

filling-in の起こりやすさの時空間周波数解析

Spatio-temporal Frequency Analysis of Filling-in Possibility

山 中 立 子* 横 田 正 恵
Ryuko YAMANAKA Masae YOKOTA

網膜に入力する光と異なる視知覚が生じる錯視の一例に filling-in がある。錯視が起こる原因として、視覚神経系での視覚情報の獲得、情報の表現、伝送、処理のプロセスで、『入力光と異なるように知覚された方が都合がよい』ことがあると考えられることから、filling-in の特性を調べ発生機構を解明することは、視覚神経系の情報処理メカニズムを理解することにつながるはずである。

視覚情報は時空間周波数が異なるいくつかのチャンネルに分かれて伝送・処理されるマルチチャンネル理論が提案されており、各チャンネルの時空間周波数に対するコントラスト感度が推定されているが、filling-in が発生する際の時空間周波数の影響に関しては、これまで、ほとんど議論されていない。

本研究では、はじめに制限された時空間周波数のみを通すチャンネルを仮定する。仮定した各チャンネルを通る視覚刺激の一例として、(時間)、空間周波数ともに帯域制限された画像列を作成する。この画像列を呈示した際、filling-in が発生するまでの時間を心理実験から測定した。次に、複数のチャンネルにおよぶ広帯域な周波数を含む画像列を作成し、filling-in が発生するまでの時間を計測した。

心理実験による結果を用いて、チャンネルの filling-in が発生するまでの時間を、(時間)、空間周波数、filling-in させる対象の大きさ、視覚のコントラスト感度を用いてモデル化した。そして、複数のチャンネルにおよぶ広帯域な時空間周波数を含む画像列を呈示した際の filling-in 時間を、複数のチャンネルのうち最も早く filling-in を起こしたものの filling-in 時間としてモデル化したところ、心理実験により計測された結果の特徴を表現できることを示した。

キーワード 視知覚充填, マルチチャンネル理論, 時空間周波数
filling-in, multi-channel theory, spatio-temporal frequency

1 まえがき

ヒトは5種類の感覚器を通して外界の情報を獲得しているが、なかでも視覚系からはもっとも多く情報を得ているといわれる。したがって、脳・神経系の情報処理機構を解明するために、視覚系が外界情報を獲得・知覚するメカニズムを調べることは非常に有効な手段になりうる。そこで、これまで生理学、心理学、情報科学など様々な立場から、視覚系の情報処理機構を理解する試みがなされている。

網膜から視覚中枢に至る視覚の処理過程では、“外界からの光入力と違う知覚が生じる方が都合がよい”ことがあり、私達はそれを錯視として感じると言われていた。錯視の特性を解析しその発生機構を解明することは、ヒトの視覚神経系の情報表現・処理メカニズムを理解することに他ならない。

網膜への光入力とは異なる視知覚が生じる代表的な事例として Yarbus による静止網膜像の実験がある¹⁾。Yarbus は、固視微動を含む眼球運動を消滅させる装置

*平成14年3月まで本学情報文化学部情報文化学科助手, (旧姓小澤)

により、網膜に入力する像が変化しない環境を構築した。Yarbusは、こうした環境下では今まで知覚されていた対象物が次第に知覚されなくなるを見出した。また、一様な色の大きな壁を見た場合など、固視微動があったとしても網膜像に大きな空間的变化を生じない場合にも外界情報を獲得できないことがある²⁾。そのほか、光入力と異なる錯視の例として視知覚充填(filling-in)が知られている^{3,4)}。filling-inは、視野の一部に、その周辺領域とは明るさや色、テクスチャなど特徴の異なる領域がある場合、適当な条件下で、その領域が周辺領域から侵食され、周辺領域で充填される現象である。

視神経が網膜を貫き中枢に向かう網膜上の場所は、網膜乳頭と呼ばれ、光を受容する視細胞が存在しない。そこでは、外界情報を獲得できないため、盲点とも呼ばれる。しかし、我々は盲点を視野中の黒い領域として知覚しているわけではなく、普段はその存在を意識することもない。これは、盲点に存在する領域では、中枢に送られる情報が皆無であるため、その周囲の情報で充填されているためであると考えられている。その他、網膜の上を通る血管部分や、視細胞の少ない周辺視にあたる場所でも、filling-inが生じていると考えられている⁵⁾。すなわち、我々は、filling-inにより、外界に起因しない視覚情報を抹消し、外界情報だけを巧みに抽出していると考えられる。したがって、filling-in発生の特性を調べることは、視覚神経系での外界情報の獲得、情報表現、伝送、処理に関するメカニズムを理解することにつながるはずである。

ところで、視覚の時空間周波数特性はコントラスト閾⁶⁾として計測される。(時間)、空間的に輝度が正弦波状に変化する視覚刺激を呈示した際の、刺激を検知可能な最小のコントラストをコントラスト閾といい、その逆数はコントラスト感度と呼ばれている。これまでにさまざまな視覚心理実験を通じて、視覚神経系は外界からの光入力を複数の(時間)周波数、空間周波数帯域に分解しそれぞれ異なる処理系で処理しているとするマルチチャンネル理論が提案されるに至っている。具体的に、さまざまな手法で、各チャンネル毎にそのコントラスト感度関数が推定されているが、各チャンネルとfilling-inの起こりやすさとの関連は、これまでほとんど議論されていない。

本研究では、はじめに、マルチチャンネル理論に従い時空間周波数の制限帯域に感度を持つチャンネルを仮定する。そしてチャンネルを通る信号の例として、(時間)、

空間周波数とともに帯域制限された画像列を作成し、その画像列に埋め込まれた一様な領域がfilling-inを起こすまでに要する時間(fill-in 時間)を計測することにより、各チャンネルごとのfilling-in時間を調べる[心理実験1]。次に、複数のチャンネルにおよぶ広帯域な時空間周波数を持つ画像列に対するfilling-in時間を測り、複数のチャンネルの特性がfilling-in時間に与える影響を調べる[心理実験2]。その結果からマルチチャンネル理論に基づき、時空間周波数とfilling-inの起こりやすさとの関係を表現するモデルを提案する。

2 心理実験1(各チャンネルのfilling-in時間の計測)

本研究では、マルチチャンネル理論で想定されるチャンネルを仮定する。マルチチャンネル理論では、(時間)、空間周波数とともに制限された帯域に感度を持つ複数のチャンネルが存在し、視覚情報はそれらのチャンネルに分かれて処理されると考えられている。

そのようなチャンネルごとの特性がfilling-inに与える影響を調べるため、(時間)、空間周波数とともに狭帯域に制限された画像列を作成し、その画像列を呈示したときのfilling-in時間を以下の実験により調べた。

2.1 Filling-in 実験の基本的な流れ

値 $\{0,1,2,\dots,255\}$ のいずれかをとる画素数 $N \times N$ 、 T 枚の画像列 $A(t, x, y)$, $t=1, \dots, T$, $x, y=1, \dots, N$ を考える。 x, y はそれぞれ水平、垂直方向の座標を表し、画像の左上を $x=y=1$ 、右下を $x=y=N$ とする。個々の画素に着目しない場合、画像列を単に $A(t)$, $t=1, \dots, T$ と表す。画像列 $A(t)$ 中のすべての画像には、座標 x_{fix}, y_{fix} を中心として値255をとる画素数 $N_{fix} \times N_{fix}$ の正方形の固視点と、座標 $(N/2, N/2)$ を中心とし、値 v_{obj} をとる直径 d_{obj} の円形の領域がある。この円形の領域は、filling-inさせることを試みる領域であり、filling-in対象と呼ぶことにする。

画像列 $A(t)$, $t=1, \dots, T$ を時間間隔 ΔT でCRTモニタに描画することにより、被験者に呈示する。一連の画像列を呈示し終えたら、再び最初の画像から呈示することを繰り返す。モニタ上では、画像の一辺の長さは W [mm]であり、モニタ前面と被験者の眼球前面の距離は L [mm]である。被験者には、画像列を呈示している間、瞬きを禁じ、片眼で固視点を固視させる。そして、filling-in対象がfilling-inを起こしたと感じたとき、マウスのボタンを押すように指示する。画像列の呈示開始から被験者がマウスのボタンを押すまでの時間を、

filling-in を起こすまでの時間と定義し, filling-in 時間 τ と呼ぶことにする.

2.2 チャンネルの仮定と画像列の作成

本実験では, 特定の時空間周波数のみを通すチャンネルを仮定する. これまでに推定されている各チャンネルの(時間), 空間周波数の帯域はおおよそ0.5から2[octave]であることから⁷⁾, その対数軸上での中間値である1[octave]を, 各チャンネルが持つ時間, 空間周波数の帯域幅であると仮定する.

上限の(時間)周波数 f_{upper}^T , 下限(時間)周波数 f_{lower}^T , および上限の空間周波数 f_{upper}^S , 下限の空間周波数 f_{lower}^S で帯域制限される画像列を次の手法により作成し, チャンネルを通る視覚情報の一例として, 被験者に呈示する画像列とする.

各画素値が独立に平均128, 標準偏差128/3の正規分布に従う画像列 $b(t, x, y)$, $t = 1, \dots, T$, $x, y = 1, \dots, N$ を考える. この画像列を3次元フーリエ変換して適当な3次元窓関数を乗じた後, 再び3次元逆フーリエ変換することにより, 周波数 f_{lower}^T 以上 f_{upper}^T 以下, および水平, 垂直方向ともに空間周波数 f_{lower}^S 以上 f_{upper}^S 以下に帯域制限された画像列 $b'(t, x, y)$, $t = 1, \dots, T$, $x, y = 1, \dots, N$ を得る(付録A参照). これに, 固視点と filling-in 対象を付加する. filling-in 対象の画素値 v_{obj} は, 画像列 $b'(t)$ の主観的な平均輝度と filling-in 対象の主観的な輝度が一致するように決定する. これは, 一般にモニタのガンマ特性などに依存する. 画像列 $b'(t)$ に固視点と filling-in 対象を埋め込み, 画素値を $\{0, 1, \dots, 255\}$ に量子化したものを画像列 $B(t, x, y)$ とする.

2.3 実験条件と手順

2.2で述べた画像列に対し, filling-in を起こすまでに要する時間を計測する実験を行った. 被験者は健康者1名であり, 被験者の効き目である右眼を被験眼とし

た. 被験者の右眼は固視点の正面に位置するように顎を固定し, 左眼は眼帯で覆った. また, 実験は, 明順応状態で行った. 次の計測に移る際は, 直前の実験により生じる網膜上の残像の影響を避けるため, 被験者に2~3秒間瞼を閉じるように指示した. 画像列の呈示開始から20秒経過しても filling-in しなかった場合は, filling-in が起こらない, もしくは計測に失敗したものとして, 記録から削除した.

この本実験に関わるパラメータは以下のように設定した.

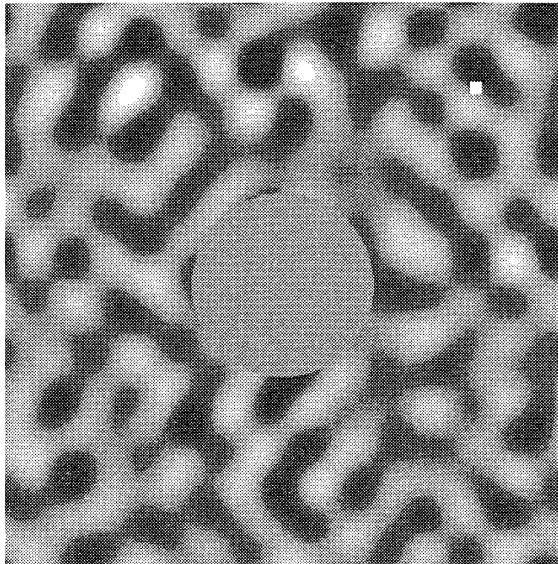
$$\begin{aligned} N &= 512 [\text{pixel}] \\ T &= 32 [\text{枚}] \\ W &= 152 [\text{mm}] \\ L &= 350 [\text{mm}] \\ N_{fix} &= 11 [\text{pixel}] \\ (x_{fix}, y_{fix}) &= (434, 78) \\ v_{obj} &= 135 \\ d_{obj} &\in \{42, 84, 125, 167, 209\} [\text{pixel}] \\ \Delta T &= 30 [\text{msec}] \end{aligned}$$

また, 表1に示す(時間), 空間周波数に感度を持つ24のチャンネルを仮定し, (時間)周波数軸上で時間チャンネル i , 空間周波数軸上で空間チャンネル j に感度を持つチャンネルを $CH_{(i,j)}$ と表すことにする. なお, 表1中の f_{mid}^T , f_{mid}^S は, それぞれの制限帯域内での時間, 空間周波数の対数軸上での中間値を表す. 空間周波数の単位は, 以降, 視角1[deg]あたりの周波数[cpd~:~cycle per degree]を用いる. 表1には空間周波数として512×512[pixel]の画像の水平, 垂直方向に含まれる波数()内に併記した. $CH_{(n, \cdot)}$, $CH_{(\cdot, m)}$ は, それぞれ n , ($n=1,2,3,4$) 番目の(時間)周波数を含むチャンネル, m , ($m=1,2,3,4,5,6$) 番目の空間周波数を含むチャンネルを表現する.

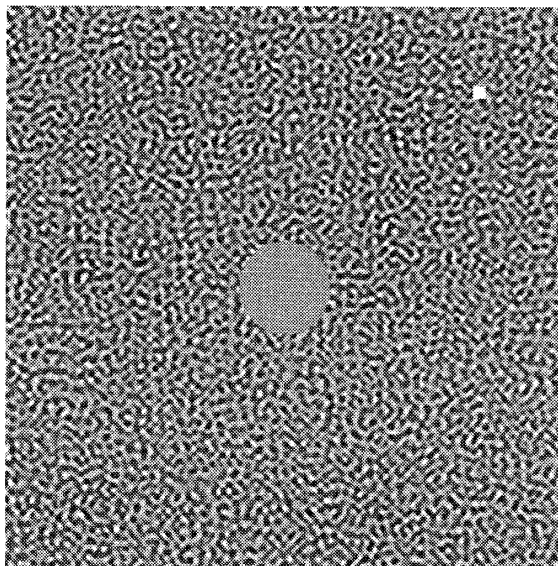
表1 チャンネルの時空間制限周波数

Channel No.		f_{lower}^T [Hz]	~	f_{upper}^T [Hz]	f_{mid}^T [Hz]
Temporal 1	$CH_{(1, \cdot)}$	8.0	~	16.0	11.3
Temporal 2	$CH_{(2, \cdot)}$	4.0	~	8.0	5.65
Temporal 3	$CH_{(3, \cdot)}$	2.0	~	4.0	2.83
Temporal 4	$CH_{(4, \cdot)}$	1.0	~	2.0	1.41
Channel No.		f_{lower}^S [cpd]	~	f_{upper}^S [cpd]	f_{mid}^S [cpd]
Spatial 1	$CH_{(\cdot, 1)}$	5.23 (128)	~	10.45 (256)	7.39
Spatial 2	$CH_{(\cdot, 2)}$	2.61 (64)	~	5.23 (128)	3.69
Spatial 3	$CH_{(\cdot, 3)}$	1.31 (32)	~	2.61 (64)	1.85
Spatial 4	$CH_{(\cdot, 4)}$	0.65 (16)	~	1.31 (32)	0.92
Spatial 5	$CH_{(\cdot, 5)}$	0.33 (8)	~	0.65 (16)	0.46
Spatial 6	$CH_{(\cdot, 6)}$	0.16 (4)	~	0.33 (8)	0.23

$N=512$ [pixel], $f_{lower}^T = 8$ [Hz], $f_{upper}^T = 16$ [Hz], $f_{lower}^S = 128$, $f_{upper}^S = 256$, $d_{obj} = 167$ [pixel], および $f_{lower}^T = 8$ [Hz], $f_{upper}^T = 16$ [Hz], $f_{lower}^S = 16$, $f_{upper}^S = 32$, $d_{obj} = 84$ [pixel]として生成された画像列 $B(t, x, y)$ 中の画像の一例を図1(a),(b)にそれぞれ示す.



(a) $f_{lower}^T = 8$ [Hz] $f_{lower}^S = 5.2$ [cpd] (128)
 $f_{upper}^T = 16$ [Hz] $f_{upper}^S = 10.45$ [cpd] (256)
 $d_{obj} = 167$ [pixel](8[deg])



(b) $f_{lower}^T = 8$ [Hz] $f_{lower}^S = 0.65$ [cpd] (16)
 $f_{upper}^T = 16$ [Hz] $f_{upper}^S = 1.3$ [cpd] (32)
 $d_{obj} = 84$ [pixel](4[deg])

図1 画像例の中の画像の例

24の各チャンネルごとに直径 d_{obj} が異なる5種類の filling-in 対象を付加し, 全部で120の画像列を用いた.

以上の実験環境により, 画像の一辺の視角は 24.5 [deg], 固視点の一辺の視角は 0.53 [deg], filling-in 対象の直径の視角は $2, 4, 6, 8, 10$ [deg]となる. 固視点は, filling-in 対象の中心から右上 45 [deg]方向に視角 12 [deg]離れた場所に位置することになる. また, モニタの解像度は 768×1024 [pixel], リフレッシュレートは 85 [Hz]である.

2.4 filling-in 時間の計測結果

filling-in 対象の直径を $d_{obj} = 2, 4, 6, 8, 10$ [deg], 表1に示した f_{lower}^T から f_{upper}^T , f_{lower}^S から f_{upper}^S の時空間周波数を持つ全120の画像列, に対し, filling-in 時間 τ を測定した. 120の画像列はランダムな順で提示し各実験条件に対して5回ずつ繰り返した. チャンネル $CH_{(i, j)}$, filling-in 対象の大きさ $d_{obj} = k$ に対して計測された filling-in 時間を $\tau(CH_{(i, j, k)})$ と表現することにする.

本実験後, 被験者から次の主観的報告がされている.

- 対象が大きいかほど filling-in が起こりにくい.
- 周辺領域のテクスチャの見え方によって filling-in の起こりやすさが変わる.
- (時間)、空間周波数ともに低いときには filling-in が起こりにくく, 高いときには起こりやすい.

filling-in 対象の大きさ d_{obj} ごとに, 各チャンネルの(時間)周波数, 空間周波数の制限帯域を対数軸で表したときの中間値 f_{mid}^T, f_{mid}^S をそれぞれ縦軸, 横軸にとり, 計測された filling-in 時間 $\tau(CH_{(i, j, k)})$ を図2に示す.

図2を見ると, filling-in が起こるまでの時間 τ は, filling-in 対象が大きくなるにしたがい長くなる. また, 画像列に含まれる(時間), 空間周波数がともに高いとき τ は長くなる傾向が見られるが, $CH_{(c, 3)}$ すなわち $f_{mid}^S = 1.85$ [cpd]の画像列では filling-in 時間が長く, $CH_{(c, 4)}$ ($f_{mid}^S = 0.92$ [cpd])の画像列では短い傾向にあることが分かる.

3 心理実験2(広帯域な周波数を含む画像を呈示した場合の filling-in 時間)

心理実験1では, 個々のチャンネルに対する filling-in 時間を測定した. 心理実験2では, 複数のチャンネルにわたる広帯域の(時間), 空間周波数が含まれる画像列を呈示した場合に, filling-in 時間がどのように変化するかを, 以下の手法により調べた.

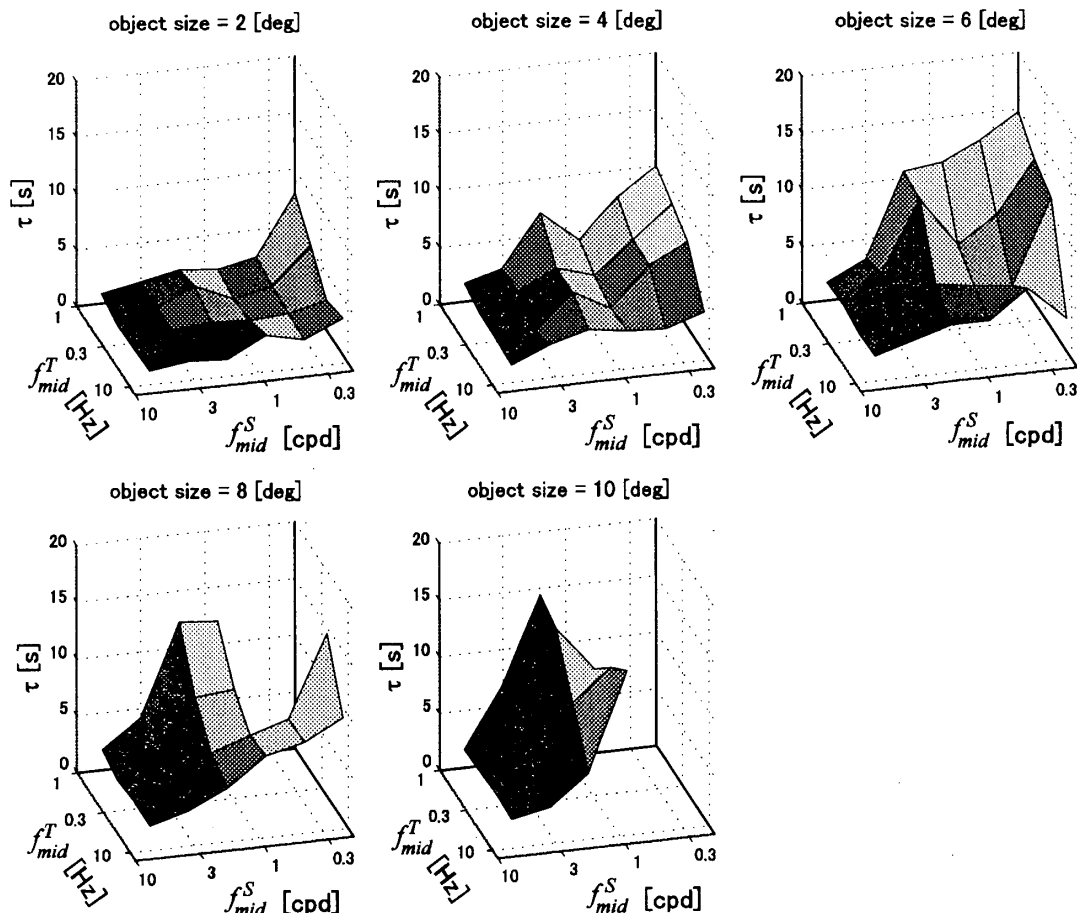


図2 周辺領域を持つ周波数の中間値 f_{mid}^T, f_{mid}^S , filling-in 対象の直径 d_{obj} と filling-in 時間 $\tau (CH_{(i,j,k)})$ の関係

3.1 実験に用いる画像列と実験方法

実験の基本的流れは、2.1と同様である。心理実験2で用いる画像列は、各画素値が独立で平均128、標準偏差128/3のランダムな画素値を持つ画像列 $b(t, x, y)$ を3次元フーリエ変換し、(時間)周波数 f_{upper}^T 、空間周波数 f_{upper}^S を上限周波数として(時間)周波数、空間周波数に対し低域周波数フィルタ特性を持つ窓関数(付録A)を乗じ、その後、3次元逆フーリエ変換することによって作成した。すなわち、ランダムドット画像列 $b(t, x, y)$ に、(時間)周波数 f_{upper}^T 、空間周波数 f_{upper}^S を上限とする3次元低域通過フィルタを通すことによって画像列を得た。これらの画像列に、実験1と同様の特性を持つ注視点と、5種類の filling-in 対象を付加した。

3.2 filling-in 時間の計測結果

本実験で用いる画像列の(時間)、空間周波数の低域遮断周波数 f_{upper}^T, f_{upper}^S を表2に示す。これらの画像列は、表2に併記した複数のチャンネルにわたる(時間)、空間周波数を含んでいる。時空間周波数の制限帯域 f_{upper}^T, f_{lower}^S と filling-in 対象の大きさ d_{obj} が異なる80セ

ットの画像列を、ランダムな順に各画像列が3回以上現れるように被験者に呈示し、filling-in が起こるまでの時間を計測した。その結果を図3に示す。

表2 画像列の上限周波数と、画像列が含む時空間周波数を有するチャンネル

f_{upper}^T [Hz]	channel No. whose temporal frequency included
16.0	$CH_{(1, \cdot)}, CH_{(2, \cdot)}, CH_{(3, \cdot)}, CH_{(4, \cdot)}$
8.0	$CH_{(2, \cdot)}, CH_{(3, \cdot)}, CH_{(4, \cdot)}$
4.0	$CH_{(3, \cdot)}, CH_{(4, \cdot)}$
2.0	$CH_{(4, \cdot)}$
f_{upper}^S [cpd]	channel No. whose spatial frequency included
10.45 (256)	$CH_{(\cdot, 1)}, CH_{(\cdot, 2)}, CH_{(\cdot, 3)}, CH_{(\cdot, 4)}, CH_{(\cdot, 5)}, CH_{(\cdot, 6)}$
5.23 (128)	$CH_{(\cdot, 2)}, CH_{(\cdot, 3)}, CH_{(\cdot, 4)}, CH_{(\cdot, 5)}, CH_{(\cdot, 6)}$
2.61 (64)	$CH_{(\cdot, 3)}, CH_{(\cdot, 4)}, CH_{(\cdot, 5)}, CH_{(\cdot, 6)}$
1.31 (32)	$CH_{(\cdot, 4)}, CH_{(\cdot, 5)}, CH_{(\cdot, 6)}$

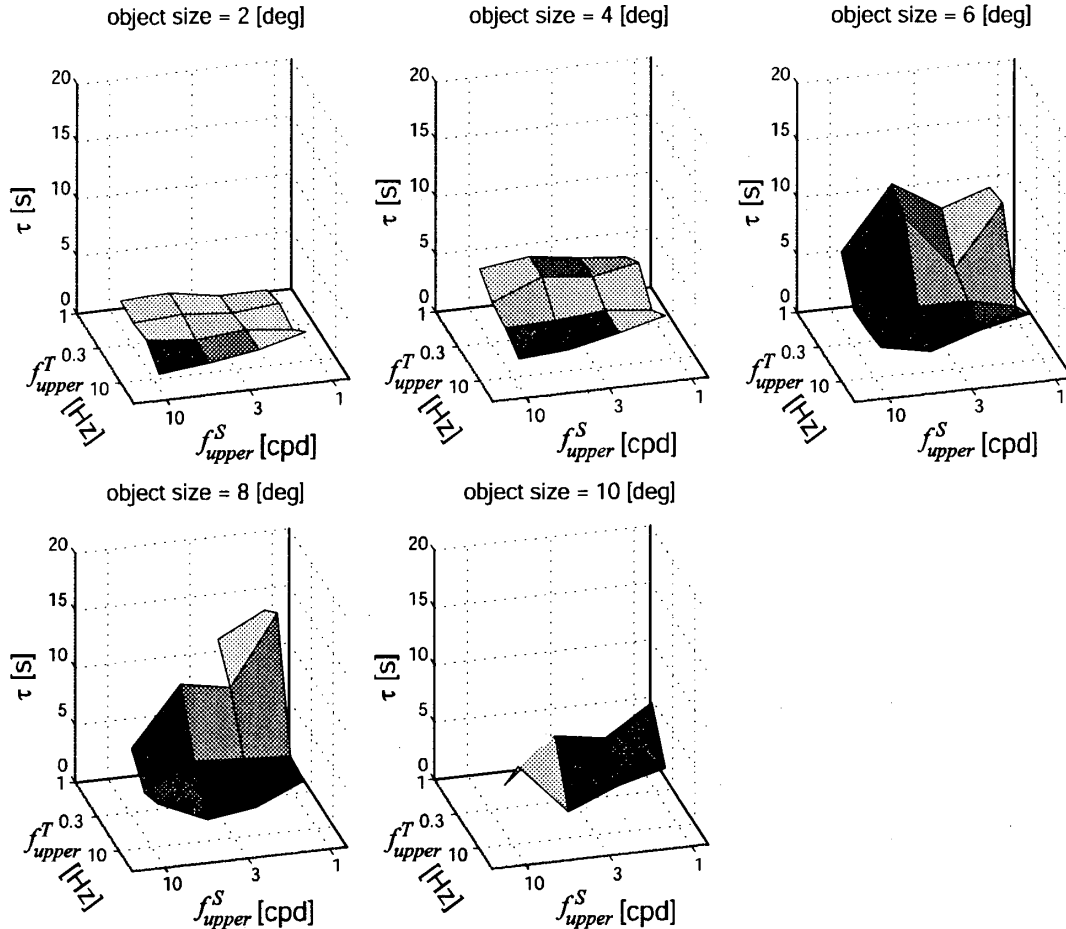


図3 周辺領域が持つ上限周波数 f_{upper}^T, f_{upper}^S と filling-in 時間 τ の関係

4 (時間), 空間周波数と filling-in 時間の関係のモデル化
 計測された filling-in 時間 $\tau(CH_{(i,j,k)})$ は, 心理実験 1 による結果と, 被験者による主観的報告から, filling-in 対象の大きさ, (時間), 空間周波数と, 視覚系の時空間周波数の感度特性に依存する可能性が考えられる。そこで, チャンネルが有する (時間), 空間周波数の中間値 f_{mid}^T, f_{mid}^S と, filling-in 対象の直径 d_{obj} , 視覚の空間周波数特性を表すコントラスト感度特性 $CSF(f^T, f^S, e)$ を用いて, 単一のチャンネルに対する filling-in 時間 $\tau(CH_{(i,j,k)})$ を以下のようにモデル化する。

$$\tau(CH_{(i,j,k)}) = d_{obj}^k \{ a_0 + a_1 (f_{mid}^T)^{k^T} + a_2 (f_{mid}^S)^{k^S} + a_3 (f_{mid}^T)^{k^T} (f_{mid}^S)^{k^S} \} + b_0 CSF(f^T, f^S, e = 12) \quad (1)$$

$d_{obj}^k, f_{mid}^T, f_{mid}^S$ は, それぞれ k 番目の filling-in 対象の大きさ, i 番目の時間チャンネル, j 番目の空間チャンネルが持つ周波数帯域の中間値を表す。なお, (時間), 空間周波数に対するコントラスト感度特性は, filling-in 対象の中心位置の網膜偏心度 $e=12[\text{deg}]$ に対し, 付録 B

に記す方法により推定された $CSF(f^T, f^S, e = 12)$ を用いた。

パラメータ $a_0, \dots, a_3, k^T, k^S, b_0$ は, filling-in 時間の各計測値とモデルから算出される filling-in 時間の間の平均 2 乗誤差を最小にするように, 非線形パラメータ推定法を用いて推定した。推定されたパラメータを表 3 に示す。その際の平均 2 乗誤差の平方根は約 2.54[sec] であった。

表 3 推定されモデルパラメータの値

a_0	3.84
a_1	-5.78
a_2	-6.56
a_3	10.11
k^T	0.097
k^S	0.19
b_0	0.025

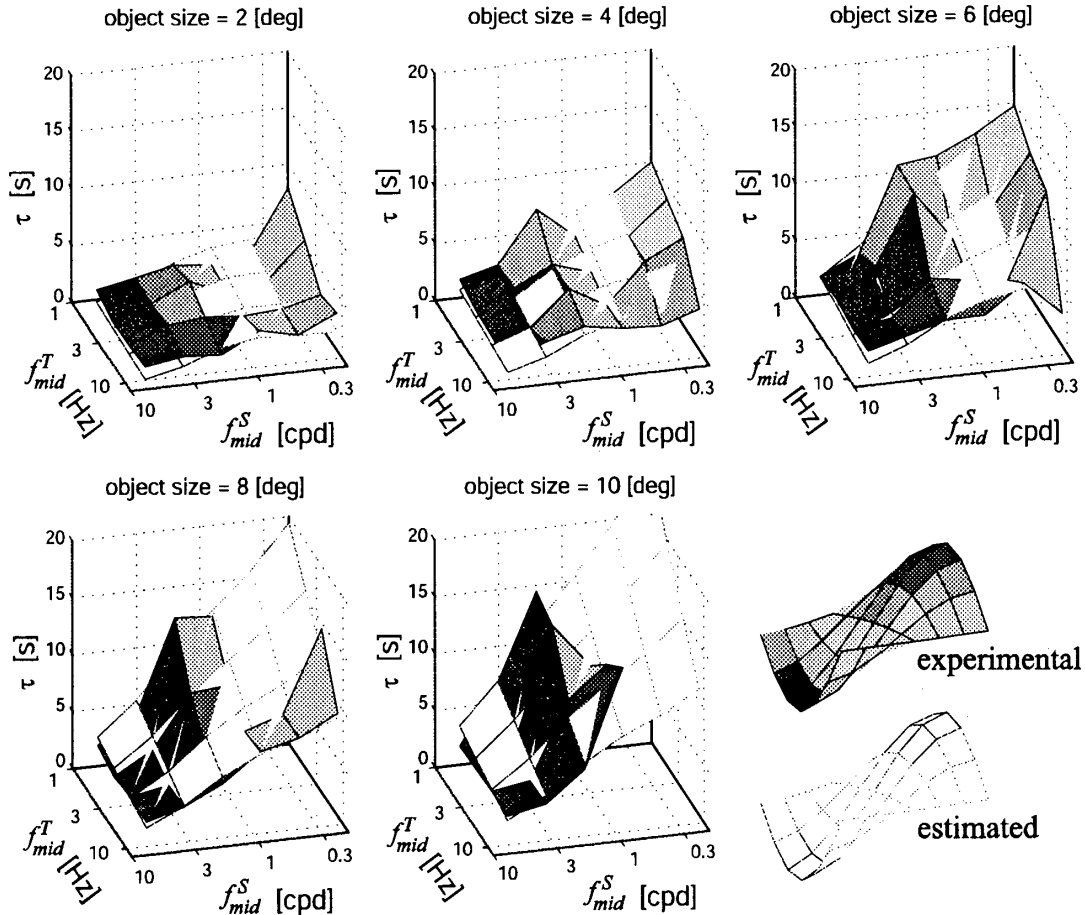


図4 モデルにより推定された心理実験1に対する filling-in 時間と計測値

本モデルが各チャンネルに対する filling-in 時間を表現できているかを確認するため、 d_{obj} , f_{mid}^T , f_{mid}^S ごとの filling-in 時間の平均値と、式(1)の提案モデルから算出される filling-in 時間を図4に重ねて示した。提案したモデルは心理実験結果をよく表現していることが分かる。

ところで、時空間周波数に対するコントラスト感度は、各チャンネルのコントラスト感度の中で最大を与えるものであることが示唆されている⁷⁾。filling-in 対象の直径が d_{obj} のとき、 n 個の(時間)周波数チャンネル i_1, \dots, i_n と m 個の空間周波数チャンネル j_1, \dots, j_m を含む画像列を呈示した際の filling-in 時間を $\tau(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m, d)$ と表すとき、次式により $\tau(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m, d)$ を推定する。

$$\begin{aligned} & \tau(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m, d) \\ & = \min[\tau(i_1, j_1, d), \dots, \tau(i_n, j_1, d), \\ & \quad \tau(i_1, j_2, d), \dots, \tau(i_n, j_2, d), \\ & \quad \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tau(i_1, j_m, d), \dots, \tau(i_n, j_m, d)]$$

なお、上式の $\min(\cdot)$ は $()$ に含まれる要素の最小値を返す関数を表す。式(1)を用いて推定された $\tau(i, j, d)$ を上式に適用し、複数の時空間周波数チャンネルにおよぶ時空間周波数を含む画像を呈示したときの filling-in 時間 $\tau(i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m)$ を推定し、図5に、心理実験結果と重ねて示す。モデルの推定値と心理実験結果との平均2乗誤差の平方根は、3.14[sec]であり、心理実験データの時空間周波数の特性を、おおよそ表現できている。

5 まとめ

本研究では、はじめにマルチチャンネル理論に基づき時空間周波数の制限帯域を通すチャンネルを仮定した。各チャンネルの帯域に制限されたランダムドット画像列に対し、filling-in 時間を計測した。その結果に基づいて各チャンネルの filling-in 時間のモデルを提案し、心理実験結果をよく表現できていることを確認した。次に、複数のチャンネルの帯域の時空間周波数が含まれる画像

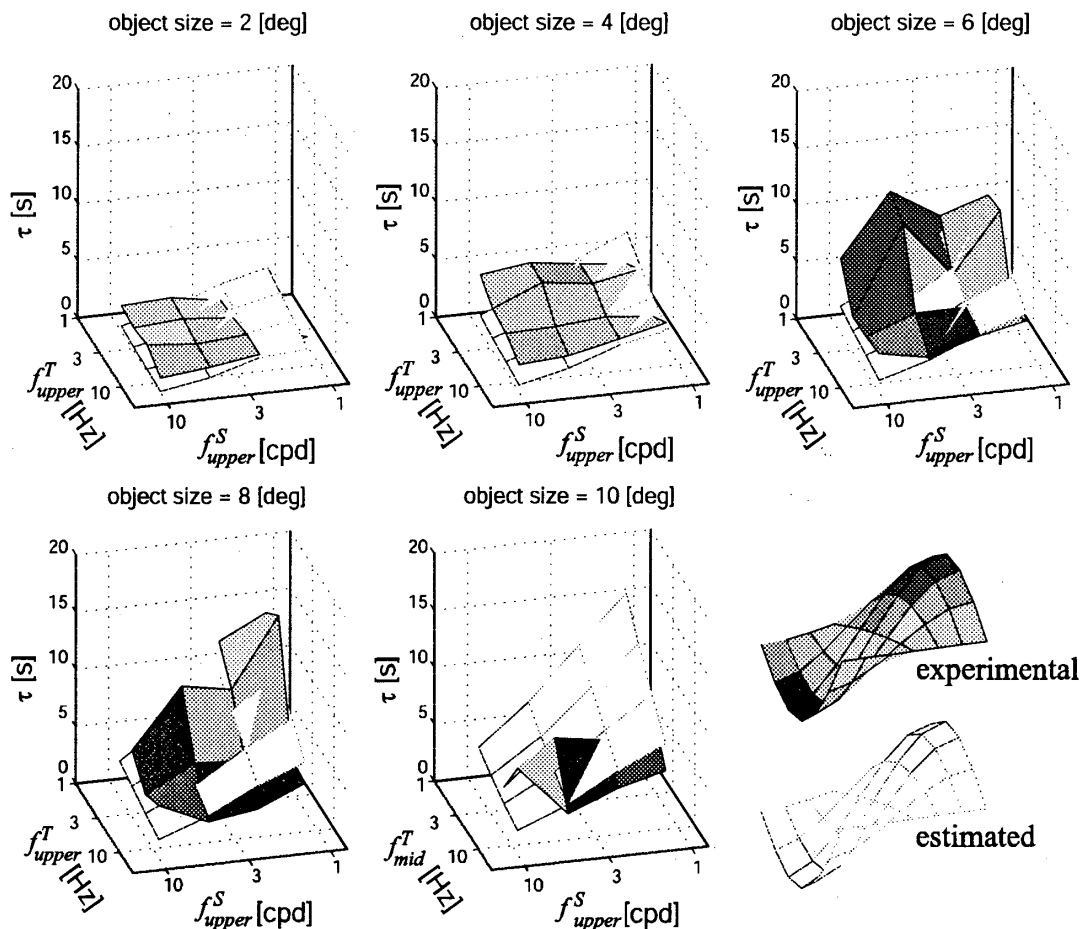


図5 モデルにより推定された心理実験2に対する filling-in 時間と心理実験による計測値

列を用いて filling-in 時間を計測した。これを各チャンネルのモデルから推定される filling-in 時間のうち最小値を与えるものとして推定したところ、心理実験から得られた時空間周波数のおおまかな特性が表現できることが分かった。

この結果を、複数の被験者によるデータから確認することは次の課題である。今後は、コントラスト感度の発生秩序⁽⁸⁾⁽⁹⁾を検討し、時空間周波数に対する filling-in 時間とコントラスト感度の関係から、filling-in の発生機構の解明を目指す。

謝辞 本研究のご指導を賜りました岐阜大学 工学部 応用情報学科 横田康成 助教授と、実験にご協力下さいました岐阜大学横田研究室学生の皆様に深く感謝いたします。

このような研究遂行の機会を与えて頂きました名古屋文理大学前理事長 故 瀧川直昭氏には、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. L. Yarbus, "New methods for investigating various parts of the retina.", *Biofizika*, vol.2, pp.163--165 (1957).
- 2) Michael A. Paradiso and Ken Nakayama, "Brightness perception and filling-in," *Vision Research*, vol.31, no.7/8, pp.1221--1236 (1991)
- 3) Peter De Weerd, Ricardo Gattass, Robert Desimone, and Leslie G. Ungerleider, "Responses of cells in monkey visual cortex during perceptual filling in of an artificial scotoma," *Nature*, vol.377, no.26, pp.731--734, (1995)
- 4) Peter De Weerd, Robert Desimone, and Leslie G. Ungerleider, "Perceptual filling-in : a parametric study," *Vision Res.*, vol.38, no.18, pp.2721--2734 (1998)
- 5) D. B. Poe and H. F. Crovitz, "Measurements of Troxler's effect", *Psychonomic Science*, vol.11, pp.123--124 (1968)
- 6) 佐藤隆夫, 三浦佳世`第II部 視覚 第9章 空間・時

間周波数特性", 大山正編, 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, pp.551--605 (1994)

- 7) 近江政雄, 塩入諭, 氏永弘裕, 川端康弘, 大竹史郎, "第5章 視覚の時空間特性", 日本視覚学会編, 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, pp.193--210 (2000)
- 8) J. Rovano, O. Luntinen and R. Nasanen, "Modeling the dependence of contrast sensitivity on grating area and spatial frequency", Vision Research, vol.33, no.18, pp.2773--2788 (1993)
- 9) J. Rovano, K. Donner, R. Nasanen and A. Raninen, "Flicker sensitivity as a function of target area with and without temporal noise", Vision Research, vol.40, pp.3841-3851 (2000)
- 10) J. Rovamo, V. Virsu and R. Nasanen, "Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision", Nature, vol.271, pp.54--56 (1978)
- 11) N. Drasdo, "The neural representation of visual space", Nature, vol.266, pp.554--556 (1977)

付録

A 帯域制限された画像列作成法

画像列 $b(t, x, y), t = 1, \dots, T, x, y = 1, \dots, N$ を次式に示すように3次元フーリエ変換する。

$$\bar{b}(f_t, f_x, f_y) = \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N e^{-i2\pi(f_t t + f_x x + f_y y)} b(t, x, y)$$

ただし,

$$f_t = -T/2 + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, T/2 - 1, T/2$$

$$f_x, f_y = -N/2 + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2 - 1, N/2$$

とする。一方, エネルギーを保存しつつ, f_{upper}^T 以上, f_{lower}^T 以下の (時間) 周波数成分と水平, 垂直方向ともに f_{upper}^S 以上, f_{lower}^S 以下の周波数成分を除去するため, 窓関数

$$w(f_t, f_x, f_y)$$

$$= \begin{cases} 1, & f_t = f_x = f_y = 0 \\ \{ \sqrt{(f_{upper}^T - f_{lower}^T)(f_{upper}^S - f_{lower}^S)} \}^{-1}, & |f_t| \leq \frac{T}{2} f_{upper}^T, |f_t| \geq \frac{T}{2} f_{lower}^T, \\ & |f_y| \leq \frac{N}{2} f_{upper}^S, |f_y| \geq \frac{N}{2} f_{lower}^S, \\ & |f_x| \leq \frac{N}{2} f_{upper}^S, \text{ and } |f_x| \geq \frac{N}{2} f_{lower}^S \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

を定義する。 $\bar{b}(f_t, f_x, f_y)$ に, この窓関数を乗じた

$$\bar{b}(f_t, f_x, f_y) w(f_t, f_x, f_y)$$

を次式に従って, 逆フーリエ変換する。

$$b'(t, x, y) = \frac{1}{TN^2} \sum_{t=1}^T \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N e^{i2\pi(f_t t + f_x x + f_y y)} \bar{b}(f_t, f_x, f_y) w(f_t, f_x, f_y)$$

これにより得られた画像列 $b'(t, x, y)$ は, 画像列 $b(t, x, y)$ と平均値, 分散が等しく, (時間) 周波数が f_{upper}^T 以下, f_{lower}^T 以上, 水平, および垂直空間周波数が f_{upper}^S 以下, f_{lower}^S 以上に帯域制限されている。

B filling-in 対象の網膜偏心率に対するコントラスト感度の推定

(時間), 空間周波数に対するヒト視覚系のコントラスト感度は, 網膜中心窩で, (時間) 周波数が低いとき (約9[Hz]以下) には, 帯域通過型フィルタの特性を有することが知られている⁶⁾。また網膜上の細胞密度の違いなどに起因して, コントラスト感度は網膜偏心率に依存する¹⁰⁾。

ここでは, filling-in 対象の網膜偏心率におけるコントラスト感度特性を推定することを考える。

大脳皮質 V1野上では, 偏心率によらずコントラスト感度の空間周波数特性は一致することが報告されており, また, V1野内の微小線分の長さ ΔL_{V1} と, それに対応する網膜受容野での長さ ΔL_{retina} の比は網膜-皮質拡大因子 M と呼ばれ, 網膜偏心率 e に対し, 次式の関係になることが推定されている¹¹⁾。

$$M = \frac{\Delta L_{V1}}{\Delta L_{retina}} = \frac{1}{0.087(1+0.59e)}$$

図4に示す V1野上での空間周波数特性¹⁰⁾ から上式を用いて網膜上の filling-in 対象の偏心率12[deg]での空間周波数特性を推定し, 同図に示す。

心理実験1で用いた画像列の(時間)周波数は, 一部を除きほとんどの画像列が9 Hz以下の(時間)周波数を持つことから, コントラスト感度は, 本実験で用いた(時間)周波数の範囲内では概略低域通過フィルタの特性を有すると考えられる。そのため, 本研究では, filling-in 対象の網膜偏心率(12[deg])における(時間)周波数9 [Hz]以下のコントラスト感度特性を図6であると仮定し, これを $CSF(f^T, f^S = 12)$ と表記して用いることにする。

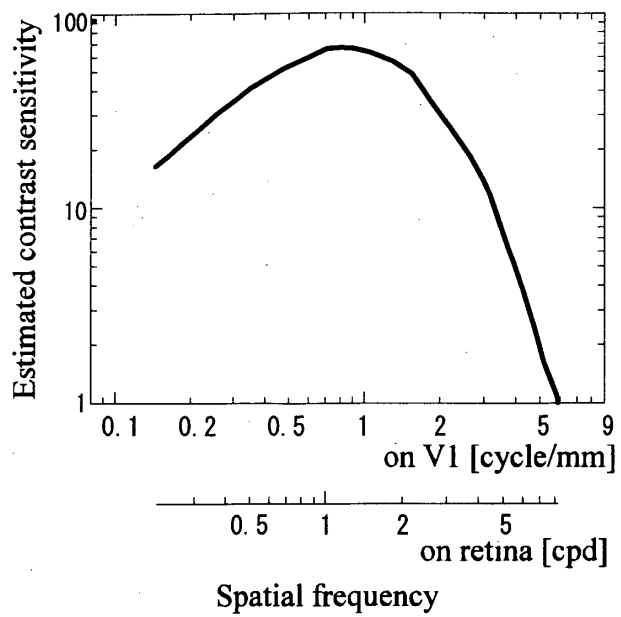


図6 モデルにより推定された filling-in 時間と計測値