

閉回路テレビ方式によるトラベルシミュレータ

Travel Simulation by Closed-Circuit TV

三 浦 武 雄* 尾 崎 正 道**
Takeo Miura Masamichi Ozaki
平 河 幸 太 郎*** 波 多 江 保 彦***
Kôtarô Hirakawa Yasuhiko Hatae

Abstract

A travel simulator, the main attraction in the Hitachi Group Pavilion at EXPO '70, is described. Unlike ordinary simulator systems, this particular system is designed especially from display-engineering point of view. The visual display system, using closed-circuit color television, is the largest of its kind in Japan. It combines a model-camera system and cinefilm-camera system; the former can be switched over to the latter and vice versa, as necessary. Control is effected by a hybrid system consisting of a digital computer for sequential control and an analog computer for dynamic calculations. A special back-up system is provided to enhance reliability.

1. 緒 言

アポロ宇宙船の月面着陸以来、宇宙飛行士の訓練に一般の関心が集まり、それにシミュレータが活用されていることから、“シミュレータ”なる言葉(ことば)がかなりポピュラなものになってきた。訓練用シミュレータは飛行機の訓練を目的としたフライトシミュレータが最もよく知られているが、最近は機関車、自動車、船などにも適用されている。これらは元来、運転とか操縦のように技能の訓練を対象としているので、被訓練者は1人ないし数人程度であり、またシミュレータより得られるフィーリングは、操作機器操作時の反応をはじめ操縦室の内装に至るまで実物そっくりであることが要求される。したがって、一般に高価であり、フライトシミュレータなどは1台数億円になるのが普通であるが、また一面ではいかに巧妙に実物同様のフィーリングを実現するかという点で技術上の苦心もある。

万国博出展計画の際に、シミュレータ技術を活用することが要請されたが、なにぶん上記のように訓練用シミュレータをそのまま転用することはできないので、詳細決定までには何回にもわたる討議がなされた。普通の訓練用シミュレータと異なり、万国博出展用として特に考慮しなければならないのは次のような点である。

まず演出上より派生する問題としては

- (a) 対象が一般観客であること、したがって、技能の訓練を目的とするのではなく、観客にアピールするような要素を盛り込む必要のあること。
- (b) 目標とする観客動員数を達成するためには、一度に多数の観客を効率よく処理する必要のあること。
- (c) 観客にとっては短時間の、かつほとんど1回限りの経験であること。したがって、機器の操作などは簡単で高度の技能を要求しないものであること。

などがある。また、長期にわたる連続実演で、かつ故障による停止は許されないというきつい条件から、設計製作上の問題として信頼性の確保ということが強く要求される。さらに、観客の予測しない行動に対する安全上の配慮を構造上、回路上に盛り込んでおく必要もある。

このように、シミュレータ技術の転用とはいふものの、特殊な条

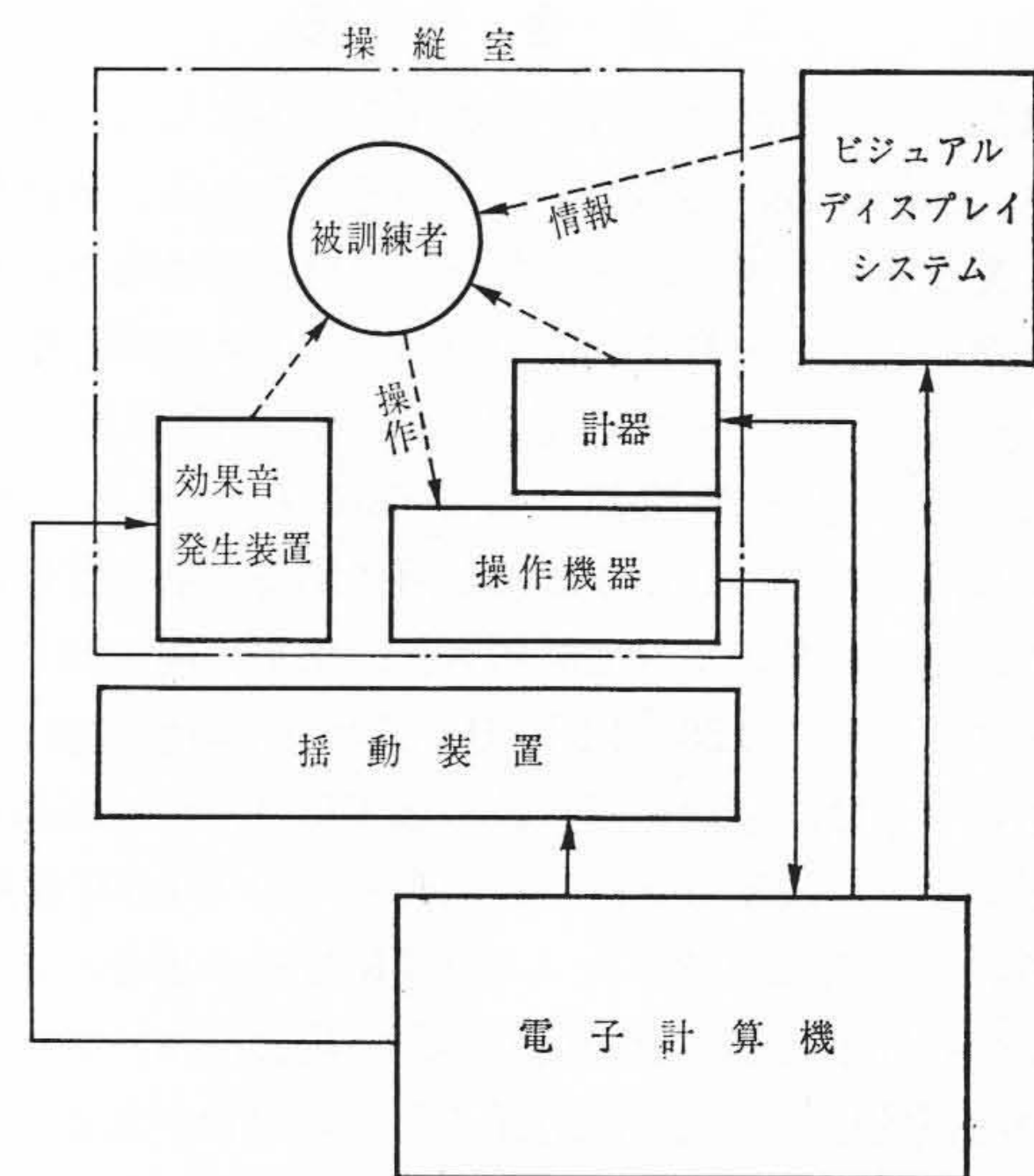


図1 訓練用シミュレータの構成

Fig. 1. Configuration of Trainer System

件が重なり、特に演出にからむ問題には本来の訓練用シミュレータに対する要求と逆行するような性質のものもあって、純技術的分野の問題というよりも、むしろ展示工学とでも称すべき新分野の仕事といってもさしつかえないものである。

この計画を進めるに当たり、社内関係者、プランナー、エージェントより構成されるシミュレータ分科会が設置された。分科会における数多くの討論の結果、上記条件を一応満足するものとして考案されたのが閉回路テレビ方式によるトラベルシミュレータである。本稿ではその内容について述べる。

2. 全体システムの構成

乗物の訓練用シミュレータは一般的には図1に示す構成をとる。これをフライトシミュレータを例にとって説明すれば、被訓練者の操縦桿(かん)、エンジンなどの操作が計算機の入力として取り込まれると、あらかじめ計算機内に組み込まれた飛行体の特性方程式に従って速度、高度、姿勢角などが算出される。その結果は計算機の出力として送出され、

- (a) コックピット(操縦室)内の計器ならびに警報ランプなどに指示される。

* 日立製作所中央研究所 工学博士

** 日立製作所中央研究所

*** 日立電子株式会社イノベーション推進部

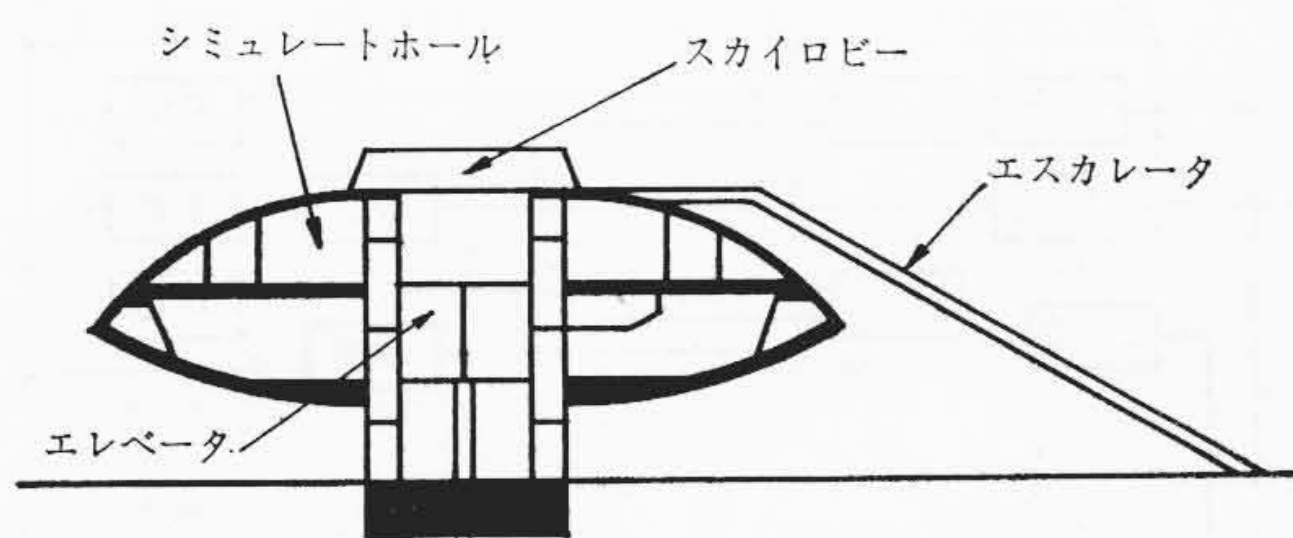


図2 日立グループ館各階説明図

Fig. 2. Sectional Plan of Hitachi Group Pavilion

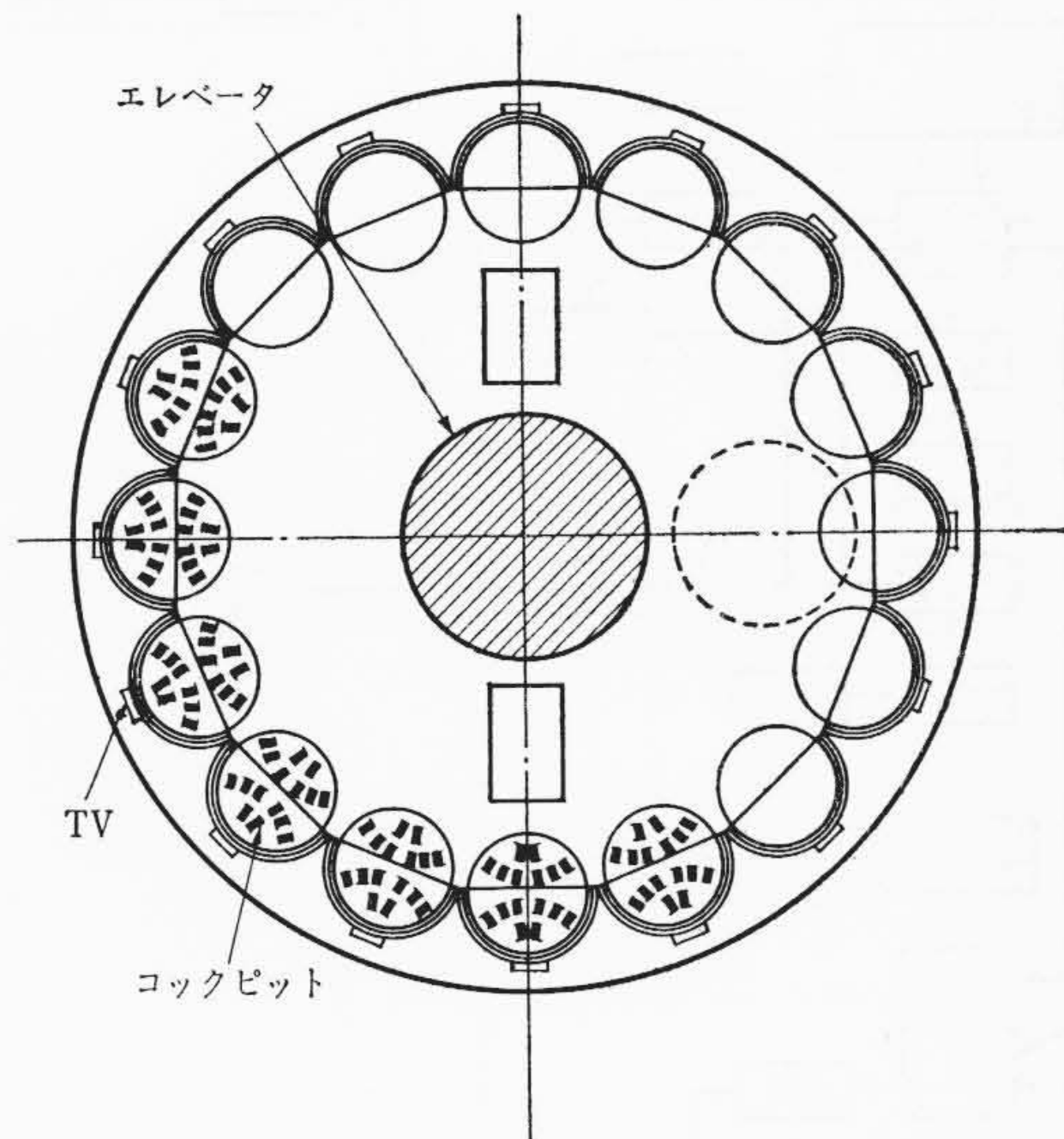


図3 シミュレートホール説明図

Fig. 3. Arrangement of Cockpits

- (b) 効果音発生装置を作動させ、必要な音響をコックピット内に発生させる。
- (c) コックピット揺動装置の入力となり、計算結果に従ってコックピットに縦揺れ、横揺れなどを起こさせる。
- (d) ビジュアルディスプレイシステムを駆動し、飛行体の運動に従った外部視界の変化を実現して操縦者にフィードバックする。

被訓練者はこれらフィードバックされた情報によって自分の行なった操作が正しかったかどうかを判断し、必要な場合にはさらに修正動作を行なうことができる。すなわち、そこには人間の介在する閉回路システムが構成されていることになる。

このようなシミュレータシステムをそのままの形で展示に供するには多額の費用を要し、当然のことながら展示効率も悪くなる。したがって、“人間の介在する閉回路システム”という訓練用シミュレータの特長を生かしながら、あわせて前章で述べた万国博出展用としての問題点を解決していかなければならない。また、トラベルシミュレータが主展示内容となるだけに、このシステム構成が展示館全体を通じての演出に大きな影響を及ぼすのみならず、ひいては建築構造を決定する要因ともなる。全館の構成が現在の形にまとまるまでにはシミュレータ分科会において幾多の検討が行なわれ紆余(うよ)曲折があったが、ここでは特にその経過には触れず、主として得られた結果について述べる。

(1) 展示館におけるシミュレータの位置付け

展示館の構造の概略を図2に示す。観客は128人ずつに区切られ、長さ40mの長尺エスカレータにより一挙に4階のスカイロビーまで運ばれる。スカイロビーに数分間滞留後エレベータで3階のシミュレートホールに降りるのであるが、観客処理の効率を

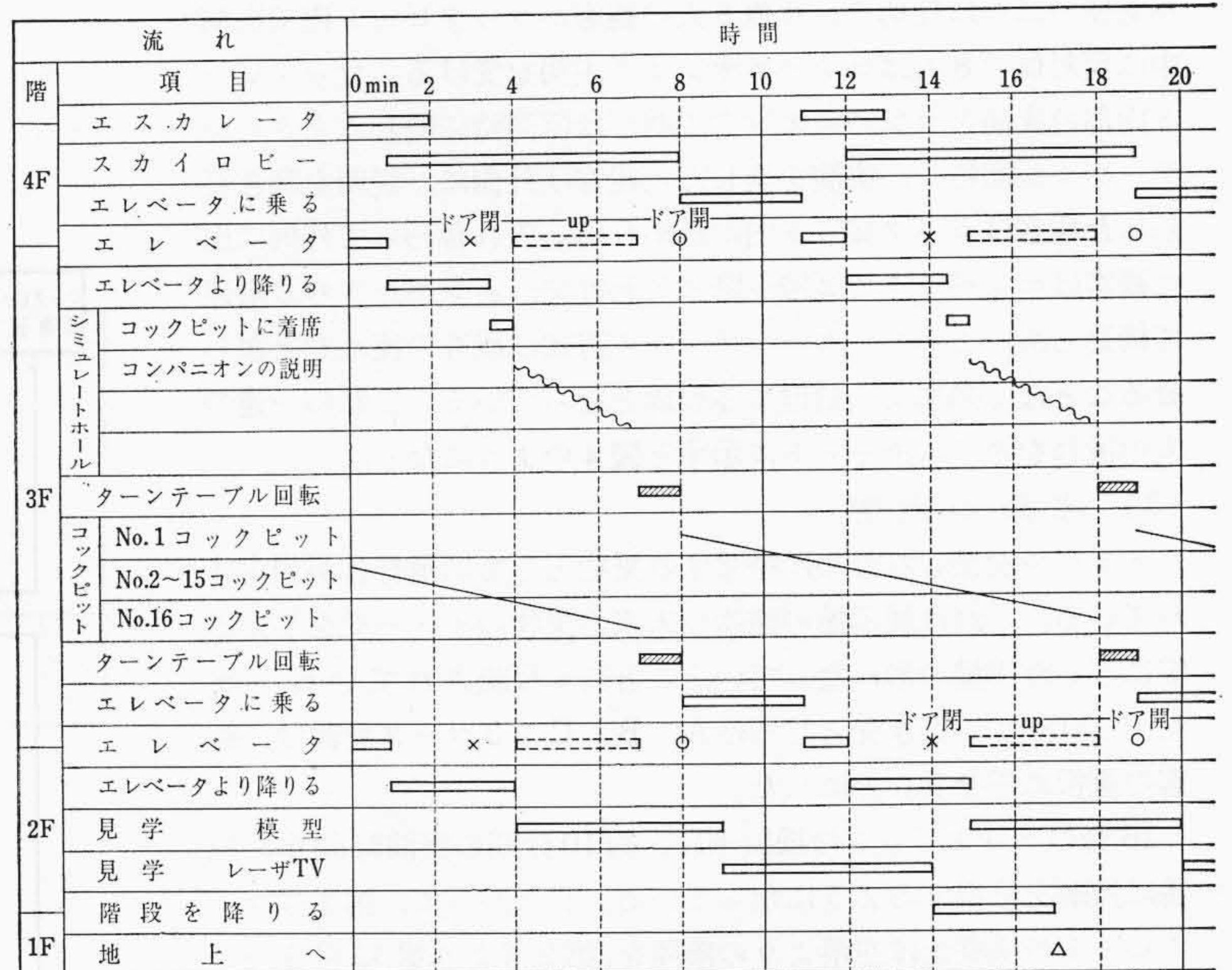


図4 観客の流れを示すタイムチャート

Fig. 4. Time Chart for Exhibition

あげるため、エレベータは2階建てになっており、上段にはシミュレートホールにはいる観客が、下段にはホールより出た観客がそれぞれ搭(とう)乗し、同時に次の場所へ移動するようになっている。シミュレートホールでトラベルを楽しんだ観客はエレベータで2階に導かれ、そこでトラベルシミュレータの舞台裏、すなわちシミュレータを動かすために使用されている機器を見学し館外へ出るようになっている。

これからわかるように、全館を通じて一つの大きな流れが形成されており、多数の観客を待ち時間なしに円滑に処理するような配慮がなされている。シミュレータの実演はこの流れの中央に位置し、スカイロビー、エレベータなどはその導入部、また使用装置の見学は実演後の種明かしといった意味をもつ。

(2) シミュレートホールの構造

演出上最も苦心したことの一つは、多数の観客にいかんして参加意識をもたせるかということであった。前述のように訓練用シミュレータでは被訓練者はたかだか2~3人程度であり、その目的からいって、各人は必ず機器を操作し、その結果を表示された、あるいは感覚によって得られた情報によって確認することができるので、当然のことながら参加意識は特に問題とはならない。本来のシミュレータに対する考え方をそのまま適用するならば、全観客の1人1人に操縦桿を操作してもらい、操縦の実感を味わってもらわなくてはならないことになるが、これは動員数や費用の点からみて無理な相談である。そこでグループの中の代表者に操縦させ、残りの観客もできるだけ参加意識をもちうるような構成をとることにした。すなわち、観客を8人ずつのグループに分け、これを図3に示すような半円形のコックピットに入れ、前列の2人が正副操縦士として操縦桿を操作するのである。こうすることによって後列の6人は自分で操縦をしないまでも、操縦士の操作を目の前に見ることができるので、参加意識をもつことができる。シミュレートホールにはこのような8人乗りのコックピットを16個設け、128人の観客を一度に処理できるようになっている。

コックピットの構造上の特長としては、導入に回転方式を採用したことがあげられる。これは観客の処理効率をあげるために考案されたものであって、図3に示すように、円形のターンテーブ

ルを壁で二つに仕切り、片側8人の観客がコックピット内で実演中に反対側の8人はコンパニオンより説明を受ける。コックピット内部の実演とコンパニオンの説明がほぼ同時に終わるとターンテーブルが回転し、実演を楽しんだ観客は外側に、説明を聞き終わった観客はコックピット内に導かれる。入れ替わって外側に出た観客はエレベータで2階へ降りるわけで、エレベータの2階建て構造とあいまって、ターンテーブル方式は観客の流れをとぎらせることなく効率よく処理する要因となっている。これら一連の人の流れをタイムチャートに示すと図4のようになる。

(3) 実演の内容

トラベルを楽しむために搭乗する乗物としては飛行体が想定されている。これは展示館の建物が未来の乗物のイメージを与える宙に浮いた円盤の形になっていることにも反映されている。また、トラベルの行き先としてはA、B、Cの3コースを設け、観客の選択に任せることにした。

16台のコックピットの操縦士は、約10分間の実演時間中、順番に操縦を分担するようになっている。したがって、第1号コックピットの操縦士は空港よりの離陸を、第2号より第15号までのコックピットはトラベル中の操縦を、最後の第16号コックピットが空港への着陸を分担することになる。コックピット内にはこれらの切り換えを示す表示ランプが設けられている。

(4) ビジュアルディスプレイシステム

操縦時の外部視界に関する情報をコックピット内の操縦者にフィードバックするのがビジュアルディスプレイシステムである。観客である操縦者は前面の窓にうつった画面を見ながら操縦するが、この画面の質が観客に与える影響は大きい。もしも、カラーでシャープな大画面が実現できればそれだけ観客にアピールする度合いも大きくリアルな感覚が得られる。

ビジュアルディスプレイシステムについては各種の方式が提案されているが⁽⁴⁾、ここでは建築上の制約、費用などを勘案して地形模型を使用した閉回路テレビ方式とシネフィルム方式を併用した。前者は模型の大きさの許せる範囲では自由度が豊富で観客に与える満足感も大きい、費用がかさむ。これに対し後者ではフィルムの筋書きどおりに進行するので操縦の自由度はそこなわれるが安価である。これらの特長を生かして運用上は離着陸には模型を使用した閉回路テレビ方式（以下モデルシミュレーションと称す）を、トラベルにはシネフィルム方式（以下フィルムシミュレーションと称す）を適用することにした。シネフィルムはいったんテレビ信号に変換し、離着陸時の映像とトラベル中の映像とをテレビ信号の形で切り換えている。

(5) 計算機および制御装置

コックピット内には前面窓にうつる画面のほかに計器や表示ランプ、また耳から聞える音響、揺動の体感などの現象がある。シミュレータとしてはこれらを総合的に制御してフィードバック効果があがるようにしなければならない。また制御機能としては(3)項で述べたように16台のコックピットの操縦桿をシーケンシャルに切り換えることも必要である。本システムではデジタル計算機によってこれら一連の制御指令を発している。また飛行体の運動はアナログ計算機により行なわれており、全体としてハイブリッドシステムを形成している。これらの諸関係は図5のブロック図に示すとおりである。

計算機および制御装置はこのシミュレータシステムの中核部であって、その故障は全システムの停止を意味する。したがって、各機器には冗長度をもたせたり、あるいは特殊なバックアップ装置をもたせるなどして信頼性の確保に意を用いている。

また、ターンテーブル、コックピット揺動装置などの可動部が

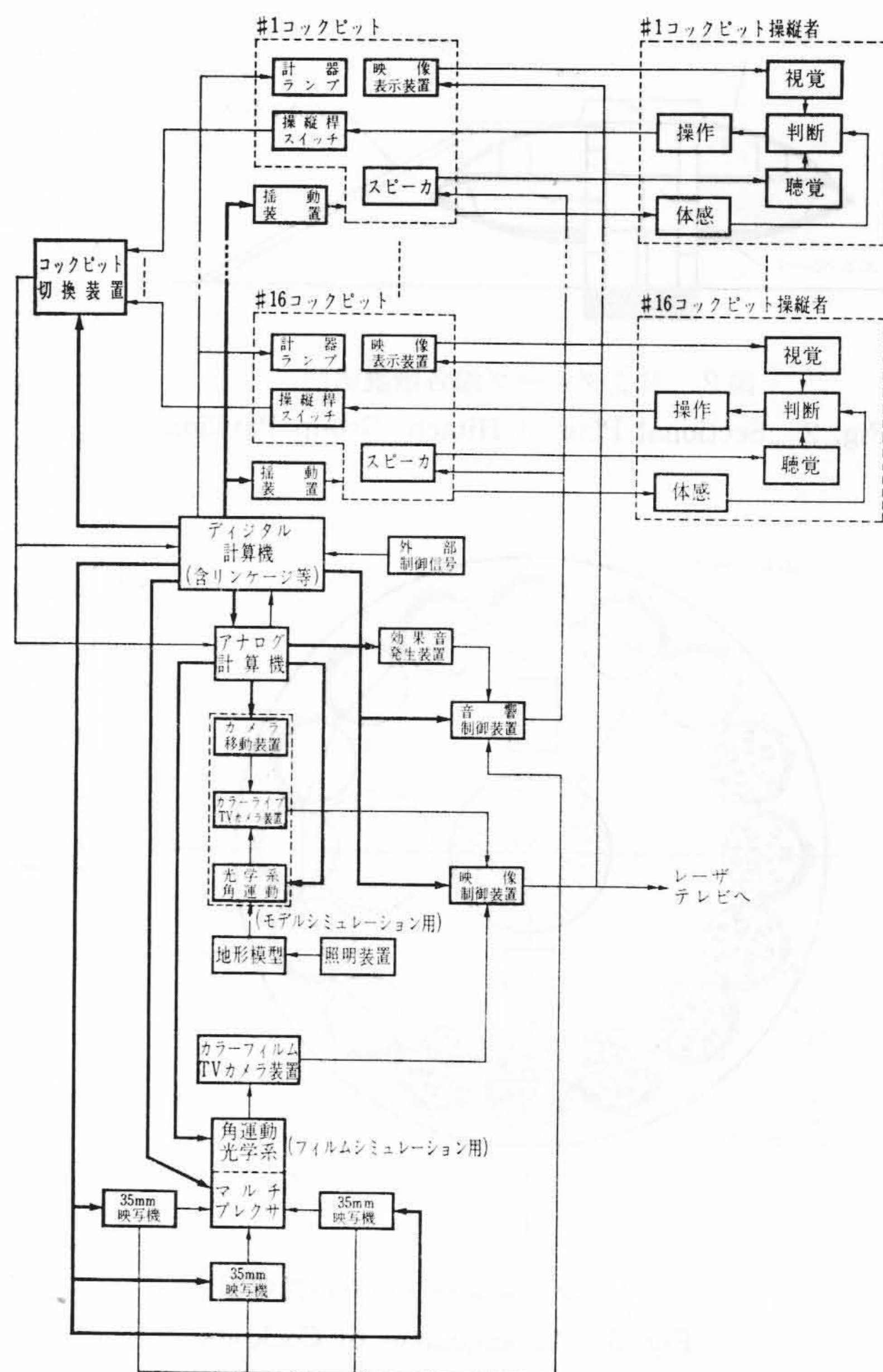


図5 全体システムブロック図

Fig. 5. Block Diagram of Total System

表1 副操作卓の機能

Table 1. Function of Companion Desk

機	能	備	考
1.	シミュレートホール内説明テーブルレコーダの起動	毎	回
2.	コックピット内説明用テーブルレコーダの起動	緊	時
3.	決定したトラベルコースの制御装置への送出	急	回
4.	シミュレートホールの照明制御	毎	回
5.	シミュレートトラベル終了の確認	毎	回
6.	ターンテーブルの回転	毎	回
7.	シミュレートホールのガイドアナウンス	毎	回
8.	非常停止	緊	時

多いため、観客に対する安全には特に注意を払い、万一事故が起こった場合でも制御装置が安全側に動作するよう配慮されている。

以上がシミュレータ主要部の概略であるが、このほかに運用面から作られたシステムがある。シミュレートホールにおける実演はすべて自動的にシーケンシャルに行なわれ、かつ各機器の状況は一応計算機室に設置された操作卓で集中監視できるようになっているが、館内ではシミュレートホールが3階、計算機、制御装置などが2階と異なった階に設けられているため、スケジュールの進行にあたって必ずしもじゅうぶんに監視しうる態勢にあるとはいえない。特に観客は各種の階層を含む群集であるから、不測の事態の起こることも考慮に入れなければならない。そのため、観客の状況をは握したうえで操作するのが望ましいもの、および緊急時の操作については人手による処置が必要である。この目的のためシミュレートホールに副操作卓を設け、コンパニオンがこれを操作するとともに計算機室の主操作卓とインタフォンによる

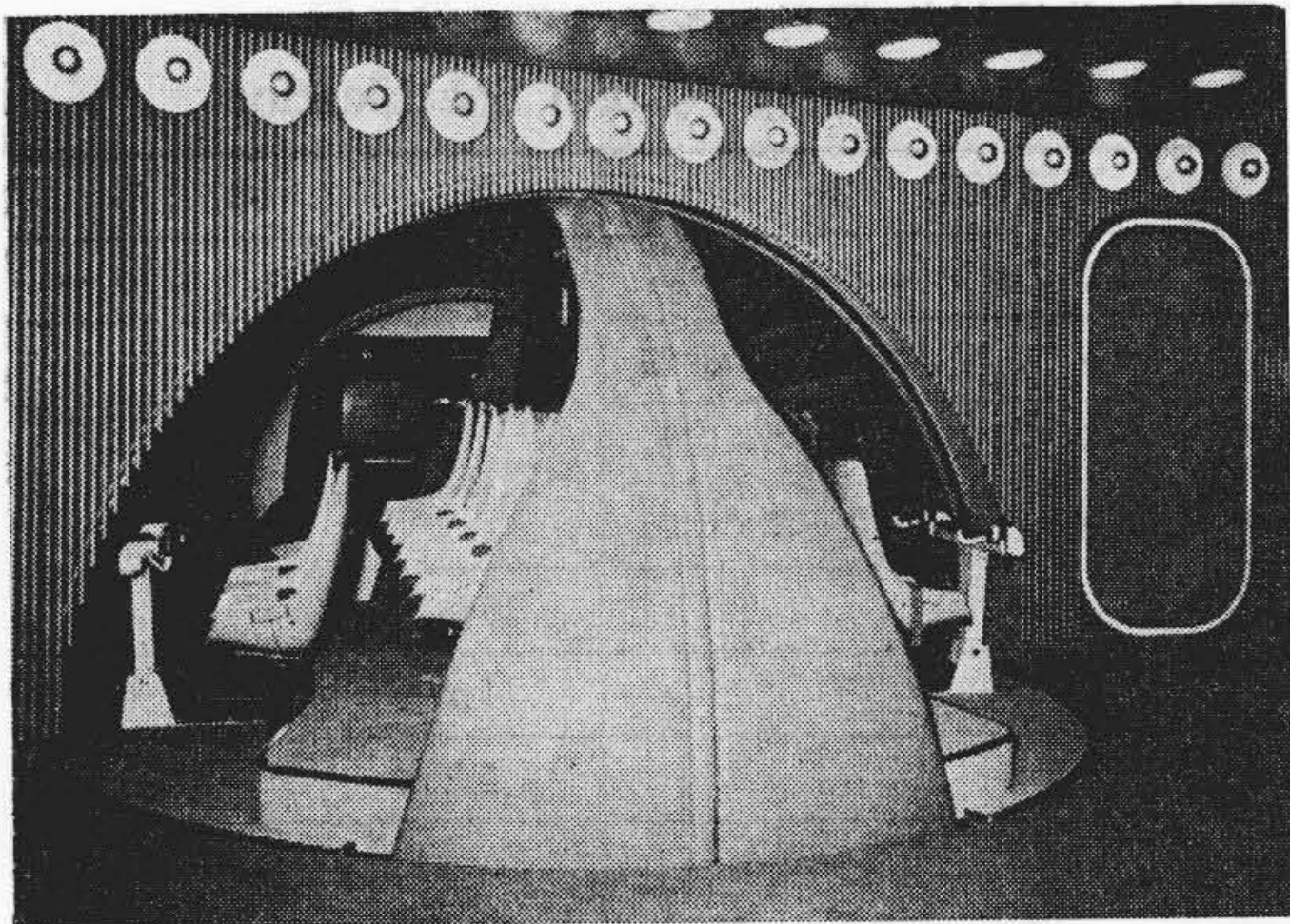


図6 コックピットとターンテーブル

Fig. 6. Turn Table and Inside View of Cockpit

連絡ができるようになっている。副操作卓で行なわれる機能は表1に示すとおりである。

以上全体システムについての概要を記したが、以下の各章において各サブシステムについて詳述する。

3. コックピット

2. で述べたように、シミュレートホールには8人乗りのコックピットが16台設置されており、観客はターンテーブルにより回転しながらコックピット内へ導入される。ターンテーブルは自動車の方向変換装置を利用したもので、図6の写真に示すように中央の壁で二つに仕切られ、両側にそれぞれ8脚ずつの座席が背中合わせに設けられている。このターンテーブルの採用によりコックピット内で実演の済んだ観客とこれから始める観客とを同時に入れ替えることができる。

コックピットは実際のトラベルが行なわれるところであり、ある意味ではこのシミュレータの評価がなされるところでもある。したがって、前面窓に現われるトラベルの内容は観客の楽しめるものでなければならないが、観客の視覚、聴覚、体感を巧みに利用して飛行体によるトラベルのフィーリングを総合的に実現しなければならない。

視覚に訴えられるものは、構造、内装、内部機器の配置などに関連するので、机上のプランのみでは実感を伴って判断しにくいものが多い。そのため最終の形にまとまるまでには数回の試作が繰り返された。結果の概略を示すと下記のようなになる。

(a) コックピットの構造

いかにも特殊な乗物に乗り込んだというやや狭苦しい感じをだした。

(b) 前面窓の画面

カラーテレビとしては最大の25形を使用し、自動焦点式カメラの採用により常にシャープな画面を出すようにした。

(c) 計器類

費用の関係で、飛行体のイメージをこわさない程度のものを設置した。

(d) 内装・座席

試作によって決定した。

聴覚に関するものとしては、飛行体のエンジン音、バックグラウンドミュージック、説明用ナレーションのようにスピーカより出して内部のムードを高める役をなすものと、モータ音、リレーの動作音のようにノイズとなるため、しゃ音対策を施す必要のあるものがある。ここではエンジン音発生法について簡単に触れておく。

エンジン音発生法としては、予想される状況下における実際の音

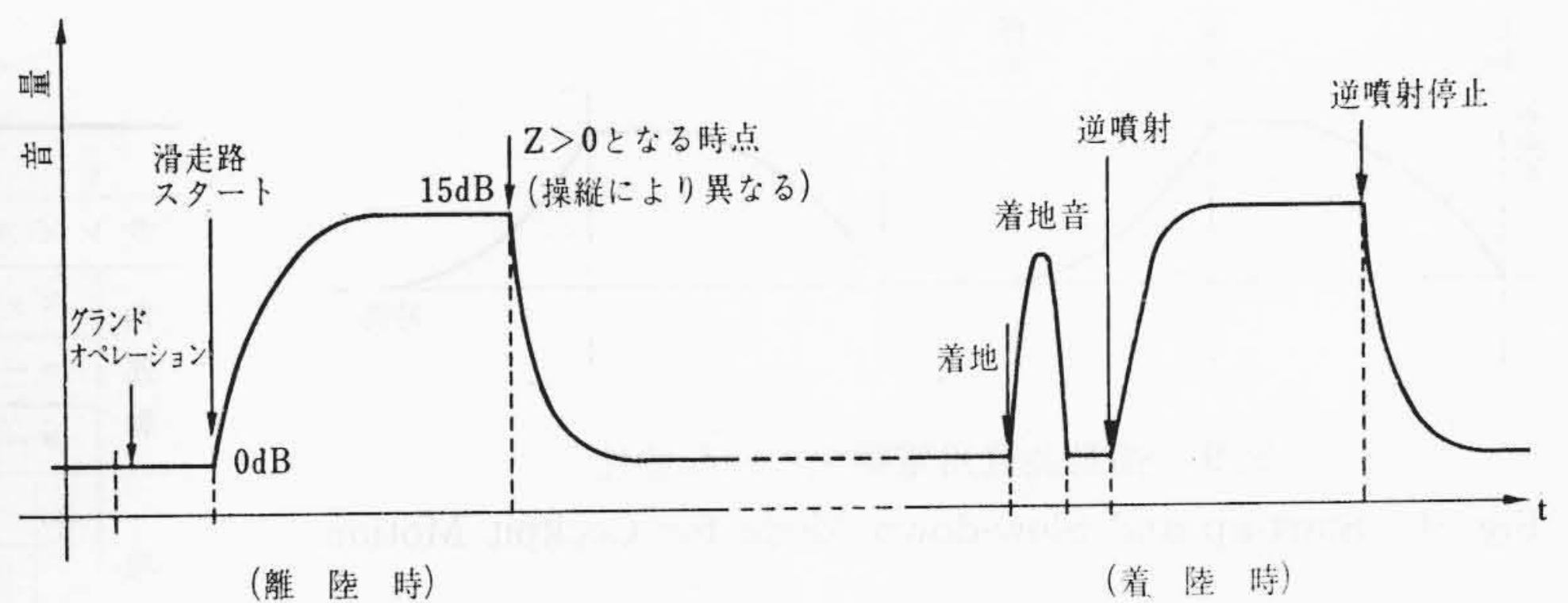


図7 離着陸時の音量の時間的変化

Fig. 7. Sound Effect at Take-off and Landing

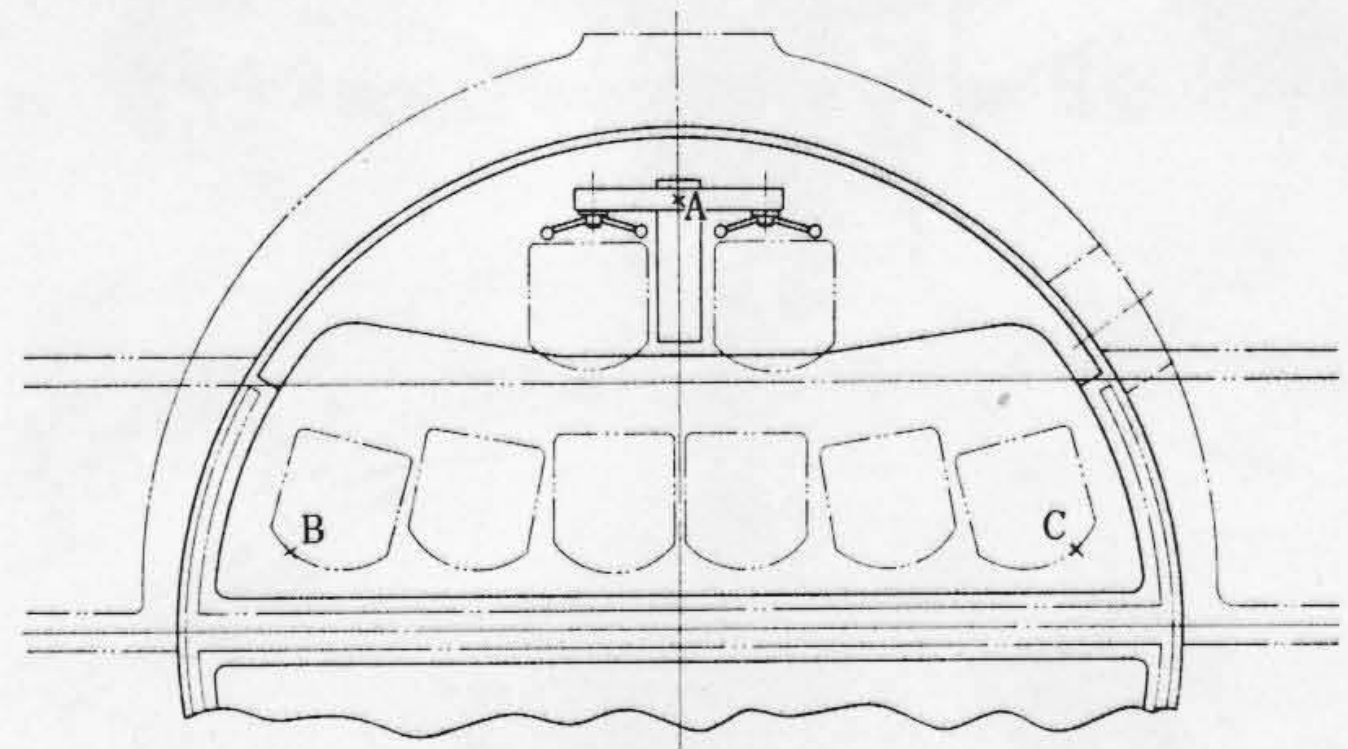


図8 コックピット揺動装置

Fig. 8. Mechanism for Cockpit Motion

をあらかじめテープレコーダに録音しておく方法と合成により作りだす方法が考えられるが、ここでは選択、制御の自由度の高い合成による方法を採用した。ジェットエンジン音はジェット気流の噴射音と高速回転を行なっているタービンの音とより成り、両者ともエンジンの動作状態に応じて音量、周波数成分が変化する。周波数分析によってこれらの状況を検討した結果、ジェット噴射音としては白色雑音をローパスフィルタを通して利用し、タービン音は2~7kHzののこぎり波の周波数の異なるものを混合して得ることにした。またこれらの音量、周波数はアナログ計算機によって算出された飛行状態を表わす信号(たとえば速度信号)によって制御されている。離着陸時の音量の時間的変化を示すと図7のようなになる。

体感も重要なファクタであり、これに該当するものに操縦桿操作時の反力とコックピットの揺動がある。操縦桿の反力は厳密には飛行体の受ける動圧の関数となるが、ここではスプリングとオイルダンパによる簡単なものとした。コックピットの揺動は視覚によるディスプレイの効果をより高めるために補助的役割をするものであり、訓練用シミュレータにも実施しているものと、していないものと

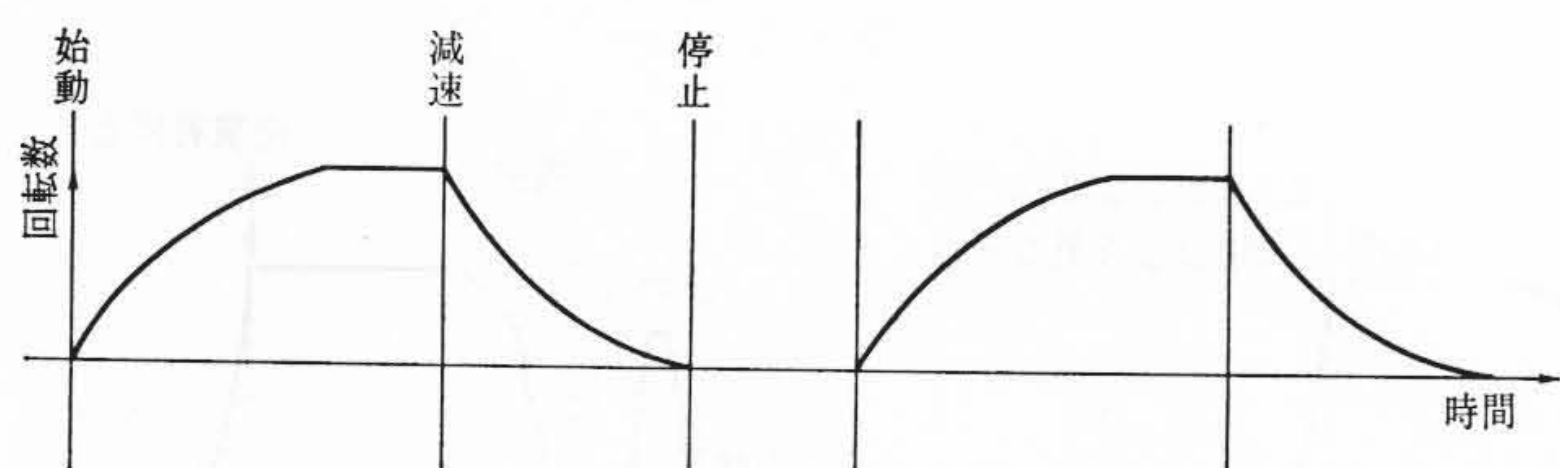


図9 揺動装置用電動機の回転特性

Fig. 9. Start-up and Slow-down Mode for Cockpit Motion

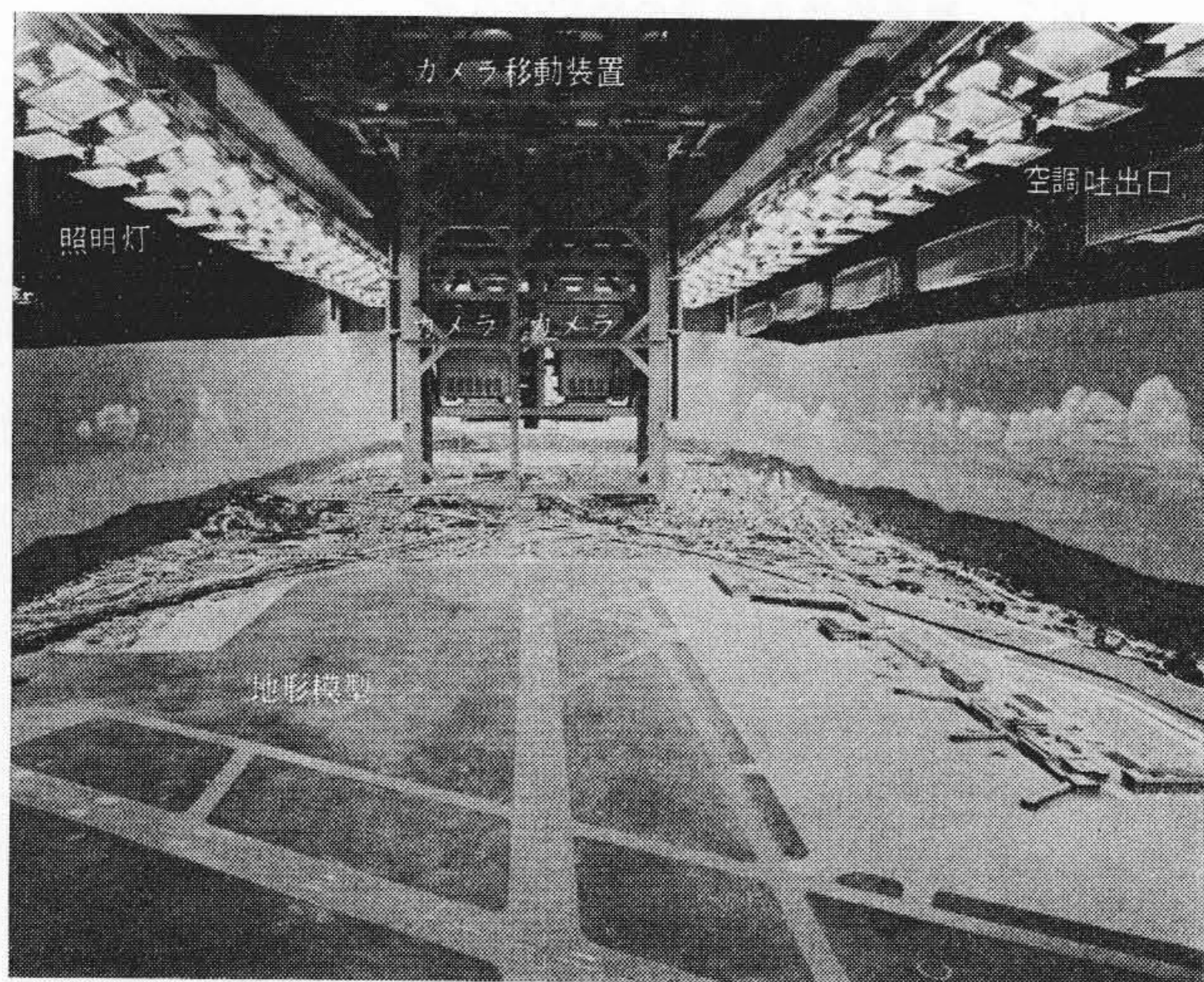


図10 地形模型付近

Fig. 10. Terrain Model for Visual Display

がある状況なので、本装置のようなものには不要であるとの意見もあったが、実験による検討の結果効果の高いことが認められ、設置されることになった。しかし、目的からいって高性能のものは必要ないので、構造が簡単で安価なものという趣旨から図8に示すようなものが用いられている。すなわち、観客用座席の載っている床板がA、B、C 3点で支持されており、このうちAは自在継手を介して固定されているが、B、Cは上下に10 cmずつ動かせるようになっている。ここでB、Cを同じ方向に上下してやれば床面は縦揺れと同じ動きをするし、それぞれ反対方向に上下してやれば近似的に横揺れを実現できる。ただし、揺動の始動、停止時に衝撃感を受けるようではぐあいが悪い。これを解決するために、B、Cの上下駆動に誘導電動機のImpulsive Drive法⁽²⁾⁽³⁾を適用し、始動、停止時の回転数特性を図9のようにした。この結果衝撃感は全くといってよいほどなくなり、予想以上の効果があった。実演中、この揺動は制御装置よりの指令によって行なわれるが、これに2種類のモードがある。一つは操縦者の操縦桿の操作結果から算出された信号によるもので、たとえば操縦桿を手前に引くとB、Cはいずれも下げるような信号が送られ、あたかも機首を上に向けたような体感を生ずる。ほかの一つは、操縦桿を操作しないときに加えられる周期数秒程度の駆動信号である。B、Cでこの駆動信号の周期がわずかに異なるようにしておくと、コックピットはその差を周期としてゆっくりと縦揺れ、横揺れを順次にくり返していく。そのため観客は常時揺られているような感じを受け、これにより内部で発生する種々のノイズによる効果を実質上相殺することがきる。

コックピットには、上記のようにフィーリングを向上させる対策のほか、たとえ短時間にしろ観客を密閉された空間に閉じこめることになるので、安全上の対策として非常ドアや、緊急事態通報用ベルの押しボタンが設けられている。

表2 V/STOL 機シミュレータとの比較
Table 2. Visual Display System Specification

		V/STOL 機 用	万 国 博 用
テレビカメラ		1 ビジコンモノクローム	3 プランビジコンカラー
角運動	ピッチング	カメラ、レンズを一体で回転	光学系内のプリズムを回転 (図11参照)
	ローリング	レンズ固定、カメラのみ回転	
	ヨーイング	カメラ、レンズを一体で回転	
地形模型	寸 法		
	長 さ	7.5 m	16 m
	幅	2.5 m	4 m
	高 さ	2.4 m	1.2 m
	縮 尺 率	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{600}$
模 型 照 明	彩 色	モノクローム	カラー
	光 源	400 W 高 圧 水 銀 灯	1 kW タングステンハロゲン電球
	配 置	天蓋(がい)すき間より投光	地形模型上(図10参照)
	灯 数	20 灯	118 灯
	照 度	6,000 lx 以 上	16,000 lx 以 上
高い空の表現法		地 形 模 型 の 天 蓋	光学系付属のスカイプレート

4. ビジュアルディスプレイシステム

ビジュアルディスプレイシステムは、前述のようにモデルシミュレーション部とフィルムシミュレーション部より成り、これに映像制御装置と映像表示装置を組合せて一連のシステムが構成されている。

4.1 モデルシミュレーションシステム

地形模型、地形模型照明装置、テレビカメラ装置、カメラ移動装置の組合せによって視界を得るオーソドックスな方式を基本としているが、本装置の場合はカラー化されているためもあるが、かつてわれわれが製作したV/STOL機シミュレータ⁽⁴⁾と異なる点が多い。両者の比較を示したのが表2である。

(1) 地 形 模 型

飛行場およびその周辺の地形を想定して、約10km×2.5kmの範囲を1/600の縮尺率で立体的にまとめている。

地形の周囲は遠景および低い空を描いたホリゾンが設けられており、展示効果、部屋の形状、据付調整の便宜を考慮して地形表面が水平になるように設置されている。

地形模型の仕様決定に際して、全体の大きさは部屋の形状および大きさに、地形はシミュレーションの目的に、縮尺率は後述の最低高度の条件のほか、サーボ系の精度やテレビ系の解像力に支配される要素が多い。

地形表面はカラーテレビカメラの被写体として検討された彩色⁽⁵⁾を施されており、顔料も退色の少ないものが選定されている。

地形模型上をテレビカメラが走行する関係上、カメラの走行範囲内の地形表面とテレビカメラに取り付けられたモデルシミュレーション用光学系の先端との間隔きを長期にわたって一定に保つ必要があるため、地形模型はカメラ移動装置と共通の強固な基台上に固定されており、滑走路付近は定盤状の構造を採用して地形表面の精度は0.5 mm以下に仕上げられている。

地形模型の一部および照明灯、カメラ移動装置などは図10に示すとおりである。

(2) 地形模型照明装置

地形模型の至近点から遠点までの広範囲にわたって鮮明な映像を得るためには、後述のようにレンズの絞値を大きく選ぶ必要があり、使用するテレビカメラの必要照度や照明電力量との関連もあって本装置では照度16,000 lxを設計仕様とし、光束法により

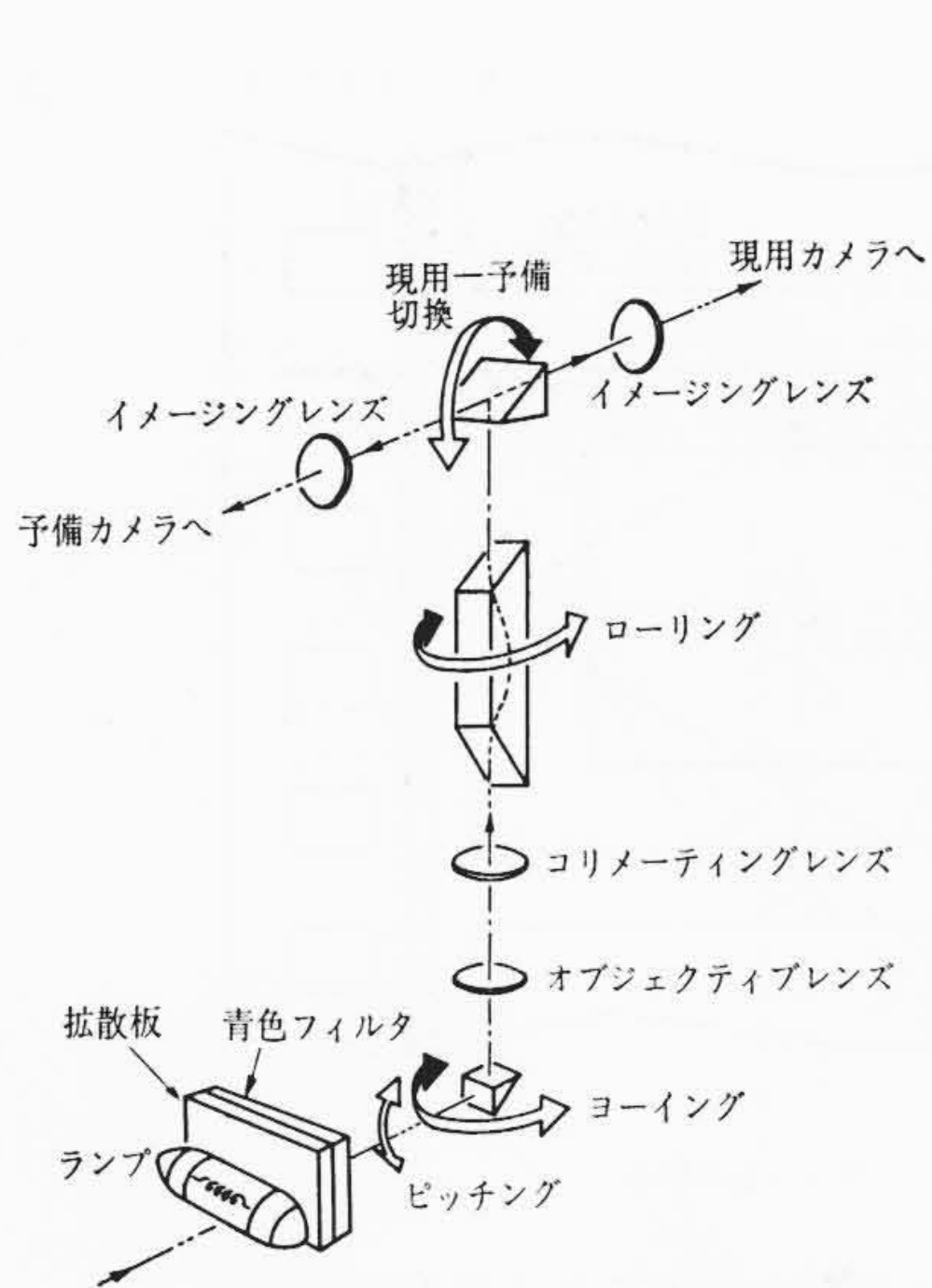


図 11 モデルシミュレーション用光学系
Fig. 11. Schematic Diagram of Optical System for Live Camera

表 3 各 運 動 の 仕 様
Table 3. Camera Motion Specification

	運 動 範 囲	最 高 速 度	備 考
X (前後方向)	0~10 m	0.25 m/s	
Y (左右方向)	±0.15 m	0.1 m/s	
Z (上下方向)	0~1 m	0.1 m/s	$Z_0=12.5\text{ mm}$
θ (ピッチング)	±20 度	$\frac{1}{5}\text{ rad/s}$	
ϕ (ローリング)	±30 度	$\frac{1}{5}\text{ rad/s}$	ϕ 補正を含まず
ψ (ヨーイング)	±50 度	$\frac{1}{10}\text{ rad/s}$	

灯具の配置を決定した。

本装置のようにテレビカメラが地形模型上を走行する方式の場合は、灯具の配置におのずから制限があり、カメラおよびカメラ移動装置走行部による影の問題もあるが、前者は灯具の配光特性をたくみに利用して前掲図 10 のように地形模型の両縁に沿って 2 列に配置し、後者はカメラ底面に管状電球を配設して解決した。

テレビ照明としては、前記照度のほかに色温度、演色性、効率、寿命などの条件があるが、本装置では汎用 1 kW タングステンハロゲン電球に熱線吸収ガラスを組合せて、これらの条件に対して好結果を得るとともに、地形模型へのふく射熱の影響を抑制している。

照明電力量は、約 120 kW に及ぶので、空調設備を設けてテレビカメラの周囲温度を許容範囲内に押えている。

(3) モデルシミュレーション用テレビカメラ装置

テレビ局用として開発された 3 プランビコンカラーカメラ装置⁽⁶⁾を一部改造したもので、使用撮像管はセパレートメッシュ形、色分解光学系はプリズム形である。

カメラヘッドは、現用、予備各 1 台が後述のモデルシミュレーション用光学系を介して対向して配置されており、現用機に障害があった場合は、モデルシミュレーション用光学系からの入射光を、ワンタッチで予備機に切り換えることができる。

(4) モデルシミュレーション用光学系

撮像用レンズ系と角運動用光学系の組合せを基本とし、前述のテレビカメラ現用—予備切換機構およびスカイプレートより構成されている。

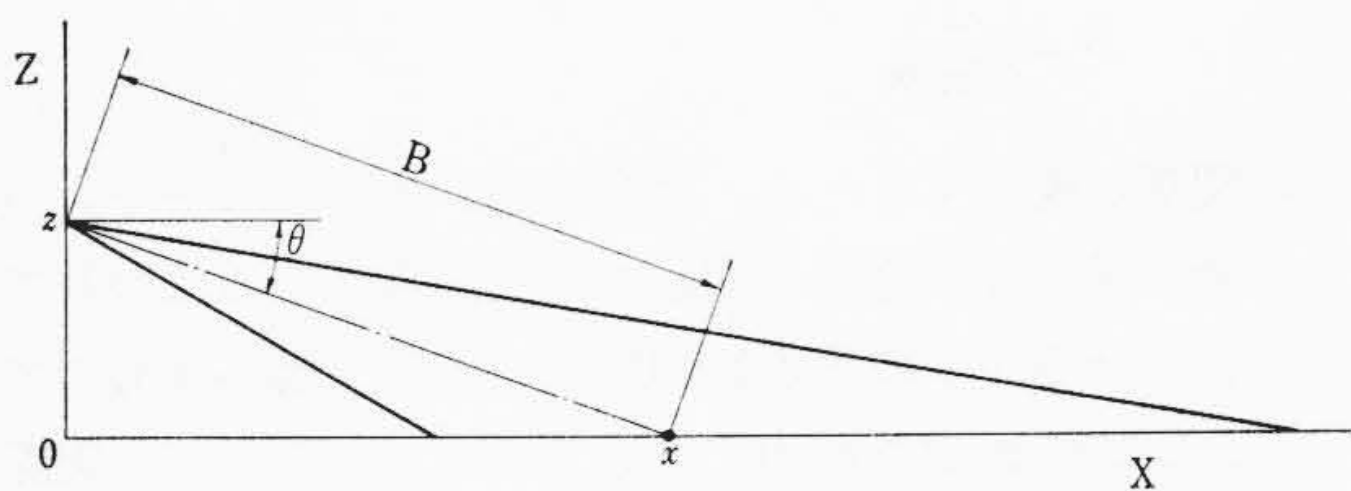
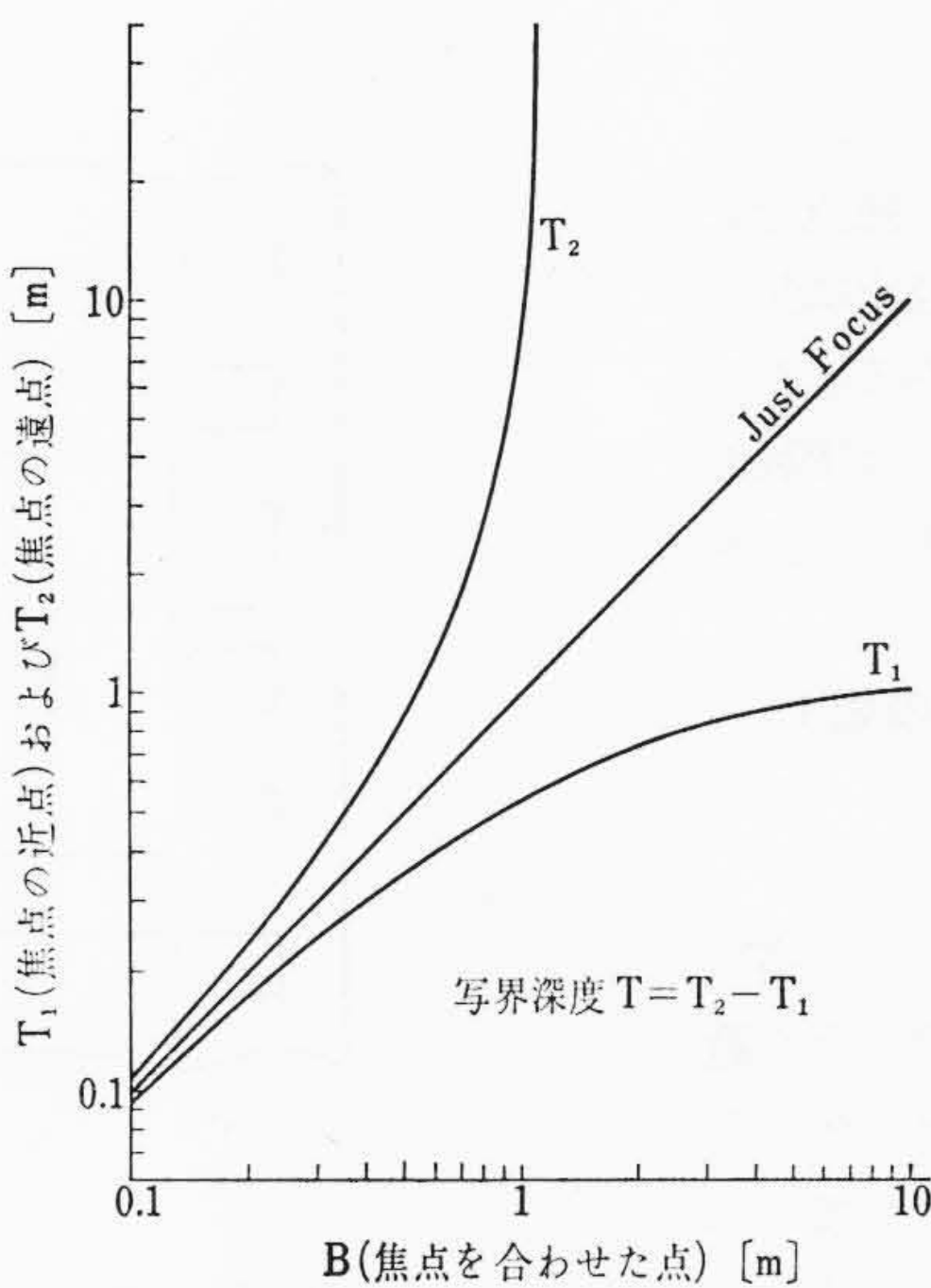


図 13 自動焦点の関係

Fig. 13. Conceptual Diagram for Auto-focusing

図 12 写 界 深 度

Fig. 12. Curves for Depth of Focus

本光学系の概要は図 11 に示すとおりである。

撮像レンズ系は、前記テレビカメラとの組合せにおいて、最も自然な描写力が得られる約 30 mm の焦点長を選定し、光学的諸仕様についてはテレビ局用ズームレンズ⁽⁷⁾に準じて決定したが、シミュレータ用として要求される次のような特殊条件については角運動機構や後述のスカイプレートとともに試作を行ない、それぞれ解決の道を見出した。

- (a) 最低高度が得られること（地形表面から入射光軸までの距離が、実際の飛行体における地表からパイロットの目の高さに地形模型の縮尺率を乗じた値よりも小さいこと）。
- (b) 角運動の障害にならないこと。
- (c) 至近点より遠点まで、広範囲にわたって鮮明な映像が得られること。

(a)および(b)については、撮像レンズ系に、入射瞳(ひとみ)が同レンズ系の外にある特殊な形式を採用し、入射瞳の位置に光軸を 90 度曲げるプリズムを配置して、同プリズムを前掲図 11 に扁平(へんぺい)矢印で示す方向に回転させることにより、ピッチングおよびヨーイングを得る方式とした。ローリングは同じく図 11 に示すように台形プリズムを回転させて得ている⁽⁸⁾。

角運動をシミュレートする 2 個のプリズムは、テレビカメラへの雑音障害を防ぐため、いずれも交流サーボ系により駆動され、ヨーイングに伴って生ずるローリング現象は、ローリング用サーボ系の入力にヨーイング信号を加算して補正されている。

各運動の仕様は表 3 に示すとおりである。

(c)については、レンズの絞値を大きくとれば写界深度が深くなることは広く知られているとおりであるが、本装置が必要とする 0.1 m~10 m の範囲について許容錯乱円径 0.05 mm (解像力 250 本に相当) の計算値⁽⁹⁾をプロットしてみると図 12 に示すように至近点のピントに不安がある。

問題となるのは、飛行体の高度がきわめて低い状態を模擬する場合であって、たとえば離陸および着陸の際の滑走時には、地形模型の至近点より最遠点までが同一画面に収められるため、どのあたりに焦点を合わせるかが問題となる。また人の目には像の運動速度が速くなるほど視力が低下する性質があり⁽¹⁰⁾、滑走中では視力低下に補われてピンボケが目立たなくなるが、離陸前や着陸後は完全な静止像となるので特に問題となる。

これらの問題に対しては、種々の条件で実験を行なった結果、アナログコンピュータの出力信号の一つである高度信号とピッチ信号を用いて自動的に焦点を制御する方式を採用した。

図 13 において、焦点を合わせるべき点を x とすると、

$$B = \frac{z}{\sin \theta}$$

の関係が成立するため、高度が低い状態ではやや近点に焦点を合わせ、飛行体の速度が増して高度が高くなるにつれて遠点に焦点を合わせるように焦点制御用サーボ系を動かすものである。ただし、このままでは $z \neq 0$ のとき $B \neq 0$ となるので、実際には実験的に支障を感じない程度にバイアス分を加え、若干遠点側に焦点をずらしてある。

撮像レンズ系の入射瞳にきわめて近い個所には、前掲図 11 のように青色フィルタ、拡散板および光源を設け、青色フィルタの結像面側の色彩および光束発散度が、地形模型周囲の水平線に描かれた低い空のそれとほぼ等しくなるように調整して、高い空を表現するように構成した。青色フィルタなどは焦点の合う範囲外にあるため、青色フィルタなどの下端は完全にボケた像となり、水平線に描かれた低い空ときわめて円滑に融合して、低い水平線を使用しながら、角運動をそこなうことなく低い空と連続した高い空の像を得ることができた。この部分をわれわれはスカイプレートと呼ぶことにした。

スカイプレートには、このほか外光をさえぎる効果があり、さえぎられる部分にも照明灯が配置できるので照明設計上にも利点があったし、同じ理由により後述のカメラ移動装置の設計上にも利点があった。

2 台のテレビカメラに入射光を切り換える機構は、前掲図 11 に示すようにローリング用台形プリズムのあとにモータで駆動されるプリズムをそう入し、その後にそれぞれのカメラに専用のイメージングレンズを配置している。イメージングレンズの一つは、切替用プリズムに対して光軸方向に可動であって、両テレビカメラの取付間隔や傾きをバックフォーカスをそこなわずに調整することができる。

本光学系には、テレビカメラの調整を容易にするため、チャート投影機を付属品として準備した。チャート投影機は本光学系をテレビカメラに装着したままでも着脱できる。

(5) カメラ移動装置

地形模型とテレビカメラとの間に相対運動を行なわせる手段としては、各種の方式が考えられるが、本装置においては、固定された地形模型に対して前後方向に動く天井走行形クレーン状の装置を X 方向とし、X 方向移動けたに Y 方向と Z 方向の駆動機構を備えたテレビカメラ搭載用架台をつり下げる方式を採用した。X、Y、Z ともサーボモータの容量から SCR を使用した点弧角制御によるサーボ系でラックピニオンギヤを介して駆動される。

各運動の仕様は前掲表 3 に示してある。

SCR 採用に関し、閉回路テレビ系への雑音障害が心配されたが、サーボ系のケーブルとテレビ系のケーブルとを配置上完全に分離し、カメラ側は通常のカラーライブカメラに施されている程度のシールドによって障害を排除できることが実験的に確認された。

地形模型およびモデルシミュレーション用光学系の項でも触れたように、最低高度をシミュレートする場合は、撮像用レンズ系への入射光軸が地形表面に接近し、この状態ではモデルシミュレーション用光学系の先端と地形模型表面との間げきは、地形模型の精度や経時変化を見込むと 2.5 mm を保たねばならないので、全カメラ移動範囲内にわたり 0.5 mm 以下の精度に仕上げられている。

カメラ移動装置の負荷重量は、X 方向約 1,500 kg、Y 方向約 750 kg、Z 方向約 500 kg が見込まれているため、過大入力そのほかの障害に伴う暴走に対しては、電氣的、機械的に 2 重の安全対策が施されている。

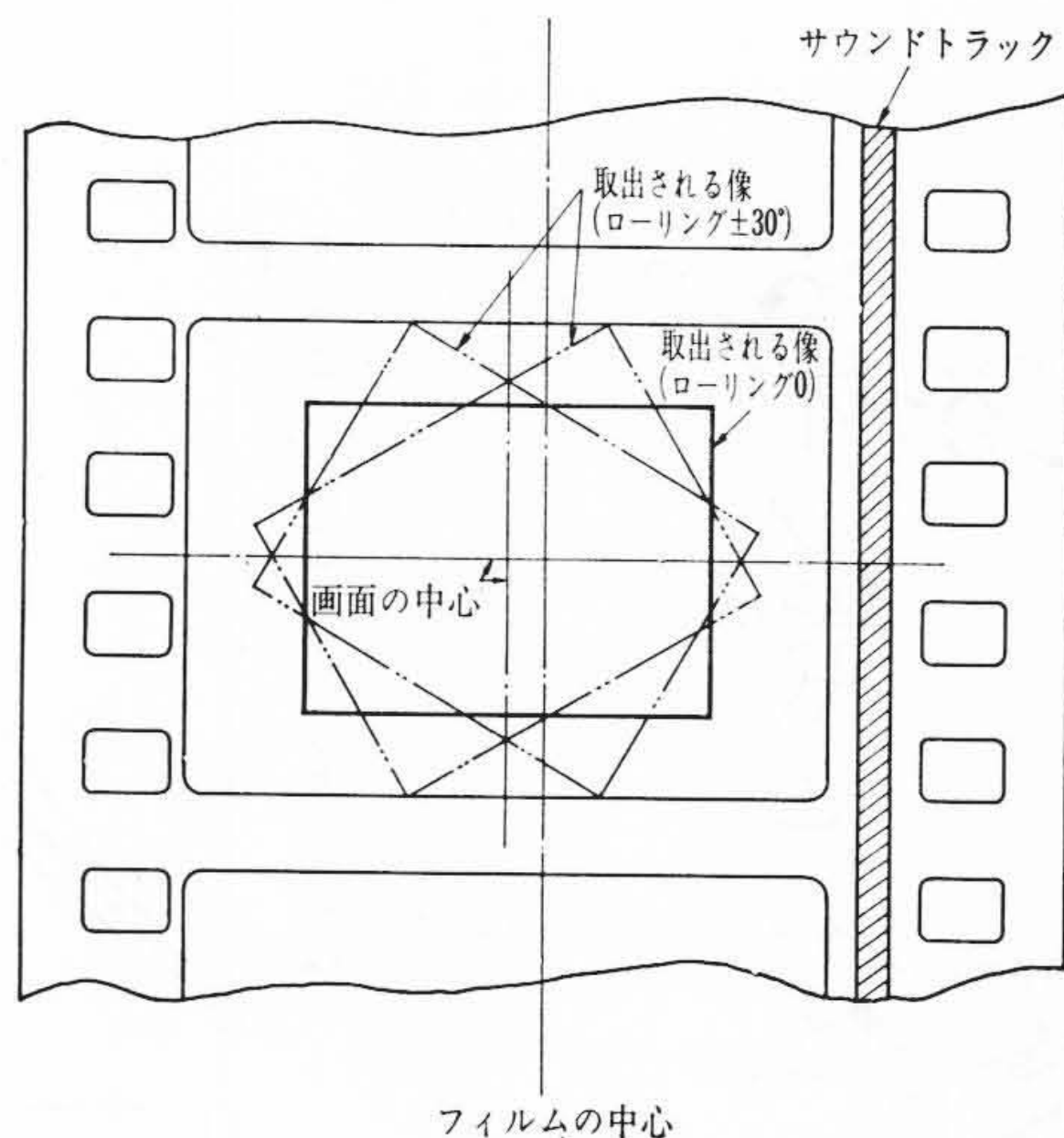


図 14 フィルムの齧と取出される映像の関係
Fig. 14. Size of Visual Scene Picked Up from Film Frame

表 4 絵素数の比較

Table 4. Number of Picture Elements for Various Films

	垂直解像力 r_v (本)	水平解像力 r_h (本)	絵素数 (個)
8 mm フィルム	190	190 (260)	50,000
16 mm フィルム	430	430 (580)	250,000
35 mm フィルム	915	915 (1,270)	1,160,000
525 本の TV	350	322 (430)	150,000

注：() 内の数字は縦横比を掛けた値

1 フレーム分の絵素数 = 垂直解像力 × 水平解像力 × $\left(\frac{\text{画面の幅}}{\text{画面の高さ}} \right)$

4.2 フィルムシミュレーションシステム

フィルムシミュレーションは、あらかじめ撮影された映画フィルムから、操縦による変化を伴った映像を取り出そうとするものであるが、フィルムに収められている映像の内容は映画撮影時の条件に支配されるためシミュレーションに関する自由度が少ない。

またフィルム送像用テレビカメラと組み合わせる関係で光学的制限も多いので、制御対象を Y、Z、ローリングに限定して人間工学的観点から実験を行ない、後述のフィルムの絵素数などを勘案してローリングのみを行なうことに決定した。

一齧(こま)のフィルムから ± 30 度のローリングを伴った映像を取り出す状況は図 14 に示すとおりである。この場合、フィルムの利用率が低くなるので、絵素数や光量の点で通常のフィルム送像用テレビ系に多用されている 16 mm フィルムに劣らない限界として 35 mm フィルムを採用した。各種素材の絵素数の比較⁽¹¹⁾を示したのが表 4 である。

フィルムシミュレーション中の音響には、フィルムの光学トラックを利用している。

フィルムシミュレーションシステムも現用、予備に分かれており、プロジェクタ、フィルムシミュレーション用光学系、テレビカメラを組み合わせた一連の系として、ワンタッチで切り換えることができる。

(1) 35 mm プロジェクタ

通常のフィルム送像用テレビ系に使用されるプロジェクタのプロジェクションレンズをシミュレーションに適したものに交換し、運用の便宜のためオートストップおよびキュー検出回路を付加した。

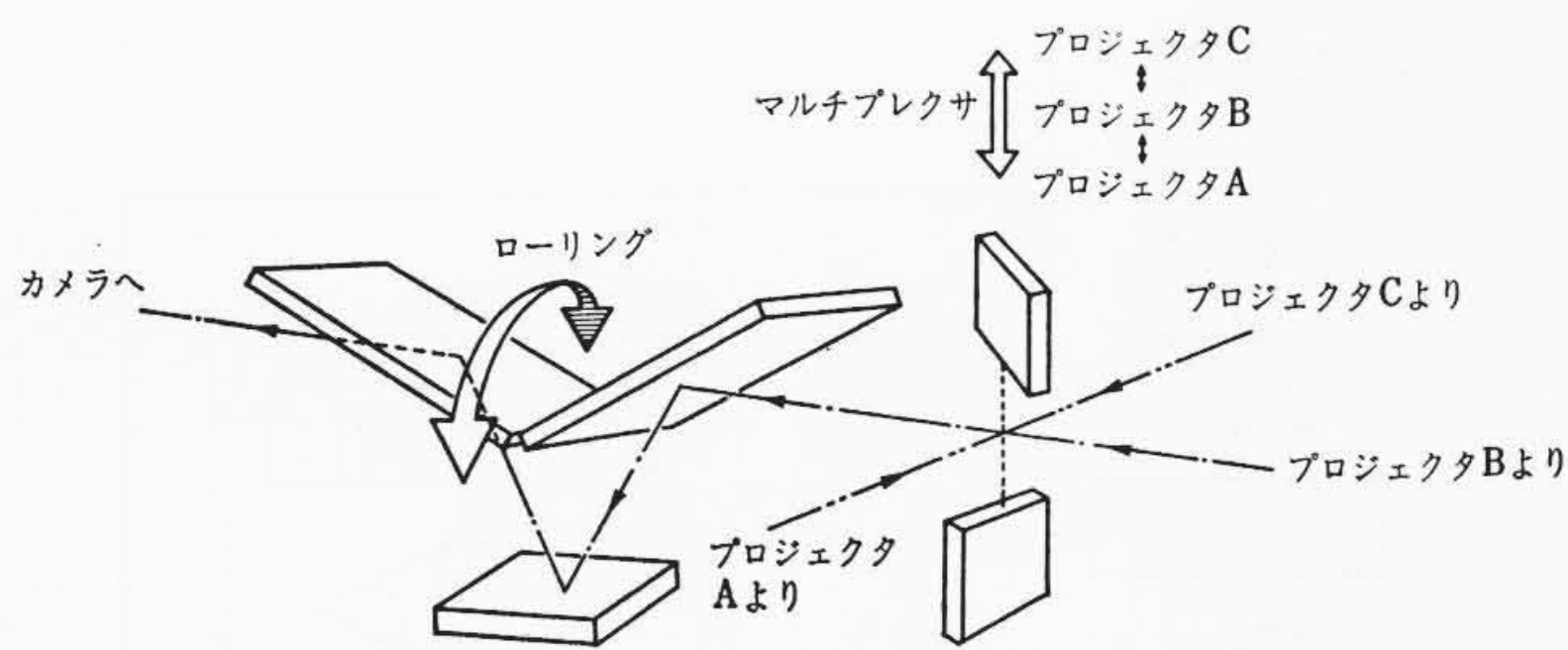


図 15 フィルムシミュレーション用光学系

Fig. 15. Schematic Diagram of Optical System for Film Camera

(2) フィルムシミュレーション用光学系

3入力1出力のマルチプレクサに角運動用ミラーを組み合わせたもので、概要は図15に示すとおりである。

本装置のマルチプレクサは切換時間が速い必要はなく、また送像中に切換操作を行なうようなことはないので、ミラーの精度に重点を置き、同一軸上に段違いに交差したミラーをモータで上下に駆動する方式とした。またこのような方式のマルチプレクサでは、反射チャンネルの2入力と透過チャンネルの1入力とは映像の極性は異なるが、本装置の場合は各チャンネルに使用されるフィルムがあらかじめ決められているので、透過チャンネル用フィルムを裏焼きにした。

角運動用ミラー系は、モデルシミュレーション用光学系におけるローリング用プリズムと同一原理に基づくものであるが、フィルムシミュレーションの場合はテレビカメラの結像面積が大きいので(モデルシミュレーションの場合 17.1×12.8 , フィルムシミュレーションの場合 114×85) プリズムの代りにミラーを採用した。角運動用ミラー系は、モデルシミュレーション用光学系同様交流サーボ系によって駆動され、サーボアンプは互換性をもっている。

通常のフィルム送像用テレビ系においても、プロジェクト、マルチプレクサ、テレビカメラ相互間の光学的アライメントは精度を要し、手数のかかるものとされているが、本装置の場合は角運動用ミラー系を含んでいるのでいっそう困難であった。

(3) フィルムシミュレーション用テレビカメラ

テレビ局用として開発された4ビジコンカラーカメラ装置⁽¹²⁾を一部改造したもので、フィールドレンズもシミュレーションに適したものに交換した。

4.3 映像制御装置

同期信号発生器、分配器、切換器、特殊効果増幅器、変調器、リレー盤などより構成されている。

シミュレータとして特徴ある部分は特殊効果増幅器で、離陸終了後のモデルシミュレーションの像からトラベルのフィルムシミュレーションの像にディゾルプで切り換え、着陸開始時に再びモデルシミュレーションの像にディゾルプで切り換える。トラベルのフィルムの巻頭と巻末には雲の中を飛行している状態の像が収められており、ディゾルプで切り換えると離陸後雲の中へ突入し、着陸開始時には雲から出てくる効果が得られる。

音響も同様にディゾルプで切り換える。

変調器は、映像出力をVHFに変換して、後述の映像表示装置や展示用として別途設置されたレーザカラーテレビなどへ有線で送り出す。

リレー盤は、ディジタルコンピュータからの指令を受けて、各機器を自動運行する。

4.4 映像表示装置

25形カラーテレビ受像機を一部改造したものを操縦室の前面窓にはめ込み、離陸から着陸に至る一連の映像を搭乗者に提供する。

5. コントロールシステム

コントロールシステムの中心は、ディジタルコンピュータと、これに関連する制御機器およびアナログ計算機より成るハイブリッドシステムである。すなわち、モデルシミュレーションにおいては、サーボ機構によりカメラを動かすことから、アナログ計算機が中心となり、フィルムシミュレーションにおいては、コックピット揺動および計器制御を行ない、かつ、アナログ計算機の演算制御を行なうことからディジタルコンピュータが中心となる。

このような各装置の処理内容の分担は、フライトシミュレータにおけると同様に、ダイナミックスを必要とする個所にはアナログ計算機を、シーケンシャルな制御や非線形な処理を必要とするところには、ディジタルコンピュータを分担させたものである。

制御装置を中心とするブロック図を示すと図16のようになる。コントロールシステムの入出力信号類を一括して示したのが表5である。

5.1 デジタル計算機およびリンケージ部

本装置は、ハイブリッド演算処理用のディジタル計算機CLOAP-

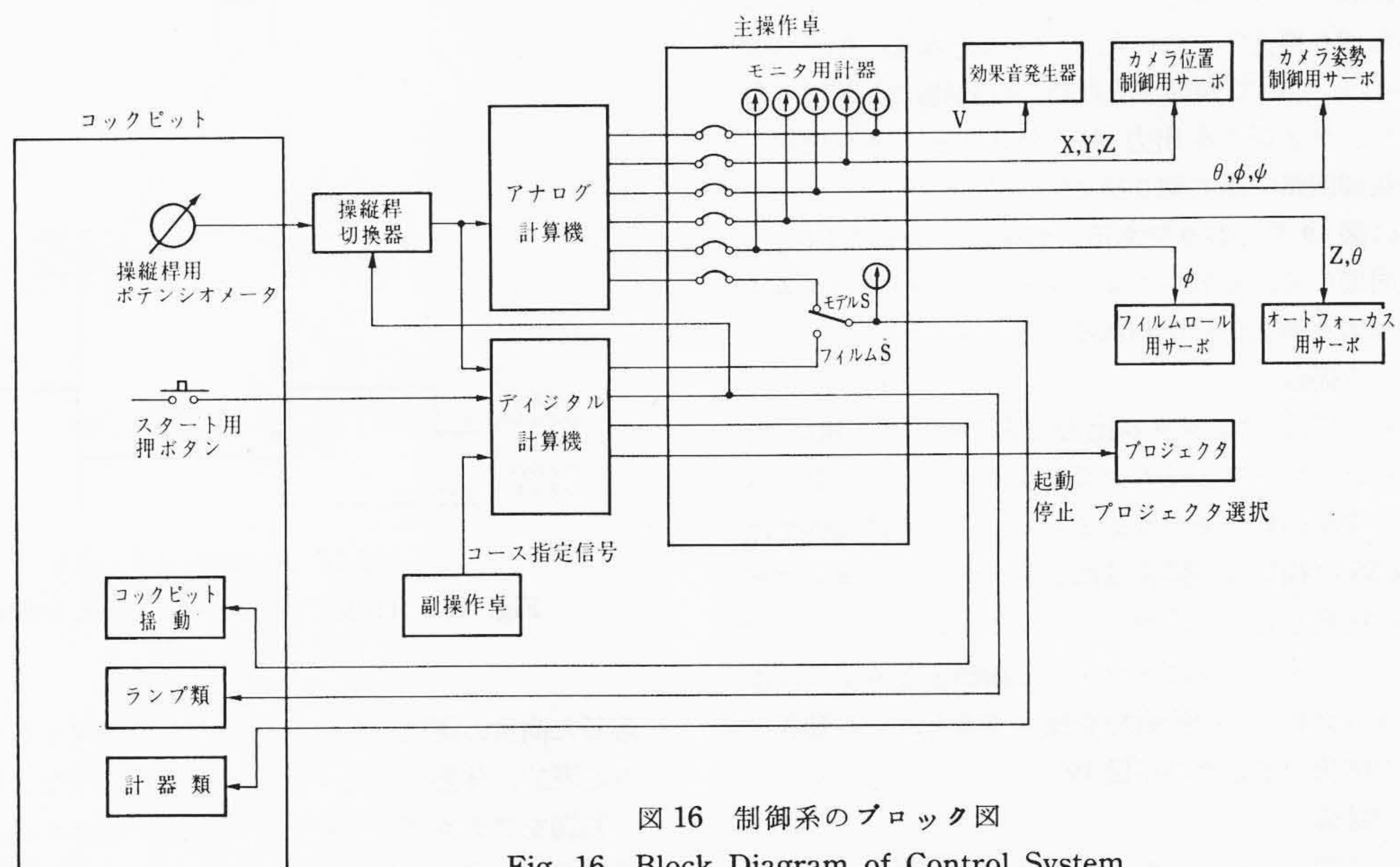


図 16 制御系のブロック図

Fig. 16 Block Diagram of Control System

表5 入出力の信号
Table 5. Input/Output Signals of Computer

制御の項目	信号の内容	制御の内容
コックピット揺動	D	コックピット内の床を操縦量に応じて、またはランダムに揺動させる。
コックピット内ランプ類	D	コックピットごとに「AUTO」「MANUAL」「CAUTION」「GO AHEAD」を切り換える
コックピット内計器類	A	高度計、速度計を画面に合わせてコントロールする。
操縦桿の切換	D	コックピットの番号順に操縦可能時間を切り換える。
コース選択	D	コース別のプロジェクタを切り換える。
M, S ↔ F, S の切換	D	プロジェクタの起動、停止を時間的にコントロールする。
カメラ用位置信号の計算	A	X, Y, Z 信号によりカメラ位置をコントロールする。
カメラ用姿勢信号の計算	A	θ, ϕ, ψ 信号によりカメラの光学系をコントロールする。
オートフォーカス用信号	A	Z と θ により自動焦点用サーボをコントロールする。
フィルムシミュレーション用ロール信号	A	フィルムシミュレーション中に画面のロールを行なう。
スタート信号	D	コックピット内のスタート押ボタン信号を取り込み、デジタル計算機のプログラムスタートを行なう。
コース指定信号	D	副操作卓から次回コースを取り込む。
操縦桿のポテンシオメータ	A	操縦桿の操作量を取り込み、コックピット揺動を行なう。

D: デジタル信号
A: アナログ信号

2000E を用いて、表5のうち「D」(デジタル)の個所の処理を分担するもので、最も基本的な機能は、モデルおよびフィルムシミュレーションを通じて、全体の進行時間を規制するタイミングを発生することにある。

デジタル計算機における処理内容をフローチャートで示すと図17のようになり、各詳細は以下のとおりである。

(a) 操縦桿切り換え

操縦可能な時間をコックピットごとに切り換えて、できるだけ多数の人々に操縦のおもしろさを体験してもらうことを目的としたものである。計算機では、デジタル出力を制御して切り換えるが、切り換えは該当コックピットに直ちに切り換えるのではなく、予告してから切り換える。このため、予告と本来の操縦時間を16コックピットについて制御するため、時間的には直列に32状態が必要となり、デジタル出力「C₀」を5チャンネル使用してデコードし、制御回路を経て切り換えている。

この時間関係は図18のとおりである。図中にもあるように、この切り換え信号に同期して、モデルシミュレーション ↔ フィルムシミュレーションの切り換えが行なわれる。

(b) コックピット揺動

揺動の制御に対しては、デジタル出力を5チャンネル用いて、モデルシミュレーションとフィルムシミュレーションでは異なった制御を行なう。すなわち、モデルシミュレーションにおいてはNo.1またはNo.16の操縦桿の操作量により、すべてのコックピットを同じように揺動させるが、フィルムシミュレーションにおいては、すべてのコックピットにランダムな揺動となるように制御するが、該当コックピットの操縦桿を操作すると、その動きに支配される。この関係を示したのが図19である。

(c) 計器類の制御

コックピットの計器をフィルムシミュレーション中に、画面に

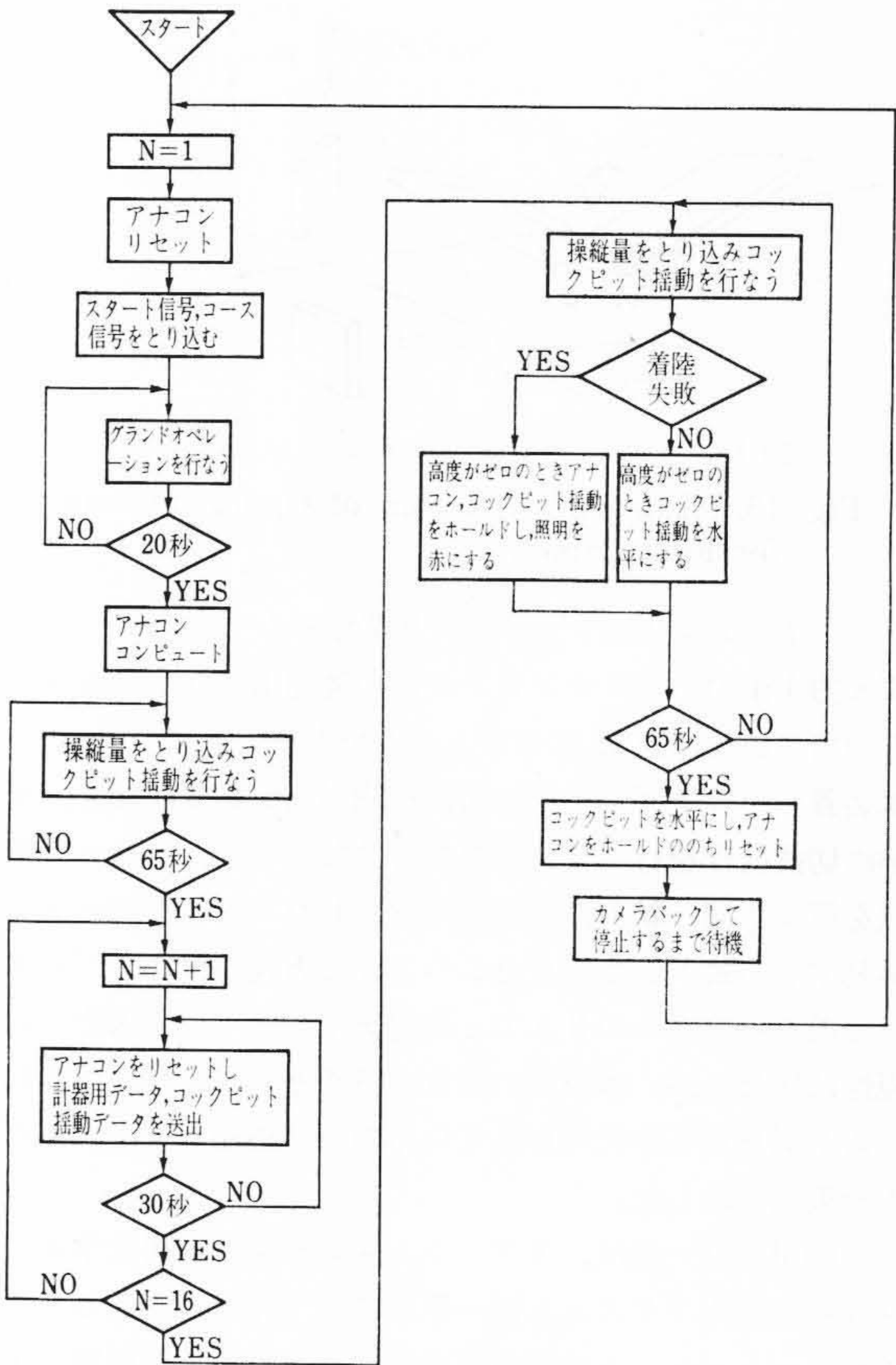


図17 フローチャート

Fig. 17. Flow Chart for Control Function

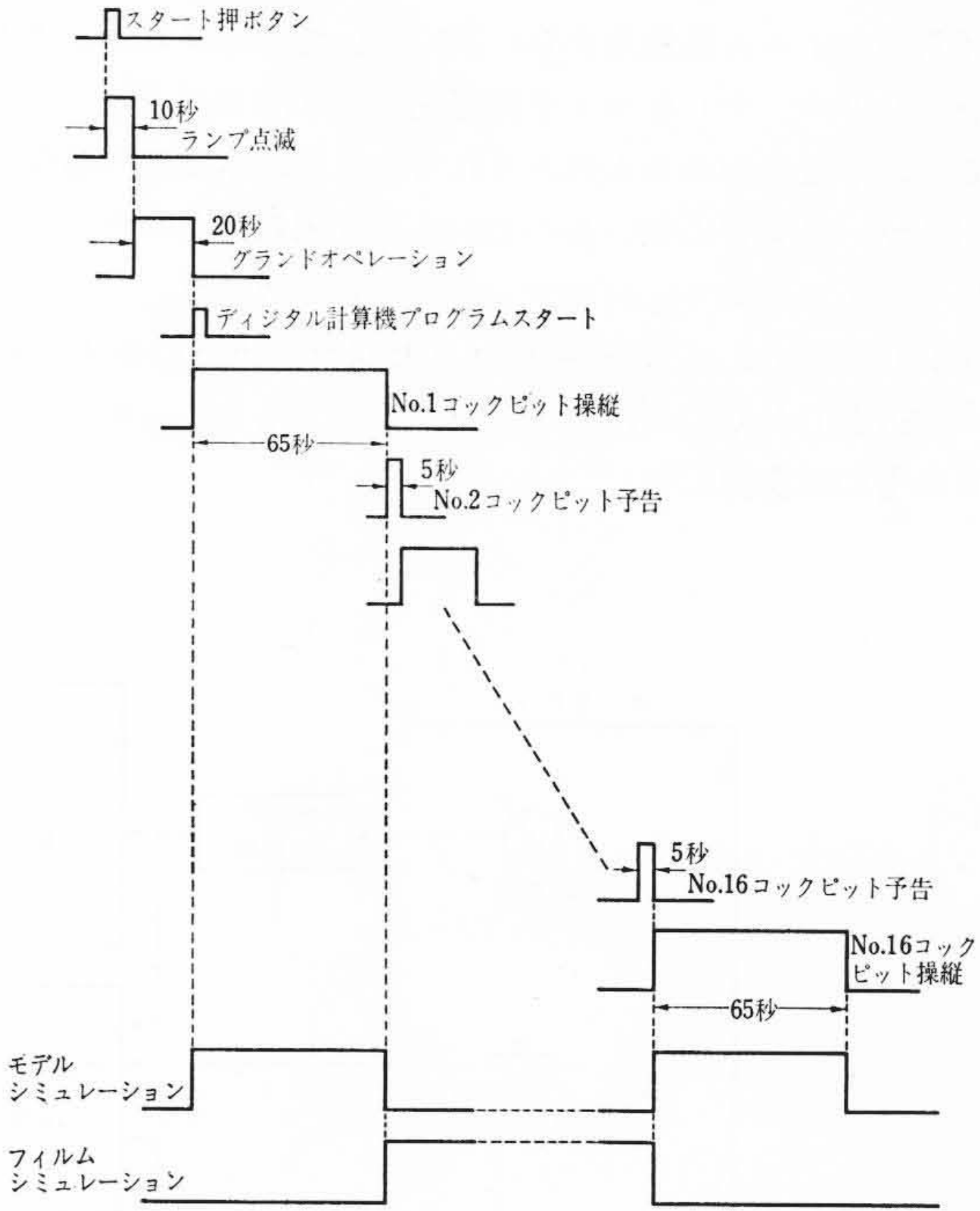


図18 操縦桿の切り換え

Fig. 18. Time Sequence for Stick Switching

応じた高度、速度の指示となるように制御するもので、操縦に伴う心理的、体感的な効果を上げるために行なうものである。
制御をアナログ的に行なうため、デジタル計算機にフィルム撮影時の高度、速度のデータをあらかじめ記憶しておき、画面の

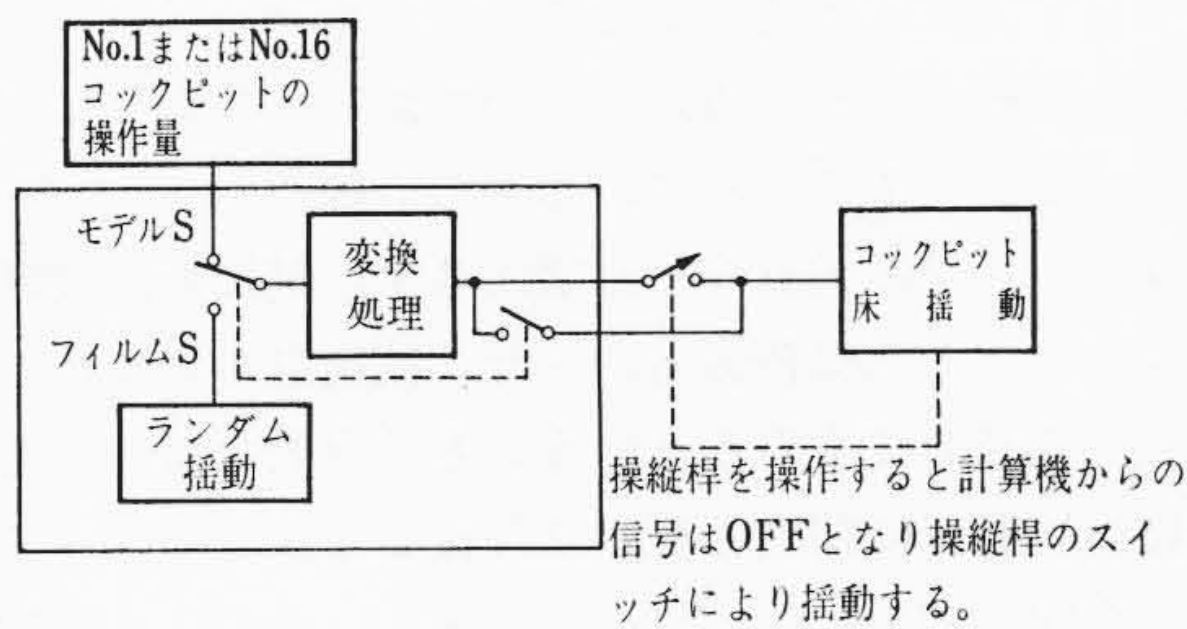


図 19 コックピット揺動

Fig. 19. Cockpit Moving System

進行に応じて、DA変換して出力する。出力した値は、適当なフィルタ特性のあるバッファを経て計器を制御する。

(d) ランプ類の制御

コックピット内に、操縦桿が使える旨を予告するランプ、当番であることを示すランプ、モデルシミュレーション、フィルムシミュレーションを示すランプ類があり、これらはあくまで心理的な効果を上げるための補助的なものであるが、操縦桿の切り換えと同期して制御される。

(e) スタート信号およびコース指定信号

この二つは、いずれもデジタル計算機の入力信号となるものであって、デジタル入力より取り入れる。取り込まれたあとの処理は先に示した図 17 のフローチャートに示すとおりである。

(2) 飛行計算装置

モデルシミュレーションにおいて離陸、着陸時の飛行軌跡として、位置信号 (X, Y, Z)、姿勢信号 (θ, ϕ, ψ)、速度 (V) を操縦桿の操作量を入力信号として計算する。

構成については、ダイナミックスの点からアナログ計算機を用いたが、計算式の選定については、すでにある一般の飛行方程式を基にして次の点を考慮した。

- (i) 離陸、着陸に用いる模型は 1/600 であって、滑走路は約 2 km (原寸は 3.3 m) に相当するため、機体の想定として、かなり STOL 機に近いものである。
- (ii) 万国博の展示物という性格から、操縦者は一般大衆であるため、操縦がきわめて簡単に行なわれることが必要である。
- (iii) 自動車と異なり、6 自由度を持つ飛行体の操縦感覚を短時間に、体感できるように考慮する。
- (iv) フィルムシミュレーションとの接続に、不自然さを与えないように、離陸後の処理および着陸開始時の初期値を選定する。

以上の点を考慮しながら、離陸の演算と着陸の演算に分けて、初期値、各係数、時定数は実験を何度かくり返して定めたが、(i) と (ii)、(iii) は相反する条件であるため、ここには妥協が必要であった。

着陸時の「着陸失敗」の条件としては、次のパラメータをとり、いずれか一つでも満たされると着陸失敗とした。

- (滑走路の左右の限界値をこえるとき)
- (高度が一定値以上であるとき)
- (ロール角が一定値以上であるとき)
- (ヨー角が一定値以上であるとき)

このようなパラメータの限界値は、操縦性の場合と同様に、何度かの実験により、着陸成功が 50% 程度となるように定めたものである。

(3) バックアップ装置

万国博の展示物という性格から、システム構成の項でも述べられているように、安全性、信頼性をじゅうぶん考慮しておくことは

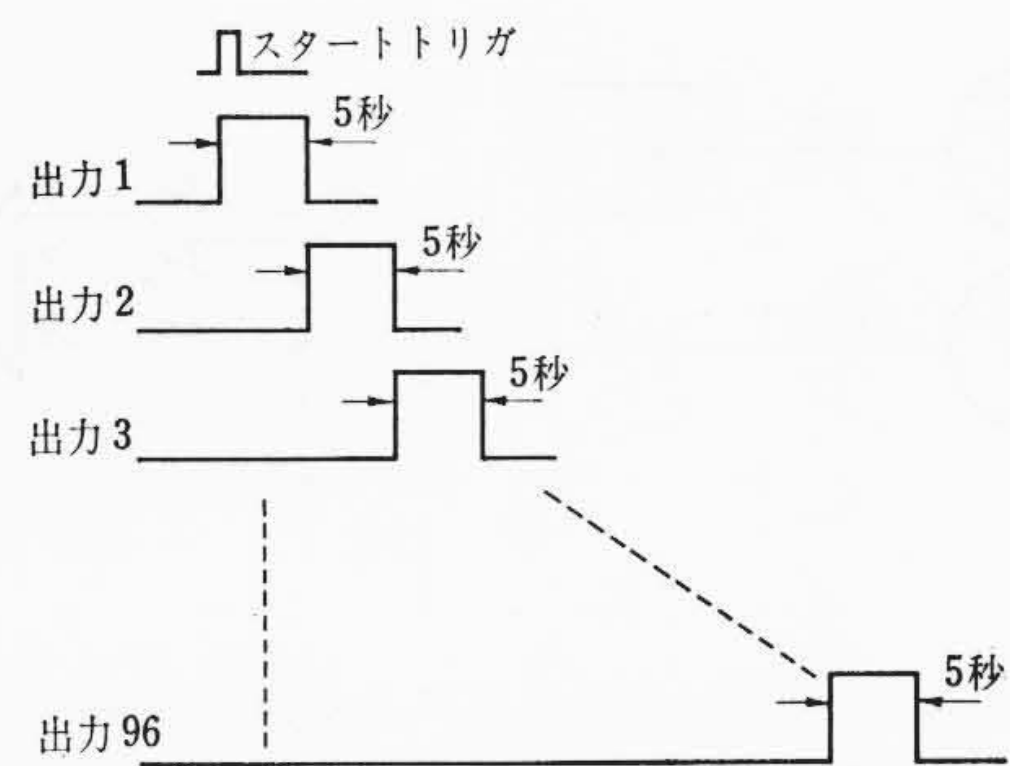


図 20 プログラムタイマ

Fig. 20. Pulsed Output from Program Timer

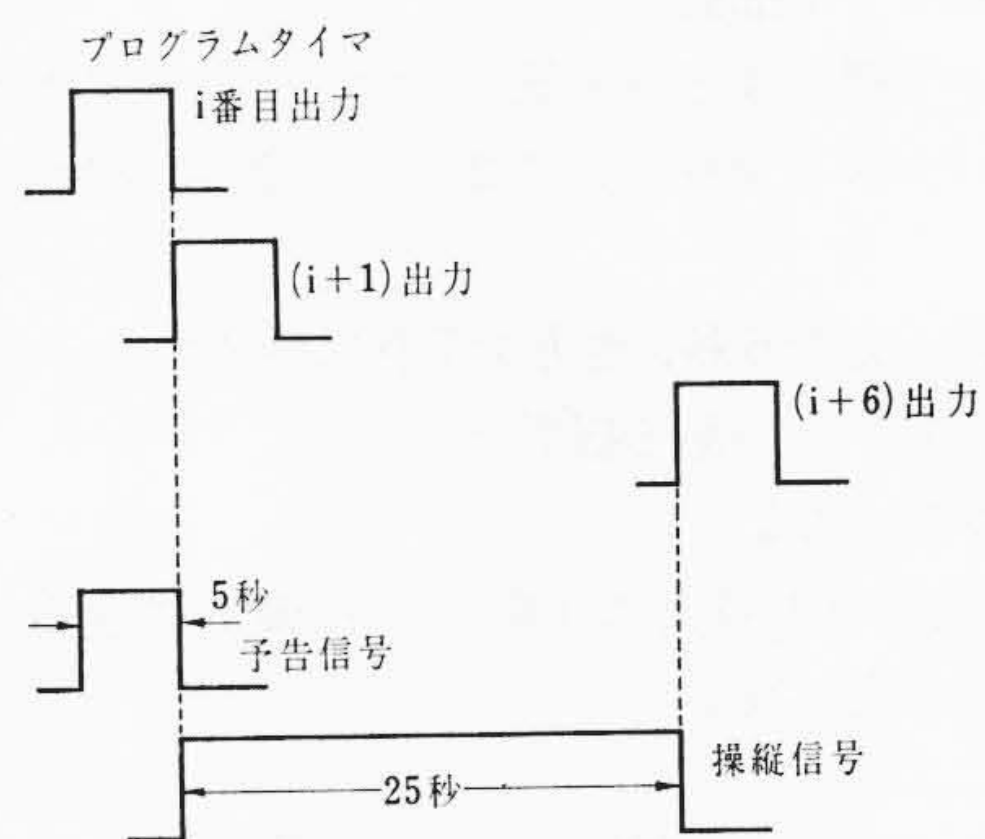
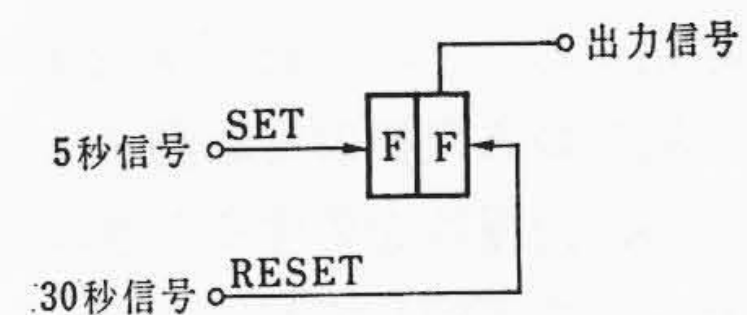


図 21 バックアップによる操縦切り換え

Fig. 21. Stick Switching by Back-up Controller

もち論であるが、重要個所には予備系統を用意し、現用系統と全く並列に動かして、緊急時に切り換えて使用できることが必要である。

ここに述べるバックアップ装置は、本システムの主要部であるデジタル計算機のタイミング発生機能に関する装置と、これに関連する若干の機器から構成されている。

バックアップ装置の中心は「プログラムタイマ」と称する時間軸発生器であって、5 秒ごとにパルスを出力する。時間的な出力の関係は図 20 に示すとおりである。

この装置で、時間幅を 5 秒とした理由は次のとおりである。

- (i) 操縦桿の切り換えは、元来、予告 5 秒を含めて 30 秒ごとに行なわれており、5 秒の整数倍である。
- (ii) アナログ表示を行なう計器類の信号は比較的ゆるやかに変化し、5 秒刻みでじゅうぶんである。

以上から最大時間は、フィルムシミュレーションの全時間をカバーするように 480 秒に定めてある。

出力端子数は同一時間に制御する対象が一つとは限らないため、最大 12 個同時に出力がとり出せるように考慮してある。

このようなプログラムタイマによる各種の制御は次のとおりである。

(a) 操縦桿の切り換え

プログラムタイマからパッチにより定めたタイミングと、フリップフロップを用いて図 21 のように、予告信号 (5 秒) と操縦信号 (25 秒) を作る。このような組をコックピットの数だけ用意して、デジタル計算機と並列に動作させる。

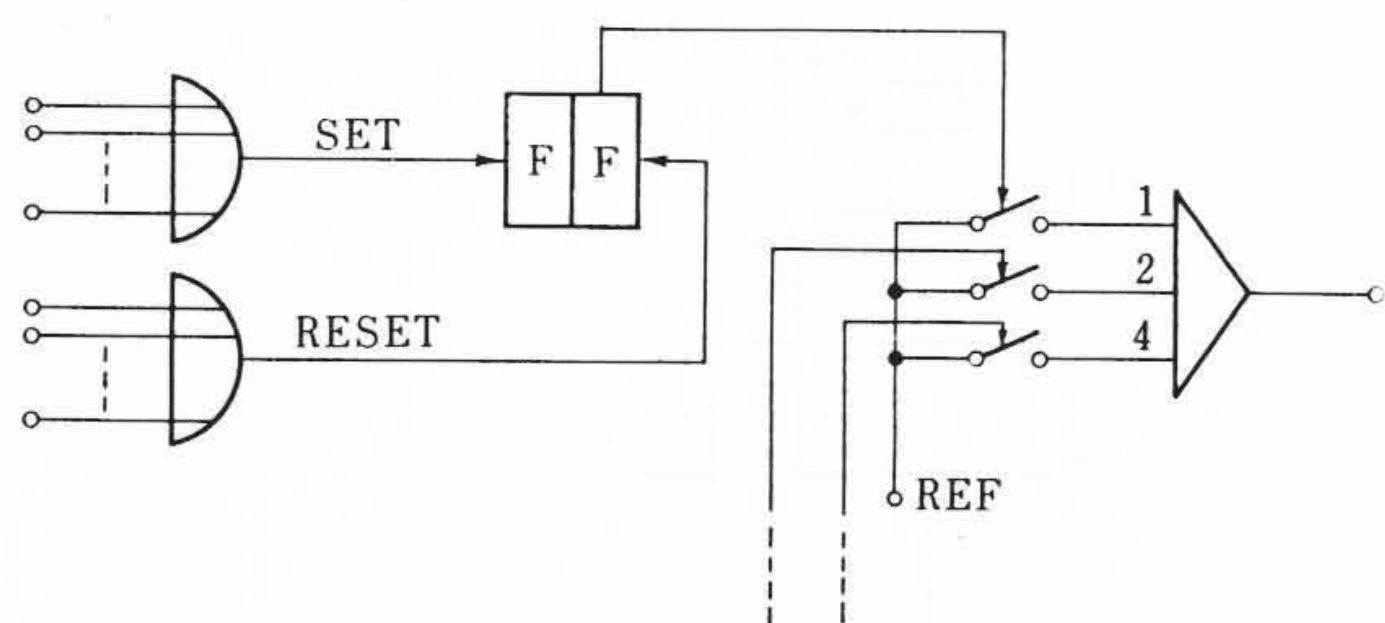


図 22 バックアップによる計器制御

Fig. 22. Meter Drive by Back-up Controller

(b) 計器類の制御

予備に切り換えたときの計器制御に対しては、計算機の場合に比べて多少簡略化することにした。すなわち、図 22 のように 3 ビットを用いて簡易 D/A 変換器を駆動するものである。図は片極性の場合であるが、両極性を要するときは、符号に 1 ビットを取り、残りの 2 ビットを変換して利用する。

(c) コックピット揺動

コックピット揺動は予備系統の場合、プログラムタイマとは無関係に、モータタイマを用いて 2 個の可動点を独立に制御している。

すなわち、一方を 6 秒、他方を 7 秒に定めてあるため、42 秒を周期とする、ビートのある揺動となる。

(d) ランプ類の制御

図 21 の操縦桿切り換えに同期して制御ができるため、特別の系統は用意されていない。

6. 結 言

万国博用トラベルシミュレータについて概説した。

トラベルシミュレータの構想は本計画のトータルプランナである東中プロダクション高橋克雄氏の提案になるもので、われわれはその提案の技術的検討を行ない実現にこぎつけたものである。完成し

た閉回路テレビ方式によるビジュアルディスプレイシステムはわが国で最初の大規模なカラー方式のものである。しかし、一方では目的が万国博の展示であるために、本来の訓練用シミュレータとは違った特殊条件を考慮に入れなければならず、純技術的問題としてのみ処理できないところに苦勞もあった。技術進歩のはげしい今日、技術を大衆に認識してもらおうということは重要なことであり、技術、特に総合技術の展示に関する要請は今後ますます強まってくると考えられる。今回のトラベルシミュレータも、そのような観点から、果たして観客から予期していたとおりの評価を受けているのかどうか、じゅうぶんな追跡が必要であろう。

終わりに本計画を進めるにあたり絶えず有益なご討議をいただいた日立製作所万博臨時本部およびシミュレータ分科会のかたがたに厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 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 Vol. 21, No. 3
- (2) 後藤達生: 3 相誘導電動機の Impulsive Drive 昭 40 自動制御連合講演会 219
- (3) 後藤達生, 松戸与亮: 誘導電動機の Impulsive Drive 法の分類 第 6 回 SICE 学術講演会 409
- (4) 福本智典, 小林恭一, 三浦武雄: VTOL シミュレータ, 昭和 42 年電気四学会連合大会
- (5) 伊藤安雄: 3P カメラの色再現と照明技法 放送技術 (昭 43-6~7)
- (6) 3 プランビコンカラーカメラ装置 日立評論 Vol. 51, No. 1, p. 67
- (7) 杉浦幸雄, 竜岡静夫: 最近のズームレンズの諸特性 NHK 技研月報 (昭 42-7)
- (8) Rudolf Kingslake: Applied Optics and Optical Engineering. Vol. 3, p. 269~308, Academic Press (1965)
- (9) 映画技術便覧 p. 201, 映画技術協会 (1964)
- (10) テレビジョン学会: テレビジョン工学ハンドブック p. 40, 昭 36 (© 1959), オーム社
- (11) テレビジョン学会: テレビジョン工学ハンドブック p. 47, 昭 36 (© 1959), オーム社
- (12) 4 ビジコンカラーフィルムカメラ装置 日立評論 Vol. 50, No. 1, p. 75