

海上自衛隊哨戒飛行艇PS-I型用

訓練用シミュレータの模擬視界装置

Visual Display Systems for Pilot Training

この論文は、海上自衛隊哨戒飛行艇PS-I型機の操縦訓練用シミュレータの模擬視界装置の機器構成と各装置の制御信号の発生とについて述べたものである。このシステムは、閉回路テレビ技術と波浪模型とを利用したモノクロテレビ方式の模擬視界装置である。

模擬波浪発生装置は、撮影部、波浪模型部及び照明装置により構成され、波浪階級1～5、波高0.5～4m、波長20～200m、機体速度10～160kt、機体高度0～900ft、水平視角60度の模擬が可能である。模擬視界表示装置は、テレビ拡大投映機とスクリーンとで構成される。

宮村元博* Motohiro Miyamura

平石了** Satoru Hiraishi

島崎健一** Ken'ichi Shimazaki

1 緒言

最近、電子計算機の発達とともに、シミュレータを利用した各種の教育訓練が活発化し、我が国においても航空機⁽¹⁾、原子力発電⁽²⁾、火力発電⁽³⁾、新幹線⁽⁴⁾などの要員教育に本格的な訓練用シミュレータが導入されるようになった。

筆者らは、防衛庁技術研究本部の指導のもとに哨戒用飛行艇PS-I型機の操縦訓練用シミュレータを開発し^{(5)～(7)}、昭和48年2月海上自衛隊岩国基地に納入した。

このPS-I型機は荒海離着水が可能な航空機であり、この訓練装置は従来の訓練用フライトシミュレータのもつ機能のほかに、水上運動と波浪海面での離着水の模擬を行なうことを大きな特徴としている。

このため、世界でもその例を見ない海面の模擬波浪を発生させて操縦室の前方スクリーンに投映する模擬視界装置をもち、また波の条件に合わせて機体動揺を模擬する油圧駆動機構を備えている。

訓練用シミュレータの模擬視界装置は次の方式が実用されている。

(1) 閉回路テレビ方式

操作情報に対する反応が忠実に表現される。

(2) 映画方式

表示の画質は高いが、操作情報に対する反応が制限される。

(3) 電子合成(電子計算機により発生)

抽象化された映像となるが今後の発展が期待されている。これらの方式の中で現在最も多く利用されているのは、閉回路テレビ方式である。

日立製作所は昭和41年2月、閉回路テレビ方式の模擬視界装置を国内で初めて実用化し⁽⁸⁾、科学技術庁航空宇宙技術研究所に納入した。更に昭和45年の万国博覧会にトラベルシミュレータを展示した⁽⁹⁾。

今回開発した模擬視界装置は、海面波浪を模擬することが主題であるため、波高、波長、及び視程などのパラメータが訓練課題に対応して容易に変更でき、且つ立体感を再現させるなどの目的から閉回路テレビ方式を採用した。

以下に、これらシステムの機器構成、及び各装置の制御信号発生用の演算について述べる。

2 シミュレータ開発の背景

飛行艇は陸上機と運用形態が異なるため、操縦訓練用のシミュレータには模擬視界装置が重要な役割を果たし、特に荒海での離着水訓練においては必要欠くことのできない条件となる。以下に、シミュレータの特殊性、要求される機能、及び模擬方式について述べる。

2.1 飛行艇シミュレータの特殊性

飛行艇は通常の陸上機と異なり、管制塔からの指示(又は誘導)を受けることなく、機長の判断によって任意の海面に対して離着水を行なうことが多い。従って、任意の海面に対する離着水訓練がシミュレータを利用して計画的、且つ段階的に実施される場合は、パイロットが操縦の手掛りとして必要な外部視界情報はすべて模擬視界装置により提供されることになる。

次に機体の運動面から考えると、水上運動のシミュレーションが必要であり、特に飛行艇の水上運動は通常の船舶と同様に分布定数系で、しかも実時間のシミュレーションが要求される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

2.2 模擬視界装置に要求される機能

離着陸訓練用シミュレータの模擬視界装置は、機体が滑走路に対してどのような相対関係にあるか、すなわち着陸進入時においては定められた地点に着地するかどうか、あるいは離陸滑走時における滑走路端までの余裕はどの程度となっているかなどの予測に必要な視覚情報を、パイロットに与えることが主な目的とされている。

一方、飛行艇の離着水はあらかじめ計測されている風向、風速、及び波高を参照して、機長が直接に海面波浪を目視しながら、機体の受ける動揺、及び衝撃力が小さくなるような機体と波浪の相対関係、又は姿勢を保って離着水を行なう。このため、模擬視界装置は海面波浪が滑走路のような平面ではなく、波高、及び波長がある程度把握できるような立体感をもち、且つ時間関数として変動するような映像が必要になる。

次に海面波浪の波高と波長は、訓練課題に対応して必要な値に設定できることが要求される。

2.3 模擬方式の選定

航空機の操縦訓練用の模擬視界装置は映画方式、テレビ方

* 新明和工業株式会社 ** 日立電子株式会社小金井工場

式、及び電子合成方式などが利用されている。ここで、映画方式は視覚情報の分解能、色彩、リアリティの点では最も優れているが、パイロットの操作情報や機体運動などによるフィードバック情報が制限される。これに対して、テレビ方式は映画方式の逆になる。また、電子合成方式では立体感の把握が困難である。以上のことから、模擬視界装置はパイロット及び機体からのフィードバック情報が忠実に反映されるテレビ方式を採用することになった。

3 模擬視界装置の構成と機能

模擬視界装置の基本的な構成は海面波浪を模擬するための波浪模型、模型を撮影する撮影部、更に映像をパイロットに提示するための投影部とスクリーンとから成る。図1にこれらの系統図を、また表1に各装置の概略機能を示す。

3.1 模擬波浪発生装置

波浪発生装置は、光学系とテレビカメラを用いた撮影部、波浪を発生させる波浪模型部、及び照明装置とにより構成される。

撮影部は、光学系とテレビカメラにより忠実な映像の発生と同時に、機体運動(6自由度の運動)のうちの角運動の一部、すなわちピッチング及びローリングを模擬している。また、波浪模型部は波浪の発生のほかに、機体運動の前後進運動、上下運動、及び旋回運動をそれぞれ模擬している。更に、撮影部と波浪模型部の合成運動模擬によって横滑り現象の模擬も行なっている。

3.1.1 撮影部

撮影部は一般にピックアップ部とテレビカメラとを一体として組み合わせて構成するが、これらの機構には次の3方式

が考えられる。

- (a) テレビカメラ方式
- (b) テレビカメラ-ガラス ファイバの結合方式
- (c) テレビカメラ-光学系の結合方式

ここで、(a)のテレビカメラ方式は模型面とカメラとの間隔(高度)が制約される。(b)のテレビカメラ-ガラス ファイバの結合方式は機体の角運動(ϕ , θ , ψ)の模擬に対する制御が困難で、しかも分解能が低い。(c)のテレビカメラ-光学系の結合方式は、価格が割高となるが最も実現性が高い。以上のことから、テレビカメラに光学系を結合する(c)の方式を採用した。

(1) 光学系

光学系は機能的にみて、自然な描写を行なう撮影用光学系と3軸(ロール、ピッチ、ヨー)角運動を模擬する角運動光学系の二つに大別され、次のような機能が必要になる。

- (a) 収差が少ないこと。
- (b) ひずみが小さいこと。
- (c) 写角深度が深いこと。
- (d) 焦点距離が人間の目のもつ特性に近いこと。
- (e) 十分の光量が得られること。

これらの機能を考慮して、光学系の撮影機能は表2に示すとおりとし、また図2に示すようにレンズとプリズム系によって構成され、飛行艇のピッチングとローリングの角運動(ヨーイングは除く)はプリズムの運動によって模擬される。角運動の模擬特性は表3に示すとおりである。

(2) テレビカメラ

撮影用のテレビカメラは日本テレビジョン放送標準方式に準ずる全トランジスタ化されたプランビコンカメラ装置を使用し、カメラヘッド、カメラ制御器、及び同期信号発生器に

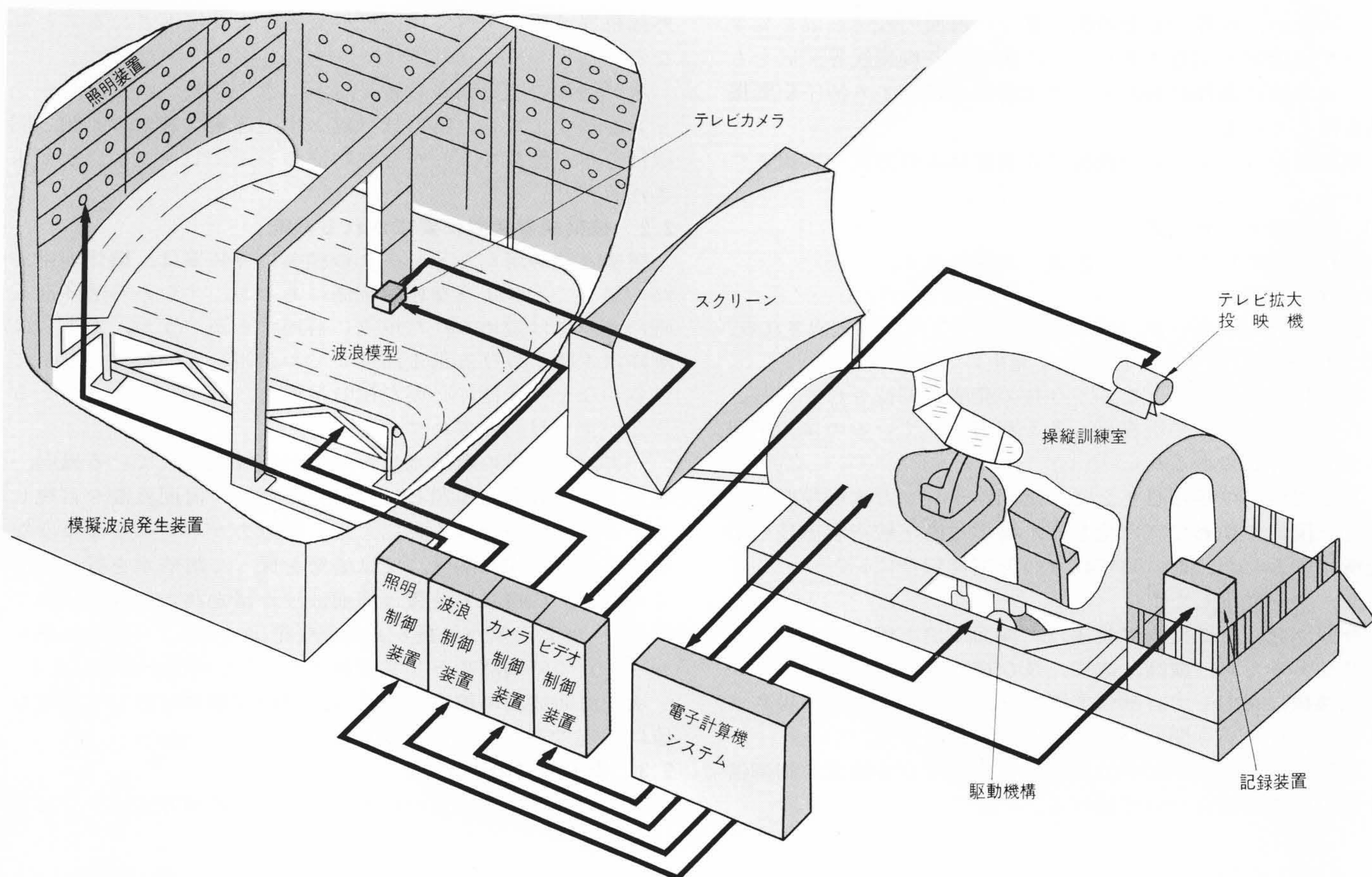


図1 模擬視界装置系統図 シミュレータの全体システムと模擬視界装置との関連を表わしたものである。

表 1 模擬視界装置の概略機能 模擬視界装置の全般的な機能をまとめたものである。

各部の名称	概略機能	各部の名称	概略機能
1. 撮影部	(1)光学系 撮影機能と角運動模擬機能をもつ。 (a) 包括水平視角：60度 (b) 角運動系の模擬：ピッチ、ロール、横滑りの模擬 (c) オートフォーカス機能による自動焦点制御	4. 照明部	(1)照明装置 (a) 波浪模型部に必要な照度(7,000～10,000lx)を与える。 (b) 晴れ、曇り、視程不良、夜の各視程の再現
	(2)撮影用カメラ 光学系による結像を映像信号に変換するブランビコンモノクロームテレビカメラ	5. 制御部	(1)映像制御部 撮影部からの映像信号を投映部に送出するまでの映像系の制御
	(3)遠景模型 無限遠の空、雲を表示する模型部 (a) カメラ上下機構との相対運動による見掛けの水平線の模擬 (b) 波動機構ターンテーブルとの同期回転によるヨーイングの模擬		(2)駆動機構制御部 各部の駆動制御機能 (a) 対地速度……波浪膜面の駆動 (b) 高度……撮影部及び遠景模型の上下動 (c) ヨーイング……波動機構、遠景模型の同期回転 (d) ローリング……光学系ローリング用プリズムの回転 (e) ピッチング……光学系ピッチング用プリズムの回転 (f) 横滑り……光学系横滑り用プリズムの回転 (g) オートフォーカス……光学系フォーカシングレンズの駆動 (h) 波の位相と位相速度……波動機構の進行速度制御
	(4)カメラ上下機構 撮影用光学系、カメラの上下動による高度の模擬		(3)環境条件の設定 設定機能 (a) 視程の設定……照明装置に視程切換えの信号を送出 (b) 波浪の設定……波動機構に波浪切換えの信号を送出
2. 投映部	(1)テレビ拡大投映機 撮影用カメラからの映像信号を受け映像をスクリーン上に拡大投映する高輝度ブラウン管式投映機	部	
	(2)スクリーン 操縦席前方に取り付けられた凹面状の反射形スクリーン		
3. 波浪模型部	(1)波浪膜面 エンドレスゴムシートにさざ波を模擬するビニルシートを装着させた膜面		
	(2)波浪膜面駆動機構 波浪膜面を対地速度に応じて前進、又は後進させる駆動機構		
	(3)波動機構 (a) 波長、波高の異なる5種類の波浪の模擬 (b) ターンテーブルを回転させ波向を変え機体のヨーイングの模擬		

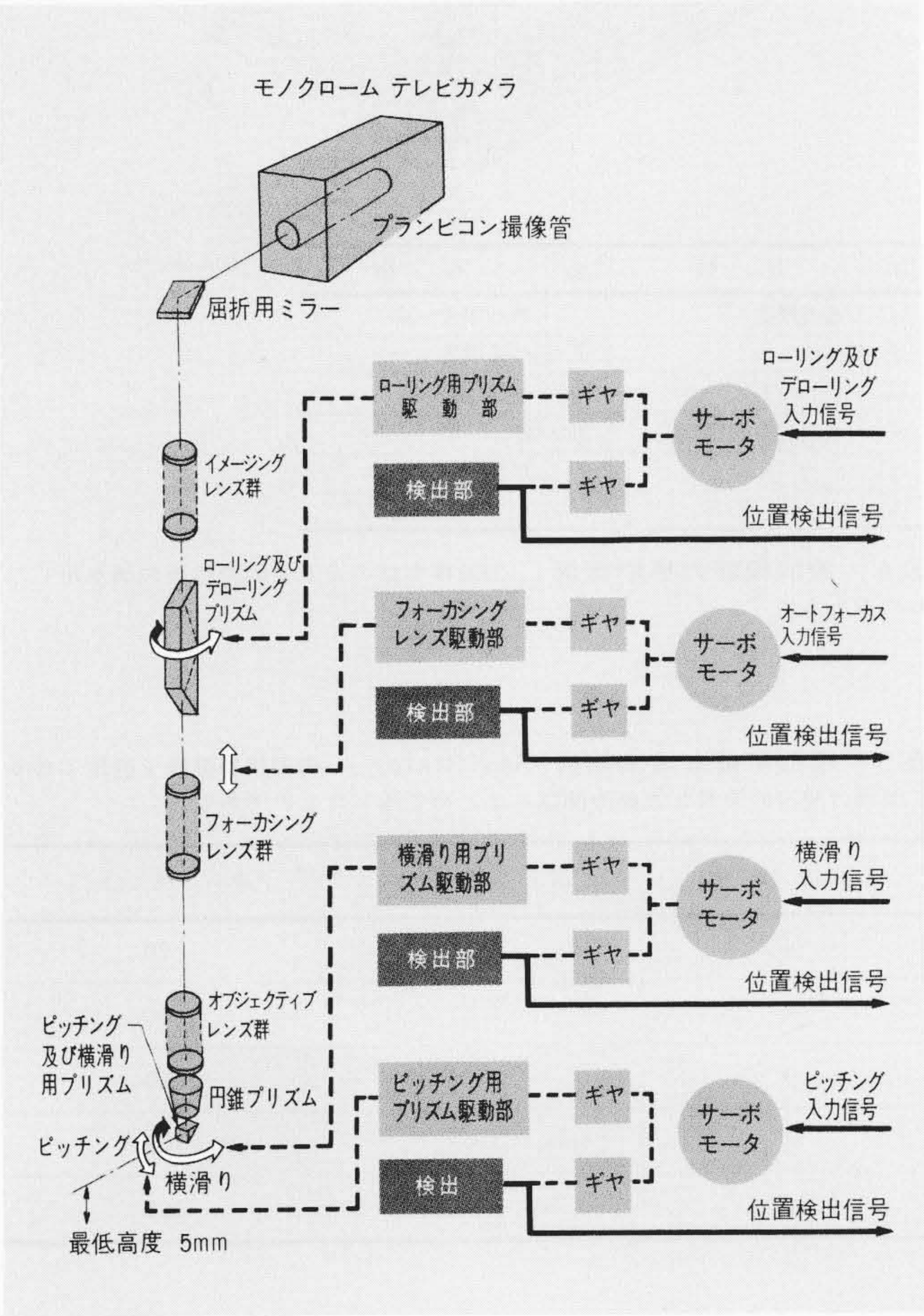


図 2 模擬視界装置光学系ブロック線図 光学系のレンズとプリズムの関係、及びこれらを制御する信号との関連を表わしたものである。

表 2 光学系の撮影機能 光学系の撮影範囲とレンズの仕様を示したものである。

項 目	機 能
1. 水 平 視 角	60度
2. 対 物 レ ン ズ 焦 点 長	11.61mm
3. 絞 り	11, 16, 22 (常用F値は16)

表 3 光学系の角運動 光学系で模擬しているローリング、ピッチングの角運動及び横滑りについて作動特性を示したものである。

項 目	ロ ー ル	ピ ッ チ	横 滑 り	オートフォーカス
1. 映 像 運 動 範 囲	±60度	-40～+25度	±30度	20mm～∞
2. 映 像 最 大 速 度	30度/s	40度/s	30度/s	フルレンジ 1s
3. プリズム駆動範囲	±60度 (横滑りに伴うローリング補正含む)	-20～+12.5度	±30度	フルレンジ 7mm
4. プリズム駆動速度	30度/s	20度/s	30度/s	フルレンジ 120度/s
5. プリズム/出力軸ギヤ比	1/2	1/2	15/23	1/2
6. 出力軸作動範囲	±120度	-40～+25度	±46度	240度
7. 出力軸トルク	671g・cm	30.8g・cm	1,890g・cm	999g・cm
8. 周 波 数 応 答				
(a)入力周波数	2 Hz	2 Hz	1 Hz	—
(b)入力振幅 (フルスケールの10%)	±6度	±2.5度	±3度	—
(c)位 相 遅 れ	10度以内	10度以内	20度以内	—

より構成される。テレビカメラの主要性能を表4に示す。
なお、視程条件の晴れ、曇り、夜間などの視界模擬は模型部の照明装置を間引き点燈し、更にリアリティを高めるため、映像信号のゲイン及びフォーカス電流を制御して、画面の最適化を図っている。図3にモニタテレビの海面波浪を示す。

3.1.2 波浪模型部

波浪を模擬する方法として、固体模型を利用する方法、光学的方法、粉体を利用する方法、流体を使う方法などが考えられるが、いずれも波浪の立体感、及び躍動感を表現すること、あるいは実時間のシミュレーションなどが期待できず、しかも実現性に乏しい。そこで、機構的にやや複雑とはなるが、最も確実な機械的方法を採用した。
波浪模型部は次に述べる四つの部分から構成され、模型の縮尺は1/250、また移動速度は-3cm/s~33cm/s(実機の数値に換算すると-10~160kt)^{(*)1}となっている。

表4 テレビカメラの主要性能 テレビカメラの主要性能を示したものである。

項 目	規 格
1. 撮 像 管	XQ-1020L (1.2インチプランビコン撮像管)
2. 入 力 信 号	(a) 帰線消去信号: 4 V(p-p) 負極性 (b) 同 期 信 号: " " (c) 水平駆動信号: " " (d) 垂直駆動信号: " "
3. 映 像 出 力	VS信号: 1.4V(p-p) 正極性
4. 走 査 方 式	(a) 走 査 線 数: 525本 (b) 毎 秒 像 数: 30枚 (c) 同 期 方 式: 電源非同期 (d) 走 査 方 式: 2:1インターレス方式
5. 周波数特性	6 MHz以上
6. 解 像 度	被写体照度 500 lx: F2.8において (a) 水平中心部: 650本以上 (b) 垂直中心部: 350本以上
7. 電 源	AC 100V 50/60Hz

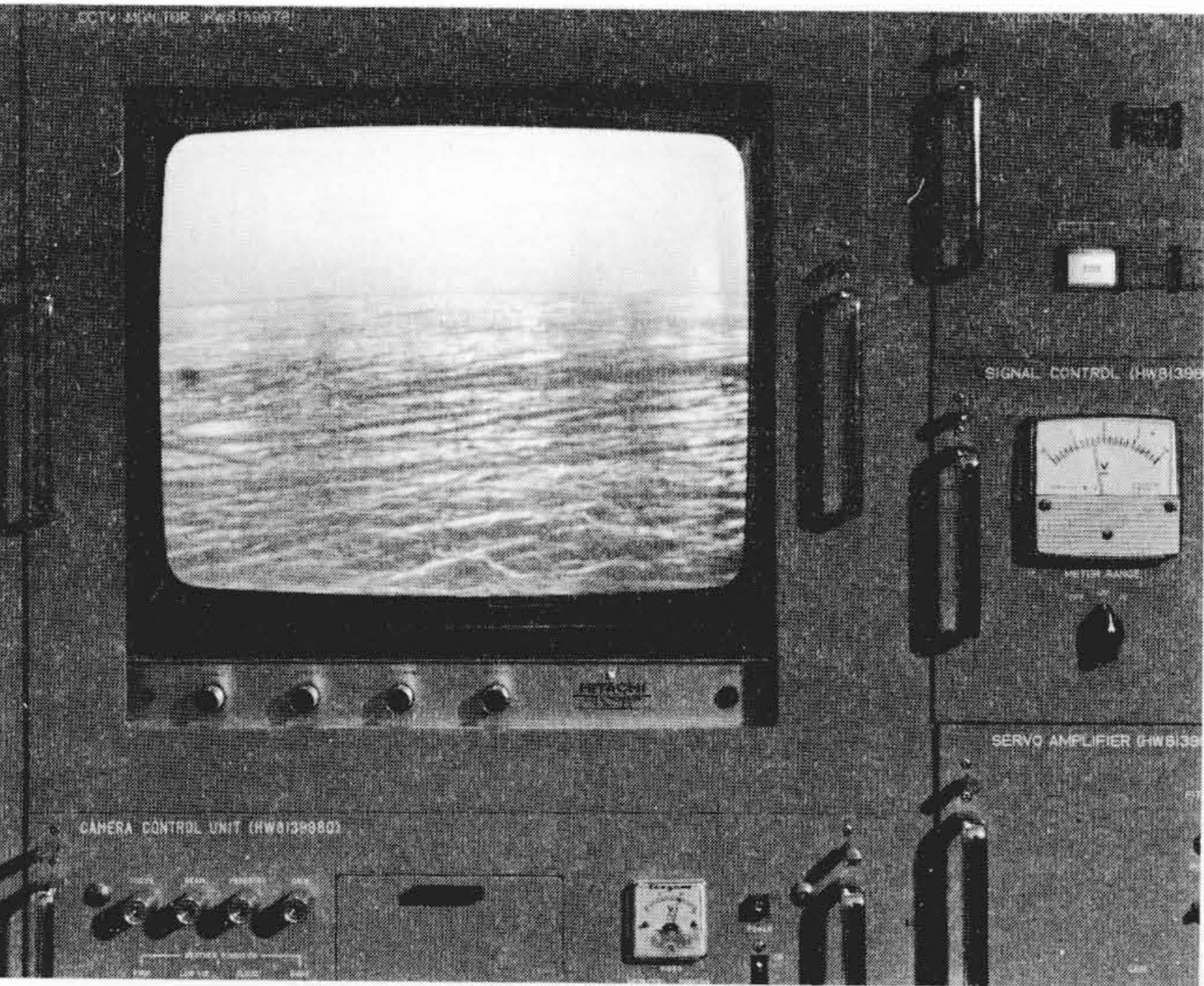
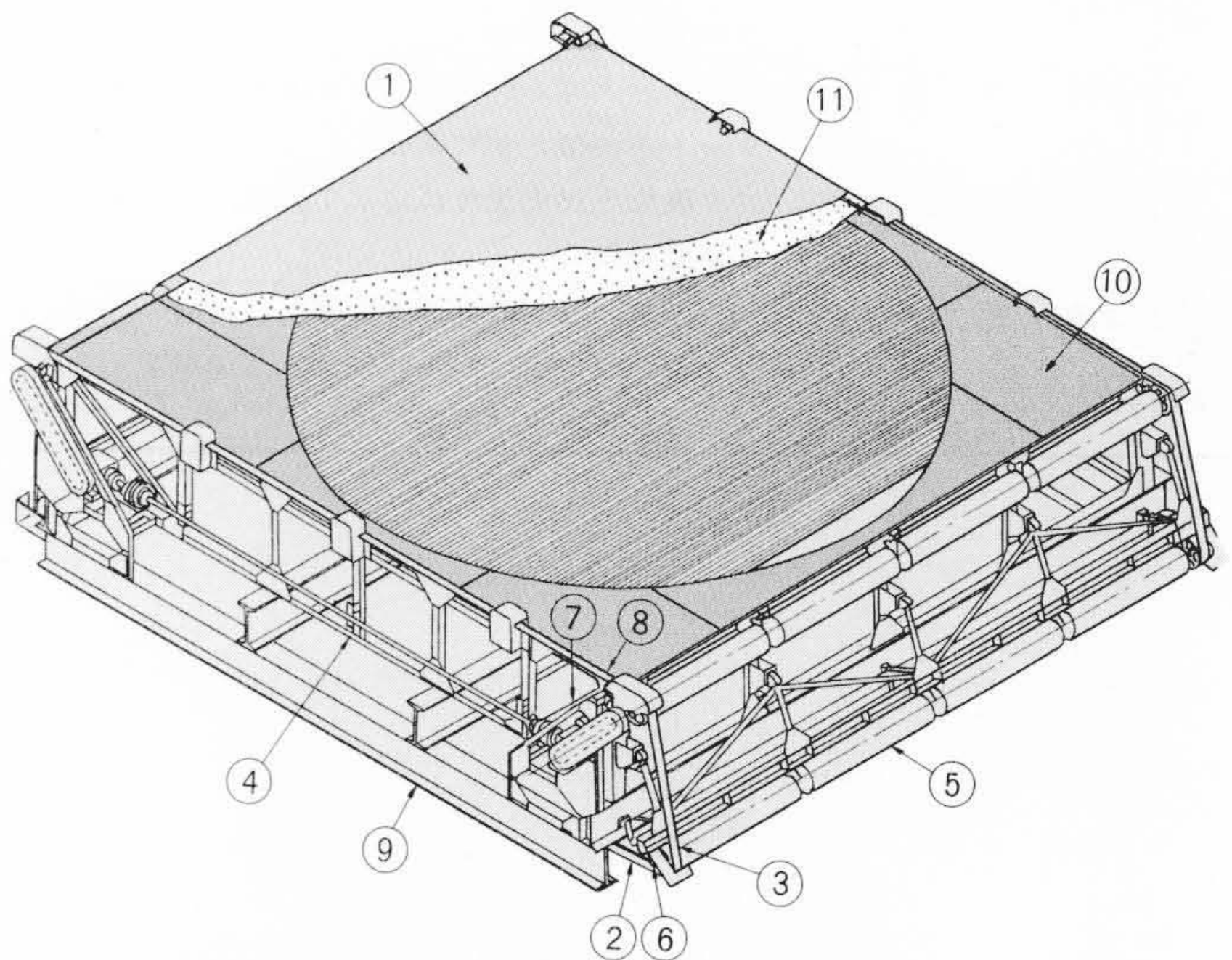


図3 モニタテレビの海面波浪 モニタテレビに表示された海面波浪を示したものである。

- (a) 波浪発生機構及び回転機構
 - (b) カメラ上下駆動機構、及び遠景模型回転機構
 - (c) カメラ駆動用クレーン架台機構
 - (d) 傾斜固定海面
- (1) 波浪発生機構及び回転機構

波浪発生は多数の平行棒と、これを上下させるための偏心カム機構とから成り、表5に示す5種類の波浪階級(Sea State)の模擬ができる。波浪の形状はsin waveとし、波の進行速度はカムの回転数にして-20(後進)~180rpmとした。また、波高の精度は撮影用光学系の最低高度との関係から±1mmとなるように設計した。
回転機構は波の進行方向の設定やヨーイング時に0~360度連続的に模擬できるようにターンテーブル機構とし、波浪発生機構全体が回転できるようになっている。図4に波浪発生機構、及び回転機構の外観を示す。



No.	名 称	No.	名 称
①	波浪膜面	⑦	サーボモータ
②	Vベルト	⑧	ハイボチェーン
③	平ベルト	⑨	I形鋼
④	波浪発生機構架台	⑩	合 板
⑤	ドラム	⑪	ゴムシート
⑥	Vベルト車		—

図4 波浪膜面の移動機構 波浪模型部の波浪膜面の移動機構を示したものである。

表5 模擬可能な波浪階級(Sea State) 模擬視界装置で表示できる5種類の波浪の波長と波高の関係をまとめて示したものである。

波 浪 階 級	波 高 (m)	波 長 (m)
1	0.5	20
2	1.5	30
3	2.0	50
4	3.0	100
5	4.0	200

(*)1 速度の-記号は、後進を意味する。

表 6 視程条件の模擬 視程条件と具体的な模擬方法を示したものである。

視程条件	状 況	具 体 的 な 模 擬 方 法	
		照明装置による制御	カメラ装置による制御
FINE	昼間の晴天	全ランプを点燈し、模型表面に均一な照明を行なう。	映像信号のゲインを通常状態とし、電氣的フォーカスも通常の設定とする。
CLOUD	昼間の曇天	1 kW 及び500W ランプを間引き点燈する。	映像信号のゲインを中程度の状態とする。 電氣的フォーカスは通常状態
LOW VISUAL	霧、もやがかかった時のような視程不良状態	"	映像信号のゲインを通常状態とし、電氣的フォーカスをずらせる。
NIGHT	晴天の夜間	"	映像信号のゲインを低くした状態とする。 電氣的フォーカスは通常状態

(2) 波浪膜面移動機構

波浪膜面は可撓膜上にしわを付けたビニールシートをかぶせて、さざ波を模擬すると同時に、この膜をエンドレス構造にして回転させることにより、機体の前進、又は後進の運動を模擬している。

(3) 遠景模型と傾斜固定海面

模型の小形化と無限遠点が近づくという違和感を除去するために、先の万国博覧会に出展したトラベル シミュレータで実績のあるスカイプレート⁽⁶⁾を使用した。この方式は遠景模型の下端と傾斜固定海面の一点とを結ぶ直線を見掛けの水平線となるように撮影用光学系のピッチプリズムを下方向に θ_0 だけ傾け、この状態を水平飛行状態とした。この結果、遠景模型は高度に対して相對運動を行ない、常に傾斜固定海面の定点に対し見掛けの水平線を模擬することになる。

3.1.3 照明装置

模型照明装置はテレビカメラに必要な照度を与えると同時に、視程条件の再現のために使用される。この視界装置は表 6 に示す 4 種類の視程模擬が行なわれる。

3.2 模擬視界表示部

模擬操縦室はパイロットに体感覚を与えるため、動揺装置によって機体運動の加速度情報を模擬している。このため、表示部は模擬操縦室と一体の動きをとるように操縦室に固定されている。テレビ拡大投映機は操縦室上部に固定され、スクリーンは操縦室の前方に設置されている。図 5 に操縦室よ

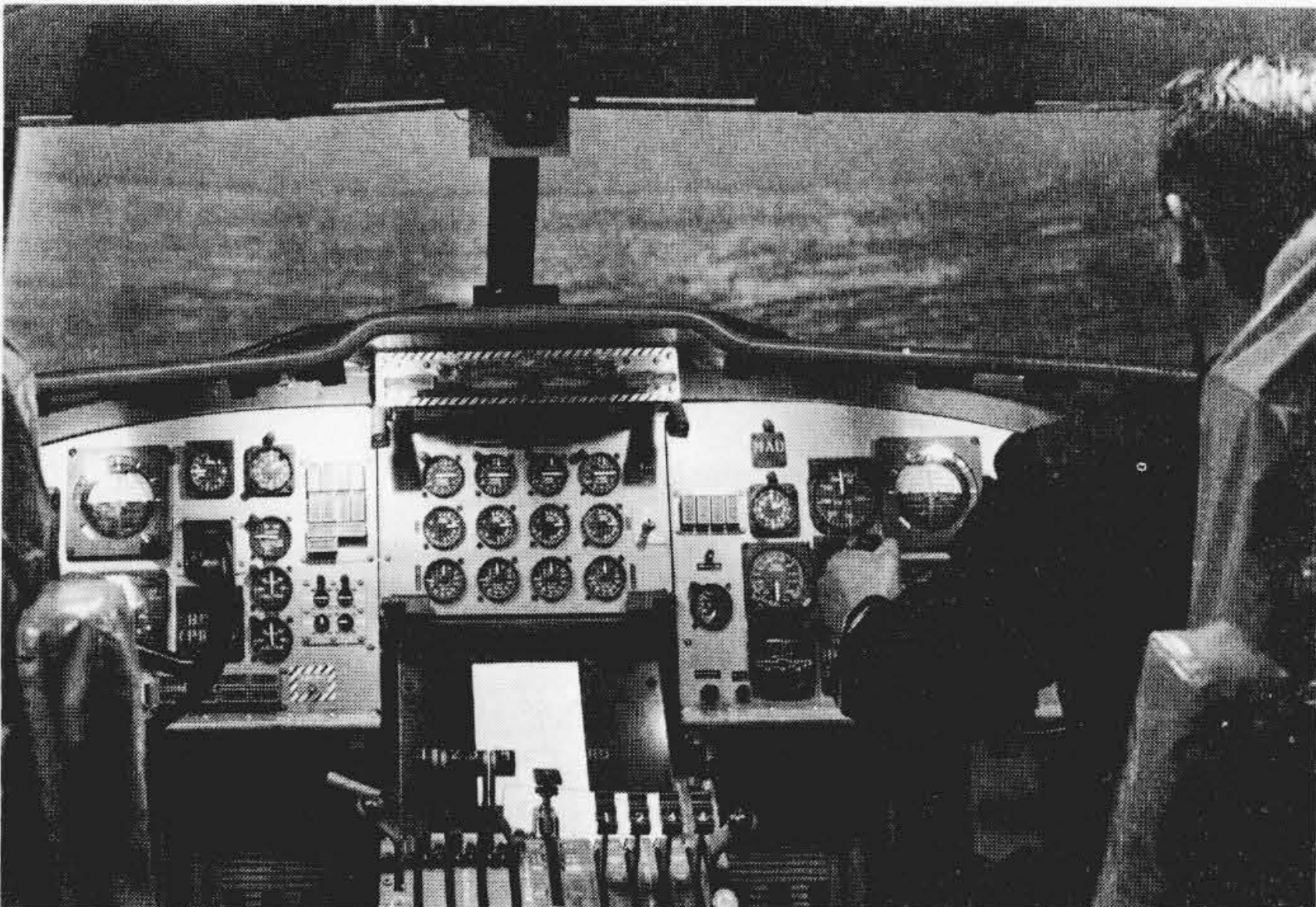


図 5 操縦室より見た海面波長 操縦室前方に表示された海面波浪を示したものである。

表 7 テレビ拡大投映機の主要性能 テレビ拡大投映機の主要な状態を示したものである。

項 目	規 格
1. 使用ブラウン管	5 インチ静電形高輝度ブラウン管
2. 光 学 系	(a) 356mm 凹面鏡 (b) 279mm 補正レンズ (c) 口径比 F0.7
3. 映 像 入 力	1 V(p-p) 75Ω
4. 水 平 解 像 度	中心部 500 本
5. 画 面 照 度	約40 lx (2.7m×1.8mスクリーンにおいて)
6. 電 源	AC 100V 50/60Hz

り見た海面波浪を示す。

3.2.1 テレビ拡大投映機

投映機は投映ヘッド部と制御器とで構成され、投映ヘッド部は光学系にシュミットレンズを採用し、ヘッド内部には映像増幅器、ブラウン管偏向ヨーク、凹面鏡、及び補正レンズが内蔵されている。表 7 に投映部の主要性能を示す。

3.2.2 スクリーン

表示装置用のスクリーンは、通常のスクリーンのように多人数の観客に見せる場合と異なり、模擬操縦室のパイロット(正及び副)に対して十分な照度で、且つ見やすくするため、凹球面状のスクリーン構造とした。表 8 にスクリーンの概要

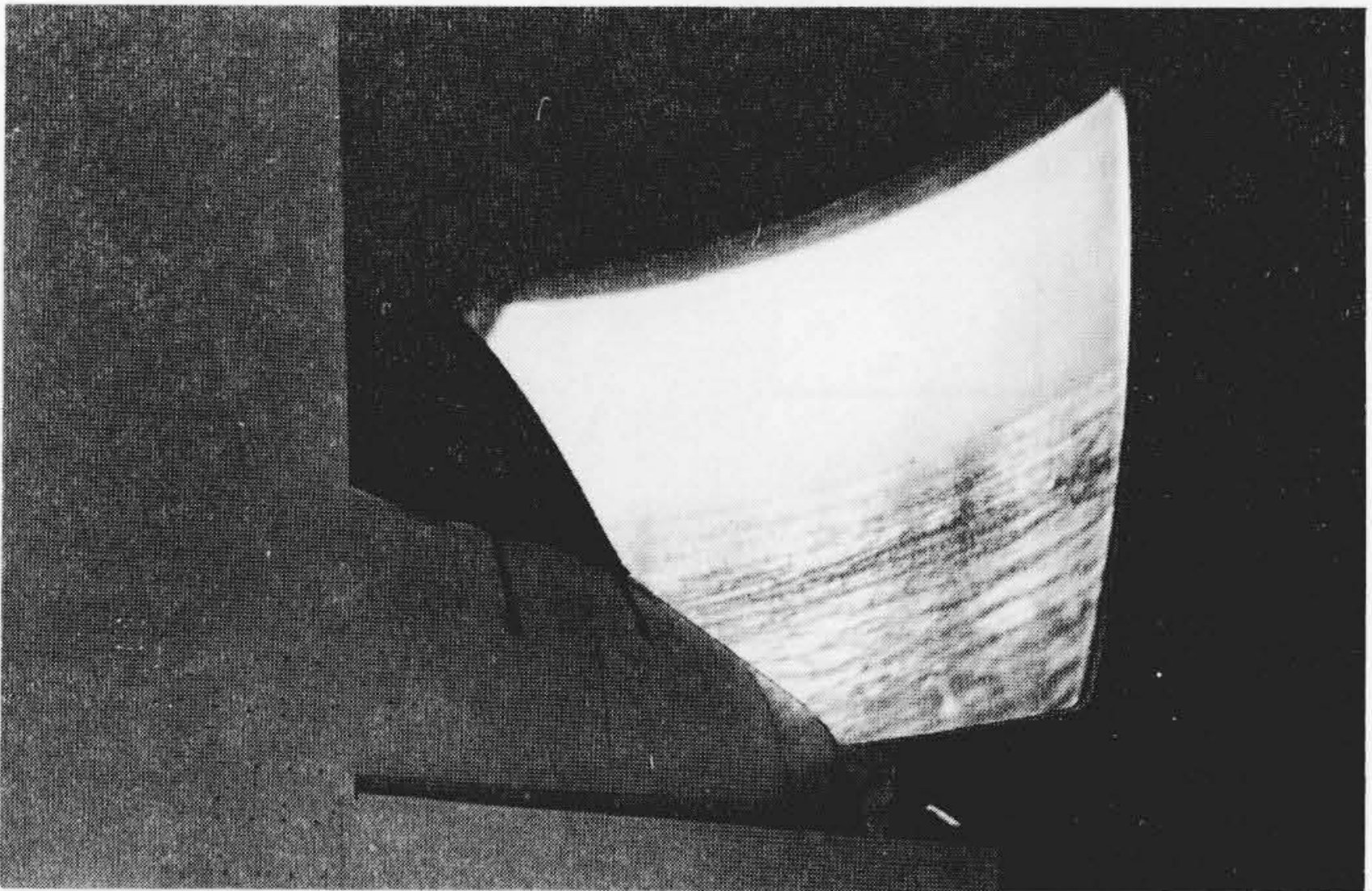


図 6 スクリーンに投映された海面波長 操縦室の外部(右側)より見た海面波浪を示したもので、スクリーンが凹球面状になっていることが分かる。

表 8 スクリーンの概要 表示部スクリーンの諸元をまとめたものである。

項 目	概 要
1. 寸 法	高さ：1.8m 幅 7 m
2. 包 括 視 野	左右方向：各30度 上 方 向：17度（機体軸基準） 下 方 向：13度（ " ）
3. スクリーンのタイプ	反射形

を、図 6 にスクリーンに投映された海面波浪を示す。

4 模擬視界装置制御信号の演算

模擬視界装置は波浪模型部の制御信号とカメラ部制御信号によって駆動され、これらの制御信号を発生させる演算ブロック線図を示すと図 7 となる。

4.1 波浪模型部制御信号

4.1.1 波浪膜面の進行速度

進行速度は機体高度 Z_G が900 ft 以下の場合に計算を行ない、900 ft 以上では $V_G = 0$ 、すなわち波浪は静止しているものと見なす。

4.1.2 波浪機構及び遠景の回転角

回転角の計算は機首方位 ϕ 、波の方位 ψ_w 、横滑り角 β_G の関係より求める。

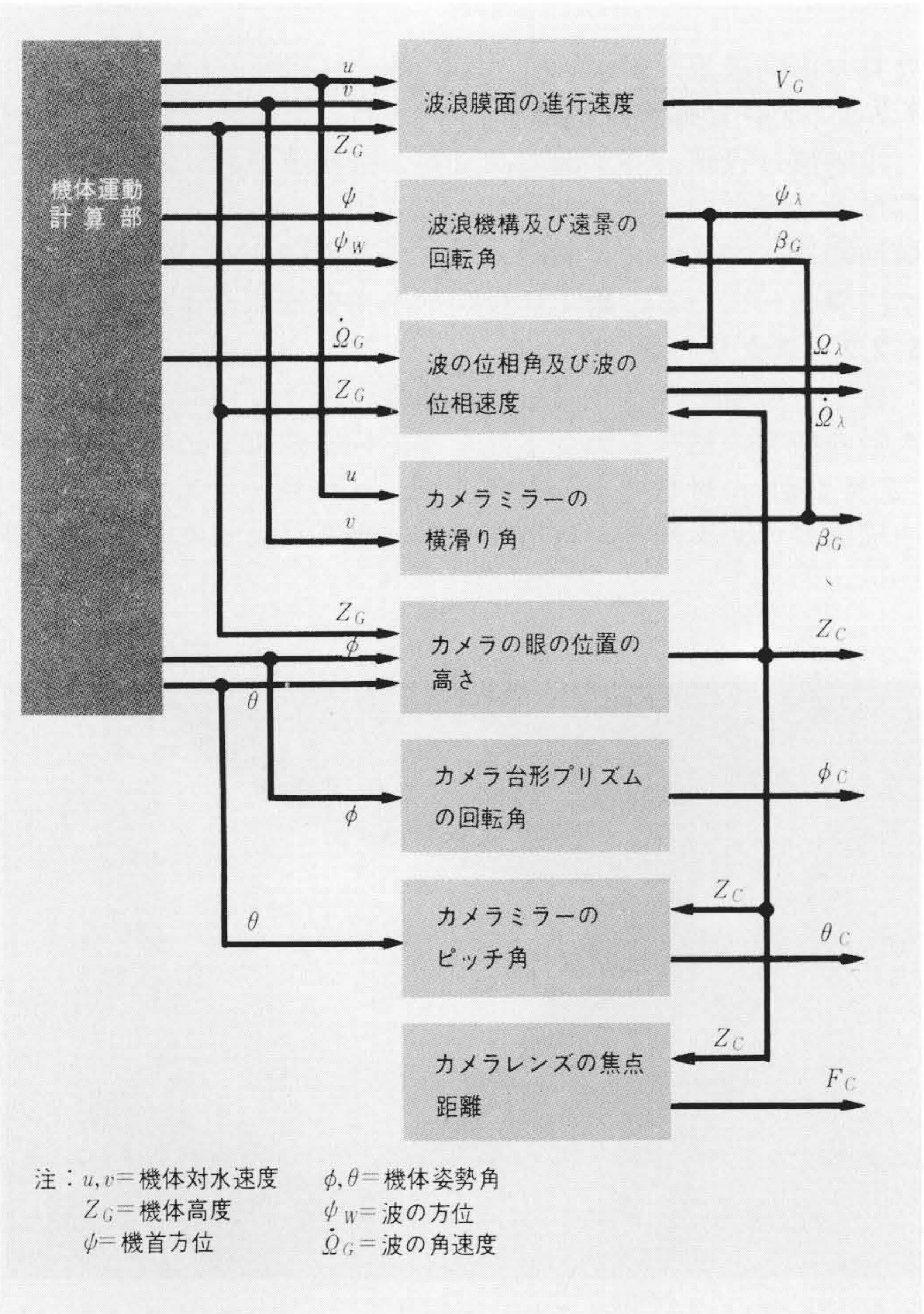


図 7 模擬視界装置の制御信号の演算ブロック線図 機体運動信号と模擬視界装置の制御信号との関連を表わしたものである。

4.1.3 波の位相角及び波の位相速度

位相角及び位相速度は機体高度 Z_G が900 ft 以下の場合に計算し、また波浪階級1～2と、3～5とに分けて処理している。

4.2 光学系制御信号

4.2.1 光学系の横滑り角

横滑り角の計算は機体の対水速度 u (X 軸成分) が2.574m/s 以上で行ない (v/u の演算結果が過大となるため)、また横滑り角の最大値は±30度とした。

4.2.2 光学系の主光軸の高さ

光学系の主光軸の高さは、パイロットの目の高さを考慮して求める。なお、パイロットの目の高さは機体高度、姿勢角、及び重心からパイロット位置までの距離 (X, Y, Z 軸成分) をもとに求める。なお、近似範囲は550 ft までである。

4.2.3 光学系台形プリズムの回転角

光学系台形プリズムによって機体のローリングを模擬しているが、これは±60度の範囲である。

4.2.4 光学系ミラーのピッチ角

ピッチ角は−40～+25度の範囲を模擬しているが、遠近感を補正するために光学系の主光軸の高さの情報によって補正している。

4.2.5 光学系の自動焦点調節

焦点距離は光学系の主光軸の高さに比例させて調節する。

5 結 言

閉回路テレビ技術と波浪模型とを利用した模擬視界装置の概要を示したが、このシステムに残された問題点は、(1)海面波浪の模擬についての画面のリアリティをより向上させる、(2)テレビ方式の共通課題として映像の解像度を高める、(3)表示面の輝度を高める、(4)視界を拡大することであるが、これらは今後の技術開発に待つ部分も多いが、更に検討のうえ研究を進めたい。

最後にこのシステムを開発するに当たり、御指導、御協力をいただいた防衛庁技術研究本部及び海上自衛隊岩国基地各部隊並びに新明和工業株式会社、日立製作所及び日立電子株式会社の関係各位に対し、心から感謝する次第である。

参考文献

(1) 浜田 勝「ジャンボジェット・フライト・シミュレータ」 日本航空宇宙学会誌 21 [231], 219 (1973-4)
(2) 伊藤 睦ほか「BWR 原子力発電所運転訓練シミュレータ」 東芝レビュー 28 [9], 1006 (昭48-9)
(3) 高内一夫「火力発電所運転研修用シミュレータ」 火力発電24 [1], 45 (1973-1)
(4) 奥田大陸、角皆紘一「新幹線電車故障迅速排除訓練用シミュレータ」 電子通信学会教育技術研究会資料ET 74-3, (1974-6)
(5) 清水幸悦、宮村元博「飛行艇用フライトシミュレータの概要」 昭和49年度飛行機シンポジウム, 28B 8, 75-78
(6) 竹内康郎「飛行艇用の模擬視界装置について」 昭和49年度飛行機シンポジウム, 28B10, 83-86
(7) 島崎健一、小林恭一、平石了「飛行艇用フライトシミュレータのビジュアルディスプレイ」 昭和50年電気学会全国大会, 1381
(8) 百名盛之、三浦武雄、福本智典「シミュレータ用ビジュアルディスプレイ」 テレビジョン学会誌 21 [3]
(9) 三浦武雄、尾崎正道ほか「閉回路テレビ方式によるトラベルシミュレータ」 日立評論 万博特集号 (昭45-6)
(10) 原幸三郎「飛行艇用フライトシミュレータの空水力モデルについて」 昭和49年度飛行機シンポジウム, 28B 9, 79-82
(11) 平石 了、佐藤光茂、太田久夫「飛行艇のハイブリッドシミュレーション」 昭和50年電気学会全国大会, 1380