

波浪中の船体6自由度非接触計測システム

大阪大学 工学部 長谷川和彦

波浪中の船体運動を計測したり、計測した結果に基づいてなんらかの制御を行ったりする新しいタイプの水槽実験が増えてきている。こうした実験を行うには従来は曳航電車から動力線や計測・制御のためのケーブルを垂らして模型船と接続していた。しかし、例えば波浪中の転覆実験や実験池における自由航走試験などにおいてはこの方法は使えない。

そこで模型船にマイクロコンピュータを搭載し、ワイヤレスモデムを介して電車上や陸上のパソコンとデジタル通信を行いジャイロによる姿勢信号等を無線転送するとともにパソコンから制御信号を送るデジタル式無線操縦・計測システムを完成した。今回さらに、陸上に設置した2台のビデオカメラにより模型船上の1点を光学的に追跡することによってその三次元位置座標を計測するシステムを作り、波浪中の転覆実験に適用した。この二つのシステムにより、船体の6自由度すべての非接触計測・制御が可能となった。この二つのシステムについて説明する。

最後に、このシステムと無線造波機制御システムを組み合わせた新しい形式の波浪中試験の可能性についても触れる。

1. はじめに

大阪大学では1956年から無線操縦装置を開発して模型船の自由航走試験を実施してきた¹⁾。このシステムはホビー用のサーボ式ラジコンを用いてリレーロジック回路で操舵、モータ回転を指示できるようにしてあり、さらに回転円盤に刻まれた歯形とフォトカプラを組み合わせアナログ量を機械加工精度でのデジタル量に変換して計測したり同様の方法でZ試験のロジックを実現させる当時としては最高のアイデアであった。以来、このシステムを使った実験を300隻以上実施して針路安定性の解析、その船型要素との相関、船尾形状や舵形状の操縦性に及ぼす影響、自船・模型船の尺度影響等々、操縦性研究へ多大の貢献をしてきた。

その後、1973年のオイルショックを契機として大型タンカーの建造が下火になった。また、ほぼ時期を同じくしてMMGモデルと呼ばれる新しい操縦運動の数学モデルが開発されるようになると、拘束模型試験による操縦流体力微係数の推定が主流となり自由航走試験はその微係数を用いた運動シミュレーションの検証を目的に行われる程度になった。

一方、低速時の操縦運動、ダイナミックポジショニングシステム(DPS)、波浪中の姿勢制御システムや転覆実験等、今までにない自由な形態の自由航走実験を実施する機会が増えてきた。そこで、マイクロコンピュータを用いた新しい無線操縦システム²⁾とビデオカメラを用いた非接触3次元位置計測システム³⁾を開発し両者を組み合わせた波浪中の船体6自由度非接触計測システムを完成したのでその概要を紹介する。

2. マイクロコンピュータを用いた無線操縦(テレメータ)システム²⁾

任意の指令に対応するための方法として二つの考え方がある。一つは、従来の無線操縦システムではリレーロジック回路として固定していた部分をマイクロコンピュータに置き換えることにより自由なロジックを実現する方法(自立型)であり、もう一つは任意の指令を陸上のパソコンで計算し、船内のコンピュータは単に操舵機やモータへ印加電圧を渡すだけという方法(データ転送型)である。さらに、計測したデータの記録方法にも二つの考え方がある。船内のコンピュータ上でフロッピーディスクに記録する自立型と時々刻々あるいは実験終了後まとめて陸上のパソコンに転送してしまうデータ転送型である。いずれの場合も前者の方法では陸上には必ずしもパソコンはいらぬが、後者の方法では陸上にもパソコンが必要である。

しかし、重量、スペース、電力、振動、熱などの理由により船内のマイクロコンピュータはできるだけ小型で振動に耐えるものでなくてはならない。こういった検討の結果、船内のコンピュータとして振動に強いVMEバス/ユーロバス規格のシングルボードコンピュータ(CPU MC68000、10MHz)を、またOSとしてはROM化が可能でありかつ、C言語やアセンブラでの開発が容易なOS-9/68000を採用した。そして、陸上のパソコン(NEC PC9801E)との通信はシリアスインターフェイス(RS-232C 9600ボー)をワイヤレスモデム(FM 130MHz)にて使用した。さらに、操舵機等の駆動信号用として8チャンネルのD/A変換ボード、各種信号計測用に32チャンネルのA/D変換ボードを組み込んだシステム構成である。図1に全体の構成を示す。

基本的なデータ転送型プログラムはすでにOSのカーネル(核)部とともにROM化しており、実行時パラメータを陸上パソコンから与えるだけでよい。その時は陸上のパソコンのキーボードまたはジョイスティックからテレビゲーム風に模型船

の操縦ができるようになっている。

また、自立型プログラムの場合は、陸上パソコンを船内コンピュータのターミナルモードとして使い、C言語でプログラムを作成し実行形式ファイルをロードして使用することももちろんできるが通常は、一度開発済みの自立型プログラムの実行形式プログラムをモトローラのSフォーマットと呼ばれるアスキーデータファイルに変換してパソコンに転送して保存してあり、実験時にパソコンから逆に転送して実行形式に再度変換する（ダウンロードと呼ばれる）。この時陸上のパソコンは自立型プログラムの起動やパラメータ設定とコマンド入力などを行うだけで、船内のコンピュータがコマンドを解釈してあらかじめプログラムされた運動を行う。したがって、ある実験だけのための自立型プログラムを作成する場合も回路の変更を一切行わずにプログラムの変更のみで可能となった。

3. ビデオカメラを用いた3次元非接触計測システム³⁾

画像処理装置の一つにX-Yトラック（変位置検出装置）と呼ばれるものが市販されている。ビデオカメラ等の画像データから輝点（コントラストのはっきりした点）の位置を検出し、かつ、追跡する装置である。これを使えばある平面内の位置を非接触で計測することが可能である。市販の装置はこういった用途を目的として開発されており、実際に水槽実験でも実用化されている⁴⁾⁵⁾。さらにボードを増設してチャンネル数を増やせば二点以上の計測が可能である。

大阪大学では従来から、水中超音波による三角測量方式の非接触位置測定装置を用いて主に、平水中の船位計測を行ってきた。しかし、この方法は本来、実験池や角水槽のように広い水面でのしかも平水中に実験に適しており、幅の狭い長水槽では三角測量の原理上精度が悪く、また電磁波の影響等でノイズが入りやすく、さらに、波浪中では三次元の位置を同定できない。

昨年、波浪中の転覆実験を実施するに当たり前項で述べたテレメータシステムを開発して、ジャイロからピッチ、ロール、ヨーの運動が計測できるようになったのを機に、2台のビデオカメラを使いX-Yトラックを用いた3次元位置計測システムを開発した。すなわち、模型船上に1個の豆電球をつけ、曳航電車の上に水槽の幅いっぱいのところを2台のビデオカメラを設置し（図2）それぞれのカメラが捕らえた1個の豆電球をX-Yトラックで追跡しその交点として船位を計算する（図3）。

3. 1 解析の手順

図4に解析の手順を示す。画面座標とは図3の（IX, IY）座標系である。これはカメラ座標系（i, j, k）（図5、カメラは原点P）から見ると球面座標とみなすことができる。また、カメラ座標系は図6に示す電車座標系（X', Y',

Z') からみると P 点であり、その位置を決める 6 つのパラメータが P X, P Y, P Z, R 1, R 2, R 3 である。さらに、目標点との距離があまり変わらないように電車をマニュアルで追従させているので、電車の走行速度を積分して X 座標に加えることにより空間固定座標系に変換できる。

図 5 において P Q の方向ベクトルは、

$$\vec{PQ}(i, j, k) = (\cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta, -\cos \alpha \sin \beta) \quad (1)$$

で与えられる。

また、図 6 においては、

$$\vec{PQ}(X', Y', Z') = K \cdot \vec{PQ}(i, j, k) \quad (2)$$

ただし、

$$K = \begin{pmatrix} \cos R_1 \cos R_2 & \cos R_1 \sin R_2 \sin R_3 & \cos R_1 \sin R_2 \cos R_3 \\ & -\sin R_1 \cos R_3 & +\sin R_1 \sin R_3 \\ \sin R_1 \cos R_2 & \sin R_1 \sin R_2 \sin R_3 & \sin R_1 \sin R_2 \cos R_3 \\ & +\cos R_1 \cos R_3 & -\cos R_1 \sin R_3 \\ -\sin R_2 & \cos R_2 \sin R_3 & \cos R_2 \cos R_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_1 = \tan^{-1}(PY/PX) \quad (4)$$

$$R_2 = \tan^{-1}(PZ/\sqrt{PX^2+PY^2}) \quad (5)$$

けっきょく、目標の位置ベクトル L はカメラ 1, 2 に応じて

$$L_{1,2} = P_{1,2} + s_{1,2} \cdot \vec{PQ}_{1,2}(X', Y', Z') \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 P はカメラの位置ベクトル、 s は媒介変数である。

目標点は L_1 と L_2 の交点として求めることができるが、実際には図 3 に示すように交わらない。そこで、この 2 本の直線と直交する直線との交点の中点を目標点とみなすことにする。すなわち、

$$\mathbf{L} = 1/2 (\mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2) \quad (7)$$

ただし、 s_1 と s_2 は次式を満たす値とする。

$$\begin{aligned} (\mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2) \cdot \overrightarrow{PQ_1} &= 0 \\ (\mathbf{L}_1 - \mathbf{L}_2) \cdot \overrightarrow{PQ_2} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

船の重心位置の座標 \mathbf{G} を得るためにはさらに、ジャイロで計測した船のピッチ角 θ 、ロール角 ϕ と電球の重心からの高さ h を用いて、

$$\mathbf{G} = \mathbf{L} - h \cdot (-\sin\theta, \cos\theta \sin\phi, -\cos\theta \cos\phi) \quad (9)$$

で求めることができる。

3. 2 平面の歪の補正と校正

実際にはさらに、レンズや撮像管等の歪によりカメラ座標系で平面が歪んでいる。図7は水平面内で1m四方のメッシュがどのように歪むかを調べたものである。そこでこの各点(図8)およびメッシュ内の点(図9)がもとの位置を保つように補正した。

図10は半径15cmのターンテーブルを用いて検証を行った結果であり、ほぼ満足できる。

ここで、本システムにおいて生ずる誤差として

- (1) X-Yトラックの位置検出の分解能(画面内で320×240)
- (2) カメラのブレ等によって生ずる L_1 、 L_2 の食い違い
- (3) 豆電球の大きさによる輝点の大きさの影響

等が考えられる。図11は次節で述べる波浪中の転覆実験において(2)のタイムヒストリーを求めたものである。これによると波浪中の実験においても電車をうまく追従させて常にカメラ座標系の原点から大きく外れないようにすれば、2~4cm以下の誤差で計測できることがわかる。

4. 波浪中での転覆実験への適用

実験は2.5mのコンテナ船の模型を使い、2.と3.で述べたシステムを用いて長水槽(100m×8m×4.3m)にて行った。

図12、13がモニタ画面上で計測した模型船（の輝点の）軌跡であり、図14が解析の結果得られた船体の航跡を（6秒目から）3次元的に表したものである。ともに1秒毎にプロットしてある。図15、16、17は6自由度すべてと舵角、電車上で計測した波高のタイムヒストリーである。この場合、13秒目に転覆していることがわかる。

そのほか、フィンスタビライザーを用いた横揺れの制御実験⁶⁾にも2.の無線操縦システムを用いて、複雑な指令にも適用できることが確認できた。

今後、このシステムを用いればさらに複雑な実験や模型船内で高度な判断をする実験（避航操船やダイナミックポジショニング、波浪を予測して制御を行う実験等）に役立つものと思われる。

さらに、電車上から赤外線モデムを使った造波機のリモートコントロールシステムへ接続することによって、模型船から造波機に造波信号を直接送ることもできるので全く新しいタイプの波浪中実験も可能である。

謝 辞

2.の無線操縦システムの開発は造船研究協会のRR24（IMO新復原性基準に関する調査研究、元良誠三部会長）の研究の一部として実施されたことを記す。また、研究全般を支援していただいた浜本剛実教授、システム開発を修士研究や卒業研究の一部として実施された岡崎 正、飯田 隆、深井隆文の各氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1)野本謙作他：船の操縦性に就いて（1）、（2）、造船協会論文集第99号、第101号、昭和31年6月、昭和32年6月。
- 2)長谷川和彦：マイクロコンピュータを用いた模型船無線操縦システム、第5回低速・浅水域数学モデル検討専門委員会資料（MSS5-11）、昭和61年11月。
- 3)深井隆文：テレビカメラによる三次元運動計測装置に関する研究、大阪大学卒業論文、昭和63年3月。
- 4)竹沢誠二他：係留された半没水型海洋構造物の波浪中運動の実用計算法（係留水深および係留システムの影響）、日本造船学会論文集第155号、昭和59年6月。
- 5)京江 宰：半潜水式海洋構造物の長周期運動に関する研究、大阪大学修士論文、昭和62年3月。
- 6)浜本剛実他：フィンスタビライザーと舵による横揺れの制御について、関西造船協会誌第209号、昭和63年6月。

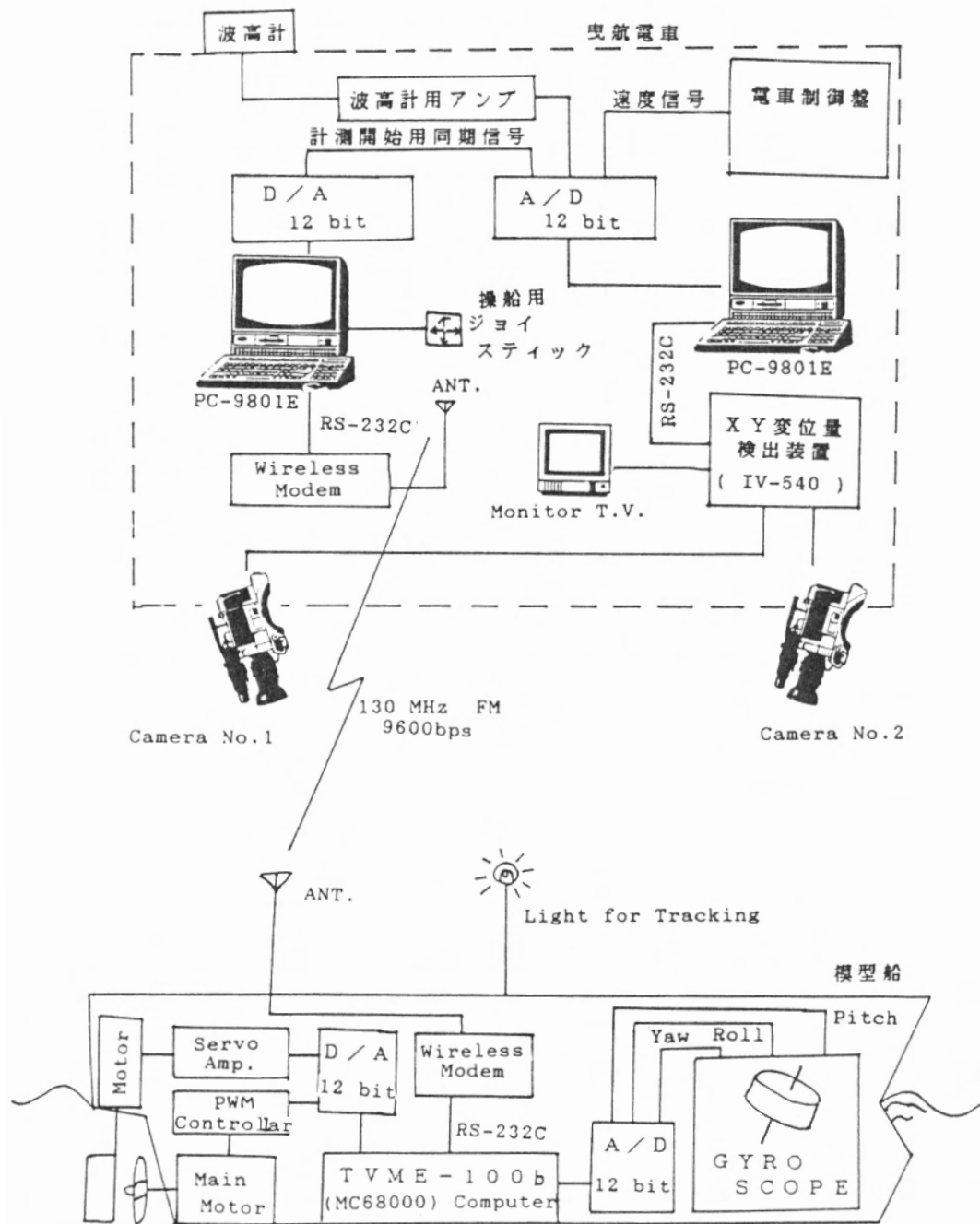


図1 システム構成

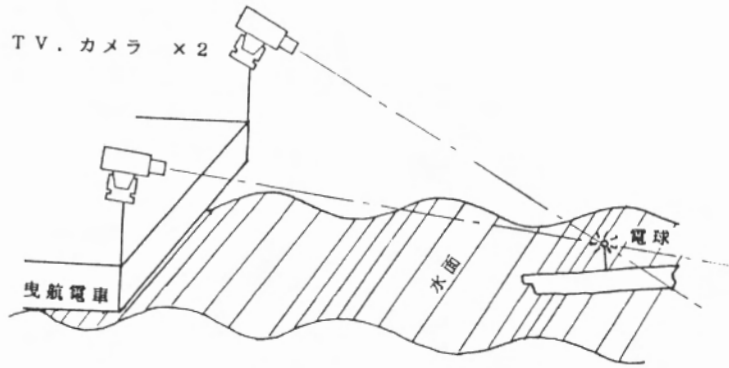


図2 ビデオカメラ配置図

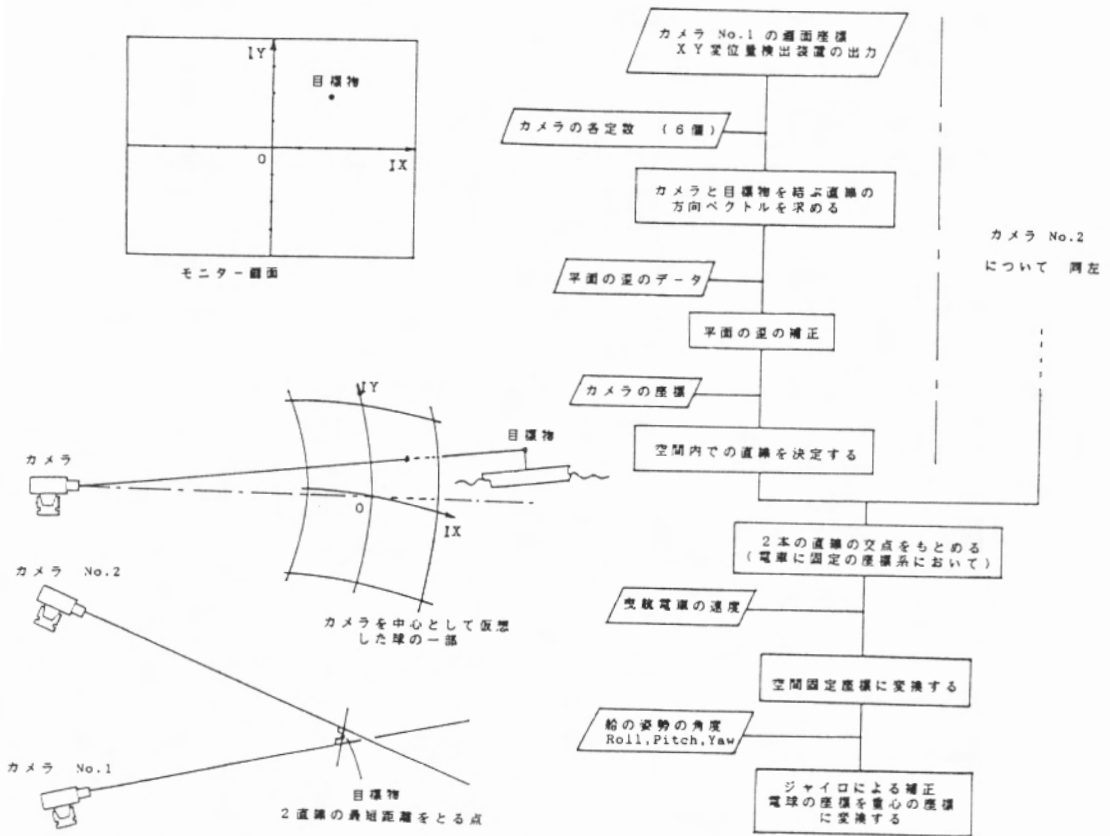


図3 カメラの画像と実際の座標

図4 解析の流れ図

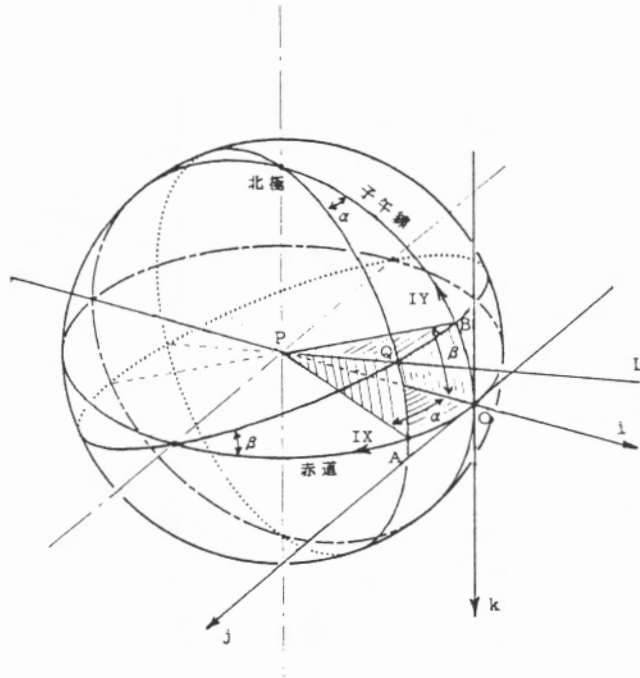


図5 (IX, IY) 座標系と (i, j, k) 座標系

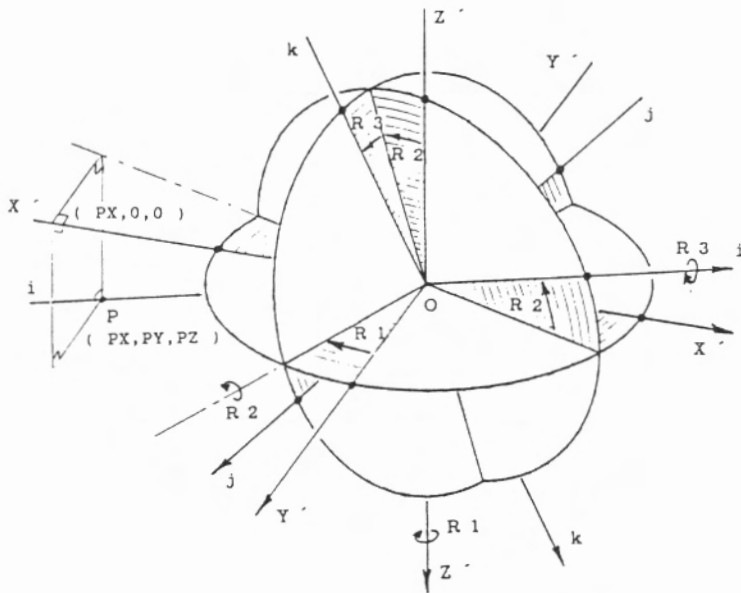


図6 (i, j, k) 座標系と (X', Y', Z') 座標系

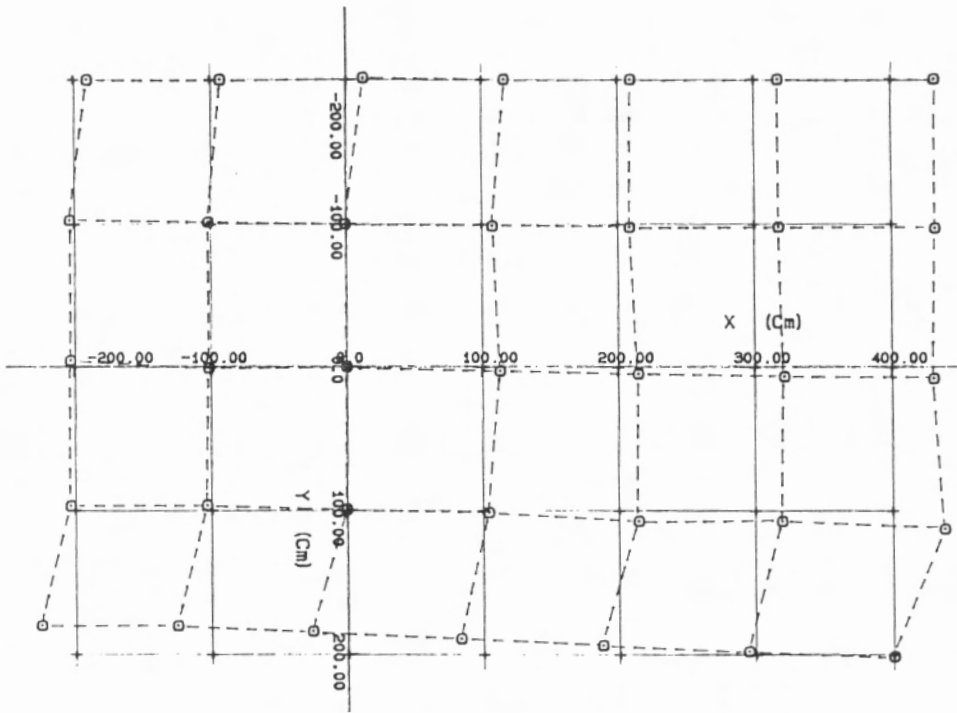


図7 平面歪 (カメラNo. 2)

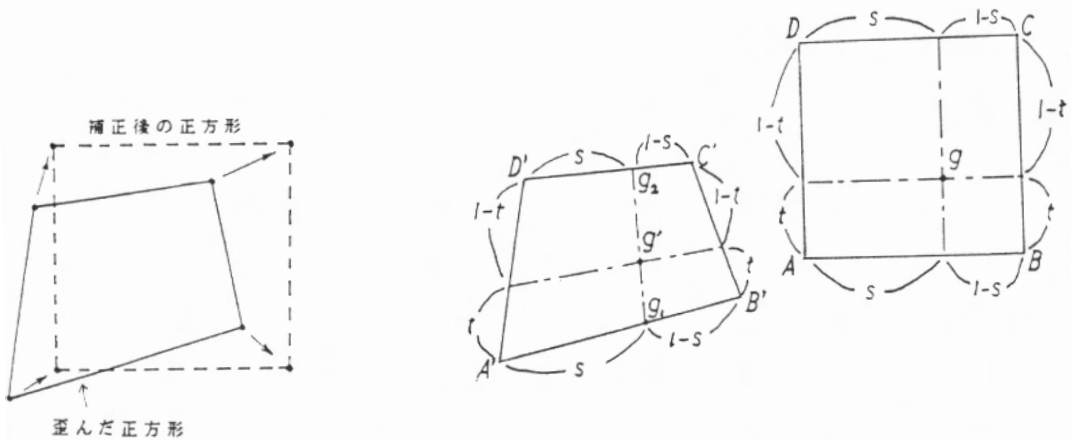


図8 メッシュの補正

図9 メッシュ内の点の補正

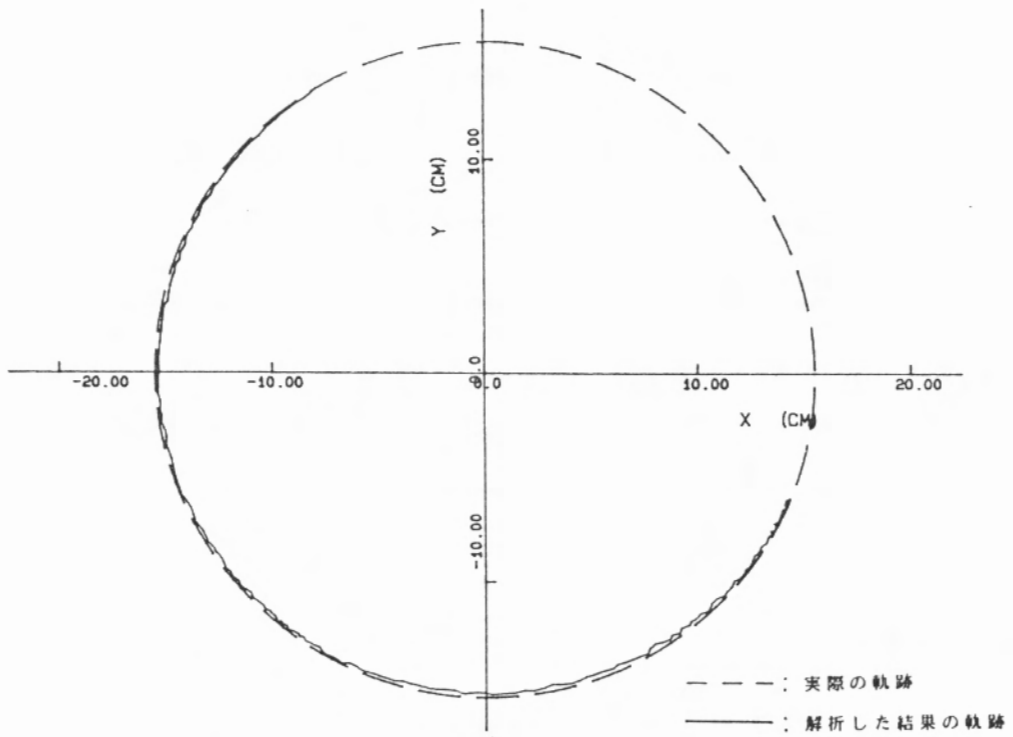


図10 システム校正 (半径15 cmの円)

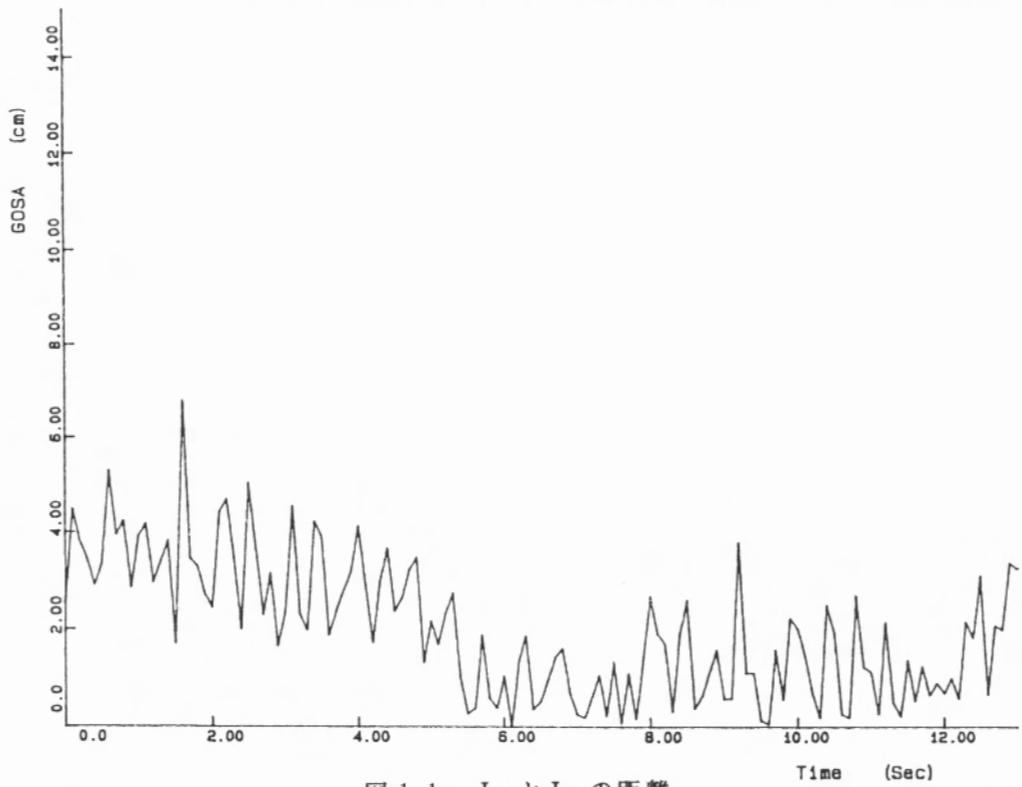


図11 L₁とL₂の距離

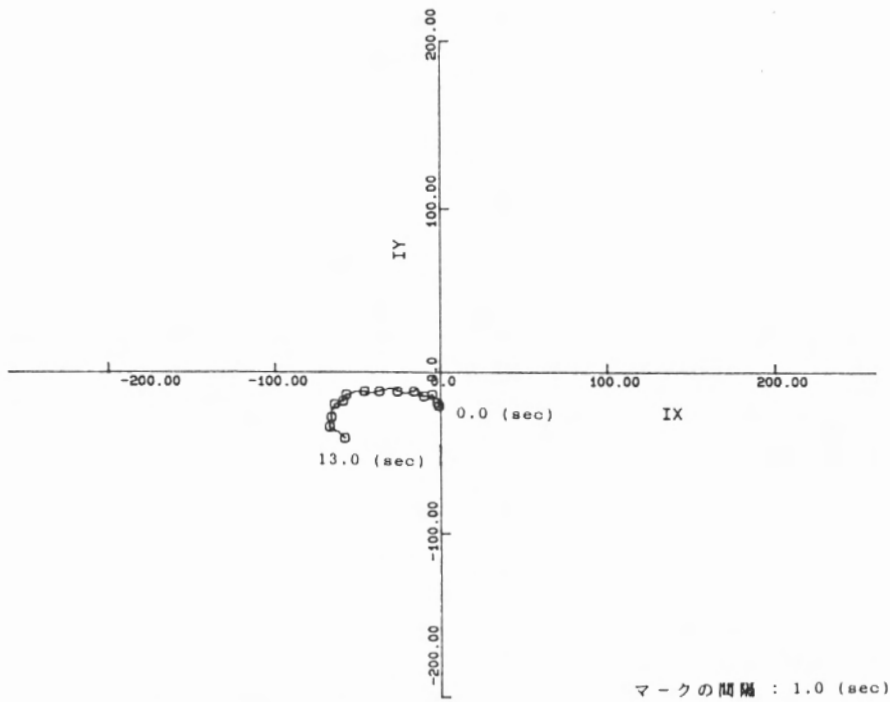


図 1 2 カメラ座標での追跡結果 (カメラ No. 1)

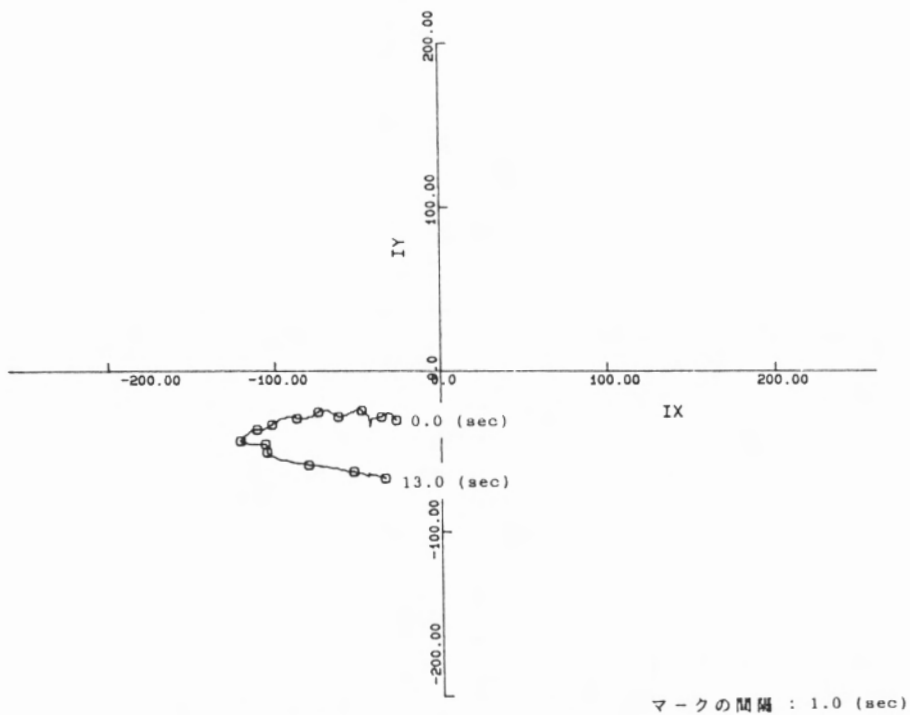


図 1 3 カメラ座標での追跡結果 (カメラ No. 2)

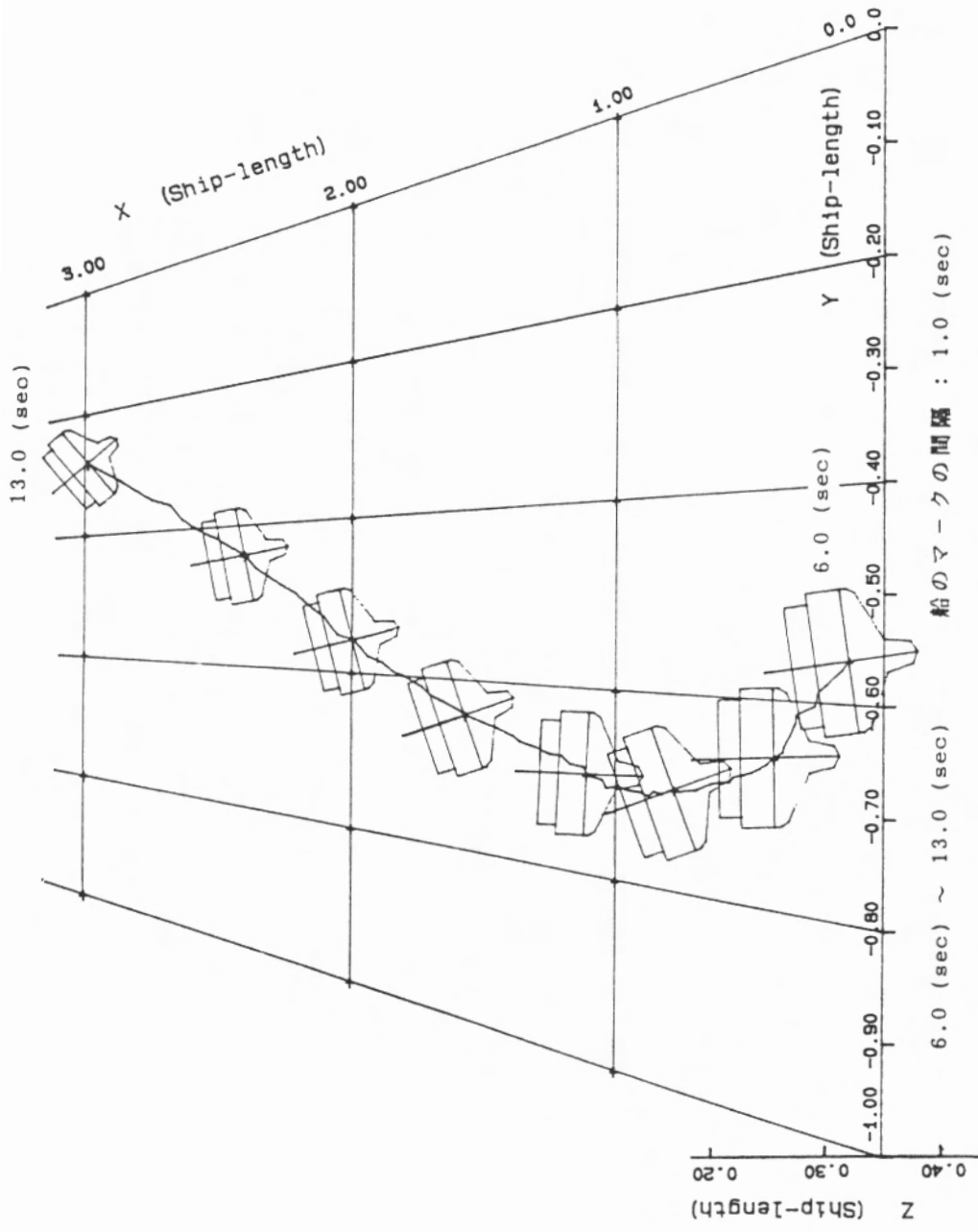


図 14 航跡図 (船の真後ろ上方からみた場合)

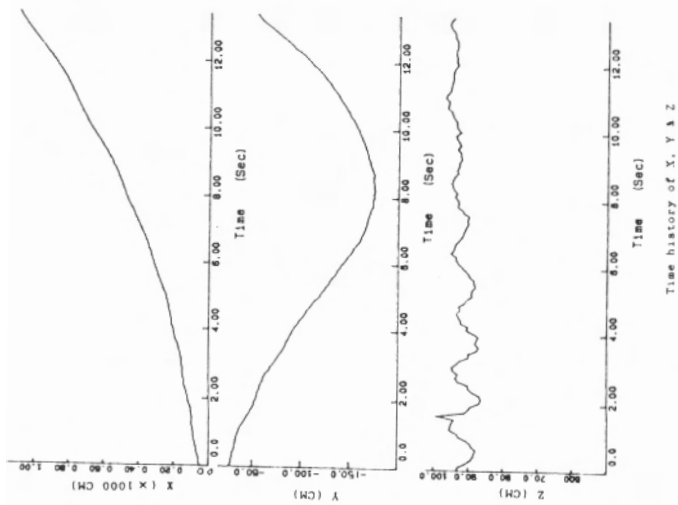


図15 タイムヒストリー (X, Y, Z)

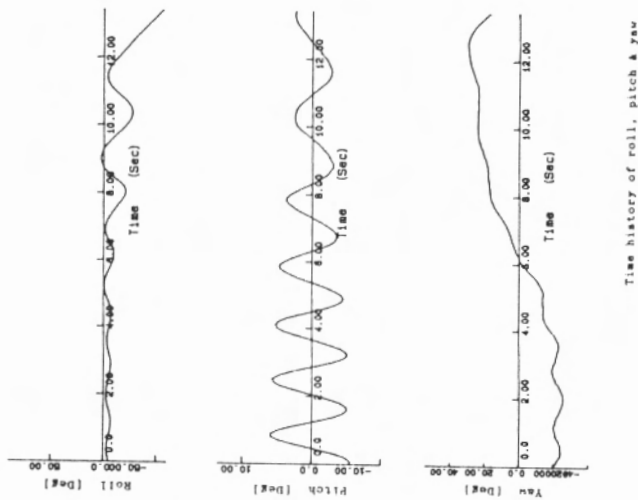


図16 タイムヒストリー (ロール、ピッチ、ヨー)

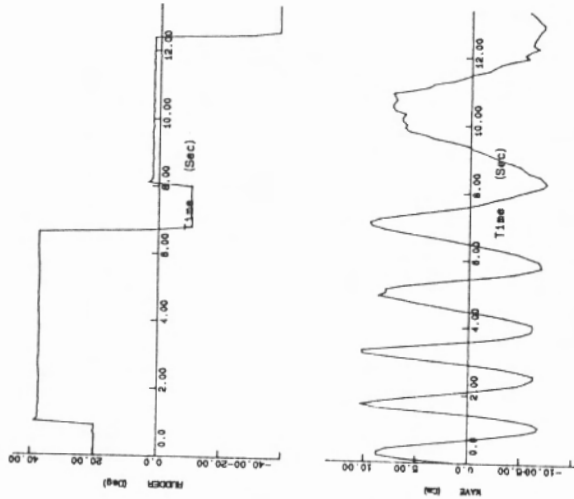


図17 タイムヒストリー (舵角、波高)