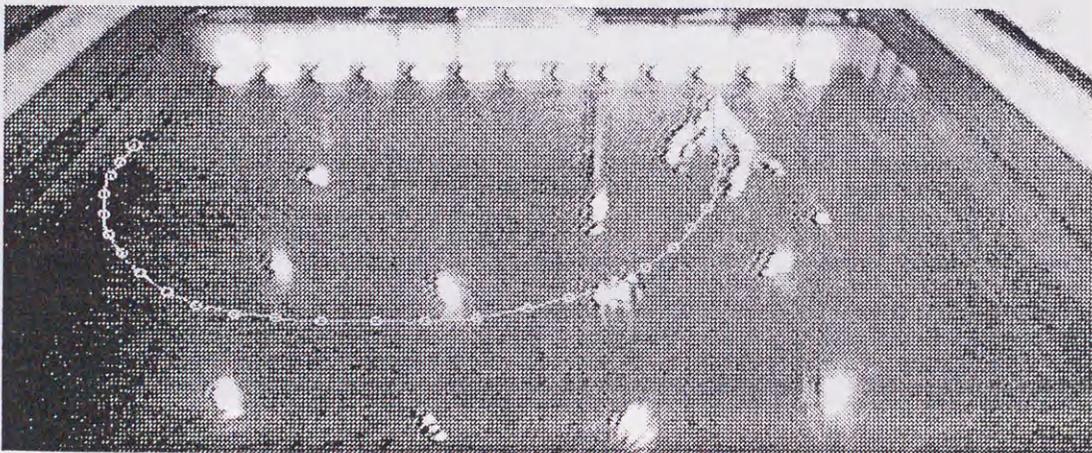
Fig. 3.6: Variation of local image



( a )

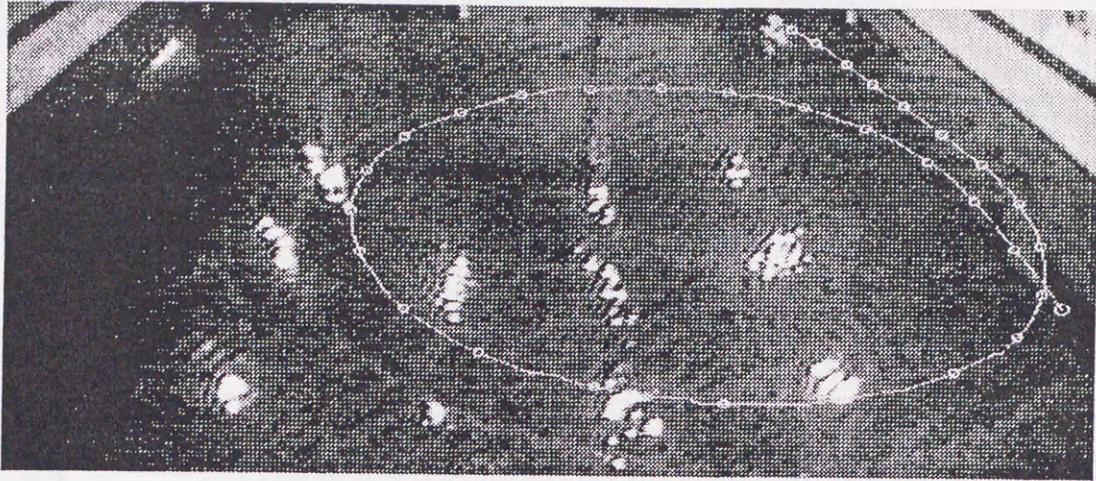


( b )

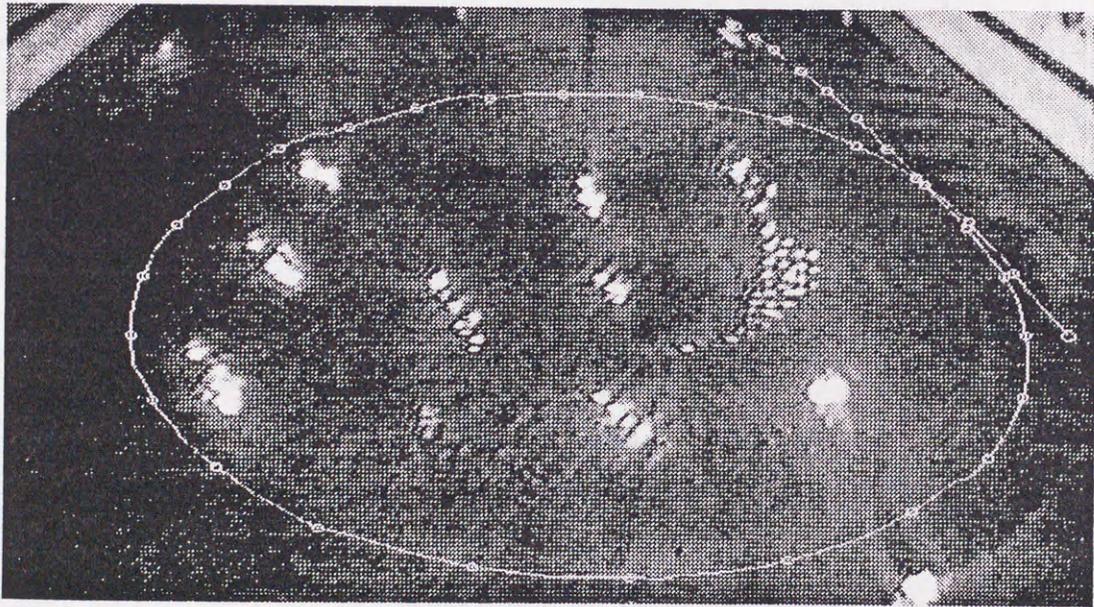


( c )

Fig. 3.7: Tracked path of target ship in case of low-speed turn on photographic plane



( a )



( b )

Fig. 3.8: Tracked path of target ship in case of high-speed turn on photographic plane

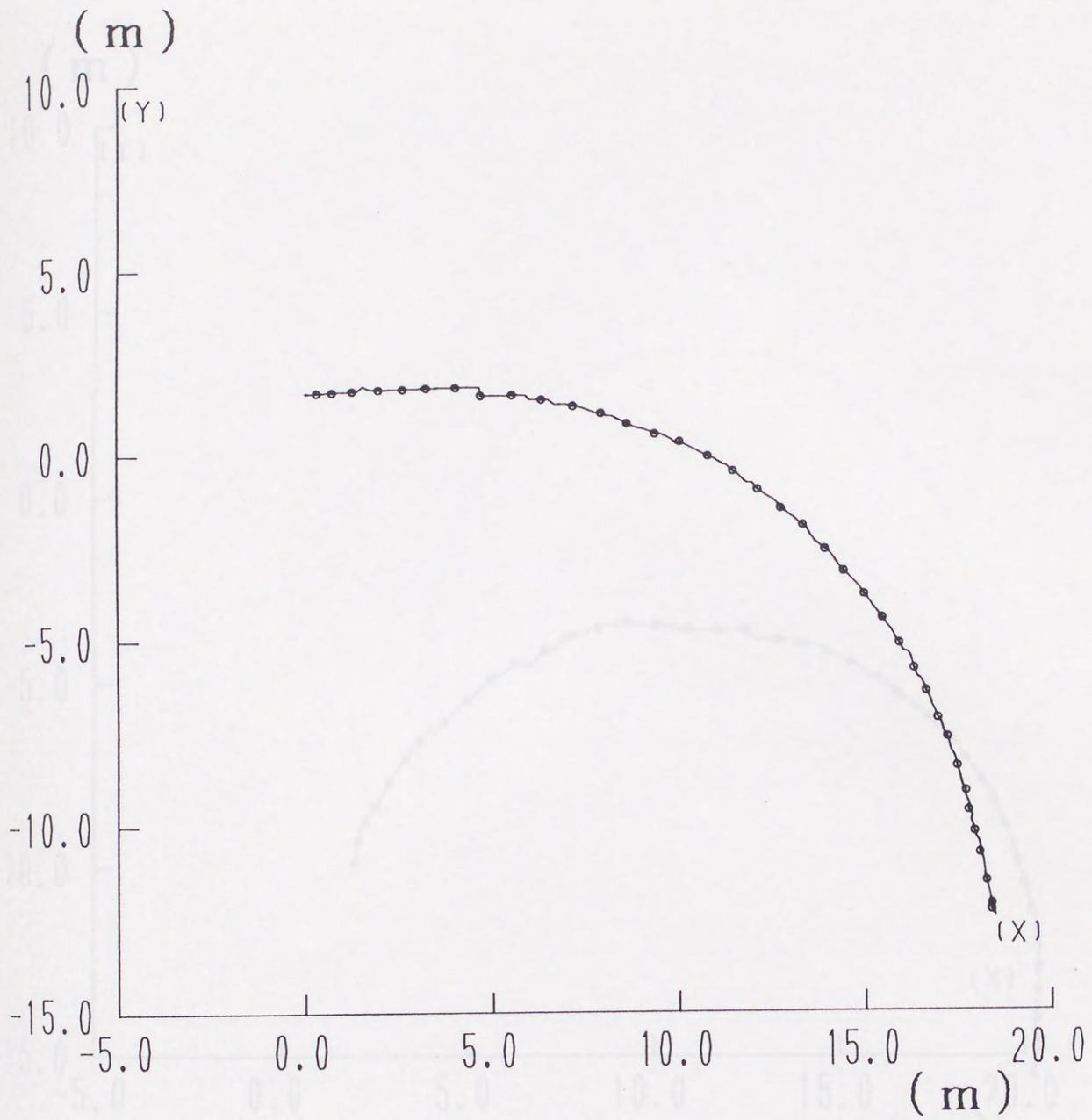


Fig. 3.9: Measured path of target ship in case of low-speed turn (rudder angle: 3degrees)

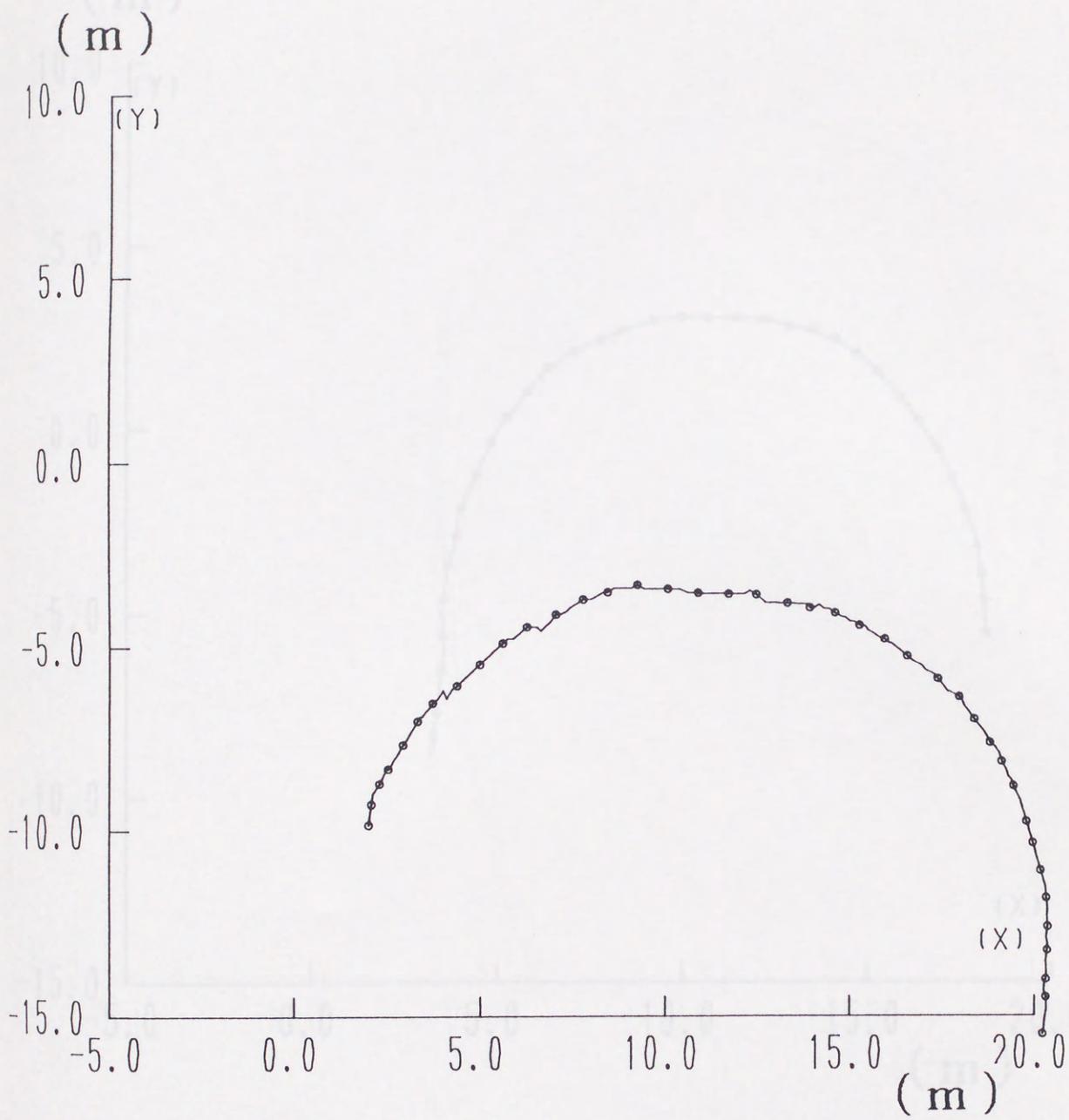


Fig. 3.10: Measured path of target ship in case of low-speed turn (rudder angle: 5degrees)

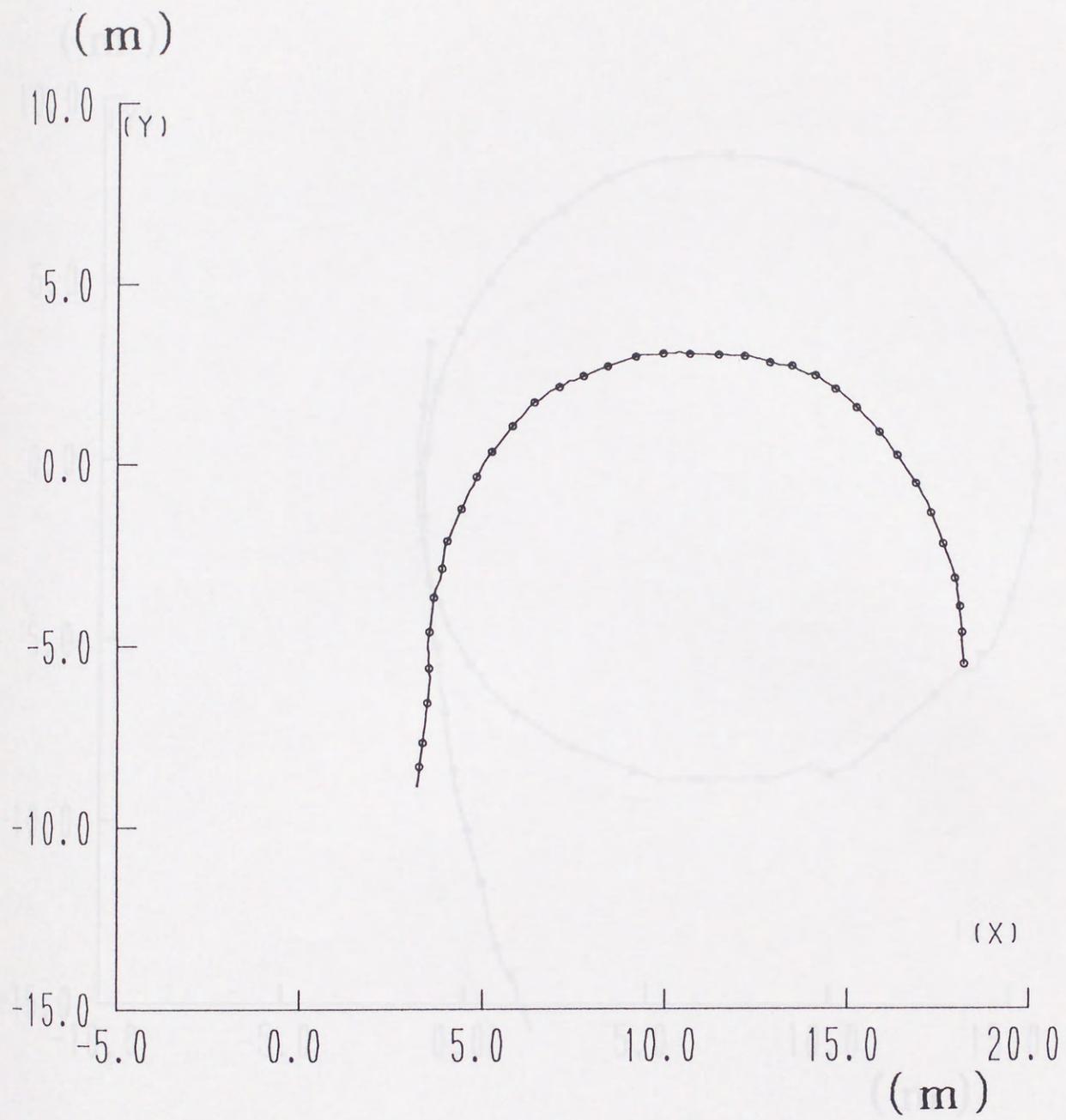


Fig. 3.11: Measured path of target ship in case of low-speed turn (rudder angle: 8degrees)

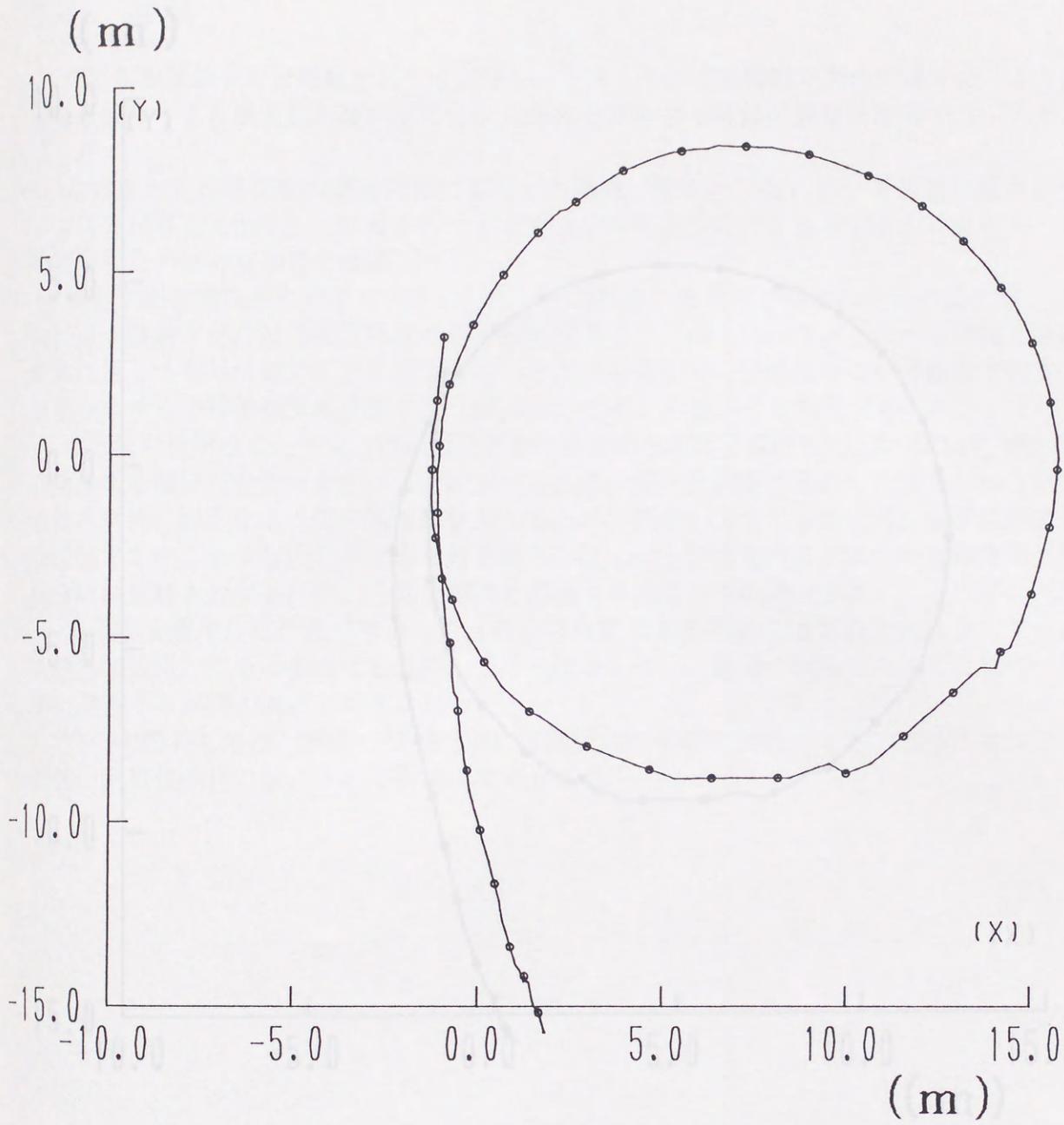


Fig. 3.12: Measured path of target ship in case of high-speed turn (rudder angle: 5degrees)

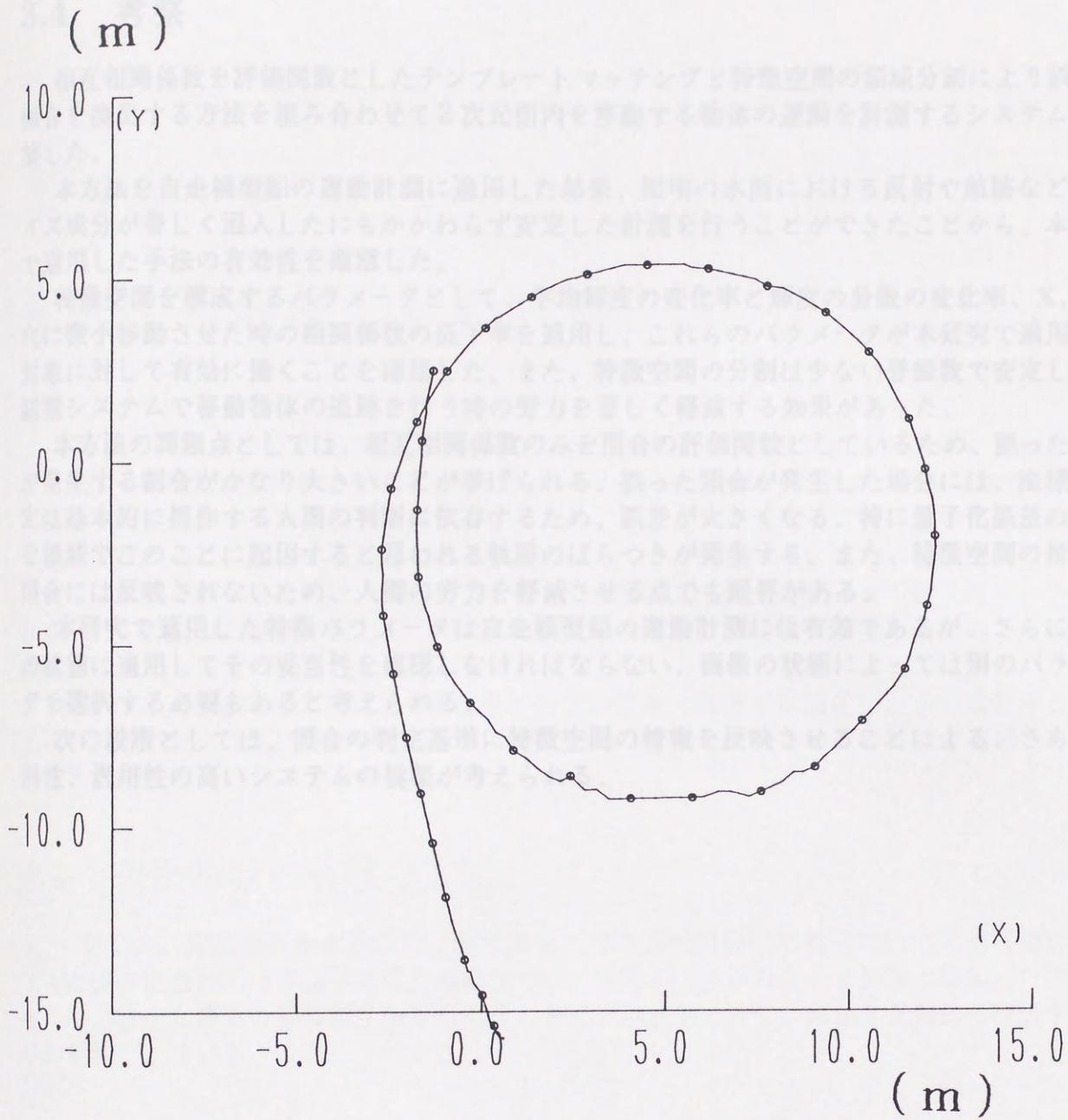


Fig. 3.13: Measured path of target ship in case of high-speed turn (rudder angle: 8degrees)

### 3.4 考察

相互相関係数を評価関数としたテンプレートマッチングと特徴空間の領域分割により誤った照合を検出する方法を組み合わせて2次元面内を移動する物体の運動を計測するシステムを構築した。

本方法を自走模型船の運動計測に適用した結果、照明の水面における反射や航跡などのノイズ成分が著しく混入したにもかかわらず安定した計測を行うことができたことから、本研究で適用した手法の有効性を確認した。

特徴空間を構成するパラメータとして、平均輝度の変化率と輝度の分散の変化率、X,Y方向に微小移動させた時の相関係数の低下率を適用し、これらのパラメータが本研究で適用した対象に対して有効に働くことを確認した。また、特徴空間の分割は少ない登録数で安定し、対話型システムで移動物体の追跡を行う時の労力を著しく軽減する効果があった。

本方法の問題点としては、相互相関係数のみを照合の評価関数としているため、誤った照合が発生する割合がかなり大きいことが挙げられる。誤った照合が発生した場合には、座標の決定は基本的に操作する人間の判断に依存するため、誤差が大きくなる。特に量子化誤差の大きな領域でこのことに起因すると思われる軌跡のばらつきが発生する。また、特徴空間の情報は照合には反映されないため、人間の労力を軽減させる点でも限界がある。

本研究で適用した特徴パラメータは自走模型船の運動計測には有効であるが、さらに多くの状態に適用してその妥当性を確認しなければならない。画像の状態によっては別のパラメータを選択する必要もあると考えられる。

次の段階としては、照合の判定基準に特徴空間の情報を反映させることによる、さらに実用性、汎用性の高いシステムの構築が考えられる。

#### 4.1 表面形状の可視化方法

本稿では、物体を計測する際に発生する誤差を低減させるための可視化方法について説明する。本稿では、距離から取得される形状の情報だけでなく、傾き情報から得られる情報を活用することにより、物体形状の可視化を定量的に実施することを目的としている。

#### 4.1.1 平面内任意形状の可視化方法

平面内任意形状の可視化方法として、傾き情報と距離情報を用いた可視化方法を提案する。傾き情報は、傾き角の正負を符号として、傾き角の絶対値を傾き情報として用いた。傾き情報の可視化は、傾き角の正負を符号として、傾き角の絶対値を傾き情報として用いた。傾き情報の可視化は、傾き角の正負を符号として、傾き角の絶対値を傾き情報として用いた。

この可視化方法を傾き情報と距離情報を用いた可視化方法として、傾き情報と距離情報を用いた可視化方法を提案する。傾き情報は、傾き角の正負を符号として、傾き角の絶対値を傾き情報として用いた。傾き情報の可視化は、傾き角の正負を符号として、傾き角の絶対値を傾き情報として用いた。

## 第 4 章

### 変形する表面形状の計測

魚類及びイルカの抵抗減少機構は、弾性表皮、表面粘液、波動表皮等であると云われている。これらの抵抗減少機構を解明するため数多くの研究が行われてきたが、これまでの研究は、平板での摩擦抵抗の軽減効果に主眼をおいており、3次元剥離流場における粘性圧力抵抗への影響及び流体起振力についてはあまり注目されていない [14] [15]。これらの柔構造表面の流れに対する影響を調べる研究は、流体工学の新しい分野として将来的に様々の研究成果が予想されるが、この実験的研究を難しくしている要因として、非定常な形状変化を時系列で定量的に計測することが非常に困難である点が挙げられる。

本章では、受動変形する表皮や弾性翼の任意の2次元断面を可視化し、その画像から表面形状の時系列変化を連続的に定量化する手法について述べる。さらにこの方法を適用した際の効果および問題点について考察する。

#### 4.1 表面形状の可視化方法

本節では、受動変形する表面及び弾性翼などの2次元断面の形状を時系列で可視化、計測する方法の内容について説明する。本研究では、画像から直接得られる形状の情報だけではなく、検力計から得られる情報と同期させることにより、力と変形の間関係を定量的に把握することを目的としている。

##### 4.1.1 柔構造円柱表面の可視化方法

剥離流場内で受動的に変形する表皮を持つ物体の表面形状変化が流体力に及ぼす影響を調べるという目的で、実験対象としては剥離の影響を受けやすく、剛体の場合の流れが既知である点を考慮して円柱を用いた。供試模型の形状は Fig. 4.1(a),(b) に示すように内筒と外筒を組み合わせたものである。没水深さ  $L=450\text{mm}$ 、内筒の直径  $D_1=75\text{mm}$ 、外筒の直径  $D_2=90\text{mm}$ 、内筒の部分の長さ  $H=350\text{mm}$  で、塩化ビニールパイプを組み合わせて製作した。

この形状を I 型円柱と称し、比較のための I 型円柱の外筒部分の直径を持つ円柱を剛体円柱とする。自由変形する表面を持つ円柱模型の構造を、Fig. 4.1(b) に示す。波線部分にゴムを水密に張り、その隙間に任意量の水を注入できるものを製作した。流体力の変動による微小な圧力変化に応じて自由に変形することと、端部の拘束による影響を考慮すると、表面の材質

としては、弱い外力で自由に変形する薄いゴム膜が望ましい。本実験では、厚さ  $90 \mu\text{m}$  のラテックスシート（オカモト株式会社製）を使用した。

ゴムの張り具合に関しては、ゴムに負荷のかかっていない状態を基準として長さを計り切断して、 $350\text{mm}$  に引き延ばして張るという手法を用いている。そのため、ゴムの裁断時の長さ  $L_0$ 、取り付け時の長さ  $L$ （この場合は  $350\text{mm}$ ）とした時、(4.1) 式で示す初期ひずみを、ゴムの張り具合を表すパラメータとして使用する。

$$e = \frac{L}{L_0} \quad (4.1)$$

ゴムと内筒の隙間部分に水を注入することで柔軟に変形する表面を形成するが、この部分の体積は約  $680\text{ml}$  で、任意に水量を調節する。注入水量を表すために、(4.2) 式で示すように注入した水の体積  $q$ 、隙間の体積  $q_0$  より定義する充填率  $c$  を用いる。

$$c = \frac{q}{q_0} \quad (4.2)$$

柔構造表面を持つ円柱の表面形状の可視化および流体力の計測装置の概要を Fig. 4.2 に示す。

供試模型（円柱）は、回流水槽のほぼ中央部に、3 分力計を介して固定する。力の計測は、 $X, Y$  の 2 方向に対して行う。

水平方向から LLS 光源を照射すると、光面と柔構造表面の交差する 2 次元断面形状が明瞭に可視化される。光源には He-Ne Laser を使用したが、レーザー光は対象とする物体の散乱特性に対して非常に微妙であるため、可視化できる方向に制限が生じる場合がある。今回表面に使用したゴム膜は非常に散乱性が高く、また方向性も少ないため、非常に明瞭に可視化することができた。

照射される範囲はなるべく広いことが望ましいが、1 方向から照射されるため実際には片面しか可視化できない。本研究では剥離流場に及ぼす影響を評価するため、円柱後方の形状に主に注目する必要がある。そこで照射は、円柱の斜め後方から行い、剥離点以降から円柱後方をすべて含む範囲を可視化した。

本研究では、可視化した結果を定量的に解析して利用するが、形状の情報のみでは利用価値が少なく、流体力の計測結果と比較することが重要である。そこで、時系列で得られた画像情報と他の定量計測値（流体力の変動）とを同期させることを考える。最も単純に同期させるには、画像記録用の VTR と流体力計測のためのデータログシステムをトリガーなどで同期させる方法が考えられる。しかし、VTR は機械的動作が伴うため、この方法では正確に同期させることが一般的には困難である。そこで、本研究では、システムを直接同期させるのではなく、画像に流体力計測の開始を示すトリガー情報を付加することで間接的に同期させる方法を採用した。具体的には、LLS 光源の点灯を光センサーを用いて検知し、点灯と同時に流体力計測が開始される。記録された時系列画像には何も写っていない冗長な部分が生じるが、この方法により両者の同期の誤差は 1 frame 以内に抑えられる。

#### 4.1.2 弾性振動翼表面の可視化方法

一様流中で振動する弾性翼の変形と、発生する流体力との関係を調べるため、Fig. 4.3に示す形状のプラスチック製矩形翼を単方向に振動させて形状の可視化と流体力計測を行った。翼が剛体である場合には、流体力は翼の振動方向のみであるが、弾性変形する翼の場合には一様流の方向に推力が発生する可能性がある。そこで流体力計測は、推力  $F_x$  と横力  $F_y$  の2方向成分を計測する。

可視化、流体力計測装置の概略を、Fig. 4.4に示す。実験は回流水槽のほぼ中央部で行った。振動翼の駆動には1軸アクチュエーターを用いた。振動幅は装置の制約などから0.1mとした。可視化方法は、柔構造表面の場合と同じく、弾性翼の中央を横切るように水平方向からLLS光源を照射して光面と弾性翼が交わる部分の2次元形状の可視化を行う。

力の計測との同期は、アクチュエーターの駆動状態が弾性翼の位置として映像に残るため、柔構造表面の可視化の場合のような同期のための特別な工夫は実施しなかった。



Fig. 4.1: Schematic view of F-type (a) and flexible surface (b) cylinder.

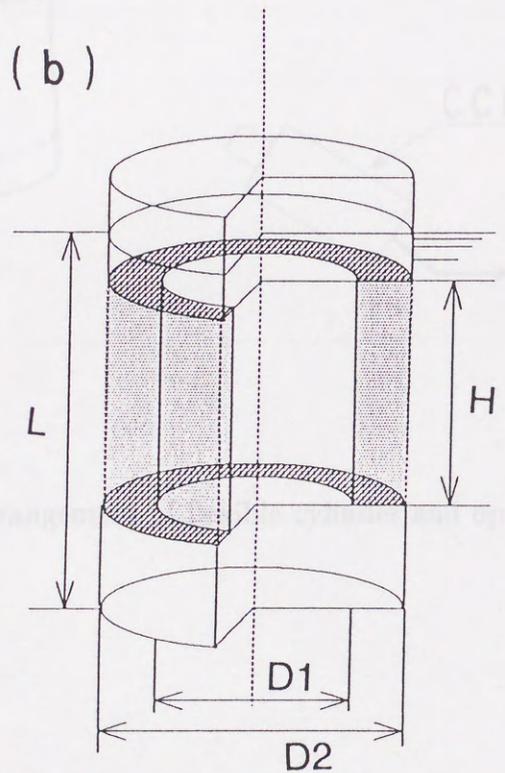
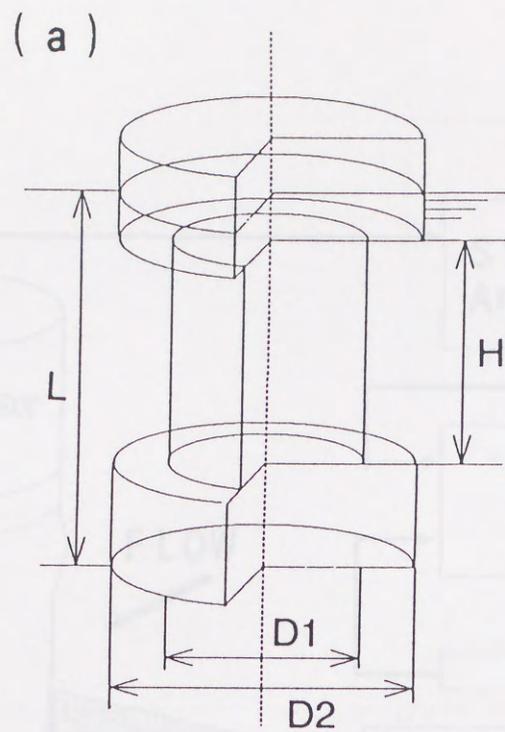


Fig. 4.1: Schematic view of I-type (a) and flexible surface (b) cylinder

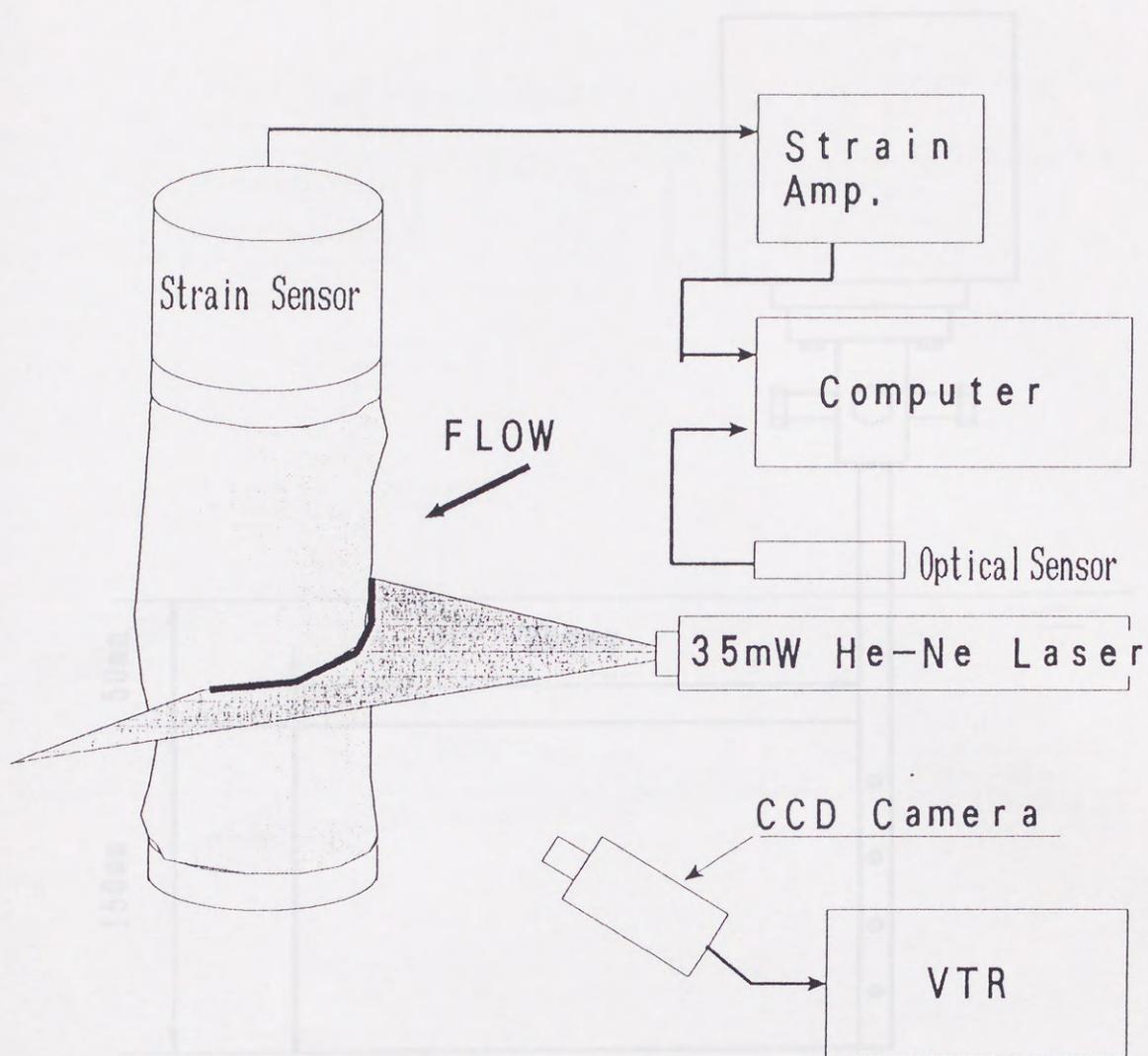


Fig. 4.2: Schematic arrangement of flexible cylinder and optics used for visualization

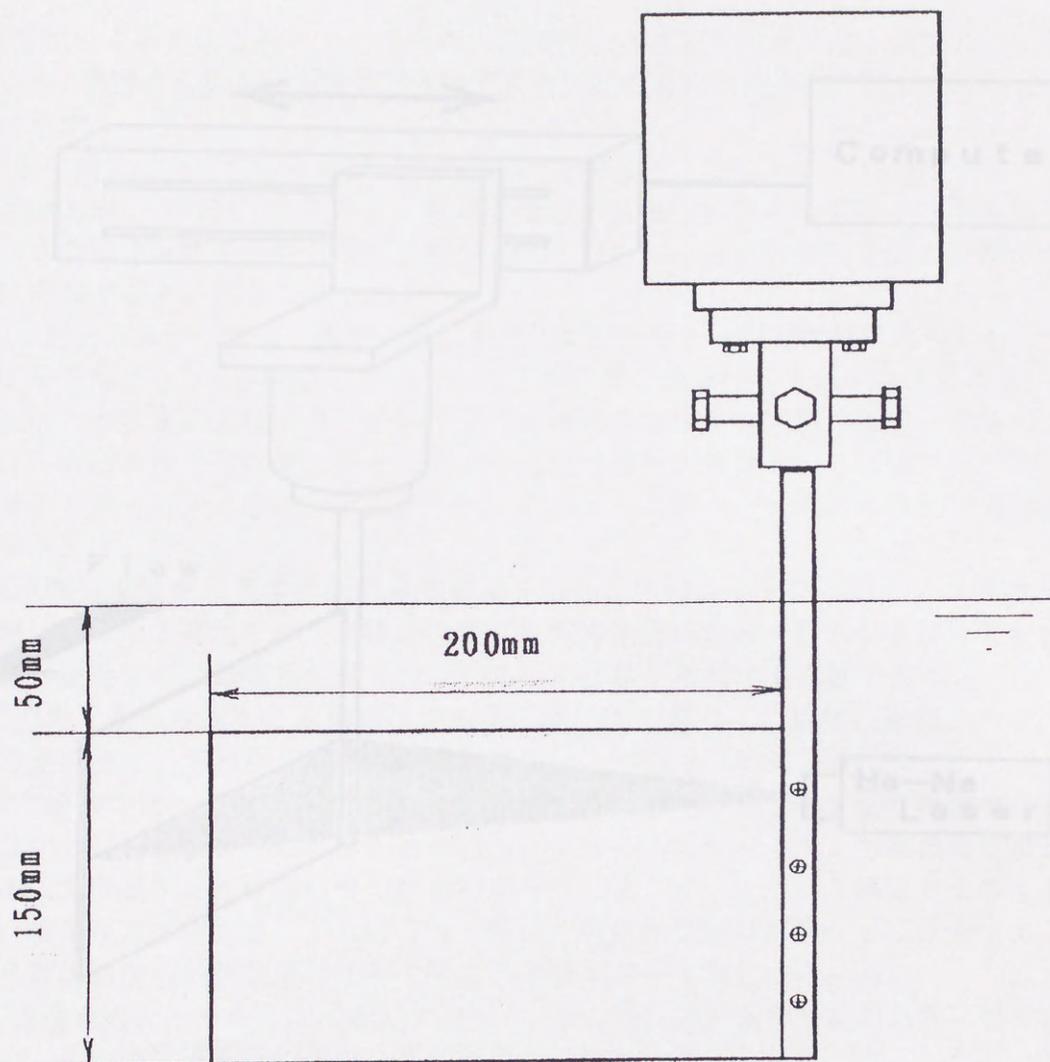


Fig. 4.3: Schematic view of elastic wing



## 4.2 表面形状画像の特徴および解析上の問題点

本研究で用いる可視化方法により得られた画像は、2次元断面を1本の曲線として取り出したものとなる。柔構造円柱表面形状及び弾性翼表面形状の可視化画像の一例を Fig. reffig:421、Fig. 4.6に示す。

物体表面の材質は、どちらもほぼ白色の樹脂であるため、散乱光の方向性は少ない。ところが光源の照射方向が1方向であるため、形状の変形による入射角の変化により輝度分布が変化する。特に柔構造円柱の表面では形状の変形が大きいため、凸部の影に表面の一部が入った時には完全に曲線が切断されることもある。

根本的な解決方法としては、表面に自己発光性を持たせる（蛍光塗料の塗布）か、光源を増設して異なる方向からさらに照射することにより影の部分をなくす方法が考えられる。しかし、前者の方法は、本研究の場合表面が変形するため塗料の材質及び塗膜の強度に問題があり、後者の方法は、汎用水槽での計測であることから光源の設置場所が著しく制限され、本研究においては適当な方法とは云えない。したがって、不完全な画像から何等かの方法で表面位置を抽出する必要がある。

表面の可視化画像から表面形状の実座標値を取り出すには、表面形状を示す輝度分布の尾根線を正確に抽出する処理を行う必要がある。尾根線抽出の最も一般的な方法は2値化画像に対して輪郭の縮退などの細線化処理を行い一本の骨格線を抽出する方法である。

本研究で得られる画像を2値化画像の画像処理技術に基づく2値化、細線化のプロセスにより1本の線画像として抽出した例をそれぞれ Fig. 4.7, Fig. 4.8に示す。

弾性翼の場合では、変形が比較的に少ないため2値化によっても画像の特徴が大幅に失われることはない。しかし、先端部の変形の向きによっては輝度が不足して翼の長さが短く見える時もある。光学系および映像信号処理系のノイズにより、2値化した画像をそのまま縮退すると細かい枝分かれが生じる。これは分岐の検出と最長尾根線の探索により除去することができるが、多階調画像の処理結果と比較するため本研究では実施しなかった。

一方、柔構造表面の場合では、変形が大きく、また局所的に変形速度が急激に速くなる部分があるため、表面の位置を示す輝度分布尾根線上の輝度は著しく変化する。したがって2値化画像は輝度が低くなる部分で途切れ、また逆に輝度が高い部分と低い部分での2値化画像の幅の変化も大きい。このため輪郭形状の縮退による細線化処理では多くの分岐と途切れ線が発生する。このことは2値化画像の輪郭形状には尾根線の形状を示す十分な情報が含まれていないことを意味している。このような画像に対して2値化画像の処理技術をそのまま適用することは極めて困難である。そこで、可視化画像の輝度変化及び2値化画像レベルでの断線を許容するという前提で、2章で述べた多階調画像の特徴抽出方法を適用する。

画像の特徴としては、輝度分布の尾根線が低い輝度レベルで連続して存在し、また尾根線上で低い輝度が連続する長さの上限が既知であることを前提とする。本研究では膜及び板の弾性により変形の上限が拘束を受けるため、この前提は妥当なものであると考えられる。

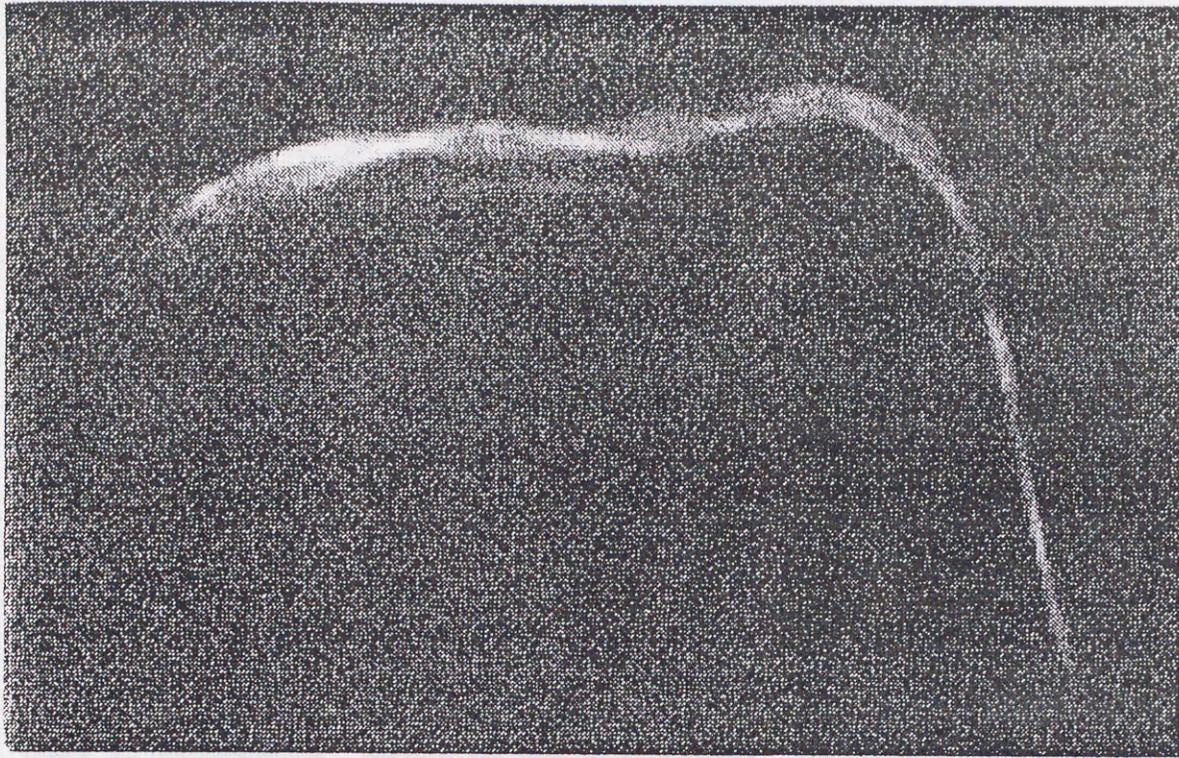


Fig. 4.5: Photographed picture of flexible surface

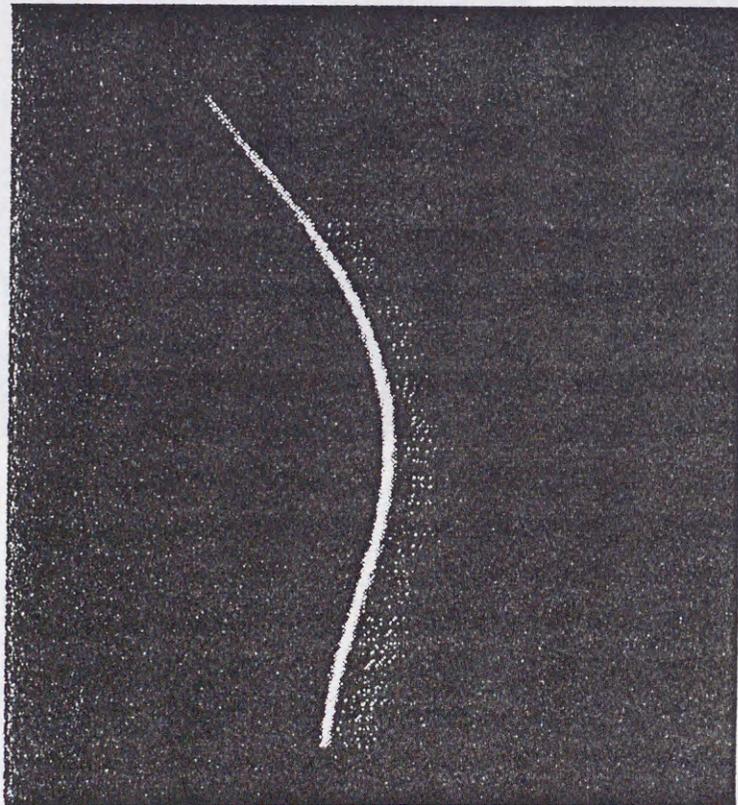


Fig. 4.6: Photographed picture of elastic wing

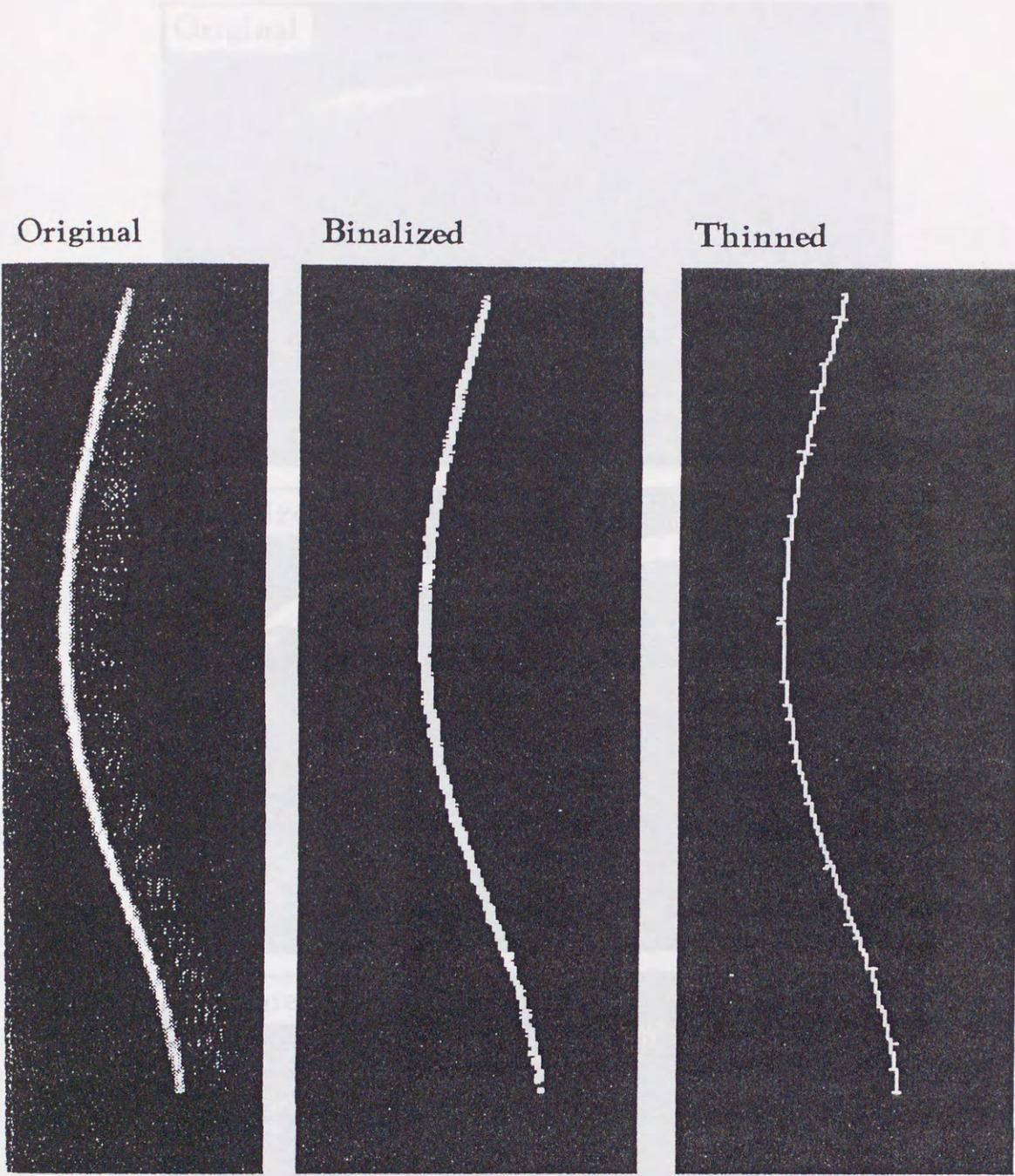


Fig. 4.7: Binalized and thinned picture of elastic wing

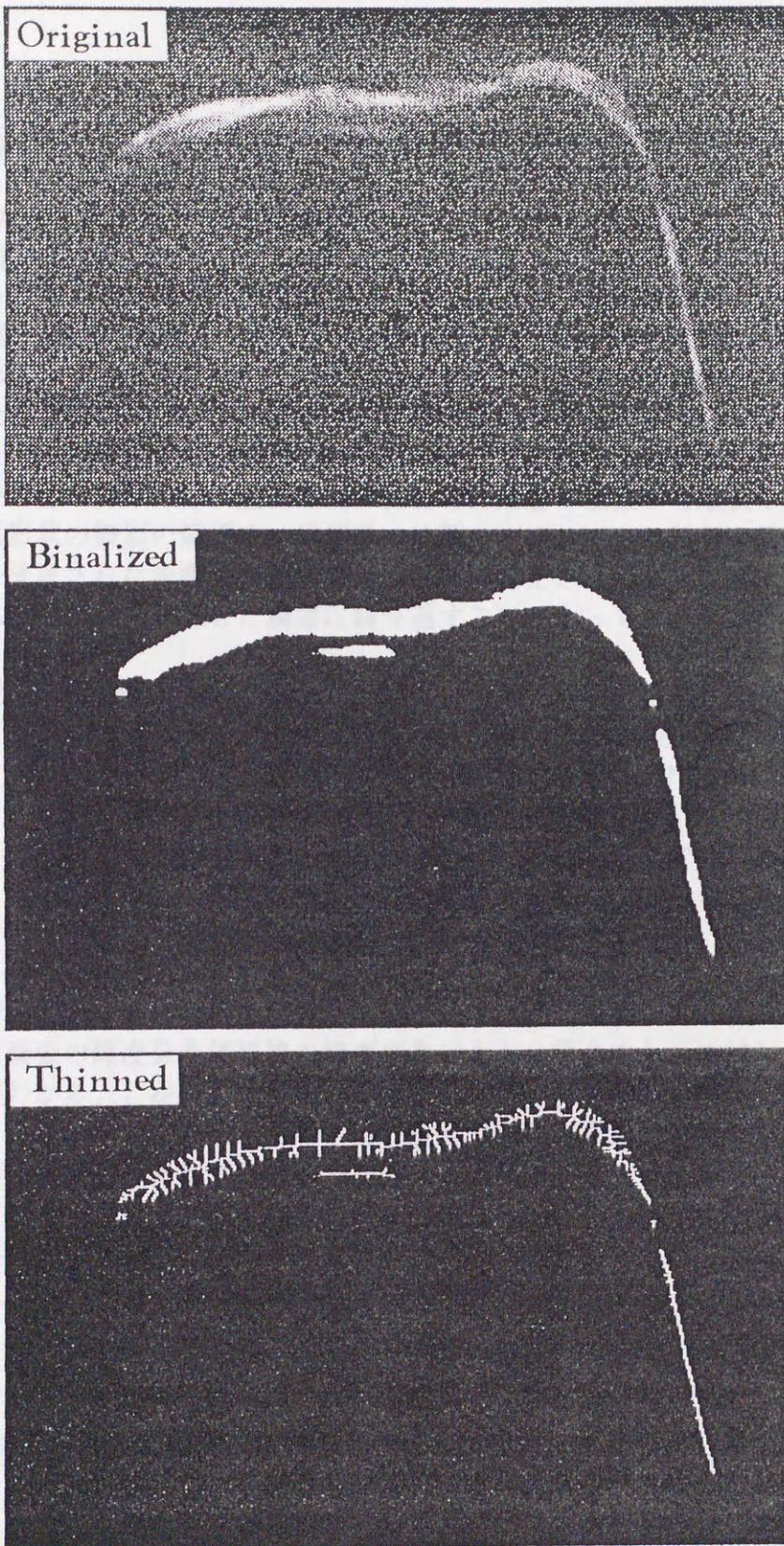


Fig. 4.8: Binalized and thinned picture of flexible surface

### 4.3 離散画像の逐次追跡による表面形状の解析方法

本研究で用いた変形表面形状の抽出処理のブロックダイアグラムを Fig. 4.9 に示す。まず、可視化された表面形状の原画像を、2.2.3 節で示す平均値あるいは最大値を用いた階層化処理によってピラミッド構造の画像データに変換する。(以下、この画像データを階層画像と称する。)次に階層画像の適当な階層に対して、表面形状の端部の検出及び2.3.3 節で示した2分探索による尾根線の逐次追跡処理を行い、変形表面画像の概形を決定する。本方法では、逐次追跡によって得られる概形の内部に求めるべき尾根線が存在するものとする。

原画像上における表面形状の座標を示す輝度分布尾根線は、2.3.4 節で示す絞り込み探索により決定する。絞り込み探索では、逐次追跡が行われた階層の画像から順次1つ下の階層の画像に対して、表面形状の概形の範囲内で尾根線的位置を決定していく処理を最下部の階層の画像まで繰り返す。決定された表面形状の座標値は、予め校正された座標変換式に従って実座標に変換される。以上の処理を連続した画像に繰り返すことによって、時系列で変化する表面形状の情報を得る。

画像の階層化及び逐次追跡、縮退処理を柔構造円柱表面の可視化画像に適用した結果の一例を Fig. 4.10 に示す。以下、Fig. 2.7 で示した  $A_n$  の階層を Class:n とする。 $A_0$  の階層の画像は Class:0 となるが、これは  $512 \times 512$  画素の原画像である。Fig. 2.7 に示す例では Class:5 まで階層化を行った。

Fig. 4.10(a) で、画像の階層化の様子を示す。ここでは、2.2.3 節で述べた平均値による階層化を適用した。Class:0 の原画像から順次上の階層に上がるに従って、線画像の概略の形状はある程度保存され、細かい特徴が徐々に減衰していくことがわかる。

Fig. 4.10(b) で、逐次追跡および縮退処理の様子を示す。ここでは、Class:5 の画像に対して逐次追跡を行い、下の階層の画像に対して縮退処理を繰り返すことにより線図形を検出する。本方法では原画像の輝度分布尾根線の輝度変化が大きい場合でも、連続した線成分として検出できることがわかる。しかし、検出された線図形には、縮退処理を簡便化した影響と思われる乱れが生じている。このようながたつきは、輝度分布の尾根線が複雑な形状になる部分で発生するが、逐次追跡を行う階層として適当な階層を選択することにより、この悪影響をある程度軽減することができる。

これらの処理の基本的概念および内容は2.2 節で既に詳述した。次に本研究で対象とする画像に適用する上でのパラメータの選択および追加処理について述べる。

#### 4.3.1 始点の決定方法

逐次追跡処理を行うには、適切な位置を始点として選択することが必要である。本章で対象とする画像では、表面の弾性により概形がある程度の拘束を受けるので、始点の決定には画像の状態に応じて人為的に範囲と走査方向を与えることにより走査を行い、あるしきい値より高い点で最初に検出されたものを始点として選択する単純しきい値法を用いる。

本方法で対象とする画像は、実験条件により始点の存在する位置が異なり、走査方向や範囲を限定しない場合には誤った始点認識をする可能性もある。そこで走査範囲を Fig. 4.11(b) に示す(1)・・・(4)の4つの領域から、走査方向を Fig. 4.11(a) で示す(A)・・・(D)の4方向から予め選択するという方法を用いる。走査範囲と走査方向は16通りの組み合わせとなる。本

研究で対象とする画像では、実験条件が同じ場合には始点の存在する領域および向きが限定される。柔構造表面の可視化画像ではゴム膜の端部が固定されているため、始点の位置と延長方向は大きく拘束される。振動する弾性翼の可視化画像では、端部はある振幅で振動するが、その振動幅と方向は既知である。したがって、以上の組み合わせの中から実験条件に応じて適当なものを選択することで、ほぼ確実に始点の認識をすることが可能となる。

ただし、線画像の端部で照明条件の制限などから輝度分布勾配が緩やかになる場合には、しきい値処理を前提とする本方法では、しきい値の選択により端部の位置が変化することになる。本方法を適用する対象では、表面形状の検出が目的となるため正確な端部の位置の情報はそれほど重要ではない。しかし、端部の情報が重要となるような対象に適用する時には、しきい値処理による簡便な方法ではなく、より適した手法を検討する必要があると思われる。

#### 4.3.2 終点の決定方法

対象とする表面形状を示す線画像は、両方に端点を持つ有限長さの曲線となるので、追跡の終了判定が必要である。本研究では、始点と同様に端部の正確な位置の情報の重要性が低いので、次の3条件を満足する時に追跡処理を打ち切ることで終点を決定した。

1. 追跡された曲線が閉ループとなった時
2. 追跡された曲線が、画像領域の端部に到達した時
3. 曲線上のある有限長さ（本研究では8画素）の輝度分布平均値が、始点輝度検出に用いたしきい値を下回る時

本研究で適用した画像では、以上の3条件を用いることにより、曲線の概形を追跡し終えた時点でほぼ確実に追跡を終了させることができた。ただし、これらの条件では、実際の端点に対して曲線の長さをやや長めに判定することになる。そこで、縮退処理により線幅1の曲線が得られた後、終点から逆に輝度を調べ、その値が始点輝度検出に用いたしきい値を上回る最初の点を終点とみなす。

この簡便な方法は、画像内に検出の対象とする線図形のみが存在する場合には有効であるが、線図形の端部近傍に輝度の高い別の対象が存在する場合には、誤った判定をする可能性がある。このような場合には対象に応じてより複雑な追跡終了判定を行うか、あるいは前処理によって線図形以外の対象を除去するなどの対策が必要となると思われる。

#### 4.3.3 2分探索の深さの選択

逐次追跡を2分探索で行う場合、深さによって効率が大きく異なる。一般的に深さが大きくなるほど誤追跡の発生は抑制されるが、その一方で処理にかかる負担は急激に重くなる。そのため本方法では、追跡される曲線を有限の長さで分割し、その分割された長さ毎に探索を行う処理を逐次繰り返す方法を適用する。

逐次追跡を行う深さを  $n$  画素、曲線全体の長さを  $m$  画素とすると、探索するべき画素の組み合わせの総数  $d$  は、2.3.3 節の (2.33) 式で示したように、長さ  $n$  を適当な値にすることで、実用上差し支えない速度で追跡処理を行うことができる。

逐次追跡を行う深さ  $n$  を変数にしてもよいが、この値は、逐次追跡を行う階層の値と密接な関係があるため、最適な値を決定することが難しくなる。そこで本研究では  $n=8$  と固定した。この時組み合わせの総数は  $d=16384$  となる。また1つの深さを探索する時の組み合わせの数は256通りとなるので、処理効率を高める上で好都合である。

#### 4.3.4 逐次追跡を行う階層の選択

2分探索による逐次追跡では、注目点の画素に隣接する4画素の中に延長可能性を判断するための十分な情報が含まれていなければならない。輝度分布尾根線のピーク値の線幅が4点隣接で常に1画素である時のみ、この条件を満足する。4.2節で既に示したが、本章で扱う画像では輝度分布尾根線のピーク値の線幅は常に1画素とは限らない。線幅が1画素を越えると、延長方向の候補が複数となるため追跡が不安定になりやすい。

そのため本方法では、画像を階層化して、輝度分布尾根線のピーク値の線幅が1画素となる適当な階層を選択して逐次追跡処理を行う。

逐次追跡を行う階層はなるべく高い方が追跡そのものは安定する。しかし画像の細部が省略されるため、極端に高い階層を選択すると必要な特徴まで失われて正確な追跡ができなくなる恐れがある。一方、極端に低い階層を選択すると、輝度分布尾根線のピーク値を示す線幅が1画素を越えるため、追跡が不安定になる。これらの事情から、最も誤追跡が生じにくく、かつ画像の特徴が残っているという条件を満足する最適の階層が存在することが予想できる。本研究では、階層の最適値は画像の特徴に著しく依存するため、対象とする画像に対して追跡を行う階層を変化させて処理を繰り返し、試行錯誤的に最適と思われる階層を決定した。

追跡を行う階層の選択が追跡結果に及ぼす影響を評価するため、Fig. 4.12に連続する20画面における検出された有効画素数の変化を示す。ここでは階層化の方法として下の階層の4点の平均値を用いた。追跡を行う階層が Class:0 または Class:1 の時には、原画像に含まれるノイズ成分の影響で安定した追跡を行うことが非常に困難となるため省略した。有効画素数は、追跡された曲線上で、輝度が始点検出しきい値を越えた画素である。横軸が時系列の画面番号、縦軸が有効画素数となる。線図形の長さで評価することも考えられるが、誤追跡が発生すると迷走により曲線の長さが長くなる場合も生じるので、本研究では有効画素数で追跡の正確さを評価した。

Fig. 4.12から、追跡を行う階層が Class:4 の時に最も有効画素数が多くなることがわかる。本方法では、有効画素数の50画素程度の差が有意でないとすれば、画像の特徴が類似している時には、時系列の連続した全ての画像に対して追跡を行う階層の最良の値が存在する。ただし、追跡を行う階層の最良の値を決定するには、あらかじめ対象とするいくつかの画像に対して試行錯誤的に適用して決定する必要がある。

#### 4.3.5 階層化方法の選択

画像の階層化を行う場合には、階層化による特徴の消失が最小限になることが望ましい。階層化の考え方としては、1つ上の階層の1画素に対して対応する4点の平均値を、その画素の輝度値とする方法と、4点の中の最大値を輝度値とする方法の2種類の方法が考えられる。

最大値による階層化画像を用いた追跡における有効画素数の変化を Fig. 4.13に示す。平均

値による階層化画像を用いた Fig. 4.12と比較すると、どちらの場合においても追跡は可能であるが、最大値で階層化した場合には有効画素数の変動が大きくなる傾向がある。また、最大値による階層化画像を用いた時には、全ての画面に対する最良の階層が必ずしも存在しないこともわかる。どちらが画像の特徴をより多く残しているかの客観的判断は難しいが、現状では複数の画像に対して両方の処理を試み、その結果より選択することが妥当であると思われる。

処理時間の問題を別にすれば、全ての階層に対して逐次追跡を行い、有効画素数から自動的に最適な階層数を選択することにより安定した追跡が可能となる。

連続する20画面の画像に対して、平均値による階層化画像と最大値による階層化画像の両方で有効画素数から自動的に最適な階層を決定した時の有効画素数を比較した結果を Fig. 4.14に示す。どちらも類似の結果となり、本研究で対象とする画像に対しては、階層化の方法による有意な差は認められなかったが、対象とする画像の特徴によっては両者に有意な差が生じる可能性もある。計算効率を優先すると、平均値による階層化を用いる方が、追跡を行う階層を固定できるという点で望ましいと考えられる。

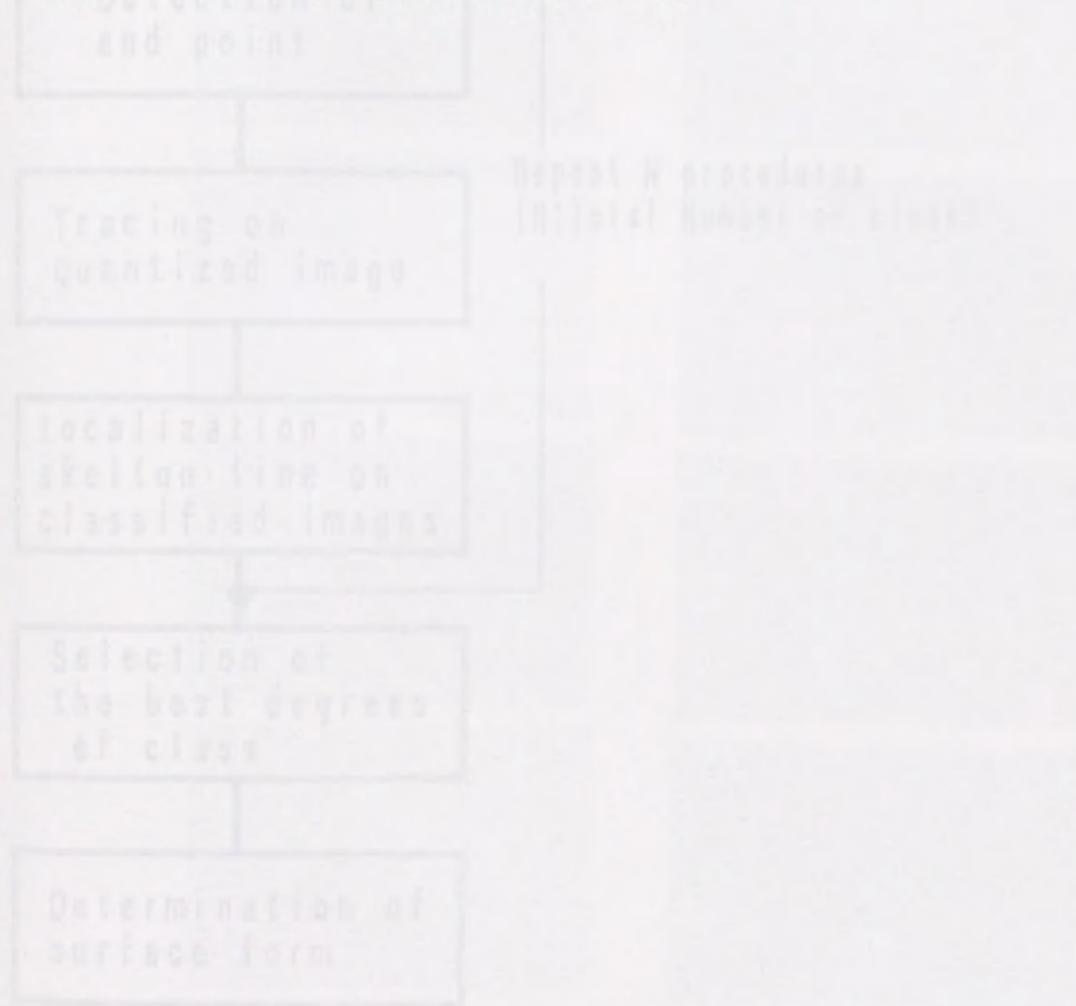


Fig. 4.3. Block diagram of image analysis for determination of surface form

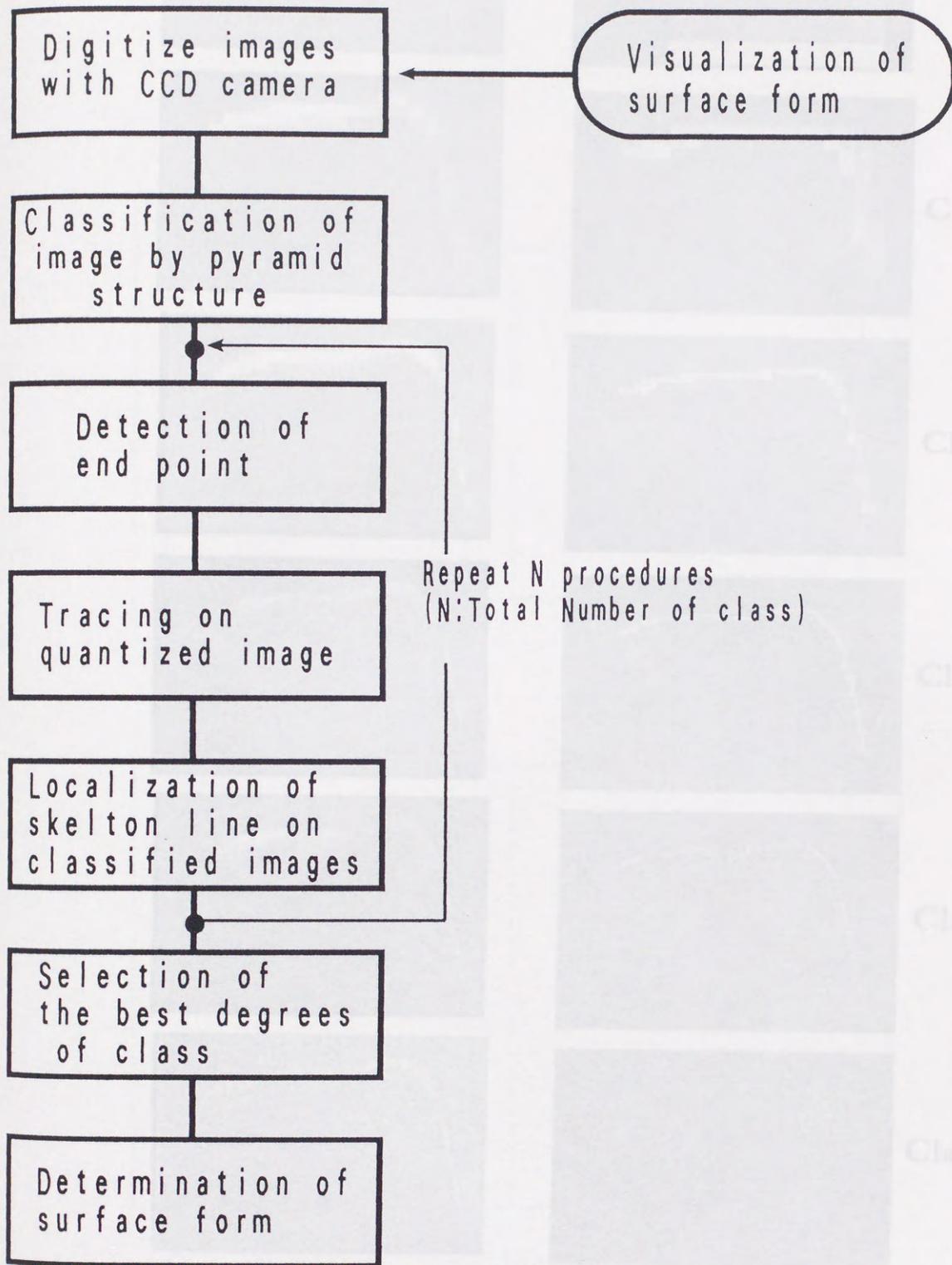


Fig. 4.9: Block diagram of image analysis for determination of surface form

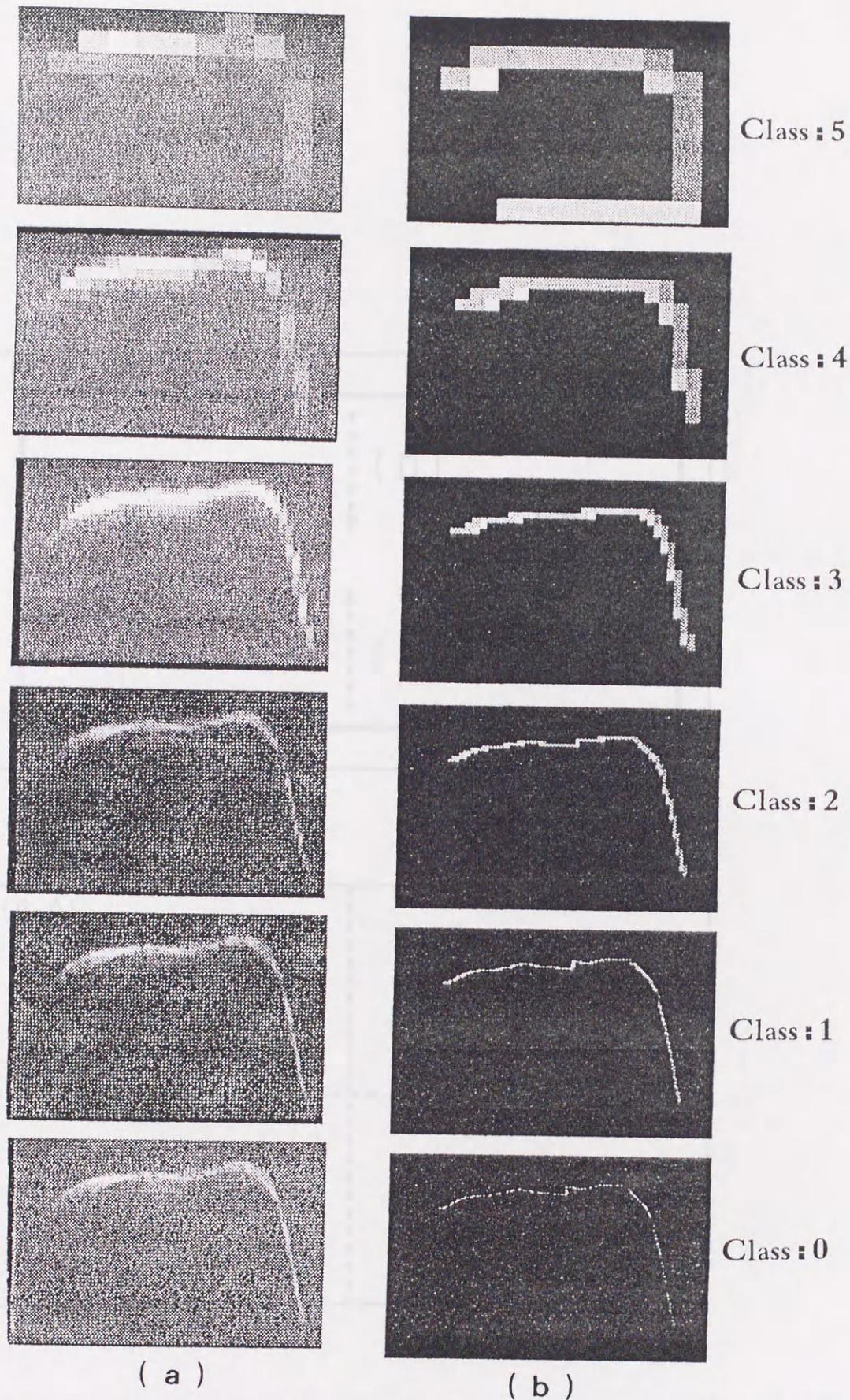


Fig. 4.10: Sample pictures of classification and tracing process

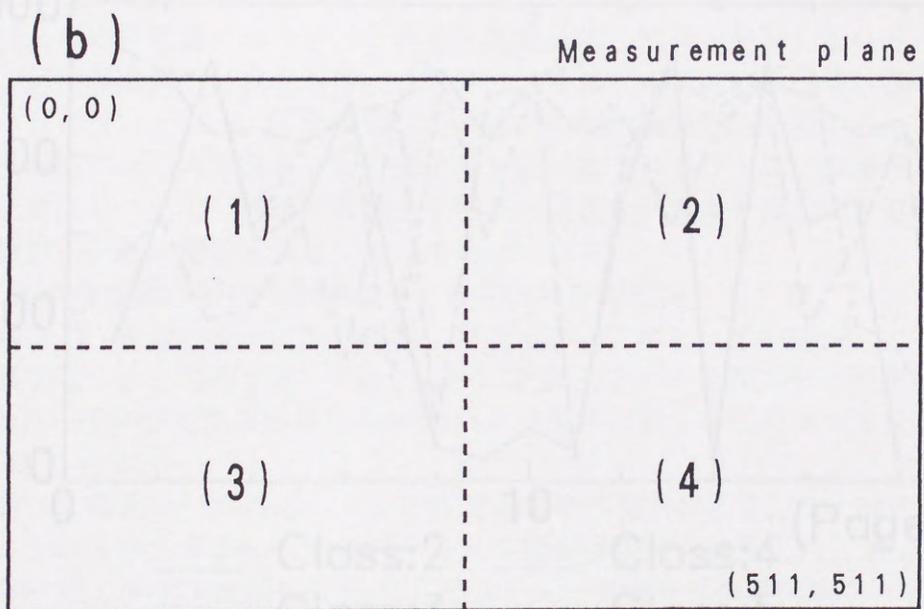
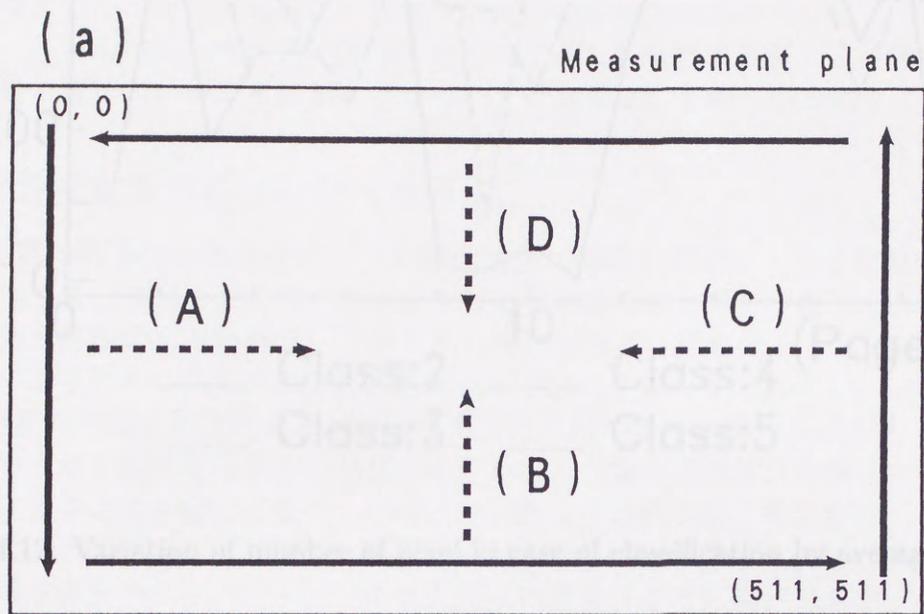


Fig. 4.11: Schematic explanation of scanning direction (a), and scanning area (b), for detection of end point

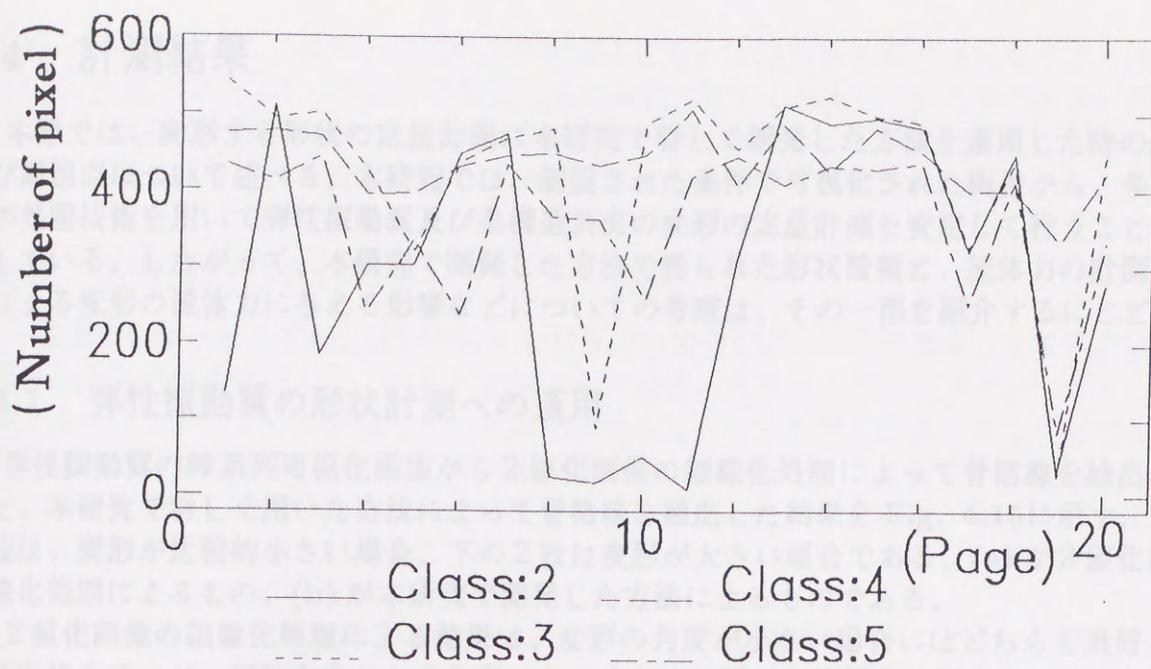


Fig. 4.12: Variation of number of pixel in case of classification by average value

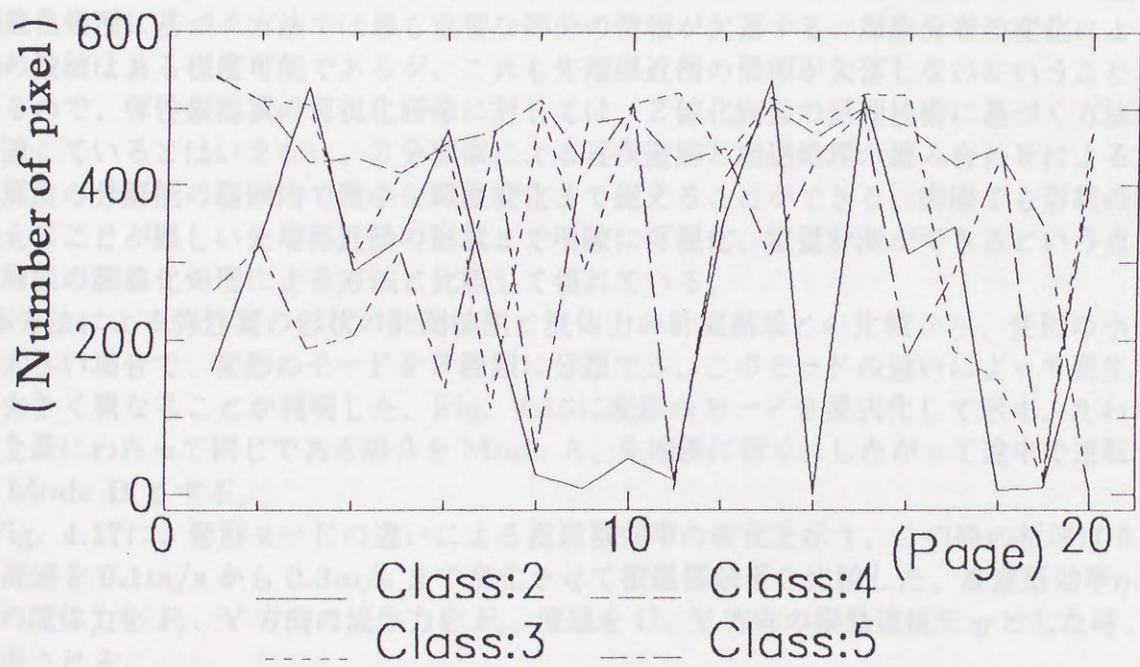


Fig. 4.13: Comparison of number of pixel: (a) Classification by maximum value, (b) Classification by average value

## 4.4 計測結果

本節では、変形する形状の定量計測に本研究で新しく開発した方法を適用した時の適用性及び問題点について述べる。本研究では、制限された条件で可視化された画像から、多階調画像の処理技術を用いて弾性振動翼及び柔構造表皮の変形の定量計測を安定して行うことを目的としている。したがって、本研究で開発した方法で得られた形状情報と、流体力の計測との比較による変形の流体力に与える影響などについての考察は、その一部を紹介するにとどめる。

### 4.4.1 弾性振動翼の形状計測への適用

弾性振動翼の時系列可視化画像から2値化画像の細線化処理によって骨格線を抽出した結果と、本研究で新しく用いた方法によって骨格線を抽出した結果を Fig. 4.15に示す。上側の2枚は、変形が比較的小さい場合、下の2枚は変形が大きい場合である。(a)が2値化画像の細線化処理によるもの、(b)が本研究で開発した方法によるものである。

2値化画像の細線化処理による結果は、変形の角度が小さい場合にはどちらも良好と思われる形状を示すが、照射方向からの角度が大きくなると翼の先端部分で輝度が低くなり、全体の形状をとらえることが難しくなっている。一方新しい方法では、輝度の低くなる先端部分まで安定に追跡できていることが判る。変形の状態を定量的に評価するには、変形の大きい先端部付近の情報が必要である。しかし、可視化画像の輝度分布は、翼とアクチュエーターの接合部(画像の下側)から先端に行くに従い輝度が緩やかに低くなる傾向があるので、2値化画像の細線化処理に基づく方法では最も重要な部分の情報が欠落する。輝度分布の変化による途切れ線の接続はある程度可能であるが、これも先端部近傍の情報が欠落しないということが前提となるので、弾性振動翼の可視化画像に対しては、2値化画像の処理技術に基づく方法は必ずしも適しているとはいえない。2分探索による逐次追跡と縮退処理の組み合わせによる方法では、輝度の分解能の範囲内で微小な輝度変化まで捉えることができる。肉眼でも形状の特徴をとらえることが難しい先端部近傍の形状まで明瞭に可視化、定量計測ができるという点で、2値化画像の細線化処理による方法と比較して優れている。

本方法による弾性翼の形状の計測結果と流体力の計測結果との比較から、変形の小さい場合と大きい場合で、変形のモードを2種類に分類でき、このモードの違いによって発生する推力が大きく異なることが判明した。Fig. 4.16に変形のモードを模式化して示す。たわみの方向が全長にわたって同じである場合を Mode A、先端部に行くにしたがって途中で逆転する場合を Mode B とする。

Fig. 4.17に、変形モードの違いによる推進器効率の変化を示す。この時の板厚は 0.3mm で、流速を 0.1m/s から 0.3m/s まで変化させて推進器効率を比較した。推進器効率 $\eta$ は、X方向の流体力を $F_x$ 、Y方向の流体力を $F_y$ 、流速を $U$ 、Y方向の振動速度を $y'$ とした時、(4.3)式で表される。

$$\eta = \frac{\int_T F_x \cdot U dt}{\int_T F_y \cdot y' dt} \quad (4.3)$$

変形のモードが Mode B である時、最も推進器効率が高くなることは非常に興味深い。もちろん、この原因を追求するには、変形と流体力だけではなく、弾性翼周囲の非定常流場の状

態を調べる必要がある。流場の可視化とその画像処理による方法と組み合わせることは、どちらも LLS 光源を用いるという点で可視化方法が類似しているため、十分可能であると考えられる。また、本研究で得られた表面形状の定量的データを数値シミュレーションに組み込むことにより、現象の理解がより深くなるものと期待される。

#### 4.4.2 柔構造円柱表面の形状計測への適用

一様流中に置かれた柔構造表面円柱の形状変化の定量計測に、2分探索による逐次追跡と縮退処理による方法を適用した。内筒と表面の間の流体の充填率、流速をパラメータとして様々に変化させることによって表面形状の変化が流体力に及ぼす影響を評価することができる。流体の充填率は自由に变化させることが可能であるが、充填率が少ない場合には表面と内筒の距離が短くなるため、内筒の反射が画像に悪影響を及ぼし、また、充填率が多い場合には変形から顕著な傾向を読み取ることが難しくなる。したがって、本研究では表面の挙動が最も顕著となる、充填率が 50% の場合について計測を行った。

表面の計測位置及び座標系を Fig. 4.18 に示す。可視化装置の制限により、計測範囲は円柱の後側の  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の間となる。柔表面は、円柱の上流側では内筒と密着するが、下流側（剥離点後方）では非定常流体力と干渉し合って不規則な挙動を示す。

表面形状の計測結果の一例を Fig. 4.19 に示す。流速  $0.3\text{m/s}$ 、( $Rn = 17200$ )、サンプリング間隔は  $0.1\text{sec}$  である。LLS 光面の位置は、柔構造円柱のほぼ中央部（水面より  $0.25\text{m}$ ）で、表面の変形が最も 2 次元的である部分とした。表面形状の計測は、流体力の計測と同期して数 10 秒間行われるが、得られた時系列データの内、 $0.9\text{sec}$  間の形状情報を右上から左下に階段状に配置して変形の様子を示す。Fig. 4.19 では、一様流の方向は左向きになる。肉眼では捉えにくい不規則な挙動が、時系列で詳細かつ定量的に可視化されている。

高速度カメラやビデオのコマ送りなどでも定性的には同様の情報を得ることができるが、このように不規則な変動をする対象から直接何等かの結論を導くことは困難である。柔表面の平均的な挙動を明らかにするため、 $-20^\circ$  から  $-70^\circ$  の間で柔構造表面と内筒表面の間の断面積を算出し、時系列による変化を調べた。(Fig. 4.18 参照) この断面積は、単位長さ当たりの流体の体積または柔構造表面の平均厚さを示すパラメータとなる。

断面積を  $A$ 、供試円柱の効力係数を  $C_x$ 、横力係数を  $C_y$  とし、同時刻における断面積と流体力の変化を比較したものを Fig. 4.20, Fig. 4.21 に示す。両者は同じ実験状態のデータであるが、前者は断面積の変動振幅が大きい場合、後者が変動振幅が比較的小さい場合である。両者を比較すると、断面積の振幅が大きくなる部分では横力の振幅も大きくなり、抗力は高い値を示す。一方、断面積の振幅の小さくなる部分では横力の振幅も小さくなり、抗力は比較的低い値を示している。

断面積の振幅が大きくなる時刻での表面形状の変動を Fig. 4.22、断面積の振幅が小さくなる時刻での表面形状の変動を Fig. 4.23 に示す。Fig. 4.22 から、断面積の振幅が大きくなる時には、柔表皮の形状は計測範囲の円周方向長さをほぼ半波長とする長波長の波形となっている。しかし Fig. 4.23 に示すように、断面積の振幅が小さくなる時には、比較的短い波長の進行波が間欠的に発生していることが判る。以上の結果から、表面の長周期変動は横力の増減と関連があり、また表面の微小な進行波の有無と効力の増減には何等かの相関があるものと推察される。

## 4.5 考察

レーザー光面により可視化された2次元断面の画像から、その形状の変化を連続的に定量化する手法として、可視化された表面形状の原画像に対して、階層化および2分探索による尾根線の逐次追跡、縮退処理による線画像の検出を行う方法を提案し、流場内で受動変形する表皮や振動する弾性翼の任意の2次元断面形状の定量計測に適用した。

### ● 手法の妥当性

変形する表面の画像は、光源の照射方向が1方向であるため、表面への入射角が場所によって異なり、輝度分布が大きく変化する。2値化処理に基づく従来の方法と比較した結果、本方法では輝度分布尾根線の輝度変化が大きいため2値化処理に基づく方法では特徴の抽出が難しい画像に対しても、連続した線成分として安定に検出できることが確認された。ただし、検出された線図形には、縮退処理を簡便化した影響と思われる乱れが生じた。この乱れは、輝度分布の尾根線が複雑な形状になる部分で発生するが、逐次追跡を行う階層として適当な階層を選択することにより、この悪影響をある程度軽減することが可能であることもわかった。追跡を行う最良の階層は画像の特徴に著しく依存するため、試行錯誤的に最良と思われる値を決定した。

追跡を行う階層の選択が追跡結果に及ぼす影響を連続する複数画面における有効画素数の変化で評価した結果、本研究で対象とした画像ではClass:4の時に最も有効画素数が多くなることがわかった。また、平均値を用いて階層化を行った時には、連続した全ての画像に対して追跡を行う階層の最良の値が存在することも判明した。

平均値による階層化と最大値による階層化における有効画素数の変化を調べた結果、どちらの場合においても追跡は可能であるが、最大値で階層化した場合には有効画素数の変動が大きくなる傾向があり、全ての画面に対する最良の階層が必ずしも存在しないことがわかった。また、どちらも有効画素数の最大値に有意な差は認められなから、本研究で適用する画像に対しては、平均値による階層化が有効であることもわかった。

始点および終点の決定方法としては、単純しきい値法を用いた。この方法では、線画像の端部で照明条件の制限などから輝度分布勾配が緩やかになる場合には、しきい値の選択により端部の位置が変化する。本研究では表面形状の検出が目的となるため、端部の正確な位置の情報はさほど重要ではないので簡便な方法を用いたが、端部の情報が重要となるような対象に適用する時には、より適した手法を検討する必要がある。また、この簡便な方法は、画像内に検出の対象とする線図形のみが存在する場合には有効であるが、線図形の端部近傍に輝度の高い別の対象が存在する場合には、誤った判定をする可能性がある。このような場合には複雑な判定方法を適用するか、あるいは前処理によって線図形以外の対象を除去するなどの対策が必要となると思われる。

### ● 弾性振動翼の形状計測への適用性

弾性振動翼の時系列可視化画像から2値化画像の細線化処理によって骨格線を抽出したものと、本研究で新しく用いた方法によって骨格線を抽出したものを比較した。その結果、翼とアクチュエーターの接合部から先端に行くに従い輝度がなだらかに低くなるため、2

値化画像の細線化処理に基づく方法では先端部近傍の情報が大きく欠落するが、本方法では、輝度の低くなる先端部分まで安定にして追跡できる点で有効であることがわかった。本方法による弾性翼の形状の計測及び流体力計測との比較から、変形の小さい場合と大きい場合で、変形のモードを2種類に分類でき、このモードの違いによって発生する推力が大きく異なることが新たに判明した。

以上の結果から、振動する弾性翼の流体力学的評価に関して本方法が極めて有用な手法であることが確認された。

- 柔構造円柱表面の形状計測への適用性

柔表皮を持つ円柱表面形状の時系列変化の計測に本方法を適用した結果、肉眼では捉えにくい不規則な挙動を、詳細かつ定量的に計測できることがわかった。

柔表面の平均的な挙動を明らかにするため、ある有限幅で柔構造表面と内筒表面の間の断面積を算出し、時系列変化を調べた。断面積の変化が大きくなる時刻では横力の振幅が増大し、抗力は高くなる。この時の柔表皮の形状は計測範囲の円周方向長さをほぼ半波長とする長波長の波形となる。一方、断面積の振幅の小さくなる部分では横力の振幅も小さくなり、抗力は比較的低い値を示す。この時には柔表皮表面には比較的短い波長の進行波が間欠的に発生する。

これらの結果から、表面の長周期変動は横力の増減と関連があり、また表面の微小な進行波の有無と効力の増減には何等かの相関があることが推察される。

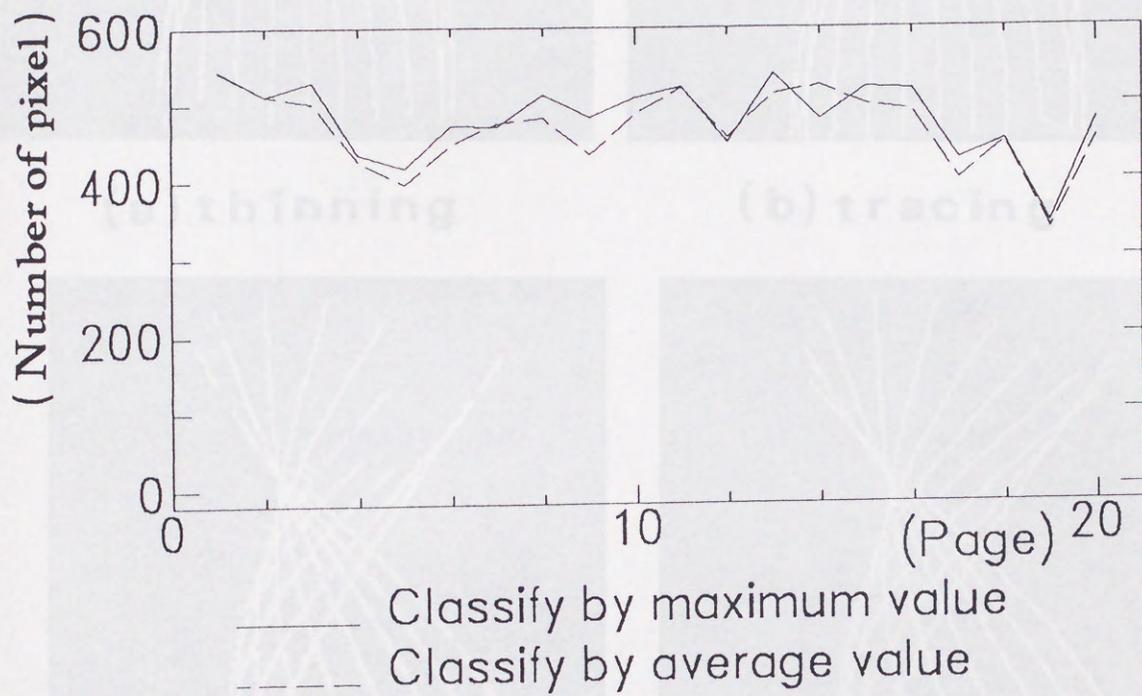
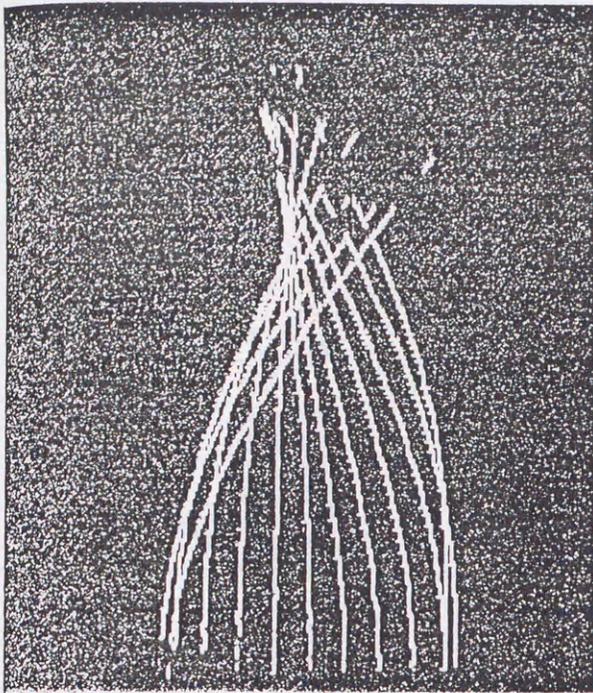


Fig. 4.14: Comparison of Number of pixel

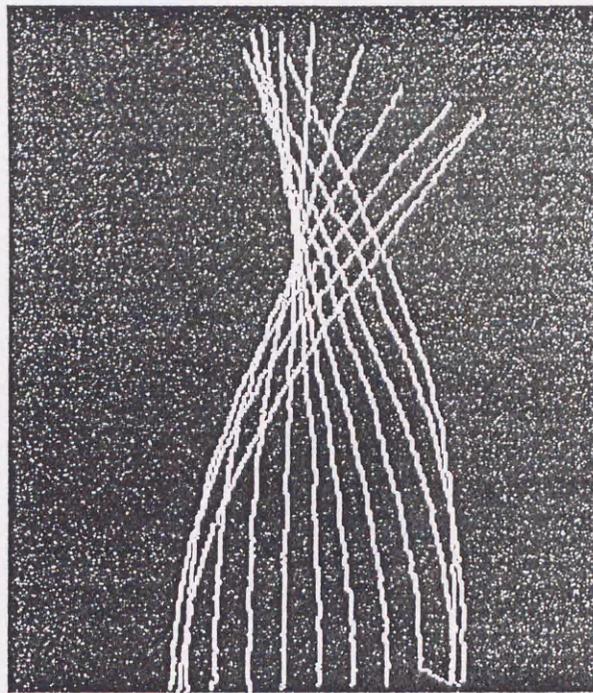
(a) thinning

(b) tracing

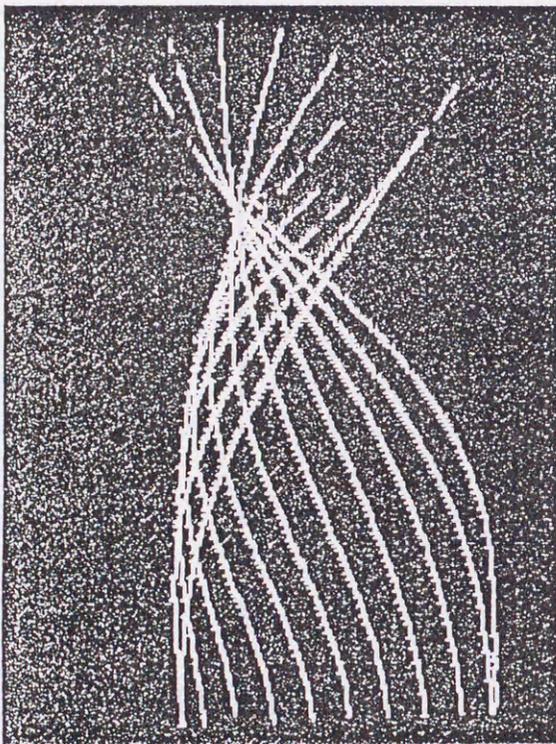
Fig. 4.13: Comparison of detected surface form of oscillating elastic wing between thinning and tracing process



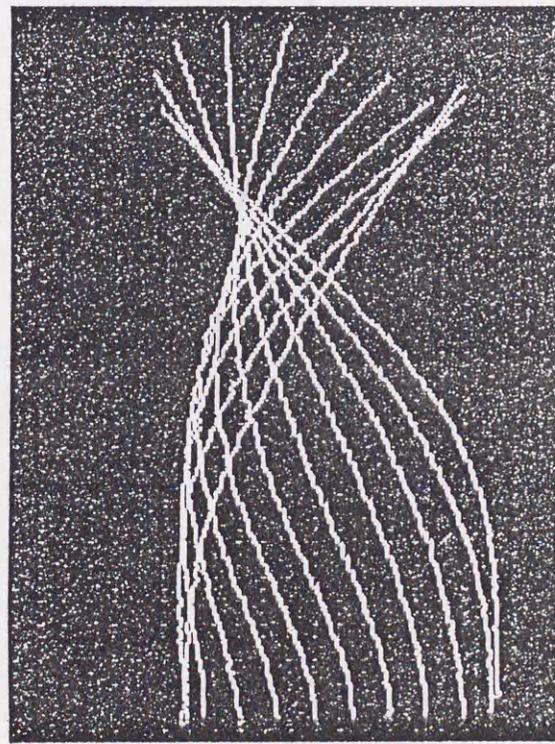
**(a) thinning**



**(b) tracing**



**(a) thinning**



**(b) tracing**

Fig. 4.15: Comparison of detected surface form of oscillating elastic wing between thinning and tracing process

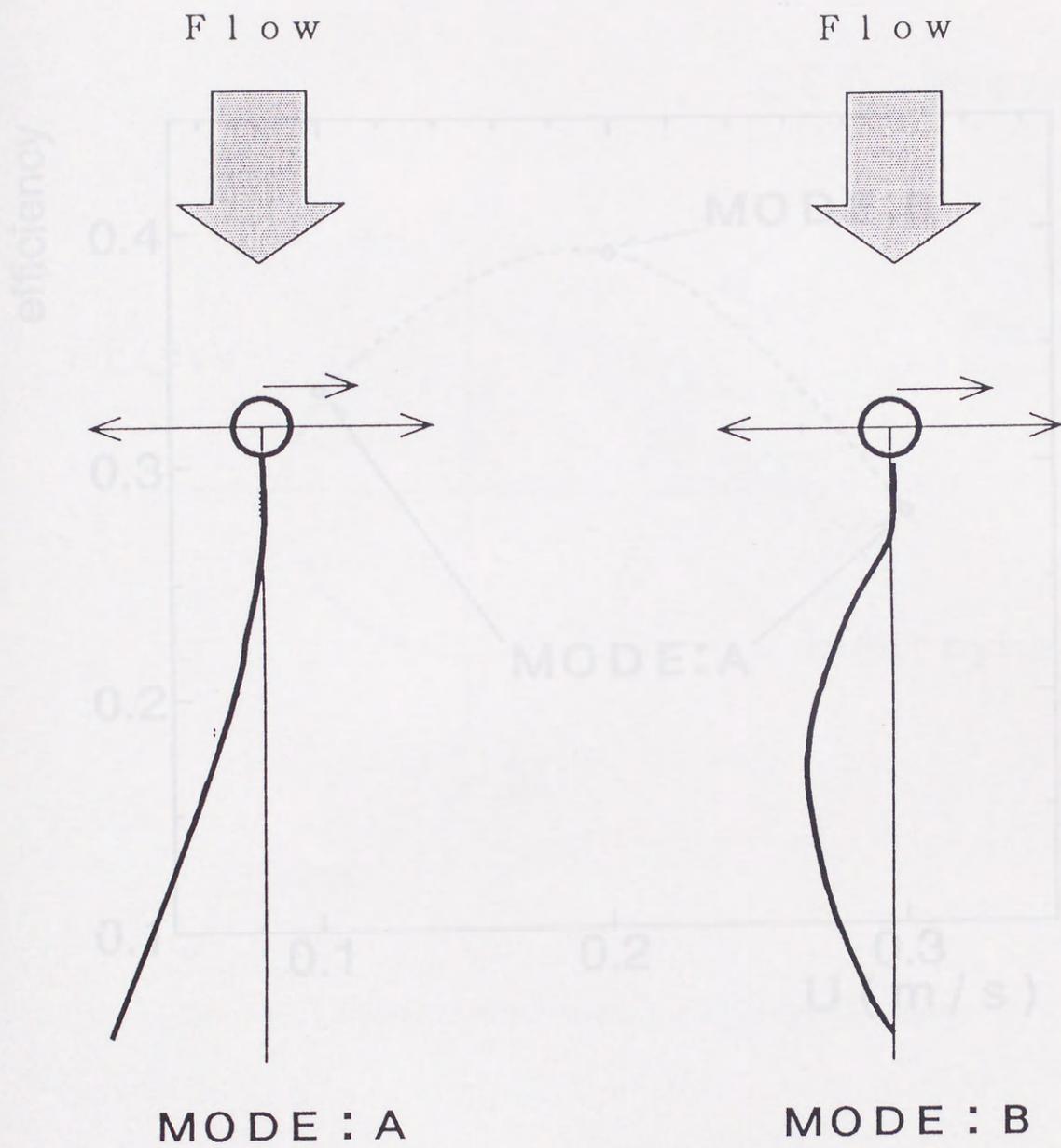


Fig. 4.17: Efficiency of oscillating elastic wing

Fig. 4.16: Transformation mode of oscillating elastic wing

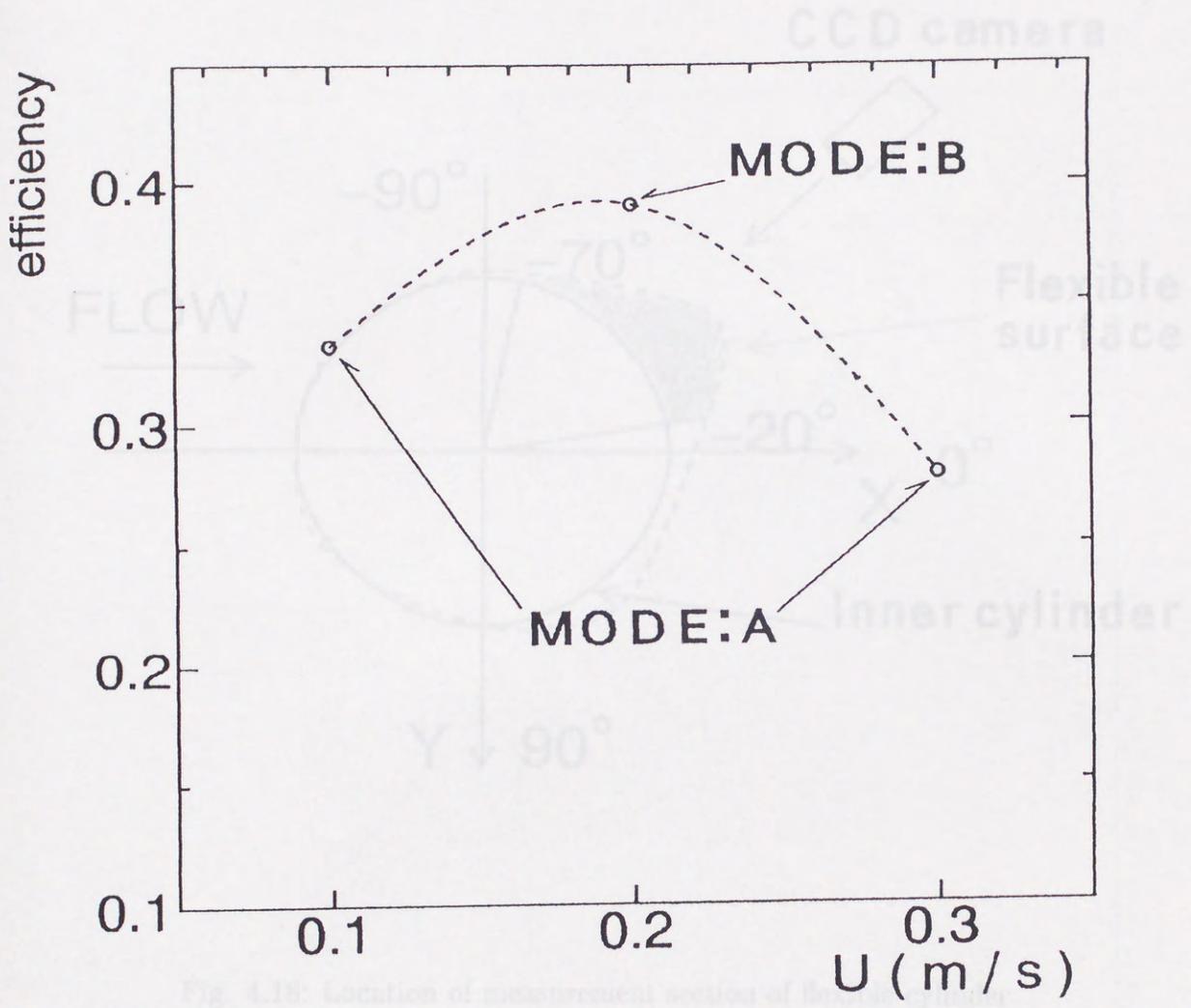


Fig. 4.17: Efficiency of oscillating elastic wing

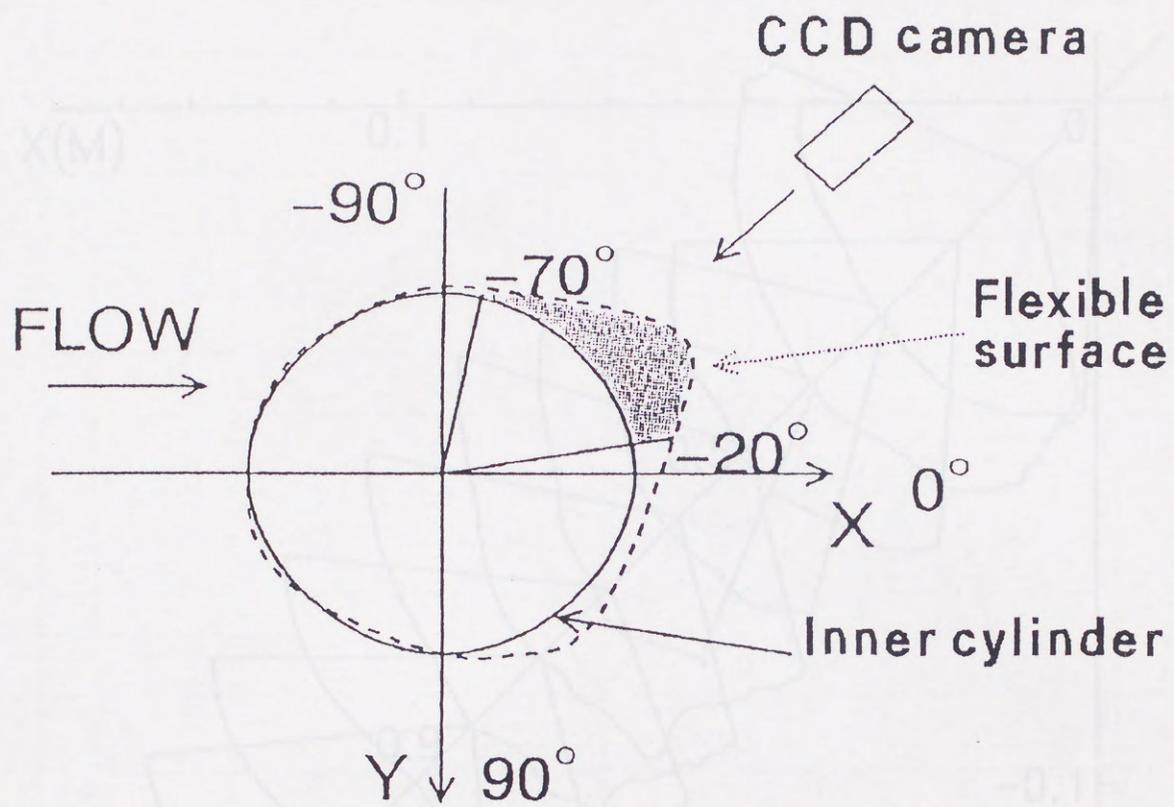


Fig. 4.18: Location of measurement section of flexible cylinder

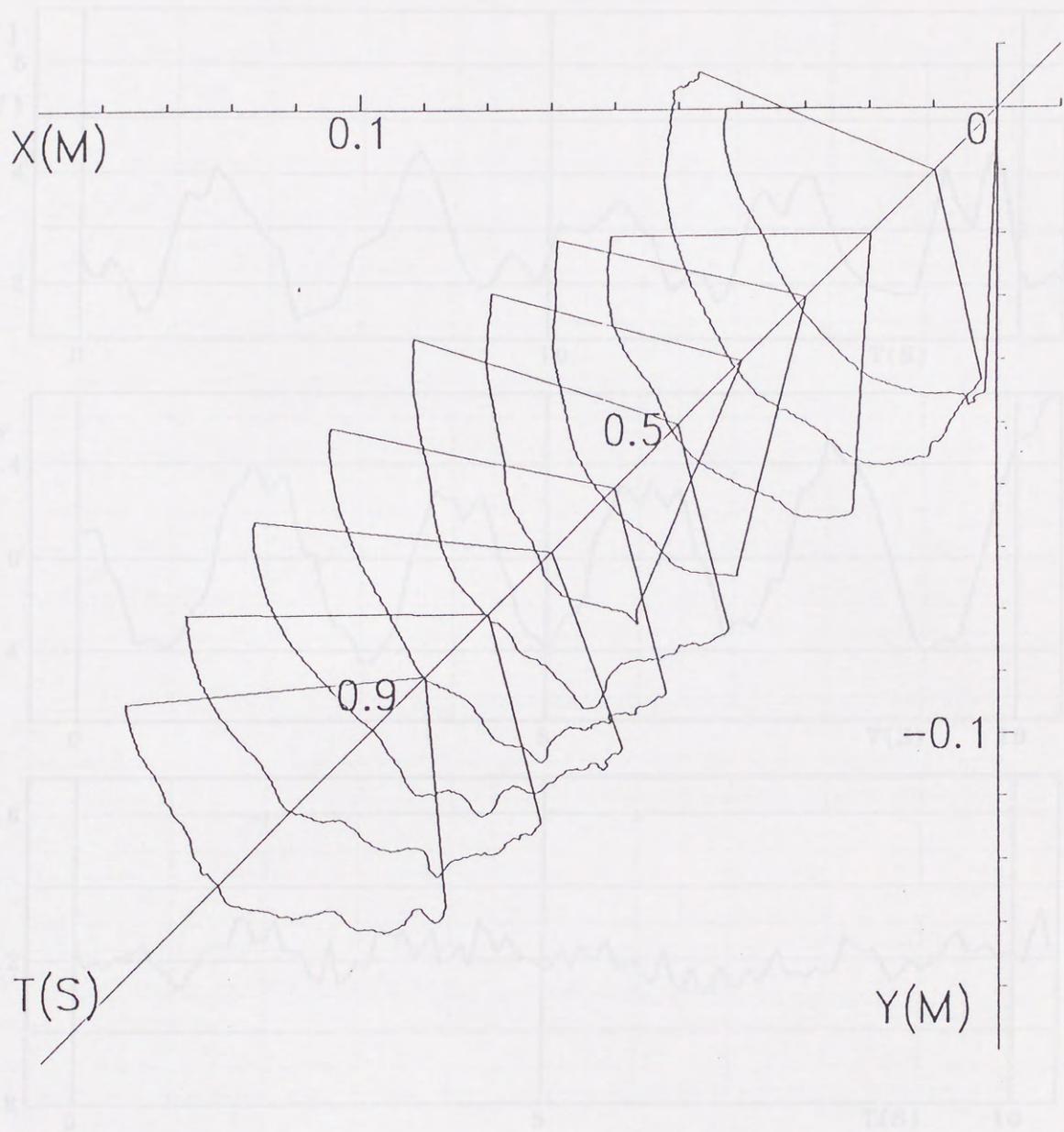


Fig. 4.19: Variation of flexible surface around a cylinder

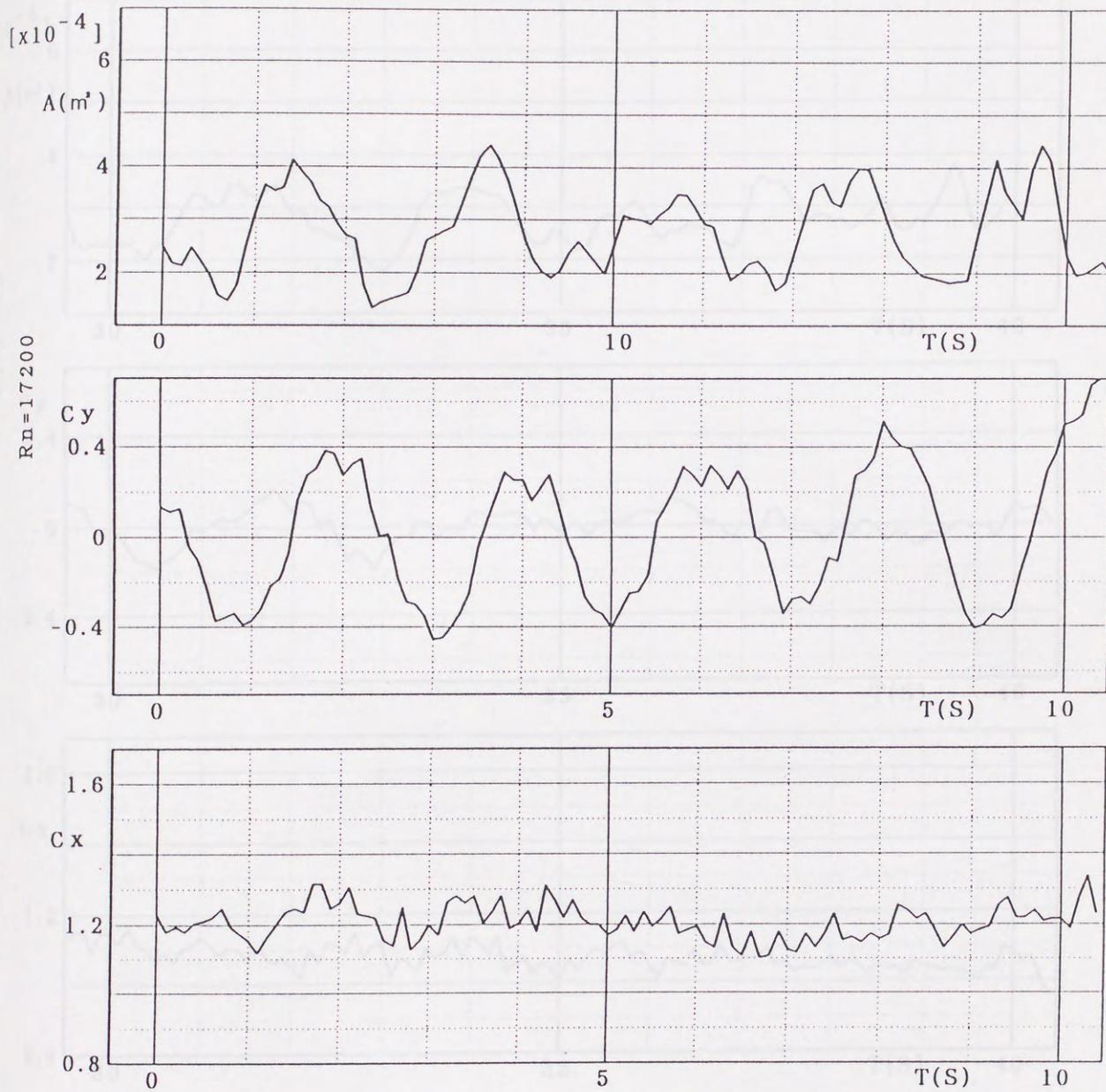


Fig. 4.20: Variation of surface form and hidroynamical force

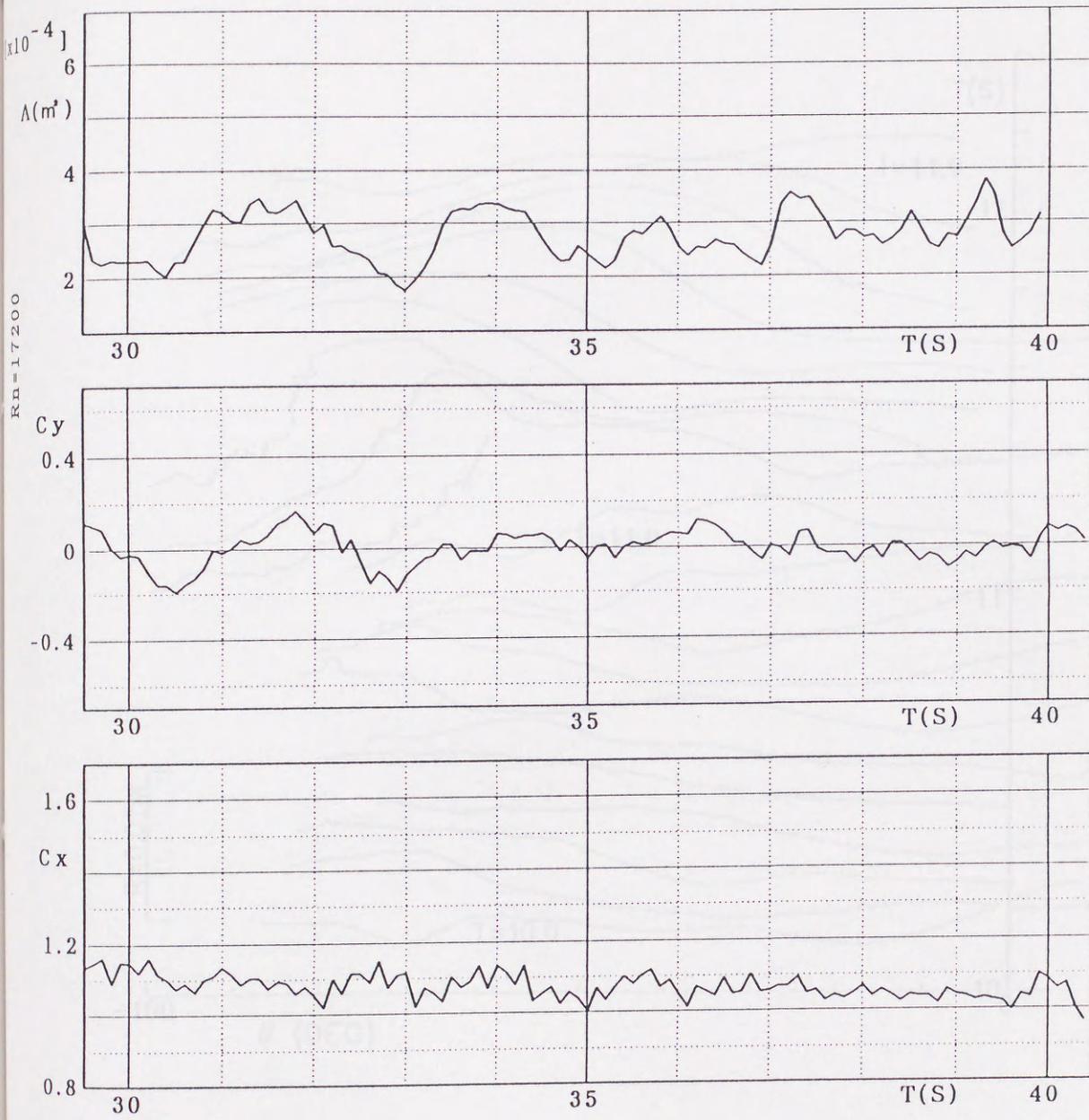


Fig. 4.21: Variation of surface form and hydrodynamical force

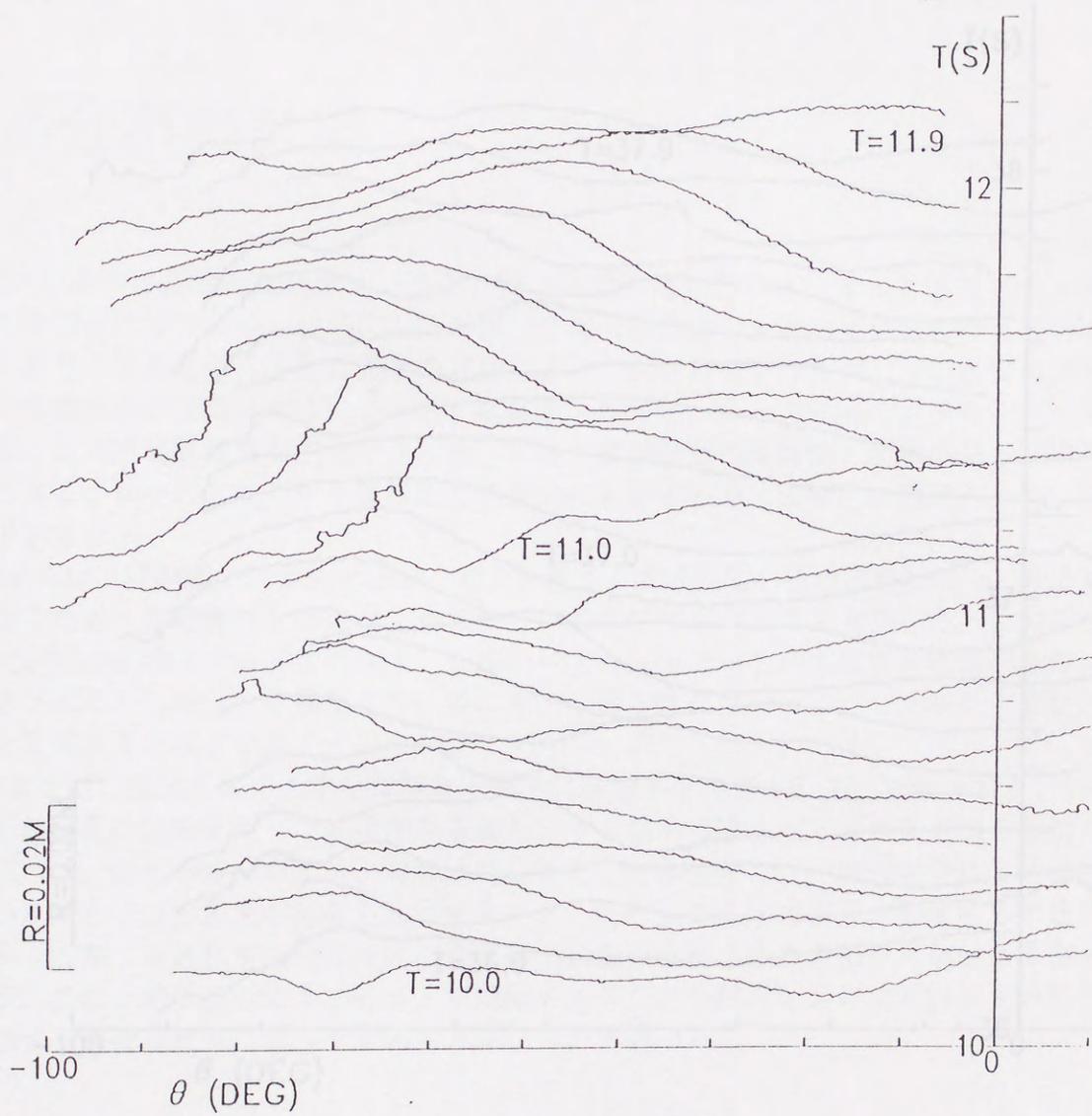


Fig. 4.22: Time history of deformation of flexible surface

## 第5章

### 波高分布の計測

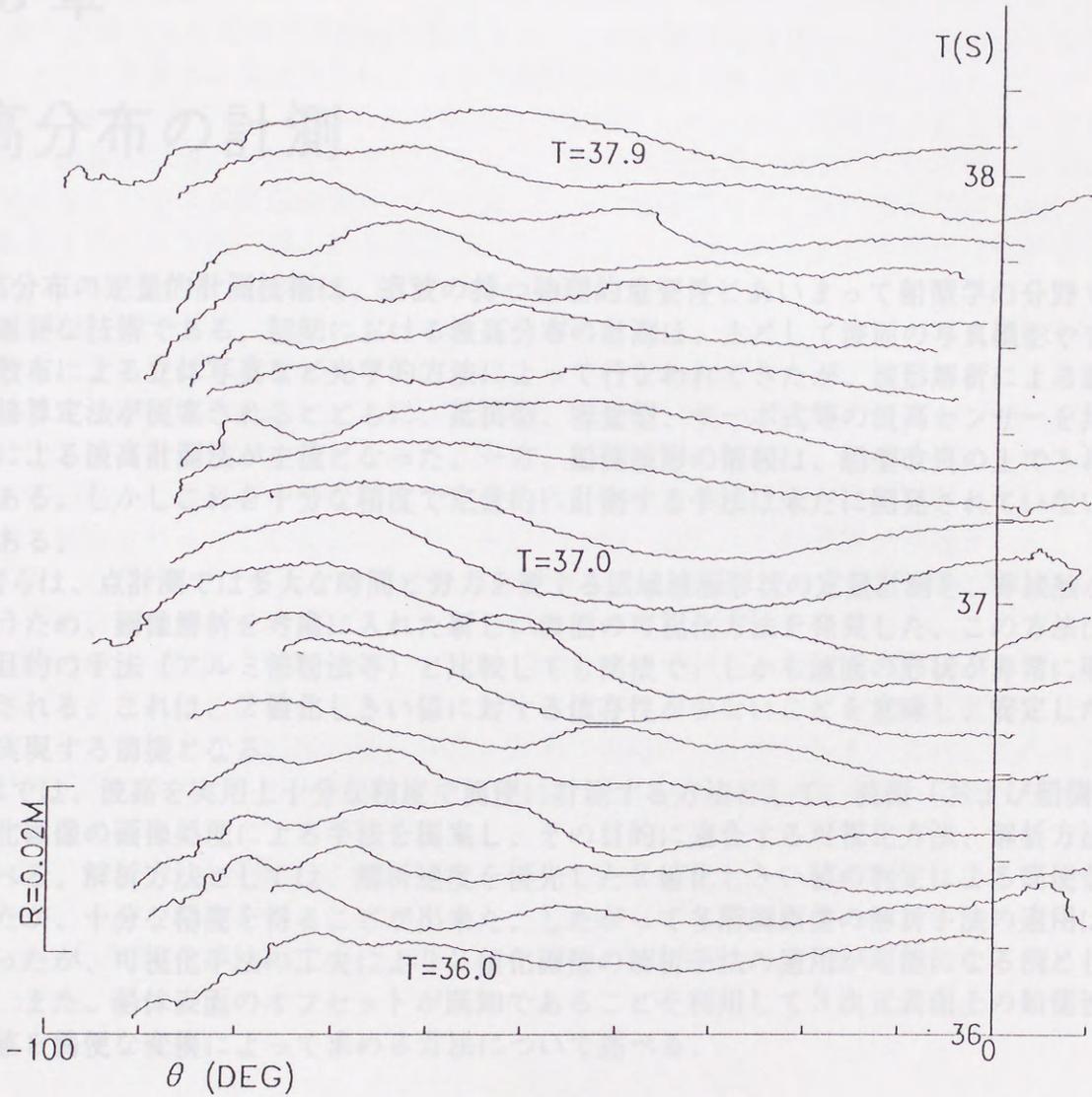


Fig. 4.23: Time history of deformation of flexible surface

## 第 5 章

### 波高分布の計測

波高分布の定量的計測技術は、造波の持つ物理的重要性とあいまって船型学の分野ではきわめて重要な技術である。初期における波高分布の計測は、主として波面の写真撮影やアルミ箔粉の散布による立体写真など光学的方法によって行なわれてきたが、波形解析による造波抵抗の直接算定法が提案されるとともに、抵抗型、容量型、サーボ式等の波高センサーを用いた点計測による波高計測法が主流となった。一方、船側波形の情報は、船型改良の上できわめて有用である。しかしこれを十分な精度で定量的に計測する手法は未だに開発されていないのが現状である。

著者らは、点計測では多大な時間と労力を要する広域波面形状の定量計測を、非接触かつ簡便に行うため、画像解析を考慮に入れた新しい波面の可視化方法を発見した。この方法は、従来の同目的の手法（アルミ箔粉法等）と比較しても簡便で、しかも波面の形状が非常に明瞭に可視化される。これは、2値化しきい値に対する依存性が少ないことを意味し、安定した画像計測を実現する前提となる。

本章では、波高を実用上十分な精度で簡便に計測する方法として、波面（および船側波形）の可視化画像の画像処理による手法を提案し、その目的に適合する可視化方法、解析方法について述べる。解析方法としては、解析速度を優先した2値化しきい値の判定による簡便な方法を用いたが、十分な精度を得ることが出来た。したがって多階調画像の解析手法の適用は実施しなかったが、可視化手法の工夫により2値化画像の解析手法の適用が可能になる例として紹介する。また、船体表面のオフセットが既知であることを利用して3次元表面上の船側波高の実座標値を簡便な変換によって求める方法について述べる。

#### 5.1 気相界面可視化法

水のように散乱性の低い物質の表面を直接可視化するには、従来はアルミ箔粉などの何等かの散乱物質の散布が必要とされてきた [16] [17]。しかし、このような可視化手法は非接触性、同時多量性という大きな利点があるにもかかわらず、水質の汚染など様々な計測器が同時に用いられる汎用水槽での恒常的使用を阻む要因があるため十分に活用されていない。

変形する界面を可視化するには、界面において何等かの散乱反射が必要である。水に蛍光顔料などの散乱物質を混ぜることも考えられるが、水質を汚染する点ではアルミ箔粉法と大差

はない。しかし、液相ではなく気相側を可視化することによっても同様に界面の可視化が可能である。つまり、気相側に散乱物質を散布し、気相界面を可視化することによって波面を可視化することが可能になるということである。以下、この考えによる方法を気相界面可視化法と称する。

本方法における可視化および解析手順を Fig. 5.1 に示す。本方法では、水面上に散乱物質として安価で無害であるドライアイスミストを供給し、水面上で薄い層を形成するミストに LLS 光源を照射して気相側の界面を可視化する。これを適当な角度から CCD カメラで撮影することにより、任意の 2 次元断面における波面形状の画像を得ることができる。

得られた画像の画質は、波形の検出処理に十分耐えられるが、突発的に発生する微小なノイズ成分が解析に影響を及ぼすこともあるので、原画像の情報を損なわない程度に 1 回から 2 回の平滑化などのマスク処理を施す。この後、しきい値処理などの波形検出処理を行い、波高分布を算出する。本方法で得られる画像は、2 値化しきい値に対する依存性が比較的小さいため、しきい値の任意性による誤差の発生は極めて少ない。

可視化装置の概略図を Fig. 5.2 に示す。高濃度のミストを発生させるため、回流水槽の上流側にミスト発生装置を設置する。ミストはドライアイス温水に浸すことによって発生させる。このミスト発生装置に適当な送風機構を取り付けることにより水面上にミストを送り出す。ミストの比重は空気より若干重いために水面近くまで自重で下降し、回流水槽の水流により水面付近の気相側には境界層が形成されているため、ほぼ均一な濃度、厚さを保った状態でミストは下流へ輸送される。この現象により、水面には均一なミストの薄層が形成される。このミスト層に対して水槽上方から LLS 光源を照射することにより、ミスト層の波面側の境界線が、光面と波面の交わる線（波高分布）として可視化される。

可視化された断面は、CCD カメラにより撮影され、画像解析装置に取り込まれる。CCD カメラと LLS 光源の位置関係を常に保持した状態で、両者をレーザー光面に直角な方向にトラバースすることにより、広域の波形分布を非常に短時間に計測できる。また、この方法によれば比較的面倒な作業である計測断面の画素座標と実座標の変換係数を求める校正作業が一度で済むため実験の利便上も極めて好都合である。

この方法で得られる画像は輝度分布の 2 値性が非常に高いため、波面の検出には 2 値化画像の境界検出処理（単純しきい値法）のみでも比較的良好な結果が得られる。

画像解析より得られた波面の画素座標値  $(x, z)$  より実座標値  $(X, Z)$  を計算するための変換式を (5.1) 式に示す。

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ x_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

変換係数  $A_{11} \cdots A_{24}$  は、計測の前（あるいは計測終了後）にレーザー光面と CCD カメラの位置関係を固定し、光面上に格子板などを設置して実座標が既知である 4 点の画素座標と実座標の関係より決定する。

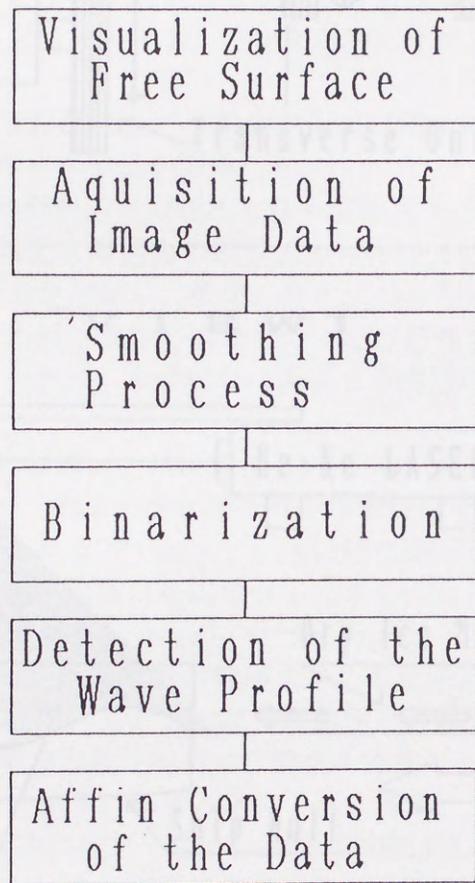
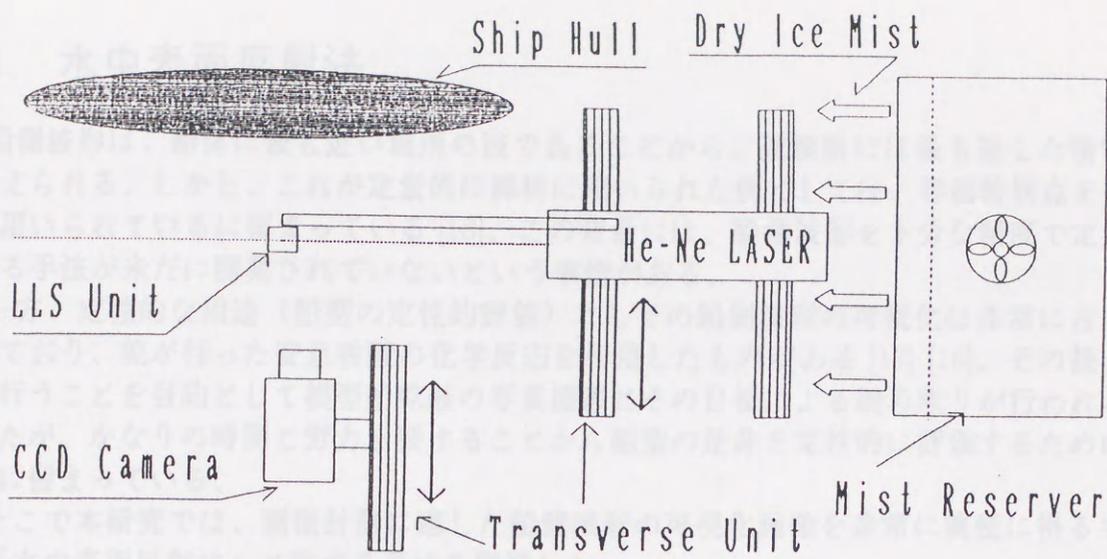


Fig. 5.2: Schematic view of air-side free surface visualization system

Fig. 5.1: Block diagram of air-side free-surface visualization method

[ TOP VIEW ]



[ SIDE VIEW ]

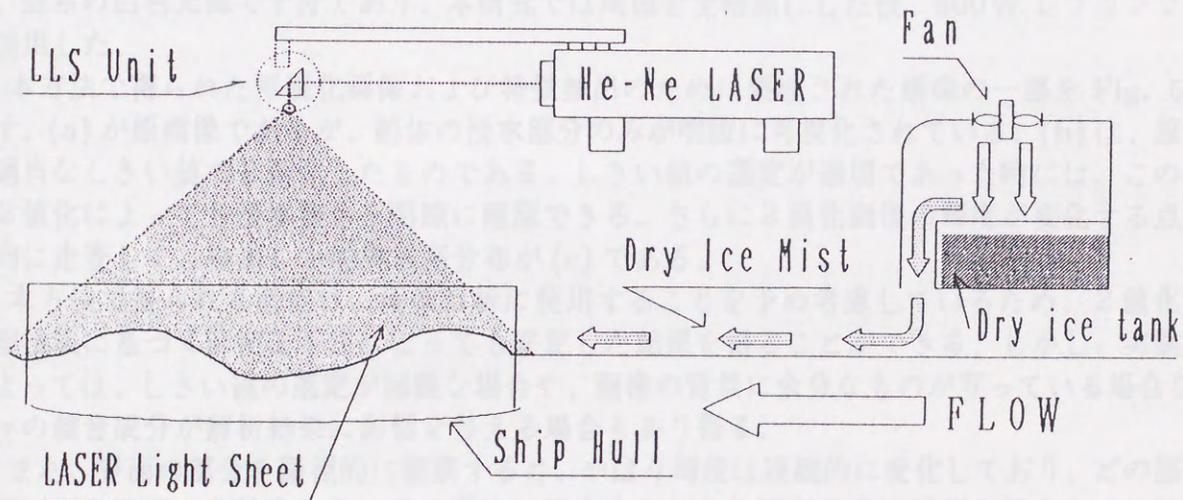


Fig. 5.2: Schematic view of air-side free-surface visualization system

## 5.2 水中表面反射法

船側波形は、船体に最も近い場所の波であることから、逆解析には最も適した情報であると考えられる。しかし、これが定量的に解析に用いられた例としては、等価特異点を求めるために用いられているに留まっている [18]。この背景には、船側波形を十分な精度で定量的に計測する手法が未だに開発されていないという事情がある。

一方、定性的な用途（船型の定性的評価）としての船側波形の可視化は非常に古くから行われており、乾が行った安息香酸の化学反応を利用したものがある [17] [16]。その後、より簡便に行うことを目的として模型船乾舷の写真撮影とその目視による読み取りが行われるようになったが、かなりの時間と労力を要することから船型の是非を定性的に評価するために用いられるに留まっている。

そこで本研究では、画像計測に適した船側波形の可視化画像を非常に簡便に得る手法として、「水中表面反射法」と称する手法を開発した。

水中表面反射法による船側波形の可視化方法の概略図を Fig. 5.3 に示す。

水中表面反射法では、回流水槽側面の観察窓から水中を通して適当な角度で船体を照射すると、光線の大部分が水面で全反射し、船体の浸水面のみが明瞭に可視化されるという現象を利用する。この可視化された面と水面との境界は、ほぼ船側波形とみなすことができる。光源は、通常の白色光源で十分であり、本研究では周囲を全暗黒にした後、500W レフランプ 2 個を使用した。

本方法で得られた可視化画像および特徴抽出のために処理された画像の一部を Fig. 5.4 に示す。(a) が原画像であるが、船体の浸水部分のみが明瞭に可視化されている。(b) は、原画像を適当なしきい値で 2 値化したものである。しきい値の選定が適切であった時には、このように 2 値化によっても浸水部分を明瞭に確認できる。さらに 2 値化画像の輝度が変化する点を縦方向に走査して、検出した船側波高分布が (c) である。

本方法で得られる画像は、画像解析に使用することを予め考慮しているため、2 値化画像処理技法に基づく簡便な手法によっても安定した結果を得ることができる。しかし、実験状態によっては、しきい値の選定が困難な場合や、画像の背景に余分なものが写っている場合など、種々の雑音成分が解析結果に影響を与える場合もあり得る。

また、界面の部分を微視的に観察すると、やはり輝度は連続的に変化しており、どの部分を界面とみなすかは 2 値化しきい値の選定に依存する。より精度の良い計測を行うためには画像の解像度を上げる必要があるが、その場合には 2 値化しきい値に対する依存性が再び問題になると予想される。

### 5.3 物体表面座標の同定方法

水中表面反射法によって船側波形の可視化は容易に可能となるが、船体側面は一般的に平面ではなく複雑な曲面であるので、気相界面可視化法で用いた(5.1)式による簡便な座標変換式では正確な座標を決定することができない。

3次元空間の任意の座標を求めるため、実空間座標を、それが投影された面の座標に変換することを考える。この逆変換により2次元面内の座標から実空間座標を求めることができる。

実空間座標  $(x, y, z)$  を投影面座標  $(x', y')$  に変換する変換式を(5.2),(5.3)式に示す。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{W} \\ \frac{Y}{W} \\ \frac{Z}{W} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

(5.2), (5.3) 式では、 $A_{41} \cdots A_{43}$  が透視変換成分となる。

この座標変換における変換係数の決定には、基本的に対象物とカメラの相対位置、方向が既知でなければならない。この変換は複雑であり、また実空間上のレンズ中心座標などを正確に知ることが一般に困難である。したがって、実際の計測では変換精度は機器の設置精度に強く依存する。

ところで、本研究で対象とする船側波高の位置は、位置及び形状が既知である船体表面上に必ず存在する。そのため、既知である曲面のオフセットを利用して、より簡便で精度の維持が容易な変換を行うことが可能である。本方法では、1画面の座標を求めたい点に対して複数面の2次元座標変換を行なうことにより、視点と計測点を結ぶ直線を決定し、この直線と物体表面の曲面との交点座標を対象の位置とする。

#### 5.3.1 船体表面座標の計算方法

3次元曲面上の座標を複数の2次元座標変換から求める方法の概念を、Fig. 5.5に示す。実空間上で船体表面を挟む任意のP面、Q面を設定し、各々の面で4点ずつ計8点の標点より(5.4),(5.5)式で示す変換係数  $A_{11}^p, \cdots, A_{24}^p, A_{11}^q, \cdots, A_{24}^q$  を決定する。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^p & A_{12}^p & A_{13}^p & A_{14}^p \\ A_{21}^p & A_{22}^p & A_{23}^p & A_{24}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ xy \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\begin{bmatrix} x_q \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^q & A_{12}^q & A_{13}^q & A_{14}^q \\ A_{21}^q & A_{22}^q & A_{23}^q & A_{24}^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ xy \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$(x_p, y_p)$  ..... P面上の実座標値  
 $(x_q, y_q)$  ..... Q面上の実座標値  
 $(x, y)$  ..... 画面上の画素座標値

実空間上の  $z_p, z_q$  は既知なので、計測点の画素座標値  $(x, y)$  より、 $p, q$  面上の2点  $P(x_p, y_p, z_p), Q(x_q, y_q, z_q)$  が求められる。

計測点の実座標値を  $O(x_0, y_0, z_0)$  とするとこの3点を通る直線のマトリックス表示は、(5.6) 式で表される。

$$\begin{bmatrix} (y_q - y_p)x_p - (x_q - x_p)y_p \\ (z_q - z_p)y_p - (y_q - y_p)z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_q - y_p & x_p - x_q & 0 \\ 0 & z_q - z_p & y_p - y_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

(5.6) 式で計測点の実座標値  $O(x_0, y_0, z_0)$  は、直線と船体表面との交点が求める座標である。船体表面座標はオフセットデータとして離散的に与えられるので、三角形の複数平面の構成で曲面を近似する。直線が通過する三角形の各頂点が  $S_1(x_1, y_1, z_1), S_2(x_2, y_2, z_2), S_3(x_3, y_3, z_3)$  で与えられる時、この3点によって決定される平面と、その平面上の計測点の実座標値  $O(x_0, y_0, z_0)$  のマトリックス表示は (5.7) 式となる。

$$\begin{aligned} & [x_1(y_2 \cdot z_3 - z_2 \cdot y_3) + y_1(z_2 \cdot x_3 - x_2 \cdot z_3) + z_1(x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3)] \\ & = \begin{bmatrix} y_2 \cdot z_3 - x_2 \cdot y_3 & z_2 \cdot x_3 - x_2 \cdot z_3 & x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.7)$$

(5.6) 式と (5.7) 式から、船体表面上の実座標値を決定する3元1次連立方程式は (5.8) 式で表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} y_{qp} \cdot x_p - x_{qp} \cdot y_p \\ z_{qp} \cdot y_p - y_{qp} \cdot z_p \\ x_1 \cdot yz_{23} + y_1 \cdot zx_{23} + z_1 \cdot xy_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{qp} & -x_{qp} & 0 \\ 0 & z_{qp} & -y_{qp} \\ yz_{23} & zx_{23} & xy_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} x_{qp} &= x_q - x_p & yz_{23} &= y_2 \cdot z_3 - z_2 \cdot y_3 \\ y_{qp} &= y_q - y_p & zx_{23} &= z_2 \cdot x_3 - x_2 \cdot z_3 \\ z_{qp} &= z_q - z_p & xy_{23} &= x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3 \end{aligned}$$

(5.8) 式を解くことにより、実座標値  $O(x_0, y_0, z_0)$  が決定される。

### 5.3.2 船体表面座標の平面表示と平面の特定

船体表面と直線の交点が存在する三角形の各頂点  $S_1(x_1, y_1, z_1), S_2(x_2, y_2, z_2), S_3(x_3, y_3, z_3)$  は、次のようにして求める。

まず、船体表面座標  $S(x_i, y_j, z_{ij})$  を次のように定義する。

$$S(x_i, y_j, z_{ij}) = S(x_i, y_j, f(x_i, y_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5.9)$$

船体表面座標は、 $m \times n$  の2次元配列で与えられる。ここで船体表面を構成するマトリックスの任意の座標を (5.10) 式で表す。

$$S_{1L}(x_1, y_1, z_1) = S(x_i, y_j, f(x_i, y_j)) \quad (5.10)$$

この時、 $S_{1L}(x_1, y_1, z_1)$  を頂点とする三角形領域の残り2つの頂点座標  $S_{2L}(x_2, y_2, z_2)$  及び  $S_{3L}(x_3, y_3, z_3)$  を、(5.11) 式で表す。

$$\begin{aligned} S_{2L}(x_2, y_2, z_2) &= S(x_{i+1}, y_j, f(x_{i+1}, y_j)) \\ S_{3L}(x_3, y_3, z_3) &= S(x_i, y_{j+1}, f(x_i, y_{j+1})) \end{aligned} \quad (5.11)$$

または、マトリックス上の任意の座標を (5.12) 式で表す時、

$$S_{1L}(x_1, y_1, z_1) = S(x_{i+1}, y_{j+1}, f(x_{i+1}, y_{j+1})) \quad (5.12)$$

三角形領域の残り2つの頂点座標  $S_{2R}(x_2, y_2, z_2)$  及び  $S_{3R}(x_3, y_3, z_3)$  を、(5.13) 式で表す。

$$\begin{aligned} S_{2R}(x_2, y_2, z_2) &= S(x_i, y_{j+1}, f(x_i, y_{j+1})) \\ S_{3R}(x_3, y_3, z_3) &= S(x_{i+1}, y_j, f(x_{i+1}, y_j)) \end{aligned} \quad (5.13)$$

三角形領域を構成する頂点の組  $S_{1L}, S_{2L}, S_{3L}$  および  $S_{1L}, S_{2R}, S_{3R}$  を、それぞれ  $S_1, S_2, S_3$  とすると、計測点  $O(x_o, y_o, z_o)$  の座標値が  $S_1 \cdots S_3$  で構成される三角形領域に含まれるかどうかは、(5.14) 式で示すベクトル  $S_1 \vec{S}_2, S_1 \vec{S}_3$  で計算される三角形領域の面積と、(5.15) 式で示すベクトル  $O \vec{S}_1 \cdots O \vec{S}_3$  で計算される2つの三角形領域の面積の和との比較で判定することができる。

$$\begin{aligned} S_1 \vec{S}_2 &= (x_{21}, y_{21}, z_{21}) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ S_1 \vec{S}_3 &= (x_{31}, y_{31}, z_{31}) = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} O \vec{S}_1 &= (x_{1o}, y_{1o}, z_{1o}) = (x_1 - x_o, y_1 - y_o, z_1 - z_o) \\ O \vec{S}_2 &= (x_{2o}, y_{2o}, z_{2o}) = (x_2 - x_o, y_2 - y_o, z_2 - z_o) \\ O \vec{S}_3 &= (x_{3o}, y_{3o}, z_{3o}) = (x_3 - x_o, y_3 - y_o, z_3 - z_o) \end{aligned} \quad (5.15)$$

ここで、 $(x_{21}, y_{21}, z_{21}), (x_{31}, y_{31}, z_{31}), (x_{1o}, y_{1o}, z_{1o}), (x_{2o}, y_{2o}, z_{2o}), (x_{3o}, y_{3o}, z_{3o})$  はそれぞれそのベクトルの成分である。

$S_1 \vec{S}_2$  と  $S_1 \vec{S}_3$  で構成される三角形領域の面積  $A_s$  および  $O \vec{S}_1 \cdots O \vec{S}_3$  で構成される三角形領域の面積の和  $A_o$  は、それぞれ (5.16), (5.17) 式で表すことができる。

$$A_s = \sqrt{(y_{21}z_{31} - z_{21}y_{31})^2 + (z_{21}x_{31} - x_{21}z_{31})^2 + (x_{21}y_{31} - y_{21}x_{31})^2} \quad (5.16)$$

## 5.4 計測結果

$$A_O = \sqrt{(y_{1o}z_{2o} - z_{1o}y_{2o})^2 + (z_{1o}x_{2o} - x_{1o}z_{2o})^2 + (x_{1o}y_{2o} - y_{1o}z_{2o})^2} \\ + \sqrt{(y_{1o}z_{3o} - z_{1o}y_{3o})^2 + (z_{1o}x_{3o} - x_{1o}z_{3o})^2 + (x_{1o}y_{3o} - y_{1o}z_{3o})^2} \quad (5.17)$$

面積  $A_s$  および  $A_O$  を用いた計測点の位置の判定を (5.18) 式に示す。

$$A_O = A_s \cdots \text{点 } O \text{ は三角形の内側} \\ A_O > A_s \cdots \text{点 } O \text{ は三角形の外側} \quad (5.18)$$

実際には (5.18) 式で示す判定を (5.11), (5.12) 式で示す頂点の組み合わせに順次適用することにより直線が通過する三角形を決定し、その頂点で決定される平面を用いた計測点  $O(x_o, y_o, z_o)$  の座標を船体表面上の実座標値とする。

以上で、1台のカメラの画像と物体表面の座標データより物体票面上の座標値を特定できることを示した。しかし、(5.18) 式の判定を物体表面の全データに対して行うのは非常に効率が悪い。

そこで、(5.11), (5.12) 式の頂点の組み合わせの候補として、

$$x_i \leq \min(x_p, x_q) < x_{i+1} \\ y_j \leq \min(y_p, y_q) < y_{j+1} \quad (5.19)$$

を満足する  $x_i, y_j$  で表わされる点を  $S_{iL}(1, 1)$  とし、

$$x_i \leq \max(x_p, x_q) < x_{i+1} \\ y_j \leq \max(y_p, y_q) < y_{j+1} \quad (5.20)$$

を満足する  $x_i, y_j$  で表わされる点を  $S_{iL}(m, n)$  として、 $m \times n \times 2$  個の三角形に候補を絞って (5.18) 式による判定を行う。

## 5.4.2 船側波高計測への適用

水中表面反射法で得られた船側波高分布を、マイクローブを用いた目視による点計測値と比較した。本計測で使用した回波水標は波の状況が複雑に依存して若干変動するが、約 10 分間隔で 4 回計測した。その結果を Fig. 5.8(a)~(d) に示す。1 回の計測に要するサンプルング時間は 1 秒とし、比較のための点計測は画像計測との時間差がなるべく小さくなるように速やかに行った。

船側近傍を除く計測点で、本方法で得られた計測値の平均値と点計測による値のずれは 5.5mm 以内となった。船側波高そのものの変動が大きくなる船首近傍の一点では約 1.7mm の

## 5.4 計測結果

前節までに示した2種類の新しい可視化、計測方法の有効性を確認するため、本方法をS201模型船の波高分布及び船側波形分布の計測に応用した。模型船長は1.0mで、回流水槽のほぼ中央部に固定した。以下にその結果を示す。

### 5.4.1 波高分布計測への適用

気相界面可視化法による波高分布の計測結果をFig. 5.6に示す。可視化に用いたLLS光源は、35mW He-Neレーザーとシリンドリカルレンズを組み合わせたもので、幅方向に約50cmの範囲を可視化することができる。計測は、供試模型中心線より10cm離れた位置を開始面とし、y方向にトラバースさせて計12本の線上の波高分布を計測した。

今回用いたシステムでは、カメラとLLS光源を独立してトラバースさせたため、機械的精度の制約に起因する相対的な位置のずれにより若干の誤差が発生する。Fig. 5.6で示す計測波形のy方向に僅かだが不規則な凹凸があるのはそのためである。また、端部で波形の分布にバラつきがあるが、これはLLS光面の輝度が不足しているためであると思われる。しきい値法で界面を検出する場合、輝度分布のむらを考慮せずに処理を行うとこのようなバラつきが発生する。しかし、端部を除く領域では、簡単なしきい値法でも安定した計測結果を得ることができたと思われる。装置設置後の計測はきわめて迅速に実施することができ、しかも実時間での計測も可能である。

この方法の精度を検証するため、前述の実験で得た波高分布の一断面と、同じ断面でのサーボ式水位計による計測値を比較した。その結果をFig. 5.7に示す。どちらも3秒間の平均値を計測値としている。流れの時間変化による水位の変動の影響を軽減するため、水位計による計測は画像計測の直前と直後の2回実施し、その影響がないことを確認した。

光面の輝度が弱くなる左右の端部で最大約2.0mmの誤差が生じているが、輝度の安定した中央部では誤差は1.0mm以内に納まっている。これは今回使用した画像解析システムのフレームサイズおよび計測範囲によって決定される量子化誤差とほぼ同じレベルの値である。端部で大きな誤差が発生する要因としては、広角レンズの歪曲収差の影響も考えられる。実験の利便性からは広範囲が計測できる広角レンズの使用が望ましいが、本方法で使用した座標変換式では歪曲収差の補正はできない。使用する光学系の特性を考慮した座標変換を行う必要があるだろう。

### 5.4.2 船側波高計測への適用

水中表面反射法で得られた船側波形分布を、マイクロメーターを用いた目視による点計測値と比較した。本計測で使用した回流水槽は流れの状態が時間に依存して若干変化するので、約10分間隔で4回計測した。その結果をFig. 5.8(a)~(d)に示す。1回の計測におけるサンプルリング時間は5秒とし、比較のための点計測は画像計測との時間差がなるべく少なくなるように速やかに行った。

船首近傍を除く計測点で、本方法で得られた計測値の平均値と点計測による値のずれは0.5mm以内となった。船側波高そのものの変動が大きくなる船首近傍の一点では約1.7mmの

ずれが生じている箇所もある。点計測は目視によるため細かく変動する波形では正確な波高を計測することが困難となる。この領域では、回流水槽の性能の限界による波面の変動が大きくなるため、厳密には目視による計測ではなく時系列の平均値を計測できる点計測法との比較が必要であると思われる。

ところで、このような画像計測法の精度は一般に画像の分解能に依存するが、本方法では、その原理から物体表面近傍における水面形状が大きな影響を及ぼすものと考えられる。物体表面と水面の交わる部分を微視的に観察すると、表面形状の影響により水面は複雑な形となっている。

マイクロメーターによる点計測では、波面の最も盛り上がった位置（船側に近い位置）と、船体から少し離れた位置の両方を船側波高として示しているが、船側に近い位置の波高と画像計測による値が良い一致を示していることから、本方法では表面張力の影響も含めた浸水部分の波高を計測しているものと考えられる。

以上に示すように、いずれの可視化方法で得られる画像も、単純なしきい値法の適用で良好な結果を示すことがわかった。しかし、画像の端部など輝度分布の不均一性が顕著になる部分では、計測値の変動が大きくなる。

今後、より広範囲の波面に本方法を適用することを考える場合、照明条件の維持が困難になることが予想される。現状では2値化しきい値で精度良く計測できる可視化方法であるが、その時には多階調画像の特徴を利用した解析方法の適用を考慮に入れなければならないだろう。

## 5.5 考察

点計測では多大な時間と労力を要する広域波面形状の定量計測を非接触かつ簡便に行うことを目的として、波面（および船側波形）の可視化画像の画像処理による手法を開発し、船体まわりの波面形状の計測に応用して手法の適用性および精度を評価した。

広域波面の可視化方法としては、気相側に散乱物質（ドライアイスミスト）を散布し、気相界面を可視化することによって波面を可視化する気相界面可視化法を用いた。

船側波高の可視化方法としては、回流水槽側面の観察窓から水中を通して適当な角度で船体を照射すると、光線の大部分が水面で全反射し、船体の浸水面のみが明瞭に可視化されるという現象を利用した水中表面反射法を用いた。

本研究で用いたこれらの可視化方法は、従来の同目的の手法（アルミ箔粉法等）と比較して簡便で、しかも波面の形状を非常に明瞭に可視化できることを確認した。そのため解析方法としては、解析速度を優先した2値化しきい値の判定による簡便な方法を用いた。さらに船側波高の計測では、船体表面のオフセットが既知であることを利用して、3次元表面上の船側波高の実座標値を簡便な変換によって求める方法を適用した。

気相界面可視化法を用いた計測では、LLS光面の周辺輝度の不足により端部で波形の分布にバラつきが発生するが、端部を除く領域では、簡単なしきい値法でも安定した計測結果を得ることができた。光面の輝度が弱くなる左右の端部では最大約2.0mmの誤差が生じているが、輝度の安定した中央部では計測誤差は量子化誤差とほぼ同じレベルの1.0mm以内に納まることから、本方法の有用性が確認された。端部で大きな誤差が発生する要因としては、広角レンズの歪曲収差の影響も考えられる。今後は使用する光学系の特性を考慮した座標変換を適用する必要があると思われる。また、界面の部分を微視的に観察すると輝度は連続的に変化しているため、より高精度の計測に適用する場合には2値化しきい値に依存しない画像解析方法を適用する必要があるだろう。

水中表面可視化法による船側波高の計測方法を回流水槽における模型船の船側波高計測に適用したところ、船首近傍の一点を除く計測点で、本方法で得られた計測値と点計測による値のずれは0.5mm以内に納まった。比較のために用いたマイクロメーターによる点計測では、波面の最も盛り上がった位置を計測しているため、本方法では表面張力の影響も含めた浸水部分の波高を計測しているものと考えられる。

以上に示すように、いずれの可視化方法で得られる画像も、単純なしきい値法の適用で良好な結果を示す。しかし、画像の端部など輝度分布の不均一性が顕著になる部分では、計測値の誤差が大きくなる傾向にあるのも事実である。今後、より広範囲の計測および、より高精度の計測に本方法を適用することを考える場合、多階調画像の特徴を利用した解析方法の適用を考慮に入れなければならないだろう。

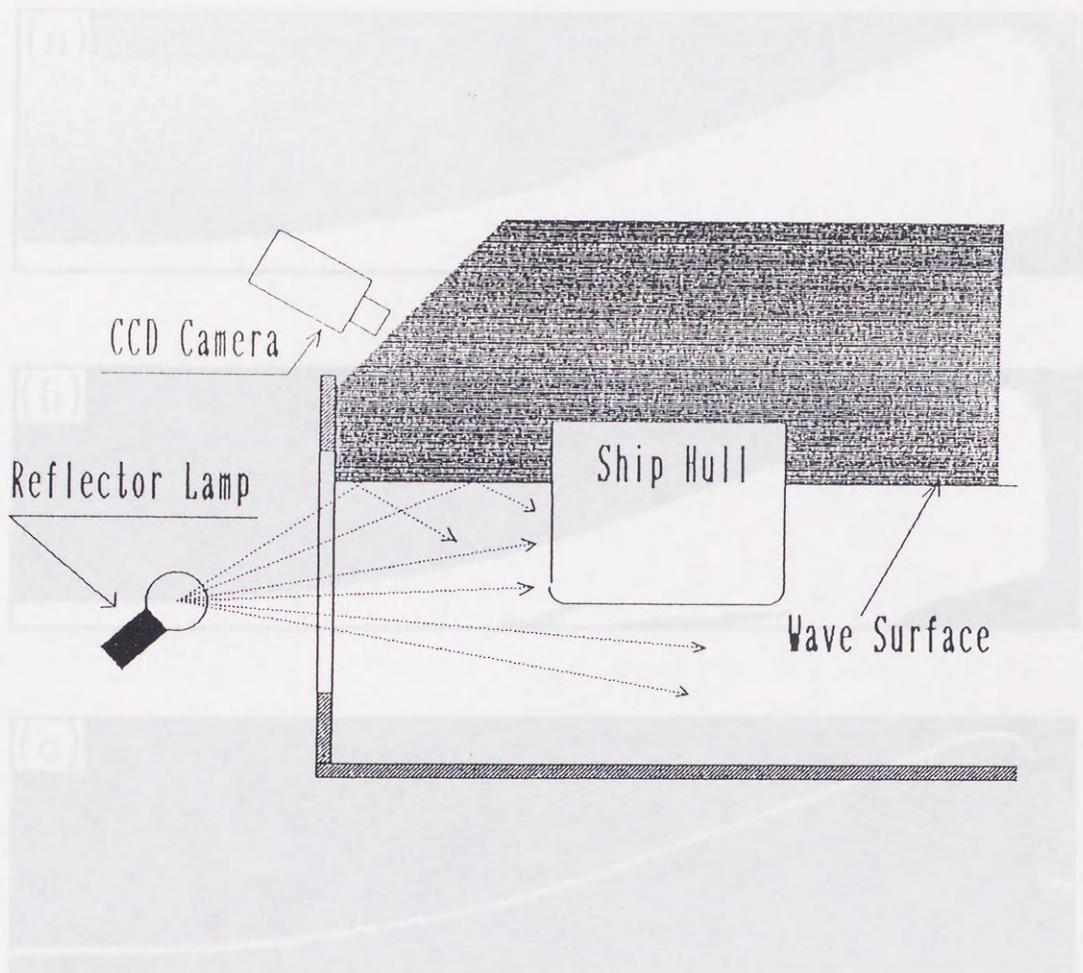


Fig. 5.3: Schematic view of wetted-surface illumination system

Fig. 5.4: Processing sequence of wetted surface illumination system: (a) Original image, (b) threshold image, (c) Edge detection

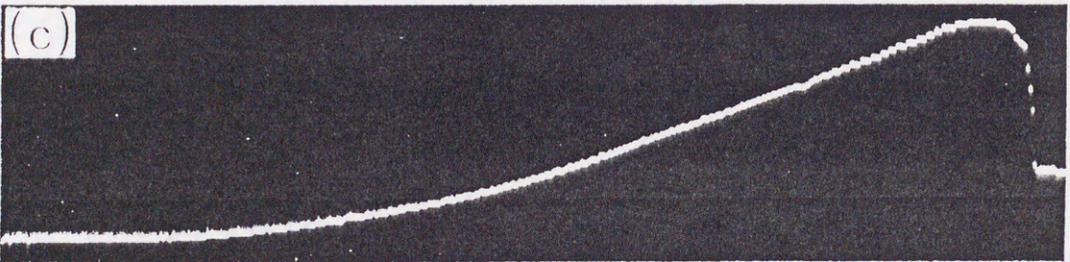
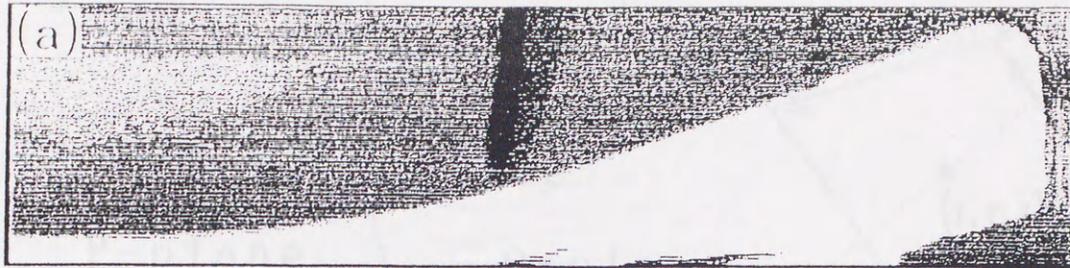


Fig. 5.4: Processing sequence of wetted surface illumination method: (a) Original image, (b) Binalized image, (c) Edge detection

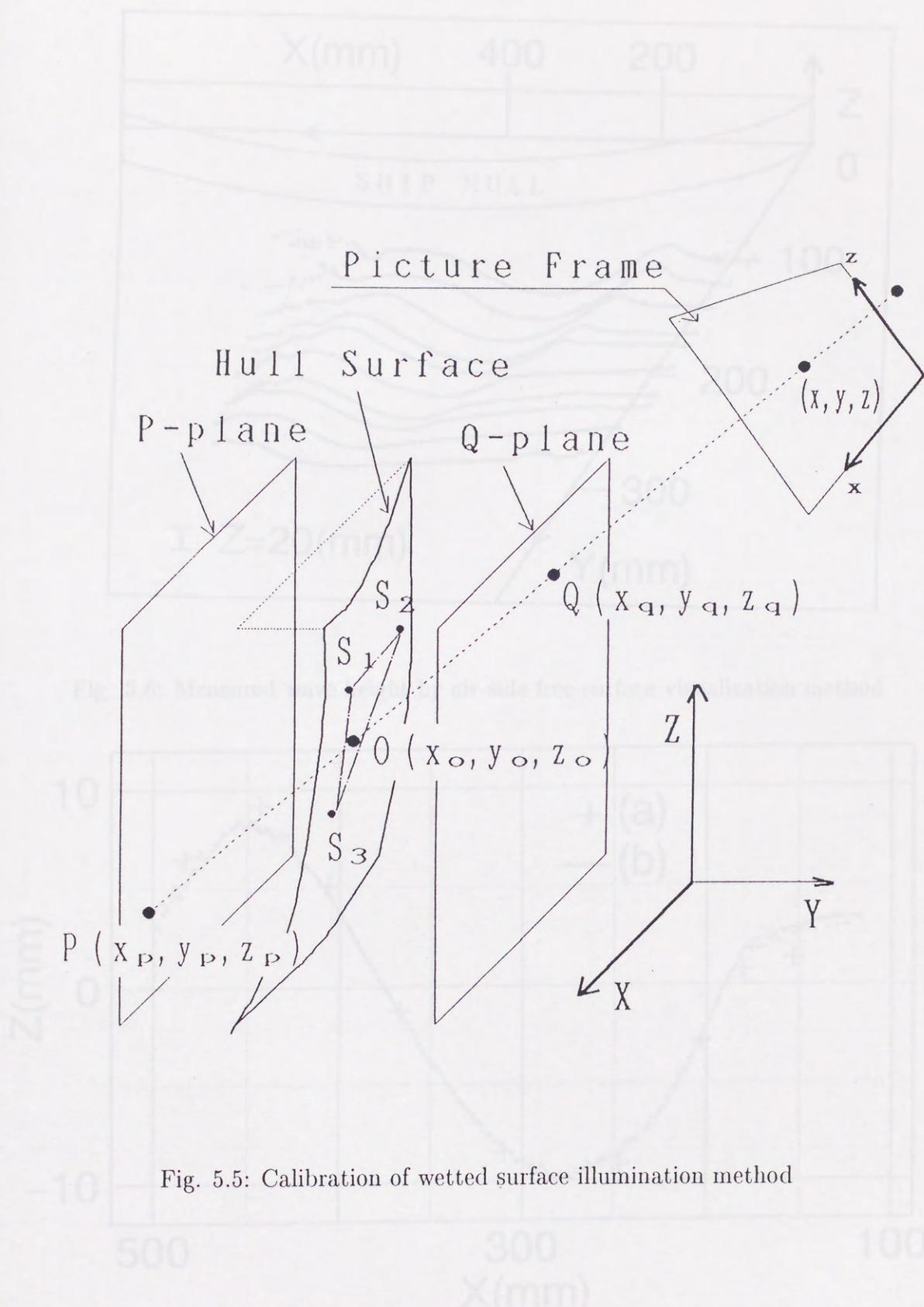


Fig. 5.5: Calibration of wetted surface illumination method

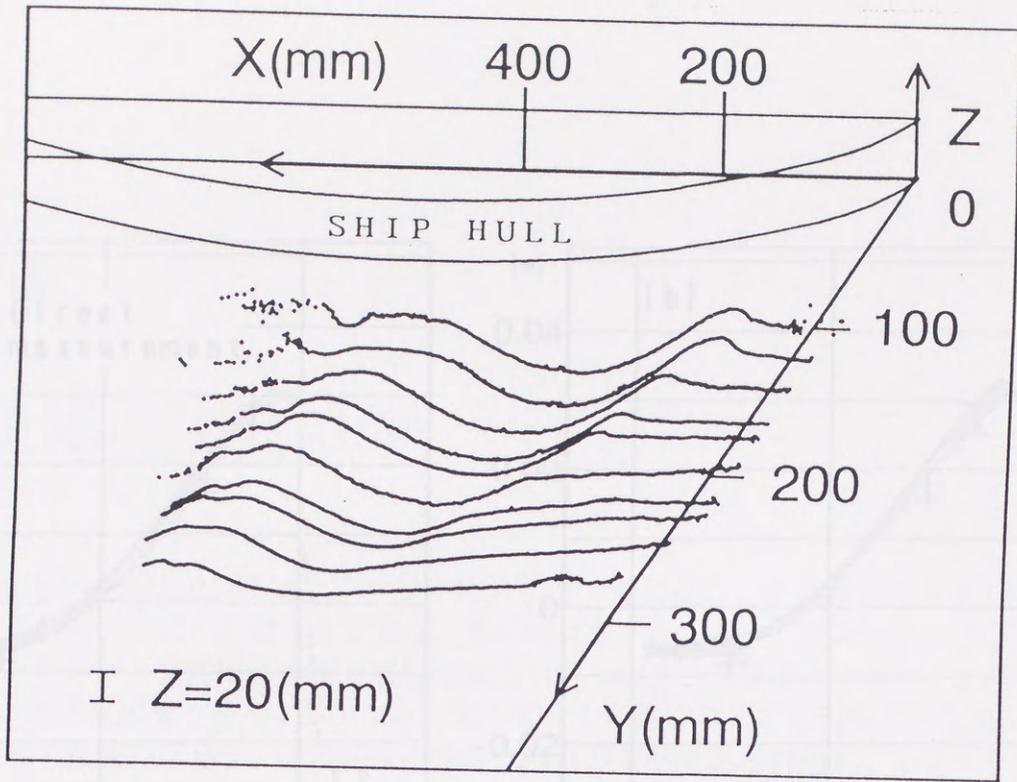


Fig. 5.6: Measured wave height by air-side free-surface visualization method

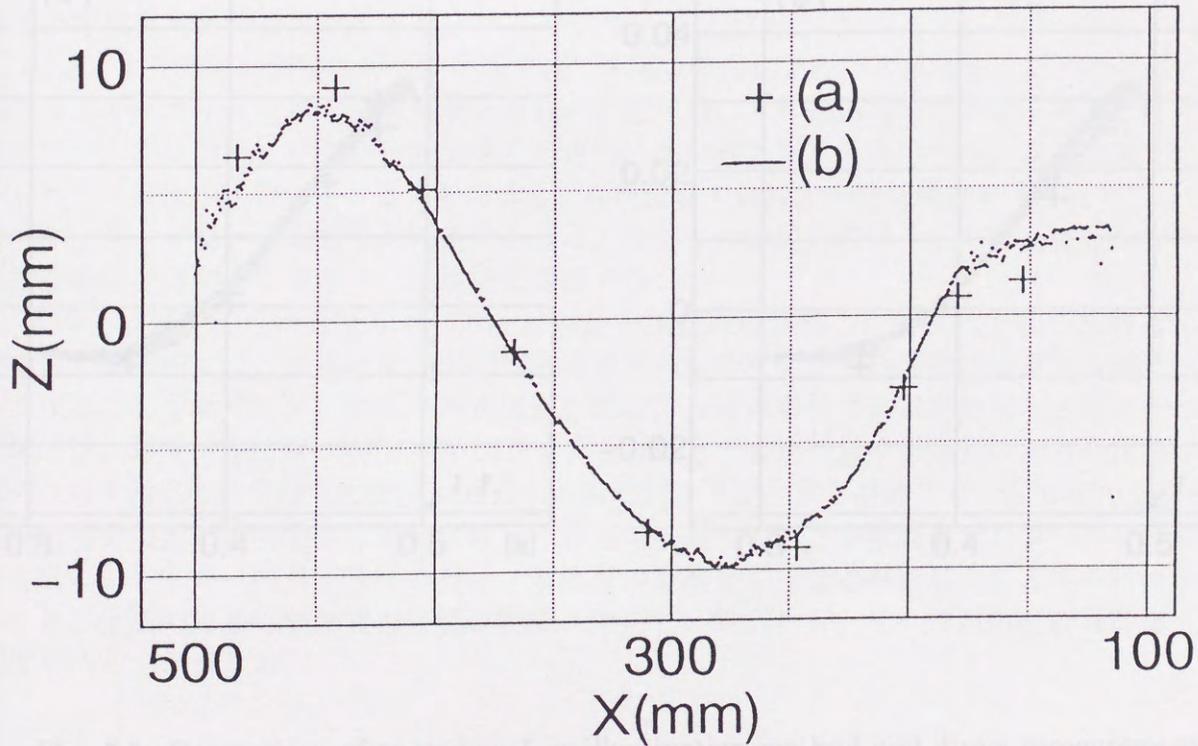


Fig. 5.7: Comparison of air-side free-surface visualization method and direct measurement

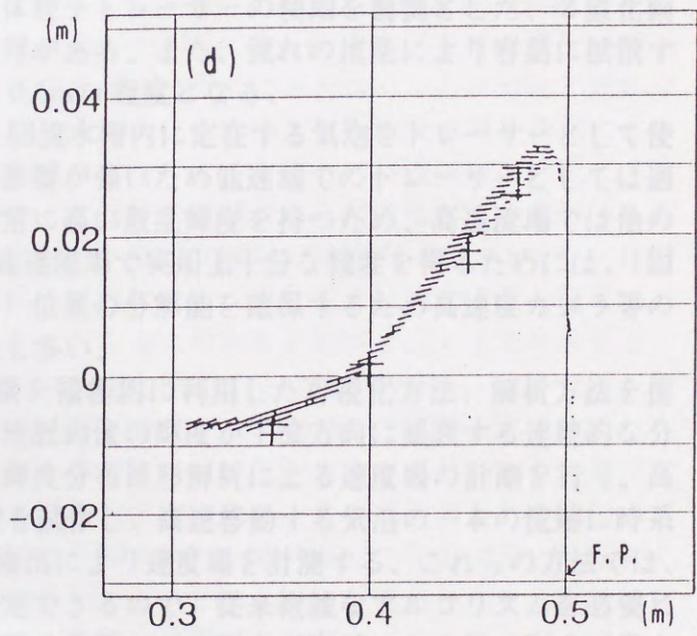
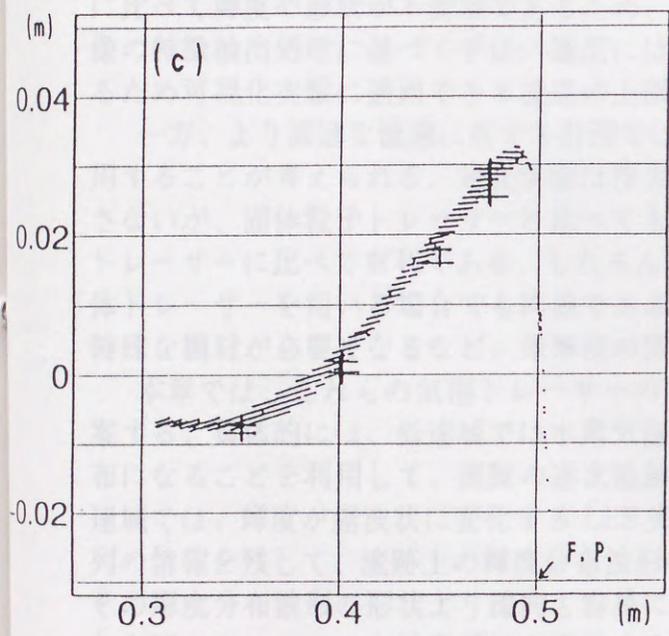
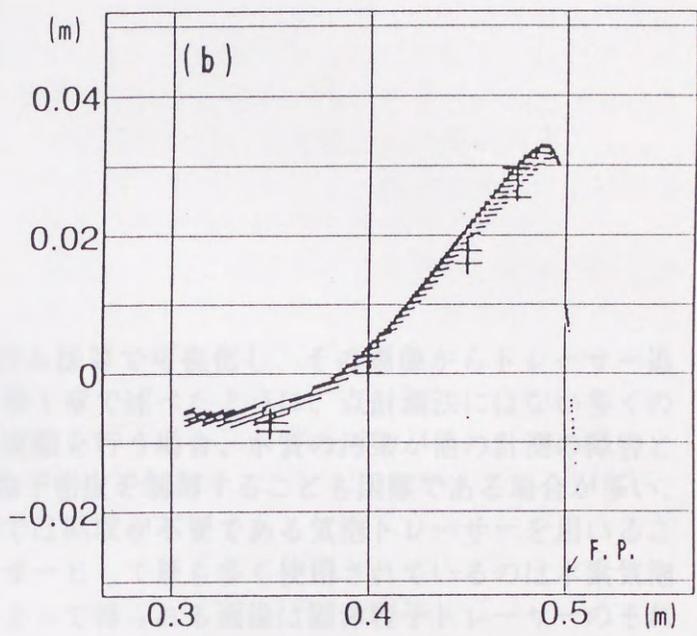
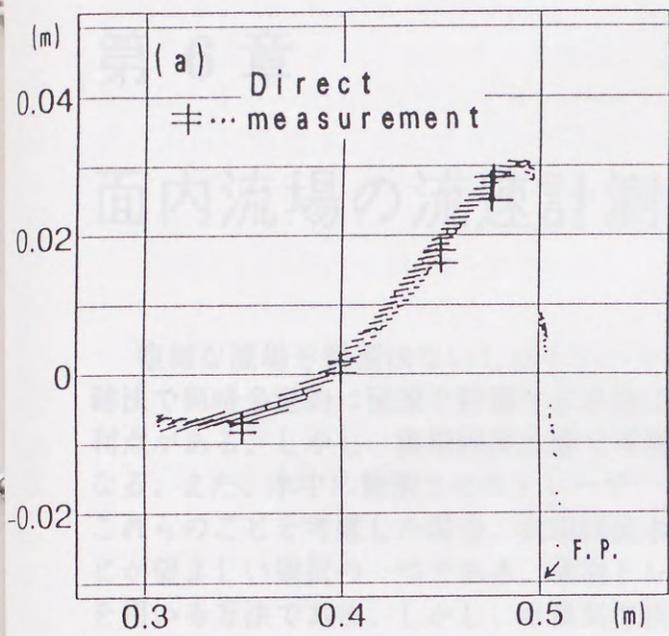


Fig. 5.8: Comparison of wetted surface illumination method and direct measurement

## 第 6 章

### 面内流場の流速計測

複雑な流場を懸濁法ないしはトレーサー注入法等で可視化し、その画像からトレーサー追跡法で同時多量的に流速を計測する手法は、第 1 章で述べたように、点計測法にはない多くの利点がある。しかし、汎用回流水槽で可視化実験を行う場合、水質の汚染が他の計測の障害となる。また、水中に懸濁させたトレーサーの粒子密度を制御することも困難である場合が多い。これらのことを考慮した場合、汎用回流水槽では回収が不要である気泡トレーサーを用いることが望ましい選択の一つである。気泡トレーサーとして最も多く使用されているのは水素気泡を用いる方法である。しかし、水素気泡法によって得られる画像は固体粒子トレーサーのそれに比べて輝度や形状が不安定であるため、固体粒子トレーサーの使用を前提とした、2 値化画像の特徴抽出処理に基づく手法の適用には限界がある。また、流れの攪乱により容易に拡散するため可視化実験に適用できる流速の上限は  $0.5\text{m/s}$  程度となる。

一方、より高速な流速に対する計測では、回流水槽内に定在する気泡をトレーサーとして使用することが考えられる。定在気泡は浮力の影響が強いため低速域でのトレーサーとしては適さないが、固体粒子トレーサーと比べても非常に高い散乱輝度を持つため、高速流場では他のトレーサーに比べて有利である。もちろん、高速流場で実用上十分な精度を得るためには、(固体トレーサーを用いる場合でも同様であるが) 位置の分解能を確保するため高速度カメラ等の特殊な機材が必要となるなど、未解決の問題も多い。

本章では、これらの気泡トレーサーの特徴を積極的に利用した可視化方法、解析方法を提案する。具体的には、低速域では水素気泡の流脈画像の輝度が下流方向に減衰する連続的な分布になることを利用して、流脈の逐次追跡と輝度分布波形解析による速度場の計測を行う。高速域では、輝度が鋸波状に変化する LLS 光源を試作し、高速移動する気泡の一本の流跡に時系列の情報を残して、流跡上の輝度分布波形の検出により速度場を計測する。これらの方法では、その輝度分布波形の形状より流向も容易に判定できるので、従来複雑なアルゴリズムを必要とした同一トレーサーの対応付けや交差する流跡の分離などの判定が容易になる等の利点が考えられる。上記の方法を船体後部の流場計測に適用し、気泡トレーサーの面内流側場計測への適用性について検討する。

## 6.1 気泡トレーサーによる可視化方法

トレーサー追跡法では、通常は固体トレーサーが用いられる。材質としては、ポリスチレンやラテックスの小球が一般的である。特にポリスチレン粒子は安価で入手が容易であるため使用例も多い [7],[5],[19]。可視化には、アルミ粉を用いる場合も多いが、アルミ粉は反射光の輝度が一定でないため、トレーサー追跡法には適していない。実際に用いられる粒子トレーサーの比重は、1.0 ~ 1.04 程度まで様々であり、粒子径についても目的に応じて多岐にわたっているが、適用に当たっては、まず粒子の流れに対する追従性について考慮する必要がある。

一様流れでは、流体と密度が等しく、十分に粒子径が小さいレーザー粒子は流れにほぼ完全に追従するが、加速流れでは追従性は粒子密度および粒子径に依存する。

加速流れにおいて粒子に作用する力は粒子を加速する力と流体抵抗であるが、流体抵抗がストークスの法則に従うものとする、粒子の比重が流体と等しい場合でも、粒子径が大きいほど粒子の加速時間が長くなり、また粒子の比重が小さいほど追従性が高くなることが知られている [2]。しかし、粒子の比重を極端に小さくすると浮力の影響が出てくることが考えられる。一方、粒子径を極端に小さくすると、トレーサーの識別が困難になる。

現在の映像機器（写真、ビデオ等）の性能を考慮する場合、固体トレーサーとして使用できるトレーサー径の最小値は約 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  程度である。また、この大きさでは浮力の影響を無視できないので、密度は流体密度となるべく等しくすることが前提となる。

トレーサー追跡法のもう一つの問題点として、流跡画像の個別化の困難さがある。円柱まわりの流れ ( $Rn=3200$ ) を直径約 200  $\mu\text{m}$  のポリスチレン粒子で可視化した写真の一例を Fig. 6.1 に示す。露光時間  $\Delta t$  を 1/125 sec から 1/4 sec まで変化させて撮影すると、露光時間の短い場合では、個々のトレーサーの識別が可能であるが、露光時間が長くなるにつれて流跡が重なり合うため粒子の識別が困難になる。また、固体トレーサーを汎用回流水槽で使用するのを考える場合、他の計測への影響も考慮しなければならない。例えば熱膜流速計や翼車流速計等のセンサー部は、流体中の懸濁物の衝突により容易に破損または精度低下等の悪影響を被る。そこで、計測後は回収の必要が生じてくるが、小型回流水槽で実験的にポリスチレン粒子を懸濁させて回収を試みたところ、水の全交換を数回繰り返しても完全に粒子を取り除くことはできなかった。大型の回流水槽で計測毎に 20t から 40t の水を数回繰り返して交換することは実際には困難であり、また濾過装置にも特別なものを使用する必要がある。

以上で述べたように、固体トレーサーを汎用水槽で使用するには様々な制限がある。そこでもう一つの選択枝として気泡トレーサーの使用が考えられる。気泡をトレーサーとして使用する可視化方法の一つとしては水素気泡法がある。水素気泡法では、水中に設置された電極に直流電圧をかけたときに陰極側から発生する水素気泡群をトレーサーとして利用する。陰極側の電極としては、通常は白金やタングステンの細線 (50 ~ 200  $\mu\text{m}$ ) が用いられる。直流電圧を加えると流脈を、パルス電圧を加えるとタイムラインを得ることができる。

梯子型電極とパルス電圧発生装置を用いる可視化装置の概略図を Fig. 6.2 に示す。水槽の上流側に梯子型の陰極線を設置し、縦線の部分だけを暴露して他の部分を絶縁する。この状態でパルス電圧発生器により電圧をかけると Fig. 6.2 に示すように棒状の気泡群が発生する。ここで水平方向から流向と平行にレーザー光面を入れることにより、気泡群と光面の交わる部分があたかもトレーサーのように可視化される。この方法では、パルス間隔及び陰極線の間隔の変更によって粒子群の密度を制御することができ、しかも微小な気泡群で構成されているため

追随性は非常に良好で、浮力の影響も少ないという利点がある。

水素気泡法で得られた画像の一例を Fig. 6.3 に示す。長さ 1m の船体模型の船尾近傍の流れの一部を可視化した。上流から整然と並んだ細長いトレーサーが画面のほぼ全体に分布している。また、各トレーサーは紡錘型の形状をなしており、同一流脈上の別のトレーサーと非常に低い輝度レベルで連続している。このように水素気泡法による画像は、輝度分布が流脈上で連続的に変化し、低い輝度レベルでつながっているという特徴を持つ。

トレーサーが流脈上に整然と並んでいるため、トレーサーの分離、複数画面上での同一トレーサーの同定は、比較的簡単である。しかし、2 値化した場合の輪郭は不安定なものとなる。水素気泡は、ポリスチレン粒子に比べて輝度が高く、また回収の必要もないため、大型の水槽での実験に適している。しかし水素気泡法には、乱れの大きな流場では容易に拡散してトレーサーの個別化が困難になるという欠点がある。この限界は模型船の船尾流場の場合で、 $U=0.3 \sim 0.5 \text{ m/s}$  の付近にある。それ以上の速度域では、何等かの拡散しないトレーサーを用いる必要がある。

ところで回流水槽では、水流が循環するために、その流れが湾曲する部分で気泡に向心力が生じ、ある速度以上になると一度発生した気泡はそのまま水中に定在してしまうという現象がある。この気泡は定在気泡と云われ、微小で気泡の浮上速度が遅い気泡のみが残されるため、トレーサーとしての利用が可能であると考えられる。定在気泡は、回流水槽が高速で運転される場合には自由表面での巻き込み等の原因で自然に発生するが、数が少ないので、可視化に用いるには回流水槽下流側に気泡を発生する装置を設置して強制的に気泡を水中に混入させる。定在気泡を用いた可視化装置の概略図を Fig. 6.4 に示す。回流水槽計測部の下流側に長さ 20cm、直径 3cm のセラミック多孔体を設置し、コンプレッサーから高圧空気 ( $5.0 \text{ kg/cm}^2$ ) を送り込むことによって大量の気泡を発生させる。水中に送り出された気泡は、回流水槽を循環して上流から出現する。その気泡に対して水平方向からレーザー光面を照射することによって任意の断面における気泡の流跡を可視化する。

定在気泡をトレーサーとして用いるには、十分な量のトレーサーが得られることが必要であるが、回流水槽内にどの程度気泡が定在するかを調べた結果が Fig. 6.5 である。これは回流水槽中央部の  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  の水平面内を 1 秒間に通過する気泡の数を、ビデオ画像からカウントしたものである。気泡を十分に注入した後、コンプレッサーを止めた直後から 2 分までは、約 100 個のトレーサーがみられる。その後急速に減少するが、4 分以降は 20 個のトレーサーが定在していることがわかる。このことは、十分な量の気泡を注入すれば長時間にわたって計測が可能であることを示している。また、回流水槽の運転を止めればこの気泡は消滅するので、汎用の回流水槽で使用するには非常に有益なトレーサーであると考えられる。

さて、定在気泡トレーサーが適用できるのは、流速が  $1.0 \text{ m/s}$  程度からであるが、こうした速度域では、映像機器のサンプリング速度に 毎秒 60 画面という制限があるため、連続する複数の画面でトレーサーを追跡することは困難である。このような場合には、LLS 光源の光学系に Light Chopper を設けて、1 枚の画像に複数時刻のトレーサー像を撮影する手法が有効である。

本研究では、トレーサー流跡の個別化および方向の決定を容易にするために、LLS 光源の輝度を鋸波状に変化させて 1 つの画面上に複数時刻の流跡を示す輝度分布波形を残す方法を用いる。Fig. 6.6 にその概念を示す。上側が LLS 光源の輝度変化、下側が可視化された流跡を模式化したものである。輝度の高い部分を濃色で示す。通常の Light Chopper では、輝度を

(a) に示すように矩形波状に変化させるのに対して本方法では、(b) に示すようにある幅で輝度を鋸波状に変化させることで、複数時刻のトレーサーの位置の情報だけでなく、その方向および対応づけを決定するための情報も残すことができる。

本方法で用いる光学系の概略図を Fig. 6.6 に示す。LLS 光源の光学系のレーザー光源とシリンダリカルレンズの間に、光線の透過率を回転フィルターで変化させる Beam modulator を設置し、レーザー光面に鋸波状の輝度変化を与える。この光面を水槽床面と平行に設置して面内を通過する気泡を可視化する。任意の輝度変化をレーザー光に与える Beam modulator の構造を Fig. 6.8 に示す。本研究では透過率が円周方向に変化する回転円盤として、透明シートの重ね合わせで透過率を調整する。

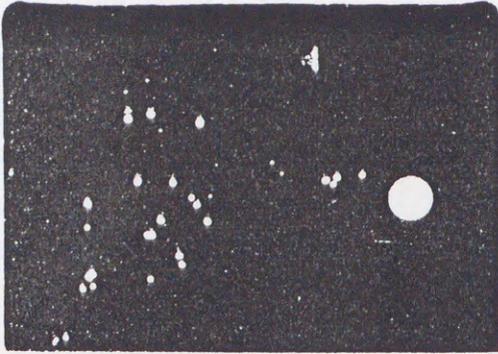
この方法で得られた流跡画像の一例を、Fig. 6.9 に示す。本研究で用いた Beam modulator は、透過率が階段状に変化するが、CCD カメラの応答遅れ等の原因により、撮影された流跡画像の輝度分布はほぼ連続的な鋸波状の輝度分布となる。

水素気泡トレーサーと定在気泡トレーサーの特徴を、粒子が十分に小さくかつ散乱輝度が高い理想的な固体トレーサーと比較した時の特徴を Table 6.1 に示す。Table 6.1 からわかるように、気泡トレーサーは適用する流場の状態、流速で水素気泡、定在気泡の選択が異なる。本研究では、水素気泡法が適用可能な  $U=0.3\text{m/s}$  までの流場を低速流場、それ以上の定在気泡法が有利な流場を高速流場とし、両者を相補的に用いるという観点からそれぞれに適する解析方法を適用する。

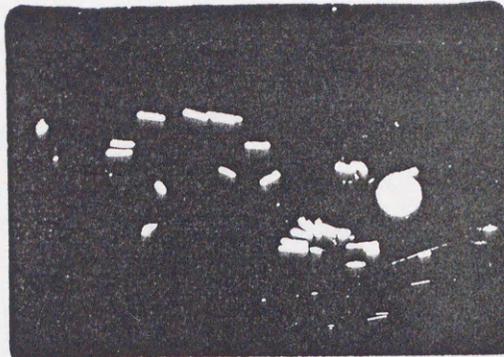


Fig. 6.1. Image of particle tracks (a)  $\Delta t = 1/10 \text{ sec}$ , (b)  $\Delta t = 1/5 \text{ sec}$ , (c)  $\Delta t = 1/20 \text{ sec}$ , (d)  $\Delta t = 1/10 \text{ sec}$ , (e)  $\Delta t = 1/5 \text{ sec}$ , (f)  $\Delta t = 1/5 \text{ sec}$ .

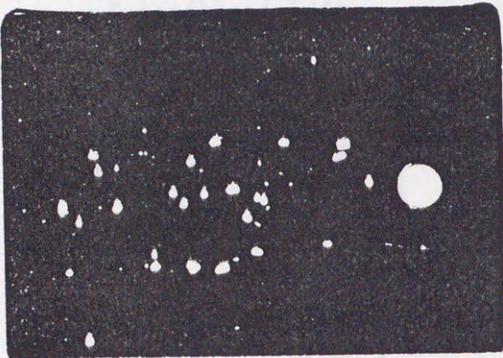
(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

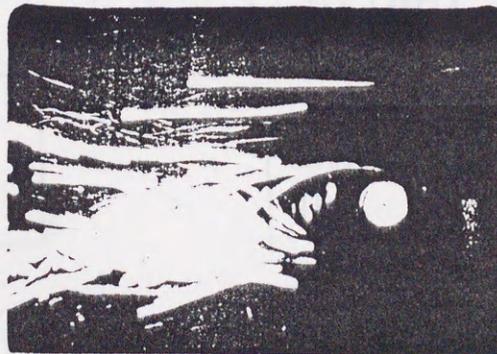


Fig. 6.1: Images of particle streaks behind a cylinder, (a)  $\Delta t = 1/125$  sec, (b)  $\Delta t = 1/60$  sec, (c)  $\Delta t = 1/30$  sec, (d)  $\Delta t = 1/15$  sec, (e)  $\Delta t = 1/8$  sec, (f)  $\Delta t = 1/4$  sec

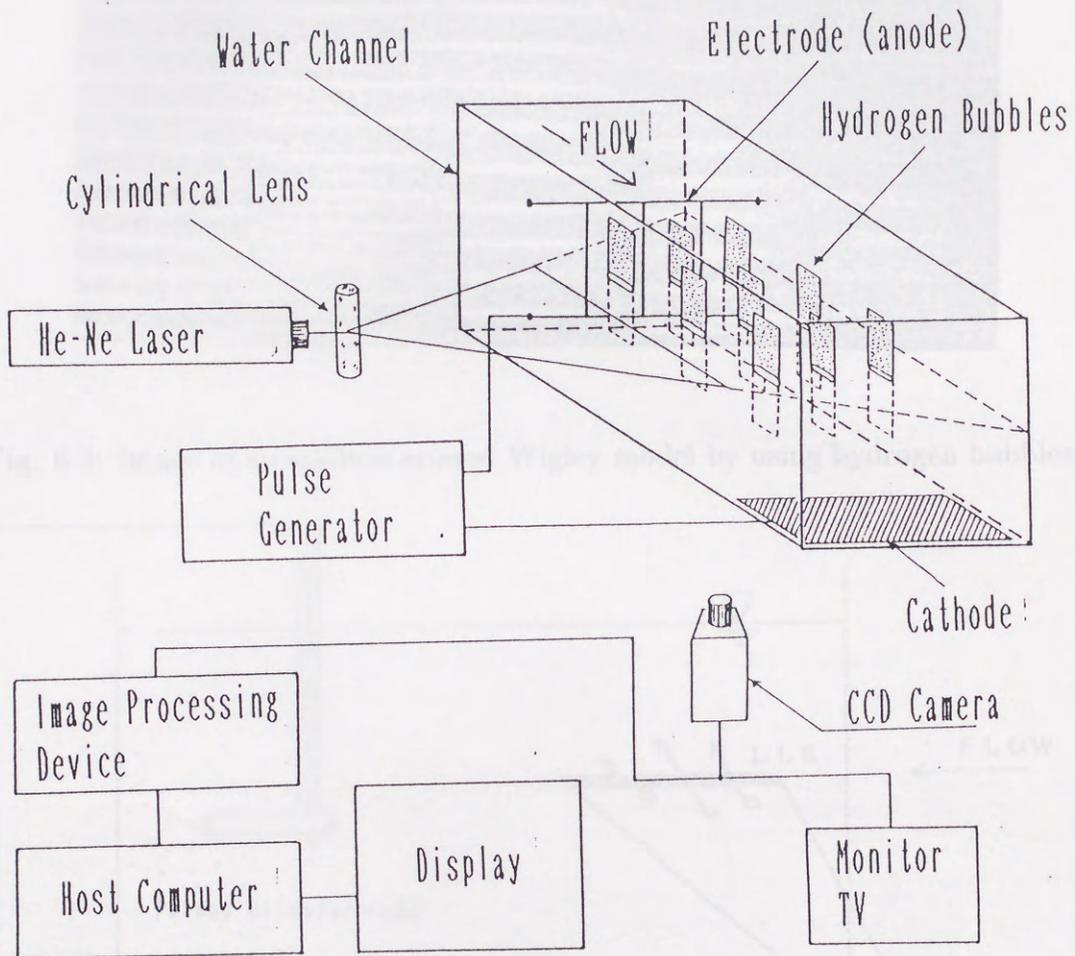


Fig. 6.2: Schematic arrangement for flow visualization and image processing by using hydrogen bubbles

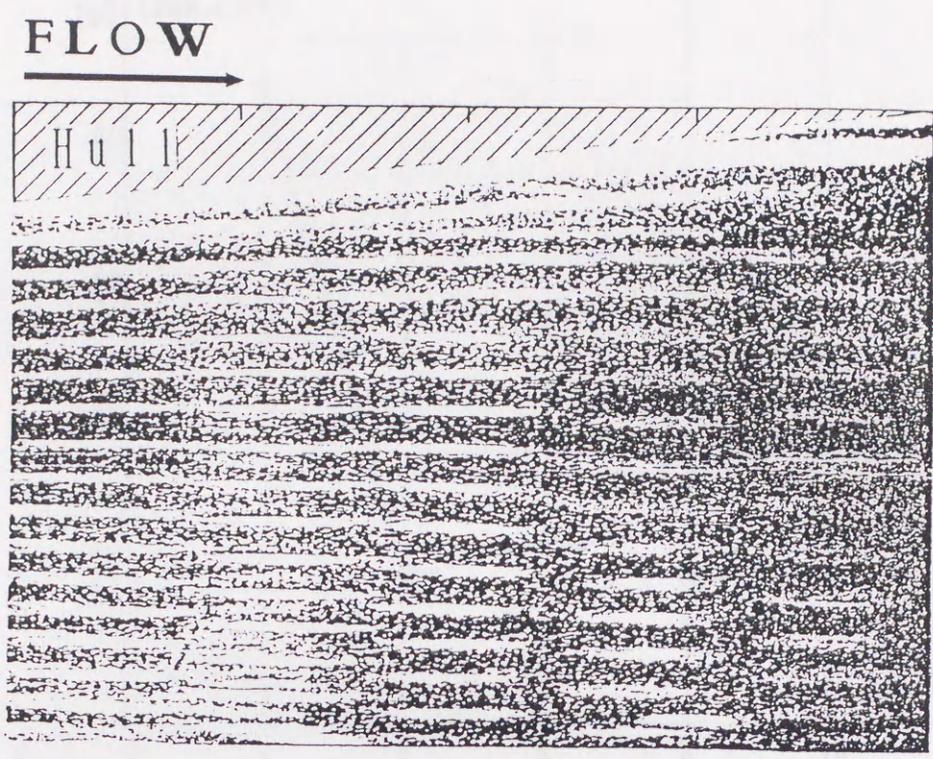


Fig. 6.3: Image of streaklines around Wigley model by using hydrogen bubbles

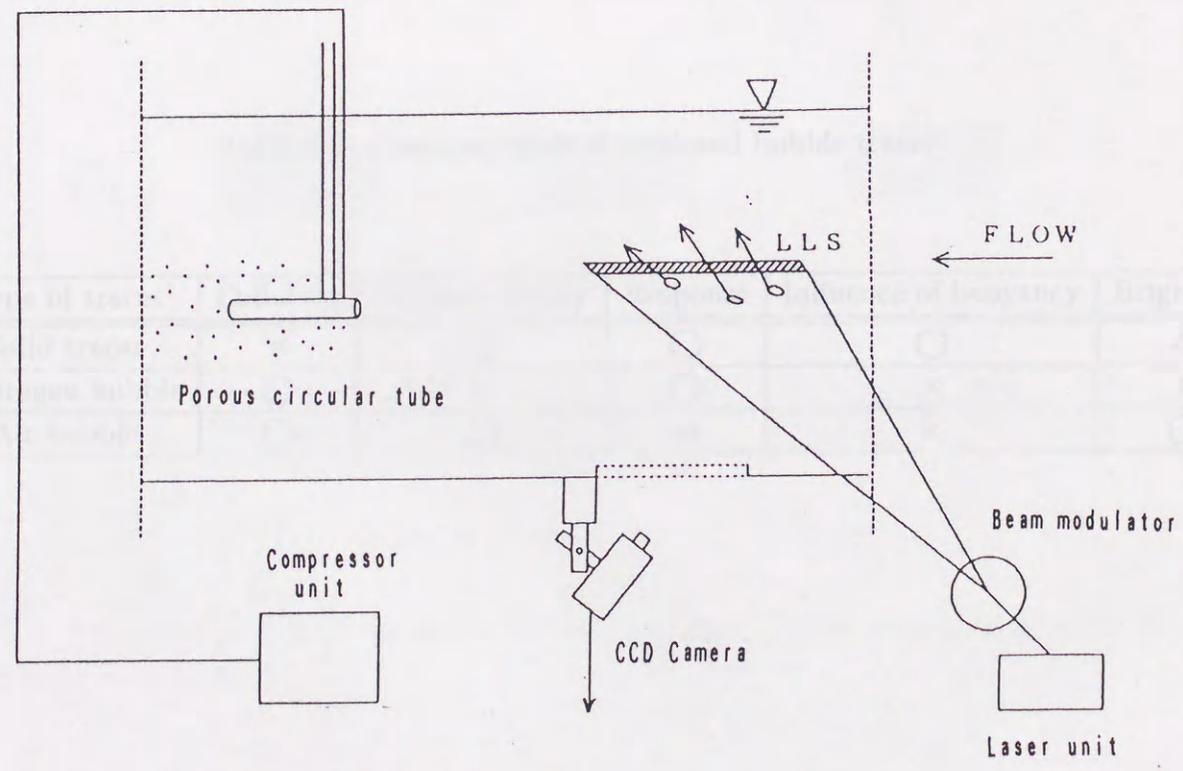


Fig. 6.4: Schematic arrangement of flow visualization system by using air bubbles

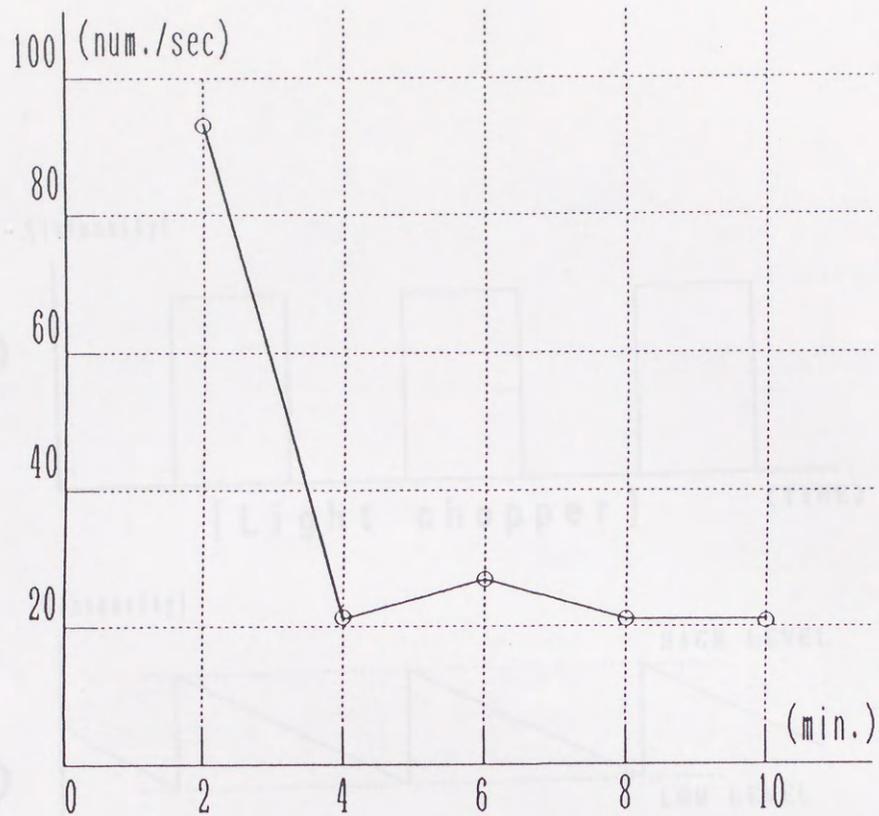


Fig. 6.5: Variation of number of air bubbles in circulating water channel

Table 6.1: Characteristics of solid and bubble tracer

Type of tracer	Pollution	Critical velocity	Response	Influence of buoyancy	Brightness
Solid tracer	×	○	○	○	△
Hydrogen bubble	○	×	○	×	×
Air bubble	○	○	△	×	○

Fig. 6.5. Schematic images of intensity profile of streakline, (a) by using light chopper; (b) by using beam modulator

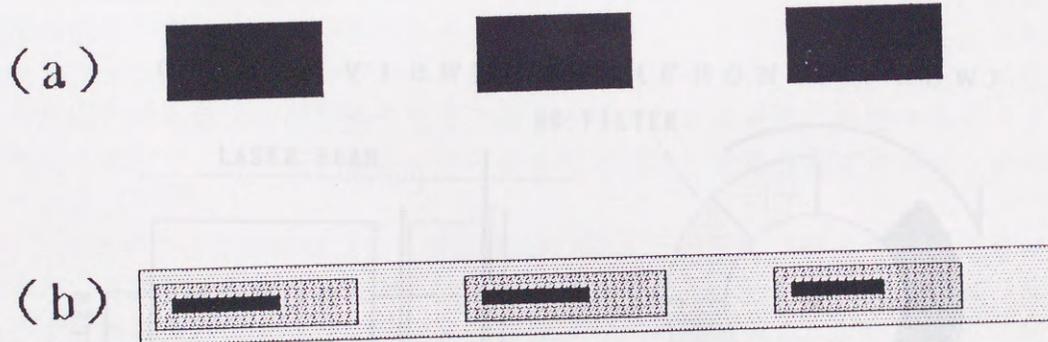
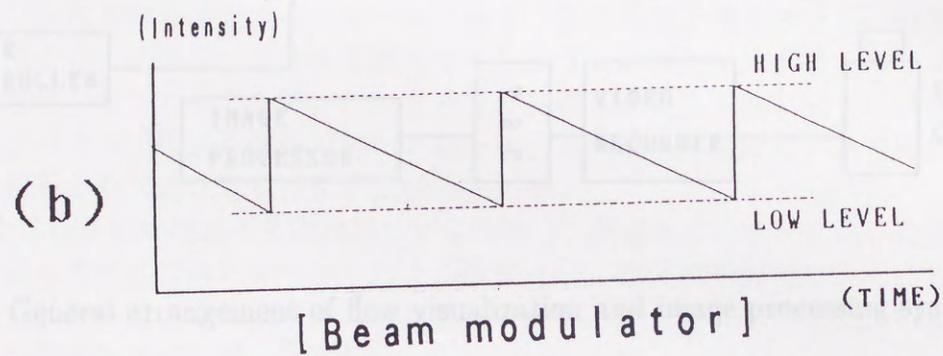
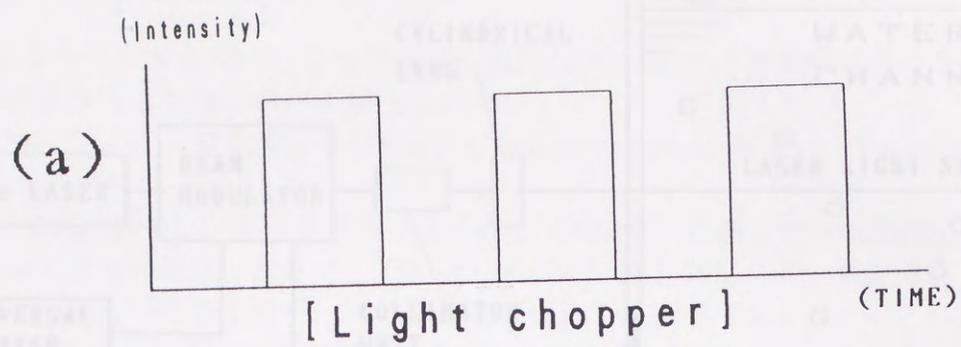


Fig. 6.6: Schematic images of intensity profile of streakline, (a) by using light chopper, (b) by using beam modulator

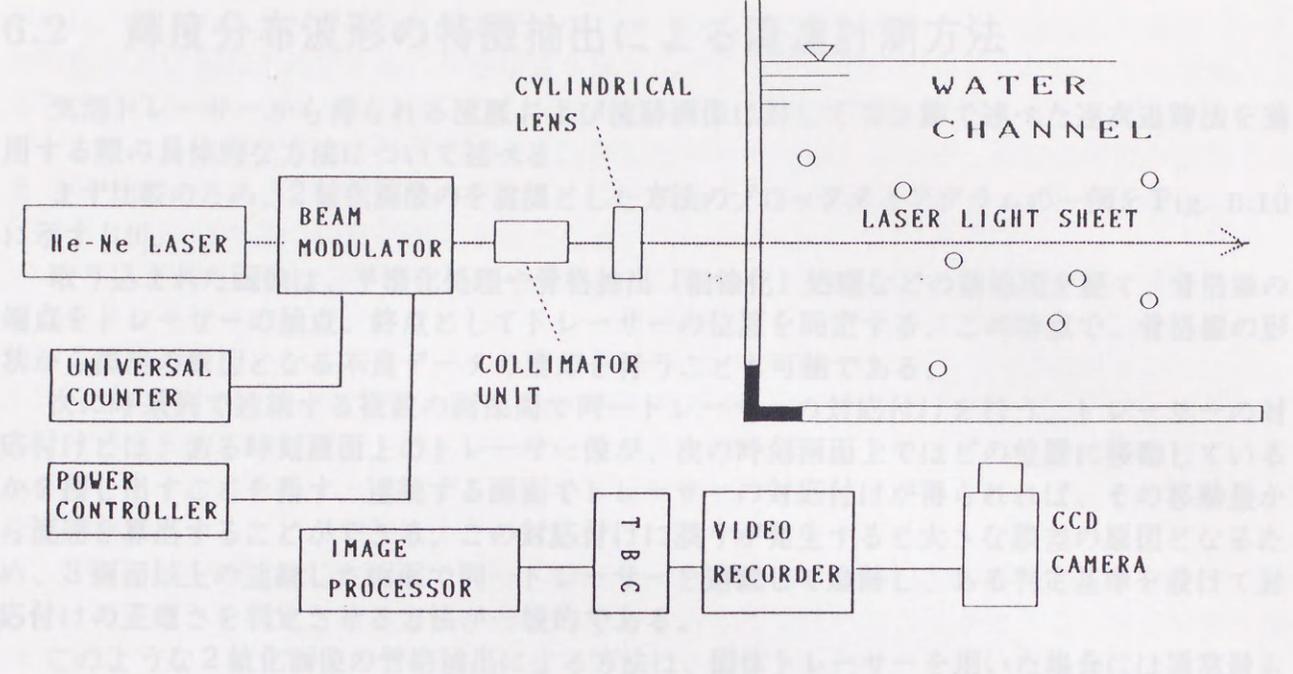


Fig. 6.7: General arrangement of flow visualization and image processing system by using air bubbles

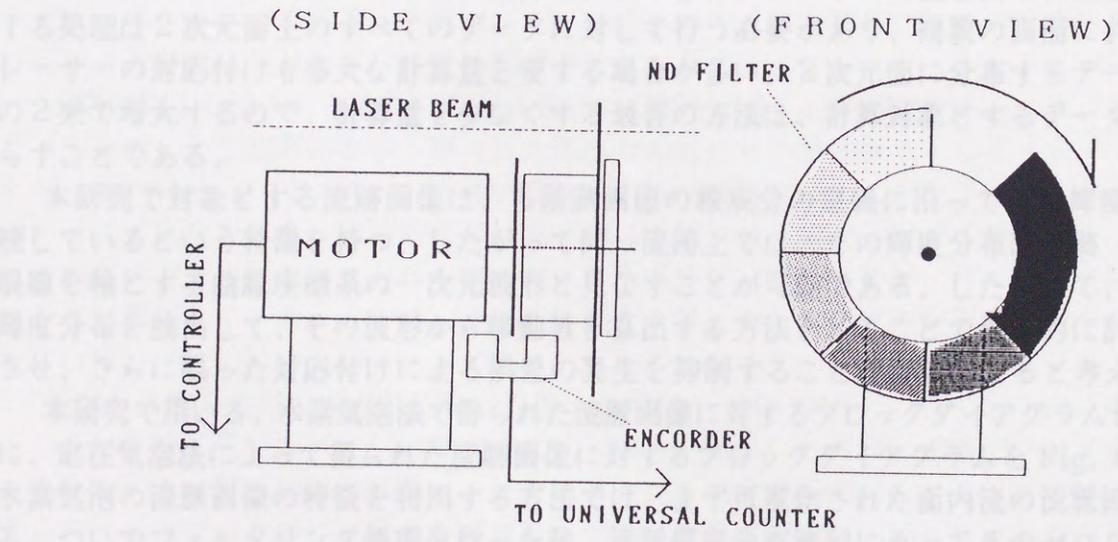


Fig. 6.8: Schematic view of beam modulator

## 6.2 輝度分布波形の特徴抽出による流速計測方法

気泡トレーサーから得られる流脈および流跡画像に対して2.3節で述べた逐次追跡法を適用する際の具体的な方法について述べる。

まず比較のため、2値化画像のを前提とした方法のブロックダイアグラムの一例をFig. 6.10に示す[19]。

取り込まれた画像は、平滑化処理や骨格抽出(細線化)処理などの前処理を経て、骨格線の端点をトレーサーの始点、終点としてトレーサーの位置を同定する。この時点で、骨格線の形状から誤差の原因となる不良データの棄却を行うことも可能である。

次に時系列で連続する複数の画像間で同一トレーサーの対応付けを行う。トレーサーの対応付けとは、ある時刻画面上のトレーサー像が、次の時刻画面上ではどの位置に移動しているかを捜し出すことを指す。連続する画面でトレーサーの対応付けが得られれば、その移動量から流速を算出することができる。この対応付けに誤りが発生すると大きな誤差の原因となるため、3画面以上の連続した画面で同一トレーサーを連続して追跡し、ある判定基準を設けて対応付けの正確さを判定させる方法が一般的である。

このような2値化画像の骨格抽出による方法は、固体トレーサーを用いた場合には通常最もよく用いられるが、気泡トレーサーによる画像では、輪郭が不鮮明であることが多いため、最適な2値化しきい値の選定は多くの場合困難であり、また解析結果はしきい値に強く依存するため精度に関する客観的評価が難しい。

輪郭が不鮮明な画像に対しては、相関法の適用が考えられる。しかし、この方法は空間分解能が低いという欠点があり、また雑音成分に敏感なため過誤ベクトルの棄却にかなり工夫を要する。2値化画像の特徴抽出を前提とした方法では、相関法に比べて一般的に計算量は少ない上、空間分解能も高いという特徴がある。しかし、トレーサーの重心あるいは骨格線を抽出する処理は2次元面上のすべてのデータに対して行う必要があり、複数の画面における同一トレーサーの対応付けも多大な計算量を要する場合が多い。2次元面に分布するデータはサイズの2乗で増大するので、計算量を少なくする最善の方法は、計算対象とするデータの次元を減らすことである。

本研究で対象とする流跡画像は、多階調画像の線成分の定義に沿って低い輝度レベルで連続しているという特徴を持つ。したがって同一流跡上では、その輝度分布は流跡(流脈)の尾根線を軸とする曲線座標系の一次元波形と見なすことが可能である。したがって、尾根線上の輝度分布を抽出して、その波形から移動量を算出する方法をとることで飛躍的に計算量を減少させ、さらに誤った対応付けによる誤差の発生を抑制することが可能になると考えられる。

本研究で用いる、水素気泡法で得られた流脈画像に対するブロックダイアグラムをFig. 6.11に、定在気泡法によって得られた流跡画像に対するブロックダイアグラムをFig. 6.12に示す。水素気泡の流脈画像の特徴を利用する方法では、まず可視化された面内流の流脈画像を取り込み、ついでフィルタリング処理を行った後、流脈輝度分布波形にそってそのゼロクロス点(以後波形の移動を評価するための着目点を特徴点と称する)を走査する。流速はその特徴点の移動量より算出する。この方法によれば、流脈の決定までは2次元面上での処理となるが、以降の処理は流脈にそった一次元の輝度分布波形に対するものとなり、その処理は非常に簡単になる。また、しきい値に対する依存性もなくなるなどの利点がある。

流脈上の輝度分布を検出するには、その流脈の中心線の座標をなるべく正確に求めること

が必要である。任意の形状を持つ画像の中心線を抽出する方法としては、画像を2値化し、その輪郭形状に細線化処理を施して骨格線を取り出す方法が一般的である。しかしこの方法によると、輝度分布の勾配が比較的なだらかな画像の場合、輪郭形状が2値化しきい値に大きく依存し、誤差を強調する。また流脈画像は輪郭形状が不安定であるので、細線化処理の過程で本来の骨格線以外の枝分かれが生じる。さらに、流脈は2値化処理によって断続的な線になることが多く、途切れ線の接続処理も必要となる。

一方、前節で詳細に述べたが、水素気泡法で得られる流脈画像上の輝度分布は輝度レベルの低いところでも尾根線を有する。こういった画像に対しては、第2章で述べた逐次追跡による線成分の抽出方法が適用できる。逐次追跡の最初の段階では、Fig. 6.13に示すように始点を検出した後、始点を中心として360度の範囲を走査して延長方向を決定する。次のステップからは走査範囲を限定する。流脈画像では電極指示部からリークする気泡や析出物などのため比較的ノイズ成分が大きくなるが、この手法は特別な前処理を必要としないため処理にかかる時間が短縮されるという利点もある。

さて、流脈の逐次追跡により、同じ位置を起点とする輝度分布波形の時系列データが得られるが、流速はその輝度分布波形の移動量を検出することで求めることができる。定在気泡を用いる方法では、一枚の画像に複数時刻のトレーサー像が含まれているが、流脈画像の場合と同様に輝度分布の尾根線追跡を行った後、輝度分布波形上で位置を特定できる特徴点を検出し、その長さより流速を求める。

輝度分布波形の解析には流脈画像と流跡画像で以下に示すように異なる方法を用いる。

### 6.2.1 流脈輝度分布波形の解析方法

輝度分布波形の移動量は、前述のように時系列で得られる複数の波形上で位置を特定できる点を決定し、その移動量から算出する。以下、この点を特徴点と称する。特徴点の位置はトレーサー追跡法におけるトレーサー粒子の位置に相当する。

水素気泡法で得られる画像の輝度分布は、印加する電圧が矩形波であっても、下流方向に減衰するなだらかな波形になる。得られた輝度分布波形と、周波数フィルタリングによる特徴抽出の一例を Fig. 6.14に示す。実線が波形、点線が高周波ノイズを取り除いたもの、一点鎖線がバイアス成分である。流脈画像が鮮明な例（上側）と不鮮明な例（下側）の2つを比較すると、輝度の勾配の緩急にかかわらず、バイアス成分と、原波形及びノイズ除去波形の交わる点は非常に類似している。これは、ノイズの混入に対してこの交点の位置変動が少ないことを示している。

輝度分布波形の特徴点の対応付けの様子を Fig. 6.15に示す。ここでは上から順に同一流脈上の波形を時系列に並べた。実線がバイアス成分を除去した波形、点線がノイズ成分を除去した波形である。対応付けの結果は、ゼロクロス点を結ぶ直線で示される。この対応付けは、特徴点どうしの組み合わせを適当な評価基準を設けて順次検索し、最も良いものを選択する。評価基準としては、特徴点を含む1波長の輝度分布波形の相互相関係数を用いる。この対応付け操作を3画面以上の複数の画面に対して行い、総合的に相関係数が大きくなる組み合わせを採用することにより、誤った対応付けの発生を抑制する。

以上の方法においても、画像の乱れなどによりごくまれに誤った対応付けを選択することがあるが、この場合、他の対応付け結果に対して、飛び越しによる対応付けの矛盾が発生する。

実際には特徴点の順番が時系列で逆転することはないので、このような場合には不良データとして棄却する。この特徴点の位置の信頼性は、周波数フィルタリング処理の際のカットオフ周波数の選択に僅かだが依存する。そこで、さらに特徴点近傍の局所的な輝度分布の相関が最大となる移動量を計算して、この誤差を補正する。

本方法では、多階調の輝度分布情報が処理の過程で欠落しないので、2値化画像の特徴抽出処理では困難であった過誤ベクトルの客観的な除去を行う。その評価関数としても対応づけされた特徴点近傍の輝度分布波形の相互相関係数を利用する。本方法では、相互相関係数にしきい値を設け、ある一定値以下の組み合わせを不良データとして棄却した。また本方法では連続する3画面から流速を計算するので、第1画面と第2画面の特徴点の移動量によって求められたものを比較し、その流速変化が極端に大きい場合も不良データとして棄却する。

以上の対応付けの評価基準および過誤ベクトルの除去基準は、かなり客観性を持ち、設定するパラメータに対する依存性も比較的少ないものと考えられる。

### 6.2.2 流跡輝度分布波形の解析方法

流脈輝度分布の解析では、波形の移動量を特徴点の移動量から精度良く推定するという手法を用いたが、流跡輝度分布の解析では、一枚の画面上の流跡画像に複数時刻のトレーサー像が記録されているため、流速の検出は波形の特徴点同士の距離から Fig. 6.16 で示すように簡単に算出することができる。特徴点としては、鋸波のピーク点、およびゼロクロス点を選ぶことが考えられるが、本方法では波形を判別するため両方の座標を用いる。

流速は、ピーク点あるいはゼロクロス点同士の距離  $L$  から算出する。どれを選べば良いかは対象とする画像の状態で異なるが、一般的には輝度勾配が大きい方のゼロクロス点 (Fig. 6.16 ではゼロアップクロス点) を用いる方が良い。ゼロクロス点は前述の周波数フィルタリング処理で検出できるので、ピーク点およびボトム点はゼロクロス点間の最大値 (および最小値) を検索することで位置を特定する。

流脈が対象の場合には、発生位置が既知であるため流向は自明であったが、流跡を対象とする場合には、流向を判定するアルゴリズムが必要となる。本方法における流向判定は、Fig. 6.16 における鋸波のゼロクロス点からピーク点までの距離  $a$ ,  $b$  から求められる評価関数  $e$  を用いて行う。評価関数  $e$  を (6.1) 式に示す。

### 6.3 計測結果

$$e = \log \left( \frac{a}{b} \right) \quad (6.1)$$

ここで、評価関数  $e$  が正の時には、流向は正の方向となり、 $e$  が負の時には流向も負の方向となる。この評価関数の絶対値は入力波形に依存する一定値の近傍に集中する。そこで、この絶対値の分布にしきい値を設定して波形が不安定である時に発生する過誤ベクトルを合理的に棄却することが可能である。

実験に用いた電極の形状および電極間との位置関係を Fig. 6.15(a) に示す。電極には、20  $\mu\text{m}$  の白金線を 5mm 間隔に固定した棒状電極を用いた。電極としては、下電極はステンレス製の平面板を設置した。棒状電極の支持部付近は流れが乱れているので、レーザ光面と電極は連絡して移動する。水素気泡の発生量は水素に大きく依存するので、一様流の計測では水温を 27.8  $^{\circ}\text{C}$  に、船尾伴流の計測では 19.9  $^{\circ}\text{C}$  に加熱した。

平均流速  $U=0.1\text{m/s}$  の時の一様流流場の計測結果をヒストグラムで Fig. 6.15(b) に示す。直線で示した過誤ベクトルの除去処理を行った後の結果と元のデータを比較して示した。過誤ベクトルの除去処理によって、ヒストグラムのヤシ台部分の不良データと検定される領域のデータが完全に除去されていることがわかる。しかし同時に平均値近傍のデータもかなり除去されてしまっている。不良データを検定する際の一般的な手法の限界はかなり顕著である。不良データの中には、過誤ベクトル除去処理では検出されない場合でも人為的判断で誤りを判定出来ることもある。したがって人間による判断を介在させたシステムの必要性も考える必要がある。

計測された平均流速値は過誤ベクトルの除去によって、一様流の流速値に近づく傾向があり、計測値と一様流の流速値の差は約 5% に留まった。誤差幅は、過誤ベクトルの除去処理を行った後でも約 10% 近くある。これは、計測結果である同定水場の流れの流速を考慮しても大きすぎる値であるが、各測定点で定められた流速場の誤差幅は約 5% 程度に収まっている。本計測で用いた装置の量子数誤差によって生じる流速の最小誤差が約 5% であることを考慮すると、上記の結果はほぼ満足できるものである。

計測の精度は、気泡発生のために強制に増加するパルス電圧の周波数にも影響される。周期を短くすると 1 断面あたりのデータ数は増加するが、速度分布形状の形状が次第に不明瞭になり、特徴点の識別化が困難になるため計測精度は低下する。一方周期を長くすると波形が明瞭になり、特徴点を特定することが容易になるが、速度分布形状の谷の長さも増大するので流速変動が不安定になりやすい。またデータ量も少なくなる。

これらの事実を考慮すると、パルス電圧を増加するときの周波数には最適なものが存在する。これは対象とする流れの状態で異なるので事前に予備実験などによって最も良い値が得られる周波数を決定しなければならない。本実験では、周期を予備実験によって 0.125 sec とした。

本方法の適用流速の限界を調べるため、Fig. 6.15 (b) に、公称流速 0.1m/s, 0.2m/s, 0.3m/s, 0.4m/s の 4 状態での計測結果を比較して示す。サンプリング間隔は 1/20 sec、計測時間は 1 sec とした。パルス電圧の周期はデータの密度がほぼ等しくなるように流速毎に適宜調整した。ヒストグラムに示す結果はすべて過誤ベクトルの除去処理をしたものである。

流速が 0.1 ~ 0.3m/s の範囲では、精度に有意な差はなく、ほぼ同様の精度が得られている。しかし 0.4m/s の場合では、ヒストグラムの形状は著しく歪みを生じている。

## 6.3 計測結果

### 6.3.1 流脈画像を用いた低速流場計測への適用

本研究で提案する解析手法の有効性を確認するため、一様流および Wigley 模型の船尾伴流の面内流場計測を実施した。実験はすべて垂直循環型回流水槽（観測部寸法： $L \times B \times H = 4.0 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ ）で行った。水素気泡発生用の電圧源には、400V 直流パルス電圧発生器を使用した。

実験に用いた電極の形状および模型等との位置関係を Fig. 6.17 に示す。陰極には、 $20 \mu\text{m}$  の白金線を  $5\text{mm}$  間隔に展張した梯子型電極を用いた。陽極としては、下流側にステンレス製の平板を設置した。梯子型電極の支持部付近は流れが乱されているので、レーザー光面と電極は連動して移動する。水素気泡の発生量は水温に大きく依存するので、一様流の計測では水温を  $27.8^\circ\text{C}$  に、船尾伴流の計測では  $19.0^\circ\text{C}$  に加熱した。

平均流速  $U=0.1\text{m/s}$  の時の一様流速場の計測結果をヒストグラムで Fig. 6.18(a),(b) に示す。前節で示した過誤ベクトルの除去処理を行った後の結果と元のデータを比較して示した。過誤ベクトルの除去処理によって、ヒストグラムのすそ付近の不良データと推定される領域のデータが有効に除去されていることが判る。しかし同時に平均値近傍のデータもかなり除去されてしまっている。不良データを棄却する際の一般的な手法の開発はかなり困難である。不良データの中には、過誤ベクトル除去処理では検出されない場合でも人為的判断で誤りを判定出来ることもある。したがって人間による判断を介在させたシステムの可能性も考える必要があろう。

計測された平均流速値は過誤ベクトルの除去によって、一様流の流速値に近づく傾向にあり、計測値と一様流の流速値の差は約 3% に留まった。標準偏差は、過誤ベクトルの除去処理を行った後でも約 10% 近くある。これは、計測対象である回流水槽の流れの変動を考慮しても大きすぎる値であるが、各画面毎で求められた流速場の標準偏差は約 5% 前後に収まっている。本計測で用いた装置の量子化誤差によって生じる速度の最小誤差が約 3% であることを考慮すると、上記の結果はほぼ満足できるものである。

計測の精度は、気泡発生のために陰極に引加するパルス電圧の周波数にも影響される。周期を短くすると 1 画面あたりのデータ数は増加するが、輝度分布波形の形状が次第に不明瞭になり、特徴点の個別化が困難になるため計測精度は低下する。一方周期を長くするほど波形が明瞭になり、特徴点を特定することが容易になるが、輝度分布波形の谷の長さも増大するので流脈追跡が不安定になりやすい。またデータ量も少なくなる。

これらの事情を考慮すると、パルス電圧を引加するときの周波数には最適なものが存在する。これは対象とする流れの状態で異なるので事前に予備実験などによって最も良い値が得られる周波数を決定しなければならない。本実験では、周期を予備実験によって  $0.125 \text{ sec}$  とした。

本方法の適用流速の限界を調べるため、Fig. 6.18 (b) に、公称流速  $0.1\text{m/s}$ ,  $0.2\text{m/s}$ ,  $0.3\text{m/s}$ ,  $0.4\text{m/s}$  の 4 状態での計測結果を比較して示す。サンプリング間隔は  $1/30 \text{ sec}$ 、計測時間は  $1\text{sec}$  とした。パルス電圧の周期はデータの密度がほぼ等しくなるように流速毎に適宜調整した。ヒストグラムに示す結果はすべて過誤ベクトルの除去処理をしたものである。

流速が  $0.1 \sim 0.3\text{m/s}$  の範囲では、精度に有意な差はなく、ほぼ同様の精度およびばらつきで計測されている。しかし  $0.4\text{m/s}$  の場合では、ヒストグラムの形状は著しくなだらかにな

り、明らかに精度の低下がみられる。これは、流速が速くなると、流脈画像の輝度が相対的に低くなり、波形の特徴が不明瞭になるためである。

いずれにせよ、2値化画像の処理技術に基づく手法では定量計測がきわめて困難である画像に対して、過誤ベクトルの客観的な除去により精度が向上すること及び適用流速の上限値が高いことが確認出来た。

次に、3次元流場での適用性を調べるため、Wigley 船尾流場の水平面内流速分布を計測した。計測位置及び座標系を Fig. 6.19 に示す。計測結果は船体長さの半分を基準として無次元化した座標系で示す。x 軸は船体中央を原点とし、船尾方向を正とする。y, z 軸はそれぞれ左舷方向、鉛直下方を正とする。使用した Wigley 模型は全長 1.2m の2重模型で、全没水状態で計測した。計測領域は、船尾を中心に前後 0.2 m、幅方向に 0.15 m の長方形領域とした。画像解析装置の制限により、取り込まれた画像の画素サイズは、512 × 512 画素となる。そこで x 方向の精度を確保するため、長方形の領域を3つに分割し、それぞれ重複する部分を含ませながら計測面を逐次移動して計測した。画像の取り込み間隔は 1/15 sec で計測時間は1断面あたり 3 sec とした。一様流の平均流速値は  $U = 0.1\text{m/s}$  ( $Rn = 1.2 \times 10^5$ ) である。

流脈追跡の様子とその画面を含む連続する3画面から求められた流速ベクトルを Fig. 6.20 に示す。Fig. 6.20 (a) では、追跡された流脈を白線部分で示しているが、背景にかなりの雑音成分があるにもかかわらず、流脈は正確に追跡されていることがわかる。輝度の低い部分で本方法に特有のこぼこした迷走状態が若干観察されるが、特徴点はこの部分には存在しないことが多いので計測精度への悪影響は少ない。

Fig. 6.20 (b) に、過誤ベクトルの除去処理を行った後の流速ベクトルを示す。船体近傍では流れの変動が大きいため流脈が乱れ、有効なデータは減少する。過渡的な流れを計測する場合にはこれが大きな問題となる。連続する複数の画面から平均流速値を求める場合には、全体として流場を表現するのに十分な数のデータを得ることが出来る。

連続して得られる 45 画面分の流速分布から、格子点流速分布を計算した結果を Fig. 6.21 に示す。特徴的な状態を示す  $Z=0.0$ ,  $Z=0.05$  の2つの面内の格子点流速分布を比較する。格子点での流速計算は、距離の逆数補間法を用いた。空間分解能を確保するため補間の範囲を 0.012m とかなり狭くしたが、その範囲で有効なデータがない格子点では流速ベクトルは空白となっている。

各断面についてそれぞれ考察する。 $Z=0.0$  断面では、対称面であるためほぼ2次元流場であると考えられるが、境界層外層付近の流れの状態が明確に計測されている。境界層の内層と船尾の剥離流場が計測不能領域となっている。計測不能になる原因は、流れそのものの攪乱のため安定した流脈線が得られないからである。

$Z=0.05$  断面では、 $Z=0.0$  断面と比較して境界層が形成される領域は狭くなるため、計測不能領域は小さくなると考えられるが、実際には、計測不能領域は拡大されている。これは、実験の時間経過による陰極線の劣化も原因として考えられるが、流れの3次元性が強くなるため流脈の変形が大きくなることが主たる原因と思われる。

### 6.3.2 流跡画像を用いた高速流場計測への適用

前節では、水素気泡法によって得られる流脈画像の特徴を利用した手法の適用例について述べたが、この方法が適用できる流速の上限は、0.3 m/s 程度までである。それ以上の流速で

は、気泡群の密度を確保することが困難になり、散乱光の輝度の低下により流脈の特徴がとらえにくくなる。実際の計測では、このような低速流場ばかりではなく、むしろ流速が1.0m/sを越える高速流場の計測も多い。

そこで、本研究では回流水槽内に定在する気泡をトレーサーとして使用する新しい方法も提案した。この方法では、NTSC方式の映像機器を用いて高速移動するトレーサーを追跡する必要があるため、トレーサーの同定と流向の両方を容易に判定できるように Beam Modulatorによってレーザー光面に鋸波状の輝度変化を与えて複数時刻の流跡を同一画面に記録する。

本方法により実際に流速、流向が判定できるかどうかを検証するため、流速場の計測に先立ち、Fig. 6.22に示すように定速回転するターンテーブル上にたてられたグラスファイバロッドに、本研究で使用する輝度が連続的に変化するLLS光面を水平から照射してグラスファイバロッドを可視化して、その回転速度を計測した。

その結果をFig. 6.23に示す。横軸がターンテーブル上に配置されたロッドの実際の周方向速度、縦軸が画像計測による計測値である。真値に対するばらつきの標準偏差は、約0.015(m/s)、真値と計測値の相関係数は約0.99であった。

量子化誤差で決定される速度の最小誤差が約0.018(m/s)であることから、よく制御された環境で適切な流跡画像が与えられる時、本方法は十分な精度を有することが確認された。

本方法の実計測における計測精度を評価するため、回流水槽において平均流( $U=1.0\text{m/s}$ )の計測を実施した。計測位置は水槽のほぼ中央部で最も流れが一様流れに近いと思われる部分である。

得られた流跡上輝度分布の一例をFig. 6.24に示す。実際の流場の可視化画像においても、やや乱れはあるが鋸波状の波形が得られることがわかる。鋸波のピークはかなり鋭い形状になっており、またバイアス値とのゼロクロス点もほぼ波形の特徴点として採用し得る明瞭なものになっている。そこで、特徴点としてピーク点を用いたものとゼロクロス点を用いたものの両方について解析を行った。その結果をFig. 6.25に示す。(a)がピーク点を用いたもの、(b)がゼロクロス点を用いたものである。評価間数による棄却の結果を考慮した場合、ピーク点を用いた方が若干良好な分布になるが、実用に供するには両者とも不十分な精度である。ターンテーブルによる机上の検定結果と異なり大きな過誤ベクトルが発生する理由としては、輝度分布波形にときおり大きなノイズが入るためである。このノイズは輝度が比較的高いときに多く発生する。気泡の径が大きいほど輝度は高くなるので、気泡の変形による反射率の変化が原因であると考えられる。

これを防ぐには径の揃った十分に小さな気泡を大量に発生させる方法を開発する必要がある。また、形状評価間数による棄却方法はFig. 6.25の結果を見る限りある程度の効果はあるが、完全に過誤データを除去するには至らなかった。さらに実状に適合した形状評価方法を導入する必要があると思われる。

本方法は、以上で示したように現段階では実用上十分な精度を有するに至っていないが、可視化方法の改良により良好な流跡画像が得られれば、実用に供するに足る精度を持つ可能性があることが確認された。

## 6.4 考察

水素気泡法により得られる流脈画像の輝度が下流方向に減衰する連続的な分布になることを利用して、流脈の逐次追跡と輝度分布波形の解析により比較的低速の面内流速場を計測する方法を開発した。

また、回流水槽に定在する気泡の流跡に対して、輝度が鋸波状に変化するLLS光源を用いて可視化して、複数時刻の位置と方向の情報を含む画像から流跡上の輝度分布波形の検出により速度場を計測する方法を開発した。

これらの気泡トレーサーの特徴を積極的に利用した可視化、解析方法を実際の面内流場計測に適用し、その適用性及び問題点について検討した。

### ● 流脈画像を用いた低速流場計測への適用性の評価

流脈画像の輝度分布波形解析による面内流速計測法を、一様流およびWigley模型の船尾伴流の計測に適用した。

一様流の計測結果では、過誤ベクトルの除去によって計測値と一様流の流速値の差は約3%に留まった。また計測された流速分布の標準偏差は、過誤ベクトルの除去処理を行った後でも約10%近くあったが、各画面毎で求められた流速場の標準偏差は約5%前後に収まっていることから本方法の有効性が確認された。

本方法で用いた過誤ベクトルの除去処理では、ヒストグラムのすそ付近の不良データと推定される領域のデータが有効に除去されていることが判明した。しかし正しいと思われるデータもかなり除去されてしまうことから、不良データを棄却する際の一般的な手法の開発はかなり困難であると思われる。

本方法では、流速が0.1m/sから0.3m/sの範囲では、ほぼ同じ精度で計測できるが、それ以上になると著しく精度が低下する。これは、流速が速くなると、粒子群の拡散により流脈画像の輝度が低くなり、波形の特徴が不明瞭になるためである。このことから、本方法の適用限界は0.3 m/s付近であることがわかった。

模型船の船尾伴流計測に適用した結果から、本方法では過誤ベクトルの除去処理によって船体近傍で有効なデータが減少するが、連続する複数の画面から平均流速値を求める場合には、境界層より外側では流場を表現するのに十分な数のデータを得ることが確認された。

### ● 流跡画像を用いた高速流場計測への適用性の評価

回流水槽内に定在する気泡に対して輝度が鋸波状に変化する光源で可視化して流速場を計測する方法を、定速回転するターンテーブル上のトレーサーの計測及び一様流速場の計測に適用した。

ターンテーブル上のトレーサーを用いた計測ではほぼ理想的な輝度分布波形が得られるため、真値に対するばらつきの標準偏差は、約0.015(m/s)、真値と計測値の相関係数は約0.99となり、量子化誤差で決定される速度の最小誤差が約0.018(m/s)であることから、本方法の有効性が確認された。

一様流速場における定在気泡の可視化画像に本方法を適用した結果、やや乱れはあるが鋸波状の波形が得られることを確認した。また鋸波のピークはかなり鋭い形状になっており、またバイアス値とのゼロクロス点もほぼ波形の特徴点として採用し得る明瞭なものになった。しかし、輝度分布波形に含まれるノイズの影響で実用に供するには不十分な精度となった。

精度を低下させるノイズは輝度が比較的高いときに多く発生する。気泡の径が大きいほど輝度は高くなるので、気泡の変形による反射率の変化が原因であると考えられる。これを防ぐには径の揃った十分に小さな気泡を大量に発生させる方法を開発、実状に適合した形状評価方法を導入する必要があると思われる。

本方法は、以上で示したように現段階では実用上十分な精度を有するに至っていないが、可視化方法の改良により良好な流跡画像が得られれば、実用に供するに足る精度を持つ可能性があることが確認された。



Fig. 6.9: Sample image of streakline illuminated by beam modulation

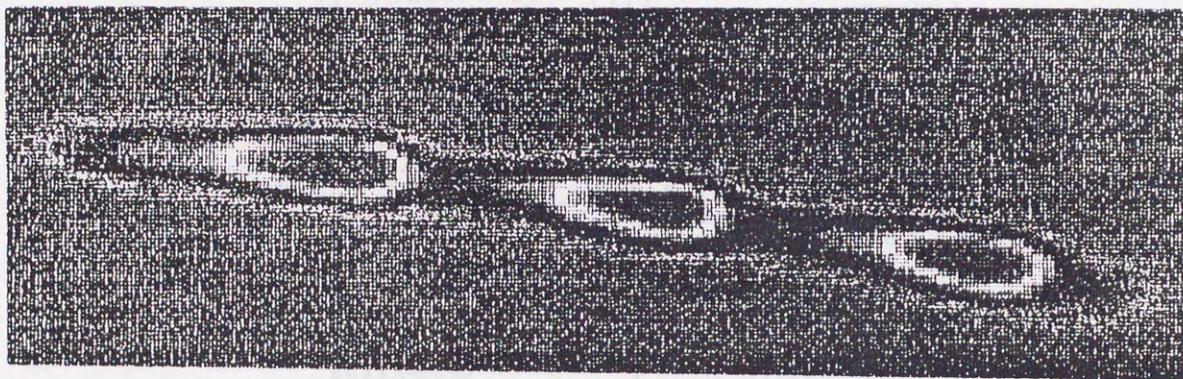


Fig. 6.9: Sample image of streakline illuminated by beam modulator

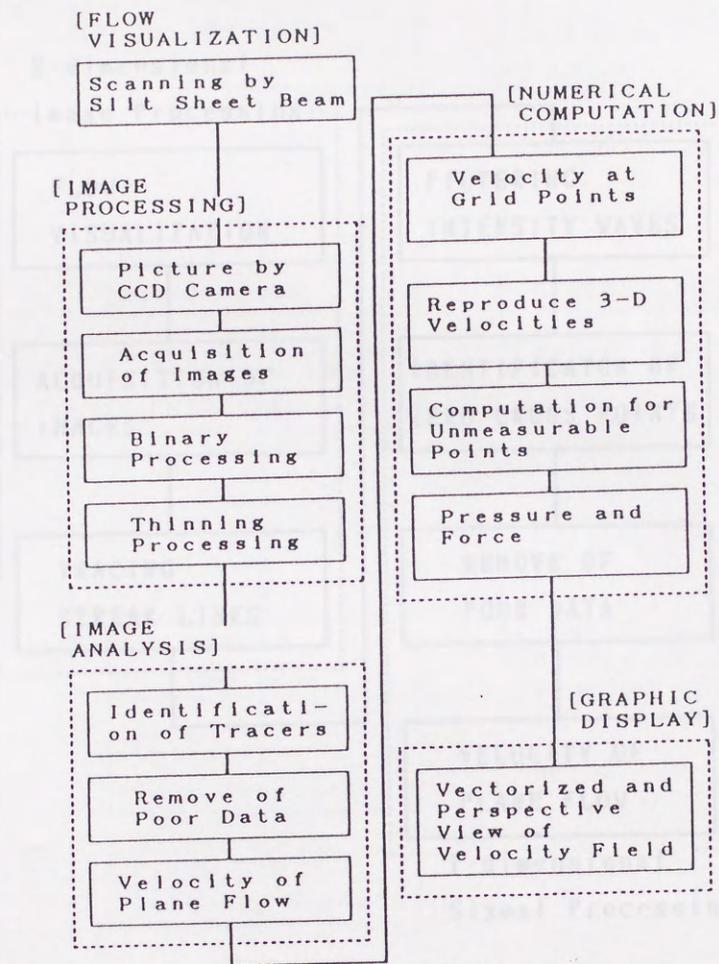


Fig. 6.10: Flow chart of velocity measurement system by binarized image processing

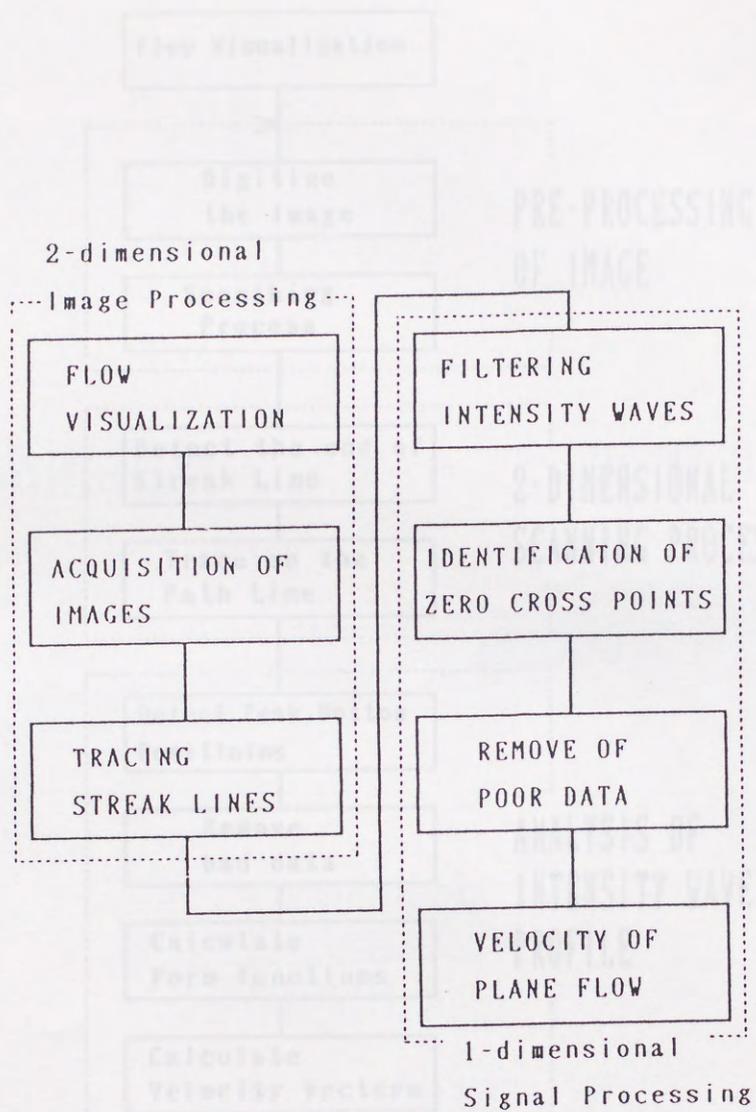


Fig. 6.11: Flow chart of velocity measurement system by using hydrogen bubbles

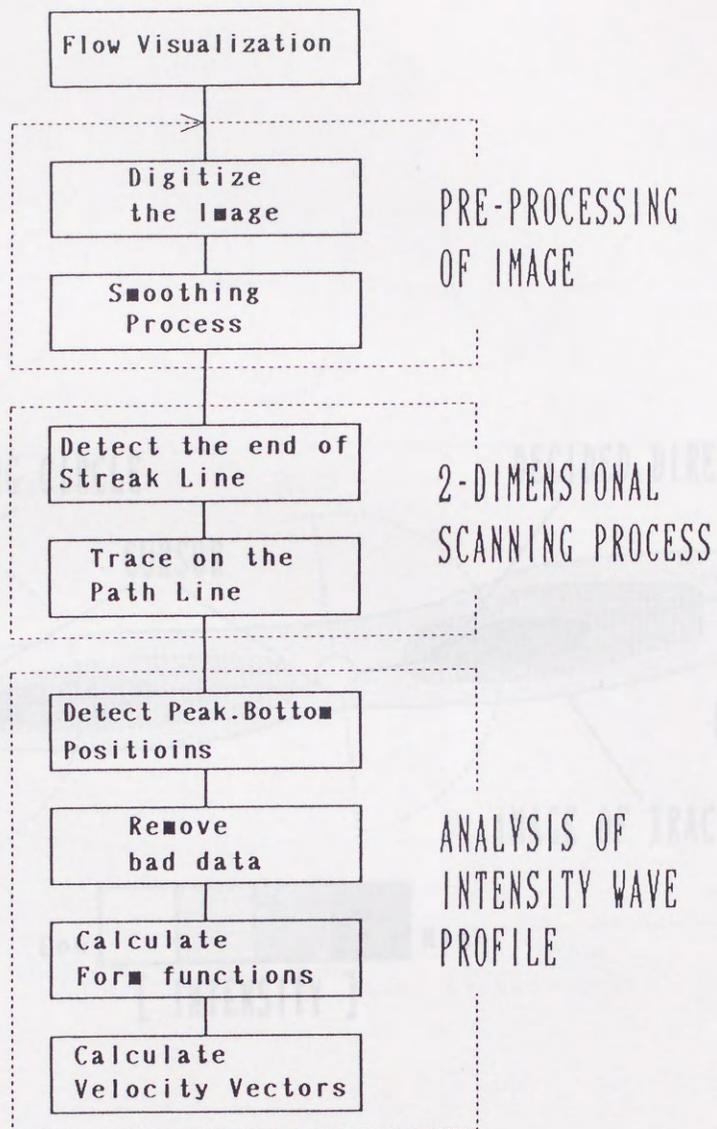


Fig. 6.12: Block diagram of velocity measurement system by using air bubbles

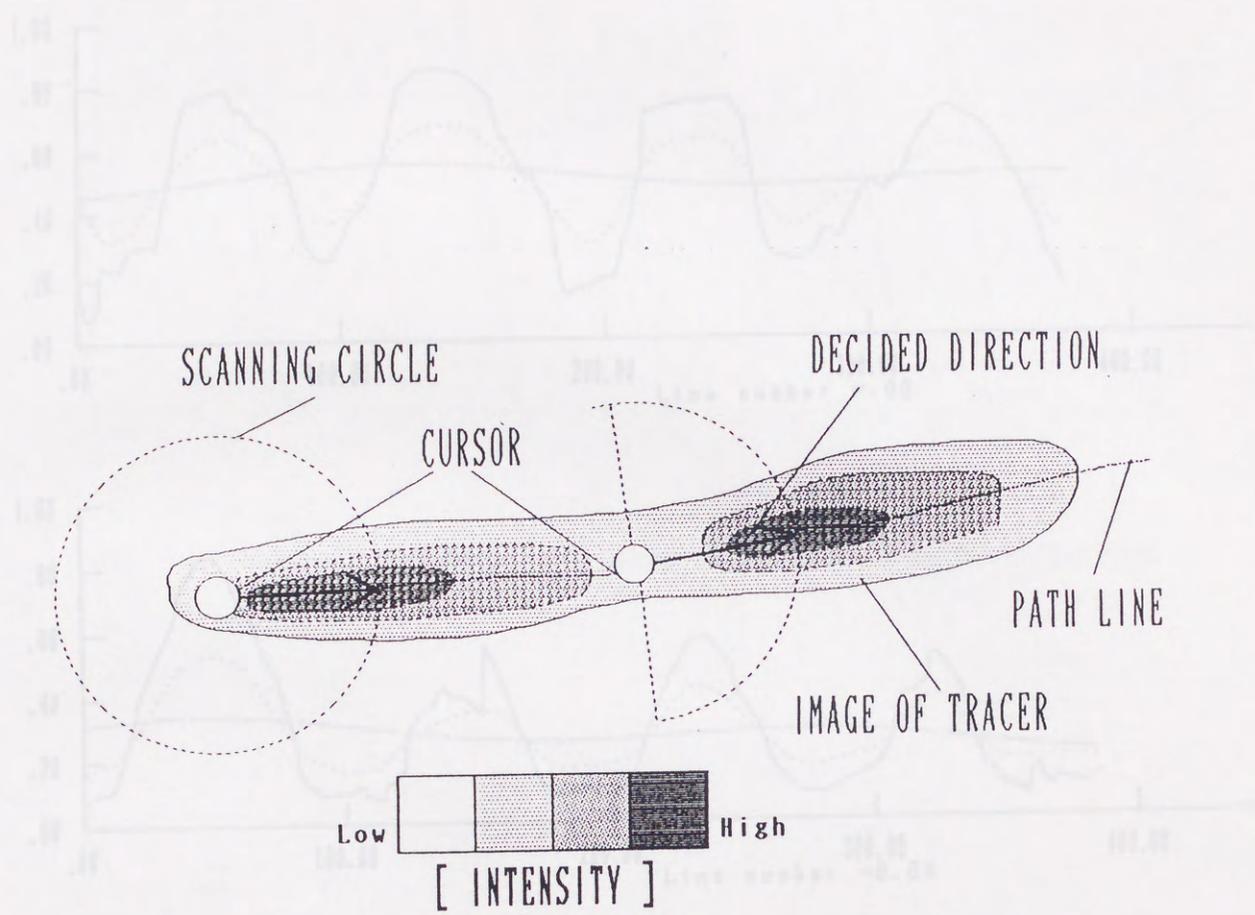


Fig. 6.13: Procedure of tracing a streakline

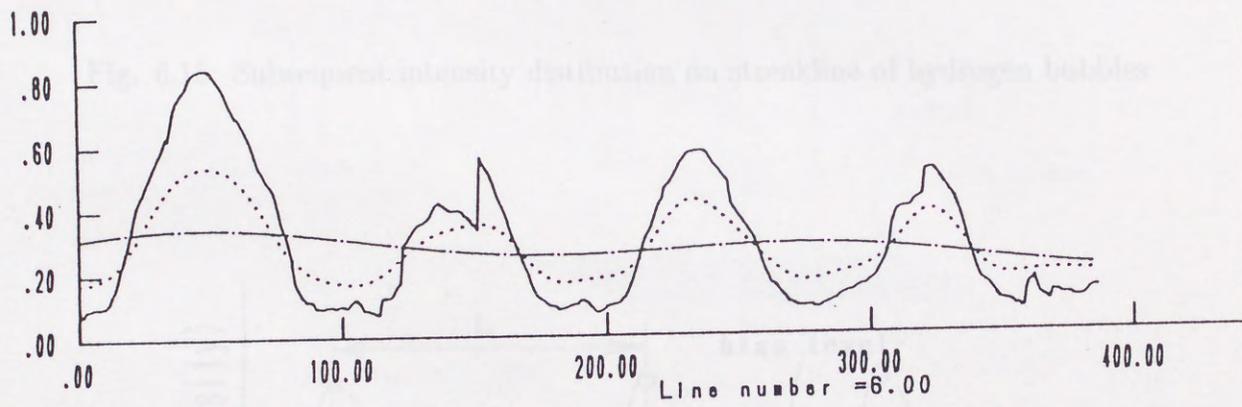
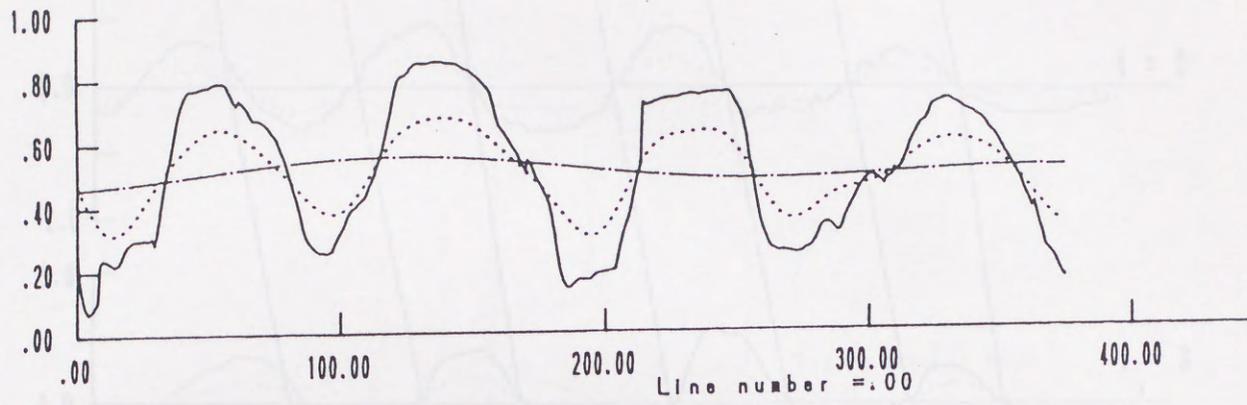


Fig. 6.14: Intensity distribution on streakline of hydrogen bubbles

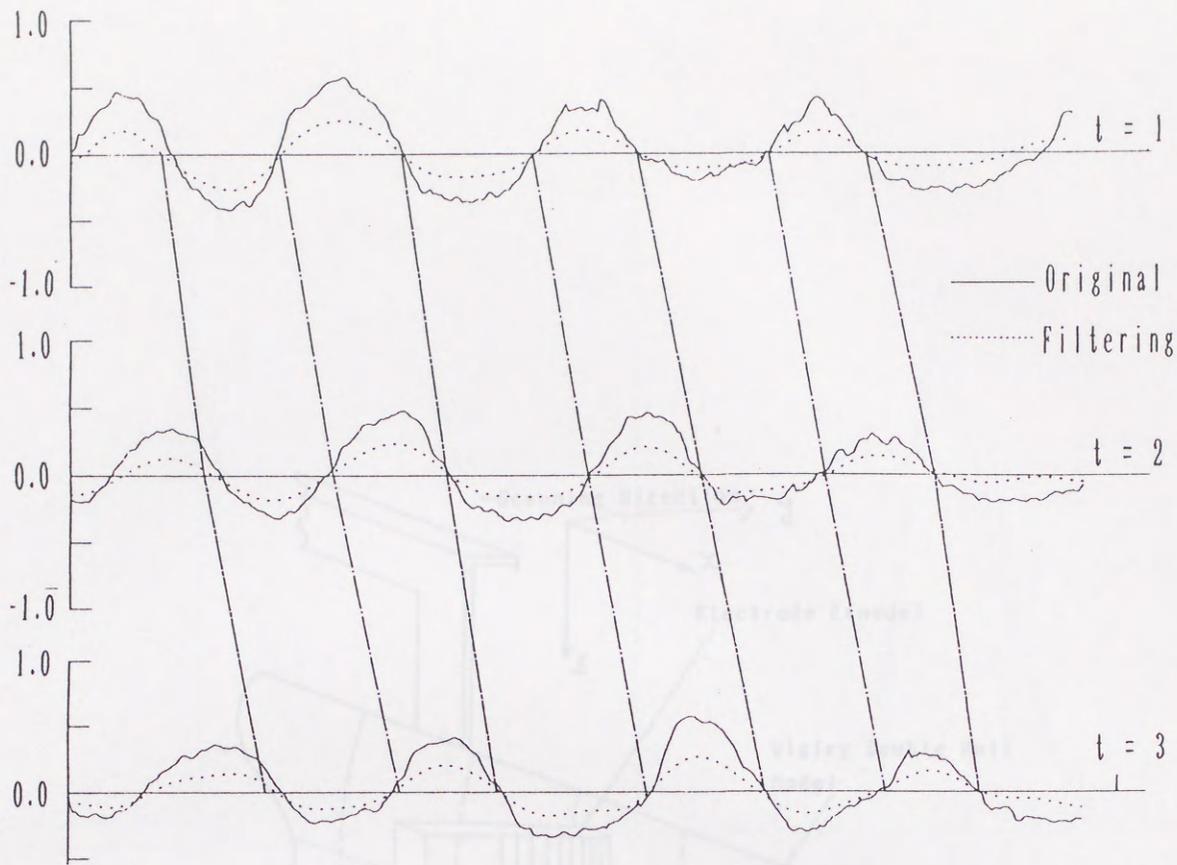


Fig. 6.15: Subsequent intensity distribution on streakline of hydrogen bubbles

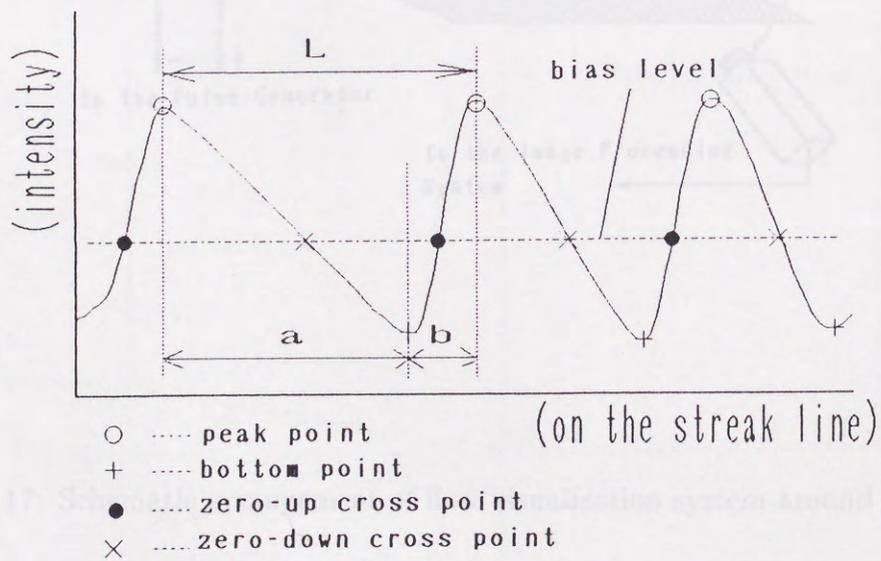


Fig. 6.16: Schematic of velocity estimation

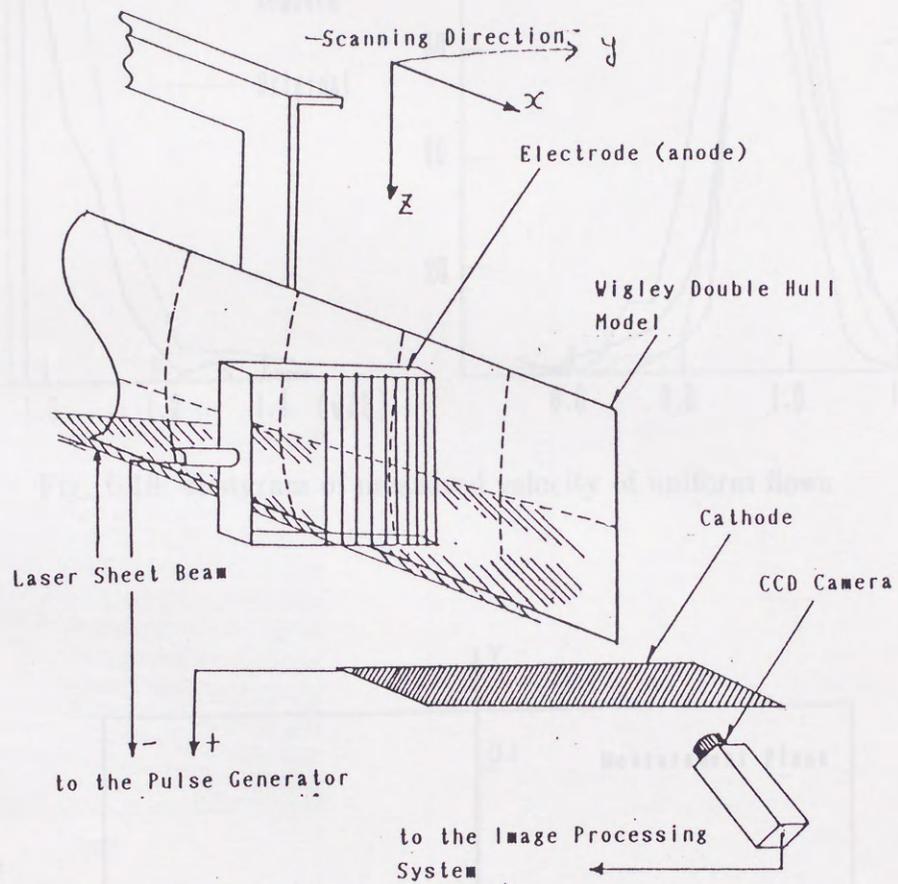


Fig. 6.17: Schematic arrangement of flow visualization system around ship hull

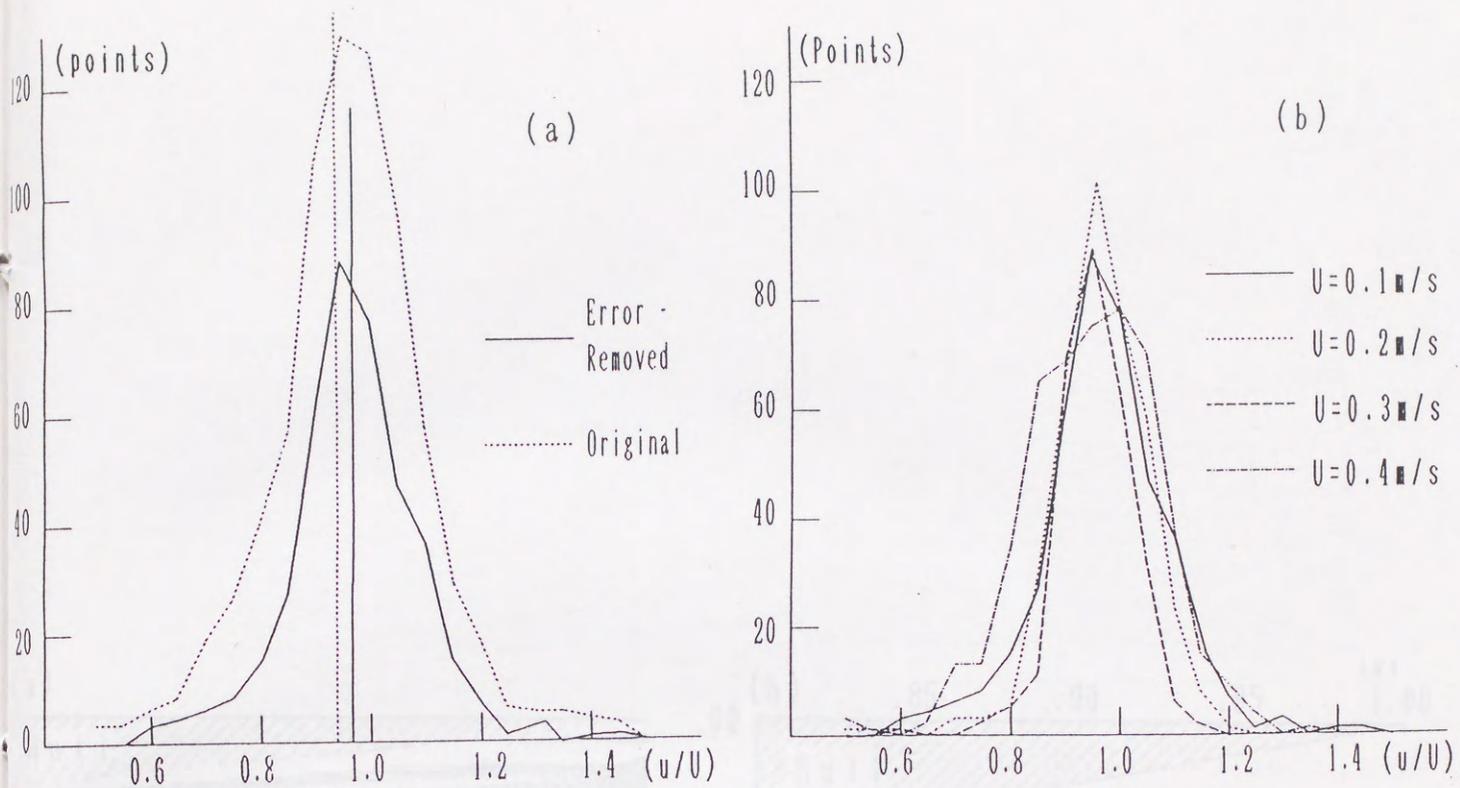


Fig. 6.18: Histogram of measured velocity of uniform flows

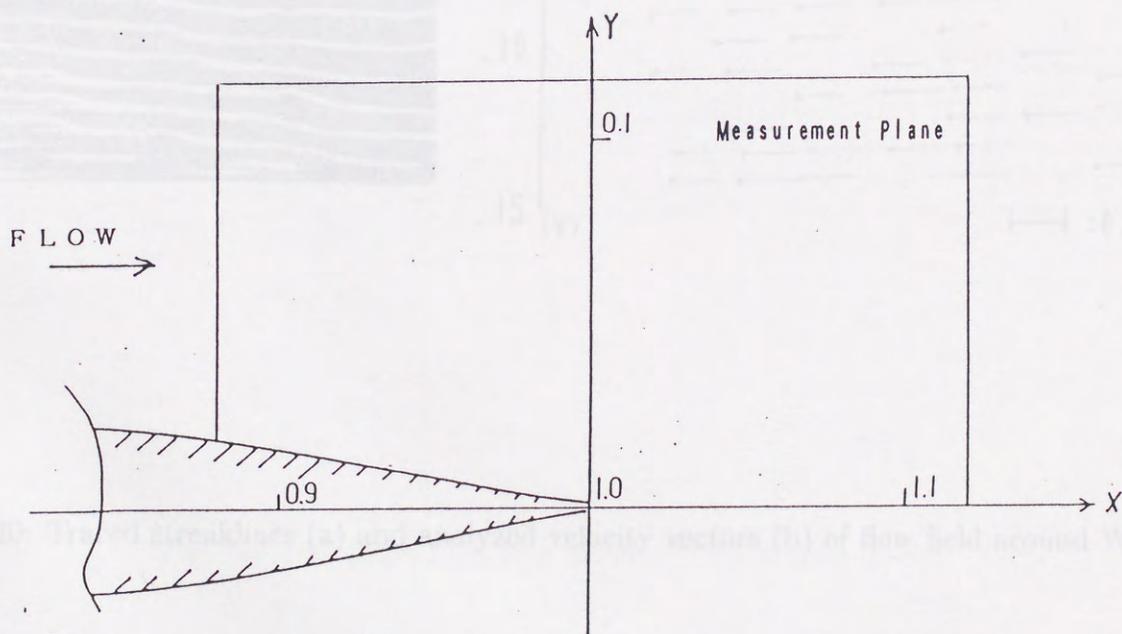


Fig. 6.19: Location of measured sections

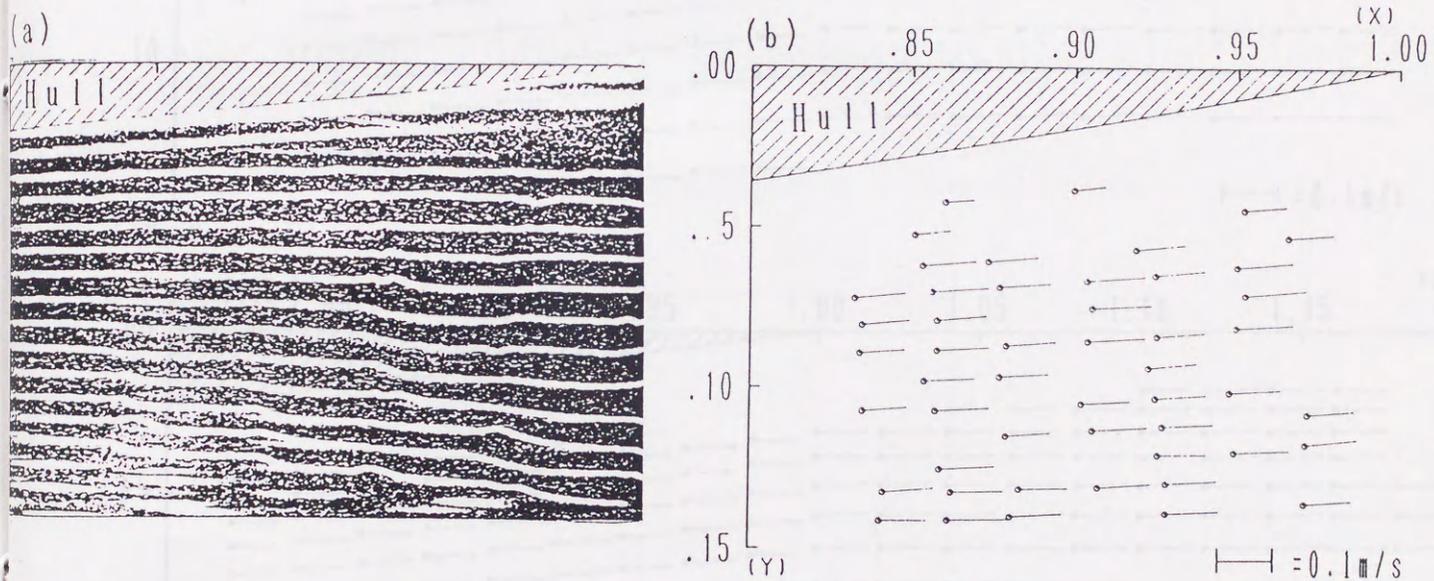


Fig. 6.20: Traced streaklines (a) and analyzed velocity vectors (b) of flow field around Wigley model

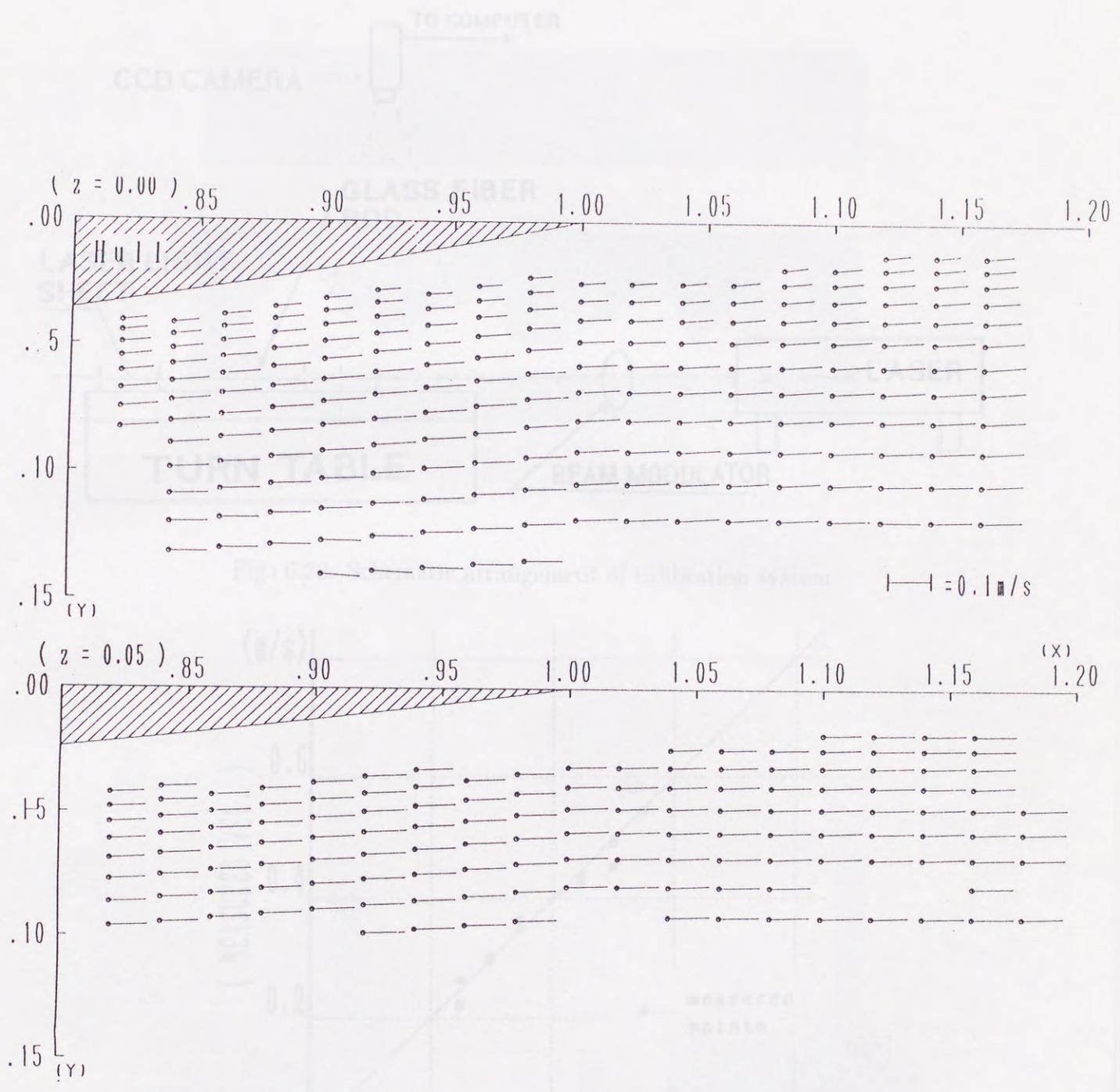


Fig. 6.21: Measured velocity fields around Wigley model

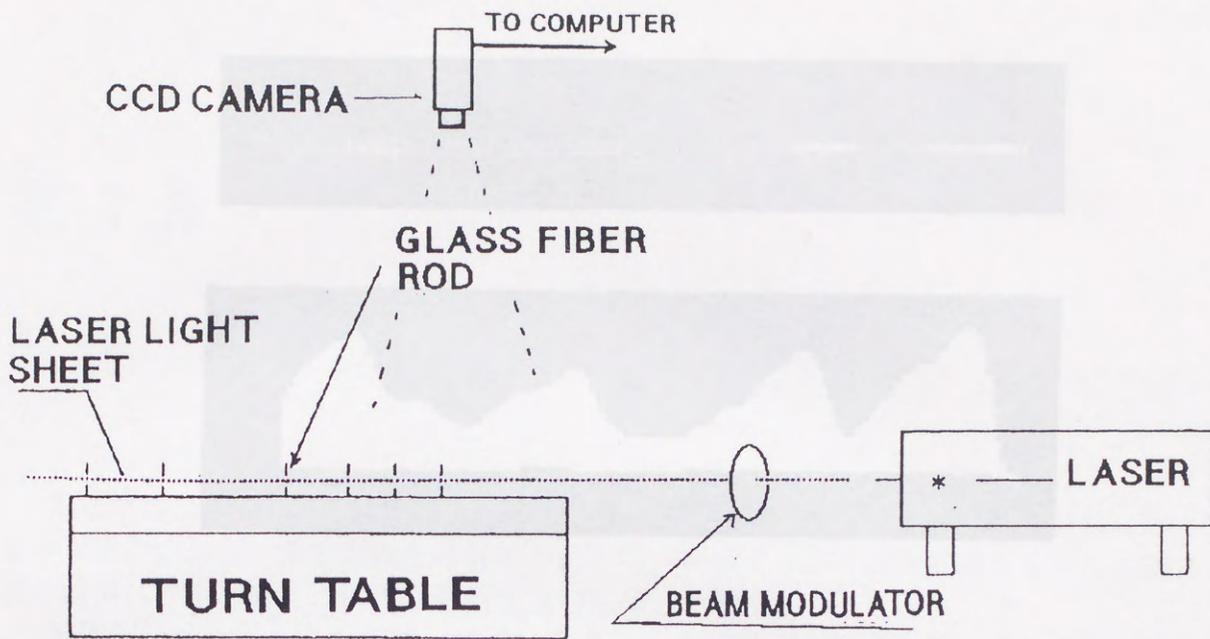


Fig. 6.22: Schematic arrangement of calibration system

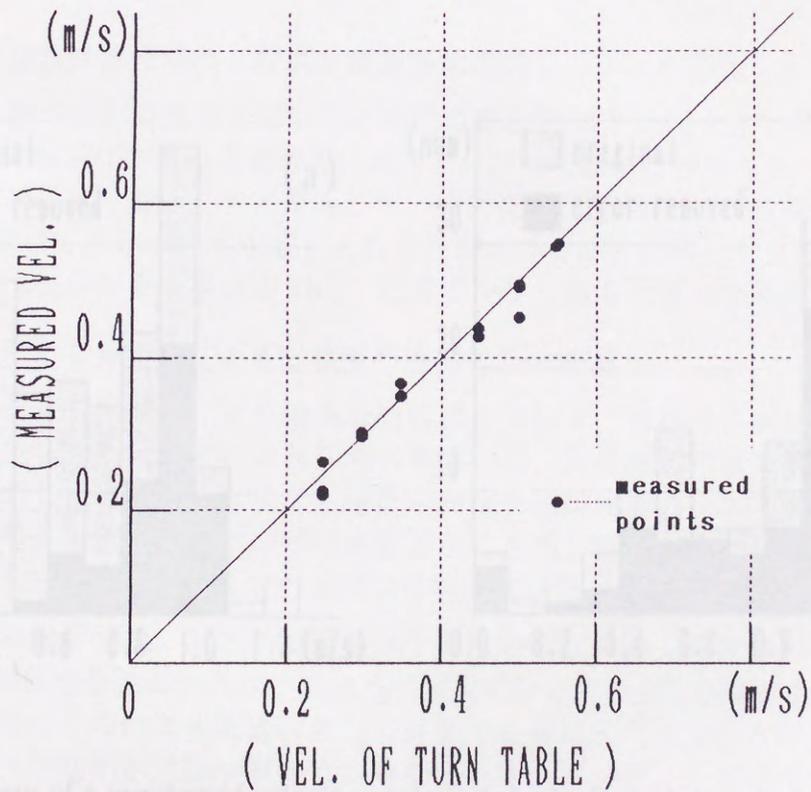


Fig. 6.23: Comparison of measured and real velocity of turn table

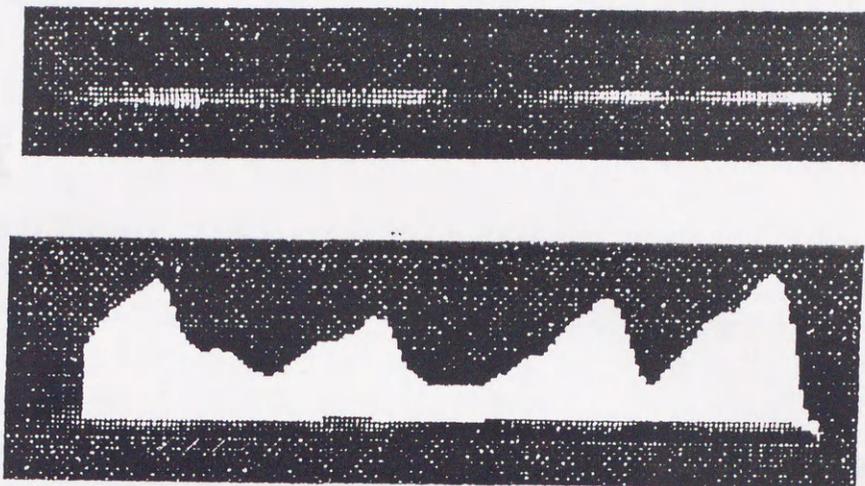


Fig. 6.24: Sample of intensity distribution of pathline

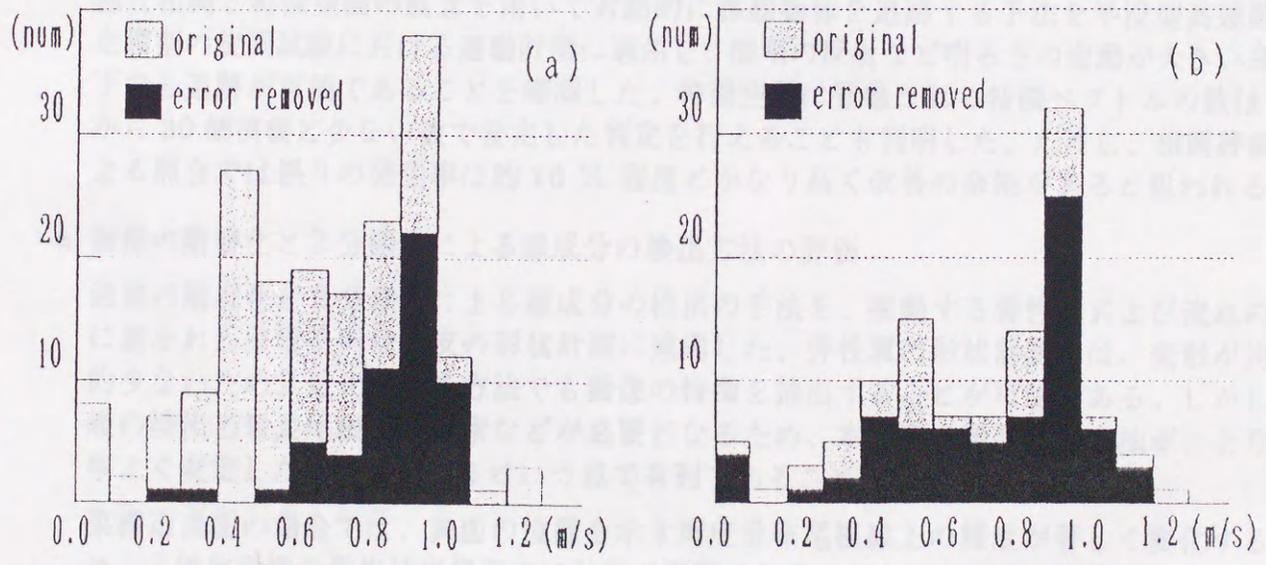


Fig. 6.25: Histogram of a number of velocity vectors, (a)calculated by peak point, (b)calculated by zero-cross point

## 第 7 章

### 結論

本研究では、流体計測の分野で従来の画像計測技術の適用が困難である対象に対して、新しい可視化方法と、多階調画像の解析手法を用いたいくつかの画像計測システムを構築し、実際の計測に適用することにより有効性及び問題点を検証した。

解析方法として、表面形状や流脈に代表される不鮮明な線成分を、逐次追跡に工夫を加えることにより確実に抽出する手法と、テンプレートマッチングで発生する誤照合を特徴空間の領域分割により判定する手法を提案した。以下にこれらの手法を実際の計測に適用した際の評価を述べる。

- 特徴空間の概念に基づく誤り検出と移動物体追跡システムの評価

相互相関と特徴空間の概念を用いて対話的に移動物体を追跡する手法を半没型高速船自走模型の旋回試験における運動計測に適用し、照明の反射など明るさの変動が大きい条件下でも追跡が可能であることを確認した。特徴空間に登録される特徴ベクトルの数は 20 から 30 個前後と少ない数で安定した判定を行えることも判明した。ただし、相関評価による照合では誤りの発生率は約 16 % 程度とかなり高く改善の余地があると思われる。

- 画像の階層化と 2 分探索による線成分の検出方法の評価

画像の階層化と 2 分探索による線成分の検出の手法を、振動する弾性翼および流れの中に置かれた柔構造円柱表皮の形状計測に適用した。弾性翼の形状計測では、変形が比較的少ないため 2 値化による方法でも画像の特徴を抽出することが可能である。しかし分岐の検出と最長尾根線の探索などが必要となるため、本研究で開発した方法が、より効率よく安定した計測が行えるという点で有利であることを確認した。

柔構造表面の場合では、表面の位置を示す輝度分布尾根線上の輝度が著しく変化するため、2 値化画像の骨格抽出処理では計測が困難となる。しかし本研究で開発した方法では低い輝度で連続している尾根線に対して安定した検出を行うことができた。ただし、逐次追跡を行う階層が不適切な場合や、輝度分布尾根線が著しく不明瞭な場合にはアルゴリズムの限界により、細かいがたつきが発生することもある。

- 画像解析に適合する波面の可視化方法の評価

画像解析による非接触計測に適合する波面の可視化方法として、「気相界面可視化法」と「水中表面反射法」の2つの新しい手法を提案し、回流水槽における波面および船側波形の計測に適用した。その結果、両者とも利便性に優れる手法であることを確認した。

気相界面可視化法では、照明の不十分な端部を除く領域では、簡単なしきい値法でも安定した計測結果を得ることができた。輝度の安定した中央部における誤差は1.0mm以内に納まった。

水中表面反射法では、計測値と点計測による値のずれは0.5mm以内となり、十分な精度で計測できることを確認した。ただし、時間変動が大きい船首近傍の一点では約1.7mmのずれが生じた。座標変換法として、船体のオフセットが既知であることを利用して簡便に船体表面上の3次元座標値を求める手法を適用し、精度および利便性の面で優れていることを確認した。

- 逐次追跡と線成分上の輝度分布波形解析による流場計測法の評価

水素気泡法による流脈画像と回流水槽内に定在する気泡の流跡画像に対して、多階調画像の特徴を考慮した逐次追跡方法を適用することにより、線成分および尾根線上の輝度分布波形を得ることができた。これにより逐次追跡が不鮮明な線画像に対しても有効であることを検証した。さらに抽出された輝度分布波形の移動量を局所相関及びゼロクロス点の対応付けで推定することにより流速場の計測が可能であることがわかった。この方法を Wigley 模型船の船尾流場計測に適用し、その有用性を確認した。

また高速で移動する気泡トレーサーの移動速度と流向の判定を可能とするため、LLS 光源と Beam Modulator によって複数時刻の位置の情報を同一画面上に鋸波状の輝度分布波形で記録する方法を提案し、精度の検証および平均流速場の計測を行った。本方法では気泡トレーサーの散乱特性の不均一さに起因すると思われる誤差のため十分な精度を得ることができなかったが、適切なトレーサーを選択することにより、精度が改善される可能性があることを確認した。

- 問題点および今後の課題

特徴空間の概念を導入することによりテンプレートマッチングの照合結果に対して信頼性の高い誤り判定が可能となったが、これを追跡方法そのものに反映させることで照合の誤りそのものを減少させることが考えられる。

離散画像の階層化と2分探索による線図形の抽出は、輝度分布が不鮮明な線画像に対しても有効であるが、探索を開始する階層数が結果に影響する。画像の特徴に応じた最適の階層数を求める指標が必要となるであろう。

気泡トレーサーを用いた流場計測では、実用に供するに足るだけの精度を達成できなかった。これは解析方法の問題というよりも、気泡トレーサーの散乱特性の不均一さがもたらす不安定性や、特に水素気泡の場合は流脈が容易に拡散してしまう点が影響していると思われる。流場計測により適合するトレーサーの選定が必要であろう。

以上の課題が残されているが、画像解析の適用が困難であった対象に対して多階調画像の特徴を利用することにより計測を可能とした点で本研究の目的は達成されたものと思われる。

## 謝辞 文献

本研究を遂行し、論文をまとめるにあたり御懇切なる御指導と詳細にわたる御教示及び多大なる御鞭撻を賜りました広島大学工学部エンジニアリングシステム教室教授茂里一紘先生、助教授土井康明先生に心より感謝します。また元広島大学工学部船舶・海洋工学教室助教授の堀田多喜男先生には、流れの可視化及び計測技術の御指導を通して本研究の初期段階で大変お世話になりました。厚く感謝いたします。

次に、金岡雅敏氏、和田憲之氏、上岡孝志氏、松田晃明氏、加藤高明氏、高橋直寿氏、中田浩人氏、林隆夫氏、細川学氏、案浦毅氏、戸崎啓一氏、土居健一氏には卒論研究を通して実験の遂行に多大なる協力を頂きましたことを感謝します。また広島大学工学部エンジニアリングシステム教室の全ての先生方及び事務室の皆様には、論文執筆にあたり多大なる御迷惑をおかけしたにもかかわらず常に暖かい御協力と御鞭撻をいただきました。深く御礼申し上げます。

最後に本研究の一部は、平成2年度科学研究費補助金（試験研究（B））としてなされたものであることを付記します。

[1] 堀田多喜男、土井康明、土井康明、"流体の可視化計測によるトレーサー3次元追跡手法に関する研究" 流体の可視化化学会論文集, Vol. 8, No. 34, pp. 70-82, 1995.

[2] 茂里一紘、"流体の可視化計測技術の応用" 流体の可視化化学会誌, Vol. 2, pp. 51-56, 1992.

[3] 土井康明、堀田多喜男、"流体の可視化計測技術の応用" 流体の可視化化学会誌, Vol. 1, No. 27, 1991.

[4] 土井康明、堀田多喜男、"流体の可視化計測技術の応用" 流体の可視化化学会誌, Vol. 1, No. 36, 1997.

[5] 堀田多喜男、"流体の可視化計測技術の応用" 流体の可視化化学会誌, Vol. 3, No. 39, 1993.

[6] Hira 著、"3Dイメージングシステム・プロジェクト RVT 版"、ロボットシステム - 最新は世界をどう見るか? 朝倉書店, 1998.

[7] 堀田多喜男、金岡雅敏、"流体の可視化計測" 朝倉書店, 1994.

[8] 堀田多喜男、堀田多喜男、"流体の可視化計測" 九州大学工学部工学研究報告, Vol. 20, pp. 52-58, 1997.

## 参考文献

- [1] 長尾 真, "画像認識論" コロナ社, 1983
- [2] 流れの可視化学会編, "新版流れの可視化ハンドブック" 朝倉書店, 1986.
- [3] 川橋正昭, "レーザスペckル法およびレーザ誘起蛍光法" 流れの可視化学会第2回講習会資料, pp.20-21, 1987.
- [4] 小林敏雄, "流跡写真から如何にして速度情報を得るか" 流れの可視化学会誌, Vol.6, No.20, pp.42-49, 1986.
- [5] 小林敏雄, 佐賀鉄雄, 瀬川茂樹, 唐司茂樹, "逆流を含む2次元流れ場の画像処理システムの開発" 流れの可視化学会論文集, Vol.5, No.17, pp.57-64, 1985.
- [6] 西野耕一, 笠木信英, "3次元画像処理流速計による2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), 56-525, 1388-1347, 1990.
- [7] 佐田豊, 西野耕一, 笠木信英, "画像処理流速計によるトレーサー3次元追跡手法に関する研究" 流れの可視化学会論文集, Vol.9, No.34, pp.79-82, 1989.
- [8] 筧 源亮, "画像処理の水路流速計測への応用" 流れの可視化学会誌, Vol.2, pp.51-56, 1982.
- [9] 木村一郎 他, "相関を利用した流れの画像計測 -非定常流への応用-" 流れの可視化学会誌, Vol.6, No.22, 1986.
- [10] 木村一郎 他, "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-" 流れの可視化学会誌, Vol.7, No.26, 1987.
- [11] 植村知正 他, "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" 流れの可視化学会誌, Vol.8, No.30, 1988.
- [12] Horn 著、NTT ヒューマンインターフェース研究所・プロジェクト RVT 訳, "ロボットビジョン - 機械は世界をどう視るか-" 朝倉書店, 1993.
- [13] 安居院猛・長橋弘, "知的画像処理" 昭晃堂, 1994.
- [14] 種子田 定俊, 本地 弘之, "Flexible な表面をもつ平板の摩擦抵抗" 九州大学応用力学研究所所報, Vol.26, pp.85-pp.98, 1967.

- [15] 種子田 定俊, 本地 弘之, "壁面の flexibility が遷移におよぼす影響" 九州大学応用力学研究所所報, Vol.27, pp.25-pp.30, 1967.
- [16] 乾宗夫, "続・眼で見る船型試験の話" 船舶, (30-1), pp.66-74, 1957.
- [17] 乾宗夫, "眼で見る船型試験の話" 船舶, (27-1), pp.27-32, 1954.
- [18] 茂里一紘 他, "船側波形による造波抵抗特性解析とその船型計画への応用" 日本造船学会論文集, Vol.132, pp.11-28.
- [19] 茂里 一紘, 堀田 多喜男, 二宮 伸治, "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, Vol.162, pp.81-89, 1987.
- [20] 上坂吉則, 大田育夫, "パターン認識と図形処理" 文一総合出版, 1984.
- [21] 安居院猛・中嶋正之・木見尻秀子, "C言語による画像処理" 昭晃堂, 1990.
- [22] Herbert Schildt "Artificial Interlligence Using C" McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [23] 二宮 伸治, 茂里 一紘, 細川 学, "気相界面の可視化と船体表面の水中照射による波高の光学的計測" 日本造船学会論文集, Vol.173, No.1, pp.129-pp.135, 1993.
- [24] 二宮 伸治, 茂里 一紘, "回流水槽内に定在する気泡の流跡輝度分布を用いた面内流場の流速計測" 可視化情報学会論文集, Vol.12, No.1, pp.35-pp.38, 1992.
- [25] 二宮 伸治, 茂里 一紘, "流脈輝度分布波形の特徴抽出処理による面内流場の流速計測" 日本造船学会論文集, Vol.169, pp.39-pp.45, 1991.
- [26] Kazu-hiro Mori, Shinji Ninomiya, "Development of a new velocity measurement system by using computerized flow visualization and numerical method" 5th Int. Conf. Num. Ship Hydro, pp.351-pp.360, 1989.
- [27] 茂里 一紘, 二宮 伸治, 土井 康明, "流れの可視化、画像処理と数値計算を併用した方法による3次元流場の計測" 流れの可視化学会論文集, Vol.9, No.34, pp.75-pp.88, 1989.
- [28] 案浦 毅, 戸崎 啓一, "光学的手法を用いた波高分布及び船側波形の計測に関する研究" 広島大学工学部卒業論文 1994.
- [29] 土居 健一, "振動する弾性板の変形と流体力に関する研究" 広島大学工学部卒業論文 1994.
- [30] 細川 学, "光学的手法を用いた波高分布及び船側波形の計測に関する研究" 広島大学工学部卒業論文 1993.
- [31] 中田浩人, 林隆夫, "定在気泡による流れの可視化画像を用いた高速流場の計測" 広島大学工学部卒業論文 1992.
- [32] 加藤高明, 高橋直寿, "流れの可視化と画像処理による3次元流場の計測" 広島大学工学部卒業論文 1989.

[33] 上岡孝志, 松田晃明, "流れの可視化と画像処理による流場計測" 広島大学工学部卒業論文 1988.

[34] 金岡雅敏, 和田憲之, "画像処理を応用した流場計測システムに関する研究" 広島大学工学部卒業論文 1987.

