指向性画像を水平方向へ高密度表示した3次元画像に対する調節応答の異方性

Anisotropic Accommodation Responses to 3D Images Using High Density Directional Images

正会員 名手久貴[†], 福富武史^{††}, 正会員 高木康博^{††}
Hisaki Nate[†], Takeshi Fukutomi^{††} and Yasuhiro Takaki^{††}

Abstract When we observed high density directional images, eye accommodation was focused on 3D images^{1) 2)}. There might be anisotropic accommodation responses in observing the edge being inclined to a direction in them, when we put them horizontally. We measured subjects' accommodation responses when they observed it. They observed targets under three conditions (high density directional images [HD], stereo images [SI], and real targets [RT]). the target was a checker which was set at five distances (400 mm, 500 mm, 600 mm, 700 mm and 800 mm from the subject's eyes) and was inclined at four angles (0°, 30°, 60°, and 90°), of which 0° was defined as the vertical edge. in the case of 0°, accommodation responses under condition HD were similar to those under condition RT. As the target edge was inclined to the horizontal, accommodation responses under condition HD approached those under condition SI. Accommodation distance under the HD condition was not farther from the target than under the SI condition. These results indicated that there was anisotropy in accommodation responses in observing high density directional images.

キーワード：調節，指向性画像の高密度表示，立体ディスプレイ，異方性

1. ま え が き

従来，多くの立体ディスプレイは，左右の眼に人間の両眼間隔（約65mm）に対応した視差画像を独立して提示する方式（2眼式立体表示）であった．観察者は，立体ディスプレイから提示される視差画像対中の両眼視差情報から主に立体感を得ることができた．しかし，この方式を利用した立体ディスプレイを観察すると，容易に視覚疲労が生じる³⁾．これは，2眼式立体表示を観察すると眼のピント調節（調節）がスクリーン面付近に調整されているのに対して，両眼の視線が交わる輻輳位置は3次元像付近に調整されるため，輻輳と調節が一致しないという不自然な状態が発生することが主な原因であると言われている^{3)~5)}．

視覚疲労の主要因である輻輳と調節の不一致を解消させる立体表示として，我々はある方向からの正射影像である指向性画像を対応する方向に高密度表示させる方式を提案した⁶⁾．この方式では，多数の射影方向に対応した3次元

図1 水平指向性画像の高密度表示
High-density directional images.

対象の指向性画像を，その方向に対応して高密度に投影する（図1）．観察者の瞳には，常に多数の指向性画像の一部が入射することになる．この結果，網膜にはこれらの合成された像が投影される^{1) 6)}．図1に示すように，合成された像はスクリーンではなく空間内の3次元像に焦点を合わせなければ，多重像もしくは画像のボケが観察されることになる．このため，指向性画像の高密度表示を観察した場合，

2003年9月29日受付，2004年5月7日最終受付，2004年6月11日採録

[†] 東京工芸大学 芸術学部

(〒164-8678 中野区本町2-9-5, TEL 03-3372-1321)

^{††} 東京農工大学 工学部

(〒184-8588 小金井市中町2-24-16, TEL 042-388-7923)

[†] Faculty of Arts, Tokyo Polytechnic University

(2-9-5 Hontyout, Nakano-ku, Tokyo, 164-8678, Japan)

^{††} Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

(2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588, Japan)

図3 指向性画像の高密度表示観察時における垂直エッジに対する調節位置と水平エッジに対する調節位置の比較
Comparison between accommodation distance in observing vertical edge in high-density directional images and in observing horizontal edge.

図2 指向性画像の高密度表示観察時の眼の調節と輻輳の位置
Accommodation and vergence distance in observing high-density directional images.

観察者はスクリーンではなく3次元像に焦点を合わせることが考えられる(図2)。実際、指向性画像の高密度表示観察時における被験者の調節を測定した結果、調節位置がスクリーンに誘導されるのではなく、3次元像の位置に誘導されることが確かめられている¹⁾²⁾。

しかし、すべての指向性画像の高密度表示が、調節を3次元像に誘導するかどうかについては明らかではない。そこで本研究では、指向性画像の高密度表示中の注視する線分の傾きに注目し、線分の傾きにより指向性画像の高密度表示が、調節を3次元像に誘導させる効果に違いが見られるのか、つまり異方性が見られるのかどうかについて検討する。注視する線分の傾きにより、調節誘導効果になぜ異方性が見られるのかについては2節で述べる。また、水平指向性画像の高密度表示観察時に調節応答の異方性が存在した場合、調節位置がどの程度3次元像に接近および乖離するのかについても検討する。

2. 調節応答の異方性

現在の技術では、指向性画像を水平方向と垂直方向に高密度に表示することは難しい。このため、指向性画像の高密度表示を利用した立体ディスプレイは、より効果の大きい水平方向のみに指向性画像を高密度に表示している。

水平指向性画像の高密度表示を利用した立体ディスプレイは、画像を水平に並べるため、水平方向に視差成分を再

現できる(図3)。このため、3次元像中に含まれる垂直線分(垂直エッジ)に対しては、効果的に調節が3次元像の位置に誘導されると考えられる。しかし、垂直方向には視差が再現されないために、水平線分(水平エッジ)に対しては調節が3次元像ではなく、スクリーン付近に誘導される可能性がある。このように、エッジの傾きによって調節応答の異方性が発生する可能性が考えられる。

3. 実験

水平指向性画像の高密度表示の観察時、注視するエッジの傾きに対して調節応答の異方性が存在するかどうかについて検討するため、被験者の注視するエッジの傾きを、さまざまに変化させた水平指向性画像の高密度表示(高密度条件)を提示し、被験者の調節を測定した。また、調節位置が3次元像に最も接近する場合と乖離する場合の調節位置について検討するため、実視標を提示する条件(実視標条件)と2眼式立体表示を観察する条件(2眼条件)を設けた。実視標条件は、理想的な観察条件であるため、実視標条件における調節位置は、高密度条件中の最も3次元像に近づく場合の調節位置の対照条件となり得る。同様に、2眼条件における調節位置はスクリーンに誘導されるため、高密度条件中の最もスクリーンに近づく場合の調節位置の対照条件となり得る。そこで、三つの観察条件の調節反応を比較した。

3.1 被験者

20代の大学生および大学院生五人が実験に参加した。すべての被験者の立体視機能が正常であることは確認していた。被験者の内、三人は裸眼、二人は矯正後、表示像を観察した。視標観察時の被験者の視力は、0.9以上であった。

3.2 装置

水平指向性画像の高密度表示を利用した立体ディスプレイ⁶⁾は、2眼立体表示も可能であるため、高密度条件および2眼条件の視標は、図4の立体ディスプレイで提示した⁶⁾。表1に実験に用いたディスプレイの主な仕様を表す。スクリーンと被験者の距離は600mmであった。調節測定装置には、開放型オートレフラクトメータ(FR-5000S, グランド

図4 本実験で使した立体ディスプレイ

3-D display, Using high-density directional images, used in the experiment.

表1 本実験で使した立体ディスプレイの仕様
Specifications of the 3-D display used in the experiment.

指向性画像数	64
水平表示角度刻み	0.33°
水平視域角	21.2°
3次元スクリーン サイズ	192 mm×151 mm (9.6 インチ)
解像点数	267(H)×225(V)

図5 本実験で使した視標例
Example of the target used in the experiment.

精工社製)を用いた。オートレフラクトメータは、0.2秒間隔で調節を測定することができ、表示精度は、0.01Dであった。

3.3 手続き

被験者が輻輳の正確な調整と両眼の網膜像の融像を容易に行えるようにするために、視標には長方形の格子模様を使用した(図5)。視標の大きさは、視角にして $4.5^{\circ} \times 3.0^{\circ}$ (縦×横)であった。被験者は、右端のエッジを観察するように教示された。被験者が注視するエッジの方向とは異なる方向を持つエッジの効果を減少させるために、上下の辺はぼかされていた。図6のように、注視エッジが垂直の時を

図6 注視エッジの四つの傾き
Four types of slope of fixation edges.

0° とし、反時計回りに 30° 、 60° 、 90° と注視エッジの傾きを4段階に変化させた(図6)。観察者から400mm、500mm、600mm、700mm、800mmと5段階に視標の提示位置を変化させた。視標の提示位置を変化させても、視標自体の大きさを変化させたため、視標の視角は一定であった。

視標の観察条件には、水平指向性画像の高密度表示条件(高密度条件)、2眼式立体表示条件(2眼条件)、実視標条件を設けた。高密度条件では、指向性画像を水平方向に高密度に提示した。2眼条件では、従来の2眼立体表示に対応するように、各眼に対応する視差画像が見えるように提示した。実視標条件では、紙に印刷した視標を提示した。

被験者は、1試行につき10秒間視標を観察した。視標の傾き、提示位置、観察条件($4 \times 5 \times 3$)を組合せた結果60種類の視標が作られた。1種類の視標につき5回反復して測定したため、合計300回の試行に反応した。視標を観察している間、開放型オートレフラクトメータにより被験者の眼の調節を0.2秒ごとに測定した。得られた調節データの内、安定して視標を観察していたと考えられる8秒から10秒までの調節データの平均値を求めた。そして、繰り返し測定された5回の測定データの平均値をさらに平均化した。その値を視標観察時の調節量とした。

3.4 結果

図7は、各視標観察時の被験者の調節量を示す。横軸は視標の位置、縦軸は調節量を示す。調節量は視標の位置に対してほぼ直線的に増加するため、調節量の近似直線を求めた。実視標条件では、すべての被験者に共通して、視標の提示位置が被験者に近づくにつれて、調節量が増加した。この傾向は、注視エッジが 0° 、 30° 、 60° 、 90° のすべての傾きに対して共通していた。その値も、3次元像の位置に近い値であった。この結果は、被験者の調節が視標の位置に応

図7 (a) 被験者T.F.の調節結果。エラーバーは標準誤差を示す。

Results of accommodation responses. Error bar represents standard error.

図7 (b) 被験者H.E.の調節結果。エラーバーは標準誤差を示す。

Results of accommodation responses. Error bar represents standard error.

図7 (c) 被験者T.K.の調節結果. エラーバーは標準誤差を示す.

Results of accommodation responses. Error bar represents standard error.

図7 (d) 被験者S.K.の調節結果. エラーバーは標準誤差を示す.

Results of accommodation responses. Error bar represents standard error.

図7 (e) 被験者H.Y.の調節結果。エラーバーは標準誤差を示す。
Results of accommodation responses. Error bar represents standard error.

じて正常に変化していることを示している。また、実視標を観察するときに、注視エッジがどのような傾きであっても、注視対象の位置に調節を調整できることも示していた。

2眼条件では、四人(T.F., H.E., T.K., S.K.)の被験者の近似直線は共通していた。H.E., T.K.の60°および、S.K.の30°を除き、2眼条件における近似直線の傾きは、実視標条件・高密度条件における近似直線の傾きよりも小さかった。この傾向は、注視エッジの傾きが0°, 30°, 60°, 90°のすべての傾きに共通していた。これは、2眼条件の視標を観察しているとき、被験者の調節位置が3次元像ではなく、3次元スクリーンに誘導されていることを示唆している。T.F., T.K.の30°以外の条件では、実視標条件・高密度条件の近似直線の傾きよりは小さいものの、視標の位置に応じて調節量が増加する傾向が見られた。これは、輻輳が調節を誘導する効果(輻輳性調節)⁷⁾によるものと考えられる。一方、H.Y.の調節量は実視標に対する調節と同様に、視標の位置に応じて顕著に増加した。この傾向は、0°, 30°, 60°, 90°とすべての視標の傾きに共通していた。これは、輻輳性調節の効果が顕著に現れたものと考えられる。高密度条件では、T.F.の0°の視標における調節の近似直線は実視標条件の直線に類似したが、90°の視標に対する調節の近似直線は2眼条件の直線に類似した。また、0°から90°へとエッジの傾きが垂直から水平に近づくにつれて、実視標条件から2眼条件へと類似する近似直線がシフトし

ていった。H.E., T.K., S.K.は、0°, 30°, 60°までは、T.F.と同様にエッジの傾きが垂直から水平に近づくにつれて、直線が実視標条件から2眼条件にシフトしていった。ただし、高密度条件のエッジの傾きが、90°の視標に対する調節量が60°条件よりも2眼条件に近づかなかった。H.Y.の調節量は、0°, 30°, 60°, 90°とすべての視標の傾きに共通して、視標の位置に応じて増加した。

3.5 考察

本研究では、水平指向性画像の高密度表示の観察時、3次元像の注視エッジの傾きに応じて調節応答が変化するのか、つまり異方性が存在するかについて検討した。実験の結果、五人中四人について注視エッジの傾きが垂直の時には、高密度表示条件の調節位置は3次元像付近であった。しかし、注視エッジの傾きが垂直から水平に変化するにつれて、高密度表示条件の調節位置は、3次元スクリーンに近づいていった。実視標条件の調節位置が視標付近に位置し、2眼条件の調節位置がスクリーン付近に位置する傾向が見られたことから、高密度表示条件観察時の調節応答の傾向が、実視標観察時から2眼立体表示観察時における調節応答の傾向にシフトしていったことを示している。つまり、調節応答の異方性が存在することを示している。

高密度表示条件における調節位置は、注視エッジの傾きが0°の時に最も3次元像に近づき、水平に傾くにしたがって3次元スクリーンに近づいていった。0°の視標では、視標の注視

図8 90°の傾きを持つ視標. 垂直エッジが視標中に含まれている
Target being inclined 90 degrees, the vertical edge is included in the target.

エッジにピント調節を合わせないときの画像のボケ, つまり調節誤差による画像のボケが大きくなる. 他の条件よりも調節誤差による画像のボケ情報を手がかりとして利用できたため, 調節をより正確に合わせることができたと考えられる. そして, 注視エッジが水平になるにしたがって調節誤差による画像のボケが小さくなっていくと, 調節誤差による画像のボケ情報が利用しづらくなるために, 視標に調節を合わせることが困難になっていったと考えられる.

水平指向性画像の高密度表示観察時, 注視エッジの傾きの変化により調節応答の異方性が存在するならば, 最も調節誤差による画像のボケ量が小さい注視エッジの傾きが90°の視標を観察したとき, 最も調節位置がスクリーン付近に位置することが予想される. しかし, 三人の被験者で, 90°の視標に対する調節位置は, 30°や60°の視標よりも3次元像付近にあった. これは, 被験者が注視エッジの近くの垂直エッジを手がかりとしたためであると考えられる(図8). つまり, 注視エッジ以外の方向エッジによる画像のボケ情報が, 調節応答に効果を与えることを示唆している. 被験者が視標を融像し易くするために, 今回の実験では注視エッジ以外の方向エッジを含む視標を選択した. これは, 単一方向のエッジだけによる視標では, 装置の仕様上, 融像しづらくなるためであった.

H.Y.については, 他の四人の被験者と異なり注視エッジの傾きが垂直から水平に変化しても, 調節量に変化は見られなかった. 調節量の変化が見られなかった原因として, 調節が輻輳に誘導される輻輳性調節の効果が顕著に現れたと考えられる. つまり, H.Y.は輻輳性調節により, すべての条件において輻輳の位置である注視点の位置に調節が誘導された結果, 調節誤差による画像のボケ量が大きくなるにもかかわらず, 輻輳性調節により調節が視標の位置に誘導されたと考えられる. H.Y.の2眼条件でも, エッジの傾きに関わらず実視標条件に近い調節量が得られたこともこの仮説を支持している.

2眼条件における調節は3次元像の位置が変化してもスクリーンの位置に調整されるため, 理論的には2眼条件の直

線は水平である. しかし, T.F., T.K.の30°を除く2眼条件で直線の傾きが0以上であることから, 多くの条件で3次元像の位置に応じて調節量が増加していた. ただし, この増加傾向は, 実視標条件や高密度条件ほど大きくなかった. これは, H.Y.以外の被験者についても輻輳性調節の効果が現れていることを示していた. また, 輻輳性調節の効果には個人差があり, H.Y.に大きく働いたことを示唆している.

高密度条件では, 注視エッジが垂直から水平に近づくにつれて, 調節量が実視標に対する値から乖離していく傾向が見られた. しかし, すべての被験者で2眼条件に対する調節量ほど乖離することはなかった. これは, 指向性画像の高密度表示観察時, 調節誤差による画像のボケが小さくなったとしても, 2眼立体表示以上に調節量が実視標に対する値と乖離しないことを示していた. 2眼条件以上に高密度条件の調節量が乖離しなかった理由として, 2眼式立体表示観察時では, 利用不可能な調節誤差による画像ボケの情報が, 水平指向性画像の高密度表示観察時には利用可能であったためであると考えられる. 高密度条件において, 調節誤差による注視エッジのボケ情報が利用できない90°の視標でも, 注視エッジ以外のエッジによる画像ボケ情報が得られた. このため, 高密度条件の90°の視標でも2眼条件より調節が3次元像の位置に接近していたと考えられる.

今回の実験では, エッジの数と方向が制限された特殊な視標を用いた. このような場合でも, 指向性画像の高密度表示観察時は, 2眼式立体表示観察時よりも調節が3次元像に接近した. このことは, ささまざまな方向のエッジや複雑なテクスチャを持つ一般的な3次元像においても, 2眼式立体表示観察時の調節よりも指向性画像の高密度表示観察時の調節の方が, 3次元像に接近する可能性のあることを示唆している.

4. む す び

指向性画像を水平方向に高密度に表示した場合は, 注視エッジが垂直から水平に傾くにつれて, 3次元像への眼のピント調節の誘導効果が小さくなるという調節応答の異方性が見られた. これは, 注視エッジが水平に近づくにつれて調節誤差による画像ボケ量が小さくなるためであると考えられた. ただし, 最も調節がスクリーンに誘導されたときでも, 2眼式立体表示観察時よりもスクリーンに調節が誘導されることはなかった.

また, 当初は予想していなかったが, 水平エッジと垂直エッジが混在した視標を用いた場合に, 水平エッジを見るように被験者に教示しても, 垂直エッジを手がかりとしたと思われる調節応答があった. 一方, 現実の3次元シーンにおいては, 水平エッジのみで構成される画像は考えにくい. そこで, 今後は, 画像中に含まれる水平エッジと垂直エッジの割合が調節応答に与える影響について調べる予定である.

〔文 献〕

- 1) 福富, 名手, 高木: “高密度指向性画像で表示した3次元画像における調節応答”, 映情学誌, **58**, 1, pp.69-74 (2004)
- 2) 福富, 名手, 高木: “指向性画像の高密度表示を原理とする3次元表示に対する調節応答と異方性”, 3次元画像コンファレンス2003論文集, pp.29-32 (2003)
- 3) 江本: “立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係”, 映情学誌, **56**, 11, pp.1803-1812 (2002)
- 4) 須佐見, 阿部, 梶木, 圓道, 畑田, 本田: “超多眼立体画像に対する輻輳調節反応”, 3次元画像コンファレンス2000論文集, pp.155-158 (2000)
- 5) 渋谷, 名手, 須佐見, 三橋, 宋, 畑田, 本田: “瞳孔入射光の広がり と眼機能応答”, 3次元画像コンファレンス2002論文集, pp.121-124 (2002)
- 6) 高木: “変形2次元配置した多重テレセントリック光学系を用いた3次元ディスプレイ”, 映情学誌, **57**, 2, pp.293-300 (2003)
- 7) Takeda. T., Hashimoto.K., Hiruma. N. and Fukui. Y.: “Characteristics of Accommodation Toward Apparent Depth”, Vision Research, **39**, 12, pp.2087-2098 (1999)

名手 久貴 (なて ひさき) 2001年, 大阪大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了. 通信・放送機構国内招聘研究員. 東京農工大産学官連携研究員を経て, 現在, 東京工芸大学芸術学部助手. 視覚工学, 立体テレビの観察時における視覚特性の研究に従事. 博士 (人間科学), 正会員.

福富 武史 (たくとみ たけし) 2002年, 東京農工大学工学部卒業. 2004年, 東京農工大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年, オリジナル (株) に入社. 現在, 同研究開発センターにて高精細動画システムに関する研究に従事.

高木 康博 (たかき やすひろ) 1992年, 早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了. 1991年, 同大学助手. 1994年, 日本大学理学部専任講師. 1998年, 同助教授. 2000年, 東京農工大学工学部助教授. 主として, 3次元映像技術, 回折光学素子, デジタルホログラフィ, 高精細画像処理, 光情報処理に関する研究に従事. 博士 (工学), 正会員.