6章 超多眼表示と人の視覚機能

[正会員]水科晴樹^{†1}, [正会員]高木康博^{†2}, 安藤広志^{†1,†3}

キーワード：立体ディスプレイ、超多眼表示、輻輳、調節、運動視差

1. まえがき

これまでに紹介された裸眼立体表示では、眼鏡などの特殊な装備を要することなく、立体映像を裸眼の自然な状態で見るができる。しかし、ホログラフィなどの一部の方式を除き、「調節と輻輳の不一致」という問題が依然として残されたままである。調節は眼の水晶体によるピント合わせの機能である。近くを見ようとするときは毛様体筋が収縮し、水晶体を厚くすることによって見ている対象の距離にピントを合わせ、網膜上に鮮明な像をつくる。一方、輻輳は対象の距離に応じて左右の眼を逆方向に回転させて視線を対象に合わせる機能であり、対象が近くなるほど左右の眼の視線は内側に寄り、遠くなるほど視線が平行に近くなる。通常、自然視環境で物体を両眼で見る場合、図1(a)に示すように調節に対する距離と輻輳に対する距離は一致する。一方、従来方式の立体表示の場合、図1(b)に示すように、輻輳を立体像の再生位置に合わせようとしても、実際に像が表示されているのはスクリーン上であるため、いわゆる調節と輻輳の不一致が発生する。この不一致が、立体映像観察時の視覚疲労や不快感の原因の一つであると言われている^{1)~3)}。

この点を踏まえ、調節と輻輳の不一致を解消する自然な立体表示技術が盛んに研究されている。しかし同時に、人の視覚がそれら新しい方式の立体表示に対してどのように機能するのか、すなわち調節と輻輳の不一致が解消され、自然な立体視が可能になるかを評価することも重要である。本稿では、調節と輻輳の不一致を解消する方法の一つとして超多眼表示を取り上げ、その原理および実現手法に

図1 自然視と従来の立体表示に対する調節機能

ついて概説するとともに、人の視覚が超多眼表示に対してどのように機能するのか、評価実験の結果に基づいて説明する。

2. 超多眼表示の原理

裸眼立体表示方式には、ホログラフィに代表される波面

^{†1} 独立行政法人情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所

^{†2} 東京農工大学 大学院 工学研究院

^{†3} 脳情報通信融合研究センター

"Super Multi-view 3D Display and Human Visual Function" by Haruki Mizushima (Universal Communication Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Kyoto), Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo) and Hiroshi Ando (Universal Communication Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Kyoto, and Center for Information and Neural Networks (CiNet), National Institute of Information and Communications Technology (NICT) and Osaka University, Osaka)

図2 超多眼表示の原理

再生型と、多眼立体表示やインテグラル表示に代表される光線再生型がある。本稿で扱う超多眼表示は、多眼立体表示の特殊なケースと考えることができ、光線再生型に分類される。

多眼立体表示では、見る位置（視点）によって異なる像が見えるようにすることで両眼立体視を実現し、かつ空間に視点を連続的に複数設けることで運動視差を実現する。従来の多眼表示の場合、左右の眼に別々の視差画像が表示されれば両眼立体視には充分であるので、視点間隔は両眼間隔以下の数cmのオーダーで設定されることが多い。一方、多眼表示の視点間隔を数mmのオーダーまで狭め、瞳孔径より狭くしたものが超多眼表示であり、立体像の1点を通る光線が2本以上同時に瞳に入射される。そのため、図2(a)のように眼のピントをスクリーンに合わせると網膜上では複数の点として結像するため多重像に見えるが、図2(b)

図3 超多眼表示による被写界深度の拡大

に示すように立体像にピントを合わせると、光線は網膜上で一点に重なる。このとき、結果として調節と輻輳が一致することになるため、調節と輻輳の不一致が解消される⁴⁾。

被写界深度は、光線のボケが知覚されないスクリーン前後の奥行き範囲である。図3(a)に示すように、従来の多眼表示ではスクリーンからの光線が眼に到達するとき、ビーム径が瞳孔径よりも大きくなるため、被写界深度は瞳孔径で決定される。超多眼表示では空間的に非常に密に視点を形成するため、光線に高い指向性を持たせる。視点間隔が瞳孔径より小さくなると、図3(b)に示すように、光線のビーム径が瞳孔径より小さくなり、実効的な瞳径が縮小する。その結果、被写界深度が拡大するため、立体像にピント合わせができる範囲も拡大し、スクリーンから大きく離れた位置に再生された立体像を、安定的に知覚することが可能になる⁵⁾。

超多眼表示の実現における技術的な難しさは、一定の視域に高密度に視点を配置し、各視点に対応した膨大な画像情報を表示する点にある。視点間隔を瞳孔径より狭くする必要があるため、両眼観察および頭部の移動が可能で実用的な視域を確保するためには、数十から場合によっては数百の視点が必要とされる。この要件を満たすためにさまざまな手法が考案されている⁶⁾。

マルチプロジェクション方式では、視点数に対応した多数のディスプレイ画像を異なる指向性を持つ光線で投影する^{7)~10)}。この方式には、各視点の画像をディスプレイのフル解像度で表示できるというメリットがある。多数のディスプレイを用いる代わりに、少数の高フレームレートディスプレイ画像を時間多重で表示する方式もある¹¹⁾。光源アレイを用いたレンチキュラ方式では、各視点に異なる画素を割当て、レンチキュラレンズで光線の向きを制御する^{12) 13)}。この方式は、光源アレイとして薄型の高精細液晶パネルを用いることで、コンパクトな構成が可能な点が特徴である。レンチキュラ方式では視点数と立体画像の解像度がトレードオフの関係にあり、視点数が増加するほど各視点の画像解像度が低下するが、この欠点を補うために視域を眼の近傍のみに限定し、フラットパネルディスプレイに要求される解像度を低下させる方法も考案されている¹⁴⁾。この方法では、アイトラッキングと組合せることで、頭部の移動に合わせて、常に眼の近傍に視域を形成する必要がある¹⁵⁾。一方で、マルチプロジェクション方式とレンチキュラ方式を組合せることで、さらに膨大な数の視点を配置することも可能である¹⁶⁾。また、ヘッドマウントディスプレイに時間多重表示を用いることで、超多眼表示を実現する方法も考案されている^{17) 18)}。

3. 超多眼表示に対する視覚機能

超多眼表示に対して、人間の視覚機能がどのように機能するのか、いくつかの評価実験の結果とともに説明する。

従来の二眼表示および多眼表示に対するピント調節機能を測定すると、立体像の再生位置がスクリーン面付近のときは調節の応答が立体像の視差に応じて変化するが、再生位置がスクリーンから大きく離れると、調節応答は立体像の位置に追従できなくなる^{19) 20)}。これは、立体像の再生位置が被写界深度の範囲内であれば、眼は輻輳と連動して生じる輻輳性調節^{21) 22)}と呼ばれる機能により、立体像の位置にピントを合わせることができるが、再生位置が被写界深度の範囲を外れると、ぼけが知覚されないようにピントの位置を被写界深度内に留めようとするためと解釈できる。先述のように、超多眼表示では実効的な瞳孔径が縮小し、被写界深度が拡大するため、輻輳性調節により眼が立体像の位置にピントを合わせ、自然な調節機能の働く範囲が広がることが期待される。超多眼表示に対する調節応答が、通常多眼表示とどのように異なるのか実験的に測定した

図4 超多眼表示と多眼表示に対する調節応答(文献20)より改変)

例を紹介する²³⁾。図4は視点間隔が(a) 2.6 mmと(b) 7.9 mmのときの、立体像に対する調節応答を測定したものである。平均的な瞳孔径が5 mm程度であることを考慮すると、視点間隔2.6 mmは瞳孔径に複数の視差光線が入射する超多眼表示に、7.9 mmは単一の視差光線のみが入射する従来の多眼表示に相当する。視点群とスクリーンの距離は350 mmである。被験者が観察する視標の距離は、スクリーンの奥75 mmから手前105 mmの範囲を15 mm間隔で刻んだ13箇所である。各グラフの横軸は実物体に対する調節応答、縦軸は立体像に対する応答であり、いずれもディオプタ(diopter, D)で表示している。ディオプタは屈折力の単位であり、焦点距離の逆数と定義されている。すなわち、1.0 mにピントのあった状態が1.0 D、0.5 mにピントのあった状態が2.0 Dとなる。立体像に対して、実物体に対するのと同じピント調節機能が働いている状態がグラフ中の45°の破線である。図中では、立体像に対して実物体に対するのと同じように調節が働く範囲を、被写界深度とし

て灰色で表示している。図から明らかなように、超多眼表示によって被写界深度が拡大したことがわかる。このことから、超多眼表示によって広い奥行き範囲にわたって自然な調節機能が働くようになると言え、これは先述の実効的な瞳孔径の縮小によるものと考えられる。

しかし、超多眼表示にもいくつかの限界がある。まず、光線の広がりを実無限に小さくすることはできないので、被写界深度、すなわち自然な調節機能が働く奥行き範囲は有限である。この範囲をさらに拡大するためには、視点間隔をさらに密にして、光線のビーム径をより小さくする必要がある。現在、視点間隔を1 mmにまで狭めた超多眼ディスプレイが開発されている²³⁾。

図4に示した超多眼表示に対する調節応答は、視標を両眼で観察した場合のものである。しかし、超多眼表示された立体像を片眼(単眼)で観察すると、両眼で観察した場合と比べて、立体像の再生位置の変化に伴って生じる調節応答の変化量が減少してしまう²⁴⁾。単眼観察の場合は、輻輳刺激(両眼視差)が存在しないので、輻輳応答の変化はほとんど生じない。このことから、超多眼表示を両眼で観察した際に生じる調節の変化には、拡大した被写界深度内で生じる輻輳性調節が大きな役割を果たしていると考えられ、単眼による観察では超多眼表示の利点が最大限に生かされない可能性がある。

理想的な超多眼表示としては、水平・垂直方向の視差が存在する水平垂直視差型(フルパララックス)であることが望ましい。しかし実用的には、垂直方向の視差画像を表示すると視点数が莫大になるため、水平視差型(horizontal parallax only)とすることが多い。この場合、画像中に含まれるエッジが垂直に近いほど、立体像の位置への眼のピント調節の誘導は効果的に行われ、エッジが水平に近づくにつれて誘導効果は弱くなる²⁵⁾。調節刺激の観点から考えると、垂直のエッジは立体像の位置への調節刺激となるが、水平エッジはスクリーン面への調節刺激となるからである。水平視差型の超多眼ディスプレイを使用する場合、このような水平・垂直の異方性があることを考慮する必要があるだろう。

ここまでは、超多眼表示によって自然な調節機能が働く範囲、すなわち被写界深度が拡大するという観点から説明してきた。では、最初に述べた「調節と輻輳の不一致」は、超多眼表示によって解消されるのだろうか。これを確認するための最も直接的な方法は、立体像に対する調節と輻輳の応答を同時測定することである。そこで次に、超多眼表示に対する調節・輻輳応答を測定した例を紹介する²⁶⁾。図5は、眼から視標までの距離を462 mmから857 mmまで変化させたときの輻輳・調節応答の変化量を示したものであり、4名の被験者の結果の平均値である。462 mmと857 mmは、ディオプタに換算するとそれぞれ2.17 Dと1.17 Dであり、変化量は1.0 Dとなる。超多眼表示と二眼表示は、眼から

図5 視標の距離が1.0 D変化したときの調節・輻輳応答の変化量
(文献23)から改変)

600 mm (1.67 D) の位置に設置された同一のディスプレイを用いて、視点間隔をそれぞれ2.3 mmおよび21.0 mmとしたものである。なお、輻輳の単位のMAはMeter Angleであり、ディオプタと同じく距離の逆数である。図から明らかなように、いずれの表示条件でも輻輳の応答は刺激の変化量と同じく約1.0 MAであるが、調節の応答は条件間で大きく異なる。実物体に対しては、輻輳と同じく調節にも約1.0 Dの変化が生じており、輻輳と調節の変化量が一致している。一方、二眼表示に対しては輻輳応答の約半分の調節の変化しか生じておらず、調節と輻輳の変化量の間の差に、有意水準1%で統計的な有意差が見られた(図中に $p < 0.01$ と表記)。超多眼表示の場合、調節の変化量は実物体と二眼表示の場合のほぼ中間の値をとり、調節と輻輳の間の有意差は見られない。このことから、超多眼表示によって調節と輻輳の不一致が軽減され、実物体を見ている場合に近い、自然な調節・輻輳が機能していると言える。

調節と輻輳の不一致の軽減以外で、視覚機能に対する超多眼表示の利点としては、滑らかな運動視差の変化が挙げられる。従来の多眼表示でも、頭部を動かすことによって運動視差による奥行き知覚が得られるが、視点の切替わりの際に視差が不連続に変化するため不自然な動きが知覚される。しかし、超多眼表示では瞳孔内に常に二つ以上の視差の光線が入射しているので、頭部運動に伴う運動視差の変化は非常に滑らかで自然である。また、滑らかな運動視差によって、30 mを超えるような長距離に表示された立体像の奥行き知覚が正確になるため、ヘッドアップディスプレイ型のカーナビゲーションシステムなどへの応用が期待される²⁷⁾。

4. むすび

本稿では、超多眼表示の原理とそれを実現するための各種方式、および超多眼表示に対する視覚機能、特に調節・輻輳機能について概説した。究極の立体表示といわれるホログラフィには、実用までに技術的に困難な課題がまだ数

多く残されているが、超多眼表示は現時点の技術水準でも調節と輻輳の不一致を、完全にではないが軽減することができる。また、従来の多眼表示で生じた視点切替わりに伴う不連続な運動視差がなくなり、滑らかな運動視差が実現できる。数年前に沸き起こった3Dブームが不発に終わった原因の一つとして「立体映像は不快で疲れる」という要因があったのだとすれば、自然な輻輳、調節の機能が期待でき、また自然な運動視差も再現できる超多眼表示は有望な解決策と言えよう。

(2014年7月31日受付)

〔文 献〕

- 1) D.M. Hoffman, A.R. Girshick, K. Akeley and M.S. Banks: "Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue", J. Vision 8, 3, 33, pp.1-30 (2008)
- 2) K. Ukai and P.A. Howarth: "Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories and observations", Displays 29, 2, pp.106-116 (2008)
- 3) T. Bando, A. Iijima and S. Yano: "Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: A review", Displays 33, 2, pp.76-83 (2012)
- 4) Y. Kajiki, H. Yoshikawa and T. Honda: "Hologram-like video images by 45-view stereoscopic display", Proc. SPIE 3012, pp.154-166 (1997)
- 5) Y. Takaki and K. Kikuta: "3D images with enhanced DOF produced by 128-directional display", 13th International Display Workshops (IDW2006), pp.1909-1912 (2006)
- 6) Y. Takaki: "Development of super multi-view displays", ITE Trans. On MTA, 2, 1, pp.8-14 (2014)
- 7) T. Honda, D. Nagai and M. Shimomatsu: "Development of 3-D display system by a fan-like array of projection optics", Proc. SPIE 4660, pp.191-199 (2001)
- 8) H. Nakanuma, H. Kamei and Y. Takaki: "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation", Proc. SPIE 5664, pp.28-35 (2005)
- 9) Y. Takaki: "High-density directional display for generating natural three-dimensional images", Proc. IEEE 94, pp.654-663 (2006)
- 10) K. Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display", Proc. SPIE 6490, pp.64900U-1-8 (2007)
- 11) 金箱 翼, 高木康博: "時間多重表示モジュールを用いた高密度指向性立体ディスプレイ", 映情学誌, 63, 8, pp.1133-1138 (2009)
- 12) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images", Proc. SPIE 5664, pp.56-63 (2005)
- 13) Y. Takaki and T. Dairiki: "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation", Proc. SPIE 6055, pp.60550X-1-8 (2006)
- 14) Y. Takaki, K. Tanaka and J. Nakamura: "Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display", Opt. Express, 19, 5, pp.4129-4139 (2011)
- 15) J. Nakamura, T. Takahashi, C.-W. Chen, Y.-P. Huang and Y. Takaki: "Analysis of longitudinal viewing freedom of reduced-view super multi-view display and increased longitudinal viewing freedom using eye-tracking technique", J. Soc. Inf. Display, 20, 4, pp.228-234 (2012)
- 16) Y. Takaki and N. Nago: "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display", Opt. Express, 18, 9, pp.8824-8835 (2010)
- 17) D.-W. Kim, Y.-M. Kwon, Q.-H. Park and S.-K. Kim: "Analysis of a head-mounted display-type multifocus display system using a laser scanning method", Opt. Eng., 50, 3, pp.034006-1-034006-9 (2011)
- 18) S.-K. Kim, E.-H. Kim and D.-W. Kim: "Full parallax multifocus three-dimensional display using a slanted light source array", Opt. Eng., 50, 11, pp.114001-1-114001-4 (2011)
- 19) 比留間伸行, 福田忠彦: "調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件", 信学論, J-73-D-II, 12, pp.2047-2054 (1990)
- 20) 水科晴樹, 根岸一平, 安藤広志, 正木信夫: "立体映像および実物体観視時の調節・輻輳応答の静特性と動特性", 映情学誌, 65, 12, pp.1758-1767 (2011)
- 21) 原島 博監修, 元木紀雄, 矢野澄男共編: "3次元画像と人間の科学", オーム社 (2000)
- 22) I.P. Howard: "Seeing in Depth: Volume 1, Basic Mechanisms", I Porteous, Toronto (2002)
- 23) J. Nakamura, K. Tanaka and Y. Takaki: "Increase in depth of field of eyes using reduced-view super multi-view displays", Appl. Phys. Express, 6, 2, pp.22501-1-22501-3 (2013)
- 23) Y. Toda, J. Takagi and Y. Takaki: "Super multi-view display with 1-mm-pitch viewpoints and accommodation measurements", the 20th International Display Workshops (IDW2013), pp.1045-1046 (2013)
- 24) H. Mizushima, J. Nakamura, Y. Takaki and H. Ando: "Vergence and accommodation responses to super multi-view display", Proceedings of the 5th International Conference on 3D Systems and Applications (3DSA2013), P2-1 (2013)
- 25) 名手久貴, 福富武史, 高木康博: "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质性", 映情学誌, 58, 9, pp.1263-1270 (2004)
- 26) 水科晴樹, 根岸一平, 安藤広志, 正木信夫: "超多眼立体表示に対する調節・輻輳応答", 映情学誌, 67, 12, pp.1475-1478 (2013)
- 27) Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando, K. Nakamura and Y. Takaki: "Super-multiview windshield display for driving assistance", J. of Information Display, 12, 1, pp.43-46 (2011)

水科 晴樹 1998年, 新潟大学工学部卒業。2000年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。2003年, 同研究科博士後期課程修了。同年, 高知工科大学教育講師。2004年, カナダ・ヨーク大学博士研究員。2007年, 東京工業大学産学官連携研究員。2009年, (株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)研究員。2012年より, (独)情報通信研究機構(NICT)ユニバーサルコミュニケーション研究所多感覚・評価研究室研究員。視覚心理物理学, 立体映像の安全性に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。

高木 康博 1986年, 早稲田大学理工学部卒業。1988年, 同大学大学院理工学研究科修士課程修了。1992年, 同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, 同大学助教授。2000年, 東京農工大学工学部助教授。2013年より, 同大学教授。主に, 立体映像技術に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。

安藤 広志 1992年, MIT 脳・認知科学科博士課程修了。同年, (株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に入社。主任研究員を経て, 認知ダイナミクス研究室長。2009年, (独)情報通信研究機構(NICT)グループリーダー。2011年より, (独)情報通信研究機構(NICT)ユニバーサルコミュニケーション研究所多感覚・評価研究室室長。2012年より, 脳情報通信融合研究センター(CiNet)脳情報通信融合研究室副室長, 大阪大学大学院生命機能研究科招聘教授を兼務。認知脳科学, 多感覚インタフェース等の研究に従事。Ph.D.(計算神経科学)。