

3D マルチメディアコンテンツ再生システムの性能評価尺度の考察

妹尾孝憲*1 青木輝勝*1 安田浩*1 小暮拓世*1 小池真由美*1

東京大学 先端科学技術研究センター*1

近年マルチメディアコンテンツは、映像符号化方式の進化や CG 技術を用いた 3D 化などにより、日増しに画質・臨場感が高まりつつある。そこでは、これまで映像評価尺度として定着している信号対雑音比(SNR)のみでは、評価出来ない項目が増えて来た。本稿では、3D マルチメディアコンテンツ再生システムの性能を定量的に評価する尺度として臨場感度(Reality Measure)を提案する。臨場感度 R は、没入感を与えるパラメータ(画素密度、視野カバー率)と、画質を与えるパラメータ(画素の量子化ビット数、再生映像の SN 比)と、立体感を与えるパラメータ(両眼視差、輻輳角、焦点調節、運動視差、その他の効果)の関数とし、基準値を 100 と定義した。この式を用い、各種システムの評価を行った結果、CAVE/多面体立体表示システムの臨場感度として 67.4 を得た。

A Study on Measurement Criteria for 3D Multimedia Content Reproduction System

Takanori Senoh *1 Terumasa Aoki*1 Hiroshi Yasuda*1
Takuyo Kogure*1 Mayumi Koike *1

*1 University of Tokyo, RCAST

Recently, multimedia contents are becoming richer and higher-reality thanks to the progresses of coding technology and three-dimensional representation technology. There, a signal-to-noise ratio, which has been a standard quality measure, is no more enough. In this paper, "Reality Measure" is newly proposed. "Reality Measure" is defined as a function of Involvement Feeling parameter, Image Quality parameter and Three-Dimensionality parameter. Several 3D reproduction systems are evaluated and "Reality Measure" of 67.4 is measured with the Polyhedron Three-Dimensional Image Display System/CAVE.

1. はじめに

マルチメディアコンテンツの符号化・再生方法は日増しに進化している。例えば ISO (国際標準化機構) 傘下の MPEG (Moving Picture Expert Group) 標準では、MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 と新標準が出る度にその符号化効率 は 3 ~ 6dB づつ改善されており、現在の MPEG-4 AVC (Advanced Video

Coding) 規格^[1]では、MPEG-1 の約 4 倍の高画質を同じビットレートで実現することが出来るなど、高精細度映像の高効率伝送 / 蓄積による臨場感再生が可能になりつつある。また一方では、更に高臨場感・没入感を得る為の立体映像の撮像・符号化・表示技術の研究開発が精力的に進められている。MPEG でも 2001 年以来、3D AV 符号化方式の標準化検討が継続して行われており、2005 年からはマルチビュー映像符号化方式の標準化が開始された^[2]。

このような状況において、今後は高臨場感実現を目指す3Dコンテンツの符号化・再生システムの品質評価がより重要になると思われるが、3D映像ではこれまで広く用いられて来た信号対雑音比(SNR)の測定だけでは表しきれない、立体感や、臨場感・没入感の評価が重要であり、これらのパラメータの考慮なくしてはシステムの性能を正確には評価出来なくなって来た。

本稿では、このような観点から3Dマルチメディアコンテンツ再生システムの品質を総合的かつ定量的に評価する尺度として、臨場感度(Reality Measure)を導入する事を提案する。以下では、従来用いられて来た各種の映像品質評価尺度をレビューし、それらを元に新たに臨場感度Rを定義する。臨場感度は、3Dコンテンツ再生システムの提示するコンテンツへの没入感と、再生される映像の品質と、再生映像の与える立体感の関数とし、夫々の関数形を検討する。又、定義した関数を用いて各種の立体映像再生システムの臨場感度を試算し、得られた値の意味を考察すると共に今後の展望を述べる。

2. 3D映像評価に関する従来研究

2.1 画質評価

従来、2D映像の品質評価には信号対雑音比(SNR)が広く用いられて来た。

$$SNR = 10\log_{10}(S/N) \quad (1)$$

ここで、Sは平均信号電力、Nは平均雑音電力である。映像の世界では信号のピークレベルに注視点が集まる事が多く、そのピーク電力と平均雑音電力を比較するPSNR(Peak Signal-to-Noise ratio)で映像の品質を示す事が一般的に行われている。

$$PSNR = 10\log_{10}(255^2/N) \quad (2)$$

PSNRは、映像の符号化・再生システム中での信号劣化を評価するには適しており、立体映像を構成する一手段であるマルチビュー映像符号化方式の評価^[9]にも用いられているが、立体映像の観点からのパラメータは入っていない。

立体映像としてのステレオ画像の品質評価方法に関しては、エッジとそれ以外の部分での画質劣化の見え方の相違や視差情報を考慮した画質評価モデルとしてPQS_{stereo}(Picture Quality Scale for coded stereoscopic image)が提案^[4]されている。ここでは、左右の原画像と符

号化画像のRGB値をCIEのL*a*b色空間成分に変換し、この符号化誤差から歪要因の主成分分析を行い、更にテキストチャ特徴量に関する主成分を加えた後、主観評価実験により得られたMOS(Mean Opinion Score)値との関係を非線形重回帰モデルに当てはめてPQS_{stereo}の値を得ている。

$$PQS_{stereo} = 4/[1+\exp\{- (PQS_{smr} - 3)\}] + 1 \quad (3)$$

$$PQS_{smr} = b_0^* + \sum_{i=1}^{N_i} b_i^* Z_i + \sum_{j=1}^{M_j} b^*_{N+j} Y_j$$

ここで、 b_i^* は回帰係数、 Z_i は基礎歪要因の主成分、 Y_j はテキストチャ特徴量の主成分である。

この方法は、主観評価実験から得られる主観画質のMOS値を目標値として画質評価モデルの係数を決める為、主観評価実験値との整合性が良いが、やはり画質のみの評価であり、没入感や立体感の項は含まれていない。

2.2 臨場感評価

映像が臨場感を与える要因としては、

- A. 視野(画角)
- B. 解像度(精細度)
- C. 立体感(奥行き感)
- D. 双方向性(インタラクティブ性)
- E. 異種感覚協調性(映像と音の協調など)

などがある事が知られており^[5]、これらが融合する事で臨場感が高まる。

映像の占める視野角の臨場感への寄与は、人の両眼が瞬時に情報処理可能な視域である水平50~80度、垂直30~60度で高まる事が知られているが、眼球や頭部の運動がある場合にはその範囲は更に増す。頭部を固定した場合、最大220度の視野角が得られるが、視野中心から離れるに従って視力は急速に低下する^[6]。しかし周辺視野の存在が臨場感や没入感を得る為に必要である事も知られている^[7]。

解像度に関しては、解像度が高い程臨場感は増すので、人の目の解像度と同程度の画素密度が高臨場感に必要である。更に質感を出す為には、解像度の他に明さの諧調や色調の分解能も十分高い必要がある。

立体感(奥行き感)は、高臨場感を実現する為の重要な要素であり、立体視に関する多くの研究報告がなされており、詳細は次節に述べる。

双方向性(インタラクティブ性)は、臨場感・没入感を得る為の大きな要因であるが、その実現にはシステムの能動的なレスポンスを必要とし、装置が大掛かりになる。受動的な映像表示システムで双方向性を実現する例としては、ホログラフィ^[8]による光波面の再生や、回転型スクリーン^[9]への多重投影、インテグラルフォトグラフィー^[10]

による多重映像表示等が挙げられる。これらの方式では、
 看視者が映像の回りに回りこむ事で、異なった角度からの
 映像を見る事が可能になっている。

異種感覚協調性に関しては、聴覚と視覚の協調作用によ
 り、映像のある方向に音像が引き寄せられる現象や、触覚
 による3次元形状の知覚等に関する報告等が行われており
 [11]、映像の臨場感を高める補助手段として有効である。

2.3 立体感

人が空間を立体として認識する要因としては、

- A. 両眼視差(左右の目に映る映像の違い)
- B. 輻輳角(左右の目と対象物体とで構成する角度)
- C. 焦点調節(水晶体の厚さ調節)
- D. 運動視差(看視位置の動きで生じる映像のずれ)
- E. その他(対象物体の大きさ, 明るさ, 濃さ, 色調, 重
 なり等)

が知られている[12]。夫々の要因と奥行き知覚感度との関係は
 図1の様になっており、近距離では両眼視差の効果もつ
 とも大きく、それを補う要因として輻輳や焦点調節がある
 が、その寄与率は約40分の1と小さい。運動視差が奥行
 き知覚に与える効果も大きい事が知られているが、これは
 カメラ又は看視者が位置を変える事が必要で、静止状態
 では効果が得られない。中距離以遠ではこれらの影響は小さ
 くなり、その他の要因である像の大きさ, 明るさ, コント
 ラストや対象物体の重なり具合等の効果が大きくなる。

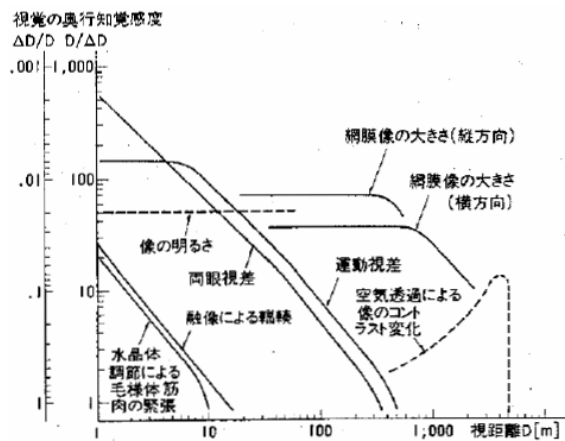


図1 立体視の要因(「立体視の不思議を探る」より)

これらの要因の内1つでもあれば奥行き感を得られるが、他
 の効果がなかったり矛盾している場合は、立体感が損なわ
 れたり疲れ易くなったりするので、注意が必要である。

3. 3D コンテンツ再生システムの評価尺 度の提案

3.1 臨場感度

これまで立体映像の表示システムの提案や解析報告は
 種々なされているが、そのシステムの画質や没入感、立体
 感の総合特性を定量的に評価した報告はない。今後、各種
 の立体映像コンテンツやその表示システムが増加・普及し
 て来ると、それらを容易に比較出来る共通評価指標が必要
 かつ有益になると思われる。以下では、そのような3Dコ
 ンテンツ再生システムの総合性能評価指標として臨場感度
 (Reality Measure) を提案する。臨場感度Rは、システ
 ムが提示する3D空間の没入感度Iと画質Q、及び立体感
 度Tの関数とし、理想値を100とする。

$$\text{臨場感度 } R = 100 \times f(I, Q, T) \quad (4)$$

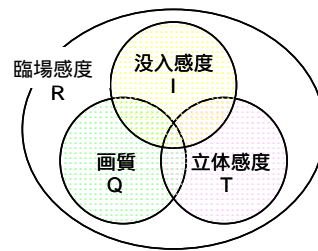


図2 臨場感度 (Reality Measure)

3.2 没入感度

没入感度Iは、没入感を与える2大要素である画素密度
 Dと画面の視野角の関数とする。

$$\text{没入感度 } I = g(D, \theta) \quad (5)$$

画素密度Dは、1画素が構成する空間角(rad)で表し、そ
 の効果は、視力1.0の目の分解能(5m先の1.5mmのスリ
 ットを識別可能)を標準として正規化した。

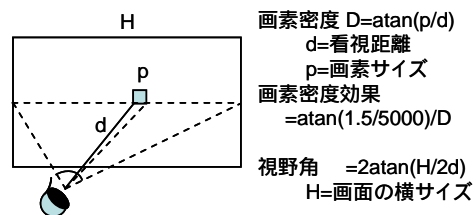


図3 画素密度と視野角

画面の視野角の効果は、視野の周辺程視力が低く情報認識能力が減少する為、視野の中心に重点を置くが、周辺視野の存在も重要であるので、次式で近似した。

$$\text{視野カバー効果} = \left(\frac{\theta}{20} \right)^2 \quad (6)$$

その結果、最も臨場感を感じるとされる視野角度（50～80度）で、視野カバー効果=1.0、没入感に大きな影響を持つ両眼視野の最大角度（約220度）まで広がった場合、視野カバー効果=2.0となる。

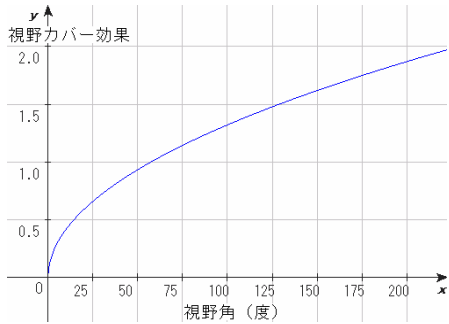


図4 視野カバー効果

以上より、没入感度Iは次式で表される。

$$\text{没入感度 } I = \text{atan}(0.3E^{-3}) / \text{atan}(s/d) \times \quad (7)$$

$s = \text{画素サイズ (mm)}, d = \text{看視距離 (mm)}$

3.3 画質の効果

画質の効果Qは、量子化ビット数NQとピーク信号対雑音比PSNRの関数として次式で表す。

$$\text{画質効果 } Q = h(NQ, \text{PSNR}) \quad (8)$$

量子化ビット数NQの効果に関しては、人の目の輝度信号に対する感度は約8.3bitであるが^[13]、色差信号に対する感度はそれよりも低いことを考慮し、8bitで正規化した。

$$\text{量子化ビット数効果} = NQ/8 \quad (9)$$

PSNRの効果は、一般に許容出来る画質であるPSNR=30dB（ノイズパワーが1/1000）以上の時にほぼ1.0となる様、次式で近似した。

$$\text{PSNRの効果} = 1 / (100 \times 10^{-\text{PSNR}/10} + 1) \quad (10)$$

その結果、PSNRの効果は、PSNR = 30dB の場合に 1.0、

PSNR=0dB(ノイズと信号が同じ)の場合に0.01となる。

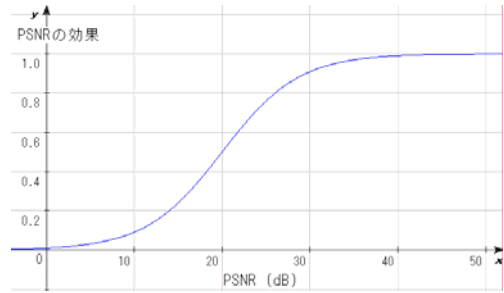


図5 PSNRの効果

以上より、画質の効果Qは、次式で表される。

$$\text{画質効果 } Q = NQ/8 / (100 \times 10^{-\text{PSNR}/10} + 1) \quad (11)$$

3.4 立体感度

立体感度は、距離10m以内の立体感の強く現れる領域を重点に評価する為、立体視の4大要素(両眼視差効果B、輻輳角効果C、焦点調節効果A、運動視差効果M)の加重平均とし、夫々の寄与率を図1より夫々、1.0、0.025、0.025、1.0とした。更にその他の効果P(映像中の物体の大小、明るさ、コントラスト、隠れなど遠近感を出す成分)の寄与を考慮する為、合計で重み1.0として加えた。この結果、その他の効果のみで得られる立体感度は約0.3になるが、これは平面画像でも得られる立体感の程度と符合している。

$$\text{立体感度 } T = \{B + 0.025(V+A) + M + P\} / 3.05 \quad (12)$$

ここで両眼視差効果Bは、人の両眼(レンズ間距離6.5cm)で対象物体を見た時に出来る両眼視差量(基準視差量)で正規化し、次式で表した。

$$\text{両眼視差効果 } B = \text{両眼視差量} / \text{基準視差量} \quad (13)$$

$$\text{両眼視差量} = (\text{左眼映像} - \text{右眼映像})^2$$

基準視差量 = 人の両眼(レンズ間距離6.5cm)で対象物体を見た時に出来る両眼視差量。

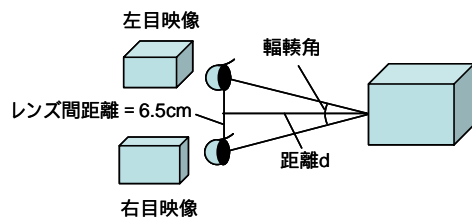


図6 両眼視差と輻輳角

輻輳角の効果 C は,表示システムで変えられる輻輳角の範囲を,人が自然な状態で 3D 空間を見渡した場合に変化する輻輳角の範囲(明視の距離 25cm 以遠:約 0.26rad=15 度)で正規化した.

$$C = \frac{\text{輻輳角変化範囲(rad)}}{2 \times \text{atan}(6.5/50)}$$

$$\text{輻輳角変化範囲} = \text{最近点の輻輳角(rad)} - \text{最遠点の輻輳角(rad)} \quad (13)$$

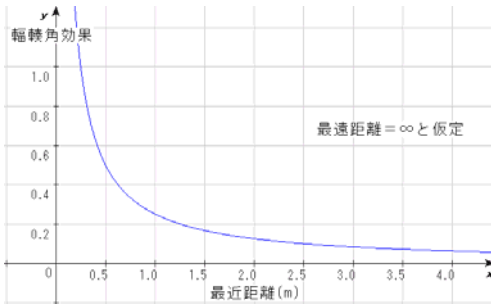


図7 輻輳角効果

焦点調節の効果 A は,表示システムで変えられる焦点距離の範囲を,人が自然な状態で 3D 空間を見渡した場合に変化する焦点調節の範囲(明視の距離 25cm 以遠)で正規化した.ここで,距離に反比例して焦点調節の効果がなくなるので,焦点距離の逆数を用いて焦点調節効果を表した.

$$A = \text{明視の距離(25cm)} \times \left\{ \frac{1}{\text{最近焦点距離(cm)}} - \frac{1}{\text{最遠焦点距離(cm)}} \right\} \quad (14)$$

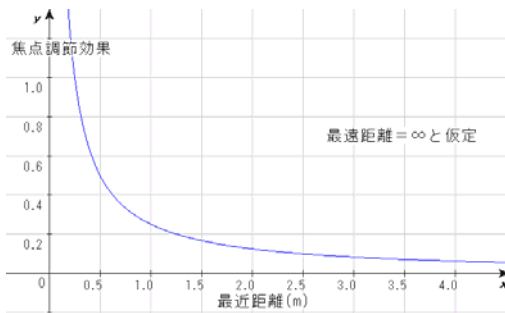


図8 焦点調節効果

運動視差の効果 M は,カメラや看視者がどれくらい対象物体のまわりに回り込めるかを数値化し,全周を周回できる場合(2)で正規化した.

$$M = \frac{\text{回り込める角度(rad)}}{2} \quad (15)$$

この効果の中には,双方向性(インタラクティブ性)の効果も一部含まれる.

4. 実験結果と考察

4.1 臨場感度計測実験

以上,提案した臨場感度 R を用いて 3 種類の 3D 映像表示システム^{[14][15][16]}を評価した.評価に用いたディスプレイの主要諸元と看視距離を表 1 に,システムの概要を図 9~11 に示す.看視距離は,卓上型は 50cm,CAVE はシステムの中央に立つと仮定した.

表1 計測実験に用いた 3D ディスプレイ

諸元	Sharp Mebius PC-RD1-3D	Perspecta (Actuality)	CAVE (日商エレ)
3D方式	視差バリヤー	回転スクリーン	時分割LR表示
画面サイズ	15インチ (横:305mm)	10インチ (横:203mm)	3mx3mx4面 (前左右下)
解像度	1024x768pel	768x768pel	2500x2000pel
看視距離	0.5m	0.5m	1.5m

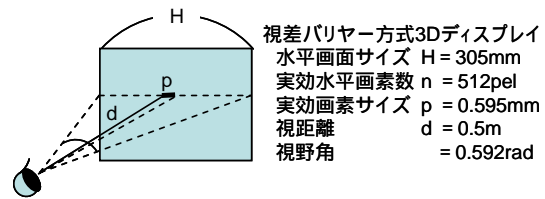


図9 Mebius

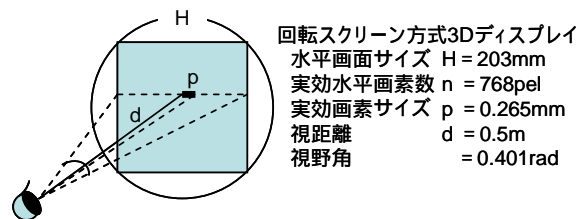


図10 Perspecta

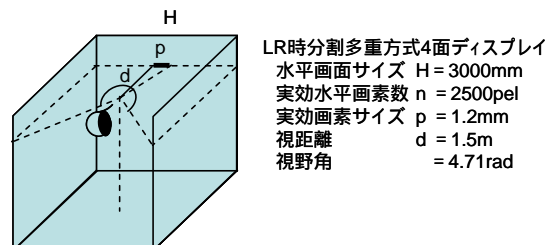


図11 CAVE

この看視条件下で得られた各システムの臨場感パラメータを表 2 に示す.今回の計測では,表示される映像は符号化

劣化のない原画像と仮定した為画質効果の差はない。

表2 各種ディスプレイの臨場感パラメータ

臨場感パラメータ	Sharp Mebius PC-RD1-3D	Perspecta (Actuality)	CAVE (日商エレ)
画素密度効果	0.252	0.567	0.375
視野カバー効果	0.769	0.633	2.171
没入感度	0.194	0.359	0.814
量子化ビット数効果	1	1	1
SNR効果	1	1	1
画質効果	1	1	1
両眼視差効果(B)	1	1	1
輻輳角効果(C)	1	0.212	1
焦点調節効果(A)	0	0.212	0
運動視差効果(M)	0	1	0.5
その他効果(P)	1	1	1
立体感度(T)	0.664	0.987	0.828
臨場感度(R)	12.39	35.43	67.4

4.2 考察

Mebius や Perspecta の様な卓上型ディスプレイは、表示画面がさほど小さくなくても、その分接近して視聴出来るので、画素密度や視野カバー率が高くなり、結果として没入感度は高くなる。ただし両眼視差を得る為に、各画素を固定的に左右映像に割り当てる視差バリエーション方式や、レンチキュラーレンズ方式等は実効画素密度が下がり、没入感度がある程度犠牲になるのはやむを得ない。

立体感度に関しては、回転スクリーン方式の Perspecta は、輻輳角変化範囲や焦点調節範囲は狭いが、周囲 360 度から回り込んで見られる事より、運動視差は高い値になり、結果として高得点になったが、実際に興行きを持った映像であるので、その値は妥当と思われる。

人が 3D 映像空間に入り込める CAVE は、予想通り最も高い臨場感度が得られたが、その主要因は、非常に高い視野カバー率である。これは高精細度プロジェクタを 4 台使う事で実現されているが、同時に大スクリーンによる画素密度の低下を防ぐ事にも役立っている。CAVE の臨場感度を 100 まで上げる為には、更に画素密度を上げる事が有効である事も分かる。

5. まとめ

本稿では、今後広範な普及が予想される立体映像表示システムの性能を統一的に評価する指標が必要になることに言及し、3D コンテンツ再生システムの総合評価指標として、没入感度、画質及び立体感度をパラメータとする臨場感度の導入を提案し、代表的な 3D 映像表示システムの臨場感度を計算した。

今後は、今回提案した指標について主観評価実験から得られる値との整合性を高め、更に符号化劣化のある映像での臨場感度の計測や、異種感覚協調項の導入等を検討し、更に評価関数の精度を高めて行く予定である。

文献

- [1] ISO/IEC, "Information Technology – Coding of audio-visual objects – Part 10: Advanced Video Coding", ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 N5555, March 2003.
- [2] ISO/IEC, "Draft Call for Proposals on Multi-View Video Coding", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N6910, January 2005.
- [3] A. Smolic, H. Kimata, "Report on 3DAV Exploration", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N5878, July 2003.
- [4] 堀田裕弘,河合良直,南陽子,村井忠邦,中嶋芳雄, "符号化されたステレオ静止画像における画質評価モデル", AV 複合情報処理 28-6, March 2000.
- [5] 須佐見憲史, 畑田豊彦, "3次元ディスプレイと高臨場感", 信学技報 EID2001-35, September 2001.
- [6] 畑田豊彦, "3次元画像表示とヒューマンファクタ", 3次元画像と人間の科学, オーム社, April 2000.
- [7] 近江政雄, "3次元画像が平行感覚, 方向感覚, 運動感覚に与える影響", 3次元画像と人間の科学, オーム社, April 2000.
- [8] 本田捷夫, "光ホログラフィー技術の展開", 信学誌 Vol.78, No.11, pp1107-1113, November 1995.
- [9] 日立, "360度どこからでも見ることができる立体映像ディスプレイ技術を開発", <http://www.hitachi.co.jp/News/cnews/040224a.html>, February 2004.
- [10] 岡野文男, 星野春男, 洗井淳, "インテグラルフォトグラフィの撮像系に関する検討と実験", 信学技報 TE95-146, March 1996.
- [11] 金次保明, "3次元画像と感覚統合", 3次元画像と人間の科学, オーム社, April 2000
- [12] 井上弘, "立体視の不思議を探る", オプトロニクス社, January 1999.
- [13] 矢野澄男, "画像に関する視覚特性の基礎", 画像情報圧縮, オーム社, August 1991.
- [14] シャープ, "Mebius", <http://www.sharp.co.jp/products/pcrd13d/index.html>, 2005
- [15] Actuality Systems, "Perspecta", <http://www.actuality-systems.com>, 2005
- [16] 日商エレ, "CAVE/多面体立体表示システム", <http://www.nissho-ele.co.jp/product/cave>, 2005