

自由航走模型船の位置・運動の画像計測

大阪大学工学部船舶海洋工学科
長谷川和彦

1. はじめに

IMO (国際海事機構) は1993年11月、操縦性暫定基準 A.751(18) を採択し、1995年7月1日以降起工される新造船に適用されている。その中では、旋回性能、保針性能、停止性能の基準値を設け、それを満足することが規定されている。その結果、以前にもまして、船の設計段階において操縦性の予測が重要となってきた。拘束模型試験や操縦流体力の理論計算により流体力微係数を推定し、シミュレーション計算によりそれらを確認する手法が通常用いられているが、それを確認する手段として模型船の自由航走試験が再び重要となってきた。しかも、以前のように旋回試験やZ試験といった定型化した試験を実施してその特性を表すパラメータを求めるといった実験解析から、より多様な試験の実施とさらに細かい解析の必要に迫られている。

その目的のため、著者は以前、自由な試験に対応するための模型船位置計測システム¹⁾を開発した。市販のビデオトラッカーと呼ばれる装置が利用できること、2次元平面内の運動であれば1台のカメラでさらに簡単にできるため、同じく市販されている超音波方式と並び模型船の位置計測手法として定着した。

しかしその後、低速時の操縦試験において位置のみならず横流れ速度をより高い精度で求めたい、あるいは水中翼船の旋回試験などのように従来の試験装置では計測が不可能といった場合が出てくるにつれ、この手法のハードウェア上の限界やソフトウェア上の問題点などが出てきた²⁾。

そこで、改めて従来の手法、市販の装置にとらわれない新しい模型船の位置・運動計測システムの開発を目指し、種々の検討を行っている³⁾。本報では、ビデオトラッカー方式の問題点を述べ、現在検討中の画像解析法について述べる。

2. ビデオトラッカー (Video Tracker) 方式の原理と問題点

2.1 ビデオトラッカー (Video Tracker) 方式

模型船など目標物上にまわりと輝度や色相の違うもの (ランプや色紙など) を取付け、それを CCD カメラで撮影し市販のビデオトラッカーにより、ビデオの画像を二値化し、残った画素の重心位置から物体の画面上の位

置を出力する。そして、その画面上での座標をカメラの位置や姿勢から座標変換し実際の目標の位置を求める。

欠点は、太陽光線等の水面反射で、十分な輝度差を得ることができない場合は物標の追跡がうまくいかないことが多い。また、求めた画面座標を空間固定座標に変換するためには、カメラの位置と姿勢 (カメラ座標) を決定する必要があるが、そのために予め位置のわかっている数点とそれに対応する画像上の点から較正と呼ばれる作業が必要である。

2.2 座標系と2次元画像の解析原理

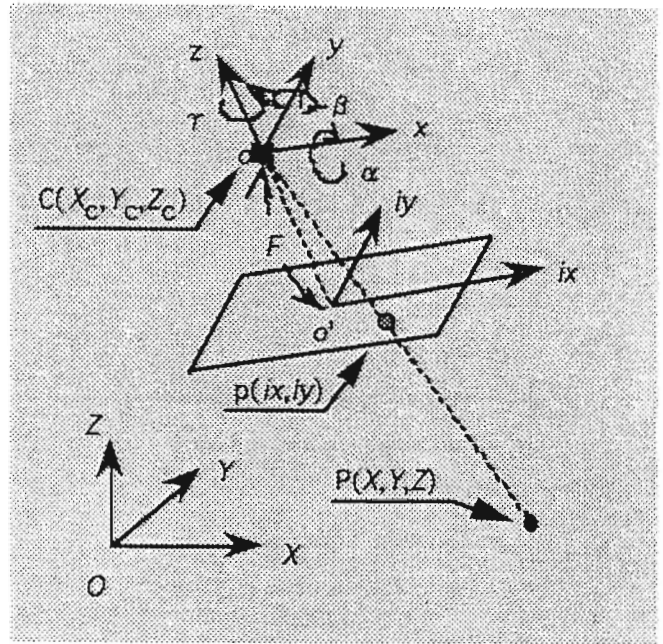


Fig. 1 Coordinate System (Space-fixed, Camera-fixed and Image-Plane-fixed Axes)

空間固定座標を $O-XYZ$ とし、 $C(X_c, Y_c, Z_c)$ を原点とし、順に z 、 y 、 x 軸の回りに γ 、 β 、 α 回転したカメラ固定座標系 $o-xyz$ 、そこから z 軸の負方向に F 平行移動した離散座標系である画面座標系 $o'-ix-iy$ を Fig. 1 のように定義する。空間固定座標系で見たある点 $P(X, Y, Z)$ は画面座標系では $p(ix, iy)$ に 1 画素として映る。 F は画面距離と呼ばれる仮想的な定数である。

このとき、点 P と点 p の関係は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} ix \\ iy \\ -F \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X-X_c \\ Y-Y_c \\ Z-Z_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{pmatrix} X-X_c \\ Y-Y_c \\ Z-Z_c \end{pmatrix} = \frac{1}{k} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ix \\ iy \\ -F \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式からkを消去すると

$$X-X_c = (Z-Z_c) \frac{a_{11}ix + a_{12}iy - a_{13}F}{a_{31}ix + a_{32}iy - a_{33}F} \dots\dots\dots(3)$$

$$Y-Y_c = (Z-Z_c) \frac{a_{21}ix + a_{22}iy - a_{23}F}{a_{31}ix + a_{32}iy - a_{33}F} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

$$\begin{cases} a_{11} = \cos\beta \cos\gamma \\ a_{12} = -\cos\alpha \sin\gamma + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma \\ a_{13} = \sin\alpha \sin\gamma + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma \\ a_{21} = \cos\beta \sin\gamma \\ a_{22} = \cos\alpha \cos\gamma + \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma \\ a_{23} = -\sin\alpha \cos\gamma + \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma \\ a_{31} = -\sin\beta \\ a_{32} = \sin\alpha \cos\beta \\ a_{33} = \cos\alpha \cos\beta \end{cases}$$

となり、カメラの座標 $C(X_c, Y_c, Z_c)$ と姿勢角 (α, β, γ) と画面距離 F (以上の7変数をまとめてカメラ定数と呼ぶことにする) がわかればビデオカメラで捉えた点 $p(ix, iy)$ から $Z=Z_0$ における空間固定座標での点 $P(X, Y, Z_0)$ がわかる。

そこで、すでに空間固定座標系で既知の点4組以上を使い、(3),(4)式を解いてそれらのカメラ定数を決める必要が

ある。市販のビデオトラッカーではそれを自動でやってくれるので便利である。

2.3 ビデオトラッカー方式による計測例と問題点

ビデオトラッカー方式の問題点を洗い出すため、実験を行った。Fig. 2は実験を行った大阪大学自由航走実験池(犬飼池)とビデオカメラを設置した総合研究棟の配置図である。犬飼池は東西約150m、南北約50mの自然の池で、カメラは高さ約30mの総合研究棟の屋上に2台設置した。

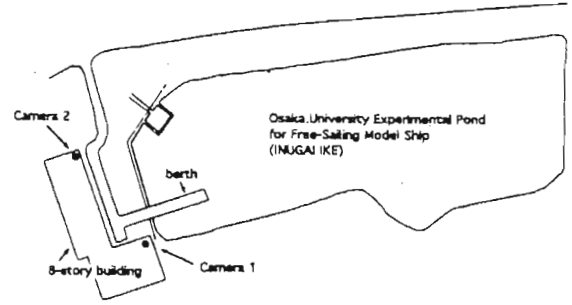


Fig. 2 Layout of Experimental Pond and Setting of CCD Cameras

実験はこの池の中央でガイドにより旋回半径を固定した長さ4mの模型船を半径5.6mで旋回させた。このとき、得られたビデオ画像をカメラ1とカメラ2の画像を重ねてFig. 3に示す。

このビデオトラッカーは540×384の分解能である。校正によりカメラ定数を求めた。しかし、4組の較正值から7個のカメラ定数は一意に決まらない。そこで、カメラ定数を最小自乗法で求め、求めたF以外のカメラ定数を(3)、(4)式に代入して各較正点毎にFを求め、あとは線形補間により全平面毎に対して可変なFを適用する方法(画面距離可変法⁴⁾と定義する)を適用した。

Fig. 4にその結果を示す。これを見ると同一の旋回航跡でありながら、二つの航跡がずれていることがわかる。

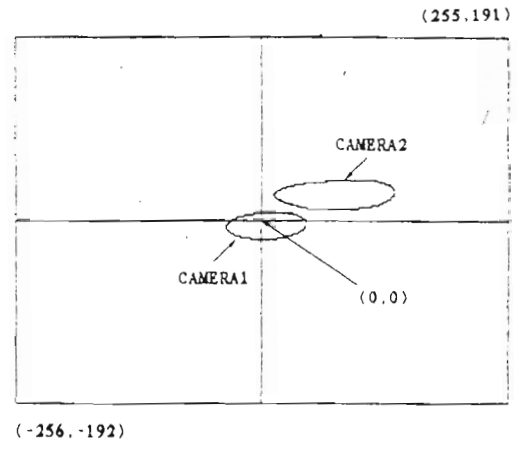


Fig. 3 Image Outputs of a Model Experiment

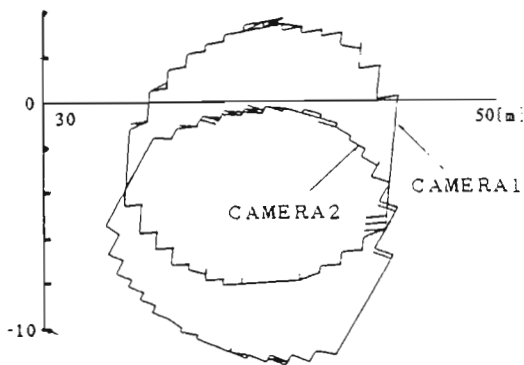
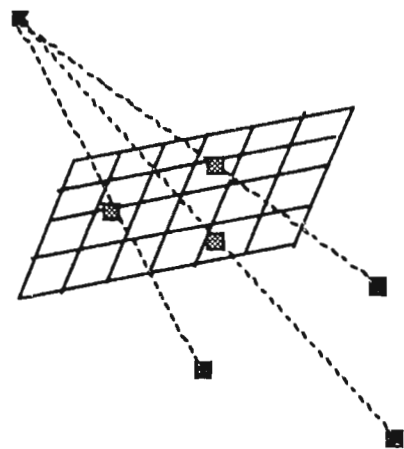
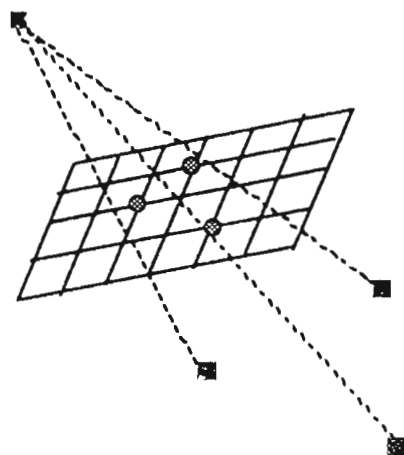


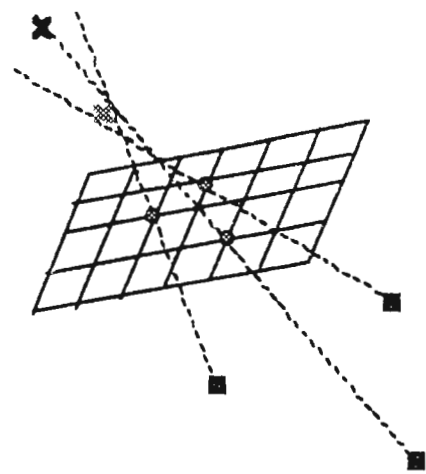
Fig. 4 Result of Variable Image-Plane Distance Method



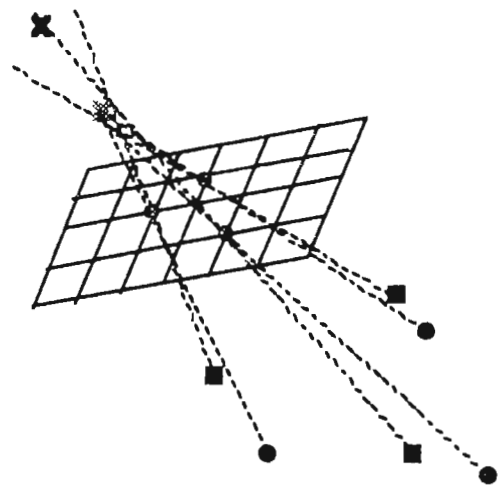
(a) Ideal Images



(b) Actual Images



(c) Fault Origin of Camera Axes (⊗)



(d) Calibrated Results (●) of Calibration Points (■)

Fig. 5 Effect of Calibration

その原因の一つは画面座標が離散化しているためである。つまり、Fig. 5に示すように、(a)実像 ■とカメラ座標の原点 ■を結ぶ直線は画面とは ⊗で交わるが、それは必ずしも画面上の離散化された点ではなく、(b)そこに一番近い画素 ●が出力される。したがって、校正点とその画面座標を既知として最小自乗法によりカメラ定数を求めることは、(c)に示すように相交わらない空間上の3本の直線への距離がもっとも近い点 ⊗を求めたことになる。(d)さらに、そうして求めた値のカメラ原点(仮想原点と呼ぶことにする) ⊗(及び姿勢角)を用いて画面上の点 ●から実空間上の点を推定すると ●となり、与えた点 ■と一致しない。画面距離に比べて実像までの距離が大きい場合、特にカメラの俯角が小さい場合その誤差はかなり大きい。

2.4 ビデオトラッカー方式の改良

こうした従来の方法を改善するために次のような改良

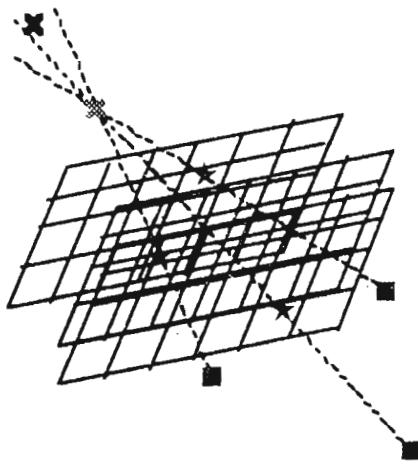


Fig. 6 Iterated Calibration Method

を行った。すなわち、Fig. 5(c)で求めた仮想原点とその姿勢角を固定し、先に述べた画面距離可変法により、各校正点毎の平均画面距離 \bar{F} を求める。そして、各校正点毎にその画面距離を用い、仮想原点及び姿勢角が正しいとして、校正点より画面上の交点★を求める。Fig. 6にそれを模式的に示す。さらに、求めた画面座標点を用いて、再度画面距離可変法を適用し、画面座標点を更新する。これを各校正点毎の画面距離がある誤差以下になるまで繰り返す。

このようにして求めた結果をFig. 7に示す。カメラ1およびカメラ2の結果が実空間面ではほぼ一致した。ただし、Fig. 8(画面座標をカメラ1、カメラ2について実空間面に投影したもの)を見てわかるようにこれ以上の精度はトラッカーの分解能上難しい。

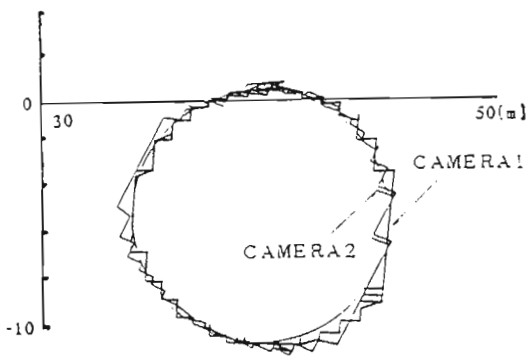


Fig. 7 Result of Revised Method

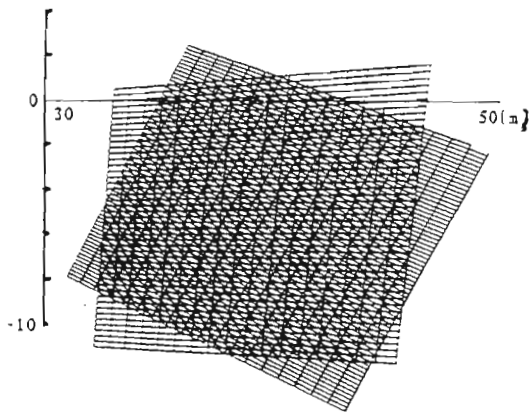


Fig. 8 Projected Grids of Tracker's Resolution

3. 画像解析(Image Analysis)方式

そこで、これらの点を改良するため、直接画像解析方式を提案した³⁾。詳しい手法は論文を参照いただくとしてここでは、校正を要しないカメラ定数の決定手法以外について述べる。

この方法の全体のフローチャートを Fig. 9に示す。

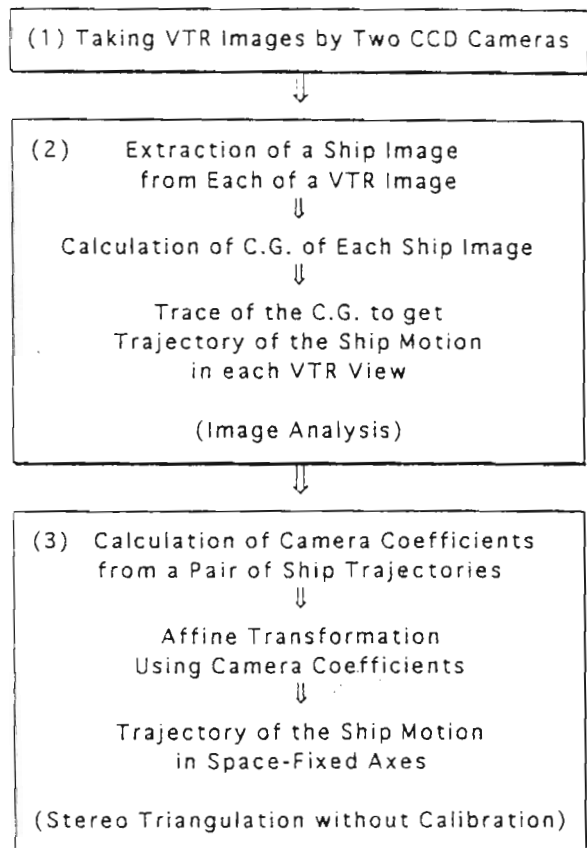


Fig. 9 Flow Chart of Model Ship Position and Motion Measurement System Using Stereo Cameras

- (1) ビデオトラッカー方式と同じであるが、(3)でステレオ画像を用いるので2台のカメラを使う。
- (2)(1)で撮ったビデオの画像を何秒かおきにコンピュータに取り込み、画像解析により画面上の船の位置を求める。ビデオトラッカーが目標物体の輝度などを利用した二値化により輝点の追跡を行うとともにその重心位置を計算するのに対し、本法では直接コンピュータに画像を取り込み、物標そのものの抽出とその追跡を画像解析により行う。
- (3)(2)で求めた画面上の船の位置からカメラの位置や姿勢を用いた座標変換により実際の船の航跡を求める。ビデオトラッカー方式では校正してカメラの位置や姿勢を求めているが、本法では校正を行わない。

3.1 画像の取り込み

本法ではビデオ画像を1秒間隔で 512×512ピクセルの配列に各点8ビット (256階調) のグレースケール画像としてコンピュータに取り込んだ。Fig.10にその一例を示す。

3.2 船影の抽出とその追跡

画像解析により移動体を抽出するもっとも一般的な方法は画像差分である。ただし、連続する3枚の画像から差分と論理積を用いたり、差分の前に画像微分を行う⁵⁾、あるいは複数枚の連続画像の平均から背景画像を作成する⁶⁾などそれぞれの状況に応じた工夫がある。

また、抽出した物体 (の投影画像) は回転、移動や拡大 (縮小) による変形を受けているわけだが、画像認識システムなどではその変形をもとに戻すための工夫も数多く提案されている。例えば、Sunら⁷⁾は物体の投影部の可視中心 (visible region center) と不可視中心 (invisible region center) という概念を用いてその変換ができることを示しており、たいへん興味深い。

ここでは、Fig. 10に示すような状況下での模型船ということから、そのいずれも使わなかった。その理由として、(1)前後の画像間で物体の画像が一部重なっていることが多い。(2)屋外での実験であるので、太陽光線による水面反射や他の物体の陰影など背景画像の輝度差と物体との輝度差があまり変わらない。(3)物体の形状が楕円状であり、凹凸がない、などがあげられる。

本方法を箇条書きで示す。

- (1) 最初の画像のみ、マウスで船のある領域を指定して、そこから適当な部分領域 (船の移動速度、画像の取り込み速度に依存するが、ここでは101×101ピクセル) を切り出す。これは計算時間を短縮するためであり、(1)を含めビデオトラッカー方式とまったく同じである。
- (1') 2枚目以降は1枚目の画像で抽出した船 (の画像) の重心を中心として101 x 101 ピクセルの部分領域を切り出す。この中に船影が入っている限りその追跡が可能である。もし、領域の端部に船影がかかっている (5)で求めた重心で判断) 場合には、その重心を中心に再度切り出す ((2)~(5)を繰り返す) 修正で追跡でき

るが部分領域の大きさが十分であればその必要はない。

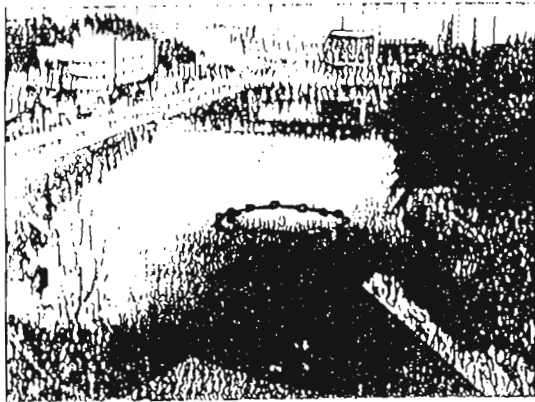
- (2) 切り出した部分領域 (部分画像) から、池の輝度程度の画素を取り除くように二値化する。二値化の閾値は経験的に決めた。ただし、この段階では、船を構成している画素の中で池と同じ位の輝度の部分も消える。
- (3) 船の周辺は輝度差が大きいので、部分画像の微分を行い輪郭線の検出を行う。
- (4) (2)と(3)を組み合わせ、そのどちらかがある閾値以上の画素を二値化する。さらに、雑音除去のためのスムージングを行い、できるだけ自然な船影の抽出を行う。
- (5) 実際には、船影だけが残る場合と、他の陰影などが一緒に残る場合がある。そこで、ラベリングと呼ばれる処理を行い、離れた物体の画像毎に面積と重心計算を行い、面積が最大のものを船とする。そして、その位置は重心を部分画像の中心座標で補正して出力する。

3.3 船首方位の検出

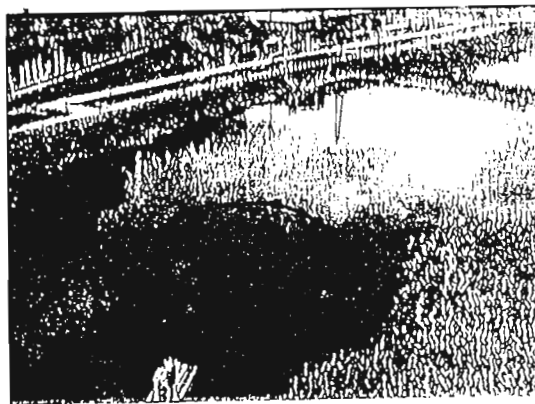
船首方位の検出についても、フーリエ変換や自己相関などの方法が考えられるが、船影が楕円状で、時として影などにより船首・船尾がはっきりしないケースも多い。また、必ずしもそれらの方法で得られた図形の長軸方向が船首方位とは限らない。そこで、種々検討の結果、計算時間が短い点と検出された方位の可否がわかりやすい点から、次の方法を採用した。

- (6) 最初の画像のみ、マウスで船首と船尾の方向を指示する。これは画像のみから船首と船尾の区別をすることが不可能なためであり、方位の決定は(7)によって行う。
- (6') 2枚目以降は1枚目の画像で検出した船 (の画像) の船首方位を用いる。
- (7) (6)または(6')で与えられた方位を中心に適当な角度 (船の運動の角速度と画像の取り込み速度に依存するが、ここでは±5°程度) の範囲で(5)で求めた重心を通る直線と船影との共通部分がもっとも長い角度を船首方位とする。探索は0.1°ごとに総当たりとした。

以上の手順により、画面座標での模型船の運動軌跡 (ビデオ画像上で模型船の位置を連ねたもの) が得られる。Fig. 10はタンカーの旋回試験の例であり、2台のカメラの画面座標での模型船の運動軌跡をそれぞれのカメラから見た画像を重ねてプロットしてある。Fig. 10をもとに、Fig. 9で示したフローチャート上の(3)を実施することにより空間上での真の軌跡が求まる。その詳細や考察は別報に譲るが、Fig. 11にその試算例を示す。ほぼ良好な結果が得られた。



(a) Trajectory from Camera 1



(b) Trajectory from Camera 2

Fig. 11 Result of Extracted Trajectories in Each Camera View

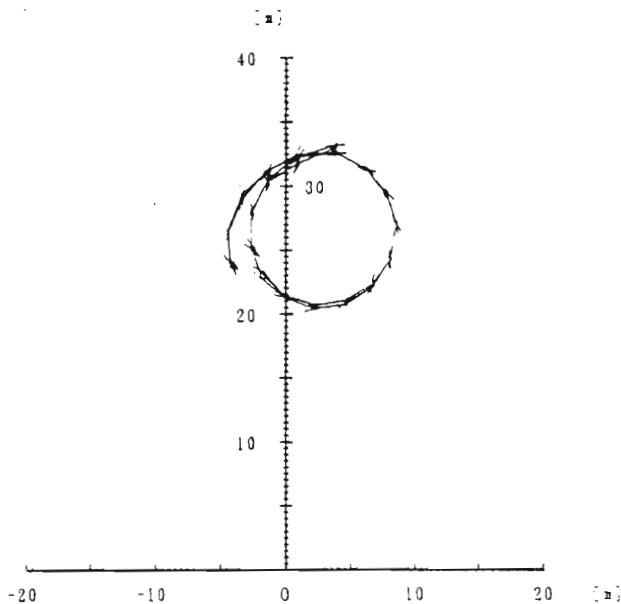


Fig. 12 Estimated Trajectory

4. 結 言

自由航走模型船の位置・運動計測のためのビデオトラッカー方式の問題点と改良方法および較正を必要としない新しい画像解析システムを提案し、実験によりその有効性を確認した。

さらに、両者の融合により現場での解析を可能とするシステム、本報では詳細を述べなかった較正なしてカメラ定数を決定する数学的方法の提案など続けて検討したい。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(C)の補助金により実施されたことを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 長谷川和彦：波浪中の船体6自由度非接触計測システム、関西造船協会誌、第210号、pp.155-160、1988年9月。
- 2) 長谷川和彦：直接画像処理方式による自由航走模型船の位置計測法(速報)、第7回船の操縦性能推定法に関する研究(PSM)専門委員会資料、日本造船学会運動性能研究委員会、PSM7-9、1994年1月。
- 3) 長谷川和彦、鈴木啓介：自由構想模型船の位置・運動計測のための画像解析システム 第1報 船影の抽出と船首方位の検出関西造船協会誌、第222号、pp.83-90、1994年9月。
- 4) 広岡 秀昭：リモートセンシング技術の二次元運動計測システムへの応用、大阪大学卒業論文、1991年3月。
- 5) 増田 功：時系列画像計測、システム/制御/情報、第38巻、第1号、pp.15-20、1994年1月。
- 6) 田村昭博、赤塚孝雄：複数移動体の軌跡追跡、第31回学術講演会予稿集、計測自動制御学会、pp.635-636、1992年7月。
- 7) Y. Sun and F. Qi: Shape Normalization through Visible Region Center and Invisible Region Center, Pattern Recognition Letters Vol.14, pp.407-414, May 1993.