

3D ディスプレイにおける質感再現

高 木 康 博

Reproduction of Object Appearances by Three-Dimensional Display

Yasuhiro TAKAKI

The appearances of objects, such as glare, transparency, and softness, are the results of reflection, refraction, and diffusion of rays near surfaces of objects. The high-density directional display, which was originally developed to realize a natural three-dimensional display that solves the visual fatigue caused by the accommodation-vergence conflict, precisely controls the ray directions so that it can reproduce appearances of objects. The subjective evaluation showed that the high-density directional displays provided higher appearances and presence than the conventional 2D displays do.

Key words: three-dimensional display, three-dimensional images, appearance reproduction, natural three-dimensional display, subjective analysis

最近のディスプレイ技術の発展は目覚しく、すでに、フル HD 解像度 (1920×1080)、階調数 12 ビット、フレームレート 240 fps を達成している。しかし、二次元ディスプレイでは、解像度をいくら高めても、階調数をいくら増しても、例えば、ダイヤモンドの輝き、織物の艶やかさ、画家のタッチといった物質のもつ質感を忠実に再現することは難しい。輝きは左右の眼に入る反射光の強さの違いに起因し、艶やかさは物質表面での光線方向の微妙な変化に起因し、筆のタッチは顔料表面の立体形状に起因するからである。すなわち、物質のもつ質感を忠実に再現するためには、ディスプレイから発せられる光線の指向性を詳細に制御することが必要である。

コンピューターグラフィックスの分野では、物質の質感をより忠実に表現するために、BRDF (bi-directional reflection distribution function)¹⁾ や BSSRDF (bi-directional scattering surface reflectance distribution function)²⁾ などに代表される物質表面での光線の反射、屈折、および拡散をより正確に取り扱うモデリング手法が用いられるようになってきている。しかし、その出力には、光線の方

向を再現できない従来の二次元ディスプレイが用いられている。

光線の指向性を詳細に制御する技術として、われわれは高密度指向性表示^{3,4)}を提案している。これは、物体から発せられる光線を詳細に再現することで、従来の立体ディスプレイのもつ調節輻輳矛盾に起因する眼精疲労などの問題点を解決した自然な立体表示を実現するために開発したものである。

本解説では、高密度指向性表示ディスプレイによる質感と立体感の再現性を調べるために実施した主観評価実験⁵⁾の結果について述べる。

1. 質感表現と光線の指向性

すべての物質は、固有の質感を有している。ここでは、物質のもつ質感を、光線の反射、屈折、拡散といった3つの物理現象をもとに分類する。いくつかの典型的な物質のもつ質感を表1に分類した。

従来のディスプレイでは、光線はスクリーンから拡散するため、厳密に言えば、拡散性物質の質感しか忠実に再現

東京農工大学大学院共生科学技術研究院 (〒184-8588 小金井市中町 2-24-16) E-mail: ytakaki@cc.tuat.ac.jp

表1 代表的な物質の質感の分類。

物 質	反 射	屈 折	拡 散
クリスタル/ガラス	◎	◎	×
金 属	◎	×	×
液 体	○	◎	×
大 気	×	○	○
肌	○	○	◎
陶 器	○	○	◎
プラスチック	○	×	◎
木	×	×	◎
紙	×	×	◎
砂	×	×	◎

できない。クリスタル、ガラス、金属といった物質は、視点の移動により急激に輝きが変化する。また、その三次元形状は、物質表面での光の拡散がほとんどないことから、光線の反射や屈折からしか知ることができない。従来のディスプレイでは、これらの物質の質感を表すために、物質を回転させて表示するといった技法が用いられてきた。しかし、回転により輝きを表現することはできるが、三次元形状を伝えることは難しい。

次に、物質のもつ質感を忠実に再現するために必要な光線のサンプリング角度ピッチについて考える。図1に人間の視覚光学系を示す。人間の眼の瞳は有限の大きさをもつため、瞳の大きさを d で観察距離を z で表すと、角度 $\delta\theta = \tan^{-1}(d/z)$ 以下の光線の角度変化を人間は知覚することができない。したがって、角度 $\delta\theta$ が質感再現に必要な光線のサンプリング角度ピッチであると考えられる。

人間の瞳の直径 d は周囲の明るさによって変化し2 mm から8 mm であるといわれているが、ここでは、平均値をとって5 mm とする。観察距離 z が600 mm の場合は、必要なサンプリング角度ピッチ $\delta\theta$ は 0.48° となる。このように、光線のサンプリング角度ピッチを非常に小さくする必要がある。観察距離が600 mm の位置で、例えば、両眼間隔の3倍以上の約200 mm 以上の視域を確保するためには、視域角を約 20° 以上にする必要があり、表示する指向性光線の方向数としては約40以上は必要である。本研究で用いる高密度指向性ディスプレイでは、光線の指向性の制御は水平方向に限定している。当然、光線の制御は水平方向と垂直方向の両方向に行うことが好ましいが、この場合は必要な光線の方向数は2乗で増加することになる。

2. 高密度指向性ディスプレイ

われわれは、高密度指向性表示を、自然な立体表示の実

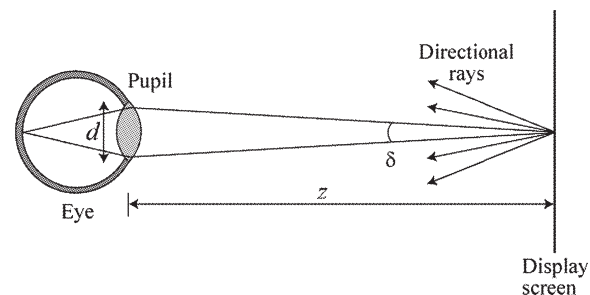


図1 視覚光学系と質感再現のための光線進行方向のサンプリング角度ピッチ。

現方法として以前に提案している^{3,4)}。これは、物体から発せられる光線の進行方向を非常に小さな角度ピッチでサンプリングし詳細に再現することで、立体像の1点から発せられる光線が同時に2本以上瞳に入射する状態を作り出し、立体像に対する眼のピント合わせを可能にし、眼精疲労の原因である調節輻輳矛盾を解決しようとするものである⁶⁾。同時に、滑らかな運動視差も実現できる⁷⁾。実は、調節輻輳矛盾を解決する自然な立体表示を実現するための光線の表示条件と、忠実な質感表現を実現するための光線の表示条件は一致することがわかる。

われわれは、高密度指向性ディスプレイの構成方法として、変形二次元配置した光学系を用いて、水平方向に高密度指向性表示を実現する方法を提案している。これにはプロジェクション型とフラットパネル型の2種類の構成方法がある。プロジェクション型の構成方法を用いて、水平表示角度ピッチが 0.33° で解像度 QVGA 相当の64指向性ディスプレイ^{3,4)}、水平表示角度ピッチが 0.23° で解像度 QVGA 相当の128指向性ディスプレイ⁸⁾、さらに、水平表示角度ピッチが 0.28° で解像度 SVGA の128指向性ディスプレイ⁹⁾を試作している。フラットパネル型の構成方法を用いて、水平表示角度ピッチが 0.38° で解像度 320×400 の72指向性ディスプレイ¹⁰⁾、水平表示角度ピッチが 0.38° で解像度 640×400 (VGA 相当) の72指向性ディスプレイ¹¹⁾、および、水平表示角度ピッチが 0.71° で解像度 256×128 の30指向性ディスプレイ¹²⁾を試作している。

3. 主観評価実験

次に、高密度指向性ディスプレイによる質感再現性を評価するために行った主観評価実験の結果について紹介する。

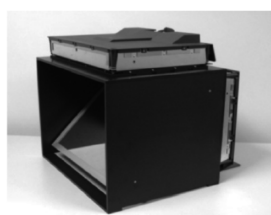
実験には、フラットパネル型のVGA解像度および解像度 320×400 の72指向性ディスプレイ^{10,11)}を用いた。仕様を表2に、外観を図2に示す。両者の光線の水平サンプリ

表2 72指向性ディスプレイの仕様。

三次元解像度	640×400, 320×400
指向性数	72
水平角度ピッチ	0.38°
水平視域角	27.6°
スクリーンサイズ	22.2 インチ



(a)



(b)

図2 72指向性ディスプレイの外観。(a) 解像度 320×400, (b) 解像度 640×400 (VGA 相当)。

ング角度ピッチは 0.38° で同一であり、観察距離が 734 mm 以内で、瞳孔径 5 mm とした場合の眼のサンプリングピッチ以下になる。すなわち、空間の 1 点を通る光線が 2 本以上同時に瞳に入射するようになる。比較のために用いた二次元ディスプレイには、72 指向性ディスプレイを構成する液晶パネルと同一のものをを用いた。

実験に用いた 5 種類の評価画像を図 3 に示す。同図 (a) の swan はガラスの質感、同図 (b) の spoon は金属の質感、同図 (c) の toy は布地の質感、同図 (d) の dog は毛の質感、同図 (e) の melon は果肉の質感を表現するために用意した。これらの評価画像は、実在の物体を撮影したもので、平行移動ステージに IEEE1394 カメラ（解像度

表3 主観評価実験に用いた評価用語対。

評価用語対		
1.	柔らかい	硬い
2.	粗い	細かい
3.	重い	軽い
4.	暗い	明るい
5.	印象の薄い	印象的な
6.	光沢のない	光沢のある
7.	不透明な	透明な
8.	輝きの変化が不自然な	輝きの変化が自然な
9.	弾力のない	弾力のある
10.	ざらざらした	つるつるした
11.	実在感のない	実在感のある
12.	奥行きのない	奥行きのある

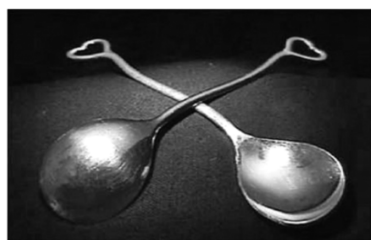
1280×960) を載せて水平方向に移動しながら多数の画像を撮影し、補間処理により生成した¹³⁾。

評価に用いた 12 個の評価用語対を表 3 に示す。これらの評価用語対に対して 7 段階評価で回答させた。被験者数は 10 名である。被験者 10 名の視力は全員 1.0 以上であった。それぞれの評価画像ごとに、72 指向性表示（解像度 640×400 と 320×400）と二次元表示（解像度 640×400 と 320×400）の 4 種類の表示条件でランダムな順番で提示した。画像の表示時間は 60 秒とし、回答時間には制限を設けなかった。観察距離は 600 mm とした。被験者には、頭を左右に動かして異なる水平方向から画像を観察するように指示した。なお、72 指向性表示では、大きく左右に頭を動かすと繰り返し画像が見えるが、これは評価に加えないように指示した。

3 回の実験で得られたデータをすべてまとめて主成分分析を行った。第 1 主成分と第 2 主成分、および、評価用語



(a)



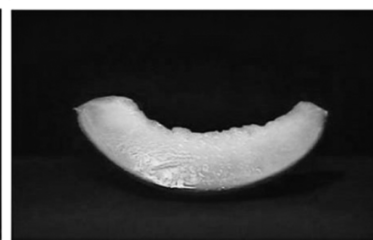
(b)



(c)



(d)



(e)

図3 主観評価に用いた画像。(a) swan, (b) spoon, (c) toy, (d) dog, (e) melon.

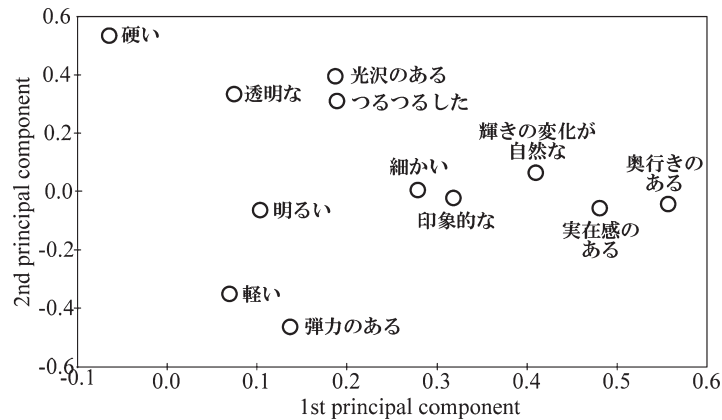


図4 主成分分析による第1主成分係数と第2主成分係数。

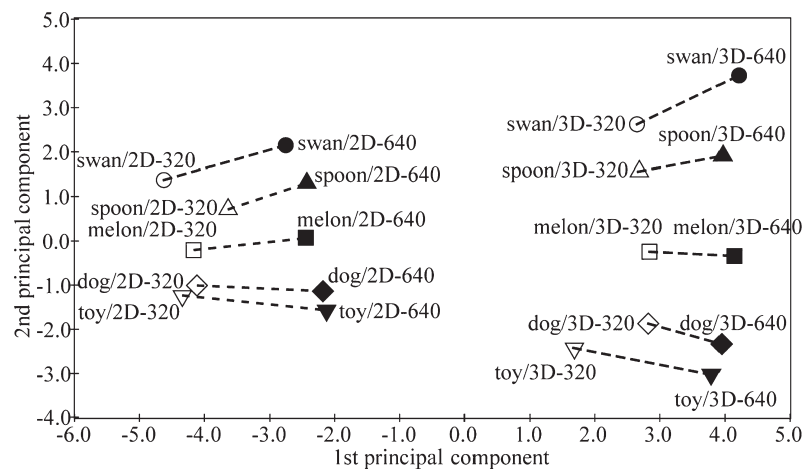


図5 評価画像の主成分スコア。

の関係を図4のグラフに示す。第1主成分の寄与率は70.3%で、第2主成分の寄与率は20.2%であった。グラフから、第1主成分は、「奥行きのある」「実在感のある」「輝きの変化が自然な」がプラスの値で、係数が大きかった。これらの評価用語群から、第1主成分は実在感や立体感を示していると解釈でき、プラスに大きいほど実在感や立体感の表現にすぐれ、マイナスに大きいほど劣っていると考えられる。第2主成分は、「硬い」「光沢のある」「透明な」および「つるつるした」がプラスの値で係数が大きく、「弾力のある」と「軽い」がマイナスの値で係数が大きかった。第2主成分は質感を示していると解釈した。第2主成分がプラスの場合には、光線の反射や屈折に起因する質感を示していると考えられる。マイナスの場合は、軽さや弾力感の寄与が大きく、これらは本来は触覚にかかわるものであるが、視覚的には布地や毛のように物質表面のみでなく物質表面下層における光の散乱に起因する質感を表すと考えられる。

図5に各評価画像に対する主成分スコアの値を示す。第

1主成分の値はプラスに大きいほど実在感や立体感の表現にすぐれ、マイナスに大きいほど劣っていると考えられる。第2主成分はプラスの値からマイナスの値まで異なる質感を表すことを考えると、それぞれの表示条件で5種類の評価画像に対して第2主成分がもつ値の範囲が広いほど高い質感表現が実現できていると考えられる。

第1主成分では、4つの表示方法の間で $p < 0.01$ の両側検定において有意差が認められた。この結果より、72指向性表示と二次元表示で、解像度 320×400 よりも解像度 640×400 のほうが高い実在感が得られることがわかった。また、解像度が同じ場合には、二次元表示よりも72指向性表示のほうが高い実在感が得られていることがわかった。さらに、解像度 640×400 の二次元表示よりも、解像度 320×400 の72指向性表示のほうが高い実在感が得られていることがわかった。

第2主成分に関しては、それぞれの表示画像に対して各表示方法での平均値の差の検定を行った。その結果、評価

画像 swan と toy では、解像度 320×400 と解像度 640×400 の間に、72 指向性表示 ($p < 0.01$) と二次元表示 ($p < 0.05$) の両方の表示条件で有意差があった。解像度が同じ場合には、二次元表示と 72 指向性表示の間に有意差 ($p < 0.01$) があった。また、解像度 640×400 の二次元表示と、解像度 320×400 の 72 指向性表示の間に有意差 ($p < 0.01$) があった。評価画像 dog では、二次元表示の解像度 320×400 と解像度 640×400 の間に有意差が認められなかったが、それ以外の場合では swan と toy とほぼ同様な有意差が認められた。評価画像 spoon に関しては、二次元表示の解像度 320×400 と 72 指向性表示の解像度 640×400 の間に有意差 ($p < 0.05$) が認められた。評価画像 melon に関しては、表示条件による有意差が認められなかったが、これは melon が反射や屈折に起因する質感と柔らかさや弾力感の質感の両方をもっているためであると考えられる。

以上より、今回の実験では、二次元表示より 72 指向性表示のほうが、解像度 320×400 より解像度 640×400 のほうが、質感の再現性にすぐれ、高い実在感と立体感の表現が可能であることがわかった。また、解像度 640×400 の二次元表示と解像度 320×400 の 72 指向性表示で、ほぼ同等の質感表現が可能であることがわかった。

自然な立体表示を実現するために開発された高密度指向性表示は、光線の表示方向を詳細に再現する。そのため、物体の奥行きが再現できるだけでなく、物質のもつ質感も再現できることを紹介した。

文 献

- 1) G. J. Ward: "Measuring and modeling anisotropic reflection," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, **26** (1992) 265-272.
- 2) H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan: "A practical model for subsurface light transport," *Proc. of ACM SIGGRAPH 2001* (Los Angeles, August 2001) pp. 511-518.
- 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** (2003) 293-300.
- 4) Y. Takaki: "High-density directional display for generating natural three-dimensional images," *Proc. IEEE*, **94** (2006) 654-663.
- 5) 大力孟司, 畑田豊彦, 高木康博: "VGA 解像度 72 指向性ディスプレイによる質感表現", 映像情報メディア学会誌, **61** (2007) 1795-1802.
- 6) 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.
- 7) 渡部正行, 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物体の奥行き知覚に与える効果", 映像情報メディア学会誌, **60** (2006) 1956-1963.
- 8) H. Nakanuma, H. Kamei and Y. Takaki: "Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation," *Proc. SPIE*, **5664** (2005) 28.
- 9) K. Kikuta and Y. Takaki: "Development of SVGA resolution 128-directional display," *Proc. SPIE*, **6490** (2007) U-1-8.
- 10) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images," *Proc. SPIE*, **5664** (2005) 56-63.
- 11) Y. Takaki and T. Dairiki: "72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation," *Proc. SPIE*, **6055** (2006) X-1-8.
- 12) M. Tsuboi, M. Fujioka, Y. Takaki and T. Horikoshi: "Real time rendering for a full parallax 3D display using high-density directional images," *Proc. of the 13th International Display Workshops* (2006) p. 1379.
- 13) 吉川博志, 高木康博: "高密度指向性画像を生成する 3 次元カメラの基礎実験", 映像情報メディア学会誌, **58** (2004) 75-81.

(2009 年 9 月 21 日受理)