

解説

3次元ディスプレイの技術動向

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

(1992年5月6日受理)

Trend of 3-Dimensional Displays

Toyohiko HATADA

Department of Photographic Science and Technology, Faculty of Engineering,
Tokyo Institute of Polytechnics, 1583, Iiyama, Atsugi 243-02

1. はじめに

直接体験できない状況, 例えば自動車での衝突現場や身体内部の状態が, あたかもその場にいるような状況で体験できるとなると, 訓練や教育などいろいろな面での利用が期待される. ただ, このような疑似体験空間を作り出すための各種感覚情報を提示する技術は, 期待される再現状態には程遠く, 次のような点での改良がまだまだ必要である.

- 1) 2次元画像の高品質化
 - a) 高精細→注目状態で変化する視覚弁別能力以上の余剰情報を表示する.
 - b) 大画面→画枠による視覚情報探索時の制約が取り除かれ, 自然に近い環境条件が再現できる.
- 2) 新しい空間情報の表示技術の改善
 - a) 3次元情報→平面の枠内から立体・3次元空間へと再現空間を展開させる.
 - b) 他感覚との相乗効果→触覚や平衡感覚などへの情報付加にともなって, 表示される情報の操作・制御がより確実に行え, 受動的な観察状態から能動的な情報受容環境が形成される.
- 3) 画像利用適合システムの選択可能性
 - a) 双方向システム→能動的な情報受容と表示情報の操作に伴う新しい作業環境システムが作り出せる.
 - b) 複合表示法→画像情報の利用目的に応じた多種情報を表示して, 情報利用者の積極的な情報選択が可能となる.

本特集で取り上げられている立体空間表示から人工現実感を実現する空間再現技術までの改良目標も, ここで示したような人間との整合条件が重要なポイントになっている. 本稿では, その基本になる人間の立体視特性と, 各種空間再現技術の特徴を整理して, 今後の3次元ディスプレイへの動向を展望してみる.

2. 3次元空間再現と空間認識の要因^{1,2)}

先に述べた空間再現技術の改良点で, 新しい空間情報の中心となる3次元空間情報には, 人間の立体視機能に働きかけるさまざまな要因が関与している. それらの要因情報を整理すると, 図1のように, 両眼に提示される受動的な情報だけでなく, 観察者が積極的に情報探索する動作(図1の破線括弧の要因)等も重要な情報になる.

- a) 単眼情報だけで空間成分が知覚できる要因
 - ① (ピント)調節; 表示像位置を無限遠にしたり, スクリーン面の存在を目立たなくして, この要因が効果的に働かなくする虚像方式(3.2参照), 能動的なピント調節に関しても満足させる空間スクリーン方式(5.2参照)で, この要因が関与している.
 - ② 網膜(上の)像; 奥行き画像(3参照)の表示情報(像の大きさ, 明るさ, 色, コントラストなどによる鮮鋭度, 陰影の分布状態など)で, 奥行き効果を生み出すのに利用される.
 - ③ 運動視差; 動画像表示に加えて, 多方向情報表示方式(5.1参照)にして, 観察位置の移動に対応した情報が表示されることで, 自然な空間知覚

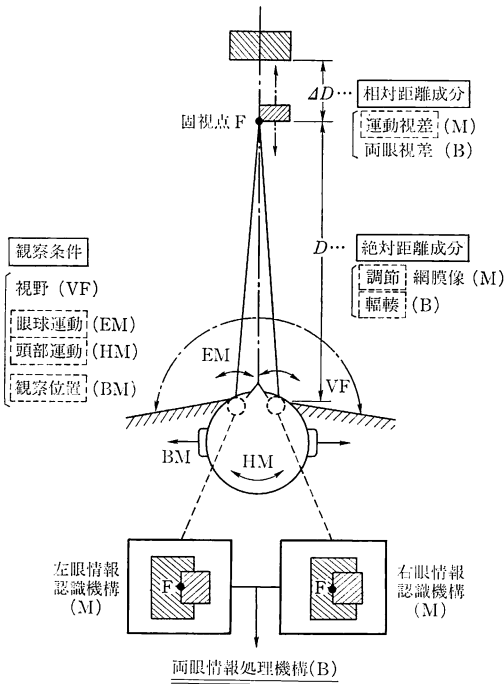


図1 3次元空間認識要因と視覚情報処理機構
絶対距離(D), 相対距離(4D), 観察条件に関する要因と, 単眼(M), 両眼(B)での情報処理機構を示す。

が成立する。

- ④ 視野; スクリーンを大型化して, 視覚情報を受容する範囲(図3)を広げる広視野画像方式(3.1参照)により, 観察制限の少ない臨場感溢れる空間再現が可能になる。
- b) 両眼情報を統合・比較して, 奥行き方向の距離成分を知覚する要因
- ⑤ 輻輳; 3次元画像(3参照)での安定した空間知覚を助ける両眼の注視運動(図1の固視点Fを注視する両眼の視線状態)を発生させる要因である。
- ⑥ 両眼視差; 立体画像(4参照)の基本情報で, 左右眼での物体像のずれ量(視差)から, 基準位置(図1の固視点F)からの距離を知覚する。

これらの要因を距離の観点から整理し直すと, 次のようにも分類でき, 利用する空間状態に応じた再現技術方式を選択する場合の参考になる。

- 1) 物体までの絶対距離(図1の距離D)を検出するのに必要な要因
 - ①(ピント)調節, ②網膜(上の)像, ⑤輻輳

- 2) 物体間の相対距離(図1の距離4D)を検出するのに必要な要因

③運動視差, ⑥両眼視差

今までに提案されているいろいろな空間再現技術を, これらの立体視要因に対応させると, 次のような空間を再現する画像方式(図2, 表1)として分類することができる³⁾。

- a) 奥行き画像… 2次元画像1枚で, 表示面よりも奥行き方向に空間を再現する方式。
 - 要因①, ④, ⑤による表示面位置の知覚を不安定な状態にし, 表示画像に要因②, ③を巧みに加えて, 奥行き効果を高める。現行の2次元画像表示を高品質化することで実現できる。
- b) 立体画像… 2次元画像2枚で, 両眼からの観察画像情報(視差成分)を表示し, 表示面の前後方向に空間を再現する方式。
 - 要因⑥だけによる空間再現方式で, 要因①と⑤の

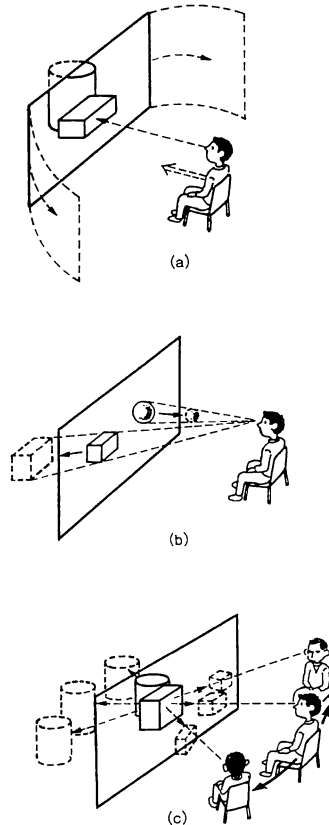


図2 3次元空間再現方式による空間状態
(a)奥行き画像, (b)立体画像, (c)3次元画像

表1 3次元空間再現方式の分類

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②, ③, ④	(a) 透視図法	5m 以上
	表示面効果④, ⑤, ⑥	(b) 大画面 (c) 虚像 (空中像)	2m 以上
(II) 立体画像 (2次元画像2枚)	両眼視差効果⑥, ⑦, ⑧	(a) 観察光学系方式(立体鏡など)	1m 以内
		(b) 眼鏡方式 (同時:色, 偏光, 濃度差) (継時:シャッタ)	100m 以内
		(c) 表示面方式	10m 以内
(III) 3次元画像 (2次元画像多数) (空間像形成)	視差効果③+⑥	(a) 多眼方式 (レンチキュラー板, IP など)	50m 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)	5m 以内

* 原理の項の数字は, 本文中の要因が有効に作用する場合は丸数字, 不安定な状態にした方が効果的な場合は四角数字で示してある. IP: インテグラルフォトグラフィ (フライアイレンズ使用)

表2 再現空間距離に要求される条件と再現方式

再現空間距離	要求条件と適合方式	利用目的
近距離 手作業空間 ($<1\sim 2m$)	・絶対・相対距離弁別; 高精度 ・視機能バランス保持 ・観察位置の自由度 →両眼+運動視差方式	計測, 制御 加工 研究, 教育 訓練 娯楽
中距離 歩行空間 ($<2\sim 10m$)	・相対距離弁別; 良好 ・観察位置の自由度 →多眼・広視野方式	教育, 訓練 娯楽
遠距離 観察空間 ($>10m$)	・絶対距離情報提示 ・空間的広がり →広視野方式	訓練 娯楽

バランスが実際状態とは異なり, 観察位置の移動に応じた空間情報も欠落している. しかし, 物体の相対距離を識別するには有効な方式である.

- c) 3次元画像…多方向からの2次元画像を提示したり, 空間走査や波面再生などにより空間像を形成し, 立体画像が多方向から観察できる. 数多くある立体視要因がバランス良く再現される方式.
→立体画像に, 他の要因①, ③, ⑤を加えて, 相対距離だけでなく, 絶対距離も違和感なく再現できる.

以上のような画像情報による分類に加えて, 人間は自分の動作や環境状態に応じて, 活動空間範囲を分割して

生活していることから, 再現される空間の距離範囲によって, 各方式を分類することも重要である. このような人間の生活状態を考慮して, 再現可能な空間距離範囲に適した方式(表2)と, 今後の技術的発展の可能性を調べてみる.

3. 奥行き画像方式の現状

2次元画像1枚だけで奥行き空間を再現する方式では, 前述の単眼要因のうち, ④視野と①(ピント)調節とを効果的に利用して, 表示面を感じさせなくする広視野(大画面)画像方式と虚像画像方式が, いろいろな分野で実用化されている.

3.1 広視野画像方式

ほとんどの映画館が横長のシネマスコープ型大型スクリーンになり, 一般家庭においても, 40インチを越える直視型テレビから, 投射型の大型画面テレビに人気が集まり, ホームシアタの雰囲気を楽しもうとする傾向がみられる. 万博などの特別な催し物でも, 全周全天スクリーンを用いた臨場感溢れる大型映像が呼び物の一つになっている.

このような大画面で作り出される空間は, 次のような状態を生み出し, 奥行き空間を感じさせる.

- 1) 表示面の存在が弱くなる.

→大画面に提示された画像を観察する時, 画枠が観察者の中心視に入ることが少なくなり, 表示面までの距離や位置の情報が明確でなくなる. その結

果,表示されているのが2次元画像であるとの意識が弱くなり,表示空間に奥行き方向の広がりを感じられるようになる。

- 2) 表示空間と観察者の存在する空間が融合した状態になる。

→狭い画枠で切り出された画像は,窓から眺めている状況と同じ感覚であるが,広い画枠での画像になると,観察空間との境界を感じられなくなり,表示空間内に没入したような状態になる。

- 3) 視覚情報の増加により,感覚系全体からの受容情報量のバランスが自然な状態になる。

→音の方が光よりも,刺激提示の制約が少ないため,空間音場の再現は画像空間よりも容易である。しかし,各種感覚系からの情報比重は圧倒的に視覚情報が優位で,聴覚と比較しても500倍以上の情報量になる。映画やテレビにしても,音による空間再現状態が先行し,実際環境と比べて,視覚情報の貧弱さを解決することは難しかった。これに対して,大画面による視覚情報の増加は,他の感覚情報との協調と視覚情報の優位性などを良好にし,より自然な状況設定を可能にする。

- 4) 情報受容の制約が緩和され,観察者の位置や姿勢が自由になり,観察者の主体的な情報探索が可能と

なる。

→狭い画像表示では,観察者の意志による情報探索よりも,情報を提供する側の表示状態(カメラワークや構図など)に従属せざるを得ない状態であった。しかし,画面が広がると,観察者の意志による情報探索の自由度が生じ,双方向システムでの情報交換がより積極的・効果的にできる状況が作り出せる。

これらの空間効果は,「奥行き」「広がり」「自由」「迫力」「自然」などの言葉で表現される空間感覚を示し,表示される空間内に実際に存在するような感じになる「臨場感」を再現する。訓練用シミュレータや臨場感通信などに見られる双方向システムでは,異なった空間を結び付けるのに,欠かせない条件となっている⁴⁾。

このような空間効果が感じられる画面サイズを求めするために,表示画像による観察者の座標軸への影響度を調べた実験が報告されている。その結果,視野特性(図3)で安定注視野(E)から誘導視野(C)を満足するだけの画面サイズが必要であることがわかっている⁵⁾。現状では,魚眼レンズ投影系と70mmフィルムでドーム状スクリーンに映し出すオムニマックスと呼ばれる大型映像(図4)が,この条件を満たす最大の映像である。

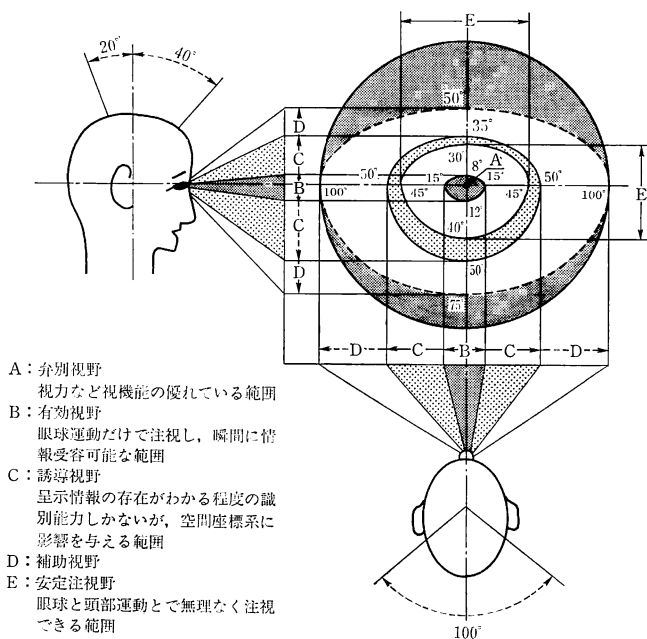


図3 視野内での情報受容範囲と空間的座標系に影響を与える範囲(頭部に示した数字は頭部回転可能範囲)

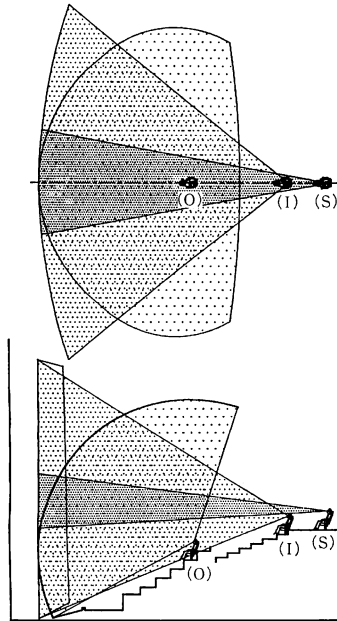


図4 大型映像の実例
標準(S), アイマックス(I), オムニマックス(O)のスクリーンサイズと観察位置による観察画角が比較表示してある。

3.2 虚像画像方式

明るい部屋で見るテレビには、照明光などが映り込んだりして、表示面や枠がはっきりと認識され、表示画面で作り出される空間の広がり感を妨げてしまう。それに対して、映画館のように、スクリーン周辺を暗くすると、画質への影響を少なくするだけでなく、スクリーンまでの距離を不明瞭にして、空間的広がりを生み出している。

さらに、光学系などによって虚像状態の画像を表示すると、ピント調節機能への要因が少なくなり、先に述べた画枠効果と併せて空間的広がり効果を高める。

このような表示空間を作り出す方式としては、凹面鏡を利用して空中に像を浮かせて見せるもの(図5)から、模型などの実像上に虚像の動画像をハーフミラー等で合成する方式などが既に実用化され、疑似水族館などを巧みに再現している。

4. 立体画像方式の現状⁶⁻⁸⁾

物体間の相対距離を識別するのに、立体視機能のうちで最も効果的な要因である両眼視差情報を、左右眼に分離して提示する立体画像表示技術(表1)は、さまざまな方式で実用化されている。しかし、自然な立体効果を生

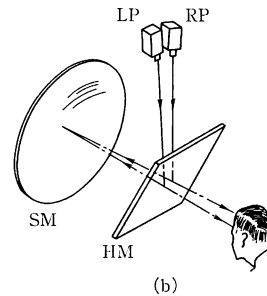
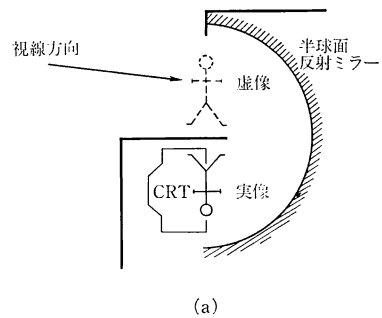


図5 凹面鏡を用いた虚像表示方式
(a)疑似立体表示(CRTに表示された動画像の虚像が空中に観察される), (b)虚像型2眼式立体表示(SM;凹面鏡, HM;半透鏡, RP, LP;左右眼用プロジェクタ)。

み出すには、改良点を残したままのものが多く見られる。その不自然さから立体画像に対する期待が薄れ、3次元空間表示技術の発展を阻害している側面もあり、今後の技術改良が最も期待される方式である。

4.1 立体画像方式の問題点³⁾

- 1) 表示面と両眼視差による再現位置が異なる場合が多いため、ピント調節と輻輳の両機能にアンバランスが生じやすい。特に、両機構の許容範囲(図6)から極端に外れた立体再現が行われると、観察者にかなりの視覚負担を与える。
- 2) 両眼視差による立体表示は、基準との相対距離を表示するため、基準情報が表示画像に制約を与えると、不自然な空間歪が生じる。
→狭い画枠に掛かった対象物は、基準になる画枠位置に引き寄せられた状態に見える。
- 3) 立体動画像の場合、物体の急激な移動に対しては、両眼視差情報だけでの観察側の追従が困難になり、1/s以上の移動速度(図7)になると、立体視が低下し始める。
→画面切り替えや物体の飛び出し時の速度を緩やか

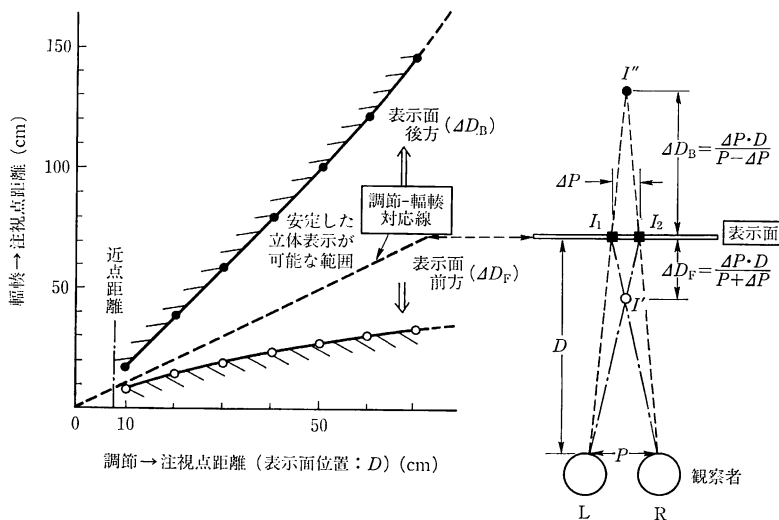


図6 調節-輻輳機能の対応許容範囲
表示面; 調節-輻輳対応線が表示位置, 斜線で囲まれた範囲以外では
2重像に見える。P: 両眼瞳孔間距離, ΔP: 両眼視差量。

にして, 視機能への負担を少なくする必要がある。

- 4) 再現される立体像が, 舞台などに使われる背景(書き割り)のような見え方になる場合がある。この原因はまだ明確ではないが, 画質の不十分さに加えて, 観察方向の移動に応じた像が観察できないことにも関係する。

→(5.1 参照)

- 5) 自然な状態と比べて, 両眼視差情報だけでは, 物体の大きさは浮き出すと小さく, 沈み込むと大きく見える。
- 6) 両眼へ呈示する画像成分に大きな差異があると, 視野闘争(左右眼画像内に差のある部分が交互に入れ替わって現れる不安定な見え方)が発生する。

→視野闘争は, 大きさでは15%以上, 明暗は40~70%, 画像の回転角では6°以上の差異で発生する。また, 画枠による左右眼の観察範囲のずれなどでも発生するが, 動画像では目立ちにくくなる。

4.2 2眼立体画像方式の今後

今まで述べた問題点から見て, 観察者の条件に整合・調整できる装置への改良が期待される。

- 1) 眼鏡方式では, カラー動画像の表示が可能で, しかも両眼への画像情報差が少ない次の方式が用いられている。

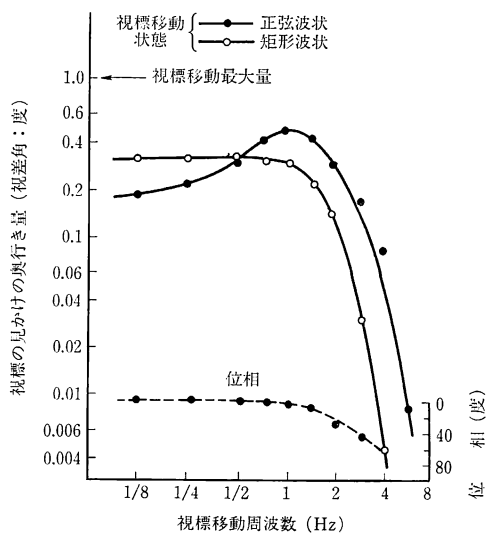


図7 両眼視差情報のみで奥行き方向に移動して見える視標の見かけの奥行き量と移動周波数の関係

正弦波状に滑らかな動きの場合(黒丸)とステップ状に移動する場合(白丸)で見かけ上の奥行き効果が異なり, 高速でステップ状に変化する方が奥行き効果が少なくなる。

- a) 偏光型
- b) 時間分割シャッタ型

ただし, b)では片眼への画面切り替え周波数を, ちらつきが感じられなくなる50~60 Hz(CFF)以上にする必要があるが, 眼への負荷を考慮すると, 70

~80 Hz (図 8 の SFF) 以上が望ましい。

これらの方式は多人数観察用としての条件を満たしているが、個人観察用では近距離から表示部を観察するので、調整可能な機構を持つ観察光学系方式(幅輻, 調節に対応できる方式)の方が望ましい。

2) 表示面方式は、両眼への情報提示を表示面の指向性を利用することから、観察者は眼鏡のような装備が不必要である。この利点を生かして、双方向システムなどの立体表示には有効である。ただ、表示面の微細光学素子としては薄針状のレンチキュラーレンズが多用されているが、期待される広い観察範囲と高画質立体画像の再現にはまだ満足できるものではなく、より高性能な新しい微細光学素子の開発が

必要である。

5. 3次元画像方式へのアプローチ^{7,8)}

立体画像の問題点を改良するために、新しい空間認識要因を付加表示し、より自然な空間再現ができる方式に向けて、いろいろな工夫が行われている。物体からの波面を再生するホログラフィックな空間再現方式は、各種方式のうちで最も理想的であると言われている。しかし、その表示情報量の多さから、カラー動画像を再現するのに、さまざまな技術的問題を解決する必要がある。その点に関しては、別稿で詳説されているので、ここでは省略し、高画質化が可能な多眼方式と、観察範囲の拡大が期待される空間スクリーン方式による3次元空間再現方式の現状をまとめてみる。

5.1 能動的な情報受容と多方向情報の表示方式

広い空間内に存在する対象物を、観察者が望む位置から自由に観察できることも、自然な空間再現には重要な条件になる。そのためにも、広い視野の情報を積極的に探索する時に発生する眼球と頭部の運動運動特性を満足する表示条件や、観察位置を移動した場合に見られる運動視差情報の表示法などが問題になる。

能動的な情報受容特性を満足させ、しかも特定方向からの立体情報しか表示できない2眼立体方式の欠点を補う目的で、次に示す方式が実用化されようとしている。

- a) 両眼視差による立体表示に、観察位置の移動に連動した各方向からの画像情報を提示する2眼情報+双方向システムによる観察移動連動方式
→観察者の移動状態に画像情報を連動させる次のよ

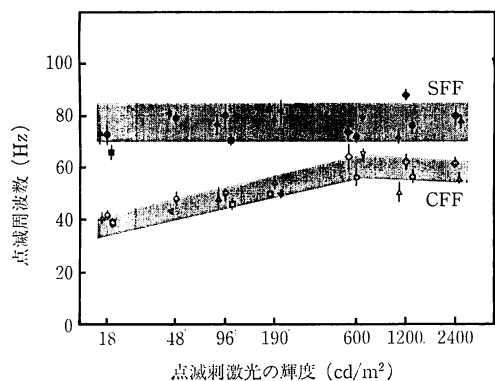


図 8 点滅刺激に対する安定した知覚が成立する周波数特性
CFF: ちらつきが知覚されなくなる点滅周波数, SFF: 見かけの明るさなどへの影響も見られなくなる安定点滅周波数。

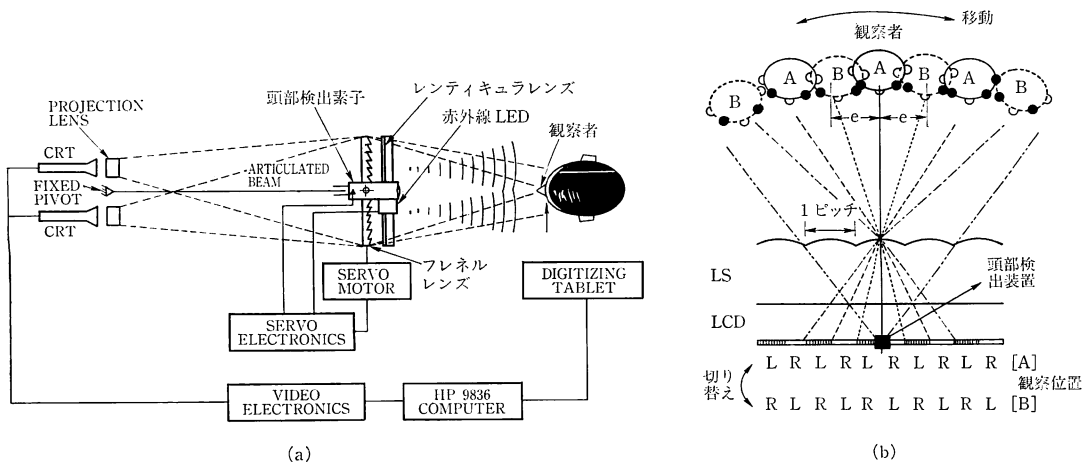


図 9 観察者の位置移動検出型立体空間表示方式
(a)機械型(赤外線センサーによる観察者位置検出信号で、投射側のフレネルレンズにより左右眼用画像をずらす), (b)電子型(観察者の位置がAからBに移動したとき、左右眼用画像の画素が切り替わる)。

うな方式が見られる。

1) 装着型…別稿で述べられている HMD のように表示装置を頭部に装着して、観察移動に連動した画像を表示する。ただ、軽量で高画質なディスプレイの開発と観察時の違和感を取り除く高速表示が必要である。

2) 移動検出型…テレビ会議のように、観察者の相互観察が要求されるシステムでは、特殊装置を装着することなく、超音波や光学的位置検出素子などにより、観察移動位置(図 9)を検出し、適切な立体画像成分を表示する。観察者の位置や姿勢を素早く検出して、表示画像の時間ずれを少なくする必要がある。

b) 多方向からの画像情報を表示画素単位に集積表示する多眼方式

→レンチキュラーレンズやフライアイレンズ等の方向選択性のある微小光学素子やホログラム素子などで構成された表示面を用いて、構成レンズ素子に多方向からの画像情報を表示・観察する方式で、眼鏡無し立体表示方式として、立体印刷や立体テレビ等に用いられている。表示面を構成する微小光学素子の指向性と分解能を向上させることが問題点である。

ただし、a)方式では、基本的には2眼式の立体表示であるので、ピント調節と輻輳の関係を満足させることが難しい。また、観察者の動きと表示画像に追従ずれが生じると、船酔効果などの不自然な表示状態になる危険性もある。

5.2 空間スクリーン方式の現状

空間に像を形成するためには、次のように表示部分を工夫したさまざまな方式が試みられている。しかし、高速度映画や CG、レーザー走査による原画像情報を3次的に表示する段階であるため、大画面に高画質な画像を表示するには、解決すべき問題を多く残している。

1) 平面で継時的に空間を走査する方式 (図 10)

- a) 機械方式；平面や螺旋状曲面スクリーンを回転させて、円筒状の空間内に空間像を表示する方式
- b) 光学方式；可変焦点鏡などの光学系により、像面を移動させて空間像を再現する方式
- c) 電気方式；液晶などの多層膜の体積型スクリーンで、各膜ごとの透過率制御によりスクリーン膜を移動させる方式

2) 固体表示素子による方式 (図 11)

- a) 固体発光素子；Er イオンを含む蛍石に赤外光

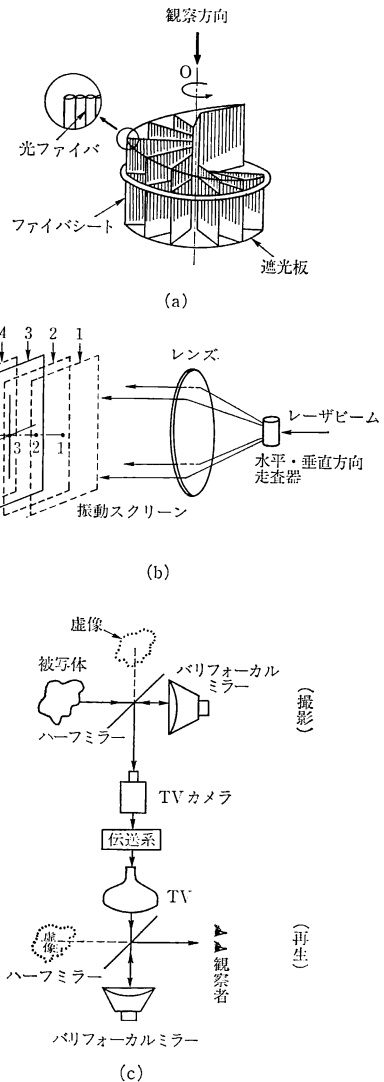


図 10 継時走査型空間スクリーン方式

(a)回転円筒表示方式(オプティカル・ファイバ・シートで段階的な奥行き位置の情報を提示する)、(b)平面振動表示方式、(c)パリアフォーカルミラー方式(撮影、再生部に可変焦点鏡使用)。

を照射し、エネルギー集光部に発光が生じる空間発光スクリーンが報告されている、現在のところ、実用化できるレベルまで達していない。カラー動画像表示には、材料面の開発だけでなく、発光刺激法の検討も必要である。

- b) 微粒子散乱スクリーン；煙や霧などの散乱特性を利用して空間像を表示するが、照射光路上の散乱を除去する必要がある。

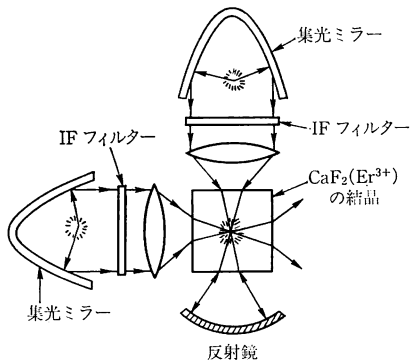


図 11 固体発光型空間スクリーン方式

3) 対象からの波面を再生する方式; ホログラフィ

これらの方式のうち, 2)での実用化が可能な技術の開発が期待されるが, 現状では高画質画像表示には程遠い状態である. 近年, 固体スクリーンに関する研究報告はほとんど見られないが, 新素材の開発に伴い, 驚くような表示方式の誕生が予想される方式でもある.

6. 3次元ディスプレイの今後

仮想空間や遠隔操作空間を再現する試みが, これまで述べてきたいろいろな方式によって行われようとしている. しかし, 現状ではすべての条件を満足できる空間再

現方式はまだ実用化されていない. 人間の空間での作業状態(表2)を調べてみても, 空間認識に関する全機能を総動員している訳ではなく, 動作距離や作業内容に応じて, 効果的に処理できる機能で分担認識している. 3次元ディスプレイの方式も, 何を表示するか, また何に利用するかによって, 観察したい対象情報が選択観察できる複合余剰情報表示システムを開発することが, 今後の課題であろう.

文 献

- 1) 畑田豊彦: “生理光学 15. 3次元ディスプレイ”, O plus E, 73 (1985) 98-109; “生理光学 16. 自然視画像と視覚特性”, O plus E, 74 (1986) 121-130.
- 2) 畑田豊彦, 斎田真也: “奥行き知覚の要因とメカニズム”, テレビ誌, 43 (1989) 755-762.
- 3) 畑田豊彦: “立体視機能から見た三次元映像”, 画像ラボ, 12 (1990) 13-16.
- 4) 伴野 明, 岸野文郎: “3. 立体画像・音響技術 3-2 入力方式 3-2-2 仮想空間操作における入力技術”, テレビ誌, 45 (1991) 460-467.
- 5) T. Hatada, H. Sakata and H. Kusaka: “Psychophysical analysis of the ‘sensation of reality’ induced by a visual wide-field display,” SMPTE. J., 89 (1980) 560-569.
- 6) 磯野春雄: “3. 立体画像・音響技術 3-1 表示方式”, テレビ誌, 45 (1991) 446-452.
- 7) Proc. of Int. Symp. on Three Dimensional Image Technology and Arts. Seiken Symposium, 8 (1992).
- 8) 平田渥美, 日下秀夫, 一之瀬進: “立体及び3次元画像表示技術(1)”, 画像電子誌, 20 (1991) 235-245.