融像式を用いたズーミング可能なステレオフォトビューア（Ⅱ）
－融像式における指数ｎの最適値の決定方法－

広内　哲夫

A Stereo-Photographic Viewer with Which Zooming is Possible by Using a Fusion Equation (II)
— A Determining Method of the Optimum Value of the Index n in a Fusing Equation —

Tetsuo Hirouchi

Abstract

This paper is the 2nd half of the paper presented before. In the paper of the first time, the power-multiplication index n of the fusion equation devised by the author of this paper was settled by securing the index as the value of 0.7. However in the paper of this time, a model based on the index n, the expansion limitation multiplication m0, and the parallax D1 is constructed so that the value of n can be settled complying with the individual characteristics of the stereoscopic photographs. Furthermore the behavior of the model is minutely simulated. As a result, the author has been successful in making up the mechanism where SPV itself allows the optimum value of the index n applicable to the zooming environment of the individual stereoscopic photographs to be determined automatically.

1. はじめに

前回発表した 2 つの論文、『融像式を用いたズーミング可能なステレオフォトビューア』（文献 1）および『3 次元仮想空間を用いたズーミング可能なステレオフィトビューア』（文献 2）では、3D 写真ビューア SPV（Stereo Photo Viewer）のズーミング理論について論じた。

その際、前者論文の 7.4 節「立体像のシミュレーション解析」において、融像式の前進／後退ファクター f の冪乗指数 n を、「拡大限界倍率 m_0 が 10.0 倍、画面上でのズレ幅（文献 1 ではズレの間隔と表記）D_1 が 1cm」というズーム環境のもとで、0.7 と定めた。この値は、高倍率かつ高遠近感で立体写真をズームする場合に適した値である。文献 1 と文献 2 の執筆当時は、ズーミングの迫力を醸し出すために高倍率かつ高遠近感が期待され、人物や人形に比べて遠近感の出しやすいホテルや寺院などの建築物の 3D 写真コンテンツの制作が期待されていたためでもあった。

その後、身近な室内風景あるいは人物、人形、仏像などの 3D 写真コンテンツの制作の経験を経て、すべての立体写真に対して同一の n の値を設定するのではなく、個々の立体写真ではズーム環境が異なることから、立体写真の特性に応じた n の値を設定した方が良いことが分かった。

そこで今回の論文では、個々の立体写真のズーム環境に応じて、「指数 n の最適値を SPV 自身が稼働中に自動設定できる機構」を構築することを試みた。拡大限界倍率 m_0 とズレ幅 D_1 に関係す

る指数 n のモデルを構築し、そのモデルの振る舞いを詳細にコンピュータ・シミュレーションによって解析した。その結果、ズーム環境に応じて指数 n の最適値を SPV 自らが自動的に定める機構を作り上げることが出来た。今回はその報告である。

なお、文献 1 の 7.4 節（2）「前進／後退ファクターの指数の関数化」では、立体像の動きを意図的に加速したり減速したりするための指数 n の値の設定方法を述べた。これは立体像に敢えて特別な動きをさせ、閲覧者に迫力を感じさせる方策である。しかし、今回の論文ではそれとは別に、個々の立体写真のズーム環境に合わせて、その立体像に自然な動きをさせる方法を述べている。

2. 3 次元 CG としての SPV 仮想空間

2. 1　カメラと 3 次元 CG

私たちはカメラを用いて身の回りの光景を写真撮影するが、そこは 3 次元世界である。しかし、撮影された写真は 2 次元平面であるが、そこには現実の撮影空間の 3 次元特性が正しく反映されている。その一例として、人間の目では眺めた光景は、距離と倍率という変量が反比例関係にあるが、撮影された写真はその関係を正しく満たしている。視点はカメラのレンズ（凸レンズ）であり、レンズの後方（カメラを向ける反対側の方向）の焦点距離の位置に撮影面（撮像素子）が置かれ、撮影面に透視投影された像は上下左右が反転して映し出される。その視界の範囲は画角によって定まる。

一方、3 次元コンピュータ・グラフィックス（CG）では、カメラと同じ考え方で、現実の空間を反映するようにディスプレイ画面上に 3 次元仮想空間が作られる[文献 3、文献 4]。図 1 に示すように、仮想空間のある一点に視点を定め、カメラとは反対に視点の前方（眺める側の方向）にカメラの撮影面に当たる投影面を置く。この投影面はビュースクリーンと呼ばれる。投影面と視点の距離がカメラの焦点距離に対応する。投影面には、視点に対して透視投影された仮想物体の像が反転しないで映し出され、投影面の画像はディスプレイ装置の画面にそのまま転写される。この転写はビューポート変換と呼ばれる。投影面の前方と後方には、それぞれ前方クリッピング面と後方クリッピング面が設定され、両方（前方と後方）のクリッピング面で囲まれた空間（視点を起点とする後方クリッピング面までの四角錐空間から同じく視点を起点とする前方クリッピング面までの四角錐空間を除いた空間）はビューボリュームと呼ばれ、この限定された仮想空間内に存在する仮想物体のみが投影対象となる。投影面に映し出される視界の範囲は、視角（垂直視角と水平視角：カメラでは画角と呼ばれる）によって定まる。

投影面は視点と連携し（ただし焦点距離は可変）、視点は投影面とともに閲覧者の操作によって 3 次元仮想空間内を動き回り、投影面を介してディスプレイ画面に映し出された画像を閲覧者が眺めることになる。このことから、視点はアバターとも呼ばれ、閲覧者の代理人として働く。また、3 次元 CG においてもカメラ同様、視点から仮想物体（投影対象物）までの距離と投影面に映し出される画像の倍率の間には反比例の関係が成り立つ。

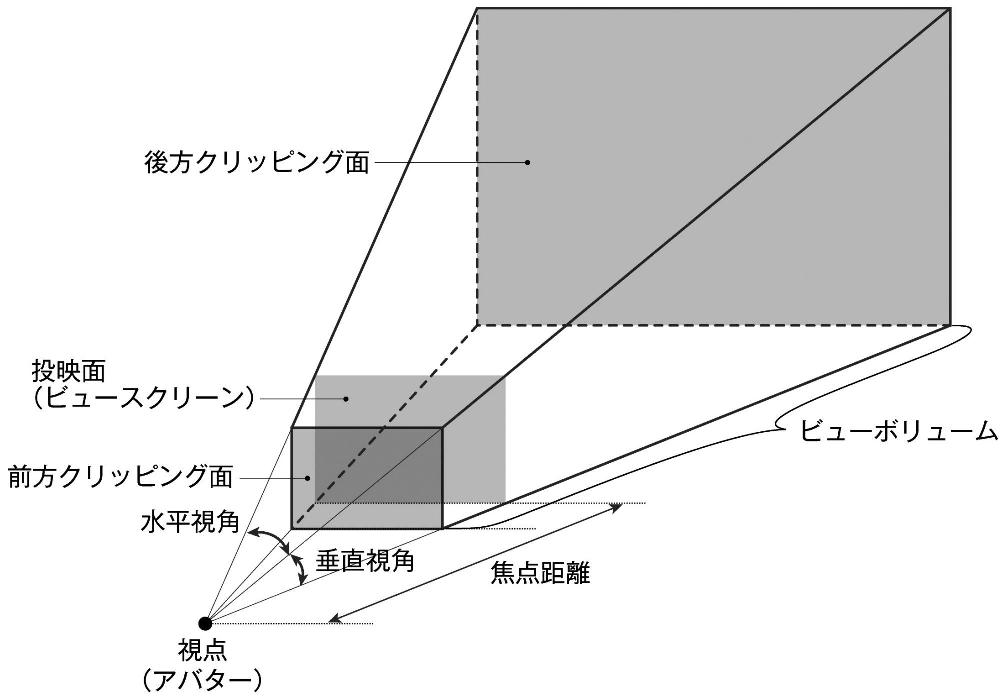


図 1　視点から眺めた 3 次元仮想空間

2. 2　SPV 仮想空間の仕組み

SPV はソフトウェアとしては、Java2D を用いた 2 次元 CG に基づいて制作されているが、SPV の仮想空間は、上記の 3 次元 CG の仮想空間を用いて説明することができる（文献 2 には投影面を描かない状態で簡略化して紹介している）。というのは、3D ディスプレイ画面に映し出される 2 次元画像の倍率は、アバターの視点から仮想物体までの距離という 3 次元空間の特性に関係付けすることができるからである。SPV は仮想物体に代わって、ステレオペアと呼ばれる左目用と右目用の 2 枚の立体写真の組を用いる。ステレオペアのそれぞれは厚さがなく重なり合ってパネルに貼り付けられていて、それは図 1 に示す後方クリッピング面に置かれている。アバター（視点）はその左右 2 枚のステレオペアを同時にかつ別箇に眺める能力がある。また、ステレオペアの右目用写真は、3.1 節で述べる融像式に従って水平方向左右にスライドする。アバターの眼の左右の視線の向きは水平かつ Z 軸奥行き方向に向いている。投影面は図 1 に示す前方クリッピング面の位置に置かれており、アバターの眺めた立体写真は投影面を介して、閲覧者の眺める 3D ディスプレイ画面に、ステレオペアが 2 重写しとなった画像として転写される。このような SPV における仮想空間を「SPV 仮想空間」と呼ぶことにする。

閲覧者のズーム操作によって、3D ディスプレイ画面に映し出される画像の倍率が変化するが、その理由は SPV 仮想空間内のアバター（視点）から立体写真のパネルまでの距離が変化するからである。一般には、固定配置された立体写真に対してアバターが動くと考えるが、動きは相対的な

ので、SPV では固定配置されたアバター対して立体写真のパネルが位置を変えるものとする。例えば、閲覧者が最大の拡大ズーム操作を行うと、最遠の後方クリピング面に位置する立体写真は前方クリッピング面まで SPV 仮想空間内を移動する。

このように SPV においては、画像の倍率操作をすることがズーム操作であり、それによって、立体像が近づいたり遠ざかったりするのである。SPV の内部では、3 次元 CG の仮想空間を模した SPV 仮想空間において、距離と倍率の間で反比例関係が成立している。

3. SPV のズーム機構

3.1　指数 n が現れるズレ幅 D の式

SPV において立体写真をズーミングする基礎となる式は、筆者の考案した融像式 (文献 1) である。この融像式が、立体写真の右目用の写真を左右にスライドさせ、閲覧者に立体写真の立体像をズーム映像して視認させる働きをする。冪乗の指数 n は、以下に示す融像式の中に現れる。変数 t はプログラム内部において、右目用写真をスライドさせる際の座標変換（表示画面の座標系に依存）に用いられ、閲覧者に直接、関係するものではない。

$$t = \{a / (1/m_1 - 1/m_0)^n\} \times (1/m - 1/m_0)^{n+1} + b \qquad (1)$$

一方、閲覧者は融像式のもとで 3D ディスプレイ画面に表示される左目と右目の画像のズレ幅 D（文献 1 ではズレの間隔と記載した）を感知することで立体像を視認する。この視認は無自覚のもとで脳が瞬時に行っている。ズレ幅 D を表す式は、融像式が導出される過程で並行して求められる。それは以下の通りである。

$$D = k_2 \times \{a / (1/m_1 - 1/m_0)^n\} \times \{(1/m - 1/m_0)^n \times (1 - m/m_0)\} \qquad (2)$$

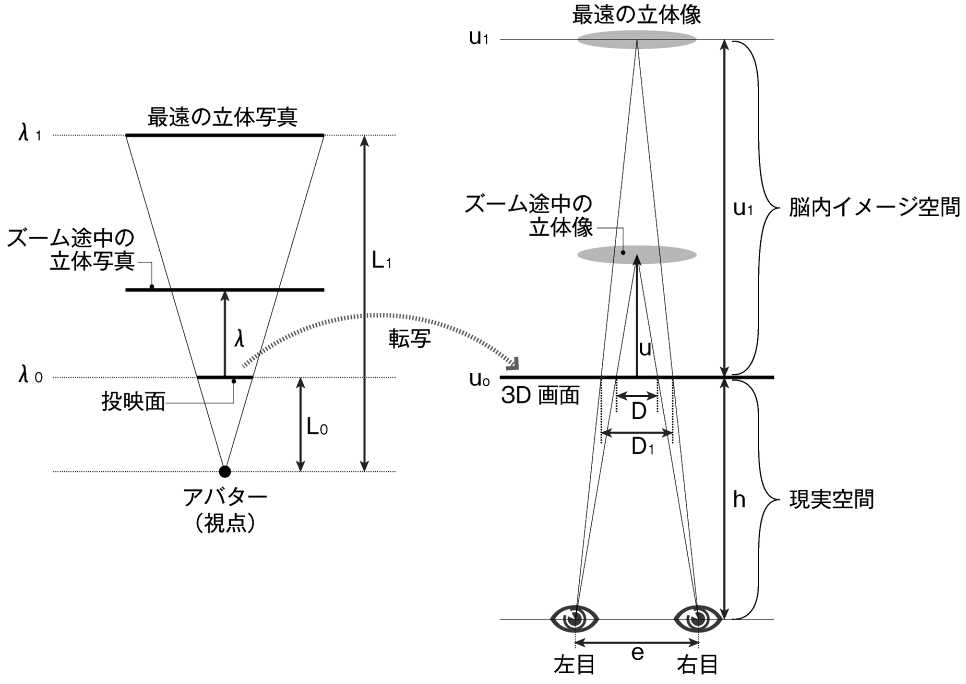
本論文で重要な役割を果たすのは、ズレ幅 D に関する 2 式である。この式に登場する冪乗の指数 n は、融像式の指数と同じである。閲覧者の立体視は、ズレ幅 D の式（2 式）に基づいて行われるので、以降、この式を介して指数 n を取り扱うものとする。ただし、n は、融像式の導出過程で立体像の動きを調整するために人為的に導入された量であるので、解析的に解かれるような対象とはなっていない。

なお、k_2 の意味するところについては 6.3 節で述べるが、それまではズレ幅 D の式に関する係数の積 $k_2 \times a$ として一括して取り扱う。なお、1 式、2 式の中に出てくる変数や定数の意味については、文献 1 を参照されたい。

3.2　SPV のズーム機構

ここから先は SPV のズーム機構を SPV 仮想空間に基づいて説明する。仮想空間に配置された仮想物体は、SPV においてはパネルに張られた 2 枚の左目用と右目用の重ね合わされた立体写真の組、すなわちステレオペアに置き代わる。アバターの視線の向きは水平かつ立体写真の Z 軸奥行き方向に向いている。アバターの眺める立体写真は投影面を介して、閲覧者の眺める 3D ディスプレイ画面に、立体写真は 2 つに重なった画像として転写される。

ところで、閲覧者が立体写真をアバター(視点)に近づけたり遠ざけたりすることによって、ズー



（a）SPV 仮想空間　　　（b）脳内イメージ空間

図 2　SPV 仮想空間と脳内イメージ空間の対比

ミング操作を行うことになる。このズーム環境は SPV では、次のように設定されている。図 2（a）に示すように、立体写真がアバターから最遠の距離 L_1 だけ離れたところに配置されているとし、そのときアバターが眺める投影面上の立体写真の画像の倍率（縮小限界倍率）を m_1（m_1 は 1 倍とする）とする。また、立体写真はアバターから距離 L_0 にある投影面までに最接近することができ、そのときアバターが眺める投影面上の立体写真の画像の倍率（拡大限界倍率）を m_0 とする。このとき、以下の式のような「距離×倍率＝一定」の反比例関係が成立する。

$$L_1 \times m_1 = L_0 \times m_0 = 一定 \qquad (3)$$

ここで、投影面から立体写真までの距離を表す変数を λ とし、そのときアバターが眺める投影面に投影された立体写真の画像の倍率を表す変数を m とする。立体写真が投影面に接近・後退することによって、λ が取り得る範囲は、以下の通りである。

$$0 \leqq \lambda \leqq L_1 - L_0 \qquad (4)$$

ここで、以下の式のように、立体写真が投影面に最接近する距離（接近限界距離）λ を λ_0、また投影面から最も遠ざかる距離（後退限界距離）λ を λ_1 とする。

$$\lambda_0 = 0 \qquad (5)$$

$$\lambda_1 = L_1 - L_0 \qquad (6)$$

ところで、3 式と同様な反比例関係から、以下の式が成立することは明らかである。

$$(\lambda + L_0) \times m = L_0 \times m_0 \qquad (7)$$

3 式と 6 式から、以下の関係が得られる。

$$L_0 = (m_1 / (m_0 - m_1)) \times \lambda_1 \qquad (8)$$

$$L_1 = (m_0 / (m_0 - m_1)) \times \lambda_1 \qquad (9)$$

また、7 式と 8 式を用いると、以下の式が得られる。

$$m = (L_0 \times m_0) / (\lambda + L_0)$$
$$= (m_1 \times m_0 \times \lambda_1) / \{\lambda \times (m_0 - m_1) + m_1 \times \lambda_1\} \qquad (10)$$

SPV の装備するズーム機構は、上記に示した SPV 仮想空間の特性を基礎にして組み立てられている。

なお、8 式と 9 式において、$m_0 = m_1$ となる場合、3 式から $L_0 = L_1$ となり、6 式から後退限界距離 λ_1 が 0.0 となる。これは投影面と立体写真の距離が 0 であり、拡大縮小ズーミングを行えないことを意味する。

4. 脳内で知覚するイメージ空間

4.1　立体視の原理

立体視は、左目で眺めた光景が左目の網膜に、右目で眺めた光景が右目の網膜に、それぞれ独立して映し出された結果、立体像が生じる現象である。左目と右目の間隔は、人間（大人）では 6.5cm 程度であり、この間隔の差によって左右の網膜に映し出される像には若干のズレが生じる。このズレは一般には視差と呼ばれ、これを知覚する細胞が脳内に存在し、その働きによって外界の光景を閲覧者が立体像としてイメージする[文献 5]。立体視は脳内の生理現象である。

SPV においては、左右の立体写真の組（ステレオペアと呼ばれる）は、立体カメラの 2 つのレンズの間隔に起因するズレ幅を伴っている。パネルに貼られたズレ幅のある立体写真は、アバターによって SPV 空間内で眺められ、その光景は投影面を介して、閲覧者の眺める 3D ディスプレイ画面へ左右の画像の 2 重写しとして転写される。閲覧者は立体メガネを用いて左右画像をそれぞれ分離して左右の網膜に取り込み、脳内の立体視に関わる細胞の働きによって立体像を視認するのである。

4.2　脳内で視認する立体像

図 2 では、投影面から立体写真までの距離 λ、および D ディスプレイ画面から閲覧者の視認する立体像までの距離 u について、この 2 つの変量を対（図（a）と図（b）は対）にして描いている。

図（b）は、閲覧者が 3D ディスプレイ画面から距離 h だけ離れたところから立体メガネを装着して画面を眺め、閲覧者が立体像を画面から距離 u だけ離れたところに視認する様子を表している[文献 1]。閲覧者によって視認される立体像の距離 u は、ズレ幅 D を用いて以下の式から求めることができる。e は瞳孔間隔である。

$$u = h \times \{D / (e - D)\} \qquad (e > D) \qquad (11)$$

このとき、3D ディスプレイ画面に映し出される実画像（立体視を行わない 2 重映像）の倍率を m とすれば、立体像の倍率 b は、D と m を用いて以下の式から求めることができる。

$$b = m \times \{D / (e - D) + 1\} \qquad (e > D) \qquad (12)$$

当然のことながら、閲覧者の視認する立体像は閲覧者の脳内でイメージされた虚像であるが、閲

覧者は画面から距離 u だけ離れた位置に、立体像が倍率 b の大きさで“あたかも実のごとき空間”に実在するが如く、その立体像を視認する。この空間を「脳内イメージ空間」と呼ぶことにする。なお、上記の u および b に関する式の導出については、文献 1 を参照されたい（u の式は河合隆史氏らが図を用いて導いている）。

4. 3　SPV 仮想空間と脳内イメージ空間の連結

3D ディスプレイ画面に映し出された左目用／右目用の画像を眺めている閲覧者は、2 枚の画像の重なり合いによるズレ幅 D に基づいて脳内で立体像を視認するが、その立体像の動きは、閲覧者のズーム操作に対応してどのような動きとなって、閲覧者に知覚されるのだろうか。それについて以下に説明する。

閲覧者が 3D ディスプレイ画面を眺めることで視認する立体像が自然な動き方をするには、その動きは SPV 仮想空間におけるアバターが眺めた立体写真の動きと連動する必要がある。すなわち、脳内イメージ空間内の動きが SPV 仮想空間内の動きに同一歩調を取る必要があると言うことは、数学的に言えば、脳内イメージ空間の立体像と SPV 仮想空間の立体写真の動きが、以下に述べるように相互に線形性（比例関係）を保たねばならないと言うことである。

SPV 仮想空間で投影面から立体写真までの距離 λ および脳内イメージ空間で画面から視認される立体像までの距離 u の間で、以下のような比例関係（K は比例定数で正の実数）が成り立つことである。この辺の詳しい説明については、8.1 節の補足を参照されたい。

$$\lambda = K \times u \qquad (13)$$

この比例関係が成り立つとすれば、SPV 仮想空間と脳内イメージ空間を連結できることになる。13 式の式の u は、以降で説明するが、指数 n、倍率 m を独立変数とする非線形関数である。従って SPV 仮想空間と脳内イメージ空間を連結させるためには、この式を用いて、 λ と u の間で 13 式に示す比例関係を成り立たせるような、そうゆう n の値を探し出す作業を行わねばならない。これが本論文の主題の一つである。

ところで、SPV 仮想空間におけるアバターの眺める立体写真の動き（これは λ で表される）は 7 式に従うのであるが、これと同じ動きが閲覧者の脳内イメージ空間で生成される立体像においても起こるであろうか？　閲覧者の視認する立体像の倍率を b とし、7 式が意味する距離（$\lambda + L_0$）× 倍率 m と同様に、脳内イメージ空間における距離と倍率の積を、以下のように Y で表す。

$$Y = (u + L_0 ／ K) \times b \qquad (14)$$

Y は、図 3（a）に示す SPV 仮想空間のアバター視点に対応させて、図 3（b）に示すように設定された脳内イメージ空間の視点 H から求められる量である。この Y が一定値になるかどうかについては、7.2 節で述べる。この視点をアバター（代理人）に対応させて、ここではホムンクルス（小人）と呼ぶことにすると、ホムンクルスは脳内イメージ空間において立体像を眺める働きをすると言える。

なお、ホムンクルスとは、「脳の中に居て知覚を担っている」と昔からヨーロッパで語られてきた小人（脳内の賢い小人）のことである。SPV 仮想空間の視点が現代的な響きのある名称を用いて「アバター」と言うならば、それに対応させた脳内イメージ空間の視点は、伝統的な名称を用いると「ホムンクルス」と言うことになる（20 世紀前半に入ってからも脳機能を結果的にホムンクルスのように説明することもあったが、いろいろ問題［ホムンクルス問題］をはらんでいるようである）[文献 5]。

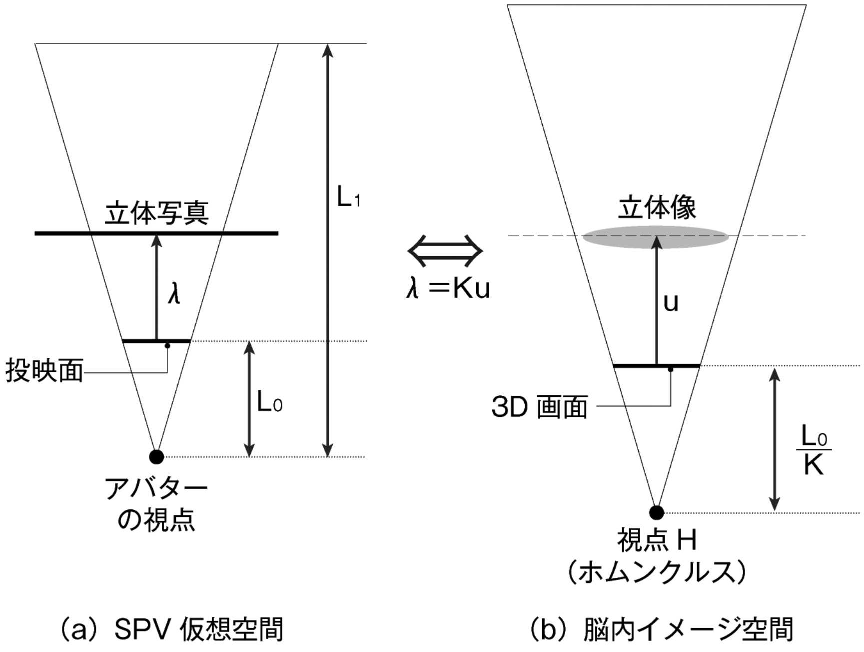


図 3　脳内イメージ空間における視点 H の設定

5. 立体写真の動きから立体像の状態を定める関係式の導出

本章では、立体写真の動きから立体像の状態を定める式をいくつか導出する。これらの式を用いると、求める条件の指数 n を確定することが可能となる。まず 13 式から以下の λ と u に関する比例式が得られる（λ と u の対応関係については、8.1 節の補足を参照されたい）。

$$\lambda_0 = K \times u_0 \qquad (15)$$

$$\lambda_1 = K \times u_1 \qquad (16)$$

ここで、 λ_0 と λ_1 は、3.2 節で述べた接近限界距離と後退限界距離である。u_0 は、閲覧者が立体像を画面上に視認する距離で、u_0 の値は 0 である。また u_1 は、閲覧者が視認する立体像の画面から最遠の距離である。2 式において倍率 m が m_1 のときのズレ幅 D を、以下の 17 式のように D_1 と表記すると、u_1 の値は、その D_1 を 11 式に代入したところの、以下の 18 式から得られる。

$$D_1 = k_2 \times a \times (1 - m_1 ／ m_0) \qquad (17)$$

$$u_1 = h \times D_1 ／ (e - D_1) \qquad (18)$$

D_1 については、最大ズレ幅と呼ぶが、その意味については、6.1 節（1）項を参照されたい。

4 式は、6 式と 16 式を用いると、以下のように表される。

$$0 \leqq \lambda \leqq L_1 - L_0 = K \times u_1 \qquad (19)$$

また、10 式は、16 式を用いると以下のように表される。

$$m = (m_1 \times m_0 \times K \times u_1) / \{\lambda \times (m_0 - m_1) + m_1 \times K \times u_1\} \tag{20}$$

立体写真が 19 式の定める λ の範囲を可動するとき、アバターが眺める立体写真の倍率 m を表す関数（20 式）の関数記号を以下のように f_1 で記述する。

$$m = f_1(\lambda) \tag{21}$$

このもとで、閲覧者が閲覧する 3D ディスプレイ画面における左右画像間のズレ幅 D を表す関数（2 式）の関数記号を以下のように f_2 で記述する。その関数 f_2 をさらに関数 f_1 と関係する関数として記述する。

$$D = f_2(m) = f_2(f_1(\lambda)) \tag{22}$$

そして、閲覧者が視認する立体像の画面から距離 u を表す関数（11 式）の関数記号を以下のように g_1 で記述する。その関数 g_1 をさらに関数 f_2 と関係する関数として記述する。

$$u = g_1(D) = g_1(f_2(f_1(\lambda))) \tag{23}$$

また、倍率 b を表す関数（12 式）を倍率 m とそれへの乗算項の 2 つの部分に分け、前者の倍率 m を関数 f_1 で記述する。後者の部分の関数記号を以下のように g_2 で記述する。その関数 g_2 をさらに関数 f_2 と関係する関数として記述する。

$$\begin{aligned} b &= f_1(\lambda) \times g_2(D) \\ &= f_1(\lambda) \times g_2(f_2(f_1(\lambda))) \end{aligned} \tag{24}$$

21 式～ 24 式を使用すると、閲覧者によって視認される立体像の画面からの距離 u やその倍率 b を、アバターに対する立体写真の動き（λ で表記できる）に合わせて計算することが可能になるのである。

また、距離×倍率を示す 14 式は、23 式と 24 式を用い、さらに関数記号を用いて表すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} Y = &\{g_1(f_2(f_1(\lambda))) + L_0 / K\} \\ &\times \{f_1(\lambda) \times g_2(f_2(f_1(\lambda)))\} \end{aligned} \tag{25}$$

ところで、L_0 / K は、8 式と 16 式、23 式から、以下の通りである。

$$\begin{aligned} L_0 / K &= (m_1 / (m_0 - m_1)) \times u_1 \\ &= (m_1 / (m_0 - m_1)) \times g_1(f_2(f_1(\lambda_1))) \end{aligned} \tag{26}$$

25 式に 26 式に代入すると、最終的に、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} Y = &\{g_1(f_2(f_1(\lambda))) + (m_1 / (m_0 - m_1)) \times g_1(f_2(f_1(\lambda_1)))\} \\ &\times \{f_1(\lambda) \times g_2(f_2(f_1(\lambda)))\} \end{aligned} \tag{27}$$

SPV 仮想空間と脳内イメージ空間を対応付ける比例定数 K は、SPV 仮想空間における距離 λ が 19 式に従って変化するとき、20 式の倍率 m に影響を与えない。そのため、脳内イメージ空間に関係する、導出した 22 式～ 24 式および 27 式の中には K が出現しないので、それらの式は 13 式の K の値には依存しない。そこで以降のコンピュータ・シミュレーション解析では、「K の値は 1 である」としてそれを行う（K の値を具体的に定めないと、計算を行うことができないためである）。

以上で、立体写真と立体像の状態を表す m、D、u、b、Y を、立体写真の位置を表す λ を独立変数とする関数として記述することができ、これで最適な指数 n を求めるシミュレーション解析の準備が整ったのである。

6. 最適な指数 n を求めるシミュレーション解析の方法

第 4 章で述べたように、SPV 仮想空間と脳内イメージ空間は、同じ空間の特性を持たなければならないが、そのためには 13 式（$\lambda = K \times u$）が成立しなければならない。そこで、指数 n にある値を仮定し、投影面から立体写真までの距離 λ の値に応じて、それに対応する 3D ディスプレイ画面から立体像の距離 u を、23 式を用いて計算する。そして、λ および計算された u の組に対して、13 式と同形式の一次式（係数を K´ とする）を用いて近似できるようにするために最小二乗法を適用し、K´ に K（K の値は 1）の最近傍値を与える指数 n を、コンピュータ・シミュレーション解析によって探し出すのである。このようにして指数 n のある値のもとで、ほぼ K（K の値は 1）に近い値の K´ の存在が示されれば、そのときの指数 n の値が 13 式の比例関係を概括的に成立させるのである。6.1 節でこの詳しい方法を示す。そして、その指数 n の値のもとで、27 式で与えられる Y（距離×倍率）が、距離 λ が 19 式に従って変化する場合、一定となるかどうかを検証する。

なお、シミュレーションに用いられる量は、ズレ幅 D（正確に言えば、縮小限界倍率 m_1 における最大ズレ幅 D_1：6.1 章（1）項参照）、拡大限界倍率 m_0、指数 n である。これらはパラメータとなり、その値の範囲は任意ではあるが、ここでは、それぞれ（順番に）0.0cm ～ 5.0cm、1.0 倍～ 15.0 倍、0.0 ～ 1.5 の範囲の値を用いることにする。なお、ズレ幅 D を最大 5.0cm に限定しているが、これについては 8.2 節の補足を参照されたい。

6. 1　λ＝K × u となる指数 n の値の探索法

(1) 係数の積 $k_2 \times a$ の算出

指数 n を求めるには 2 式を用いるが、最初にその式の係数の積 $k_2 \times a$ を決定しておく必要があるが、その前に 2 式についてコメントしておく。2 式で規定するズレ幅 D は、倍率 m に関して単調減少関数であるので、縮小限界倍率 m_1（この倍率は 1 である）のもとで最大の値となる。その最大のズレ幅 D を以降、「最大ズレ幅 D_1」と記載することにする。ズーム操作が行われるときには、λ が 19 式に従って 0 から $L_1 - L_0$ の範囲で変化するとき、ズレ幅 D は 22 式に従って 0 から最大ズレ幅 D_1 の範囲で変化する。最大ズレ幅 D_1 と記載されていたら、それは縮小限界倍率 m_1 におけるズレ幅 D であると考えて頂きたい。

ところで、縮小限界倍率 m_1 における最大ズレ幅 D_1 は 17 式で表され、幸いにもこのとき、D_1 は指数 n に依存しない。そこで、この式を用いると（m_0 と D_1 が与えられれば）、以下のように、係数の積 $k_2 \times a$ は計算で求められる。

$$k_2 \times a = D_1 / (1 - m_1 / m_0) \qquad (28)$$

係数の積 $k_2 \times a$ の a は、文献 1 で示した立体写真固有の遠近感制御定数であり、融像式（1 式）の中に現れた定数 a である。

(2) 最適な指数 n の探索

次に、$\lambda = K \times u$ となる指数 n の値の探索法を説明しよう。$D_1 = 1$cm、$m_0 = 10$ 倍の場合を例に挙げる。まず 28 式を用いて、その場合の係数の積 $k_2 \times a$ の値を求める。そして求めた係数の積 $k_2 \times a$、D_1 と m_0 の 3 つの値を用いて、指数 n の 0.0 の場合において、次に述べる作業を行う。19 式において距離 λ が最低値 0.0 から最高値 $K \times u_1$ までを 10 等分し（ここで示した等分値は参考値であり、10 以外の値であってもよい）、その刻み値（増分値）$0.1 \times K \times u_1$ を用いて、投影面から

立体写真までの距離 λ を 0.0 から $K \times u_1$ 値までの間で増分値を逐次加えながら変化させ、それに対応する 3D ディスプレイ画面から立体像までの距離 u を、23 式の関係式を用いて計算する（計算に使用される K の値は 1 である）。

そして、個々の λ_i に対して求められた個々の u_i の（λ、u）の組（i = 0 ～ 10 の 11 個の離散データの組）に対して、以下の比例関係

$$\lambda = K' \times u \tag{29}$$

が成り立つとして、最小二乗法を用いて残差（$\lambda - K' \times u$）の二乗和を最小にする定数 K′ の値を求める。併せて、そのときの、$\lambda - K \times u$（K の値は 1）についての二乗平均平方根（RMS）[文献 6] も求めるが、本研究ではこれをバラツキの指標とする。

次に、指数 n を 0.1 ずつ増分し（ここで示した増分値は参考値であり、0.1 以外の値であってもよい）、上記と同様な計算（D_1、m_0、$k_2 \times a$ は同じ値を用いる）を行い、定数 K′ と上記の RMS 値を求める。このような計算を指数 n が 0.0 から 1.5 までの範囲で 16 回繰り返し行う。その結果、「指数 n とそれと対を成す定数 K′」の組が 16 組得られる。

そして、その 16 組の中で、次のような指数 n、すなわち「K′ を K（K の値は 1）の最近傍値に成らしめる指数 n」が、閲覧者のズーム環境（D_1 = 1cm、m_0 = 10 倍）のもとで、13 式（$\lambda = K \times u$）の比例関係（K の値は 1）を最良の状態で成立させるといえる。例えば D_1 が α cm、m_0 が β 倍の場合に、この比例関係を最良の状態で成立させる指数 n が γ とすれば、その特定のズーム環境（$D_1 = \alpha$、$m_0 = \beta$）においては、最適な指数 n の値は γ ということである。

(3) 最適指数 n_s の集団の確定

最適な指数 n を探索するシミュレーション作業は、最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 に関して、D_1 が 0cm（D_1 が 0 の場合、指数 n は 2 式から不定となるので、実際の計算では正の近傍の値を近似値として用いる）から 5cm までの範囲で 11 回（ここで示した回数は参考回数であり、11 以外の値であってもよい）、および m_0 が 1 倍（m_0 が 1 の場合、指数 n は 2 式から不定となるので、実際の計算では 1 の近傍の値［ただし 1 より大きな値］を近似値として用いる）から 15 倍までの範囲で 15 回（ここで示した回数は参考回数であり、15 以外の値であってもよい）行う。そして、D_1 と m_0 に関して、適当な値の組み合わせを作り、それぞれの組ごとに 6.1 節 (2) 項と同様な計算（係数の積 $k_2 \times a$ も 28 式を用いて新たに求め直す）を行い、6.1 節（3）項の最後でいうところの最適な指数 n の値を求めるのである。

実際には、D_1 の値の個数と m_0 の値の個数がそれぞれ 11 個と 15 個であるので、その全組み合わせ 165 組に対して、それぞれの組としての最適の指数 n の値を求める。組み合わせ 165 個は、閲覧者にとっての想定されるズーム環境を、粗いと言えども、予めリストアップしたものになる（精密化したいならば、組み合わせの数を増やせばよい）。

ここで、この 165 個の指数 n を一つの集団（集合）として捉え、その集団の要素となる指数を特に「最適指数」と呼び、n_s と表記する。特定の最大ズレ幅 D_1 と特定の拡大限界倍率 m_0 のもとで算出された最適指数 n_s は、閲覧者にとって最適なズーム環境を提供する指数 n となる。

(4) 最適指数 n_s の探索法のまとめ

上記の（1）項～（3）項で示した最適指数探索法の繰り返し手順を纏めておく。以下の手順に示された最大ズレ幅 D_1 などの分割数は、本論文の内容に即して具体的であるが、これらの値の設定

は任意である。精度を上げるためには、分割数を大きく取ればよい。図 4 に探索法の流れ図を掲げる。図の右側に以下の手順との対応を示すが、それは概括的な対応であることにご注意願いたい。

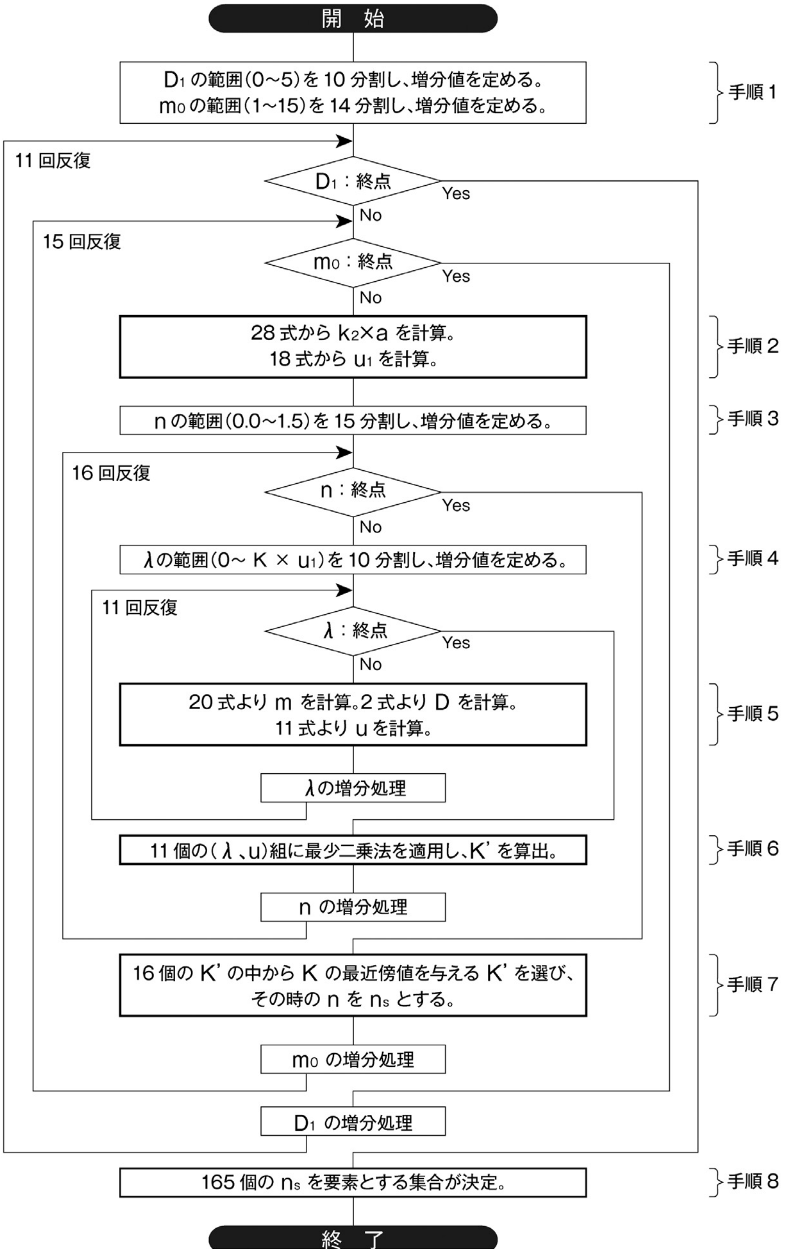


図 4　最適指数 n_s の探索法（流れ図）

手順 1：繰り返し計算に際して必要となる 2 式の D_1、m_0 をパラメータとして、その値を指定する。D_1、m_0 は、それぞれ 0.0 ～ 5.0cm、1.0 ～ 15.0 倍の範囲であり、その範囲をそれぞれ 10 分割、14 分割する（離散データ個数はそれぞれ 11 個、15 個）。最初の繰り返し過程（D_1、m_0 の始点）では、D_1 は 0.0 近傍、m_0 は 1.0 近傍を用いる。2 回目以降の繰り返し過程では、D_1、m_0 の値を、それぞれ順次増分する。

手順 2：倍率 m が m_1（m_1 の値は 1 倍）もとでズレ幅 D を D_1 とすると、2 式の係数の積 $k_2 \times a$ を 28 式を用いて、また 19 式と 20 式の定数 u_1 を 18 式を用いて、それぞれ定める。18 式の h、e は 50cm、6.5cm とする。

手順 3：繰り返し計算に際して必要となる 2 式の n をパラメータとして、その値を指定する。n は 0.0 ～ 1.5 の範囲であり、その範囲を 15 分割する（離散データの個数は 16 個）。最初の繰り返し過程（n の始点）では、n は 0.0 を用いる。2 回目以降の繰り返し過程では、n の値を順次増分する。

手順 4：λ は 19 式の範囲を取るので、その範囲を 10 分割し、$r(i) = (i - 1) \times K \times (u_1 / 10)$［i は 1 ～ 11 の値］なる増分の関数 r を用意する（変数 i は繰り返し回数を表す）。

手順 5a：λ の値を関数 r（i = 1）で与え、この値（値を λ_A とする）を用いて、21 式の m の関数 $f_1(\lambda)$、22 式の D の関数 $f_2(m)$、23 式の u の関数 $g_1(D)$ を順次介して、最終的に u の値を求める。この値を u_A とし、求められた λ と u の組を（λ_A、u_A）とする。

手順 5b：λ の値を関数 r（i = 2）で与え、この値（値を λ_B とする）を用いて、手順 5a と同様に、このときの u の値を求める。この値を u_B とし、求められた λ と u の組を（λ_B、u_B）とする。

手順 5c ～手順 5k：λ の値を関数 r（r = 3 ～ 11）で与え、i が 3 から 11 まで、手順 5a と同じ計算操作を繰り返し、このときの u の値を求める。求められた λ と u の組を（λ_C、u_C）～（λ_K、u_K）とする。

手順 6：（λ_A、u_A）～（λ_K、u_K）の 11 組に対して最小二乗法を適用し、残差（$\lambda - K' \times u$）の二乗和を最小にする定数 K′ の値を求める。

手順 7：n を増分し、手順 3 ～手順 6 を繰り返す。n の増分が終了したら（終点に達したら）、繰り返しは終了である。手順 6 で得られた 16 個の定数 K′ の値の中から K の最近傍値を与える n を（1 個だけ）選ぶ。これが、そのときの D_1、m_0 における最適指数 n_s である。

手順 8：手順 1 に戻り、新たに D_1、m_0 のパラメータの値を増分し、手順 1 から手順 7 までを繰り返す。D_1 および m_0 の増分が終了したら（終点に達したら）、繰り返しは終了である。このとき得られた 165 個が、最適指数 n_s の離散データの集合となる。

☆　　　　☆　　　　☆

本節で述べた、最適指数 n_s の集合を求める方法は、用いる 3D ディスプレイ装置には依存しない。従って、最適指数 n_s の離散データの集合から、次節で述べるような方法で補間式を一回だけ設定すれば、その式は、任意の 3D ディスプレイ装置に対して最適指数 n_s を算定する式として使用することが可能である。

6. 2　最適指数 n_s を算出できる補間式の設定法

最適指数 n_s が最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 を独立変数とする関数 f とし、また関数 f の内容も定まっているものと仮定すれば、SPV は関数 f を用いて、稼働開始時点で閲覧者の指定するズーム環境である D_1 と m_0 の値から、個々の立体写真の特性に基づく最適指数 n_s を自動的に計算

することが可能である。その関数fを以下の30式のように記述しよう。

$$n_s = f(D_1、m_0) \qquad (30)$$

ところで、前節で示した最適指数n_sは、特定のD_1と特定のm_0のもとでの離散データの組として求められただけで、任意のD_1と任意のm_0のもとで、30式の関数fが決定された訳ではない。従って、任意のD_1と任意のm_0のもとで、最適指数n_sを決めることは出来ない。

そこで、任意の最大ズレ幅D_1と任意の限界拡大倍率m_0のもとで最適指数n_sを決めることが可能となるように、離散データの組に補間法を適用し、30式の関数fを近似する補間式を定めることにする。補間式の形状は、n_sを3次元空間のz軸に対応させると、D_1とm_0はx軸とy軸に関して曲面を構成することになる。

補間式を具体的に定める方法として、多項式を用いる解析的な補間法（例えばスプライン補間など）やニューラルネットワークを利用する補間法がある。後者のニューラルネットワークは、前節で求めた165組の離散データの組を教師データとして与えると、補間式と等価な関数機能をその回路上に構築することが可能である(文献7)。

しかし、議論の先回りとなるが、7.1節の結果を精査したところ、最適指数n_sに関する補間式は緩やかで弱い非線形性（なだらかな非線形性）が想定されるので、本研究では、その補間式の簡便な定め方として、直観を用いたヒューリスティックな補間法を採用することにする。その実際の例は、7.3節で示す。

6.3　最大ズレ幅D_1の実寸法の算定法

(1)　遠近感制御定数aと結合定数k_{2A}

最大ズレ幅D_1は、3Dディスプレイ装置に依存する量であり、画面サイズや解像度によってその値は変わってくる。30式の関数fを近似する補間式を用いて最適指数n_sを求めるには、閲覧者の感知する最大ズレ幅D_1の画面上の実寸法を、SPV自らが算定できなければならない。

SPVで最大ズレ幅D_1を支配する因子は、文献1で遠近感制御定数と呼んでいる融像式（1式）の定数aである。その定数aは文献1で示したように、融像式を通して閲覧者の立体感よって評価・決定されるパラメータである。aはD_1と比例関係にあることは、以下の17式（m_1は1倍である）から理解される。

$$D_1 = k_2 \times a \times (1 - m_1 / m_0) \qquad (17式の再掲)$$

そこで、6.1節では積$k_2 \times a$を係数の塊として取り扱ったが、ここでは改めて積を個々の係数に分解し、係数k_2と遠近感制御定数aを個別に設定することにする。

まず、定数aの設定であるが、これについては前回の論文である文献1に詳しく説明してあるので、そこを参照して頂きたいが、その概略をここで示しておく。SPVが稼働するパソコンと3Dディスプレイ装置（ここでは立体メガネ方式の装置を想定）を用意する。設定対象の立体写真を、当該3Dディスプレイ画面に左右画像の重なりとして表示する。その重なり具合から、縮小限界倍率m_1のもとで1式の遠近感制御定数aを、そして拡大限界倍率m_0のもとで1式の2重像防止定数bを、それぞれ定めるのである（2つの定数は融像式の重要パラメータとなるものであるが、後者の定数bは、ここでの議論には直接関係しない）。確定された2つの定数a、bは立体写真固有の値でとなる。この設定段階では、最適指数n_sは未だ決められていないが、a、bともにその設定には指数nは関わらない。指数nの暫定値がSPV内部で設定されているので、定数a、bの設定完了の時点では、ズーム環境は最適ではないにしても、立体写真を閲覧することは可能である。

次に係数 k_2 の設定方法を述べよう。これは、遠近感制御定数 a と 2 重像防止定数 b の設定された 10 ～ 20 枚程度の立体写真をサンプルとして用いて行う。設定においても上記と同じ 3D ディスプレイ装置を使用する必要がある。個々の立体写真に対して、画面上で 2 重像となっている左右画像の最大ズレ幅 D_1 の実寸法を定規等で測定する（D_1 の実測方法は、8.4 節の補足を参照されたい）。個々の立体写真に対して測定された D_1 とそれに対となる遠近感制御定数 a（上記で定めた値）から、17 式を用いて個々の立体写真に対する係数 k_2 を算出する。

そして算出された個々の係数 k_2 の平均値を求めるが、これを以降、k_{2A} と記載する。k_{2A} は個々の立体写真固有の値ではなく、立体写真全体に対して共通の SPV の特性値となるので、17 式を以下の 31 式（m_1 は 1 倍）に書き換える。

$$D_1 = k_{2A} \times a \times (1 - m_1 / m_0) \qquad (31)$$

この k_{2A} を「結合定数」と呼ぶことにする。この呼称の意味は本節の最後で言及することにし、その設定法の実例は 7.4 節で紹介する。

(2) 解像度と画面サイズ

遠近感制御定数 a と結合定数 k_{2A} を決定するために、前項で使用した 3D ディスプレイ装置の画面サイズを S_0 インチ、画面の横方向の解像度を R_0 ピクセル数とする。このディスプレイ装置のもとで制作された 3D 写真コンテンツは、画面サイズが S インチで横解像度が R ピクセル数である、別の 3D ディスプレイ装置で閲覧上映されるかもしれない。このようなときには、31 式の結合定数 k_{2A} と遠近感制御定数 a を 3D ディスプレイ画面のハードウェア特性によって変換しなければならない（2 つの定数についての変換の詳細な説明については、8.3 節の補足を参照されたい）。

というのは、結合定数 k_{2A} は S_0 インチの画面のもとで求められているので、一般の S インチの画面サイズに対応させる必要がある。最大ズレ幅 D_1 は、k_{2A} および画面サイズ S と比例関係にあるので、k_{2A} には S / S_0 を乗じることになる。

また、a については 8.3 項の補足において詳述するが、ディスプレイ画面上における座標系の関係から融像式（1 式）においては、3D 写真コンテンツを閲覧上映する 3D ディスプレイ画面の横解像度が R ピクセル数に依存するように、遠近感制御定数 a を評価した 3D ディスプレイ画面の解像度 R_0 を基準にして、事前に融像式の定数 a の値には R / R_0 が乗じられている。その定数 a が 31 式の a の項となっている。従って、横解像度が R ピクセル数のディスプレイ画面で閲覧するには、最大ズレ幅 D_1 はその解像度が R ピクセル数のもとであっても一定の値でなければならないため、31 式の a の項には R_0 / R を乗じる必要がある。

ゆえに、以下の関係式が得られる。

$$D_1 = k_{2A} \times (S / S_0) \times a \times (R_0 / R) \times (1 - m_1 / m_0) \qquad (32)$$

この式は、基準とする 3D ディスプレイ装置のもとで結合定数 k_{2A} を定めれば、任意の 3D ディスプレイ装置のもとで利用可能な式である。ただし、上記の式は、S_0 インチの画面と S インチの画面が相似である場合に適用できるが、相似でなければ、S_0 インチの画面を基準とした横方向サイズの比を用いる必要がある。

このような係数の変換によって、「a は立体写真固有の遠近感に関係する定数」、また「k_{2A} は SPV の外部に関係する最大ズレ幅 D_1 と内部に関係する遠近感制御定数 a を結合する定数」というように、係数を明確に意味付けすることができる。k_{2A} を「結合定数」と呼ぶのは、このような意味からである。

7. シミュレーション結果と考察

7. 1　最適指数 n_s の探索の計算例

実際のシミュレーションでは、三菱 23 インチ FHD 型 3D ディスプレイ装置（解像度は 1920 × 1080）を用い、瞳孔間隔 e を 6.5cm、視距離 h を 50cm とした。縮小限界倍率 m_1 における最大ズレ幅 D_1 を 0.0cm（実際には近傍値 0.001cm を使用）から 0.5cm 刻みで 5.0cm まで、また拡大限界倍率 m_0 を 1.0 倍（実際には近傍値 1.001 倍を使用）から 1.0 倍の刻みで 15.0 倍までとし、その 165 組の組み合わせを作り、各組に対して 6.1 節の手続きを踏まえ、最適指数 n_s の値として 165 個を得た（前回の文献 1 の論文では、限定された一部のズーム環境［D_1 = 1.0cm、m_0 = 10 倍］しか行わなかった）。そして、27 式を用いて最適な指数 n_s に対する Y の値（距離×倍率の値）を求めた。その結果の一部を表として以下に示す。

(1)　λ と u の対応

表 1 の中段は、最大ズレ幅 D_1 が 0.5cm で拡大限界倍率 m_0 が 4 倍のズーム環境において、指数 n が 0.6 であるとき、SPV 仮想空間と脳内イメージ空間の相互の線形性が最適に保たれることを示している。そのときの 29 式の定数 K′ は 0.993 である。また、λ − K × u（K は 1 の値、λ は 0.0 ～ 4.17 の範囲）についての RMS は 0.055 であり、これは妥当な値であると思われる。この妥当性については、本節の表 3 の説明箇所で述べることにする。std_ λ と std_u は、距離 λ の最大を 1.0 に規格化した場合であり、std_RMS はその規格化された RMS である。

表 1 の上段と下段は、同じズーム環境における指数 n が 0.2 と 1.0 の場合であるが、このときは、定数 K′ が 1 から外れているので、SPV 仮想空間と脳内イメージ空間の相互の線形性は十分に保たれていないことが分かる。

各段の最後の項目は、27 式の Y の値（距離×立体像の倍率）を示しているが、これは、L_1 で割って規格化している。この結果から中段の場合（上記 2 つの空間の相互の線形性が成り立つ場合）には、Y の値がほぼ 1 に近い値となっており、「距離×立体像の倍率＝一定」が成立すると考えてよい。ただし、これは、最大ズレ幅 D_1 が比較的小さいときである。この考察は 7.2 節で再度行う。なお、表 1 の上段と下段においては、Y の値が 1 から大きく外れている。

表 1　SPV 仮想空間の λ と脳内イメージ空間の u の対応の一例

●ズレ幅D1＝0.5 拡大限界倍率m0＝4.0 における 指数n＝0.2　の場合
定数K＝0.857　　λとuに関する標準偏差σ＝0.339 (nrm_σ＝0.081)
<λとuに関する詳細なデータ および 距離×倍率データ>

λ=0.00	nrm_λ=0.00	m=4.00	u=0.00	nrm_u=0.00	b=4.00	nrm_(u+L0)*b=1.00
λ=0.42	nrm_λ=0.10	m=3.08	u=0.76	nrm_u=0.18	b=3.12	nrm_(u+L0)*b=1.21
λ=0.83	nrm_λ=0.20	m=2.50	u=1.43	nrm_u=0.34	b=2.57	nrm_(u+L0)*b=1.31
λ=1.25	nrm_λ=0.30	m=2.11	u=1.99	nrm_u=0.48	b=2.19	nrm_(u+L0)*b=1.33
λ=1.67	nrm_λ=0.40	m=1.82	u=2.44	nrm_u=0.59	b=1.91	nrm_(u+L0)*b=1.32
λ=2.08	nrm_λ=0.50	m=1.60	u=2.83	nrm_u=0.68	b=1.69	nrm_(u+L0)*b=1.28
λ=2.50	nrm_λ=0.60	m=1.43	u=3.16	nrm_u=0.76	b=1.52	nrm_(u+L0)*b=1.25
λ=2.92	nrm_λ=0.70	m=1.29	u=3.46	nrm_u=0.83	b=1.38	nrm_(u+L0)*b=1.20
λ=3.33	nrm_λ=0.80	m=1.18	u=3.72	nrm_u=0.89	b=1.26	nrm_(u+L0)*b=1.16
λ=3.75	nrm_λ=0.90	m=1.08	u=3.95	nrm_u=0.95	b=1.17	nrm_(u+L0)*b=1.12
λ=4.17	nrm_λ=1.00	m=1.00	u=4.17	nrm_u=1.00	b=1.08	nrm_(u+L0)*b=1.08

●ズレ幅D1＝0.5 拡大限界倍率m0＝4.0 における 指数n＝0.6　の場合
定数K＝0.993　　λとuに関する標準偏差σ＝0.052 (nrm_σ＝0.013)
<λとuに関する詳細なデータ および 距離×倍率データ>

λ=0.00	nrm_λ=0.00	m=4.00	u=0.00	nrm_u=0.00	b=4.00	nrm_(u+L0)*b=1.00
λ=0.42	nrm_λ=0.10	m=3.08	u=0.30	nrm_u=0.07	b=3.10	nrm_(u+L0)*b=0.94
λ=0.83	nrm_λ=0.20	m=2.50	u=0.74	nrm_u=0.18	b=2.54	nrm_(u+L0)*b=0.97
λ=1.25	nrm_λ=0.30	m=2.11	u=1.21	nrm_u=0.29	b=2.16	nrm_(u+L0)*b=1.01
λ=1.67	nrm_λ=0.40	m=1.82	u=1.67	nrm_u=0.40	b=1.88	nrm_(u+L0)*b=1.03
λ=2.08	nrm_λ=0.50	m=1.60	u=2.12	nrm_u=0.51	b=1.67	nrm_(u+L0)*b=1.05
λ=2.50	nrm_λ=0.60	m=1.43	u=2.55	nrm_u=0.61	b=1.50	nrm_(u+L0)*b=1.06
λ=2.92	nrm_λ=0.70	m=1.29	u=2.97	nrm_u=0.71	b=1.37	nrm_(u+L0)*b=1.07
λ=3.33	nrm_λ=0.80	m=1.18	u=3.38	nrm_u=0.81	b=1.26	nrm_(u+L0)*b=1.08
λ=3.75	nrm_λ=0.90	m=1.08	u=3.78	nrm_u=0.91	b=1.16	nrm_(u+L0)*b=1.08
λ=4.17	nrm_λ=1.00	m=1.00	u=4.17	nrm_u=1.00	b=1.08	nrm_(u+L0)*b=1.08

●ズレ幅D1＝0.5 拡大限界倍率m0＝4.0 における 指数n＝1.0　の場合
定数K＝1.092　　λとuに関する標準偏差σ＝0.302 (nrm_σ＝0.073)
<λとuに関する詳細なデータ および 距離×倍率データ>

λ=0.00	nrm_λ=0.00	m=4.00	u=0.00	nrm_u=0.00	b=4.00	nrm_(u+L0)*b=1.00
λ=0.42	nrm_λ=0.10	m=3.08	u=0.12	nrm_u=0.03	b=3.08	nrm_(u+L0)*b=0.84
λ=0.83	nrm_λ=0.20	m=2.50	u=0.39	nrm_u=0.09	b=2.52	nrm_(u+L0)*b=0.81
λ=1.25	nrm_λ=0.30	m=2.11	u=0.74	nrm_u=0.18	b=2.14	nrm_(u+L0)*b=0.82
λ=1.67	nrm_λ=0.40	m=1.82	u=1.14	nrm_u=0.27	b=1.86	nrm_(u+L0)*b=0.85
λ=2.08	nrm_λ=0.50	m=1.60	u=1.59	nrm_u=0.38	b=1.65	nrm_(u+L0)*b=0.88
λ=2.50	nrm_λ=0.60	m=1.43	u=2.06	nrm_u=0.49	b=1.49	nrm_(u+L0)*b=0.92
λ=2.92	nrm_λ=0.70	m=1.29	u=2.56	nrm_u=0.61	b=1.36	nrm_(u+L0)*b=0.96
λ=3.33	nrm_λ=0.80	m=1.18	u=3.07	nrm_u=0.74	b=1.25	nrm_(u+L0)*b=1.00
λ=3.75	nrm_λ=0.90	m=1.08	u=3.61	nrm_u=0.87	b=1.16	nrm_(u+L0)*b=1.04
λ=4.17	nrm_λ=1.00	m=1.00	u=4.17	nrm_u=1.00	b=1.08	nrm_(u+L0)*b=1.08

(2) 最適指数 n_s の選定

表 2 はズーム環境において、拡大限界倍率 m_0 が変化すると、最適指数 n_s も変化する例を示している。上段は最大ズレ幅 D_1 が 0.5 cm で拡大限界倍率 m_0 が 4.0 倍のズーム環境、また下段は最大ズレ幅 D_1 が 0.5 cm で拡大限界倍率 m_0 が 6.0 倍のズーム環境の場合である。そしてともに、指数 n を 0.0 から 1.5 まで変化させたときの 29 式の定数 K′、および λ − K × u（K は 1 の値、λ は 0.0 ～ 4.17 の範囲）についての RMS と規格化された RMS（表 2 では M、std_M と略記）を示している。RMS の妥当性については、本節の表 3 の説明箇所で述べることにする。このズーム環境では、上段における最適指数 n_s は 0.6、下段における最適指数 n_s は 0.7 であり、前者の K′ は 0.993、後者のそれは 0.994 である。

表2　特定のズーミング環境における最適指数 n_s の選定

```
●ズーミング環境が ズレ幅D1=0.5  拡大限界倍率m0=4.0 における  最適指数ns=0.6
        定数K=0.993
        λとuに関するσ=0.052 (規格化されたσ=0.013)
  <指数nが 0.0から1.5 までの詳細データ (上から7行目が最適指数のデータ) >
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.0  K=0.771  σ=0.550  nrm_σ=0.132
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.1  K=0.815  σ=0.442  nrm_σ=0.106
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.2  K=0.857  σ=0.339  nrm_σ=0.081
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.3  K=0.895  σ=0.244  nrm_σ=0.059
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.4  K=0.930  σ=0.156  nrm_σ=0.037
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.5  K=0.963  σ=0.079  nrm_σ=0.019
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.6  K=0.993  σ=0.052  nrm_σ=0.013
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.7  K=1.021  σ=0.107  nrm_σ=0.026
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.8  K=1.047  σ=0.174  nrm_σ=0.042
    D1=0.5  m0=4.0  n=0.9  K=1.070  σ=0.239  nrm_σ=0.057
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.0  K=1.092  σ=0.302  nrm_σ=0.073
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.1  K=1.113  σ=0.362  nrm_σ=0.087
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.2  K=1.132  σ=0.420  nrm_σ=0.101
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.3  K=1.149  σ=0.474  nrm_σ=0.114
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.4  K=1.165  σ=0.525  nrm_σ=0.126
    D1=0.5  m0=4.0  n=1.5  K=1.180  σ=0.574  nrm_σ=0.138
--------------------------------------------------------------------------------
●ズーミング環境が ズレ幅D1=0.5  拡大限界倍率m0=6.0 における  最適指数ns=0.7
        定数K=0.994
        λとuに関するσ=0.045 ( 規格化されたσ=0.011)
  <指数nが 0.0から1.5 までの詳細データ (上から8行目が最適指数のデータ) >
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.0  K=0.721  σ=0.678  nrm_σ=0.163
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.1  K=0.769  σ=0.561  nrm_σ=0.135
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.2  K=0.814  σ=0.451  nrm_σ=0.108
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.3  K=0.856  σ=0.347  nrm_σ=0.083
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.4  K=0.895  σ=0.250  nrm_σ=0.060
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.5  K=0.931  σ=0.160  nrm_σ=0.038
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.6  K=0.963  σ=0.080  nrm_σ=0.019
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.7  K=0.994  σ=0.045  nrm_σ=0.011
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.8  K=1.022  σ=0.101  nrm_σ=0.024
    D1=0.5  m0=6.0  n=0.9  K=1.048  σ=0.169  nrm_σ=0.041
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.0  K=1.072  σ=0.236  nrm_σ=0.057
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.1  K=1.094  σ=0.300  nrm_σ=0.072
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.2  K=1.114  σ=0.360  nrm_σ=0.086
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.3  K=1.133  σ=0.418  nrm_σ=0.100
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.4  K=1.150  σ=0.472  nrm_σ=0.113
    D1=0.5  m0=6.0  n=1.5  K=1.166  σ=0.524  nrm_σ=0.126
```

(3) 最適指数 n_s の集団の確定

表3は、拡大限界倍率 m_0 が1.0倍（実際の近傍値は1.001倍）から15倍をカバーするときの最大ズレ幅 D_1 の2例の最適指数 n_s を示している。表3では、最大ズレ幅 D_1 が0.5cm(上段)と1.0cm（下段）において計算された最適指数 n_s、そのときの29式の定数K´、および $\lambda - K \times u$（Kの値は1。λ は、D_1 が0.5の場合は0.0～4.17の範囲、D_1 が1.0の場合は0.0～9.09の範囲）についてのRMSと規格化されたRMS（表3ではM、std_Mと略記）を示している。指数nが最適指数となる場合のRMS値は、バラツキの範囲が λ のズーム距離（$L_1 - L_0$）に対して、D_1 が1.0cmであり m_0 が1.0倍（実際の近傍値は1.001）の場合を除いて、最大でも2%未満を示しているので、最適指数 n_s は、SPV仮想空間と脳内イメージ空間に対して妥当な線形の対応関係を与えているといえる（m_0 が1.0倍近傍においては、D_1 が大きくなるに従ってRMS値は徐々に大きくなるが、m_0 が1倍近傍ということは、事実上ズーミング動作は小さいので、実用上は差支えない)。上段と下段の結果から、最大ズレ幅 D_1 が大きくなると、最適指数 n_s は小さくなることが推察される。

なお、表1～表3では、計算の一部しか示していないが、全体の結果からは最適指数 n_s の D_1 と m_0 に関しての非線形性は緩やかであると言える。上記の165個の結果を統合した最適指数 n_s は D_1 と m_0 の非線形関数となるが、補間式を定める作業は、7.3節で示すことにする。

表 3　最大ズレ幅 D_1 が 0.5 cm と 1.0 cm における最適指数 n_s の集団

```
●ズレ幅Ｄ１＝0.5 拡大限界倍率ｍ０＝1.0～15.0 における 最適指数ｎｓ
D1=0.5  m0=01.0  ns=0.0  K'=1.017  M=0.057  std_M=0.014
D1=0.5  m0=02.0  ns=0.3  K'=0.981  M=0.065  std_M=0.016
D1=0.5  m0=03.0  ns=0.5  K'=0.990  M=0.057  std_M=0.014
D1=0.5  m0=04.0  ns=0.6  K'=0.993  M=0.055  std_M=0.013
D1=0.5  m0=05.0  ns=0.7  K'=1.005  M=0.068  std_M=0.016
D1=0.5  m0=06.0  ns=0.7  K'=0.994  M=0.048  std_M=0.011
D1=0.5  m0=07.0  ns=0.7  K'=0.985  M=0.056  std_M=0.013
D1=0.5  m0=08.0  ns=0.8  K'=1.008  M=0.063  std_M=0.015
D1=0.5  m0=09.0  ns=0.8  K'=1.003  M=0.047  std_M=0.011
D1=0.5  m0=10.0  ns=0.8  K'=0.999  M=0.037  std_M=0.009
D1=0.5  m0=11.0  ns=0.8  K'=0.995  M=0.033  std_M=0.008
D1=0.5  m0=12.0  ns=0.8  K'=0.992  M=0.034  std_M=0.008
D1=0.5  m0=13.0  ns=0.8  K'=0.990  M=0.038  std_M=0.009
D1=0.5  m0=14.0  ns=0.8  K'=0.988  M=0.044  std_M=0.011
D1=0.5  m0=15.0  ns=0.8  K'=0.986  M=0.050  std_M=0.012
------------------------------------------------------------
●ズレ幅Ｄ１＝1.0 拡大限界倍率ｍ０＝1.0～15.0 における 最適指数ｎｓ
D1=1.0  m0=01.0  ns=0.0  K'=1.036  M=0.263  std_M=0.029
D1=1.0  m0=02.0  ns=0.3  K'=0.999  M=0.096  std_M=0.011
D1=1.0  m0=03.0  ns=0.5  K'=1.008  M=0.158  std_M=0.017
D1=1.0  m0=04.0  ns=0.5  K'=0.980  M=0.149  std_M=0.016
D1=1.0  m0=05.0  ns=0.6  K'=0.994  M=0.094  std_M=0.010
D1=1.0  m0=06.0  ns=0.6  K'=0.981  M=0.143  std_M=0.016
D1=1.0  m0=07.0  ns=0.7  K'=1.003  M=0.096  std_M=0.011
D1=1.0  m0=08.0  ns=0.7  K'=0.997  M=0.070  std_M=0.008
D1=1.0  m0=09.0  ns=0.7  K'=0.991  M=0.080  std_M=0.009
D1=1.0  m0=10.0  ns=0.7  K'=0.986  M=0.106  std_M=0.012
D1=1.0  m0=11.0  ns=0.7  K'=0.983  M=0.133  std_M=0.015
D1=1.0  m0=12.0  ns=0.8  K'=1.011  M=0.111  std_M=0.012
D1=1.0  m0=13.0  ns=0.8  K'=1.008  M=0.089  std_M=0.010
D1=1.0  m0=14.0  ns=0.8  K'=1.006  M=0.070  std_M=0.008
D1=1.0  m0=15.0  ns=0.8  K'=1.004  M=0.055  std_M=0.006
```

7. 2　距離×倍率の評価の計算例

(1)「距離×立体像の倍率＝一定」としての Y 値の一般的特性

本節では、最適指数 n_s のもとで、SPV 仮想空間において成立する「距離×倍率＝一定」を表す 7 式と同様の関係が、脳内イメージ空間においても成り立つかどうかを検証する。この関係を示すのが 27 式である。27 式は、立体写真の動きの範囲を表す λ が 0（始点）から $L_1 - L_0$（終点）まで変化するときの、脳内イメージ空間における Y の値の変化を調べるための式である。D_1 が小さい場合には、距離 λ の変化に従って、Y は単調に増加する（n に多少の誤差があることから、λ の 0（始点）付近また $L_1 - L_0$（終点）付近の局所的範囲のみでごく小さな増減が見られる）。λ が終点になると、Y の値は λ が始点のときよりもより大きくなる。この傾向は、表 1 の中段に示す結果からも理解される。なお、指数 n が明らかに最適値から外れている場合には、Y の値は λ の変化に対して単調増加は維持されなくなり、ある周期で増加したり減少したりする。

Y の増加の割合は、最大ズレ幅 D_1 の値が大きくなるに従っても、徐々に拡大し、ある所から Y

は徐々に大きくなる。そして、Y は D ／（e － D）の項を持っていることから、D が e の値を取るとき、Y の値は無限大に発散する（この点については、8.2 節の補足を参照されたい)。従って個々の閲覧者にとって、「Y がおおむね一定」は、D のある範囲内でしか成り立たない。これは文献 1 で示した幾何光学的モデル自体の適用限界の問題であり、その限界は心理物理実験で確かめられると思われるが、ここではその指摘に止める。

(2)「距離×立体像の倍率」の具体的計算例

最適指数 n_s を与えるズーム環境での「距離×立体像の倍率」は具体的にはどうであろうか？　最大ズレ幅 D_1 が 0.5 cm であり m_0 が 4 倍のときの 27 式における Y の値に関する標準偏差は、Y の平均値が 5.75 のもとで 0.258 であり、立体視という環境においては、まずまずの値となっている。そして、D_1 が 1.0 cm であり m_0 が 4 倍のときは、Y の平均値が 13.37 のもとで標準偏差は 0.850 となり、やや大き目となるが、立体視という環境では、特に大きいともいえない値であると思われる。しかし、D_1 の値がより大きくなるに従って、標準偏差はより大きくなるが、指数 n が最適指数 n_s の場合には、Y は λ の増加に対する単調増加傾向は維持されている（ただし、前述のように λ の始点と終点の局所部分においては、最適指数 n_s の誤差のためと思われるが、そのため多少減少する)。

7.5 節の先回りの議論となるが、サンプルの 3D 写真コンテンツ（27 組の立体写真）における D_1 の計算値は、50 インチ FDH 型 3D テレビを用いた場合、拡大限界倍率 m_0 が 2 倍程度～ 6 倍程度のもとで、そのほとんどが 1.0 cm 以下であり、1.0 cm 以上が 5 組あり、その最大値は 1.08 cm であった。8.5 節の補足で述べる 3D 閲覧における安全基準を考慮すると、50 インチ程度までの 3D ディスプレイ画面においては、実際の 3D 写真コンテンツの D_1 の大きさは 1 cm ～ 2 cm 程度と見積もられることから、実用レベルで大概的には「Y の値はおおむね一定」と見なしてもよいと思われる。

閲覧者の心理的な観点からすると、SPV 仮想空間に対して脳内イメージ空間の線形性が維持されている場合（最適指数 n_s の場合）には、Y の値は λ の変化に対して、単調増加の傾向を保つため（ただし、前述のように λ の始点と終点の局所部分においては、最適指数 n_s の誤差のためと思われるが、多少減少する)、次のことが言えると思われる。閲覧者はズーミング過程において、立体像の倍率増加にも関わらず、無意識のうちに「Y がおおむね一定である」というような感覚で立体像を視認して、特に違和感を感じていないようである。従って、「最大ズレ幅 D_1 が 3 cm 程度の範囲までは、閲覧者は心理的には Y はおおむね一定と感じている」として、実用上問題はないと結論付けて構わないと言えよう。

なお参考のために、画像の倍率 m とそのとき視認される立体像の倍率 b（12 式）の比を b ／ m で表し、12 式を用いて距離 λ_1 におけるその比を示しておく。D_1 が 0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm、4 cm において比 b ／ m は、それぞれ 1.08、1.18、1.44、1.86、2.60 と増加していく。しかし、現実的には意外にも、視認される立体像の倍率 b の増加は、多くの閲覧者にとって不自然には感じられないようである（筆者もその一人)。このような立体像の倍率に関する閲覧者の視感覚については、今後の検討課題でもある。

7. 3　最適指数 n_s を算出できる補間式の具体例

離散データの補間を行うには、スプライン補間などの解析的な方法もあるが、離散データ間の変化が緩やかな場合には、直観を用いたヒューリスティックな補間を採用するのも一つのやり方であ

る。7.1 節の結果から n_s の関数 f（30 式）は緩やか非線形性が推察されるので、本研究では、関数 f を近似する補間式の簡便な定め方として、165 組の計算結果（離散データ）から個々のデータ間の関連具合を直観的に把握してヒューリスティックに補間式を作り出すという方法を採用した。そして、最終的にはプログラムコード（コードの逐次実行による方法）の形式で非線形の補間式を設定することにした。

式の定め方は次の通りである。D_1、m_0、n_s の値の一覧リストを作成した。リストのある特定の D_1 を眺め、その中で n_s と m_0 の関係具合を精査した。そうすると、指数 n_s と倍率 m_0 の離散データの関係は、近似的に対数式の関係にあることが見出された。そこでまず、以下の対数式を曲線当てはめとして用いることとし、

$$n_s = a \times \log(m_0) + b \tag{33}$$

33 式における係数 a と b を概略的に決定した。そして次に、その対数の形状が、D_1 が、0.0cm の近傍から 5.0cm に変化するに従って、ほぼ同じような対数式の形状を保ったままで、指数 n_s の値が徐々に小さく変化していくことを把握した。そこで、先に求めた a、b を用いて、a と D_1、b と D_1 の関係が一次式の補間式になるようした。

この結果を逐次実行型プログラムコード（Java 言語）として、以下に示す。

```
p1 = 0.26;q1 =  0.14;
p2 = 0.12;q2 = − 0.05;
r = （p2 − p1）／ 9.;
s = （q2 − q1）／ 9.;
d = D1*2. − 1.;
a = p1 + r*（d）;
b = q1 + s*（d）;
ns = a*Math.log（m0） + b;
```

ここで、係数 a を小さくすると、最適指数 n_s は扁平化し、係数 a を大きくすると、n_s は拡大限界倍率 m_0 の高倍率領域でより大きくなる。また係数 b を大きくすると、最適指数 n_s は全体が均一に増分されて大きくなる。また、最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 の関係については、D_1 が大きくなると最適指数 n_s は小さくなり、m_0 が大きくなると、最適指数 n_s は大きくなる。上記のコードは、①拡大限界倍率 m_0 が 1.5 倍から 15 までの範囲、②最大ズレ幅 D_1 が 0.0 の近傍から 5.0 までの範囲、のそれぞれにおいて、最適指数 n_s の値を連続的に算出することができる。しかし、33 式の係数 a、b は、直観によるヒューリスティックな方法で見出され、その値を決める離散データの組（165 組）も少ない状況なので、得られた 33 式は、精度を十分に満たしている訳ではないことに注意されたい。

表 4 に、理論的に算定された最適指数 n_s に対して、上記の補間式を用いて求められた補間値を示す。理論値は 6.1 節の最適指数探索法に従って算定された、最大ズレ幅 D_1 と倍率 m_0 に対する最適指数 n_s の値であり、補間値はそれに対応して 33 式の補間式で求められた指数 n_s の値である。理論値の算定が 7.1 節では小数点以下 1 桁で行われたため、それに対応する補間値も同じく 1 桁で記載している。精度は欠けるが、理論値と補間値では、大概的な形状の示す傾向はかなりの良好な一致が見られる。この補間式を用いて、実際の 3D 写真コンテンツに使用した具体例を 7.5 節で示す。なお、ここで示した直観によるヒューリスティックな補間法は、常に首尾よく行くとは限らないことを付け加えておく。

表 4　最適指数 n_s の理論値と補間値の比較

	ズレ幅　D1 ０．０cm 近傍		ズレ幅　D1 １．０cm		ズレ幅　D1 ２．０cm		ズレ幅　D1 ３．０cm		ズレ幅　D1 ４．０cm		ズレ幅　D1 ５．０cm	
倍率 m0	理論値 ns	補間値 ns	理論値 ns	補間値 ns	理論値 ns	補間値 ns	理論値 ns	補間値 ns	理論値 ns	補間値 ns	理論値 ns	補間値 ns
１．０近傍	０．０	０．２	０．０	０．１	０．０	０．１	０．０	０．０	０．０	０．０	０．０	０．０
２．０	０．４	０．４	０．３	０．３	０．２	０．２	０．０	０．２	０．０	０．１	０．０	０．０
３．０	０．５	０．５	０．４	０．４	０．３	０．３	０．２	０．２	０．１	０．２	０．０	０．１
４．０	０．６	０．５	０．５	０．５	０．４	０．４	０．３	０．３	０．１	０．２	０．０	０．１
５．０	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．３	０．２	０．２	０．０	０．１
６．０	０．７	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．３	０．３	０．１	０．２
７．０	０．８	０．７	０．７	０．６	０．６	０．５	０．４	０．４	０．３	０．３	０．１	０．２
８．０	０．８	０．７	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．４	０．３	０．３	０．１	０．２
９．０	０．８	０．８	０．７	０．７	０．６	０．５	０．５	０．４	０．３	０．３	０．２	０．２
１０．０	０．８	０．８	０．７	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．３	０．３	０．２	０．２
１１．０	０．８	０．８	０．７	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．２	０．２
１２．０	０．９	０．８	０．８	０．７	０．６	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．２	０．２
１３．０	０．９	０．９	０．８	０．７	０．７	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．２	０．３
１４．０	０．９	０．９	０．８	０．８	０．７	０．６	０．５	０．５	０．４	０．４	０．２	０．３
１５．０	０．９	０．９	０．８	０．８	０．７	０．７	０．５	０．５	０．４	０．４	０．２	０．３

7. 4　最大ズレ幅 D_1 の実寸法を算定する具体例

結合定数 k_{2A} を計算しそれを用いて最大ズレ幅 D_1 の実寸を算定した実例を紹介しよう。計測には三菱 23 インチ FHD 型 3D ディスプレイ装置（解像度は 1920 × 1080）を用いている。計算対象の立体写真は、『立体写真拡大鏡－ズームする魅惑の立体像』（文献 8）であり、そのサンプル数は 16 組である。個々の立体写真において定められた遠近感制御定数 a の値とその写真における最大ズレ幅 D_1 の実測値を用いて個々の係数 k_2 を計算すると、表 5 に示すようになった。また、その平均値である結合定数 k_{2A} は 0.521 mm（標準偏差は、0.0508）が得られた。この結果から、結合定数 k_{2A} は 31 式（および 32 式）における唯一の定数となることが分かる。そこで、その結合定数 k_{2A} を用いると、サンプル以外の一般の立体写真の画面に映し出された最大ズレ幅 D_1 の実寸値を、31 式あるいは 32 式（S_0、S の値はともに 23、また R_0、R の値はともに 1920）を用いて算定することが可能となる。サンプルに対してそれを行ったところ、表 4 に示すように、その計算値は実測値とほぼ満足する範囲で一致した。なお、表中の D_1 および k_2 と k_{2A} に関しては、単位は cm 単位でなく mm 単位で記述している。

表 5　結合定数 k_2A と最大ズレ幅 D_1 の計算値
（『立体写真拡大鏡』をサンプルとして）

番号	作品名	拡大限界倍率(m0)	遠近感制御定数(a)	ズレ幅(D1)実測値	係数(k2)計算値	ズレ幅(D1)計算値
1	郷陽人形	8.0	8.66	4	0.528	3.9
2	冨士屋洋館	5.8	8.90	4	0.543	3.8
3	梅小路電車区	5.3	15.18	6～7	0.528	6.4
4	冨士屋本館	4.3	12.07	4～5	0.486	4.8
5	民家園	3.5	8.28	3	0.507	3.0
6	東博宝物	3.5	7.35	3	0.571	2.7
7	水屋	8.1	6.48	3	0.528	2.9
8	フランス人形	3.3	5.62	2～3	0.638	2.0
9	こども動物園	4.3	11.17	5	0.583	4.4
10	湯上り人形	7.4	8.34	4	0.555	3.7
11	寺院	4.2	20.51	7	0.448	8.1
12	桂離宮	7.0	13.08	5	0.446	5.8
13	観音	3.2	13.03	4～5	0.502	4.6
14	東博面	3.7	10.23	4	0.536	3.8
15	モデル嬢	2.2	7.48	2	0.490	2.1
16	郷土人形	3.0	16.78	5	0.447	5.8
平均					結合定数 0.521	

7.5　稼働中の SPV 自身による最適指数 n_s の算定例

ここまでで議論を経て、もし 6.2 節で述べた 30 式の関数 f を近似する補間式の設定が可能ならば、稼働中の SPV は自らその補間式を用いて閲覧者が視認している立体写真に対しての、最適指数 n_s の値を決定することが出来る。

閲覧者がズーミング開始時に眺める最大ズレ幅 D_1（縮小限界倍率 m_1 のもとでの 2 重画像のズレ幅）は、32 式を用いて SPV 内部で計算可能である。また、30 式を近似する補間式は、7.3 節の 33 式であり、それは定まっている。従って、ズーム環境を定める最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 のもとで、SPV はその補間式（33 式）を用いて、最適指数 n_s を稼働中に自動算出できる。そして、SPV は算定された最適指数 n_s の適用された融像式（1 式）を用いて、個々の立体写真毎に最適なズーミングを行うことが可能となる。

SPV の 3D 写真コンテンツ『3D 横浜人形の家―人間国宝・平田郷陽の世界』[文献 9] を実例として取り上げてみよう。3D ディスプレイ装置として現在は、大型の 3D テレビを用いることが多い。そこで 50 インチ FHD 型 3D テレビを想定した場合の最適指数 n_s を求めてみる。32 式の結合定数

k_{0A} は、7.4 節の表 5 から 0.521mm と確定している。そして、その式の S_0、S の値は 23、50、また R_0、R の値はともに 1920 である。これらの値を用いて、上記の 3D 写真コンテンツのサンプル 27 組の立体写真について、設定された拡大限界倍率 m_0 と遠近感制御定数 a のもとで 32 式から最大ズレ幅 D_1 を求め、そして、33 式の補間式（実際には 7.3 節の Java コード）から最適指数 n_s を計算した。その結果を表6に示す。表中の D_1 に関しては、単位はcm単位でなくmm単位で記述している。

なお、表 6 中で最大ズレ幅 D_1 が 0.0（* の記号が付けられている箇所）となるのは、遠近感制御定数 a が 0.0 の場合である。このときは、最適指数 n_s は、実際にはどのような値を取ってもよく、ズーミングの計算には影響しない。この場合、後退限界距離 λ_1 は 0.0 となりズーミングは行われず、立体像は画面上に留まるだけである。

表 6　50 インチ FHD 型 3D テレビ画面を想定した最適指数 n_s の計算値
（『3D 横浜人形の家』をサンプルとして）

写真番号	倍率 m0	ズレ幅 D1	指数 n s	写真番号	倍率 m0	ズレ幅 D1	指数 n s
1	6.1	7.9	0.58	15	3.2	9.1	0.40
2	4.3	8.7	0.48	16	5.0	10.6	0.50
3	5.4	10.8	0.52	17	4.3	10.2	0.47
4	2.8	6.0	0.39	18	3.1	7.7	0.41
5	5.0	9.1	0.52	19	4.0	7.1	0.48
6	5.0	9.0	0.52	20	2.2	6.2	0.33
7	5.0	10.6	0.50	21	3.5	8.1	0.43
8	2.2	8.3	0.32	22	3.9	7.0	0.47
9	3.9	8.5	0.46	23	2.8	3.6	0.41
10	4.0	8.5	0.46	24	5.0	7.5	0.53
11	4.2	10.1	0.46	25	3.4	0.0（＊）	
12	2.2	6.2	0.33	26	4.2	8.6	0.48
13	3.9	7.0	0.47	27	4.3	7.2	0.49
14	2.2	9.3	0.31				

（＊）このときは、立体感制御定数 a が 0.0 で、指数 n s は定まらない。

32 式と 33 式（実際には 7.3 節の Java コード）を実装した SPV が三菱 23 インチ FHD 型 3D ディスプレイ装置のもとで n_s を自動計算し、SPV 自身がリアルタイムにその値を用いて、ズーミング映像（上記の『3D 横浜人形の家－人間国宝・平田郷陽の世界』）を上映するというテストを行った。その結果は、筆者および制作関係者にとって、十分満足のいくものであった。

8. より深い議論・・・補足

8. 1　λとuの対応付け

(1) 対応可能な理由

第 5 章では、SPV 仮想空間と脳内イメージ空間において、λ と u に関して、以下の対応付けを行っている。この対応がなぜ可能なのか、その理由を述べることにする。

$\lambda_0 = K \times u_0$　　　　（15 式の再掲）

$\lambda_1 = K \times u_1$　　　　（16 式の再掲）

まず、16 式の λ_1 と u_1 の対応付けを説明しよう。図 2（b）における脳内イメージ空間において、3D ディスプレイ画面に映る左目用と右目用の画像は重なり合い、立体写真の 2 重画像となっているが、その左右の画像は閲覧者の左右の網膜に分離して提示される。そして、閲覧者の脳は 3D ディスプレイ画面から u_1 の位置に立体像を視認する。このとき、閲覧者の網膜に映る像は、立体像の位置に立体写真に写る物体と等価な物体 A（この物体を A と特称する）が存在するとした場合、物体 A を眺めた場合と同じ像なのである。閲覧者には網膜に映る像が立体像なのか物体 A なのかを区別することができない。従って閲覧者にとっては、立体像の位置に物体Aが、立体像に代わって存在するとしても矛盾は生じない (文献 5)。

一方、図 2（a）における SPV 仮想空間において、投影面から λ_1 の距離に存在する立体写真は、透視投影されて投影面に左目用と右目用の画像が 2 重画像として映る。ところで、λ_1 の位置に立体写真に写る物体と等価な物体 A をおいても、投影面には物体 A が透視投影されて同じ画像が投影されることになる。従って、λ_1 の位置に立体写真が存在しても物体 A が存在しても投影面に映し出される画像は同じとなる。

このように、「距離 λ_1 の位置に物体 A が存在し、閲覧者も距離 u_1 の位置に物体 A を眺めている」と見なせるので、SPV 仮想空間の λ_1 と脳内イメージ空間の u_1 を 16 式で対応付けることが可能となるのである。

λ_0 と u_0 についても 15 式で対応付けられるが、これも 16 式における λ_1 と u_1 の対応付けと同じ理由である。

(2) 対応関係の事例

13 式の比例関係に基づいて、21 式～ 27 式の関係式が導かれるのである。そのとき、13 式の比例定数 K は SPV 仮想空間と脳内イメージ空間を対応付ける係数であるが、それは 21 式～ 27 式の関係式の中には現れない。前者の空間は 3 次元 CG における数学的な空間で、後者の空間は感性に立脚する想像上の空間であるので、当然といえば当然である。

対応関係の一例を以下に示す。接近限界距離 λ_0、およびその時立体像が画面上に視認される距離 u_0 は、それぞれ 0.0cm、0.0cm である。また、後退限界距離 λ_1、およびその時立体像が 3D ディスプレイ画面から視認される距離 u_1 は、最大ズレ幅 D_1 が 0.5cm（この値は 23 インチ FDH 型 3D ディスプレイ装置を用いた場合、通常の 3D 写真コンテンツではよく起こり得るズレ幅である）で、画面から 87cm 離れての眺めた場合、それぞれ 7.308 × Kcm（18 式と 16 式から計算：K は不定であるが、これまでの議論では、K の値は 1 としている）、7.308cm（18 式から計算）である。

SPV の融像式（1 式）およびズレ幅 D の式（2 式）は、指数 n に関わらず、このようになるように工夫されている。

8. 2　最大ズレ幅 D_1 とその取り得る値の限界

閲覧者は、2 式で表されるズレ幅 D に基づいて立体感を得る。また、ズレ幅 D に基づいて視認される立体像の 3D ディスプレイ画面からの距離 u は 23 式、視認される立体像の倍率 b は 24 式で与えられる。この 2 つの理論式においてはその派生元の式（それぞれ 11 式と 12 式）まで辿ると、それぞれ D ／（e － D）の項が存在し、ズレ幅 D が瞳孔間隔 e（大人の場合は 6.5cm）を取るとき、u、b はそれぞれ無限大に発散する。すなわち D が D ＝ e となる位置で特異点となり、2 つの理論式はその点で破綻する [文献 10]。しかし、少なからずの閲覧者には、ズレ幅 D が特異点 e に近づき、それを通過しても依然として立体像の視認は可能である（筆者もその一人)。このことは、2 つの理論式の適用限界が個々人によって異なり、また特異点付近における立体像の視認の可能性は式の予測通りではないことを意味する（生理現象が関係する分野では、理論構築に限界があり、そこから導出された式には適用限界があることが多い)。

また、例えば、23 インチ FHD 型 3D テレビ画面における最適閲覧（画面高の 3 倍の視距離 0.87m からの閲覧）の場合で、ズレ幅 D が 6cm のとき、「立体像の位置 u は画面から 10.44m 奥である」と 11 式から算出されるが、これは通常の閲覧者の立体感にはとても合わない。倍率 b に関しても同様である。

このようなことから、少なくとも 11 式と 12 式の適用限界は、ズレ幅 D が 4.0cm から 5.0cm の間程度までと思われる。従って、シミュレーション解析においては、閲覧者が感知するズレ幅 D の範囲を最大 5.0cm に限定する。そのときの立体像の位置 u は、計算上 3.48m 奥である。

ところで、2 式で規定するズレ幅 D は、倍率 m に関して単調減少関数であるので、縮小限界倍率 m_1（m_1 は 1 倍）のもとで最大の値となる。その最大のズレ幅 D を、「最大ズレ幅 D_1」と記載することは 6.1 節（1）で述べたが、上記の「ズレ幅 D の範囲を最大 5.0cm に限定する」というのは、この最大ズレ幅 D_1 の値のことである。

ズレ幅が適用範囲を超えるような場合には、11 式と 12 式に代わる正確な実験式を作り出す必要があろう。しかし、本研究は視覚生理学（あるいは視覚心理学）の基礎研究ではなく工学的で実用的な応用研究であるので、それは重要な研究課題ではあるが、その検討は別の機会としたい。ここではその指摘に留めて置くことにする。

8. 3　解像度と画面サイズ

(1)　基準化の必要性

6.3 節に関して、3D ディスプレイ装置の補足を述べておく。CG ソフトにおける表示画面の座標系は、一般に解像度に関するピクセル数（画素数）に関係する。SPV の実装は Java2D を用いて行われ、それにおいては画面の座標原点は画面左上隅に設定され、画面右向きに x 軸座標の正、画面下向きに y 座標の正が定められている。その単位はピクセルであり、ちなみに一世代前の XGA 型の 3D ディスプレイ画面では、水平方向の大きさは 1024、垂直方向の大きさは 768 となる。FHD 型 3D ディスプレイ画面では、水平方向は 1920、垂直方向は 1080 となる（最近出現した 4K － UHD 型の 3D ディスプレイ画面では、水平方向は 3840、垂直方向の大きさは 2160 となる)。画面サイズも多種多様で、パソコン側から出力可能な 20 型から 60 型の画面サイズの 3D テレビも販売されている。このようなことから、制作された 3D 写真コンテンツは使用する 3D ディスプレイ装置の解像度と画面サイズにおいて互換性を保つために、ある基準を定める必要がある。

⑵ 解像度の基準化

SPV においては、本論文で取り上げている融像式（1 式）は表示画面の座標系すなわち解像度に関係する。そこで、遠近感制御定数 a はそれが設定された画面解像度のもとで基準化され値となり、他の解像度の 3D ディスプレイ画面では、基準化されたその値は、当該解像度に適合するように座標変換が自動になされる（これは、融像式（1 式）における 2 重像防止定数 b についても同様である）。従って、31 式の最大ズレ幅 D_1 を求める式に現れる遠近感制御定数 a は、画面解像度によって異なった値を取ることになる。そこで、最大ズレ幅 D_1 については、その値を解像度に関係なく一定にするために、32 式に見られるように、a に（R_0 ／ R）の因子を乗じている。

⑶ 画面サイズの基準化

もう一つ、画面サイズ（画面の実寸法）の問題がある。これは解像度には関係しない。ディスプレイ装置やテレビにおいては、その表示機器自身が映像を画面サイズに見合った状態で表示する機能を持っている。ところで立体視では、その実画面に表示される実際のズレ幅の実寸法（大きさ）が重要である。というのは、立体視は閲覧者が画面に表示された実際のズレの幅を視認することによって行われるからである。ズレの幅は融像式（1 式）とズレ幅 D の式（2 式）によって、表示画面の解像度に応じた適切な値として生成されるが、その実寸法は、SPV ではなく表示機器が画面サイズに応じて自動決定する。「SPV が生成するズレ幅 D」と「表示機器が画面サイズに合わせて表示するズレの幅」の 2 つを結び付けるのが、32 式の（S ／ S_0）の因子である。これによって、SPV 自身が閲覧者の眺めている最大ズレ幅 D_1 の実寸法を正しく計算することができる。この D_1 が 30 式を近似する補間式で用いられ、指数 n_s が決定される。

⑷ 最新 4K および 8K の 3D テレビへの対応

現在は FHD 型（2K 解像度：1920 × 1080）の 3D テレビが 3D 表示装置として一般的に用いられているが、今後はより解像度の高い 4K － UHD 型（4K 解像度：3840 × 2610）、さらに将来的には 8K － UHD（NHK が開発中のスーパーハイビジョン）型（8K 解像度：7680 × 4320）の 3D テレビが用いられるものと思われる。4K － UHD 型や 8K － UHD 型については、画面サイズが同じでも解像度が高まっている。そこでアスペクト比が 16 対 9 の HD シリーズについてのみ考慮すれば、32 式は以下のように書き換えられる。K_R には、2、4、8 の HD 指数を指定する。

・FHD で定数 a を設定し、「2K」、「4K」、「8K」の解像度で使用の場合

$$D_1 = k_{2A} \times (S / S_0) \times a \times (2 / K_R) \times (1 - m_1 / m_0) \quad (34)$$

・8K － UHD で定数 a を設定し、「8K」,「4K」、「2K」の解像度で使用の場合

$$D_1 = k_{2A} \times (S / S_0) \times a \times (8 / K_R) \times (1 - m_1 / m_0) \quad (35)$$

8. 4　最大ズレ幅 D_1 の測定法

7.4 節で述べた縮小限界倍率 m_1 における最大ズレ幅 D_1 の実測方法を紹介する。すべて立体調整され実用に供されている立体写真を、立体メガネを掛けると立体視が可能な状態で 3D ディスプレイ装置の画面（画面は 2 重画像となっている）に表示させておく（立体メガネを外して立体視は行わない）。その測定手順は以下のとおりである。なお、SPV の操作法については、文献 1 と文献 11 を参照されたい。

① SPV 画面の下部のスクロールバーを拡大限界倍率 m_0 までに引き上げる。すると画面は拡大さ

れる。

②その画面上で、右画像と左画像がズレなく重なっている箇所Aに注目する。

③そして、スクロールバーを縮小限界倍率 m_1 (1倍) までに引き戻す。すると、画面は縮小される。

④注目箇所Aにおけるズレ幅を、物差しを用いてcm単位で測定する。この測定された値が、測定に用いた解像度と画面サイズにおける最大ズレ幅 D_1 となる。

8.5　フルハイビジョン画面による閲覧と快適視差

立体視の心理物理実験から、閲覧者にとって目の疲れない快適な視差（ズレ幅D）の範囲が求められており、その範囲は視差角を用いて1度以内がよいとされている(文献12)。現在ではパソコン専用3D専用ディスプレイ装置よりもFHD（フルハイビジョン）型3Dテレビ（1920 × 1080の3Dテレビ）が用いられることが多い（最近では4Kテレビが出現しているが、以下の議論はこのテレビにも当てはまる）。FHD型3Dテレビは、画面の高さの3倍の視距離を保って閲覧する仕様となっているので、視差角1度以内という値は、FHD型3Dテレビを用いて適正に閲覧する場合は、実質的に画面サイズおよび瞳孔間隔に依存しないと言える(文献12)。

FHD型3Dテレビを用いた快適な視差角の範囲を画面幅に対する%表示で表すと2.9%以内となる。これが画面サイズに関係しないのは、瞳孔間隔が視距離に比べて著しく小さいので、瞳孔間隔の影響を計算上無視できるからである。画面幅に対する快適な視差（ズレ幅D）の範囲を実寸表示で例示すると、画面が23インチの場合は1.47cm以内、42インチの場合は2.69cm以内、と画面サイズに比例して拡大する。このように画面が拡大しても快適視差の画面幅に対する%表示が画面サイズおよび瞳孔間隔に実質的に依存しないということは、23インチFHD型3D画面を用いて快適視差範囲内で制作された3Dコンテンツは、42インチFHD型3Dテレビ画面に対しても画面の高さの3倍の視距離を保って閲覧する限り、快適視差範囲内であるということを意味している（ただし立体像の奥行き位置は変化する）。

本論文では、23インチFHD型3D画面に対して快適視差範囲内を満足する3D写真コンテンツを取り扱ったが、それは42インチFHD型3Dテレビ画面に対しても、画面の高さの3倍の視距離を保って閲覧する場合には、快適視差範囲を満足する3D写真コンテンツとして取り扱うことができるのである。

9.　おわりに

本論文でSPVにおける冪乗の最適指数 n_s の決定法を述べてきたが、筆者はその応用について、現在のところは残念ながら微妙なところがあると思っている。2台の3Dディスプレイ装置を併用して立体像を見比べた場合、冪乗の指数nの相違による立体像の動きの違いを、多くの閲覧者は明確に見定めることができると思われる。しかし、1台の装置を用いて行う通常の公開の場では、一般の閲覧者は、筆者が指摘しない限り、ズーム環境の差異による立体像の動きの違いに、気が付きにくいのが普通であろう。指数nの値の違いは、意図的に演出するような極端なズーム環境以外には、閲覧者の立体感にそれ程影響を与えないようである。

このような状況は色彩理論においても見られる。一般に同系色系統の2つの色の布を手元に置いて見比べた場合、人はその色差を明確に識別することは可能であるが、別々に2つの色を見た場合は、人は一般に2色の間の微妙な色差を識別するのは概して困難であると言える。これと同じ理由

から、立体像の動きを決める SPV の指数 n の働きを単独の装置で見定めることは、指数 n が極端な値で設定されている場合を除き、一般の閲覧者にとっては難しい。視覚などの感性に関する応用には、このような問題がつきまとう。

このようなことから、精密に最適指数 n_s の値を算定して、その値を融像式に適用することは、実用上それ程意味があるとは言えないのではないかと言う意見が出るかもしれない。しかし、色彩分野においては、昔から精密な理論（例えばオストワルドの色彩理論）が組み立てられていて、現在ではその成果がカラーディスプレイ装置などの技術に応用されている。そこで、今後の立体視の発展を色彩分野と照らし合わせて考えると、複数台の 3D ディスプレイ装置を併用するような 3D システムが登場する可能性も考えられ、個々の立体像に精密なズーム制御が期待されるかもしれない。そのときは本論文で示した「融像式における最適指数 n_s を理論的に求める方法」が役立つと言えよう。また、本研究の実際的な応用が現在のところ未知数であるとは言っても、立体像のズーム制御の仕組みを解明できたことは、立体視理論の先行的研究の立場からは意義がある、と筆者は考えている。

付記 . 文献 1 の論文の訂正

以下のように、前回発表した文献 1 の論文の訂正を行います。読者の方にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

1. 35 ページ上から 1 行目 :「融像式」を「実用的なズレの式 d」に訂正する。
2. 37 ページ下から 2 行目 :「（・・・／ m_0） n」を「（・・・／ m_0） ^{n}」のように n を冪乗の指数とする。
3. 38 ページ下から 17 行目 :「基準長 r_1 を 0.1 cm、」を不要なので削除する。
4. 39 ページ下から 3 行目 :「実画像の倍率が 1 倍」を「実画像の倍率が 10 倍」のように数値を変更する。
5. 39 ページ下から 1 行目 :「からすると、のと言えよう」を、文章の抜けを補い「からすると、その結果はほぼ満足すべきものと言えよう」とする。デジタルファイル版では正しく訂正されています。

参考文献

(1) 広内哲夫、「融像式を用いたズーミング可能なステレオフォトビューア」、『情報研究（文教大学情報学部紀要)』、第 46 号、p17 ～ p56、2012 年 1 月
(2) 広内哲夫、「3 次元仮想空間を用いたズーミング可能なステレオフォトビューア」、『情報研究（文教大学情報学部紀要)』、第 46 号、p57 ～ p76、2012 年 1 月
(3) 広内哲夫、『コンピュータ・グラフィックス－ CG 理論の展開と応用－』、啓学出版、1987 年 11 月
(4) 荒屋真二、『明解 3 次元コンピュータ・グラフィックス』、共立出版、2003 年 9 月
(5) 下條信輔、『視覚の冒険－イリュージョンから認知科学へ－』、産業図書、1995 年 4 月
(6) ウィッキペディア編、「フリー百科辞典［Wikipedia］（二乗平均平方根の項目）」（デジタル資料）http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E4%B9%97%E5%B9%B3%E5%9D%87%E5%B9%B3%E6%96%B9%E6%A0%B9（2014 年 5 月閲覧）

(7) 広内哲夫、「ニューロファジイ推論の移動体駆動シミュレーションへの適用」、『情報研究（文教大学情報学部紀要)』、第 13 号、p203 ～ p223、1992 年
(8) 広内研究室制作、『立体写真拡大鏡－ズームする魅惑の立体像』（SPV を用いた 3D 写真コンテンツ)、設置場所は文教大学湘南図書館（茅ヶ崎市)、公開日は 2014 年 1 月
(9) 広内研究室制作、『3D 横浜人形の家－人間国宝平田郷陽の世界』（SPV を用いた 3D 写真コンテンツ)、設置場所は横浜人形の家（横浜市中区：公開 2013 年 12 月）
(10) 広内哲夫、林文子、「アナグリフは、なぜ飛び出してみえるのか－立体視をテーマにした系統的学習の試み－」、『情報研究（文教大学情報学部紀要)』、第 50 号、p57 ～ p84、2014 年 1 月
(11) 広内哲夫、「ズーミング可能な立体写真ビューア SPV － Basic 版の使用解説書」（ソフトウェア SPV 添付マニュアル)、文教大学情報学部広内研究室、2014 年 6 月 22 日版
(12) 安全ガイドライン部会編、「人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン－ 2010 年 4 月 20 日改定－（国際ガイドライン ISO － IWA3 準拠)」、3D コンソーシアム、2010 年 4 月（デジタル資料）http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt_wg_rep/3dc_guideJ_20111031.pdf（2012 年 12 月閲覧）