

動的立体視メカニズムの研究 : VR技術を用いた実験システムの構築

その他のタイトル	A study of Active Vision Mechanisms : Development of Experimental system using a VR Technique
著者	林 武文, 乾 敏郎
雑誌名	情報研究 : 関西大学総合情報学部紀要
巻	9
ページ	103-119
発行年	1998-07-05
URL	http://hdl.handle.net/10112/00020333

動的立体視メカニズムの研究
—VR技術を用いた実験システムの構築—

林 武文 乾 敏郎

A Study of Active Vision Mechanisms
—Development of an experimental system using a VR technique—

Takefumi HAYASHI* Toshio INUI**

Abstract

To investigate properties of surface reconstruction modules in the human visual system, an experimental system using a virtual reality technique was developed. The system produces visual cues for surface reconstruction, such as binocular disparity, motion parallax, shading, textures etc. and presents them on a stereo graphics display. Also, observer's head motion is fed back to evaluate the mechanisms of active vision. In this report, moving random dot patterns are used to investigate the human visual system's sensitivity to sinusoidal depth modulations specified by motion parallax. Modulation transfer functions (MTF) are affected both by dot average velocity and dot density. Three dots per period are necessary to perceive the sinusoidal surfaces. The value of (threshold of perception) / (average dot interval) is constant in every dot density and frequency condition. This implies that the surface reconstruction from motion parallax utilizes the gradient of the velocity field. These experimental results are similar to those in surface reconstruction from binocular disparity.

Keywords: active vision, virtual reality, surface reconstruction, motion parallax, binocular disparity

* Faculty of Informatics, Kansai University

** Graduate school of Informatics, Kyoto University

1. まえがき

立体視のメカニズムは、生理的要因によるものと心理的・記憶的要因によるものに分けられる。前者は、両眼視差、輻輳、調節、単眼の運動視差などの情報を手がかりとし、また後者は、幾何学的情報（物体形状、遮蔽輪郭、テクスチャなど）や光学的情報（明暗、コントラスト、陰影など）を手がかりとして奥行きを推定する。脳内におけるこれらの処理モジュールは主として視覚系の初期過程に存在し、独立・並列に動作して奥行き情報を計算し、それぞれの出力が統合されて3次元世界が知覚されると考えられている。これらの個々のモジュールの機能や計算メカニズムに関してはこれまでに研究が進められているが、その統合過程やさらに上位の情報処理過程に関しては、ほとんど明らかにされていない。さらに、3次元世界の再構成には、自己の運動情報の影響も無視出来ないことが指摘されている。

本研究は、このような自己の運動情報も含めた立体視メカニズム（動的立体視メカニズム）に関して、視覚系のモジュールの情報処理と統合過程を明らかにすることを目的としている。本報告は、バーチャルリアリティ（VR）の技術を応用したインタラクティブな実験システムの構築とそれを用いた立体視の空間周波数特性の評価実験について述べたものである。本実験システムでは、3次元コンピュータグラフィックスにより奥行き推定の手がかりを独立にあるいは複数を重畳させて提示し、3次元位置センサ等の入力デバイスにより身体の動きの情報をフィードバックして再描画することが可能である。

これまでの立体視の検査は、主として顔面固定の条件でしかも両眼立体視機能についてのみ調べられてきた。しかし、斜視患者等両眼立体視が出来ない場合にも単眼立体視に基づく立体視能力を有している。人間の立体視機能を個々のモジュールの能力と自然な状態における総合的な立体視機能の両方の点から正しく評価することは、心理学における基礎研究のみならず眼科臨床における応用面においても極めて重要であると考えられる。

以下、第2章では、本研究のバックグラウンドとなる初期視覚における奥行き推定モジュールの機能と相互作用に関する研究の状況について述べる。第3章では、本研究で構築した実験システムについて述べる。第4章では、本システムを用いて行った心理物理実験の一部の結果と考察について述べ、第5章で全体をまとめる。

2. 視覚モジュールと統合過程に関する研究

2. 1 計算論的アプローチ

視覚系の目的は、網膜に投影された2次元像から3次元世界を推定することであり、その初期過程では、多数のモジュールが独立並列に動作して奥行きの手がかりを処理している。これらの出力が中間視覚で統合され、観察者中心座標系で記述した表面の安定な表現が得られると

考えられている⁽¹⁾。モジュールの存在は、Julesz⁽²⁾のランダムドットステレオグラムを用いた両眼立体視の実験によって明らかにされている。これらの視覚モジュールには、図1に示すように両眼視差、運動視差、陰影、テクスチャー等の情報を処理するものが知られており⁽³⁾、それぞれの機能や計算メカニズムに関する研究は、shape-from-X (X:binocular disparity, shading, texture, motion,...) と総称され、コンピュータビジョンの分野を中心に多くの研究が進められてきた。

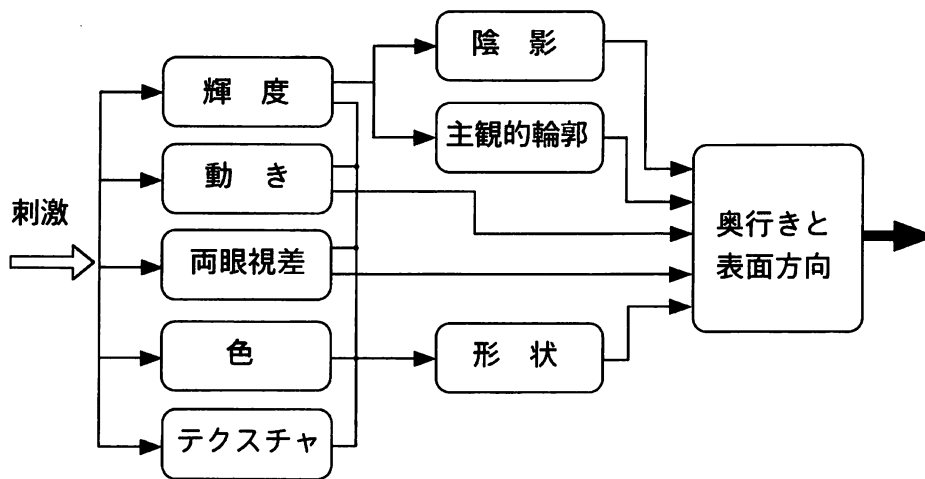


図1 視覚モジュール

網膜上の2次元情報から3次元世界を再構成することは、解が一意に定まらない不良設定問題を解くことに相当している。生体の視覚系は外界に対する先験的な知識（例えば、表面の滑らかさや剛体運動など）を拘束条件として加えることによって一瞬にして不良設定の逆問題を解いているのである。Poggioら⁽⁴⁾は、標準正則化理論（standard regularization theory）を用いることにより、初期視覚の計算モデルとしてこれを統一的に取り扱うことが可能であることを示した。この方法では、観測データと解の適合度および先験的な知識に基づく拘束条件から成る評価関数を最小とする解（＝奥行き情報）を求める。Poggioらは論文⁽⁴⁾の中で、初期視覚における各モジュールの評価関数の具体的な形を示している。

さらに、遮蔽輪郭等の不連続を含めて奥行きを復元する処理過程のモデルとして、結合マルコフ確率場（MRF:Marcov Random Field）理論⁽⁵⁾に基づく初期視覚の計算モデルが標準正則化理論を包括する形で提案されており⁽⁶⁾、この枠組みに基づいた両眼立体視⁽⁷⁾、輪郭線抽出過程⁽⁸⁾、明るさ知覚における充填過程⁽⁹⁾の説明がなされている。結合MRFモデルでは、視覚系の神経回路網の接続について生物学的な知見との整合性も考慮されている。

近年、初期視覚におけるモジュールの相互作用と情報の統合過程に注目した研究が行われて

いる。Poggioら⁽¹⁰⁾は、輝度変化に基づくエッジが最も基本であるとして、輝度エッジのモジュールと奥行きモジュールの統合過程をMRFに基づいてモデル化し、超並列計算機により視覚の問題を解いている。さらに、多層MRFモデルにより初期視覚から高次視覚までもを統一的に扱うことが可能な視覚大脳皮質の計算理論⁽¹¹⁾が提案されている。このモデルでは、視覚大脳皮質の処理過程を、フィードフォワードおよびフィードバックの双方向結合を持った多層マルコフ確率場でモデル化し、一撃アルゴリズムを組み合わせることで逆問題を数百ミリ秒程度で計算することが可能である。この枠組みに基づく計算モデルとして、陰影から奥行きを推定するモデル⁽¹²⁾、エッジに基づく両眼立体視のモデル⁽¹³⁾、および色恒常性のモデル⁽¹⁴⁾が提案されている。また、モジュール間の相互作用を考慮した奥行き情報の統合過程の研究としては、両眼立体視系が面の奥行きそのものを推定するのに対し、運動視差以外の単眼立体視系は面の曲率を見積るといふ仮説のもとに、情報統合のニューラルネットワークモデルが検討されている⁽¹⁵⁾。

2. 2 実験的アプローチ

心理物理実験による実験的アプローチとしては、両眼視差と表面輪郭⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、両眼視差と運動視差⁽¹⁸⁾ - ⁽²¹⁾、両眼視差と陰影⁽²²⁾、および図形の輪郭線と両眼視差の相互作用に関するもの⁽²³⁾が挙げられる。すなわち、一対の手がかりを重畳させて提示し、知覚される奥行きの評定値あるいは感度を調べる実験である。これらの結果に共通する点としては、奥行き推定のモジュールの解（出力）が似かよっている場合にはそれぞれの出力の線形和（重みつき平均）として結果が得られるのに対し、出力レベルが異っていたり矛盾する場合には重みつき平均とは全く異なる結果が得られる場合が多いという点である。

例えば、両眼視差と運動視差の相互作用を調べたRogersらの実験⁽¹⁹⁾では、正弦波形状の奥行き情報を運動視差と両眼視差で提示することにより、被験者に形状の知覚と奥行きの判定を行わせている。両眼視差がゼロの場合には運動視差を大きくするにつれて単眼視の場合の1/2の傾きで増加しており、奥行きの知覚は、運動視差と両眼視差の線形和すなわち $\{(\text{運動視差} + \text{両眼視差}) / 2\}$ で判定されている。ところが、両眼視差が大きい場合には、運動視差が無視され両眼視差だけで奥行きが決定されることが明らかにされている。運動視差の成分は、面の回転として知覚されてしまうのである。吉田の実験⁽²⁰⁾は円筒面の運動を刺激に用いているが、ほぼ同様の結果が得られている。また、運動視差と両眼視差を正弦波の逆位相で提示した一川らの実験⁽²¹⁾においても両眼視差で奥行きが決定されることが報告されている。

計算論的アプローチと実験的アプローチは、独立ではなく両者が相補的な関係をもって研究が進められている。実験による知見は、モデルの拘束条件を与えモデルが精緻化される。一方でモデルによる予測は実験結果に見通しをつけることになる。上述した視覚系の奥行き推定のモジュールの統合過程に関しては、計算モデルにおける評価関数を単に重みづけして足し合わせるのではなく、本質的に非線形の方法を取らなければならないことが心理実験の結果から明

らかになった。要因を統制しパラメータの制御が容易な実験システムの構築と実験データの蓄積が不可欠であることが分かる。

3. 動的立体視機能計測システムの構築

3. 1 システムの概要

実験システム要求される機能としては以下が挙げられる

- ・奥行き推定の手がかりを独立に生成する
- ・運動する視覚パターンを左右の目に個別に提示する
- ・刺激のパラメータをインタラクティブに変更し記録する
- ・被験者の身体の動きがフィードバックされる
- ・新たな刺激パターンや入出力デバイスの付加と機能拡張が可能である

これらを実現するために、図2に示すようなシステム構成とした。

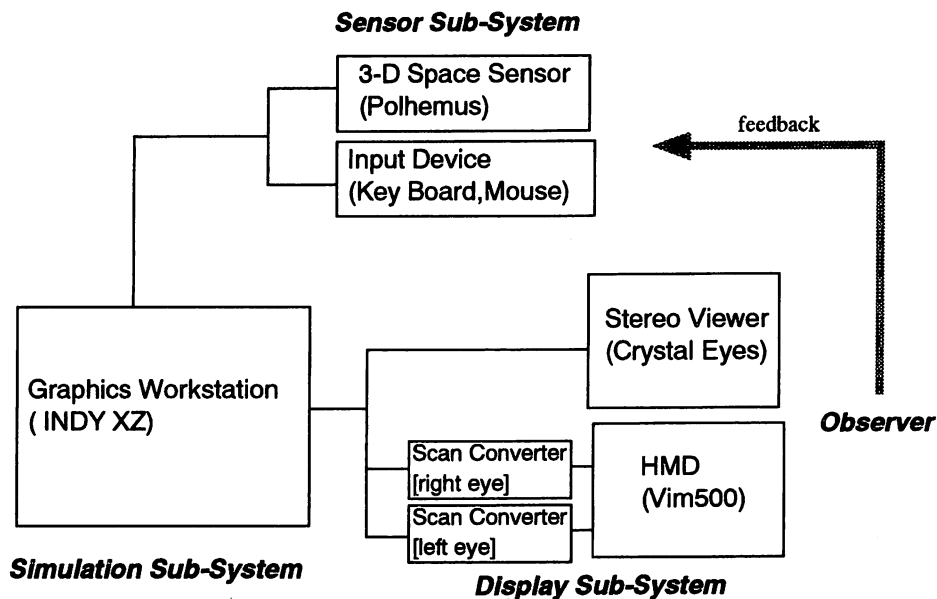


図2 実験システムのブロック図

本実験システムは、ディスプレイサブシステム、センササブシステムおよびシミュレーションサブシステムから構成される⁽²⁴⁾。ディスプレイサブシステムは、刺激の提示部に相当し、両眼立体視の実験を行うためにステレオディスプレイを用いる。センササブシステムは、被験者の動きの計測部分である。また、シミュレーションサブシステムは、刺激の生成と他のサブ

システムの制御および計測データの処理を行うCPUを指す。刺激の提示に対する被験者 (Observer) の応答は、センササブシステムからシミュレーションサブシステムに入力され、刺激が更新されてディスプレイサブシステムにフィードバックされる。

3. 2 シミュレーションサブシステム

ハードウェアによる幾何計算とラスタ処理が可能なグラフィックスワークステーション (Silicon Graphics製 INDY XZ) を用い、3次元CGによる視覚パターンをリアルタイムで生成するとともに、キーボードやマウスあるいは3次元位置センサ等の入力デバイスによりインタラクティブに刺激のパラメータを変更出来るようにした。描画性能は、線分/秒=140万、塗りつぶした三角形ポリゴン/秒=71,000であり、線画やランダムドットパターン (10,000ドット程度まで) を表示して動かす (20~30フレーム/秒で更新する) には十分である。ただし、ステレオ表示を行う場合には、描画の量が2倍に増加するため、複雑な刺激の生成が困難であった。

刺激パタンの生成には標準の3次元グラフィックスライブラリであるOpenGLを用いている。ここでは、CG空間の世界座標系と被験者の実世界の座標系を正確に対応させるとともに、奥行きの手がかりを単独で与えるために、投影変換の行列を独自に定義した。例えば、横方向への運動視差あるいは両眼視差を提示する場合には、横方向 (x方向) には透視投影を、また縦方向 (y方向) には平行投影を用いて投影変換を行っている。さらに、単眼と両眼の場合で同じ3次元幾何形状に基づくCGパターンを発生させ、運動視差と両眼視差を独立に変更することが出来るようにしている。

ウインドウ管理や被験者の反応をキーボードから入力するためのイベント処理には、XウインドウベースのツールキットであるGLUT (OpenGL Toolkit)⁽²⁵⁾ を利用している。

3. 3 ディスプレイサブシステム

ステレオディスプレイとして、液晶シャッタ方式のステレオビューア (Stereo Graphics製 CRYSTAL EYES) を用いる方法とヘッドマウントディスプレイ [HMD] (Kaiser Electronics製 Vim500) を用いる方法の両方を検討した。ステレオビューアは、120Hzで更新されるCRT上に左眼および右眼用の画像を交互に描画し、同期した液晶シャッタ眼鏡により独立に画像を提示する。またHMDは、左右の画像を同じCRT画面上に描画したものをスキャンコンバータで切り取り、ゴーグルの中に設置された左右それぞれのディスプレイに提示する。両手法の比較を次に示す。

提示装置	方式	画素数	最大水平視野角
ステレオビューア	CRT	1,300,000	約40度 (50cm離れた場合)
HMD	LCD	60,000	約40度

提示される刺激の解像度は、ワークステーションの21インチ型CRTを利用するステレオビ

ユーアが優れるが、被験者自身の動きを伴う実験では、ヘッドマウントディスプレイが不可欠となる。ただし、本研究で利用したHMDは、解像度が粗い上に、スキャンコンバータによりNTSC信号に変換した画像を提示するため画質が悪く、提示出来る刺激パターンが限られた。また、装着感が実験結果に影響を及ぼす可能性も検討する必要がある。

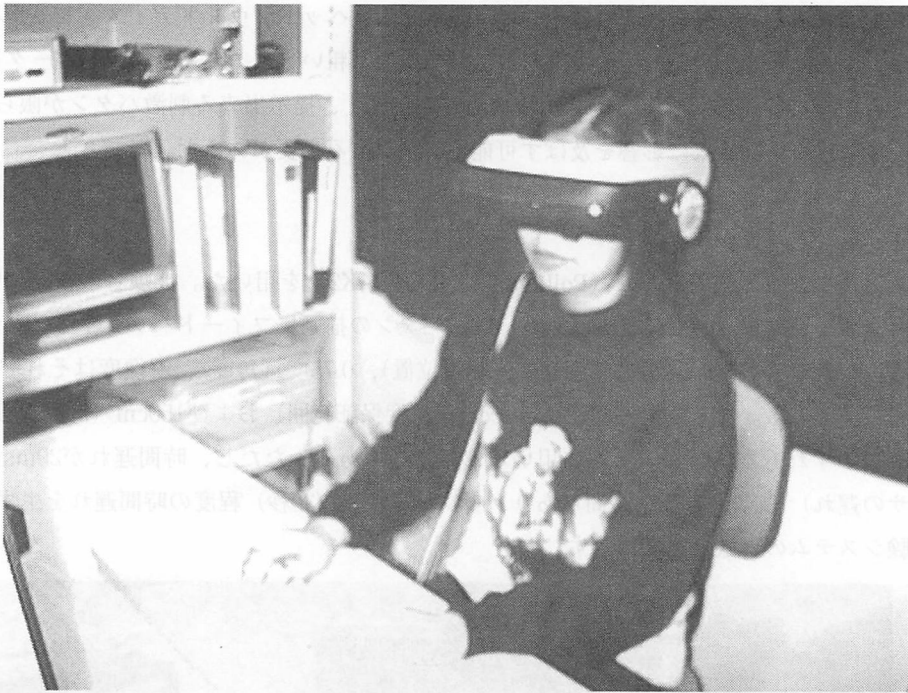
3. 4 センササブシステム

磁気方式の3次元位置センサ（Polhemus製 ISOTRAK2）を用いた。被験者の頭部に付けた磁気センサにより被験者の動きを計測し、刺激パターの描画にフィードバックすることが可能である。センサの精度は、静的精度が2.4mm（位置）、0.75度（角度）、解像度はそれぞれ0.04mm、0.1度である。また、動作範囲は、70cm（精度保証範囲）および150cm（計測保証範囲）であり、いずれも本実験システムに用いるには十分である。ただし、時間遅れが20ms（磁気センサの遅れ）+17ms（転送時間）あり、1フレーム（1/30秒）程度の時間遅れを生ずる。実験システムの外観を図3に示す。

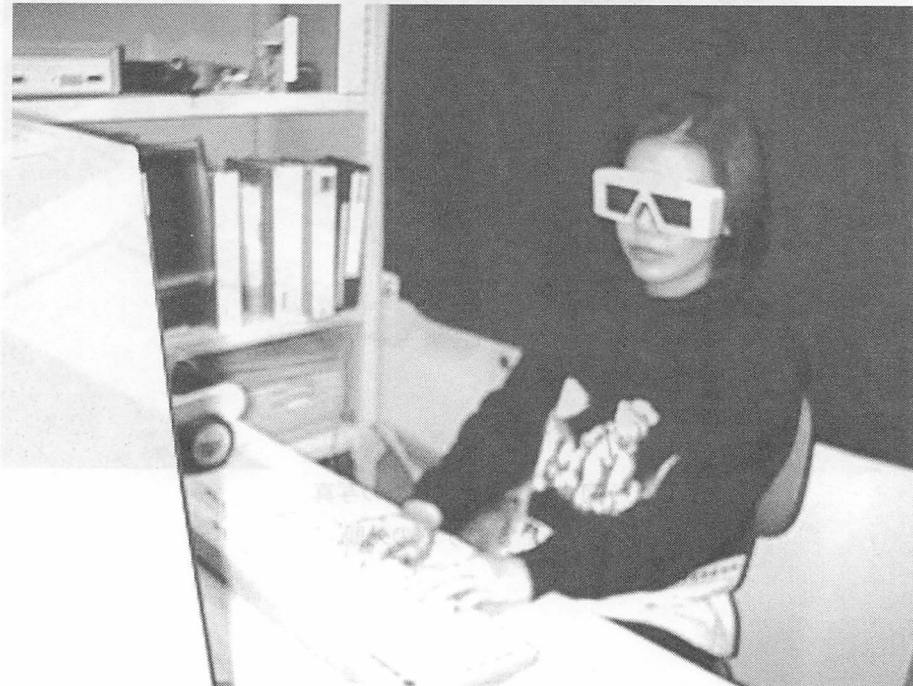


図3 実験システムの写真

(a) システムの外観



(b) HMDを用いた実験



(c) ステレオビューアを用いた実験

4. 心理物理実験

以下では、本システムを用いた立体視機能の評価実験と結果の一部について述べる。

4. 1 実験概要

単眼立体視と両眼立体視の面再構成過程とその相互作用を明らかにすることを目的に、運動視差に基づく単眼立体視の空間周波数応答特性 (MTF: Modulation Transfer Functions) について調べた。特に、MTFに及ぼすドット密度の影響に関して、両眼立体視との比較において検討を行い、立体視における面再構成過程のメカニズムについて考察した。

4. 2 刺激

図4に刺激として用いたランダムドットパターンを示す。ディスプレイ面上にワールド座標空間 ($O-xyz$) の原点があり、ディスプレイ座標系 ($O-XY$) と原点および x , y 軸が一致している。刺激は、奥行きが x 方向に一定で、 y 方向に正弦波状に変化する ($z = \sin y$)。パターン全体の移動方向は X 方向 (被験者から画面に向かって右方向) で、平均ドット速度 v が一定で移動する。ドットの大きさは、全ての点で一定 (4ピクセル) であり、被験者には X 方向の運動視差のみが提示される。

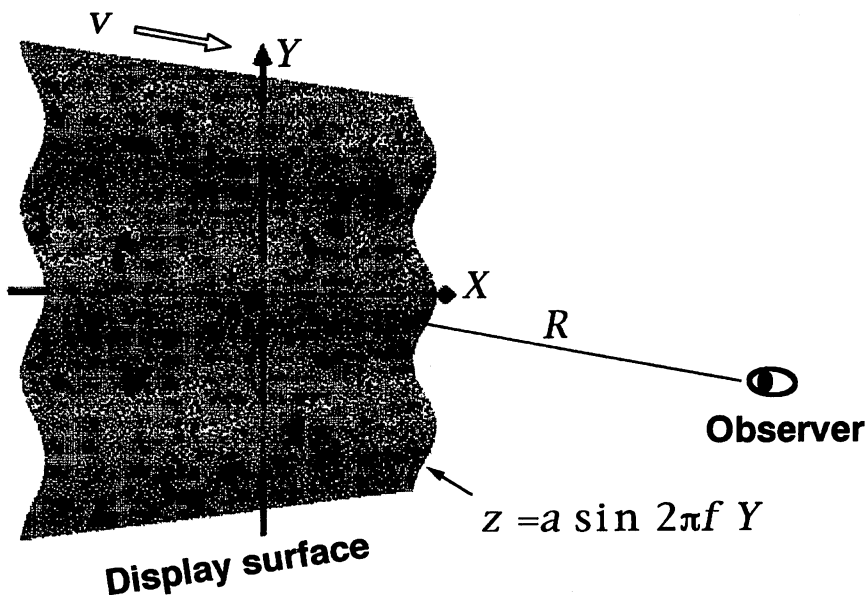


図4 実験に用いたランダムドットパターン

ウインドウの大きさは17cm×17cm、被験者からディスプレイ画面までの距離Rは105cmである。この時、ウインドウの大きさは、視角9.3度×9.3度に相当する。実験は、暗室において単眼で行っている。

図4において、画面上の点(X, Y)におけるドットの速度(V_x, V_y)は、次式で表される。

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{k \cdot v}{(R-a) \sin 2\pi f Y} \\ V_y &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 a と f は正弦波の振幅と周波数、 k は投影変換の結果生ずる定数値である。キーボードの矢印キーで振幅 a を調節することが出来る。

本実験では、平均ドット速度 v 、正弦波の空間周波数 f 、およびドット密度の組み合わせを変えて刺激を作成した。それぞれの値は、以下の通りである。

- ・空間周波数 f : 0.22, 0.32, 0.43, 0.54, 0.65, 0.75, 0.86, 0.97, 1.08 (cycle/deg)
- ・平均ドット速度 v : 0.4, 0.8, 1.6, 4, 8, 16 (deg/sec)
- ・ドット密度 : 1.4, 2.9, 5.8, 12, 23, 46 (/deg²)

各空間周波数に対して、ウインドウ上で見える正弦波の数は、2～10周期まで9種類である。平均ドット速度4 (deg/sec) の場合には、X-Y平面上のドットが画面を横切るのに2.3秒を要し、画面上での平均ドット速度は、7.33 (cm/sec) に相当する。また、各ドット密度に対して、ウインドウ上の総ドット数は、125, 250, 500, 1000, 2000, 4000ドットである。

4. 3 実験方法

ここでは、MTFを評価するため、9種類の空間周波数のパターンをランダムな順番で提示して、奥行き知覚の感度を計測した。刺激の提示は、上昇系列で行い、式(1)の正弦波の振幅 a を0から順に増加させてゆき、被験者が正弦波状の面を感じた時点の振幅を閾値として記録した。なお、この時の奥行き知覚の感度は、正弦波状の面を感じた時の運動視差の逆数で表すことになる。正弦波の頂点と底点に相当する位置のドット速度をそれぞれ V_p および V_v として、運動視差の近似値としてこれらの速度差を用いることとする。

$$V_p - V_v = k \cdot v \left\{ \frac{1}{R-a} - \frac{1}{R+a} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $R \gg a$ であるため、式(2)は次のように表すことが出来る。

$$V_p - V_v \approx \frac{2k}{R^2} v \cdot a \quad (3)$$

これより、平均ドット速度 v が一定であれば、 a は提示された運動視差と比例関係にあることが分かる。本報告では、被験者が面を感じた時点の正弦波の振幅（＝閾値）の逆数を感度として用い、以下の2種類の実験を行った。

実験1 平均ドット速度の影響を調べる実験

ドット密度を 46 ($/\text{deg}^2$) に固定し、平均ドット速度をパラメータとしてMTFを求めた。9種類の空間周波数のパタンのランダムな順序での提示を1試行とし、各平均ドット速度に対し10試行ずつ実験を行った。

実験2 ドット密度の影響を調べる実験

平均ドット速度を 4 (deg/sec) に固定し、ドット密度をパラメータとしてMTFを求めた。実験1と同様に、各ドット密度に対し、10試行ずつ実験を行った。

4.4 被験者

2名の被験者について実験を行った。両者とも裸眼もしくは矯正視力は1.0以上である。

4.5 実験結果および考察

[1] 実験1（平均ドット速度の影響）

図5に2名の被験者の感度曲線を、平均ドット速度をパラメータとして示す。

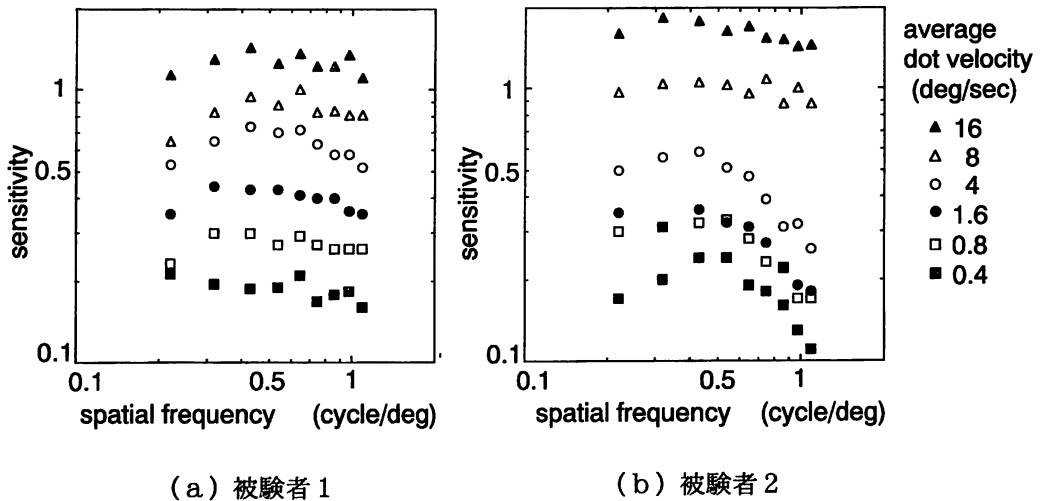


図5 感度曲線（平均ドット速度の影響）

両被験者とも平均ドット速度の増加に伴って感度が増加することが分かる。感度曲線は、ほ

は全ての平均ドット速度に対して、空間周波数が0.4~0.6 (cycle/deg) 付近でピークをもつ。

運動視差と奥行き知覚のMTFに関する研究は、Rogersら⁽¹⁸⁾により同じ正弦波状のランダムドットパターンを用いて行われており、彼らの結果では、0.2~0.4 (cycle/deg) 付近でピークをとることが明らかにされている。彼らの用いた刺激は、往復運動するランダムドットパターンであり、振幅と周期が固定されている。我々の実験は、一定速度で同一方向へ移動するパターンを用いているが、MTFが帯域通過型の特性をもつという点で彼らの結果とはほぼ一致している。

一方、同じ正弦波が知覚される静止したランダムドットパターンを用い、両眼視差を表示した場合の実験は、Rogersら⁽¹⁸⁾と乾ら⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾によって行われており、両眼立体視の場合にもMTFは帯域通過型の特性を示し、0.8 (cycle/deg) 付近が感度曲線のピークとなることが報告されている。

図6に図5のグラフから求めた平均ドット速度と感度の関係を示す。

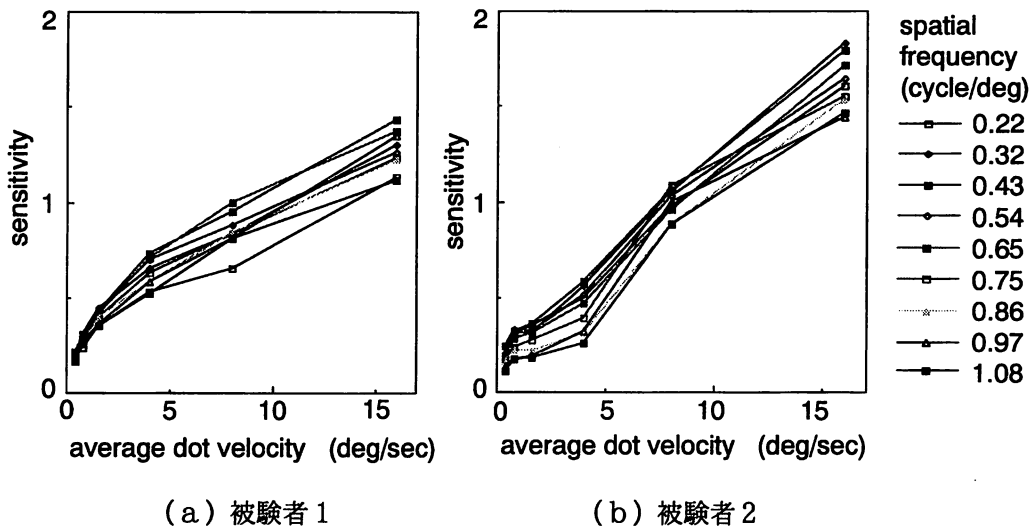


図6 平均ドット速度と感度の関係

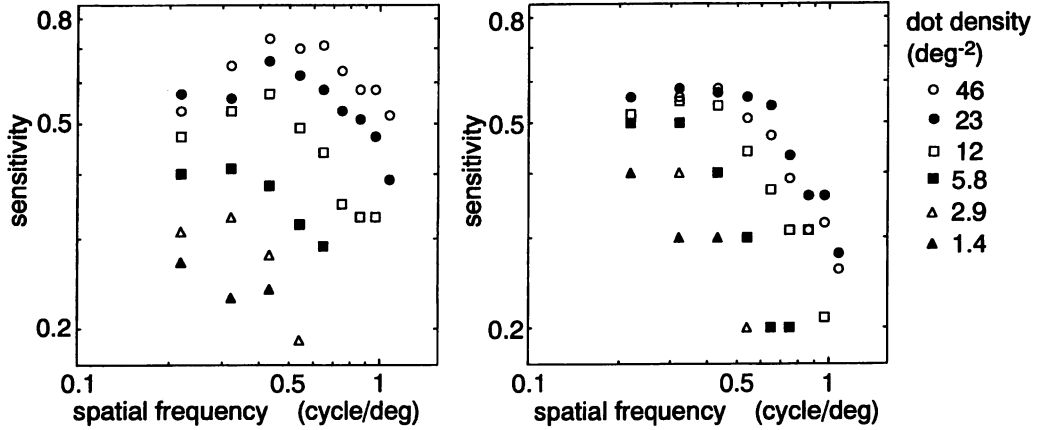
感度は、平均ドット速度の増加に伴って増加する。これは、式(3)の関係により、運動視差が平均ドット速度に比例することを反映していると考えられる。ただし、本実験の場合には、速度が速い条件 ($v=16$) では、ドットに追従するための眼球運動を伴っており、閾値には他の要因が含まれている可能性が高い。また、平均ドット速度を増加させると、25 (deg/sec) 付近より上の速度ではドットを知覚することが不可能であった。

[2] 実験2 (ドット密度の影響)

図7にドット密度をパラメータとした感度曲線を示す。ドット数の減少に伴って、感度が低

表1 面の再構成に必要な1周期あたりの平均ドット数

空間周波数	0.54	0.65	0.75	0.86	0.97	1.08	平均
面の知覚	可 不可	可 不可	可 不可	可 不可	可 不可	可 不可	可 不可
被験者1	3.16 2.24	3.73 2.64	4.52 3.19	3.95 2.80	3.51 2.48	4.47 3.16	3.89 2.75
被験者2	3.16 2.24	3.73 2.64	3.19 2.26	3.95 2.80	3.51 2.48	4.47 3.16	3.67 2.60



(a) 被験者1

(b) 被験者2

図7 感度曲線 (ドット密度の影響)

下する。ドット数が少ない条件でのMTFは、低域通過の特性を示す。本実験では、ドット密度が小さい条件では、高周波の面を知覚することが出来なくなった。

表1に、実験2において知覚可能な限界付近の空間周波数に対して、1周期に含まれる平均のドット数を求めた結果を示す。この表から、面を知覚するためには、空間周波数によらず1周期に平均3個のドットが必要であることがわかる。両眼立体視のMTFに関する実験⁽²⁷⁾においても面を知覚するためには、1周期に平均3個以上のドットが必要であることが分かっている。

図8に図7から求めた感度とドット密度の関係を示す。感度はドット密度が23~46 (/deg²)以上で一定値に収束する傾向がある。また、23 (/deg²)より少ない領域では、ドット密度の低下とともに、感度が低下することがわかる。

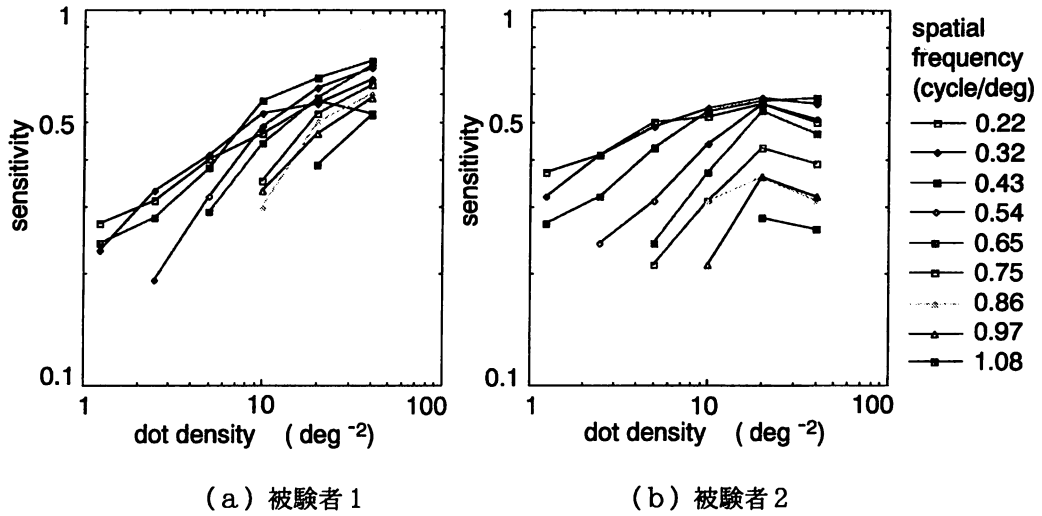


図 8 感度とドット密度の関係

4. 6 ドット密度と感度に関する考察

ドット密度の低下に伴う感度低下を規定する要因を分析するため、ドット密度が23 ($/\text{deg}^2$) 以下の実験値について検討を行った。

図9に、ドット数と閾値/ドット間隔の関係のグラフ（すなわちドット間の速度傾斜の平均値）を示す。空間周波数が1.08の刺激は、表一で示したようにドット密度が23 ($/\text{deg}^2$) より少ない条件で面が見えないため表示されない。

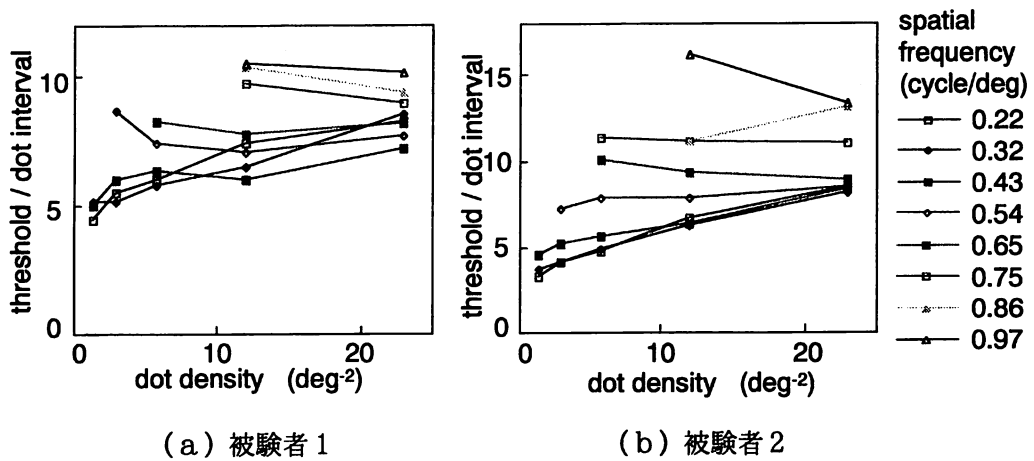


図 9 ドット密度と閾値/ドット間隔の関係

ドット密度と閾値／ドット間隔の値は各空間周波数においてほぼ一定値をとることが分かる。この結果から、奥行き知覚には、ドット間の速度傾斜（視差勾配）の情報が利用されていることが予想される。ただし、空間周波数により値が異なるのは、同時にこれ以外のメカニズムも関与している可能性も考えられる。

両眼立体視における奥行き知覚のMTFの実験⁽²⁷⁾においても、本報告と同様にドット間の視差勾配の値が面の知覚に重要であることが報告されている。また、朝倉ら⁽²⁸⁾は、正則化理論に基づいて、面の一次微分すなわち視差勾配を拘束条件として用いることにより、両眼立体視におけるMTFを再現するモデルを提案している。本実験の結果、運動視差に基づく単眼立体視においても、両眼立体視の場合とほぼ同じ特性が得られており、両視覚モジュールによる面の再構成過程が同じ計算メカニズムに依存している可能性が示されたことになる。

5. まとめ

動的立体視機能の評価を目的に、VR技術を応用した心理実験システムを構築した。また本システムを用いて、運動視差による単眼立体視のMTFを評価することによりその有効性を確認した。現在、両眼立体視のMTFの評価と運動視差を重畳させた場合の相互作用に関する実験が進行中である。また、頭を動かすなどの自己移動が加わる場合には、知覚される立体構造の多義性が解除されることも指摘されており⁽²⁹⁾、今後は身体の動きをフィードバックした実験への拡張も検討するとともに、テクスチャや陰影等の幾何学的・光学的手法を重畳させ、その他の立体視モジュールとの相互作用についても実験を展開する予定である。今後の課題としては、MHDの画質と装着感の改善、グラフィックスワークステーションの描画性能の改善が不可欠となる。本システムを利用することにより、視覚系の個々の立体視モジュールの機能やその相互作用の評価が進められると考えられる。

本システムは、パソコンへの移植性も考慮して設計している。本システムによる心理実験データの蓄積と実験方法の検討を重ねるとともに、パソコンを用いた低価格化とポータブル性の向上を図ることにより、臨床系における立体視機能の評価システムとしての実用化も十分に期待出来る。

最後に、本研究は文部省科研費（課題番号07551003および09044189）の助成を受けたことを付記する。

参考文献

- (1) Marr, D.:"Vision, *A computational investigation into the human representation and processing of visual information*" W.H. Freeman and Co., San Francisco (1982).
- (2) Julesz, B.:"*Foundations of Cyclopean Perception*" University of Chicago Press (1971).
- (3) Cavanagh, P.:"Reconstructing the third dimension : Interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape" *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **37**, pp.171-195 (1987).
- (4) Poggio, T., Torre, V., and Koch, C.:"Computational vision and regularization theory" *Nature*, **317**, pp.314-319 (1985).
- (5) Geman, S. and Geman, D.:"Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images" *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **PAMI-6**, pp.721-741 (1984).
- (6) Marroquin, J.L.:"Probabilistic solution of inverse problems" *MIT AI Laboratory Technical Report*, Cambridge (1985).
- (7) Marroquin, J. L., Mitter, S. and Poggio, T.:"Probabilistic solution of ill-posed problems in computational vision" *Journal of the American Statistical Association*, **82**, pp.76-89 (1987).
- (8) 本郷節之, 川人光男, 乾敏郎, 三宅誠:"エネルギー学習機能をもつ局所並列確率アルゴリズムによる輪郭線抽出" 電子情報通信学会論文誌, J74-D-II,3, pp.348-356 (1991).
- (9) 本郷節之, 乾敏郎, 川人光男:"明るさ知覚の計算理論と神経回路モデル—充填過程のマルコフ確率場モデル—" 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II,11, pp.1959-1967 (1992).
- (10) 川人光男, 乾敏郎:"視覚大脳皮質の計算理論" 電子情報通信学会論文誌, J73-D-II, **18**, pp.1111-1121 (1990).
- (11) Poggio, T., Gamble, E. B., and Little, J. J.:"Parallel integration of vision modules" *Science*, **242**, pp.436-440 (1988).
- (12) Kawato, M., Hayakawa, H., and Inui, T.:"A forward-inverse optics model of reciprocal connections between visual cortical areas" *Network*, **4**, pp.415-422 (1993).
- (13) Hongo, S., Sonehara, N., and Yoroizawa, I.:"Edge-based Binocular Stereopsis Algorithm - A Matching Mechanism with Probabilistic Feedback" *Neural Networks*, **9**, pp.379-395 (1996).
- (14) Takebe, K., Nakauchi, S., and Usui, S.:"A computational model for color constancy by separating reflectance and illuminance edges within a scene" *Neural Networks*, **9**, pp.1405-1415 (1996).
- (15) 乾敏郎, 山下博志:"中間視覚における情報統合のメカニズム" 電子情報通信学会技術報告, **NC93-13**, pp.9-16 (1993).
- (16) Stevens, K. & Brookes, A.:"Integrating Stereopsis with Monocular Interpretation of Planer Surfaces" *University of Oregon Technical Report*, **CIS-TR-86-05** (1986) .
- (17) Stevens, K., Lees, M. & Brookes, A.:"Combining binocular and monocular curvature features", *Perception*, **20**, pp.425-440 (1991).
- (18) Rogers, B. & Graham, M.:"Similarities Between Motion Parallax and Stereopsis in Human Depth ", *Perception*" *Vision Research*, **22**, pp.261-270 (1982).
- (19) Rogers, B. & Collet, T.:"The Appearance of Surface Specified by Motion Parallax and Binocular Disparity" *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **41A**, pp.697-717 (1989).
- (20) 吉田弘司:"3次元形状の知覚に及ぼす両眼視、運動情報の効果" 広島大学教育学部紀要, **40**, pp.25-30 (1991).
- (21) 一川誠, 斎田真也:"運動視差と両眼視差の奥行き情報の統合過程" 日本心理学会第56回大会発表論文集, p.619 (1992) .

- (22) Buckley, D. & Frisby, J. P.: "Integration of stereo, texture and outline cues in the shape perception of three dimensional ridges" *Vision Research*, **33**, pp.919-933 (1993).
- (23) Bulthoff, H. H. and Mallot, H. H.: "Integration of depth modules: stereo and shading" *Journal of the Optical Society of America, A*, **5**, pp.1749-1758 (1988).
- (24) 広瀬通孝: "バーチャル・リアリティ" 産業図書 (1993).
- (25) Kilgard, M. J.: "*OpenGL Programming for the X Window System*" Addison Wesley (1996).
- (26) 乾敏郎, 牧岡省吾, 朝倉暢彦: "両眼立体視による面の復元—正則化パラメータおよびリプシッ条件の検討—" 電子情報通信学会春期大会予稿集**D-68** (1994).
- (27) 乾敏郎, 乾幸美: "両眼立体視の面再構成過程に及ぼす刺激面積とドット密度の効果" 日本心理学会第59回大会発表論文集, p.589 (1995) .
- (28) 朝倉暢彦, 乾敏郎: "正則化理論による両眼立体視系の空間周波数特性の解析" 電子情報通信学会技術報告,**HIP96-6**, pp.29-34 (1996).
- (29) Rogers, B. & Graham, M.: "Motion parallax as an independent cue for depth perception" *Perception*, **8**, pp.125-134 (1979).