テレビジョンカメラの操作の解析

NHK 技術本部 山 崎 昇
北 原 繁 義
NHK 制作技術局 小 林 庄 一

テレビカメラマンが操作しているテレビカメラが、どのような動きをしているかを、コンピューターによって解析し、その結果に基づいて人間による操作特性に近いリモートコントロールカメラを、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から開発を行なった。

1. ま え が き

テレビスタジオの中で、カメラマンがテレビカメラを操作し、視聴者に不自然さを感じさせないような、なめらかな画像の流れを作り出すためには、カメラマン自身の熟練度とともに、カメラのいろいろな可動部分の微妙

なファクターが大きな問題となる。

従来、これらカメラメカニズム系の設計には、経験に基づく表現、たとえば、ねばりとか手ごたえといった感覚的な尺度が、その大部分を占め、定量的なデータを欠いていた。実際の設計にあたっては、熟練カメラマンが操作した感じを唯一の手がかりとして、カットアンドト

図1 装置の概要

"Man-machine Characteristics of Television Camera" by Noboru Yamasaki and Shigeyoshi Kitahara (NHK Headquarters of Technical Administration & Construction, Tokyo) and Shoichi Kobayashi (NHK Engineering Operation Department, Tokyo)

ライに調整されてきた。

一方筆者らは、サーボ系を用いた機械力によるテレビカメラの遠隔操作、すなわちリモコンカメラシステムの設計を行ってきたが、リモコンカメラ装置では、人間による操作と類似したスムーズな特性および性能を生み出すことがはなはだ困難であった。従来、この種の特性および性能をつくり出す運動についての、人間と機械との関係を人間工学的に検討したデータが乏しく、一般的なカメラメカニズムと同様、経験に基づいて設計されてきた。

今回、ミニコンピューターを使ったリモコンカメラシステムを設計する機会を得たので、従来、定性的に扱われてきたカメラ操作のメカニズムをミニコンピューターにより分析し、カメラマンの操作の振幅が時間の2.4乗に比例するなどの得られた結果に基づいて、最終的には人間の操作に近い特性と性能をもった新しい自動カメラの開発を行った。

2. テレビカメラの操作と運動モデル

図1(a)(b)にテレビカメラマンがカメラ操作をする場合の概略と、今回その特性および性能に関するデータを収集するために用いた実験装置を示す。

テレビカメラマンに見られる種々の操作のうち、今回の実験では、両腕によるパンニング、チルトリングのカメラ操作、左手親指を使つてのズーム、右手でのフォーカスを定める各操作のみを対象とした。

ところで、情報のやりとりが神経系を通して行われる仕組みについては、まだ未知の領域を出ていないことが多いが、指、腕における力の読み込み、脳での記憶、演算機能、また、これらの制御動作、指、腕における力の送り出し等の情報処理についてはコンピューターの働きと似ている。

図2は、テレビカメラマンのカメラ操作を単純化したモデルである。情報の伝達は、手、指、腕等の部分にある運動器へ制御情報が送られ、筋肉を刺激し、筋肉が収縮して操作対象（環境）に働きかける。この働きかけが皮膚感覚、深部感覚等の感覚器から検出され、カメラに

図2 生体運動制御系概要¹⁾

図3 人の情報処理過程のモデル

伝えられる。また一方では、操作結果を視覚器から高次の情報として中枢神経にフィードバックし、そこで演算処理、すなわち判断が行われる。以上が主たる情報の流れである。

図3は、熟練したカメラマンがテレビカメラを操作する場合の情報処理過程を模したモデルである。これらの処理過程の中で、パン、チルト、ズーム、フォーカスの組合せで行われる“カメラ操作”において、各時刻に発生しているそれぞれの力のベクトルを制御する“運動パターン”を検討し、これに基づいて機械システムの設計を行なった。

“運動パターン”とは主に次の3項目である。

- (1) 時間に対するテレビカメラの動きの特性。
- (2) 被写体平面上の2点間を結ぶ直線に沿って動かすための操作。
- (3) 静止位置の精度を上げる方法。

3. 実験装置

図4は実験に用いたサーボ雲台を、一般にカメラマンが使用している普通の雲台と同程度までに操作性を向上させるための漸進化フローと、次の実験段階として、コ

図4 実験のフロー

ンピューターからの指令に基づいてサーボ雲台を動かし、人間の操作に近い動きをさせるプログラムの開発フローを示したものである。この装置は人間が操作したテレビカメラの姿勢位置を電気信号に変換し、その移動を逐次記憶させるとともに、必要に応じて再び記憶装置から送り出し、適当な演算処理を行って、目標に向ってのスムーズなレンズ、雲台の動きを作り出そうとするものである。

3.1 サーボ系

リモコンカメラの雲台およびレンズを制御するにあたっては、図5に示すように従来から用いられてきた位置制御サーボの制御側のポテンシオメーターのかわりにコンピューターを使用する。

3.2 AD および DA 変換器の必要ビット数

リモコンカメラを作るうえで特に重要なことは分解能である。サーボ系を含むシステム全体を設計する場合、分解能はAD、DA変換器およびコンピューターの性能および容量に大きく関係し、技術上、コスト上の制約か

らも最適な設計が望まれる。基本的には雲台およびレンズの被制御側の分解能を考慮して、その2倍以上の分解能をもつように制御側の分解能を設計すべきである。

3.3 サンプリングおよびホールド回路

サンプリングによって生じた側波帯を除去し、パルス列を連続信号へと変えるためにホールド回路が用いられる。各DAチャンネルに付随するレジスターがこれに相当する。サンプリングはマルチプレクサーによって行われる。コンピューターを介した大ループでフィードバックを行う場合は、プログラム制御によって遅れを生じる。フィードバックループは、人間の操作性に近い運動となるようにあらかじめ作ったプログラムによってサンプリング周期を制御することになる。すなわち、コンピューターのプログラムによってサンプリングの周期を変えていることと等価である。

この装置のステップ応答を図6に示す。装置の主な仕様を表1に示す。

5 冊 1 ホ の 系 統

図 6 リモコンカメラの各部の動き (A-D 変換後コンピュータからグラフィックディスプレイしたもの)

表 1 装置の主な仕様

リ モ コ ン 雲 台	レ ソ ズ	AD, DA 変換器 マルチプレクサー
動作範囲	動作範囲	AD変換器
パ ン ±175°	ズーム 18〜180mm	すべて13ビット+1 インビット
チルト ±30°	フォーカス 0.95〜∞mm	パ ン 15ビット
最高速度	全範囲 1.5sec 以内	チルト 12ビット
パ ン 30°/sec	” ”	ズーム 12ビット
チルト 20°/sec		フォーカス 12ビット
戻り位置精度	制御側分解能	マルチプレクサー
パ ン ±1/5°以内	ズーム テレビ画面	交換時間 108μs(min)
チルト ±1/5°以内	面の 0.5% 以内	
制御側分解能	フォーカス 前玉	安定時間 45μs
パ ン 0.6'	移動量の0.32%	
チルト 0.9'		

4. 実験結果

テレビカメラを操作する場合、人間と機械との接点であるビューファインダー（テレビモニター）、パン棒、ズームハンドコントロール、フォーカスノブ等は、人間工学的に使いやすいものでなければならないが、特にビューファインダーはレンズの倍率との関係においてカメラマンの操作性を左右する。

写真1 被写体

表 2 データの分類と用途

1 次 デ ー タ	2 次 デ ー タ	3 次 デ ー タ
時間に対する読み込み情報	1次データを操作し、2次データを誘導する。	人間の共通した曲線を得る。 CPU、機械系に適用するデータを得る。
$x=X(t)$ ……パンの偏位 $y=Y(t)$ ……チルトの偏位 $z=Z(t)$ ……ズームの偏位 $f=F(t)$ ……フォーカスの偏位	(1) 時間 t を消去して $y=g(x)$ なる被写体写鉛直面上の軌跡 (2) 標的に対する人間の誤差分布 (静止精度) (3) 時間関数より加速減速など力の加え方, 消費電力 (4) x, y, z, f の時間関数より多変数制御 (5) コントロール比 (control-display ratio, C/D ratio) ²⁾ (6) 被測定物を変えて最適設計の基礎資料 (7) サーボのハード特性	

まず人間の操作性を解析するために、熟練カメラマンにカメラを操作してもらい、その操作量に対応した電圧の時間関数をポテンシオメーター→AD変換→コンピューターの経路で読み込む(1次データ)。ついで、これらのデータをたとえばノルマライズする等、われわれに必要な様式に変形する(2次データ)。さらにこの2次データに基づいて検討した結果から、人間の特性に近似した動きをするプログラムを開発し、このプログラムにそってリモコンカメラを動かしてみるという手順で実験を開始する。表2に主なデータの分類と用途を示す。

4.1 1次データ

1次データを得るために次の実験を行った。写真1に示す適当な鉛直面上の被写体の各スタート点に供試カメラを向けて、そこから中心の標的に向かってカメラを移動し、そのときの変位に対応したポテンシオメーターの電圧をコンピューターに一定周期で順次読込ませた。当実験では、テレタイプ上に直接データに必要な統計処理をほどこし形で変位量と時間の関係を記録した。

4.2 被写体面上の軌跡曲線について

1次データ $y=Y(t)$, $x=X(t)$ から時間を消去することによって求める軌跡曲線 $y=g(x)$ を誘導することができる。操作性の人間工学的な研究はイギリスのラブレス(N. E. Loveless) によって行われている²⁾。本来、雲台を含む支持台はカメラヘッドを所定の高さに固定することを目的としたものであり、カメラ操作を束縛するものであってはならない。したがって“力を加えた方向に適度な加速度を生ずる”ものが最も良いとされている。

実際にビューファインダーをのぞきなが

図 7 被写体面上の軌跡 (被写体平面の対応する点の角度を A→D 変換装置によりデジタル信号とし、10 進数で表示した図)

図 8 ズームを変えた場合の直線追従性 (斜パン)

図 9 方向による静止精度誤差平均 (ズーム: 焦点距離 85mm)

図 10 ズームを変えた場合の静止精度

項 目	静 止 誤 差	備 考
パ ン	0.29°	偏 差
チ ル ト	0.38°	偏 差
ズ ー ム	12%	画角寸法の偏差
フ ェ ー カ ス	11.25cm	被写体面焦点偏差

平面上のズーム操作による誤差平均 被写体までの距離: 3500 mm		
項 目	静 止 誤 差	備 考
ズ ー ム	7%	画角寸法の偏差

図 11 実行のある被写体間のパン、チルト、ズーム、フォーカス操作の誤差平均

ら、被写体平面上の2点間を直線的に斜パンした場合の実験を行ったが、数人のカメラマンによるその追従性のデータを図7に示す。軌跡はカメラマンによりそれぞれ若干異なっているが、直線からの最大平均偏差はレンズの倍率に關係しており、倍率が大きいほど直線に近づく。また今回の実験では、2点間の距離の大小との相関は認められなかった(図8)。

4.3 静止精度

1つの鉛直面上にある標的に向かって、その面上のいろいろな角度からカメラを移動させ、停止した点が標的からどの程度の誤差(偏差)にあるかを測定した(図9)。これはレンズの倍率によってそれぞれ異なり、ナロー(narrow)にすると静止精度が上がる。リモコンカメラの場合は、レンズの倍率と無關係に一定の精度を保ちうる。この点が人間とリモコンカメラとの違いといえよう。しかし、人間の場合、倍率があまり高くなりすぎて、標的が完全にカメラヘッドのビューファインダーの視野から飛び出してしまう場合は、静止精度が悪くなっている。最終的には、テレビ画面上に現われる誤差は視野との比率で考えるべきである(図10)。

4.4 多変数制御

人間が多変数の項目を同時に操作する場合、端末としての指、腕、手のひら、目、耳等を同時に働かせることは、かなり困難である。多変数を制御するときは、シーケンスに制御を行うことが確実であり、かつ操作もしやすい。たとえば、図11

図 12 操作の時間特性 $f(t)$

に示すような奥行きがあって、しかも画面寸法の異なる鉛直面上の2つの被写体を考え、これを往復して撮るようなカメラ操作をした場合を実験した。

カメラマンはカメラを操作するにあたって、両手を使用しなければならない。すなわち雲台の操作（パン、チルト操作）に左手と左腕、またさらにレンズズームのハンドコントロール操作のために左手の親指を使用する。一方、右手は5本の指でフォーカスノブを回転操作させている。カメラ操作の変数はパン、チルト、ズーム、フォーカスの4つのベクトルと考えられる。この考えに基づいて行った実験結果を図12に示す。

この結果から見ると操作は、パン、チルトの運動開始について、約 500 ms 後にズーム、さらに約 500 ms 遅れてフォーカスの操作をそれぞれ開始している。一方、操作の停止点についても同様に、これらの動作がおのの別々に行われている。また特にフォーカスについては、被写体の前にピントがあるか、後にピントがあるかを、試行錯誤的に求め、最終的にピントを合わせるまでに約 500 ms 程度の判断期間が存在する。

このフォーカスノブの回転方向とビューファインダーに現われる焦点移動の方向との間には、コントロールの回転方向が問題として残っている。すなわち、焦点移動の方向とノブの回転方向との対応がとり難いということである。これはまた、ズームの場合にも同様のことがい

図 13 慣性率の大きさがパン操作に及ぼす影響

える。

4.5 コントロール比

人が直接被写体を見ながら操作する場合と、レンズの焦点距離（ズーム）を変えてビューファインダーを通して見た場合との違いが操作性にどのような影響を与えるかという問題がある。すなわち、ビューファインダーを通してカメラの移動を知覚するため、ビューファインダー視野内における被写体の移動と、腕を通じての雲台操作との関係が最適であることが望ましい。しかしながら、実際にはレンズ系とビューファインダーに起因する倍率の影響を避けることができないため、これまでの実験結果には、この知覚との差が含まれている。

4.6 カメラの機械的要素の影響

人間の体型や力等は各人さほど差がないと見てよく、人間工学的には最も操作が容易な対象物の大きさ、重量、慣性率等の物理量が存在するはずである。

カメラの機械的要素のうち、慣性率がカメラ操作に与える影響を実験により求めた。カメラヘッドおよびレンズの慣性率と静止精度との相関については、パンの速さが速いほど顕著に現われる。また慣性率が大きいほど静止誤差が増大する傾向にある（図13）。

4.7 カメラ操作における運動距離と時間の関数

熟練したカメラマンがパン、チルト、フォーカスをおのの移動させた場合、その移動距離と時間との関数の例を図12に示した。またそれぞれのファクターを正規化して比較したものを図14(a)(b)(c)(d)に示す。カメラの移動が比較的小さいので、測定は移動可能範囲の7%にとどめた。

操作の時間，操作の振幅に関係ない
 はほぼ同一の特性曲線に収束する曲線
 を得た

図14 (a) パンのみにおける時間関数の平均

図14 (c) 斜パンにおける垂直成分（チルト方向）の時間関数

ここで得られた曲線を調べてみると，興味深いことに途中は直線で，始動・停止時期は時間の2.4乗曲線を描いていることがわかる．ほぼ2乗であれば2回の微分値から得られる加速度（または角加速度）は一定となり，等加速度的なオン・オフ操作を行っていることを意味するが，人間の始動特性および静止特性は，この曲線からわかるように操作振幅と関係なく，ほぼ2.4乗曲線となっている．

図 14 (b) 斜パンにおける水平成分（パン方向）の時間関数

図 14 (d) ゆっくりパンした場合の正規化操作曲線

5. コンピュータによるカメラのリモートコントロール

従来のリモートコントロールカメラは，パン，チルト，ズーム，フォーカスの組合せによる複雑な動作を思うまま再現することができず，それ故に任意の連続的動画面を放送に送り出すことが困難であった．これを実験させるために，今回の実験で知り得たカメラマンの操作特性でコンピュータから雲台およびレンズのサーボ系に指令を行うプログラムを開発した．コンピュータに

図 15 パン、チルト成分ベクトル区分図

図 16 プログラムフローチャート

はミニコンピュータ MACC 7/F、メモリー容量 16 k (ワード) のものを用いた。

リモコン雲台およびレンズの動きを人間の特性に近づける方法は、2章で検討した各運動パターンを CPU から発生する方法を応用した。カメラ雲台は、増分ベクトルをコンピュータから送り出し、DA 変換器を介して雲台およびレンズのサーボに加えることによって目標に向かせる。

雲台の動作はパン、チルトを組合わせた 2 次元運動であ

表 3 差ビット数と出力インターバル

差のビット	384 ビット	192 ビット	96 ビット	48 ビット	24 ビット	12 ビット
時間	10ms	20ms	30ms	50ms	90ms	170ms
						ストップ

るため、あらかじめ図 15 のような単位増分ベクトルを定めておき、目標値と現在値との差に応じてコンピューターから増分ベクトル出力を送り出す時間間隔をコントロールすることによって、2.4 乗曲線に近づけて行く。また現在値と目標値との差に対応する 1 増分ごとの時間は表 3 のとおりである。簡略化するために差ビットはパン、チルトのうち大きな方とした。なお、レンズのサーボ系のうちズームに関しては、一定速度で目標値に向うように制御しており、またフォーカスについて全体の制御を始める初期段階で目標値の送り出しを一度に与え、あとはサーボ系の固有速度にゆだねているが、プログラムによって制御することも可能である。

以上のフローチャートを図 16 に、またこのプログラ

(a) パン (垂直振幅 0.5 V/cm, 水平振幅 250 ms/cm)

(b) チルト (垂直振幅 0.5 V/cm, 水平振幅 250 ms/cm)

この場合は、パン、チルトともスタート時は急速に加速し、停止時に 2.4 乗に近い特性で停止させている。

写真 2 開発したプログラムによる制御信号のパン、チルト成分とフィードバック信号 (階段状の波形: パン、チルトそれぞれの制御信号, 曲線: パン、チルトそれぞれのフィードバック信号)

ムによってコントロールされたカメラ雲台の軌道のパン・チルト成分の時間関数を写真2に示す。

6. む す び

以上、カメラのレンズを通して被写体を追うテレビカメラマンの動作を、カメラ雲台およびレンズ可動部分にとりつけた位置信号検出器によって分析し、目標物に向かって始動から停止にいたる時間と距離の関数が、始動および停止の近くで2.4乗曲線に近似でき、かつその中間では直線をなしていることがわかった。しかも、この特性は目標物までの距離の大小や操作マンの個性にかわりなく、ほぼ一定であることがわかった。

この結果に基づいて、コンピューターと結合したカメラ雲台とレンズのリモートコントロール装置を設計し、

テレビ受像機画面上で特に不自然さを感じさせないような、人間の特性に充分近似した動きを再現することに成功した。この方式をさらに発展させ、いろいろな特殊効果、たとえばモンタージュ操作とカメラ画面との任意な連系動作とか、あるいは人間の行けない場所での撮影等に使用できることと、さらに加えて、人間工学面での諸研究の測定器として充分使用に耐えるものと思われる。

今回の実験開発にあたって協力を得たNHK制作技術局の皆様へ深謝する。

(昭和48年5月16日受付、昭和48年9月29日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 市川冽：運動の制御機構，信学誌，55，11（1965）
- 2) 人間工学ハンドブック，金原出版

テレビジョン学会雑誌投稿規定 (昭和49年2月13日一部改定)

1. 投稿者は原則として本学会会員にかぎる。
2. 本学会所定の原稿用紙に、別に定める「テレビジョン学会雑誌執筆のしおり」に従って執筆し、正副2部提出する。ただし、副はコピーでも差支えない。原稿用紙および執筆のしおりは申込みにより送付する。
3. 投稿欄は論文、資料、これすばんでんすの各欄とする。論文、資料欄の長さは原則として刷上がり6ページ以内(表題、図・表、文献等を含む)、これすばんでんす欄は2ページ以内とする。1ページは375字詰本会原稿用紙で約6枚。投稿の際はページ数厳守のこと。ページ数が超過している場合は原則として返戻する。

なお、各欄の内容はつぎのとおりとする。

論文：テレビジョン技術および画像エレクトロニクスに関係のある独創的な研究結果の報告。

資料：独創的な研究でなくても、新しい結果であって、テレビジョン技術および画像エレクトロニクスに関連して会員の参考となるようなデータ、設計資料、施設計画資料、試験報告等をまとめたもの。

これすばんでんす：読者の自由投稿のページであり、研究がまだ論文の形としてまとまっていないが、新しい着想を公表し、優先性を主張

するために速報するもの。新しい生産技術、現業技術を紹介するもの。あるいは既発表論文への討論や学会に対する建設的意見を発表するもの。

4. 投稿の内容はなるべく本会員多数のために理解しやすく、かつ未公表のものにかぎる。他の著作権を侵した場合は投稿者の責任とする。

5. 投稿原稿は本会編集委員会で査読し、不適当と認めたものは掲載しない。この場合、原稿は投稿者に返送する。また、編集委員会が原稿の一部訂正を適当と認めたときは、そのむね投稿者に通知し、訂正のうえ掲載する。

6. 図面トレースの作成は投稿者の負担とする。

7. 掲載された投稿について別刷を希望する場合は、別に定める料金により作成する(例：6ページ50部で15,400円、100部で16,900円)。投稿の際、希望部数を申出ること。ただし、別刷の作成は50部以上とする。

8. 原稿用紙、執筆のしおりの申込み、原稿の送付先

〒105 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内
社団法人 テレビジョン学会
TEL 東京 03-432-4678