

計算機合成ホログラムを用いた立体映像の評価法 Evaluation method of 3D Image Using Computer Generated Hologram

坂本 雄児†
Yuji Sakamoto

1. まえがき

近年、製品化されている裸眼2眼式、多眼式、インテグラルフォトグラフィ(IP)、ホログラフィ方式など様々な方式を用いた立体映像を表示システム(以下、3Dディスプレイと呼ぶ)が研究・開発されてきている[1, 2, 3]。これらのシステム毎に表示される立体映像の光学特性が異なり、様々な利点や問題点を持っているが、映像の評価は主観評価で行われる場合がほとんどであった[4]。このため、各システム間の相対的な評価を行うには実機を用意する必要があり、多数のシステム間で比較を行なうことは困難であった。これを解決するために、客観かつ定量的な評価が望まれているが、このような要求を満たす評価指標に関して十分な研究が行われていないのが現状である。

画像の定量評価法として信号対雑音比(SNR:Signal-to-noise ratio)が有効な定量指標である。本稿ではこのSNRを拡張した空間光分布の信号対雑音比(VSNR:Volume SNR)[5]を用いた3Dディスプレイの映像評価法の検討を行う。実験では計算機合成ホログラムのアルゴリズムを用い計算上の3Dディスプレイの表示映像のVSNRを求め、VSNRの映像評価法として有効性とその特性を示す。

2. VSNR

2.1 SNRと立体映像

SNRは、原信号の実効値 A_s に対して、システムにおいて付加される雑音信号の実効値 A_n の比を求めるもので、

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{A_s}{A_n} \right) \quad (1)$$

で与えられる。画像においても原画像と雑音成分で同様求められる。SNRが高いほど原画像に近く、画質が良いものと扱われる。

しかし、3Dディスプレイではデバイスに表示される画像は方式毎に異なり、評価の際に利用できる共通の画像が存在しない。例えば、裸眼2眼式では2枚の画像であり、多視点式では多数の方向から撮影した画像群をもとに統合された画像、ホログラフィ方式では光の干渉縞と様々である。このため、SNRによる評価法を直接的に立体映像に用いることはできない。また、表示させた立体映像のSNRを測定する方法も考えられるが、焦点をどこにするかの問題がある。つまり、立体画像では焦点が合っている物体は鮮明に撮影され、合っていない物体はボケて見える現象があり、これ自体が立体映像の奥行き感の重要な要素となっている。このため、特定の焦点距離で撮影された画像をもとに評価を行うことができない。さらに、この方法では視点が固定されてしまうため、運動視差や回り込み特性等の評価ができない。

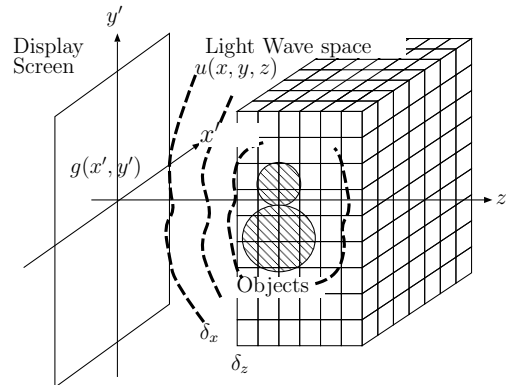


図1 光空間分布

2.2 光空間分布

3Dディスプレイが発する光は3次元空間に光の空間分布を作り出す。人間はこの光空間分布を観察することによって立体感を得ており、この光空間分布こそが立体映像の本質とも言える。このため、定量評価指標の計算には、光空間分布の推定が重要となる。

3Dディスプレイが発する光空間分布は、3Dディスプレイのデバイス直後の光空間分布がこれが観察者方向へ伝搬することによって作られる(図1)。ここで、3Dディスプレイのデバイス直後の平面を想定することができるとし、その面上の光空間分布 $g(x', y')$ とすると、距離 z 離れた平面での光空間分布 $u(x, y, z)$ はフレネル-キルヒホッフの回折積分式で求められ、

$$u(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') e^{-jk r} dx' dy' \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 r は (x, y, z) と (x', y') の距離、 k は波数、 j は虚数単位である。これを z を一定間隔で計算することによって、3Dディスプレイが作り出す3次元空間の光空間分布を推定することができる。また、一般に3Dディスプレイの表示デバイスは平面状か、平面の組合せによって作られているため、 $g(x, y')$ を理論的に得ることは容易である。

一方、実際に物体が発して(反射して)作られた光空間分布としては、レンズ等の光学系での結像理論を考える。これは、インコヒーレント結像と呼ばれ、光空間分布強度 $|u_{inc}(x, y, z)|^2$ は

$$|u_{inc}(x, y, z)|^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} |g(x', y')|^2 |e^{-jk r}|^2 dx' dy' \quad (3)$$

で与えられる。実際に人間が物体を観察する際に得られる像は、インコヒーレント結像した像であり、インコヒーレント結像を用いて光空間分布を推定することは妥当なものと思われる。

式(2)(3)の光空間分布の式は、計算機合成ホログラムで用いられる伝搬、回折の式と同等であり、計算機合成ホログラムの種々のアルゴリズムを用いて計算することができる。

† 北海道大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

2.3 VSNR

もし、実際に物体が発して(反射して)作られた光空間分布と3Dディスプレイが作る光空間分布が同じであれば理想的な立体映像であり、ずれが大きいほど画質が劣化していると言える。そこで、この2つの光空間分布の差を定量評価指標として利用することができる。ここでは、上記の差の定量的な指標として、SNR式(1)を用いる。ただし、実物体の光空間分布の光振幅 $u_{inc}(x, y, z)$ を原信号、3Dディスプレイの作る光空間分布 $u(x, y, z)$ を原信号に雑音成分が付加されたものとして考える。この定量指標をVSNRと呼ぶものとする。

3Dディスプレイの作り出す光空間分布は、その振幅や直流成分が実物体の物と異なるため各々の信号の実効値によって正規化した値を $u'_{inc}(x, y, z)$, $u'(x, y, z)$ として用いる。これより、雑音成分となる $n'(x, y, z)$ を

$$n'(x, y, z) = u'(x, y, z) - u'_{inc}(x, y, z) \quad (4)$$

で推定する。VSNRは、式(1)において A_s を $u'_{inc}(x, y, z)$ の実効値、 A_n を $n'(x, y, z)$ の実効値として計算して得ることができる。

3. 実験

上記のVSNRを計算機シミュレーションによって各種の3Dディスプレイで求めた。表示する物体は仮想モデルを用い、式(1)および(2)を計算機プログラムのアルゴリズムで計算することによってディスプレイ直後の波面 $g(x', y')$ を求めた。なお、各3Dディスプレイとも光空間分布は同一で、実験は表1に示すパラメータで行なった。

理想的な光学特性を持つと言われているホログラフィ方式のVSNRは、物体数や配置等によって変化はするが、文献[5]では10dBを超えていることが示されている。しかし、この値は二次元の画像等で議論されるSNRに比べ非常に低い。この原因はホログラフィ特有のスペckルノイズによるもので、光空間分布にノイズが多いことによる。ホログラフィ方式では、このスペckルノイズの改善が重要であることが示唆される。

IP方式はホログラフィ方式比べて劣るものの、優れた立体映像を表示する。図2(a)にIP方式の物体数によるVSNRの変化を示すが、ホログラフィ方式に比べVSNRが低く、物体数によってVSNRが大きく変化することが分かる。一つの原因は、IP方式では表示された光学像の解像度が、使用されたレンズアレイのレンズのサイズによる。そこで、図2(b)にレンズサイズとVSNRの関係(物体数は2)を示すが、レンズのサイズが小さい程、VSNRが改善されていることが分かる。このことは、VSNRが解像度も含めた評価指標となっていることを示している。

その他の裸眼2眼式の3DディスプレイにおいてはVSNRは非常に低くない、比較として有効な結果が得られなかった。これは、水平方向視差しか持たない点と、視点位置での画像だけを対象としているため、光空間分布が実施に物体を置いた場合と大きく異なることが原因である。しかし、実際には人間には立体知覚がされることから、このことから、VSNRではフルパララクス(鉛直水平方向に視差がある)かつモーションパララクス等がある立体映像として高品質な方式に適用しており、裸眼2眼式等は上記のようにVSNRで比較すること自体に問題があると言える。

4. まとめ

VSNRを用いて様々な3Dディスプレイ方式によって表示される立体画像の画質を計算上で定量的に評価した。特にIP

表1 VSNR計算におけるパラメータ。

Display screen size	20[mm] × 20[mm]
Simulation range in z direction	70[mm] - 100[mm]
Voxel size $\delta x, \delta y, \delta z$	10[μ m] × 10[μ m] × 2[mm]
Wave length λ	660[nm]

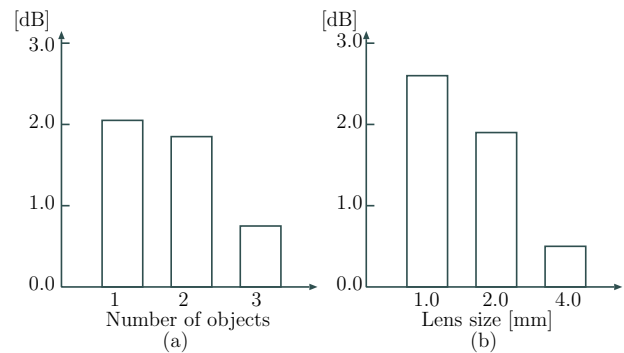


図2 IP方式のVSNR (a) レンズサイズによる影響 (b) 物体数による影響

方式において様々なパラメータで評価し、解像度との関係がVSNRにも反映されることが分かった。また、IP方式とホログラフィ方式は一般に認識されている両3Dディスプレイ方式の優劣に近いものであった。これは、VSNRによる立体映像の評価の有効性を示すものであるが、今後、実験の充実と主観評価との比較を行ない、VSNRの有効性をより明らかにする必要がある。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金(課題番号22650015)を用いて行われた。

参考文献

- [1] A. Sullivan, "3 Deep: new displays render images you can almost reach out and touch," *Spectrum*, IEEE, 42(4), 30-35 (2005).
- [2] Hoshino, H; Okano, F; Isono, H; Yuyama, I, "Analysis of resolution limitation of integral photography," *JOSA A*, 15(8), 2059-2065 (1998).
- [3] Atsushi Katou, Yuji Sakamoto, "An electro holography using reflective LCD for enlarging visual field and viewing zone with the Fourier transform optical system in CGH," *Proc. SPIE Photonics WEST 2010*, 7619-36, 23-28 (2010).
- [4] F. Okuyama, "3D Images and Virtual Fatigues," *Proc. of 4th IDW*, 839-842 (1997).
- [5] Yuji Sakamoto, Fumio Okuyama, "Quantitative quality measure based on light wave distribution to access 3D display", *Proc. of SPIE Vol.7957* p.7957-15