

様々な立体表示が持つ視覚的特性とその比較

——のぞき眼鏡から輻輳と調節の不一致を軽減させる立体表示まで——

名手久貴

映像学科

Comparison and Visual Characteristics of Various Three-dimensional Display

—From NOZOKI-MEGANE to three-dimensional display being able to reduce inconsistency between vergence and accommodation—

NATE Hisaki

Department of Imaging Art

(Received November 9, 2007; Accepted January 10, 2008)

1. はじめに

これまで、様々な立体表示装置が開発されてきた。古くはのぞき眼鏡と呼ばれる単眼視で立体感が得られる装置や、液晶シャッターや偏光板等による立体映像表示システムで用いられる二眼立体表示、CAVIN¹⁾、CAVE や一部の裸眼立体ディスプレイ等の多視差画像による立体表示、超多眼表示²⁾や指向性画像の高密度表示³⁾等の輻輳と調節の不一致を軽減させる立体表示等がある。本稿では、これらの立体表示の概要を説明するとともにそれぞれの立体表示を観察したときの視覚的特性を記述する。そして、立体表示の視覚的特性を比較することにより、時代とともに立体表示がどの程度自然な見えに近づいているかについて検討する。

2. のぞき眼鏡

ルネッサンス期のヨーロッパで広まった遠近法は、空間を再現する方法のひとつである。しかし、多くの場合、遠近法だけでは絵画の中の空間を認識させる効果と同時に絵画が平面であるという認識も存在するため、絵画中の空間を自然な空間と同様であると認識させるには限界がある。その限界を突破する方法の一つに「のぞき眼鏡」という装置が17世紀にヨーロッパで開発された⁴⁾。立体写真などの二眼立体表示が開発される以前から存在する立体表示装置であり、ヨーロッパから中国を経由して日本に伝えられた⁴⁾。日本では、丸山応挙らがのぞき眼鏡の絵を描き、江戸時代の玩具として楽しまれた⁴⁻⁵⁾。

のぞき眼鏡には直射式と反射式という二つのタイプが存在した(図1)。直射式ののぞき眼鏡は、箱の側面に凸レンズをはめ込み、レンズの反対側の側面に絵をはめ

込むというものである。観察者は、レンズ越しに反対側の側面にはめ込まれた絵を鑑賞することになる。はめ込まれた絵は、線遠近法を用い奥行き感を強調した絵が多く、差し替えることが可能である。反射式ののぞき眼鏡は、レンズと絵の間に視線に対して傾けた鏡を挿入している。その結果、観察者の視線の先に絵が置かれるのではなく、90度傾いた位置に絵を置くことになる。反射式ののぞき眼鏡は、楽な姿勢で観察できることと観察する絵を机や床に置くことができるので簡便に絵を差し替えられるという利点がある。

3. なぜ、のぞき眼鏡の絵が立体的に見えるのか

3-1 人が利用する奥行き手がかり

のぞき眼鏡を通した絵が立体的に観察される仕組みを説明する前に人が日常生活において奥行きを知覚する際に利用する奥行き手がかりについて説明する。人は、両眼視差、運動視差、輻輳、調節、オクルージョン、陰影等の様々な奥行き手がかりから奥行きを知覚している。

これらの奥行き手がかりの中で両眼視差と輻輳は、両眼で観察した時にのみ利用できる奥行き手がかりである。両眼視差は人間の眼が水平に約65 mm 離れているため、左右の眼の網膜像にずれ(視差)が発生することを利用している(図2)。そして、視差量が同じ対象は、位置が異なる対象でも、観察者からの距離が同じである。一方、輻輳は対象と両眼の視線がなす角度を利用した奥行き手がかりであり、輻輳角が大きいほど人に近い対象である。言い換えると、輻輳角が同一であれば位置が異なっても、対象と観察者との距離は同一である。このように、視差量や輻輳角の値が同じ対象は、観察者との距離が同一である。

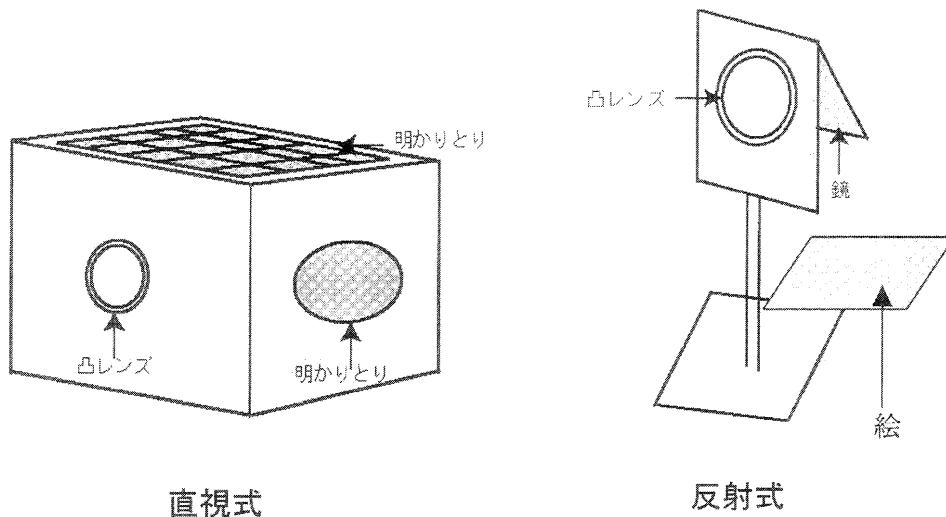


図1 のぞき眼鏡

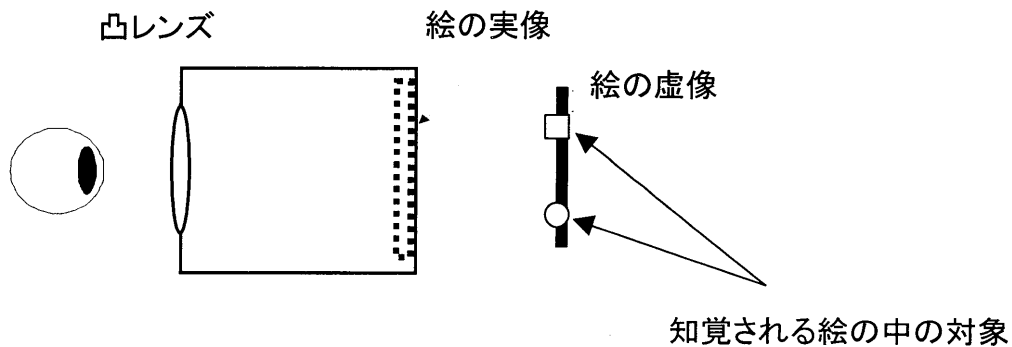


図2 のぞき眼鏡観察時の様子

単眼視でも利用可能な奥行き手がかりには、運動視差、調節、遠近法、オクルージョン、陰影等の奥行き手がかりがある。運動視差は、観察者が移動することにより発生する網膜像の変化を利用した奥行き手がかりである。調節は、眼のピント調節によるレンズの厚みの変化を利用した奥行き手がかりである。オクルージョンは、対象の網膜像上の重なりを利用した奥行き手がかりであり、遠近法は遠くの対象は網膜像上では1点に収束することを利用した奥行き手がかりである。陰影は、対象の影のつき方に注目した奥行き手がかりである。これらの奥行き手がかりのうち、運動視差と調節は、観察者が移動やレンズの調節など積極的に外界に働きかけないと利用できない奥行き手がかりであるのに対して、陰影、オクルージョン、遠近法は絵画、テレビで表示されている像の中に奥行き手がかりが含まれている。このため、陰影、オクルージョン、遠近法等はまとめて絵画的要因による奥行き手がかりとも呼ばれる。

両眼性、単眼性と様々な奥行き手がかりが存在するが、これらの奥行き手がかりはいつも利用できるわけではない。人は、状況に応じて利用可能な奥行き手がかりを組

み合わせながら奥行きを知覚している。では、のぞき眼鏡を観察しているときは、どの奥行き手がかりが利用可能であろうか。

3-2 のぞき眼鏡の絵が立体的に見える仕組み

のぞき眼鏡観察時、凸レンズ越しに絵を観察する観察者は、絵が実際よりも離れていると知覚するため、比較的近距离にのみ有効な調節による奥行き手がかりの効果が弱くなる(図3)。また、小さなレンズ越しに絵を観察する必要のあるのぞき眼鏡では、両眼での観察がしづらいため、両眼性の奥行き手がかりである両眼視差や輻輳の効果も弱くなる。さらに、観察者は静止してのぞき眼鏡を観察するため、運動視差を奥行き手がかりとして利用することができない。残された奥行き手がかりは、遠近法、陰影、オクルージョンなど単眼性の絵画的要因による奥行き手がかりである。

効果が弱くなる両眼視差、輻輳、調節は、絵の虚像の奥行き位置情報を観察者に提供する。つまり、絵の中の対象の視差量や輻輳角がすべて同一のため、すべての対象の奥行き位置も同一であるという情報を提供する。一

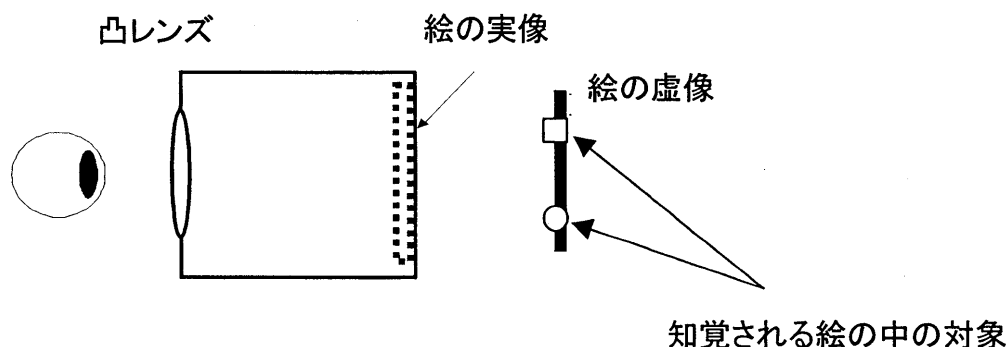


図3 絵画的要因による奥行き手がかりにより知覚される対象の位置

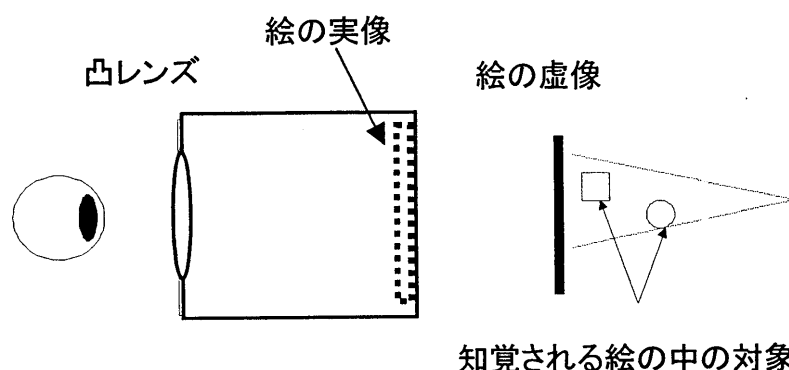


図4 3つの奥行きの異なる円柱を観察しているときの網膜像左眼の網膜像と右眼の網膜像にはずれが生じる。一番手前の黒い円柱と白い円柱は観察者からの距離が同一であるため左右の網膜像のずれ量（視差量）も同一である。

方、絵画的要因による奥行き手がかりは、絵の中の対象の奥行き位置がすべて同じというわけではないという情報、つまり絵の中に空間が存在するという情報を観察者に提供する（図4）。つまり、絵の中に空間が存在するという情報を提供している。特に多くの絵が典型的な遠近法に基づく構図であるため、遠近法による奥行き手がかりが有効に働く。

のぞき眼鏡を観察しているとき、両眼視差や輻輳など絵自体の位置情報を提供する情報の効果が弱められる一方、絵の中に空間が存在するという情報が際立ち、効果的に利用される。このため、絵の中に空間が存在すると認識されることになる。

さらに、のぞき眼鏡の絵の奥行き感を際立たせる要因として、大画面効果がある。大画面効果とは視野の大部分をスクリーンやモニターの映像で占めると、映像に奥行き間や臨場感が増す効果である。のぞき眼鏡の場合も視野に占める絵の割合が多くなるため、大画面効果により空間が認識されやすくなる。ただし、部屋の明るさや絵に用いられる紙の反射率などの要因により、奥行き感が弱められる場合がある。

のぞき眼鏡は凸レンズと箱という簡便な装置であるにも関わらず、絵の中の空間を観察者に知覚させることができる装置である。さらに視野の大部分を覆うことがで

きるために大画面効果も期待できる。この装置は、作者が自由に描いた空間を余分なものに邪魔されることなく、観察者に鑑賞させることができる装置といえる。

しかし、のぞき眼鏡から見える空間には限界がある。それは、観察者と絵の間の空間に対象を知覚させることができないという点である。観察者と絵やスクリーンの間に対象を知覚させるためには、二眼立体表示以降の表示方式の開発をまたなければならない。

4. 二眼立体表示

人間の眼は、3-1で述べたように右眼と左眼が約65 mm 離れている。このため、図2のように左右の眼の網膜に映る像は、同一ではなく横方向にずれた像になる。左右の網膜像のずれを両眼視差とよび、ずれ量のことを視差量と呼ぶ。対象の奥行き位置が異なれば、視差量も異なる。人は、左右の網膜像のずれ量である視差量から対象の奥行き量を知覚している。

二眼立体表示では、この人間の奥行き知覚の仕組みを利用することで、立体表示を可能にしている。つまり、左眼には左眼の網膜像に対応する像を、右眼には右眼の網膜像に対応する像を提示することにより、人に両眼視差を知覚させて奥行き感や立体感を知覚させている（図5）。網膜像に対応する像は、立体写真の場合には写真、立体

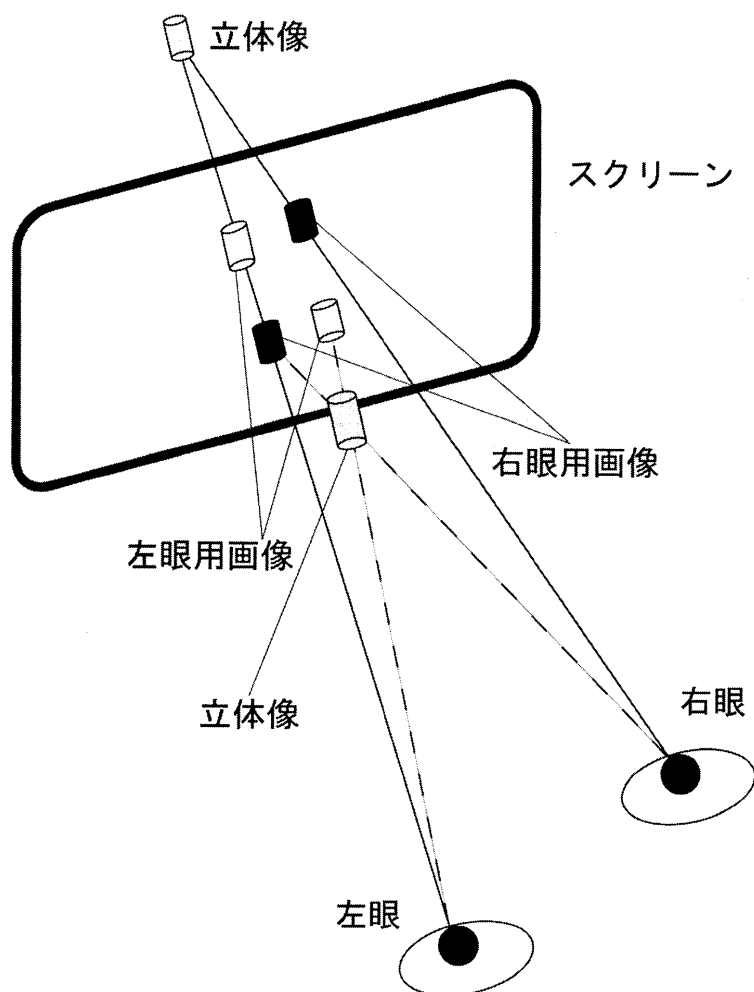


図5 二眼立体表示を観察しているときの様子。

白い円柱は右眼用の画像、黒い円柱は左眼用の画像である。液晶シャッターや偏光版やアナグリフなどを利用して、右眼用の画像は右眼にしか、左眼用の画像は左眼にしか見せないように工夫している。結果、図では、灰色の円柱の位置に円柱が知覚される。説明のため図では左眼画像と右眼画像と知覚される立体像の色を変えているが、液晶シャッターや偏光版を利用すると、左右の画像、立体像は同じ色である。

映画の場合は映画というように用いられる装置により様々である。

4-1 様々な分野で用いられる二眼立体表示

二眼立体表示の歴史は古く、1938年に Wheatstone, C. が二眼立体表示についてまとめた論文を発表し、1839年に立体写真を開発した。1839年は、写真自体が開発された年であり、写真の開発とほぼ同じときに立体写真も開発されたことになる⁶⁾。その後、立体写真を鑑賞するためのステレオ・ビューワーが多数開発され、一般に知られていった。時代とともに、写真を左右に並べて観察するタイプの立体写真だけではなく、赤と青のフィルターを用いたアナグラフ式やアナグリフ式を改良した遠山式⁷⁾などの立体写真が開発されていった。

映画も二眼立体表示による立体映画が開発されており、

アナグリフや偏光フィルターを利用したものがある。現在では、REAL D 社の Real D 方式⁸⁾ や Dolby Laboratories 社の Dolby 3D Digital Cinema 方式⁹⁾ のように 1 台の DLP プロジェクターで左右の両眼の映像を提示できる立体映像表示システムが広まりつつある。日本でもいくつかのシネコンでは、Real D 方式の立体映画を上映できる映画館ができています。

写真や映画などのアミューズメントの分野だけではなく、医療分野で立体映像が用いられている装置に腹腔鏡下手術や胸腔鏡下手術などで用いられる手術支援ロボット (Intuitive 社 da Vinci など) がある¹⁰⁾。da Vinci による手術では、従来のように術者が直接患部を観察しながら施術するのではなく、患部をモニターで観察しながら機器の操作部分 (master 部) を操作して施術する¹¹⁾。患部に直接触れるのは slave 部と呼ばれる機器の部分 (機

器の被操作部分)である。このような master-slave 型の装置では、医師が観察するモニターの質が重要な要素になる。da Vinci のモニターでは、患部の三次元表示が可能な二眼立体表示を用いて、術者に直接患部を観察した場合に近い映像を提供している。

日本では、da Vinci が臨床で実際に用いられている。2001年から2002年まで慶応大学で治験が行われた¹¹⁾。さらに治験以外でも30例以上の手術例があると報告されている。また、九州大学でも2000年から2002年にかけて62例の手術が da Vinci により行われている¹⁰⁾。その結果、慶応大学では二次元視野に比べ三次元視野の方が安全、容易に手術作業を遂行できると報告している。九州大学の例でも、入院期間の短縮や早期社会復帰に貢献しているとの報告がある。

写真測量の分野では実体鏡を用いた傾斜の測定、設計分野では CAD により設計された対象の実物大立体表示システムなどで二眼立体表示が利用されている。このように二眼立体表示は、立体表示の中では最も広い分野で利用されている立体表示方式であり、最も広く知られた立体表示方式であるといえる。

4-2 二眼立体表示の視覚的特性

二眼立体表示は、スクリーンの前に対象を知覚させることができる優れた立体表示であるが、観察中に眼が疲れる観察者が多いという弱点を持つ¹²⁻¹³⁾。二眼立体表示を観察しているときに疲労が発生する原因として、いくつかの原因が考えられる。その原因を大きく分けると、二眼立体表示自体の構造的な問題、二眼立体表示を利用している各装置固有の問題、立体映像コンテンツの問題がある。

二眼立体表示の構造的な問題として観察者の輻輳と調節が一致しないという問題が挙げられる¹²⁻¹³⁾。二眼立体表示観察時、両眼の張り出し角である輻輳 (3-1参照) は、注視している対象の位置に誘導される (図6)。しかし、眼のピント調節は、スクリーンに誘導される。このため、輻輳と調節が一致しない。通常、人が実際の対象を観察するときには注視している対象にピントを調節するため調節と輻輳がほぼ一致する。このような実際の観察時との乖離が疲労を誘発させる原因と考えられている。

次に各装置固有の問題について記述する。内視鏡の映像を立体表示させる立体内視鏡が1990年代に前半に様々な企業から発売されたが、その後、ほとんどの立体内視鏡は販売されなくなっている状況がある。山内らは立体内視鏡で用いられる像の明るさや色再現性の問題、フリッカーの発生、眼鏡の重量感が問題で長時間の手術に耐えられないことが原因であるとしている¹⁴⁾。

現在、da Vinci で二眼立体表示が採用されていること

からもわかるように、解像度や明るさなどの問題のほとんどは解決できている。また、立体映画の Real D 方式でもフリッカーや像の明るさは、全く問題がないといえる。映像の基礎技術の発達とともに、解像度や明るさ等、映像自体の問題は徐々に解決されていくことが予想される。

最後に立体映像コンテンツ自体の問題について記述する。二眼立体表示では、左右の映像に視差が生じている。視差量が大きすぎると人は一つの映像として認識することができなくなる。左右の映像が融合できる限界まで視差量が大きい場合、観察者は苦勞して二つの像を融像しなければならない。視差量が大きくなると人は苦勞して融像するために、疲労原因となる。このため、立体映像コンテンツを制作する場合には、視差量をコントロールすることが非常に重要な要素になる。

このように、二眼立体表示はスクリーンよりも手前に像を知覚させることができるという利点を持つ反面、機器の性能の向上や立体映像の視差量のコントロールによりかなり疲労を軽減させることができる。しかしながら、輻輳と調節の不一致という構造的な問題が残る。

5. 最近の立体表示

5-1 多視差画像による立体表示

多視差画像による立体表示には、CAVIN¹¹⁾や CAVE のように観察者に付着されたセンサーの位置情報に応じた視差画像が提示されるシステムやレンチキュラーシートと液晶モニターやプラズマモニター等を利用し複数の視差画像を表示する裸眼立体表示システムなどがある (図7)。この立体表示は、二眼立体表示を応用した表示方式であり、両眼視差を主に利用した立体表示である。

多視差画像による立体表示が二眼立体表示と異なる点は、観察者の移動に対応して表示像が変化する点である。

(二眼表示)

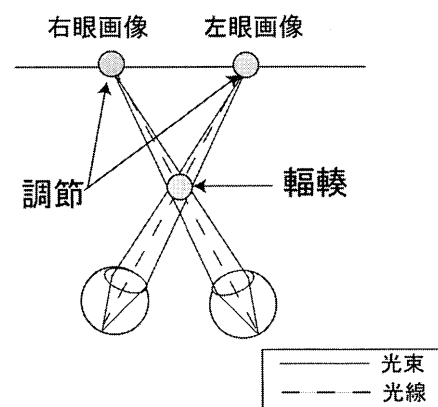


図6 二眼立体表示の観察時における、輻輳と調節の不一致

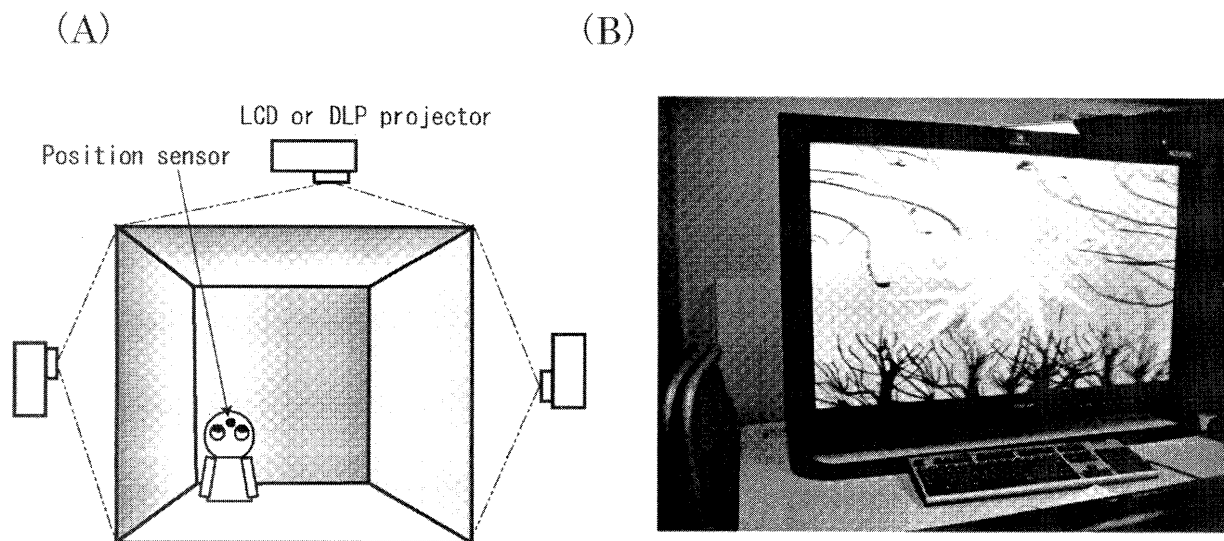


図7 多視差画像による立体表示

(A) は、CAVE や CAVIN の概略図

(B) は、8 視点裸眼立体ディスプレイ (StereoGraphics 社 Synthagram404)

つまり、観察者の頭部を横に移動させるとスクリーンやディスプレイに映る映像中の対象の側面が見えてくる。このため、観察者は奥行き手がかりとして運動視差を利用することができるようになる。ただし、観察者が観察位置を移動するたびにフリッピングを知覚してしまうために、滑らかな運動視差を知覚できるというわけではない。これは、観察者の移動に伴い表示画像が、切り替わることを知覚してしまうためである。また、多視差画像による立体表示も基本的には二眼立体表示を応用しているため、二眼立体表示と同様に調節と輻輳の不一致問題を解決できない。

5-2 調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示

近年、調節と輻輳の不一致を軽減し視覚疲労が少なくなることが期待される立体表示方式として超多眼立体表示や指向性画像の高密度表示などの表示方式が提案されている²⁻³⁾。

超多眼立体表示とは、図8のように単眼内に複数の視差画像を入射させる表示方式である。超多眼立体表示を観察しているとき、スクリーン面に眼のピントを調節すると二重像が知覚されるのに対して、スクリーンから飛び出た位置にある立体像にピントを調節すると合焦した立体像が知覚される可能性がある。そこで、筆者らは超多眼立体表示観察時に輻輳と調節が一致するかについて視覚実験を行ったところ、輻輳の位置に調節が誘導されることを確認した¹³⁾。

指向性画像の高密度表示も調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示の一つである。この立体表示では、多数

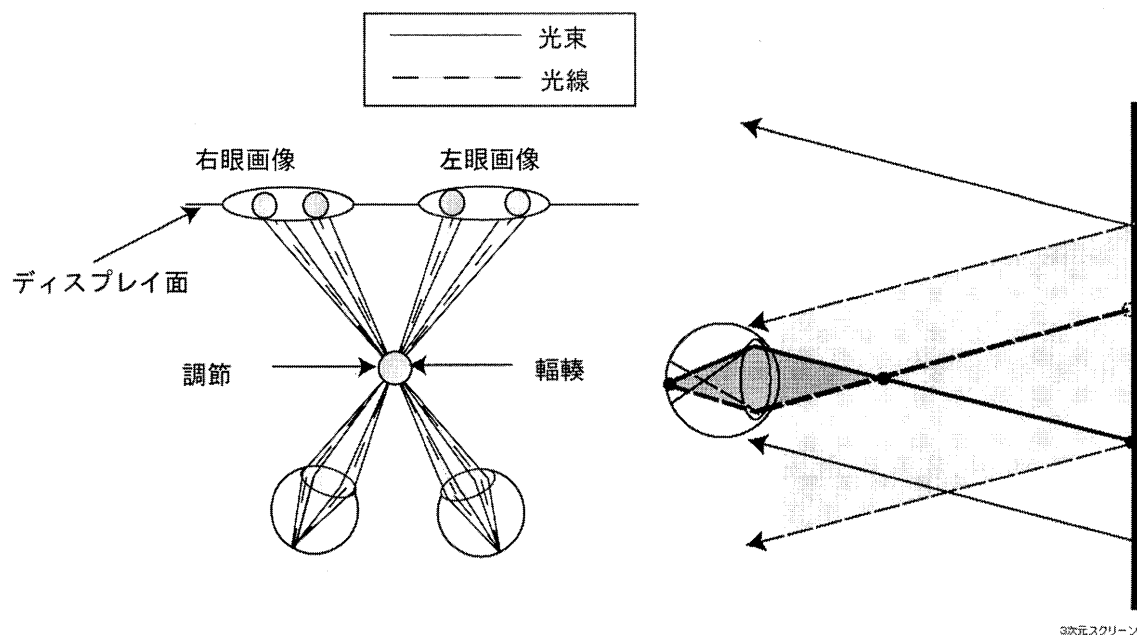
の射影方向に対応した三次元対象の指向性画像を、その方向に対応して高密度に投影する(図8)。観察者は、指向性画像の一部が合成されてできた像を観察する。合成された像では、立体像に焦点を合わせなければ、ぼけた像が観察されることになるので、指向性画像の高密度表示を観察した場合、観察者はスクリーンではなく立体像の位置にピントを合わせることが可能である。超多眼表示同様、筆者らが指向性画像の高密度表示観察時のピント調節を測定したところ、立体像の位置にピントが誘導される可能性があることが確かめられた¹⁵⁾。さらに、指向性画像の高密度表示では、高密度に画像を表示しているため多視差画像による立体表示では表示できなかったフリッピングの無い画像を表示することができる¹⁶⁾。

このように、調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示では、二眼立体表示の構造的な問題である調節と輻輳の不一致を軽減する可能性があるため、視覚疲労の根本的な解決に寄与することが期待される。

6. 様々な立体表示方式が利用可能な奥行き手がかり

のぞき眼鏡、二眼立体表示、多視差画像による立体表示、調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示の特徴とそれぞれの視覚的特性について述べてきた。本節では、それぞれの立体表示観察時に利用できる奥行き手がかりについて検討する(表1)。

のぞき眼鏡は、遠近法、テクスチャー、陰影など絵の中に含まれる絵画的要因に基づく奥行き手がかりが利用できる。一方、利用できない奥行き手がかりには、運動



超多眼表示

指向性画像の高密度表示

図8 超多眼表示と指向性画像の高密度表示

表1 各立体表示で利用可能な奥行き手がかり

	単眼手がかり (絵画的要因による奥行き手がかり)			単眼手がかり (環境に人が働きかけて得られる手がかり)		両眼性手がかり	
	遠近法	オクルージョン	陰影	調節	運動視差	両眼視差	輻輳
のぞき眼鏡	○	○	○				
二眼立体表示	○	○	○			○	○
多視差画像による 立体表示	○	○	○		○	○	○
調節と輻輳の不一致を 軽減する立体表示	○	○	○	○	○	○	○

視差、調節がある。両眼性の奥行き手がかり、運動視差、調節を利用できないようにすることにより、のぞき眼鏡は立体感を知覚させているともいえる。

二眼立体表示は、絵画的要因の奥行き手がかりに加えて両眼視差や輻輳などの両眼性の奥行き手がかりも利用できる。このため、のぞき眼鏡とは異なり二眼立体表示ではスクリーンの手前に対象を知覚させることができる。しかし、運動視差や調節は利用することができない。これは、以下に述べる理由によるものである。運動視差は、観察者が頭部を移動させてもスクリーンに映る映像中の対象の側面が見えてこないために利用することができない。つまり、観察者が移動しても表示像の視点が変化しないためである。一方、調節は、常時スクリーンに眼のピントが合焦しているために利用することができない。

多視差画像による立体表示は、基本的には二眼立体表示を応用した表示であるため、二眼立体表示で利用可能な奥行き手がかりはすべて利用できる。また、二眼立体

表示の構造的な問題でもある輻輳と調節の不一致の問題も引き継いでいる。

この立体表示の特徴は、多数の視差画像を観察者の位置に応じて提示することができるため、表示している対象の側面が連続的に見えてくるという点である。ただし、観察者移動時に切り替わる視差画像間是不連続であるため、フリッピングを知覚してしまう。

最後に輻輳と調節の不一致を軽減する立体表示では、これまでの立体表示と異なり調節が利用可能であるという特徴を持つ。さらに、指向性画像の高密度表示では、観察者の頭部を移動させたときにフリッピングが観察されずに表示対象の側面が観察できるという特徴ももつ¹⁰⁾。

輻輳と調節の不一致を軽減する立体表示、二眼立体表示が利用可能な奥行き手がかりをすべて利用できることに加えて、運動視差、調節も利用できる。これは、想定されるほとんどのすべての奥行き手がかりを利用できることを示している。さらに高い立体感や臨場感をまし自

然な見えに近づけるためには、高解像度化や大画面化が要求されることになるだろう。

7. まとめ

のぞき眼鏡、二眼立体表示、多視差画像による立体表示、調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示について視覚的特性の点から検討した。結果、技術が進歩するにつれて利用可能な奥行き手がかりの数が増加し、調節と輻輳の不一致を軽減する立体表示では、想定されるほとんどの奥行き手がかりを観察者に提供できることを確認した。

本稿の執筆に当たっては、岡 氏（神戸市博物館）および岬 氏（NHK）から貴重な助言を頂いたことをここに記す。また、のぞき眼鏡に関する記述では、「NHK ハイビジョン特集 からくり絵師 丸山応挙」の内容を参考にさせて頂いた。

参考文献

- 1) 廣瀬通孝 “全天周ディスプレイ” 映像情報メディア学会誌, 55, 8/9, 1064-1066, (2001).
- 2) H. Honda, D. Nagai and M. Shimomatsu “Development of 3-D display system by a fan-like-array of projection system.” Proceedings of SPIE, 4660, 191-199, (2002)
- 3) 高木康博 “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” 映像情報メディア学会誌, 57, 2, 293-300, (2003).
- 4) 岡泰正 “めがね絵新考” 筑摩書房 (1994).
- 5) 佐々木丞平, 佐々木正子 “円山應舉研究 研究篇” 中央公論美術出版 (1996).
- 6) 吉村信, 細馬宏道:ステレオ ―感覚のメディア史―, 1994, ベヨトル工房
- 7) 遠山茂樹, 遠山式開発チーム “Touch it! ー遠山式超立体写真集” 小学館, (2004).
- 8) <http://www.reald.com/>
- 9) http://www.dolby.com/professional/motion_picture/solutions_d3ddc.html
- 10) 安永武史, 橋爪誠 “ロボット医療開発とオープン MRI” MEDIX, 44, 4-7, (2006).
- 11) 古川俊治, 小澤壯治, 若林剛, 渡邊昌彦, 森川康英, 北島政樹 “消化器外科領域における Robotic Surgery” 日本内視鏡外科学会誌, 8, 1, 12-16, (2003).
- 12) 江本正喜 “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” 映像情報メディア学会誌, 56, 11, 1803-1812, (2002).
- 13) 名手久貴 “超多眼ディスプレイとその評価” VISION, 15, 2, 87-91, (2003).
- 14) 山内康司, 篠原一彦 “立体内視鏡下手術作業事の疲労に対する両眼立体視の影響” コンピュータ外科学会誌, 7, 2, 119-129, (2005).
- 15) 福富武史, 名手久貴, 高木康博 “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” 映像情報メディア学会誌, 58, 5, 69-74, (2004).
- 16) 渡辺正行, 名手久貴, 高木康博 “高密度指向性 3 次元表示による運動視差が奥行き知覚に与える効果” 映像情報メディア学会誌, 60, 12, 1956-1963, (2006).