

CRT による Grating Pattern の呈示法について

行 場 次 朗

1. はじめに

最近の視覚研究を眺めると、視覚刺激として縞パターン (grating と呼ぶ)、特に正弦波縞 (sinusoidal grating) が広く導入されている。まず、その理由から考察しよう。

視覚研究では、我々が日常、知覚している世界をそのまま刺激として用いる訳にはゆかない。そこには種々雑多の刺激が再現性の保証もなく入り込み、ある特定の反応が引き起こされたとしても、それが一体、どの刺激と対応するものなのか、見当がつかないからである。そこで例えば暗室中で光点を観察するといったように、刺激条件の還元を計ることになる。ところが、今、刺激条件を光点の形と光の強度という次元に還元できたとしても、今度はそれらの次元の中で刺激の変化が無限 (ad infinitum) となり、例えば光点の明るさ判断を研究するとしても、我々は決してすべての刺激条件に対する明るさ判断のデータを得ることはできない (Cornsweet, 1970)。これを抜け出すには、節約の法則に則り、ある少数の条件についての測定値から他のすべての条件に対する反応が予測できるといった方法を見つけ出す必要がある。

線形システム分析法 (linear system analysis) はこれを強力に実現するもので、主に通信工学の分野で利用されてきたが、1950年代後半より視覚系への適用も積極的に行われるようになった。その概要を図1に示す。今、分析対象をブラックボックス化して1つのシステムとみなし、その入出力関係に注目する。このシステムに一定の周波数をもつサイン波信号を入力して出力を測定する。この時の出力/入力を算出して利得 (gain) とし、これを縦軸に、入力周波数を横軸にとってプロットして周波数応答曲線を求める。この曲線は時に伝達関数 (transfer function) と呼ばれ、これが得られるとすべての入力信号に対するシステムの動作 (behavior) が予測できることになる (この意味で、伝達関数を求める作業をシステムの同定問題という)。というのは、フーリエ解析 (Fourier analysis) の導入によってどのような波形をもつ信号²⁾ もサイン波の集合によって記述できるからである³⁾。この集合を入力スペクトラム⁴⁾ で表現し、これに先に求めた伝達関数を掛け合せて出力スペクトラムを算出する。この出力スペクトラムで表現されたサイン波成分を今度は

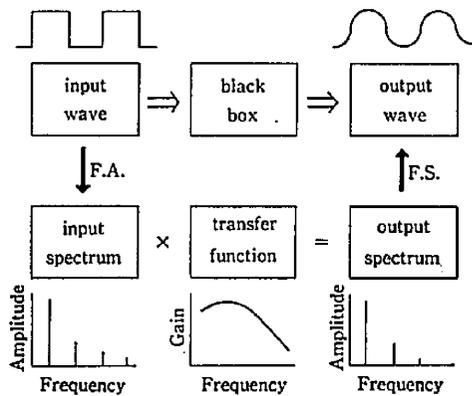


図1 線形システム分析法 (linear system analysis) の概要。F. A. = Fourier analysis; F. S. = Fourier synthesis. Georgeson (1979) のものを修正して引用。

フーリエは合成 (Fourier synthesis) と呼ばれる手続きでもって加算し合い、1つの信号を合成すると、これが出力の予測となる訳である。

この線形システム分析法の適用を可能にすることが、視覚刺激に正弦波縞を使うことの最大の理由であろう。つまり、この手法からすれば、最も単純な空間刺激はサイン波状の輝度分布をもつ縞パターンであり⁵⁾、この刺激に対する応答から、どんな複雑な空間パターンの刺激に対する反応でも予想できる可能性が生ずる⁶⁾。現に様々な方法で人間の視覚系の空間視に関する伝達関数は求められており、この関数からマッハ効果、明るさ対比などの諸現象がエレガントに予測できることがわかっている (Cornsweet, 1970)。

次にこれと関連したことであるが、我々が使用する空間刺激は数量的にきちんと定義できないものが大部分であり、これがパターン認知研究の困難性の一因となっている (大山, 1970)。正弦波縞の場合、空間周波数、コントラスト、平均輝度の3つのパラメータで一義的に定義でき、しかも後に述べるように、これらのパラメータは独立に、しかも容易に制御できる。よって正弦波縞は非常に操作性のすぐれた空間刺激であるといえよう。

また、ある一定の空間周波数や方向を持つ正弦波縞に選択的に応答する視覚神経群がネコやサルにおいて発見されており (Enroth-Cugell and Robson, 1966; Campbell et al., 1969)、しかもその生理学的基礎はかなり解明されてきた (Maffei, 1978)。それゆえ、正弦波縞を刺激とすれば、これら生理学的研究との対件 (correlates) が容易にとれることも大きな利点であろう。

視覚系の空間周波数処理機構に関する精神物理学的研究にもかなりの進展があり、すでにより概説もいくつかみられる (Cornsweet, 1970; Georgeson, 1979; Braddick et al., 1979; 市原, 1979)。そこで本稿では縞パターンを呈示する方法の技術的問題の解説を行うことにする。

2. 装置の基本構成

正弦波縞を呈示する方法で最もよく使われるのは、陰極線管 (cathode ray tube, 略して CRT) を利用する電気的手法で⁷⁾、Shade (1956) や Campbell and Green (1965) らによって考察されたものである。装置の基本構成を図2に示す。

CRT に3つの発振器からの入力が必要である。まず、Y軸入力には100kHz程度の高周波の三角波で、これによりCRT管面上をスポット (輝点) が高速走査する。次に、X軸に100Hz程度の鋸歯状波を入力すると管面が一様に光るラスタ (raster) が得られる。但し、鋸歯状波で極性が急激に反転する区間は帰線期間と呼ばれ、スポットがすみやかに管面のはしからはしに戻る期間であり、この間はブランキング (blanking, 帰線消去) を行う必要がある。さらにX軸入力の周波数は人間の眼の CFF (臨界融合頻度) より高くなければならない。そうでないとラスタがちらついて見える。また、Y軸入力の周波数をX軸入力の周波数で割った値は走査線の本数をあらわし、走査線が知覚されることのないよう視覚系の空間分解能を越えてい

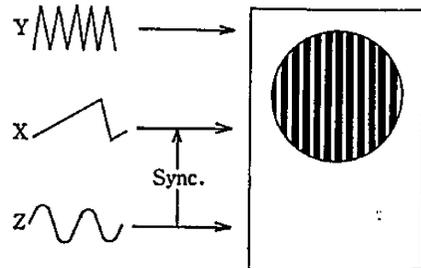


図2 装置の基本構成

ることが必要である。さて、Z軸に 1 kHz 程度のサイン波を入れ、スポットに輝度変調をかけると、管面に正弦波縞が現われる。但し、Z軸とX軸の間に同期 (synchronization) がとれていないと縞は静止せず、時に流れ出してしまふ。また、Z軸入力周波数をX軸入力周波数で除した値は、管面上何本の縞が現われるかを決定する。

実際の装置構成では、CRTにはオシロスコープを用い、X軸発振器にはオシロ内蔵のスイープジェネレータ (掃引波発振器) を利用するとよい。Z軸発振器からオシロのZ軸入力端子に入る信号を分岐して外部トリガ端子に接続し、掃引を外部トリガモードにしてやると、Z軸とX軸の同期が簡単にとれ、しかもブランキングは自動的に行ってくれる。また、Z軸発振器には後に述べるような VCF (周波数変調) の機能をもったファンクションジェネレータが望まれるが、コストを低くおさえるためには、波形発生 IC 8038 を使ったキットなどを利用することもできよう。Y軸発振器についても同様である。

3. 注意事項

a. 残光特性について

CRTの発光特性は蛍光体材料 (通常P番号で示す) に大きく依存し、材料によって発光効率や色が異なる。視覚実験で特に問題となるのは残光特性で、電子ビーム除去後のスポットの残光時間が長いと刺激呈示時間の制御が不正確になったり、運動刺激を呈示すると画像の尾引きが生ずることになる。縞ボタンを呈示する場合によく使われる蛍光体は P31 (緑), P4 (白) で、ビーム除去後、初期値の10%まで明るさが減衰するまでの時間は、それぞれ $40\mu\text{sec}$, $20\sim 60\mu\text{sec}$ と短い (小林, 1978)。但し、減衰曲線はベキ関数形をとり、10%を過ぎてからの残光時間は長くなり、P31の場合は超残光がある (大石, 1972)。オシロスコープの機種によって CRT の蛍光体材料が異なるから注意を要する。

b. 描画速度と明るさの関係について

縞ボタンにかぎらず、CRT上で画像を描くときスポットは移動するが、その移動速度によって目に感ずる明るさが異なることに注意しなければならない。これも蛍光体の特性によって異なるが、多くの蛍光体材料でスポットの輝度は描画速度 V に対し、ほぼ V^{-2} に比例して減衰するベキ関数に近い形をとるようだ (小林, 1978)。このため、刺激画像の明るさを一定に保つため、スポットの描画速度を常に一定にしておく必要がある。縞ボタンの場合に特に問題となるのは画角の調整で、Y軸やX軸入力の振幅を変えると縦・横の画角は容易に調整できるが、この時、縞の平均輝度も変わってしまう。X軸、Y軸入力の振幅、周波数は一定にしておかなければならない。

c. X軸のトリガレートについて

基本構成のところで述べたように、X軸とZ軸の同期をとるため、Z軸入力より外部トリガをかけてX軸スイープジェネレータを駆動する。この時、Z軸入力の周波数は、X軸鋸歯状波の自走時周波数の整数倍であることが望ましい。というのは、Z軸からのトリガパルスの周期とX軸鋸歯状波の周期が整数倍関係からずれると、トリガレートがさがってスポットの掃引回数が減り、結果として縞の平均輝度レベルがさがってしまうからである。特にZ軸入力の周波数が低い場合 (X軸自走時周波数が 100Hz のとき Z軸 1000Hz 以下) にこの現象がひどく、平均輝度が40%近くもさがってしまうことがある。

d. 輝度変調の直線性について

通常のオシロスコープのZ軸入力では、入力電圧の制限と帯域、及びプラスの電圧で暗くなり、マイナスの電圧で明るくなるといった類いのことしか規格表に記載されていない。入力電圧と輝度変調の直線性については、それぞれの入力条件下で各自、測定してみる必要がある。

図3は、Y軸 100kHz, X軸 100Hz, それぞれ振幅一定にして管面上に矩形波の太い縞を呈示し、その明暗部分の明るさを輝度計で測定してZ軸入力電圧との関係のみたものである。使用CRTはTEKTRONIX 624 (P31)のもの。輝度変調の直線性は入力電圧がアースレベルから離れるにしたがって悪くなった。コントラスト閾を測定する場合のように、コントラストのかなり低い縞を呈示する時は、入力電圧の振幅が小さいのでこのような非直線性は問題となら

ないが、高いコントラストの縞を呈示する時には入力信号にサイン波を入れても正弦波縞とならずに歪んでしまい、周波数スペクトラム成分は単一なものにはならない。

輝度変調の非直線性を補正するには、Z軸信号をCRTに入力する前に非線形アンプを噛まして非直線性を相殺する⁸⁾。実際には図4左に示すようなダイオード・クランプによる折線近似回路を用いるとよい(横井, 1979)。R_{B0}~R_{B2}はクランプ開始のポイント、R_{A0}~R_{A2}は各折線区間内でのゲインを設定する。マイナス側の抵抗についても同様で、この回路は非直線的な入出力特性を4つの折線で近似する。抵抗を半固定にして調整することにより、図3の関数を相殺する形に入出力特性を設定すると(図4右)、広い範囲で輝度変調の直線性が保証される。

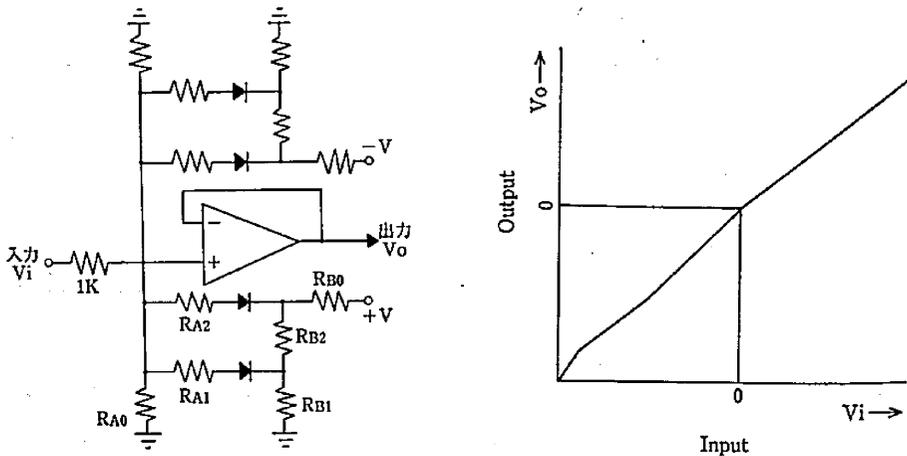


図4 折線近似回路によるガンマ補正
オペアンプは LF356を使用。

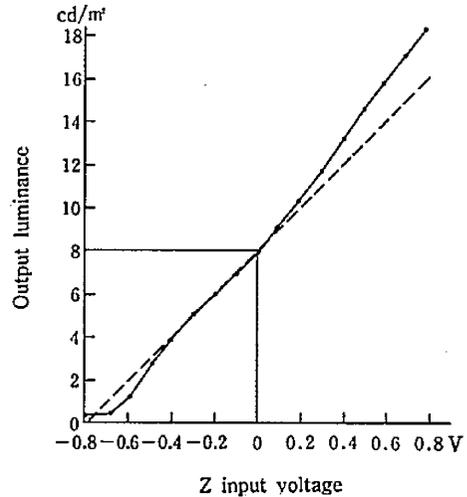


図3 Z軸入力電圧と出力輝度との関係
CRT(P31)にY軸 100KHz 三角波, X
軸 100Hz 鋸歯状波を入力し, 平均輝度を
8.0cd/m² に設定して測定したもの。

e. CRT 自体の MTF について

CRT 上に呈示した縞を刺激として視覚系の MTF⁹⁾を求めるとき、CRT 自体の MTF も考慮に入れなければならない。特に管面上にかなり細かい縞を呈示する場合には、設定したコントラストよりも低い値の縞が出る可能性がある。Campbell and Green (1965) は、フォトセルに細いスリットをつけて CRT の MTF を測定している (図 5)。これをみると 45 c/deg (57 inch の距離で測定しているから、管面上 17.7 c/cm) まではフラットな特性を示し、この範囲で視覚系の MTF を測れば問題はない。

CRT の MTF はその分解能に依存するものであるが、仕様書にはスポットサイズぐらいいし記載されていない。最近、Morgan and Watt (1982) は、このスポットサイズから MTF を概算する以下のような式を提供している。

$MTF = \exp(-3.55d^2f^2)$ d : スポットサイズ
高分解能をもつオシロスコープでもスポットサイズは 0.2mm 程度であり、上式からすると管面上 10 c/cm を超えると MTF は減衰しはじめる。

スポットサイズは管面の中央からはずれるほど大きくなり¹⁰⁾、また密度の高いラスタが得られるとはかぎらないから、実際は上式で見積った値より低めにおさえておいた方が無難であろう。限界を超す場合には、観察距離を長くとることにより縞の空間周波数をあげるほかない。

4. 運動縞を呈示する方法について

運動方向に選択的応答を示す視覚神経が発見されており、運動視のメカニズムの解明及び空間周波数処理チャンネルとの関連など盛んに研究がなされている (概説的なものとして Sekuler et al., 1978)。これらの研究では、よく運動縞が刺激として用いられる。

運動縞を呈示する最も簡単な方法はフリーランニング法と言われるもので、装置の基本構成を示した図 2 で、X軸とZ軸の同期をはずしてやればよい。具体的には、オシロの掃引モードを外部トリガモード (NORM) から自動モード (AUTO) に切り換える。X軸入力力とZ軸入力力の周波数数関係が整数倍からわずかに離れるに従って縞はゆっくりと動き出す。この方法の欠点は運動縞の速さが安定しないことにある。というのは、今、X軸が 100Hz で掃引して

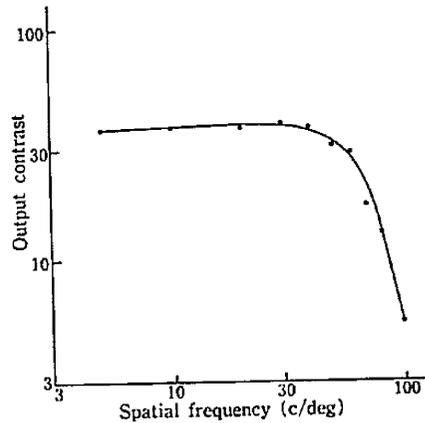


図 5 CRT の MTF
Campbell and Green (1965) による。空間周波数は管面から 57 インチの距離で算出したもの。

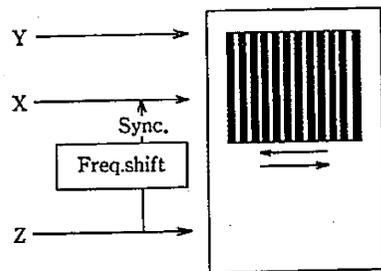


図 6 運動縞を呈示する装置の基本構成
Rogers (1976) による。

おり、Z軸発振器を 1001 Hz にしたとすると、管面上10本の縞が1秒間に1本の割合いで左に運く。ところが発振器の精度上、周波数を 1001 Hz に設定したとしても、時間がたつにつれすぐ 1000 Hz とか 1002 Hz に変動する。そうすると縞は静止しかけたり、2c/sec の速さで動いたりするのである。水晶発振子を使った発振器を用いるのもよいが、今度はX軸スイープジェネレータの発振周波数が安定しているとはかぎらない。

これを解決する方法として Rogers (1976) は図 6 に示す装置構成を考えた。Z軸から直接X軸に同期をかけるのではなく、frequency shifter (周波数変換器) を使って、Z軸周波数が増減しようとも、常にそれに一定の値を加算した周波数をもつ信号を作り、この信号でX軸にトリガをかけるのである。Frequency shifter は $\sin(A+B) = \cos A \sin B + \sin A \cos B$ の公式を図 7 に示すように 2 つのマルチプライヤーとオペアンプを使って電氣的に実現する

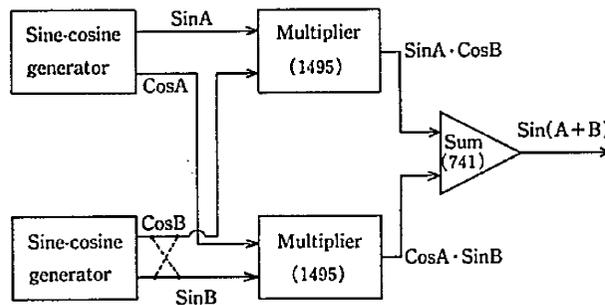


図 7 Rogers (1976) の frequency shifter のブロック・ダイアグラム

ものである。Rogers が紹介している回路図をもとにこれを試作してみたところ、マルチプライヤーのトリミングやアナログ加算器のバランスの調整はむずかしいが、十分に実用的であり、この出力でX軸にトリガをかけると縞は極めて安定した動きを示す。また図 7 に示すように、マルチプライヤーに入る Cos B と Sin B の信号を入れかえてやれば周波数減算となり、縞は反対方向に同じ速さで動くことになる。ただ、この装置構成では周波数変換用として発振器がもう一台いることになり、しかもサイン波とコサイン波の両出力をもつ発振器がなかなか見当らず、価格も高い。

その後、Brown (1977) はデジタル IC で構成した frequency shifter を発表している。但し、彼の装置の回路図を取り寄せてみると結線がかなり複雑であったり、クロックパルスやドリフトパルスなどの別入力があることから、実作はしていない。

行場・桜井は、この frequency shifter の機能をワンボードマイクロコンピュータでソフト的に実現することを考えた。使用マイコンは安価な TK85 で、プログラムは 8080 系の機械語で書かれている。基本プログラムを図 8 に示した。まず、ペアレジスタ DE には 16 進数で 04C0H (トリガレートを設定するもので、ある範囲内で任意) を、HL レジスタには 04C1H を初期値としてロードしておく。次にループを回してこれらのレジスタの内容を 1 つずつデクレメントしてゆき、DE レジスタが空になればトリガパルス発生ルーチンに、HL が空になればゲートパルス発生ルーチンにジャンプする。トリガパルス、ゲートパルス発生ルーチンでは、それぞれ 8255C ポートの 1 ビット目と 2 ビット目にパルスを出力するようになってお

アドレス	機械語	ラベル	ニューモニック
8010	11C004		LXI D,04C0H
8013	21C104		LXI H,04C1H
8016	1B	START1	DCX D
8017	7B		MOV A,E
8018	B2		ORA D
8019	CA2580		JZ TRIG
801C	2B	START2	DCX H
801D	7D		MOV A,L
801E	B4		ORA H
801F	CA3780		JZ GATE
8022	C31680		JP START1
8025	3E01	TRIG	MVI A,01H
8027	D3FA		OUT 0FAH
8029	00		NOP
802A	00		NOP
802B	00		NOP
802C	00		NOP
802D	3E00		MVI A,00H
802F	D3FA		OUT 0FAH
8031	11C004		LXI D,04C0H
8034	C31C80		JP START2
8037	3E02	GATE	MVI A,02H
8039	D3FA		OUT 0FAH
803B	00		NOP
803C	00		NOP
803D	00		NOP
803E	00		NOP
803F	3E00		MVI A,00H
8041	D3FA		OUT 0FAH
8043	21C104		LXI H,04C1H
8046	C31680		JP START1

図8 運動縞を発生させる基本プログラム

り、間に入っている NOP 命令はパルス幅を決めるものである。パルス発生後、DE, HLの各レジスタに初期値と同じ値を入れてスタートに戻るといふプログラムになっている。トリガパルスをオシロの外部トリガ端子に、ゲートパルスをインバータを介してZ軸ファンクションジェネレータに入れ、ゲート機能を働かせれば、ゲートパルスが入っている時だけ一定の周期の波形に整数個発振し、結果として安定した運動縞が発生する。HLレジスタにDEレジスタより少ない値04BFHを入れれば運動方向は逆になり、04C2H, 04C3Hと増加させてゆくと運動縞の速さは段階的に増してゆく。この時、トリガパルス、ゲートパルスの周波数 f_T, f_G を実測し、設定したZ軸波形の周期をTとすれば、運動縞の速さは $(1-f_T/f_G)/T$ (c/sec)となる。この方法はTK85のマシンサイクルが遅いため f_T, f_G の設定に制約をうけ、現在のところ、運動縞の速さを数段階にしか調整できないが、完全にプログラマブルであり、運動時間の設定や往復運動などの複雑な刺激統制が容易にできる (Sakurai, 1982)。

5. その他の刺激条件の調整法について

a. 空間周波数の調整

Z軸入力周波数を f_z , X軸鋸歯状波の周波数を f_x , X軸掃引幅を $SW_{cm}^{11)}$, 視察距離を D_{cm} とすれば、管面上の縞の空間周波数は $f_z \cdot D / (57 \cdot f_x \cdot SW)$ c/degとなる。実験中、 f_z の値から直接、空間周波数を読みとれるように、Dや $SW^{12)}$ を調節して割りきれる値にしておくといふ。

また、 f_z をマイクロコンピュータで制御すると、注意事項cで述べたように、X軸周波数の整数倍に即座に設定できる。このためには、ファンクションジェネレータのVCF(周波数変調)機能を利用する。これはVCF端子に一定の電圧をかけると周波数がそれに比例し

で変化する機能で、マイコンの出力ポートに DA コンバータをつけてこの制御電圧を与える。DA コンバータは 8 ビットのポート出力を 16 本の抵抗でつなぎ合わせるだけでも十分実用可能なものが作れる (北川, 1978)。プログラムもポートのイニシャライズの仕方さえ覚えれば簡単なものである。

b. コントラスト、平均輝度レベルの調整

コントラストは X 軸入力振幅で調整するが、注意事項 d で述べたように、輝度変調の直線性がそこなわれない範囲におさえるべきである。ファンクションジェネレータには VCA (振幅変調) 機能があり、VCA 端子に負荷する電圧で出力振幅を調整できる。これも DA コンバータを介してマイコンで制御するとよい。

平均輝度レベル (X 軸入力電圧が 0V 時の明るさ) は、オシロスコープのビーム INTENSITY のつまみで調整できる。ラストの条件にもよるが、大抵のオシロで 100cd/m^2 を超えない値である。

c. 表示時間の制御

平均輝度レベルで一様に光る画面からある一定時間だけ縞を呈示し、また平均輝度レベルにもどすといった動作には、Z 軸入力前段にアナログスイッチを入れて、Z 軸信号にゲートをかけるとよい。低い電圧の信号なら、MC14016 などの IC を 1 個使えば十分で、TTL レベルで外部のタイマーから制御できる。但し、X 軸の掃引が 100Hz とすると、100msec 以下の短い表示時間では画面がリフレッシュする回数が 10 回以下となり、掃引途中でゲートが閉じることも考えられるので、X 軸と同期をとってアナログスイッチを開閉する必要がある。後に述べる行場 (1981, 1982) の装置では、X 軸スイープジェネレータから Z 軸増幅器へゆくブランキング信号をオシロ内より拾い出してマイクロコンピュータに入力し、ブランキング信号を一定数カウントする間だけアナログスイッチを開くプログラムでこれを実現している。

また、オシロの Z 軸増幅器のブランキング信号入力は大抵の場合、TTL コンパチブルになっているようなので、これを外部から直接ゲートすれば管面の明るさを平均輝度レベルではなく、0 レベル近くまで落とすことができる。但し、X 軸スイープジェネレータからのブランキング信号との OR をとってゲートする必要がある。

d. 画角の調整

Y 軸三角波の振幅を変えると、縞の垂直方向の画角が変わるが、注意事項 b で述べたように平均輝度も変わってしまう。これをさけるためには、Y 軸入力に同期をとってブランキングをかけ、画面をワイプするほかない。図 9 は自作のワイパー回路のタイムチャートを示したものである。Y 軸入力を鋸歯状波にし、2 つの高速コンバータ (810) に適当な基準電圧を与えて、上下部分を切り出す。これらのコンバータの出力でセット・リセットのフリップ・フロップ回路を作り、そ

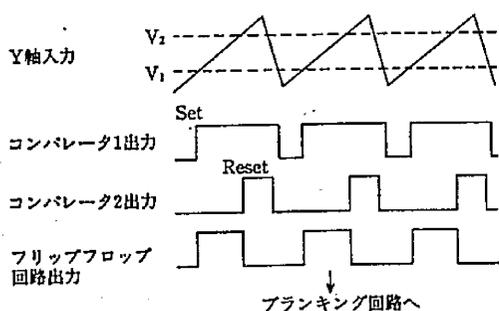


図9 ワイパー回路のタイミング・チャート

の出力でブランキングを解除してやれば、基準電圧の値に応じて画角が変わる。

水平方向の画角の調整も同様であるが、平均輝度の変化を気にしなければ、オシロの SWEEP LENGTH の可変抵抗を調節することによっても変えることができる。

e. 縞の方向の調整

縞の方向を変えるのに最も確実な方法は、オシロ本体を物理的に回転することであるが、オシロの TRACE ROTATION と呼ばれるつまみでもある程度の角度は調整できる。

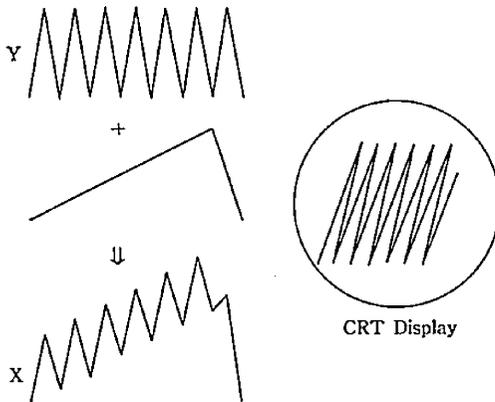


図10 斜め縞を呈示する方法

もっと大きな角度を変えるには、図10に示すようにY軸三角波と鋸歯状波をアナログ加算した波形で掃引を行ない、ラスタを傾むかせることが考えられる。アナログ加算器において、三角波加算の重みを調整すれば、それに応じて傾きは大きく変るはずである。但しこの場合、内部掃引が使えないから、外部掃引の手続きをとってブランキングも外からかけてやる必要がある。またスポットの描画速度も傾きによって異なってくるので、平均輝度が変わる可能性もある。

f. 往復運動や一定距離だけ縞を動かす方法

縞を往復運動させたり、ある一定距離だけ動かすような場合、簡便な方法がある。まず管面には静止縞を出す。オシロにはスポットの水平位置を調整する POSITION のボリュームがついており、この可変電圧入力部分に外部から制御電圧をかけてやると、それに応じて縞全体が移動する。掃引幅を長くにとって (SWEEP LENGTH で調整)、縞全体が少々移動しても切れ目がでないようにすればよい。制御電圧をサイン波にすると、サイン状の運動も作ることができる。また、デューティ比の大きく、同期の長い矩形波をZ軸に入れて管面上1本の縞を呈示してこの方法をとれば、単一のバーが移動する運動刺激を作ることにも可能である。

6. 実際の装置構成

これまで述べてきた諸方法を用い、実際の実験で使用した装置の構成例を図11、図12に示す。

図11は行場 (1981, 1982) が visual phantom の研究で用いたもので、自作のワイパーで画面中央部分にブランキングを分けて縞を二分する帯を作っている。マイクロコンピュータ (SM-B-80T) には縞の空間周波数、呈示時間の制御、被験者の反応の記録を行わせて、実験の自動化を計っている。スピーカーは試行開始の合図、キー押しに対する応答を行い、被験者とマイコンのコミュニケーション用である。これまで visual phantom の臨界空間周波数や知覚化時間を求める調整法や恒常法の機械語プログラムを書いた。プログラムはここでは省略するが、提供は惜しまない。

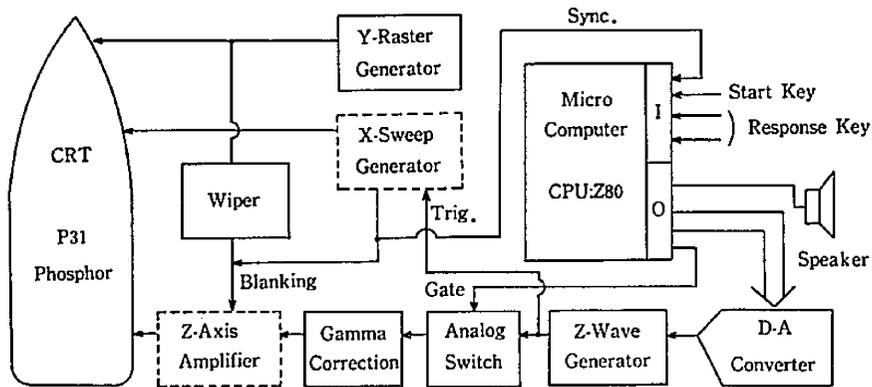


図11 実際の装置の構成例
行場 (1981, 1982) による。点線内はオシロに内蔵されている部分。

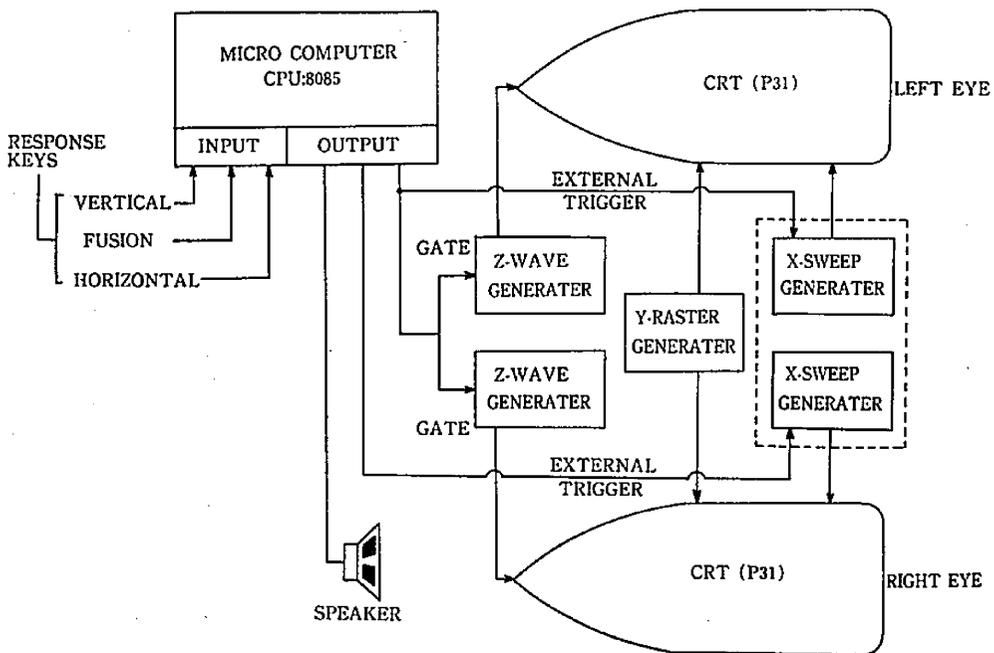


図12 実際の装置の構成例
Sakurai (1982) による。点線内はオシロに内蔵されている部分。

図12は Sakurai (1982) が視野闘争の研究で用いたものである。ここではマイコンに frequency shifter の機能をもたせて、右眼には運動縞、左眼には静止縞を呈示している。被験者の反応も記録して実験の自動化も計った。CRT を2台使っても外部の発振器は3台で済ませている。

7. 最後 に

ここ20年近くの間、視覚系の空間周波処理に関する研究の進展は目ざましいものがあり、大部分の問題はすでに整理がなされた観がある。但し、最近位相の問題 (Burr, 1980; Holt and Ross, 1980) や低空間周波数領域の問題 (Green et al., 1981; Cambell et al., 1981) の検討がなされている。また Breitmeyer and Ganz (1976) の論文以降、空間周波数処理機構と他の知覚現象との関連が活発に研究されてきたように思える。最近、目にとまったものをあげてみよう。マスクングとの関連 (Green, 1981), 眼球運動との関連 (Corfield et al., 1978), 眼の調節との関連 (Owens, 1980), 視野闘争との関連 (Hollins, 1980; Fahle, 1982), 運動視や奥行視との関連 (Cambell and Maffei, 1981; Frisby and Mayhew, 1980; Chase and Smith, 1981), 縞による誘導効果 (Tyler and Nakayama, 1980; McCourt, 1982; Gyoba, 1983) などである。乳幼児の空間周波数処理特性を測定する発達の研究においても検討が進んでいる (Banks and Stephens, 1982)。

1980年以降の Vision Research 誌に掲載される論文を眺めても、縞パターンを用いているものが1割を優に超え、縞パターンはかなり一般的な視覚刺激になっているようだ¹³⁾。上に述べた諸問題の研究にここで紹介した方法が少しでも役に立つことを願ってやまない。

付記 本研究の一部は昭和57年度文部省科学研究費奨励研究A (課題番号57710025) の助成によるものである。記して謝意を表したい。

註

- 1) 伝達関数には利得と入力周波数の関係を記述したもののほかに、位相と周波数との関係を表わした関数も必要であるが、視覚研究では、位相の問題は無視される場合が多い。
- 2) 一定の周期をもたない非連続的なものでもよい。
- 3) 例えば振幅 a_0 , 周波数 f_0 の矩形波は、振幅が $4a_0/\pi$, 周波数 f_0 のサイン波 (基本波成分と呼ばれる) に振幅, 周波数がそれぞれ基本波の1/奇数倍, 奇数倍のサイン波 (高調波成分と呼ぶ) を加算していったものである。
- 4) 周波数を横軸に、振幅あるいは位相を縦軸にとってフーリエ成分を記述したもの。
- 5) 聴覚で言う純音にあたる。
- 6) 線型システム分析法を視覚系に適用する際には、linearity, homogeneity, isotropy の諸前提の確認が必要となる (Cornsweet, 1972 参照)。
- 7) この他、光学的手法があり、それぞれ長所と欠点がある (Guzman and Steinbach, 1981 参照)。
- 8) テレビ系ではこの手続きをガンマ補正 (gamma correction) という。
- 9) 位相を問題とせず、利得と入力周波数関係に注目した時の伝達関数を MTF (modulation transfer function) と呼ぶ。
- 10) オシロスコープの FOCUS, ASTIG をきちんと調整しておかねばならない。
- 11) 画面の外にはみ出している部分もあるので注意。
- 12) SWEEP LENGTH や、オシロ内部にX軸ゲイン調整用の半固定抵抗があり、これで調節する。
- 13) 今後は2次元の正弦波縞 (two-dimensional sinusoidal grating) が使われる場合も多くなり (Carlson et al., 1977), 呈示方法を検討してゆく予定である。

引用文献

- Banks, M. S., & Stephens, B. R. 1982 The contrast sensitivity of human infants to gratings differing in duty cycle. *Vision Research*, **22**, 739-744.
- Braddick, O., Campbell, F. W., & Atkinson, J. 1978 Channels in vision : Basic Aspects. In R. Held, H. W. Leibowitz & H. L. Teuber (Eds). *Handbook of sensory physiology*. Vol. 8, Berlin : Springer-Verlag. Pp. 3-38.
- Breitmeyer B. G., & Ganz, L. 1976 Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression and information processing. *Psychological Review*, **83**, 1-36.
- Brown, C. R. 1977 A digital technique for generating moving grating patterns on an oscilloscope. *Vision Research*, **17** 299-300.
- Burr, D. C. 1980 Sensitivity to spatial phase. *Vision Research*, **20**, 391-396.
- Campbell, F. W., & Green, D. G. 1965 Optical and retinal factors affecting visual resolution. *Journal of Physiology*, **181**, 576-593.
- Campbell, F.W., Cooper, G. F., Robson, J.G., & Sachs, M. B. 1969 The spatial selectivity of visual cells of the cat and the squirrel monkey. *Journal of Physiology*, **204**, 120-121.
- Campbell, F. W., & Maffei, L. 1981 The influence of spatial frequency and contrast on the perception of moving patterns. *Vision Research*, **21**, 713-722.
- Campbell, F. W., Johnstone, J. R., & Ross, J. 1981 An explanation for the visibility of low frequency gratings. *Vision Research*, **21**, 723-730.
- Carlson, C. R., Cohen R. W., & Gorog, I. 1977 Visual processing of simple two-dimensional sine-wave luminance gratings. *Vision Research*, **17**, 351-358.
- Chase, W., & Smith, R. 1981 Spatial frequency channels tuned for depth and motion. *Vision Research*, **21**, 621-626.
- Corfield, R., Frosdick, J. P., & Campbell, F. W. 1978 Grey-out elimination : The roles of spatial waveform, frequency and phase. *Vision Research*, **18**, 1305-1312.
- Cornsweet, T. N. 1970 *Visual perception*. New York : Academic Press.
- Enroth-Cugell, C., & Robson, J. G. 1966. The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat. *Journal of Physiology*, **187**, 517-552.
- Fable, M. 1982 Binocular rivalry : suppression depends on orientation and sparial frequency. *Vision Research*, **22**, 787-800.
- Frisby, J., & Mayhew, J. 1980 The role of spatial frequency tuned channels in vergence control. *Vision Research*, **20**, 727-732.
- Georgeson, M. 1979 Spatial Fourier analysis and human vision. In N. S. Sutherland (Ed). *Tutorial essay in psychology : A guide to recent advances*. Vol. 2. John Wiley & Sons : New York.
- Green, M., Corwin, T., & Schor, C. 1981 Spatiotemporal variations in the square/sine ratio : evidence of independent channels at low spatial frequencies. *Vision Research*, **21** 423-430.
- Green, M. 1981 Spatial frequency effect in masking by light. *Vision Research*, **21**, 861-866.
- Guzman, O., & Steinbach, M. J. 1981 Manipulating the contrast of sine wave gratings and other distributions using Polaroid. *Vision Research*, **21**, 1025-1028.

- 行場次朗 1981 Rosenbach 効果と空間周波数処理, 日本心理学会第45回大会発表論文集, 165.
- 行場次朗 1982 Visual phantom の空間周波数特性, 日本心理学会第46回大会予稿集, 79.
- Gyoba, J. 1983 Stationary phantoms : a completion effect without motion and flicker. *Vision Research*, in press.
- Hollins, M. 1980 The effect of contrast on the completeness of binocular rivalry suppression. *Perception & Psychophysics*, 27, 550-556.
- Holt, J. J., & Ross, I. 1980 Phase perception in the high spatial frequency range. *Vision Research*, 20, 933-936.
- 市原 茂 1979 視覚系のフーリエモデルと特徴抽出機構: 15年間のあゆみ, 心理学研究, 50, 161-174.
- 北川一雄 1979 統・マイコン実験と工作マニュアル, オーム社。
- 小林孝夫 1978 電子ディスプレイの ABC, 日本放送出版協会。
- Maffei, L. 1978 Spatial frequency channels : Neural Mechanisms. In R. Held, H. W. Leibowitz & H. L. Teuber (Eds). *Handbook of sensory physiology*. Vol. 8, Berlin : Springer-Verlag. Pp. 39-66.
- McCourt, M. E. 1982 A spatial frequency dependent grating induction effect. *Vision Research*, 22, 118-134.
- Morgan, M. J., & Watt, R. J. 1982 The modulation transfer function of a display oscilloscope : measurements and comments. *Vision Research*, 22, 1083-1085.
- 大山 正 1970 視覚の基本体制, 八木・大山(編) 講座心理学第4巻, 東京大学出版会 Pp. 25-109.
- 大石 巖 1972 表示装置, 滝・青木・樋渡(編) 画像工学, コロナ社, Pp. 180-228.
- Owens, D. A. A comparison of accommodative responsiveness and contrast sensitivity for sinusoidal gratings. *Vision Research*, 20, 159-168.
- Rogers, B. J. 1976 A technique for generating moving visual stimuli on a C.R.O. *Vision Research*, 16, 415-417.
- Sakurai, K. 1982 Binocular rivalry between static grating and moving grating. *Tohoku Psychologica Folia*, in press.
- Schade, O. H. 1956 Optical and photoelectric analog of the eye. *Journal of Optical Society of America*, 46, 721-739.
- Sekuler, R., Pantle, A., & Levinson, E. 1978 Physiological basis of motion perception. In R. Held, H. W. Leibowitz & H. L. Teuber (Eds). *Handbook of sensory physiology*. Vol. 8, Berlin : Springer-Verlag. Pp. 67-96.
- Tyler, C. W. & Nakagawa, K. 1980 Grating induction : a new type of aftereffect. *Vision Research*, 20, 437-442.
- 横井与次郎 1979 リニアIC実用回路マニュアル, ラジオ技術社