

TR-H-213

自律的画像観測機構を実現する 視覚系の数理的モデル化の研究

松井 利一

1997.3.31

ATR人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2 TEL: 0774-95-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan

Telephone: +81-774-95-1011

Fax : +81-774-95-1008

自律的画像観測機構を実現する
視覚系の数理的モデル化の研究

松井 利一

1997年3月



A Study on a New Mathematical Human Vision Modeling Characterized by an Autonomous Image Observing Mechanism

Toshikazu Matsui

Abstract

The human vision system has many excellent image processing functions, e.g., pattern recognition, image quality evaluation, and so on. At present, it is very difficult to develop pattern recognition systems or image quality evaluation systems that are equal in performance to the human vision system. A two-step approach can be expected to be very useful in solving this problem. The first step reveals spatio-temporal image processing strategies of the human vision system and formulates a vision model into which the image processing strategies are appropriately incorporated, in other words, develops an artificial vision system to respond in the same way as the actual vision system. The second step applies the formulated vision model to the development of the image processing systems. From the above point of view, many studies have tried to elucidate the visual information processing mechanisms. One attempt was to reveal the structure and function of the eye-optical system or retina in terms of physiological optics and the neural network structure of the visual cortex or retina from neurophysiological aspects. Another attempt was to experimentally measure perceptual response characteristics, e.g., the various kinds of contrast sensitivity characteristics, determined as global responses of the human vision system from psychophysics or experimental psychology aspects. However, no vision model has yet been developed that is capable of achieving the same adaptability or flexibility in image processing functions as the human vision system. Actually, previous studies have only been constructing vision models from partially elucidated human vision's image processing mechanisms, due to the deficiency of physiological and psychological findings which are indispensable for the modeling. The human vision's excellent image processing functions are thought to be produced by the systematic or autonomous operations of the entire human vision system consisting of the eye-optical system, retina and brain; not by partial image processing mechanisms. In modeling the human vision system, therefore, it is very important to aim at formulating a vision model which can theoretically simulate the systematically or autonomously operating mechanisms of the human vision system even if the mechanisms are not completely clarified.

What concrete mechanisms should the systematic or autonomous vision model have in order to serve in developing pattern recognition systems or image quality evaluation systems with a performance as high as the human vision system's? The human vision's image processing functions such as pattern recognition can be achieved after the images presented are appropriately projected onto the retina (image observation) and are correctly perceived; hence, the image observing and perceiving mechanisms can be regarded as fundamental mechanisms indispensable for displaying all of the human vision's excellent image processing functions. In addition, these two mechanisms are not subject to uniform image processing strategies but can change their own response characteristics adaptively depending on the presented image's properties or presented conditions in order to achieve the human vision's adaptability or flexibility. In order to develop a vision model with the same performance as the human vision system, therefore, it will be essential for the model to have at least two fundamental mechanisms: one is an autonomous image observing mechanism that can change its accommodation response characteristics

depending on the presented image's properties or presented conditions; the other is an adaptive image perceiving mechanism that can change its perceptual response characteristics depending on the presented image's properties or presented conditions.

From the above viewpoint, this research focuses on constructing a new mathematical model of the human vision system as a common framework for developing pattern recognition systems or image quality evaluation systems with the same performance as the human vision system, and is carried out based on the following four phases.

(1) The first phase mathematically formulates a model of the entire human vision system consisting of the eye-optical system, retina and brain based on findings from physiological optics or neurophysiology; the model's underlying mechanisms functions to autonomously observe the presented images and to adaptively change perceptual responses in the same way as the human vision system.

(2) The second phase discusses the model's effectiveness or validity by comparing already measured perceptual response characteristics (chiefly psychophysical results) with characteristics derived theoretically from the vision model. Namely, it is clarified as to whether or not the vision model can theoretically reproduce various kinds of perceptual responses that change adaptively depending on the presented image's properties or presented conditions.

(3) The third phase considers revealing, in terms of the vision model, how the various kinds of perceptual responses are produced.

(4) The fourth phase applies the vision model to the development of objective image quality evaluation methods, the resolution of problems in computer vision, and so on.

This paper consists of seven chapters and is summarized as follows.

Chapter 1 clarifies problems confronting the present image processing techniques such as pattern recognition or image quality evaluation, and offers perspectives on how to solve the problems. Namely, it discusses that a two-step approach is very useful for developing pattern recognition systems or image quality evaluation systems that are equal in performance to the human vision system: the first step formulates a vision model that works systematically or autonomously in the same way as the human vision system; the second step incorporates the formulated vision model into the image processing systems. Moreover, from several viewpoints, it is clarified that the systematic or autonomous vision model should have at least two basic mechanisms: one mechanism is used to autonomously observe the presented images, and the other is used to theoretically reproduce various kinds of perceptual responses in human vision.

Chapter 2 proposes a mathematical human vision model for still images based on the discussion of Chapter 1, and examines its effectiveness or validity. This model, which consists of an eye-optical system (image observing mechanism), a retina block, and a brain block, has been mathematically formulated as an adaptive focus adjustable feedback system that can be subjected to an essential image observing strategy of the human vision system where two kinds of mechanisms operate interdependently: one is to adaptively change the degree of blur of the retinal image based on the presented image's properties, and the other is to determine the size of the visual field based on the degree of blur of the retinal image. The model was formulated by applying Iijima's Figure Observation Theory which is well known as a basic theory in pattern recognition. The formulated model has two features. One is a mechanism that estimates the most suitable image observing states, i.e., the most suitable sets of blur and visual field, to view the presented image by locally maximizing a certain defined evaluation function under the interdependent relation between the blur and visual field, in other words, an autonomous image observing mechanism different in kind from the auto-focusing mechanisms utilized in most camera

systems. Note that with this image observing mechanism the model can have a multiple-channel structure just like in the multichannel theory of human vision. The other is a mechanism capable of quantitatively reproducing various kinds of perceptual response characteristics in human vision to still images by utilizing the maximum evaluation function values at the optimum image observing states, such as the difference in contrast sensitivity between sinusoidal and square waves, the compound sinusoidal wave's threshold contrast characteristics supporting the human vision's multichannel theory, and the effect of display sizes on contrast sensitivity. This suggests that the model can quantitatively simulate how the human vision's perceptual responses change depending on the presented image's properties and observing conditions.

Chapter 3 experimentally verifies one mechanism of the image observing strategy that adaptively changes the degree of blur of the retinal image based on the presented image's properties or observing conditions. In experiments, accommodation responses that were closely related to producing the retinal image's blur were measured by using an infrared optometer in order to examine effects of the presented image's spatial frequency and observer's viewpoint on an accommodation error equivalent to the retinal image's blur. As a result, it is demonstrated that an accommodation error to sinusoidal waves increases with lowering spatial frequency, and that an accommodation error to square waves at lower fundamental spatial frequencies becomes smaller in the case the observer's viewpoint is located on the edges rather than at the center points between the edges. Furthermore, it is suggested that the resting point might change according to the spatial frequency. For comparison, the effects of spatial frequency and viewpoint on accommodation error were theoretically derived from the vision model, confirming that the theoretical results agreed quantitatively well with the experimental results. This agreement can be thought to have verified at least the changing property of the retinal image's blur as the basic idea, i.e., the interdependent relation between blur and visual field, underlying the vision model.

Chapter 4 proposes two kinds of objective image quality evaluation methods by a pertinent application of the vision model. One is a sharpness evaluation method, which uses the model's maximum evaluation function values at the optimum image observing states as evaluation criteria. The other is a performance evaluation method of density gradation method based imaging systems such as CRTs, LCDs, thermal printers, and so on, and the evaluation criteria are C/V_n (Carrier to Visual noise ratio), N/V_n (Noise to Visual noise ratio), and C/N (Carrier to Noise ratio) designed according to visual noise characteristics that are derived theoretically from the model's optimum image observing states. The sharpness evaluation method can correctly simulate the experimental result that the sharpness value perceived by human vision increases and thereafter is saturated with an extension in the spatial frequency bandwidth of image transmitting systems, and can also explain the experimental relation between the optimum viewing distance and the spatial frequency bandwidth of the image transmitting systems. Meanwhile, the performance evaluation method can correctly explain our empirical fact that the imaging systems will have different performance evaluation values depending on which information of the density gradation images is paid attention to, i.e., the pixel structure of the images or the signal components modulated by many light and shade pixels, and where the observer's viewpoint is located. The above results suggest that the proposed methods can theoretically simulate human subjective image quality evaluation processes.

Chapter 5 extends the model for still images to a spatio-temporal human vision model capable of simulating spatio-temporal perceptual responses to temporally changing images as well as still images. The new model was formulated by two stages. The first stage is an extension for analyzing periodically changing images such as flickering or drifting patterns, and incorporates the spatio-temporal frequency characteristics of the human vision's X- and Y-channels originating from the respective X- and Y-retinal

ganglion cells, and the spatial characteristics of the W-retinal ganglion cells into the previous model for still images; consequently, the new model's X- and Y-channels have functions to extract mainly spatial differences and temporal changes in luminance from the presented images, respectively, in the same way as the human vision system. It is demonstrated that the first-stage spatio-temporal model can reproduce experimentally measured perceptual responses, e.g., the spatio-temporal frequency characteristics of contrast sensitivity, the spatial frequency characteristics of the optimum drifting speed, and so on, to flickering and drifting images. The second stage is a generalization for analyzing all types of temporally changing images, and incorporates two kinds of temporal impulse responses of the X- and Y-channels and the dynamics of the accommodation mechanism into the first-stage model. The two impulse responses were estimated from the temporal frequency characteristics of the two channels by using the Hilbert transform. As an appropriate application, it is demonstrated that the second-stage spatio-temporal model can theoretically reproduce experimentally measured perceptual responses, e.g., the spatial frequency characteristics of contrast sensitivity or simple reaction time, and the relationship between the threshold contrast and exposure duration, to flashed sinusoidal waves. The above results suggest that the spatio-temporal vision model is very effective in simulating spatio-temporal perceptual responses to temporally changing images.

Chapter 6 applies the spatio-temporal model to developing a new motion-detection model capable of not only reproducing the human vision's perceptual responses to motion images but also estimating motion velocities. The motion-detection model was an application to computer vision, and was formulated by incorporating a motion detecting mechanism into the spatio-temporal model. The embedded motion detecting mechanism transforms the output signal of the model's Y-channel, which is well suited for chiefly extracting temporal changes in luminance from the presented images, into a spatio-temporal analytic signal; the real part of the analytic signal is used for calculating the motion impression strength that serves to predict perceptual responses to motion images and to determine the motion direction, and the phase of the analytic signal is used for estimating the motion speed. Results of pertinent applications to the analysis of compound waves consisting of three drifting sinusoidal waves with different spatial frequencies and different velocities make clear that the motion-detection model can reproduce perceptual responses, for example, the two-fold difference in contrast sensitivity between flickering and drifting sinusoidal waves or three kinds of motion appearances caused by what component sinusoidal wave the observers chiefly pay attention to, to such images and that it can exactly estimate each component wave's motion velocity.

Finally, chapter 7 summarizes the results of this study and discusses perspectives on near-future work in this study.

The originality or novelty of this study lies in having noticed an essential strategy for observing presented images in the human vision system, i.e., the interdependent relation between a retinal image's blur and the visual field, and having formulated a new mathematical model of the human vision system consisting of the eye-optical system, retina and brain in terms of the image observing strategy. Consequently, the newly-developed vision model can have both an autonomous image observing mechanism different in kind from the auto-focusing mechanism of camera systems and the ability to theoretically reproduce various kinds of spatio-temporal perceptual responses in human vision, indicating that the initial purpose or perspective of this study was achieved quite well. However, judging from the research goal of developing pattern recognition systems or image quality evaluation systems that are equal in performance to the human vision system, the current research status can be regarded as being at a stage where a means or framework to the goal has been arranged. More progress in the research is still needed to reach the goal.

2.6.2	空間周波数弁別能力を考慮したコントラスト感度と導出法	41
2.6.3	コントラスト感度空間周波数特性の実測と理論の比較	45
2.6.3.1	感度計算法及び周波数統合範囲の影響	45
2.6.3.2	感度特性に於ける画面サイズの影響	48
2.6.4	考察	51
2.7	むすび	51
3.	眼の焦点調節特性の実測による視覚モデルの正当性の検討	55
3.1	まえがき	56
3.2	実験装置の構成	56
3.3	実験及び実験結果	58
3.3.1	目的	58
3.3.2	空間周波数と焦点調節応答の関係	58
3.3.3	視点位置と焦点調節応答の関係	62
3.3.4	考察	64
3.3.4.1	焦点調節誤差の導出	64
3.3.4.2	調節安静位の変動について	65
3.4	視覚モデルによる焦点調節誤差特性の導出	66
3.4.1	焦点調節誤差特性の理論的導出	66
3.4.2	焦点調節誤差特性の実測と理論の比較	68
3.5	むすび	70
4.	視覚モデルの応用による新しい画質評価法	71
4.1	まえがき	72
4.2	鮮鋭さ評価法	72
4.2.1	視覚モデルに於ける鮮鋭さの評価尺度	73
4.2.2	帯域制限方形波に対する評価関数の導出	74
4.2.3	帯域制限画像に対する視覚モデルの基本的応答特性	76
4.2.4	帯域幅と鮮鋭さの関係に於ける実測と理論の比較	79
4.2.5	最適視距離の実測と理論の比較	82
4.3	濃度階調型 (PAM) 画像表示方式の性能評価法	85

4.3.1	評価尺度としてのCV _n 比、NV _n 比	85
4.3.2	PAM画像表示方式の数式表現	86
4.3.2.1	PAM正弦波画像とそのスペクトル表現	86
4.3.2.2	振幅値量子化特性の導入	89
4.3.2.3	PAM表示方式正弦波形の空間周波数構造	89
4.3.3	PAM正弦波に対する視覚モデル評価関数の導出	91
4.3.4	視覚ノイズとCV _n 比、NV _n 比の導出	91
4.3.5	PAM正弦波に対する評価結果	93
4.3.5.1	有効画素幅d _T と画素幅T _w の比 (duty)の影響	93
4.3.5.2	量子化の影響	99
4.3.5.2	画素幅T _w の影響	102
4.4	むすび	103
5.	動画像用視覚モデル (時空間視覚モデル) の構築	105
5.1	まえがき	106
5.2	時空間視覚モデルの定式化	106
5.2.1	視覚神経系の性質を導入したモデル化	107
5.2.2	時空間視覚モデルの数式表現	110
5.3	フリッカー正弦波に対する時空間視覚知覚応答特性	111
5.3.1	評価関数の導出	111
5.3.2	時空間視覚モデルの観測者適応化	113
5.3.3	時空間周波数特性に於ける実測と理論の比較	115
5.3.3.1	Sine typeフリッカー正弦波	115
5.3.3.2	Alternate, On-Off typeフリッカー正弦波	117
5.4	ドリフト正弦波に対する時空間視覚知覚応答特性	120
5.4.1	評価関数の導出	120
5.4.2	コントラスト感度の時間応答特性	121
5.4.3	コントラスト感度空間周波数特性の実測と理論の比較	122
5.4.4	最適ドリフト速度の実測と理論の比較	124
5.4.5	ドリフト方形波に対する感度特性の理論的予測	126
5.5	瞬間提示画像 (非定常画像) に対する時空間視覚知覚応答特性	129

5.5.1	ヒルベルト変換を用いた視覚系時間インパルス応答の推定	129
5.5.1.1	ヒルベルト変換による視覚系位相特性の推定	129
5.5.1.2	視覚系時間インパルス応答の計算	130
5.5.2	非定常時空間視覚モデルへの拡張	133
5.5.2.1	評価関数の導出	133
5.5.2.2	観測状態動特性の定式化	134
5.5.2.3	最適観測状態の推定手順	136
5.5.3	コントラスト閾・感度特性の実測と理論の比較	136
5.5.3.1	視覚モデルの基本的時間応答特性	137
5.5.3.2	コントラスト閾と画像提示時間の関係	139
5.5.3.3	コントラスト感度空間周波数特性	141
5.5.4	反応(知覚)時間特性の実測と理論の比較	142
5.5.4.1	観測状態動特性の影響	143
5.5.4.2	知覚時間の空間周波数特性	145
5.5.4.3	反応時間の空間周波数特性	146
5.5.5	考察(反応時間特性の解釈について)	148
5.6	むすび	149
6.	運動検出の為の時空間視覚モデル ～ 運動検出モデルへの拡張 ～	151
6.1	まえがき	152
6.2	運動検出モデルの定式化	152
6.2.1	解析信号表現を用いた運動検出機構	152
6.2.2	新しい運動検出モデルの定式化	154
6.3	複合ドリフト正弦波に対する運動検出特性	158
6.3.1	評価関数、運動印象、速度の導出	158
6.3.2	フリッカーとドリフト正弦波の感度特性の違いの証明	161
6.3.3	多重運動検出特性の実測と理論の比較	162
6.3.3.1	実測による多重運動見え方特性	162
6.3.3.2	計算結果との比較	165
6.3.3.3	正確な運動速度の検出	173
6.4	むすび	175

7. 結論と展望	177
参考文献	183
著者業績	189

第1章

序論

1.1 研究の背景

静止画像や動画像に対する画像品質の評価や動き検出、パターン認識・理解などは人間の視覚系が最も得意とする機能であり、視覚系と同等、またはそれ以上の性能を有する画質評価装置やパターン認識装置を工学的手法により実現するのは非常に困難である。この課題を解決するには、視覚系の柔軟で適応的な画像処理機能を参考にすること、即ち視覚系の行っている時空間的な画像処理戦略を画質評価手法やパターン認識手法に積極的に取り入れることが1つの有効な解決策となり得る。このような観点から視覚情報処理機構を解明しようとする多くの研究がなされて来た。その1つの流れは、生理光学や神経生理学的手法に基づき局所的側面から見た場合の視覚系の構造や神経細胞の結線構造などを明らかにしようとする研究であり、もう1つは心理物理学や実験心理学的手法に基づき視覚系を1つのシステムとして見た場合の全体的な視覚特性や認識特性に関する研究である。しかし、視覚系の局所的な構造と全体的な視覚特性・認識特性との間の関係を結び付けることを目指した視覚系のモデル化の研究に関しては必ずしも十分な成果が出ているとは言い難い状況であり、視覚系の柔軟で適応的な画像処理機能と同様な機能を発揮する視覚系のモデルはいまだに実現されてはいない。その1つの原因としては、視覚系のモデル化に必要な生理学および心理学的データがまだ十分に整っていない為に、解明されている部分的な視覚系の情報処理機構のみをモデル化していたからであると考えられる。視覚系の優れた機能は、部分的な視覚情報処理機構によって達成されるのではなく、眼球光学系（画像観測機構）や網膜や脳での画像処理を含めた視覚系全体が組織的・自律的に動作する結果生じるものと考えられる。従って視覚系をモデル化するに当っては、未解明の部分があったとしても、視覚系全体を1つの自律的システムとしてモデル化することを目指すことが重要と考えられる。視覚系のモデル化の研究には、モデルの立場から逆に視覚系の情報処理機構の本質の解明に貢献するという役割もあるが、この役割を果たす為にも視覚系全体を1つのシステムとしてモデル化することが重要であろう。

では視覚系の自律的モデルとして具体的にどのような機能を備えた視覚モデルを構築すれば

実際の視覚系と同等、またはそれ以上の機能を発揮する画質評価法やパターン認識法の開発に役立つのだろうか。視覚系の高度な画像処理機能（例えば認識機能）は、提示画像が網膜上に適切に投影（焦点調節機構に基づく画像観測）され、そして正しく知覚されていることが前提条件として必要不可欠であり、この画像観測機能と知覚機能は視覚系に於ける全ての画像処理機能に共通した基本的な機能であると考えられる。さらに、これらの2つの基本的機能は画一的な処理により達成されているのではなく、提示画像に依存して適応的にその画像処理特性を変化させることで視覚系の自律性・柔軟性が実現されるものと考えられる。従って、定式化されるべき視覚系の自律的モデルとしては、提示画像の性質・種類や提示条件に依存して画像観測の際の焦点調節特性が適応的に変化する現象（自律的画像観測機構）と視覚応答特性が適応的に変化する現象の2つを理論的に再現する能力を兼ね備えることが最低限度必要であろうと考えられる。この点に関していくつかの観点から具体的に考察する。

(1) 画質評価の観点から

画質評価法には、主観評価法と客観評価法とがある。主観評価法は人間に直接画質の程度を判断させる方法なので信頼性のある評価が行える。この為、主観評価法はNTSCテレビジョン方式やHDTV方式の設計、あるいはプリンターや複写機などの画像表示システムの設計などに広く利用されてきたが、評価結果を定量的に表現しにくく観察条件や評価条件によって評価結果が変動したり長い時間と労力を必要とするなどの欠点もある。一方、客観評価法は何らかの物理的測度を用いて画質の程度を表現する方法なので評価結果を定量的に表現するのは得意であるが、必ずしも人間が判断した評価結果と一致するとは限らないと言う欠点がある。ハードコピー（写真）やソフトコピー（テレビジョン）に拘らず、画像は人間の視覚に直接訴えてくるものであるから、これらの画像システムの良し悪しを判断したり合理的設計や画質改善を行なうためには、人間が主観的に行なっている画像品質の判断基準を何らかの数値を用いて客観的に表現する必要があり、この課題は画像技術に於ける共通の基盤技術となっている。

人間の主観的判断と一致し難いと言う客観評価法の欠点が生じる原因としては、画像は視覚系を通してはじめて人間にとって意味のある情報となるにもかかわらず、従来の客観評価法では視覚特性が充分考慮されていないことが考えられる。例えば、視覚系の正弦波空間周波数特性（コントラスト感度特性）を視覚系の伝達関数として客観評価法に導入するケースが多いが、視覚系の空間周波数特性は提示画像の性質や提示条件に依存して適応的に変化する事が知られており[1][2]、この適応的な変化特性をも考慮しない限り主観評価結果と良く一致する客観評価法とはなり得ない。従って、主観評価法と良く対応のとれる客観評価法を開発するには、

各種の視覚特性が理論的に再現できる視覚モデル、即ち視覚系の知覚特性が提示画像の性質に依存して適応的に変化する特性が理論的にシミュレートできる視覚系の数理モデルを構築し、客観評価法の中に導入することが必要不可欠である。また、その為の新しい客観評価法も作る必要がある。

(2) 視覚特性の統一的再現の観点から

従来から数多くの視覚特性がコントラスト感度の時空間周波数応答特性として心理物理学的に実測されてきた。コントラスト感度時空間周波数応答特性は画像システムの性質を記述するのにしばしば使われるMTF (Modulation Transfer Function)と同一の考え方で実測された特性である為、視覚系全体の機能を定量的かつシステム論的に表現するのに有効であるばかりでなく、画質評価法へも導入し易く、ヒューマンインターフェースの設計などへの工学的応用にも適している。しかし、これらのコントラスト感度時空間周波数特性は提示画像の性質・種類や提示条件が変化すると別の視覚特性へと適応的に変化してしまう特徴（提示画像と時空間周波数特性が一対一対応になっている）を有しており[1][2]、1つの視覚系に対して数多くの視覚特性が実測される結果となる。しかも、各々のコントラスト感度時空間周波数特性の間の関係についてはほとんど議論されていない。このような数多くの視覚特性は1つの視覚系から出力されている以上、各々の視覚特性間には相互に密接な関係が存在しているはずである。即ち、視覚特性の面から視覚系を記述することを考えると、実測されている全ての視覚特性が視覚系の記述に必要なのではなく、その中のいくつかの視覚特性のみ（独立の視覚特性）で十分であり、その他の視覚特性は独立の視覚特性を用いて導き出せる従属的な視覚特性と見ることが可能である。この様に、各種の視覚特性間の関係を明確にし、視覚特性を体系的・統一的に整理する為には、提示画像の性質・種類や提示条件に依存して視覚特性が適応的に変化する現象が理論的に再現可能な数理モデル（視覚モデル）を構築する研究が重要であると考えられる。

また、視覚系の焦点調節特性は、画像までの距離（視距離）に応じて焦点調節状態が変化するだけでなく、視距離一定の状態でも提示画像の性質（空間周波数の違い等）に依存して焦点調節状態が適応的に変化している（自律的画像観測）ことが知られている[3]。従来の視覚研究に於いては焦点調節機構のみの特性を明らかにする研究は独立して行われてきたが、視覚系全体の中に於ける他の視覚機能との関わり、例えば焦点調節特性の適応的変化が視覚系全体の知覚特性の形成にどの様に貢献しているかに関してはほとんど議論されなかった。視覚特性として実測されているコントラスト感度の時空間周波数特性は網膜部のみ、あるいは脳だけを取り出した形で実測されているのではなく、眼球光学系（画像観測部）に於ける焦点調節特性と網

膜特性、そして脳の機能までを含めた視覚系全体の知覚特性として実測されていることを考慮すると、焦点調節特性と知覚特性の間には何らかの密接な関係が存在していると考えた方が自然である。この焦点調節特性と知覚特性の関係の存在を明確にするには、焦点調節特性の実測を単に繰り返すよりも、視覚系全体（眼球光学系、網膜、脳）を1つの自律システムとしてモデル化した視覚モデルを用いて焦点調節特性と知覚特性の関係を理論的に明らかにした後、この結果を基にした新たな焦点調節実験を考案することも必要であろう。この様な観点からも、視覚系全体（眼球光学系、網膜、脳）を1つの自律システムとしてモデル化する研究が重要であると考えられる。

(3) パターン認識、コンピュータビジョンの観点から

従来から多くのパターン認識理論・装置の研究開発が行われ、郵便番号読み取り装置などのOCR (Optical Character Reader) 技術が一部実用化されてはいるが、人間のパターン認識能力に匹敵するパターン認識装置の実現にはまだ多くの時間を要するものと思われる。その原因について視覚系のパターン認識機構と対比しながら考えて見る。パターン認識装置は大別すると、提示画像の観測を行う画像入力部、ノイズ除去や正規化などを行う前処理部、特徴抽出や識別を行う認識処理部から構成されている。一方、パターン認識装置と言う観点から視覚系の機構を大別すると、提示画像の観測を行う画像観測機構、感覚・知覚レベルの処理を行う知覚機構、認識・情緒レベルの処理を行う認識機構に分けることが可能である。視覚系の場合には、知覚が存在しなければ認識は不可能であるから、認識機構は知覚された信号を基にしてパターン認識を行うことになり、視覚系に於いては知覚機構が認識性能に大きく影響を及ぼしている可能性が高い。さらに、提示画像の性質や提示条件に依存して知覚応答特性が適応的に変化することから推測すると、認識機構以前の画像処理機構（画像観測機構と知覚機構）は視覚の問題をできるだけ解きやすくする為の、具体的には提示画像をできるだけ認識しやすい形への最適変換を行う為の一種の前処理部としての役割を担っていること、即ち観測機構、知覚機構、認識機構は認識という1つの目的に向かって組織的かつ自律的に動作していると考えられる。しかし、従来のパターン認識装置では画像入力と前処理部と認識部は別々に機能し、かつ画一的な処理しか行えない場合が多く、これが従来のパターン認識システムの抱える1つの欠点であったと考えられる。目的達成の為に全体が自律的に動作する認識システムの研究は最近の能動視覚 (Active Vision) の研究[4][5][6]に見られる様になってはいるが、今後の研究に待つところが大きい。以上の様に、視覚系に匹敵する認識機能を実現するには、認識機構のモデル化のみに注目するのではなく、それ以上に提示画像の性質に依存して適応的に特性を変化させる画像観測

機構および知覚機構の数理的モデル化を行い、何をどの様に観測し、どの様な知覚応答を出力するかを理論的に議論できる枠組（全体が組織的かつ自律的に動作する視覚系の数理モデル）を構築することが1つの有効な解決策になると考えられる。

特に自律性の実現に関して考えて見ると、これにはシステムが知覚あるいは認識を行なうのに都合の良い様に画像を最適に観測する機能が重要な役割を果たしていると考えられる。実際の視覚系の焦点調節機構に於いても、カメラに搭載されている単なる自動焦点調節機構とは異なり、画像までの距離（視距離）に応じて焦点調節状態が変化するだけでなく、視距離一定の状態でも提示画像の性質に依存して焦点調節状態が適応的に変化しており[3]、この焦点調節特性は視覚系が知覚あるいは認識を最適に行なう為の画像観測戦略と考えられる。しかしながら、従来研究に於いては、各種のパターン認識システムやコンピュータビジョンなどの純工学的視覚システムから計算論的視覚(Computational Vision)、計算論的神経科学(Computational Neuroscience)などの視覚系の機能を考慮に入れた視覚システムに至るまで、画像観測機構には特別関心が払われなかった。即ち、従来研究では、網膜上に完全に焦点の合った画像が結像させられているという前提条件（画一的画像観測機構）の下でその後のいろいろな計算理論が組み立てられる場合がほとんどであり、この前提条件、即ち画一的画像観測機構がシステムの自律性や柔軟性を疎外する大きな要因になっているものと考えられる。従って、視覚系のモデルの自律性を実現する為には、実際の焦点調節機構の特性を十分に考慮した数理モデルを構築することが重要であろう。

1.2 本研究の目的

視覚系と同等、あるいは視覚系以上の性能を発揮する客観的画質評価法やパターン認識装置を開発する為には、組織的かつ自律的に動作する視覚系の機能、特に自律的画像観測機構と知覚機構を数理的にモデル化し、この数理モデルを利用して新しい客観的画質評価法やパターン認識理論を構築することが1つの有効な解決策になり得ることをいくつかの観点から検討してきた。上記の観点から、本研究では、新しい客観的画質評価法やパターン認識理論を開発する為の共通基盤として必要となる視覚系の数理モデルを構築することを主目的とし、次の4点を具体的な目的とした。

- (1) 生理光学、および神経生理学的知見を基に、視覚系全体（眼球光学系、網膜、脳）を1つのシステムとして数理的にモデル化する。具体的には、自律的画像観測と視覚系の各種知覚特性の再現を可能とする数理的視覚モデル（知覚モデル）を定式化する。
- (2) 構築された視覚モデルを用いて時空間視知覚応答特性を理論的に再現し、実測されて

いる実験結果（主に心理物理学データ）との比較を行うことにより、本視覚モデルの有効性・正当性を検証する。即ち、提示画像の性質や提示条件に依存して適応的に変化する知覚特性が本視覚モデルから理論的に再現可能かどうかを検証する。

- (3) 視覚モデルから理論的に得られた視知覚応答特性から、まだ良く分かっていない視覚系の画像処理機構の詳細を明らかにする（予測）。
- (4) 視覚モデルを応用した画質評価法の開発や、コンピュータビジョンへの応用可能性を検討する。

視覚系の画像処理機構を解明する為の研究方法としては、(1)生理光学、神経生理学的な側面、すなわち視覚系のハードウェアに関する研究、(2)実験心理学的な側面から視覚系全体の知覚特性を明らかにする研究、(3)視覚系の数理的モデルを構築し、モデルの立場から逆に視覚系の画像処理機構の本質を議論する研究の3つの方法がある。本研究では、第1番目の側面から得られた生理光学、神経生理学的知見を基にして視覚系の数理的モデルを構築する段階と、第2番目の心理実験による実測結果と視覚モデルから得られる理論的結果との一致性を比較することにより視覚モデルの有効性・正当性の検証を行う段階の2つを繰り返す研究方法を採用することになる。従って、生理光学や神経生理学からの知見が無い場合には仮説の導入によりモデル化を進め、モデルの正当性が検証されるまで仮説の修正を行う。また、必要であれば実験を行い仮説の正当性の検証も行なう。

1.3 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、静止画像を対象にして具体的な視覚モデルの定式化を試み、その有効性・正当性の検証を行う。モデル化に於いては、「視覚系の画像観測機構は、提示画像の性質や提示条件に依存して網膜像のボケの程度および視野の広さを適応的に変化させる」と言う視覚系の基本現象に着目し、これを中心にして視覚系全体を図形観測理論を応用して数理的に定式化する。このような定式化により、提示画像を観測するのに最適なボケ量と視野の広さを推定すること（自律的画像観測）が可能になると同時に、本視覚モデルのコントラスト感度空間周波数特性がマルチチャネル構造となり、視覚系のマルチチャネル理論と同様の特性を有する視覚モデルの実現が可能になることを示す。そして、正弦波と方形波形に対するコントラスト感度特性の違い、複合正弦波に対するコントラスト閾値特性（視覚系のマルチチャネル理論の証拠と見なされている実験結果）、表示面サイズを制限した正弦波に対するコントラスト感度特性を本モデルから理論的に再現し実測結果と比較検討することにより、本視覚モデルが提示画像の性質

や提示条件に依存して適応的に変化する実際の視覚特性を理論的に再現可能かどうか、即ち本視覚モデルの有効性・正当性を検証する。

第3章では、「提示画像の性質や提示条件に依存して網膜像のボケの程度が変化する」と言う本視覚モデルの基本的考え方の正当性について検討する。具体的には、網膜像のボケに直接影響を及ぼす焦点調節状態を赤外線オプトメータを用いて実測し、提示画像の空間周波数と焦点調節誤差の関係、及び視点位置と焦点調節応答との関係を明らかにすることを試みる。そして、本視覚モデルから理論的に導出される焦点調節誤差の空間周波数特性、視点位置依存特性とを比較をし、本視覚モデルの基本的考え方の正しさについて検討する。

第4章では、静止画像用視覚モデルの画質評価法への応用例として、鮮鋭さ（主観的鮮鋭感）評価と画像表示システム（CRTや液晶ディスプレイの様な濃度階調型画像表示装置）の性能評価に関する新しい方法を提案し、その有効性について検討する。鮮鋭さ（主観的鮮鋭感）評価では、視覚モデルの評価関数値が鮮鋭感と良く対応すると言う性質を利用する。一方、画像表示システムの性能評価では、パルス振幅変調画像(Pulse Amplitude Modulated Images)として単純化表現された濃度階調型画像表示装置からの出力画像を観測した時に得られる視覚モデルの最適観測状態から視覚ノイズを導出し、この視覚ノイズを基準にして視覚系が知覚できる信号成分（ $C V_n$ 比）とノイズ成分（ $N V_n$ 比）を評価尺度として計算する。そして、これらの評価尺度の特性と実際の見え方との比較を行い、これらの評価法の有効性を検討する。

第5章では、静止画像だけでなく動画像に対する視知覚応答特性の再現も可能とする為に、静止画像用視覚モデルを時空間視覚モデルに拡張する。本時空間視覚モデルの定式化では、静止画像用視覚モデルに網膜神経節細胞（X細胞、Y細胞）から脳に至る2種類の画像信号処理経路の性質と焦点調節機構の動的変化特性を組み込むことで実現されている。前者の性質により本時空間視覚モデルは、主に形を知覚する機能を担当するXチャンネルと主に動きを知覚する機能を担当するYチャンネルの2チャンネル構成となり、後者の特性は非定常時間変化パターンを解析する際に重要となる。そして、フリッカーやドリフト正弦波などの定常的時間変化パターンと瞬間提示正弦波などの非定常時間変化パターンに対する本時空間視覚モデルの理論的視知覚応答特性（コントラスト感度時空間周波数特性、コントラスト閾値特性、知覚時間・反応時間特性など）と実測結果との比較から、本時空間視覚モデルの有効性を検証する。

第6章では、時空間視覚モデルのコンピュータビジョンへの1つの応用例として運動検出モデルへの拡張を行い、時空間的な視知覚応答特性の理論的再現と運動検出の両方を可能とする視覚モデルの実現を目指す。拡張方法としては、時空間視覚モデルの動き知覚チャンネル(Y-channel)の信号を時空間的な解析信号として表現し、解析信号の実数部から運動方向の検出

に貢献する運動印象が、位相から運動の速さが計算できる構成にしてある。そして、本運動検出モデルからフリッカー正弦波とドリフト正弦波に対して実測されている2倍の感度差の存在を理論的に証明し、多重ドリフト正弦波に対する本運動検出モデルの応答特性と実際の見え方特性との一致性の検証を行い、本運動検出モデルの有効性を検討する。

第7章では、本研究で得られた成果のまとめを行い、今後の展望について述べる。

第2章

静止画像用視覚モデルの構築

あらまし

視覚系では提示画像に含まれる空間周波数に依存して網膜像のボケ量と視野が相互依存的に変化するという考え（画像観測に於ける基本現象）を基にして静止画像用の視覚モデルを構築する。本視覚モデルの基本的特徴は、提示画像を観測するのに最も適した観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が理論的に計算できる機構（自律的画像観測）が備わっていることと、視覚モデルの正弦波空間周波数特性が観測状態と1対1に対応する数多くの狭帯域フィルタ群の集合で構成されると同時に、このフィルタ群の包絡線が正弦波コントラスト感度空間周波数特性の実測値と一致すること（マルチチャンネル構造）である。本視覚モデルからは、正弦波と矩形波に対するコントラスト感度特性の違い、複合正弦波形に対する見え方特性（視覚系のマルチチャンネル理論を示唆する特性）、コントラスト感度特性に及ぼす表示画面サイズの影響などが理論的に説明でき、提示画像の性質や提示条件に依存して視覚系の視知覚応答特性が適応的に変化する様子を正確かつ定量的に再現できること、即ち本視覚モデルの有効性・正当性が示せた。

2.1 まえがき

第1章では、視覚系と同等またはそれ以上の性能を有する画質評価法やパターン認識装置を開発するには、提示画像の性質や提示条件に依存して適応的に変化する視覚特性（知覚特性）が理論的に再現可能な視覚系の数理モデルを構築し、次にこの視覚モデルを画質評価法やパターン認識装置に組み込むことが1つの有効な解決策になり得ることを検討した。

以上の観点から本章では、静止画像を対象とした場合の視覚系知覚機構の数理モデルの定式化を行ない、本視覚モデルの正当性の検証を行う。モデル化に際しては、特に視覚系の画像観測機構に於ける基本現象に着目した。この基本現象は我々が何か物を見る場合にたびたび経験する現象であり、以下の2点に要約される。(1) 画像の細かい構造（高い空間周波数構造）に注目すると細かい構造ははっきり見えるが、その領域は狭い範囲に抑えられてしまい、周辺部分はボケて見える為微細構造ははっきりとは見えなくなる。(2) 画像の大まかな構造（低い空間周波数構造）に注目すると細かい構造は見えにくくなるが、広い範囲にわたって大まかな画像構造が認識できる。この視覚現象は、視覚系の画像観測機構が提示画像の性質に依存した量のボケを働かせ、さらに特に注目している画像の領域即ち視野を制限している為に生じると考えられる。本論文の静止画像用視覚モデルは、この画像観測に於ける基本現象をパターン認識基礎理論として知られる図形観測理論[7]を応用することにより定式化した数理的モデルであり、提示画像を観測するのに最も適した観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が理論的に計算できる機構が備わっている。従来、画像観測の為のパラメータを推定する試みとしては、図形観測理論での全図象量の停留化という評価基準から視点位置と視野の最適解を求める方法[7]が提案されているが、この方法ではボケ量の最適値が得られない。また、ボケ量に対しても最適値が存在する様に、評価関数として観測図形のSN比（観測装置から得られた観測画像の交流成分のノルムの2乗と光電変換時の光のゆらぎによるノイズ成分のノルムの2乗の比）を定義し、SN比の最大化によりボケ量の最適値を推定する方法[8]の提案もあるが、視覚特性の再現性能に関しては不十分さが残る。これらの画像観測パラメータ推定法では、ボケ量と視野とが独立に選択できる様になっているが、実際の人間の視覚系に於てはボケ量と視野は独立ではなく、ある関係式を満たしていると考えられる。この関係式は画像観測に於ける一種の不確定性の関係とも見なせる。この観点から、本視覚モデルでは、ボケ量と視野が満たす関係式を導出し、この関係式を拘束条件とする評価関数（観測画像の交流成分及び直流成分のノルムの2乗の比と定義する）の極大化により最適な観測状態を推定する方法を提案することで、本視覚モデルが、従来不十分であった実際の視覚特性との整合性を格段に向上させ得ることを示す。

以下では、まず視覚系の画像観測プロセスについて考察した後、この画像観測プロセスに従

い図形観測理論を応用して視覚モデルの定式化を行う（2節）。次に、正弦波形に対する視覚モデルの応答特性を検討することによりボケ量と視野が満たす関係式を理論的に導出できること、及びこのボケ量と視野の関係式から視覚系空間周波数特性のマルチチャネル構造が導き出せることを示す（3節）。そして、本提案の視覚モデルで矩形波形を観測した結果得られるコントラスト感度特性と実測結果とが良く一致すること（4節）、複合正弦波に対する見え方特性やコントラスト閾値特性がばらつきも含めて理論的に再現できること（5節）、さらに表示画面サイズが感度特性に及ぼす影響なども視覚モデルのわずかな拡張で再現できること（6節）を通して、本視覚モデルの視覚特性再現能力を明らかにする。

2.2 視覚系のモデル化

2.2.1 視覚系の画像観測プロセス

視覚系の画像観測プロセスは、眼球光学系と網膜と脳から構成されるフィードバックループシステムとして図2.1のブロック図の様に単純化して考えることができる。提示画像はまず眼球光学系により網膜上に結像した後、網膜の視細胞で光電変換され、生体の電気信号による画像に変換される。網膜上に結像された像（網膜像）は、焦点調節が完璧になされた像ではなく、提示画像に含まれる空間周波数に依存した量の焦点調節誤差を含んでおり、一般的にはボケた像であることが報告されている[3][9]。また、光電変換素子として働く視細胞（錐体）^{注1)}が網膜中心部（中心窩）に近い程その密度が高くなり、網膜中心窩から離れるに従って密度が低くなる不均一分布になっている[1][3]ことを考慮すると、視覚系は網膜像全体を平等に観測しているのではなく、光軸を中心とする限定されたある領域を集中的に観測している、即ち視野を生じさせていると考えられる。人が物を見るとき、提示画像の微細構造に注目すると鮮明に見える範囲が狭まると同時にその周辺領域がボケて微細構造が見えなくなり、画像の大まかな構造に注目すると画像の微細構造がボケて良く見えなくなる現象を体験するが、この現象は眼球光学系でのボケと視細胞密度分布の不均一により引き起こされる視野との相互作用により生じていると判断できる。即ち、空間周波数の高い画像を見るときはボケ量の少ないことが必要であり、その為に視細胞密度の高い網膜中心窩で観測しようとするので、はっきり見える領域（視野）は狭くなるが、空間周波数の低い画像を見るときにはボケ量は多くなっても良く、

注1) 視細胞には錐体と桿体が存在するが、十分に明るい照明環境では錐体のみ動作していると見なして良いので、ここでは錐体のみを考慮している。

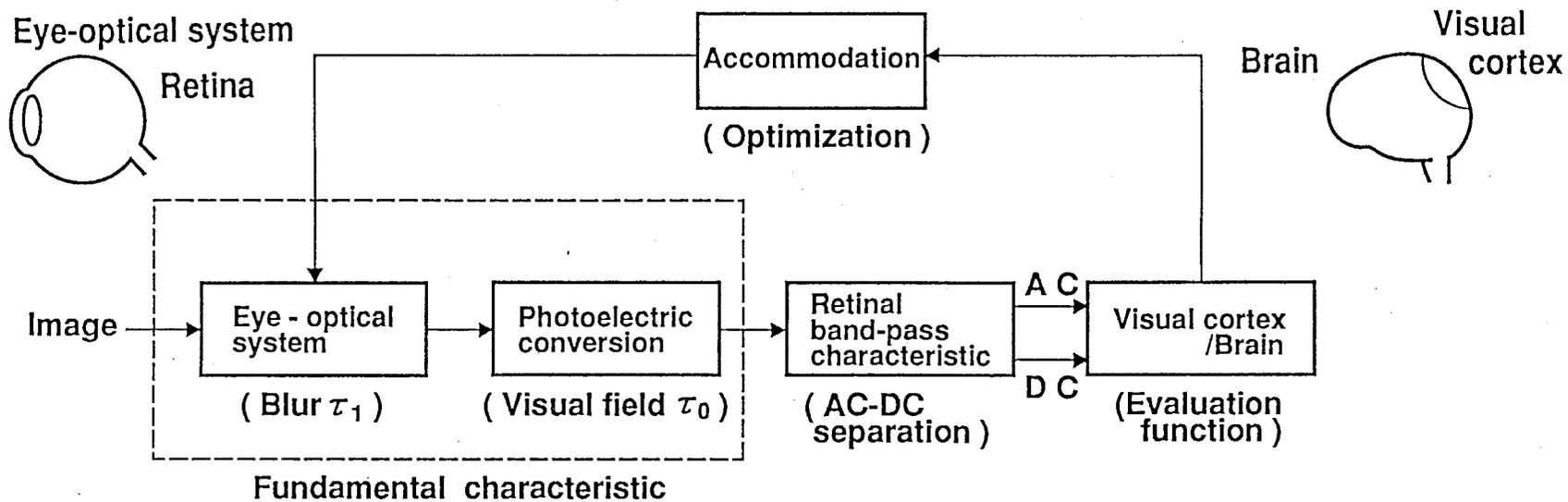


図 2.1 静止画像用視覚モデルのブロック図

Fig. 2.1 Block diagram of the proposed human vision model for still images.

視細胞密度の低い周辺部に於いても観測できるので視野も広がると考えられ、視覚系の観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が提示画像の性質に依存して変化すると同時に、視野の大きさの増減がボケ量の増減と連動し、両者が1対1に対応する関係であることが予想できる。提示画像の空間周波数に依存してボケ量が変わることは実験により確認されているが[3][9]、視野との相互依存性については経験的事実のみで明確な実測結果が示されていないので、ここでは次の様な仮説として扱う。

（仮説1）

視覚系が画像観測を行なう場合、ボケ量と視野の大きさは1対1に対応し、視野の大きさの増減はボケ量の増減と連動し、次の関数 V で表現される。

$$V(\tau_0, \tau_1) = 0 \quad (2.1)$$

但し、 τ_1 はボケのパラメータ、 τ_0 は視野のパラメータを表す。

次に、光電変換された画像信号は網膜部（光電変換部を除く）での処理を受ける。網膜特性が正弦波形に対して実測されたコントラスト感度空間周波数特性として知られている帯域通過フィルタであると考え、画像信号はこのフィルタにより交流信号成分と直流信号成分とに分けられることになる。人間にとって真に意味のある情報は交流信号成分であることを考慮すると、視覚系全体から見た網膜の役割は、画像信号の中から意味のある情報（交流信号成分）を抽出する前処理部と言える。網膜部で分離された両信号成分は、各々別径路を経て視覚領へ伝送され、脳では画像として認識される一方に於て、何らかの評価基準に基づくある値（一種の感覚量と考えられる）の計算が行なわれ、この値を用いて現在の観測状態が提示画像の観測に最適かどうか判断され（例えば、極値探索）、最適でない場合は焦点調節系を通して眼球光学系の焦点距離が変えられ、この画像観測プロセスは最適状態になるまで繰り返される。

2.2.2 図形観測理論を用いた視覚モデルの定式化

視覚系の画像観測プロセス（図2.1）を、図形観測理論を用いて定式化して行く。図形観測理論では、原画像 $f(\mathbf{r})$ をボケ量 τ_1 だけボカした2次元画像 $f(\mathbf{r}, \tau_1)$ （一般化図形）は熱伝導や拡散過程と同じ種類の次の偏微分方程式（図形の基礎方程式）を満たすことが示されている[7]。

$$(\nabla^2 - \partial/\partial \tau_1) f(\mathbf{r}, \tau_1) = 0 \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{r} は2次元平面上の位置ベクトル、 ∇^2 はラプラシアンである。この偏微分方程式はスケールスペースフィルタ(Scale-space filtering)理論でも独立に導出されている[10][11]。式(2.2)の解は、グリーン関数 $G(\mathbf{r}, \tau)$ を用いると一意的に定まり

$$f(\mathbf{r}, \tau_1) = \int_{s_\infty} G(\mathbf{r}-\mathbf{r}', \tau_1) f(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.3)$$

となる。但し、 s_∞ は2次元全平面を意味し、 $G(\mathbf{r}, \tau_1)$ は次のガウス関数を用いることとする。

$$G(\mathbf{r}, \tau_1) = (1/4\pi\tau_1) \exp(-\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} / 4\tau_1) \quad (2.4)$$

但し、 $\tau_1 = \sigma_1^2 / 2$ である。式(2.3)は、眼球光学系に於けるボケ τ_1 の導入を意味する式で、網膜が理想結像面($\sigma_1 = 0$)に位置している場合にはボケは存在しないが、レンズ系の焦点距離が変化して理想結像面が網膜位置から離れた場合には網膜像はボケることになり、このボケ画像 $f(\mathbf{r}, \tau_1)$ は原画像 $f(\mathbf{r})$ とボケ関数 $G(\mathbf{r}, \tau_1)$ とのたたみこみ積分で表わされることを意味する。

一方、視野は原画像に於いて人間がはっきり見ることのできる領域の大きさであるから、視野の導入は原画像 $f(\mathbf{r})$ に対するウィンドウ操作又は抑制操作として定義でき、 σ_0 ($\tau_0 = \sigma_0^2 / 2$)なる視野の大きさを持った画像を $f_s(\mathbf{r})$ とすると、

$$f_s(\mathbf{r}) = G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_a, \sigma_0) f(\mathbf{r}) = G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_a, \tau_0) f(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

と表現できる。但し、 \mathbf{r}_a は視点位置を表わす位置ベクトルであり、抑制関数 $G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_a, \tau_0)$ は式(2.4)のガウス関数とする。

視点の位置 \mathbf{r}_a 、ボケのパラメータ τ_1 、視野のパラメータ τ_0 を固定したとき、観測画像の内積(f_1, f_2)とノルムの2乗 $\|f\|^2$ を

$$(f_1, f_2) = \int_{s_\infty} G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_a, \tau_0 - \tau_1) f_1(\mathbf{r}, \tau_1) f_2(\mathbf{r}, \tau_1) d\mathbf{r} \quad (2.6)$$

$$\|f\|^2 = \int_{s_\infty} G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_a, \tau_0 - \tau_1) \{f(\mathbf{r}, \tau_1)\}^2 d\mathbf{r} \quad (2.7)$$

$$(0 < \tau_1 < \tau_0)$$

と定義すると、線形空間に属していた観測画像 $f(\mathbf{r}, \tau_1)$ の集合は位相空間(Hilbert Space)となる[7]。以下の議論に於いて、ノルムは最適な観測状態を推定する為の評価関数として利用されることになる。式(2.7)に於いて視野の影響を明確にする為に、視野の抑制をともなった図形 $f_s(\mathbf{r})$ を用いた形に変換した後、次の変換

$$\mathbf{R} = (\tau_0 \mathbf{r} - \tau_1 \mathbf{r}_a) / (\tau_0 - \tau_1), \quad \tau_s = \tau_0^2 / (\tau_0 - \tau_1) \quad (2.8)$$

を施すと、式(2.7)は以下の様になる。

$$\|f\|^2 = \int_{s_\infty} \frac{1}{G(\mathbf{R}-\mathbf{r}_a, \tau_s)} \{f_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)\}^2 d\mathbf{R} \quad (2.9)$$

$$f_s(\mathbf{R}, \tau) = \int_{s_\infty} G(\mathbf{R}-\mathbf{r}', \tau) f_s(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.10)$$

式(2.9)は実用図形理論[12]により定義されるノルムの2乗と同じ表現形式となっている。この結果は、網膜上にボケをともなった画像をうつし出し、これを観測し視野を考慮してノルムの計算を行なうこと(式(2.7))と、網膜上では理想結像状態にしておき、その画像に視野の抑制を加えた後ボケを働かせて観測し(式(2.10))、ノルムを計算すること(式(2.9))とが等価であり、ノルムの表現形式を異にするだけであることを示している。従って、式(2.9)中の画像 $f_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ は眼球光学系と光電変換部を通過した画像と等価なものと解釈できる。

次に、画像信号 $f_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ を網膜部の特性により画像信号として意味のある交流信号成分と直流信号成分に分けることを考える。図形観測理論では、この操作を正準化操作[7]と称し、交流信号成分 $g_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ は、式(2.10)と定数Kを用いて次の様に表わせる。

$$g_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0) = f_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0) - K \cdot G(\mathbf{R}-\mathbf{r}_a, \tau_s) \quad (2.11)$$

$$K = \int_{s_\infty} f_s(\mathbf{r}, \tau) d\mathbf{r} = \int_{s_\infty} f_s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (2.12)$$

以上の正準化操作の伝達関数を計算してみると、直流以外の周波数では平坦な特性になっており、これだけでは網膜特性の空間周波数構造が再現できないので、帯域通過フィルタ(正弦波に対するコントラスト感度空間周波数特性) $H(\omega)$ を考慮する必要がある。今、網膜特性のインパルス応答を $h(\mathbf{R})$ とすると、視覚領へ伝達される交流信号成分 $g_t(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ は、 $g_s(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ と $h(\mathbf{R})$ のたたみ込み積分で表わせる。

$$g_t(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0) = \int_{s_\infty} h(\mathbf{R}-\mathbf{R}') g_s(\mathbf{R}', \tau_s - \tau_0) d\mathbf{R}' \quad (2.13)$$

一方、網膜部で分離される直流信号成分Bは大局的な直流成分を意味するもので、視野の大きさにより変動する局所的な直流成分である式(2.12)のKを用いて次の様に表わせる^{注2)}。

$$B = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} K \quad (2.14)$$

図形観測理論では、図形のノルムの2乗 $\|f\|^2$ は提示画像の存在に対する人間の知覚量、あるいは印象の強さを表わす一種の感覚量として解釈する[7]。ここで、画像情報として意味のある交流信号成分 $g_t(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)$ と直流成分Bを用い、提示画像から人間が受け取る印

注2) この定式化では、提示画像の平均輝度が十分広い領域で一定となる状況を仮定している。

象の強さ (I) を次式で定義することにし、脳内に於ける評価関数と見なすことにする。

$$I = \| g_t \|^2 / \| B \|^2 \quad (2.15)$$

この式は、観測画像の交流信号成分 g_t が大きくなると、コントラストの増加の為に画像から受ける印象がより強くなり、平均輝度が大きくなると、コントラストの減少の為に画像がわかりにくくなる (印象が弱くなる) 経験則を表わしている評価関数である。提示画像の平均輝度が一定の場合は直流信号成分のノルム $\| B \|^2$ は定数 (B^2) となるので、式(2.9)より上式は、

$$I = \frac{1}{B^2} \int_{s_\infty} \frac{1}{G(\mathbf{R}-\mathbf{r}_a, \tau_s)} |g_t(\mathbf{R}, \tau_s - \tau_0)|^2 d\mathbf{R} \quad (2.16)$$

となる。

本報告の視覚モデルでは、提示画像の観測に最も適した観測状態 (ボケ量と視野) を決定する方法として次の仮説を設ける。

(仮説2)

画像が提示されたときに決定される観測状態 (1組のボケと視野) の最適値は、ボケと視野の関係式 $V(\tau_0, \tau_1) = 0$ の拘束条件の下で、式(2.16)の評価関数 I を極大にする。

即ち、人間が画像を観測する場合、人間は画像から受け取る印象 (評価関数値) をできるだけ大きくする様に観測状態の調節を行ない、しかもこの観測状態は、 $V(\tau_0, \tau_1) = 0$ の関係を満たしているということである。

2.3 正弦波に対する視覚モデルの応答特性

本提案の視覚モデルを用いて正弦波形の解析を行い、正弦波形に対するコントラスト感度を導出することにより、ボケと視野の満たす関係式 $V(\tau_0, \tau_1) = 0$ を決定するとともに、この視覚モデルから理論的に得られる正弦波コントラスト感度空間周波数特性が実際の視覚系と同様にマルチチャネル構造になることを示す。

2.3.1 評価関数の導出

図2.2の1次元正弦波形は、次の式により表示できる。

$$f(r) = B + A \cdot \cos(\omega_s r + \theta_r) \quad (2.17)$$

A : 正弦波の輝度振幅, B : 平均輝度

ω_s : 正弦波空間角周波数 ($= 2\pi/T$)

θ_r : 位相

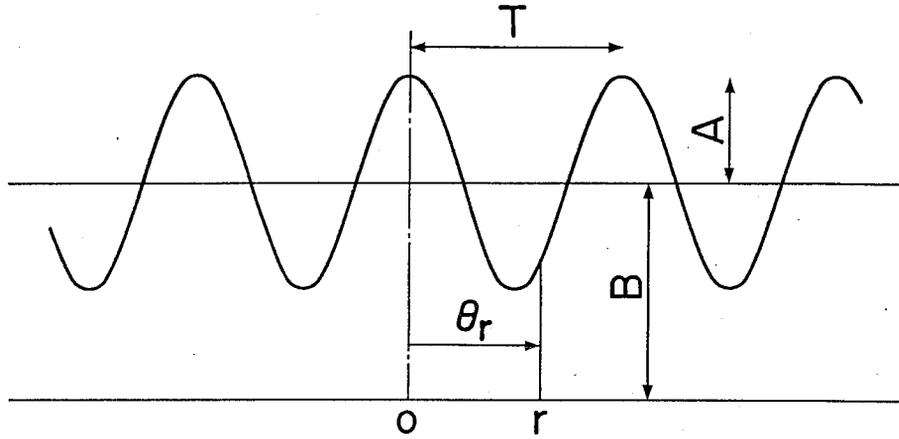


図 2.2 1次元正弦波パターン

Fig. 2.2 Profile of a sinusoidal wave.

以下の説明では、視点を眼球光学系の中心軸 ($r_a = 0$) とし、そのかわりに提示画像の位相 θ_r を考慮することで視点の移動を考える。式(2.12)より局所平均値 K は次のようになる。

$$K = B + A \cos \theta_r \cdot \exp(-\tau_0 \omega_s^2) \quad (2.18)$$

式(2.10), 式(2.11)より交流信号成分 $g_s(R, \tau_s - \tau_0)$ は、

$$g_s(R, \tau_s - \tau_0) = A \cdot G(R, \tau_s) [\cos(\omega_s \tau_0 R / \tau_s + \theta_r) \exp\{- (\tau_s - \tau_0) \tau_0 \omega_s^2 / \tau_s\} - \cos \theta_r \cdot \exp(-\tau_0 \omega_s^2)] \quad (2.19)$$

と変形できる。正弦波形の場合には、 ω_s なる周波数成分しか含まれないので、網膜特性を表わす伝達関数 (正弦波コントラスト感度空間周波数特性) $H(\omega)$ のうち $\omega = \omega_s$ のときの値を式(2.19)に乗ずることで式(2.13)のたたみ込み積分を近似すると、視覚領へ伝達される信号は

$$g_t(R, \tau_s - \tau_0) = H(\omega_s) \cdot g_s(R, \tau_s - \tau_0) \quad (2.20)$$

となり、式(2.19)(2.20)より、式(2.16)の評価関数は次の式で表わせることになる。

$$I = (A^2 / B^2) H^2(\omega_s) \exp(-2\tau_0 \omega_s^2) \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} [\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\theta_r) \exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (2.21)$$

上式の評価関数を極大にする位相 (視点の位置) は、

$$\cos(2\theta_r) = -1 \quad \therefore \theta_r = \pi/2 \pm n\pi \quad (2.22)$$

の関係の成立するのがわかる。この結果は、視点の位置が $\theta_r = \pi/2$ の様な輝度変化が最大となる位置の時に画像から受ける印象が極大になることを意味し、画像のエッジ部に視点が集まりやすい経験則を理論的に説明するものであると言える。

2.3.2 観測状態が満たすべき関係式の理論的導出と視覚モデルの空間周波数特性

コントラスト感度は知覚できる最小コントラスト（コントラスト閾）の逆数として定義される。そこで、コントラスト感度の理論的導出にあたっては次の仮説を設ける。

(仮説3)

提示画像から受ける印象の強さ（評価関数の値）に関して、人間には検知できる閾値 ($Th^2/2$) が存在し、評価関数値がこの閾値より小さいと人間は画像の存在が検知できない。さらに、この閾値は提示画像の空間周波数に依存せず一定である。

従って、提示画像から受ける印象の強さが人間の検知限界と等しくなった時の条件

$$I = Th^2/2 \quad (2.23)$$

が成立した時のコントラストの逆数として計算できる。式(2.22) から分かる様に、視点位置が $\theta_r = \pi/2$ の時に評価関数値（印象の強さ）は最大になるので、コントラスト感度はこの条件で計算することになる。式(2.22)を式(2.21)に代入すると、 $\theta_r = \pi/2$ での評価関数は次の様になる。

$$I = (A^2/B^2) H^2(\omega_s) \exp(-2\tau_0\omega_s^2) \sinh\{2\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \quad (2.24)$$

故に、コントラスト感度 $S (=B/A)$ は式(2.23)と式(2.24)より

$$S = B/A = H(\omega_s) \cdot S^*/Th \quad (2.25)$$

$$(S^*)^2 = 2 \exp(-2\tau_0\omega_s^2) \sinh\{2\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \quad (2.26)$$

と書ける。ここで、 S^* と空間周波数 $f_s (= \omega_s/2\pi)$ の関係 (図2.3) を調べると次の様になる。観測状態 (ボケと視野の1組) を固定してを計算すると S^* は狭帯域通過特性を示し、ボケ τ_1 と視野 τ_0 を両方とも小さく (大きく) して行くと狭帯域通過フィルタは高い (低い) 空間周波数領域の方へ移動する。この結果は視覚系には観測状態の集合と1対1に対応する狭帯域通過フィルタ群が存在すると見ることができる。各々の観測状態に於ける観測特性が全て等しい、即ち各々の狭帯域通過フィルタ特性が空間周波数位置の違い以外全て等しくなる様な同等条件で観測されているものと仮定すると、全ての狭帯域通過フィルタ特性の最大感度値は同一

になり、この時 S^* は一定値 C_{th} となる。また $Th = C_{th}$ とすると S^*/Th は 1 に正規化されることになり、式(2.25)のコントラスト感度 S の計算結果は網膜特性上の値 $H(\omega_s)$ と一致することが分かる。別の見方をすると、正弦波に対する視覚モデルのコントラスト感度特性と実際の視覚系の感度特性とを一致させる（視覚モデルと実際の視覚系との整合性）為には、全ての狭帯域過フィルタ特性を同等に扱う必要があることを意味する。

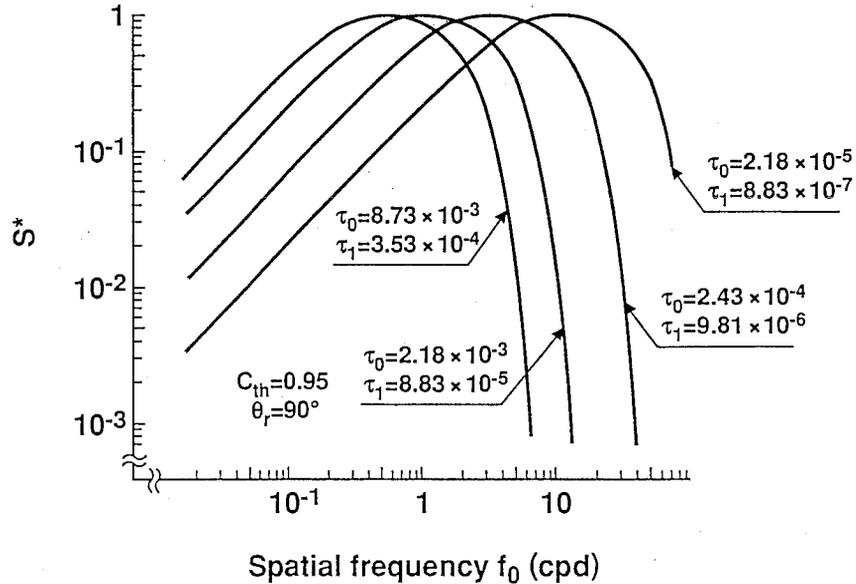


図 2.3 S^* の狭帯域通過特性

Fig. 2.3 Narrow band-pass filter characteristics of S^* .

以上の考察から、ボケ τ_1 と視野 τ_0 の満たす関係式 $V(\tau_0, \tau_1) = 0$ が導出できる。一つの観測状態を固定した時に決定される狭帯域通過フィルタの感度 S^* が最大となる空間周波数をチャンネル中心周波数 $f_c (= \omega_c / 2\pi)$ とすると、 $\omega_s = \omega_c$ で S^* の導関数は 0 となるので、

$$\begin{aligned} \frac{\partial S^*}{\partial \omega_s} \Big|_{\omega_s = \omega_c} &= 0 \\ \Rightarrow \tanh \{ 2\omega_c^2 (\tau_0 - \tau_1) \} &= \tau_0 / \tau_s \end{aligned} \quad (2.27)$$

の関係が成立する。また式(2.26)より

$$\begin{aligned} (S^*)^2 \Big|_{\omega_s = \omega_c} &= 2 \exp(-2\tau_0 \omega_c^2) \sinh \{ 2\omega_c^2 (\tau_0 - \tau_1) \} \\ &= C_{th}^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

が成立するので、式(2.27)と式(2.28)の変形により、ボケと視野の関係式及びチャンネル中心周波数 (f_c) は、次式で表わせる。

$$\frac{\tau_0}{2(\tau_0 - \tau_1)} \log_{10} \left(\frac{\tau_1}{2\tau_0 - \tau_1} \right) + \frac{1}{2} \log_{10} \left\{ \frac{(\tau_0 - \tau_1)^2}{2\tau_0\tau_1 - \tau_1^2} \right\} = \log_{10} \left(\frac{C_{th}^2}{2} \right) \quad (2.29)$$

$$f_c^2 = \frac{-1}{16\pi^2(\tau_0 - \tau_1)} \log_e \left(\frac{\tau_1}{2\tau_0 - \tau_1} \right) \quad (2.30)$$

C_{th} をパラメータとしたときのボケ量 σ_1 と視野の大きさ σ_0 の関係は図2.4の様に両対数軸に対して直線となることがわかる。しかし、 $V(\tau_0, \tau_1) = 0$ がこの図のどの直線を表わすかは、現段階では決定できず何らかの測定実験が必要である。今、 $C_{th} = 0.95$ の関係式を用いることにすると、正弦波に対する視覚モデルの最適観測状態は式(2.29)を拘束条件として式(2.21)の評価関数を極大化することで計算できることになる。正弦波の空間周波数 f_s とコントラスト感度 S (相対値)の関係、即ち空間周波数特性は図2.5となる。ただし、網膜特性として利用した正弦波空間周波数特性は、次式により関数近似した[13][14]。

$$H(\omega) = \{1 + (\omega/\omega_1)^2\}^{-1.5} [1 - \{1 + (\omega/\omega_2)^2\}^{-0.5}] \quad (2.31)$$

(ω_1, ω_2 は定数)

この図より、視覚モデルの正弦波空間周波数特性はいろいろな観測状態 ($C_{th} = 0.95$ の直線上)

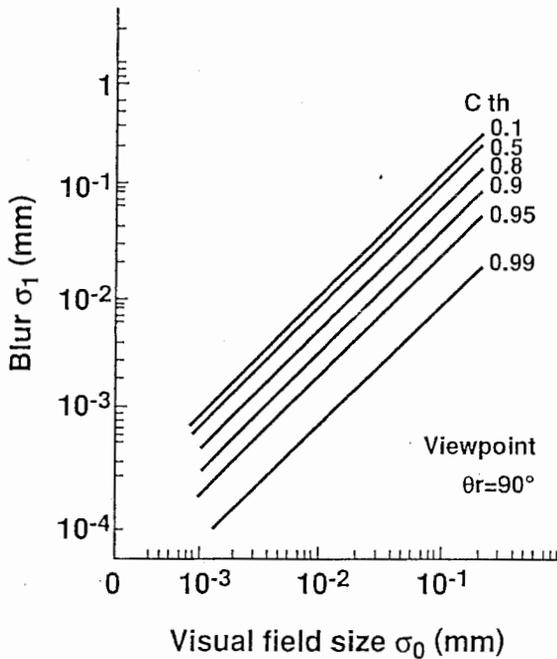


図2.4 ボケ量と視野の大きさの関係

Fig. 2.4 Relation between visual field size σ_0 and degree of blur σ_1 .

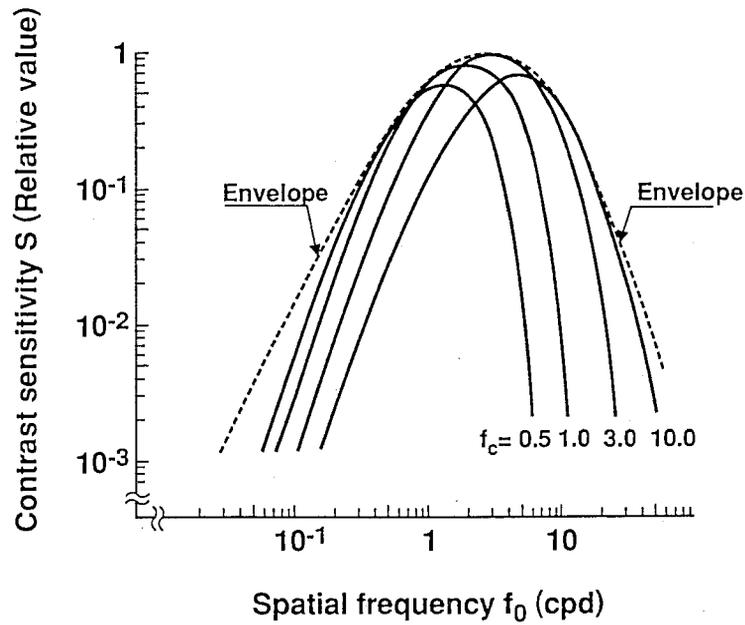


図 2.5 視覚モデルの正弦波空間周波数特性の構造

Fig. 2.5 Vision model's spatial frequency characteristics to sinusoidal waves.

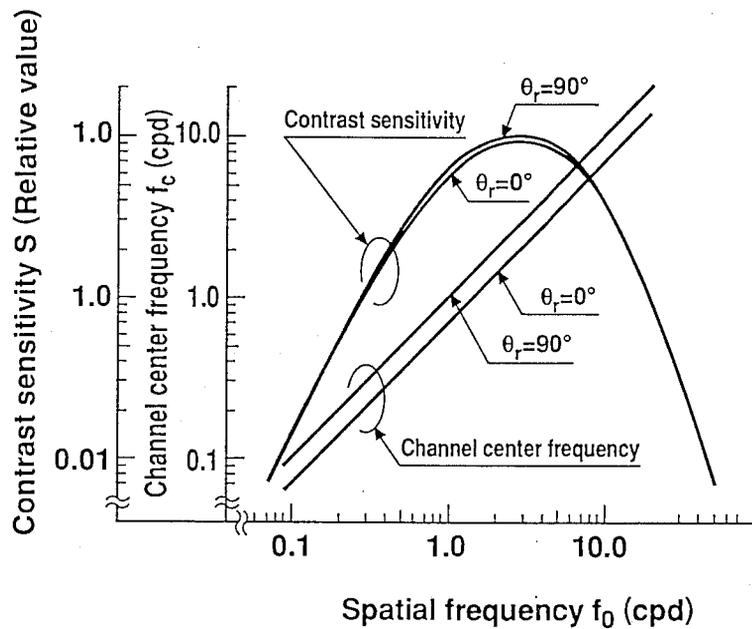


図 2.6 空間周波数特性と最適観測状態選択特性における視点の影響

Fig. 2.6 Effect of viewpoint on spatial frequency characteristics and channel center frequencies.

から決定される狭帯域通過フィルタ群で構成され、このフィルタ群の包絡線が網膜特性 $H(\omega)$ となる構造（マルチチャンネル構造）であることが結論され、視覚系のマルチチャンネル理論 [2][15][16][17][18] と類似した特性を示すことがわかる。つまり、本視覚モデルでは提示画像に依存して最適な狭帯域フィルタが選択されることになるが、このことは選択された狭帯域フィルタの空間周波数特性が現時点に於ける視覚系の伝達特性になっていることを意味している。また、評価関数（式(2.21)）を用いて視点の位置 θ_r が視覚系の空間周波数特性に及ぼす影響について計算した結果（図2.6）は以下の様になる。上記議論で導入したコントラスト感度空間周波数特性 $H(\omega)$ ($\theta_r = 90^\circ$) に対して、 $\theta_r = 0^\circ$ で計算したときの特性は、わずかであるが感度が低下する。一方、チャンネル中心周波数 f_c との関係に於いては、高い空間周波数の方がチャンネル中心周波数の高いフィルタ（ボケが少なく、視野が狭い）が選択されるだけでなく、同一周波数の正弦波を見ている、輝度変化が急峻な位置 ($\theta_r = 90^\circ$) の方がチャンネル中心周波数の高いフィルタが選択される特性となり、提示画像の空間周波数や視点位置に依存して視覚系の画像観測機構が変化している様子がこの視覚モデルから導ける。

2.4 矩形波に対する視覚モデルの応答特性

本視覚モデルの正当性について検討する為に、矩形波Gratingに対する視覚モデルの空間周波数応答特性の計算を行ない、測定結果との比較を行なう。

2.4.1 評価関数の導出

1次元矩形波形（図2.7）は次式の様にフーリエ級数展開表現できる。

$$f(r) = B + \left(\frac{4A}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} \cos(n\omega_s r + n\theta_r) \quad (2.32)$$

ただし、 d はデューティー (duty ratio) を表わす。正弦波形のときと同じ手順により矩形波形の場合の評価関数 I を求めると次式となる。

$$I = (4/\pi)^2 (A/B)^2 \cdot I_{rec} \quad (2.33)$$

$$I_{rec} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd) \sin(\pi md)}{nm} H(n\omega_s) H(m\omega_s) \exp\{-\tau_0(n^2 + m^2)\omega_s^2\} \\ \times \sinh\{(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_s^2\} [\cos\{(n-m)\theta_r\} \exp\{(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_s^2\} - \\ \cos\{(n+m)\theta_r\} \exp\{-(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_s^2\}] \quad (2.34)$$

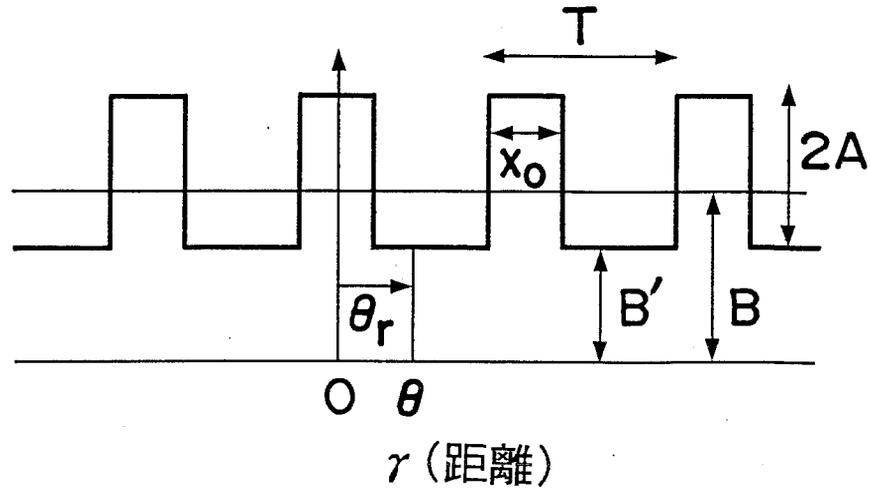


図 2.7 1次元矩形波パターン

Fig. 2.7 Profile of a rectangular wave.

コントラスト感度 S は、 $I = C_{th}^2 / 2$ とおくことにより、次式となる。

$$S = B / A = (4 / \pi \cdot C_{th}) \sqrt{2 I_{rec}} \quad (2.35)$$

矩形波を観測する場合の視覚モデルの最適観測状態は式(2.29)の拘束条件の下で式(2.33)の評価関数を極大化することで求められる。

2.4.2 コントラスト感度空間周波数特性に於ける実測と理論の比較

図 2.8 は方形波(duty ratio = 0.5)に対するコントラスト感度空間周波数特性の実測結果と視覚モデルからの計算結果を重ねて表示した図である。○と□はそれぞれ正弦波と方形波に対する実測結果[15]であり、実線は視点位置が $\theta_r = 0^\circ$ (パルスの中央部) と 90° (エッジ部) のときの計算結果である。また、破線は視覚モデルに導入された網膜特性 $H(\omega)$ であり、正弦波に対する実測結果 (○表示) の関数近似を示す。この図から次のことが分かる。(1) 高い空間周波数領域 (約 2 cpd 以上) では視点位置の違いがほとんど無く、実測結果とも良く一致している。(2) 低空間周波数領域での計算結果に於いては、視点位置が $\theta_r = 0^\circ$ (パルスの中央部) の場合は正弦波に対する実測結果と同様に空間周波数の低下に伴って感度値も低下する傾向を示し、 $\theta_r = 90^\circ$ (エッジ部) の場合は正弦波に対するよりも感度値が高く、一定の感度特性を示す。さらに、実測結果との比較に於いては、 $\theta_r = 90^\circ$ での計算結果と良く一致している。以上の結果から判断すると、方形波に対するコントラスト感度の実測に於いては、感

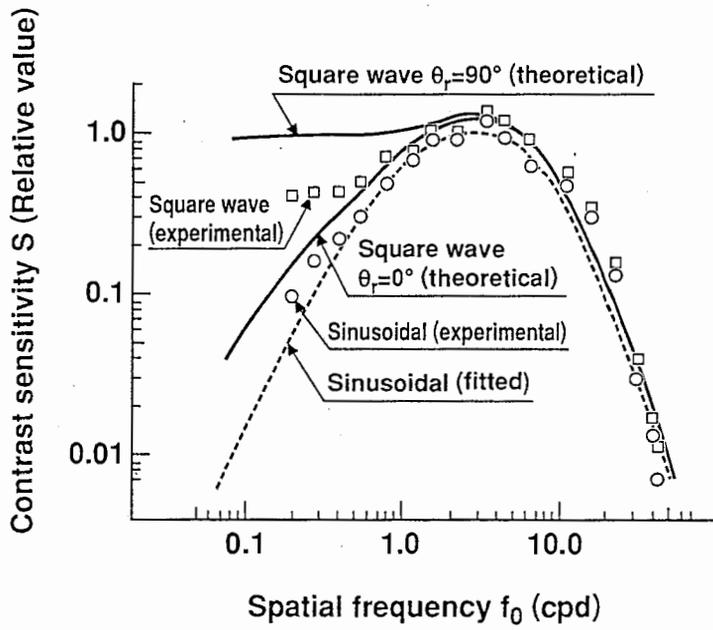


図 2.8 方形波空間周波数特性の実測結果と計算結果の比較

Fig. 2.8 Comparison between experimentally measured square wave's contrast sensitivities and theoretical ones.

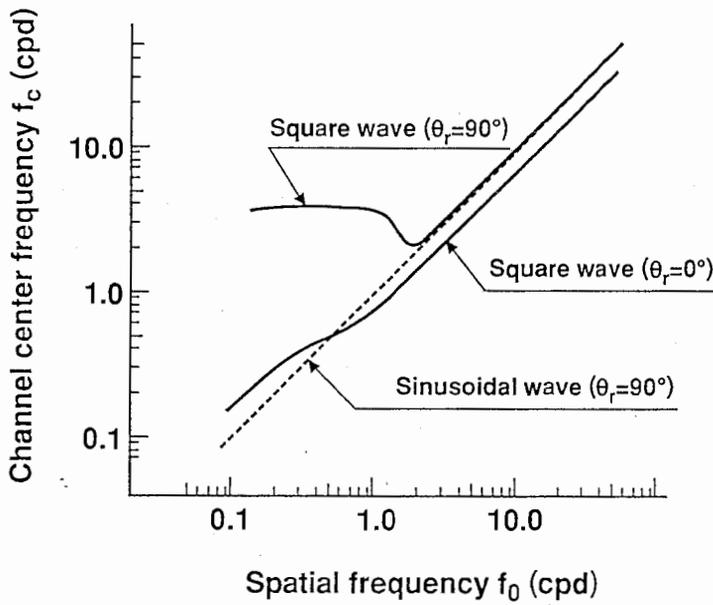


図 2.9 方形波に対する最適観測状態 (チャンネル中心周波数) 選択特性

Fig. 2.9 Spatial frequency characteristics of channel center frequency to square waves.

度が最大となる方形波のエッジ部分に視点が位置した状態でコントラスト閾が測定されているものと予想できる。一方、図 2.9 は最適観測状態と空間周波数の関係（チャンネル中心周波数選択特性）であり、実線が視点位置 $\theta_r = 0^\circ$ （パルスの中央部）と 90° （エッジ部）のときの計算結果、破線が正弦波に対する計算結果である。この図から分かることは、(1) 視点位置が $\theta_r = 0^\circ$ では正弦波とほぼ同じようなチャンネル中心周波数の狭帯域フィルタが選択される、(2) $\theta_r = 90^\circ$ に関しては、高空間周波数領域では正弦波の場合とほぼ同一結果となるが、低空間周波数領域では正弦波の場合よりもかなり高い中心周波数を持つ狭帯域フィルタ（正弦波を観測するときよりもボケが少なく、視野が狭い）が選択されて、しかも空間周波数によらず観測状態は一定となることである。高空間周波数領域で正弦波とほぼ同じ最適観測状態になるのは、見え方に於いて正弦波と方形波が区別できなくなることを意味する。また、低空間周波数領域で同一の最適観測状態が選択される理由は、視覚系は提示画像を方形波として観測するよりも1つのエッジとして観測してしまう為と考えられる。方形波を観測した時の網膜像のボケの程度を赤外線オプトメータを用いて測定した結果に依ると、ある空間周波数以下の方形波に対するボケ量は図 2.9 の計算結果と同様に一定値になることが示されており[9]、これは本視覚モデルの正当性を裏付けるものと考えられる。

次に、一般の矩形波に対する計算結果を述べる。図 2.10 と図 2.11 は視点位置をエッジ部に置き、duty ratioをパラメータとして計算したコントラスト感度空間周波数特性と最適観測

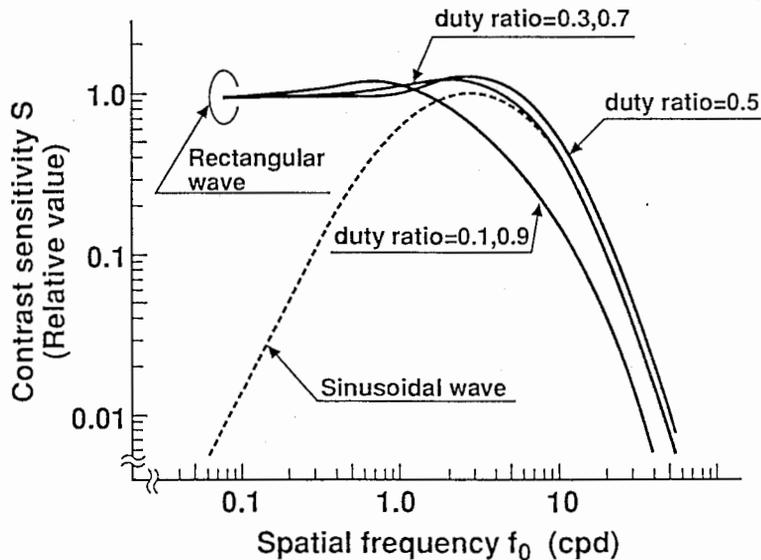


図 2.10 視覚モデルの矩形波コントラスト感度空間周波数特性

Fig. 2.10 Vision model's spatial frequency characteristics of contrast sensitivity to rectangular waves.

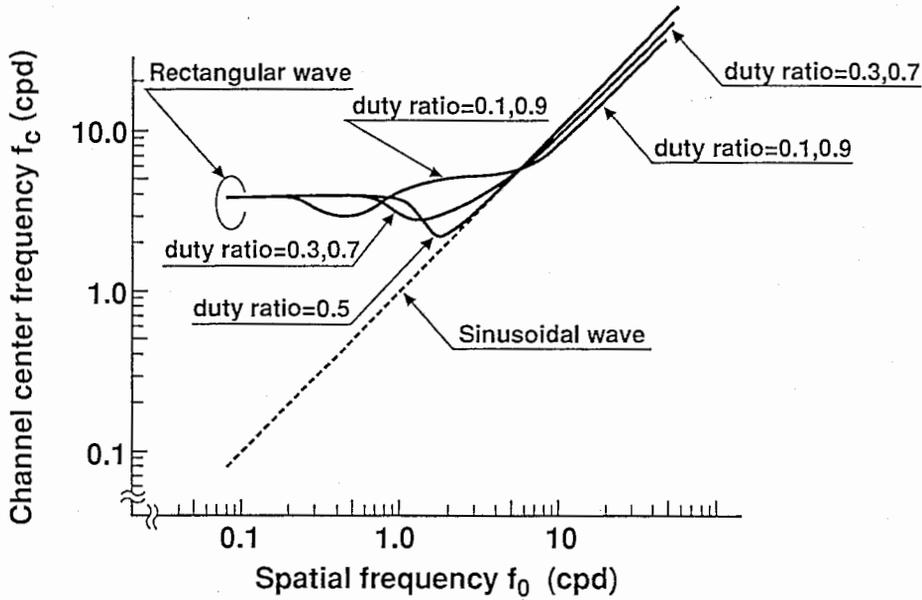


図 2.11 矩形波に対する視覚モデルの最適観測状態選択特性

Fig. 2.11 Spatial frequency characteristics of channel center frequency to rectangular waves.

状態選択特性であり、実線は矩形波に対する結果、破線は比較の為の正弦波に対する結果である。図 2.10 からは次のことが分かる。(1) 低空間周波数領域では、感度値は正弦波の場合よりも高く、duty ratio に無関係に一定値となる。(2) 高空間周波数領域では、duty ratio = 0.5 (方形波) の時に感度最高となり、duty ratio が 0.5 から離れるにつれて感度値は減少する傾向を示す。この結果は duty ratio = 0.5 と 0.2 の場合の実測結果[15]と同じ傾向であり、本視覚モデルの正当性が理解できる。一方、図 2.11 からは、低空間周波数領域では duty ratio に無関係に正弦波の場合よりも高く、かつ一定の中心周波数を持つ狭帯域フィルタが選択され、高空間周波数領域ではほとんど duty ratio とは関係なく正弦波とほぼ同じ最適観測状態選択特性が得られることが予想できる。duty ratio の影響は約 1 cpd 辺りの変動として現われる。

2.5 複合正弦波に対する視覚モデルの応答特性

前節では、本視覚モデルに矩形波形を観測させた時に得られる理論的な空間周波数特性（コントラスト感度特性）と実測結果とが良く一致することを通して本視覚モデルの正当性を議論した。しかし、本視覚モデルの基本的特徴であるマルチチャネル構造と実際の視覚系に於けるマルチチャネル理論との関係についてはあまり明確にされなかった。本節では、本視覚モデルが複合正弦波形を観測したときに得られる応答特性と実際の見え方特性（知覚特性）とが良く

一致すること、及び視覚系のマルチチャネル理論を裏付けるものとして知られている閾値下複合正弦波に対する知覚特性（コントラスト閾値特性）が本視覚モデルからも理論的に導けると言う立証を通して、本視覚モデルが実際の視覚応答を正確にシミュレートできること、かつマルチチャネル理論とも密接に関係している可能性が高いことを明確化する。さらに、閾値上複合正弦波に対する知覚特性についても検討する。

2.5.1 評価関数の導出

1次元複合正弦波パターン $f(r)$ は、図2.12の様に2種類の空間周波数を持った正弦波形の線形和として定義され、次式で表現される。

$$f(r) = B + A_1 \cos(\omega_{s1} r + \theta_r) + A_2 \cos(\omega_{s2} r + \omega_{s2} \theta_r / \omega_{s1} + \alpha) \quad (2.36)$$

A_1, A_2 : 第1及び第2正弦波の振幅

B : 複合正弦波のバイアス（平均値）

ω_{s1}, ω_{s2} : 第1及び第2正弦波の空間角周波数

θ_r : 視点位置（提示画像の位相）

α : 第1正弦波と第2正弦波の位相差

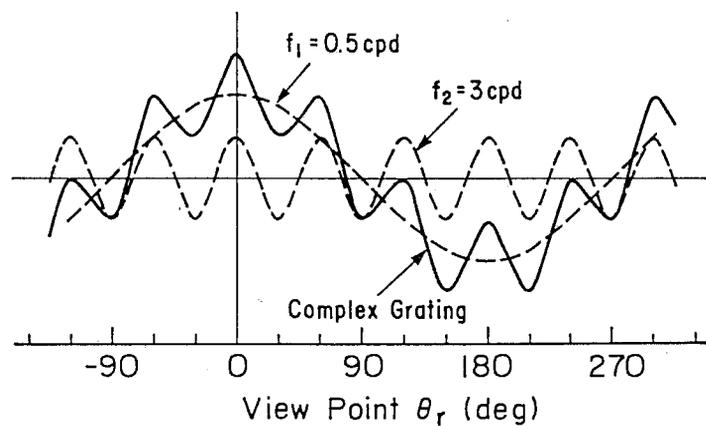


図2.12 1次元複合正弦波パターン

Fig. 2.12 Profile of a compound sinusoidal wave grating.

正弦波、矩形波の場合と同様の定式化手順に沿って、複合正弦波パターンに対する評価関数 I を導出すると以下の様に表わされる。

$$I = (A_1^2 / B^2) H^2(\omega_{s1}) \exp(-2 \tau_0 \omega_{s1}^2) \sinh\{\omega_{s1}^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ \times [\exp\{\omega_{s1}^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\theta_r) \exp\{-\omega_{s1}^2(\tau_0 - \tau_1)\}]$$

$$\begin{aligned}
 & + (A_2^2/B^2) H^2(\omega_{S2}) \exp(-2\tau_0 \omega_{S2}^2) \sinh\{\omega_{S2}^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \quad \times [\exp\{\omega_{S2}^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\omega_{S2} \theta_r / \omega_{S1} + 2\alpha) \exp\{-\omega_{S2}^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \\
 & + (2A_1A_2/B^2) H(\omega_{S1}) H(\omega_{S2}) \exp\{-\tau_0(\omega_{S1}^2 + \omega_{S2}^2)\} \\
 & \quad \times \sinh\{\omega_{S1}\omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\} [\cos\{(1 - \omega_{S2}/\omega_{S1})\theta_r - \alpha\} \exp\{\omega_{S1}\omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \quad - \cos\{(1 + \omega_{S2}/\omega_{S1})\theta_r + \alpha\} \exp\{-\omega_{S1}\omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\}] \\
 & = I_{\omega_{S1}} + I_{\omega_{S2}} + I_{\omega_{S1}\omega_{S2}} \tag{2.37}
 \end{aligned}$$

以上の様に、複合正弦波形に対する評価関数は3項から成る。第1項目は空間周波数 ω_{S1} の単独正弦波形に対する印象の強さ ($I_{\omega_{S1}}$)、第2項目は空間周波数 ω_{S2} の単独正弦波形に対する印象の強さ ($I_{\omega_{S2}}$)、第3項目は両正弦波形の相互作用の影響の大きさを表わす印象の強さ ($I_{\omega_{S1}\omega_{S2}}$) を表している。正弦波形の空間周波数、振幅の大きさ、位相などに依存して各部の印象の強さが異なるので、その変化の様子を調べれば複合正弦波形の見え方の変化が容易に予測できる。本視覚モデルが複合正弦波形を観測するときの最適観測状態は、式(2.29)のボケと視野の関係式を拘束条件として式(2.37)の評価関数を極大化することにより推定できる。

2.5.2 基本的知覚特性の解析

いろいろな観測状態 (式(2.29)を満たすボケと視野の組合わせ) に対して式(2.37)の複合正弦波形の評価関数値を計算し、評価関数の極大値が生じる様子を調べることにより、複合正弦波形の基本的な知覚特性 (見え方特性) について検討する。ここでは例として、第1、第2の正弦波空間周波数を各々 $f_{S1} = 0.5$ cpd, $f_{S2} = 3.0$ cpd とし、両正弦波形の位相差を $\alpha = 0^\circ$ とした複合正弦波形 (図2.12) を用いて計算した。

視点位置を $\theta_r = 0^\circ$ としたときのチャンネル中心周波数 f_c (観測状態と等価) と複合正弦波形に対する評価関数値の関係を第2正弦波形コントラスト (A_2/B) をパラメータにして計算したところ次のようになった (図2.13)。ただし、第1正弦波形コントラスト (A_1/B) は一定値とした。第2正弦波形 (空間周波数 $f_{S2} = 3.0$ cpd) のコントラスト (A_2/B) が第1正弦波形 (空間周波数 $f_{S1} = 0.5$ cpd) のコントラスト (A_1/B) より十分小さい場合には、評価関数が極大値を示すチャンネル中心周波数は $f_c = 0.37$ cpd が選択された。この状態は空間周波数 $f_{S1} = 0.5$ cpd の第1正弦波形が単独で存在した場合と同じチャンネル中心周波数が選択されたことになり、第1正弦波形が知覚されやすい状態であることを意味する。第2正弦波形のコントラスト (A_2/B) を大きくして行くと、評価関数が極大値となる最適観測状態は2つ (チャンネル中心周波数 $f_c = 0.37$ cpd と 2.0 cpd) 存在する様になる。 $f_c = 0.37$ cpd のチャンネル中

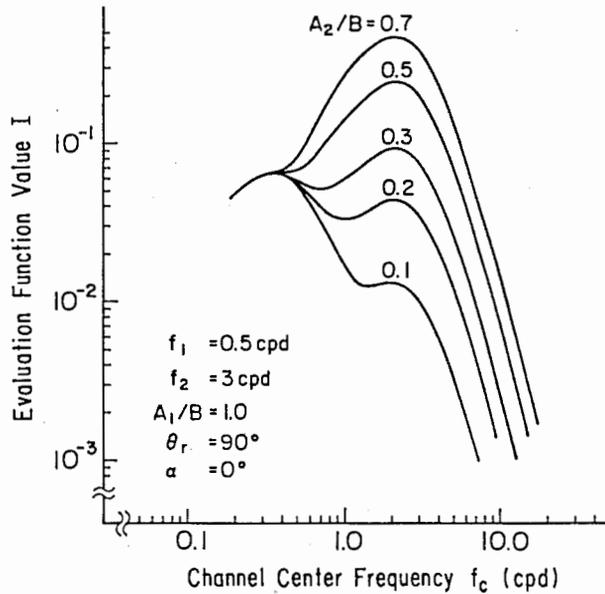


図 2.13 観測状態（チャンネル中心周波数）と評価関数値の関係

Fig. 2.13 Relation between channel center frequencies and evaluation function values.

心周波数が選択された場合には空間周波数 $f_{s1} = 0.5$ cpd の第 1 正弦波形を観測するのに適した状態になっており、 $f_c = 2.0$ cpd のチャンネル中心周波数が選択された場合には空間周波数が $f_{s2} = 3.0$ cpd の第 2 正弦波形を観測するのに適した状態になっている。また、この 2 つの最適観測状態はどちらも安定な状態なので、どちらの観測状態が選択されてもかまわないが、人間の意思が働いていない状態を仮定すれば、画像から受ける印象の強さつまり評価関数の極大値がより大きくなる観測状態の方に引かれて行く可能性が高いと考えられる。例えば、第 2 正弦波形コントラストが $A_2/B = 0.2$ のときは、チャンネル中心周波数が $f_c = 0.37$ cpd の位置の評価関数値の方が大きいので、どちらかと言えば空間周波数 $f_{s1} = 0.5$ cpd の第 1 正弦波形の方が主に知覚され易くなるが、 $A_2/B = 0.3$ のときには逆にチャンネル中心周波数 $f_c = 2.0$ cpd の位置の評価関数値の方が大きくなるので、空間周波数 $f_{s2} = 3.0$ cpd の第 2 正弦波形の方が主に知覚され易いと結論できる。勿論、意図的に評価関数値の小さいほうに合わせることは可能である。コントラスト A_2/B をさらに大きくして行くと、評価関数が極大値となる最適観測状態は再び 1 つ（チャンネル中心周波数 $f_c = 2.1$ cpd）となり、空間周波数 $f_{s2} = 3.0$ cpd の第 2 正弦波形を知覚するのに適した観測状態だけが安定に存在でき、第 1 正弦波形の知覚は困難になると判断できる。

網点やデザ等を用いた擬似中間調画像を観測するとき、人間は細かい画点を見ることも、

画点の集合により表現された信号を見ることも可能である。しかも、画点の大きさや画点の集合が表現する信号の空間周波数、振幅値などにより、画点の方が見え易いことも信号が見え易いこともある。本視覚モデルに於いて、安定な最適観測状態が複数（複合正弦波形の場合2つ）存在し、その時の評価関数値の大小関係によりどちらの信号が見え易いかが決定されるという特性は、擬似中間調画像を含め人間が画像を観測した時の視覚現象（見え方特性）を理論的に説明するものと考えられ、本視覚モデルが実際の視覚系の応答特性を正しく模擬していることを立証するものと言える。

以上の様に、本視覚モデルを用いれば、正弦波空間周波数の違い、コントラストの大小関係、視点位置などの影響により複合正弦波形の見え方が変化する様子を解析することが可能になる。

2.5.3 閾値下複合正弦波に対する知覚特性

前節では複合正弦波形の定性的な知覚特性について検討したが、本節ではコントラスト閾値下に制限された複合正弦波形のコントラスト閾値特性を計算し実測結果と比較することにより定量的な検討を行う。

2.5.3.1 コントラスト閾値の計算法

コントラスト閾値下に制限された複合正弦波形のコントラスト閾値特性は、複合正弦波形の一方の正弦波形のコントラストをこの正弦波形を単独で観測した時に得られるコントラスト閾値以下に固定した状態に於いて、もう一方の正弦波形のコントラスト閾値を計算することで求められる。コントラスト閾値自体は、最適観測状態に於ける評価関数値と人間が検知できる印象の強さの限界値 $C_{th}^2 / 2$ （この限界値以下では画像の存在がわからない）とが等しくなる時のコントラストとして計算できる。複合正弦波形の場合の評価関数は、空間角周波数 ω_{s1} 、 ω_{s2} の単独正弦波形の評価関数と両正弦波形の相互作用を表わす評価関数の和で表現されるので、コントラスト閾値の計算法としては次の二方法が考えられる。

- (a) 波形検出条件：複合正弦波形全体の評価関数が $I = C_{th}^2 / 2$ となる時のコントラスト値を計算する。
- (b) 正弦波形検出条件：単独正弦波形の評価関数が $I_{\omega_{s1}} = C_{th}^2 / 2$ （又は $I_{\omega_{s2}} = C_{th}^2 / 2$ ）となる時のコントラスト値 A_1 / B （又は A_2 / B ）を計算する。

(a) の条件からは何等かの波形もしくは変化が検知できた時のコントラスト閾値が求められる

ことになり、必ずしも正弦波形を知覚しているとは限らない。(b)の条件からは正弦波形が知覚できたときのコントラスト閾値が得られるが、この条件ではほとんどの場合、何等かの変化が知覚された後さらにコントラストを増加させたときに初めて正弦波形が知覚される状況となる為、(a)の条件から得られるコントラスト閾値よりも一般的には大きな値となる。以上より、コントラスト閾値計算手順は以下の様にまとめられる。

- (1) パラメータの設定 (空間周波数 ω_{s1} と ω_{s2} , 視点位置 θ_r , 両正弦波形の位相差 α)
- (2) 第1 (又は第2) 正弦波形のコントラスト A_1/B (又は A_2/B) を閾値以下に固定する。
- (3) 第2 (又は第1) 正弦波形のコントラスト A_2/B (又は A_1/B) を適当に設定する。
- (4) ボケと視野の関係式 (式 (2.29)) を拘束条件として複合正弦波形全体の評価関数を極大化し、このときの最適観測状態を求める。
- (5) (a) の波形検出条件の成立状況及び、(b) の正弦波形検出条件の成立状況を調べ、成立していればこのときのコントラストが求めるべき閾値となる。また、成立していなければ、第2 (又は第1) 正弦波形のコントラスト A_2/B (又は A_1/B) を新たに更新し、(4) へ戻り条件が満たされるまで繰り返し計算する。

以下では、実験での測定条件と同様に、正弦波空間周波数を $f_{s1} = 1.0$ cpd, $f_{s2} = 3.0$ cpd とし、両正弦波形の位相差を $\alpha = 0^\circ$ (ピーク加算型) と $\alpha = 180^\circ$ (ピーク減算型) の2種類に設定した複合正弦波 (図 2.14) を用いて計算する。

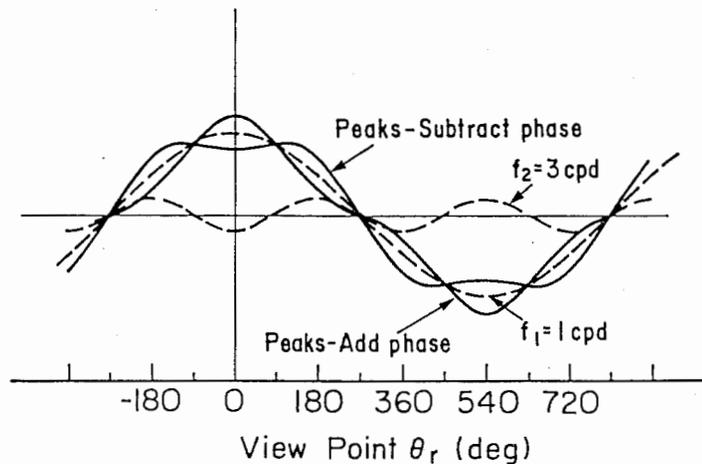
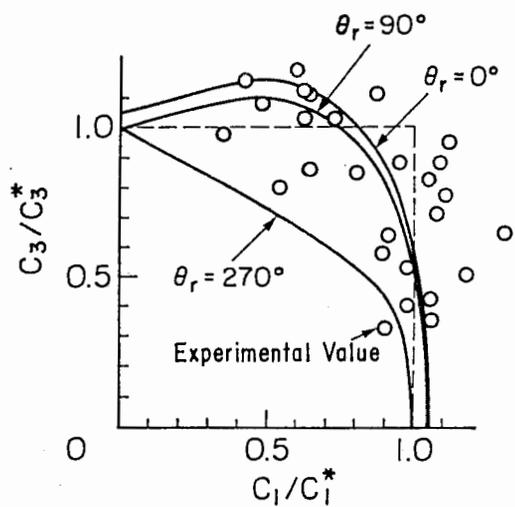


図 2.14 ピーク加算型、ピーク減算型複合正弦波パターン

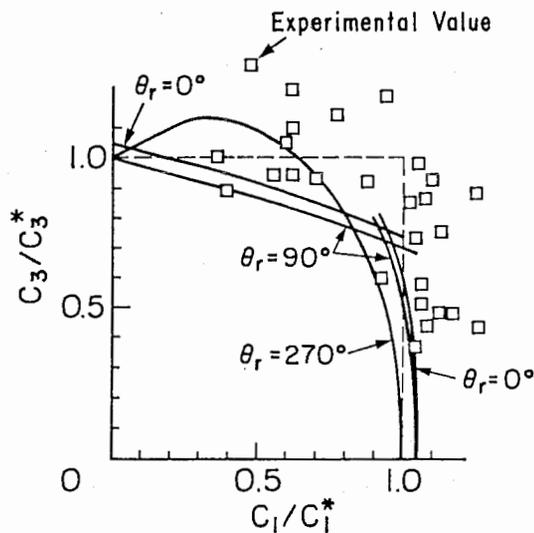
Fig. 2.14 Profile of two types of compound sinusoidal waves with different phases.

2.5.3.2 コントラスト閾値特性の実測と理論の比較

(a)の波形検出条件から計算した複合正弦波形の知覚特性(コントラスト閾値特性)と実測結果[19]とを重ねて表示したところ図2.15のようになった。但し、横軸と縦軸は各々空間周波数 $f_{s1} = 1.0$ cpd, $f_{s2} = 3$ cpdの正弦波形に対するコントラスト値 $C_1 (=A_1/B)$, $C_3 (=A_2/B)$ を空間周波数 $f_{s1} = 1.0$ cpd, $f_{s2} = 3$ cpdの単独正弦波形を観測した時に得られるコントラスト閾値 C_1^* , C_3^* で正規化したものを表わす。また、図中の円(○)はピーク減算型の実測値(図2.15(a))、正方形(□)はピーク加算型の実測値(図2.15(b))を、さらに実線は視覚



(a) Peaks-Subtract form



(b) Peaks-Add form

図2.15 波形検出基準による複合正弦波のコントラスト閾値特性

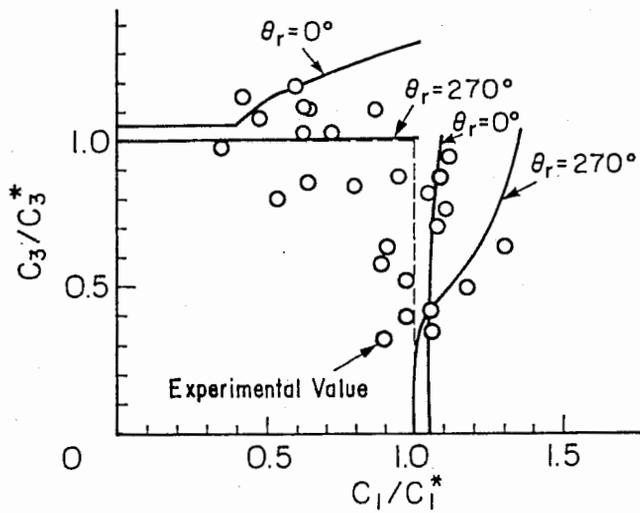
Fig. 2.15 Threshold contrast characteristics based on arbitrary wave detection criterion.

モデルから計算した理論値である。この図から分かる様に、閾値以下のコントラストに設定された正弦波形からなる複合正弦波形に対するコントラスト閾値の計算結果は、視点位置 θ_r によりかなり異なった閾値曲線を描く。ピーク減算型の場合 (図 2.15 (a)) を例にとると、視点 $\theta_r = 270^\circ$ の下で計算できる閾値曲線の内側では、人間は複合正弦波形の存在が検知できず、この閾値曲線上のコントラスト条件になって初めて何等かの波形の存在が検知できる様になることを意味する。この様な閾値曲線は視点位置を変えるごとに得られ、 $\theta_r = 270^\circ$ のときの閾値曲線が最も内側 (感度が高い) に位置し、 $\theta_r = 0^\circ$ のときの閾値曲線が最も外側 (感度が低い) に位置する結果になった。従って、 $\theta_r = 270^\circ$ と $\theta_r = 0^\circ$ の閾値曲線により囲まれた領域では、視点位置の変動に伴って何等かの波形の存在が検知できたりできなかったりするコントラスト条件であり、 $\theta_r = 0^\circ$ の閾値曲線の外側ではあらゆる視点位置に於いて波形が検出可能な状態であると判断できる。故に、本視覚モデルから得られる複合正弦波形に対する理論的コントラスト閾値は、 $\theta_r = 0^\circ$ と $\theta_r = 270^\circ$ の閾値曲線で囲まれた閾値領域として導出される。実測結果と比較すると、かなりの実測値がこの閾値領域内に含まれるが、閾値領域外に存在する実測値もまだ多く、波形検出条件だけではこの実測結果を説明しきれないことが分かる。一方、ピーク加算型の場合 (図 2.15 (b)) は、閾値曲線の構成がピーク減算型よりも複雑になっているが、この場合にも波形の存在が検知できる閾値曲線群のうち $\theta_r = 0^\circ$ と 90° と 270° の曲線によって囲まれた領域がこの視覚モデルから計算できる閾値領域となる。実測値と比較すると、この閾値領域内に含まれる実測値は少なく、ほとんどは閾値領域外であり、波形検出条件だけでは実測結果を正確に説明できないことがわかる。

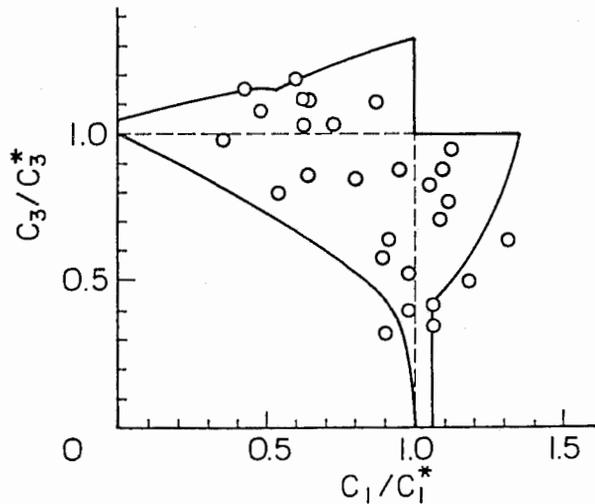
次に、(b) の正弦波形検出条件を用いてピーク減算型複合正弦波形のコントラスト閾値特性の計算値と実測結果を比較したところ図 2.16 (a) の様になった。コントラスト閾値は、この場合にも視点位置によりかなり異なる閾値曲線群で囲まれた閾値領域として得られ、最終的には視点 $\theta_r = 0^\circ$ と 270° に於いて計算された閾値曲線により囲まれる閾値領域 ($C_1/C_1^* > 1$ かつ $C_3/C_3^* > 1$ の領域は除く) となる。この閾値領域内では、視点位置の移動に伴い正弦波形の検知ができたりできなかったりする。また、この閾値領域より小さいコントラスト条件では、何等かの波形の検出が可能な場合はあるが正弦波形の検知は不可能な状態であり、逆に閾値領域より大きいコントラスト条件では、あらゆる視点位置に於いて正弦波形が検出可能な状態である。実測値との比較では、波形検出条件を用いた計算では説明できなかった閾値領域外の実測値がほぼこの正弦波形検出条件の下で得られる閾値領域内に含まれる結果となった。即ち、波形検出条件に基づく閾値領域と正弦波形検出条件に基づく閾値領域との合成を考えるならば、図 2.16 (b) の様に、合成領域と実測値の分布とがほぼ一致することが理解される。

一方、ピーク加算型複合正弦波形に対するコントラスト閾値特性 (図 2.17 (a)) も、ピーク減算型と同様に視点 $\theta_r = 90^\circ$ と 270° のときの閾値曲線で囲まれる閾値領域として得られ、波形検出条件に基づく計算では説明できない実測値のほとんどがこの閾値領域内に含まれることから、この場合にも波形検出条件による結果と正弦波形検出条件による結果とを合わせれば、図 2.17 (b) の様に、合成領域と実測値分布とがほとんど一致する結果となる。

閾値以下の複合正弦波形に対するコントラスト閾値を測定する心理物理実験[19] について考察してみる。単独正弦波形を観測する場合と異なり、複合正弦波形の観測に於いては、コント



(a) Complex sinusoidal pattern detection

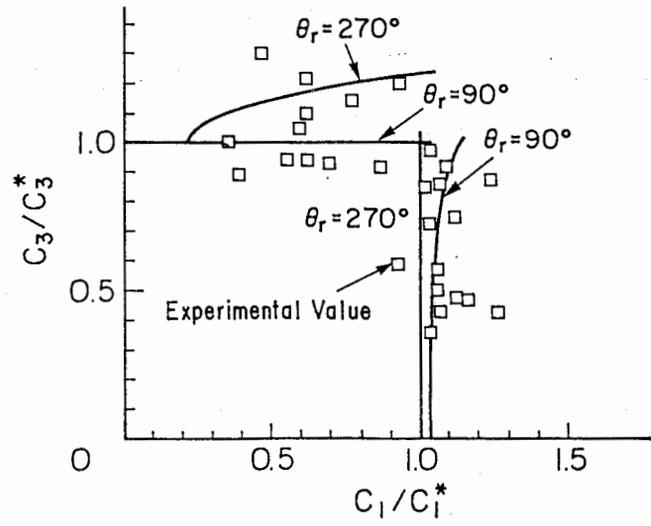


(b) Arbitrary wave form + Sinusoidal pattern detection

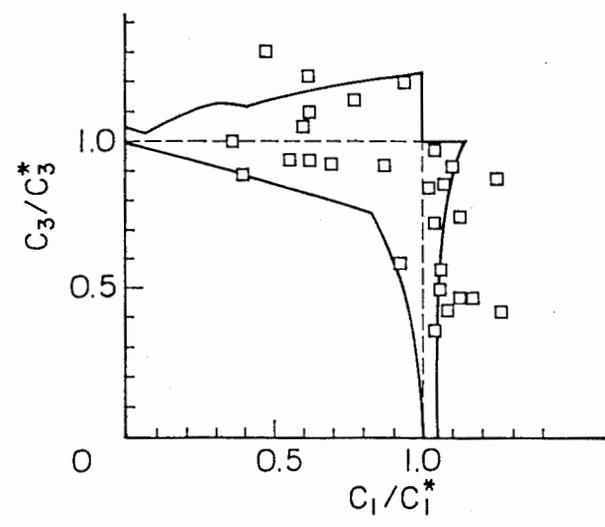
図 2.16 ピーク減算型複合正弦波に対するコントラスト閾値特性

Fig. 2.16 Threshold contrast characteristics of compound sinusoidal waves with peaks-subtract phase.

ラスト閾値であると知覚する人間の判断にはバラツキを生じさせる要因が存在すると考えられる。つまり、何らかの波形の検出をもって閾値と判断する場合もあれば、正弦波形を正しく検出したことで閾値と判断する場合もある。もしもこの考え方が正しいと仮定すれば、複合正弦波形に対するコントラスト閾値の測定実験に於いては、何等かの波形検出条件に基づく実測値と正弦波形検出条件に基づく実測値とが合成された形で測定されていると考えるのが妥当である。この観点に立脚して本視覚モデルから得られたコントラスト閾値特性を眺めると、確かに実測値のほとんどが波形検出条件と正弦波形検出条件に基づいて求められる閾値領域を合わせ



(a) Complex sinusoidal pattern detection



(b) Arbitrary wave form + Sinusoidal pattern detection

図 2.17 ピーク加算型複合正弦波に対するコントラスト閾値特性

Fig. 2.17 Threshold contrast characteristics of compound sinusoidal waves with peaks-add phase.

た領域内に含まれており、このことは本視覚モデルが実際の視覚系の応答を正確に模擬できている可能性の高さを示唆するものと考えられる。また、この閾値下複合正弦波形のコントラスト閾値特性は視覚系のマルチチャネル理論の証拠として見なされている特性であることを考慮すると、本視覚モデルの特徴であるマルチチャネル構造と視覚系のマルチチャネル理論とが密接に関係していることが容易に示唆され、この観点からも本視覚モデルが実際の視覚系に対する正当なモデルになっていると判断できる。

2.5.4 閾値上複合正弦波に対する知覚特性

空間周波数 $f_{s1} = 1.0$ cpd の正弦波形のコントラスト C_1 をこの正弦波形が単独で存在したときのコントラスト閾値 C_1^* 以上に設定した状態（正弦波形単独でも知覚できる設定条件）に於いて、空間周波数 $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形のコントラスト C_3 を増加させて行き、複合正弦波形

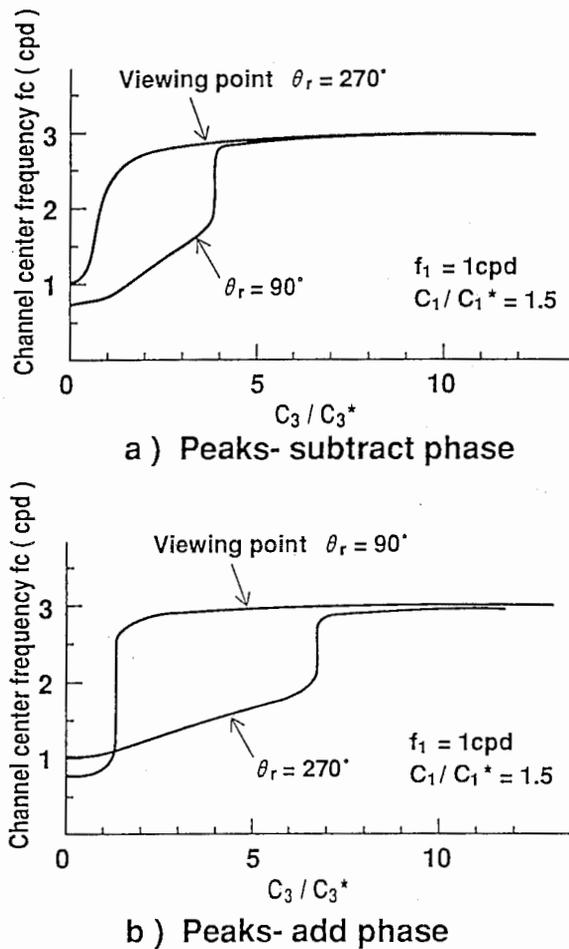


図 2.18 閾値上複合正弦波に於ける第2正弦波検出特性

Fig. 2.18 The second sinusoidal wave detection characteristics in supra-liminal compound sine-wave.

が空間周波数 $f_{s2} = 3$ cpdの単独正弦波形と同一に見える時のコントラスト C_3 を計算することで、閾値上複合正弦波形の知覚特性について考察する。計算結果を正規化する為に、コントラストは C_1/C_1^* 、 C_3/C_3^* の様に単独で存在した時のコントラスト閾値 C_1^* 、 C_3^* を基準にして設定した。

図2.18は $C_1/C_1^* = 1.5$ に設定し、第2正弦波形のコントラスト C_3/C_3^* とチャンネル中心周波数 f_c (最適観測状態と等価) の関係を計算した結果である。ピーク減算型の場合 (図2.18(a)、視点位置を $\theta_r = 270^\circ$ に固定すると、 $C_3/C_3^* = 0$ では $f_{s1} = 1$ cpd の正弦波形単独となるのでチャンネル中心周波数は $f_c = 1$ cpd であるが、 C_3/C_3^* の増加と共に $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形成分が増すので、それに伴ってチャンネル中心周波数 f_c は高い空間周波数へ移動し、 $C_3/C_3^* = 3$ 程度で $f_c = 3$ cpd に漸近するのが分かる。 $f_{s2} = 3$ cpdの単独正弦波形を観測した時のチャンネル中心周波数は $\theta_r = 270^\circ$ (正弦波形の輝度変化が最大になる視点位置) に於い

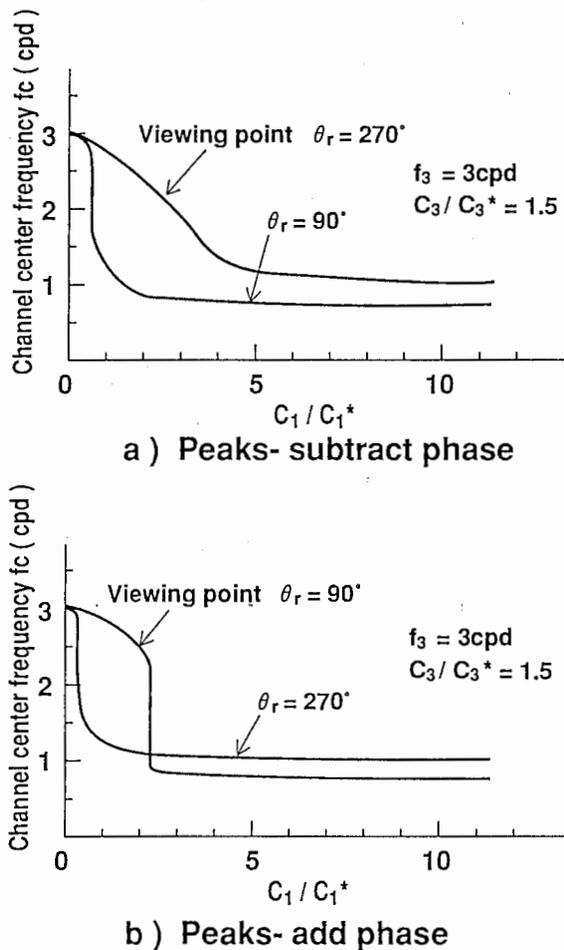


図2.19 閾値上複合正弦波に於ける第1正弦波検出特性

Fig. 2.18 The first sinusoidal wave detection characteristics in supra-liminal compound sine-wave.

て $f_c = 3$ cpd になる (図 2.6 より) ことを考慮すると、 $C_3 / C_3^* = 3$ 程度でこの複合正弦波形は $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形と同じ様に見えることが判断できる。また、視点位置が $\theta_r = 90^\circ$ の場合には、 $C_3 / C_3^* = 3.8$ でチャンネル中心周波数が急激に変化しており、このコントラストで複合正弦波形が $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形に急変して見えることが想像できる。結局、ピーク減算型では、複合正弦波形があらゆる視点に於いて $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形と同じ様に見えるのに必要なコントラストは $C_3 / C_3^* = 4$ 程度であることが分かる。一方、ピーク加算型の場合 (図 2.18 (b)) に於いては、 $C_3 / C_3^* = 7$ 程度あれば複合正弦波形があらゆる視点に於いて $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形と同じ様に見えることが分かる。即ち、ピーク減算型の方が小さなコントラストで $f_{s2} = 3$ cpd の正弦波形の知覚が可能になっており、ピーク減算型の方がピーク加算型より感度が高いと言える。この結果は、空間周波数 f の閾値上コントラストの正弦波形をバックグラウンドにして空間周波数 $3f$ の正弦波形のコントラスト感度を測定した時、ピーク減算型はピーク加算型より感度が高くなる実験結果[20]とも良く一致する。

逆に、 $f_{s2} = 3$ cpd の第 2 正弦波形コントラストを $C_3 / C_3^* = 1.5$ に固定し、 $f_{s1} = 1$ cpd の第 1 正弦波形コントラストを増加させたときの計算結果は、ピーク減算型 (図 2.19 (a)) で $C_1 / C_1^* = 4.5$ 、ピーク加算型 (図 2.19 (b)) で $C_1 / C_1^* = 2.5$ 程度あれば、複合正弦波形があらゆる視点に於いて $f_{s1} = 1$ cpd の第 1 正弦波形と同じ様に見えることを示している。この結果は、図 2.18 の結果とは逆にピーク加算型の方がピーク減算型よりも感度が高くなることを予測している。

2.6 画枠制限正弦波に対する視覚モデルの応答特性

視覚系の応答特性 (例えばコントラスト感度特性) は提示画像の空間周波数構造や提示条件などに依存して適応的に変化することが知られている。表示装置の画面サイズの減少と伴に低域空間周波数領域でのコントラスト感度が低下する現象[21] (以下、画面サイズ依存特性とする) も提示画像の性質に依存して変化する視覚応答の代表例である。従来研究に於いて画面サイズ依存特性を再現する試みとしては、各種画面サイズに対して実測されたコントラスト感度曲線を関数で近似し、この関数をディスプレイ評価の際の重み関数として利用しようとする研究[22]がある。しかし、関数近似では視覚特性の生じる原因やメカニズムについては何も議論できず、他の視覚特性再現への応用性に欠ける。また、画面サイズ依存特性が生じる原因に関しては、ディスプレイ上に表示できる正弦波形の明暗繰り返し数がある程度以下になるとコントラスト感度が低下するとの考え[23][24]が議論されたが、この考え方は画面サイズ依存特性を単に現象論的に言い換えたものに過ぎず、この視覚現象が生じる原因を説明したものとは言

えない。

そこで本論文では、視覚モデルのコントラスト感度計算プロセスの立場から、視覚系の1つの基本的特性として空間周波数弁別能力の限界（空間周波数弁別不可能領域の存在）という特性の存在が予想し得ること、及びこの基本的特性を視覚モデルに導入すれば画面サイズ依存特性に関しても理論的に再現でき、実測とも良く一致する視覚モデルに拡張可能であることを示す。即ち、画面サイズ依存特性とは一見何の関係もなさそうに見える空間周波数弁別能力の限界と言う特性がこの視覚現象の生じる重要な原因として影響している可能性を検証する。これは、ボケと視野の相互依存作用を土台とし視覚系の他の基本現象を組み合わせれば、提示画像に依存して形を変える視覚応答が理論的に予測できる視覚モデルが構築できるという筆者の考えを実証する1例でもある。

2.6.1 評価関数の導出

有限画面サイズのディスプレイ上に提示された正弦波形（以下、画枠制限正弦波形とする）を視覚モデルに観測させた時の評価関数の導出を行なう。

画枠制限正弦波形 $f(r)$ は、画面サイズに相当する幅を持つ高さ1の単一パルス関数と平均値零の正弦波形 $f_{\sin}(r)$ を乗算したものに平均輝度 B を加えた関数で表現できる。以下では、評価関数やコントラスト感度の計算式を解析的に表現する為に、単一パルス関数を周期的なパルス関数 $f_{\text{rec}}(r)$ （十分低い基本空間周波数を持ち、かつデューティ比(duty ratio)の十分小さな矩形波形）で近似し、次式で表現する。

$$f(r) = f_{\text{rec}}(r)f_{\sin}(r) + B \quad (2.38)$$

$$f_{\text{rec}}(r) = d + (2/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} \cos(n\omega_R r + n\theta_r) \quad (2.39)$$

$$f_{\sin}(r) = A \cos(\omega_s r + \omega_s \theta_r / \omega_R + \alpha) \quad (2.40)$$

r : 2次元平面上の位置ベクトル

A : 正弦波形の振幅輝度

B : バイアス輝度 (平均値)

ω_R, ω_s : 矩形波及び正弦波の空間角周波数

θ_r : 視点位置 (提示画像の位相)

α : 矩形波形と正弦波形の位相差

d : 矩形波形のduty ratio

以下では、水平方向に関して視距離一定になる円筒状スクリーンに画像を提示するものとする。
この場合、正弦波形提示部分の大きさ（画面サイズに相当） I_w は視角表現で次式となる。

$$I_w = d / F_r \quad (2.41)$$

但し、 F_r は矩形波形の空間周波数（cpd）である。以下、視覚モデルの定式化手順に従って、
画枠制限正弦波形に対する評価関数 I を導出すると以下の様に表現できる。

$$I = (A/B)^2 \sum_{j=1}^7 I_j \quad (2.42)$$

$$I_1 = d^2 H^2(\omega_s) \exp(-2\tau_0 \omega_s^2) \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ \times [\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\omega_s \theta_r / \omega_R + 2\alpha) \exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (2.43)$$

$$I_j = \frac{2d}{\pi} \sum \frac{\sin(\pi nd)}{n} H(\omega_s) H(\omega_j) \exp\{-\tau_0(\omega_s^2 + \omega_j^2)\} \\ \times \sinh\{\omega_s \omega_j(\tau_0 - \tau_1)\} [\cos(n\theta_r) \exp\{\omega_s \omega_j(\tau_0 - \tau_1)\} \\ - \cos\{(\omega_s + \omega_j)\theta_r / \omega_R + 2\alpha\} \exp\{-\omega_s \omega_j(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (2.44)$$

(j = 2, 3)

$$\omega_j = \omega_s + n\omega_R \quad (j=2) \\ = \omega_s - n\omega_R \quad (j=3)$$

$$I_j = \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd) \sin(\pi md)}{nm} H(\omega_{j1}) H(\omega_{j2}) \exp\{-\tau_0(\omega_{j1}^2 + \omega_{j2}^2)\} \\ \times \sinh\{\omega_{j1} \omega_{j2}(\tau_0 - \tau_1)\} [\cos\{(\omega_{j1} - \omega_{j2})\theta_r / \omega_R\} \exp\{\omega_{j1} \omega_{j2}(\tau_0 - \tau_1)\} \\ - \cos\{(\omega_{j1} + \omega_{j2})\theta_r / \omega_R + 2\alpha\} \exp\{-\omega_{j1} \omega_{j2}(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (2.45)$$

(j = 4 - 7)

$$\omega_{j1} = \omega_s + n\omega_R, \quad \omega_{j2} = \omega_s + m\omega_R \quad (j=4) \\ = \omega_s - n\omega_R, \quad = \omega_s - m\omega_R \quad (j=5) \\ = \omega_s + n\omega_R, \quad = \omega_s - m\omega_R \quad (j=6, 7)$$

以上の様に、画枠制限正弦波形に対する評価関数は7項から成る。即ち、評価関数の第1項 (I_1) は空間周波数 ω_s の正弦波形のみに対する印象の強さ、第2、3項 (I_2 、 I_3) は正弦波信号と上下側波帯との相互作用の結果得られる印象の強さ、第4、5項 (I_4 、 I_5) は各々上側波帯と下側波帯のみに対する印象の強さ、第6、7項 (I_6 、 I_7) は上下側波帯間の相互作用から得られる印象の強さを表わす。この視覚モデルが画枠制限正弦波形を観測するときの最適観測状態は、式(2.29)のボケと視野の関係式を拘束条件として式(2.42)の評価関数を極大化することにより推定できる。評価関数値は提示画像の空間的变化に対する印象の強さ(一種の感覚量)として定義されている。従って、評価関数値がある閾値以下の場合、人間には画像の空間的变化の存在即ち画像そのものの存在が分からなくなることを意味する。

2.6.2 空間周波数弁別能力を考慮したコントラスト感度と導出法

コントラスト感度は最適観測状態に於ける評価関数値と閾値 $C_{th}^2/2$ が一致した時のコントラストの逆数として計算できる。式(2.42)から計算される評価関数値を用いて得られたコントラスト感度は画枠制限正弦波形を観測した場合の感度である。実測されているのは大きさの制限を受けた表示画面上に提示された正弦波形に対する感度であるから式(2.42)をそのまま使うことはできない。理論的に考えるならば、式(2.42)の内、正弦波形のみを観測した場合の評価関数値 I_1 を用いるべきであろう。しかし、画枠制限正弦波形の空間周波数構造(図2.20)は、正弦波空間角周波数 ω_s を中心として矩形波基本空間角周波数 ω_r の間隔で側帯波が並んでいる構造であり、しかも矩形波基本空間周波数は十分小さい(提示画像を関数近似した時の近似条件より)のであるから、正弦波空間周波数の周りに側帯波が密集した状態になっている。

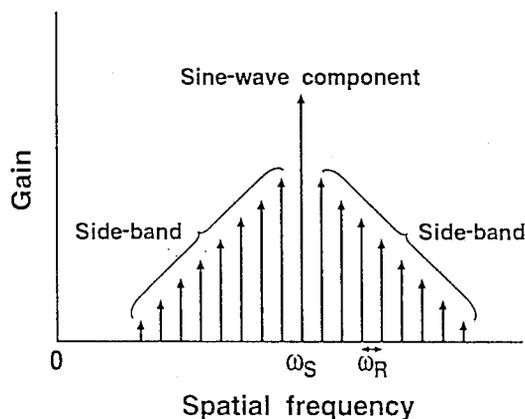


図 2.20 画枠制限正弦波の空間周波数構造模式図

Fig. 2.20 A schematic spatial frequency structure of a sinusoidal wave with a limited display size.

例えば、視角 10° の画面サイズを持つディスプレイ上に提示された正弦波形を考えて見る。この場合、画面サイズを表わす矩形波形として、視角 180° 内に1つのパルス（パルス幅は視角で 10° ）しか現われない矩形波形を想定すると、矩形波形の基本空間周波数は約 0.01 cpd となる。この様に狭い空間周波数間隔で密集している空間周波数構造を持つ信号の中から正弦波空間周波数 ω_s のみを検出することは理論的には可能であっても、実際の視覚系には困難であることが容易に予想される。つまり、視覚系は正弦波空間周波数を中心としたある幅の空間周波数領域内では空間周波数の違いを識別できないことが予想される。これは、視覚系に於ける空間周波数弁別能力の限界の存在を意味する。この空間周波数弁別不可能領域（以下、周波数統合範囲とする）の存在は実験でも確認されており、空間周波数の高低とは無関係に、少ない場合でも今考慮されている正弦波空間周波数を中心にして上下約 2% の空間周波数範囲が、多い場合には約 7% の空間周波数範囲（平均で約 4% ）が弁別不可能と報告されている [25]。従って、周波数統合範囲内の成分全体が検出すべき正弦波成分であるとして感度計算を行えば良いと考えられる。図 2.2 1 は提示画像の空間周波数構造と周波数統合範囲の関係を表現した模式図である。即ち、今問題とする正弦波空間周波数に対する周波数統合範囲は次式で表わせる。

$$\omega_s - \omega_s \cdot \text{Fur} \leq \omega \leq \omega_s + \omega_s \cdot \text{Fur} \tag{2.46}$$

但し、Fur は周波数統合範囲の広さを決める定数（統合定数）である。また、周波数統合範囲内の側帯波成分の数 N_R （線スペクトルの数）は次式となる。

$$N_R = 2 \llbracket \omega_s \cdot \text{Fur} / \omega_R \rrbracket \tag{2.47}$$

但し、 $\llbracket \cdot \rrbracket$ は小数点以下切り捨てを意味する。従って、周波数統合範囲に含まれながら側帯

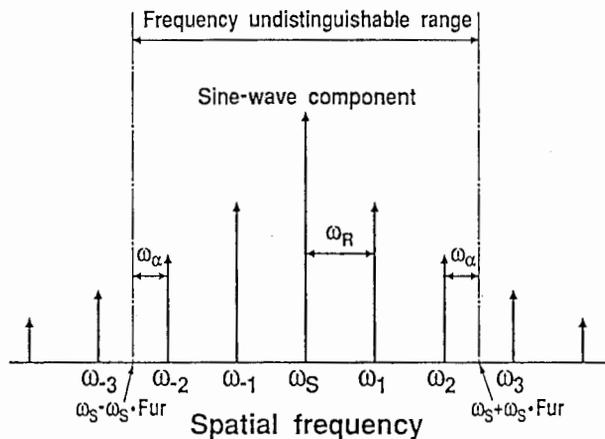


図 2.2 1 周波数統合範囲を説明する模式図

Fig. 2.21 A schematic diagram for explaining frequency undistinguishable range.

波成分が存在しない為に周波数統合範囲として意味を持たない外側に位置する空間周波数範囲の大きさ ω_α は次の様になる。

$$\omega_\alpha = \omega_s \cdot F_{ur} - \omega_R \cdot N_R / 2 \quad (2.48)$$

図2.21の場合には、周波数統合範囲内に存在する空間角周波数は ω_s 、 $\omega_{\pm 1}$ 、 $\omega_{\pm 2}$ のみであるが、 ω_α と ω_R の比の大きさによっては $\omega_{\pm 3}$ の成分の一部も周波数統合範囲内として扱った方が後で計算するコントラスト感度曲線が滑らかになると期待される。そこで、周波数統合範囲外で最も統合範囲に近い境界周波数 ($\omega_{\pm 3}$ に相当) に関しては、適当な条件 (後で説明) を付けて周波数統合範囲内の成分とみなすことにする。

次に、周波数統合範囲を考慮してコントラスト感度を導出する。正弦波形に関する感度を計算するには、提示画像である画枠制限正弦波形を観測した時の最適観測状態を求め、この最適観測状態での評価関数値 (式(2.42)) の中から感度計算に影響する評価関数値成分 I_s を取り出す必要がある。具体的には、 I_s は周波数統合範囲内のみが存在する周波数と境界周波数が関係した各々の評価関数値成分の和である。境界周波数を周波数統合範囲に含ませる条件としては、単純に境界周波数が関係した評価関数値成分に比率 $RNP (= \omega_\alpha / \omega_R)$ を乗じることとした。さらに、周波数統合範囲内と範囲外の周波数同志も接近しているので、周波数統合範囲の内と外の周波数の相互作用を表わす評価関数値成分 I_o もかなり大きくなることが予想され、この評価関数値成分 I_o が感度計算に及ぼす影響も考慮する必要があると考えられる。具体的にどの程度の I_o 成分が感度計算に寄与するかは明確に規定できないので、以下では I_o 成分を全て I_s の中に加える場合 (Type I) と全く考慮しない場合 (Type II) について計算し、後で I_o の影響について考察する。

(Type I の場合)

この場合は、周波数統合範囲内の空間周波数が関係している評価関数値成分をすべて加え合わせたもの (即ち、 I_o 成分を全て I_s の中に加える) を用いて感度を計算することになる。従って、式(2.42)の評価関数値の内、 $I_1 \sim I_3$ は正弦波空間周波数が関係しているので当然正弦波検出用の評価関数値 I_s に含まれる。また、 $I_j (j=4-7)$ を簡略化して

$$I_j = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} I_j(n, m) \quad (j=4-7) \quad (2.49)$$

と表現すると、この式は次の5項に分解できる。

$$\begin{aligned}
 I_j = & \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{\infty} I_j(n, m) + \sum_{n=N_R+1}^{\infty} \sum_{m=1}^{N_R} I_j(n, m) \\
 & + \sum_{m=N_R+1}^{\infty} I_j(N_R+1, m) + \sum_{n=N_R+2}^{\infty} I_j(n, N_R+1) + \sum_{n=N_R+2}^{\infty} \sum_{m=N_R+2}^{\infty} I_j(n, m) \quad (2.50)
 \end{aligned}$$

この式で、第1、2項は周波数統合範囲内の空間周波数が関係する成分であり、第3、4項（境界周波数成分を含む項）は比率RNPを乗じた値が感度計算に利用される。そして、第5項は正弦波検出に無関係の成分である。従って、正弦波検出に關係する評価関数値の総和 I_s は次式となる。

$$\begin{aligned}
 I_s = & (A/B)^2 \sum_{j=1}^3 I_j + (A/B)^2 \sum_{j=4}^7 \left[\sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{\infty} I_j(n, m) \right. \\
 & \left. + \sum_{n=N_R+1}^{\infty} \sum_{m=1}^{N_R} I_j(n, m) + RNP \left\{ \sum_{m=N_R+1}^{\infty} I_j(N_R+1, m) + \sum_{n=N_R+2}^{\infty} I_j(n, N_R+1) \right\} \right] \quad (2.51)
 \end{aligned}$$

故に、コントラスト感度は $I_s = C_{th}^2 / 2$ を満たすコントラストの逆数 (B/A) として計算できる。

(Type II の場合)

この場合には、周波数統合範囲内の空間周波数のみからなる評価関数値成分 (I_0 は含めない) を用いて感度計算を行う。式(2.42)の I_1 は正弦波形の評価関数値なので当然 I_s の一部である。 I_j ($j=2, 3$) を簡略化して表現すると

$$\begin{aligned}
 I_j = & \sum_{n=1}^{\infty} I_j(n) \quad (j=2, 3) \\
 = & \sum_{n=1}^{N_R} I_j(n) + I_j(N_R+1) + \sum_{n=N_R+2}^{\infty} I_j(n) \quad (2.52)
 \end{aligned}$$

の様に3つに分解できる。この内、周波数統合範囲内のみの成分である第1項と、第2項（境界周波数成分を含む項）に比率RNPを乗じたものは正弦波検出に利用され、第3項は正弦波検

出とは無関係な成分となる。また、 I_j ($j=4-7$)は次の5項に分解できる。

$$I_j = \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_R} I_j(n, m) + \sum_{m=1}^{N_R+1} I_j(N_{R+1}, m) \\ + \sum_{n=1}^{N_R} I_j(n, N_{R+1}) + \sum_{n=N_R+2}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} I_j(n, m) + \sum_{n=1}^{N_R+1} \sum_{m=N_R+2}^{\infty} I_j(n, m) \quad (2.53)$$

この内、第1項は周波数統合範囲内の空間周波数のみが関係する成分、第2、3項（境界周波数成分を含む項）は比率RNPを乗じたものが正弦波検出に利用される成分、第4、5項は正弦波検出に無関係な成分である。従って、正弦波検出に關係する評価関数値の総和 I_s は次式となる。

$$I_s = (A/B)^2 I_1 + (A/B)^2 \sum_{j=2}^3 \left\{ \sum_{n=1}^{N_R} I_j(n) + RNP I_j(N_{R+1}) \right\} \\ + (A/B)^2 \sum_{j=4}^7 \left[\sum_{n=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_R} I_j(n, m) + RNP \left\{ \sum_{m=1}^{N_R+1} I_j(N_{R+1}, m) + \sum_{n=1}^{N_R} I_j(n, N_{R+1}) \right\} \right] \quad (2.54)$$

感度はType Iと同様にして計算できる。

2.6.3 コントラスト感度空間周波数特性の実測と理論の比較

前節で導出したコントラスト感度の理論式を用いて、画枠制限正弦波形に対するコントラスト感度特性の画面サイズ依存特性を計算し、実測結果との比較検討を行なう。その際、この特性に及ぼす周波数統合範囲の広さの影響及び感度計算法（Type IとType II）の違いの影響を明確にし、さらにこの視覚現象の発生メカニズムについても考察する。

2.6.3.1 感度計算法及び周波数統合範囲の影響

まず、比較の為に周波数統合範囲を考慮しないでコントラスト感度空間周波数特性に及ぼす画面サイズの影響について計算した（図2.22）。計算では、円筒状スクリーンに提示した画枠制限正弦波形の近似として、視角 180° 内に1つのパルス（パルス幅は画面サイズに相当し、このパルス内に正弦波形が提示される）しか現われない矩形波形を用いた。さらに、視点位置は提示画像の中心位置（ $\theta_r = 0^\circ$ ）、矩形波形と正弦波形の位相差は $\alpha = 90^\circ$ （視点位置

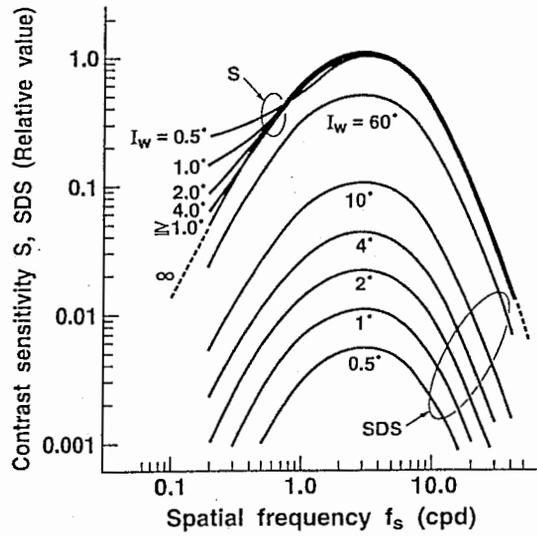


図 2.2 2 周波数統合範囲を考慮しない場合のコントラスト感度の表示面サイズ依存特性
 Fig. 2.22 Spatial frequency characteristics of the contrast sensitivity derived from this model
 at various kinds of display sizes. Frequency undistinguishable range is not considered.

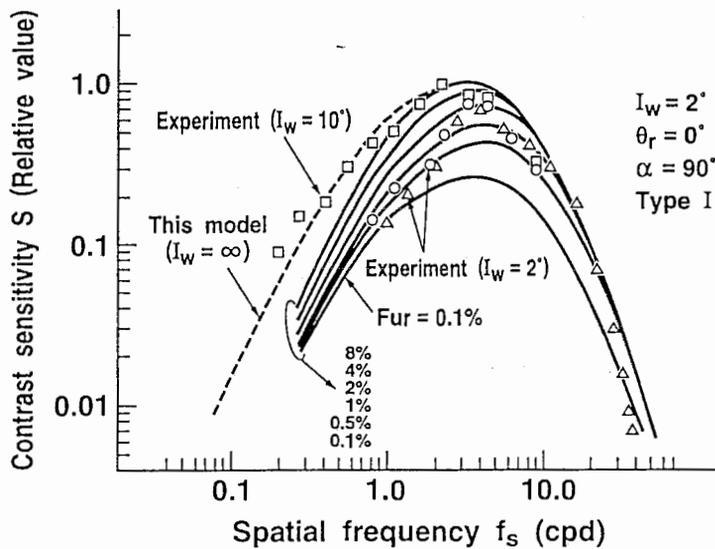


図 2.2 3 コントラスト感度の周波数統合範囲依存特性 (Type I, $I_w = 2^\circ$)
 Fig. 2.23 Comparison of measured contrast sensitivity functions with theoretical ones derived
 from this model at various values of "Fur". (Type I, $I_w = 2^\circ$)

が正弦波形の輝度変化最大位置と一致する)に設定した。その結果、画枠制限正弦波形の検出に基づくコントラスト感度 S (式(2.42)の評価関数値全体を用いて計算)は低域空間周波数領域に於いて画面サイズ I_w の影響が生じるものの、全体としては無限平面に提示した正弦波形に対する感度特性(破線で表示)とはほぼ重なった。一方、正弦波形のみを検出した場合のコントラスト感度 SDS (式(2.42)の I_1 成分のみを用いて計算)は、画面サイズ I_w の減少と共に空間周波数全体に互って感度が低下する特性となった。これらの特性は、実測で得られる画面サイズ依存特性[21] (画面サイズが減少すると低域感度が低下する)とは明らかに異なる。

次に、周波数統合範囲を考慮した場合を示す。図2.23は、画面サイズを $I_w=2^\circ$ に固定し、Type Iの感度計算法を用いた場合(その他の計算条件は図2.22と同じ)のコントラスト感度空間周波数特性に於ける周波数統合範囲の広さ(統合定数 Fur が0.1%から8%まで変化)の影響を計算したものであり、比較の為に画面サイズ $I_w=2^\circ$ と 10° の場合の実測結果(□○△で表示)[15]も重ねて表示した。この実測結果の実験条件では、画面の周りに白板を設置することで、画面周辺の明るさと画面の平均明るさとが等しくなり[15]、視覚モデルによる計算条件とほぼ同じ条件となる為、実測結果と計算結果を比較するのに都合が良い。この図から、(1)統合定数が $Fur=0.1\%$ の場合は図2.22の正弦波形のみから計算した感度特性 SDS と同様に空間周波数全体に互って感度低下を起こすこと、(2) Fur を大きくする(周波数統合範囲を広げる)と低域空間周波数領域では感度はあまり増加しないが、高域空間周波数領域では視覚モデルの網膜特性(無限平面に提示した正弦波形に対する感度特性を意味し、破線で表示した)と一致するまで感度が増加すること、(3) Fur が約1%での計算結果と実測結果(白丸○と白三角△で表示)とが良く一致することが分かる。視覚モデルに導入してある網膜特性は本来は無限平面に提示した正弦波形に対する感度特性であるが、この条件での実測結果が見当たらないので画面サイズ $I_w=10^\circ$ での実測値を用いている。図2.23で破線と $I_w=10^\circ$ での実測値とがほぼ一致するのはこの為である。同様に図2.24は、Type IIの感度計算法を用いた場合(その他の計算条件は図2.23と同じ)のコントラスト感度空間周波数特性に於ける周波数統合範囲の広さ(統合定数 Fur が2%から10%まで変化)の影響を計算したものである。定性的には図2.23と同様の結果が得られるが、定量的には、統合定数 Fur が約6-8%の場合に計算結果と実測結果[15]とが良く一致すること及び帯域通過型を示すコントラスト感度特性の帯域幅が少し狭いところが図2.23と異なる。

以上の計算結果より、周波数統合範囲を考慮すれば(Type Iの場合 $Fur=1\%$ 程度、Type IIの場合 $Fur=6-8\%$ 程度)、感度の画面サイズ依存特性が視覚モデルから理論的に再現可能であることが示せた。この結果は、空間周波数弁別能力の限界という基本特性が画面サイズ依存

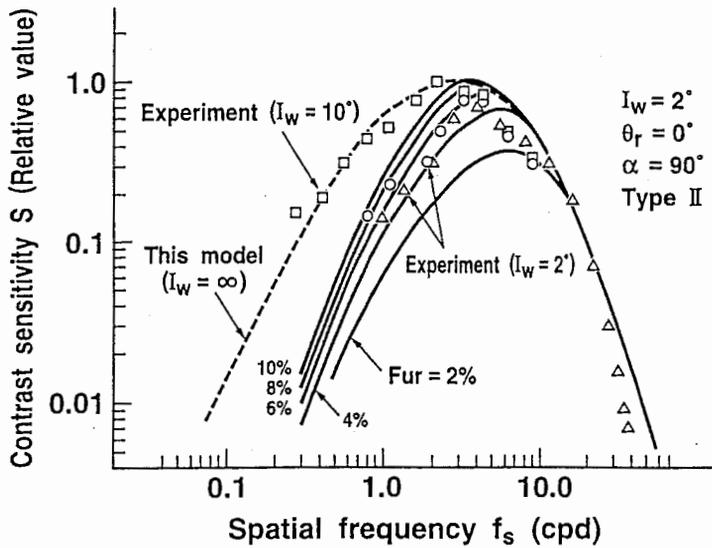


図 2.24 コントラスト感度の周波数統合範囲依存特性 (Type II, $I_w = 2^\circ$)

Fig. 2.24 Comparison of measured contrast sensitivity functions with theoretical ones derived from this model at various values of "Fur". (Type II, $I_w = 2^\circ$)

特性の発生原因になっている可能性を示唆するものと考えられる。さらに、視覚モデルの感度計算法の違いにより生じる統合定数の範囲の変動 $Fur = 1 - 8\%$ が実測結果 (統合定数が $Fur = 2 - 7\%$ の幅で変動し、平均で約 4% [25]) と比較的良く重なっていることから、空間周波数弁別能力の限界が画面サイズ依存特性の発生原因になっているという可能性が支持されるものと考えられる。また、感度計算法の違いに基づく統合定数の違いは、周波数統合範囲の内と外の空間周波数の相互作用による評価関数値成分 I_0 が感度計算に及ぼす影響の大きさを意味する。即ち、Type I は周波数統合範囲内外の相互作用の影響 I_0 を全て集め、最も感度を高くした場合の計算法であるから小さな統合定数 Fur でも良く、Type II は相互作用の影響 I_0 を全て排除し、最も感度を低くした場合の計算法であるから少し大きな統合定数 Fur が必要になる。実際の視覚系の統合定数は被験者や実験条件の違いにより異なる可能性が考えられるが、実測で求まっている平均統合定数 $Fur = 4\%$ 程度 [25] を仮定した場合、この状態を視覚モデルから再現するには、Type I と Type II の中間的な計算法、即ち周波数統合範囲の近辺に存在する空間周波数成分同志の相互作用のみを考慮した評価関数値成分 (I_0 の一部) を考慮して感度を計算すれば良いことになる。

2.6.3.2 感度特性に於ける画面サイズの影響

図2.25はコントラスト感度の画面サイズ依存特性を実測した代表例[21]であり、画面サイズの減少と共に、低域空間周波数領域を中心としてコントラスト感度が低下すること、及び感度最大を示す空間周波数位置が高域周波数の方へシフトすることをその特徴とする。一方、図2.26は視覚モデルから理論的に計算した画面サイズ依存特性である。但し、画面サイズ $I_w = 2^\circ$ で実測結果と良く一致した計算条件 (Type Iの感度計算法と統合定数 $F_{ur} = 1\%$) を用いて計算した。図2.26の計算結果は、低域感度低下特性に関しても感度最大となる空間周波数の高域シフトに関しても定性的には実測結果 (図2.25) と良く一致した特性を示し、感度の画面サイズ依存特性が本視覚モデルにより理論的に再現可能であることが分かる。実測結果と計算結果が定量的に異なる原因は、実験条件と計算条件が違うこと (実験条件では画面内の平均輝度は画面周辺輝度の10倍であり、計算条件では同じ明るさ)、被験者の正確な統合定数 F_{ur} の値が未知であること、及び視覚モデルがこの実験の被験者に適応化されていない (基本的特性として視覚モデルに導入してある網膜特性とこの被験者の特性との不一致) ことが挙げられる。

また図2.27は、図2.26の計算時に得られる視覚モデルのチャンネル中心周波数 f_c (最適観測状態と1対1に対応する) と正弦波空間周波数の関係、即ち提示画像の性質に依存して視覚モデルの最適観測状態が変化する様子を計算したものである。チャンネル中心周波数 f_c は式(2.30)を用いて最適観測状態から計算できる。高域空間周波数領域では画面サイズ I_w に関係

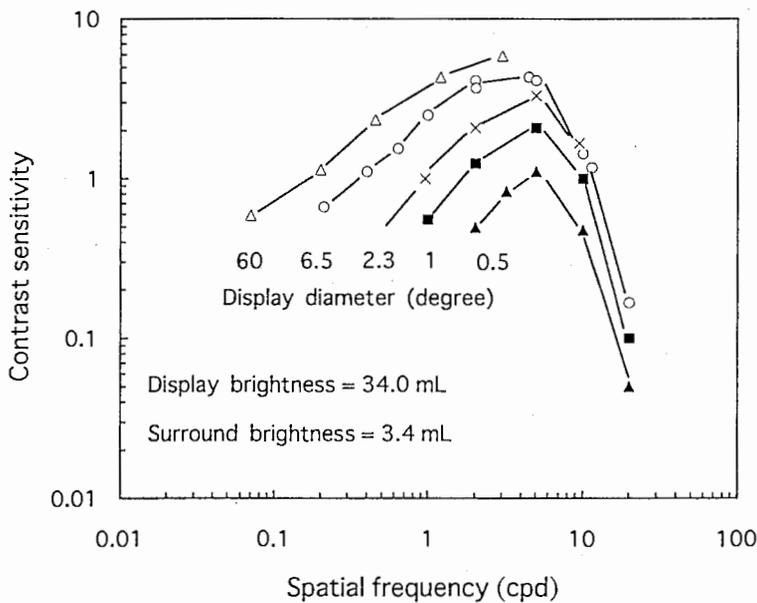


図2.25 コントラスト感度表示面サイズ依存特性の実測結果 [21]

Fig. 2.25 Measured spatial frequency characteristics of contrast sensitivities at various display sizes.

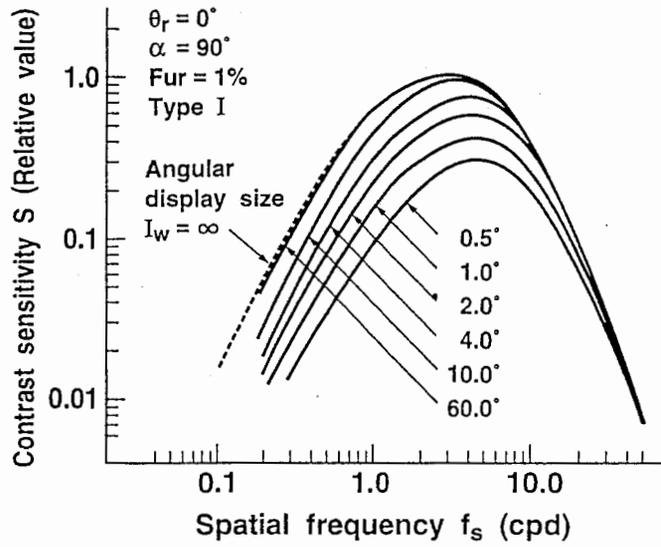


図 2.26 コントラスト感度表示面サイズ依存特性の計算結果

Fig. 2.26 Theoretical spatial frequency characteristics of contrast sensitivities derived from this model at various display sizes.

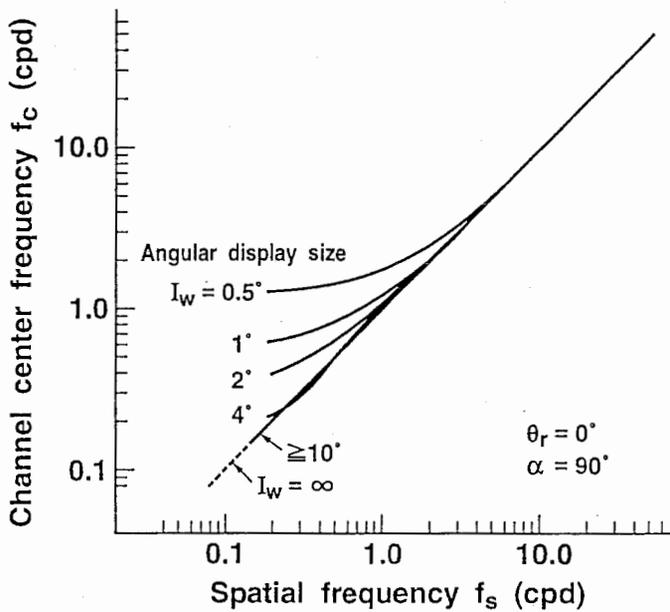


図 2.27 画枠制限正弦波観測時の視覚モデル最適観測状態の表示面サイズ依存特性

Fig. 2.27 Spatial frequency characteristics of this model's channel center frequency f_c at various display sizes.

なく無限平面に提示した正弦波形を観測した場合に得られるチャンネル中心周波数（破線で表示）と重なる特性となった。これは高域空間周波数領域では正弦波空間周波数と側帯波周波数とが非常に密集している為に、正弦波形が単独で存在する場合と見分けがつけ難くなっていることを意味する。一方、低域空間周波数領域では画面サイズ I_w の減少と共にチャンネル中心周波数は高くなり（画像を観測する時のボケと視野が小さくなる）正弦波形の場合（破線）から離れて行く。これは、正弦波形ではなく画面サイズに相当する矩形波パルスが見え易くなっていることを意味すると判断できる。

2.6.4 考察

次に、視覚系に於けるコントラスト感度画面サイズ依存特性の発生メカニズムについて考える。図2.23、図2.24より周波数統合範囲を増加させると、低域よりも高域空間周波数領域に於けるコントラスト感度の方がより大きく増加し、網膜特性に漸近することが分かった。これは、矩形波形基本空間角周波数 ω_R が非常に小さい為に低域よりも高域空間周波数領域の方が周波数統合範囲内により多くの側帯波成分を含み（図2.20、図2.21参照）、感度計算に影響を与える評価関数値成分がそれだけ大きくなるからである。従来この視覚現象に関しては、画面サイズが小さくなると低域感度が低下すると説明されてきた。しかし、視覚モデルの観点から考えてみると、画面サイズが小さくなると正弦波形そのものに対する感度は全空間周波数帯域に亘って全体的に低下するが、空間周波数弁別能力の限界の存在の為に高域空間周波数領域では感度が増加し正弦波形に対する感度低下を相殺することができるというより詳しい発生メカニズムの想定が可能である。この様に、視覚応答を正確に再現できる視覚モデルができると、モデルの立場から逆に視覚現象の発生する原因や発生機構を推測することが可能になる利点が生まれる。

2.7 むすび

視覚系と同等またはそれ以上の性能を有する画質評価法やパターン認識装置を開発するには、提示画像の性質や提示条件に依存して適応的に変化する視覚特性（知覚特性）が理論的に再現可能な視覚系の数理モデルを構築することが重要であるという観点から、静止画像を対象とした場合の視覚系知覚機構の数理モデルの定式化を行ない、本視覚モデルの正当性の検証を行った。具体的モデル化に於いては、視覚系では提示画像に含まれる空間周波数に依存して網膜像のボケ量と視野が相互依存的に変化する（画像観測に於ける基本現象）と言う考えを基に、画像観測プロセスを図形観測理論を応用して数理的にモデル化してあり、提示画像を観測するの

に最も適した観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が理論的に計算できる機構が備わっている。本視覚モデルを正弦波形に適用することにより、観測状態（ボケ量と視野の大きさ）の満たすべき関係式が導出できると同時に、本モデルの基本的特性である正弦波空間周波数特性が観測状態と1対1に対応する数多くの狭帯域フィルタ群で構成され、このフィルタ群の包絡線が実測されている正弦波コントラスト感度空間周波数特性（所謂、網膜特性）になる構造（マルチチャンネル構造）であることを示した。本視覚モデルの正当性の検証として、矩形波形、複合正弦波形、表示画面サイズが限定された正弦波形（画枠制限正弦波）に対する視覚モデルの応答特性（見え方特性、コントラスト感度特性、コントラスト閾値特性）と実測結果との比較を行ったところ、両者は良く一致することが示せた。具体的結果は、以下の通りである。

（矩形波形に関する結果）

- (1) 方形波に対するコントラスト感度空間周波数特性の実測結果と計算結果は良く一致する。
一般の矩形波に関しても、両者は良く一致する（但し、実測結果は一部のみ存在する）。
- (2) 低空間周波数の方形波を観測する場合の網膜像のボケの程度は一定値になることが視覚モデルから理論的に導出でき、これは実測とも良く一致する。

（複合正弦波に関する結果）

- (1) 2つの正弦波形の内、空間周波数、振幅、視点位置に依存してどちらの正弦波形がより見え易いかが理論的に明確にでき、これは実際の見え方特性と定性的に一致する。
- (2) 閾値下複合正弦波形のコントラスト閾値特性に於いて、視覚モデルから理論的に計算した閾値領域の中にほとんどの実測値が含まれ、実測と理論は良く一致する。この結果は、視覚系のマルチチャンネル理論と本視覚モデルの本質的特徴であるマルチチャンネル構造とが密接に関係していることを示唆するものと言える。
- (3) 閾値上複合正弦波形に於いて、空間周波数の高い正弦波形（第2正弦波）検出時のコントラスト感度は、ピーク減算型の方がピーク加算型よりも高く、実測結果とも一致する。逆に、空間周波数の低い正弦波形（第1正弦波）検出の場合には、ピーク加算型の方が高くなることが理論的に予測された。

（画枠制限正弦波形に関する結果）

- (1) 空間周波数の違いが弁別できない範囲の存在（空間周波数弁別能力の限界）という視覚系の基本的特性を視覚モデルに導入することにより、コントラスト感度の表示画面サイズ

依存特性が理論的に再現でき、実測結果とも良く一致する。

- (2) シミュレーションから得られた理論的周波数弁別不可能範囲は感度計算法に依存して変化するが、統合定数で $F_{ur} = 1-8\%$ の範囲となり、実測されている値(2-7%)と同程度となり、ここからも本モデルの正当性が示唆される。
- (3) 周波数弁別不可能範囲の存在は、高域空間周波数領域では画面サイズの減少によって低下した感度を相殺する効果を持つが、低域での影響は少ない。(画面サイズ依存特性の発生メカニズム)

以上の結果は、本視覚モデルが静止画像に対する実際の視覚系の視知覚応答特性を定量的に再現する能力を持っていることを示すものであり、人間と同程度の性能を持つ画質評価法やパターン認識装置を開発する場合にも十分応用可能な基本的性能を有している視覚モデルになっていると考えられる。

第3章

眼の焦点調節特性の実測による 視覚モデルの正当性の検討

あらまし

焦点調節機構の解明を目指し、最も基本的な特性である焦点調節応答の空間周波数依存特性と視点位置依存特性を赤外線オプトメータを用いて実測した。その結果、正弦波空間周波数の低下と共に焦点調節誤差が単調増加（網膜像のボケの程度が増加）すること（空間周波数依存特性）、及び方形波の場合の低域空間周波数ではエッジ部に視点を置いて観測した方が焦点調節誤差が小さくなる（網膜像のボケの程度が減少）こと（視点位置依存特性）が導出された。さらに、一般的には変動しないと考えられていた調節安静位も空間周波数に依存して変動する可能性も示された。また、視覚モデルから理論的に得られる網膜像のボケ（焦点調節誤差）に関する空間周波数依存特性と視点位置依存特性は実測結果と良く一致することを明らかにした。以上の結果は、視覚モデル構築に於ける基本的考え方（ボケと視野の相互依存特性）の内、少なくともボケの概念に関してはその正しさが実証されたものと考えられる。

3.1 まえがき

第2章では、提示画像の性質や提示条件に依存して適応的に変化する視覚系の知覚特性が理論的に再現できる視覚系の数理モデルを定式化し、その有効性・正当性の検討を行った。しかし、本視覚モデルを構築する為の前提条件となった仮説「視覚系の画像観測機構には提示画像をボカす機能と視野の大きさを制限する機能があり、両者が相互依存的に働きながら画像観測を行う」の正当性に関しては明確な実証が行われていない。本章では、網膜像のボケの程度を実測することにより、画像観測機構のボケ量が提示画像の性質に依存して変化する特性を実験的に明らかにすることを試みる。そして、本視覚モデルから理論的に得られるボケの変化特性と比較し、少なくともボケに関してはこの仮説が正しいことを示す。

焦点調節状態は画像までの視距離に依存して変化する（例えば3次元物体を観察する場合）だけでなく、視距離が一定であっても画像の性質や観測者の心理状態に依存して変化することが知られている。例えば、焦点調節誤差（調節ラグとも呼び、視覚系が判断した提示画像までの視距離と実際の物理的視距離との間の定常的なズレを意味する）と空間周波数の関係では、提示画像の空間周波数が低くなるに従って焦点調節誤差が増加する場合[9][26]と、正弦波形に対するコントラスト感度特性と同様に帯域通過型の特性（ある空間周波数で最大の焦点調節誤差が生じ、その両側では共に焦点調節誤差が減少する特性）になる場合[27]とが報告されているが、どちらが正しいのかまだ明確な見解が示されていない。また、遠近感のある絵画やTV画像を観察した場合、視距離は一定でも画像の与える主観的な遠近感または奥行き感に誘導されて焦点調節応答が変化すること[28][29]なども報告されている。この様に、提示画像に依存して焦点調節状態が変化する事実は多く示されているが、どの様な法則に従って変化するのかは余り明確ではない。

以上の観点から本章では、焦点調節応答の空間周波数依存特性と視点位置依存特性という非常に基本的かつ重要な応答特性を赤外線オプトメータを用いて実測し、まだ明確な見解が示されていない焦点調節誤差の空間周波数特性（単調増加特性か帯域通過特性か）および視点位置依存特性を明らかにすることを試み、考察を加える。そして、視覚モデルから理論的に得られる焦点調節誤差の空間周波数特性および視点位置依存特性と比較し、視覚モデルの正当性について検討する。

3.2 実験装置の構成

焦点調節応答の測定は、Badal光学系を用いた視標提示装置と赤外線オプトメータ（ニデック社製自動屈折検査機AR-100）を組み合わせた実験システム（図3.1）を用いて行った。赤

外線オプトメータからの赤外線はダイクロイックミラーを通過して被験者の眼球に入射する。一方、提示画像（スライド化された視標）は2枚の凸レンズにより希望する視距離の位置に結像される様に設定され（Badal光学系）、平面鏡とダイクロイックミラーとに反射されて被験者の眼球に入射する。瞳孔径は調節応答、実験環境、疲労などにより変動する（収縮・拡張）ので、瞳孔径を一定にする為に2枚の凸レンズの間に人工瞳孔が配置されている。赤外線オプトメータから出力された測定値（焦点調節応答）はA/D変換された後、CRT画面に表示されると同時にフロッピーに記憶される。Badal光学系は、視標までの距離を変えても画像の大きさ（視角）が変化しないことが特徴になっている光学系なので、他のパラメータに影響を与えずに視距離だけを単独で変えられる。また、人工瞳孔は瞳孔径を固定したまま調節の変化のみを測定する為に使用しており、実際の瞳孔径よりも小さく設定すれば実際の瞳孔径の変化に関係なく、瞳孔径一定の条件下で調節応答が測定できる。提示画像は2つの1次元正弦波濃淡パターンを90°で重ね合わせた濃淡分布（コントラストは100%）を持つ2次元正弦波と2つの1次元方形波パターンを90°で重ね合わせた濃淡分布を持つ2次元方形波、及び2次元図形（正方形）であり、CRT上に表示した画像（256階調）を写真撮影し、スライドにしたものを用いた。

次に、赤外線オプトメータの原理を以下に簡単にまとめる。2本の平行光線を眼球に入射させた場合、もし眼が無限遠を見ていれば2本の光線は網膜上で一点に収束する。眼が無限遠よ

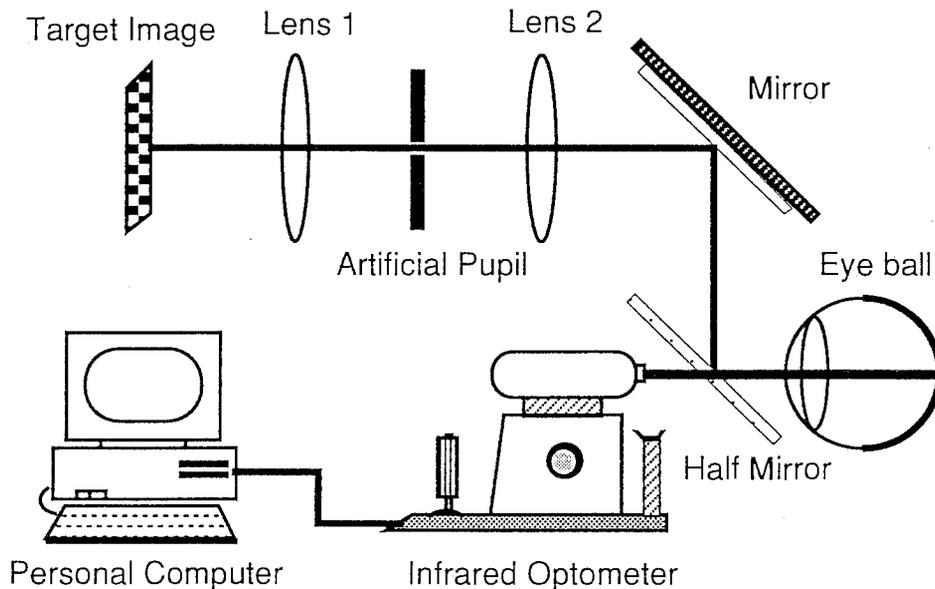


図 3.1 実験システムの構成図

Fig. 3.1 Experimental system for accommodation response measurement.

り近くを見ていれば2本の光線は網膜の手前で交差し、網膜上では2点の結像画像が得られ、この2点の間隔は無限遠より近くを見れば見るほど広がることになる。赤外線オプトメータはこの原理を利用して調節応答を測定しており、2本の光線は赤外線を用いるので人間には知覚されずに測定を行うことができる（他覚的測定）。網膜上の結像の様子は網膜からの反射光を赤外線検出器で検出する。最終的に得られる実測値はdiopter（視標までの距離の逆数）で表現される。

3.3 実験及び実験結果

3.3.1 目的

提示画像を観測している時の眼の焦点調節応答を赤外線オプトメータを用いて実測し、提示画像の空間周波数、視距離、視点位置と焦点調節応答との依存関係を明確にする。提示画像は2次元正弦波、2次元方形波と2次元図形（正方形）であり、被験者は裸眼視力が1.0以上を有するT.M.とE.S.の2名である。

3.3.2 空間周波数と焦点調節応答の関係

図3.2 (a)-(d)は、提示された2次元正弦波形の空間周波数（cpd表示）と焦点調節応答測定値（diopter表示）との関係を各図とも5回測定し、重ねて表示したものであり、人工瞳孔径は $d_p=2\text{ mm}$ 一定、被験者はE.S.である。測定は単眼にて行い、約5~10秒間測定した後、単純加算平均して1つの測定値とした。4つの図の違いは視標の提示位置であり、図の順番通りに各々1, 2, 3, 5 diopterに設定した。また、被験者には提示された2次元正弦波形の中心の明るい部分の真ん中（固視点はない）に意識を集中するように要請した。これら4つの図から分かることは以下の3点である。

- (1) 視標提示距離に関係なく、空間周波数の低下と共に焦点調節応答は増加し明確な飽和傾向を示す。但し、図3.2 (a) (1 diopter) の場合は飽和しているかどうか明確でない。
- (2) 焦点調節応答の最小値（高域空間周波数での測定値）は、図3.2 (a)では実際の視標提示位置(1 diopter)よりも大きく、図3.2 (b)と図3.2 (c)では視標提示位置(2, 3 diopter)とほぼ等しく、図3.2 (d)では視標提示位置(5 diopter)より小さい。これは、眼が判断した視標提示位置が、図3.2 (a)では実際の視標提示位置より近く、図3.2 (b)と図3.2 (c)ではほぼ等しく、図3.2 (d)では遠くなっていることを意味する。
- (3) 空間周波数の変化(0.3 ~ 15 cpd)に対する焦点調節応答値の変化幅は、図3.2 (a)を除けば物

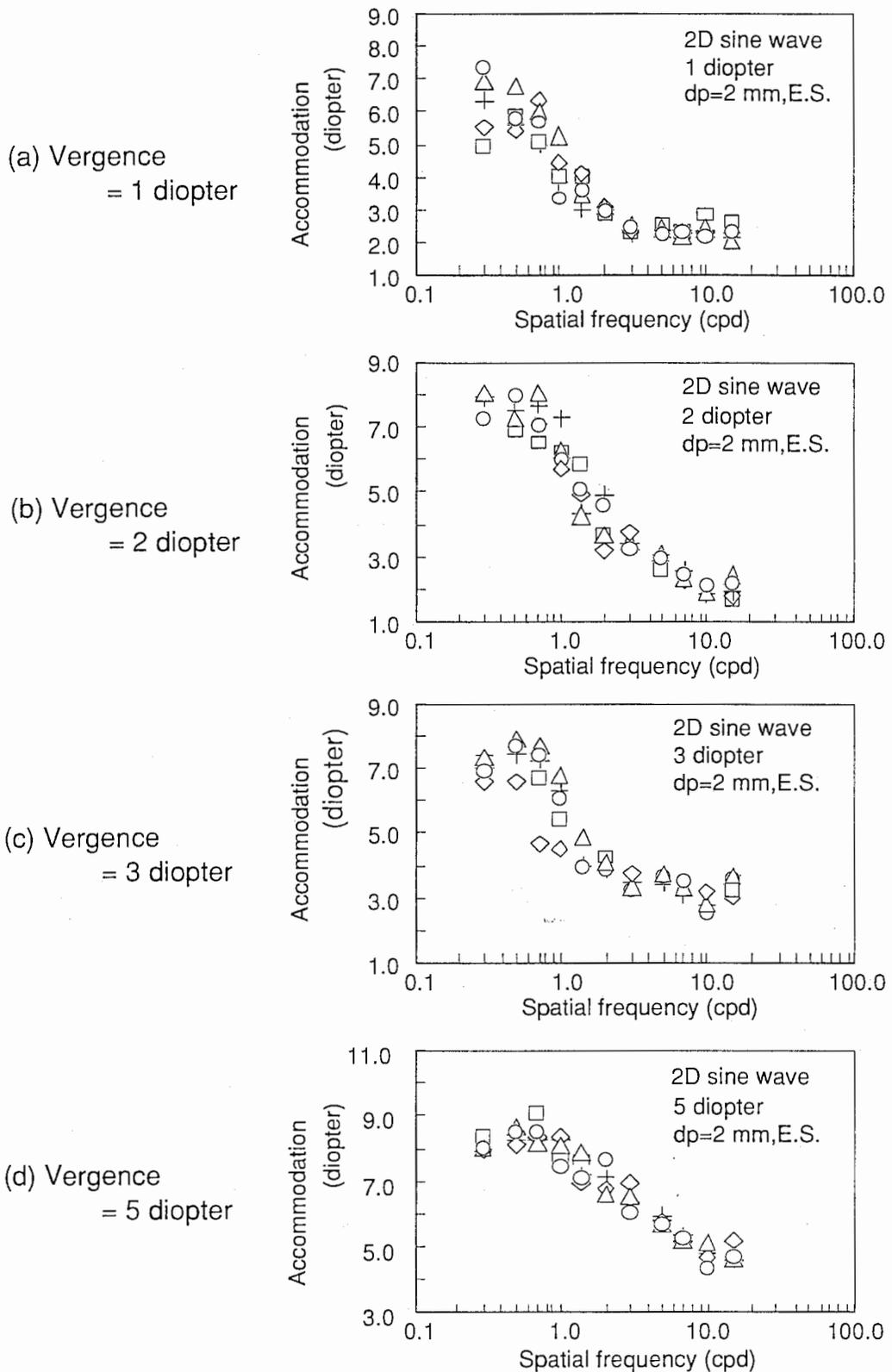


図 3.2 空間周波数と調節応答の関係 (被験者 : E.S.)

Fig. 3.2 Spatial frequency characteristics of accommodation responses to sine-waves. (Subject : E.S.)

理的な視標提示距離を遠くするに従って増加傾向を示す。視標提示距離が20 cm (5 diopter), 33 cm (3 diopter), 50 cm (2 diopter) に対し、変化幅は各々約 4.0, 4.5, 5.5 diopter となる。図 3.2 (a)の焦点調節応答変化幅は約 4.8 diopter であるが、さらに低い空間周波数で測定を行えばもう少し変化幅が広がる可能性もある。

以上の様に、視標の提示位置（物理的視距離）を一定に保った場合、低域空間周波数領域での飽和特性を考えなければ、空間周波数が低くなるに従って焦点調節応答値が単調増加するという関係が明確に成立しているのが分かる。この結果は、空間周波数の低下と共に眼の判断した視標提示距離が眼に近くなること、あるいは眼のレンズの焦点距離が短くなることを意味し、さらには網膜像のボケの程度が空間周波数に依存して変化することを意味する。低域空間周波数での飽和特性が生じる原因は2つ考えられる。第1は、視標が小さい（約 4° ）ことが考えられる。実際、低域空間周波数では2次元正弦波の1周期分以下が切り出されたパターン（明るい丸い球が1つ四角枠の中に存在する）となっており、視標の枠がかなり気になることから、視標枠の大きさが焦点調節応答値の飽和特性に影響を与えることは十分考えられる。もっと大きな視標を使って実験すれば明確になるであろう。第2の原因は、被験者の調節状態が調節可能範囲の限界点に達したことである。人間の焦点調節可能範囲（調節力）は有限なので、焦点調節応答がこの調節可能範囲を越えようとした場合には結果的に飽和することになる。飽和値の大小関係から、おそらく図 3.2 (a)-(c) は第1の原因による飽和、図 3.2 (d) は第2の原因による飽和と考えられる。(2)の焦点調節応答最小値と物理的視標提示距離の関係は従来から知られている調節ラグと視標提示距離の関係[30]と同様であり、本実測結果が従来の結果から逸脱したものでないことが分かる。また、(3)の視標提示位置が遠くなる程焦点調節応答の変化幅が増加するという結果は、低域空間周波数領域で生じる焦点調節応答の飽和により変化が頭打ちになることが原因であろう。

図 3.3 (a)-(d) は、図 3.2 の実測結果の再現性を確認する為に、被験者 T.M. に対し同一条件で行った実測結果である。図 3.2 と図 3.3 の比較から、高域空間周波数(10 cpd 以上)での実測値の違いを除けば、両者はほぼ同じ特性が得られていることが分かる。図 3.3 (a)では10 cpd 以上、図 3.3 (b)(c)では15 cpdの空間周波数に於いて焦点調節応答値が増加する、即ち眼の判断した視標提示位置が近づく傾向を示す。被験者 T.M. に見え方を聞いてみると、10 cpd 以上の空間周波数では2次元正弦波パターンを正確に解像する（1つ1つの光の粒をはっきりと見る）ことが困難になり、正確に解像するにはかなりの注意力を視標に集中させることが必要になること、油断するとすぐに視標がボケて来ることが分かった。即ち測定結果の増加は、意

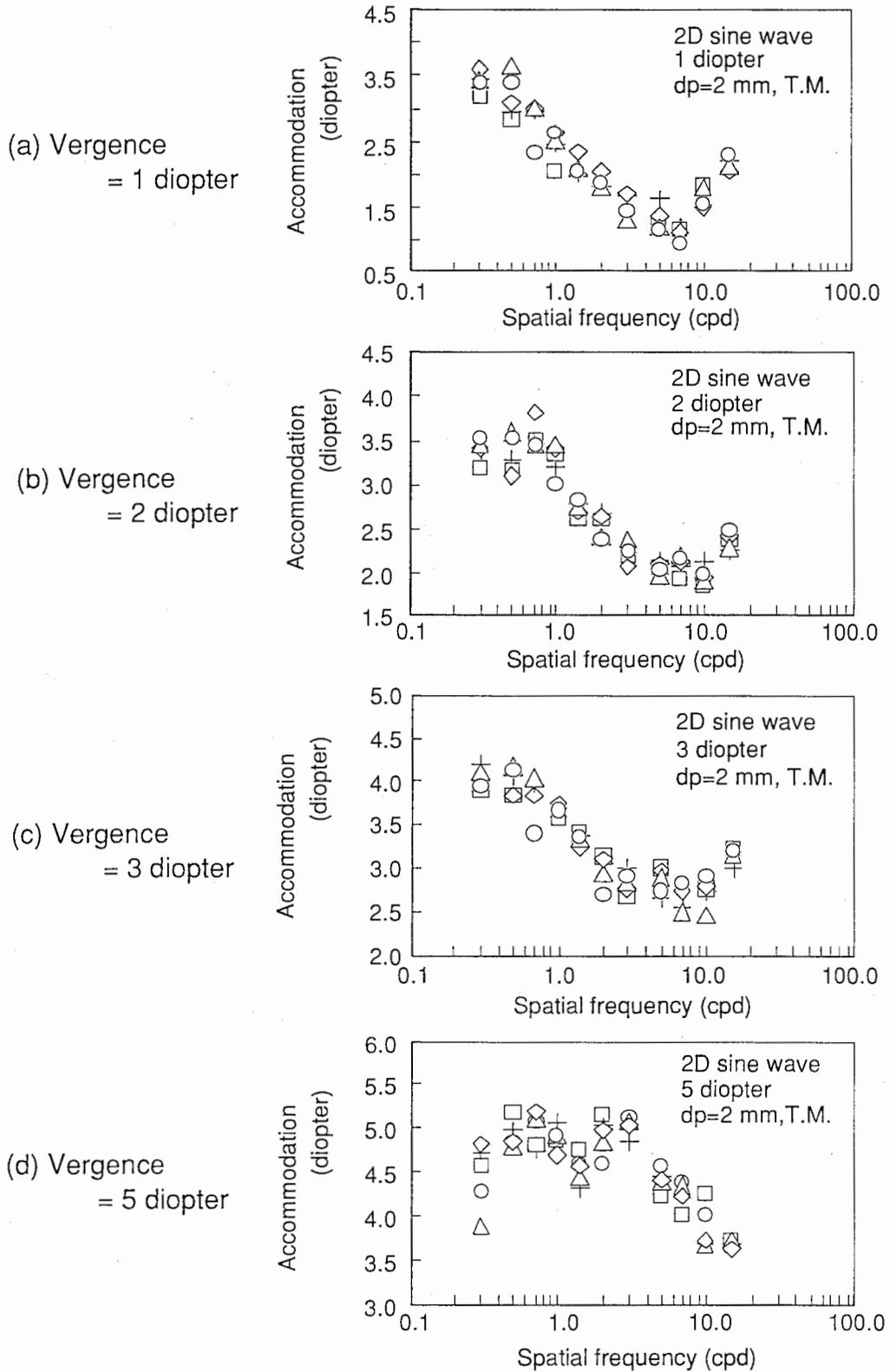


図 3.3 空間周波数と調節応答の関係 (被験者: T.M.)

Fig. 3.3 Spatial frequency characteristics of accommodation responses to sine-waves. (Subject: T.M.)

識の集中欠如により2次元正弦波パターンの光の粒を正確に解像できなかったことが原因で生じたものと考えられる。従って、意識を完璧に集中させた状態で正弦波パターンを正確に解像できた場合には、図3.2の場合と同様に焦点調節応答値は増加せず、7 cpdの空間周波数の場合とほぼ同じ値が得られるものと予想される。またこの被験者の場合には、図3.3(d)から分かるように、焦点調節応答値が5 diopterで飽和しており、被験者E.S.よりも調節可能な変化幅がかなり小さくなっているのが分かる。

3.3.3 視点位置と焦点調節応答の関係

図3.4は2次元方形波の基本空間周波数と焦点調節応答値の関係を視点位置をパラメータとして実測表示したものである。図中、白抜きマークは方形波のエッジに視点を置いた場合、黒いマークはエッジ間の中心部分（固視点は無い）に視点を置いた場合であり、視標提示距離は50 cm (2 diopter)、人工瞳孔径は2 mm、被験者はT.M.である。この図から以下のことが分かる。

- (1) 視点をエッジ間の中心部に置いた場合、2次元正弦波形の場合と同様に空間周波数の低下と共に焦点調節応答値は増加する。但し、空間周波数15 cpdでは集中力の不足の為に実測値が増加しているものとして除外して考えた。
- (2) 視点をエッジ部に置いた場合、約1.5 cpd以上の空間周波数では空間周波数の低下と共に焦

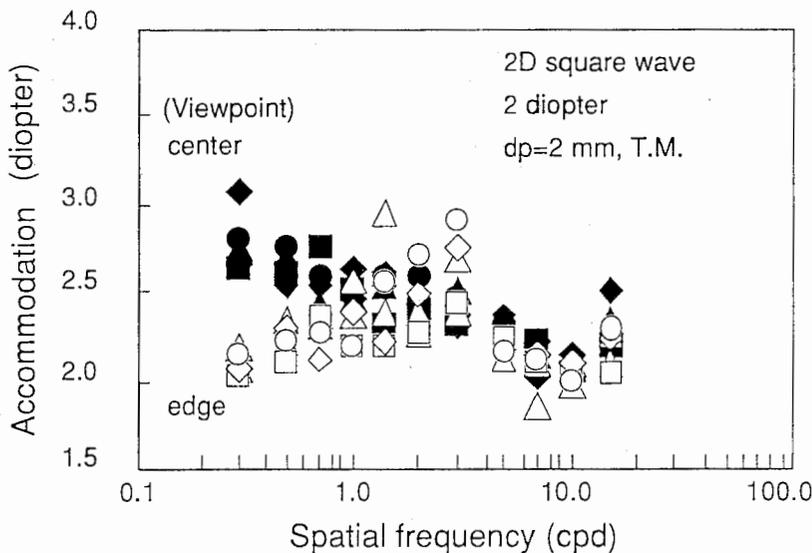


図3.4 方形波に対する調節応答の空間周波数特性 (被験者: T.M.)

Fig. 3.4 Spatial frequency characteristics of accommodation responses to square waves. (Subject : T.M.)

点調節応答値は増加する（(1)とはほぼ同じ実測値）が、1.5 cpd以下の低域空間周波数では空間周波数の低下と共に焦点調節応答値は減少する。

(3) 視点位置の影響は低空間周波数領域に於いて顕著に現われる。

この結果は、焦点調節応答が空間周波数に依存して変化することを再確認しただけでなく、提示画像の局所的な構造変化に対応して焦点調節応答が変化する特性であることを明確に示している。低域空間周波数では方形波パターンとしてではなく、単一のエッジ画像として見えることが原因と考えられる。

図3.5は図3.4の結果の再現性を確認する為に、白抜き正方形図形の大きさ（1辺の長さを視角で表現した）と焦点調節応答値の関係を実測した結果である。図3.5(a)(b)は各々視標提示位置が1 m (1 diopter), 50 cm (2 diopter)の場合であり、人工瞳孔径は2 mmである。

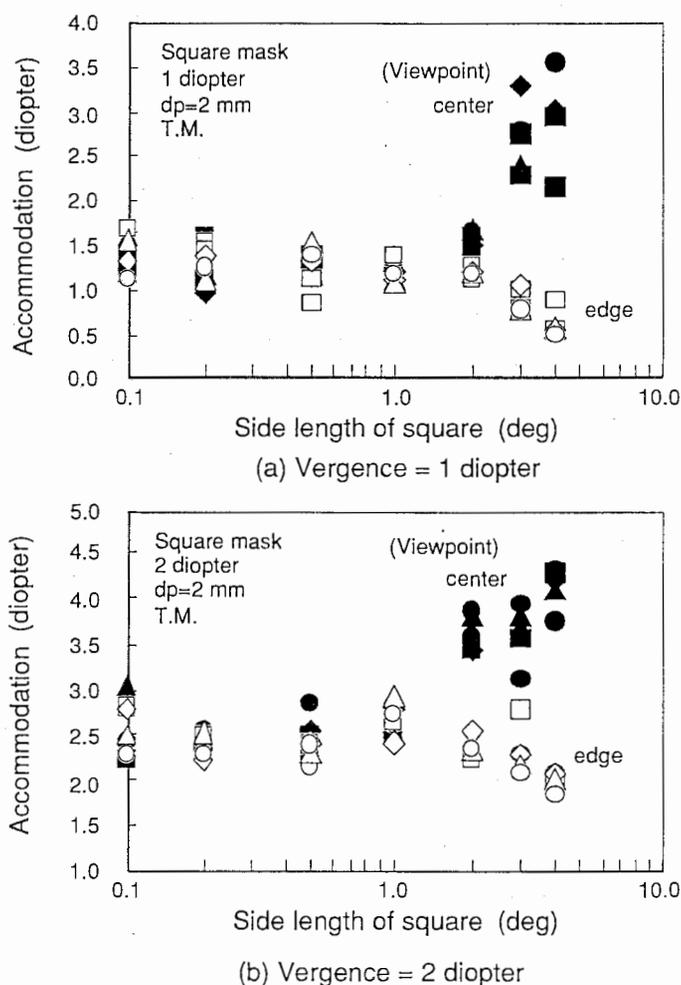


図3.5 正方形図形に対する調節応答の空間周波数特性（被験者：T.M.）

Fig. 3.5 Spatial frequency characteristics of accommodation responses to square masks. (Subject : T.M.)

- (1) 視点位置を正方形のエッジ部（角ではなく辺）に置いた場合（辺に注目する様に指示した）、1辺の長さが $1-2^\circ$ までは焦点調節応答値の変化はほとんどない、それ以上になると焦点調節応答値は少し減少する。
- (2) 視点位置を正方形の中央部に置いた場合（固視点なしの状態ですべてを注目する様に指示した）、1辺の長さが $1-2^\circ$ までは焦点調節応答値の変化はほとんどないが、それ以上になると焦点調節応答値は急激に増加する。
- (3) 視点位置の影響は大きな正方形（低空間周波数の2次元方形波に相当）を観測した場合に顕著に現われる。

以上の結果からも、提示画像の局所的構造に依存して焦点調節応答が変化することがはっきりと分かり、図3.4の結果を裏付けている。

3.3.4 考察

3.3.4.1 焦点調節誤差の導出

焦点調節応答値から網膜像のボケの程度と同じ意味を持つ焦点調節誤差を導出し、焦点調節誤差の観点から実測結果を検討する。焦点調節誤差は一般的には調節ラグを意味し、提示画像までの物理的視距離の逆数と眼が判断した視距離の逆数（焦点調節応答値）との差（diopter表現）として計算できる。実測結果では、図3.2(b),(c)と図3.3(a),(b)の場合は実際の視標提示位置と焦点調節応答の最小値とがほぼ一致しているので一般的な調節ラグの定義が利用できるが、図3.2(a),(d)と図3.3(c),(d)の場合は両者が一致しないので、一般的な定義を適用すると理解しにくい現象が生じる。例えば図3.3(c) (3 diopter)の場合、測定された焦点調節応答値と3 diopter（基準位置）との差として計算した焦点調節誤差は、空間周波数2 cpdの正弦波を観測する時はほぼ零であるが、10 cpdの高い空間周波数の正弦波を見る時は約0.3 diopterの焦点調節誤差が生じている。これは、高い空間周波数の正弦波を観測する場合にはわざと焦点を外して見ること（ボカして見ること）を意味する結果となる。本来高い空間周波数の正弦波をはっきりと解像できる様に観測するには焦点調節誤差をより小さく、つまり網膜像のボケをより少なくして見なければならぬ筈であるから、10 cpdの正弦波に対しては2 cpdの正弦波よりも小さい焦点調節誤差（網膜像のボケがより小さい）になっている筈と考えられる。以上の観点から、本実測結果が正しいと仮定するならば、少なくともこの2人の被験者に対しては実際の物理的視距離を基準位置にした焦点調節誤差の計算には疑問が残る。では、この被験者の場合の基準位置はどこにあるのが問題である。おそらく、高い空間周波数の正弦波もはっきりと

解像できる様に意識を集中して見ることを要求した条件では、高い空間周波数で測定できる最小の焦点調節応答値が最も基準位置に近い（最もボケが少なく、高い周波数が明確に解像できる状態）と考えるのが妥当と考えられる。これは、従来から言われている調節ラグとしての焦点調節誤差とは別に、焦点調節応答値の最小値（これは調節ラグの発生機構に従属している）を基準位置として焦点調節誤差を生じさせている機構が視覚系に存在することを示唆するものと考えられる。おそらく、提示画像中のパターン（2次元正弦波の光の玉や図形）の大きさを意識して観測していることが影響していると考えられる。残念ながら実測データが少ないので現在のところ仮説の段階である。この仮説を用いて計算した焦点調節誤差と空間周波数の関係は以下のようにまとめられる。

（焦点調節誤差と空間周波数の関係）（図3.2、3.3の結果より）

- (1) 焦点調節が可能な範囲内に於いて、2次元正弦波パターンの空間周波数が低くなるに従い焦点調節誤差は単調増加する。但し、低域空間周波数領域では焦点調節能力の限界により焦点調節誤差の増加が頭打ちになり、飽和する傾向となる。この結果は、視標提示位置に依存しない。

（焦点調節誤差と視点位置の関係）（図3.4、3.5の結果より）

- (1) 2次元方形波のエッジ間の中央部に視点を設定すると、空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は単調増加する。一方、エッジ部に視点を設定すると、約1.5 cpd以上の空間周波数では空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は増加する（(1)とほぼ同じ特性）が、1.5 cpd以下の低域空間周波数では空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は減少する。
- (2) 正方形パターンの中央部に視点を設定すると、1辺の長さが1-2°までは焦点調節誤差にはほとんど変化ないが、それ以上になると焦点調節誤差は急激に増加する。一方、正方形のエッジ部に視点を設定すると、1辺の長さが1-2°までは焦点調節誤差にはほとんど変化ないが、それ以上になると焦点調節誤差は少し減少する。

3.3.4.3 調節安静位の変動について

次に、調節安静位が変動する可能性について本実測結果から考察する。調節刺激がない場合、眼は無調節の状態（遠方に焦点を合わせ）になるのではなく、かなり近い値（正確には個人により異なり、一般的には1 diopter 前後と言われている）に焦点を合わせるとされており、この位置を調節安静位と呼ぶ。調節安静位は特異点であり、この位置では調節応答の変化は生ぜず、視標提示位置が調節安静位より手前の場合の調節誤差は調節応答が小さくなる方向（遠方）に

生じ、視標提示位置が調節安静位よりも遠方の場合の調節誤差は調節応答が大きくなる方向（手前）に生じると一般的には考えられている[30]。しかし、我々の測定結果では、視標提示距離を変化させて(1, 2, 3, 5 diopter)測定すると、どの視標提示距離でも同様に提示画像の空間周波数に依存して調節応答は同じ方向に変化し、調節安静位とは無関係に調節状態が変化すると結論された。そこで、この予想を確認する為に調節安静位の位置を被験者T.M.に関して実測してみた。図3.6は2次元正弦波形(0.3 cpdと7.0 cpd)を提示する時の視標提示位置を0(無限遠)-7 diopterまで変化させたときの焦点調節応答実測値である。ただし、人工瞳孔は $d_p=2\text{ mm}$ であり、破線は視標提示位置と実測値とが一致した場合に生じる直線(参照線)を表している。図より、実測結果と参照線との交点として得られる調節安静位は、7 cpdの2次元正弦波形を観測している場合には約2.5 diopter、0.3 cpdの2次元正弦波では約3.4 diopterとなった。つまり、調節安静位はその位置自体が空間周波数に依存して変化する(空間周波数の低下と共に被験者の方へ近付いてくる)ことになり、特異点ではないことが我々の実測結果から導き出せた。調節安静位自体が変動すると言う実験結果は他にも報告されている[31]。以上の結果から、我々の実測結果が正しいとすれば、調節安静位は調節刺激が存在しない場合の安定点であり、刺激が存在する通常の視覚環境に於いては特に大きな意味を持たず、調節誤差とは無関係であるという結論が導きだせることになる。

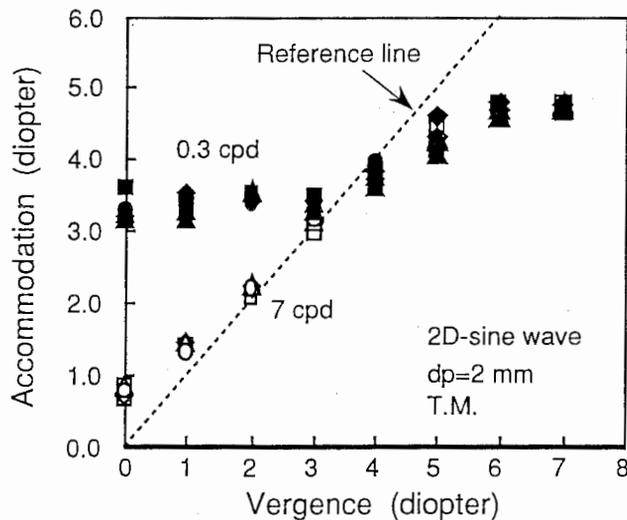


図3.6 2次元正弦波に対する調節応答の視距離依存特性(被験者:T.M.)

Fig. 3.6 Relation between accommodation response and vergence. (Subject : T.M.)

3.4 視覚モデルによる焦点調節誤差特性の導出

3.4.1 焦点調節誤差特性の理論的導出

視覚モデルからは画像を観測したときの網膜像のボケの程度が計算できるので、焦点調節誤差の実測値と理論値との比較ができる様にボケと焦点調節誤差の関係を導出する。焦点調節誤差と網膜像のボケの関係は図3.7で近似的に表わせる。提示画像までの物理的な視距離を a_2 、視覚系が判断した視距離を a_1 、視距離 a_1 の提示画像を見たときの眼のレンズの焦点距離を f 、瞳孔直径を d_p 、レンズから網膜までの距離を l_m 、焦点距離 f のレンズで視距離 a_2 の画像を見たときの結像位置を l_b とすると、視距離 a_1 の画像は網膜上に結像するが（破線表示）、視距離 a_2 の画像はレンズから l_b の距離に結像する（実線表示）ことになるので、網膜上にはボケが生じることになる。レンズの結像公式から、視距離と結像距離の関係は次式の様に表わせる。

$$1/a_1 + 1/l_m = 1/f \quad (3.1)$$

$$1/a_2 + 1/l_b = 1/f \quad (3.2)$$

また、視覚モデルでは網膜上のボケはガウス関数型のボケフィルタと提示画像との畳み込み積分で表現される。従って、図3.7の様な点光源に対する網膜上のボケはボケフィルタと同じガウス関数型となるので、ボケの大きさをボケフィルタの標準偏差の2倍（直径） $2\sigma_1$ で近似すると、ボケの大きさ $2\sigma_1$ と瞳孔直径 d_p の比は

$$2\sigma_1/d_p = (l_b - l_m)/l_b \quad (3.3)$$

となる。焦点調節誤差 ΔD (diopter) は提示画像までの物理的な距離 a_2 の逆数と視覚系が判断した視距離 a_1 の逆数の差であるから、式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)から次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta D &= 1/a_2 - 1/a_1 = (1/l_m) \left((l_b - l_m)/l_b \right) \\ &= 2\sigma_1 / (d_p \cdot l_m) \end{aligned} \quad (3.4)$$

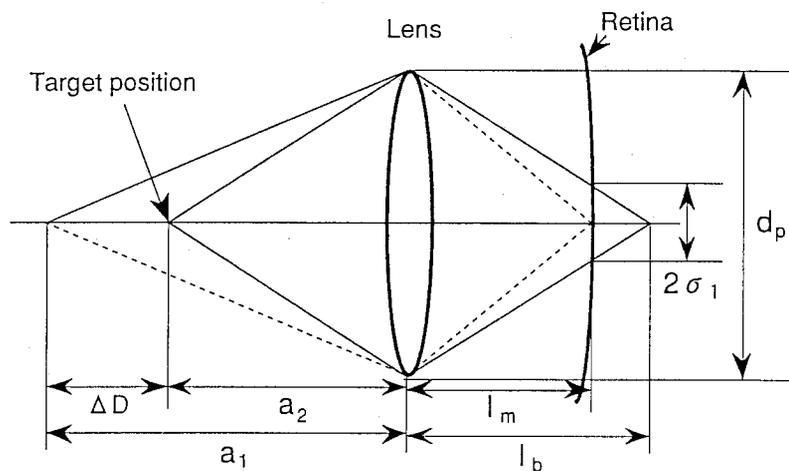


図3.7 焦点調節誤差と網膜上でのボケの大きさの関係

Fig. 3.7 Relation between accommodation error and retinal image's blur.

3.4.2 焦点調節誤差特性の実測と理論の比較

視覚モデルが正弦波パターンと矩形波パターンを観測したときの最適観測状態（提示画像を見るのに最適なボケと視野）を計算し、最適ボケの値から式(3.4)を用いて焦点調節誤差の空間周波数特性を求め、実測結果と比較する。

（正弦波パターンに関する実測値と理論値の比較）

図3.8は視覚モデルが正弦波パターンを観測した時に得られる最適観測状態の内、ボケ量を使って理論的に計算した焦点調節誤差 ΔD の空間周波数特性であり、瞳孔径 d_p がパラータになっている。ただし、視覚モデルの視点位置は、正弦波パターンの輝度変化が最大になる位置（ $\theta_r=90^\circ$ ）に固定した。その結果、空間周波数が低下するに従って焦点調節誤差は単調に増加する特性となり、実測結果と良く一致する。但し、実測では視標の大きさ制限や調節可能範囲の存在の為、低域空間周波数領域で飽和傾向を示すのに対し、計算では単調増加を続ける特性となる。

（矩形波パターンに関する実測値と理論値の比較）

図3.9、図3.10は視覚モデルが矩形波パターンを観測した時に得られる最適観測状態の内、最適ボケ量から理論的に計算した焦点調節誤差 ΔD の空間周波数特性である。視覚モデルの視点位置は、図3.9はエッジ部分、図3.10はエッジ間の中央部分に固定した。これらの図から以下の結果が得られる。

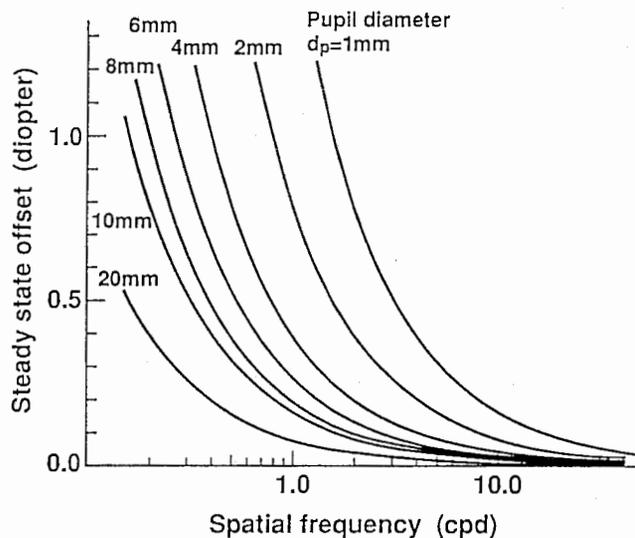


図3.8 正弦波に対する調節誤差の空間周波数特性（視覚モデルからの理論値）

Fig. 3.8 Vision model's accommodation error characteristics to sinusoidal waves.

(1) 視点をエッジ部に固定した場合 (図 3.9)、約 1.5 cpd を境にして高い空間周波数領域では空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は増加するが、低い空間周波数領域では空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は減少し一定値に収束する。低域空間周波数領域での特性は、視覚モデルからの最適観測状態 (ボケと視野) がほぼ一定値に収束するからであり、これは提示パターンを矩形波パターンとしてではなく 1 つのエッジパターンとして観測していることを

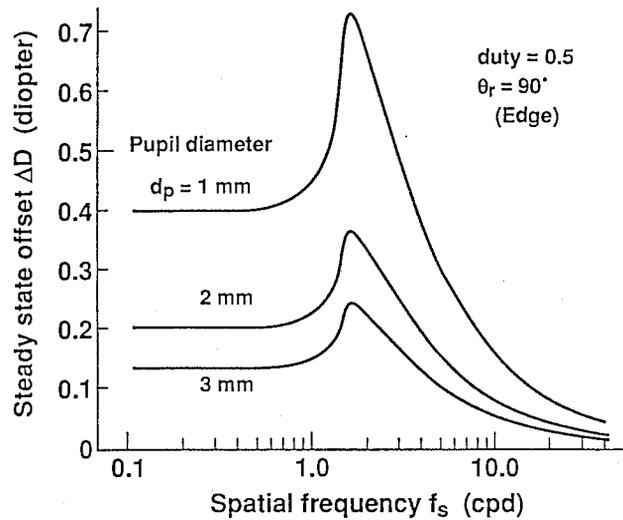


図 3.9 方形波に対する調節誤差空間周波数特性の理論値 (視点位置: エッジ部)

Fig. 3.9 Vision model's accommodation error characteristics to square waves. (viewpoint : edge)

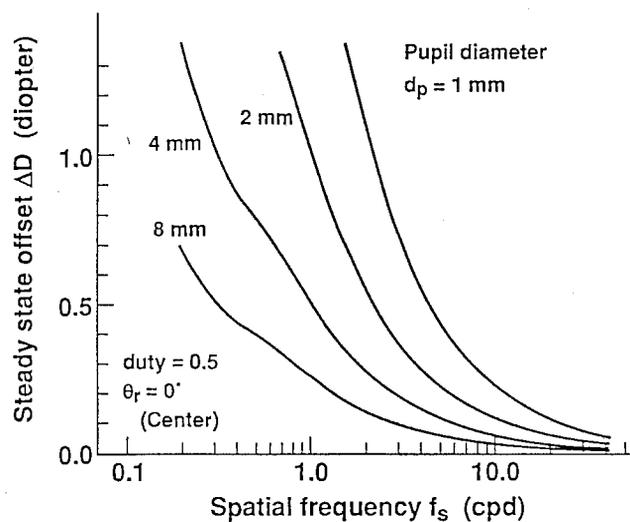


図 3.10 方形波に対する調節誤差空間周波数特性の理論値 (視点位置: エッジ部)

Fig. 3.10 Vision model's accommodation error characteristics to square waves. (viewpoint : center)

意味する。

(2) 視点をエッジ間の中央部に固定した場合 (図 3.10) は、正弦波パターンの場合とほぼ同様に、空間周波数の低下と共に焦点調節誤差は増加する。これは、視点位置がエッジ上に無い為、エッジの印象が(1)ほど強くなく、1つのエッジパターンとして見えていないことを意味する。

以上の視点位置依存特性は実測結果と良く一致する。

以上の理論と実験との比較から、網膜像のボケ (焦点調節誤差) に関する限り、この視覚モデルと実際の視覚系とは同じ特性、即ち同じ画像観測メカニズムを持っていると判断でき、これは視覚モデルの基本的考え方であるボケの概念の正しさを示すものと考えられる。

3.5 むすび

焦点調節機構の解明を目指し、最も基本的な特性である焦点調節応答の空間周波数依存特性と視点位置依存特性を赤外線オプトメータを用いて実測した。その結果、空間周波数構造や局所的画像構造の違い (視点位置の違い) に依存して焦点調節状態が変化していることを確認することができた。さらに、焦点調節応答実測データから焦点調節誤差の導出に関して検討したところ、従来の調節ラグとは異なった焦点調節誤差が生じている可能性が考えられ、この考えに従うと、正弦波空間周波数の低下と共に焦点調節誤差が単調増加、すなわち網膜像のボケの程度が増加する結果が導けた (空間周波数依存特性)。また、低域空間周波数ではエッジ部に視点を置いて観測した方が焦点調節誤差が小さくなる、すなわち網膜像のボケの程度が減少することが導けた (視点位置依存特性)。さらに、一般的には変動しないと考えられていた調節安静位も空間周波数に依存して変動する可能性も本実測結果から結論された。

また、視覚モデルから理論的に得られる網膜像のボケ (焦点調節誤差) に関する空間周波数依存特性と視点位置依存特性は実測結果と良く一致することを明らかにした。これは、少なくとも網膜像のボケに関する限り、この視覚モデルと実際の視覚系とは同じ特性、即ち同じ画像観測メカニズムを持っていることを示す結果であり、視覚モデル構築に於ける基本的考え方であるボケの概念の正しさを示すものと考えられる。

第4章

視覚モデルの応用による新しい画質評価法

あらまし

視覚モデルの応用例として、視覚モデルの2種類の応答出力（評価関数値と最適観測状態）を用いた新しい客観的画質評価法（鮮鋭さ評価と画像表示システムの性能評価）を提案した。鮮鋭さ評価法では鮮鋭さを表わす尺度として視覚モデルの評価関数値が利用され、画像伝送系の帯域幅が広がる（ボケが減る）につれて評価関数値は増加し、そして飽和する傾向を示し、帯域幅と鮮鋭さの関係に関する従来結果と良く一致する。また、画像伝送系の帯域幅と最適視距離の関係も実験結果と良い一致を示している。一方画像表示システムの性能評価法では、濃度階調型画像表示装置からの出力画像をパルス振幅変調（PAM）正弦波で近似し、この画像を視覚モデルが観測した時の最適観測状態から導出できる視覚ノイズ特性を基準として、視覚系が知覚できる信号成分 $C V_n$ 比（Carrier to Visual noise ratio）、視覚系が知覚できるノイズ成分 $N V_n$ 比（Noise to Visual noise ratio）、及び $C V_n$ 比と $N V_n$ 比を組み合わせた $C N$ 比（Carrier to Noise ratio）の3種類が計算され、これらが評価尺度として用いられる。その結果、画素構造が良く見える状態と画素の集合により表現された正弦波形（信号成分）が良く知覚できる状態の2つの見え方が存在し、各々の状態で評価結果が異なること、及び視点位置にも依存して評価結果は変化することなど、我々が行う主観的判断のプロセス（過程）を適切に再現できることが示せた。以上の結果は本視覚モデルの有効性を示すものと考えられる。

4.1 まえがき

画質評価法には人間の主観に依存する主観評価法と何等かの物理量に基づいて判断する客観評価法とがある。主観評価法は、観察条件や評価条件によって評価結果が変動したり長い時間と労力を必要とするなどの欠点もあるが、今のところ最も信頼のおける評価結果が得られ、画像形成システムの種類に関係なく適用できる方法なので広く利用されている。一方、客観評価法は評価尺度を明確にすることで主観評価法の欠点を比較的簡単に回避した形で容易に評価が行なえるので、SN比など多くの客観評価法が考案されてきた[32][33][34]。しかし、従来の客観評価法は視覚系の特性が十分に考慮されていない為、必ずしも主観と一致した結果が得られるとは限らないという欠点がある。この欠点を解決し、人間の主観と良く一致する客観的画質評価法を開発するためには、人間がどのようにして画像を観測しているのか、人間が画像を観測した時に視覚系に生じる変化または応答特性はどうなっているのか（視覚系応答特性）を明確にし、客観評価法に反映させて行くことが必要である。残念ながら、視覚系の応答特性を正確に測定することは困難であるが、この観点に立脚して眼球運動、瞳孔径、焦点調節応答、輻輳応答（立体画像の場合）など比較的観測しやすい視覚系の画像観測機構（画像入力部）の変化特性が測定され、客観的画質評価へ応用する試みがなされている。眼球運動に関してはHDTVとNTSCに対する注視点分布の違いから両システムを客観的に評価した例[35]があり、瞳孔径に関してはTV放送を見たときの瞳孔径の変化パターンから強い印象を与える部分はどこかを評価する研究がある[36]。また、調節応答に関しては、ディスプレイの見易さを調節緊張速度を測定して判定する研究[37]や調節のステップ応答の測定から眼性疲労の程度を定量化する研究[38]がある。

本章では、視覚モデルの一応用例として新しい客観的画質評価法の提案を行う。視覚モデルは視覚系の各種応答特性（知覚特性）が理論的に再現できるので、上述の方法よりも有効な客観評価が行える可能性が期待できる。以下では、視覚モデルからの2種類の応答出力である評価関数値と最適観測状態がそれぞれ鮮鋭さ評価法と画像システムの性能評価法に応用可能であり、我々の主観的判断とも良く一致することを述べる。

4.2 鮮鋭さ評価法

画質に影響を及ぼす多くの心理要因の中でも、画像が観察者にはっきりとシャープに見える主観的な度合いを表現する鮮鋭さ（主観的鮮鋭度）は特に重要な要因のひとつと見なされており、このため写真やテレビジョン技術の分野を中心として、鮮鋭さを画像伝送系の物理量で表現しようとする試みが数多く行われてきた[39][40]。現在、人間の主観とかなり良い相関を示

し、理論的にも一応の筋が通る鮮鋭さの評価式としては、次式の正規化情報容量[41]、正規化等価帯域幅[42]が良く利用される。

$$S_{\text{harp}} = \int_{f \infty} \{R(f) \cdot E(f)\}^n df / \int_{f \infty} E^n(f) df \quad (4.1)$$

この式で、 $R(f)$ は画像伝送系の空間周波数特性、 $E(f)$ は視覚系の空間周波数特性であり、 $n=1$ のときが正規化情報容量、 $n=2$ のときが正規化等価帯域幅である。上式で表現される鮮鋭さは、画像伝送系の空間周波数帯域幅が変化したときの鮮鋭さの主観的評価値と良く一致するが、エッジ強調により画質改善を行なった画像やコントラストの変化した画像および視距離が変化したときの画像に対しては十分に適合しない場合が多い。これは評価式の中に、観察している画像に依存して視覚系の空間周波数特性が変化するという基本的な性質が考慮されていない為に生じる。これに対して、分流型抑制機構を持つ神経素子モデルを用いて視覚系の波形応答を計算し、この波形応答の勾配値から鮮鋭さの評価を行なう方法が提案されている[43]。この神経素子モデルは感覚系の入出力の非直線特性をよく近似できるので、画像の帯域幅の変化だけでなく、コントラスト、エッジ強調量を変化させた場合にも主観との一致性の良い鮮鋭さ評価ができる。しかし、視距離が変化したときの画像に対する鮮鋭さ評価が経験的事実と一致していないこと等の問題が残る。

本節では、視覚モデルが提示画像を観測したときに得られる評価関数値を用いた新しい鮮鋭さの評価法の提案を行ない、この評価法が画像伝送系帯域幅の変化だけでなく、視距離の変化に対しても主観と一致した評価結果が得られることを示す。

4.2.1 視覚モデルに於ける鮮鋭さの評価尺度

視覚モデルで計算される評価関数は、現在提示されている画像をこの視覚モデルが観測したときに人間が受け取る印象の強さを表わす感覚量として定義されている。評価関数値は、提示画像がボケてくるにつれて評価関数値も減少して行き、完全なボケ画像（直流信号）に対しては零（意味のある画像として見ない）となる性質を持っており、人間が画像のボケに対して感じる感覚量と等価なものと判断できる。即ち、視覚モデルに於ける評価関数値は提示画像がどの程度ボケているか、あるいはどの程度波形がなままっているかを表現することができる感覚量である。画像の鮮鋭さは画像がシャープに見える主観的な度合いを評価する尺度であることを考慮すると、視覚モデルで計算される評価関数値を鮮鋭さの程度を表わす評価尺度として利用することが可能である。従って以下の議論では、評価関数値が鮮鋭さを表現する尺度であると仮定して、鮮鋭さに関して得られている実験結果が評価関数値を用いた計算結果からどの程度説明できるかを検証することにより、この仮定が正当かどうかを検討する。

また、鮮鋭さの評価に用いる画像については多くの研究から、鮮鋭さがナイフエッジ像の切れ方に関係すると考えられていること[39]、及びナイフエッジ像と一般画像による鮮鋭さの比較実験を通し両画像ではほぼ同じ結果が得られること[44]、さらにナイフエッジ像に含まれている空間スペクトル分布特性が一般画像の空間スペクトル分布と良く似ていること[45]等からナイフエッジ像の様な単純な画像を利用して鮮鋭さの評価ができるとされている。以下の議論では、一般画像にはいろいろな基本周波数を持った矩形波が存在すると考えられることから、単純なエッジではなく基本空間周波数が変えられる方形波形を用いて鮮鋭さの評価を行なう。

図4.1は提案した鮮鋭さ評価法のブロック図である。画像伝送系へ入力された方形波信号は画像伝送系の帯域幅制限によりボケた（鮮鋭さの低下した）画像として出力される。この出力画像を視距離を変えながら視覚モデルが観測した時の評価関数値が鮮鋭さの尺度である。

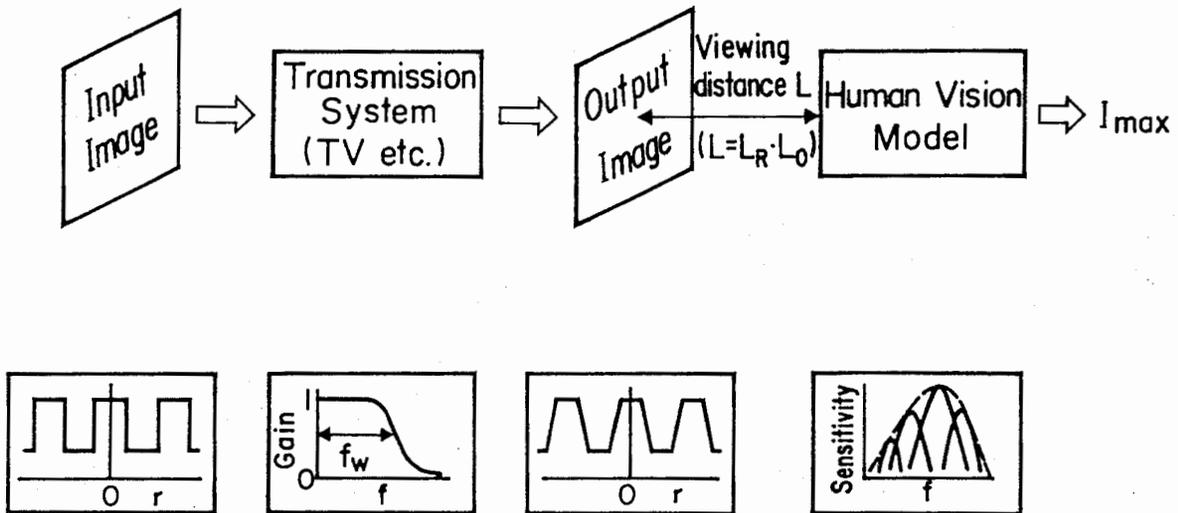


図4.1 視覚モデルを応用した鮮鋭さ評価法のブロック図

Fig. 4.1 Block diagram of the proposed sharpness evaluation method using the human vision model.

4.2.2 帯域制限方形波に対する評価関数の導出

画像伝送系に入力された方形波形は画像伝送系の帯域幅の制限によりボケを含んだ方形波形として出力される。入力方形波形は次の様にフーリエ級数展開表示される。

$$f_0(r) = B + \left(\frac{4A}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos \{(2n-1)\omega_s r + (2n-1)\theta_r\} \quad (4.2)$$

A: 方形波の振幅、 B: 平均輝度、 r: 網膜上での距離

ω_s : 方形波の基本空間角周波数、 θ_r : 視点の位置（方形波の位相）

画像伝送系の帯域制限特性のインパルス応答（ボケを作る関数）として

$$G(r, \tau_b) = (1/4\pi\tau_b) \exp(-r \cdot r/4\tau_b) \quad (4.3)$$

のガウス関数を仮定すると、画像伝送系を通過した後のボケを伴った画像（以下、提示画像とする） $f(r)$ は、入力方形波とガウス関数とのたたみ込み積分で表わされ次式となる。

$$f(r) = B + \left(\frac{4A}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \exp\{-\tau_b(2n-1)^2\omega_s^2\} \cos\{(2n-1)(\omega_s r + \theta_r)\} \quad (4.4)$$

一方、現在観測している視距離を L_0 とし、この視距離 L_0 を基準の距離として提示画像 $f(r)$ を視距離 L

$$L = L_R \cdot L_0 \quad (L_R \text{は視距離比を表わす係数}) \quad (4.5)$$

の位置から観測することを考える。この場合、視距離の変化と共に方形波の基本空間周波数と画像伝送系のボケ（画像帯域幅）が網膜上に於いて等価的に

$$\begin{aligned} \omega_s &\rightarrow L_R \cdot \omega_s \\ \tau_b &\rightarrow \tau_b / L_R^2 \quad (\text{標準偏差では } \sigma_{b1} \rightarrow \sigma_{b1} / L_R) \end{aligned} \quad (4.6)$$

と変換されるので、式(4.4)に代入すると視距離を考慮した提示画像 $f_L(r)$ は次式の様に表現される。

$$f_L(r) = B + \left(\frac{4A}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \exp\{-\tau_b(2n-1)^2\omega_s^2\} \cos\{(2n-1)(L_R\omega_s r + \theta_r)\} \quad (4.7)$$

次に、上記の視距離を考慮した提示画像をこの視覚モデルが観測したときに得られる評価関数 I は以下の式となる。

$$I = (4/\pi)^2 (A/B)^2 \cdot I_{\text{sqr}} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{sqr}} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+m+2}}{(2n-1)(2m-1)} H[(2n-1)\omega_s L_R] H[(2m-1)\omega_s L_R] \\ &\times \exp[-\{(2n-1)^2 + (2m-1)^2\}(\tau_0 + \tau_b/L_R^2)L_R^2\omega_s^2] \sinh\{(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)L_R^2\omega_s^2\} \\ &\times [\cos\{2(n-m)\theta_r\} \exp\{(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)L_R^2\omega_s^2\} \\ &\quad - \cos\{2(n+m-1)\theta_r\} \exp\{-(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)L_R^2\omega_s^2\}] \end{aligned} \quad (4.9)$$

提示画像を観測したときの視覚系の最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として式(4.8)の評価関数 I を極大化することにより推定できる。従って、最適観測状態を τ_0^* 、 τ_1^* 、その時の評価関数値を I_{max} とした時、この視覚モデルを用いた鮮鋭さの評価尺度 S_{sharp} は式(4.8)から次式として定義できる。

$$\text{Sharp} = I_{\max} = \underset{\tau_0, \tau_1}{\text{M a x}} I = (4/\pi)^2 (A/B)^2 \cdot I_{\text{sqr}} \Big|_{\substack{\tau_0 = \tau_0^* \\ \tau_1 = \tau_1^*}} \quad (4.10)$$

4.2.3 帯域制限画像に対する視覚モデルの基本的応答特性

ボケ（画像伝送系の帯域制限特性）を伴った方形波を視覚モデルが観測したときに得られる基本的な応答特性（最適観測状態とその時の評価関数の極大値）を計算すると同時に、視点位置をどこに置いて鮮鋭さ評価を行えば良いかを検討する。但し、ここで用いる画像伝送系の帯域制限特性は式(4.3)のガウス型のインパルス応答を仮定しているの、この画像伝送系の空間周波数伝達特性はガウス型の Low-pass filter 特性となる。

図4.2は視点位置を方形波形のエッジ部（ $\theta_r = 90^\circ$ ）に固定し、画像伝送系のボケ量 σ_{bl} をパラメータとして方形波形の基本空間周波数 f_s と最適観測状態に於ける評価関数値 I_{\max} の関係を計算した結果であり、次のことが理解される。但し、コントラストは一定（ $A/B = 1$ ）とした。(1) 画像伝送系のボケ量が一定値の場合、評価関数値 I_{\max} は低域空間周波数部ではほとんど一定となり、空間周波数の増加に伴って I_{\max} は最大値に到達し、その後減少する。 I_{\max} が低域周波数部で一定値となるのは方形波形ではなくエッジ画像として観測するからである。(2) 画像伝送系のボケ量が小さい（ $\sigma_{bl} \leq 0.001$ ）ときの評価関数値 I_{\max} の空間周波数特性はほとんど重なるが、ボケ量が大きくなると（ $\sigma_{bl} > 0.001$ ）評価関数値 I_{\max} が全体的に減少し、特に高域周波数領域で大きく減少すると同時に評価関数値 I_{\max} が最大値となる空間周波数位置がボケ量の増加と共に低域空間周波数の方へ移動して行く。評価関数値が全体的に減少するのは、ボケ量の増加と共に波形が鈍ってくる為に画像から受ける印象の強さが弱くなるからであり、高域周波数領域に於いて特にボケの影響を強く受ける結果高域周波数領域の方がより大きく評価関数値が減少することになる。その為に、評価関数値の最大値が低い空間周波数の方へ移動する。さらに、最適観測状態と等価なチャンネル中心周波数 f_c と方形波基本周波数との関係（図4.3）からは次のことがわかる。(1) 低域空間周波数領域では観測状態が一定となり、高域空間周波数領域では正弦波形を観測したときと同じ観測状態が得られる。低域周波数部での特性は提示画像を方形波として見ているのではなく、エッジ画像として見ていることを意味する。(2) 画像伝送系のボケ量が少ないとき（ $\sigma_{bl} \leq 0.001$ ）の最適観測状態は重なっているが、ボケ量が多くなると（ $\sigma_{bl} > 0.001$ ）、低域周波数部分ではチャンネル中心周波数 f_c が低くなり、波形が鈍るに従って観測に適した視覚モデルのボケ量 τ_1 が大きく、かつ視野 τ_0 が広がって行く。

一方、視点位置を方形波形の中央部分（ $\theta_r = 0^\circ$ ）に固定し、同様に最適観測状態に於ける

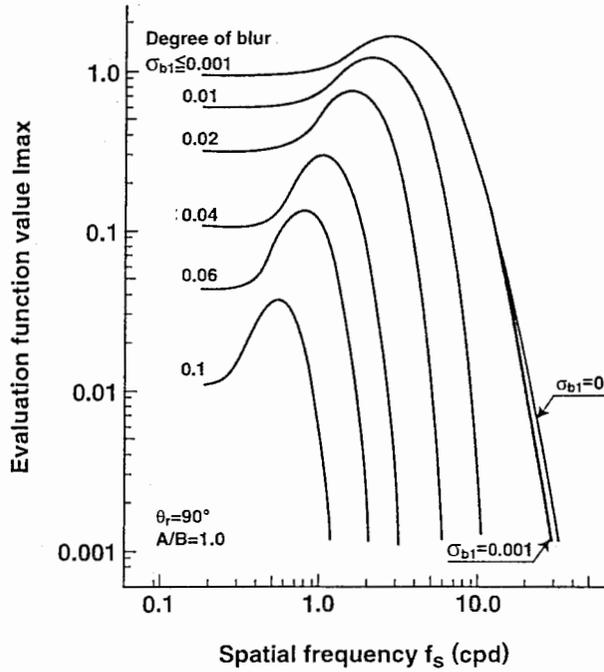


図 4.2 方形波に対する評価関数極大値と空間周波数の関係（視点位置： $\theta_r = 90^\circ$ ）

Fig. 4.2 Spatial frequency characteristics of the model's maximum evaluation function value to square waves as a parameter of σ_{b1} . ($\theta_r = 90^\circ$)

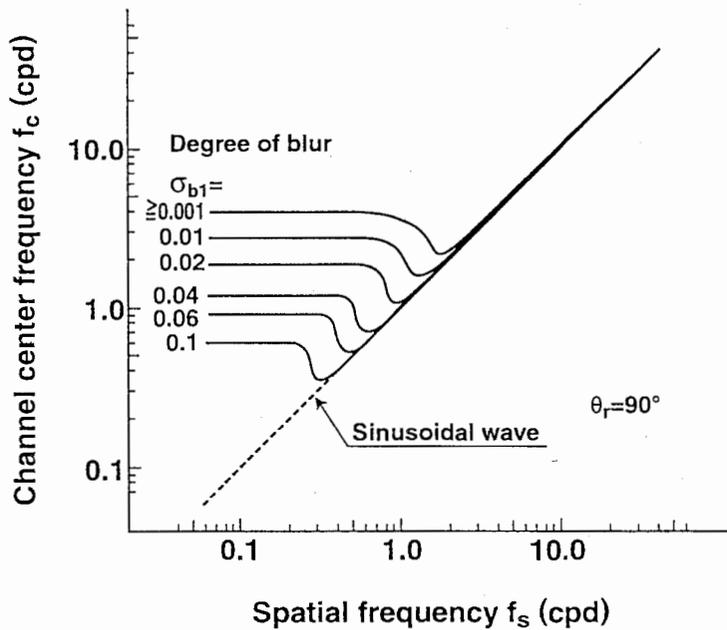


図 4.3 方形波に対する最適最適状態評と空間周波数の関係（視点位置： $\theta_r = 90^\circ$ ）

Fig. 4.3 Spatial frequency characteristics of the model's channel center frequency f_c to square waves as a parameter of σ_{b1} . ($\theta_r = 90^\circ$)

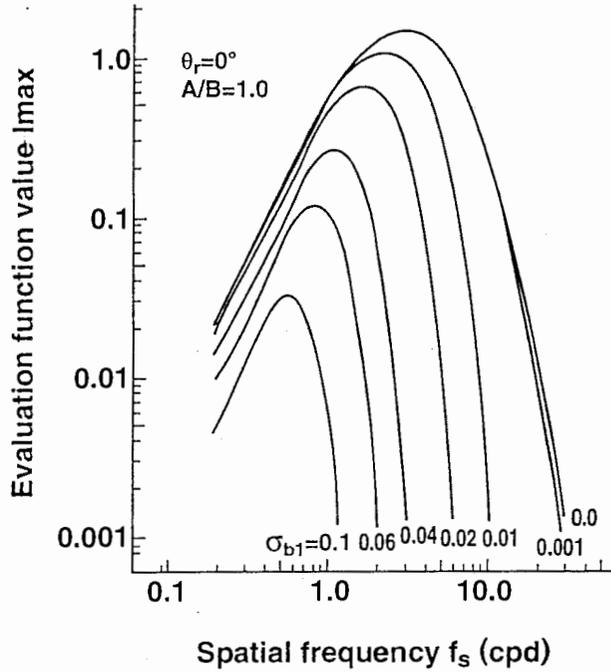


図 4.4 方形波に対する評価関数極大値と空間周波数の関係 (視点位置: $\theta_r = 0^\circ$)

Fig. 4.4 Spatial frequency characteristics of the model's maximum evaluation function value to square waves as a parameter of σ_{b1} . ($\theta_r = 0^\circ$)

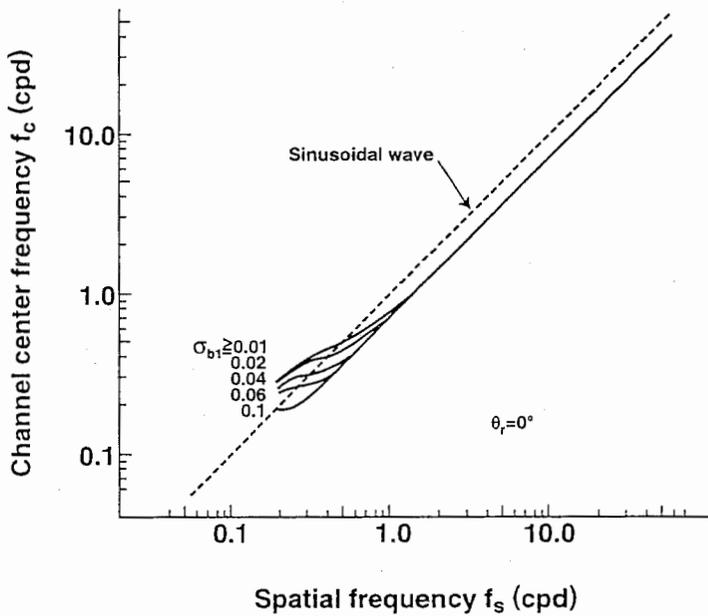


図 4.5 方形波に対する最適最適状態評と空間周波数の関係 (視点位置: $\theta_r = 0^\circ$)

Fig. 4.5 Spatial frequency characteristics of the model's channel center frequency f_c to square waves as a parameter of σ_{b1} . ($\theta_r = 0^\circ$)

評価関数値 I_{\max} 及びチャンネル中心周波数 f_c の空間周波数特性 (図 4.4、図 4.5) を計算したところ次の様になった。(1) 評価関数値 I_{\max} が最大となる空間周波数を境として、高域及び低域空間周波数の両領域に於いて評価関数値、即ち画像から受ける印象が弱くなる。(2) 画像伝送系のボケ量 σ_{b1} の増加と共に全空間周波数領域に亙って印象の強さが低下し、評価関数値 I_{\max} が最大となる位置が低い空間周波数の方へ移動する。視点位置が $\theta_r = 90^\circ$ の場合 (図 4.2) には低域周波数領域での評価関数値は一定値となり、画像伝送系のボケ量の増加と共にその値が大きく変化しているのに対し、視点位置 $\theta_r = 0^\circ$ では空間周波数の低下につれて評価関数値は減少し、画像伝送系のボケ量に対する変化が小さくなるのが大きな違いである。この時の方形波形の見え方を良く表わしているチャンネル中心周波数 f_c の空間周波数特性は、1 cpd 以上の高域部では正弦波形の中央部 (輝度変化が零となる位置) を視点位置として観測した時のチャンネル中心周波数と同じであり、1 cpd 以下の低域部では方形波形のエッジ部分の影響を受けるため正弦波形を観測した時よりもチャンネル中心周波数が増加し (視覚モデルのボケが減り、視野が狭くなる)、画像伝送系のボケ量が増えると共にその増加量が減り、正弦波形を観測した時の状態に近くなる。

以上の様に、視覚モデルの評価関数値は画像伝送系のボケ量 (帯域制限量) の変化に対して増減する性質を持っているので、人間の主観量である鮮鋭さを定量的に表現する尺度として適していると見ることができる。従って、この視覚モデルを用いた場合、画像伝送系のボケ量が同じでも空間周波数に依存して鮮鋭さの感覚は異なり鮮鋭さが最大となる空間周波数が存在すること、及び画像伝送系のボケ量に依存して鮮鋭さが最大となる周波数位置が移動することが予測できる。さらに、視点位置を $\theta_r = 90^\circ$ (エッジ部) とした方が画像伝送系のボケ量に対する評価関数値の変化が大きくなり、鮮鋭さの評価がより効果的に行えると考えられ、このことはエッジ画像を用いた方が鮮鋭さが評価しやすいことを裏付けたものと言える。

4.2.4 帯域幅と鮮鋭さの関係に於ける実測と理論の比較

画像伝送系の帯域幅 f_w (-6 dB 低下するときの空間周波数幅) を変えた場合の出力方形波画像を視覚モデルが視距離をいろいろ変化させて観測した時の評価関数値を計算し、今までに得られている鮮鋭さの主観評価結果との比較を行なう。但し、視点位置はエッジ部 ($\theta_r = 90^\circ$)、画像伝送系に入力される方形波形のコントラストは $A/B = 1$ 、視距離 L については基準となる視距離 L_0 に対する倍率 $L_R (= L/L_0)$ で表現し、方形波形の基本空間周波数は $f_s = 0.5$ cpd, 6.0 cpd の二種類とした。

帯域幅 f_w の画像伝送系を通過した $f_s = 0.5$ cpd と 6.0 cpd の方形波形を観測したときの評価

関数値 I_{\max} と帯域幅 f_w の関係を視距離比 L_R をパラメータとして計算した結果 (図 4.6 (a)、図 4.6 (b)) 次の様になった。

- (1) 視距離比 L_R を一定値に保った時、評価関数値は画像伝送系の帯域幅 f_w の増加に対して急激に増加し、そして飽和する傾向を示す。
- (2) $f_s = 0.5$ cpd では、視距離が増加 (視距離比 L_R が増加) すると、画像伝送系の帯域幅に関係なく評価関数値は大きくなる。ただし、 $L_R \leq 6$ である。
- (3) $f_s = 6.0$ cpd では、視距離が減少 (視距離比 L_R が減少) すると、画像伝送系の帯域幅に関係なく評価関数値は大きくなる。ただし、 $L_R \geq 0.5$ である。

(1) の結果は、鮮鋭さの主観的な評価値が画像伝送系の帯域幅の増加に対して飽和することを示した実験事実[46]を本方式を使えば無理なく説明できることを意味する。(2) の結果は、提示画像がボケていても視距離を遠くして見れば鮮鋭さが向上して見えると言う経験的事実を、(3) は空間周波数の高い画像に対しては、逆に視距離を近くして見た方がより鮮鋭に見える経験的事実を説明している。方形波形に対する評価関数値の空間周波数特性 (図 4.2) は、基本空間周波数が $f_s = 3.0$ cpd のときに最大となり、その両側では低下して行く特性になり、方形波形に対する視覚系のコントラスト感度特性と密接に関係している。従って、 $f_s = 3.0$ cpd 以下

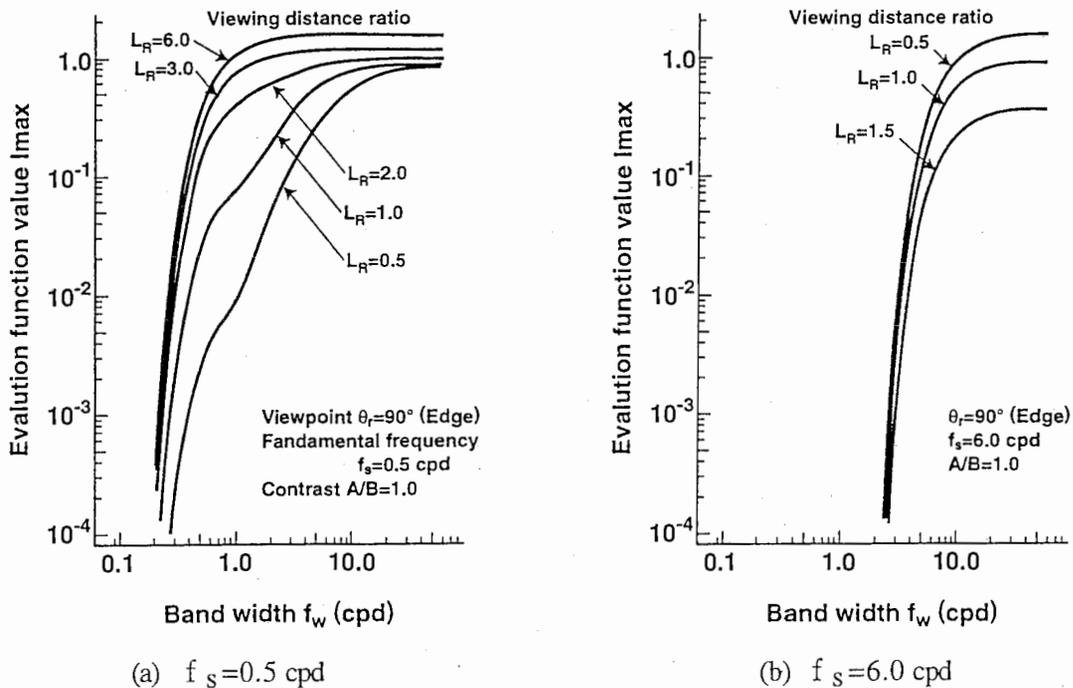


図 4.6 画像伝送系の帯域幅 f_w と評価関数値 I_{\max} の関係 (パラメータ: 視距離比 L_R)

Fig. 4.6 Relation between band width f_w and evaluation function value I_{\max} . (parameter: L_R)

の方形波形の場合 ($f_s=0.5$ cpd) には、視距離を遠くして見ることで等価的に画像伝送系の帯域幅が増え（ボケが減り）見掛けの基本空間周波数が高くなるので、その結果評価関数値が増加することになる。 $f_s=3.0$ cpd 以上の方形波形の場合 ($f_s=6.0$ cpd) には、視距離を遠くして見掛けの基本空間周波数を高くすると逆に評価関数値が低くなるので、近くによって画像を見た方が鮮鋭さを高めることができるのである。なお、従来から用いられている鮮鋭さの評価尺度（正規化情報容量、正規化等価帯域幅、shunt型神経回路の応答特性など）でも、鮮鋭さに対する飽和特性については説明できるが、視距離が変化したときの特性について説明することは困難である。

また、図4.7は画像伝送系のボケ量 σ_{b1} （帯域幅と等価）をパラメータとして評価関数値と視距離比の関係を求めたものであり、画像伝送系のボケ量 B_{σ_1} が増加するにつれ評価関数値が増加すること及び最も鮮鋭さが高くなる視距離比（最適視距離）の存在することがわかる。特に最適視距離に関しては、視距離比 $L_R=6$ のときに評価関数値が最大（最適視距離）となり、この視距離より遠くても近くても評価関数値は低下することがわかる。この特性は、ボケを伴った画像であっても視距離を遠くすれば鮮鋭さが向上するが、遠く離し過ぎれば逆に鮮鋭さが低下して画像が見え憎くなる経験的事実と一致する。また、最適視距離比 $L_R=6$ のときの見掛けの基本空間周波数は3.0 cpdとなり、方形波形に対して視覚モデルが最高感度を示す空間周波数に一致する。この結果は、視距離の変化が画像伝送系の帯域幅と方形波形の基本空間周

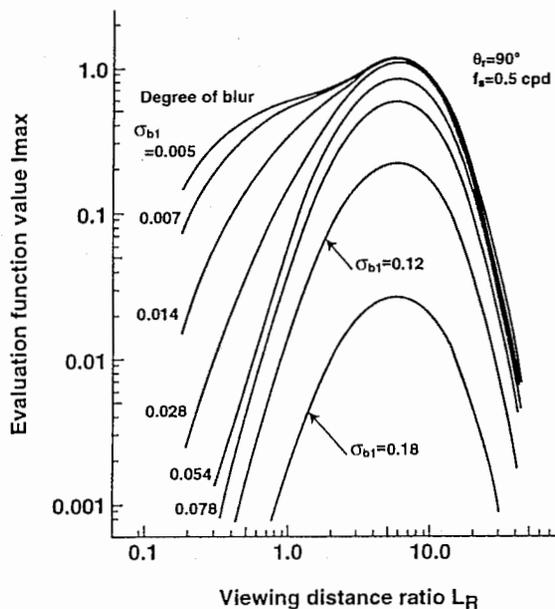


図4.7 視距離比 L_R と評価関数値 I_{max} の関係（パラメータ：ボケ量 σ_{b1} ）

Fig. 4.7 Relation between viewing distance ratio and evaluation function value. (parameter : σ_{b1})

波数の変化を見掛上引き起こすことに起因する。即ち、図4.2より見掛けの基本空間周波数が3.0 cpdに達するまでは評価関数値は増加するが、3.0 cpdを越えると評価関数値は減少するからである。視距離を変えて方形波形を観測したときのチャンネル中心周波数の変化の様子（図4.8）を見ると、方形波形を観測した時のチャンネル中心周波数の空間周波数特性（図4.3）と非常に似た形をしている。これは、視距離を変えることで方形波形の見掛けの基本空間周波数が変化する為に、空間周波数を変えて計算したのと等価的に等しくなっているからである。低域空間周波数部で一定値とならないのは視距離の変化が画像伝送系の帯域幅をも見掛上変化させているからである。

以上、視覚モデルの評価関数値を鮮鋭さを表わす客観評価尺度として用いれば、画像伝送系の帯域幅と鮮鋭さの関係だけでなく、従来の評価尺度では説明困難な視距離の影響をも無理なく説明できることがわかる。

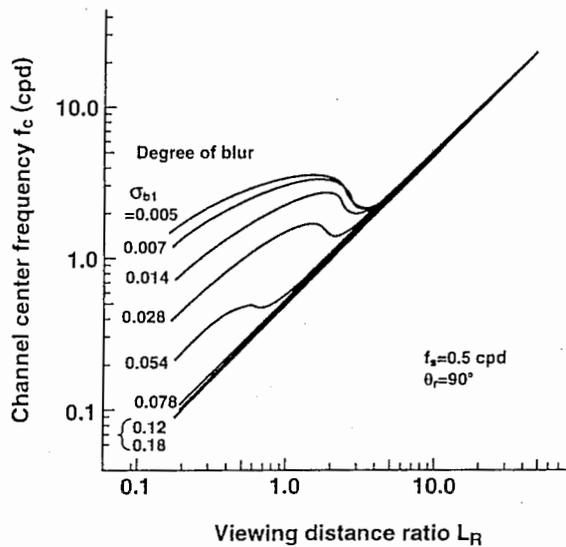


図4.8 視距離比 L_R と最適観測状態 f_c の関係（パラメータ：ボケ量 σ_{b1} ）

Fig. 4.8 Relation between viewing distance ratio and channel center frequency. (parameter : σ_{b1})

4.2.5 最適視距離の実測と理論の比較

図4.7に示した最適視距離は、画像伝送系の帯域幅には関係なく、方形波形の見掛けの基本空間周波数が3.0 cpdとなる位置であった。これは、評価関数値つまり鮮鋭さが最大となる視距離を最適と考えたからである。ところで焦点の合っていない画像（ボケた画像）を見た場合、ボケていない比較画像が無くても我々は画像のボケが知覚できるし、画像のボケが改善されて行けば画像のボケが知覚できる状態からボケが知覚できない状態へ変化するポイント（閾値に

相当し、この閾値を越えると画像のボケの程度に無関係にボケていないと知覚される)が存在する現象をたびたび経験する。即ち、人間は比較すべき画像がなくても、提示された画像がボケているかどうかを判断することが可能である(これを絶対的ボケ検出と呼ぶことにする)。この現象は、人間が提示画像を見たときに感じる鮮鋭さにある閾値を設定し、画像を見たときに感じる鮮鋭さがこの閾値を越えると画像がボケているかどうか判断できなくなり、この閾値以下の場合には自動的に画像のボケを感じるものとするれば無理なく理解できる。この現象を視覚モデルで表現するには、評価関数値にある閾値を設定すれば良い。従って、評価関数値がこの閾値を越えたら画像のボケが感じられなくなり、その結果鮮鋭さの変化は知覚できなくなるので、絶対的ボケ検出を考慮した場合には評価関数値が最大になる位置が最適視距離ではなく、評価関数値がこの閾値に到達したときの視距離が最適視距離であると考えられる。なお評価関数値が閾値を越えない場合は、視距離をどの様に動かしても画像がボケていると感じられることになるが、この場合は鮮鋭さが最大になる視距離が最も鮮鋭に見えるという意味で最適視距離となる。そこで、図4.7と同様にして計算した視距離と評価関数値の関係($f_s = 0.2$ cpdに設定)に於いて、評価関数値に閾値 $I_a (=1.0, 0.8, 0.5, 0.3)$ を設定して、評価関数値と閾値が等しくなるときの視距離比(最適視距離比)と画像伝送系の帯域幅の関係(図4.9)を調べたところ次の様になった。比較の為、最適視距離の実測結果[44]も図4.10に示す。

- (1) 評価関数値の閾値 $I_a = 1.0$ の場合を除けば、最も鮮鋭に見える視距離(最適視距離)と画像伝送系の帯域幅の関係に於いて、両対数軸上で直線的に変化する部分が存在しその勾配は約-1.0であること、及び閾値 I_a が小さい方が直線部分が長いことがわかる。主観評価実験で求めた最適視距離と画像伝送系の帯域幅の関係も、両対数軸上で直線となりその勾配がほぼ-1.3となることが示されており[44]、本方式による計算結果と良く一致していると言える。
- (2) 画像伝送系の帯域幅が狭い領域(ボケ量大きい)に於いては、最適視距離と帯域幅の関係が直線状態から外れ、最後には画像伝送系の帯域幅とは無関係に最適視距離は一定値になる。この状態は、評価関数値が閾値を越えない場合であり、常にボケた画像として見えるがその中で最も鮮鋭に感じる最適視距離は画像伝送系の帯域幅に関係なく一定になることを意味する。この特性は実測結果には存在しない。これは、実験に用いた画像はいろいろな空間周波数が含まれた画像であり、計算条件($f_s = 0.2$ cpdに設定)と異なることが原因として考えられる。
- (3) 実験では、画像伝送系の帯域幅が広い(ボケ量小さい)場合の最適視距離は一定となり、計算結果と異なる。最適視距離が一定となる原因として眼球運動の影響が可能性として考えられている[44]。即ち、全く別の要素が影響しているからであり、計算では考慮されていない

い為に実測と異なると考えられる。

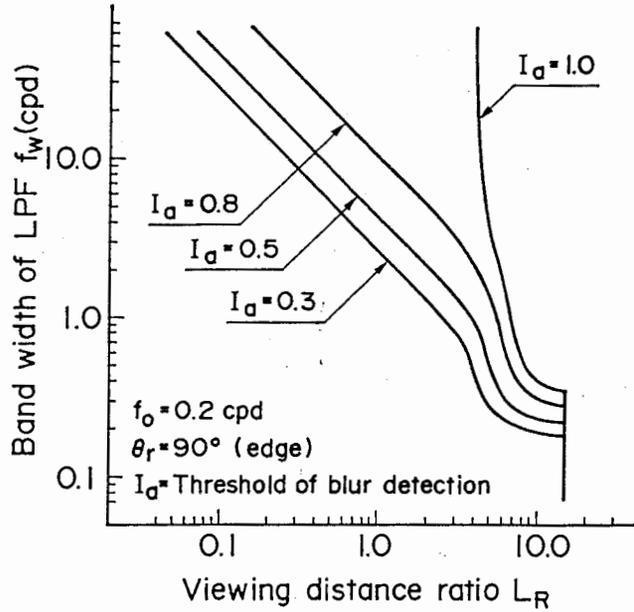


図4.9 画像伝送系の帯域幅 f_w と最適視距離比 L_{Ropt} の理論的關係 ($f_s = 0.2$ cpd)

Fig. 4.9 Theoretical relation between band width and optimum viewing distance ratio. ($f_s = 0.2$ cpd)

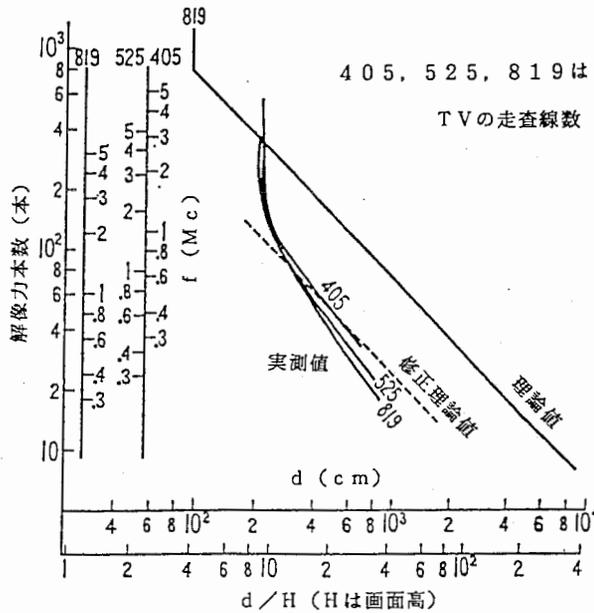


図4.10 画像伝送系の帯域幅と最適視距離の關係の実測結果[44]

Fig. 4.10 Relation between band width and experimentally measured optimum viewing distance[44].

4.3 濃度階調型 (PAM) 画像表示方式の性能評価法

本節では、視覚モデルが提示画像を観測したときに得られるもう一つの応答出力である最適観測状態を用いた新しい画像表示システム性能評価法を提案する。画像表示システムとしては濃度階調画像表示システム (昇華型熱転写プリンター、CRTや液晶などの各種ディスプレイ) を対象とし、システムの性能を客観的に評価する評価尺度として新しく CV_n 比 (Carrier to Visual noise Ratio) と NV_n 比 (Noise to Visual noise Ratio) と CN 比 (Carrier to Noise Ratio) を考案した。これらの評価尺度は視覚モデルの最適観測状態から導出できる視覚ノイズを基準にして計算される。そして、濃度階調画像に対する視覚モデルの評価関数値と CV_n 比、 NV_n 比、 CN 比の導出を行ない、これらの数値と濃度階調画像の性質 (画素の大きさ、量子化数など) との間の基本的関係を明確にする。

4.3.1 評価尺度としての CV_n 比、 NV_n 比

CRTや液晶ディスプレイなどの濃度階調画像表示システムに於ける画質劣化要因は画素構造や各種のノイズ、歪などである。従って、出力画像には本来表示されて欲しい信号成分 (入力された信号) とそれ以外のノイズ成分が含まれることになる。本節で提案する画像表示システムの性能評価法では、 CV_n 比 (carrier to Visual noise Ratio) は、正弦波信号を画像表示システムに入力した時に得られる出力画像の中で入力正弦波と同じ周波数の正弦波信号成分と視覚系のノイズ成分との比 (dBで表現する場合は差になる) として定義し、 NV_n 比 (Noise to Visual noise Ratio) は、出力画像の中で入力正弦波とは異なる周波数信号成分である歪みやノイズ成分と視覚系のノイズ成分との比として定義される。視覚系のノイズ成分は、視覚系が検知できる最小のコントラスト (コントラスト閾) として表現でき、出力画像を視覚モデルに観測させたときに得られる最適観測状態から理論的に計算できる。

次に、 CV_n 比と NV_n 比が何を表現しているかを考える。 CV_n 比は、出力画像の中に含まれる正弦波信号成分 (入力正弦波と同じ周波数) のうち視覚系によって検出される量を意味する。即ち、この画像システムがどれだけ忠実に入力信号を再現することができるかを表現する量であると言える。一方 NV_n 比は、出力画像の中に含まれている入力正弦波と異なる周波数成分 (歪み、ノイズ、搬送波成分など) のうち視覚系によって検出される量を意味している。即ち、入力信号の再現に対する妨害感の程度を表現するものと言える。さらに、 CV_n 比と NV_n 比の比 (dB表現の場合は差をとることを意味する) も出力画像の画像品質を表わす一つの客観評価尺度として用いることができ、 CN 比 (Carrier to Noise Ratio) と定義しておく。

CV_n 比、 NV_n 比、 CN 比の具体的な計算法は次のようにまとめられる (図4.11)。

- (1) 画像表示システムに一定振幅で空間周波数 ω_s の正弦波形を入力し、歪みやノイズを含んだ出力画像を得る。
- (2) 出力画像を観測した時に得られる視覚モデルの最適観測状態（ボケと視野の最適値）から視覚系のノイズ特性を推定する。
- (3) 出力画像に於いて、視覚系が検出できる空間周波数 ω_s の正弦波信号成分（正弦波信号のパワーとこの空間周波数の位置に於ける視覚系ノイズの比または差で表現できる）及び視覚系が検出できる歪みやノイズ成分（各空間周波数に於ける歪み・ノイズ成分と視覚系ノイズの比または差を空間周波数全体に互って積分したもの）を計算し、各々を CV_n 比、 NV_n 比とする。
- (4) CV_n 比、 NV_n 比の差（または比）を計算して CN 比とする。（dB表現の時は差を計算し、そうでない時は比を計算する）
- (5) 空間周波数や視点の位置を変えて(1)~(4)を繰り返す。

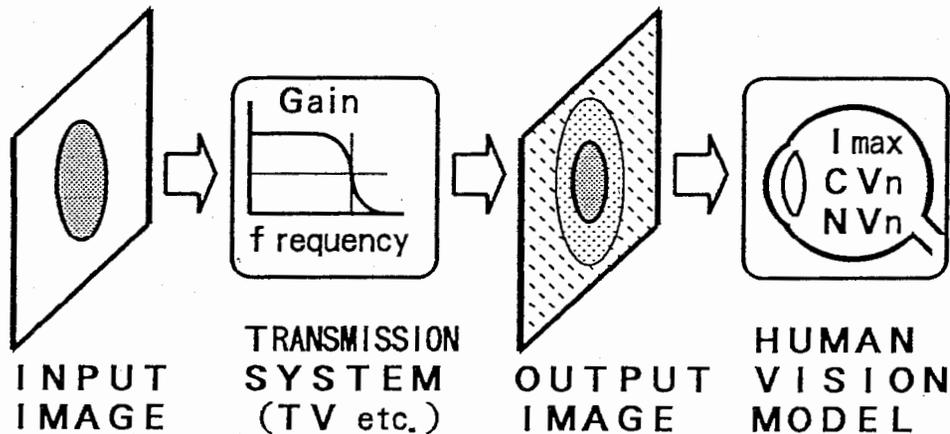


図4.11 画像表示システム性能評価の為の CV_n 比、 NV_n 比計算過程

Fig. 4.11 Calculating process for performance evaluation criteria C/V_n and N/V_n of imaging systems.

4.3.2 PAM画像表示方式の数式表現

昇華型熱転写プリンターやCRT・液晶ディスプレイ等の濃度変調法に基づく画像表示システムから得られる出力画像はパルス振幅変調（PAM: Pulse Amplitude Modulation）画像として近似的に数式表現できる。この近似は視覚モデルの応答特性や出力画像のスペクトルを理論的に計算できるようにする為である。

4.3.2.1 PAM正弦波画像とそのスペクトル表現

CRTや昇華型熱転写プリンター等の濃度階調表示システムでは、画素が存在することと各画素に於ける濃度または輝度が量子化されていることが特徴なので、次の正弦波形

$$g(r) = B + A \sin(\omega_s r + \theta_p) \quad (4.11)$$

A：正弦波振幅 B：平均濃度または平均輝度 θ_p ：位相

ω_s ：正弦波形の空間角周波数 r：距離

を濃度階調表示システムに入力したときの出力正弦波形は図4.12の様なパルス振幅変調正弦波（PAM正弦波）としてモデル化できる。但し、入力正弦波の位相は以後の議論に重大な影響を及ぼさないと考えられるので、 $\theta_p = 0$ (rad)とした。

PAM正弦波に於いて、1画素の大きさを T_w とし、入力正弦波形の1周期 $T_s (= 2\pi / \omega_s)$ が1画素 T_w の整数倍のみで表現できず x_0 という余りが生じる一般的な入力正弦波を考えると

$$T_s = N \cdot T_w + x_0 \quad (x_0 = m \cdot T_w / M) \quad (4.12)$$

の関係が成立する。但し、Nは正の整数値、mとMは共通の素数を含まない正の整数値であり、 $m = 0$ の時は $M = 1$ とする。以上の様に余り x_0 が存在している為に、PAM正弦波形に於ける周期 T_a は入力正弦波の周期 T_s とは異なり

$$T_a = M \cdot T_s = MN \cdot T_w + Mx_0 = (MN + m) \cdot T_w \quad (4.13)$$

の様に入力正弦波の周期 T_s のM倍で表わされ、 $(MN + m)$ 個の画素に相当する。

次に、各画素に於ける振幅値（輝度または濃度） y_n ($n = 1 \sim MN + m$) を求める。n番

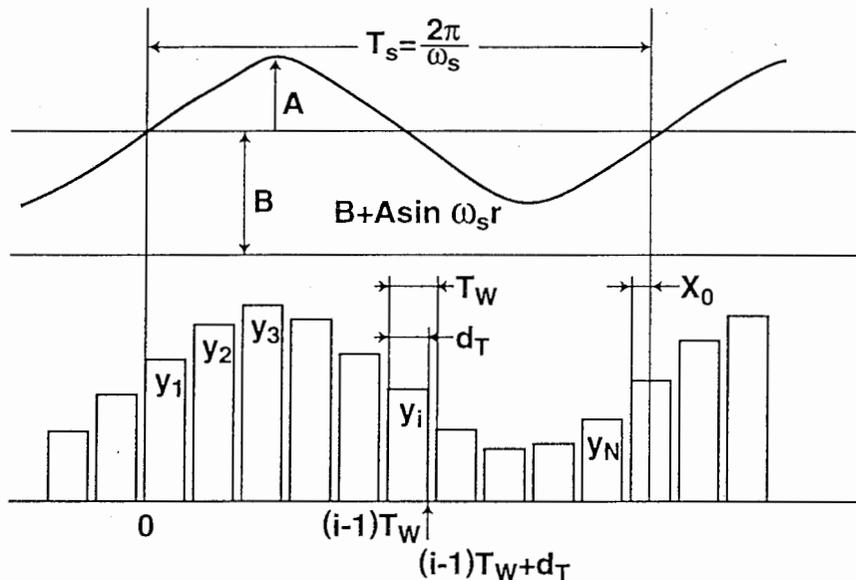


図4.12 パルス振幅変調（PAM）正弦波パターン

Fig. 4.12 Profile of a pulse amplitude modulated (PAM) sinusoidal wave.

目の画素に相当する位置での入力正弦波の積分値 Y_n

$$Y_n = \int_{(n-1)T_w}^{nT_w} [B + A \sin(\omega_s r)] dr$$

$$= B T_w - A [\cos(n\omega_s T_w) - \cos\{(n-1)\omega_s T_w\}] / \omega_s \quad (4.14)$$

を1画素の有効画素幅 d_T (1画素に於ける開口幅) で割ったものが理想的なPAM正弦波形の振幅値 y_n であると考えられるので、第 n 画素での振幅値 y_n は次式となる。

$$y_n = Y_n / d_T \quad (4.15)$$

上記の如く、PAM正弦波形は周期 T_a の周期関数となっているので、フーリエ係数を用いて

$$f(r) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ a_n \cos(n\omega_a r) + b_n \sin(n\omega_a r) \} \quad (4.16)$$

$$(\omega_a = 2\pi / T_a)$$

の様に級数表現が可能である。PAM正弦波の1周期を構成する画素の数 $(MN+m)$ が偶数 (奇数の場合にも同じ結果が得られる) の場合についてフーリエ係数を求めると次の様になる。

$$a_0 = 2 \int_{-T_a/2}^{T_a/2} f(r) dr / T_a = 2 \sum_{i=1}^{MN+m} Y_i / T_a \quad (4.17)$$

$$a_n = 2 \int_{-T_a/2}^{T_a/2} f(r) \cos(2\pi n r / T_a) dr / T_a$$

$$= 2 \sin(\pi n d_T / T_a) \sum_{i=1}^{MN+m} y_i \cos[n\pi \{2(i-1)T_w + d_T\} / T_a] / (\pi n) \quad (4.18)$$

$$b_n = 2 \int_{-T_a/2}^{T_a/2} f(r) \sin(2\pi n r / T_a) dr / T_a$$

$$= 2 \sin(\pi n d_T / T_a) \sum_{i=1}^{MN+m} y_i \sin[n\pi \{2(i-1)T_w + d_T\} / T_a] / (\pi n) \quad (4.19)$$

式(4.17)~(4.19)からPAM正弦波形のパワースペクトルは

$$|c_0|^2 = a_0^2 / 4 \quad (4.20)$$

$$|c_n|^2 = (a_n^2 + b_n^2) / 4 \quad (4.21)$$

を用いて計算することができ、これをdB表現すると以下の様に表現できる。

$$p_0 = 20 \cdot \log_{10} |c_0| = 20 \cdot \log_{10} (a_0 / 2) \quad (4.22)$$

$$p_n = 20 \cdot \log_{10} |c_n| = 10 \cdot \log_{10} \{ (a_n^2 + b_n^2) / 4 \} \quad (4.23)$$

4.3.2.2 振幅値量子化特性の導入

上記の定式化では各画素の振幅値 y_n を連続量（無限大の階調を意味する）として扱ったが、実際の画像表示システムでの階調数は有限なのでより正確な定式化を行う為に振幅値を量子化することが必要である。図4.13の量子化特性の様に各画素の振幅値 y_n （量子化入力）が存在している範囲（ $0 \leq y_n \leq A_{\max}$ ）を線形に N_q 個の区間に等分して量子化（線形量子化）し、その時の離散化された振幅レベル値 $d y_n$ （量子化出力）の範囲が $A_{\min} \leq d y_n \leq A_{\max}$ である場合、各画素の振幅値のステップ幅 Δy_n 及び量子化された振幅値のステップ幅 $\Delta d y_n$ は

$$\Delta y_n = A_{\max} / N_q \quad (4.24)$$

$$\Delta d y_n = (A_{\max} - A_{\min}) / (N_q - 1) \quad (4.25)$$

となる。従って、振幅レベル値 $d y_n$ は

$$d y_n = A_{\min} + \Delta h \cdot \Delta d y_n \quad (\Delta h = \llbracket y_n / \Delta y_n \rrbracket) \quad (4.26)$$

で表わせる。但し、 $\llbracket * \rrbracket$ は実数の整数化を意味する。量子化特性を導入する場合は、PAM画像の振幅値 y_n の代わりに $d y_n$ を用いれば良い。

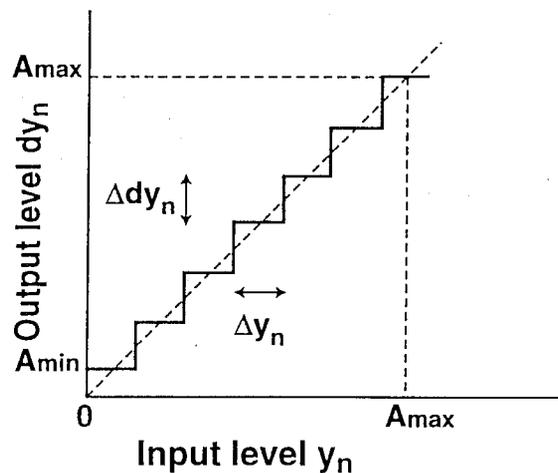


図4.13 PAM画像の画素に於ける線形量子化特性

Fig. 4.13 Linear luminance quantization characteristic in a pixel of a PAM image.

4.3.2.3 PAM表示方式正弦波形の空間周波数構造

以上の定式化に基づいて計算したPAM正弦波空間周波数構造の例を図4.14、図4.15に示す。これらの図で、横軸はフーリエ係数の項数であり、空間周波数を意味し、縦軸はパワ

ースペクトル (dB) である。正弦波信号周波数を 1 cpd、有効画素幅 d_T と画素幅 T_W の比 d_T / T_W (duty) を 0.8、入力正弦波形の平均輝度 B 及び振幅 A を各々 50, 30、量子化後の振幅値の変化範囲を 1~100、視距離を 30 cm に固定した状態で、画素幅 T_W の大きさを 1, 4 mm と変化した時の理論的空間周波数特性であり、量子化レベル数 (2, 8, 64, ∞) をパラメータとして描いてある。PAM 正弦波形の基本的な空間周波数構造は直流信号成分と入力正弦波信号空間周波数及び搬送波空間周波数 (画素周期 $T_W = 1\text{mm}$ のとき 5.236 cpd、 $T_W = 4\text{mm}$ のとき 1.309 cpd) とその側帯波とから構成され、搬送波が矩形パルスの為には搬送波と側帯波の高調波成分も発生している。画素幅 T_W が大きくなって行くと、搬送波空間周波数が低い方に移動するの

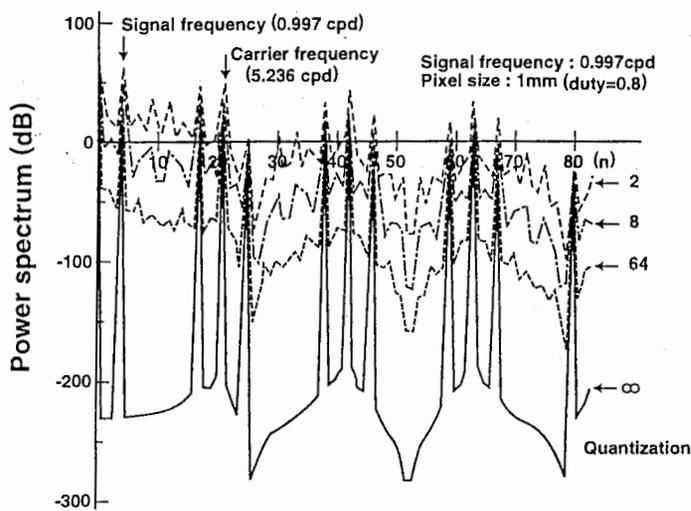


図 4.14 PAM 正弦波形の空間周波数構造 (画素幅: $T_W = 1\text{ mm}$)

Fig. 4.14 Spatial frequency structure of a PAM sinusoidal wave. (pixel width: $T_W = 1\text{ mm}$)

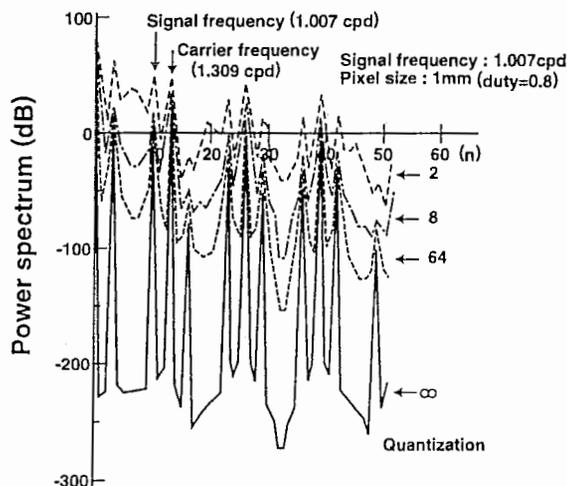


図 4.15 PAM 正弦波形の空間周波数構造 (画素幅: $T_W = 4\text{ mm}$)

Fig. 4.15 Spatial frequency structure of a PAM sinusoidal wave. (pixel width: $T_W = 4\text{ mm}$)

で、下側帯波と入力正弦波空間周波数とが接近する結果となり、さらに画素幅 T_w を大きくすると (図 4.15)、入力正弦波空間周波数と下側帯波の位置関係が逆転し、下側帯波の方が正弦波空間周波数より低くなる結果となる。この状態はいわゆる折り返しノイズ (Aliasing) が発生した状況であり、正弦波空間周波数よりも低い空間周波数のノイズ (下側帯波) が見えることを意味している。また、量子化レベル数を少なくして行くと、正弦波空間周波数、搬送波空間周波数、側帯波の間に位置する空間周波数に於いて量子化歪みに基づくノイズが急激に増加して行くことが分かる。

4.3.3 PAM正弦波に対する視覚モデル評価関数の導出

フーリエ級数で表現した PAM 正弦波形 (式(4.16)) を視点位置 θ_r (あるいは位相) を考慮した形に書き直すと

$$f(r) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ a_n \cos(n\omega_a r + n\theta_r) + b_n \sin(n\omega_a r + n\theta_r) \} \quad (4.27)$$

$$(\omega_a = 2\pi / T_a)$$

となる。画像表示システムから出力される PAM 正弦波形を視覚モデルが観測した時に得られる評価関数 I は次の様になる。

$$I = \frac{8}{a_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} H(n\omega_a) H(m\omega_a) \exp\{-\tau_0(n^2 + m^2)\omega_a^2\} \sinh\{(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_a^2\}$$

$$\times [C1_n C1_m \sinh\{(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_a^2\} + C2_n C2_m \cosh\{(\tau_0 - \tau_1)nm\omega_a^2\}] \quad (4.28)$$

$$(C1_n = a_n \cos(n\theta_r) + b_n \sin(n\theta_r), C2_n = b_n \cos(n\theta_r) - a_n \sin(n\theta_r))$$

提示画像を観測したときの視覚系の最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として式(4.28)の評価関数 I を極大化することにより推定できる。

4.3.4 視覚ノイズと CVn 比、NVn 比の導出

PAM 正弦波形を視覚モデルが観測した時に決定される最適観測状態に於いては、この最適観測状態と等価な意味を持つ狭帯域通過フィルタ型 (チャンネル中心周波数 f_c) のコントラスト感度特性 $S_B(\omega_s)$ (視覚モデルのマルチチャンネル構造を構成する 1 つの狭帯域フィルタ) が現時点での視覚モデルの空間周波数特性を表現していることになる。 $S_B(\omega_s)$ の逆特性 $1/S_B(\omega_s)$ は、各空間周波数に於いて人間が検知できるコントラストの限界値 (閾値) を表わしており、視覚系はこの限界値以下のコントラストを持つ画像を検出することができない。この意味に於いて、コントラスト閾値特性 $1/S_B(\omega_s)$ は視覚系のノイズと空間周波数の関

係を等価的に表現している特性であると解釈できる。C/V_n比、N/V_n比、C/N比をdB表現で求めるにはコントラストで表現されている視覚ノイズ特性を対数パワーで表わしておく必要がある。本来、コントラスト閾値特性は空間周波数 ω_s の正弦波形に対して測定または計算されるものなので、平均輝度をBとすると閾値での正弦波形の振幅 $A_t(\omega_s)$ は

$$A_t(\omega_s) = B / S_B(\omega_s) \quad (4.29)$$

となる。この振幅値を持つ正弦波形の振幅スペクトルの大きさは $A_t(\omega_s) / 2$ (空間周波数 ω_s の位置に生じる線スペクトル)なので、対数パワースペクトル PV_n は次式となる。

$$PV_n = 20 \cdot \log_{10} \{ A_t(n\omega_a) / 2 \} \quad (\text{dB}) \quad (4.30)$$

但し、PAM正弦波形で生じる線スペクトルと同じ空間周波数の位置で計算できるように ω_a 間隔毎に離散化して表現した。この視覚モデルでは、入力正弦波形の空間周波数やPAM表現での1画素幅、量子化特性、視点位置に依存して最適観測状態が適応的に変化するので、視覚系のノイズ特性もこれらの変化に依存して形を変える。

次に、C/V_n、N/V_n、C/Nの導出を行なう。入力正弦波形の空間周波数 ω_s と出力波形であるPAM正弦波形の基本空間周波数 ω_a の関係は、式(4.13)より

$$\omega_s = M \cdot \omega_a \quad (4.31)$$

となるので、PAM正弦波形において視覚系が検知することができる空間周波数 ω_s の正弦波成分の大きさは式(4.23)と式(4.30)より次の様に表わされる。

$$C/V_n = p_M - PV_M = 10 \cdot \log_{10} \{ (a_M^2 + b_M^2) / A_t^2(M\omega_a) \} \quad (4.32)$$

但し、正弦波成分 p_M が視覚ノイズ PV_M より小さい場合は、人間には正弦波成分の存在が検知できないという意味に於いて $C/V_n = 0$ とする。一方、PAM正弦波形において視覚系が検知できる空間周波数 ω_s 以外の高調波成分やノイズ・歪み成分の大きさを総合したものは

$$N/V_n = \sum_{n=1}^{\infty} (p_n - PV_n) \quad (n \neq M) \quad (4.33)$$

$$p_n - PV_n = 10 \cdot \log_{10} \{ (a_n^2 + b_n^2) / A_t^2(n\omega_a) \} \quad (4.34)$$

で与えられる。C/V_nの場合と同様に、 $p_n - PV_n \leq 0$ となった場合には人間には検知できないノイズなので $p_n - PV_n = 0$ とする。以上より、空間周波数 ω_s の正弦波形を入力して得られるPAM正弦波形を視覚モデルが観測したときのC/N比は次式となる。

$$C/N = C/V_n - N/V_n = p_M - PV_M - \sum_{n=1}^{\infty} (p_n - PV_n) \quad (n \neq M) \quad (4.35)$$

4.3.5 PAM正弦波に対する評価結果

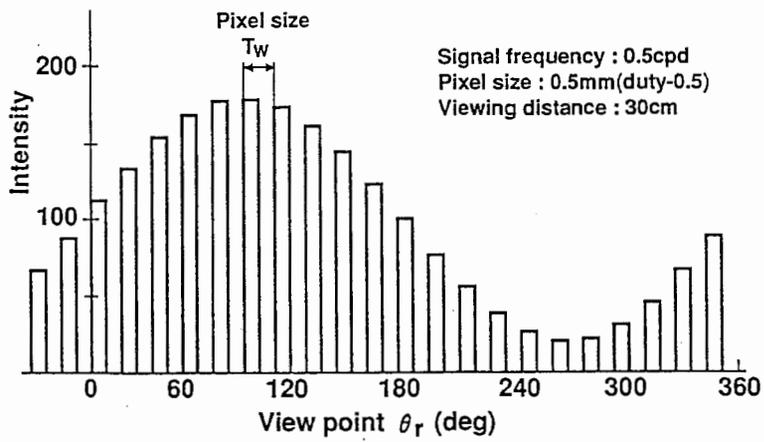
PAM正弦波形の基本的見え方特性の解析と CV_n 比、 NV_n 比、 CN 比を用いたPAM方式の性能評価を行なう。検討する項目は以下の3種類である。

- (1) 有効画素幅 d_T と画素幅 T_w の比 (duty)の違いの影響
- (2) 各画素の輝度値を量子化したときの影響
- (3) 画素幅 T_w の大きさと量子化数の影響

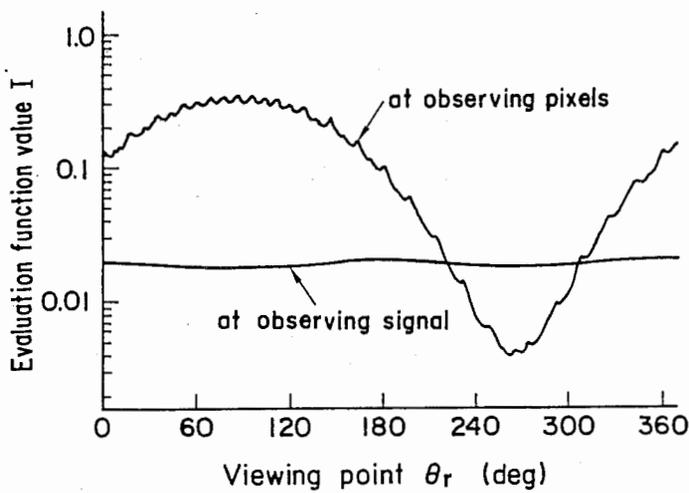
4.3.5.1 有効画素幅 d_T と画素幅 T_w の比 (duty) の影響

図4.16は、振幅値 $A=40$ 、平均輝度 $B=50$ 、空間周波数 $f_s=0.499$ cpdの正弦波信号を入力し、画素幅 $T_w=0.5$ mm、 $duty=0.5$ 、量子化なし (量子化数 $=\infty$)、視距離を30 cmの設定で出力波形であるPAM正弦波形を視覚モデルに観測させた時の応答特性である。図4.16(a)はPAM正弦波形、(b)(c)は各々PAM正弦波を視覚モデルが観測したときに得られる評価関数値の極大値と視点位置の関係、最適観測状態 (チャンネル中心周波数) と視点位置の関係を示している。この様なPAM正弦波形を観察するときの基本的特徴は、異なった見え方を引き起こす2種類の最適観測状態が安定して存在し、それに対応して視覚ノイズ特性も変化することである。評価関数値やチャンネル中心周波数が細かく変動する方は、視覚モデルがPAM画像の搬送波であるパルス波形 (画素) を観測するのに適した状態になっていることを意味する。この細かい変動は画素構造と対応し、特に極大値の位置はPAM画像のパルスのエッジの位置に相当している。また、評価関数値やチャンネル中心周波数の変化が緩やかな方は、視覚モデルがPAM方式により表現されている正弦波信号 (画素の集合で表現されている) を観測するのに適した状態であることを意味する。図4.16(b)を見ると、PAM正弦波形が比較的明るい多くの視点位置で画素構造を観測した時の方が評価関数値 (印象の強さ) が大きくなっており、この部分では正弦波信号よりも画素構造のほうが目に付きやすいことが予想される。一方、PAM正弦波の輝度が低い視点位置では正弦波信号を観測した時の方が大きな評価関数値となり、この部分に位置する画素はあまり目立たなくなることを意味する。図4.16(c)の観測状態選択特性では、正弦波信号を観測する場合は入力正弦波形そのものを観測した時とほぼ同じチャンネル中心周波数が選択され、画素構造を観測する場合はより高い空間周波数を見ることになるので、より高いチャンネル中心周波数 (ボケが少なく、視野が狭い) が選択される。この様に、この視覚モデルを用いると、我々が実際にPAM正弦波を観察したときの見え方が理論的にシミュレートできる。

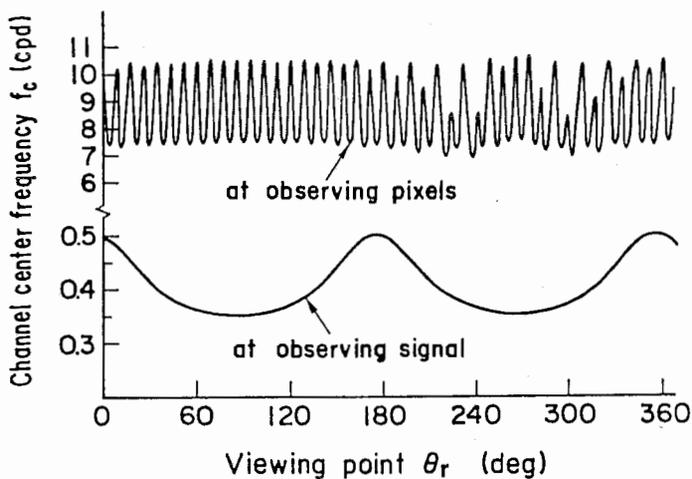
図4.17(a)(b)は各々 CV_n 比特性、 NV_n 比特性を計算した結果である。正弦波信号を観



(a) P A M正弦波形パターン (duty = 0.5)



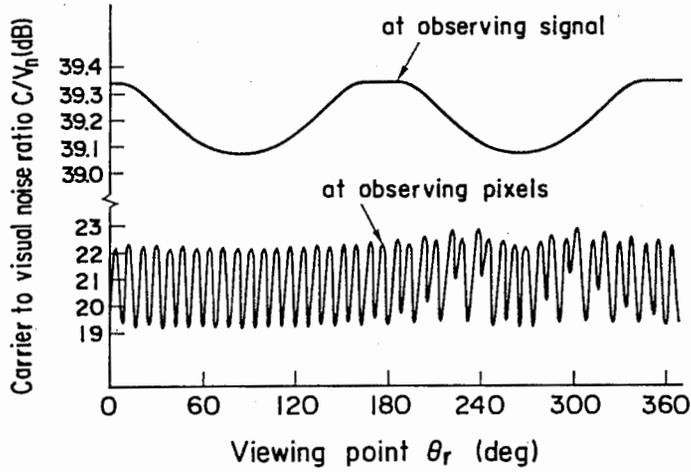
(b) 評価関数極大値 I_{max} と視点位置の関係



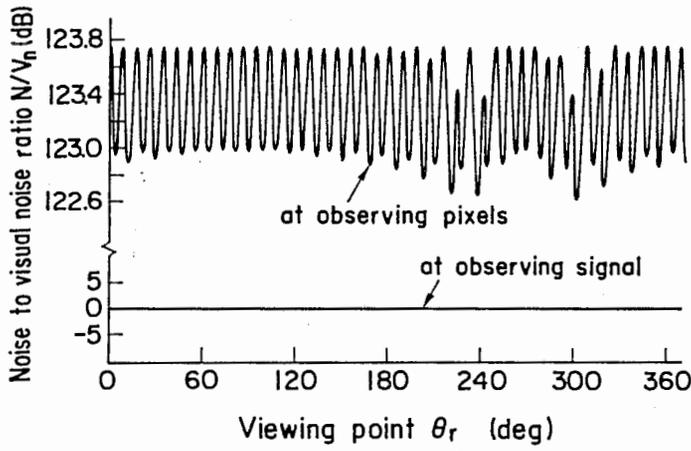
(c) 最適観測状態 (チャンネル中心周波数 f_c) と視点位置の関係

図4.16 P A M正弦波形に対する視覚モデルの応答特性 (duty = 0.5)

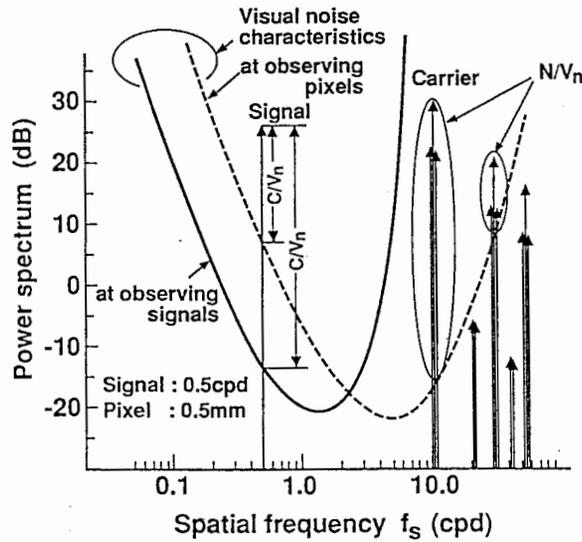
Fig. 4.16 The vision model's response characteristics to a PAM sinusoidal wave. (duty = 0.5)



(a) C/V_n 比と視点位置の関係



(b) N/V_n 比と視点位置の関係



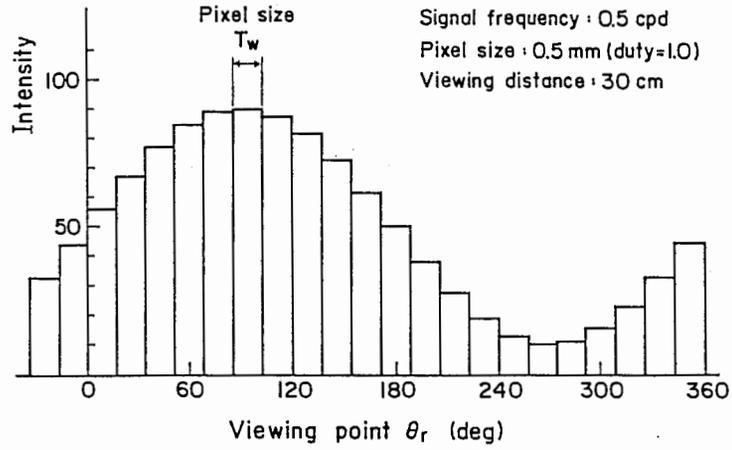
(c) PAM正弦波形と視覚ノイズの空間周波数構造の関係 ($\theta_r = 0^\circ$)

図4.17 視覚モデルに基づくPAM正弦波形の評価特性 (duty = 0.5)

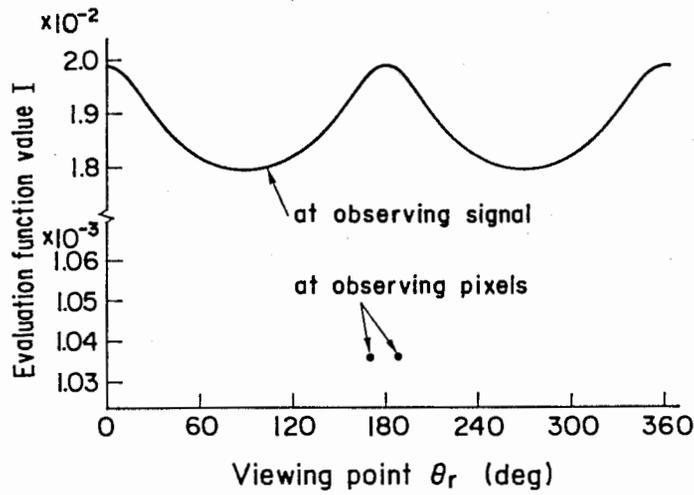
Fig. 4.17 Evaluation results to a PAM sinusoidal wave using the vision model. (duty = 0.5)

測するのに適する観測状態が選択された場合、 CV_n 比はほぼ一定値 (39.07 dB ~ 39.33 dB) となり、 NV_n 比は 0 dBである。即ち、この状態は階調性に優れたきれいな正弦波信号が認識され (正弦波信号の再現性に優れる)、正弦波信号の知覚を妨害する画素構成成分は知覚されないことを意味するので、画質の高い (画像劣化の少ない) 画像として評価される結果となる。一方、画素構造の観測に適する観測状態が選択された場合、 CV_n 比は正弦波観測の場合よりも低く 19.2 dB ~ 22.85 dBの間で細かく変動し、 NV_n 比は正弦波観測の場合よりも高く 122.6 dB ~ 123.74 dBの間で細かく変動する。この変動は画像構造に対応している。即ちこの状態では、正弦波信号を認識することは可能であるが、それ以上に正弦波信号の知覚を妨害する画素構成成分の方がはるかに大きなものとして知覚され、画質の低い (画像劣化の激しい) 画像として評価されることを意味する。図 4.17(c) は以上の結果を空間周波数構造で表現したものであり、PAM正弦波形と視覚モデルの2種類のノイズ特性の空間周波数構造を重ねて描いてある。但し、視点位置は $\theta_r = 0^\circ$ である。正弦波信号観測用の最適観測状態の場合は、0.499 cpd に位置する正弦波信号成分のみが正弦波観測用の視覚ノイズ (実線で表示) より大きく、その他の搬送波や側帯波成分は視覚ノイズ以下なので、正弦波信号のみが認識できることになるが、画素構造観測用の最適観測状態の場合は、正弦波信号だけでなく搬送波や側帯波およびその高調波成分も画素観測用の視覚ノイズ (破線で表示) よりも大きくなるので、画素構造がはっきり見える状態となり、劣化の激しい画像として評価される。この様に、本提案の視覚モデルを用いた評価法 (CV_n 比、 NV_n 比) を利用すれば、同じ画像であっても注目する情報や視点位置に依存して画質評価値が変化する我々の主観的判断が理論的に説明できる。

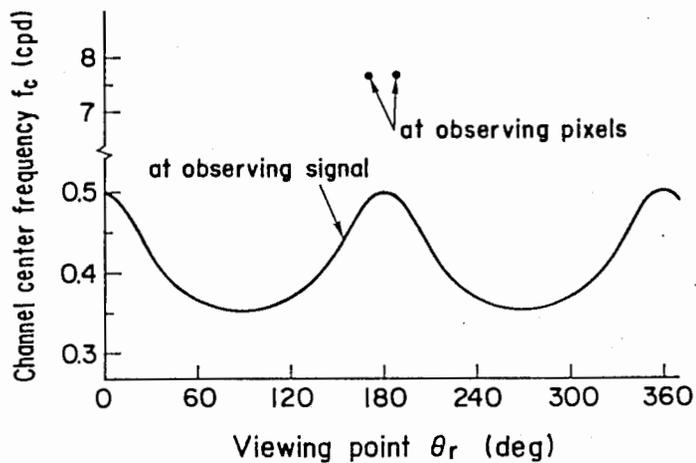
図 4.18 は $duty = 1.0$ (他は図 4.16 と同じ) の場合の視覚モデルの基本的応答特性である。基本的な見え方特性で図 4.16 と明確に異なるところは、画素構造の観測に適する観測状態の存在する視点位置が極端に減少することである。これは、図 4.18(a) の PAM正弦波形からも分かる様に、画素同志が繋がっている為に画素が単独では見え難いことを意味している。図 4.19 の評価結果に関しても、正弦波信号の観測に適した観測状態では、 CV_n 比が 39.04 dB ~ 39.31 dB、 NV_n 比が 0 dB となり、図 4.17 と同様に画質劣化の少ない正弦波形が認識されるが、画素構造の観測に適した観測状態では、 CV_n 比が 21.9 dB、 NV_n 比が約 31.5 dB となり、図 4.17 と比べると正弦波信号の知覚を妨害する画素構成成分が極端に減少していることが分かる。これは、 $duty = 1.0$ の場合の方が正弦波形の知覚を妨害する画素構成成分が少ないと言う意味で優れた画質であると評価されることを意味する。図 4.19(c) は、PAM正弦波形と2種類の視覚ノイズ特性の空間周波数構造を重ねたものである。但し、視点位置は $\theta_r = 0^\circ$ である。これを見ると、 $duty = 1.0$ の PAM正弦波形の空間周波数構造は、搬送波が無く側帯波



(a) PAM正弦波形パターン (duty = 1.0)



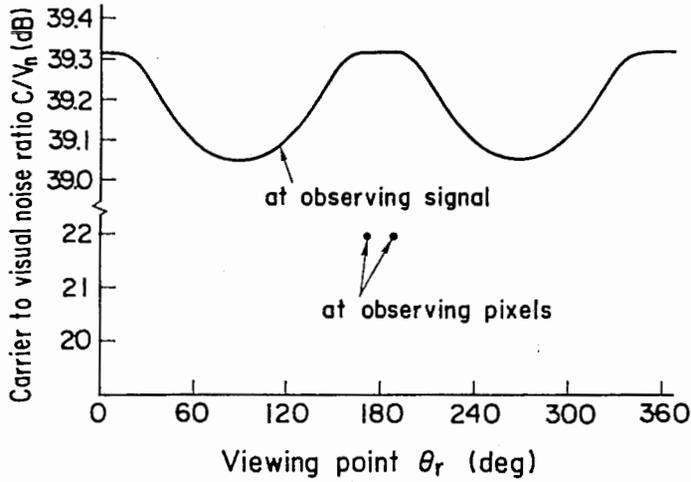
(b) 評価関数極大値 I_{\max} と視点位置の関係



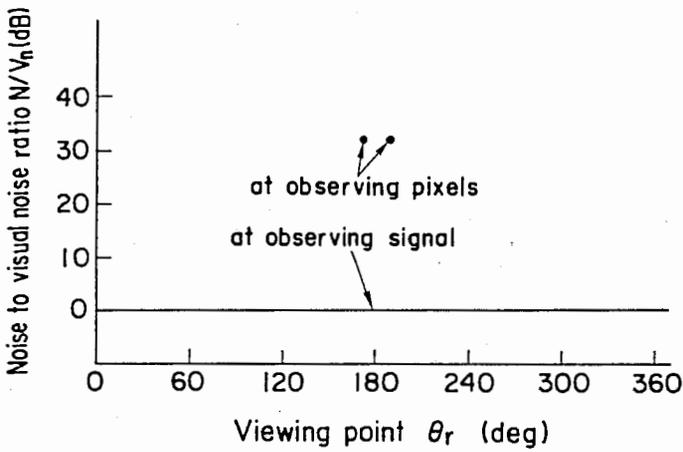
(c) 最適観測状態 (チャンネル中心周波数 f_c) と視点位置の関係

図4.18 PAM正弦波形に対する視覚モデルの応答特性 (duty = 1.0)

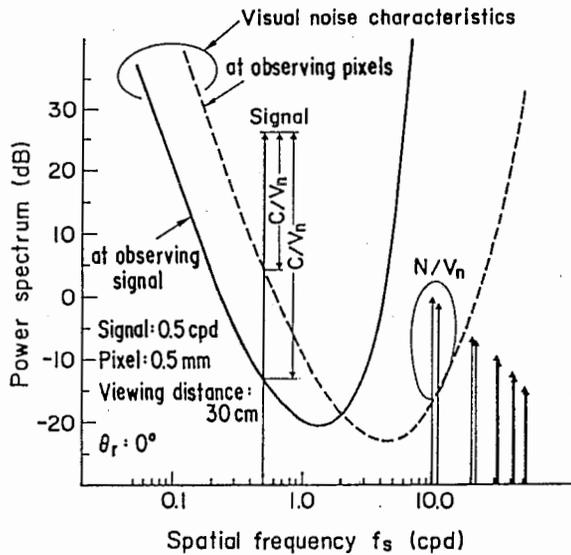
Fig. 4.18 The vision model's response characteristics to a PAM sinusoidal wave. (duty = 1.0)



(a) C/V_n 比と視点位置の関係



(b) N/V_n 比と視点位置の関係



(c) PAM正弦波形と視覚ノイズの空間周波数構造の関係 ($\theta_r = 0^\circ$)

図4.19 視覚モデルに基づくPAM正弦波形の評価特性 (duty = 1.0)

Fig. 4.19 Evaluation results to a PAM sinusoidal wave using the vision model. (duty = 1.0)

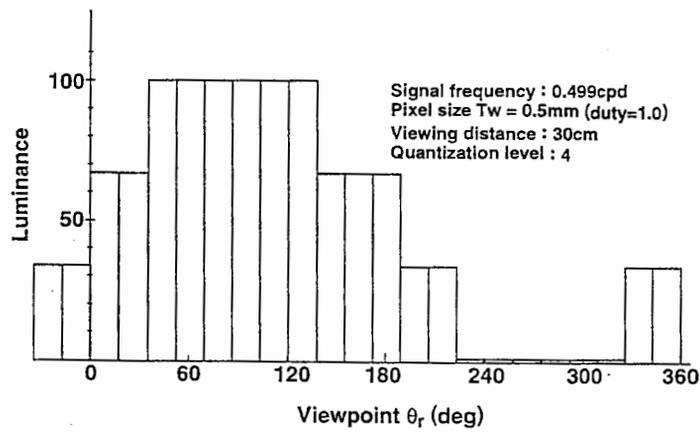
成分が小さい為に、正弦波形の知覚を妨害する画素構成成分が知覚されにくいことが分かる。

以上の計算結果に共通して言えることは、視点の位置に依存して見え方が異なる（正弦波形としての印象が強いか或いは画素構造の印象が強いかなど）と同時に CV_n 比、 NV_n 比で表現される画質の評価値も変化することである。この様に、視点の位置に依存して画質の評価値が異なることは我々が実際の画像を評価する時にも生じる本質的な現象であり、本評価法により無理なく表現できる。

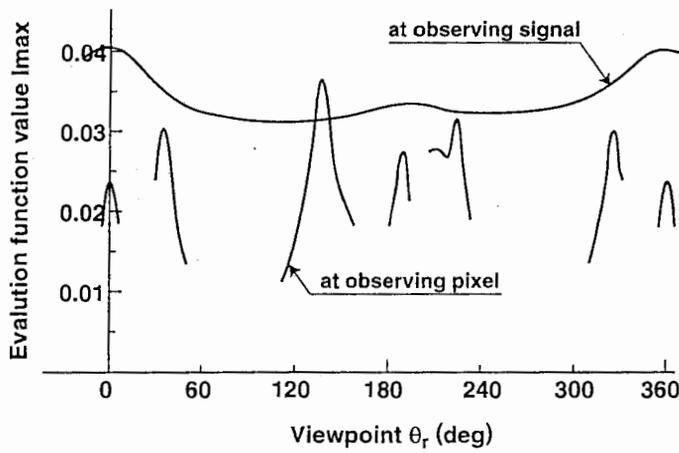
4.3.5.2 量子化の影響

図4.20は、振幅値 $A=40$ 、平均輝度 $B=50$ 、空間周波数 $f_s=0.499$ cpdの正弦波信号を入力し、画素幅 $T_w=0.5$ mm、 $duty=1.0$ 、視距離を30 cm、量子化数=4の設定で出力したPAM正弦波形を視覚モデルに観測させた時の計算結果である。図4.20(a)はPAM正弦波形、(b)(c)は各々PAM正弦波形を観測した時に得られる視覚モデルの評価関数値と視点位置の関係、最適観測状態（チャンネル中心周波数）と視点位置の関係である。同じ設定条件での計算結果（図4.18、但し量子化は行なっていない）は、ほとんど正弦波信号用の最適観測状態しか現われず（画素構造用の観測状態は1周期の内3か所でのみ存在）画質劣化の少ない綺麗な正弦波形が知覚できたが、量子化を行なった場合には正弦波用観測状態以外の最適観測状態も安定して存在しており、正弦波信号よりも大きな印象（正弦波形に対する評価関数値より大きな値になる）を与える場合もあるなど、明らかに画質が劣化した正弦波形として知覚されることが予想できる。正弦波形用観測状態以外の最適観測状態に於いては、基本的には画素構造、特に画素のエッジ部分が見えている訳であるが、この場合のように量子化された波形の場合には擬似輪郭が見えていると判断できる。特に、視点 $\theta_r=137^\circ$ 近くのエッジ部では正弦波形に対するよりも大きな評価関数値（印象が強い）が得られ、擬似輪郭がはっきりと認識できることが分かる。一方、図4.21を見ると、正弦波形用の観測状態では CV_n 比はほぼ一定値（41.6 dB～42 dB）、 NV_n 比は66.7 dB～156.7 dBの間で変動し、画素構造用の観測状態では CV_n 比は26.5 dB～38.8 dB、 NV_n 比は283.3 dB～393.4 dBの間に分布している。量子化数 $=\infty$ で計算した結果（図4.19）と比べると、正弦波形用観測状態、画素構造用観測状態の両方に於いて正弦波形の知覚を妨害する成分 NV_n 比（量子化によるノイズが原因）が極端に増加しているのが特徴であり、その分だけ画質を著しく劣化させていると判断できる。

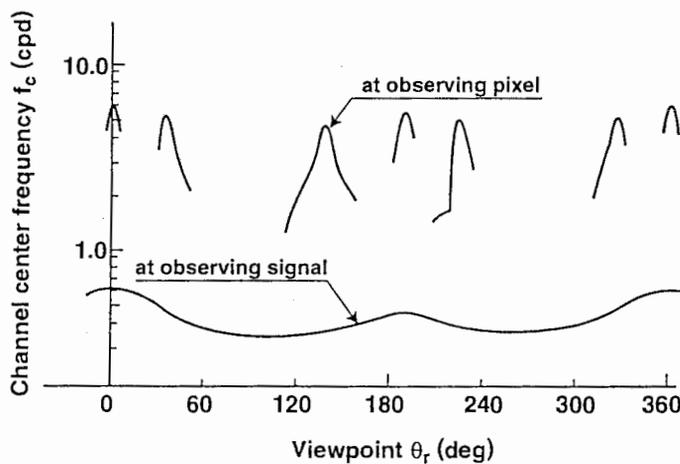
図4.22は、 CN 比（ $=CV_n - NV_n$ ）で表現した画質と量子化数の関係をまとめた結果である。但し、設定条件は図4.20と同じであり、量子化数は2～256まで変化させた。 CN 比は、構成要素である CV_n 比と NV_n 比の大小関係が不明確になるが、簡単に画質の程度が



(a) PAM正弦波形パターン (duty = 1.0)



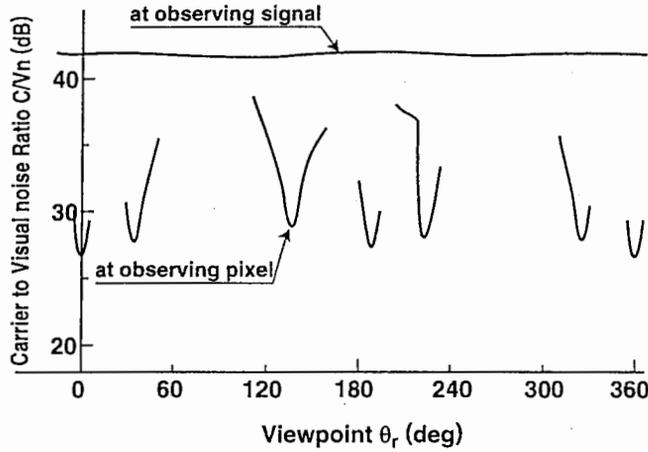
(b) 評価関数極大値 I_{\max} と視点位置の関係



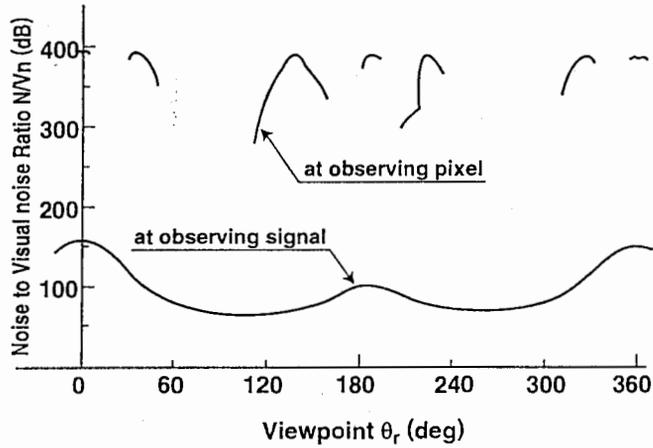
(c) 最適観測状態 (チャンネル中心周波数 f_c) と視点位置の関係

図4.20 PAM正弦波形に対する視覚モデルの応答特性 (量子化数 $N_q = 4$)

Fig. 4.20 The vision model's response characteristics to a PAM sinusoidal wave. ($N_q = 4$)



(a) CV_n 比と視点位置の関係



(b) NV_n 比と視点位置の関係

図4.21 視覚モデルに基づくPAM正弦波形の評価特性 (量子化数 $N_q=4$)

Fig. 4.21 Evaluation results to a PAM sinusoidal wave using the vision model. ($N_q=4$)

比較できる利点がある。 CV_n 比も視点位置に依存して変動するので、この図では最大値曲線と最小値曲線を示した。この図から次の結果が得られる。

- (1) 正弦波形観測用、画素構造観測用の両観測状態では、量子化数が増加するに従って CV_n 比 (画質に対応する) は増加し、量子化数 $N_q=64$ 以上ではほとんど飽和する。
- (2) 両観測状態に於いて、視点位置に依存した CV_n 比の変化量 (最大値曲線と最小値曲線の差) は量子化数の増加につれて小さくなる。これは、量子化数の増加につれて、正弦波形の知覚を妨害する成分 NV_n 比の減少が原因である。
- (3) 画素構造用観測状態での CV_n 比は、正弦波用観測状態での CV_n 比より小さい。

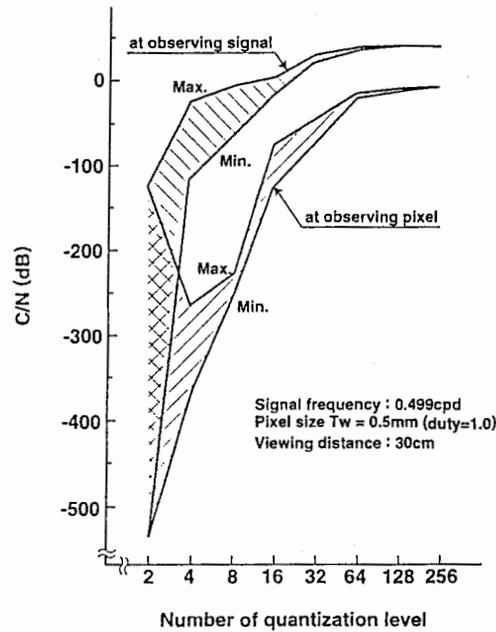


図 4.22 PAM正弦波に対する量子化数 N_q とC/N比の関係

Fig. 4.22 Relation between the number N_q of quantization levels and C/N to PAM sinusoidal waves.

4.3.5.3 画素幅 T_w の影響

図 4.2 3 (a) (b) は、正弦波振幅値 $A=40$ 、平均輝度 $B=50$ 、 $duty=1.0$ 、視距離を 30 cm に設定し、画素幅 T_w (0.05 mm , 0.1 mm , 0.2 mm , 0.4 mm , 0.8 mm) をパラメータにして計算した量子化数とC/N比の関係をまとめた結果で、各図はそれぞれ正弦波空間周波数 f_s が 1.0 cpd , 4.0 cpd の場合である。C/N比は視点位置に依存して値が変わるので、この場合も最大値曲線と最小値曲線の両方を描いた。これらの図から次の結果が得られる。

- (1) 正弦波空間周波数 f_s が低い場合 (図 4.2 3 (a))、小さい画素幅 ($T_w = 0.05\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$) に於けるC/N比と量子化数の関係は特性がほとんど重なるが、空間周波数 f_s が高くなると (図 4.2 3 (b)) 画素幅 T_w の大きい方から順にC/N比特性の分離が始まる。分離の仕方は、量子化数の小さい方から始まり、最終的にはC/N比の飽和値 (量子化数=256) にまで及ぶ。この特性は、空間周波数の高い画像を高い品質で再現するには小さな画素幅を使って表示することが重要であることを意味している。
- (2) 画素幅 T_w が大きくなるにつれてC/N比は減少する傾向である。
- (3) 量子化数が増えるとC/N比が上昇し飽和するが、一般的に言って画素幅 T_w の大きい方がC/N比飽和時の量子化数は大きくなる傾向である。
- (4) 視点位置に依存してC/N比が変動する。

以上の様に、画像表示システムの性能は空間周波数、視点位置、画素幅、量子化数などにより変化するが、本方式の評価法を用いればこれらの影響を客観的に評価できる可能性がある。

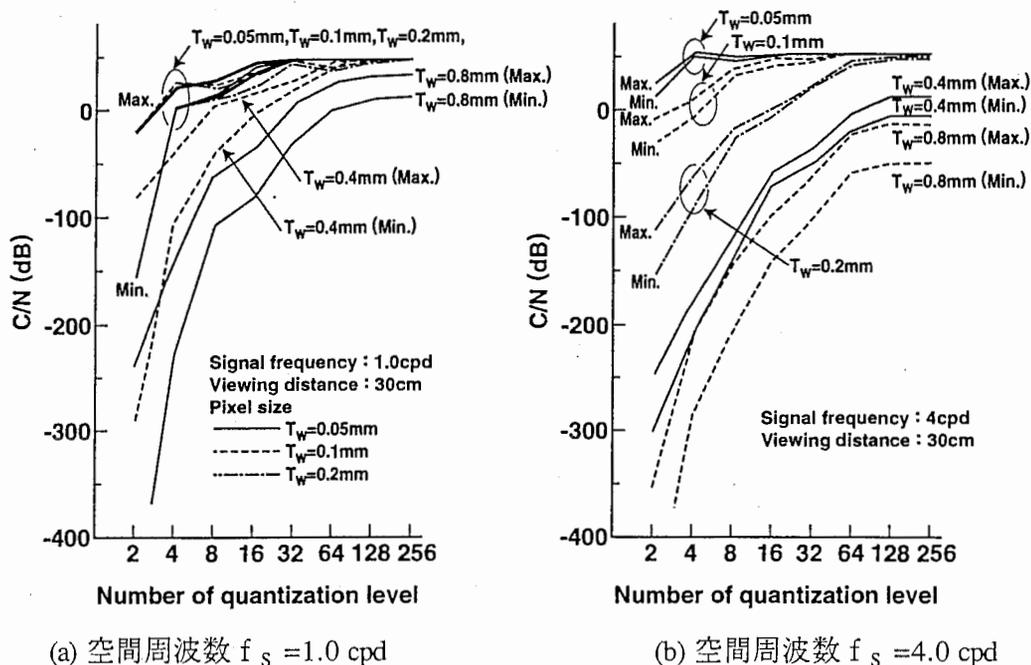


図 4.23 PAM正弦波に対する量子化数 N_q とC/N比の関係 (パラメータ:画素幅 T_w)

Fig. 4.23 Relation between N_q and C/N to PAM sinusoidal waves. (parameter: T_w)

4.4 むすび

視覚モデルの応用例として、視覚モデルの2種類の応答出力(評価関数値と最適観測状態)を用いた新しい客観的画質評価法(鮮鋭さ評価と画像表示システムの性能評価)を提案した。

鮮鋭さ評価法では、提示画像に対して得られる視覚モデルの評価関数値が画像に含まれるボケ量の大小に応じて増減する性質を持っていることに着目し、評価関数値を鮮鋭さに対する客観評価尺度として用いている。実際の計算では、画像伝送系に入力された方形波形が画像伝送系の帯域幅の制限によりボケを伴った方形波形として出力されることを想定した。そして、このボケを伴った方形波形を視覚モデルが観測した時に得られる評価関数値により鮮鋭さに関して得られている経験的事実あるいは実験事実がどの程度説明され得るかどうかを検証し、以下の結果の様に本鮮鋭さ評価法の有効性が示せた。

- (1) 画像伝送系の帯域幅が広がる(ボケが減る)につれて、評価関数値は増加し、そして飽和する傾向を示し、帯域幅と鮮鋭さの関係に関する従来結果と良く一致する。また、視距離を遠くすると評価関数値も増加し、遠くしすぎると逆に評価関数値は減少する。これは、ボケた画像であっても遠ざけて観測すれば鮮鋭さが増加し、遠く離しすぎると逆に見にくくなる

ことを意味し、我々の経験的事実と良く一致する。

- (2) ボケの存在が知覚できる視覚系の能力（絶対ボケ検出）を評価関数値にある閾値を設定することで近似し、この条件の下で画像伝送系の帯域幅と最適視距離（ボケの存在が知覚できなくなった最小の視距離）の関係を求めたところ、両対数軸に対し約-1.0の傾きを持った直線で表現できる領域が存在する結果が得られた。この計算結果は、画像伝送系の帯域幅と最適視距離についての実験結果（約-1.3の傾きを持った直線）と良い一致を示している。

一方画像表示システムの性能評価法では、濃度階調型画像表示装置からの出力画像をパルス振幅変調（PAM）正弦波で近似し、この画像を視覚モデルが観測した時の最適観測状態から導出できる視覚ノイズ特性を基準として計算した視覚系が検知できる信号成分 CV_n 比（Carrier to Visual noise ratio）、視覚系が検知できるノイズ成分 NV_n 比（Noise to Visual noise ratio）、及び CV_n 比と NV_n 比を組み合わせた CN 比（Carrier to Noise ratio）の3種類を評価尺度として用いている。duty（有効画素幅 d_T と画素幅 T_w の比）、正弦波空間周波数 f_s 、量子化数、画素幅 T_w を変化させたPAM正弦波形に対し、視覚モデルの応答特性から CV_n 比、 NV_n 比、 CN 比を求めたところ次の結果の様に我々の主観的判断と良く一致する評価結果が得られた。

- (1) PAM正弦波形の基本的な見え方特性として、画素構造観測用の最適観測状態と画素の集合により表現された正弦波形観測用の最適観測状態の2種類が存在し、各々の状態で画質評価結果は異なる。画素構造用の観測状態よりも正弦波形用の観測状態で見の方が CV_n 比が高く（正弦波再現性が良い）、 NV_n 比が低く（正弦波形に対する知覚妨害が少ない）なり、優れた画質であると判断できる。しかも、この評価結果は視点位置に依存して変化する。この結果は、我々の行っている主観評価の方法（評価過程）と非常に良く似ている。
- (2) duty = 1の場合は画素構造観測用の最適観測状態が生じにくく、 NV_n 比も小さく（画素構造が見え難い）なり、その分だけ正弦波信号が見え易くなる為、高い画質と判断できる。
- (3) 量子化数が減少すると、画素構造観測用の最適観測状態が生じやすく、 NV_n 比も増加（画素構造が見え易い）する為、劣化した画質であると判断できる。この場合のノイズは画素による妨害感ではなく、擬似輪郭が見えることによる妨害感を意味している。
- (4) 画素幅 T_w の拡大は NV_n 比の増加（画素構造が見え易い）を招き、画質は低下する。

以上の様に、本提案の画質評価法（画像表示システムの性能評価）は人間の画質評価過程が理論的にシミュレートでき、我々の主観的判断を定量的に表現することが可能である。これは、視覚モデルの正当性をも示すものと考えられる。

第5章

動画像用視覚モデル（時空間視覚モデル）の構築

あらまし

静止画像用視覚モデルに、網膜神経節細胞であるX, Y, W細胞の特性を組み込むことにより、形状知覚に適したXチャンネルと動き知覚に適したYチャンネルから構成される新しい時空間視覚モデルを構築した。そして、本時空間視覚モデルを代表的な定常的時間変化パターンであるフリッカー正弦波とドリフト正弦波に適用し、視覚モデルの視知覚応答特性（コントラスト感度時空間周波数特性や最適ドリフト速度特性など）が両チャンネルの応答から理論的に再現でき、実測結果とも良く一致することを示した。さらに、瞬間提示画像の様な非定常時間変化画像に対する視知覚応答も再現可能な非定常時空間視覚モデルに拡張した。具体的には、X, Yチャンネルの時間インパルス応答と焦点調節機構の動特性に相当する観測状態の動的遷移特性およびその最大変化速度の限界を時空間視覚モデルに導入することにより実現されている。そして、瞬間提示正弦波形に対するコントラスト閾値の画像提示時間依存特性、コントラスト感度空間周波数特性、反応時間の空間周波数特性特性を計算したところ、実測結果と良く一致する結果が得られ、本時空間視覚モデルの有効性が示せた。

5.1 まえがき

前章までは、静止画像を中心とした視覚モデルの定式化を行ってきた。本章では、動画画像に対する視覚応答特性が再現できる時空間視覚モデルの定式化を行い、その有効性、正当性を検証する。画像の動きに対する視覚系の応答特性は、静止画像に対する応答特性と並び、人間にとっては重要な基本的視覚特性である為、動画画像に対する視覚系の時空間応答特性がいろいろ測定されてきた。本章で扱う動画画像の時間変化パターンはフリッカー（画像の点滅）、ドリフト（画像の移動または運動）、瞬間提示の3種類である。フリッカーやドリフト特性が定常的な時間変化（動き）パターンに対する視覚応答であるのに対し、瞬間提示や提示のオン・オフ特性などは過渡的な時間変化（動き）に対する視覚応答であることを特徴とする。これらは基本的な時間変化パターンであり、一般的な時間変化はこれら3種類の合成特性として表現できると考えられる。動き情報検出に関する従来の研究例としては、入力画像に視覚系での処理を模擬した時空間フィルタを施し、その出力を利用して物体の速度（速さと向き）を計算する運動検出モデルがある[47][48][49][50][51]。しかし、これらの運動検出モデルでは、フリッカーやドリフト画像などに対して視覚系がどのような時空間視覚応答を出力するかについての基本的な情報（例えば、見え方特性、感度特性、時空間的な相互依存特性など）を得ることは困難であり、運動視覚モデルという立場から考えると不十分である。

本章では、視覚神経系の生理学的知見を従来 of 静止画像用視覚モデルに導入することにより、動きにも対応可能な時空間視覚モデルに拡張する方法を提案する。生理学的知見としては、網膜神経節細胞（X、Y、W細胞）の特性が考慮されている。本時空間視覚モデルは、視覚系の画像観測機構（ボケと視野の相互依存作用）を土台とし視覚系の他の基本現象を組み合わせれば、各種視覚現象の統一的な説明を可能にする汎用的視覚モデルが開発できると言う筆者の考えに基づいて開発されており、汎用的視覚モデルに一步近付いた視覚モデルとして位置付けられる。以下ではまず、視覚神経系の生理学的知見を組み込んだ時空間視覚モデルの定式化を行う。そして、本時空間視覚モデルを3種類の基本的時間変化パターンであるフリッカー、ドリフト、瞬間提示画像に適用し、本モデルの有効性、正当性の検証を行う。

5.2 時空間視覚モデルの定式化

視覚神経系の生理学的性質、特に網膜神経節細胞のX細胞・Y細胞・W細胞の応答特性についての知見を用いて、静止画像用視覚モデルを時空間視覚モデルに拡張する方法について説明する。

5.2.1 視覚神経系の性質を導入したモデル化

網膜上の投影画像は、視細胞による光電変換と網膜内での神経回路処理を経て網膜の出力細胞である神経節細胞（X、Y、W細胞）に送られた後、脳に伝達される。神経節細胞の基本的性質に関する生理学的知見は以下の3点に要約される[52][53][54]。

- (1) X細胞、Y細胞は2重同心円構造の受容野を持ち、受容野中心部と周辺部との間には拮抗関係が成立し、互いの反応を抑制する。拮抗関係はX細胞の方がY細胞よりも強い。また、X細胞の受容野の大きさはY細胞よりも小さい。さらに、全神経節細胞に占める割合はX細胞の方がY細胞よりもかなり高い。
- (2) 受容野中心部に光刺激を与えると、X細胞は光刺激が存在する間インパルス放電を出力し続けるのに対し、Y細胞では過渡的に高頻度のインパルス放電を出力し、その後次第に放電頻度は低下する。また、神経節細胞から出ている軸索（脳と結ばれている視神経線維）のインパルス伝達速度はY細胞の方がX細胞よりも速い。
- (3) W細胞は神経節細胞の中で最も小さく、網膜の平均的な明るさの抽出、パターンの角あるいは運動方向に選択的に反応するなどいろいろな機能を持つ。

(1)の性質からは、X、Y細胞が提示画像の明るさよりもコントラスト情報を抽出するのに適し、X細胞の方がY細胞よりも空間分解能が高いことが導かれる。(2)の性質からは、Y細胞が微分特性の様な時間応答特性を持ち、時間的変化情報に鋭く反応するので、X細胞よりも時間分解能が高いことが分かる。即ち、X細胞はある程度細かい明暗の空間的コントラスト情報の抽出に適し、Y細胞は比較的粗い明暗コントラストの時間的変化（大きなパターンが受容野内を素早く通過するような刺激）情報の抽出に適していると言える。X、Y、W細胞はネコの網膜神経節細胞に対する呼び方であるが、サルや人間の場合にも、呼び方は異なるがX、Y、W細胞と同様の機能を持つ神経節細胞が存在することがわかっている[55][56][57]。

以上述べたX、Y、W細胞の基本的性質を静止画像用視覚モデルに組み込むと、形状知覚を主に担当するチャンネルと動き検出を主に担当するチャンネルで構成される時空間視覚モデルに拡張できる。図5.1は、時空間視覚モデルのブロック図である。まず、提示画像にボケと視野を加えて観測（観測した画像を初期観測画像とする）し、この初期観測画像が神経節細胞へ伝えられる。X細胞は空間コントラスト情報を抽出するので、X細胞の空間的情報処理様式は初期観測画像から交流信号成分を抽出することに相当する。これは静止画像用視覚モデルと同じ情報処理様式であり、時空間視覚モデルが静止画像用視覚モデルの自然な拡張になっているこ

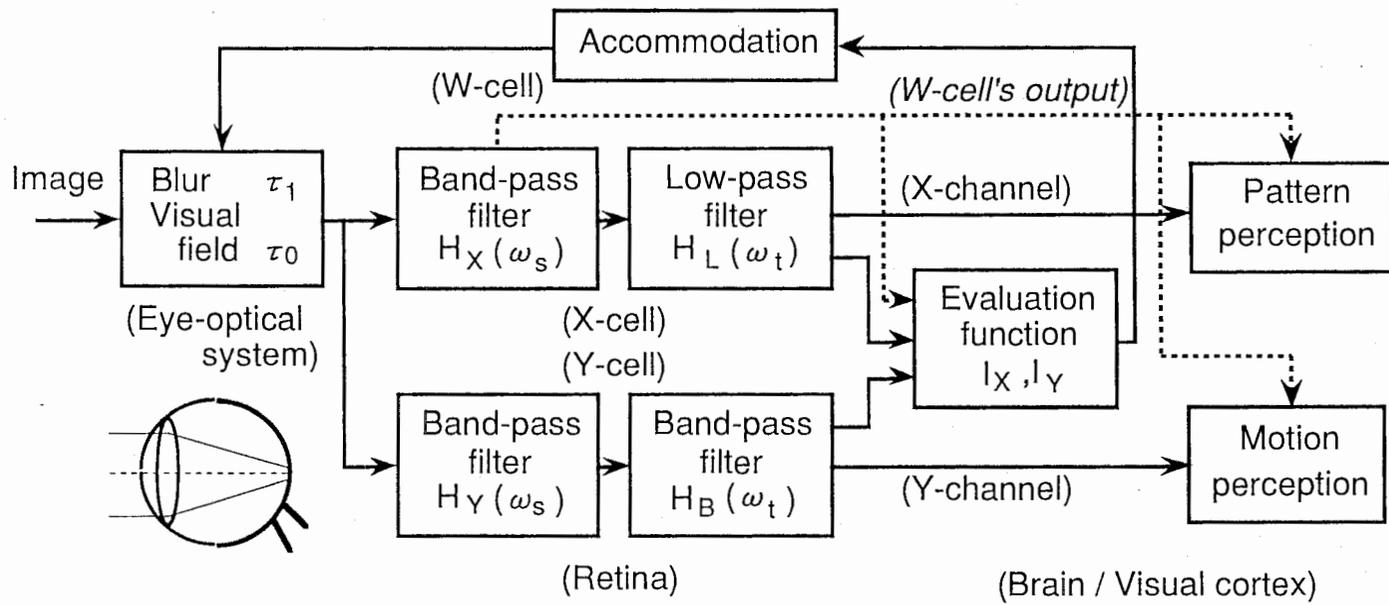


図 5.1 時空間視覚モデルのブロック図

Fig. 5.1 Block diagram of the proposed spatio-temporal human vision model.

とを意味する。従って、X細胞の空間周波数応答特性 $H_X(\omega_s)$ は静止画像用視覚モデルと同じ帯域通過型（正弦波コントラスト感度の空間周波数特性で表現される網膜特性）である。また、X細胞は画像の時間変化に対して定常的(sustained)に反応することから、X細胞の時間周波数応答特性は全周波数領域に亘って一定値となるフラットな特性で近似できる。しかし、X細胞、視神経、脳での情報処理機構は速すぎる時間変化には対応できない、即ち一種の時間積分特性を持っていると考えられる。そこで、これら全体の特性を総合した形で、X細胞の時間周波数応答特性を低域通過型特性 $H_L(\omega_t)$ として表現する。この扱いは空間周波数特性でも同様である。Y細胞の空間的情報処理様式は基本的にはX細胞と同様に初期観測画像から交流信号成分を抽出することであり、その空間周波数応答特性 $H_Y(\omega_s)$ は帯域通過型で表現できるが、Y細胞が大きなパターン（空間周波数の低い画像）に対して強く興奮することから、X細胞の場合よりも低い空間周波数領域で高い感度を示す帯域通過特性と見なせる。また、Y細胞は画像の時間変化に対して過渡的(transient)に反応することから、Y細胞の時間周波数応答特性は高域通過型特性 $H_H(\omega_t)$ で近似できる。この場合にもX細胞と同様に考え低域通過型特性をさらに付け加えると、最終的なY細胞の時間周波数応答特性は両特性の合成である帯域通過型特性 $H_B(\omega_t)$ として表現できる。一方、W細胞の機能は一つではないが、その中で網膜上の平均的な明るさ情報の抽出に注目すると、W細胞の空間的情報処理様式は提示画像の直流信号成分（平均輝度）の抽出と見なせ、静止画像用視覚モデルと同じ情報処理機構が利用できる。以上のように、初期観測画像はX、Y、W細胞の3系統の並列情報処理を受けた後、これらの出力信号は脳に伝達される。但し本モデルでは、画像観測と言う立場から、観測動作をも含む形で視覚系全体のシステム論的な定式化を目指しているため、脳内での詳しい結線構造などについては現時点では言及せず、脳と言う1つのブロックとして扱うことにする。そして、X細胞出力は主に形状の知覚・認識に、Y細胞出力は主に動きや運動の知覚・認識に利用される（以下では、X細胞の情報処理系統からなるチャンネルをXチャンネルまたは形状知覚チャンネルとし、Y細胞の情報処理系統からなるチャンネルをYチャンネルまたは動き知覚チャンネルとする）と同時に、X、Y細胞の出力信号は評価関数値の計算に利用され、両チャンネルの評価関数値が極大に達しているかどうか判定される。もし極大でなければ、画像観測機構の基本現象（ボケと視野の相互依存関係）という拘束条件の下で観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が変えられ、このフィードバックプロセスは評価関数値が極大に達するまで繰り返される。そして最終的には、Xチャンネルからは形状を知覚・認識するのに最適な観測状態（ボケ量と視野の最適値）が、Yチャンネルからは動きや運動の知覚・認識に最適な観測状態が決定され、視覚系の自律的な画像観測動作が終了する。

5.2.2 時空間視覚モデルの数式表現

時空間視覚モデルを構成するXとYチャンネル各々の評価関数を図5.1のブロック図に従って導出する。空間的な取扱いに関しては静止画像用視覚モデルと同じ手順で定式化できる。提示画像 $f_t(\mathbf{r}, t)$ (\mathbf{r} : 2次元平面上の位置ベクトル、 t : 時間) は一定の平均輝度Bと空間的变化及び時間的变化を伴った交流信号 $f(\mathbf{r}, t)$ (空間的な平均値は常に零) の和

$$f_t(\mathbf{r}, t) = B + f(\mathbf{r}, t) \quad (5.1)$$

で表されるものとする。まず視野 τ_0 (ガウス関数で視野の抑制を表現する) を掛けた画像 $f_s(\mathbf{r}, t)$ は視点位置ベクトルを \mathbf{r}_a とすると

$$f_s(\mathbf{r}, t) = B \cdot G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a, \tau_0) + G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a, \tau_0) f(\mathbf{r}, t) \quad (5.2)$$

となる。視野を考慮した提示画像の局所平均値 $K(t)$ は視野制限画像を用いて

$$K(t) = \int_{s\infty} f_s(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = B + K^*(t) \quad (5.3)$$

$$K^*(t) = \int_{s\infty} G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a, \tau_0) f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (5.4)$$

として計算できるので、視野制限画像 $f_s(\mathbf{r}, t)$ の交流信号成分 $g_s(\mathbf{r}, t)$ 、及びボケ τ_1 によるボケ操作 (ガウス関数型のボケフィルタ) と座標変換後の交流信号成分 $g_s(\mathbf{R}, t)$ は各々次式で表現できる。

$$\begin{aligned} g_s(\mathbf{r}, t) &= f_s(\mathbf{r}, t) - K(t) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a, \tau_0) \\ &= G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a, \tau_0) \{ f(\mathbf{r}, t) - K^*(t) \} \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$g_s(\mathbf{R}, t) = \int_{s\infty} G(\mathbf{R} - \mathbf{r}, \tau_s - \tau_0) g_s(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (5.6)$$

$$[\tau_s = \tau_0^2 / (\tau_0 - \tau_1), \quad \mathbf{R} = (\tau_0 \mathbf{r} - \tau_1 \mathbf{r}_a) / (\tau_0 - \tau_1)] \quad (5.7)$$

交流信号成分 $g_s(\mathbf{R}, t)$ はボケと視野を考慮して観測した初期観測画像から直流成分のみを取り除いた信号であり、XとYチャンネルに於ける網膜フィルタ処理を受ける前の交流信号成分に相当する。また、式(5.1)の様な平均輝度一定の提示画像に対しては、W細胞により抽出される平均輝度も一定値Bとなる。

(Xチャンネルの評価関数)

脳へ伝達されるXチャンネル交流信号成分 $g_X(\mathbf{R}, t)$ は、初期観測画像交流信号成分 $g_s(\mathbf{R}, t)$ と空間周波数特性 (網膜特性) $H_X(\omega_s)$ を表すインパルス応答 $h_X(\mathbf{R})$ との畳み込み積分 $g_x(\mathbf{R}, t)$ を行い、さらに $g_x(\mathbf{R}, t)$ と時間周波数特性 $H_L(\omega_t)$ を表すインパルス応答 $h_L(t)$ との畳み込み積分で表される。

$$g_x(\mathbf{R}, t) = \int_{s\infty} h_X(\mathbf{R} - \mathbf{R}') g_s(\mathbf{R}', t) d\mathbf{R}' \quad (5.8)$$

$$g_X(\mathbf{R}, t) = \int_{t\infty} h_L(t - t') g_x(\mathbf{R}, t') dt' \quad (5.9)$$

但し、 $t\infty$ は全時間領域を表す。故に、Xチャンネルの評価関数 I_X は次式となる。

$$I_X = \frac{1}{B^2} \int_{s \infty} \frac{1}{G(\mathbf{R} - \mathbf{r}_a, \tau_s)} \{g_X(\mathbf{R}, t)\}^2 d\mathbf{R} \quad (5.10)$$

Xチャンネルの評価関数値は画像の空間的变化に対する印象の強さ（一種の感覚量）として定義される。従って、評価関数値が閾値以下の場合、人間には画像の空間的变化即ち画像の存在が分からなくなる。

(Yチャンネルの評価関数)

脳へ伝達されるYチャンネル交流信号成分 $g_Y(\mathbf{R}, t)$ は、初期観測画像交流信号成分 $g_s(\mathbf{R}, t)$ と空間周波数特性（網膜特性） $H_Y(\omega_s)$ を表すインパルス応答 $h_y(\mathbf{R})$ との畳み込み積分 $g_y(\mathbf{R}, t)$ を行い、さらに $g_y(\mathbf{R}, t)$ と時間周波数特性 $H_B(\omega_t)$ を表すインパルス応答 $h_B(t)$ との畳み込み積分で表される。

$$g_y(\mathbf{R}, t) = \int_{s \infty} h_y(\mathbf{R} - \mathbf{R}') g_s(\mathbf{R}', t) d\mathbf{R}' \quad (5.11)$$

$$g_Y(\mathbf{R}, t) = \int_{t \infty} h_B(t - t') g_y(\mathbf{R}, t') dt' \quad (5.12)$$

故に、Yチャンネルの評価関数 I_Y は次式で表される。

$$I_Y = \frac{1}{B^2} \int_{s \infty} \frac{1}{G(\mathbf{R} - \mathbf{r}_a, \tau_s)} \{g_Y(\mathbf{R}, t)\}^2 d\mathbf{R} \quad (5.13)$$

Yチャンネルの評価関数値は画像の時間的变化に対する印象の強さを表し、この値が閾値以下になると、人間には画像の時間的变化が知覚できなくなる。

5.3 フリッカー正弦波に対する時空間視知覚応答特性

定式化した時空間視覚モデルを正弦波的 (Sine type) 及び矩形波的 (Alternate type と ON-OFF type) に点滅するフリッカー正弦波に適用し、その評価関数を導出する。そして、フリッカー正弦波に対する基本的視知覚応答特性の計算結果と実測結果とを比較し、本時空間視覚モデルの正当性を検討する。更に、フリッカー融合に関しても理論的に検討する。

5.3.1 評価関数の導出

フリッカー正弦波は1次元正弦波形の各点の輝度が時間的な変調を受ける画像のことであり、本論では1次元正弦波形の平均輝度は一定とする。時間的な変調方式（フリッカー関数）としては、1次元正弦波形の明暗の位置が正弦波的に滑らかに切り替わるもの(Sine type)、瞬間的に切り替わるもの(Alternate type)、正弦波形と一様輝度パターンが瞬間的に切り換わるもの

(ON-OFF type)の3種類を取り上げ、各々次の様に定義する。

$$f_t(r, t) = B + A \cos(\omega_s r + \theta_r) \cos(\omega_t t) \quad (5.14)$$

$$f_t(r, t) = B + A \cos(\omega_s r + \theta_r) \Theta(t) \quad (5.15)$$

$$f_t(r, t) = B + A \cos(\omega_s r + \theta_r) \Phi(t) \quad (5.16)$$

但し、Bは画面の平均輝度、Aは正弦波振幅、 ω_s 、 ω_t は各々空間角周波数及び時間角周波数、 θ_r は視点位置または提示画像の位相を表わす。また、 $\Theta(t)$ と $\Phi(t)$ は矩形波型時間変調関数であり、

$$\Theta(t) = (2d-1) + \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} \cos(n\omega_t t) \quad (5.17)$$

$$\Phi(t) = d + \left(\frac{2}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} \cos(n\omega_t t) \quad (5.18)$$

と表現できる。ここで、dは時間変調関数のduty ratioである。

時空間視覚モデルの定式化手順に従って、フリッカー正弦波に対する評価関数を導出する。

(Sine type フリッカー正弦波)

式(5.14)のSine type フリッカー正弦波に対するXチャンネルの評価関数は次の様になる。

$$I_X = I_0 H_X^2(\omega_s) H_L^2(\omega_t) \cos^2(\omega_t t) \quad (5.19)$$

$$I_0 = (A^2/B^2) \exp(-2\tau_0 \omega_s^2) \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ \times [\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\theta_r) \exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (5.20)$$

提示画像の形状情報に注目する時の時空間視覚モデルの最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として式(5.19)の評価関数 I_X を極大化することで推定できる。また、式(5.19)の評価関数値は時間と共にその大きさが変動する。これは、人間が提示画像の形状から受ける印象の強さが時間とともに変動することを意味する。同様にYチャンネルの評価関数 I_Y は次式となる。

$$I_Y = I_0 H_Y^2(\omega_s) H_B^2(\omega_t) \cos^2(\omega_t t) \quad (5.21)$$

提示画像の動き情報に注目する時の最適観測状態は、Xチャンネルと同様に式(2.19)を拘束条件とする式(5.21)の評価関数 I_Y の極大化により得られる。また、XとYチャンネルのコントラスト感度は最適観測状態での評価関数値(I_{Xmax} 、 I_{Ymax})と閾値 $C_{th}^2/2$ が一致した時のコントラストの逆数として計算できる。

(Alternate type フリッカー正弦波)

式(5.16)のAlternate type に対して、Sine typeと同じ手順でXとYチャンネルの評価関数を導出すると以下の様になる。

$$I_X = I_0 H_X^2(\omega_s) A_{Xn}(t) A_{Xm}(t) \quad (5.22)$$

$$I_Y = I_0 H_Y^2(\omega_s) A_{Yn}(t) A_{Ym}(t) \quad (5.23)$$

$$A_{Xn}(t) = (2d-1) + \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} H_L(n\omega_t) \cos(n\omega_t t) \quad (5.24)$$

$$A_{Yn}(t) = \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} H_B(n\omega_t) \cos(n\omega_t t) \quad (5.25)$$

但し、 $A_{Xm}(t)$ 、 $A_{Ym}(t)$ は式(5.24) (5.25) の変数 n を m に変えたものを意味する。

(ON-OFF type フリッカー正弦波)

式(5.17)のON-OFF type に対しても、XとYチャンネルの評価関数が以下の様に導出できる。

$$I_X = I_0 H_X^2(\omega_s) O_{Xn}(t) O_{Xm}(t) \quad (5.26)$$

$$I_Y = I_0 H_Y^2(\omega_s) O_{Yn}(t) O_{Ym}(t) \quad (5.27)$$

$$O_{Xn}(t) = d + \left(\frac{2}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} H_L(n\omega_t) \cos(n\omega_t t) \quad (5.28)$$

$$O_{Yn}(t) = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi nd)}{n} H_B(n\omega_t) \cos(n\omega_t t) \quad (5.29)$$

但し、 $O_{Xm}(t)$ 、 $O_{Ym}(t)$ は式(5.28) (5.29) の変数 n を m に変えたものを意味する。

5.3.2 時空間視覚モデルの観測者適応化

フリッカー正弦波に対する時空間視覚モデルの定式化に於いて、Xチャンネルの空間的帯域通過特性 $H_X(\omega_s)$ は静止画像用視覚モデルの網膜特性と同じ特性（式(2.31)）が利用できるが、時間的低域通過特性 $H_L(\omega_t)$ 及びYチャンネルの空間的帯域通過特性 $H_Y(\omega_s)$ と時間的帯域通過特性 $H_B(\omega_t)$ の具体的な関数形は未知のままであった。これら4つの特性は観測者に依存して異なるので、時空間視覚モデルの応答特性と実測値とを一致させるには、以上の4特性を観測者に適応化させる必要がある。しかし、1人の観測者に関して以上の4特性が測定された例は見当たらないので、本論文では複数の観測者の特性を合わせて観測者適応化を行う。

Kulikowski, J.J. & Tolhurst, D.J. が行った実測結果に依ると、Sine type フリッカー正弦波では正弦波の形に注目した時（Xチャンネル）のコントラスト感度時間周波数特性は低域通過型であり、時間的变化（フリッカー）に注目した時（Yチャンネル）の特性は帯域通過型になることが示さ

れており[58]、本時空間視覚モデルの特性と同じである。従って、この実測結果を本時空間視覚モデルに当てはめることでXチャンネルの低域通過特性 $H_L(\omega_t)$ とYチャンネルの帯域通過特性 $H_B(\omega_t)$ の関数形を決定することができる。当てはめ関数として

$$H_L(\omega_t) = [1 + \{1.5 \omega_t / (2\pi F_{d1})\}^2]^{-1.3} \quad (5.30)$$

$$H_B(\omega_t) = (\omega_t / 2\pi)^{0.4} [1 + \{0.7 \omega_t / (2\pi F_{d1})\}^2]^{-2} \quad (F_{d1} = \text{定数}) \quad (5.31)$$

を用いると図5.2の様に当てはめ関数（実線）と実測結果（黒丸と白丸）[58]とを良く一致させられる。但し、空間周波数は12cpdの場合である。

次に、Yチャンネルの空間的帯域通過特性 $H_Y(\omega_s)$ の関数形を決定する。この特性を直接実測した例は見当たらないので、ここではコントラスト感度空間周波数特性実測結果[59]の一部を利用して $H_Y(\omega_s)$ の関数形を決めることにする。図5.2を見ると、時間周波数 $f_t=16\text{Hz}$ ではYチャンネルの方がXチャンネルより感度が高くなる。さらに、正弦波空間周波数が0.8cpdでも時間周波数16HzではYチャンネルの方が感度が高くなる[58]ことから、時間周波数 $f_t=16\text{Hz}$ でのコントラスト感度空間周波数特性実測値[59]（図5.3の矩形□）は感度の高いYチャンネルにより得られたものと考えられる。この前提の下に、式(5.21)のYチャンネルの評価関数から得られる理論的コントラスト感度と図5.3の実測値とが一致する様に $H_Y(\omega_s)$ の関数形として

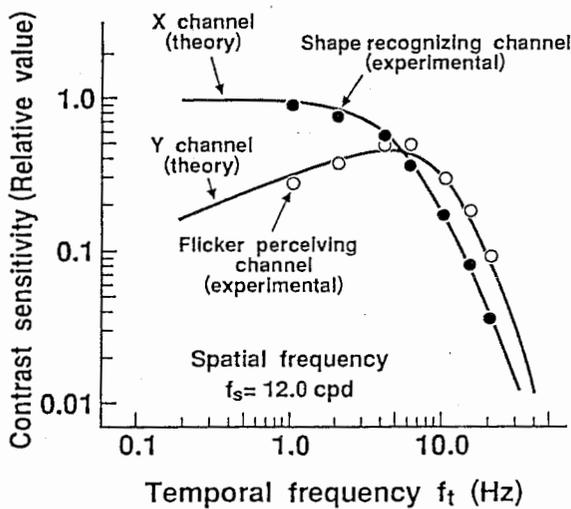


図5.2 X, Yチャンネル時間周波数特性
実測結果と観測者適応化結果 (Sine type)

Fig. 5.2 Comparison of X- and Y-channels' measured temporal frequency characteristics to sine-type flickering sinusoidal waves with observer's adaptation results.

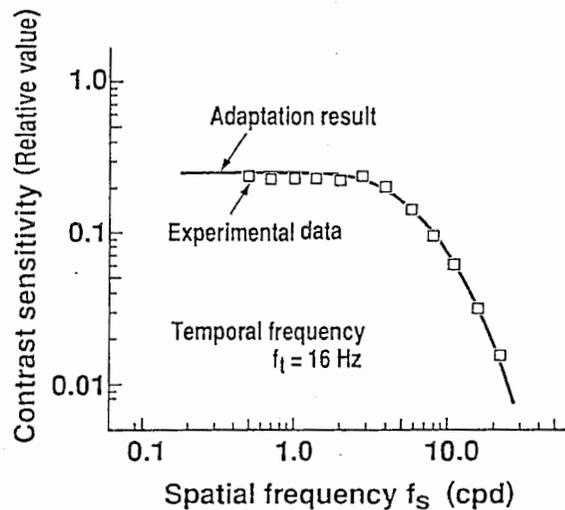


図5.3 Yチャンネル空間周波数特性実測
結果と観測者適応化結果 (Sine type)

Fig. 5.3 Comparison of X- and Y-channels' measured spatial frequency characteristics to sine-type flickering sinusoidal waves with observer's adaptation results.

$$H_Y(\omega_s) = C_b \{1 + (\omega_s / \omega_3)^2\}^{-1.5} \cdot [1 - \{1 + (\omega_s / \omega_4)^2\}^{-0.5}] \quad (5.32)$$

を当てはめると、図5.3の様に当てはめ関数（実線）と実測値（矩形□）とが良く一致する。但し、 C_b 、 ω_3 、 ω_4 は定数である。図5.3の実測結果はYチャネルの空間周波数特性が低域通過型になることを示唆するが、もっと低い空間周波数での感度が測定されていないので現時点では明言できない。本時空間視覚モデルの $H_Y(\omega_s)$ は、実測されている空間周波数領域では実測結果と同様な低域通過型特性を正確に再現するが、さらに低域の空間周波数領域で感度が低下する帯域通過型になると仮定している。

5.3.3 時空間周波数特性に於ける実測と理論の比較

3タイプのフリッカー正弦波に対して、時空間視覚モデルから導出できる理論的コントラスト感度時空間周波数特性と実測結果とを比較し、本モデルの正当性について検討する。以下、AlternateとON-OFF typeフリッカー関数のduty ratioは $d = 0.5$ 一定とする。

5.3.3.1 Sine type フリッカー正弦波

Sine type フリッカー正弦波に対して時空間視覚モデルのX、Yチャネルから理論的に計算したコントラスト感度と空間周波数 f_s の関係を図5.4に示す。但し、時間周波数 f_t は1, 6, 16, 22 Hzの場合とし、更に感度が最大になる視点位置 $\theta_r = 90^\circ$ と時刻 $t = 0$ secを用いた。この図から、時間周波数 f_t の増加と伴にXチャネルでは単純に感度が低下するのに対し、Yチャネルでは感度最大になる時間周波数が存在すること、さらに両チャネルの関係に関しては、時間周波数が低い場合（ $f_t = 1$ Hz）には $f_s = 0.9$ cpd以上の空間周波数領域でXチャネル感度の方がYチャネルよりも勝り、 $f_s = 0.9$ cpd以下では逆にYチャネルの方が感度が高くなること、及び時間周波数が高い場合（ $f_t = 6, 16, 22$ Hz）はYチャネルの感度の方がXチャネルよりも高くなることが分かる。この結果は、時間周波数と空間周波数が低い場合には正弦波形の空間的な形が分からなくなっても何かが動いている感覚だけは知覚できることを、時間周波数が低く空間周波数が高い場合には動いている感覚がなくなった状態でも正弦波形の空間的な形はまだ知覚できることを意味する。また、時間周波数が高い場合には空間周波数に関係なくYチャネルが優勢になり、動いている感覚が知覚され易くなることを意味する。この計算結果は、閾値近くでの実際の見え方とも良く一致している。

次に、空間周波数 f_s を0.5, 4, 16, 22 cpdに設定した場合のコントラスト感度と時間周波数 f_t の関係（図5.5）を計算した。但し、視点位置は $\theta_r = 90^\circ$ 、時刻は $t = 0$ secである。図か

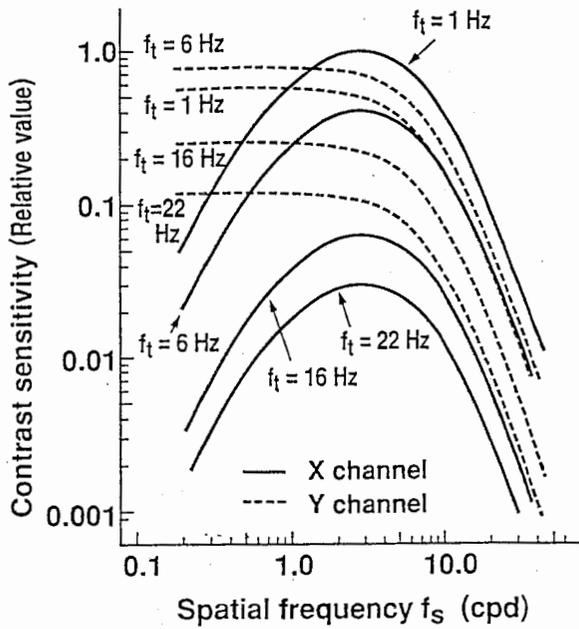


図 5.4 視覚モデルのコントラスト
感度空間周波数特性 (Sine type)

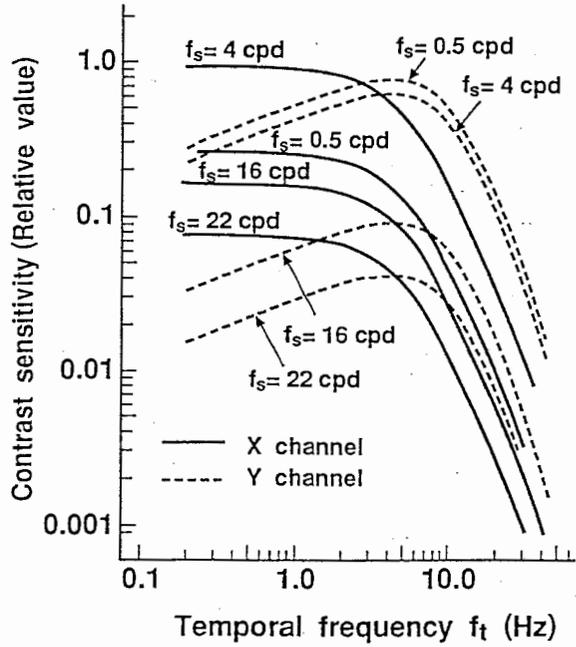


図 5.5 視覚モデルのコントラスト
感度時間周波数特性 (Sine type)

Fig. 5.4 Theoretical X- and Y-channels' spatial contrast sensitivity functions to sine-type flickering sine-waves. Fig. 5.5 Theoretical X- and Y-channels' temporal contrast sensitivity functions to sine-type flickering sine-waves.

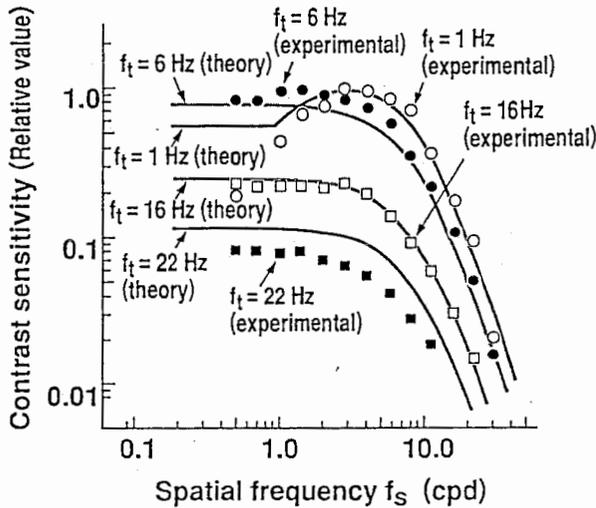


図 5.6 コントラスト感度空間周波数特性
の実測と理論の比較 (Sine-type)

Fig. 5.6 Comparison of measured spatial contrast sensitivity functions to sine-type flickering sine-waves with theoretical ones derived from this model.

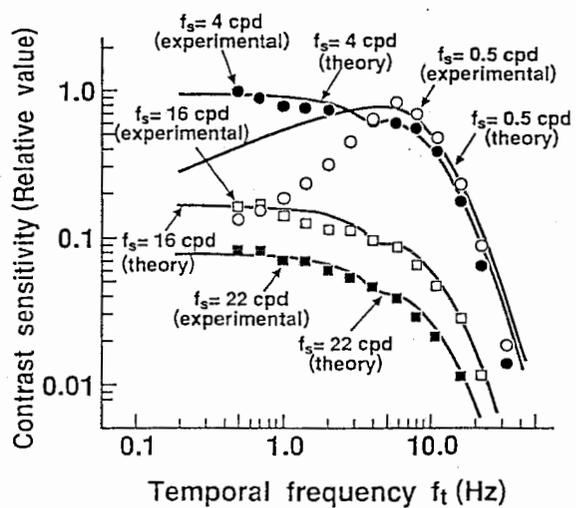


図 5.7 コントラスト感度時間周波数特性
の実測と理論の比較 (Sine-type)

Fig. 5.7 Comparison of measured temporal contrast sensitivity functions to sine-type flickering sine-waves with theoretical ones derived from this model.

ら、空間周波数 f_s の増加と共に X チャンネルでは感度最大になる空間周波数が存在するのに対し、Y チャンネルでは単純に感度が低下すること、及び両チャンネルの関係については、両チャンネル特性が交差する時間周波数 f_a 以上では Y チャンネル感度は X チャンネルより高くなり、 f_a 以下では X チャンネルの方が高くなることが分かる。この交差時間周波数 f_a は、観測している空間周波数が低くなる程低域周波数の方へ移動する。この結果は、時間周波数が f_a 以下の場合には動きの感覚がなくなっても正弦波の空間的な形は知覚でき、 f_a 以上の時間周波数では正弦波の形が分からなくなっても何かが動いていると言う感覚だけはまだ知覚できることを意味し、図 5.4 を別の側面から見たのと等価である。

図 5.6、図 5.7 は以上の Sine type フリッカー正弦波に対するコントラスト感度時空間周波数特性の計算結果と実測結果[59] とを重ねて表示した図である。本時空間視覚モデルから得られる理論的時空間周波数特性は人間が提示画像の形に注目するか（X チャンネル）あるいは動きに注目するか（Y チャンネル）に依存して異なる結果になるが、この実測結果[59]に関しては何に注目して測定されたのかが明確ではないので、ここではどんな変化でも良い（X チャンネルと Y チャンネルの感度のうち大きい方の感度を採用）と言う判断基準で測定されたものとし、計算結果を X チャンネルと Y チャンネルの合成特性で表した。これらの図を見ると、図 5.6 の時間周波数 $f_t = 1$ Hz と図 5.7 の空間周波数 $f_s = 0.5$ cpd の場合を除けば、理論値と実測値とはかなり良く一致しており、本時空間視覚モデルが視覚系の時空間応答特性を正確に再現できるモデルになっていることが分かる。理論値と実測値とが一致しない部分がある主要な原因は、時空間視覚モデルの観測者適応化に用いた観測者と図 5.6、図 5.7 の実測に関わった観測者の視覚特性が同じでないからであろう。特に、図 5.7 の空間周波数 $f_s = 0.5$ cpd での低域時間周波数領域に於ける誤差が大きく、Y チャンネルの時間的帯域通過特性 $H_B(\omega_t)$ の形が異なっていると考えられる。従って、 $H_B(\omega_t)$ をこの観測者に適応化させれば、低域時間周波数に於ける Y チャンネルの出力が減少するので、図 5.6 の時間周波数 $f_t = 1$ Hz での低域空間周波数領域に於ける不一致も改善されるはずである。

5.3.3.2 Alternate, On-Off type フリッカー正弦波

図 5.8(a) は、Alternate と ON-OFF type フリッカー正弦波に対して時空間視覚モデル X チャンネルのコントラスト感度時間周波数特性の計算結果（実線）と実測結果[58]（黒丸と白丸）とを重ねて表示したものである。但し、提示正弦波空間周波数は $f_s = 10$ cpd、視点位置 $\theta_T = 90^\circ$ 、時刻 $t = 0$ sec である。計算結果は、低域時間周波数ではフリッカーの種類に関係なく同一感度が得られること、及び Alternate type の場合は時間周波数の増加と共に感度が減少する低域通過

特性を示すのに対し、ON-OFF type の場合は時間周波数の増加に伴って最大感度（静止時の感度）の半分まで感度が減少したところで収束し、しかも常にAlternate type の場合以上の感度になり、実測結果とも良く一致する。図5.8(b)は正弦波空間周波数 $f_s = 4$ cpd、視点位置 $\theta_r = 90^\circ$ に於けるYチャネルのコントラスト感度時間周波数特性の計算結果と実測結果[58]と重ねて表示したものである。但し、Yチャネルの時間周波数特性 $H_B(\omega_t)$ は帯域通過型であり、矩形波型フリッカー関数に対しては感度強調が生じるので、感度最大になる時刻を用いて計算した。図から、Alternate type での感度が ON-OFF type の場合の2倍になる現象が計算結果と実測結果で良く一致している。また具体的実測値は無いが、低域時間周波数では感度強調効果の為に感度がほぼ一定になることが本時空間視覚モデルから導出できる（Sine type では低域時間周波数で感度が低下）。これは、時間周波数が低くても瞬間的に画像が変化すればその時点で動きが検知できる為、感度が低下しないと考えられる。

図5.9(a)、図5.9(b)は両チャネルのコントラスト感度時間周波数特性を同一の正弦波空間周波数（0.5 cpdと16 cpd）に対して計算した結果である。比較のため、Sine type の結果も重ねて表示した。計算結果から、以下のことが理論的に導出できる。

- (1) Xチャネルでは1 Hz以上の時間周波数で Sine type の感度は Alternate type より僅かに低く、Yチャネルでは Sine type の感度は低域時間周波数領域で最低となるが、これ以外の領域では Alternate type と ON-OFF type の間に位置している。この関係は空間周波数に関係なく成立する。
- (2) 両チャネル感度の大小関係では、空間周波数が低い場合（図5.9(a)）はYチャネルの方がXチャネルよりも全体的に感度の高い方（上）に位置するのに対し、空間周波数が高い場合（図5.9(b)）は逆にYチャネルの方が全体的に感度の低い方（下）に位置する。

特に(2)に関しては、時間周波数 $f_t = 3.5$ Hz の場合の感度特性を Alternate と ON-OFF type に対して実測した結果に於いても、空間周波数の大小に依存して両チャネル感度が逆転する特性が見られ[58]、本モデルからの理論的結果を支持している。

以上の結果をフリッカー融合の観点から考察する。フリッカー融合はフリッカー周波数を高めたときにフリッカー感覚が知覚できなくなる現象であり、本時空間視覚モデルではYチャネル出力が閾値（人間の知覚できる最小値）以下になった状態として扱える。即ち、Yチャネルのコントラスト感度時間周波数特性に於いて、設定した正弦波コントラストの逆数値に対応する感度値で引かれる直線（時間周波数軸に対して水平となる）と感度曲線との交点がフリッカー融合の生じる臨界点であり、臨界点での周波数はフリッカー融合周波数を表わすことになる。

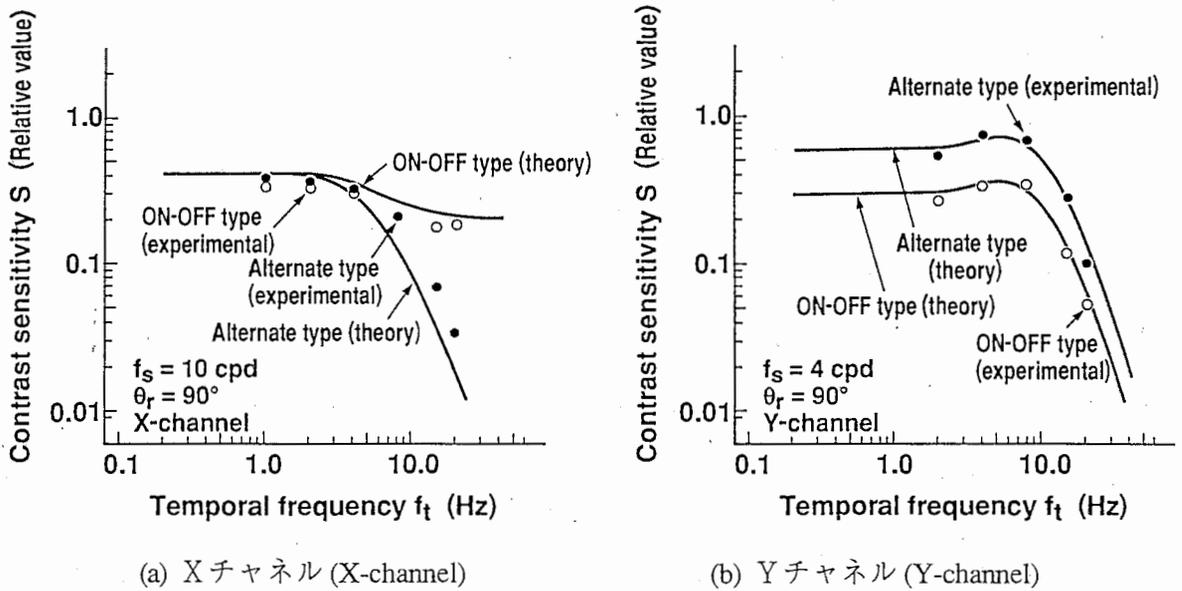


図 5.8 コントラスト感度時間周波数特性の実測と理論の比較 (Alternate & ON-OFF type)

Fig. 5.8 Comparison of X- and Y-channels' measured temporal contrast sensitivity functions to alternate and ON-OFF type flickering sine-waves with theoretical ones derived from this model.

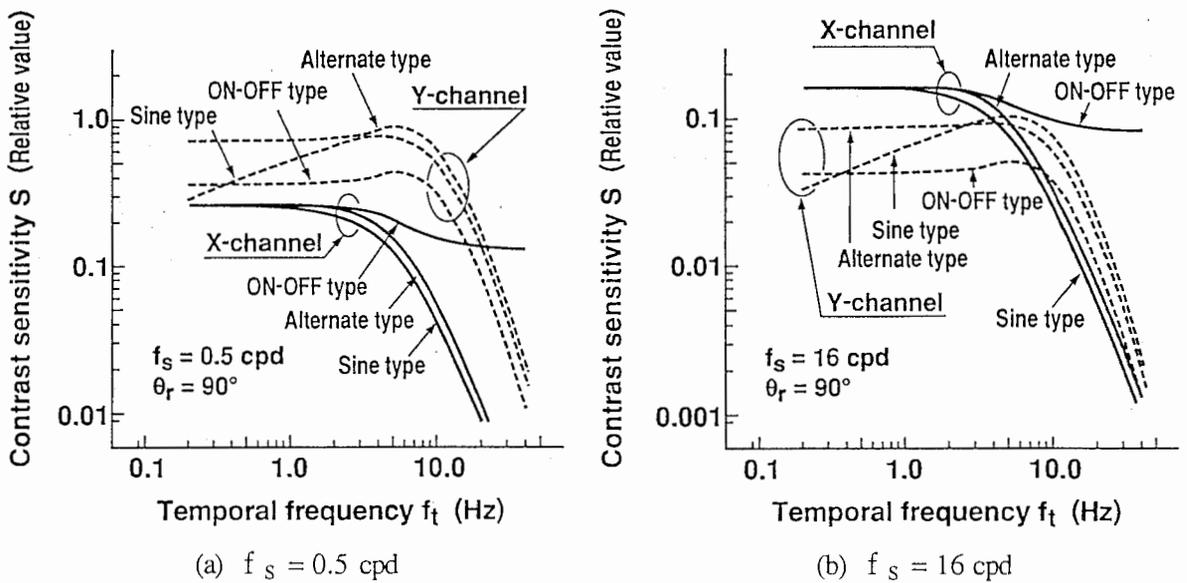


図 5.9 視覚モデルのコントラスト感度時間周波数特性 (Sine, Alternate, and ON-OFF type)

Fig. 5.9 X- and Y-channels' theoretical temporal contrast sensitivity functions to sine, alternate and ON-OFF type flickering sine-waves.

以上の観点から図5.9(a)、図5.9(b)を見直すと以下の様になる。空間周波数が低い場合（図5.9(a）、Alternate typeとSine typeではXチャンネル感度がYチャンネルよりも常に低いので、フリッカー融合時にはフリッカーが知覚できないと同時に提示画像も見えなくなること、及びON-OFF typeでは両チャンネル感度が交差するので、この交差フリッカー周波数以下でフリッカー融合が生じれば提示画像も見えなくなるが、交差フリッカー周波数以上でフリッカー融合が生じれば提示画像が静止画像として観測できる様になることが理論的に導かれる。一方、空間周波数が高い場合（図5.9(b)）は図5.9(a)よりYチャンネル感度が全体的に低下する為にフリッカー融合が生じ易くなる事が分かる。さらに、Alternate typeとsine typeでは両チャンネル感度に交差が生じ、この交差フリッカー周波数以下でフリッカー融合が生じることがあればXチャンネルの方が感度が高い為にフリッカー融合時には提示画像が静止して見え、交差フリッカー周波数以上ではフリッカー融合により提示画像も見えなくなる事及びON-OFF typeでは常にXチャンネル感度の方が高い為にフリッカー融合が生じれば提示画像が静止画像として観測できる様になることが導出できる。

5.4 ドリフト正弦波に対する時空間視覚知覚応答特性

前節では、時空間視覚モデルに必要な基本データ（形と動きの各々の情報に注目した時に得られるコントラスト感度の時間周波数特性と空間周波数特性であり、これらは観測者に依存して多少変化する）として、フリッカー正弦波刺激（輝度が点滅するのみで時間的位置変動は起こさない）に対する実測結果を利用した。しかし、フリッカーに対する基本データを導入した本時空間視覚モデルがフリッカー刺激とは種類の異なる動き特性を持つ画像パターンにもそのまま適用可能性であるかどうか（正当性・汎用性の問題）は未定であり、確認の必要がある。本節では、本時空間視覚モデルの正当性・汎用性を確認する為に、フリッカー以外の代表的な動画像として、画像が時間的に移動する動き特性を持つドリフト画像を対象とし、ドリフト画像に対して得られる理論的な時空間視覚知覚応答特性（コントラスト感度特性など）と実測結果との一致性の比較検討を行う。そして、その結果から本時空間視覚モデルがフリッカー以外の動画像に対してもそのまま適用可能であること、即ち視覚モデルの正当性・汎用性が十分期待できることを示す。

5.4.1 評価関数の導出

ドリフト画像 $f(r, t)$ は、正弦波が右方向または左方向に等速度で移動する画像であり、次式で表現できる。

$$f(r, t) = B + A \cos(\omega_s r + \omega_t t + \theta_r) \quad (5.33)$$

r : 空間位置, t : 時間,

A : 輝度振幅, B : 平均輝度,

ω_s : 空間角周波数, ω_t : 時間角周波数

(正 : 左方向ドリフト、負 : 右方向ドリフト)

通常、ドリフト速度（ドリフト画像が移動する速さ） v は目の位置を中心として測った角度（視角）の時間変化で表されるので、時間周波数 f_t (Hz) と空間周波数 f_s (cpd) とドリフト速度 v (deg/sec) の間には次の関係がある。

$$f_t = f_s \cdot v \quad (5.34)$$

ドリフト正弦波を視覚モデルが観測した時の X チャンネルおよび Y チャンネルの評価関数 I_X 、 I_Y はそれぞれ次式となる。

$$I_X = (A^2/B^2) I_D \{H_X(\omega_s) H_L(\omega_t)\}^2 \quad (5.35)$$

$$I_Y = (A^2/B^2) I_D \{H_Y(\omega_s) H_B(\omega_t)\}^2 \quad (5.36)$$

$$I_D = \exp(-2\tau_0\omega_s^2) \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ \times [\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos\{2(\omega_t t + \theta_r)\} \exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (5.37)$$

提示画像の形状情報または動き情報に注目して観測する時の時空間視覚モデルの各時刻に於ける最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として各々式(5.35)の X チャンネルの評価関数 I_X または式(5.36)の Y チャンネルの評価関数 I_Y を極大化することで推定できる。

5.4.2 コントラスト感度の時間応答特性

時空間視覚モデルの応答特性に於けるドリフト正弦波とフリッカー正弦波の基本的な違いを明確にする為に、X チャンネルを例に取り、両画像に対して得られるコントラスト感度の時間応答特性を計算した（図 5.10）。計算条件は、正弦波空間周波数が $f_s = 1$ cpd、時間周波数（ドリフト周波数またはフリッカー周波数）が $f_t = 2$ Hz、初期視点位置が $\theta_r = 90^\circ$ である。フリッカー正弦波の場合は、画像が瞬間的に消える時刻（ $t = 125$ msec, 375 msec …）でコントラスト感度が零となる為、視覚モデルの出力に於いても知覚できる状態と知覚できない状態とが交互に出現する点滅が生じている。一方、ドリフト正弦波の場合には、多少コントラスト感度の変動するだけで零（消える）になることはない為、常に画像が動いていると言う印象が出力されることになる。以上の計算結果は人間が実際に観察した場合の見え方の違いを正確に模擬している。

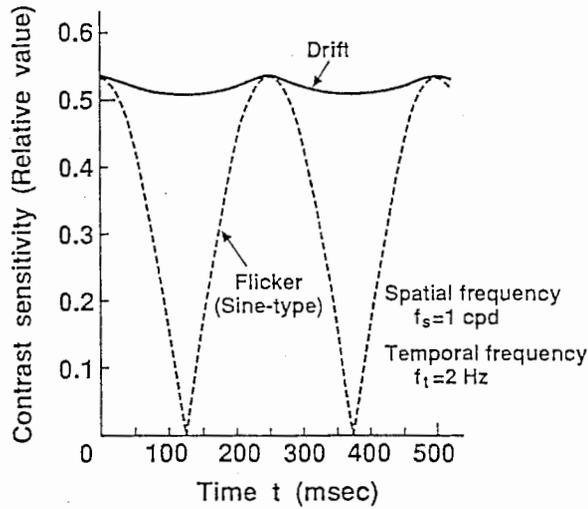


図 5.10 視覚モデル (Xチャンネル) 時間応答特性 (感度) のドリフトとフリッカーの違い

Fig. 5.10 Difference in the X-channel model's temporal responses between drifting and flickering sine-waves.

5.4.3 コントラスト感度空間周波数特性の実測と理論の比較

図 5.11 はドリフト速度 v をパラメータとして実測されたコントラスト感度空間周波数特性 (各種のプロット記号) [13][60] と時空間視覚モデルの X チャンネルから計算したコントラスト感度空間周波数特性 (実線) を重ねて表示したものである。ドリフト正弦波に対して実測できるコントラスト感度には、形 (正弦波縦縞パターン) に注目した場合と動きに注目した場合

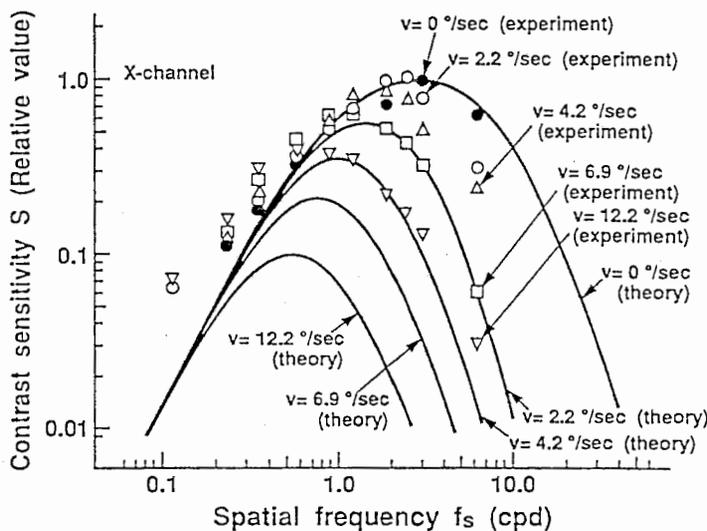
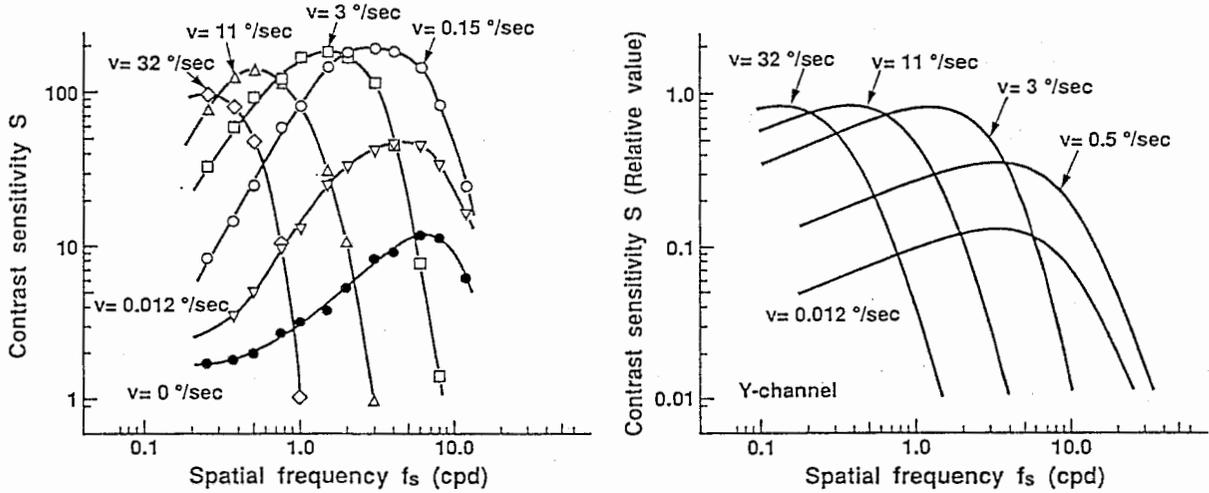


図 5.11 コントラスト感度空間周波数特性の実測と理論 (Xチャンネル) の比較

Fig. 5.11 Comparison of spatial contrast sensitivity functions measured to drifting sinusoidal waves and theoretical values derived from the X-channel model.

とで異なった2種類の感度が実測できることが分かっており、図5.11の実測結果はこのうち正弦波縦縞パターン（形）に注目した時に検知できる最小コントラストから求めた感度特性であると判断できる[13][60]。一方、時空間視覚モデルのXチャンネルは形状を知覚するチャンネルであり、ドリフト正弦波形の縦縞パターンの検知に基づくコントラスト感度が計算できるので、比較検討の為に両者を重ねて表示した。計算条件はドリフト速度の範囲を $v = 0 \sim 12.2$ deg/secとし、コントラスト感度が最大になる時刻($t = 0$ sec)と初期視点位置($\theta_r = 90^\circ$)を用いて計算した。実測結果の特徴は、ドリフト速度 v の上昇と共に、(1)コントラスト感度曲線に於いて最大感度を示す空間周波数位置が低域空間周波数へシフトすることと、(2)最大感度の値が単調に減少することである。従って、ドリフト速度の上昇と共に正弦波の形は見えにくくなる。これに対して、時空間視覚モデルからの計算結果は定性的には実測結果と非常に良く一致しており時空間視覚モデルの有効性が確認できる。しかし、静止画像($v = 0$ deg/sec)の場合を除けば、定量的には計算結果の方が感度低下が大きくなっている。この原因は次の様に考えられる。時空間視覚モデルでは、時空間フィルタの特性を被験者または観測者の特性に合わせることで観測者それぞれの視覚応答特性が正確に再現できる構成になっている（観測者適応化）。しかし、現在の視覚モデルの時空間フィルタ特性は固定されており、図5.11の実験の被験者の特性に合わせていない。つまり、図5.11の定量的な不一致は観測者適応化を行っていないことが原因と考えられる。従って、観測者適応化ができればXチャンネルからの計算結果は実測結果と定量的にも良く一致することが期待できる。

ドリフト正弦波形に対するコントラスト感度特性には図5.11とは異なるもう1つの実測結果（図5.12(a)）が報告されている[61]。測定条件は、単なる閾値の検出（何等かの変化が存在するとわかる最小コントラストの検出）であり、形と動きの2種類の検出閾は区別されていない。さらに、眼球運動追跡装置により眼球運動の影響を除外してある。図5.11の実測結果と比較すると、最大感度を示す空間周波数位置が低域空間周波数へシフトする特性は同一であるが、ドリフト速度の上昇に伴って、感度値が全体的に増加した後僅かに低下するのみで低い空間周波数でもかなり高い感度値が維持されること及び静止画像に対する感度低下特性（眼球運動の影響を除外したことにより静止網膜像になっている為）が異なる。これと似た実測結果には、800 deg/secのドリフト速度でも低い空間周波数では大きな感度が維持されるという報告もある[62]。一方、図5.12(b)はドリフト速度をパラメータとして計算した時空間視覚モデルYチャンネルのコントラスト感度空間周波数特性である。Yチャンネルは主に動きを知覚するチャンネルなので、ドリフト正弦波の動きの感覚に基づくコントラスト感度が計算できる。計算条件は、ドリフト速度の範囲を $v = 0.012 \sim 32$ deg/secとし、感度最大になる時刻($t = 0$ sec)



(a) 実験結果 (Experiment)

(b) Yチャンネルモデルの計算結果 (Theory)

図 5.1 2 ドリフト正弦波に対するコントラスト感度空間周波数特性（実験と理論の比較）

Fig. 5.12 Spatial contrast sensitivity functions to drifting sinusoidal waves. (Experiment and theory)

と初期視点位置 ($\theta_r = 90^\circ$) を用いて計算した。この図から分かる様に、Yチャンネルから得られる感度曲線は、ドリフト速度 v の増加と伴に一旦感度が全体的に高まった後ほぼ同一の最大感度が維持されると同時に、最大感度となる空間周波数位置が低域空間周波数の方へ移行する特性であり、図 5.1 2 (a) の実測結果と定性的には非常に良く一致する。これは、図 5.1 2 (a) の実測結果が実はドリフト画像の動きに注目して、即ち視覚系の動きに応答するチャンネルに対して測定されている可能性を強く示唆する結果と考えられる。この様に、時空間視覚モデルを用いると、理論的観点から実験での被験者の判断基準や実測結果の意味をより明確にできる利点も生じる。また、図 5.1 2 (a) と図 5.1 2 (b) の定量的な不一致は X チャンネルの場合 (図 5.1 1) と同様に観測者適応化の不備が原因であると考えられ、図 5.1 2 (a) の被験者の特性を視覚モデルに導入しておけば定量的にも実測結果と良く一致するはずである。

以上の様に、ドリフト正弦波に対するコントラスト感度空間周波数特性に於ける 2 種類の実測結果と本時空間視覚モデルの X と Y チャンネルから得られた計算結果との一致性は、本時空間視覚モデルの正当性・汎用性を示す有力な結果と考えられる。

5.4.4 最適ドリフト速度の実測と理論の比較

ドリフト正弦波に対してはコントラスト感度を最大にするドリフト速度（最適ドリフト速度）の存在が実測されており、本時空間視覚モデルからもこの特性の導出を試みる。

最適ドリフト速度の理論的導出は、正弦波空間周波数を固定した条件で計算したXとYチャネルのコントラスト感度とドリフト速度の関係に於いて、感度を最大にするドリフト速度を探索することで実現できる。但し、時刻は $t = 0 \text{ sec}$ 、初期視点位置は $\theta_r = 90^\circ$ に設定してある。図5.13は正弦波空間周波数と最適ドリフト速度の関係の実測結果（プロット記号付き破線）[13][60]と時空間視覚モデルYチャネルからの計算結果（実線）を重ねて表示したものである。但し、プロット記号（○と□）は、ばらつきを持った実測結果に対する当てはめ関数のプロット位置を表している。実測結果の特徴は、正弦波の縦縞パターン（形状）に注目した場合（○表示）と動きに注目した場合（□表示）の2種類の最適ドリフト速度が存在すること、空間周波数の増加と共に最適ドリフト速度が低下すること、及び動きに注目した方が形に注目するよりも速い最適ドリフト速度が得られることである。なお、最適ドリフト速度 v_{opt} と空間周波数 f_s の関係は、

$$v_{opt} = k_1 f_s^{-0.81} \quad (\text{形に注目}) \quad (5.38)$$

$$v_{opt} = k_2 f_s^{-1.22} \quad (\text{動きに注目}) \quad (5.39)$$

で表現され（ k_1, k_2 は定数）、両対数軸に関して直線となる。一方、時空間視覚モデルからの計算結果では、Xチャネルに対しては $v_{opt} = 0 \text{ deg/sec}$ （図5.13中に表示なし）、即ち静止画像に対して感度が最大となり、形に注目した時の実測結果とは一致しないが、Yチャネルに対しては

$$v_{opt} = k_3 f_s^{-1.011} \quad (k_3 \text{ は定数}) \quad (5.40)$$

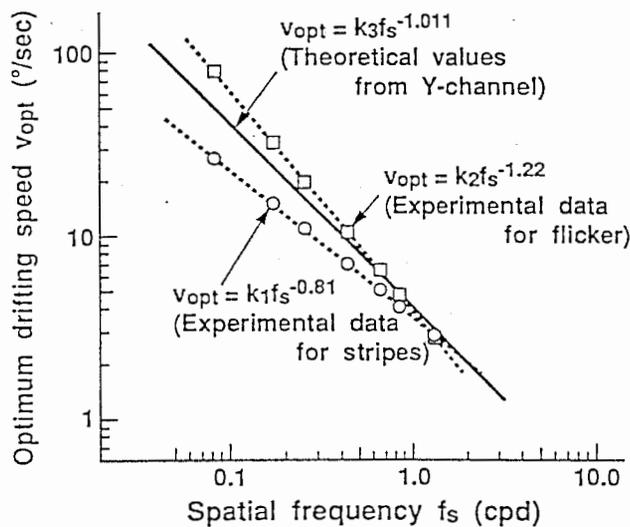


図5.13 最適ドリフト速度空間周波数特性の実測と理論（Yチャネル）の比較

Fig. 5.13 Comparison of measured optimum drifting speeds and theoretical values derived from the Y-channel.

と表現でき、動きに注目した時の実測結果と非常に良く一致した特性が定量的に得られることが分かる。Xチャンネルに対する計算結果と実測結果とが一致しない原因について考察する。図5.13の結果を導出する基になったコントラスト感度のドリフト速度依存特性の実測結果[13][60]から判断すると、この実験にかかわった被験者のXチャンネル時間周波数特性（視覚モデルでは $H_L(\omega_t)$ に対応する）は時間周波数の増加と共に感度が単調減少する単純な低域通過特性ではなく、高域時間周波数で僅かに強調された形の低域通過特性であることが予想される。一方、視覚モデルXチャンネルに導入されている時間周波数特性 $H_L(\omega_t)$ は単純な低域通過特性であり、この違いが最適ドリフト速度特性の実測結果と計算結果の不一致となって現われていると考えられる。実際に高域強調のかかった低域通過特性を用いると、視覚モデルからも $v=0 \text{ deg/sec}$ 以外の最適ドリフト速度が存在する様になる。この考察は、実際の視覚系に於ける形を知覚するチャンネルの低域通過型時間周波数特性に僅かな高域強調特性が含まれるか否かを再度正確に測定し直す必要性のあることを示唆するものと言える。

5.4.5 ドリフト方形波に対する感度特性の理論的予測

時空間視覚モデルの汎用性がかなり期待できるとする上記の結果を根拠にして、ドリフト方形波に対するコントラスト感度空間周波数特性の理論的予測を行なう。

ドリフト方形波は次の関数で与えられる。

$$f(r, t) = B + \left(\frac{4A}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos \{(2n-1)(\omega_s r + \omega_t t + \theta_r)\} \quad (5.41)$$

今までと同様の手順に従って導出した評価関数は以下の様になる。

$$I_X = (4/\pi)^2 (A/B)^2 \cdot I_{Xsq} \quad (5.42)$$

$$I_{Xsq} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+m+2}}{(2n-1)(2m-1)} H_X[(2n-1)\omega_s] H_X[(2m-1)\omega_s] \\ \times H_L[(2n-1)\omega_t] H_L[(2m-1)\omega_t] \cdot I_R(n, m) \quad (5.43)$$

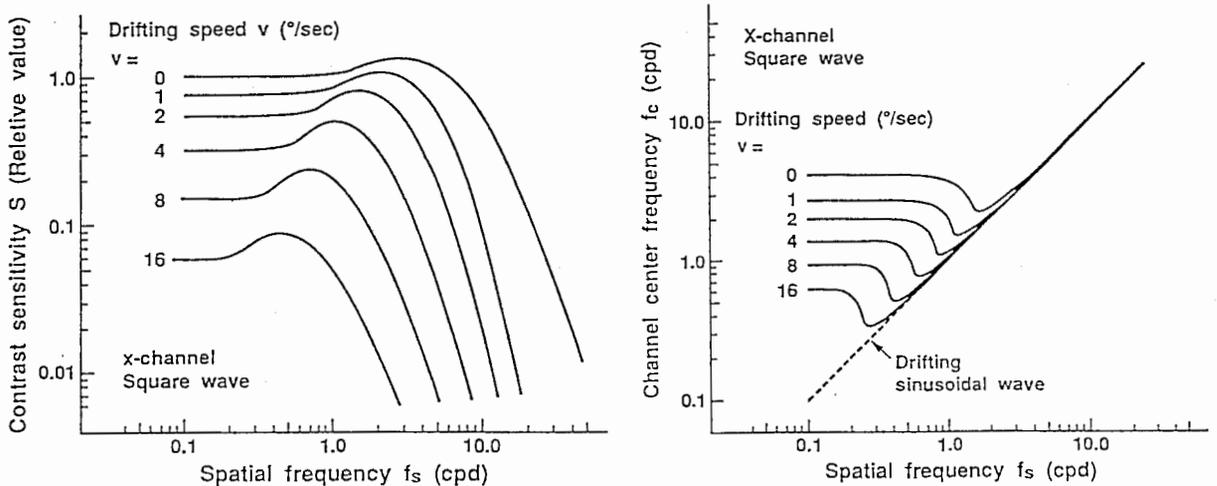
$$I_Y = (4/\pi)^2 (A/B)^2 \cdot I_{Ysq} \quad (5.44)$$

$$I_{Ysq} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+m+2}}{(2n-1)(2m-1)} H_Y[(2n-1)\omega_s] H_Y[(2m-1)\omega_s] \\ \times H_B[(2n-1)\omega_t] H_B[(2m-1)\omega_t] \cdot I_R(n, m) \quad (5.45)$$

$$I_R(n, m) = \exp[-\{(2n-1)^2 + (2m-1)^2\} \tau_0 \omega_s^2] \sinh\{(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)\omega_s^2\} \\ \times [\cos\{2(n-m)(\omega_t t + \theta_r)\} \exp\{(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)\omega_s^2\}]$$

$$- \cos \{2(n+m-1)(\omega_t t + \theta_r)\} \exp \{-(\tau_0 - \tau_1)(2n-1)(2m-1)\omega_s^2\} \quad (5.46)$$

図5.14(a), (b)は各々ドリフト速度 v をパラメータとして計算したXチャンネルのコントラスト感度空間周波数特性とチャンネル中心周波数選択特性（最適観測状態から計算できる狭帯域フィルタの中心周波数 f_c の空間周波数特性）である。計算条件は、感度が最大になる時刻（ $t = 0 \text{ sec}$ ）と初期視点位置（ $\theta_r = 90^\circ$ ）に設定した。図5.14(a)から、静止状態（ $v = 0 \text{ deg/sec}$ ）では低域空間周波数領域でほぼ一定の感度となる方形波特有の特性（第2章参照）が得られ、時空間視覚モデルが静止画像用の視覚モデルを含んだ形で拡張されていることが分かる。さらに、ドリフト速度の上昇と共に、静止状態に対してコントラスト感度が全体的に低下する傾向を示すと同時に、最大感度となる空間周波数位置は低域空間周波数の方へ移動して行く特性が予測でき、ドリフト速度が増加しても低域空間周波数に於いて感度がほぼ一定になる特性は維持される。一方、図5.14(b)から静止状態（ $v = 0 \text{ deg/sec}$ ）でのチャンネル中心周波数が高域空間周波数では正弦波の場合と同じ値（破線表示）となり、低域空間周波数領域では正弦波の場合よりも高く、ほぼ一定値（ $f_c = 4 \text{ cpd}$ ）に維持されることが分かる。この特性は方形波に対する視覚モデルの基本的特性であり、高域空間周波数では方形波のエッジが見え難くなるので正弦波と同じ様に知覚され、低域空間周波数では方形波というよりもエッジ画像として観測してしまう結果、チャンネル中心周波数が高く（観測動作での最適視野が狭く、最適ボケが少なくなる）、しかもほぼ一定値になるものと考えられる。また、ドリフト速度が増加すると、低域空間周波数領域でのチャンネル中心周波数は徐々に低下し正弦波の場合に近付くこと、即ちドリ



(a) コントラスト感度空間周波数特性

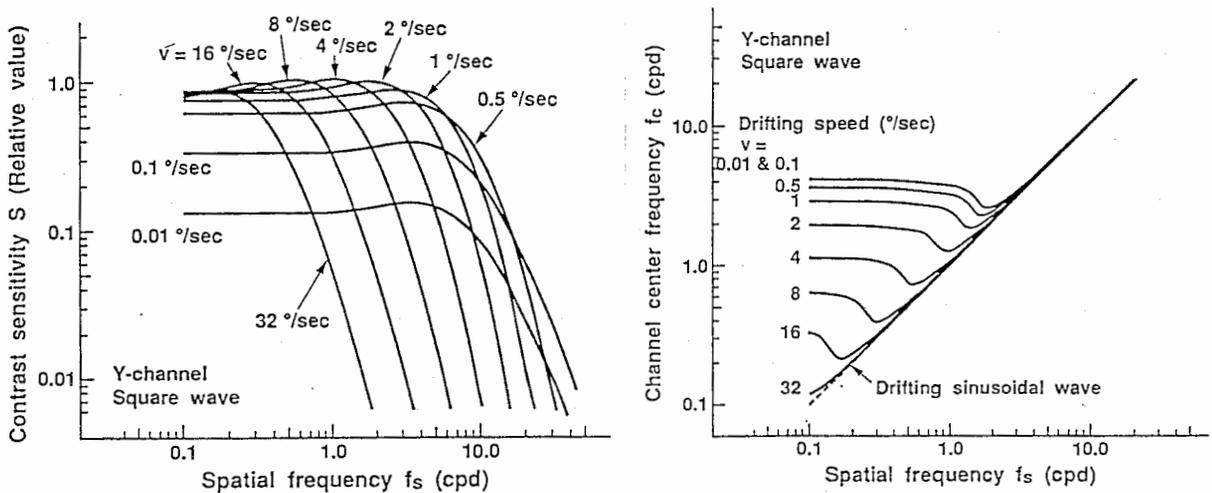
(b) チャンネル中心周波数選択特性

図5.14 ドリフト方形波に対する視覚モデルXチャンネルの空間的応答特性

Fig. 5.14 Spatial frequency characteristics of the X-channel model's contrast sensitivities and channel center frequencies to drifting square waves.

フト速度の上昇と共に画像観測の為に利用される最適視野が広くなり、最適ボケが増加することが理論的に予想された。これは、視点位置を固定した状態で動いている物体を観測するには、ボケを増やしたとしても広めの視野で観測するほうが良いことを意味すると考えられる。

図5.15(a), (b)は各々Yチャンネルのコントラスト感度空間周波数特性とチャンネル中心周波数選択特性である。計算条件は、時刻 $t = 0 \text{ sec}$ 、初期視点位置 $\theta_T = 90^\circ$ である。図5.15(a)から分かる様に、感度曲線はXチャンネルの場合（図5.14(a)）と同様に低域空間周波数ではほぼ一定の感度が得られる方形波特有の形を持ち、ドリフト速度 v の増加と共に一旦感度が全体的に高まった後ほぼ同一の最大感度が維持されると同時に最大感度となる空間周波数位置が低域空間周波数の方へ移行する特性が理論的に予想できる。一方、図5.15(b)はXチャンネルのチャンネル中心周波数選択特性（図5.14(b)）とほぼ同じ特性であるが、 $v = 4 \text{ deg/sec}$ 以上のドリフト速度になると、低域空間周波数領域（チャンネル中心周波数 f_c がほぼ一定値を示す領域）ではXチャンネルの場合（図5.14(b)）よりも低いチャンネル中心周波数が選択され、動きに注目（Yチャンネル）した場合の方が広い画像領域（最適視野が広い）を観測する必要のあることが理論的に予想される。



(a) コントラスト感度空間周波数特性 (b) チャンネル中心周波数選択特性

図5.15 ドリフト方形波に対する視覚モデルYチャンネルの空間的応答特性

Fig. 5.15 Spatial frequency characteristics of the Y-channel model's contrast sensitivities and channel center frequencies to drifting square waves.

5.5 瞬間提示画像（非定常画像）に対する時空間視覚応答特性

観測者適応化の為に本時空間視覚モデルに組み込まれるX、Yチャンネルのコントラスト感度時間周波数特性はゲイン特性のみであり位相特性が導入できない（実測が困難な為）ので、本視覚モデルではフリッカーやドリフト画像の様な周期的な時間変化を繰り返す定常的時間変化画像しか扱えない。より一般的な非定常時間変化画像（例えば瞬間提示画像やオンオフ過程）に対する視覚系の視覚応答をも再現するには、実測以外の手段で視覚系の位相特性または時間インパルス応答（ゲイン特性と位相特性からも計算可能）を求め視覚モデルに組み込む必要がある。

そこで本節では、視覚系時間周波数特性の位相特性または時間インパルス応答を直接実測する困難を避け、時間周波数特性のゲイン特性からヒルベルト変換の方法を利用して位相特性を理論的に推定した後、両特性を用いて視覚系の時間インパルス応答を計算することにより、従来の時空間視覚モデルを非定常時間変化画像にも対応できるより汎用性を高めた時空間視覚モデルに拡張する。また、画像が瞬間的に切り替わった場合に生じる観測状態の不連続的变化を防止する為に、観測状態の時間変化特性（動特性）も考慮する（実際の視覚系でも焦点調節は動特性の為になめらかに変化している）。そして、本時空間視覚モデルの有効性・正当性の検証として、瞬間提示画像の様な非定常時間変化画像に対する視覚系の基本的視覚応答特性（コントラスト感度空間周波数特性及びコントラスト閾値と提示時間の関係）が定量的にシミュレートでき、実測とも良く一致することを示す。さらに、本視覚モデルの応答特性から反応時間（知覚時間）の空間周波数依存特性が理論的に再現可能であることも示す。

5.5.1 ヒルベルト変換を用いた視覚系時間インパルス応答の推定

5.5.1.1 ヒルベルト変換による視覚系位相特性の推定

視覚系の時間インパルス応答を明確な測定データとして手に入れるのは非常に困難なので、時間インパルス応答を視覚モデルに直接導入することはできない。そこでヒルベルト変換を利用して視覚系の時間周波数ゲイン特性から位相特性を推定し、その後視覚系の時間インパルス応答を計算することを考える。

視覚系の離散化表現された時間インパルス応答 $h(t)$ の z 変換を $H(z)$ （時間周波数特性）とすると次の様に実数部と虚数部または振幅と位相に分けて表現できる。

$$\begin{aligned} H(z) &= H_R(z) + j H_I(z) \\ &= |H(z)| \exp(j \arg[H(z)]) \quad (\text{ただし、} z = \exp(j \omega t)) \end{aligned} \quad (5.47)$$

今、視覚系と言うシステムが最小位相条件を満たすとすると、時間周波数特性の対数振幅と位

相の間には以下のヒルベルト変換の関係が成立する[63]。

$$\log |H(z)| = h^*(0) - p \int_{-\pi}^{\pi} \arg[H(z)] \cot\{(\theta - \omega_t)/2\} d\theta / 2\pi \quad (5.48)$$

$$\arg[H(z)] = p \int_{-\pi}^{\pi} \log |H(z)| \cot\{(\theta - \omega_t)/2\} d\theta / 2\pi \quad (5.49)$$

この式で、 $h^*(n)$ は時間周波数特性 $H(z)$ の対数を z 変換とする実数時系列信号である。また、 $p \int$ はコーシーの主値積分を意味する。以上の様に、最小位相システムでは、対数振幅か位相特性のいずれかが分かればシステムの伝達関数が決定できる。

実際に計算する場合、時間周波数ゲイン特性は離散化されているものとする、式(5.49)は離散的フーリエ変換 (DFT) を用いて次式の様に表現される。

$$\begin{aligned} j \arg[H(z)] &= \sum_{m=0}^{N-1} \log |H(m)| V_N((k-m))_N / N \quad (0 \leq k \leq N-1) \\ &= 0 \quad (\text{その他の } k) \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} V_N((k))_N &= -j 2 \cot(\pi k / N) \quad (0 \leq k \leq N-1 \text{ かつ } k \text{ が奇数}) \\ &= 0 \quad (\text{その他の } k) \end{aligned} \quad (5.51)$$

$V_N((k))_N$ は N (サンプル点数) を周期とする巡回関数である。一般的には、DFT表現された最小位相系の伝達関数の対数振幅と位相とをヒルベルト変換で関係づけることはできないが、サンプル点数 N を増やすことにより、近似的に対数振幅から位相特性が計算できる[63]。なお、視覚系が近似的には最小位相系と見なして良いことは実験により示されている[64]。

5.5.1.2 視覚系時間インパルス応答の計算

視覚系の時間インパルス応答を計算するには、視覚系時間周波数ゲイン特性とヒルベルト変換 (式(5.50),(5.51))を用いて推定した視覚系の位相特性を用いて

$$H(k) = H_R(k) + j \cdot H_I(k) \quad (5.52)$$

の様に実数部 $H_R(k)$ と虚数部 $H_I(k)$ を用いた形に変換しておき逆フーリエ変換すれば良い。即ち、視覚系の時間インパルス応答 $h(k \cdot \Delta t)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} h(k \cdot \Delta t) &= \sum_{n=0}^{N-1} H(n) W_N^{-nk} / (\Delta t \cdot N) \quad (0 \leq k \leq N-1) \\ &\quad (W_N = \exp(-j 2\pi / N)) \end{aligned} \quad (5.53)$$

Δt はサンプリング間隔である。また、ステップ応答 $s(k \cdot \Delta t)$ は時間インパルス応答の積分として次の様に表現できる。

$$s(k \cdot \Delta t) = \sum_{n=0}^{k-1} h(n \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \quad (\text{但し } s(0) = 0) \quad (5.54)$$

時空間視覚モデルに導入した X チャンネルの時間周波数ゲイン特性 $H_L(\omega_t)$ は低域通過型であり（式(5.30)）、図 5.16 (a) で示される。図の横軸は正規化周波数であり、最高周波数の位置

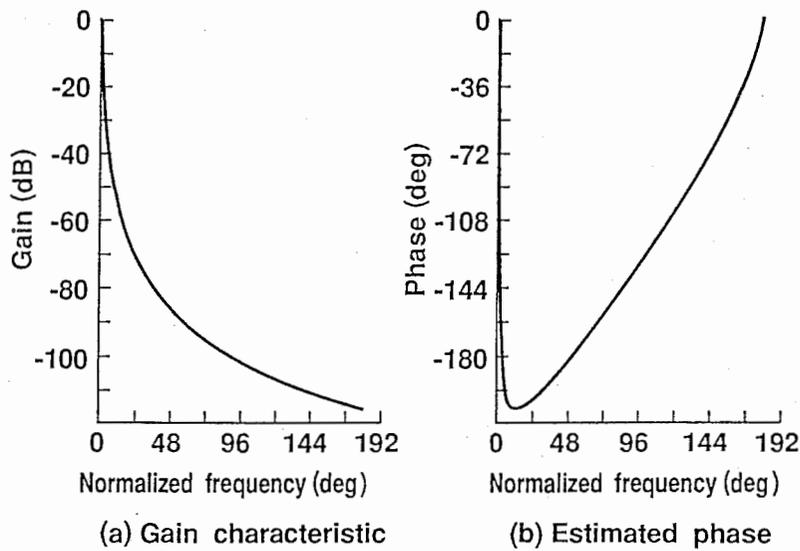


図 5.16 視覚モデル X チャンネルの時間周波数特性（ゲインと位相）

Fig. 5.16 The X-channel model's temporal frequency characteristics of measured gain and estimated phase.

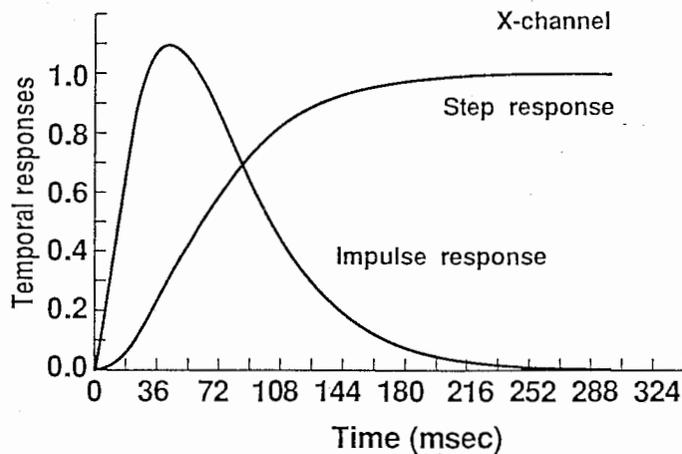


図 5.17 視覚モデル X チャンネルのインパルス応答とステップ応答（推定結果）

Fig. 5.17 The X-channel model's temporal impulse response and step response derived from Hilbert transform.

が 180 deg に相当する。このゲイン特性を最高周波数 $F_{\max} = 1000 \text{ Hz}$ 、データ数 $N = 2^{15}$ という条件でヒルベルト変換（式(5.50)(5.51)）すると、図 5.16 (b) の様に V 字型の位相特性が推定できる。図 5.16 の時間周波数特性を逆フーリエ変換（IDFT）すると、図 5.17 の時間インパルス応答とステップ応答が得られる。時間インパルス応答 $h_X(t)$ は、 $t < 0$ の領域で $h_X(t) = 0$ （因果律）を満たし、 $t = 43 \text{ msec}$ で最高値に達した後再び零に戻る。ステップ応答 $s_X(t)$ は零から単調増加して行き飽和して $s_X(t) = 1$ となる。

一方、Yチャンネルに導入した時間周波数ゲイン特性 $H_B(\omega_t)$ は帯域通過型であり（式(5.31)）、

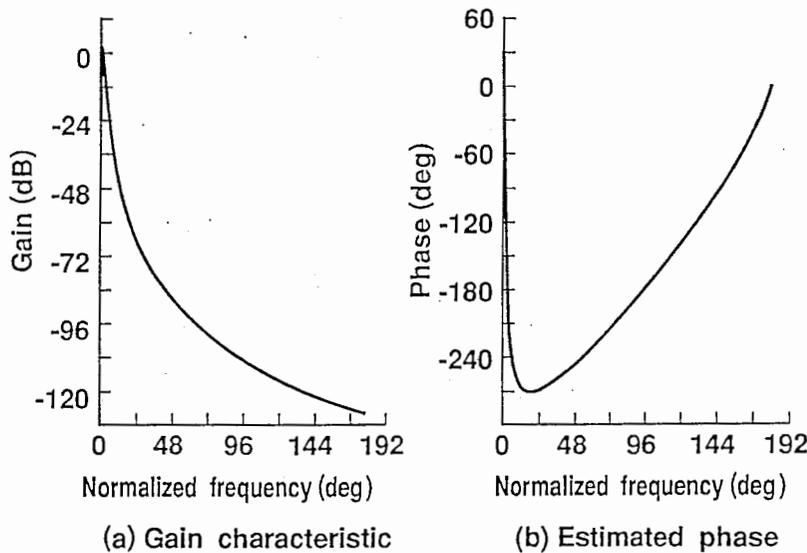


図 5.18 視覚モデル Y チャンネルの時間周波数特性（ゲインと位相）

Fig. 5.18 The Y-channel model's temporal frequency characteristics of measured gain and estimated phase.

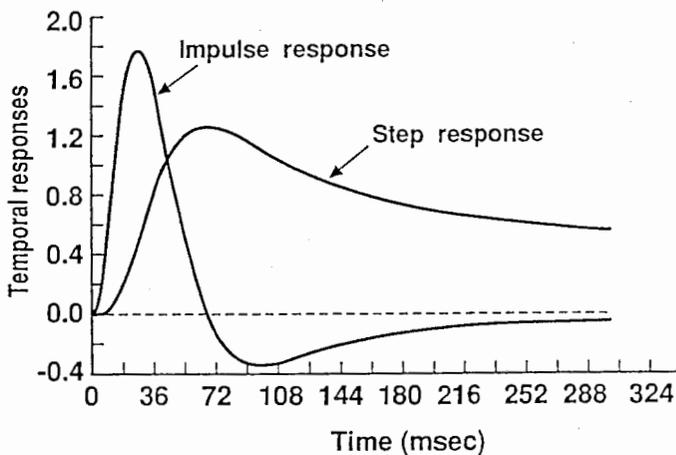


図 5.19 視覚モデル Y チャンネルのインパルス応答とステップ応答（推定結果）

Fig. 5.19 The Y-channel model's temporal impulse response and step response derived from Hilbert transform.

図5.18(a)で示される。 $\omega_t = 0$ Hz（直流）でのゲイン値を零にするとヒルベルト変換（式(5.50))の対数部分が発散するので、 $\omega_t = 0$ Hzでのゲイン値を十分小さな値に設定して表現（図5.18(a)）し、近似的にヒルベルト変換が成立するようにした。ヒルベルト変換により得られた位相特性（図5.18(b)）は零周波数近辺に於いて一旦増加した後減少する特性となり、この点がXチャンネルの場合と大きく異なる。但し、低周波数で最大値が生じる特性（帯域通過特性）をできるだけ正しく離散化表現する為、データ数は $N = 2^{21}$ に増やした。図5.19の時間インパルス応答 $h_Y(t)$ は、 $t < 0$ の領域で $h_Y(t) = 0$ （因果律）を満たし、 $t = 27$ msecで最高値に到達した後、急激に減少して負の領域に下がり、それから零に漸近する特徴を示す。ステップ応答 $s_Y(t)$ は $t = 67$ msecで最大値に達した後零に向かって漸近する。

5.5.2 非定常時空間視覚モデルへの拡張

導出した視覚系時間インパルス応答を用いて瞬間提示正弦波に対する時空間視覚モデルの評価関数の導出を行なう。さらに、画像が瞬間的に切り替わった場合に発生しやすい観測状態の不連続的变化を防止する為に、焦点調節機構の動特性に相当する観測状態の時間変化特性（動特性）も考慮することにより、より汎用的な非定常時空間視覚モデルに拡張する。

5.5.2.1 評価関数の導出

瞬間提示正弦波画像は、一様輝度の平面上に正弦波形が瞬間的に出現し、再び元の一様平面に戻る様な非定常的時間変化を伴う画像である。瞬間提示画像を表示装置を使って表示する場合、一様平面は表示画面の大きさで限定される。この有限の表示面を低い空間周波数 ω_1 の正弦波形で近似すれば、この正弦波は常に存在することになり、瞬間提示画像は表示面を表わす第1の正弦波と信号を表わす第2の正弦波に提示期間を乗じたものの和として数式表現される。

$$f(r, t) = B + A_1 \cos(\omega_1 r + \theta_r) + A_2 \cos(\omega_s r + \omega_s \theta_r / \omega_1 + \alpha_1) \{u(t) - u(t - T_p)\} \quad (5.55)$$

ω_1 : 有限表示面を表わす正弦波空間角周波数

A_1 : 有限表示面を表わす正弦波振幅, B : 平均輝度

ω_s : 瞬間提示される正弦波信号の空間角周波数

A_2 : 瞬間提示される正弦波振幅

θ_r : 瞬間提示画像 $f(r, t)$ の位相（視点位置）

α_1 : 両正弦波形の位相差

$u(t)$: 単位ステップ関数, T_p : 画像提示時間

この時、一様平面と正弦波信号の平均輝度は一定に保たれるものとする。定式化手順に従って評価関数を導出すると、以下の様になる。

$$I_X = (A_1^2/B^2) I_1 + (A_2^2/B^2) H_X^2(\omega_S) a^2(t) I_2 + 2 (A_1 A_2/B^2) a(t) I_3 \quad (5.56)$$

$$I_Y = (A_2^2/B^2) H_Y^2(\omega_S) b^2(t) I_2 \quad (5.57)$$

$$I_1 = H_X^2(\omega_1) \exp(-2 \tau_0 \omega_1^2) \sinh\{\omega_1^2(\tau_0 - \tau_1)\} \times [\exp\{\omega_1^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\theta_T) \exp\{-\omega_1^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (5.58)$$

$$I_2 = \exp(-2 \tau_0 \omega_S^2) \sinh\{\omega_S^2(\tau_0 - \tau_1)\} [\exp\{\omega_S^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos(2\omega_S \theta_T / \omega_1 + 2\alpha_1) \exp\{-\omega_S^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (5.59)$$

$$I_3 = H_X(\omega_1) H_X(\omega_S) \exp\{-\tau_0(\omega_1^2 + \omega_S^2)\} \sinh\{\omega_1 \omega_S(\tau_0 - \tau_1)\} \times [\cos\{(1 - \omega_S / \omega_1) \theta_T - \alpha_1\} \exp\{\omega_1 \omega_S(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos\{(1 + \omega_S / \omega_1) \theta_T + \alpha_1\} \exp\{-\omega_1 \omega_S(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (5.60)$$

$$a(t) = \int_{t_\infty}^t h_L(t') \{u(t-t') - u(t-T_p-t')\} dt' = \int_0^t h_L(t') dt' - \int_0^{t-T_p} h_L(t') dt' \quad (5.61)$$

$$b(t) = \int_{t_\infty}^t h_B(t') \{u(t-t') - u(t-T_p-t')\} dt' = \int_0^t h_B(t') dt' - \int_0^{t-T_p} h_B(t') dt' \quad (5.62)$$

Xチャネルの評価関数は有限表示面を表わす空間周波数 ω_1 の正弦波のみに関する項と空間周波数 ω_S の信号正弦波のみに関する項と両者の相互作用を表わす項からなり、Yチャネルの評価関数は時間的に変化する信号正弦波のみからなる。提示画像の形状情報或いは動き情報に注目して観測する時の時空間視覚モデルの各時刻での最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として式(5.56)のXチャネルの評価関数 I_X または式(5.57)のYチャネルの評価関数 I_Y を極大化することで推定できる。

5.5.2.2 観測状態動特性の定式化

本視覚モデルに於いては、観測状態の変化は主に水晶体の厚み変化に基づく焦点調節誤差の変動によってもたらされると考えている。一般的に言って、質量を持った物体が移動する場合

の動特性は2階線形微分方程式により記述できる場合が多いので、非定常時空間視覚モデルでも観測状態の動特性を2階線形微分方程式でモデル化する。モデル化のポイントは次の3点である。

- (1) 微分方程式の変数としてチャンネル中心周波数 f_c （視覚モデルの狭帯域フィルタの中心周波数）を利用する。（直観的に分かりやすくする為）
- (2) 観測状態やチャンネル中心周波数 f_c の変化範囲は数decadeに及ぶ。全ての変化範囲に於いて、狭帯域フィルタの位置変化特性を対等に扱う為にチャンネル中心周波数の対数を微分方程式の変数 $x(t)$ にする。

$$x(t) = \log_{10} \{ f_c(t) / f_c(0) \} \quad (5.63)$$

$f_c(0)$ は初期状態での値である。

- (3) 実際の視覚器官（水晶体など）の変化速度には上限が存在すると考えられる。従って、観測状態の変化速度にも上限（最大移動速度 V_{max} ）を設定する。

以上を考慮して、次の2階線形微分方程式を導入する。

$$L \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + R \frac{dx(t)}{dt} + \frac{x(t)}{C} = \frac{1}{C} E(t) \quad (5.64)$$

$$E(t) = \log_{10} \{ f_{c*}(t) / f_c(0) \} \quad (5.65)$$

但し、入力変数 $E(t)$ 中の $f_{c*}(t)$ は目標値となるチャンネル中心周波数（式(5.56)(5.57)の最適化により得られる最適観測状態）である。また、 L 、 R 、 C は各々誘導要素(Inductance)、抵抗要素(Resistance)、容量要素(Capacitance)を意味する。微小時間 Δt 毎の差分表現に変換すると次の様になる。

$$x(i) = \frac{\{ 2(1 + R_1 \Delta t) x(i-1) - x(i-2) + R_2^2 (\Delta t)^2 E(i) \}}{1 + 2R_1 \Delta t + R_2^2 (\Delta t)^2} \quad (5.66)$$

但し $R_1 = R / 2L$ 、 $R_2^2 = 1 / LC$ と置き換えた。水晶体の厚み変化特性はできるだけ振動せずに、かつ素早く目標値に移動するものと仮定すると、臨界制動状態（ $R_1 = R_2$ ）から僅かに振動状態にずれた特性（ R_1 が R_2 よりも僅かに小）なる様に微分方程式のパラメータを設定すれば、実際の視覚系に近い特性の再現が可能になると考えられる。従って、時刻 i での最適観測状態 $f_c(i)$ は式(5.66)から得られる変数 $x(i)$ を式(5.63)に代入することにより計算

できる。

$$f_c(i) = f_c(0) \cdot 10^{x(i)} \quad (5.67)$$

また、時刻 i での観測状態の変化速度 $V_{fc}(i)$ は次式の様に定義できる。

$$V_{fc}(i) = [\log_{10}\{f_c(i)/f_c(0)\} - \log_{10}\{f_c(i-1)/f_c(0)\}] / \Delta t \quad (5.68)$$

変化速度 $V_{fc}(i)$ が最大値 V_{max} を越えた場合には、変化速度は最大値に制限される。今、時刻 i に於いて観測状態の変化速度が最大値を越えたとすると、この時の観測状態の値 $f_{cv}(i)$ は式(5.68)より次の様に計算できる。

$$f_{cv}(i) = f_c(i-1) \cdot 10^{V_{max} \cdot \Delta t} \quad (5.69)$$

即ち、時刻 i に於ける観測状態の遷移値は次の拘束条件により決定される。

$$\begin{aligned} \text{if } (V_{fc}(i) \leq V_{max}) \quad \text{then } f_c(i) &= f_c(i) \\ \text{if } (V_{fc}(i) > V_{max}) \quad \text{then } f_c(i) &= f_{cv}(i) \end{aligned} \quad (5.70)$$

5.5.2.3 最適観測状態の推定手順

非定常時空間視覚モデルの最適観測状態およびその時の評価関数値は次の様にして計算する。

- (1) $t \leq 0$ に於いて、有限の表示面を表わす空間周波数 ω_1 の正弦波形のみを観測した時の最適観測状態を計算し、これを初期値 $f_c(0)$ とする。
- (2) Δt 経過後の時刻に於いて、XおよびYチャンネルの評価関数（式(5.56)と式(5.57)）の極大化により、最適観測状態を計算する。この計算値は、入力関数 $E(i)$ の目標値 $f_{c*}(i)$ となる。
- (3) 差分方程式（式(5.66)）から計算される $x(i)$ と式(5.67)を用いて、観測状態が遷移する位置 $f_c(i)$ を求める。
- (4) 観測状態が $f_c(i-1)$ から $f_c(i)$ へ遷移した時の変化速度 $V_{fc}(i)$ を計算し、式(5.70)の拘束条件に従って $f_c(i)$ の値を修正する。
- (5) 最適観測状態 $f_c(i)$ から式(2.29)と式(2.30)を連立させボケ $\tau_1(i)$ と視野の大きさ $\tau_0(i)$ を求め、これらの値を式(5.56)と式(5.57)に代入し、XとYチャンネルの評価関数値を計算する。
- (6) Δt 時間進め、(2) から(5) までの手順を繰り返す。

5.5.3 コントラスト閾・感度特性の実測と理論の比較

瞬間提示画像に対する非定常時空間視覚モデルの時間応答特性を計算する。そして、その応答特性からコントラスト閾や感度特性を導出し、実測結果と比較する。

閾値特性は、提示した画像が知覚できる最小のコントラスト（コントラスト閾値）またはそ

の逆数であるコントラスト感度を使って表現される特性であり、実験では瞬間的な画像提示を何回も繰り返している間に知覚できる最小のコントラストを探索するという手順で測定される。本来ならば、画像提示期間と画像を提示しない期間とでは異なった観測状態が得られる筈なので、最適観測状態は2種類の観測状態の間を時間と共に遷移して行くことになる。しかし、コントラスト閾値の測定という特別の状況下に置かれた場合の視覚系の状態を考えて見ると、画像提示が繰り返されている間に、視覚系は提示画像が最も見易くなる（感度最大）様に観測状態を調節して行き、画像が提示されない期間に於いても次の画像提示期間に備えて意図的に画像提示期間と同一の観測状態に固定しようとするのが容易に予想される。即ち、提示画像が存在する期間はもとより、存在しない期間でも、視覚系の観測状態は信号知覚にとって最も適した状態（感度最大）に保たれると考えられる。時空間視覚モデルを用いてこの状態を近似表現するには、式(5.56)(5.57)の評価関数に於いて正弦波信号のみを考慮すれば良い。即ち、 $A_1 = 0$ とすれば良い。

5.5.3.1 視覚モデルの基本的時間応答特性

図5.20は、瞬間提示正弦波（空間周波数 $f_s = 3$ cpd、視点位置 $\theta_r = 90^\circ$ ）を最適観測状態で観測した場合のXチャンネル評価関数値 $I_X (= I_{Xmax})$ の応答特性を計算したものであり、画像提示時間 T_p がパラメータになっている。閾値特性計算用の設定条件（ $A_1 = 0$ ）により近

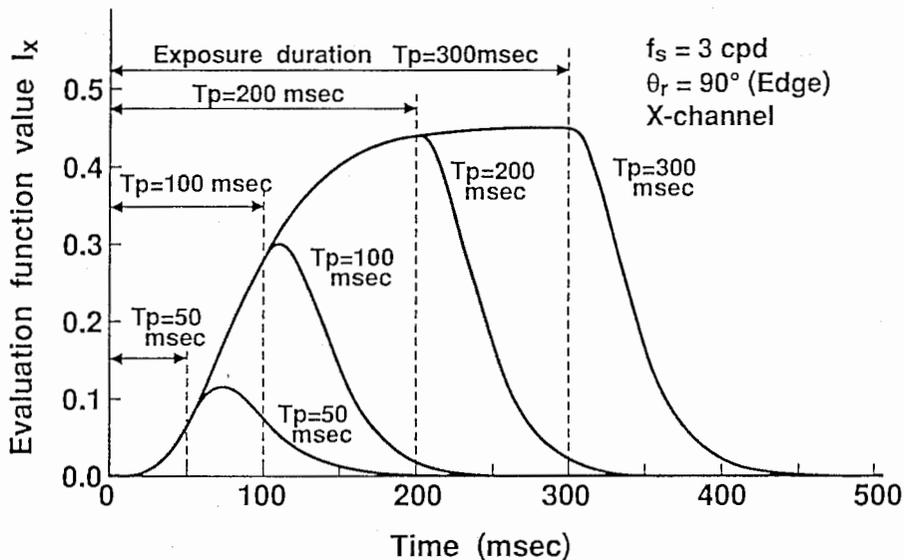


図5.20 最適観測状態に於けるXチャンネル評価関数値の時間応答特性
 Fig. 5.20 Temporal response characteristics of the X-channel model's evaluation function value calculated at the optimum image observing state as a parameter of stimulus exposure duration.

似したので、式(5.56)の第2項のみを用いている。画像提示時間 T_p が長い場合($T_p = 200$ msec, 300 msec)に於けるXチャンネルの時間応答特性の特徴は、画像提示の開始と共に信号正弦波の形状に対する印象の強さ（評価関数値 I_X ）が増加して行き、ほぼ飽和傾向を示すこと、及び画像提示の終了と共に印象の強さが減少することである。従って、提示時間の長い方が正弦波形状をより明確に知覚しやすくなると言える。また、画像提示時間 T_p が短い場合（ $T_p = 50$ msec, 100 msec）に於いては、画像提示が終了し画像が消えても依然として印象の強さは増加し続け、最大値に達する特性が得られる。この特性は、画像が消えてからの方が正弦波の形を知覚しやすいことを意味する。

同様に図5.21は最適観測状態に於けるYチャンネルの評価関数値 $I_Y (= I_{Ymax})$ の時間応答特性であり、Xチャンネルと同じ条件で計算している。Yチャンネルの時間応答特性の第一の特徴は、動きに対する印象の強さ（評価関数値 I_Y ）が極大になる位置が2か所発生することである。最初の極大は画像提示が開始されたことに起因する動きに対する応答を意味し、2番目の極大は画像提示が終了したことによって生じる動きに対する応答を意味している。極大値の大きさの比較では、画像提示開始に対する印象の方（最初の極大値）が大きく、画像提示時間が長くなると共に画像提示終了に対する印象（2番目の極大値）が強くなる傾向を示す。これは提示時間の長い方が画像提示の開始と終了の両方の変化を明確に知覚し易くなること、逆に言えば、提示時間が短くなると画像提示の開始と終了の時刻が明確に区別できにくくなること

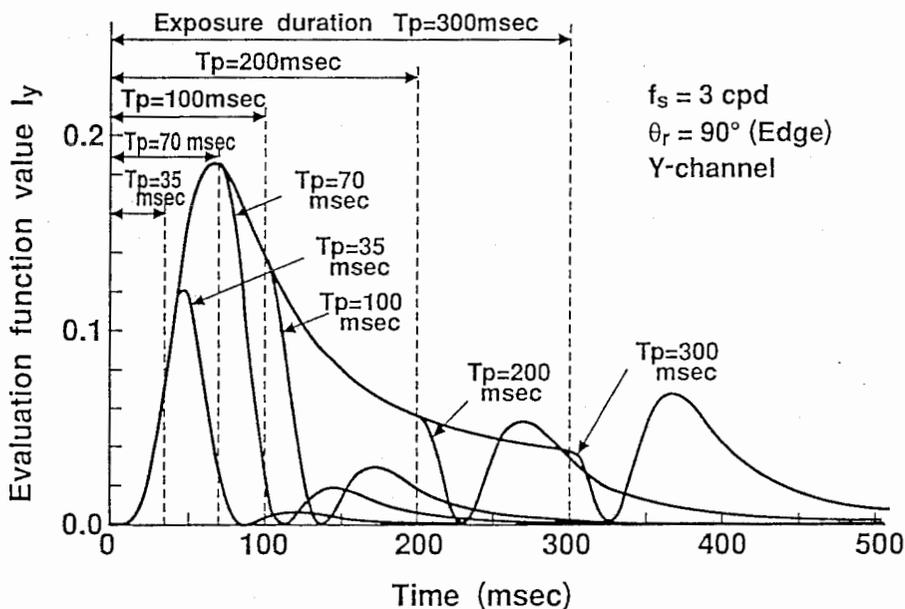


図 5.21 最適観測状態に於ける Y チャンネル評価関数値の時間応答特性
 Fig. 5.21 Temporal response characteristics of the Y-channel model's evaluation function value calculated at the optimum image observing state as a parameter of stimulus exposure duration.

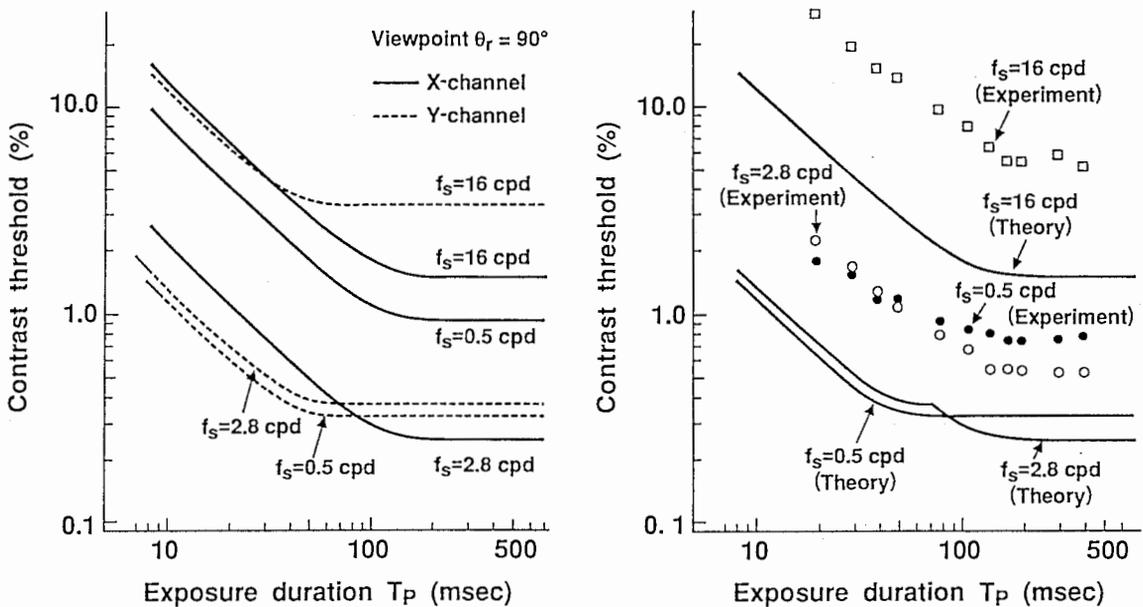
を意味する。第二の特徴は、画像提示開始に対する印象が最大になる時刻が遅くても 67 msec で飽和することである。従って理想的な状態に於いては、多くても 67 msec あれば画像の時間的変化の存在が検出できることになる。

以上の基本応答特性を考慮すると、コントラスト感度や閾値の理論値は両チャンネル評価関数中の時間関数 $a(t)$, $b(t)$ が最大値に到達する時刻に於いて決定されることになり、必ずしも画像提示時間 T_p 内に決定されるとは限らない。

5.5.3.2 コントラスト閾と画像提示時間の関係

図 5.2 2 (a) は瞬間提示正弦波に対するコントラスト閾値（%表示）と画像提示時間 T_p の関係を本時空間視覚モデルから理論的に計算した結果である。計算条件は、正弦波形空間周波数が $f_s = 0.5$ cpd, 2.8 cpd, 16 cpd の 3 種類であり、実線が X チャンネル、破線が Y チャンネルからの結果を表わす。X チャンネルでは、提示時間が $T_p = 150$ msec 程度までは提示時間の増加と共にコントラスト閾値は両対数軸に関してほぼ一定の割合で減少し、 $T_p > 150$ msec では一定値となる。一方 Y チャンネルでは、提示時間 T_p が 60 msec 以下では、X チャンネルとほぼ同じコントラスト閾値減少特性を示し、60 msec 以上は一定値となる。

図 5.2 2 (b) はコントラスト閾値（%表示）と画像提示時間の関係の実測結果[65] と視覚モ



(a) X, Yチャンネルの計算結果

(b) 実測値と計算値の重ね合わせ

図 5.2 2 コントラスト閾値と画像提示時間の関係に於ける実測値と計算値の比較

Fig. 5.22 Comparison of threshold contrasts measured to flashed sinusoidal waves with theoretical ones derived from the X- and Y-channel models as a function of stimulus exposure duration.

デルからの計算結果（実線）を重ねて表示した図である。但し、計算結果はどんな変化でも良いという判断基準（図5.2 2(a)の両チャンネルのコントラスト閾値のうち、どちらか閾値の低い方を採用する）の場合の閾値特性であり、X、Yチャンネルの合成特性である。この図から次のことが実測と理論で良く一致する。

- 1) 提示時間が短い間は、提示時間の増加と共にコントラスト閾値は減少する（両対数軸に対しほぼ一定の割合）が、提示時間がある値以上では提示時間に無関係に一定のコントラスト閾値になる。また、空間周波数が変わった場合の閾値曲線の大小関係も理論と実測で良く一致する。
- 2) 提示時間 T_p が短い領域では次式が成立する。

$$(\text{コントラスト閾値}) \times (\text{提示時間 } T_p)^q = \text{一定} \quad (5.71)$$

べき指数の値 q は実測では $q = 0.7$ 、理論では $q = 0.864$ となり両者の値はほぼ等しい。

- 3) 閾値が減少する領域から一定値領域に遷移する境目の提示時間（臨界提示時間）の理論値は $f_s = 0.5$ cpd では60 msec（実測では80 msec）、2.8 cpd では150 msec（実測では150 msec）、16 cpd では150 msec（実測では200 msec）となり実測に近い値が得られる。

一方、実験値と理論値との不一致点は、コントラスト閾値曲線の理論値が全体的に低い方へシフトしていることと、 $f_s = 2.8$ cpdと16 cpdでの臨界提示時間の差が実測値では50 msecあるのに対し理論値では差が生じないことである。前者に対する理由としては、時空間視覚モデルに導入してある基本特性（X、Yチャンネルの空間周波数特性と時間周波数特性がこの実験の被験者の基本特性と異なるからであると考えられる（観測者適応化を行っていないから）。従って、観測者適応化が行えれば実測と理論を定量的に一致させることも可能であろう。後者に対しては、視覚モデルに知覚時間（画像が提示されてから知覚できるまでに要する時間）の遅れ特性が考慮されていないことが原因と考えられる。実測結果によれば、提示画像の空間周波数が高くなる程知覚時間が増加すると言われている[66][67]。即ち、16 cpdの正弦波は他と比べてかなり高い空間周波数であり、それだけ多くの知覚時間を必要とする結果、臨界提示時間がその分だけ増加するものと考えられる。

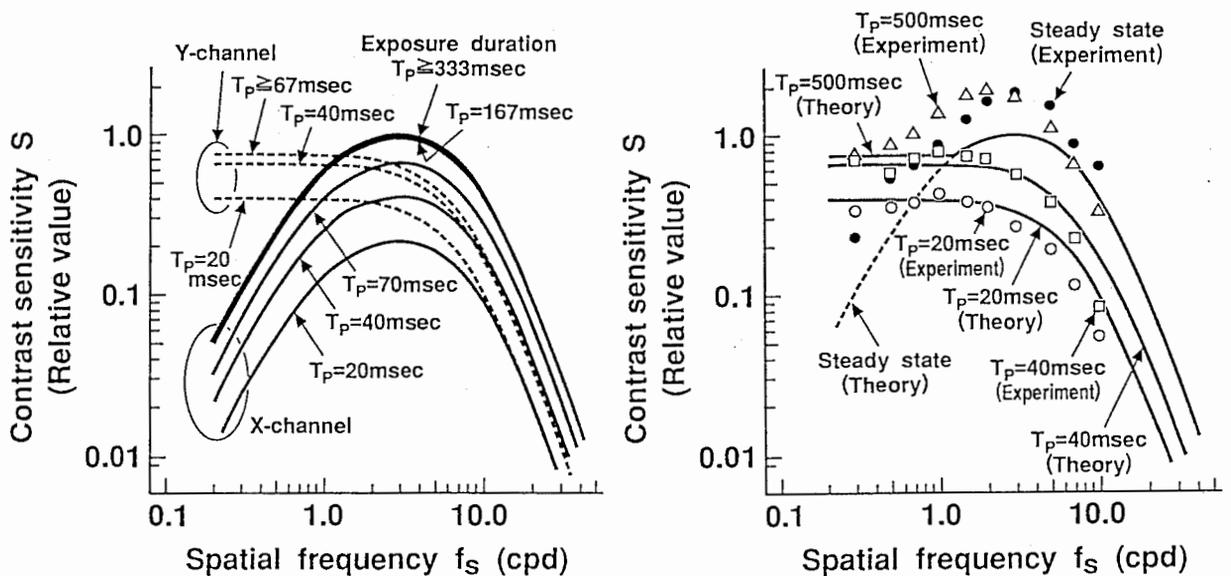
次に、図5.2 2(b)の実験結果に対する閾値判定条件と計算条件について検討する。実験での閾値判定条件は正弦波形の検出であるから、本来ならば視覚モデルのXチャンネル（主に形状知覚を担当）からの計算結果との一致性を議論すべきところであるが、実際にはX、Y両チャンネルに於ける計算結果の合成特性との一致性を検討した。この理由は以下の通りである。即ち、空間周波数の増加と共に臨界提示時間が増加する実測結果（図5.2 2(b)）に対しては、低域

空間周波数領域で応答が支配的となる過渡チャンネル（視覚モデルではYチャンネルに対応）と高域空間周波数領域で応答が支配的となる定常チャンネル（視覚モデルではXチャンネルに対応）の信号伝達速度の違い（過渡チャンネルの方が早い）が原因である[65]と説明されていることから判断すると、実際には過渡チャンネルと定常チャンネルの合成特性（視覚モデルではXとYチャンネルの合成特性）として実測されている可能性が高いと考えられるからである。

5.5.3.3 コントラスト感度空間周波数特性

図5.23(a)は画像提示時間 T_p をパラメータとして本時空間視覚モデルから計算したコントラスト感度の空間周波数特性である。但し、実線はXチャンネル、破線はYチャンネルからの計算結果である。Xチャンネルに関しては、基本的には帯域通過型であり、画像提示時間 T_p が長くなるに従って感度が空間周波数全体に亘って高くなって行き、静止正弦波形に対するコントラスト感度に漸近して行く。 $T_p=167$ msec以上ではほとんど同じ感度特性が得られる。一方、Yチャンネルの感度特性は低域通過型であり、画像提示時間 T_p が長くなるに従って感度が空間周波数全体に亘って高くなり、 $T_p=67$ msec以上の提示時間で飽和する特性が得られる。

図5.23(b)は瞬間提示正弦波に対する代表的なコントラスト感度空間周波数特性の実測結果[68]と計算結果（実線）を重ねて表示した図である。但し、計算結果は図5.22(b)と同様



(a) X, Yチャンネルの計算結果

(b) 実測値と計算値の重ね合わせ

図5.23 瞬間提示正弦波コントラスト感度空間周波数特性に於ける実測値と理論値の比較

Fig. 5.23 Comparison of measured contrast sensitivities to flashed sinusoidal waves with theoretical ones derived from the X- and Y-channel models as a function of spatial frequency.

にどんな変化でも良いという判断基準（図5.23(a)のX、Yチャンネルの合成特性として感度の大きい方を採用する）を用いて計算しており、破線は静止正弦波に対する感度特性の計算結果である。実測結果、計算結果共に、提示時間が短い場合（ $T_p = 20 \text{ msec}$, 40 msec ）は低域通過型であるが、提示時間が長くなると（ $T_p = 500 \text{ msec}$ 以上）帯域通過型の特性に変化して行き、静止正弦波で完全な帯域通過型になる特徴を示し、定性的には実測結果と計算結果は良く一致することが分かる。定量的に一致しない部分（ $T_p = 500 \text{ msec}$ 以上）が生じる原因は、図5.22(b)と同様に観測者適応化の不備と考えられる

図5.23(b)の実測結果も正弦波の形の検出という判断基準で測定されたことになっている[68]が、この場合にもX、Y両チャンネルの合成特性と実測結果との一致性を検討した。この理由は、図5.23(b)と図5.22(b)の実測結果が同一の特性を別の側面から見た特性であり、さらに両特性に定性的矛盾が無いことから判断すると、図5.22(b)と同様にこの場合にも過渡チャンネルと定常チャンネルの両方が関係している可能性が高いと考えられるからである。この様に、時空間視覚モデルを用いて異なった計算条件（形の検出、動きの検出、或いはどんな変化でも良い）でのコントラスト感度特性などを計算し実測結果と比較すれば、逆に実験中の被験者の判断基準（測定条件）を予測することができ、実測結果の意味をより正確に理解することが可能になる利点もある。

5.5.4 反応（知覚）時間特性の実測と理論の比較

瞬間提示画像に対する非定常時空間視覚モデルの時間応答特性を計算する。そして、その応答特性から反応時間（知覚時間）特性を導出し、実測結果と比較する。

5.5.4.1 観測状態動特性の影響

図5.24は、式(5.66)の差分方程式で表わされる観測状態の時間変化特性をパラメータ R_1 、 R_2 を変化させて計算した結果である。但し、差分方程式の目標値は $E(i) = 1$ とし、観測状態が振動せずにできるだけ早く目標値に到達する様に R_1 を R_2 より少し小さく設定（6種類）した。また、差分間隔は $\Delta t = 0.5 \text{ msec}$ である。図から分かるように、観測状態は R_1 、 R_2 が大きくなる程早く目標値に到達し、しかもオーバーシュートがほとんど無い特性が得られる。

図5.25、5.26は、観測状態の遷移特性が非定常時空間視覚モデルの応答特性に及ぼす影響を明らかにする為に、Xチャンネルの信号正弦波 f_s に対する評価関数値成分 I_{X2} （式(5.56)の第2項目）と最適観測状態の時間応答特性を各々計算した結果である。図中の破線は観測状態の動的変化特性を考慮しない場合、実線は考慮した場合であり、計算条件は、表示面

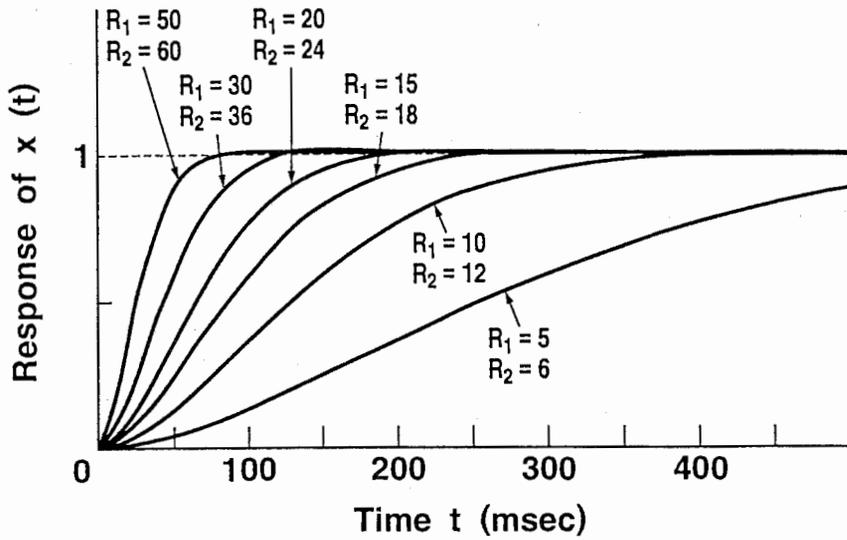


図 5.24 チャンネル中心周波数（観測状態）の変数 $x(t)$ の時間遷移特性（動特性）

Fig. 5.24 Transition properties (Dynamics) of the model's channel center frequency. (Parameter : R_1 、 R_2)

を表わす第 1 正弦波形の空間周波数を $f_1 = 0.5$ cpd、信号正弦波形の空間周波数を $f_s = 3.0$ cpd、提示時間 $T_p = 200$ msec とし、さらに表示画面の中心部と信号正弦波形の輝度変化最大位置が重なる様に視点位置を $\theta_r = 0^\circ$ 、位相 $\alpha_1 = 90^\circ$ に設定した。観測状態の変化特性を考慮しない場合は、評価関数値 I_{X2} が時刻 $t = 43$ msec から突然発生し時刻 $t = 287$ msec で突然消え、

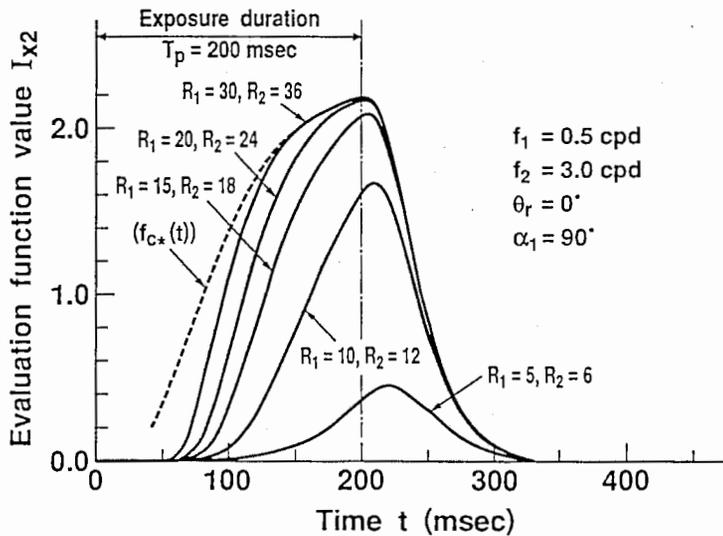


図 5.25 瞬間提示正弦波に対する信号用評価関数値 I_{X2} の時間応答特性

Fig. 5.25 Temporal responses of the model's evaluation function value I_{X2} for a presented signal.

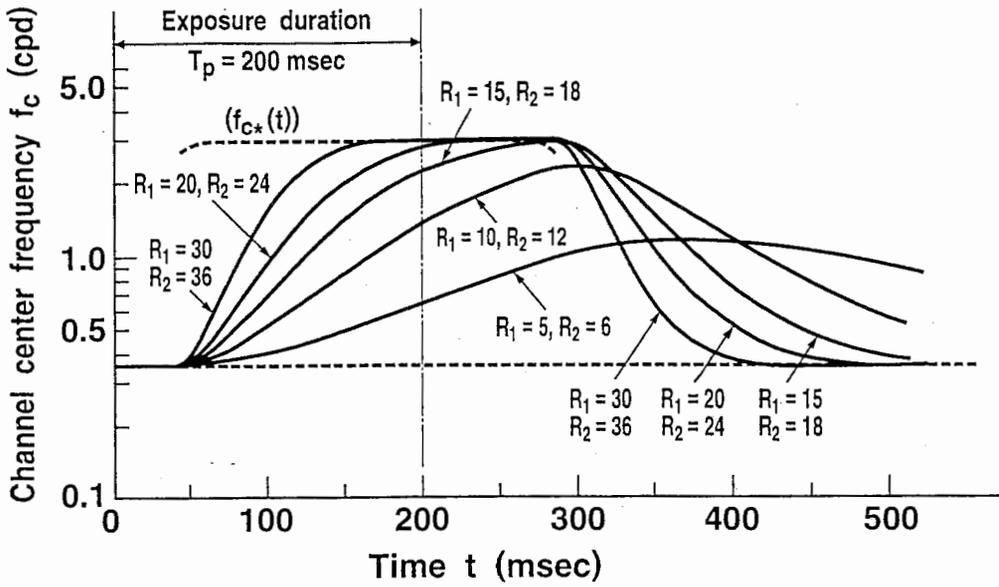


図 5.26 瞬間提示正弦波に対する最適観測状態の時間応答特性

Fig. 5.26 Temporal responses of the model's optimum channel center frequency to a flashed sine-wave.

最適観測状態もこの時間帯のみに信号正弦波の観測に適したチャンネル中心周波数 ($f_c = 3$ cpd) が出現し、それ以外は第1正弦波の観測に適したチャンネル中心周波数 ($f_c = 0.354$ cpd) になる。しかし、観測状態の動的変化特性を考慮した場合には、評価関数値やチャンネル中心周波数

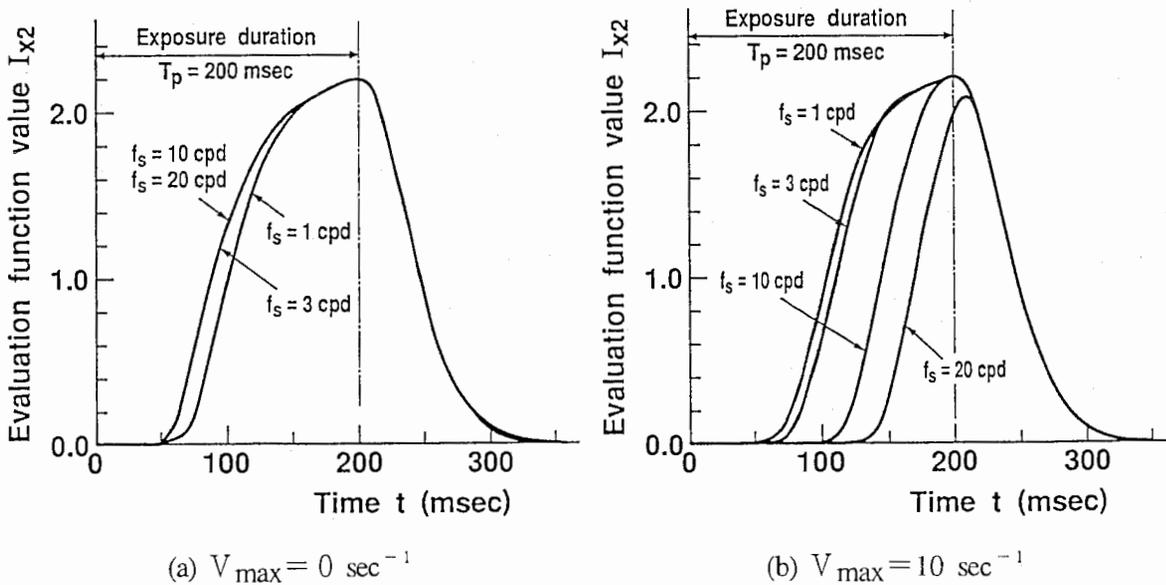


図 5.27 評価関数値 I_{X2} の時間応答特性に於ける V_{max} の影響

Fig. 5.27 Effect of V_{max} on temporal response of the model's evaluation function value I_{X2} .

が突然現れることはなく滑らかに変化する。また、 R_1 、 R_2 が大きくなる程変化が早く、観測状態の動的変化特性を考慮しない場合の特性（破線）に漸近し易くなり、破線で表わされた特性は目標値に相当しているのが分かる。

次に、観測状態の最大変化速度 V_{\max} の影響について検討する。図5.27(a)(b)は、 V_{\max} を考慮した場合と考慮しなかった場合のXチャネルの評価関数値 I_{X2} の時間応答特性を計算した結果である。計算条件は、定常正弦波形の空間周波数 $f_1 = 0.2$ cpd、提示時間 $T_p = 200$ msec、 $R_1 = 30$ 、 $R_2 = 36$ 、 $V_{\max} = 10 \text{ sec}^{-1}$ 、視点位置 $\theta_r = 0^\circ$ 、位相 $\alpha_1 = 90^\circ$ であり、信号正弦波の空間周波数 f_s をパラメータとして変化させた。また、信号正弦波のコントラスト値は、主観的コントラストを一定に保つ為に、各空間周波数に於いて得られるコントラスト閾値の1.5倍の値に設定した。 V_{\max} を考慮しない場合（図5.27(a)）は、信号正弦波の空間周波数が増加しても評価関数値 I_{X2} の時間応答特性にはほとんど差が生じない。しかし、 V_{\max} を考慮した場合（図5.27(b)）には、空間周波数 f_s が高くなる程時間応答波形に遅れが生じるのが分かる。以上の結果は、焦点調節機構の動特性に相当する観測状態遷移特性（ R_1 、 R_2 ）とその最大変化速度 V_{\max} を適切に設定すれば、空間周波数が高くなる程知覚時間或いは反応時間増加現象が非定常時空間視覚モデルから理論的に導出可能であることを意味する。

5.5.4.2 知覚時間の空間周波数特性

知覚時間 P_T （Perception Time）とは、信号正弦波形の提示開始時刻から視覚系が信号正弦波形を知覚（または検出）した時刻までの時間のことである。計算手順は以下の様になる。

- (1) 観測状態の動特性を考慮して、各時刻に於ける最適観測状態を計算する。
- (2) 最適観測状態をXチャネルの評価関数（式(5.56)）に代入し信号正弦波形のみに対する評価関数値（式(5.56)の第2項 I_{X2} ）の時間応答特性を計算する。
- (3) 画像提示開始時刻から評価関数値 I_{X2} が視覚モデルで設定されている閾値 $C_{th}^2 / 2$ に等しくなった時の時刻までの時間を求め、知覚時間 P_T とする。

以上の計算手順を用いて空間周波数 f_s と知覚時間 P_T の関係を本時空間視覚モデルから計算する。計算条件は反応時間測定実験[66]の測定条件にできるだけ合わせ、表示画面に相当する定常正弦波空間周波数 $f_1 = 0.2$ cpd、提示時間 $T_p = 100$ msec、視点位置 $\theta_r = 0^\circ$ 、位相 $\alpha_1 = 90^\circ$ 、信号正弦波形のコントラスト $A_2 / B = 3 \times T_h$ （ T_h は $T_p = 100$ msecの場合のコントラスト閾値）にした。 $f_1 = 0.2$ cpdに設定したのは、実験での表示面サイズ（ $5.3^\circ \times 3.8^\circ$ ）の広い方が0.2 cpdの正弦波形1周期にほぼ相当するからである。1例として、図5.28に観

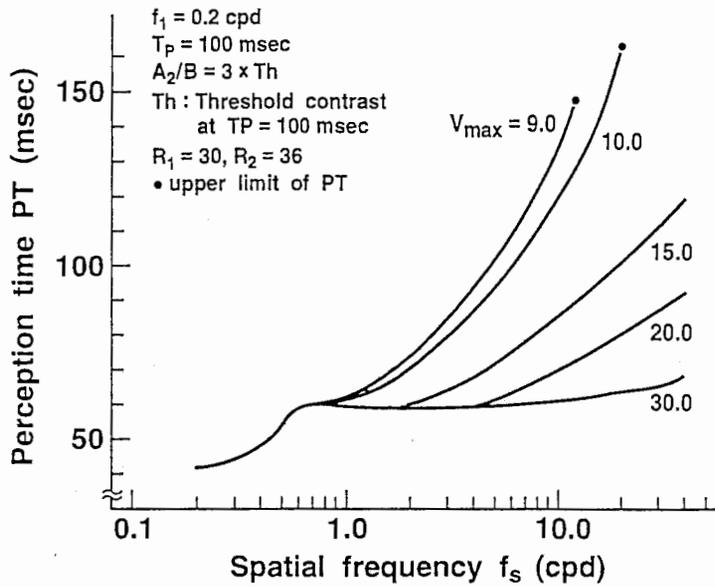


図 5.28 視覚モデルから導かれる知覚時間 P_T と空間周波数 f_s の理論的關係

Fig.5.28 Spatial frequency characteristics of perception time P_T derived from the vision model.

測状態遷移特性を $R_1 = 30$, $R_2 = 36$ 、最大変化速度 V_{max} をパラメータにした場合の計算結果を示す。図より、 $f_s = 0.8$ cpd 以上では観測状態の最大変化速度 V_{max} が小さくなるほど、また空間周波数 f_s が高くなるほど知覚時間は長くなり、 $f_s = 0.8$ cpd 以下では V_{max} とは無関係に空間周波数 f_s が低くなるほど知覚時間は短くなるのが分かる。 $f_s = 0.8$ cpd 以下で知覚時間が V_{max} に無関係となる理由は、目標値となる信号正弦波形に対する観測状態と観測状態の初期値との差が小さすぎる為、観測状態の移動速度が小さく V_{max} に達しなかったからである。

5.5.4.3 反応時間の空間周波数特性

図 5.29(a) は、信号正弦波のコントラスト A_2/B をパラメータ（○： $3.0 \times T_h$ 、□： $4.5 \times T_h$ 、△： $6.0 \times T_h$ ）にして実測した反応時間の実測結果[66]と非定常時空間視覚モデルの Xチャンネルから計算した反応時間（実線で表示）を比較した図である。但し、実測結果と計算結果とが良く一致する様に、観測状態遷移特性を $R_1 = 30$, $R_2 = 36$ 、最大変化速度 $V_{max} = 10$ として計算した。また、信号正弦波形を提示した時刻から被験者が提示正弦波を知覚し、知覚したことを知らせる為のスイッチを押すまでの時間として定義される反応時間 R_T (Reaction Time) (=知覚時間 P_T + スイッチを押すまでの時間 S_T) のうち、スイッチを押すまでの時間 S_T が一定であると仮定すると、計算した知覚時間に一定のバイアス時間を加えれば理論的な

反応時間 R_T を求めることができると考えられる。この図に於いても、計算した知覚時間に一定のバイアス時間を加えて反応時間とした。実測結果では、コントラスト A_2/B に関係なく、空間周波数が高くなるほど反応時間が単調に増加すること、およびコントラストが大きくなるほど反応時間が減少することが分かる。一方、非定常時空間視覚モデルから計算した反応時間（知覚時間 + 適当なバイアス時間）と実測値との比較では、コントラスト $A_2/B = 3.0 \times T_h$ の場合は実測値と計算値とは良く一致するが、コントラストが大きくなると計算結果の全体的な傾向は実測結果と良く一致するものの、計算結果の反応時間の方がわずかに長くなる結果となった。但し、理論的反應時間を計算する為のバイアス時間は約 220.8 msec にした。コントラストの増加と共に理論値と実測値の一致性が悪くなる原因を本非定常時空間視覚モデルの観点から考察すると、観測状態遷移特性かその最大変化速度 V_{max} 、または両方がコントラストの大きさに依存して変化する可能性が考えられる。また、信号を知覚した後スイッチを押す命令が神経を通じて筋肉に伝えられ、実際に筋肉を動かすのに必要な時間 S_T は約 200 msec 程度であることも予想できた。

図 5.29 (b) は、信号正弦波形のコントラストを空間周波数に無関係に $A_2/B = 0.5$ 一定、かつ提示時間を $T_p = 50$ msec にして実測した反応時間特性 [67] と非定常時空間視覚モデルの X チャンネルからの計算結果（実線で表示）とを比較した図である。ただし、提示時間 $T_p = 50$

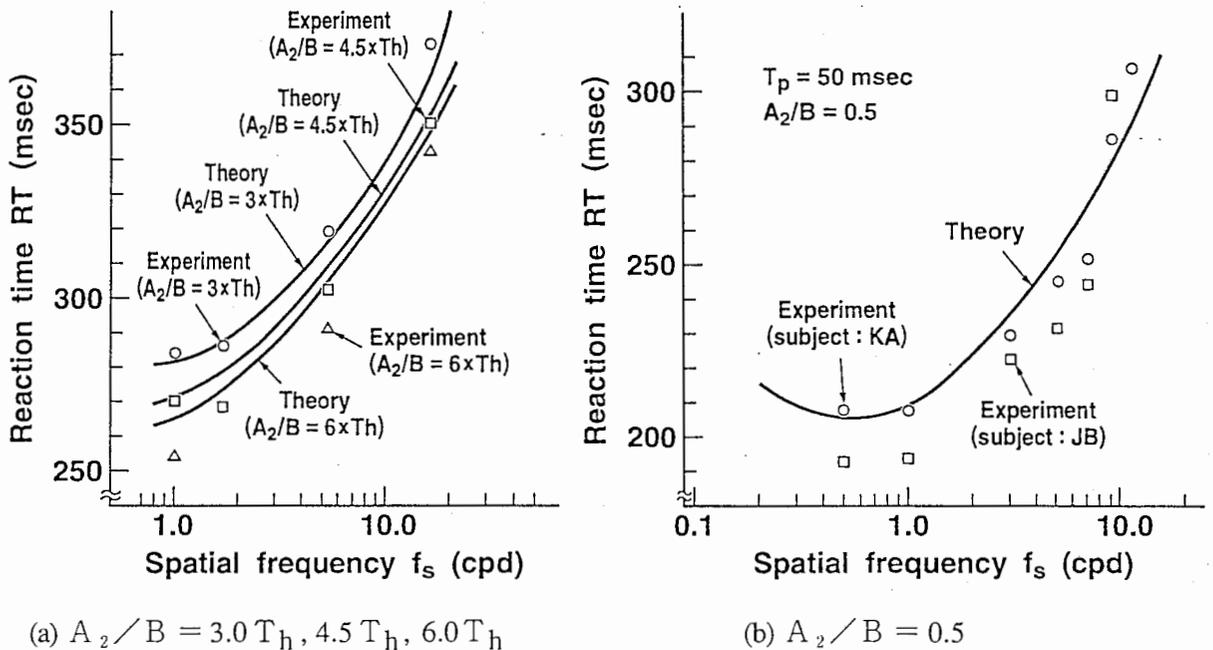


図 5.29 反応時間の実測値と視覚モデルからの理論値との比較

Fig. 5.29 Comparison of measured simple reaction time properties with theoretical ones derived from the model.

msec 以外の計算条件は図 5.29(a) と同じであり、計算した知覚時間 P_T にバイアス時間 S_T (193 msec) を加えて反応時間 R_T の理論値とした。実測結果は、空間周波数 $f_s = 1.0$ cpd 以下ではほぼ同じ反応時間であるが、 $f_s = 1.0$ cpd 以上では空間周波数の増加と共に反応時間が増加する結果が得られ、図 5.29(a) の小さなコントラストの場合よりも反応時間が早くなる。計算結果も実測結果と良く一致しており、この非定常時空間視覚モデルを使えば、信号正弦波形のコントラストの大小に関係なく視覚系の反応時間特性を定量的にシミュレートできることが分かる。また、提示正弦波形を知覚してからスイッチを押すまでの時間 S_T も図 5.29(a) の計算結果とほぼ同様に 200 msec 程度であり、一貫性のとれた結果が得られた。

5.5.5 考察（反応時間特性の解釈について）

空間周波数が高くなるほど反応時間が増加する理由については、従来の考え方では視覚系の X チャンネル（比較的高い空間周波数、低い時間周波数で感度が高い）と Y チャンネル（低い空間周波数、高い時間周波数で感度が高い）の信号伝達時間の差が原因であると説明される場合が多かった。即ち、空間周波数が高い場合には X チャンネル、空間周波数が低い場合には Y チャンネルが支配的となり、X チャンネルでの信号伝達速度は Y チャンネルの信号伝達速度よりも遅い為、空間周波数が高くなると知覚時間が増加し、その結果反応時間が増加する[66][67][69]という考え方である。従来の説明が正しいとすると、X チャンネルあるいは Y チャンネルが支配している空間周波数領域では各々信号伝達速度がほぼ等しい筈であるから、各々の空間周波数領域での知覚時間すなわち反応時間はほとんど同一となり、チャンネルの切り替わる空間周波数を境として反応時間特性はステップ状の不連続関数になると考えることができる。しかし、実測結果ではこの様な不連続点は見られず、連続的に変化する結果となり、両チャンネルの信号伝達速度の差では説明しきれない。また、ある空間周波数を境にして両チャンネルが瞬間的に切り替わるのではなく、遷移領域というある帯域幅を持った空間周波数領域で両チャンネルが切り替わって行き、遷移領域を越えるとほぼ一定の反応時間になるとする考え方[70]も示されている。この場合にも遷移領域内に於いては空間周波数の増加と共に反応時間が増加する特性であり、この遷移領域での反応時間特性の説明を両チャンネルの信号伝達速度の差で説明するのは困難と考えられる。

一方、非定常時空間視覚モデルを用いた計算では、X チャンネルの応答特性から計算した反応時間（知覚時間 + バイアス時間）特性は実測結果と比較的良く一致する果を得た。非定常時空間視覚モデルの立場から反応時間特性の生じる理由を考えると、視覚系の画像観測機構の動特性（主に水晶体の厚み変化の遷移特性と変化速度の上限）に相当する視覚モデルの観測状態の動的遷移特性と観測状態の最大変化速度の存在が原因であると予想でき、従来の考え方とは全

く異なる別の可能性が考えられる。提示画像までの視離が一定でも提示画像の空間周波数構造に依存して眼の焦点調節状態が変化することは第3章でも述べたが、反応時間の実測結果にも視覚系の画像観測機構の動特性が何等かの影響を及ぼしている可能性は高いと考えられる。

5.6 むすび

視覚系画像観測機構の基本現象（ボケと視野の相互依存特性）に着目して定式化した従来の静止画像用視覚モデルに、網膜神経節細胞であるX、Y、W細胞の特性を組み込むことにより、形状知覚に適したXチャンネルと動き知覚に適したYチャンネルから構成される新しい時空間視覚モデルを構築した。そして、本時空間視覚モデルを定常的時間変化パターンを特徴とする3種類（Sine, Alternate & ON-OFF type）のフリッカー正弦波とドリフト正弦波に適用し、視覚モデルの視知覚応答特性（コントラスト感度特性）と実測結果との比較を行ったところ、以下の結果の様に本時空間視覚モデルの正当性・有効性が検証された。

（フリッカー正弦波に対する結果）

- (1) Sine type フリッカー正弦波に対するコントラスト感度時空間周波数特性の実測結果は時空間視覚モデルのX、Yチャンネルから得られるコントラスト感度時空間周波数特性の合成特性として理論的に再現できる。ただし、画面のどんな変化でも良いという判断基準を用いた。
- (2) AlternatetypeとON-OFF type フリッカー正弦波に対して時空間視覚モデルのX及びYチャンネルから理論的に計算したコントラスト感度時間周波数特性は、フリッカータイプの差に依存して生じる感度特性の違い（実測結果）を正確に再現する。
- (3) Yチャンネルからの応答出力値（評価関数値）が閾値 $C_{th}^2/2$ （人間が知覚できる最小値）以下になった状態としてフリッカー融合現象が理論的に扱える。

（ドリフト正弦波に対する結果）

- (1) ドリフト正弦波に対して得られている代表的な2種類のコントラスト感度空間周波数特性の実測結果が本時空間視覚モデルのXとYチャンネルから理論的に導出できる。
- (2) 最適ドリフト速度の空間周波数特性は、Yチャンネル（動きに注目）では実測結果と計算結果とが良く一致する。Xチャンネル（形に注目）では実測結果と計算結果とは一致しないが、わずかな修正により両者が一致する可能性のあることを考察した。
- (3) ドリフト方形波の見え方特性を理論的に検討したところ、ドリフト速度が速くなると画像の空間解像度は犠牲にしたとしても視野は広くして観測することが予測できた。この予測は

我々の経験則にも合致する。

さらに、瞬間提示画像の様な非定常時間変化画像に対する視知覚応答も正確に再現可能な非定常時空間視覚モデルに拡張した。具体的には、X、Yチャンネルの時間周波数ゲイン特性（実測可能）とヒルベルト変換を用いて推定した位相特性とを組み合わせることで計算した両チャンネルの時間インパルス応答と観測状態の動的遷移特性およびその最大変化速度の限界を時空間視覚モデルに導入することにより実現されている。本非定常時空間視覚モデルを用いて瞬間提示正弦波形に対するコントラスト閾値特性、コントラスト感度特性、反応時間特性を計算したところ、以下の様に実測結果と良く一致し、本非定常時空間視覚モデルの有効性が示された。

- (1) XとYチャンネルの合成特性として計算したコントラスト閾値特性は、提示時間が短い領域では、 $(\text{コントラスト閾値}) \times (\text{提示時間 } T_p)^{0.864} = \text{一定}$ の関係を満たし（実測では T_p のべき指数は0.7）、提示時間が長い領域では提示時間に関係なく一定の閾値となる。この関係は、閾値の値が全体的に低い方へシフトしていることを除けば実測結果と良く一致する。さらに、臨界提示時間に関しても理論値と実測値はかなり良く一致する。
- (2) XとYチャンネルの合成特性として計算したコントラスト感度空間周波数特性は、短い提示時間では低域通過型、提示時間が長くなると帯域通過型に変化する特性となり実測結果と良く一致する。
- (3) 空間周波数の増加に伴って反応時間（知覚時間＋スイッチを押すまでの時間）が増加する特性が理論的に導出でき、実測結果とも良く一致する。これは、反応時間特性の生じる原因が従来から可能性として考えられてきた視覚系X、Yチャンネルの信号伝達速度の差ではなく、全く異なる原因（観測状態の動的遷移特性およびその最大変化速度の限界）が可能性として考えられることを示唆するものである。
- (4) 信号正弦波のコントラストが大きくなると反応時間が減少する特性が理論的に導出でき、実測結果とも良く一致する。
- (5) 画像を知覚してから筋肉を動かしてスイッチを押すまでの時間が約200 msec程度であることを理論的に予測した。

第6章

運動検出の為の時空間視覚モデル

～ 運動検出モデルへの拡張 ～

あらまし

時空間視覚モデルがコンピュータビジョンへも容易に応用可能であることを示す1例として、本時空間視覚モデルに運動検出機構を組み込むことにより、視知覚応答特性（見え方特性、コントラスト閾値特性、コントラスト感度特性などの知覚特性）の理論的再現と運動速度検出の両方が実現可能な新しい運動検出モデルの定式化を行った。具体的定式化においては、時空間視覚モデルの動き知覚チャンネル（Yチャンネル）信号を時空間解析信号として表現し、この時空間解析信号の実数部から運動方向の決定に寄与する運動印象を、位相の時間微分と空間微分の比から速度値が推定できる構成となっている。そして、本運動検出モデルからドリフト正弦波のコントラスト感度がフリッカー正弦波の2倍になる特性が理論的に再現できること、また3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形に対しては3種類の見え方の存在（どの正弦波に注目するかに依存して3つの最適観測状態が存在する）が理論的に導出でき、各状態からは正しい運動方向が検出できること、さらに少しボカして観測させることにより正しい速度値も計算可能であることが示され、本モデルの有効性・正当性が検証できた。

6.1 まえがき

コンピュータビジョンの分野に於いて、運動速度（オプティカルフロー）の検出は重要な基礎技術として今まで多くの研究が行われてきた。運動速度検出に関する代表的な従来の研究例としては、特徴点間の対応関係（マッチング）を基にして計算する方法[71]や、入力画像に視覚系での処理を模擬した時空間フィルタを施し、その出力を利用して物体の速度（速さと向き）を計算する運動検出モデルなどが数多く提案されている[47][48][49][50][51]。しかし、これらの運動検出モデルでは、フリッカーやドリフト画像などに対して視覚系がどのような時空間視覚知覚応答を出力するかについての基本的な情報（例えば、見え方特性、感度特性、時空間的な相互依存特性など）を得ることは困難であり、運動視覚モデルという立場から考えると不十分である。一方、本論で構築した時空間視覚モデルは静止画像や動画像に対する視覚系の視覚知覚応答特性（見え方特性、コントラスト閾値特性、コントラスト感度特性などの知覚特性）を理論的に再現する能力を持つが、運動速度の検出は行なうことができなかった。

本章では、時空間視覚モデルがコンピュータビジョンへも容易に応用可能であることを示す1例として、本時空間視覚モデルに運動検出機構を組み込むことにより、視覚知覚応答特性の理論的再現と運動速度の計算の両方が実現可能な新しい運動検出モデルの定式化が行なえることを示す。そして、この運動検出モデルを利用すれば、フリッカー正弦波とドリフト正弦波に対するコントラスト感度の違いの理論的再現や、多重運動（透明視：Transparency）の検出及びその見え方特性の解析などへの応用が可能であることを示し、本運動検出モデルの有効性・正当性の検証を行う。

6.2 運動検出モデルの定式化

従来の運動検出モデルに用いられている運動検出機構を解析信号の立場から整理し、新しい運動検出モデルの定式化を行う。但し単純化の為に、空間的には1次元信号を扱う。

6.2.1 解析信号表現を用いた運動検出機構

動画像を時間領域及び空間領域でフーリエ変換（時空間フーリエ変換）し、時空間周波数領域でその動画像の特徴を調べて見ると、動画像のなかで左方向に運動している成分は時空間周波数領域の第1と第3象限にその周波数成分が現われ、右方向に運動している成分は時空間周波数領域の第2と第4象限にその周波数成分が現われることがわかる。即ち、時空間周波数領域の第1と第3象限または第2と第4象限のみを分離すれば、基本的には左右方向の運動成分が検出できることになる。この様な時空間周波数領域の象限の分離は解析信号[72]を用いると

簡単に実現できる。

動画像信号を $f(r, t)$ とすると、空間的な解析信号 $Af_x(r, t)$ は以下の様に表現できる。

$$Af_x(r, t) = f(r, t) + j f_x(r, t) \quad (6.1)$$

但し、 $f_x(r, t)$ は $f(r, t)$ を空間領域に於いてヒルベルト変換した関数であり、各々の空間的フーリエ変換を $F(\omega_s, t)$, $F_x(\omega_s, t)$ とすると次の関係で結ばれている。

$$F_x(\omega_s, t) = -j \operatorname{sgn}(\omega_s) F(\omega_s, t) \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(\omega_s) &= 1 & (\omega_s > 0) \\ &= 0 & (\omega_s = 0) \\ &= -1 & (\omega_s < 0) \end{aligned}$$

従って、解析信号の空間的フーリエ変換 $AF_x(\omega_s, t)$ は

$$\begin{aligned} AF_x(\omega_s, t) &= F(\omega_s, t) + j F_x(\omega_s, t) \\ &= [1 + \operatorname{sgn}(\omega_s)] F(\omega_s, t) \end{aligned} \quad (6.3)$$

と表現され、正の空間周波数領域のみで入力信号のスペクトル成分が存在することが分かる。即ち、正の空間周波数領域のみを分離することが可能となる。さらに、信号 $Af_x(r, t)$ を時間的な解析信号 $Af(r, t)$ (時空間解析信号) で表現すると以下の様になる。

$$Af(r, t) = Af_x(r, t) \pm j Af_{xt}(r, t) \quad (6.4)$$

$$Af_{xt}(r, t) = f_t(r, t) + j f_{xt}(r, t) \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \therefore Af(r, t) &= f(r, t) - \{\pm f_{xt}(r, t)\} + j \{f_x(r, t) \pm f_t(r, t)\} \\ &= f_R(r, t) + j f_I(r, t) \end{aligned} \quad (6.6)$$

但し、 $Af_{xt}(r, t)$, $f_t(r, t)$, $f_{xt}(r, t)$ は各々 $Af_x(r, t)$, $f(r, t)$, $f_x(r, t)$ を時間領域に於いてヒルベルト変換した関数であり、 $Af_x(r, t)$, $Af_{xt}(r, t)$ の時間的フーリエ変換を $AF_x(r, \omega_t)$, $AF_{xt}(r, \omega_t)$ とすると以下の関係がある。

$$AF_{xt}(r, \omega_t) = -j \operatorname{sgn}(\omega_t) AF_x(r, \omega_t) \quad (6.7)$$

従って、時空間解析信号 $Af(r, t)$ の時空間フーリエ変換を $AF(\omega_s, \omega_t)$ とすると

$$AF(\omega_s, \omega_t) = [1 \pm \operatorname{sgn}(\omega_s) \operatorname{sgn}(\omega_t) + \operatorname{sgn}(\omega_s) \pm \operatorname{sgn}(\omega_t)] F(\omega_s, \omega_t) \quad (6.8)$$

と表わされ、複号±が正の場合は時空間周波数領域の第1象限のみで、複号±が負の場合は時空間周波数領域の第4象限のみで $AF(\omega_s, \omega_t)$ は値を持つ。即ち、時空間解析信号表現を用いると左右方向に運動する成分を分離検出することが可能となる。同様に、時空間解析信号の実数部 $f_R(r, t)$ と虚数部 $f_I(r, t)$ の時空間フーリエ変換 $F_R(\omega_s, \omega_t)$, $F_I(\omega_s, \omega_t)$ は、

$$F_R(\omega_s, \omega_t) = [1 \pm \operatorname{sgn}(\omega_s) \operatorname{sgn}(\omega_t)] F(\omega_s, \omega_t) \quad (6.9)$$

$$F_I(\omega_s, \omega_t) = -j [\operatorname{sgn}(\omega_s) \pm \operatorname{sgn}(\omega_t)] F(\omega_s, \omega_t) \quad (6.10)$$

と表わされ、複号±が正の場合は時空間周波数領域の第1, 3象限のみで、複号±が負の場合

は時空間周波数領域の第2, 4象限のみで $F_R(\omega_s, \omega_t)$, $F_I(\omega_s, \omega_t)$ は値を持つ。即ち、時空間解析信号の実数部 $f_R(r, t)$ と虚数部 $f_I(r, t)$ を用いても左右方向に運動する成分を分離検出することが可能となり、位相が $\pi/2$ ずれていることが両者の違いである。従来の運動検出モデルでも実数部 $f_R(r, t)$ のみを用いた例がある[49]。

さらに、時空間解析信号は

$$Af(r, t) = A(r, t) \exp(j\theta(r, t)) \quad (6.11)$$

$$A^2(r, t) = f_R^2(r, t) + f_I^2(r, t) \quad (6.12)$$

$$\theta(r, t) = \text{Tan}^{-1} \{f_I(r, t) / f_R(r, t)\} \quad (6.13)$$

と極座標表現でき、振幅の2乗 $A^2(r, t)$ は従来の運動検出モデルではMotion Energyと呼ばれ、運動方向や速さの検出に利用されている[48][50]。一方、位相 $\theta(r, t)$ を空間微分、時間微分すると、各々時空間解析信号の局所空間周波数 ω_{is} 、瞬時時間周波数 ω_{it}

$$\begin{aligned} \omega_{is} &= \partial \theta(r, t) / \partial r \\ &= \frac{1}{A^2(r, t)} \left\{ \frac{\partial f_I(r, t)}{\partial r} f_R(r, t) - f_I(r, t) \frac{\partial f_R(r, t)}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \omega_{it} &= \partial \theta(r, t) / \partial t \\ &= \frac{1}{A^2(r, t)} \left\{ \frac{\partial f_I(r, t)}{\partial t} f_R(r, t) - f_I(r, t) \frac{\partial f_R(r, t)}{\partial t} \right\} \end{aligned} \quad (6.15)$$

を導出することができ、この両者から計算される速度 $v (= \omega_{it} / \omega_{is})$ も従来の運動検出モデルに利用されている[51]。以上の様に、時空間解析信号表現を用いると従来の運動検出モデルの運動検出機構の相互の関係が整理できる。

6.2.2 新しい運動検出モデルの定式化

上記の時空間解析信号表現を応用して、時空間視覚モデルを運動検出モデルに拡張する。速度検出という性格上、時空間視覚モデルの動き検出用チャンネル(Yチャンネル)の信号に対して時空間解析信号表現を行う。第5章でも述べた様に、脳へ伝達されるYチャンネル交流信号成分 $g_Y(R, t)$ は、初期観測画像交流信号成分 $g_s(R, t)$ と空間周波数特性(網膜特性) $H_Y(\omega_s)$ を表すインパルス応答 $h_Y(R)$ との畳み込み積分 $g_Y(R, t)$ を行い、さらに $g_Y(R, t)$ と時間周波数特性 $H_B(\omega_t)$ を表すインパルス応答 $h_B(t)$ との畳み込み積分で表される。従って、Yチャンネル交流信号成分 $g_Y(R, t)$ の時空間解析信号表現 $A g_Y(R, t)$ は式(6.6)より次式となる。

$$\begin{aligned} A g_Y(R, t) &= g_Y(R, t) - \{\pm g_{YX}(R, t)\} + j \{g_{YX}(R, t) \pm g_{Yt}(R, t)\} \\ &= \text{Re}\{A g_Y(R, t)\} + j \text{Im}\{A g_Y(R, t)\} \end{aligned} \quad (6.16)$$

(複号±の+：左方向運動検出用、複号±の-：右方向運動検出用)

$g_{YX}(R, t)$, $g_{Yt}(R, t)$ は各々Yチャネル交流信号成分 $g_Y(R, t)$ の空間領域と時間領域に於けるヒルベルト変換を意味し、次の様に表わせる。

$$g_{YX}(R, t) = \int_{t-\infty}^t h_B(t-t') g_{yX}(R, t') dt' \quad (6.17)$$

$$g_{yX}(R, t) = \int_{s-\infty}^s \overline{h_Y}(R-R') g_s(R', t) dR' \quad (6.18)$$

$$g_{Yt}(R, t) = \int_{t-\infty}^t \overline{h_B}(t-t') g_Y(R, t') dt' \quad (6.19)$$

$$g_Y(R, t) = \int_{s-\infty}^s h_Y(R-R') g_s(R', t) dR' \quad (6.20)$$

また、 $g_{YX}(R, t)$ は両空間でのヒルベルト変換を意味し、次式で表わされる。

$$g_{YX}(R, t) = \int_{t-\infty}^t \overline{h_B}(t-t') g_{yX}(R, t') dt' \quad (6.21)$$

但し、 $\overline{h_Y}(R)$ はYチャネル空間周波数特性 $H_Y(\omega_s)$ のインパルス応答 $h_Y(R)$ の空間的ヒルベルト変換であり、 $\overline{h_B}(t)$ はYチャネル時間周波数特性 $H_B(\omega_t)$ のインパルス応答 $h_B(t)$ の時間的ヒルベルト変換である。従って、 $\overline{H_Y}(\omega_s)$, $\overline{H_B}(\omega_t)$ を各々 $\overline{h_Y}(R)$, $\overline{h_B}(t)$ のフーリエ変換とすると、周波数空間では以下の関係が成立する。

$$\overline{H_Y}(\omega_s) = -j \text{sgn}(\omega_s) H_Y(\omega_s) \quad (6.22)$$

$$\overline{H_B}(\omega_t) = -j \text{sgn}(\omega_t) H_B(\omega_t) \quad (6.23)$$

以上のYチャネル信号の時空間解析信号表現 $A g_Y(R, t)$ は図6.1のYチャネルのフィルター構成で実現でき、図中のA、Bには各々時空間解析信号 $A g_Y(R, t)$ の実数部と虚数部の信号が出力される。解析信号の実数部や虚数部自体でも時空間周波数領域の傾いた領域（第1, 3象限または第2, 4象限）を分離抽出できることは、これらの時空間フィルター構成の受容野構造が時空間領域で傾いており、さらに実数部と虚数部は位相が $\pi/2$ ずれた時空間フィルターからの出力であることを意味している。この位相が $\pi/2$ ずれた2つの時空間フィルターはQuadrature Pairと呼ばれる。実際の第1次視覚野にもこの様な時空間的に傾いた受容野を持つ単純型細胞が存在することは既に発見されており[73][74][75]、実際の視覚系でも運動検出モデルと同様な機構で運動検出が行われていることの証拠となっている。また、視覚系には方向選択性を持った独立の運動検出機構(Module)が存在していることも分かっている[76][77][78]。従って、式(6.16)より右方向運動検出信号 $g_{YR}(R, t)$ 、左方向運動検出信号 $g_{YL}(R, t)$ は

$$\begin{aligned} g_{YR}(R, t) &= g_{YR1}(R, t) + j g_{YR2}(R, t) \\ &= g_Y(R, t) + g_{YX}(R, t) + j \{g_{YX}(R, t) - g_{Yt}(R, t)\} \end{aligned} \quad (6.24)$$

$$g_{YL}(R, t) = g_{YL1}(R, t) + j g_{YL2}(R, t)$$

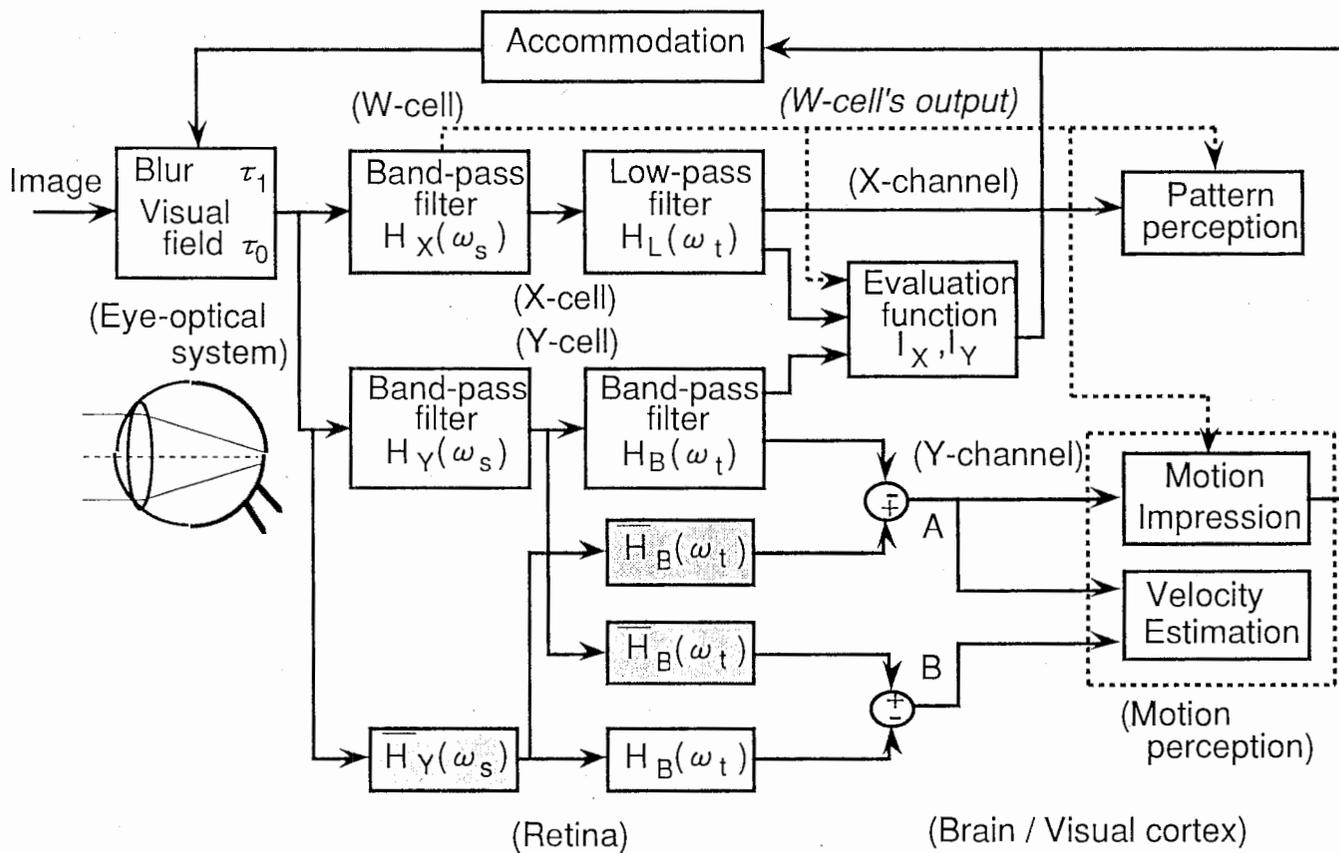


図 6.1 運動検出モデルのブロック図

Fig. 6.1 Block diagram of the spatio-temporal human vision model with motion detection mechanism.

$$= g_Y(R, t) - g_{YXt}(R, t) + j \{g_{YX}(R, t) + g_{Yt}(R, t)\} \quad (6.25)$$

と表わせる。

次に、この運動検出モデルでは評価関数値 I_Y と運動印象 MI と速度の計算が行われる。図からわかる様に、この様な時空間フィルター構成にしても Y チャンネルの評価関数 I_Y の計算には何の影響もなく、時空間視覚モデルの特徴がそのまま保存された状態で運動検出モデルに拡張されている。運動印象 MI は提示画像に含まれている運動成分から受ける印象の強さ、または運動に対する知覚量（一種の感覚的な量）として定義され、従来モデルで使われている Motion Energy の代わりに時空間解析信号の実数部を用いて計算される。 Y チャンネルの評価関数 I_Y との違いは、評価関数値が提示画像の時間的変化（運動しているかどうかに関係なく単なる画像の時間的変化を意味する）を扱っているのに対し、運動印象は運動のみから感じる知覚量を扱っている点である。しかし、両方とも印象の強さ（知覚量）という点に於いては共通なので、以下の様に評価関数と同じ計算法を用いる。

$$MI_R = \frac{1}{B^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{G(R - r_a, \tau_s)} |g_{YR1}(R, t)|^2 dR \quad (6.26)$$

$$MI_L = \frac{1}{B^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{G(R - r_a, \tau_s)} |g_{YL1}(R, t)|^2 dR \quad (6.27)$$

MI_R , MI_L は各々右方向運動印象、左方向運動印象であり、運動印象の大きい方向が最終的な運動方向として出力される。また、運動速度は時空間解析信号の位相から計算される。右方向運動検出信号 $g_{YR}(R, t)$ の位相を $\theta_R(R, t)$ 、左方向運動検出信号 $g_{YL}(R, t)$ の位相を $\theta_L(R, t)$ とすると、式(6.13)より次式となる。

$$\theta_R(R, t) = \text{Tan}^{-1} \{g_{YR2}(R, t) / g_{YR1}(R, t)\} \quad (6.28)$$

$$\theta_L(R, t) = \text{Tan}^{-1} \{g_{YL2}(R, t) / g_{YL1}(R, t)\} \quad (6.29)$$

従って、右方向速度 v_R 、左方向速度 v_L は式(6.14) (6.15) より以下の様に表現できる。

$$v_R = \omega_{Rit} / \omega_{Ris} \quad , \quad v_L = \omega_{Lit} / \omega_{Lis} \quad (6.30)$$

$$\omega_{Ris} = \partial \theta_R(R, t) / \partial r, \quad \omega_{Rit} = \partial \theta_R(R, t) / \partial t \quad (6.31)$$

$$\omega_{Lis} = \partial \theta_L(R, t) / \partial r, \quad \omega_{Lit} = \partial \theta_L(R, t) / \partial t \quad (6.32)$$

時空間視覚モデルでは拘束条件（式(2.29)）の下で X , Y チャンネルの評価関数が極大になる時の観測状態を最適状態としたが、この運動検出モデルでは X , Y チャンネルの評価関数だけでなく、左右方向運動印象の極大化によっても最適観測状態が推定できる構成になっている。こ

うすることにより、形や動きに対する最適観測状態以外に、運動を観測する為にも最適した観測状態が推定できることになる。

6.3 複合ドリフト正弦波に対する運動検出特性

本運動検出モデルの有効性・正当性を検証する為には、本モデルを3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形に適用し、評価関数と運動印象の定式化そして速度の検出を行う。そして、フリッカー正弦波とドリフト正弦波の感度の違いや複合ドリフト正弦波の基本的見え方特性（運動視知覚特性）が本運動検出モデルから理論的に再現でき、3種類の運動成分の速度も正しく検出できることを示す。

6.3.1 評価関数、運動印象、速度の導出

3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形 $f(r, t)$ は、3種類の空間周波数と3種類のドリフト周波数（時間周波数）を持つ正弦波が右方向または左方向に等速度で移動する画像であり、次式で表現できる。

$$f(r, t) = B + A_1 \cos(\omega_{S1} r + \omega_{t1} t + \theta_{r1}) + A_2 \cos(\omega_{S2} r + \omega_{t2} t + \theta_{r2}) + A_3 \cos(\omega_{S3} r + \omega_{t3} t + \theta_{r3}) \quad (6.33)$$

A_1, A_2, A_3 : 第1、第2、第3正弦波の振幅

B : 複合正弦波のバイアス（平均値）

$\omega_{S1}, \omega_{S2}, \omega_{S3}$: 第1、第2、第3正弦波の空間角周波数

$\omega_{t1}, \omega_{t2}, \omega_{t3}$: 第1、第2、第3正弦波の時間角周波数

（正：左方向ドリフト、負：右方向ドリフト）

θ_{r1} : 視点位置（提示画像の位相）

$$\theta_{r2} = \omega_{S2} \theta_{r1} / \omega_{S1} + \alpha_2, \quad \theta_{r3} = \omega_{S3} \theta_{r1} / \omega_{S1} + \alpha_3$$

α_2, α_3 : 第1正弦波と第2正弦波、及び第1正弦波と第3正弦波の位相差

複合ドリフト正弦波を運動検出モデルが観測した時のXチャンネルおよびYチャンネルの評価関数 I_X, I_Y はそれぞれ次式となる（時空間視覚モデルを用いても同じ結果が得られる）。

$$\begin{aligned} I_X = & (A_1^2 / B^2) I_{D_1} H_X^2(\omega_{S1}) H_L^2(\omega_{t1}) \\ & + (A_2^2 / B^2) I_{D_2} H_X^2(\omega_{S2}) H_L^2(\omega_{t2}) + (A_3^2 / B^2) I_{D_3} H_X^2(\omega_{S3}) H_L^2(\omega_{t3}) \\ & + 2 I_{D_{12}} H_X(\omega_{S1}) H_X(\omega_{S2}) H_L(\omega_{t1}) H_L(\omega_{t2}) \\ & + 2 I_{D_{23}} H_X(\omega_{S2}) H_X(\omega_{S3}) H_L(\omega_{t2}) H_L(\omega_{t3}) \\ & + 2 I_{D_{31}} H_X(\omega_{S3}) H_X(\omega_{S1}) H_L(\omega_{t3}) H_L(\omega_{t1}) \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$\begin{aligned}
 I_Y = & (A_1^2/B^2) I_{D_1} H_Y^2(\omega_{S1}) H_B^2(\omega_{t1}) \\
 & + (A_2^2/B^2) I_{D_2} H_Y^2(\omega_{S2}) H_B^2(\omega_{t2}) + (A_3^2/B^2) I_{D_3} H_Y^2(\omega_{S3}) H_B^2(\omega_{t3}) \\
 & + 2 I_{D_{1_2}} H_Y(\omega_{S1}) H_Y(\omega_{S2}) H_B(\omega_{t1}) H_B(\omega_{t2}) \\
 & + 2 I_{D_{2_3}} H_Y(\omega_{S2}) H_Y(\omega_{S3}) H_B(\omega_{t2}) H_B(\omega_{t3}) \\
 & + 2 I_{D_{3_1}} H_Y(\omega_{S3}) H_Y(\omega_{S1}) H_B(\omega_{t3}) H_B(\omega_{t1}) \quad (6.35)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{D_i} = & \exp(-2 \tau_0 \omega_{Si}^2) \sinh\{\omega_{Si}^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \times [\exp\{\omega_{Si}^2(\tau_0 - \tau_1)\} - \cos\{2(\omega_{ti}t + \theta_{ni})\} \exp\{-\omega_{Si}^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (6.36) \\
 & (i = 1 \sim 3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{D_{1_2}} = & (A_1 A_2/B^2) \exp\{-\tau_0(\omega_{S1}^2 + \omega_{S2}^2)\} \sinh\{\omega_{S1} \omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \times [\cos\{(\omega_{t1} - \omega_{t2})t + \theta_{r1} - \theta_{r2}\} \exp\{\omega_{S1} \omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & - \cos\{(\omega_{t1} + \omega_{t2})t + \theta_{r1} + \theta_{r2}\} \exp\{-\omega_{S1} \omega_{S2}(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (6.37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{D_{2_3}} = & (A_2 A_3/B^2) \exp\{-\tau_0(\omega_{S2}^2 + \omega_{S3}^2)\} \sinh\{\omega_{S2} \omega_{S3}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \times [\cos\{(\omega_{t2} - \omega_{t3})t + \theta_{r2} - \theta_{r3}\} \exp\{\omega_{S2} \omega_{S3}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & - \cos\{(\omega_{t2} + \omega_{t3})t + \theta_{r2} + \theta_{r3}\} \exp\{-\omega_{S2} \omega_{S3}(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (6.38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{D_{3_1}} = & (A_3 A_1/B^2) \exp\{-\tau_0(\omega_{S3}^2 + \omega_{S1}^2)\} \sinh\{\omega_{S3} \omega_{S1}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & \times [\cos\{(\omega_{t3} - \omega_{t1})t + \theta_{r3} - \theta_{r1}\} \exp\{\omega_{S3} \omega_{S1}(\tau_0 - \tau_1)\} \\
 & - \cos\{(\omega_{t3} + \omega_{t1})t + \theta_{r3} + \theta_{r1}\} \exp\{-\omega_{S3} \omega_{S1}(\tau_0 - \tau_1)\}] \quad (6.39)
 \end{aligned}$$

提示画像の形状情報または動き情報に注目して観測する時の時空間視覚モデルの各時刻に於ける最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として各々式(6.34)のXチャネルの評価関数 I_X または式(6.35)のYチャネルの評価関数 I_Y を極大化することで推定できる。

一方、右方向運動検出信号 $g_{YR}(R, t)$ の実数部 $g_{YR1}(R, t)$ と虚数部 $g_{YR2}(R, t)$ 、左方向運動検出信号 $g_{YL}(R, t)$ の実数部 $g_{YL1}(R, t)$ と虚数部 $g_{YL2}(R, t)$ は以下の様になる。

$$\begin{aligned}
 g_{YR1}(R, t) = & (1 - \omega_{t1}/|\omega_{t1}|) A_1 H_Y(\omega_{S1}) H_B(\omega_{t1}) G(R, \tau_S) I_{C1} \\
 & + (1 - \omega_{t2}/|\omega_{t2}|) A_2 H_Y(\omega_{S2}) H_B(\omega_{t2}) G(R, \tau_S) I_{C2} \\
 & + (1 - \omega_{t3}/|\omega_{t3}|) A_3 H_Y(\omega_{S3}) H_B(\omega_{t3}) G(R, \tau_S) I_{C3} \quad (6.40)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{C_i} = & \cos(\omega_{Si} \tau_0 R / \tau_S + \omega_{ti} t + \theta_{ni}) \exp(-\tau_1 \omega_{Si}^2) \\
 & - \cos(\omega_{ti} t + \theta_{ni}) \exp(-\tau_0 \omega_{Si}^2) \quad (i = 1 \sim 3) \quad (6.41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g_{YR2}(R, t) = & (1 - \omega_{t1}/|\omega_{t1}|) A_1 H_Y(\omega_{S1}) H_B(\omega_{t1}) G(R, \tau_S) I_{S1} \\
 & + (1 - \omega_{t2}/|\omega_{t2}|) A_2 H_Y(\omega_{S2}) H_B(\omega_{t2}) G(R, \tau_S) I_{S2} \\
 & + (1 - \omega_{t3}/|\omega_{t3}|) A_3 H_Y(\omega_{S3}) H_B(\omega_{t3}) G(R, \tau_S) I_{S3} \quad (6.42)
 \end{aligned}$$

$$I_{S_i} = \sin(\omega_{Si} \tau_0 R / \tau_S + \omega_{ti} t + \theta_{ni}) \exp(-\tau_1 \omega_{Si}^2)$$

$$-\sin(\omega_{ti}t + \theta_{ti}) \exp(-\tau_0 \omega_{si}^2)] \quad (i = 1 \sim 3) \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned} g_{YL1}(R, t) = & (1 + \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)A_1 H_Y(\omega_{s1}) H_B(\omega_{t1}) G(R, \tau_s) I_{C1} \\ & + (1 + \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)A_2 H_Y(\omega_{s2}) H_B(\omega_{t2}) G(R, \tau_s) I_{C2} \\ & + (1 + \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)A_2 H_Y(\omega_{s3}) H_B(\omega_{t3}) G(R, \tau_s) I_{C3} \end{aligned} \quad (6.44)$$

$$\begin{aligned} g_{YL2}(R, t) = & (1 + \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)A_1 H_Y(\omega_{s1}) H_B(\omega_{t1}) G(R, \tau_s) I_{S1} \\ & + (1 + \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)A_2 H_Y(\omega_{s2}) H_B(\omega_{t2}) G(R, \tau_s) I_{S2} \\ & + (1 + \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)A_2 H_Y(\omega_{s3}) H_B(\omega_{t3}) G(R, \tau_s) I_{S3} \end{aligned} \quad (6.45)$$

上記の式を用いると、式(6.26)(6.27)より左右方向の運動印象 MI_R , MI_L は次の様になる。

$$\begin{aligned} MI_R = & (1 - \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)^2 (A_1^2 / B^2) I_{D_1} H_Y^2(\omega_{s1}) H_B^2(\omega_{t1}) \\ & + (1 - \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)^2 (A_2^2 / B^2) I_{D_2} H_Y^2(\omega_{s2}) H_B^2(\omega_{t2}) \\ & + (1 - \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)^2 (A_3^2 / B^2) I_{D_3} H_Y^2(\omega_{s3}) H_B^2(\omega_{t3}) \\ & + 2(1 - \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)(1 - \omega_{t2}/|\omega_{t2}|) I_{D_{1,2}} H_Y(\omega_{s1}) H_Y(\omega_{s2}) H_B(\omega_{t1}) H_B(\omega_{t2}) \\ & + 2(1 - \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)(1 - \omega_{t3}/|\omega_{t3}|) I_{D_{2,3}} H_Y(\omega_{s2}) H_Y(\omega_{s3}) H_B(\omega_{t2}) H_B(\omega_{t3}) \\ & + 2(1 - \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)(1 - \omega_{t1}/|\omega_{t1}|) I_{D_{3,1}} H_Y(\omega_{s3}) H_Y(\omega_{s1}) H_B(\omega_{t3}) H_B(\omega_{t1}) \end{aligned} \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned} MI_L = & (1 + \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)^2 (A_1^2 / B^2) I_{D_1} H_Y^2(\omega_{s1}) H_B^2(\omega_{t1}) \\ & + (1 + \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)^2 (A_2^2 / B^2) I_{D_2} H_Y^2(\omega_{s2}) H_B^2(\omega_{t2}) \\ & + (1 + \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)^2 (A_3^2 / B^2) I_{D_3} H_Y^2(\omega_{s3}) H_B^2(\omega_{t3}) \\ & + 2(1 + \omega_{t1}/|\omega_{t1}|)(1 + \omega_{t2}/|\omega_{t2}|) I_{D_{1,2}} H_Y(\omega_{s1}) H_Y(\omega_{s2}) H_B(\omega_{t1}) H_B(\omega_{t2}) \\ & + 2(1 + \omega_{t2}/|\omega_{t2}|)(1 + \omega_{t3}/|\omega_{t3}|) I_{D_{2,3}} H_Y(\omega_{s2}) H_Y(\omega_{s3}) H_B(\omega_{t2}) H_B(\omega_{t3}) \\ & + 2(1 + \omega_{t3}/|\omega_{t3}|)(1 + \omega_{t1}/|\omega_{t1}|) I_{D_{3,1}} H_Y(\omega_{s3}) H_Y(\omega_{s1}) H_B(\omega_{t3}) H_B(\omega_{t1}) \end{aligned} \quad (6.47)$$

提示画像の運動情報に注目して観測する時の時空間視覚モデルの各時刻に於ける最適観測状態は、式(2.29)を拘束条件として式(6.46)(6.47)の左右方向運動印象 MI_R , MI_L を極大化することで推定できる。一方、左右方向速度 V_R , V_L は式(6.28)～(6.32)の手順に基づいて導出された以下の式を用いて計算することができる。

$$V_R = \omega_{Rit}^* / \omega_{Ris}^* \quad , \quad V_L = \omega_{Lit}^* / \omega_{Lis}^* \quad (6.48)$$

$$\omega_{Ris}^* = \{ \partial g_{YR2}(R, t) / \partial r \} g_{YR1}(R, t) - g_{YR2}(R, t) \{ \partial g_{YR1}(R, t) / \partial r \}$$

$$\omega_{Rit}^* = \{ \partial g_{YR2}(R, t) / \partial t \} g_{YR1}(R, t) - g_{YR2}(R, t) \{ \partial g_{YR1}(R, t) / \partial t \}$$

$$\omega_{Lis}^* = \{ \partial g_{YL2}(R, t) / \partial r \} g_{YL1}(R, t) - g_{YL2}(R, t) \{ \partial g_{YL1}(R, t) / \partial r \}$$

$$\omega_{Lit}^* = \{ \partial g_{YL2}(R, t) / \partial t \} g_{YL1}(R, t) - g_{YL2}(R, t) \{ \partial g_{YL1}(R, t) / \partial t \}$$

6.3.2 フリッカーとドリフト正弦波の感度特性の違いの証明

ドリフト正弦波のコントラスト感度はフリッカー正弦波の感度よりも2倍大きいことが実測されている[61][76]。時空間視覚モデルはフリッカー正弦波やドリフト正弦波に対するコントラスト感度特性を理論的に再現する能力を持っているが、両者の感度の違いは再現できなかった。その理由は、時空間視覚モデルではドリフト正弦波の運動としての性質が考慮できなかったからである。そこで、本運動検出モデルを用いれば、この2倍の感度差が再現できることを理論的に証明する。

フリッカー正弦波は左右方向に運動する2つのドリフト正弦波の和として表現できるから、式(6.33)で

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 = A/2 \quad (A_3 = 0), \\ \omega_{s1} &= \omega_{s2} = \omega_s \quad (\omega_{s3} = 0), \\ \omega_{t1} &= -\omega_{t2} = \omega_t \quad (\omega_t > 0) \quad (\omega_{t3} = 0), \\ \theta_{r1} &= \theta_{r2} = \theta_r \quad (\theta_{r3} = 0) \end{aligned}$$

とすれば良い。従って、Yチャンネル評価関数 I_{Yflick} 、運動印象 MI_{Rflick} (= MI_{Lflick}) は式(6.35)(6.46)(6.47)から以下の様になる。

$$\begin{aligned} I_{Yflick} &= (A^2/B^2)HY^2(\omega_s)HB^2(\omega_t)\cos^2(\omega_t t)\exp(-2\tau_0\omega_s^2) \\ &\quad \times \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}[\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ &\quad - \cos(2\theta_r)\exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \end{aligned} \quad (6.49)$$

$$\begin{aligned} MI_{Rflick} &= (A^2/B^2)HY^2(\omega_s)HB^2(\omega_t)\exp(-2\tau_0\omega_s^2) \\ &\quad \times \sinh\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}[\exp\{\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \\ &\quad - \cos\{2(\omega_t t + \theta_r)\}\exp\{-\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\}] \end{aligned} \quad (6.50)$$

コントラスト感度の最大値は評価関数値、運動印象が最大になる時刻 ($t=0$)、位相 ($\theta_r=90^\circ$) で得られるから、最大評価関数値 I_{Ymax} 、最大運動印象 MI_{Rmax} は

$$\begin{aligned} I_{Ymax} = MI_{Rmax} &= (A^2/B^2)HY^2(\omega_s)HB^2(\omega_t) \\ &\quad \times \exp(-2\tau_0\omega_s^2)\sinh\{2\omega_s^2(\tau_0 - \tau_1)\} \end{aligned} \quad (6.51)$$

となり、両者は等しくなる。従って、最適観測状態 τ_0^* 、 τ_1^* を代入し $I_{Ymax} = C_{th}^2/2$ 、 $MI_{Rmax} = C_{th}^2/2$ から計算されるコントラスト感度 S_{Iflick} と SM_{Iflick} は等しい。

$$\begin{aligned} S_{Iflick}^2 = SM_{Iflick}^2 &= (2/C_{th}^2)HY^2(\omega_s)HB^2(\omega_t) \\ &\quad \times \exp(-2\tau_0^*\omega_s^2)\sinh\{2\omega_s^2(\tau_0^* - \tau_1^*)\} \end{aligned} \quad (6.52)$$

一方、単一の左方向ドリフト正弦波の場合の評価関数 I_{Ydrift} 、運動印象 MI_{Ldrift} は

$$I_{Ydrift} = MI_{Rflick}, \quad MI_{Ldrift} = 4 MI_{Rflick} \quad (6.53)$$

となるので、同様にして計算できるコントラスト感度 $S_{I_{drift}}$, $S_{MI_{drift}}$ は次式となる。

$$S_{I_{drift}}^2 = S_{I_{flick}}^2 = S_{MI_{flick}}^2, \quad S_{MI_{drift}}^2 = 4 S_{I_{flick}}^2 = 4 S_{MI_{flick}}^2 \quad (6.54)$$

即ち、フリッカー正弦波の場合は評価関数、運動印象から計算した感度は等しいが、ドリフト正弦波の場合には、評価関数から計算した感度はフリッカーの時と同じであるのに対し、運動印象から計算した感度はフリッカーの場合の2倍となっている。以上の様に、本運動検出モデルの運動印象を利用した感度計算機構を追加すればフリッカー正弦波やドリフト正弦波の感度特性が再現できるだけでなく両者の感度値の違いも理論的に説明でき、より汎用的な視覚モデルに拡張されることが分かる。

6.3.3 多重運動検出特性の実測と理論の比較

3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形の基本的見え方特性（運動視知覚特性）が本運動検出モデルの応答から理論的に再現でき、3種類の運動成分の速度も検出できることを示す。

6.3.3.1 実測による多重運動見え方特性

3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形に対する視覚系の多重運動検出特性を実験により明確にする。実験装置は、計算機(SUN WorkStation)とフレームメモリと高解像度CRT (1024 × 1024 pixels, frame rate = 60 Hz, non-interlace) からなる。計算機で作成した複合ドリフト正弦波

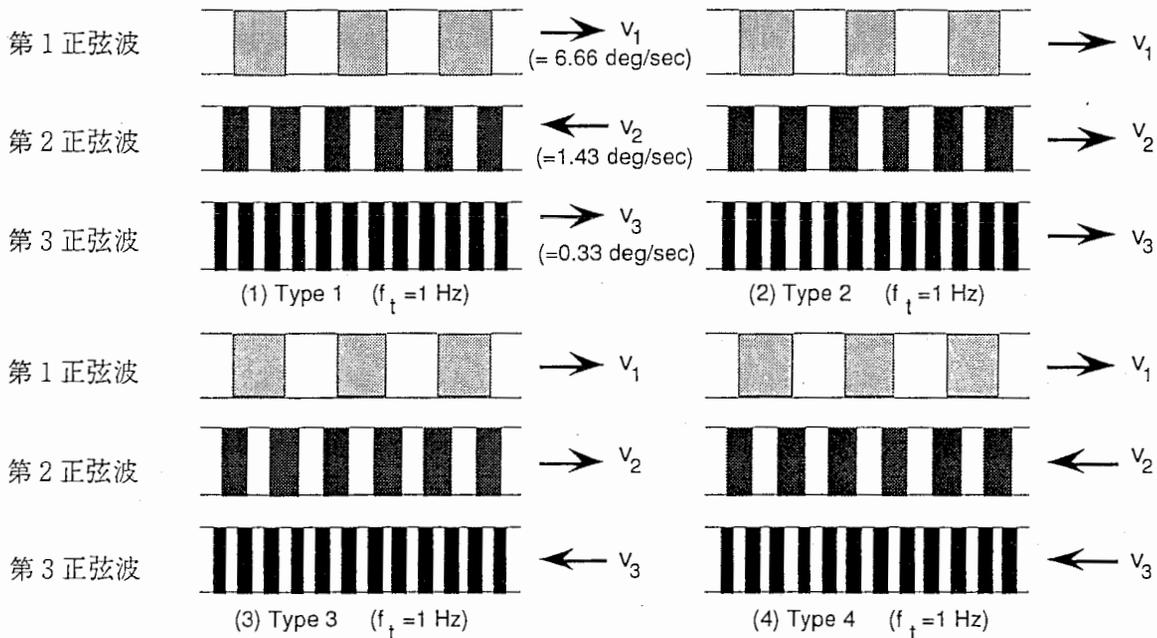


図 6.2 複合ドリフト正弦波の4種類の多重運動パターン

Fig. 6.2 4 kinds of multiple motion patterns in drifting compound sinusoidal waves.

(1/30 sec 毎にサンプリングした30枚のフレーム画像) は一旦フレームメモリに書き込まれた後、フレームメモリ制御システムにより高解像度CRTに動画像として表示され、この動画像を2名の被験者が観察し各々の成分ドリフト正弦波の運動がどの様に知覚(検出)できるかを調べた。正弦波空間周波数は $f_{s1}=0.15$ cpd, $f_{s2}=0.7$ cpd, $f_{s3}=3.0$ cpd、ドリフト速度は各々 $v_1=6.66$ deg/sec, $v_2=1.43$ deg/sec, $v_3=0.33$ deg/sec (ドリフト周波数 $f_t=1$ Hz) とし、左右の組み合わせは図6.2の4種類である。また、実験は蛍光灯をつけた通常の明るさの下で行われた。その結果、4種類の多重運動パターンに共通して言えることは空間周波数の違いに依存して3種類の見え方(状態)が存在することである。各々の見え方(状態)に於ける運動方向の検出結果は以下の様にまとめられる(表6.1)。

(1) Type 1 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：左方向、第3正弦波：右方向)

(a) 第1正弦波 (0.15 cpd) に注目した場合：

0.15 cpdの第1正弦波が右へ動くのが知覚できる。この時、0.7 cpdの第2正弦波も0.15 cpdの第1正弦波と一緒に(同じ速度)で右へ動くのが分かる。この現象は、モーションキャプチャー(Motion capture)と呼ばれる現象[79][80]である。また、3.0 cpdの第3正弦波に関しては右方向に動いている様にも感じられるが、明確には見分けられない。確かめよう

表6.1 複合ドリフト正弦波に於ける成分運動の方向検出結果(実験による)

Table 6.1 Direction detecting characteristics of each component motion in drifting compound sinusoidal waves.

注目正弦波	Type 1			Type 2		
	(0.15 cpd)	(0.7 cpd)	(3.0 cpd)	(0.15 cpd)	(0.7 cpd)	(3.0 cpd)
第1正弦波 (0.15 cpd)	→	→ M. C.	△	→	→ M. M.	△
第2正弦波 (0.7 cpd)	→ M. M.	←	← M. C.	→ M. M.	→	→ M. C.
第3正弦波 (3.0 cpd)	△	← M. M.	→	△	→ M. M.	→

注目正弦波	Type 3			Type 4		
	(0.15 cpd)	(0.7 cpd)	(3.0 cpd)	(0.15 cpd)	(0.7 cpd)	(3.0 cpd)
第1正弦波 (0.15 cpd)	→	→ M. M.	△	→	→ M. C.	△
第2正弦波 (0.7 cpd)	→ M. M.	→	→ M. C.	→ M. M.	←	← M. M.
第3正弦波 (3.0 cpd)	△	→ M. M.	←	△	← M. M.	←

(M.C. : Motion capture, M.M. : Multiple motion)

として3.0 cpdの第3正弦波に注意を移すと見え方が変わってしまうからである。

(b) 第2正弦波 (0.7 cpd) に注目した場合：

0.7 cpdの第2正弦波が左へ移動するのが知覚できる。この時、3.0 cpdの第3正弦波は第2正弦波と一緒に同じ速度で左へ移動する(Motion capture)。しかし、0.15 cpdの第1正弦波は第2正弦波とは独立に右方向へ動くのが知覚できる。

(c) 第3正弦波 (3.0 cpd) に注目した場合：

3.0 cpdの第3正弦波が右へ動くのが見える。しかし、0.7 cpdの第2正弦波は第3正弦波とは別に左へ動いているのが感じられる。0.15 cpdの第1正弦波の動きは明確には見分けられない。確かめようとして第1正弦波に注意を移すと見え方が変わってしまう。

(2) Type 2 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：右方向、第3正弦波：右方向)

(a) 第1正弦波 (0.15 cpd) に注目した場合：

0.15 cpdの第1正弦波は右へ動くのが分かるが、少し見えにくいように感じる (細い矢印で表示)。0.7 cpdの第2正弦波は第1正弦波とは違う速度で (一緒ではない) 右へ動くのが感じられる。3.0 cpdの第3正弦波の動きは明確に見ることは困難。明確に見ようとすると見え方が変わってしまう。

(b) 第2正弦波 (0.7 cpd) に注目した場合：

0.7 cpdの第2正弦波は右へ移動するのが分かる。3.0 cpdの第3正弦波は第2正弦波と一緒に同じ速度で右へ移動する(Motion capture)。しかし、0.15 cpdの第1正弦波は第2正弦波とは独立に右方向へ動くのが感じられる。

(c) 第3正弦波 (3.0 cpd) に注目した場合：

3.0 cpdの第3正弦波は右へ動くのが見える。0.7 cpdの第2正弦波は第3正弦波とは別速度で右へ動いているのが感じられる。0.15 cpdの第1正弦波の動きは明確には感じ取れない。明確に見ようとすると見え方が変わってしまう。

(3) Type 3 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：右方向、第3正弦波：左方向)

(a) 第1正弦波 (0.15 cpd) に注目した場合：Type 2の見え方と同じ。

(b) 第2正弦波 (0.7 cpd) に注目した場合：Type 2の見え方と同じ。

(c) 第3正弦波 (3.0 cpd) に注目した場合：

3.0 cpdの第3正弦波が左へ動くのが見える。0.7 cpdの第2正弦波は第3正弦波とは別に右へ動いているのが感じられる。0.15 cpdの第1正弦波の動きは明確には感じ取れない。

(4) Type 4 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：左方向、第3正弦波：左方向)

(a) 第1正弦波 (0.15 cpd) に注目した場合：Type 1と同じ見え方である。

(b) 第2正弦波 (0.7 cpd) に注目した場合：

0.7 cpdの第2正弦波は左へ移動するのが分かる。3.0 cpdの第3正弦波は第2正弦波と一緒に同じ速度で左へ移動して見える(Motion capture)場合と第2正弦波とは違った速度で左へ動く様に見える場合があり不安定である。0.15 cpdの第1正弦波は第2正弦波とは独立に右方向へ動くのが感じられる。

(c) 第3正弦波 (3.0 cpd) に注目した場合：

3.0 cpdの第3正弦波は左へ動くのが見える。0.7 cpdの第2正弦波は第3正弦波とは別に左へ動いているのが感じられる。0.15 cpdの第1正弦波の動きは明確には感じ取れない。確かめようとする見え方が変わってしまう。

以上の様に、基本的な運動方向検出特性には以下の4種類のパターンがあることが分かる。(1) 注目している正弦波の運動方向は正しく検出できる。(2) 注目している正弦波の空間周波数よりも高い空間周波数の正弦波は注目している正弦波と一緒に運動する (Motion capture現象)。(3) 注目している正弦波の空間周波数よりも高い空間周波数の正弦波であっても、運動方向の組み合わせパターンによっては独立の運動として知覚されることがある。(4) 注目している正弦波の空間周波数よりも低い空間周波数の正弦波は独立の運動として知覚される。特に、(4)の特性は注目している正弦波よりも常に低い空間周波数で生じることから、注目正弦波は中心視により、低い空間周波数の正弦波は周辺視機構によって検出されていると考えられる。

6.3.3.2 計算結果との比較

以上の実験結果と運動検出モデルからの計算結果を比較する。

(1) Type 1 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：左方向、第3正弦波：右方向) の場合

図6.3(a)(b)はType 1の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対して得られる本運動検出モデルの最適チャンネル中心周波数 f_c の時間応答特性 (最適観測状態選択特性) であり、図6.3(a)が評価関数、(b)が運動印象の極大化から計算した結果である。図6.3(a)からは、(1)形状に注目した場合 (Xチャンネル) には3.0 cpdの正弦波観測に適した1種類の観測状態 (破線) が得られ、(2)動き (時間的変化情報) に注目した場合 (Yチャンネル) には、3種類の運動成分を観測するのに適した3種類の観測状態 (実線) f_{c_high} (3.0 cpdの第3正弦波観測に適する)、 f_{c_middle} (0.7 cpdの第2正弦波観測に適する)、 f_{c_low} (0.3 cpdの第1正弦波

観測に適する)が生じるが、 f_{c_high} と f_{c_low} が途中で途切れることが分かる。これは、Xチャンネルでは3種類の運動成分は検出できないこと、Yチャンネルでは3種類の運動が検出できる可能性はあるが、途中の途切れの為に安定な検出は期待できそうにないことを意味する。一方図6.3(b)からは、運動に注目した場合(実線)には3種類の運動成分を観測するのに適した3種類の観測状態(動きに注目した場合(破線)とは異なる値)が途切れ無く安定して推定できることが分かり、本運動検出モデルの運動検出機構を用いれば3種類の運動成分が安定に検出できることが期待される。3種類の最適観測状態の存在は実際の見え方特性に於いて3種類の見え方が存在することと対応しており、本運動検出モデルには視覚系の画像観測プロセスに於いて複数の見え方が存在する基本的観測特性を理論的にかつ無理なく再現する能力が備わっていると判断できる。

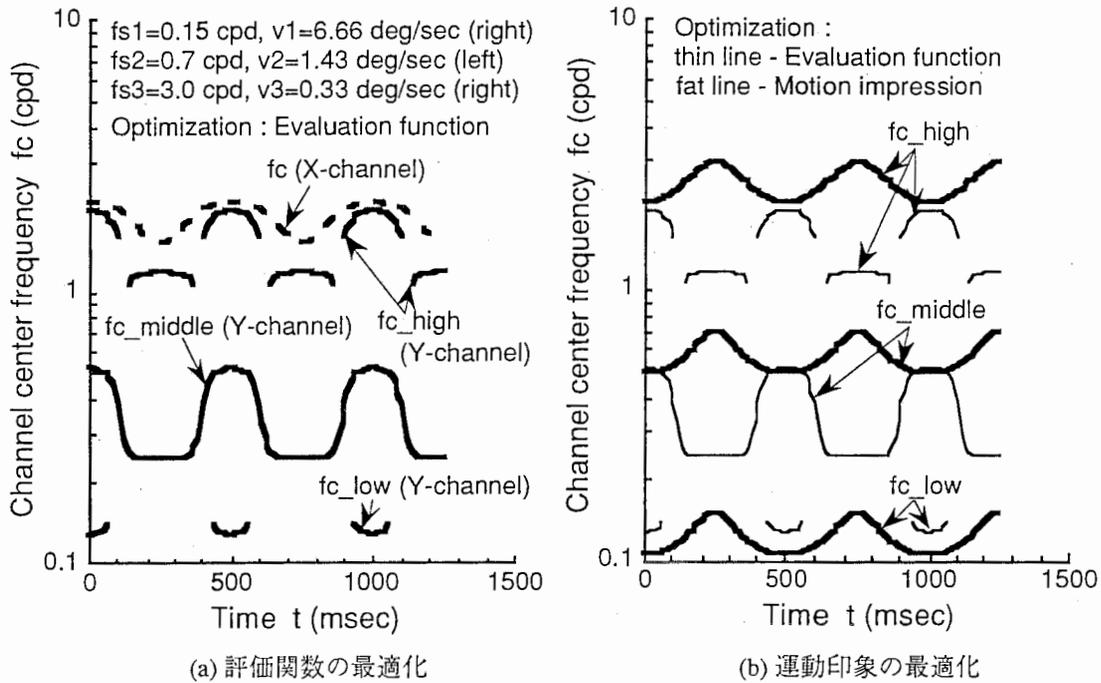


図 6.3 最適チャンネル中心周波数の時間応答特性 (Type 1)

Fig. 6.3 Temporal response characteristics of optimum channel center frequencies. (Type 1)

図 6.4 (a)(b)(c) は運動印象の極大化から計算した 3 種類の最適観測状態に於ける左右方向運動印象の値と推定速度を重ねて表示したものであり、図 6.4 (d) は比較の為に Yチャンネル評価関数の極大化から得られたうちの 1 つの最適観測状態を使って計算した左右方向運動印象の値と推定速度である。最適観測状態 f_{c_low} を用いた場合 (図 6.4 (a)) は Type 1 の実験で第 1 正弦波に注目した場合に相当する。この図では、右方向運動印象値 MI_R は左方向運動印象値 MI_L

よりも常に大きく、かつ変動が少なくなっている。この結果は、この最適観測状態 f_{c_low} が 0.3 cpd の空間周波数の正弦波を観測するのに適した状態であることを考慮すると、第1正弦波 (0.3 cpd) の右方向への運動が安定して知覚できることを意味する。他の空間周波数の運動成分 (第2、第3正弦波) に関しては、たとえそれらの正弦波パターンの形状が見えていたとして

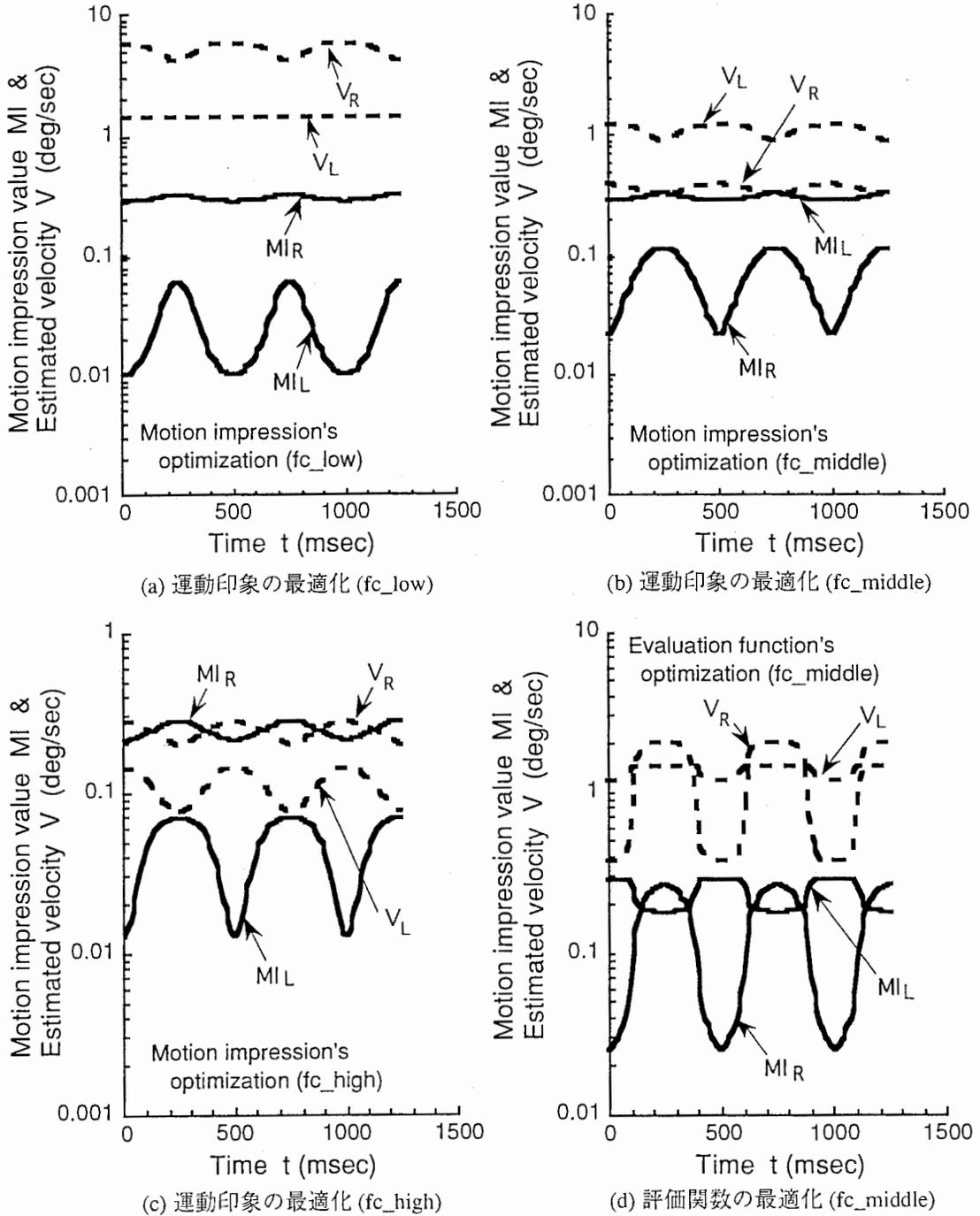


図 6.4 左右方向運動印象値と推定速度の時間応答特性 (Type 1)

Fig. 6.4 Temporal response characteristics of motion impression values and estimated velocities. (Type 1)

も（形状知覚を担当するXチャンネルによる）、この最適観測状態で知覚できる運動方向はあくまでも右方向なので、結局見えている第2、第3正弦波パターンも第1正弦波と同様に右方向に運動して見えるはずであること、即ちMotion capture現象が生じているであろうことが推測できる。この最適観測状態 $f_{c,low}$ は視覚モデルに0.3 cpdを中心周波数とする狭帯域空間フィルターを生じさせるので、この狭帯域フィルター特性では0.7 cpdの正弦波は知覚できたとしても3.0 cpdの正弦波は知覚されにくいことが考えられる。つまり、0.7 cpdの正弦波はMotion capture現象により第1正弦波と一緒に動くが、3.0 cpdの正弦波の運動についてはMotion capture現象が生じているかどうかの判断が困難になることが予想できる。また、この時の右方向の運動速度 v_R は時間に伴って多少変化するが、約4～6 deg/secと導出される。この速度推定結果は第1正弦波の速度(6.66 deg/sec)と非常に近い値であり、この点から見てもこの最適観測状態は第1正弦波の運動検出に適していることが分かると同時に、他の運動成分の形が見えているとしたら、これらの正弦波も第1正弦波と同じ速度で運動していると知覚されることが分かる。以上の理論的結果は実際の見え方と良く一致している。

最適観測状態 $f_{c,middle}$ を用いた場合（図6.4(b)）はType 1の実験で第2正弦波に注目した場合に相当する。この図では、左方向運動印象値 MI_L が右方向運動印象値 MI_R よりも常に大きく、かつ変動が少なくなっている。この結果は、この最適観測状態 $f_{c,middle}$ が0.7 cpdの空間周波数の正弦波を観測するのに適した状態であることを考慮すると、第2正弦波(0.7 cpd)の左方向への運動が安定して知覚できることを意味する。また、左方向推定速度 v_L も第2正弦波の速度(1.43 deg/sec)に近い値となっており、第2正弦波の運動が知覚されると判断できる。図6.4(a)での議論と同様に、第3正弦波(3.0 cpd)に関してはMotion capture現象により第2正弦波と一緒に左方向へ運動することが考えられる。また、本運動検出モデルは中心視のモデルであり周辺視のモデルが含まれていないので、現在の運動検出モデルでは第1正弦波(0.3 cpd)もMotion capture現象により第2正弦波と一緒に運動すると予測できる。しかし、周辺視モデルを組み込むことができれば、注目正弦波よりも低い空間周波数である第1正弦波は周辺視モデルにより右方向への正しい運動が検出される筈であり、そうすれば実験結果と同様に2種類の運動パターンが同時に知覚できることになる。

最適観測状態 $f_{c,high}$ を用いた場合（図6.4(c)）はType 1の実験で第3正弦波に注目した場合に相当する。この図では、右方向運動印象値 MI_R が左方向運動印象値 MI_L よりも常に大きく、かつ変動が少なくなっており、右方向推定速度 v_R も第3正弦波の速度(0.33 deg/sec)に近い値となっている。即ち、この結果は第3正弦波(3.0 cpd)の右方向への運動が安定して知覚できることを意味する。図6.4(b)で議論した様に、この最適観測状態の場合には注目正弦波が最高

の空間周波数(3.0 cpd)を持つ正弦波であることから、周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば、他の運動成分は周辺視機構により第3正弦波とは独立の運動として知覚できる筈である。しかし、現在の運動検出モデルではMotion capture 現象により第3正弦波と一緒に運動すると予測してしまう。

図6.4(d)はYチャンネルの評価関数の極大化から得られた1つの最適観測状態 f_{c_middle} を用いて計算した運左右方向動印象の値と推定速度値であり、Type 1の実験で第2正弦波に注目した場合に相当する。この図では、左右方向運動印象値 M_{L} , M_{R} 及び左右方向の推定速度値 v_{L} , v_{R} が時間の経過に伴って逆転を繰り返す現象、即ち時間の経過に伴って右方向の運動が知覚されたり左方向の運動が知覚されたりする見え方になっていると判断でき、実際の見え方とは異なる結果となる。この結果から、運動を正しく検出する為には本運動検出モデルに於ける運動印象の極大化に基づく最適観測状態の推定機構が重要であることが理解される。

(2) Type 2 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：右方向、第3正弦波：右方向) の場合

図6.5はType 2の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対して得られる本運動検出モデルの最適チャンネル中心周波数 f_c の時間応答特性（最適観測状態選択特性）であり、Xチャンネルは評価関数の極大化により、Yチャンネルは運動印象の極大化から計算した。但し、3つの正弦波共に同一方向に運動する画像なので、Yチャンネルの運動印象の極大化と評価関数の極大

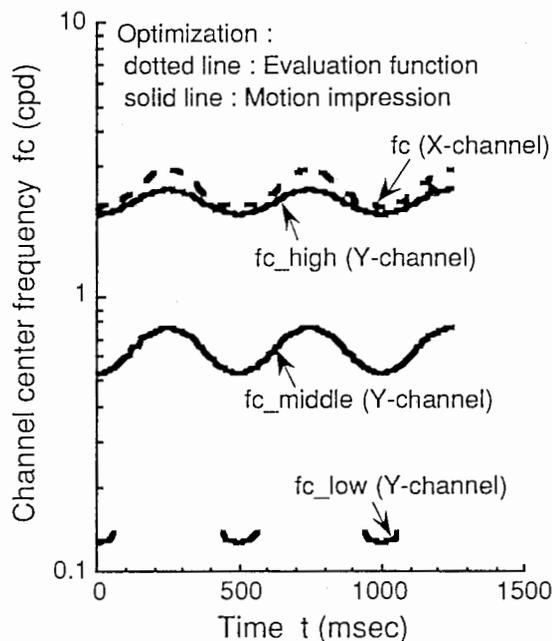


図6.5 最適チャンネル中心周波数の時間応答特性 (Type 2)

Fig. 6.5 Temporal response characteristics of optimum channel center frequencies. (Type 2)

化は同じ結果が得られる。図6.5からは、(1)形状に注目した場合（Xチャンネル）には3.0 cpdの正弦波観測に適した1種類の観測状態（破線）しか得られず、Xチャンネルでは3種類の運動成分は検出できないこと、(2)運動に注目した場合（Yチャンネル）には、3種類の運動成分を観測するのに適した3種類の観測状態（実線） f_{c_high} （3.0 cpdの第3正弦波観測に適する）、 f_{c_middle} （0.7 cpdの第2正弦波観測に適する）、 f_{c_low} （0.3 cpdの第1正弦波観測に適する）が生じるが、 f_{c_low} は途中で途切れる為安定な運動検出は期待できないことが分かる。3つの最適観測状態が存在することは実際の見え方に3種類あることに相当する。

図6.6(a)(b)は運動印象の極大化から計算した3種類の最適観測状態に於ける右方向運動印象（左方向は無い）の値と推定速度を重ねて表示したものである。最適観測状態 f_{c_low} を用いた場合はType 2の実験で第1正弦波に注目した場合に相当する。右方向運動印象値 MI_R 及び右方向推定速度 v_R は最適観測状態選択特性（図6.5）と同様に部分的にしか存在しないが、右方向推定速度 v_R が実際の第1正弦波速度(6.66 deg/sec)と非常に近い値であることから、この状態では第1正弦波(0.3 cpd)の右方向への運動が断続的に知覚でき、さらにMotion capture現象も断続的に生じることが予想される。しかし、運動印象が存在しない区間では他の運動成分の運動が知覚され、第1正弦波の運動と他の運動成分の運動とが時分割的に切り替わって見えることになるので、結局第1正弦波と他の運動成分の運動が多重に重なって見えると判断でき

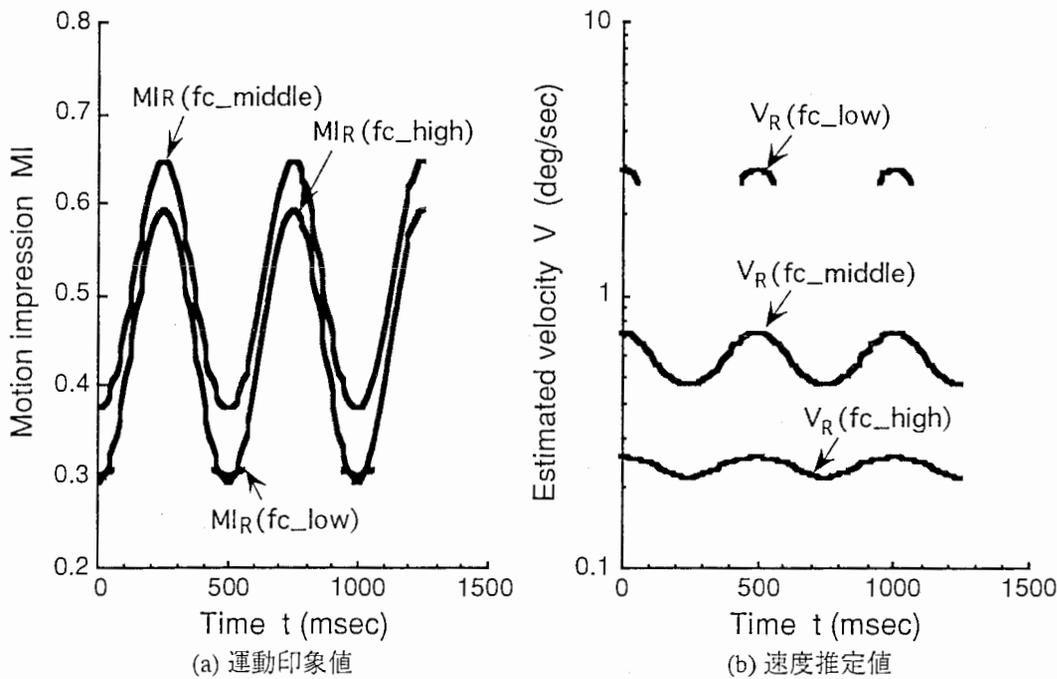


図6.6 右方向運動印象値と推定速度の時間応答特性 (Type 2)

Fig. 6.6 Temporal response characteristics of motion impression values and estimated velocities. (Type 2)

る。これは、実際の見え方に於ける不安定さ（見えにくさ）及びMotion capture 現象ではなく多重に重なって見える現象と良く対応している。一方、最適観測状態 f_{c_middle} , f_{c_high} を用いた場合はType 2の実験で各々第2正弦波、第3正弦波に注目した場合に相当する。これらの場合では常に運動印象が存在することと推定速度値が各々第2正弦波、第3正弦波の実際の速度と近いことから、各々第2正弦波、第3正弦波の右方向への運動が安定して知覚できると判断できる。そして図6.4 (b)でも議論した様に、 f_{c_middle} の状態では画像観測を行うと3.0 cpdの第3正弦波はMotion capture 現象により第2正弦波と一緒に動いて見え、0.3 cpdの第1正弦波に関しては周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば、第2正弦波とは独立の運動として知覚できると言える。また、 f_{c_high} の状態では画像観測を行った場合も同様に、周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば第3正弦波とは独立の運動として他の運動成分が知覚できると考えられ、実際の見え方と良く対応した結果が得られる。

(3) Type 3 (第1正弦波：右方向、第2正弦波：右方向、第3正弦波：左方向) の場合

図6.7 (a)はType 3の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対して得られる本運動検出モデルの最適チャンネル中心周波数 f_c の時間応答特性（最適観測状態選択特性）であり、Yチャンネルの評価関数の極大化からの3種類の結果（破線）と運動印象の極大化からの3種類

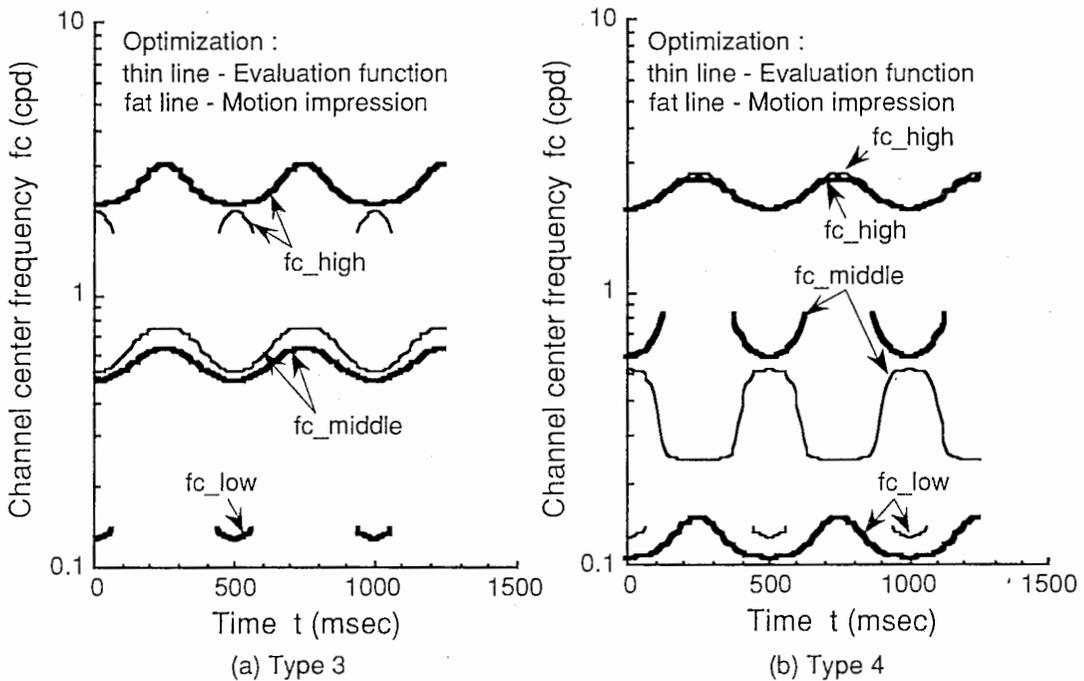


図6.7 最適チャンネル中心周波数の時間応答特性 (Type 3 & 4)

Fig. 6.7 Temporal response characteristics of optimum channel center frequencies. (Type 3 & 4)

の結果（実線）が重ねて表示されている。3種類の見え方の存在及び f_{c_middle} が常に存在することと f_{c_low} が部分的にしか存在しないこと（両者の結果は重なっている）に関しては両者は同じ特性であるが、評価関数の極大化では f_{c_high} は部分的にしか存在しないのに対し運動印象の極大化では f_{c_high} が常に存在することが両者の違いである。実際の見え方では第3正弦波の運動は安定して知覚できることから、やはり運動印象の極大化からの計算結果の方が運動検出には適していると言える。

各々の最適観測状態での左右方向運動印象や推定速度の関係は、Type 1, Type 2の結果と基本的には同じであり、注目正弦波の運動方向と推定速度は正しく計算できている（図は省略）。また、最適観測状態 f_{c_low} を用いて画像を観測した場合は図 6.5、図 6.6の f_{c_low} を用いた場合と同様であり、第1正弦波の運動と他の運動成分の運動とが時分割的に切り替わって見えると判断できる。これは、実際の見え方に於ける不安定さ（見えにくさ）及びMotion capture現象ではなく多重に重なって見える現象と良く対応している。一方図 6.4 (b)、図 6.6でも議論した様に、 f_{c_middle} の状態で画像観測を行うと3.0 cpdの第3正弦波はMotion capture現象により第2正弦波と一緒に動いて見え、0.3 cpdの第1正弦波に関しては周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば、第2正弦波とは独立の多重運動として知覚できると言える。また、 f_{c_high} の状態で画像観測を行った場合も同様に、周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば第3正弦波とは独立の運動として他の運動成分が知覚できると考えられ、実際の見え方と良く対応した結果が得られる。

(4) Type 4（第1正弦波：右方向、第2正弦波：左方向、第3正弦波：左方向）

図 6.7 (b) はType 4の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対して得られる本運動検出モデルの最適チャンネル中心周波数 f_c の時間応答特性（最適観測状態選択特性）であり、Yチャンネルの評価関数の極大化からの3種類の結果（破線）と運動印象の極大化からの3種類の結果（実線）が重ねて表示されている。3種類の見え方の存在及び f_{c_high} が常に存在することに関しては両者は同じ特性であるが、評価関数の極大化では f_{c_low} が部分的に存在し、 f_{c_middle} が常に存在するのに対し、運動印象の極大化では f_{c_low} が常に存在し、 f_{c_middle} が部分的にしか存在しないことが両者の違いとなっている。実際の見え方では第1正弦波の運動は安定して知覚でき、第2正弦波の運動の知覚に不安定さが生じることから、この場合でもやはり運動印象の極大化からの計算結果の方が運動検出には適していると言える。

各々の最適観測状態での左右方向運動印象や推定速度の関係は、Type 1, Type 2, Type 3の結果と基本的には同じであり、注目正弦波の運動方向と推定速度は正しく計算できている（図は

省略)。今までの結果と同様に考えると、最適観測状態 f_{c_low} を用いて画像を観測した場合には、Motion capture 現象により他の運動成分は第1正弦波と一緒に運動するのが知覚されると考えられる。一方、 f_{c_middle} の状態で画像観測を行うと、第2正弦波の運動と第3正弦波の運動とが時分割的に切り替わって多重に見える不安定さが生じると同時に、0.3 cpd の第1正弦波に関しては周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば、第2正弦波とは独立の運動として知覚できると言える。また、 f_{c_high} の状態で画像観測を行った場合も同様に、周辺視機構を含んだ運動検出モデルに拡張できれば第3正弦波とは独立の運動として他の運動成分が知覚できると考えられ、実際の見え方と良く対応した結果が得られる。

以上の様に、本運動検出モデルは現時点に於いては周辺視機構を持っていないので、周辺視機構に起因すると考えられる実際の見え方特性の説明が不可能であることを除けば、本運動検出モデルは単に速度値が検出可能というだけでなく、実験から導き出された視覚系の運動検出特性（見え方特性）を理論的に再現（シミュレート）する能力も持っていることが分かる。ここが従来の運動検出モデルとの大きな違いでもある。

6.3.3.3 正確な運動速度の検出

今までの計算結果によると、最適観測状態を用いると運動方向は正確に計算できるが、速度の計算値は正確な値（実際の設定値）よりも少し小さな値として推定されていた。そこで、正確な速度の計算法について検討する。

本運動検出モデルの速度推定特性を明らかにする為に、観測状態（チャンネル中心周波数）を変数にして左右方向運動印象と速度の計算を行った（図6.8(a)(b)(c)(d)）。図6.8(a)はType 1の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対する時刻 $t = 0 \text{ sec}$ の時の結果であり、運動印象（実線）が極大値になる位置での3つの最適チャンネル中心周波数がそれぞれ3種類の運動成分検出に適した状態（最適観測状態）を意味する。右方向の推定速度 v_R 曲線（破線）を見ると、右方向運動印象曲線に存在する2つの極大値の位置（最適チャンネル中心周波数）で計算できる速度値は正確な値（設定値）よりも小さ目であるが、最適チャンネル中心周波数よりも少し低い位置では速度値がほぼ一定となり、この一定値が正確な速度値となっていることが分かる。正確に言うと、3.0 cpd の第3正弦波に関しては $f_c = 1 \text{ cpd}$ あたりで生じる微分係数絶対値の極小値の位置での速度値が、0.3 cpd の第1正弦波に関しては約 $f_c = 0.07 \text{ cpd}$ 以下の領域で生じる零の微分係数絶対値の位置での速度値がほぼ正しい速度値になっている。左方向の推定速度 v_L 曲線（破線）でも同様に、左方向運動印象曲線が極大値を示す最適チャンネル中心周波

数の位置での速度値は正確な値よりも小さ目であるが、約 $f_c=0.4$ cpd 以下の領域で生じる零の微分係数絶対値の位置での速度値はほぼ正しい速度値になっている。以上の様に、本運動検出モデルでは最適チャンネル中心周波数よりも少し低いチャンネル中心周波数を用いて速度を計算すると正確な速度値が推定できる特徴がある。最適チャンネル中心周波数よりも少し低いチャンネル中心周波数での観測は、最適観測状態よりもボケを少し増やし、視野を少し広くして観測することを意味している。

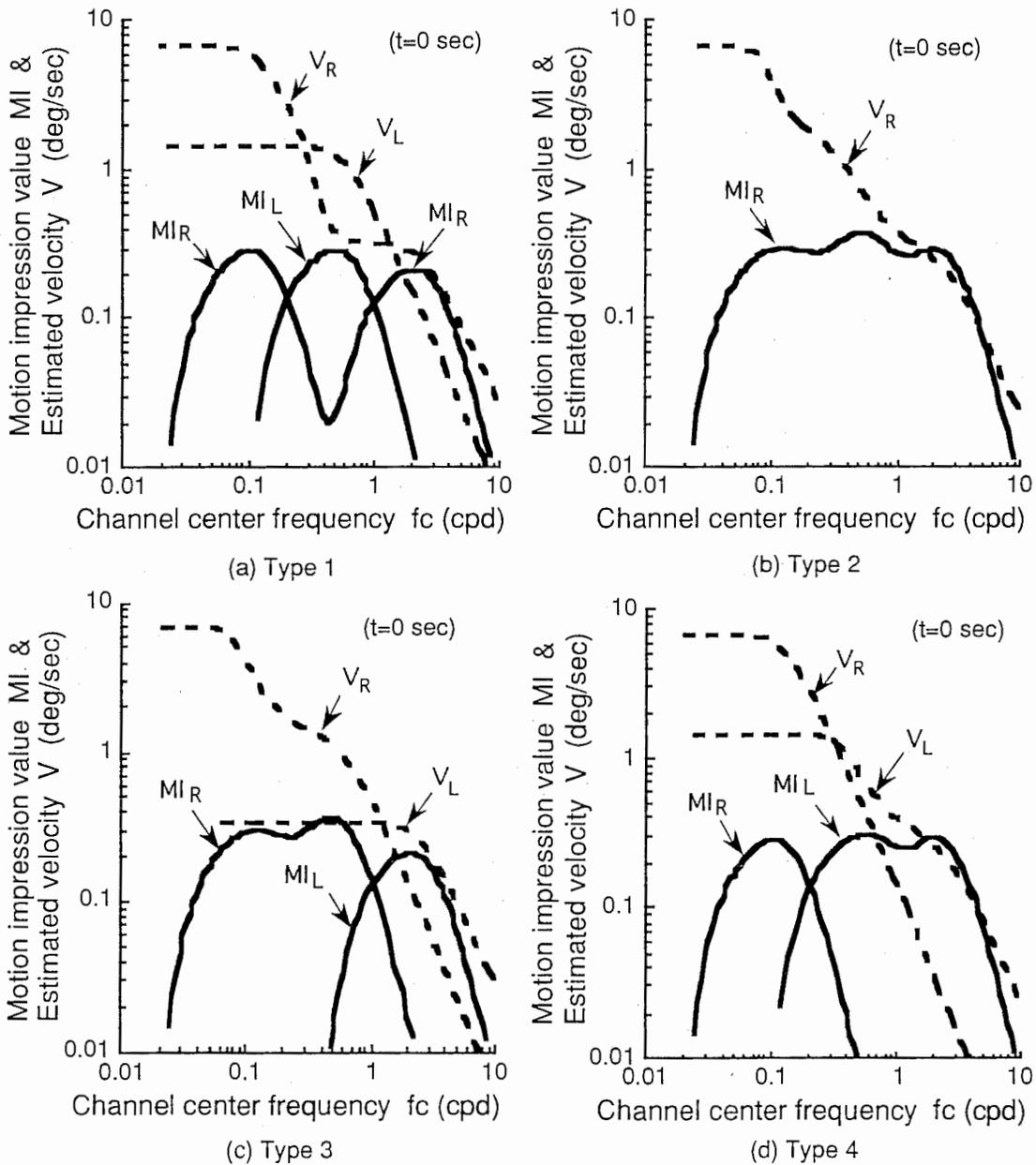


図 6.8 左右方向運動印象と推定速度のチャンネル中心周波数（観測状態）依存特性

Fig. 6.8 Dependence of channel center frequency on motion impression and estimated velocity.

図6.8(b)はType 2の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対する時刻 $t = 0$ secの時の結果であり、運動印象(実線)が極大値になる位置での3つの最適チャンネル中心周波数がそれぞれ3種類の運動成分検出に適した状態(最適観測状態)を意味する。図6.8(a)の場合と同様に、右方向運動印象曲線(この場合左方向は無い)に存在する3つの極大値の位置(最適チャンネル中心周波数)で計算できる右方向速度推定値(破線)は正確な値(設定値)よりも小さ目であるが、最適チャンネル中心周波数よりも少し低い位置では推定速度曲線の微分係数絶対値が極小または零になる位置が存在し、この位置での速度値がほぼ正確な速度値となっていることが分かる。

図6.8(c)(d)はType 3,4の多重運動パターンを持つ複合ドリフト正弦波に対する時刻 $t = 0$ secの時の結果である。これらの場合にも今までと同様に、右左方向運動印象曲線(実線)に存在する3つの極大値の位置(最適チャンネル中心周波数)で計算できる左右方向速度推定値(破線)は正確な値(設定値)よりも小さ目であるが、最適チャンネル中心周波数よりも少し低い位置では推定速度曲線の微分係数絶対値が極小または零になる位置が存在し、この位置での速度値がほぼ正確な速度値となっていることが分かる。

以上の様に、本運動検出モデルでは最適チャンネル中心周波数での速度推定値は正確な速度値よりも小さくなるが、最適観測状態よりもボケを少し増やし、視野を少し広くして観測することにより正確な速度値が推定できる特徴を持っている。

6.4 むすび

時空間視覚モデルがコンピュータビジョンへも容易に応用可能であることを示す1例として、本時空間視覚モデルに運動検出機構を組み込むことにより、視知覚応答特性(見え方特性、コントラスト閾値特性、コントラスト感度特性などの知覚特性)の理論的再現と運動速度検出の両方が実現可能な新しい運動検出モデルの定式化を行った。具体的定式化においては、時空間視覚モデルのYチャンネル信号を時空間解析信号として表現し、この時空間解析信号の実数部から運動方向の決定に寄与する運動印象を、位相の時間微分と空間微分の比から速度値が推定できる構成となっている。そして、本運動検出モデルを3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形に適用した結果次の様になり、本モデルの有効性・正当性が検証できた。

- (1) ドリフト正弦波のコントラスト感度がフリッカー正弦波感度の2倍になる実測結果が本運動検出モデルから再現可能であることを理論的に証明した。(運動視知覚特性の理論的再現)
- (2) 3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形を本運動検出モデルが観測した時の左右方向運

動印象の極大化から3つの最適観測状態が得られる。これらの状態は、3種類の見え方が実際に存在することと対応しており、左右方向運動印象の差から決定される各々の最適観測状態での注目正弦波の運動方向や注目正弦波よりも高い空間周波数の運動成分がMotion capture現象（注目正弦波と一緒に運動する）と多重運動（透明視：Transparency）のどちらに見えるかに関しても実際の見え方と良く一致する。但し、周辺視で検出されていると判断できる運動（注目正弦波よりも低い空間周波数の運動成分の運動）に関しては、本運動検出モデルが周辺視機構を持っていないことから今のところ再現はできない。

- (3) 最適観測状態（最適チャンネル中心周波数）で計算できる速度推定値は正確な速度値よりも小さくなるが、最適観測状態よりもボケを少し増やし、視野を少し広くして観測することにより正確な速度値が推定できる。

第7章

結論と展望

本論文の研究成果を要約し、今後の課題を述べる。

第1章では、視覚系と同等、あるいは視覚系以上の性能を発揮する客観的画質評価法やパターン認識装置を開発する為には、眼球光学系、網膜、脳からなる視覚系全体を1つの自律的システムとして数理的にモデル化し、この数理モデルを利用して新しい客観的画質評価法やパターン認識理論を構築することが1つの有効な解決策になり得ることを考察した。そして、この数理的視覚モデルが持つべき具体的な機能として、提示画像の性質・種類や提示条件に依存して画像観測の際の焦点調節特性が適応的に変化する現象（自律的画像観測機構）と視知覚応答特性が適応的に変化する現象（コントラスト感度特性や見え方特性などの知覚を中心とした特性）の2つを理論的に再現する能力を兼ね備えることが最低限度必要であろうとすることをいくつかの観点から検討した。

第2章では、第1章の観点から静止画像用視覚モデルの定式化を行い、その有効性・正当性を検討した。具体的な定式化に於いては、視覚系では提示画像に含まれる空間周波数に依存して網膜像のボケ量と視野が相互依存的に変化する現象（画像観測に於ける基本現象）に着目し、これを数理的にモデル化した。本視覚モデルの基本的特徴は、提示画像を観測するのに最も適した観測状態（ボケ量と視野の大きさ）が理論的に計算できる機構（自律的画像観測）が備わっていることと、視覚モデルの正弦波空間周波数特性が観測状態と1対1に対応する数多くの狭帯域フィルタ群の集合で構成されると同時に、このフィルタ群の包絡線が正弦波コントラスト感度空間周波数特性の実測値と一致すること（マルチチャネル構造）である。本視覚モデルからは、正弦波と矩形波に対するコントラスト感度特性の違い、複合正弦波形に対する見え方特性やコントラスト閾値特性（視覚系のマルチチャネル理論を示唆する特性）、コントラスト感度特性に及ぼす表示画面サイズの影響などが理論的に説明でき、提示画像の性質や提示条件に依存して視覚系の視知覚応答特性が適応的に変化する様子を正確かつ定量的に再現できること、即ち本視覚モデルの有効性・正当性が示せた。

第3章では、焦点調節機構の解明を目指し、最も基本的な特性である焦点調節応答の空間周

波数依存特性と視点位置依存特性を赤外線オプトメータを用いて実測した。その結果、正弦波空間周波数の低下と共に焦点調節誤差が単調増加（網膜像のボケの程度が増加）すること（空間周波数依存特性）、及び方形波の場合の低域空間周波数ではエッジ部に視点を置いて観測した方が焦点調節誤差が小さくなる（網膜像のボケの程度が減少）こと（視点位置依存特性）が導出された。さらに、一般的には変動しないと考えられていた調節安静位も空間周波数に依存して変動する可能性も示された。また、視覚モデルから理論的に得られる網膜像のボケ（焦点調節誤差）に関する空間周波数依存特性と視点位置依存特性は実測結果と良く一致することを明らかにした。以上の結果は、視覚モデル構築に於ける基本的考え方（ボケと視野の相互依存特性）の内、少なくともボケの概念に関してはその正しさが実証されたものと考えられる。

第4章では、視覚モデルの応用例として、視覚モデルの2種類の応答出力（評価関数値と最適観測状態）を用いた新しい客観的画質評価法（鮮鋭さ評価と画像表示システムの性能評価）を提案した。鮮鋭さ評価法では鮮鋭さを表わす尺度として視覚モデルの評価関数値が利用され、画像伝送系の帯域幅が広がる（ボケが減る）につれて評価関数値は増加、そして飽和する傾向となり、帯域幅と鮮鋭さの関係に関する従来結果と良く一致した。また、画像伝送系の帯域幅と最適視距離の関係も実験結果と良い一致を示した。一方画像表示システムの性能評価法では、濃度階調型画像表示装置からの出力画像をパルス振幅変調（PAM）正弦波で近似し、この画像を視覚モデルが観測した時の最適観測状態から導出できる視覚ノイズ特性を基準として、視覚系が知覚できる信号成分 $C V_n$ 比（Carrier to Visual noise ratio）、視覚系が知覚できるノイズ成分 $N V_n$ 比（Noise to Visual noise ratio）、及び $C V_n$ 比と $N V_n$ 比を組み合わせた $C N$ 比（Carrier to Noise ratio）の3種類が計算され、これらが評価尺度として用いられた。その結果、画素構造が良く見える状態と画素の集合により表現された正弦波形（信号成分）が良く知覚できる状態の2つの見え方が存在し、各々の状態で評価結果が異なること、及び視点位置にも依存して評価結果は変化することなど、我々が行う主観的判断のプロセス（過程）を適切に再現できることが示された。以上の結果は本視覚モデルの有効性を示すものと考えられる。

第5章では、静止画像用視覚モデルに、網膜神経節細胞であるX、Y、W細胞の特性を組み込むことにより、形状知覚に適したXチャンネルと動き知覚に適したYチャンネルから構成される新しい時空間視覚モデルを構築した。そして、本時空間視覚モデルを代表的な定常的時間変化パターンであるフリッカー正弦波とドリフト正弦波に適用し、視覚モデルの視知覚応答特性（コントラスト感度時空間周波数特性や最適ドリフト速度特性など）が両チャンネルの応答特性から理論的に再現でき、実測結果とも良く一致することを示した。さらに、瞬間提示画像の様な非定常時間変化画像に対する視知覚応答特性も再現可能な非定常時空間視覚モデルに拡張し

た。具体的には、X、Yチャンネルの時間インパルス応答と焦点調節機構の動特性に相当する観測状態の動的遷移特性およびその最大変化速度の限界を時空間視覚モデルに導入することにより実現されている。そして、瞬間提示正弦波形に対するコントラスト閾値の画像提示時間依存特性、コントラスト感度空間周波数特性、反応時間の空間周波数特性を計算したところ、実測結果と良く一致する結果が得られ、本時空間視覚モデルの有効性が示せた。

第6章では、時空間視覚モデルがコンピュータビジョンへも容易に応用可能であることを示す1例として、本時空間視覚モデルに運動検出機構を組み込むことにより、視知覚応答特性（見え方特性、コントラスト閾値特性、コントラスト感度特性などの知覚特性）の理論的再現と運動速度検出の両方が行える新しい運動検出モデルの定式化を行った。具体的定式化においては、時空間視覚モデルの動き知覚チャンネル（Yチャンネル）信号を時空間解析信号として表現し、この時空間解析信号の実数部から運動方向の決定に寄与する運動印象を、位相の時間微分と空間微分の比から速度値が推定できる構成とした。そして、本運動検出モデルからドリフト正弦波のコントラスト感度がフリッカー正弦波の2倍になる特性が理論的に再現できること、また3種類の運動を含む複合ドリフト正弦波形に対しては3種類の見え方の存在（どの正弦波に注目するかに依存して3つの最適観測状態が存在する）が理論的に導出でき、各状態からは正しい運動方向が検出できること、さらに少しボカして観測させることにより正しい速度値も計算可能であることが示され、本モデルの有効性・正当性が検証できた。

本研究では、画像観測に関する基本現象（ボケと視野の相互依存特性）を中心にして視覚系全体を1つの自律的システムとして定式化し、このモデルを利用して提示画像に依存して適応的に変化する各種視知覚応答特性を理論的・系統的に再現しようとしたところにその新規性・独創性があるものと考えられる。その結果、自律的画像観測機構（焦点調節機構）と各種視知覚特性の理論的再現能力を持った数理的視覚モデルを実現することができ、当初の目的がかなり達成された。しかし、「視覚系の優れた画像処理機能（画質評価、パターン認識など）を工学的に実現する」という最終目標から判断すると、やっと最終目標が目指せる基盤が整えられた段階と見ることができ、研究のさらなる進展が望まれる。以下に、今後の課題を列挙する。

(1) 視覚モデルの正当性の検証

本論文の中でも視覚モデルからの理論的応答特性と実験結果との比較、検討を通して本視覚モデルの正当性の検証を行った。しかし、数多く存在する視覚特性（実験結果）の全てを検証したわけではない。これは、最終目標を目指すのに必要な視覚モデルの必要最小限の形をできるだけ早く整えたい為に主要な視覚特性に限定したからである。本視覚モデルの視覚特性再現

能力の信頼性を高める為には、さらに多くの視覚特性が理論的に再現できることを示し、もし再現能力の限界が存在するならばこれを明らかにするだけに留まらず、視覚モデルの改良へと結び付けてゆくことが重要である。また、本視覚モデルの定式化の基礎となっている焦点調節特性に関してもさらに実験を積み重ね、本視覚モデルの基本的考え方の正当性を明確化してゆくことが必要と考えられる。

(2) 視覚モデルの拡張

本視覚モデルは十分に明るい環境で動作（明所視）する中心視モデルとして定式化されている。実際の画質評価やパターン認識は、通常明所視の環境下かつ中心視を用いて実行される場合が多いと考えられるので、明所視・中心視モデルであっても十分な利用価値はあると判断できる。しかし、視覚モデルの応用範囲をさらに広げる為には、薄明視、周辺視、色覚などの機能を追加し、実際の視覚系と同様にいろいろな環境に適用可能な汎用的視覚モデルに拡張してゆくことが重要である。また、視覚特性再現能力の限界が新しく発見された場合には、今までの再現能力を損ねることなく視覚モデルを適切に改良する必要がある。

(3) 画質評価法、パターン認識への具体的応用

本論文では、視覚系の自律的数理モデルの構築及びその有効性の検証が中心であったので、画質評価法やパターン認識への具体的応用に関しては本視覚モデルの応用可能性を示す（第4章、第6章）程度に留まり、十分な議論はできなかった。今後は、本視覚モデルを基礎にした新しい画質評価法やパターン認識理論を構築し、視覚系の優れた画像処理機能を工学的に実現する方法論を具体的に確立することが重要である。



参考文献

- [1] テレビジョン学会編：“画像エレクトロニクスの基礎”，画像エレクトロニクス講座1，コロナ社(1975).
- [2] 永野俊：“視覚系の空間周波数特性”，電総研調査報告第193号(1977).
- [3] 応用物理学会光学懇話会編：“生理光学”，朝倉書店(1975).
- [4] Bajcsy, R.：“Active Perception”，IEEE Proc., Vol.76, No.8, pp.996 - 1006 (1988).
- [5] Aloimonos, Y. and Weiss, I.：“Active Vision”，Int. J. Computer Vision, pp.333 - 356 (1988).
- [6] Ballard, D.H.：“Reference Frames for Animate Vision”，Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp.1635 - 1641 (1989).
- [7] 飯島泰蔵：“パターン認識”，電気電子工学大系43，コロナ社(1973).
- [8] 米山恒雄：“視覚観測動作のモデル”，テレビ学技報, VVI-18-1, pp.1-16 (1976).
- [9] 笠井健，藤井克彦，関口稔，篠原薫：“眼の焦点調節におけるボケ処理のメカニズム”，信学論, Vol.57-D, No.5, pp.261 - 268 (1974).
- [10] Witkin, A.：“Scale Space Filtering”，Proc. Int. Joint Conf. Artif. Intell., Karlsruhe, West Germany, pp.1019 - 1021 (1983).
- [11] Yuille, A. L. and Poggio, T. A.：“Scaling Theorems for Zero Crossings”，IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.PAMI-8, No.1, pp.15 - 25 (1986).
- [12] 飯島泰蔵：“OCRのための実用図形基礎理論”，信学誌, Vol.56, No.3, pp.365 - 372 (1973).
- [13] Watanabe, A., Mori, T., Nagata, S. and Hiwatashi, K.：“Spatial Sine-wave Responses of the Human Visual System”，Vision Research, Vol.8, pp.1245 - 1263 (1968).
- [14] 樋渡涓二，渡部叡，森孝行，長田昌次郎：“視覚の空間正弦波レスポンス”，NHK技研, Vol.16, No.1, 通巻第80号, pp.38 - 60 (1964).
- [15] Campbell, F.W. and Robson, J.G.：“Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings”，J.Physiol., Vol.197, pp.551- 566 (1968).
- [16] Blakemore, C. and Campbell, F.W.：“On the Existence of Neurones in the Human Visual System Selectivity Sensitive to the Orientation and Size of Retinal Images”，J.Physiol., Vol.203, pp237 -

260 (1969).

- [17] Dealy, R.S. and Tolhurst, D.J. : " Is Spatial Adaptation and After-effect of Prolonged Inhibition ? ", J.Physiol., Vol.241, pp.261- 270 (1974).
- [18] 畑田豊彦 : “生理光学 7 - マルチチャンネル機構と明暗強調効果-” , O plus E, No.63, pp.78 - 85 (1985).
- [19] Graham, N. and Nachmias, J. : " Detection of Grating Patterns Containing Two Spatial Frequencies : A Comparison of Single-Channel and Multiple- Channels Models " , Vision Research, Vo.11, pp.251-259 (1971).
- [20] Stromeyer III, C.F. and Klein, S. : " Spatial Frequency Channels in Human Vision as Asymmetric (Edge) Mechanisms " , Vision Research, Vol.14, pp.1409-1420 (1974).
- [21] Carlson, C.R. : " Sine-Wave Threshold Contrast Sensitivity Function : Dependence on Display Size", RCA Review, Vol.43, pp.675-683 (1982).
- [22] Barten, P.G. : " The Effects of Picture Size and Definition on Perceived Image Quality " , Proceedings of the SID, Vol.30/2, pp.67-71 (1989).
- [23] Hoekstra, J., Van der Goot, D.P., Van den Brink, G. and Bilsen, F.A. : " The Influence of the Number of Cycles Upon the Visual Contrast Threshold for Spatial Sine Wave Patterns " , Vision Research, No.14, pp.365-368 (1974).
- [24] Savoy, R.L. and McCann, J.J. : " Visibility of Low-Spatial-Frequency Sine-Wave Target : Dependence of Number of Cycles " , J.Opt.Soc.Am. No.65, pp.343-350 (1975).
- [25] Campbell, F.W., Nachmias, J. and Jukes, J. : " Spatial-Frequency Discrimination in Human Vision " , J.Opt.Soc.Am. No.60, pp.555-559 (1970).
- [26] Charman, W.N. and Tucker, J. : " Dependence of Accommodation Response on the Spatial Frequency Spectrum of the Observed Object " , Vision Research, Vol.17, pp.129-139 (1977).
- [27] Owen, D.A. : " A Comparison of Accommodative Responses and Contrast sensitivity for Sinusoidal gratings " , Vision Research, Vol.20, pp.159-167 (1980).
- [28] Takeda, T., Iida, T., and Fukui, Y. : " Dynamic Eye Accommodation Evoked by Apparent Distances " , Optometry & Vision Science, Vol.67, No.6, pp.450-455 (1990).
- [29] 比留間伸行、星野春男 : “テレビジョン画像が水晶体焦点調節に及ぼす影響” , テレビ学会年次大会, 17-1, pp.389-390 (1989).
- [30] 鵜飼一彦 : “調節機構の機能的解析” , あたらしい眼科, Vol.4, No.4, pp.491-497 (1987).
- [31] Malmstrom, F.V. and Randle, R.J. : " Effects of Visual Imagery on the Accommodation Response",

- Perception & Psychophysics, Vol.19, No.5, pp.450-453 (1976).
- [32] Sakrison, D.J. : " On the Role of the Observer and a Distortion Measure in Image Transmission ",
IEEE Trans. Commun., Vol.COM-25, No.11 (1977).
- [33] 井上正之 : " 符号化处理画像の品質評価 ", テレビ誌, Vol.40, No.4, pp.292-297 (1986).
- [34] 中山 剛 : " 画像とその評価 - 画質評価と多変量解析 - ", テレビ誌, Vol.33, No.12,
pp.1033-1040 (1979).
- [35] 山田光穂、福田忠彦 : " 視線の動きを用いたテレビ画像の分析 ", テレビ誌, Vol.40,
No.2, pp.121-128 (1986).
- [36] 中山実、安池一貴、清水康敬 : " 提示画面の輝度変化と画像内容による瞳孔面積変化 ",
テレビ誌, Vol.44, No.3, pp.288-293 (1990).
- [37] 斎藤、伊比、東、石川、畑田 : " 視覚の生理特性からみた各種ディスプレイ評価 ",
テレビ学技報, VVI88-40, Vol.12, No.35, pp.43-46 (1988).
- [38] Takeda, T., Fukui, Y., and Iida, T. : " Influence of CRT Refresh Rates on Accommodation
Aftereffects ", Proceedings of Work with Display Units 86, pp.474-482 (1986).
- [39] 樋渡清二 : " 視覚とテレビジョン ", 日本放送出版協会 (1968).
- [40] 江森康文 : " 視覚の空間周波数特性と画像鮮鋭度 ", テレビ誌, Vol.33, No.12, pp.1000-
1008 (1979).
- [41] 佐柳和男, 伊藤宏 : " 写真レンズのinformation volume [1] 軸上に於ける解像力とresponse
function ", 応用物理, Vol.25, pp.443 (1956).
- [42] Schade, O.H. : " Image Gradation, Graininess, and Sharpness in Television and Motion Picture
Systems, part II and part IV", J.SMPTE, 58, pp.181 (1952). and J.SMPTE, 64, pp.11 (1955).
- [43] 磯野春雄 : " テレビジョン画像における鮮鋭さの一計算法 ", 信学論(B), Vol.J66-B,
No.7, pp.805-812 (1983).
- [44] 長谷川敬 : " テレビジョン画像における鮮鋭さと視距離 ", NHK技術研究, Vol.18,
No.2, pp.155-177 (1966).
- [45] 畑田豊彦 : " 画像評価と視覚特性 ", O plus E, No.81, pp.113-122 (1986).
- [46] Baldwin, M.W. : " The Subjective Sharpness of Simulated Television Images ", Bell Syst. Tech.J.,
Vol.19, No.10, pp.563-586 (1940).
- [47] Marr, D. and Ullman, S. : " Directional Selectivity and Its Use in Early Visual Processing ",
Proc. R. Soc. London Ser. B211, pp.151-180 (1981).
- [48] Adelson, E.H. and Bergen, J.R. : " Spatiotemporal Energy Models for the Perception of Motion ",

参考文献

- J. Opt. Soc. Am. A, Vol.2, No.2, pp.284-299 (1985).
- [49] Watson, A.B. and Ahumada, A.J. : " Model of Human Visual-Motion Sensing ", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.2, No.2, pp.322-341 (1985).
- [50] Heeger, D.J. : " Model for the Extraction of Image Flow ", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.4, No.8, pp.1455-1471 (1987).
- [51] Fleet, D.J. and Jepson, A.D. : " Computation of Component Image Velocity from Local Phase Information ", Int. J. Comput. Vision, 5, 1, pp.77-104 (1990).
- [52] Stone, J. and Fukuda, Y. : " Properties of Cat Retinal Ganglion Cells: A Comparison of W-cells with X- and Y-cells ", J. Neurophysiol., Vol.37, pp.722-748 (1974).
- [53] Rodieck, R.W. : " Visual Pathways ", Ann. Rev. Neurosci., Vol.2, pp.193-225 (1979).
- [54] 斎藤秀昭, 深田芳郎 : " パターン認識の基礎となる神経過程の解明 I ~ 網膜の神経回路と並列情報処理 ~ " , N H K 技術研究, Vol.37, No.2, 通巻第168号, pp.81-98 (1985).
- [55] Perry, V.H., Oehler, R. and Cowey, A. : " Retinal Ganglion Cells that Project to the Dorsal Lateral Geniculate Nucleus in the Macaque Monkey ", Neurosci., Vol.12, No.4, pp.1101-1124 (1984).
- [56] Perry, V.H. and Cowey, A. : " Retinal Ganglion Cells that Project to the Superior Colliculus and Pretectum in the Macaque Monkey ", Neurosci., Vol.12, No.4, pp.1125-1137 (1984).
- [57] Rodieck, R.W., Binmoeller, K.F. and Dineen, J. : " Parasol and Midget Ganglion Cells of the Human Retina ", J. Comp. Neurol., Vol.233, No.1, pp.115-132 (1985).
- [58] Kulikowski, J.J. and Tolhurst, D.J. : " Psychophysical Evidence for Sustained and Transient Detectors in Human Vision ", J. Physiol., Vol.232, pp.149-162 (1973).
- [59] Robson, J.G. : " Spatial and Temporal Contrast-Sensitivity Functions of the Visual System ", J. Opt. Soc. Am. 56, pp.1141-1142 (1966).
- [60] 森孝行, 渡部叡, 山口幸也 : " 視覚の空間正弦波レスポンス (2) " , N H K 技術研究, 第 1 8 卷、第 2 号、通巻第 9 3 号, pp.79-93 (1966).
- [61] Kelly, D.H. : " Motion and Vision. II. Stabilized Spatio-temporal Threshold Surface ", J. Opt. Soc. Am. Vol.69, No.10, pp.1340-1349 (1979).
- [62] Burr, D.C. and Ross, J. : " Contrast Sensitivity at High Velocities ", Vision Res., Vol.22, pp.479-484 (1982).
- [63] Oppenheim, A.V. and Schaffer, R.W. : " Digital Signal Processing ", Prentice-Hall Inc., New Jersey, pp.337-358 (1975).
- [64] 坂田晴夫 : " 視覚の位相特性 " , 信学論 (A), Vol.J67-A, No.12, pp.1217-1222 (1984).

- [65] Breitmeyer, B.G. and Ganz, L. : " Temporal Studies with Flashed Gratings: Inferences about Human Transient and Sustained Channels ", *Vision Research*, Vol.17, pp.861-865 (1977).
- [66] Lupp, U., Hauske, G. and Wolf, W. : " Perceptual Latencies to Sinusoidal Gratings ", *Vision Research*, Vol.16, pp.969-972 (1976).
- [67] Breitmeyer, B.G. : " Simple Reaction Time as a Measure of the Temporal Response Properties of Transient and Sustained Channels ", *Vision Research*, Vol.15, pp.1411-1412 (1975).
- [68] Arend, L.E. : " Response of the Human Eye to Spatially Sinusoidal Gratings at Various Exposure Durations ", *Vision Research*, Vol.16, pp.1311-1315 (1976).
- [69] Vassilev, A. and Mitov, D. : " Perception Time and Spatial Frequency ", *Vision Research*, Vol.16, pp.89-92 (1976).
- [70] Felipe, A., Buades, M.J. and Artigas, J.M. : " Influence of the Contrast Sensitivity Function on the Reaction Time ", *Vision Research*, Vol.33, No.17, pp.2461-2466 (1993).
- [71] Ullman, S. : " The Interpretation of Visual motion ", MIT Press, Cambridge MA (1979).
- [72] Franks, L.E. : " Signal Theory ", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. (1969).
猪瀬博、加藤誠巳、安田浩 訳 : " 信号理論 ", 産業図書 (1974).
- [73] McLean, J. and Palmer, L.A. : " Contribution of Linear Spatiotemporal Receptive Field Structure to Velocity Selectivity of Simple Cells in Area 17 of Cat ", *Vision Research*, Vol.29, pp.675-679 (1989).
- [74] DeAngelis, G.C., Ohzawa, I. and Freeman, R.D. : " Spatiotemporal Organization of Simple-cell Receptive Field in the Cat's Striate Cortex. I. General Characteristics and Postnatal Development ", *J. Neurophysiol.*, Vol.69, pp.1091-1117 (1993).
- [75] McLean, J., Raab, S. and Palmer, L.A. : " Contribution of Linear Mechanisms to the Specification of Local Motion by Simple Cells in Areas 17 and 18 of the Cat ", *Visual Neurosci.*, Vol.11, pp.271-294 (1994).
- [76] Levinson, E. and Sekuler, R. : " The Independence of Channels in Human Vision Selective for Direction of Movement ", *J. Physiol.*, Vol.250, pp.347-366 (1975).
- [77] Watson, A.B., Thompson, P.G., Murphy, B.J. and Nachmias, J. : " Summation and Discrimination of Gratings Moving in Opposite Directions ", *Vision Research*, Vol.20, pp.341-347 (1980).
- [78] Stromeyer III, C.F., Kronauer, R.E., Madsen, J.C., and Klein, S.A. : " Opponent Mechanisms in Human Vision ", *J. Opt. Soc. Am. A1*, pp.876-884 (1984).
- [79] Ramachandran, V.S. and Inada, V. : " Spatial Phase and Frequency in Motion Capture of Random-

参考文献

dot patterns ", Spatial Vision, Vol.1, No.1, pp.57-67 (1985).

[80] Ramachandran, V.S. and Cavanagh, P. : " Motion Capture Anisotropy ", Vision Research, Vol.27, No.1, pp.97-106 (1987).