

## 立体映像とフラットパネル型立体表示技術

高木 康博

### Three-Dimensional Images and Flat-Panel Type Three-Dimensional Display

Yasuhiro TAKAKI

The present paper reviews the recent developments of three-dimensional displays, especially employing flat-panel two-dimensional displays. At first the classification of display principles and that of system implementation are shown. Then the recently developed display principle called spatial imaging is explained, that controls ray directions in order to reconstruct rays from three-dimensional objects. Two recently developed implementation techniques using flat-panel displays are also explained, one is the step-barrier technique and the other is the slanted lenticular technique. They enable to increase the number of horizontal ray directions. The high-density directional display technique can be implemented by increasing the number of ray directions more than 50-200 and by decreasing the ray angle pitch less than  $0.1-0.4^\circ$ . The technique enables to overcome two problems of conventional three-dimensional displays; the accommodation-vergence conflict and the lack of motion parallax. The technique also enables to reconstruct the appearances of objects, such as glare, transparency, softness, and etc., because the appearances are results of reflection, refraction, and diffusion of rays on and near surfaces of objects.

**Key words:** three-dimensional display, three-dimensional images, flat-panel display, spatial imaging, natural three-dimensional display, appearance

立体映像は究極の映像表示技術であることはいうまでもないが、最近では、ハイビジョン普及後の次世代映像技術として立体ディスプレイに対する関心が高まってきている。映像機器のハイビジョン化は、アナログ放送が停止される2011年を前に、早いペースで進んでいて、すでにフルHDテレビも価格競争に突入しようとしている。映像産業は、次の研究開発ターゲットを必要としている。

将来、立体ディスプレイが家庭まで幅広く普及するためには、解決すべき技術的課題がいくつか存在する。その中で、最も重要な課題として、立体映像が人体に与える影響の問題がある。立体映像を見ていると頭が痛くなる、視機能が完成していない若年者に悪影響を与えることが稀にあるといった問題である。このような問題点を解決する自然な立体表示技術の研究開発が重要になるが、わが国では、世界に先駆けて平成4年から平成14年の10年間にわたり

通信放送機構（現在の通信総合研究所）において、自然な立体映像に関する研究<sup>1,2)</sup>が行われ、現在でも自然な立体表示の実現に関する研究が各所で盛んに行われている。

本稿では、まず、立体表示の課題、立体表示方式の分類、立体表示装置の分類について述べる。つぎに、フラットパネルディスプレイを用いた構成方法、最新動向、自然な立体表示などについて述べ、最後に将来予想について述べる。

#### 1. 従来の立体ディスプレイの課題

人間がもつ立体知覚の生理的要因には、両眼視差、輻輳、調節、運動視差の4つがある。自然な立体表示を実現するためには、これらのすべての要因が正しく機能する立体ディスプレイを実現する必要がある。しかし、従来の2眼式立体ディスプレイでは、両眼視差と輻輳しか機能しな

い。そのため、人間の視機能に対して矛盾が生じる<sup>3)</sup>。

第1の矛盾は、調節と輻輳の不一致である。輻輳は、物体の一点を見たときの両眼の回転角の情報をもとに、三角測量の原理でその点の奥行き位置を知覚する。調節は、可変焦点距離レンズである眼のレンズによるピント合わせ機能である。従来の立体表示では、左右の眼に異なる映像を表示するため、図1 (a) に示すように、輻輳は立体の奥行き位置を正しく知覚するが、眼のピントはディスプレイのスクリーン上にあり調節は正しく機能しない。人間の視機能には輻輳で知覚した奥行き位置に調節を合わせようとする輻輳性調節という作用があるが、従来の立体表示では調節と輻輳が一致せず、調節が輻輳性調節に従うことができない。このような調節と輻輳の矛盾は、実世界ではありえないため、眼精疲労を引き起こすといわれている。このため、長時間の利用は避けるべきであるといわれている。

第2の矛盾は、運動視差の欠如あるいは不連続である。従来の立体表示では、右眼用の画像と左眼用の画像しか表示しないため、図1 (b) に示すように、頭を動かしても、見える画像が変化しない。多眼式では、複数の視点位置から見た画像を同時に表示するため運動視差を実現できるが、現状では視点数が10個程度と少ないため、視点の移動に対して画像の切り替わりが不連続である。人間は、自身の身体運動に対する画像変化を予測するため、このような運動視差の欠如や不連続さにすぐに気がつく。このような違和感が、人間が感じる臨場感を低下させるといわれている。大画面で風景などの遠景を表示する場合には、運動

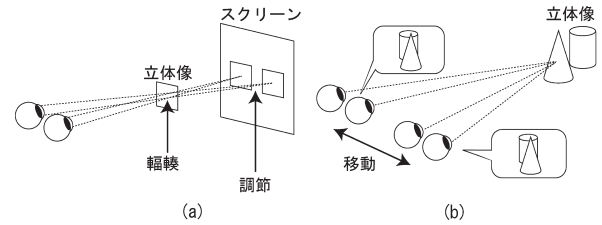


図1 従来の立体表示の問題点。(a) 調節輻輳矛盾、(b) 運動視差の欠如。

視差の欠如はあまり気にならないが、近景で特に人物などを表示する場合には人間を騙すことは難しい。また、両眼立体視が苦手な人は、おもに運動視差によって物体の奥行きを知覚することが知られている。

以上のような2つの矛盾を解決することが、将来の立体ディスプレイの幅広い普及のために重要である。

## 2. 立体表示原理の分類

立体表示に関しては、表示原理と表示装置の名称が混同されることが多いので、本稿では、最初に立体表示原理の分類について述べる。なお、ここでは、立体像の観察に特別なメガネを必要としない裸眼立体ディスプレイについてのみ述べる。

図2に、立体表示原理の分類<sup>4,5)</sup>を示す。2眼式は、空間に左右の眼を置く視点位置を設定し、左右眼用の画像をそれぞれの視点位置に集光するように表示する。多眼式は、空間に視点位置を3つ以上設定し、それぞれの視点から見た画像をそれぞれの視点位置に表示する。空間像方式

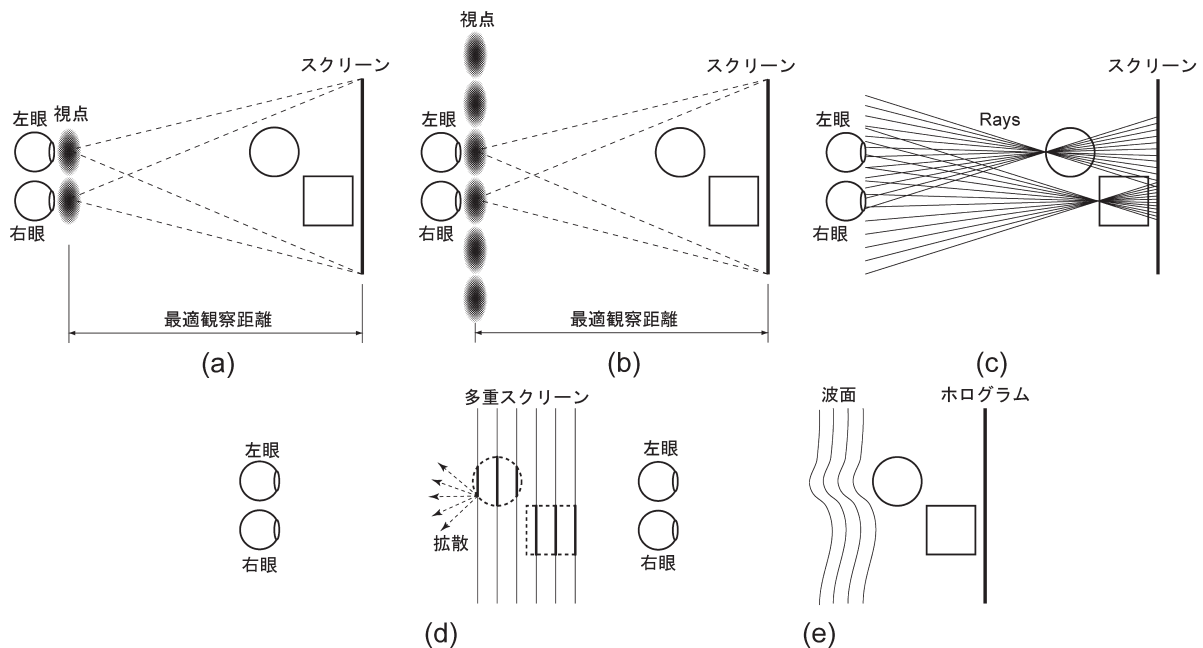


図2 立体表示原理の分類。(a) 2眼式、(b) 多眼式、(c) 空間像方式、(d) 奥行き標本化方式、(e) ホログラム方式。

表1 立体表示原理と問題点の比較.

表示原理	調節輻輳矛盾の解決	滑らかな運動視差の実現	表示に必要な解像点数 [pixels]	実現の難易度
2眼式	×	×	0.7 M	容易 ↑ ↓ 困難
多眼式	×	△	2~6 M	
奥行き標本化方式	○	△	6~22 M	
空間像方式	○	○	>35 M	
ホログラム方式	○	○	3 T	

は、空間に視点を設定せず、物体から発せられる光線を再現する方式である。奥行き標本化方式は、空間に並べた多数のスクリーンに画像を表示する。ホログラム方式は、物体から発せられる波面を再生する。

空間像方式は、最近用いられることが多くなった表示方式で、若干の違いでさまざまなよばれ方がされている。昨年度の(社)オプトメカトロニクス協会での調査研究<sup>6)</sup>で、これらをまとめて空間像方式とよぶことにしたが、本稿でもこれに従うことにした。

1章で述べた立体ディスプレイの課題と立体表示原理の関係を表1に示す。2眼式では、当然のことながら、従来の問題点は解決できない。多眼式では、通常は視点数が10個程度であるため運動視差が不連続で、左右の眼に異なる画像を表示しているという点では2眼式と同様であり、調節輻輳矛盾は解決できない。空間像方式では、物体から発せられる光線を再現するため、人間の視知覚に対して十分詳細に光線が再現されるという条件のもとでは、調節輻輳矛盾が解決でき、滑らかな運動視差が得られる。奥

行き標本化方式では、物体の表示位置にあるスクリーンから光線が拡散されるので、調節輻輳矛盾は生じないが、視点を移動させると、前後のスクリーンに表示された画像が重なって見えたり隙間が開いて見えたりするといった問題がある。ホログラム表示に関しては、物体からの波面を再生するため、これらの問題は生じない。

表1には、それぞれの表示原理で必要となる画像表示の解像点数も示してある。立体像の解像度をSD解像度(720×480)とし、画面サイズを20インチとした。表示する画像数は、多眼表示は6~16、奥行き標本化方式は16~64、空間像方式は100以上とした。ホログラム表示で用いる空間光変調器(SLM)の解像度は5000本/mmとした。いうまでもなく、2眼式が最も実現が容易である。ついで、多眼式、奥行き標本化方式、空間像方式、ホログラム方式の順で難易度は高くなる。なお、奥行き標本化方式の表示画像数については、表示する立体像の奥行き範囲に依存するが、現実的には時分割表示が用いられることが多いことを考えて上記の値とした。空間像方式の表示画像数は、自然な立体表示を実現するための画像数とし、詳しくは6章で説明するが、ここでは100以上とした。

最近提案された方式に、DFD (depth-fused 3-D)<sup>7,8)</sup>方式がある。これは、奥行き標本化方式でスクリーン数を2つに限定したものと考えることもできるが、2つのスクリーンに表示する画像の強度比を独自の方法で調節することで、スクリーン間の任意の位置に奥行きが知覚される現象を利用している。

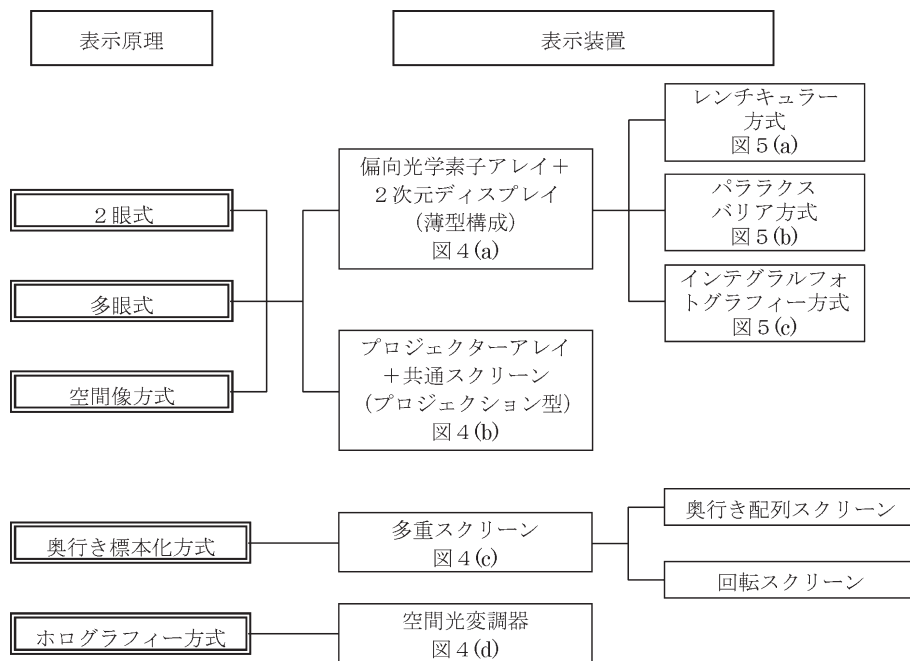


図3 立体表示装置の分類.

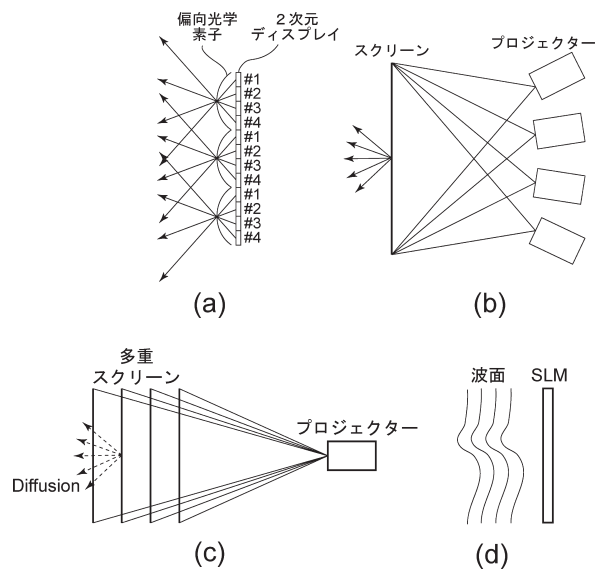


図4 立体表示装置の分類。(a) 偏光光学素子アレイと二次元ディスプレイ、(b) プロジェクターアレイと共通スクリーン、(c) 奥行き配置スクリーン、(d) ホログラム方式。

### 3. 立体表示装置の分類

つぎに、立体表示装置の分類を図3に示す。2眼式、多眼式、空間像方式の実現には、大きく分けると、(1) 偏光光学素子アレイと二次元ディスプレイを用いる薄型構成方法、(2) プロジェクターアレイと共通スクリーンを用いるプロジェクション型構成方法が用いられる。前者は、図4(a)に示すように、二次元ディスプレイの複数のピクセルに対して1つの偏光光学素子を対応させ、それぞれのピクセルから発せられる光線を異なる方向へ偏向させる。後者

は、図4(b)に示すように、異なる位置にある複数のプロジェクターから共通スクリーンへ画像を多重投影することで、スクリーン各点から異なる方向へ進む光線を発生させる。奥行き標準化方式では、図4(c)に示すように、空間の異なる位置に隣接して設置した複数の拡散スクリーンに画像を表示する。スクリーンの配置には、奥行き方向への配置と回転スクリーン配置があるが、図には前者を示した。ホログラム方式では、図4(d)に示すように、空間光変調器により光の波面を二次元的に変調する。

薄型構成方法では、用いる偏光光学素子アレイの種類によって、表2に示すように、3種類に分類することができる。図5(a)に示すように、一次元のレンズであるシリンドリカルレンズを用いて光線を水平方向に偏向し、これらを水平方向に多数並べたレンチキュラーシートを用いるのがレンチキュラー方式である。同図(b)に示すように、縦長スリットにより光線を水平方向に偏向し、これらを水平方向に並べたパララクスバリアを用いるのがパララクスバリア方式である。同図(c)に示すように、偏光光学素子にマイクロレンズを用いて光線を水平・垂直方向に偏向し、これらを二次元的に並べた二次元レンズアレイを用いるのがインテグラルフォトグラフィー方式である。二次元レンズアレイは、フライアイレンズとよばれることもある。

レンチキュラー方式とパララクスバリア方式では、光の偏向方向は水平方向に限定されるため、水平視差しか得られない。これに対して、インテグラルフォトグラフィーでは、光を水平・垂直に偏向するため、水平・垂直の両方の

表2 薄型構成方法による立体ディスプレイの分類。

表示装置	偏向方法	偏向デバイス	解像度	視差
パララクスバリア方式	スリット	パララクスバリア	高い	水平
レンチキュラー方式	シリンドリカルレンズ	レンチキュラーシート	高い	水平
インテグラルフォトグラフィー方式	マイクロレンズ	二次元レンズアレイ	低い	水平・垂直

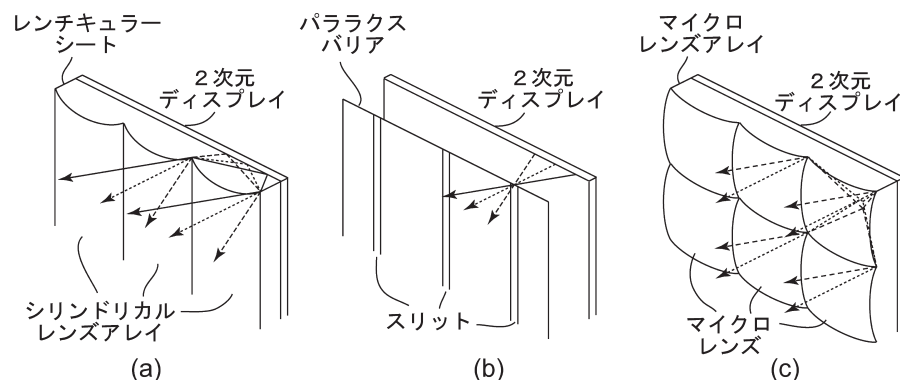


図5 薄型構成方法の分類。(a) レンチキュラー方式、(b) パララクスバリア方式、(c) インテグラルフォトグラフィー方式。

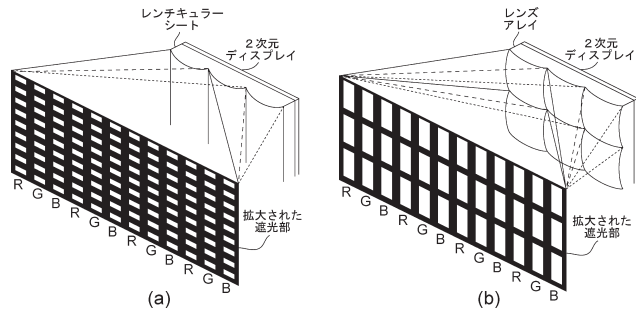


図6 偏向光学素子によるピクセル構造の拡大。(a) 水平視差型、(b) フルパララクス型。

視差（フルパララクス）が得られる。プロジェクション方式では、複数のプロジェクターを水平方向にのみ並べた場合には水平視差型になり、水平・垂直に並べた場合にはフルパララクスが得られる。ホログラム方式は、基本的にはフルパララクスが得られるが、水平視差に限定して高解像度な表示を水平方向のみにすることで、空間光変調器に対する負担を軽減し、情報量を低減する方法も知られている。

なお、最近では、パララクスバリアを円筒状にした全周型ディスプレイが開発されているが、これについては本特集の解説<sup>9,10)</sup>に詳しい説明がある。これらは、奥行き標準化方式と勘違いされることがあるが、そうではない点を指摘しておく。

薄型構成方法とプロジェクション型構成方法の比較について述べる。装置サイズについては、明らかに前者が有利である。立体表示解像度や表示画像数といった立体表示性能の向上に関しては、前者は二次元ディスプレイの解像度の増加で対応するのに対して、後者はプロジェクター数を増やすことでも対応できる。また、後者は、大画面化にも容易に対応できる。すなわち、前者は超高精細な大型パネルを用い、後者は多数の小型パネルを用いる。ちょうど、現在の大型テレビにおける薄型とリアプロジェクション型の関係に似ている。

#### 4. フラットパネルディスプレイを用いた薄型構成方法

ここからは、薄型構成方法で、二次元ディスプレイとしてフラットパネルディスプレイを用いる場合について述べる。フラットパネルディスプレイでは、ピクセル群で画像表示を行うが、ピクセル間の遮光部の存在と色ピクセルの配列に注意する必要がある。

フラットパネルディスプレイの色ピクセルの間には、配線用の遮光部が存在する。図6に示すように、光線の偏向によりピクセル構造が拡大されるため、遮光部に対応して光線が存在しない光線方向が発生する。多眼式では、1つ

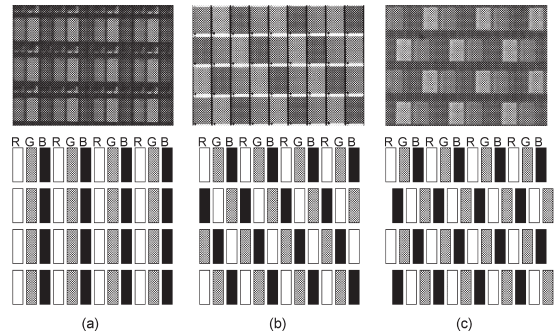


図7 フラットディスプレイパネルの色ピクセル配列。(a) ストライプ配列（シャープ製 LQ072K1）、(b) モザイク配列（エプソン製 LF4F）、(c) デルタ配列（三洋製 ALP242）。

のピクセルが1つの視点に対応するため、遮光部の存在は、視点と視点の間に何も見えない領域を作り出す。視点が設定された観察距離以外の距離から見た場合には、これが画面の強度むらとして観察される。空間像方式では、光線が存在しない表示角度が発生するため、画面の強度むらとして観察される。高精細なフラットパネルほど、一般に遮光部の割合は大きくなる。

遮光部の問題を回避する方法として、デフォーカス状態で光線を偏向させる、拡散材の利用が知られている。水平視差のみのレンチキュラー方式やパララクスバリア方式では、レンズやスリットを傾斜させることで遮光部の影響を低減する方法も知られている。

フラットパネルディスプレイの色ピクセルの配列には、図7に示すように、ストライプ配列、モザイク配列、デルタ配列の3種類が存在する。水平方向にはRGBの色ピクセルが繰り返し配置されるが、ストライプ配列では垂直方向には色ピクセルの配列は同一であり、モザイク配列では垂直方向には1色ピクセル分ずらして配置され、デルタ配列では1.5色ピクセル分ずらして配置される。最近では、ストライプ配列が主流であるが、モザイク配列やデルタ配列は見た目の解像度を高くする効果をもつため、初期の液晶テレビ等でよく用いられた。

レンズやスリットによりピクセル構造が拡大されると、図6に示すように、光線の偏向方向によって光線の色がRGBに変化して見える。多眼式では、視点によって見える色が変わる。視点が設定された観察距離以外の距離から見た場合には、これが画面の色むらとして観察される。空間像方式では、方向によって光線の色が変化するため、画面の色むらとして観察される。

色むらを解決する方法としては、遮光部の場合と同様に、デフォーカスや拡散材が用いられる。2眼式では、水平方向に隣り合う2つの色ピクセルに1つの偏向光学素子

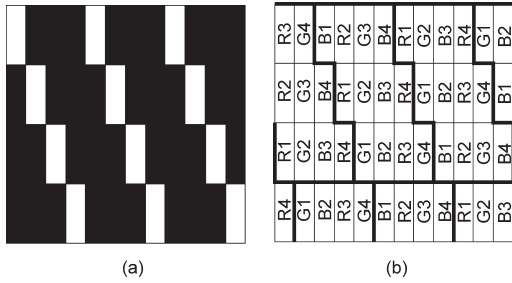


図8 ステップバリア方式。(a) ステップバリア、(b) 色ピクセルと表示方向。

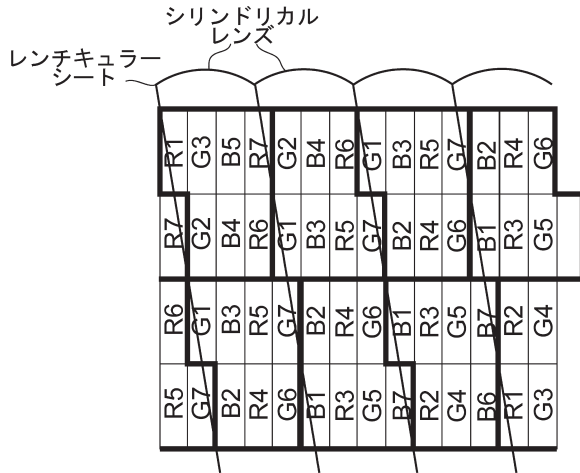


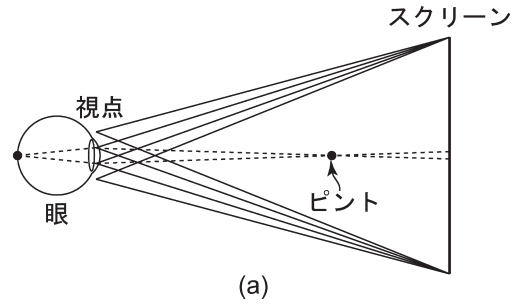
図9 斜めレンチキュラー方式。

を対応させる方法が用いられる。ある視点から見ると、1つの偏向光学素子が一色に見え水平方向に素子の色がRGBと変わるので、1つの偏向光学素子を1つの色ピクセルとして扱える。また、水平視差方式では、垂直方向にはピクセル構造が拡大されないため、モザイク配列やデルタ配列を用いると、垂直方向に細かい周期で色が変わるため色むらが解消できる。このようなモザイク配列の特徴をうまく用いた方法については、本特集で解説<sup>11)</sup>がある。

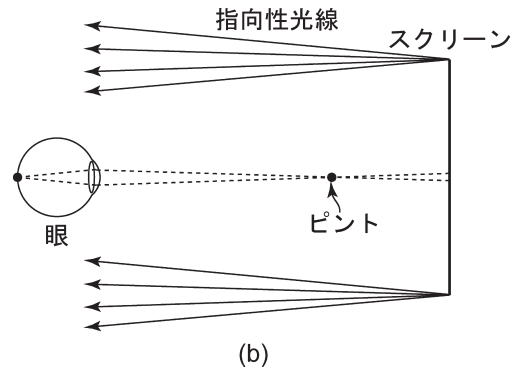
### 5. 最近の方式

薄型構成方法で、水平視差のみを表現する場合には、二次元ディスプレイは水平方向にのみ解像度が高ければよい。しかし、通常の二次元ディスプレイでは、水平方向にのみ解像度を高めたものは存在せず、垂直方向にも水平方向と同等に解像度が高められている。そこで、立体表示の際に、垂直方向の解像度も水平視差の実現に用いる方法が考えられた。これが、ステップバリア方式<sup>12)</sup>と斜めレンチキュラー方式<sup>13)</sup>である。

ステップバリア方式では、図8に示すように、スリットの位置を垂直方向に階段状に変形させたパラクスバリアを用いる。それぞれの色ピクセルから発せられる光線に対



(a)



(b)

図10 調節応答の誘起。(a) 超多眼、(b) 高密度指向性表示。

して、スリットが与える水平偏向方向を同図に示す。このように、縦方向に3個の色ピクセルをまとめて用いることで、水平偏向方向を3倍に増やすことができる。最近では、モザイク配列のフラットパネルディスプレイが製造されなくなったため、スリット側を垂直方向に1色ピクセルずつずらして配置することで、同様な効果を得ていると考えることができる。

斜めレンチキュラー方式は、図9に示すように、レンチキュラーシートを斜めにすることで、ステップバリアと同様な効果を得ている。レンチキュラー方式では偏向にレンズを用いるため、パラクスバリア方式に比べると、光の利用効率が高く光線の制御性もよい。また、レンチキュラーシートを傾けることで遮光部による強度むらを除去する効果が得られる。ただし、レンチキュラーシートは通常は樹脂で作製されるため、これを精度よく作製し、温度や湿度などの環境による変形を抑えることは難しい。

また、最近では、レンチキュラーシートの傾き角を意図的に決めずに、立体像を見ながら二次元ディスプレイでの画像表示を決めることで、立体表示解像度と光線方向数のバランスがとれるとするフラクショナルビュー方式<sup>14)</sup>とよばれる方式も提案されている。

### 6. 自然な立体表示

調節輻輳矛盾の原因は、調節が正しく機能しないことにある。そこで、図10(a)に示すように、多眼式で発生す

表3 高密度指向性ディスプレイ。

指向性光線数	64 指向性	128 指向性	72 指向性	30 指向性
構成方法	プロジェクション型		薄型	
水平表示角度ピッチ	0.34°	0.23°	0.38°	0.71°
水平視域角	21.6°	29.6°	27.6°	21.2°
三次元解像度	~QVGA	~QVGA	320×400	256×128
スクリーンサイズ	9.25"	13.2"	22.2"	7.2"

外観

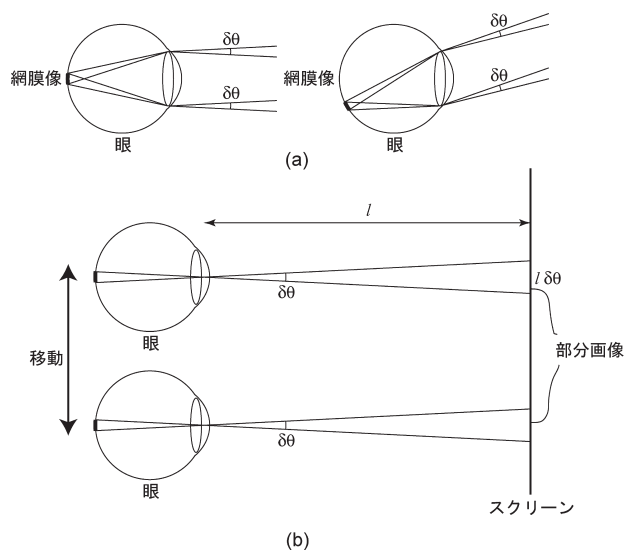
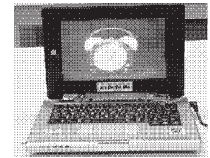
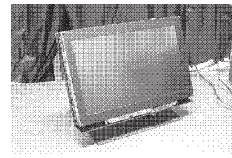
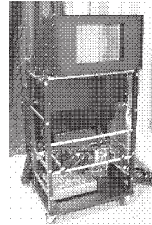
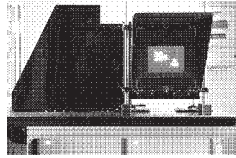


図11 高密度指向性表示による網膜像形成。(a) 網膜像に映る指向性画像の部分画像, (b) 運動視差の発生。

る視点の間隔を狭めて、眼の瞳に2つ以上の視点が入るようにすると、空間の一点を通る光線が2本以上同時に瞳に入射するので、人間がこの点に眼のピントを合わせることが可能になるという提案がある。これは、視点を空間に高密度に発生するため、超多眼表示とよばれている。眼の瞳の大きさは周囲の明るさによって変化するが、2~8 mmと非常に小さいことを考えると、非常に多くの視点数が必要になる。視点数45のFLA方式<sup>15)</sup>を用いた走査型ディスプレイや、視点間隔2 mmで視点数30のFAPO方式<sup>16)</sup>とよばれるプロジェクション型ディスプレイが試作された。これらの試作システムに対する人間の調節応答が測られた<sup>17,18)</sup>。

最近では、視点を空間に設定した多眼表示ではなく、光線の進行方向を制御する空間像方式でも、同様な考え方で調節輻輳矛盾を解決する研究<sup>19-23)</sup>が行われている。この

場合は、図10(b)に示すように、光線の表示角度ピッチを狭めて光線の指向性を高めることで、空間の一点を通る光線が2本以上同時に瞳に入射するようにする。必要な光線の角度ピッチは観察距離にも依存するが、調節輻輳矛盾が問題になる約1~2 m以内の観察距離に対しては、角度ピッチを約0.1~0.4°と非常に小さくする必要がある。そのように、非常に指向性が高い光線を高密度に発生する必要があることから、高密度指向性表示とよばれる。表3に示すように、プロジェクション型構成方法を用いて、表示角度ピッチが0.34°で指向性光線数が64のディスプレイ<sup>19,20)</sup>、表示角度ピッチが0.23°で指向性光線数が128のディスプレイ<sup>21)</sup>が試作されている。また、斜めレンチキュラーの構成法を用いて、表示角度ピッチが0.38°で指向性光線数が72の薄型ディスプレイ<sup>22)</sup>も試作されている。高密度指向性表示に対する調節応答についても報告<sup>24,25)</sup>がなされている。

高密度指向性表示においては、光線の進行方向についてサンプリングを行うため、同じ方向へ進む互いに平行な光線群で、三次元物体の平行投影画像(正射影画像)を表示する。異なる方向へ進む光線の数だけ異なる画像を表示する。多眼表示で視点に投影する画像は視点から見た一点透視投影画像で、これを視差画像とよぶが、指向性表示では平行投影画像を指向性画像とよぶ。

このように、高密度指向性表示では平行投影画像の平行投影を基本とするため、多眼式の場合とは異なる網膜像の形成がなされる。多眼式では、視点位置に対応した視差画像全体が網膜に映る。これに対して、指向性表示では、図11(a)に示すように、指向性画像のうち網膜に投影されるのは一部分である。異なる方向へ表示される多数の指向性画像に対応して、それぞれの一部分が網膜上の異なる位置に投影されて網膜像が形成される。この場合、図11(b)

に示すように、眼の位置を変えると、それぞれの指向性画像で網膜に投影される部分が変わる。したがって、指向性画像の1解像点分だけ眼の位置が変化しただけでも網膜像が変わるので、非常に滑らかな運動視差が得られる。ただし、網膜上に並ぶ部分画像の間が不連続にならず滑らかに接続されるためには、光線の角度ピッチを非常に小さくする必要がある。光線の角度ピッチが大きい場合には、立体像をスクリーン近くに表示して奥行きを制限し、指向性画像間の違いを小さくする必要がある。

高密度指向性表示における調節応答の誘起は、つぎのように考えることもできる。立体像を表示する光線は指向性が高いので、瞳での光線の広がりや瞳径よりも小さくなる。このことは、実質的に瞳径を小さくし、眼の結像系の焦点深度を広げる効果をもつと考えることができる。すなわち、スクリーン前後で事実上ピントが合う範囲が広がるため、輻輳性調節に従い立体像に対してピント合わせできる範囲が広がる。別のいい方をすれば、マクスウェル視<sup>26)</sup>に近い効果を得ているということができる。

以上のことからわかるように、空間像方式において、調節輻輳矛盾を解決するためには、光線の角度ピッチをかなり小さくする必要がある。空間像方式であれば調節輻輳矛盾を解決できるというのは間違いで、自然な立体表示を実現するためには、非常に多くの画像を表示する必要がある。20°以上の視域角を仮定すると、約50~200以上の画像を表示する必要がある。以上は、水平視差の場合であるが、フルパララクスを実現しようとするとき、必要な画像数は2乗で増加し、約50<sup>2</sup>~200<sup>2</sup>以上の画像を表示する必要がある。

## 7. フラットパネルディスプレイを用いた空間像表示

つぎに、二次元ディスプレイにフラットパネルディスプレイを用いた空間像表示について説明する。空間像方式では、多数の光線の進行方向を制御する必要がある。パララクスバリア方式では、光線間の分離をよくするためにはスリット幅を小さくする必要があるが、光量減少と回折による光線の広がりがあるため、空間像表示の実現にはあまり適していない。レンチキュラー方式では、視差は水平方向に限定されるが、高精細なフラットパネルディスプレイを用いれば、ある程度多くの光線数を得ることができる。インテグラルフォトグラフィー方式では、水平・垂直に視差が得られるが、それぞれの方向への光線数は平方根で減少する。

ここでは、斜めレンチキュラー方式による空間像表示<sup>22)</sup>について説明する。図12に示すように、縦にN個で横

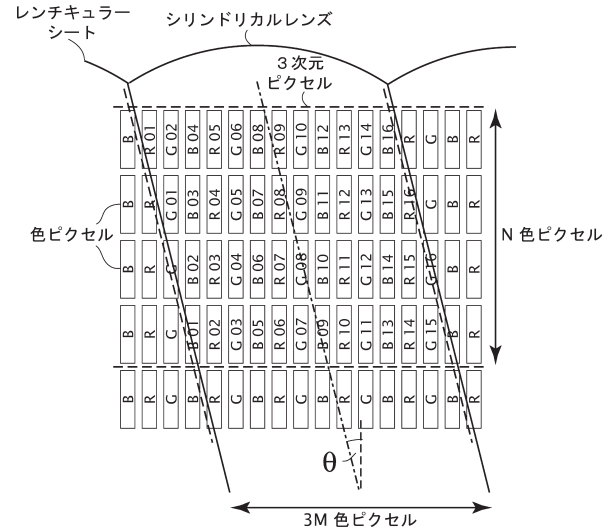


図12 斜めレンチキュラー方式による高密度指向性表示。

に3M個の色ピクセルをまとめて、1つの三次元ピクセルとして扱う。色ピクセルの水平ピッチを $p_x$ で、垂直ピッチを $p_y$ で表す。レンチキュラーシートを色ピクセル列に対して角度 $\alpha = \tan^{-1}(3p_x/Np_y)$ だけ傾けると、1つの三次元ピクセル内のRGB各色のピクセル内で、レンズ中心軸に対する水平距離が等間隔に変化するようになり、色ピクセルから発せられる光線の水平進行方向は角度ピッチ $\delta\theta = \tan^{-1}(p_x/Nf)$ で変化し、異なる $M \times N$ 方向に進む光線が得られる。ただし、レンズの焦点距離を $f$ とした。空間像方式では、指向性が高く広がり角の小さい光線を用いるため、レンズの焦点面に色ピクセルが並ぶように配置する。

ここで、レンチキュラー方式を用いた場合の、多眼式と空間像方式の設計上の違いについて考える。多眼式では、視点位置に光線を集めるため、ピクセルと視域を共役にするとき視点の分離が最もよくなる。距離 $z$ の位置に幅 $w$ の視域を確保する場合、レンズとピクセルの距離 $s$ は $s = Mp_x z/w$ と求められる。したがって、多眼式の場合のレンズの焦点距離 $f_m$ は、 $f_m = s/(1 + Mp_x/w)$ とするのがよい。これに対して、空間像方式の場合は、上述のようにレンズの焦点距離 $f_s$ は $f_s = s$ とする。以上より、 $f_s = (1 + Mp_x/w)f_m$ であり、 $Mp_x/w$ の値によって多眼式と空間像方式が区別できる。 $M$ が小さい場合には、空間像表示と多眼式の違いは小さく、レンズの製造誤差の範囲に収まる。

レンズピッチに関しては、多眼式では、隣り合うレンズが同じ視域を作り出すことから、レンズピッチを $q_m = Mp_x/(1 + Mp_x/w)$ とする。空間像方式では、指向性画像を表示する場合には、互いに平行な光線群を作り出すため



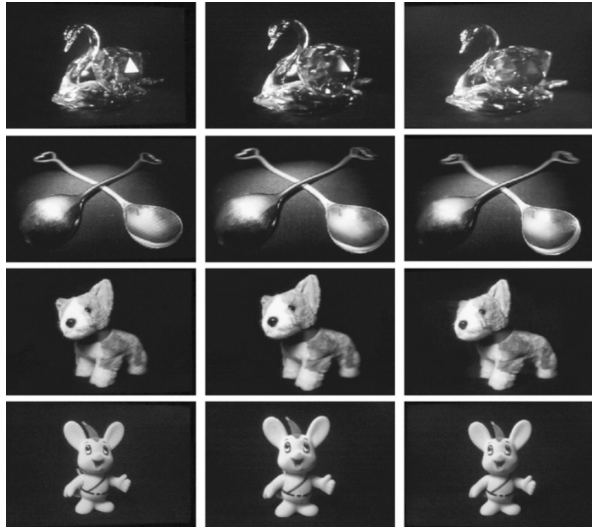


図13 高密度指向性表示による質感表示 (72 指向性 VGA ディスプレイによる立体像)。

に、レンズピッチを  $q_s = Mp_x$  とする。しかし、空間像方式の本質は光線の指向性制御にあり、必ずしも互いに平行な光線群を用いる必要はないので、観察距離に対する視域が確保できる多眼式と同じレンズピッチとしてもよい。

## 8. 質感表示

輝き、透明感、柔らかさといった物質のもつ質感は、光学的には、物体表面あるいはその内部での光線の反射や屈折で記述できる。コンピュータグラフィックスの分野では、このような質感をより忠実に表現するために、光線の入射角と出射角の2変数関数であるBRDF (bi-directional reflection distribution function) を用いた方法<sup>27)</sup>などが使われるようになってきている。しかしながら、二次元ディスプレイでは、光線はスクリーンから拡散するため、物質のもつ質感を表現するために、表示物体を回転させるなどして光線の反射・屈折の動的な変化を見せる手法が用いられる。空間像方式では、光線の進行方向を制御するため、物体表面で反射・屈折される光線の方向による微妙な変化を再現できる。そのため、金属やガラスといった物質の質感を表現できる。

さらに、人間が知覚できる光線の進行方向の違いは、目の瞳の大きさで決まることを考えると、高密度指向性表示では、物質のもつ質感を忠実に再現できることになる<sup>28)</sup>。この場合は、ビロードなどの布地の表現、肌のきめ細かさなどの柔らかさやみずみずしさといった微妙な質感も表現できるようになる。図13に、72 指向性 VGA ディスプレイ<sup>29)</sup>を用いて表示した立体像の例を示す。主観評価により、同じ解像度をもつ二次元ディスプレイより高い質感が

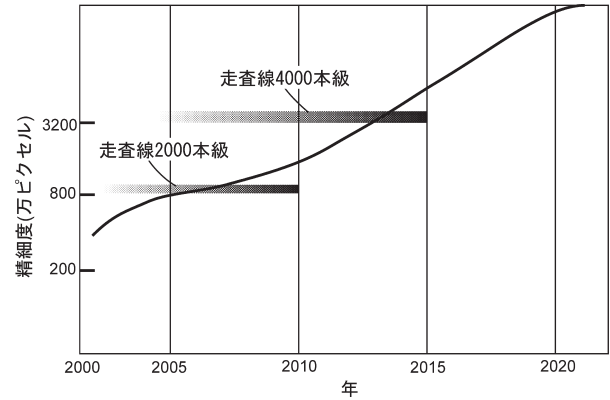


図14 将来のフラットパネルディスプレイのピクセル数に関する予測。

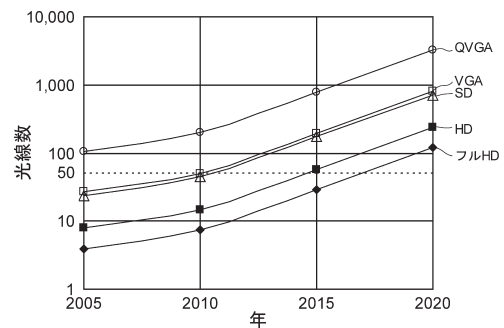


図15 フラットパネルを用いた空間像方式の光線数と解像度の予測。

得られることが示されている。

以上のように、立体ディスプレイは、単に立体感を表現できるだけでなく、物質のもつ質感も表現できる。すなわち、従来の二次元ディスプレイでは、いかに解像度を増しても、階調数を増しても表現することができない質感を表現することができる。ただし、立体像の各点から光線を拡散させる奥行き標準化方式の立体表示は、質感表現には適していない。

## 9. 将来展望

フラットパネルディスプレイを用いた立体ディスプレイの性能は、フラットパネルディスプレイの解像度によって決まる。そこで、ここではフラットパネルディスプレイの進歩の予測をもとに、空間像方式の立体ディスプレイの将来について予測してみる。

図14に、将来のスーパーハイビジョン放送のロードマップに沿ったフラットパネルディスプレイの解像度増加の予測<sup>30)</sup>を示す。ただし、2015年以降は、立体ディスプレイ用途に向けて開発が持続すると仮定している。これをもとに、立体表示の光線数を代表的な解像度について予測した結果を図15に示す。2020年ころまでには、ハイビジョ

ンクラスの解像度で100本以上の光線数を有する三次元ディスプレイが実現できる可能性があることがわかる。したがって、水平パララクスタイプであれば、自然な立体ディスプレイが実現できる可能性がある。フルパララクスタイプの自然な立体ディスプレイの実現は、これ以降になると予想される。

フラットパネルディスプレイを用いた立体ディスプレイの性能向上は、おもに、フラットパネルディスプレイの解像度の向上にかかっている。しかし、現在では、立体ディスプレイ専用のフラットパネルディスプレイの開発は残念ながら行われていない。二次元表示用に開発されたパネルを流用しているにすぎない。高精細化はもちろんのこと、今後は、高速駆動による時分割表示を用いた解像度増加などの方法も考えられる。一方で、高精細化には当然のことながら物理的な限界が存在するので、デバイス技術にばかり依存するのではなく、立体表示原理にも何らかのブレークスルーが必要になる可能性もある。いずれにしても、立体表示専用のパネル開発が本格化すれば、さまざまな工夫がなされるに違いない。一方で、新しいディスプレイ技術の実用化は、それを支えるインフラ技術の存在を必要とするため、いかに立体映像産業を立ち上げていくかが今後の課題であろう。ディスプレイ産業は、日本の産業技術の発展を支えてきたわが国の核となる産業であり、これが持続的な発展を維持するためには、映像の立体化は不可避である。

## 文 献

- 1) 高度立体動画通信プロジェクト最終成果報告書 (通信・放送機構, 1997).
- 2) 高度三次元動画遠隔表示プロジェクト最終報告書 (通信・放送機構, 2002).
- 3) 原島 博 (監修): 3次元画像と人間の科学 (オーム社, 2000).
- 4) 大越孝敬: 三次元画像工学 (朝倉書店, 1991).
- 5) 泉 武博 (監修): 3次元映像の基礎 (オーム社, 1995).
- 6) 3次元情報のインタラクティブな利用に関する調査研究報告書 ((社)日本オプトメカトロニクス協会, 2006) ([http://www.joem.or.jp/chosa\\_top.htm](http://www.joem.or.jp/chosa_top.htm)).
- 7) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai: "Apparent 3-D image perceived from two luminance-modulated 2-D images displayed at different depths," *Vision Res.*, **44** (2004) 785-793.
- 8) 高田英明, 陶山史郎, 伊達宗和, 昼間香織, 中沢憲二: "前後2面のLCDを積層した小型DFDディスプレイ", *映像情報メディア学会誌*, **58** (2004) 807-810.
- 9) 圓道知博: "全周観察型立体ディスプレイ", *光学*, **35** (2006) 410-415.
- 10) 舘 暉: "裸眼立体ディスプレイとバーチャルリアリティ", *光学*, **35** (2006) 423-427.
- 11) 平山雄三: "平置き型立体ディスプレイシステム", *光学*, **35** (2006) 416-422.
- 12) K. Mashitani, G. Hamagishi, M. Higashino, T. Ando and S. Takemoto: "Step barrier system multiview glassless 3D display," *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, San Jose, California (2004), *Proc. SPIE*, **5291** (2004) 265-272.
- 13) C. van Berkel: U.S. Patent No. 6064424 (2000).
- 14) 石井源久: "フラクショナル・ビュー・ディスプレイ—非整数ビューの立体視—", 3次元画像コンファレンス2004 (2004) pp. 65-68.
- 15) 梶木善裕: "超多眼領域を用いた3Dディスプレイ", *光技術コンタクト*, **36** (1998) 624-631.
- 16) 本田捷夫, 永井大輔, 稲垣隆二, 下松雅也: "投影光学系扇形配列方式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 (2001) pp. 165-168.
- 17) 須佐見憲史, 阿部真也, 梶木善裕, 圓道知博, 畑田豊彦, 本田捷夫: "超多眼立体画像に対する輻輳, 調節応答", 3次元画像コンファレンス2000 (2000) pp. 155-158.
- 18) 須佐見憲史, 下松雅也, 永井大輔, 梶木善裕, 圓道知博, 畑田豊彦, 本田捷夫: "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 (2001) pp. 121-124.
- 19) 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** (2003) 293-300.
- 20) Y. Takaki: "Density directional display for generating natural three-dimensional images," *Proc. IEEE*, **94** (2006) 654-663.
- 21) H. Nakanuma, H. Kamei and Y. Takaki: "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation," *IS & T/SPIE 17th Annual Symposium Electronic Imaging*, San Jose (2005), *Proc. SPIE*, **5664** (2005) 28-35.
- 22) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images," *IS & T/SPIE 17th Annual Symposium Electronic Imaging*, San Jose (2005), *Proc. SPIE*, **5664** (2005) 56-63.
- 23) 堀越 力, 壺井雅史, 榛葉敏彦, 高木康博: "モバイル用途の3Dディスプレイ端末の試作", 3次元画像コンファレンス2005 (2005) pp. 45-48.
- 24) 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** (2004) 69-74.
- 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方性", *映像情報メディア学会誌*, **58** (2004) 1263-1270.
- 26) G. Westheimer: "The Maxellian view," *Vision Res.*, **6** (1966) 355-385.
- 27) H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan: "A practical model for subsurface light transport," *Computer Graphics, SIGGRAPH 2001 Proceedings* (2001) pp. 511-518.
- 28) Y. Takaki and T. Dairiki: "High-appearance images generated by high-density directional display," *The 12th International Display Workshops*, Takamatsu (2005) pp. 1777-1780.
- 29) Y. Takaki and T. Dairiki: "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation," *IS & T/SPIE 18th Annual Symposium Electronic Imaging*, San Jose (2006) 60551H1-8.
- 30) 奥井誠人: "3次元ディスプレイ", *NIKKEI MICRO-DEVICES*, No. 241 (2005) 82-83.

(2006年5月25日受理)