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

Accommodation Responses to 3D Images Consisting of High-Density Directional Images

福 富 武 史[†], 正会員 名 手 久 貴^{††}, 正会員 高 木 康 博[†]
Takeshi Fukutomi[†], Hisaki Nate^{††} and Yasuhiro Takaki[†]

Abstract One of the problems of conventional 3D displays is the danger of using the ocular function. Observers feel fatigue because accommodation responses do not correspond to convergence. We have already proposed a new 3D display technique to solve this problem by displaying high-density directional images. This technique can be implemented by using modified 2D aligned telecentric optical systems. This technique enables several people to observe 3D images simultaneously without wearing 3D glasses and also offers color and moving 3D images. In this study we measured accommodation responses to a prototype 3D display which can display 64 directional images simultaneously. Measured accommodation responses to the prototype 3D display were very similar to those obtained for real objects.

キーワード：3次元ディスプレイ，3次元表示，視機能，人間工学

1. ま え が き

従来の3次元ディスプレイの問題点は，視覚疲労が起りやすく，長時間の観察が困難なことにある．この視覚疲労は，主に人間の立体知覚の生理的要因である調節と輻輳が一致しないために生じると言われている．従来の3次元ディスプレイで代表的な2眼式立体ディスプレイでは，左右の眼に対応する視点から見た2枚の視差画像を表示するが，この場合は，輻輳位置は3次元物体表示位置にあるのに対して，調節位置はスクリーン上にある．この矛盾が，観察者に負担を与え，視覚疲労を生じさせる一因であると言われている¹⁾．

この矛盾を解決するために，3次元物体の各点を通る光線が2本以上瞳に入射する状態，いわゆる超多眼状態^{2)～5)}を作り出すことで調節応答を誘起する3次元表示方式が提案されている．また，これを実現する構成方法としては集束化光源列を用いる方法⁶⁾，アナモルフィック光学系を用いる方法⁷⁾，投影光学系扇形配列を用いる方法⁸⁾などが提案されている．実際に，集束化光源列や投影光学系扇形配列を用いた3次元ディスプレイ観察時の調節応答と輻輳応答を

測定し，調節と輻輳の矛盾が解決できる可能性があることが報告されている^{9)～12)}．

われわれは，指向性画像の高密度表示を行うことで，超多眼状態と同様に調節応答を誘起できる3次元表示方式を提案している．また，これを実現するために，テレセントリック光学系の変形2次元配置を用いた構成法を提案し，実際にシステムを試作して3次元画像の表示に成功している¹³⁾．

本研究では，指向性画像の高密度表示を用いた，3次元表示に対する人間の調節応答を測定したので，その結果について報告する．

2. 超多眼表示

従来の2眼式立体ディスプレイでは，図1(a)に示すように，輻輳位置は3次元物体の表示位置にあるのに対して，調節位置はスクリーン上にある．3次元物体表示位置に眼のピントを合わせると，図1(b)に示すように，網膜上にはぼけた画像が形成される．

これに対して，超多眼状態では，3次元物体の一点を通る2本以上の光線が瞳に入射するため，この点に眼のピントを合わせると，図2(b)に示すように，網膜上で光線は一点に集光する．しかし，スクリーン上にピントを合わせると，図2(a)に示すように，網膜上で光線は一点に集まらない．したがって，眼のピントを3次元物体表示位置に合わせることが可能になり，輻輳と調節の矛盾が解決できる可能性がある．

2003年4月7日受付，2003年9月8日再受付，2003年10月10日採録

[†] 東京農工大学 工学部

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

^{††} 東京工芸大学 芸術学部

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

[†] Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

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

^{††} Faculty of Arts, Tokyo Institute of Polytechnics

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

(a) 調節位置がスクリーン上にある場合

(b) 調節位置が3次元物体表示位置にある場合

図1 2眼式立体表示と眼の調節

Binocular stereoscopic display and eye accommodation.

(a) eyes focus on the screen, (b) eyes focus on a 3D object.

3. 指向性画像の高密度表示

従来の超多眼3次元表示では、図3 (a) に示すように、観察者が瞳を置くことができる視点位置を空間に多数発生させる。観察者は、一つの視点を通して、一つの視差画像を見ることができる。視点の間隔を瞳の幅より小さくすると、瞳にふたつ以上の視差画像が入射するようになり、超多眼状態が実現できる。ただし、瞳を置く位置が限定され、特に、ディスプレイに対する奥行き方向の観察位置が限定されることが問題点である。なお、表示する画像は、視点を通して見る視差画像であるため、3次元物体の一点透視投影画像である。

指向性画像の高密度表示では、視点を仮定しない。3次元物体を特定方向に正射影した指向性画像を、微妙に異なる多数の射影方向に対応して多数用意する。これらを、図3 (b) に示すように、対応する方向に高密度に平行投影する。瞳には、常に多数の指向性画像の一部が入射し、これらの合成が網膜像を形成する。視点を仮定しないため、ディスプレイの奥行き方向に対する観察位置の制限はない。3次元物体を近距離で観察する場合には、3次元物体の同一点を通る2本以上の光線が同時に瞳に入射するため、超多眼状態となる。

観察者の瞳孔径を P 、目から3次元物体までの距離を L 、表示角度刻みを $\Delta\theta$ で表すと、調節が機能するための条件

(a) 調節位置がスクリーン上にある場合

(b) 調節位置が3次元物体表示位置にある場合

図2 超多眼3次元表示と眼の調節

Super multi-view 3D display and eye accommodation.

(a) eyes focus on the screen, (b) eyes focus on a 3D object.

(a) 従来の方式

(b) 指向性画像の高密度表示

図3 超多眼3次元表示方式

Super multi-view 3D images.

(a) conventional method, (b) high-density generation of directional images.

図4 調節が機能するための表示角度のサンプリングピッチと指向性画像数

Sampling pitch of a display angle and the number of directional images required to induce accommodation function.

は、次式で与えられる。

$$P > 2L \tan \frac{\Delta\theta}{2} \quad (1)$$

人間の瞳孔径は2～8mmと言われているが、これを5mmで代表させると、上式からわかるように、調節が機能するために必要な表示角度の最小サンプリングピッチは、3次元物体と眼の距離Lで決まり、図4のようになる。3次元物体を両眼で観察できること、さらに複数の観察者が同時に観察できることを考えると、視域角は少なくとも20°程度必要である。この場合に必要な指向性画像の数も図4に示した。

4. 実 験

指向性画像の高密度表示方式を実現するために、われわれが提案したテレセントリック光学系の変形2次元配置を用いた3次元ディスプレイの構成図を図5に示す。小型2次元ディスプレイを、水平位置が一致しないように変形2次元配置する。詳細は文献13)に詳しいが、それぞれの小型2

図5 テレセントリック光学系の変形2次元配置を用いた3次元ディスプレイの構成方法

3D display using modified 2D aligned telecentric optical systems.

表1 実験に用いた3次元ディスプレイの仕様
Specifications of the prototype 3D display used for experiments.

Number of directional images	64
Sampling pitch of horizontal display angle	0.33 deg
Horizontal viewing angle	21.2 deg
3D screen size	192 mm × 151 mm (9.6inch)
Number of LCD pixels	267(H) × 225(V)

図6 試作システムの写真
Photograph of the prototype 3D display.

次元ディスプレイに表示した指向性画像が異なる水平方向に平行投影される。

実験に用いた3次元ディスプレイの仕様を表1に示す。小型2次元ディスプレイとしては、カラー液晶表示パネルを用いた。指向性画像の数は64で、水平表示角度のサンプリングピッチは0.33°である。したがって、瞳孔径を5mmとすれば、超多眼領域はスクリーンから868mmの距離までとなる。3次元ディスプレイの写真を図6に示す。

調節測定には、両眼開放型レフラクトメータ (FR-5000S, グランド精工) を使用した。これは、眼に赤外光を入射させて、眼底での赤外光の反射位置から眼屈折力を測定する。測定結果は、RS-232Cを通してコンピュータに記録される。測定精度は0.01Dで、0.2秒間隔で測定データが得られる。

被験者は20代の男性5名で、そのうち2名はコンタクトレンズを装着した視力矯正状態で測定を行い、3名は裸眼で測定を行った。5名とも視力は0.7以上で、正常な両眼立体視ができることを確認してある。被験者は両眼で3次元画像を観察し、そのときの右眼の調節を測定した。

視標には、図7に示すように、テクスチャを施した矩形を用いた。本研究の目的は調節応答の測定にあるため、輻輳が視標表示位置に合い易いようにテクスチャを施した。被験者には垂直エッジを見るように指示をした。視標の水平エッジはぼかしてあるが、これは実験に用いた3次元ディスプレイは参考文献13で述べているように、水平方向にのみ超多眼状態が実現できるためである。視標の水平幅は24mmである。

眼とスクリーンの距離は600mm (1.67D) とした。図8に示すように、視標を眼から400mm (2.50D), 500mm (2.00D), 600mm (1.67D), 700mm (1.43D), および800mm (1.25D)

図7 実験に用いた視標
Target used for experiments.

図8 視標の表示位置
Positions of targets.

の距離に表示した。各被験者に対して同一条件で2秒間の測定を5回行い、その平均値を測定値とした。

比較のために、実視標と2眼式立体表示に対しても同様の測定を行った。実視標としては、紙に印刷した視標を用いた。2眼式立体表示には、前述の3次元ディスプレイを用いた。左右の眼に対応した二つの視差画像を用意し、それぞれの眼に対応した視差画像のみが入射するように表示した。

5. 実験結果と考察

調節測定の一例を図9に示す。これは、眼から視標までの距離が2.50Dの場合の測定結果である。横軸は測定時間で、縦軸は調節位置である。指向性画像の高密度表示と実視標に対しては、視標表示位置の2.50D付近に調節応答が得られていることがわかる。一方、2眼式立体表示に対しては、スクリーン位置の1.67D付近に調節応答が得られていることがわかる。

次に、各被験者に対する測定結果を図10に示す。横軸は視標表示位置で、縦軸は調節位置である。調節応答の大きさに個人差が見られるが、若干の例外はあるものの、すべての被験者の結果において、指向性画像の高密度表示に対して、実視標に対するのとはほぼ同様な調節応答が得られていることがわかる。これに対して、被験者T.K.とT.F.の2眼式立体表示に対する結果では、視標をスクリーンより奥に表示した場合には調節はある程度追従を示すが、視標をス

図9 調節応答の時間変化の一例 (被験者H.E.)
Typical result of temporal accommodation responses (subject H.E.).

クリーンより手前に表示した場合の調節応答は、スクリーン上に表示した場合の調節応答とほとんど変わらないことがわかる。被験者H.E., S.K.およびH.Y.の2眼式立体表示に対する結果では、スクリーンより手前に視標を表示した場合でも調節は追従を示すが、実視標に対する場合に比べると、追従の度合いが小さいことがわかる。2眼式立体表示の結果で、調節が常にスクリーン上にあるのではなく、視標表示位置にある程度の追従を示すのは輻輳性調節によるものであると考える。

調節応答の大きさの個人差の影響を取り除くために、実視標に対する2眼式立体表示と指向性画像の高密度表示の調節値を実視標の調節値と比較した。横軸に実視標の調節値を取り、縦軸に対応する2眼式立体表示と、指向性画像の高密度表示の調節値をプロットした。その結果を図11に示す。測定データは図10と同一である。5名の被験者すべての場合で、指向性画像の高密度表示に対する調節応答は、原点を通る傾きが1の直線付近にあり、実視標に対する調節応答と類似度が高いことがわかる。それに対して、2眼式立体表示の場合は調節応答が小さい。

図12は、全体の傾向を見るために、被験者5名のデータを一つのグラフにまとめて示したものである。指向性画像の高密度表示と2眼式立体表示に対する結果を、それぞれ図12(a)と図12(b)に示す。また、それぞれに対して最小2乗法を用いて求めた近似直線を同時に示した。近似直線の傾きは、指向性画像の高密度表示に対しては0.95であったのに対して、2眼式立体表示に対しては0.64であった。以上より、全体の傾向としても、指向性画像の高密度表示は、2眼式立体表示に比べて実視標表示時に近い調節応答を誘起することが確認できた。

6. む す び

指向性画像の高密度表示を用いた3次元ディスプレイ観察時の調節応答を測定した。その結果、実視標に対する場合と良く似た調節応答が得られることが判明した。また、すべての被験者は、試作システム観察時に疲労は感じないと報告している。

今後は、輻輳応答と瞳孔径についても測定を行い、指向

図10 調節応答の測定結果

Measured results of accommodation responses.

(a) subject H.E., (b) subject S.K., (c) subject T.K., (d) subject T.F., (e) subject H.Y.

図11 実視標に対する調節応答と指向性画像の高密度表示と2眼式立体表示に対する調節応答の比較

Accommodation responses for high-density generation of directional images and binocular stereoscopic images compared to those for real objects.

(a) subject H.E., (b) subject S.K., (c) subject T.K., (d) subject T.F., (e) subject H.Y.

(a) 指向性画像の高密度表示

(b) 二眼式立体表示

図12 すべての被験者に対する指向性画像の高密度表示と二眼式立体表示に対する調節応答

Accommodation responses to high-density directional images and stereoscopic images for all subjects.

- (a) high-density generation of directional images,
(b) binocular stereoscopic images.

性画像の高密度表示が視機能に与える影響について、より詳細に調べる予定である。また、単眼観察時の調節応答についても測定を行い、今回確認できた調節機能の誘起と輻輳性調節との関係についても明らかにする予定でいる。また、超多眼状態が水平方向に限られることの影響についても調べる予定である。

最後に、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(No.13450028)と総務省戦略的情報通信研究開発推進制度

研究主体育成型研究開発(産官学連携先端技術開発)の助成により行われた。

〔文 献〕

- 1) 江本, 矢野: “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, 3, pp.447-454 (2002)
- 2) 梶木, 吉川, 本田: “超多眼領域の立体表示における単眼視差の効果”, 3次元画像コンファレンス1997, pp.166-171 (1997)
- 3) 梶木, 本田: “2次元変調器と1次元走査による超多眼立体ディスプレイの検討”, 3次元画像コンファレンス1998, pp.16-21 (1998)
- 4) 梶木: “自然な立体視を目指した立体表示技術の動向”, 映情学誌, 53, 7, pp.43-48 (1999)
- 5) Y. Kajiki, H. Yoshikawa and T. Honda: “Autostereoscopic 3-D Video Display Using Multiple Light-Beams with Scanning”, IEEE TRANS. ON CSVT, 10, 2, pp.254-260 (2000)
- 6) 梶木, 吉川, 本田: “集束化光源列 (FLA) による超多眼式立体ディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス1996, pp.108-113 (1996)
- 7) 松本, 本田: “アナモルフィック光学系を用いた立体表示”, 3次元画像コンファレンス1995, pp.36-41 (1995)
- 8) 本田, 永井, 稲垣, 下松: “投影光学系扇形配列による立体映像表示装置の開発”, 3次元画像コンファレンス2001, pp.165-168 (2001)
- 9) 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, pp.155-158 (2000)
- 10) 須佐見, 下松, 永井, 梶木, 圓道, 畑田, 本田: “超多眼立体画像に対する輻輳, 調節, 瞳孔反応”, 3次元画像コンファレンス2001, pp.121-124 (2001)
- 11) 名手, 田中, 下松, 須佐見, 畑田, 本田: “超多眼立体画像における調節反応”, 3次元画像コンファレンス2002, pp.193-196 (2002)
- 12) T. Honda, Y. Kajiki, K. Susami, T. Hamaguchi, T. Endo, T. Hatada and T. Fujii: “A Display System for Natural Viewing of 3-D Images”, Springer-Verlag, Heidelberg, pp.462-487 (2002)
- 13) 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 (2002)

福富 武史 2002年, 東京農工大学工学部卒業。同年, 同大学院工学研究科博士前期課程入学。現在, 在学中。3次元映像技術に関する研究に従事。

名手 久貴 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, 東京工芸大学特別研究員, 東京農工大産官学連携研究員を経て, 現在, 東京工芸大学助手。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。

高木 康博 1992年, 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。1991年, 同大学助手。1994年, 日本大学文理学部専任講師。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。