

解説

奥行き知覚と多眼式ディスプレイ

畑田 豊彦

東京工芸大学工学部写真工学科 〒243-02 厚木市飯山 1583

(1988年3月14日受理)

Depth Perception and Parallax Panoramagram

Toyohiko HATADA

Department of Photographic Sciences, Faculty of Engineering,
Tokyo Institute of Polytechnics,
1583, Iiyama, Atsugi 243-02

1. はじめに

CT 画像などの医用画像分野や、CAD による設計応用などの分野では、今まで以上に高密度な画像情報を用いるため、立体表示を始めとした新しい画像表示技術の開発が積極的に進められている。

パソコンの普及は、人間とディスプレイの対話をより緊密なものにし、より見やすく、疲れないディスプレイの出現が望まれている。一方、テレビゲームなどの娯楽利用においても、より臨場感のあるディスプレイを作り出すべく努力が続けられている。

このように、研究・計測、教育・訓練、娯楽など数多くの画像情報の利用分野において、3次元空間の再現技術の改良が強く期待されているが、まだまだ定着したディスプレイとして成熟したものにはなっていない。

本号では、理想的3次元ディスプレイ方式として登場した“ホログラフィ”を中心に、関連した空間再現方式について報告されている。ここでは、その基礎になる人間の奥行き知覚を整理するとともに、実用的方式として期待される多眼式ディスプレイの現状と今後の可能性について述べてみることにする。

2. 奥行き知覚と空間再現^{2-4,15)}

奥行き方向の距離や物体相互の位置関係を知るのに、人間は種々な視覚情報を利用している。それらの情報を次の観点から整理し、空間再現の各種方式での利用原理との適合性などについて述べてみる。

2.1 単眼だけで知覚できる奥行き情報

(1) ピント調節

眼球の水晶体を変形させて、網膜上に鮮鋭な像を結像させる機能で、中枢からのピント合せ指令による筋肉系の動きと、網膜上のボケ量検出能力から奥行き距離の情報となる。——この機能の影響として、鮮鋭度の低い物体像は遠方にあるように感じたり、遠方物体が空気の散乱などで不鮮明になる空気透視効果も同様の要因による。

(2) 運動視差

観察者が移動したときに、物体相互の空間配置の変化や集合物体群の移動流れなどが生じ、物体間の前後位置や空間分布の様子が知覚できる。——前方にある物体が後方の物体を遮蔽する状態や、照明光源と観察位置の関係から物体の凹凸に応じて生ずる陰影などの微妙な立体情報も、観察位置の変化により効果的な要因になる。

(3) 像の大きさ

物体までの距離によって、網膜上にできる像の大きさが変化する様子から奥行き距離を判定する。——大きさが既知の物体、等サイズ物体の規則配列などでさらに効果的な情報になる。絵画などの遠近表現(線透視図、規則模様の分布変化)にも利用されているが、被写体の明るさや色によっても進出(明るい長波長域の色)-後退(暗い短波長域の色)効果が強調される。

(4) 視野

奥行き距離差の検出に直接関与する情報ではないが、自然な空間再現には重要な情報である。画枠などの制限

が感じなくなると、臨場感も強まり、他の情報と合わせて空間効果を高める。——表示面の存在が目立たなくなり、観察者の積極的な情報探索が自由に行なえるため、家庭用テレビも大画面化の傾向が見られる。後述の両眼視差機能も、視野制限のない条件のほうが効果的に働き、安定した奥行き知覚が可能となる。

2.2 両眼の情報から得られる奥行き情報

(5) 両眼輻輳 (開散) 運動

物体を網膜中心窩で注視する際に発生する両眼の内よせ (輻輳) 外よせ (開散) 運動により奥行き距離を知る。眼球を動かす外眼筋の状態と、両眼網膜上の像が単一像として見える範囲 (融像領域) に移動させる運動量が情報となる。両眼の視線がなす角 (輻輳角) を手がかりとして両眼位置からの三角測量を行なっていることになる。——単眼情報の (1)ピント調節機構と連動して働くので、両者の間に極端なズレが生じると違和感による眼精疲労を惹き起こす。

(6) 両眼視差

観察位置を変えると観察できる物体相互の関係が変化することは、先の (2)運動視差で述べたが、両眼の間隔によっても両眼の網膜上にできる物体の見え方に差が生じる。この差 (輻輳角の差に相当するズレ量) を検出する細胞が、両眼情報を統合比較できる大脳視覚領で発見され、奥行き距離差の検出機構の基本神経素子として働いている。——両眼輻輳による広い範囲の奥行き知覚に比べ、両眼視差では狭い距離の奥行き差の検出を基本特性としている。現行の2眼式立体ディスプレイでは、このような役割分担を無視した状態で、両眼視差による前後弁別を強要する点が問題である。

以上の情報のうち、(2)、(5)、(6)の関係を図1に示してある。これらが安定した状態で観察できるディスプレイが望ましい3次元ディスプレイになる。

2.3 奥行き距離の弁別

奥行き距離の弁別に関して、物体までの絶対距離を検出する情報と、物体間の相対距離を知る情報に分類できる。

絶対距離を検出する情報は、(1)ピント調節、(3)像の大きさ、(5)両眼輻輳、それに、(2)運動視差で観察者ならびに物体の移動速度がわかっている場合は(5)と同様の情報として検出可能である。

相対距離を検出する情報としては、(2)運動視差、(6)両眼視差があり、他の情報でも時間的・空間的差分を取れば、相互位置の検出は当然可能である。

これらの情報成分により奥行き距離が効果的に知覚で

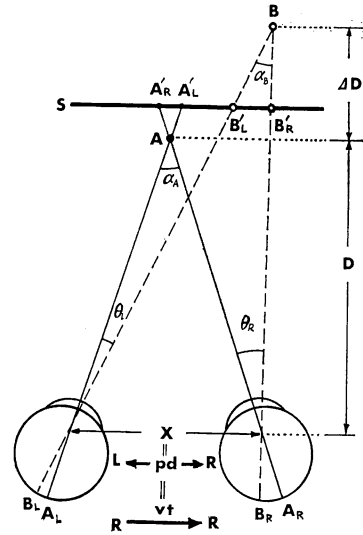


図1 両眼輻輳、両眼視差と運動視差の関係
 輻輳角 $\alpha_A \approx X/D$, $\alpha_B \approx X/(D + \Delta D)$, X : 両眼の瞳孔間距離 (pd). 両眼視差 $|A_L B_L - A_R B_R| = |\theta_L - \theta_R| = |\alpha_A - \alpha_B| \approx (\Delta D/D^2)X$. 運動視差 (移動速度 v , $X = vt$ のときに物体 A, B を見込む角 $\theta_L \rightarrow \theta_R$ に変化) $\Delta \theta = \theta_R - \theta_L \approx (\Delta D/D^2)vt \rightarrow d(\Delta \theta)/dt \approx (\Delta D/D^2)v$. 表示面(S)上での両眼視差情報の表示は(A'L, A'R), (B'L, B'R) で示される。

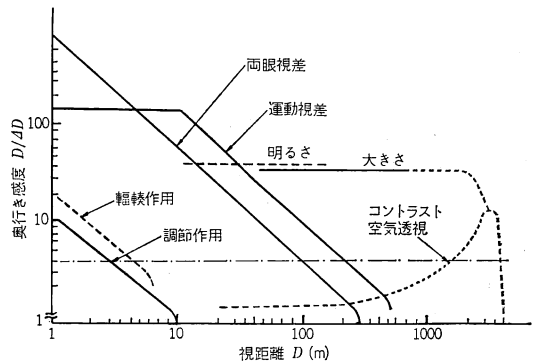


図2 奥行き知覚に関与する各種情報と奥行き感度の関係⁴⁾
 視距離 (D) での前後弁別距離 (ΔD) から、 $D/\Delta D$ を奥行き感度と定義し、 $D/\Delta D \leq 5$ (一点鎖線以下) では有効に働かない。

きる能力は、単純には物体までの距離の2乗に反比例して低下することになる。しかし、各情報の変動量、たとえば、(5)の場合は両眼の視線方向、(6)は網膜上の像のズレ、を検出する精度に差があり、前者での最小変動検出角約 $20'$ 、後者は最小検出ズレ量約 $10''$ で、両者の距離弁別特性は数十～数百倍の能力差になる。

奥行き情報による空間距離の弁別特性を調べた報告

が、図2に示すような奥行き感度(対象物体までの距離 D と奥行き差弁別距離 ΔD から、 $D/\Delta D$ で定義してある)により比較されている⁴⁾。この奥行き感度値が5以上の場合、各情報成分が効果的に働くことを考えると、機能分担によって広い空間の奥行き知覚を行なっている様子がわかる。このような機能分担は、後述の各種方式で再現する空間の適正範囲を示すことにもなり、利用目的に応じた方式を決定するのに役立つ。

2.4 能動的な奥行き知覚

観察者が能動的に情報検出する成分と、受動的に処理する成分とに分類され、より自然な3次元空間の再現には、観察者の能動的な情報検出に対しても適応できる表示方式が望ましい。

能動的成分は、(1)ピント調節、(2)運動視差の観察者が移動する場合、(5)両眼輻輳で構成され、他は受動的成分になる。とくに、能動的成分を表示するためには、2次元画像を1枚(現行の平面ディスプレイ)または2枚(後述の2眼用画像を呈示するディスプレイ)用いる方式では難しく、能動的成分を別に満足させる方式が検討されている。

3. 3次元空間再現の各種方式

種々な奥行き情報を検出する視覚機能に対応させて、既存の空間再現方式を分類すると、表1のようになる。各分類方式について、その特徴や問題点を調べてみる。

3.1 奥行き画像(方式I)

画像表示面より奥行き方向に空間を再現する方式で、前述の奥行き情報のうち、2.1項の情報を効果的に表示する方式と、奥行き知覚に関与する視機能((1),(4),(5)など)の働きを不確定な状態にして、表示面内に画像が特定されない印象を再現する方式がある。

表示面の存在を不確定なものにする方式の具体策としては、次のものがある。

- 1) 観察距離を長くする。
- 2) 光学系を利用して空中像を作る。
- 3) 表示面の表面状態(汚れ、反射むらなど)を目立たないようにする。
- 4) 表示面を大型化する。

これらは共に、ピント調節による情報をなるべく不確定な状態にすることが目的である。そのうち、4)は運動視差や視野の制約がなくなり、より自然なディスプレイになる。また、2)に示す空中像方式は非常に効果的なディスプレイではあるが、その効果の発生理由(光学系による像面深度や倍率、ピント調節の働かない距離への像面移動など)に関してはまだ明確にされていない。

3.2 立体画像(方式II)

奥行き情報のうち、(6)両眼視差を用いて、表示面の前後に空間を再現する方式で、観察者の両眼へ各々の視差情報をどのように分離呈示するかによって、各種の方式が提案されている。

表1 3次元空間再現の各種方式

分類	原理*	方式	再現空間距離
(I) 奥行き画像 (2次元画像1枚)	単眼奥行き効果(1)~(3)	(a) 透視図法	5 m 以上
	表示面効果(1), (4)	(a) 大画面 (b) 虚像(空中像)	2 m 以上
(II) 立体画像 (2次元画像2枚)	両眼視差効果(6)	(a) 観察光学系方式 (立体鏡など)	1 m 以内
		(b) 眼鏡方式 (同時: 色, 偏光, 濃度差) (継時: シャッター)	100 m 以内
		(c) 表示面方式	10 m 以内
(III) 3次元画像 (2次元画像多数) (空間像形成)	視差効果(2)+(6)	(a) 多眼方式 (レンチキュラ板, IP など)	50 m 以内
	立体視効果(1)~(6)	(b) 空間像方式 (可変焦点光学系 空間スクリーン: 同時, 継時) 波面再生	5 m 以内

* 原理の項の数字は、本文中の奥行き情報を示す。

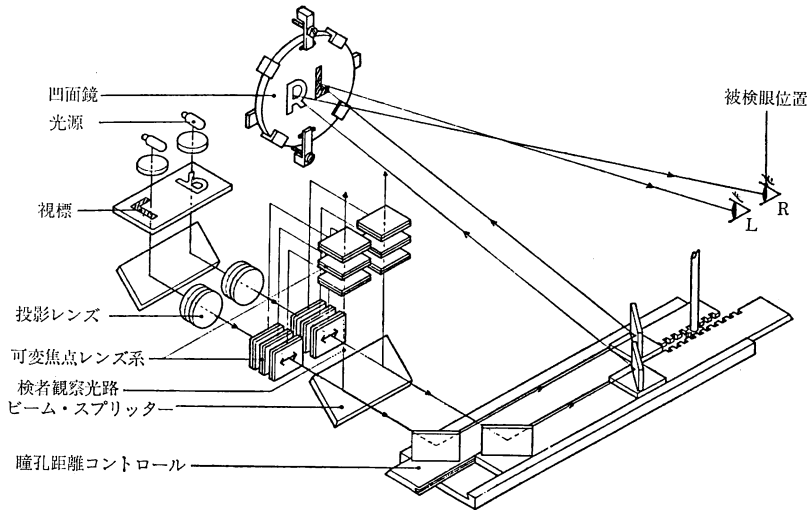


図3 自覚的検眼装置に見られるファントム・ビューア方式

Vision Analyzer 210 (Humphrey 製) の凹面鏡利用の視標投影光学系, 視標 L, R が左眼・右眼に投影される。

両眼への画像分離呈示には次のような方式がある。

(a) 観察光学系 (ビューア) 方式

立体鏡として最も古くから提案されている双眼用光学系による両眼画像を観察する方式である。多人数観察が不可能なため、特殊用途にしか利用されていない。しかし、図3に示すようなファントム・ビューア光学系⁵⁾を用いることで、覗き込みによる制約が緩和され、見やすいディスプレイを作り出すことも可能である。

(b) 眼鏡方式

眼鏡の左右眼で、光に対する特性差をもたせ、両眼画像を分離呈示する方式。特性差としては、色、偏光方向、時間ズレ、濃度などが用いられている。ただ、濃度差は左右方向の運動物体に対してのみ立体効果^{*1}が生じるもので、通常両眼視差画像には適用できない。各眼鏡方式にはおのおの改良点が残されており、実用化に際しては、後述の問題点を解決する工夫が必要である。

(c) 表示面方式

特殊な表示面を用いて特定位置から観察すると、両眼画像が分離されて見える方式で、縦格子マスク利用のパララックス・バリヤ方式、微小光学素子を配列したレンチキュラレンズ板方式、フライアイレンズ板方式などがある。図4には主な方式例を示したが、ホログラムの方向選択性を利用した指向性スクリーン⁶⁾も提案されているが、実用化レベルには至っていない。

これらの各種方式は2眼方式と呼ばれ、特定単一方からの空間情報しか再現されないため、次のような問題点が残されている。

- i) 観察者からの能動的なピント調節ができない。
- ii) 観察位置の移動に伴う画像情報の変化を満足させるだけの多方向情報が表示されていない。
- iii) 表示面 (ピント調節位置) と空間再現位置 (両眼視差による像知覚位置や両眼視線の交叉 (輻輳) 位置) のズレから生じる視機能のアンバランスがもたらす違和感がある。
- iv) 左右眼への呈示画像の差が大きくなると、視野闘争^{*2}が生じ、不自然な見え方になる。
- v) 一方からの両眼情報だけでは、舞台背景に使われる“書き割り”のような立体像に見える。

3.3 3次元画像 (方式III)

立体画像に残された問題点を解決するために、種々な方式が提案・実用化されている。

(a) 多眼方式

立体画像の問題点 ii) を解決する目的で、図4に示す指向性の強いスクリーンを用いて多方向からの両眼用画像の組合せを表示する方式 (図5)。半円筒レンズによるレンチキュラ・レンズ板では左右方向の移動だけ許容されるが、昆虫の複眼に似たフライアイレンズ板では上

*1 光刺激の強度によって知覚時間に差が生じることを利用した効果で、Pulfrich 効果と呼ばれる。

*2 左右眼の画像が交互に入れ替わる不安定な見え方をいい、左右眼の明暗・色・図形差によって発生するため、とくに眼鏡方式の欠点になる。

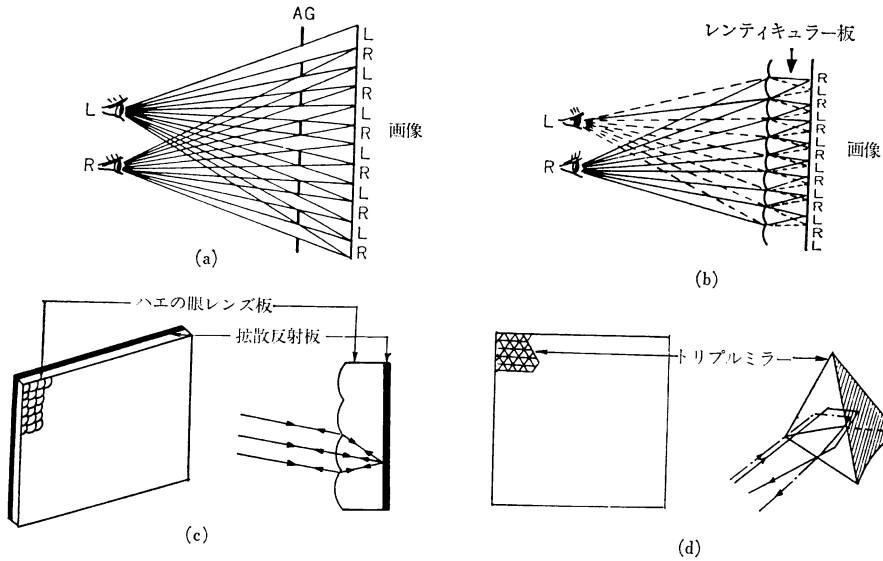


図 4 表示面方式に用いられる指向性スクリーン
 (a)パララックス・バリア (縦格子マスク AG を通して両眼用画像 L, R を観察する), (b)レンティキュラ・レンズ板 (縦長半円筒レンズ配列), (c)フライアイレンズ板 (微小凸レンズ配列), (d)コーナークューブ板 (微小トリプル鏡素子配列)

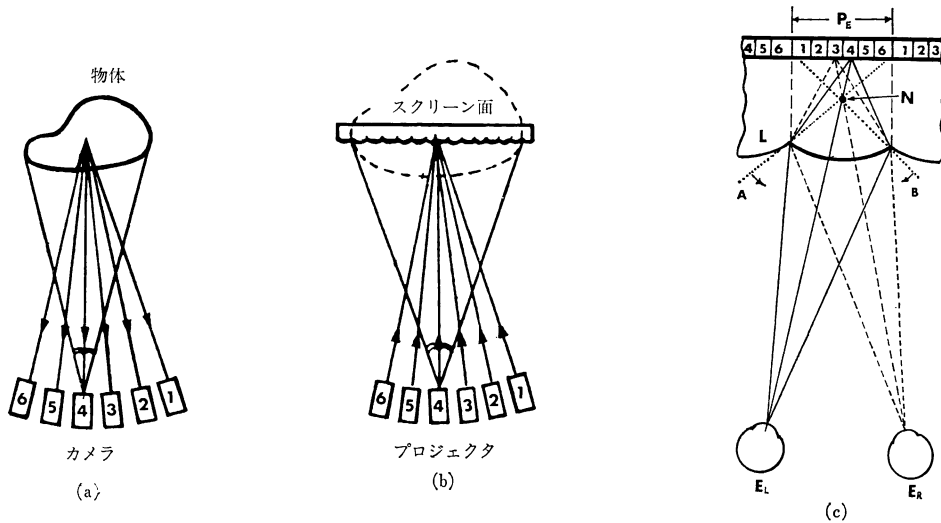


図 5 多眼方式の撮影・再生と再生像の観察状態
 (a)多眼方式の撮影, (b)投射型多眼方式の再生, (c)指向性スクリーン構成微小光学素子 (L) と分割画像 (P_E 内 1~6) の観察位置 (E_L, E_R) 関係. 構成素子の節点 (N) とピッチ幅 (P_E) から安定した視域 ($\angle ANB$) が決まる.

下左右の移動が可能となり, integral photography (IP) と呼ばれ, 非常に自然な立体像が再現できる. ただ, この方式の物体撮影・記録時と再生時に使用する微小光学素子板と感材・表示素子の像特性が, 画質面から見て, まだまだ不十分で, 改良すべき点が残されている.

(b) 空間像方式

立体画像の問題点 i) を中心に他の問題点も解決できる方式で, 次のようなものがある.

イ) 可変焦点光学系による像面移動を利用して継時的に空間像を形成する方式^{7,8)}

ロ) 2次元スクリーン面を移動させ, 空間を面で時分

割表示する方式¹⁰⁾

ハ) 液晶のような平面ディスプレイによる多層構造スクリーンに、同時または継時的に空間像を形成する方式

ニ) 透明物質を外部制御により、内部発光または透過率変化などを発生させ、多方向からの観察可能な空間像を作る方式¹¹⁾ (蛍石に Er^{3+} を含有させた結晶体による提案以降、具体例はない)

ホ) 物体からの光伝播を波面状態のまま再現する方式(ホログラフィ)

これらのうちで、イ), ホ)は実用化されたが、表示面サイズ、画質面で改良の余地が残され、一般的な普及方式にまで至っていない。ただ、ホ)の技術と多眼方式を組み合わせたホログラフィック・ステレオグラムは、両方式の欠点を補い、利用分野を広げつつある。いずれにしろ、ホ)の方式で、実時間再生の大型フルカラー画像が可能になれば、他の方式は空間再現技術の歴史を彩る脇役に終りそうである。しかし、現状ではまだまだ問題点も多く残され、多眼方式による改良型ディスプレイが当分の間は主流になると予想される。

4. 3次元空間再現方式の画質評価

今まで述べてきた3次元空間再現の各種方式を評価する際に、2次元画像の画質評価項目(階調・色調再現、鮮鋭度・粒状度など)に加えて、奥行き成分の再現状態や観察条件などの新しい評価項目が必要になる。以下、3次元特有の項目について整理しておく。

4.1 奥行き成分の空間再現範囲

方式Iでは表示面より前方空間の再現は難しいし、方式IIでは融像領域以上の範囲を両眼視差だけで再現すると、非常に違和感を与える。ただ、II(a)では光学系によって輻輳発生を助けたり、II(b)では輻輳位置を制限している画枠を拡大して、輻輳に許容範囲を与えると、短い時間ならば、表示面前後のかなり広い空間再現が可能になる。II(c)と方式III(a)では表示面の微小光学素子とそれに対応する分割画像(図5参照)の両眼分離精度が観察位置によって影響を受けるため、他のIIの再現範囲より狭い場合が多い。III(b)でも、イ), ロ)は像面移動範囲、ハ), ニ)は表示素材の大きさで決まる。ホ)に至っては、レーザー光記録の場合は可干渉性で、ホログラフィック・ステレオグラムではIIと同様の条件が、白色再生では像のボケ量の許容範囲などが加わって、空間再現範囲が決定される。このように、各方式ともに再現範囲を拡大する技術改良の余地は残されているが、現行

の技術では大画面表示のメガネ式が最も広いため、映画や娯楽用展示などに用いられている。

4.2 奥行き距離の表示分解精度

図2に人間側の奥行き距離差の弁別特性から求めた奥行き感度が示してある。この結果から、近距離(数m以内)では両眼視差、中距離(数m~数十m)では運動視差、遠距離(数十m以上)では像の大きさなど網膜上の像情報からの判断がおのおのの距離範囲で最も感度よく働いていることがわかる。

各方式の基本情報から見て、方式Iは遠距離対象、方式IIは近距離、方式IIIは近・中距離の再現に有効である。ただ、近距離空間の再現に関しては距離差弁別精度はよくないが、ピント調節と輻輳機能に対しては不自然な情報呈示にならないように、IIの空間再現状態を工夫する必要がある。

以上のような生体側の弁別特性だけでなく、表示技術面での分解精度も調べる必要がある。とくに、方式II(c), 方式III(a), (b)イ)~ハ)では、奥行き方向を離散的に再現している点が問題である。指向性スクリーンを用いた方式では、使用微小光学素子の間隔(レンズ板では構成レンズピッチ)、指向性(レンズ収差や回折などによる像のボケ、フィルムや表示素子の解像度など)によって奥行き方向の分解精度¹⁾が決定される。

4.3 観察位置の自由度

平面画像を観察する場合は、画質(走査線構造や粒状度など)が許容できる視距離で、表示面の法線方向から45°以内の範囲で観察すればとくに問題はない。しかし、奥行き成分を再現する各方式では、それぞれ観察位置に制約が生じる。方式II(a)は光学系を覗き込む姿勢が要求されるし、ファントム・ビューア一式でも凹面鏡による像位置と両眼位置の設定がかなり厳密になる。II(b)は立体歪を気にしなければ、平面画像と同程度の観察位置の自由度はあるが、偏光式だけは頭部の傾斜など姿勢に制約が要求される。II(c)やIII(a)では指向性スクリーンの特性と各微小光学素子に対応する分割画像の特性によって観察位置(視域、図6にはレンチキュラ・レンズ板の場合の菱形柱状領域が示してある)に制限を与える。多眼方式によってこの領域が多数存在し、観察位置に関する自由度は増えるが、方式III(b)のニ)で述べた空間スクリーンの新素材が開発されない限り、全方向からの観察が可能なのは無理であろう。

4.4 視機能との整合性

方式IIの問題点i)~v)でも述べたが、奥行き知覚に関与する視覚機能のうち、能動的成分(1)と(5)のパラ

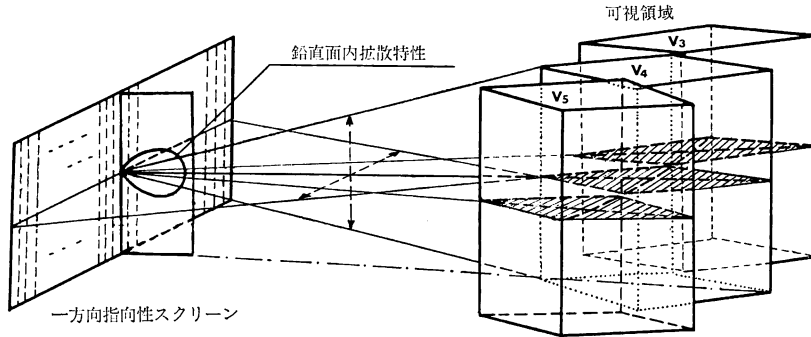


図 6 一方向指向性スクリーンでの多眼方式の観察位置
各方向からの分割画像に対応する観察位置 (V_i) が菱形柱状の領域により、多方向画像により観察位置が広がる。

シス、(2)の効用などがどの程度再現できるかで、空間再現の自然さが評価できる。方式Ⅲのうち(a)では(2)の効用で自然感を、(b)では(1)と(5)のバランスを補っている。いずれの方式が有効であるかの判定は難しいが、奥行き再現範囲が極端に広い範囲でない場合は、ピント調節と両眼輻輳の許容範囲の存在から、(a)の多方向観察のほうが自然な空間再現になる。

以上の評価項目において、改良すべき点が多く残されているが、自然な観察条件が実現しやすい方式として、方式Ⅲ(a)の多眼方式について、その特徴と今後の可能性について調べてみる。

5. 多眼方式の特徴と今後の発展

本号の中心テーマになっているホログラフィは、再現される空間が理想状態に近い方式であるが、記録・再生時の条件は他の方式ほど簡便ではない。一方、2眼方式は既存の技術を利用して、容易に実現可能なため、幾度となく一般娯楽用として検討されてきた。しかし、不自然な空間再現しかできなかったことが原因となって、定着したディスプレイにまでは成熟していない。

これら両方式の問題点を補うものとして、両眼視差+運動視差によって空間再現を試みる多眼方式が検討されている。一般的には、方式Ⅱ(c)の表示面方式で多方向情報が表示可能にしたものを多眼方式というが、2眼方式に双方向システムを加味したものや、画像合成にホログラフィックな手法を用いるホロコード・ホログラム¹²⁾やホログラフィック・ステレオグラム¹³⁾も含まれ、以下にそれらの特徴や今後の発展を調べてみる。

5.1 2眼+双方向制御方式

図7に示すクローズドシステムにより、観察者の移動状態が2眼方式に表示できる方式で、ロボットの遠隔操

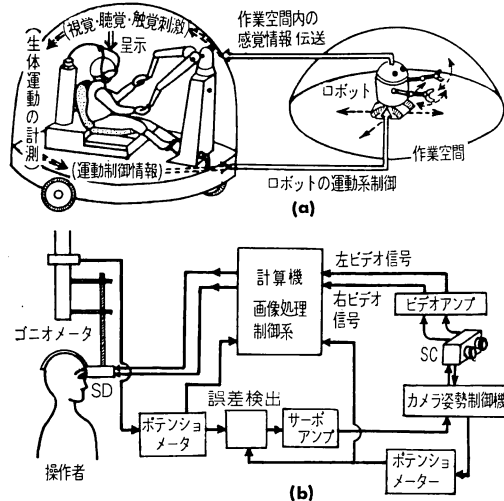


図 7 2眼+双方向制御方式によるトレイグジスタンスの画像呈示システム¹⁴⁾

2眼テレビカメラ(SC)からの画像を操作者頭部に固定した観察光学系方式のテレモニター(SD)で観察する。操作者の頭部運動をゴニオメーターで検出し、カメラ姿勢制御を行なう。

作システム¹⁴⁾などで利用されている。観察者の眼球・頭部運動に伴う視点移動状態を、画像入力用2眼カメラの視軸方向制御系に伝達し、観察者の頭部に固定された2眼式立体ディスプレイで能動的な空間観察が可能な状態を作り出す。ただ、観察者の眼球運動に対してカメラ方向を忠実に追従させると、頭部運動の場合に比べて、かえって不安定な見え方になる。この理由は、網膜上の像移動を補正する信号系への行動系中枢からの指示が不十分な状態にあるためで、遠隔操作など高精度制御の場合には、視覚系と行動系の相関状態を十分検討する必要がある。また、この方式により前述の問題点v)の書き

割り効果を解決できる可能性もあり、頭部固定の観察光学系方式と双方向制御系の改良で、今後の利用範囲が広がる方式である。

5.2 表示面方式

図5に示した指向性スクリーンを構成する微小光学素子ごとに、多方向情報がどれだけ精度よく配置できるかで、この方式の画質が左右される。別講「連続視域3次元テレビジョン」で、光学素子と画像情報の位置調整、隣接素子への光漏れ防止などが詳説されているように、次の点が問題になる。

- 1) 構成光学素子の配列ピッチ（口径に相当）は、画像の空間的標本化による画質低下を感じさせないように、できる限り小さくする。ただし、素子の回折効果を考慮すると、0.1~0.5 mm の範囲が最適ピッチになる。
- 2) 視域を広くするために、広角レンズ系にすべきであるが、収差などによる指向性の低下も生じやすく球面単レンズ素子では $\pm 10^\circ$ 程度である。
- 3) 隣接光学素子への光漏れは、視域拡大に利用される場合もあるが、大画面多眼方式では周辺像に違和感が生じるため、各素子の節点と像位置の関係に留意するとともに、光漏れ防止の対策が必要である。
- 4) 観察者が横移動しても、再生画質が低下しない範囲内で、両眼に連続的な像が見える条件にするためには、観察距離にも関係するが、5~10方向の情報が必要になる。その結果、各素子ごとの画質は0.1~0.01 mmの精度で位置合せが必要となり、写真技術以外のディスプレイの現状ではやや難しい。

以上の問題点があるものの、最近の微小光学素子やディスプレイ技術の進歩で打開できるレベルの問題であるため、急激な発展が予想される方式である。

5.3 ホログラフィック合成方式

表示面方式で観察時に使用する微小光学素子と同様のものを用いて、物体の撮影・記録を行ない、その状態で再生を行なうと、再生像が裏返し像（pseudoscopic image）になる。その欠点を修復するには、裏返しの実像を再度IPで記録する必要があり、このような行程を簡略化する方法が、白色光再生ホログラフィの手法として登場したホロコーダ・ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムである。これらの手法に関しては別に詳説されているので、ここでは省略するが、ホログラフィのもつ特徴を既存の立体ディスプレイ技術で利用する動きは、3次元画像情報の適正な低減法や観察方向の制御技術で今後も盛んになることであろう。

6. おわりに

人間の奥行き知覚に必要な情報を中心に、3次元空間の再現技術について、その問題点を定性的に述べてきたが、これらの各種方式が定着したディスプレイとして利用されるには、まだまだ改良すべき点が多い。しかし、空間情報を積極的に利用しようとする分野も数多く存在し、観察者に違和感を感じさせない良質なディスプレイが簡便に実現できるようになれば、娯楽用だけでなく、望ましいマン・マシンインタフェースとして人々の必需品になることであろう。

文 献

- 1) 大越孝敬：三次元画像工学（産業図書，東京，1972）。
- 2) K. N. Ogle: *The Eye*, vol. 4 (Academic Press, New York, 1962)。
- 3) 畑田豊彦：“生理光学，13. 3次元画像と視覚特性”，*O plus E*, No. 69 (1985) 110-119. “生理光学 14. 奥行き知覚特性”，*O plus E*, No. 71 (1985) 108-118. “生理光学 15. 3次元ディスプレイ”，*O plus E*, No. 73 (1985) 98-109. “生理光学 16. 自然視画像と視覚特性”，*O plus E*, No. 74 (1986) 121-130.
- 4) 長田昌次郎：“視覚の奥行き距離情報とその奥行き感度”，*テレビ誌*, **31** (1977) 649-655.
- 5) 河原哲夫：めがね工学，小瀬輝次監修（共立出版，東京，1983）pp. 192-231.
- 6) D. Gabor: U. S. Patent No. 3479111 (1969).
- 7) N. A. Valyus: *Stereoscopy* (Focal Press, London, 1966).
- 8) A. C. Traub: “Stereoscopic display using varifocal mirror,” *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1085-1087.
- 9) J. Hamasaki, Y. Nagata, H. Higuchi and M. Okada: “Real-time transmission of a 3D image using volume scanning and spatial modulation,” *Appl. Opt.*, **16** (1977) 1675-1685.
- 10) W. Simon and T. Walters: “A spinning mirror autostereoscopic display,” *Proc. SPIE*, **102** (1977) 180-183.
- 11) J. D. Lewis, C. M. Verber and R. B. McGree: “A true three-dimensional display,” *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-18** (1971) 724-732.
- 12) R. V. Pole: “3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light,” *Appl. Phys. Lett.*, **10** (1967) 20-22.
- 13) N. George: “Experiments with full-view holographic stereograms,” *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1970) 1154.
- 14) 館 暉：“テレビグジスタンスの研究”，第21回 SICE 講演会予稿集 (1982) pp. 167-168.
- 15) 日下秀夫：“3次元情報の基礎”，*テレビ誌*, **41** (1987) 604-609.
- 16) 平田渥美，鈴木清明：“3次元ディスプレイ種々の方式とテレビジョンへの応用一”，*テレビ誌*, **41** (1987) 610-618.
- 17) 本田捷夫：“3次元ディスプレイの産業・医用への応用”，*テレビ誌*, **41** (1987) 619-627.