

ピント合わせ課題の精度と空間周波数

田中恵津子*・小田浩一**

*杏林大学病院 眼科

〒181 東京都三鷹市新川 6-20-2

**東京女子大学 現代文化学部 コミュニケーション学科

〒181 東京都三鷹市牟礼 4-3-1

1. はじめに

高空間周波数帯域に感度をもたない低視力眼は、光学機器のピント調整が正確にできないことが言われている。我々が以前行った実験でも、低視力者はピントが大きくずれていても、そのずれに気づき難いという結果を得た。ピント調整に利用する空間周波数とピント精度との間にはどのような関係があり、その機序はなんであろうか？

関連する先行研究で、Tuckerら(1986)は、ピントずれに伴うコントラストの低下の仕方は空間周波数ごとに異なり、低空間周波数は高空間周波数よりも緩やかにコントラスト低下が起こることを報告している¹⁾。また、Legge(1987)は、精神物理実験により低視力になると Depth of Focus が広がることを示した²⁾。そしてそのため低視力になるとピントずれに対する感度が鈍くなると述べている。

本研究では、以下の2点に着目した。一つめは、ピント調整に利用した空間周波数の高低によって、ピント精度がどう異なるかを調べた。空間周波数を極限させた4種類のGabor刺激それぞれを提示したときのピント精度を比較(実験1)した。二つめは、ピント合わせは観察者のどの感度を利用して行われているか探った。ここでは、コントラスト感度(実験2)、コントラスト弁別感度、明るさ弁別感度(実験3)について検討した。

2. 本研究の全般的な方法

2.1 ピント精度の定義

本研究では、ピント精度はピント合わせ課題を繰り返して行ったときの、被験者の反応のばらつき(SD)の逆数と定義した。

2.2 計測方法

装置 被験者がピント合わせに使用した装置は、Nikon社製 Low Vision Aids #30821で低視力者の拡大補助具として開発されたものであった。拡大率は2倍であった。ピントの調節つまみの目盛りは、以下の式によって屈折値に変換可能であることが実測によって分かった。

$$\text{屈折値} = 0.816 \times \text{単眼鏡の目盛り値} + 0.292$$

刺激はコンピュータ(NEC社製PC9801BA)で制御し、Digital Arts社製のフレームバッファHyperFRAME3を介してラスタスキャン型モニタNEC社製PC-KD853に提示した。刺激以外の輪郭がピント合わせの手がかりにならないように完全な暗室で刺激を見せた。

刺激 ピーク周波数がそれぞれ1.8, 3.6, 7.2, 15 cycles/degreeの4つのGabor刺激をCRT画面上に提示した。刺激のバンド幅は2.17オクターブであった。単眼鏡を覗いたときに起こる色収差を最小にとどめるため、モニタ上では赤・緑・青の内、緑のみを輝度変調させた。縞の中の最大コントラストは99.9%で、刺激の平均輝度は63 cd/m²であった。Gabor刺激の背景をなす平均輝度の領域は、モニタ画面端でエッジを形成して高周波のピント合わせ手がかりを与え

た。そこで背景領域の輪郭もガウス分布に従ってなだらかに消失するようにした(図1)。

被験者 24歳から28歳までの視覚の正常な女性3名, 男性1名が被験者となった。被験者は, 観察眼(片眼)に調節麻痺剤(1% cyclopentolate hydrochloride)³⁾を点眼し, 眼内のピント調節機構が働かない状態であった。刺激提示位置に合った屈折矯正レンズと網膜照度を一定にするための3mmの人工瞳孔をかけ, 実験に参加した。

手続き 被験者調整法に従って, 被験者自身が単眼鏡のピント調節つまみを回し, 4m先にある刺激が, もっともハッキリ見えるところ(実験1, 3)かろうじて見えるところ(実験2, 検出閾値)を探した。実験者は, 各試行時の単眼鏡のピント調節つまみの値を記録した。

3. 実験1: ピント合わせの精度は観察刺激の空間周波数によってどのように違うか?

3.1 目的

空間周波数を限定した4種類のGabor刺激を提示したときのピント精度を比較した。

3.2 方法

被験者は, 提示された刺激が最もハッキリ見えるように単眼鏡のピントを調整し, 実験者はその時の単眼鏡の屈折値を記録した。

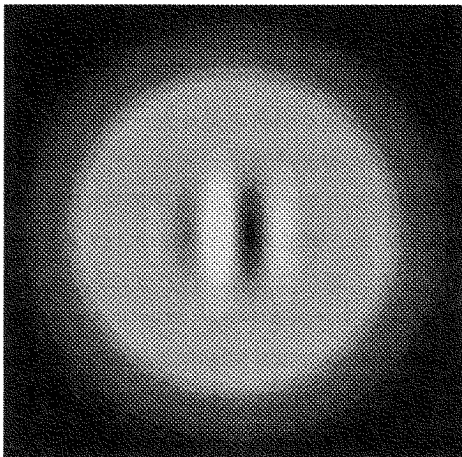


図1 刺激

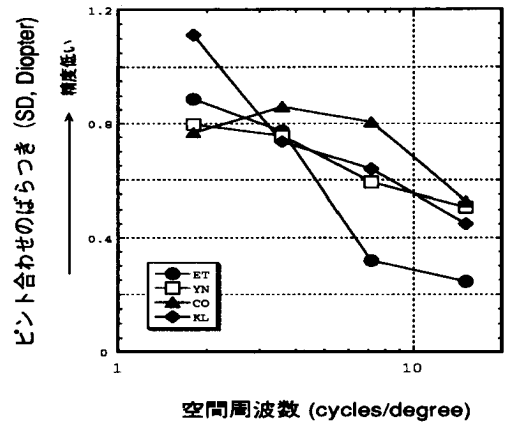


図2 空間周波数によるピント精度のちがい

3.3 結果と考察

低空間周波数の刺激でピント精度が低くなる傾向が見られた(図2)。晴眼者でもピント合わせに利用する空間周波数でピント精度が異なることがわかった。低視力者のピント合わせ精度が低い一つの原因は, 彼らが低周波チャンネルのみに依存してピント合わせをしているからであることを示唆する結果であった。

4. 実験2: ピント合わせの精度はコントラスト感度によって決定されるのか?

観察者は何を手がかりにピント合わせをしているのだろうか。次に, ピント合わせが, コントラスト感度; 閾上コントラスト弁別感度; 明るさ弁別感度のどれを利用して行われているのかを検討した。

4.1 目的

4種類のGabor刺激について検出閾値を計測し, ピント精度との関係を調べた。

4.2 方法

被験者は, 刺激が全く見えないところから始めて刺激がかろうじて見えるところ(検出閾値)までピントを移動させた。実験者は, その時の屈折値で刺激の縞の方向が80%以上正答できることを確認し値を記録した。

4.3 結果と考察

検出閾値とピント精度(実験1のデータ)を

同一刺激を使ったときで比較すると、両者にはおよそ1 log-unitの隔りがあることが分かった(図3)。また、両者のカーブのプロファイルが全く異なっていた被験者もいた。ピント合わせには、コントラスト検出感度を直接使っているのではなく、別の閾上弁別感度を使っていることが分かった。

5. 実験3: コントラスト弁別感度, 明るさ弁別度の検討

単眼鏡のピントの合っている位置を探す課題というのは、その屈折変化によるコントラストないしピーク値の変化量が弁別閾を越えるかどうかを視覚的にモニタしながら、屈折を変化させていることになる。閾上の弁別感度として、コントラスト弁別と、刺激の輝度のピークに着目した輝度弁別の二つが考えられる。コントラスト弁別閾は、 $\Delta C = kC^n$ ($n=0.6\sim 0.8$) に従うことが知られている⁹⁾し、輝度弁別閾について

は、 $\Delta L = kL$ ($k=0.14$) という式で、Weber's Law が成り立つことが分かっている⁹⁾。それぞれの予測する弁別閾は、刺激のコントラストの増減によって違ってくる。

光学系の屈折値の変化に伴って起こる刺激のコントラスト変化は、ある特定の空間周波数に限定すると、もとのコントラストに対する一定の割合の増減となる⁹⁾。これは、刺激のコントラストをどのように変化させようと、屈折値の変化が同じなら、その変化量は割合としては一定であるということである ($\Delta I/I = \text{一定}$)。

Weber's Law に従う輝度弁別をつかってピント合わせをしているとすれば、弁別閾は常にそのときの刺激強度の一定の割合 ($\Delta L/L = \text{一定}$) だから、屈折変化と輝度変化の関係は刺激のコントラストを下げてても変わらず、ピント合わせの精度に変化は起こらない。これに対してコントラスト弁別の方は、刺激強度と閾値の関係が Weber's Law に従わない。だから、刺激強度を変化させると弁別閾とそのときの刺激強度の割合は変化する。コントラスト弁別閾の指数は1より小さいので、強度を下げると閾値の刺激強度との割合は相対的に大きくなる ($kC_1^{0.7}/C_1 > kC_0^{0.7}/C_0$, $C_1 < C_0$)。屈折変化とコントラスト変化の割合が一定なのに、弁別閾が相対的に大きくなれば、精度は下がるわけである。

5.1 目的と方法

各刺激のコントラストを下げて提示し、実験1と同じ方法でピント精度を計った。刺激のコントラストが高い時と比べて精度がどう変化したかを比較することで、被験者が閾上コントラスト弁別と明るさ弁別のどちらを用いてピント調整をしたかについてテストした。コントラストを下げるために、3人の被験者には occlusion-foil⁹⁾ を眼前に置く方法、1名の被験者には、刺激画像のコントラストを下げる方法をとった。

5.2 結果と考察

刺激のコントラストを下げると、被験者4人中1人のピント精度が下がり、1人の精度は変わらなかった(図4)。仮説を適用すると、前

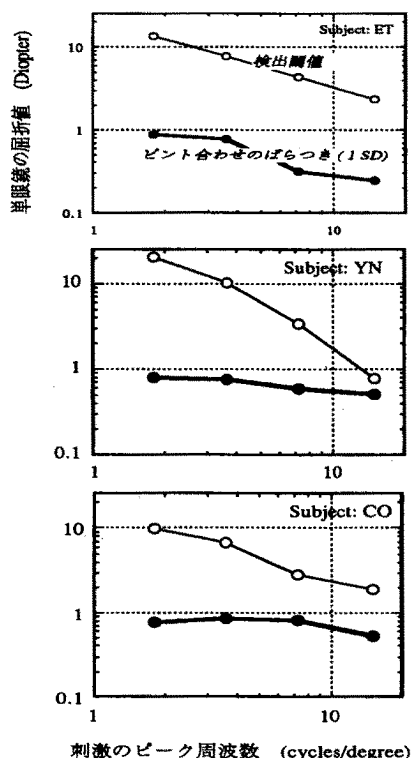


図3 ピント合わせ精度と検出閾値

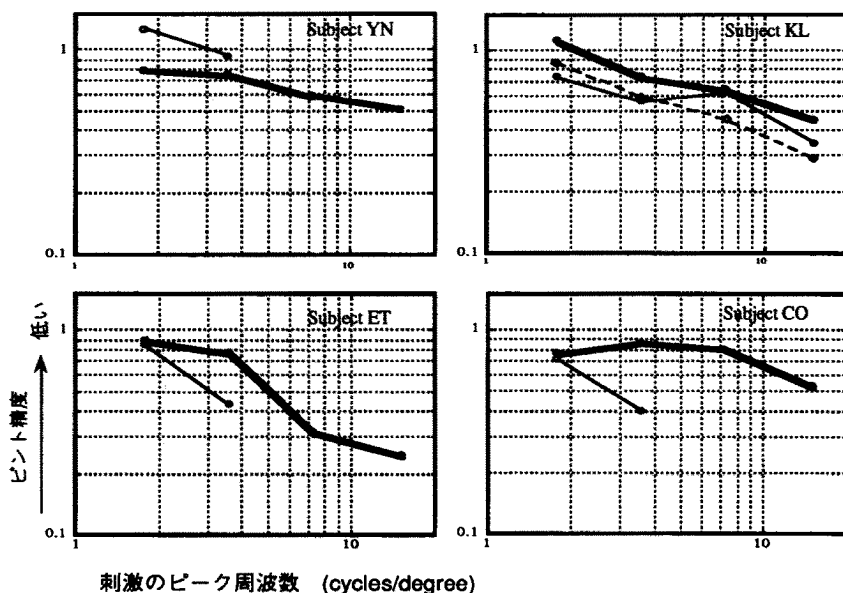


図4 刺激のコントラストを下げたときのピント精度の変化
(太線は高コントラスト、細線は低コントラスト)

者はコントラスト弁別感度を使っており、後者は明るさ弁別感度をつかっていたことになる。

残りの2人は、精度は上がり、ここで検討したコントラスト弁別、明るさ弁別のいずれでも説明はできなかった。

6. おわりに

ピント合わせ精度は、利用できる空間周波数成分によって異なり、低空間周波数を利用するほど、ピント合わせ精度は有意に下がるという結果を得た。これは、低空間周波数チャンネルのみに依存する低視力者のピント合わせ精度の低さを説明するものであった。実験2から、ピント合わせ精度は、コントラスト検出感度からは直接予測できるものではなく、別の閾上弁別感度を利用してピント合わせをしていることが示唆された。実験3では、コントラスト閾上弁別感度、明るさ弁別感度の2つの閾値上感度を検討したが、どちらも単独では十分にピント合わせ精度の変化を説明するものではなかった。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金、総合研究 A #06301011 (代表者 河内十郎)、総合研究 A

#05301011 (代表者 二木宏明)、奨励研究 A #6710164 から補助を受けた。

文献

- 1) J. Tucker, W. N. Charman and P. A. Ward: Modulation dependence of the accommodation response to sinusoidal gratings. *Vision Research*, 26, 1693-1707, 1986.
- 2) G. E. Legge, K. T. Mullen, G. C. Woo and F. W. Campbell: Tolerance to visual defocus. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 851-863, 1987.
- 3) 所 敬, 金井 淳 (編): 現代の眼科学. 金原出版, 1993.
- 4) 波呂栄子, 鶴飼一彦, 小町祐子, 石川 哲: 弱視治療用眼鏡箱の視覚遮蔽効果. *眼科臨床医報*, 87, 1330-1334, 1993.
- 5) M. Georgeson: Over the limit: Encoding contrast above threshold in human vision. *J. J. Kulikowski, V. Walsh and I. J. Murray (eds): Vision and Visual Dysfunction. vol. 5. The MacMillan Press, New York, 106-119, 1991.*
- 6) T. N. Cornsweet and H. M. Pinsker: Luminance discrimination of brief flashes under various conditions of adaptation. *Journal of Physiology (London)*, 176, 294-310, 1965.