

# レンチキュラー方式3Dディスプレイ 立体視領域における奥行再現性を検証する

Verify the Reproducibility of Depth Perception in Position Possible Stereoscopic Viewing  
in Autostereoscopic Display

山田 千彦

Chihiko Yamada

元日本工業大学、元凸版印刷 (株)

〒120-0014 東京都足立区西綾瀬 4-13-17

E-mail : [c-yamada@jcom.zaq.ne.jp](mailto:c-yamada@jcom.zaq.ne.jp)

メガネなしで立体視できる方法にレンチキュラー方式3Dディスプレイ（通称「ステレオ印刷」製品）がある。ステレオ印刷製品は、左右に視点の異なる多くの画像が立体合成されており、観察者が何処から観ても立体視できる、という特徴を持っている。本稿では、立体視可能領域における奥行再現性を幾何学的に解析した。その結果、立体合成される画像数が多いほどに自然な立体感に近いことがわかる。

## 1. はじめに

日本国内においては、1960年頃から印刷企業を中心にメガネなしで立体視できる「レンチキュラー方式印刷タイプ3Dディスプレイ（通称：ステレオ印刷）」が市場に流れる様になり、当時は、珍しさが伴って多くの数の商品化が進められてきている。しかし、その多くは宣伝用であり、個人向けの商品は少なかった。当時ステレオ印刷を手にするると誰もが驚き、興味を示していたが、お金を出して購入する人は少なかった。

1990年代に入り、立体映画、あるいは臨場感通信、等に多くの論文が出る様になり、メガネなしで立体視できる産業用3Dディスプレイが市場に出る様になってきた。当初はレンチキュラー、あるいはバリアを用いた2像式であったが、その後ディスプレイの画素が増えるに伴って多像式に移行している。

今、地上デジタル放送が実用に入り、次は立体TV放送の実用化と言われている。当然メガネなしで立体視できる方式になるであろうと言われている。

近年、立体映画のブーム到来に伴い、ステ

レオ印刷製品も市場に多くみられるようになり、お金を出して購入する人々が増えている。

ステレオ印刷製品はすでに五十年以上の経験をもっている。市場にあるステレオ印刷製品は、当初から多像式であり、何処から観ても立体視できる印象を持っている。通常の商品では、手に持つか、壁に固定して立体視する程度である。それゆえ、何処でどのような立体視が出来るのか、議論したことはほとんどないと思われる。

本稿では、何処でどのような立体視が得られるのか、幾何学的に検証してみた。そして、立体合成される画像数が多いほどに自然な立体感を得られている、と判断できることが分かる。

## 2. ステレオ印刷製品の立体視原理

ステレオ印刷製品を観て立体視している図を図01に示す。レンチキュラー板は円筒形レンズを横に多数並べてレンズシートとして造られている。レンチキュラー板はその形状から、

曲率半径： $r$

幅（ピッチ）： $p$



浮いて見える画像の立体感、そして  $S_B$  は画像面より後ろに沈んで見える画像の立体感、また  $K$  は観察者の眼間距離であり、通常  $K = 65$  mm を標準値として扱う。

図04の幾何学的関係から立体感  $S$  は次式から計算する。

$$S_F = \frac{x_F D}{K + x_F}$$

$$S_B = \frac{x_B D}{K - x_B}$$

$$S = S_F + S_B \quad (03)$$

この時、 $D_B$  を求める式において、分母が負の場合は無限大を意味している。

#### (1) 画像数

ステレオ印刷製品は、立体合成するときの画像数から分類することが出来る。

**2像式**：特定の世界（例えば医学）で特定の観察者（医師）が立体視する時に威力を発揮する

**多像式**：不特定多数の一般の観察者がどこから見ても立体視できる

さらに細かく分類すると、画像数により図05に表示できる。

2 像 合 成	多 像 合 成	
	有限多像 (6像の例)	連続多像
L R	6 ・ 2 1	N ・ 2 1

図05 合成画像数の分類

まず、基本的な2像式、および多像式に分類し、さらに多像式を「有限多像」、および「連続多像」に分類できる。

**有限多像**とは、立体合成される画像数が数えることのできる像数である。

**連続多像**とは、立体合成される画像数が有限多像よりはるかに多く、画像数の計算できない像数を言う。

#### (2) 視差の計算

観察者はレンチキュラー裏面の距離  $\Delta p$  だけ離れて存在する両眼視差のある2枚の画像を見て立体視する。合成画像数を  $N$  とした時、 $N$  と  $\Delta p$  との関係は次式となる。

$$N = \frac{p_P}{\Delta p} \quad (04)$$

次に、距離  $\Delta p$  だけ離れて存在する2枚の画像間の両眼視差  $x_F$ 、および  $x_B$  は同様に次式で表す事が出来る。

$$x_F = \frac{\Delta p}{p_P} X_F$$

$$x_B = \frac{\Delta p}{p_P} X_B \quad (05)$$

ここで  $X_F$ 、および  $X_B$  は立体合成された複数枚の画像の両端に位置する画像間の視差で、**最大視差値**と呼び、常数として扱かう。

ここで注意して区別したいことは、式(05)が満足するのは連続多像式の場合である。もし、有限多像の場合は、視差が断続的になる。隣の画像間の視差は次式(06)で計算出来る。

$$x_F = \frac{X_F}{N-1}$$

$$x_B = \frac{X_B}{N-1} \quad (06)$$

そこで、観察距離により、今観ている画像が式(01)から左右どのくらい離れた画像であるかを求め、その値から視差を計算することになる。

### 4. 立体視領域



3Dディスプレイ

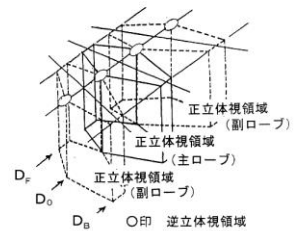


図06 立体視領域の概念図

ステレオ印刷製品は、どこから見ても立体視できるように思える。しかし、幾何学的に計算してみると、ある限定された立体視領域が存在する。図06に立体視領域の概念図を示す。

ある観察距離  $D_0$  に設計、製作された製

品は、その位置を最適距離として前後左右に立体視出来る領域を持っている。この形を平面図で表すと「六角形」となる。また、上下方向を加えると「六角柱」となる。この六角柱の中に入れる人の数は2像式では1人に限定されるが、像数が増えるに従って数名が可能になってくるのが分かっている。

更に、横方向に展開すると、この六角柱の形をした立体視領域が左右に多く並び、立体視できる観察者の数を多くしている。このとき、中心にある立体視領域を主ローブと呼び、その両側に数多く存在する立体視領域を副ローブと呼ぶ。

ステレオ印刷製品に対して観察者がどの場所から観ているかによって「正立体視」、「逆立体視」、「非立体視」の3態に区分する事が出来る。

正面で所定の観察距離から見ると、右目で右目用の画像、左目で左目用の画像を見て、正しい立体感を得ている。同様に、観察位置を少し横にずらして見ると、右目で左目用の画像を、左目で右目用の画像を見てしまう。これが逆の立体感であり、不自然に見える。更に違った位置に目を置いてみると、右目と左目の両方で左目用の画像を見てしまう

表01 立体視領域の三態

正立体視	画面全体において正しい浮きや沈みが得られる立体再現状態を言う
逆立体視	画面全体において浮き沈みが逆転した不自然な立体再現状態を言う
非立体視	画面の一部のみが正立体であったり、逆立体と混在したり、あるいは立体感のない不自然な立体再現状態を言う

場所がある。これでは立体感は得られない。

これらの様に、観察者がどこから見るかによって立体感の再現性が違ってくる。これら3態を表01に示す。

そして、立体視領域を求める計算式を表02に示す。

### 5. 計算上の共通データ

画像数として、

- (A) 2像式
- (B) 有限多像/4像式
- (C) 有限多像/10像式
- (D) 連続多像

表02 立体視領域を求める計算式

正立体視	前後方向	$D_F$	N像式	連続多像式
			$D_F = \frac{A+K}{A+NK} D_0$	$D_F = \frac{(A+K)}{2(x+\Delta x_F)} \left( \frac{t}{n} \right)$ $x = \frac{A}{2D_0} \left( \frac{t}{n} \right)$ $\Delta x_F = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\left( \frac{t}{n} \right)}{D_0} \right) p$
		$D_0$	$D_0$	
		$D_B$	$D_B = \frac{A+K}{A-(N-2)K} D_0$	$D_B = \frac{(A-K)}{2(x-\Delta x_B)} \left( \frac{t}{n} \right)$ $x = \frac{A}{2D_0} \left( \frac{t}{n} \right)$ $\Delta x_B = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\left( \frac{t}{n} \right)}{D_0} \right) p$
	左右方向	$W$	$W = NK$	$W = \frac{p}{\left( \frac{t}{n} \right)} D_0$
逆立体視	前後方向	$D_F'$	$D_F' = \frac{A+(N+1)K}{A+(N+2)K} D_0$	
		$D_0$	$D_0$	
		$D_B'$	$D_B' = \frac{A+(N+1)K}{A+NK} D_0$	
	左右方向	$W'$	$W' = 2K$	

$p$ : レンチキュラーのピッチ[mm]  $D_F$ : 立体視できる最近距離[mm]  
 $N$ : 画像数  $D_0$ : 立体視できる最適距離[mm]  
 $A$ : 画像の横幅寸法[mm]  $D_B$ : 立体視できる最遠距離[mm]  
 $K$ : 眼間距離[mm]  $D_F', D_B', W'$ : 逆立体視領域

の4点を選択しそれぞれにおいて、観察距離により奥行再現性(立体感)がどう変化していくか、計算して行く。

共通データとして、製品の外形を、ディスプレイサイズ:

(横)  $A = 270$  × (縦)  $B = 340$  mm

最適な観察距離:

$$D_0 = 1,000 \text{ mm}$$

画像の持っている最大視差:

$$\text{(浮き)} X_F = 10 \text{ mm}$$

$$\text{(沈み)} X_B = 20 \text{ mm}$$

とする。

表03 レンチキュラー形状一覧

	レンチキュラー形状			$t-r$	$p_F$	$\Delta p$
	$r$	$p$	$t$			
2像式	1.80	0.4375	5.18	3.38	0.4390	0.2195
4像式	0.91		2.60	1.69	0.4382	0.1096
10像式	0.39		1.06	0.67	0.4378	0.0436
連続多像	0.52		1.30	0.78	0.4378	0.0567

$D_0 = 1,000$  mm

そして、レンチキュラー形状は、最適な観察距離において、式(04)を満足する形状とする。このとき、ピッチは共通な値

$p = 0.4375 \text{ mm}$  とし、画像数に合わせて形状が変化する。表 03 にレンチキュラー形状、および計算に必要な数値を一覧する。

### 6. 画像数と立体視領域

画像数が増えると立体視領域が変化する。通常、画像数が少ないと立体視領域は狭いが、画像数が増えるほどに立体視領域は広がっている。表 02 に立体視領域を求める式を一覧しているが、計算結果を表 04 に示す。

表 04 立体視領域の計算結果

	立体視領域		
	Df	Do	Db
2像式	838	1,000	1,241
4像式	632		2,393
10像式	364		-1,340
連続多像	403		-704

### 7. 計算手順

まず、2 像式における計算手順を述べる。観察者はディスプレイのほぼ正面から立体視している。この時、2 像式が多像式と異なる点は、観察距離が変化しても見ている画像の視差が一定である。奥行再現性は式(03)において、見ている視差を画像の最大視差値に置き換えて計算を進める。そこで、観察距離は任意に設定してよいが、ここでは表 04 に示す立体視領域の 3 点としている。

次に、4 像式における計算手順を述べる。

- (1) 1つの画像の幅は、

$$\frac{p_P}{N} = \frac{0.4382}{4} = 0.1096 \text{ mm}$$

であり、

- (2)  $\Delta p$  を

$$\Delta p = 0.1096$$

$$\Delta p = 0.2191$$

$$\Delta p = 0.3287$$

$$\Delta p = 0.4382$$

の 4 点となる観察距離を式(02)から計算

- (3) 両眼視差を式(06)から計算  
 (4) そして、式(03)より奥行再現性を計算する。

10 像式においては、4 像式と同様に計算を進める。

連続多像式においては、任意の観察距離における観察者の見ている視差を計算し、その

時の奥行再現性を計算する。この時、任意の距離をいろいろ仮定し、結果を表示する。

### 8. 計算結果

2 像式における計算結果を表 05 に示し、結果のグラフを図 07 に示す。

表 05 2 像式における計算結果

D	浮き x <sub>F</sub> =10		沈み x <sub>B</sub> =20	
	x <sub>F</sub>	S <sub>F</sub>	x <sub>B</sub>	S <sub>B</sub>
D <sub>F</sub>	838	-112		372
D <sub>0</sub>	1,000	-133	20.0	444
D <sub>B</sub>	1,241	-165		551

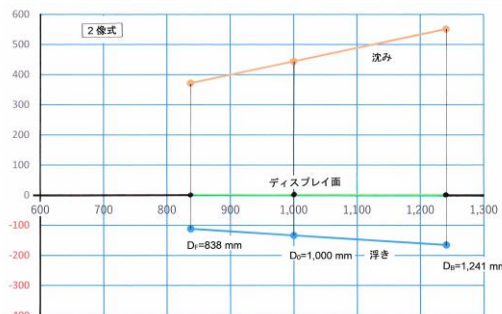


図 07 2 像式における結果のグラフ

4 像式における計算結果を表 06 に表し、そのグラフを図 08 に示す。

表 06 4 像式における計算結果

D	浮き X <sub>F</sub> = 10		沈み X <sub>B</sub> = 20	
	x <sub>F</sub>	S <sub>F</sub>	X <sub>B</sub>	S <sub>B</sub>
251	10.0	-33	20.0	111
334		-45		149
501	6.7	-31	13.3	86
		-47		129
1,003	3.3	-24	6.7	57
		-49		115

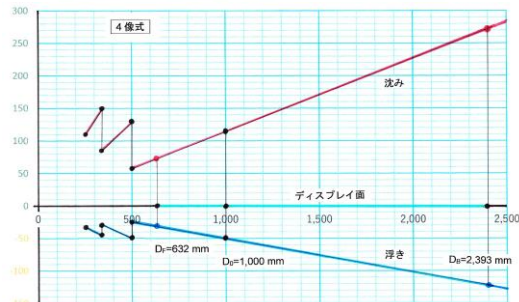


図 08 4 像式における計算結果のグラフ

同様に、10 像式における計算結果を表 07 に表し、そのグラフを図 09 に示す。

そして、連続多像式における計算結果を表 08 に表し、そのグラフを図 10 に示す。

### 9. まとめ

2 像式が多像式と異なる点は、観察距離に関係なく、観察者が観ている視差が最大視差値である。よって、2 像式を取り扱う場合、

この特性を理解し、活用できる環境とすべきであることが分かる。例えば、研究者、医学者、等産業用となろう。

表07 10像式における計算結果

D	浮き X <sub>F</sub> = 10		沈み X <sub>B</sub> = 20	
	x <sub>F</sub>	S <sub>F</sub>	x <sub>B</sub>	S <sub>B</sub>
99	10.0	(13.3)	20.0	44.2
111		(14.7)		49.1
124	8.9	(13.3)	17.8	41.6
		(15.0)		46.8
142	7.8	(13.3)	15.6	39.1
		(15.2)		44.7
166	6.7	(13.2)	13.3	36.7
		(15.4)		42.8
199	5.6	(13.1)	11.1	34.2
		(15.7)		41.0
249	4.4	(12.7)	8.9	31.5
		(15.9)		39.4
332	3.3	(12.1)	6.7	28.4
		(16.2)		37.9
497	2.2	(11.0)	4.4	24.3
		(16.4)		36.5
995	1.1	(8.4)	2.2	17.6
		(16.7)		35.2

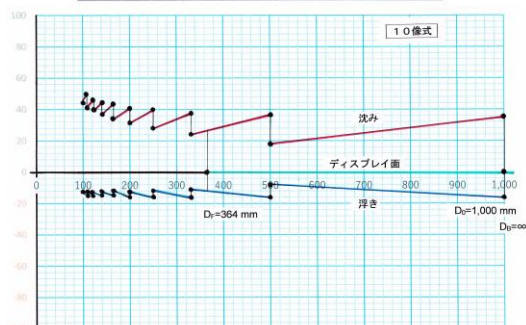


図9 10像式における計算結果のグラフ

表08 連続多像式における計算結果

D	$\Delta p/pp$	浮き X <sub>F</sub> = 10		沈み X <sub>B</sub> = 20	
		x <sub>F</sub>	S <sub>F</sub>	x <sub>B</sub>	S <sub>B</sub>
116	0.9982	10.0	-15.4	20.0	51.4
200	0.5790	5.8	-16.4	11.6	43.4
400	0.2895	2.9	-17.1	5.8	39.1
600	0.1930	1.9	-17.3	3.9	37.9
800	0.1447	1.4	-17.4	2.9	37.3
1,000	0.1158	1.2	-17.5	2.3	36.9
1,200	0.0965	1.0	-17.6	1.9	36.7
1,400	0.0827	0.8	-17.6	1.7	36.6
1,600	0.0724	0.7	-17.6	1.4	36.4
1,800	0.0643	0.6	-17.6	1.3	36.3
2,000	0.0579	0.6	-17.7	1.2	36.3
2,500	0.0463	0.5	-17.7	0.9	36.1
3,000	0.0386	0.4	-17.7	0.8	36.1

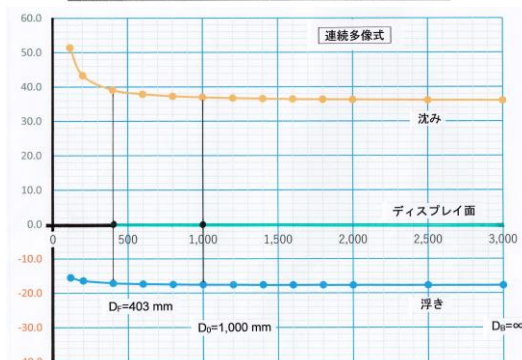


図10 連続多像式における計算結果のグラフ

我々の日常生活では、観ている物の大きさは観察距離が変わっても同じ大きさである。すなわち、究極は連続多像式である、と判断できる。計算結果から分かる様に、奥行き再現性は観察距離に関係なく、ほぼ一体となり、我々の生活環境の中において得られる自然な立体感と一致している様である。その理由は、観察距離が変わると観察者の観ている視差が変わり、観察距離により奥行き再現性が2像式と大きく異なっていることである。

連続多像式のディスプレイはどの様に撮影(製作)されるのであろうか。筆者の経験では、アナログ時代は、最も当たり前な撮影方法であった。シートフィルム上に撮影された画像を現像後に、レンチキュラー板を載せて直ちに立体視できた。しかし、今デジタル時代になって、この撮影方法は不明である。同様な結果を得ることの出来る撮影方法は、視差のある複数枚の画像をデジタルカメラ、等で撮影し、PC上で立体合成することである。そして、プリントし、その上にレンチキュラー板を載せて立体視している。

アナログ時代の前者は、撮影中の約10秒間シャッターが開きっぱなしで1ピッチ内に連続して視差のある画像を記録していた。それゆえ、筆者は連続多像式と呼んでいる。一方、デジタル時代の後者は複数枚の画像を1ピッチ内に立体合成していることから、筆者は有限多像と呼んでいる。

有限多像式で連続多像式と同様な結果を得るためには何像が必要になるのであろうか。

デジタル時代の当初は、PCの処理能力が小さかったため、6~10像が多かった。ポストカードではこれで良かった。近年、PCの処理能力が大きくなって、20像程度が当たり前になっている。全判サイズの広告用ディスプレイであっても違和感なく観ることができる様になっている。

## 10. おわりに

ステレオ印刷製品が市場に出るようになった。当初から多像式が当たり前であり、観察者は何処から観ても立体視できた。当初から連続多像式による商品化が当たり前であった。

今、デジタル時代になり、改めて本稿の様に検証を進めてみると、今当初のアナログ時

代の製品に追い付いていないことに気が付く。

我々が気づかないところでまだまだ課題が残っている様であり、これからも詰めていきたい。

＜ 参考文献 ＞

- (1) 山田千彦 「立体視領域における「過観察距離」を提案する」、「3D映像」Vol.31, No.3, (2017-12)
- (2) 山田千彦、「モアレの観点から立体視領域を計算する」、「3D映像」Vol.30, No.4 (2017-01)
- (3) 羽倉弘之、山田千彦、大口孝之・編集「裸眼3Dグラフィクス」朝倉書店 pp.42-76 2012-08刊
- (4) 山田千彦、「レンチキュラー板立体ディスプレイにおける立体視領域」、「3D映像」Vol.7, No.2, pp4-7 (1993-03)

＜ 連続多像式のステレオ撮影方法 ＞

通称	カメラ	レンズ	露光	被写体	得られる原画と処理
スタジオカメラ (A)	固定	単眼	数秒間	ターンテーブル上に載せることのできる数秒間不動の被写体	撮影と同時に立体合成される。その合成画像の上に、レンチキュラー板を載せて直ちに立体視できる。
ポータブルカメラ (B)	横移動	単眼	数秒間	室内外の数秒間不動の被写体	(C) (連続多像)
大口径カメラ	固定	大口径単眼	瞬間	全ての被写体 (D)	
単眼多像撮影カメラ	固定	単眼	数秒間	ターンテーブル上に載せることのできる数秒間不動の被写体 (G)	視差のある複数枚の画像を得た後、次工程で立体合成を行なう。その合成画像の上にレンチキュラー板を載せて立体視出来る。
	横移動			屋内外の数秒間不動の被写体 (E)	
ワンショットカメラ (F)	固定	多眼	瞬間	全ての被写体	(有限多像) (2像)

アナログ時代の連続多像式においては、(A)、および(B)が該当するステレオ撮影方法である。

デジタル時代においては、連続多像式は難しいと思われるが、同等な「多画像有限多像式」はどの方式で実用化されるであろうか。

＜ 計算式の中での置き換え ＞

光学設計者の使用する計算式と、筆者が使用する計算式とに違いがある。計算結果が実用に近いことから、筆者は下記の様に置き換えて計算している。

$$\frac{t}{n} \rightarrow t-r$$

光学設計者は、  
「レンチキュラー板の曲率半径の中心から裏面までの距離 =  $\frac{t}{n}$ 」

と置いている。この計算式は正しい。しかし、ステレオ印刷製品の製造では、通常、樹脂の厚さを 85~90%

に薄くしている。

$$f \neq t$$

なのである。

これは、品質を落とすことなく、コスト低減につながっている。

実用に近い計算結果を得るためには、

$$t-r \text{ に置き換えて}$$

計算すべきと考えている。

以上