

立体写真における 自然なズームの実現

—立体写真ズーム閲覧ソフト（SPV）を例にして—

文教大学情報学部 広内哲夫

I. SPVの概要

●SPVの機能と特徴

立体写真の希望する箇所を希望する倍率でズームを行うことができる。

ズームを行っても立体像の崩壊を防ぐ「融像式」を装備している。

閲覧者にとっては写真でありながら、ビデオ映像を眺めているように感じられる。

●SPVにおけるズームの設定法

望遠カメラでの撮影の仕方と同一である（撮影したいところに①カメラを向け、②撮影倍率を決め、③その倍率のもとでの「ピント合わせ」を行う）。

SPVにおいては、ズームしたい画像において①場所を指定し、②ズーム倍率を決め、③その倍率のもとでの「立体像の視認位置合わせ」を行う。

●SPVの応用

博物館等において非常設展示となっている重要物の立体仮想展示として使用できる。

<図 「横浜人形の家」の博物館に導入されたSPVコンテンツの説明パネル>

人間国宝・平田郷陽の人形写真が自動ズームしながら立体的に見える!!

立体写真拡大鏡『3D横浜人形の家』

It's a 3D virtual exhibition system called 3D Yokohama Doll Museum.

立体写真拡大鏡「3D横浜人形の家」は、3Dテレビと3Dメガネを使って、人形の写真を立体的に拡大し、ビデオ映像のようにズームしながら見ることができるシステムです。肉眼ではよく見えない細かなところまで、虫眼鏡を使って見るようにじっくりと観察することができます。

In the 3D virtual exhibition system 3D Yokohama Doll Museum, you can magnify the stereoscopic pictures of the doll and see them as moving images like video footage through a 3D TV monitor and 3D glasses. Also you can observe the details as if with a magnifying glass, which is better than what can be seen by the naked eye.

特許技術を使った“日本初”のシステム“立体写真拡大鏡”とは

文教大学情報学部広内研究室では、2枚の写真の重なり具合を制御する数学式(文教大学学園が特許取得)を開発し、15倍*までのズーム(拡大)を欲たんなく行うことを可能にしました。この数学式を導入し、今回「3D横浜人形の家」で使用したソフトが、SPV(立体写真閲覧ビューア)です。SPVは、博物館や展示館の仏像や人形などのある一部分を立体(3D)で拡大して見るのに適しています。この特許を使った日本初のシステムが「立体写真拡大鏡」です。

立体写真をズーム表示することで、人形の顔まで立体的に見られる!



*写真の解像度によっては倍率までズームすることができません。

**6倍
ZOOM**



※写真はイメージです。

立体写真拡大鏡は他にもさまざまな場所を導入されています。

■制作：文教大学情報学部 広内研究室

■監修者(立休撮影)：筑倉 弘文(立休美術館のフォーラム)

■立体写真撮影：八尋 佳則(プロフェク)

■立体画像設定：永井 謙史(レッドパーペタル)

■SGM作曲：柳 一彦

■立体表示ソフト開発：広内 哲夫(文教大学情報学部所属)

■協力：公益財団法人 横浜観光コンベンションビューロー

教育力の伝説校。 **文教大学** 鎌倉キャンパス | 教育学部 | 人間科学部 | 文学部 | 7343-6511 埼玉県鎌倉市野矢3337

湘南キャンパス | 情報学部 | 芸術学部 | 健康栄養学部 | 健康学部 | 7253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行舟1100

II. 本研究の主題

●ズームングにおいて考慮すべき点

現実の3次元空間においては、物体を「距離×倍率＝一定」の関係で眺めている。

3DCGにおける仮想空間でもこれが成り立っている。

●立体写真における自然なズームングの実現

立体視を行っている閲覧者の脳内イメージ空間においても、上記の規則が成り立つように、自然なズームングを行う必要がある。

⇒これを行わせるのは、融像式に登場する冪乗の指数 n である。

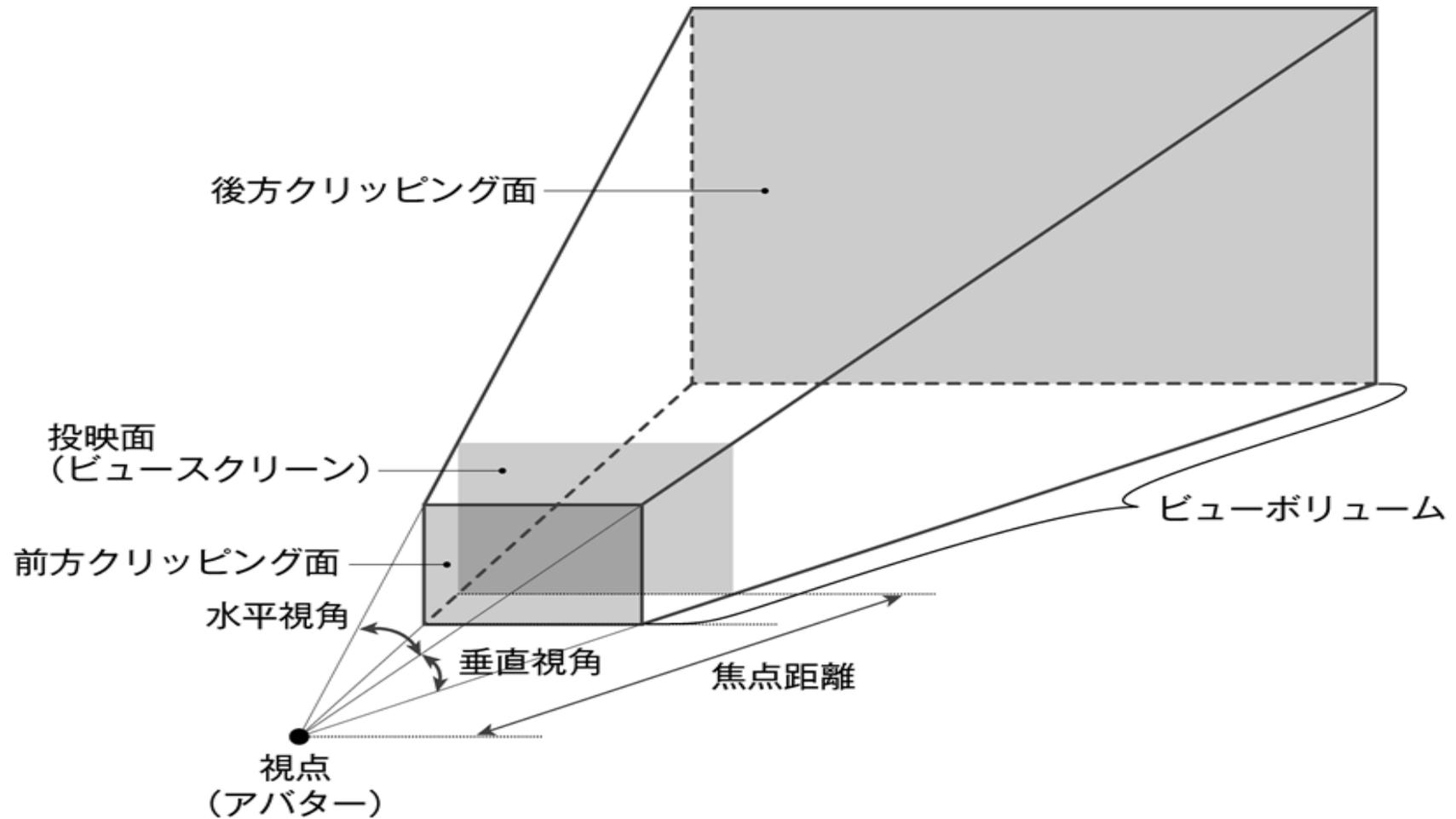
(前回の発表では、暫定的な値 $n = 0.7$ を与えている。)

今回は、最適な指数 n の値を定める方法を紹介する。

引用・参考文献：広内哲夫「融像式を用いたズームング可能なステレオフォトビューア (II)

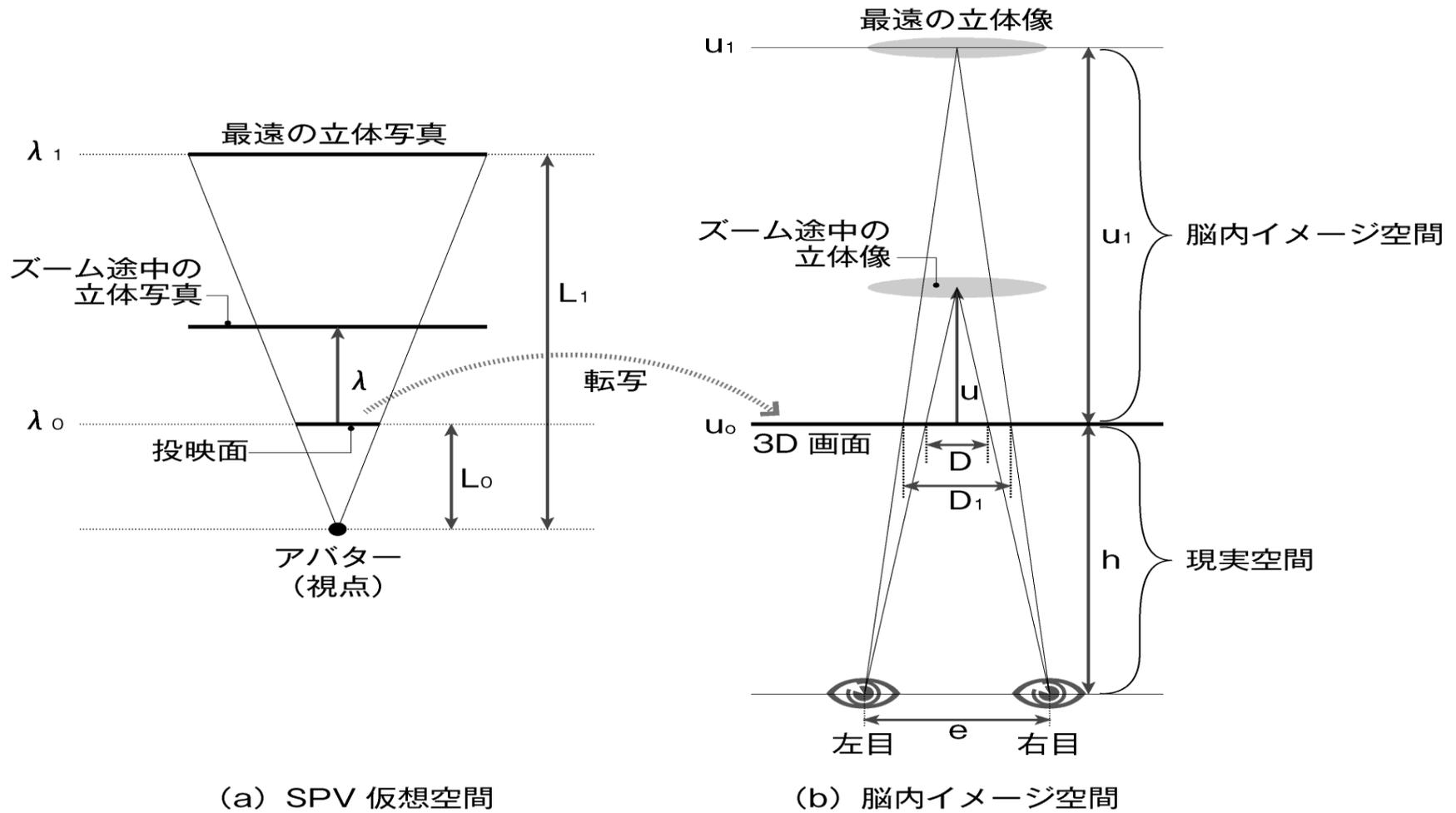
— 融像式における指数 n の最適値の決定方法 —」情報研究 (文教大学情報学部紀要 2015年/1月)

<図 CGにおける3D仮想空間>



参考文献：荒谷真二『明解3次元コンピュータグラフィックス』共立出版、2003年

<図 SPVにおける仮想空間と閲覧者の脳内イメージ空間>



Ⅲ. SPVの基本式

●融像式 (t)

仮想空間内でステレオペアを相互にスライドさせ、重なり具合を調整する式

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

以下の2つの定数は、「立体像の視認位置合わせ」の際に定められる。

a : 縮小限界倍率 m_1 において閲覧者の立体感性によって定められる値。

b : 拡大限界倍率 m_0 において閲覧者の立体感性によって定められる値。

●ズレ幅の式 (D)

画面に映し出されるステレオペアのズレ幅を定める式 (人はズレ幅から遠近感を感じる。)

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

k_2 は、縮小限界倍率 m_1 におけるズレ幅を D_1 とすると、以下の式から定められる。

$$D_1 = k_2 \times a \times (1 - m_1 / m_0) \quad D_1 \text{は実画面における実測値}$$

●立体像位置決定式 (u)

閲覧者が視認した立体像の奥行きを推定する式 (幾何学的に求めることが可能である。)

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

参考文献：河合隆史他著、『次世代メディアクリエイター入門 1—立体映像表現—』、カットシステム、
(2003年12月)

IV. 最適な指数 n を求める手続き

- 最適な指数 n の最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 に関する関数 ($n = f(D_1, m_0)$) を解析的に求めることは、一般に困難!! (少なくとも発表者にとっては)

●そこで考案された解法手続き

- ① 指数 n に関する **数値シミュレーション** を行い、離散データの組 (λ_i, u_i) を作る。その際、パラメータとして、指数 n 、最大ズレ幅 D_1 、拡大限界倍率 m_0 を用いる。
- ② **最小二乗法** を用いて、 $\lambda = K \times u$ という比例関係 (条件) を満たす離散データの組 (最適指数 n_s の組) を選び出し、その組に関する (n_s, D_1, m_0) を取り出す。
- ③ 取り出された組について、ヒューリスティック法による **補間法** を適用して、最適指数 n_s に関する補間式 g を決定する。
- ④ 最適指数 n_s は、関数 f の近似関数である **補間式** $g (D_1, m_0)$ から求められる。

V. 最適指数 n_s の探索法

- アバターが仮想空間の座標 λ に位置する場合の倍率 m (「距離 \times 倍率 = 一定」の関係)

$$m = (L_0 \times m_0) / (\lambda + L_0)$$

$$= (m_1 \times m_0 \times \lambda_1) / \{ \lambda \times (m_0 - m_1) + m_1 \times \lambda_1 \}$$

● S P V 仮想空間と脳内イメージ空間における比例関係

S P V 仮想空間 (λ) と閲覧者の脳内イメージ空間 (u) において、以下の比例関係を成り立たせる。

$$\lambda = K \times u \quad (K \text{ は任意の定数})$$

ということは、ズレ幅の式Dにおける指数 n の値が、上式を満たすことである。そのような値が最適の n の値である。

● 探索のパラメータ

ズレ幅の式Dの係数の積 $k_2 \times a$ は計算で求められる。

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

これから、指数 n は、最大ズレ幅 D_1 と拡大限界倍率 m_0 がパラメータになることが分かる。

VI. 探索の具体例

● 指数 n 、最大視差 D_1 、拡大限界倍率 m_0 の範囲（例えば n を $0.0 \sim 1.5$ 、 D_1 を $0.0 \sim 5.0$ cm、 m_0 を $1.0 \sim 15.0$ 倍）を定め、その範囲を任意の区間で分割（それぞれ 1.5 、 1.0 、 1.4 分割とする）する。

● その分割点 ($D_1 = 1.0$ cm、 $m_0 = 10.0$ 倍、 $n = 0.0$) を用いて、離散データ (λ 、 u) の組に対して、以下の比例関係が成り立つとして、

$$\lambda = K' \times u$$

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。

● 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' 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 とその対 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 の最近傍値に成らしめる指数 n 」が、閲覧者のズーム環境 ($D_1 = 1 \text{ cm}$ 、 $m_0 = 1.0$ 倍)のもとで、($\lambda = K \times u$) の比例関係を最良の状態に成立させるといえる。

●上記の過程を、 D_1 と m_0 の分割点 (D_1 は 11 個、 m_0 は 15 個) の組み合わせ回数分について行う。それによって、165 個の n の値の集合が得られる。この n が最適指数 n_s である。例えば D_1 が $\alpha \text{ cm}$ 、 m_0 が β 倍の場合に、比例関係 ($\lambda = K \times u$) を最良の状態に成立させる最適指数 n_s を γ とすれば、そのズーム環境 ($D_1 = \alpha$ 、 $m_0 = \beta$) において、最適な指数 n の値は γ ということである。

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

●ズレ幅 $D_1=0.5$ 拡大限界倍率 $m_0=1.0\sim 15.0$ における 最適指数 n_s							
$D_1=0.5$	$m_0=01.0$	$n_s=0.0$	K_s	$=1.017$	$M=0.057$	$std_M=0.014$	
$D_1=0.5$	$m_0=02.0$	$n_s=0.3$	K_s	$=0.981$	$M=0.065$	$std_M=0.016$	
$D_1=0.5$	$m_0=03.0$	$n_s=0.5$	K_s	$=0.990$	$M=0.057$	$std_M=0.014$	
$D_1=0.5$	$m_0=04.0$	$n_s=0.6$	K_s	$=0.993$	$M=0.055$	$std_M=0.013$	
$D_1=0.5$	$m_0=05.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=1.005$	$M=0.068$	$std_M=0.016$	
$D_1=0.5$	$m_0=06.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.994$	$M=0.048$	$std_M=0.011$	
$D_1=0.5$	$m_0=07.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.985$	$M=0.056$	$std_M=0.013$	
$D_1=0.5$	$m_0=08.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.008$	$M=0.063$	$std_M=0.015$	
$D_1=0.5$	$m_0=09.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.003$	$M=0.047$	$std_M=0.011$	
$D_1=0.5$	$m_0=10.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.999$	$M=0.037$	$std_M=0.009$	
$D_1=0.5$	$m_0=11.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.995$	$M=0.033$	$std_M=0.008$	
$D_1=0.5$	$m_0=12.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.992$	$M=0.034$	$std_M=0.008$	
$D_1=0.5$	$m_0=13.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.990$	$M=0.038$	$std_M=0.009$	
$D_1=0.5$	$m_0=14.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.988$	$M=0.044$	$std_M=0.011$	
$D_1=0.5$	$m_0=15.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=0.986$	$M=0.050$	$std_M=0.012$	

●ズレ幅 $D_1=1.0$ 拡大限界倍率 $m_0=1.0\sim 15.0$ における 最適指数 n_s							
$D_1=1.0$	$m_0=01.0$	$n_s=0.0$	K_s	$=1.036$	$M=0.263$	$std_M=0.029$	
$D_1=1.0$	$m_0=02.0$	$n_s=0.3$	K_s	$=0.999$	$M=0.096$	$std_M=0.011$	
$D_1=1.0$	$m_0=03.0$	$n_s=0.5$	K_s	$=1.008$	$M=0.158$	$std_M=0.017$	
$D_1=1.0$	$m_0=04.0$	$n_s=0.5$	K_s	$=0.980$	$M=0.149$	$std_M=0.016$	
$D_1=1.0$	$m_0=05.0$	$n_s=0.6$	K_s	$=0.994$	$M=0.094$	$std_M=0.010$	
$D_1=1.0$	$m_0=06.0$	$n_s=0.6$	K_s	$=0.981$	$M=0.143$	$std_M=0.016$	
$D_1=1.0$	$m_0=07.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=1.003$	$M=0.096$	$std_M=0.011$	
$D_1=1.0$	$m_0=08.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.997$	$M=0.070$	$std_M=0.008$	
$D_1=1.0$	$m_0=09.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.991$	$M=0.080$	$std_M=0.009$	
$D_1=1.0$	$m_0=10.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.986$	$M=0.106$	$std_M=0.012$	
$D_1=1.0$	$m_0=11.0$	$n_s=0.7$	K_s	$=0.983$	$M=0.133$	$std_M=0.015$	
$D_1=1.0$	$m_0=12.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.011$	$M=0.111$	$std_M=0.012$	
$D_1=1.0$	$m_0=13.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.008$	$M=0.089$	$std_M=0.010$	
$D_1=1.0$	$m_0=14.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.006$	$M=0.070$	$std_M=0.008$	
$D_1=1.0$	$m_0=15.0$	$n_s=0.8$	K_s	$=1.004$	$M=0.055$	$std_M=0.006$	

VII. 補間式の設定

●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 であって、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。その関数を f とする。

$$n_s = f(D_1, m_0)$$

●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。

●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。補間式のベースとなるのは、曲線あてはめによって定めた拡大限界倍率 m_0 に関する対数式であり、係数 a , b は最大ズレ幅 D_1 における補間によって決定した。

●この結果を逐次実行型プログラムコード（J a v a 言語）として、以下に示す。

$$p_1 = 0.26 ; q_1 = 0.14 ;$$

$$p_2 = 0.12 ; q_2 = -0.05 ;$$

$$r = (p_2 - p_1) / 9. ;$$

$$s = (q_2 - q_1) / 9. ;$$

$$d = D_1 * 2. - 1. ;$$

$$a = p_1 + r * (d) ;$$

$$b = q_1 + s * (d) ;$$

$$n_s = a * \text{Math. log} (m_0) + b ;$$

<表 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	
	理論値 n_s	補間値 n_s	理論値 n_s	補間値 n_s	理論値 n_s	補間値 n_s	理論値 n_s	補間値 n_s	理論値 n_s	補間値 n_s	理論値 n_s	補間値 n_s
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

VIII. 最大ズレ幅 D_1 の実測と結合定数 k_{2A} の算定

●最大ズレ幅 D_1 は3Dディスプレイ画面のサイズと解像度によって変わる。SPVが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 D_1 の画面上の実寸法が必要となる。

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

●個々の立体写真の D_1 を測定することによって、係数 k_2 を求めることができ、その平均値 k_{2A} （結合定数）を求める。 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、上記の式を以下の式（ m_1 は1倍）に書き換える。

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

●画面サイズと解像度による D_1 の補正式は、以下の通りである。 S_0 、 R_0 は、測定に用いた基準となる3Dディスプレイ画面のサイズと解像度である。

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

<表 係数 k_2 と最大ズレ幅 D_1 、および結合定数 k_{2A} の計算値>

(実際に稼働している立体写真コンテンツ『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(m_0)	遠近感制御 定数(a)	ズレ幅(D_1) 実測値	係数(k_2) 計算値	ズレ幅(D_1) 計算値
1	郷場人形	8.0	8.66	4	0.528	3.9
2	富士屋洋館	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	富士屋本館	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	

IX. 最適指数 n_s の計算例

<表 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>

(実際に稼働している立体写真コンテンツ『横浜人形の家』をサンプルとして)

写真 番号	倍率 m_0	ズレ幅 D_1	指数 n_s	写真 番号	倍率 m_0	ズレ幅 D_1	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。

X. おわりに

● 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、指数 n の相違による像の動きを、閲覧者は明確に見定めることができる。しかし、1台の装置を用いて行う通常の場合、指数 n の相違による立体像の動きは、閲覧者にとって気が付きにくい。

このような立体視において、精密な指数 n の決定は必要なのか？

● 感性に関わる色彩においても、同様な状況であった。色彩の学問は心理学分野で開拓されたが、しかし、20世紀前半、ドイツの科学者オストワルドらによって表色系として厳格に理論化され、その成果は現在では、美しい4Kテレビの誕生に繋がっている。

● 立体視研究は現在、主観的な立場で行われることが多いが、将来、色彩分野のように厳格な理論化が進むのを期待して、本研究が先行的研究として少しでも役立つことを願っている。

== ご清聴、ありがとうございました。 ==