

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「過観察距離」を提案する

Proposal for “Hyper Visual Distance” in Positions Enable Stereoscopic Vision
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

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ディスプレイがある。その中で最も歴史があって普及しているのが、手に取って立体視することの出来る、通称「ステレオ印刷」である。ステレオ印刷はいろいろな企業で製品化されているが、今でも経験による作業が残っている。本稿ではステレオ印刷を立体視する時の立体視できる領域（ディスプレイから観察者までの距離）について詳述し、「過観察距離(HVD)」を提案する。

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、珍しさが伴って多くの数の商品化が進められた。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ほとんどいなかった。

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。

ステレオ印刷はすでに五十年以上の経験あ

る製品となっている。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。通常の製品では、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、何処で立体視できるのか、「立体視領域」について議論したことはほとんどないと思われる。

本稿では、「立体視領域」について、改めて詳述するとともに「過観察距離(HVD)」について提案する。

2. 立体視領域の定義

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

厚さ： t

となっており、厚さ： t は通常焦点距離： f と一致している。また、レンチキュラー板は無色透明な熱可塑性樹脂、等で造られている事が多い。

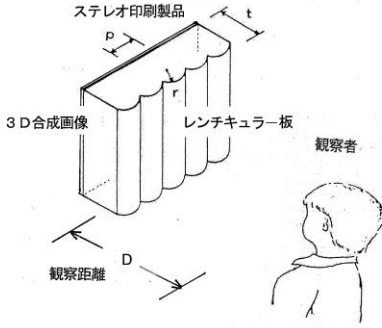


図01 ステレオ印刷製品と立体視

ステレオ印刷、例えば、立体絵はがきを観ると、どこから見ても立体視できるように思われる。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ことが分かる。図02に立体視領域の概念を示す。

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。

この六角形の中で立体視できる最近距離を D_F 、立体視できる最遠距離を D_B と定義する。

この六角柱の中で立体視できる人数は2像式では基本的には1人に限定されるが、像数が増えるに従って人数が増えていく。

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。

つぎに、立体視領域を平面に展開すると、ステレオ印刷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ステレオ印刷を観ると、右目で右目画像、左目で左目画像を見て、正しい立体感(正立体視)を得ている。

同様に、観察位置を少し横にずらして見ると、右目で左目画像を、左目で右目画像を見てしまう。これが逆の立体感(逆立体視)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同じ画像を見てしまい、立体視できない(非立体視)場所がある。

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。



3Dディスプレイ

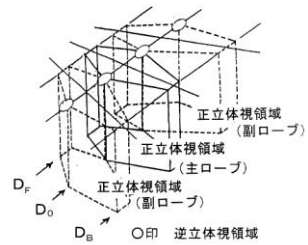


図02 立体視領域の概念図

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

多像式における立体視領域の平面図を図03に示す。ここでは、2像式ステレオ印刷製品は市場にないことから、2像式については省略する。

多像式における正立体視領域は、画像数が増えれば増える程にその面積は広がっていく。それに合わせて逆立体視領域は、左右に存在する正立体視領域と正立体視領域の境界に存在し、画像数に関係なく一定である。そのため、画像数が増えるにしたがって相対的に小さくなり、殆んど逆立体視領域を見つることが出来なくなる。

3. 立体視領域を幾何学的に解析する

多像式を代表して4像式における立体視領域を計算するための幾何学的関係図を図04に示す。

まず、最適視位置において、正面では右目で2番の画像を画面全体で見ており、左目で

3番の画像を画面全体で見ている事が分かる。目を横に少しずらしてみると、右目で1番の画像を、左目で2番の画像を見ている。いずれも正立体視である。このように像数が増えると正立体視できる領域が横に広がってくる。

次に、最適視位置から斜め後ろに目を移動する。右目で1+2像を、左目で2+3像を見て正立体視している。1+2の意味するところは、図から分かるように図の右端では2

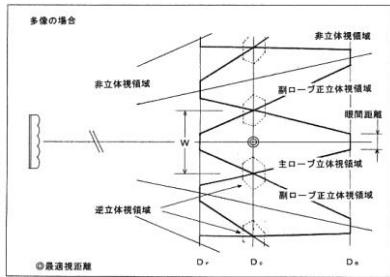


図03 多像式ステレオ印刷における立体視領域

番の画像を見ており、左端では1番の画像を見ていることを示している。画像の中心部は1と2の境界となる。すなわち、この時画像は左右2分されて正立体視しているが、実際

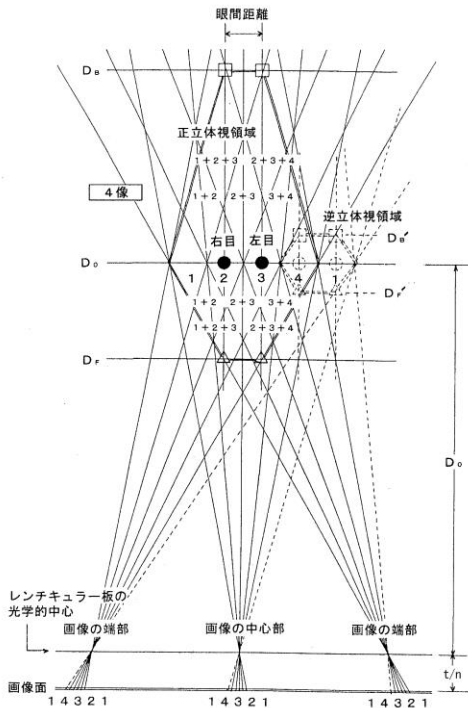


図04 4像式における立体視領域

は画像を合成するとき境界線を識別できないようにするので観察者が境界線を意識する事はない。

この様に観察者が見ているディスプレイ面を表示すると、図05に正立体視の例を示す。

観察位置	左目で見ている画像	右目で見ている画像							
4像	D_0	<table border="1"> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> </table>	4	3	2	<table border="1"> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	3	2	1
	4	3	2						
	3	2	1						
D_0'	<table border="1"> <tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table>	2	3	4	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	1	2	3	
2	3	4							
1	2	3							
D_0''	<table border="1"> <tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table>	2	3	4	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> </table>	1	2	3	
2	3	4							
1	2	3							

図05 正立体視の例

4. 立体視領域を計算する

2像式(本稿では省略)、および多像式における幾何学的関係から立体視領域を計算する式を導き出し、表02に示す。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。

表02 立体視領域を求める計算式

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

5. 像数、画像サイズ、および観察距離と立体視領域

表02に示した立体視領域を求める計算式の中で、レンチキュラー形状を一定にすると、画像数： N 、画像の横幅寸法： A 、および観察距離： D_0 の3変数があり、その内どれか1つを変え、他を固定すると立体視領域がどのように変化するかがわかる。

図06 にそれぞれのどれかを変えた時の立体視領域の変化を示す。

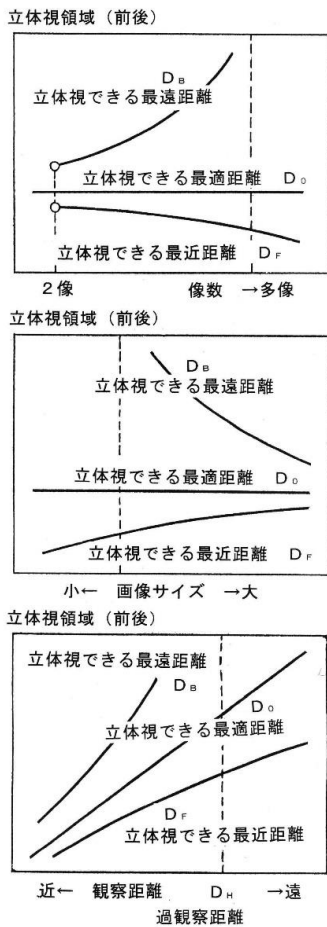


図06 象数、画像サイズ、および観察距離と立体視領域
これらの図の中で、縦の点線は $D_B = \infty$ となる点を示している。

(1) 像数を変える

2 像で立体視領域が最も狭く、像数の増加に伴っても広がる事が分かる。

(2) 画像の横幅を変える

サイズが小さいと立体視領域が広く、サイズが大きくなる程に狭くなる。この時、立体絵はがきの様にサイズが小さいと最適距離： D_0 が小さいので、立体視領域が広くても絶対値は小さい。サイズが大きくなると、立体視領域は狭くなるが、最適距離： D_0 が大きいので、立体視領域の絶対値は大きくなる。

(3) 最適距離を変える

最適距離が小さいと立体視領域は狭く、最適距離を大きくすると立体視領域が広がる。

6. 過観察距離を提案する

立体視領域を求める式で、 $D_B = \infty$ となる距離に注目する。

D_B を求める式の分母をゼロにする観察距離を「過観察距離」(Hyper Visual Distance)： D_H と名付ける事を提案したい。

表02の連続多像における D_B を求める式において、分母をゼロにする式は、

$$x = \Delta x_B \tag{1}$$

であり、この式から、

$$D_0 = \frac{A-p}{p} \left(\frac{t}{n} \right)$$

が得られる。そして、

$$D_H = D_0 = \frac{A-p}{p} \left(\frac{t}{n} \right) \tag{2}$$

と置き換えることとする。

そして、この時の立体視できる最近距離を

$$D_F = \frac{1}{2} D_H \tag{3}$$

と設定し、立体視で来る最遠距離を、

$$D_B = \infty \tag{4}$$

となる。

7. パンフォーカス撮影

一般の写真撮影では、「パンフォーカス撮影」という撮影距離設定の方法がある。この時の被写界深度において、撮影距離を、

$$\text{撮影距離} = \text{過焦点距離}$$

と設定した時、ピントの合う前方深度は、

$$\text{前方深度} = \frac{1}{2} \times \text{過焦点距離}$$

後方深度は、

後方深度 = ∞

となって、写真撮影において、最も被写界深度の深い撮影をすることが出来る。

前章では、立体視領域の計算に本章の考え方を活用している。すなわち、立体視領域において、最適観察距離を過観察距離に設定することにより立体視領域を最も広い範囲にすることが出来る。

8. 検証計算、およびまとめ

立体視領域を取り扱う上で前章のパンフォーカス撮影と同じ考えが適応できるのか、以下に検証する。

具体的に計算を進めるために、レンチキュラ一形状、および樹脂を、

$$r = 1.41, \quad p = 1.2700, \quad t = 3.81 \text{ mm}$$

PMMA樹脂、屈折率： $n = 1.49$

製品例を、

A全判縦サイズ (約 600 × 850 mm)

とする。

この時、観察距離： D_0 を製品サイズから

$$D_0 = 2,500 \text{ mm}$$

と製造設計している。

(1) 製造設計値から立体視領域を計算

ここでは、まず、上記設定値で製作された製品の立体視領域を表02/連続多像式の欄から計算すると、

$$D_0 = 2,500$$

$$\frac{t}{n} = 2.5570$$

$$x = 0.3068$$

$$\Delta x = 0.6356$$

$$D_F = 902$$

$$D_B = \infty$$

が得られる。

(2) 過観察距離を計算

第6章で提案している計算式から立体視領域を計算すると、

$$D_H = 1,205$$

$$D_F = 603$$

$$D_B = \infty$$

が得られた。

(3) 連続多像式から過観察距離を計算

前項から $D_H = D_0$ とおいて、立体視領域を計

算すると、

$$D_0 = D_H = 1,205$$

$$x = 0.6363$$

$$\Delta x = 0.6363$$

$$D_F = 688$$

$$D_B = \infty$$

となる。

(4) 比較評価

第2項と第3項を比較すると、 D_F 値が等しくないが、近似していることが分かる。

(5) いろいろな観察距離で立体視領域を計算

連続多像式を用いて、いろいろな観察距離で観察距離を計算すると、

	$D_0 = 500$
	$x = 1.534$
①	$\Delta x = 0.6382$
	$D_F = 391$
	$D_B = 763$
	$D_0 = 1,500$
	$x = 0.5114$
②	$\Delta x = 0.6360$
	$D_F = 741$
	$D_B = \infty$
	$D_0 = 5,000$
	$x = 0.1534$
③	$\Delta x = 0.6353$
	$D_F = 1,078$
	$D_B = \infty$

(6) 過観察距離を検証する

第1項、第3項、第4項、第5項の計算結果を一つに纏めて第2項と比較すると、立体視領域が最も広くなるのは

$$D_H = 1,205$$

の時であることが分かる。

(7) まとめ

第6項の結果から、過観察距離の考えは間違っていない、と判断できる。

しかし、ここで考慮せねばならないことは立体視できる最近距離： D_F となる。第2項で計算した結果と第3項で計算した結果とで

異なるからである。この場合、第3項の計算結果： $D_F = 688 \text{ mm}$ を採用すべきと判断する。

しかしながら、立体視できる最適な距離： D_H を採用するにより、この時に立体視領域が最も大きな値になることは、製造設計時に検討する価値があるであろう。

9. おわりに

我々が目にするステレオ印刷製品は、どこから見ても立体視できる物と思われており、実際に何処から見ても立体視できる利点を持っている。製品サイズはお菓子の付録になる様な小さなサイズから、A全判、B全判はもとよりビルの壁面に取り付けられる広告用まで数々製品化されている。

それぞれの製品にはそれぞれの観察環境に適した観察位置が決められている。しかし、現実には立体視領域が有限であることを、製造設計上、把握しておきたい技術である。

さらに、製造時に、レンチキュラーピッチと印刷画像ピッチとの間にずれが発生すると、観察距離が変化してしまう。本稿では、述べていないが、この点は課題であると共に、製造時には注意せねばならない。

本稿が、製造設計において、お役に立てば幸いである。

< 参考文献 >

- (1) 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)
- (2) 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
- (3) 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, pp.4-7 (1993-03)

< 付録 >

レンチキュラー形状を設計する上で2つの計算式が存在する。前者は、光学設計者が推奨する計算式であり、後者は、筆者が使用してきた計算式である。後者の計算式から得られた値の方が実用に適しており、筆者は、今後とも後者の計算式を使用する。

筆者は前者の式を「一般式」と呼び、後者を「大越式」と呼んでいる。ここに両式を提示する。

一般式：

$$t = \frac{n}{n-1} r$$

であり、 t はレンチキュラー板の最適厚さ、 n はレンチキュラー板として使用されている樹脂の屈折率、 r は曲率半径である。

大越式：

$$t = \frac{g(\phi_0)}{n^2 - 1} \{x(\phi_M) + r s i \phi_0\} + r(1 - c o \phi_0)$$

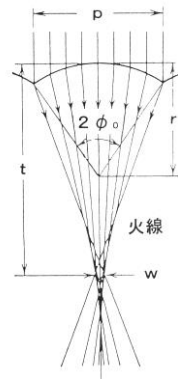
$$\phi_0 = s i^{-1} h \frac{p}{2r}$$

$$\phi_M = \frac{\phi_0}{2}$$

$$x(\phi_M) = r \frac{f(\phi_M) - f(\phi_0)}{g(\phi_M) + g(\phi_0)}$$

$$f(\phi) = \sqrt{n^2 - s i^2 n \phi + c o \phi s}$$

$$g(\phi) = \frac{\sqrt{n^2 - s i^2 n \phi + n^2 c o \phi s}}{s i \phi}$$



大越孝敬「三次元画像工学」産業図書 1972年刊 pp.71-77

さらに、光学設計者の使用する計算式と筆者が使用する計算式に違いがあり、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。

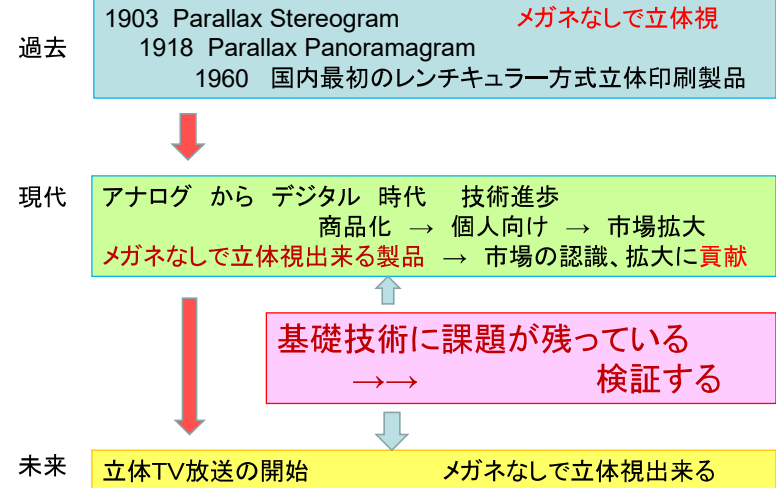
$$\frac{t}{n} \rightarrow t - r$$

以上

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「過観察距離」を提案する

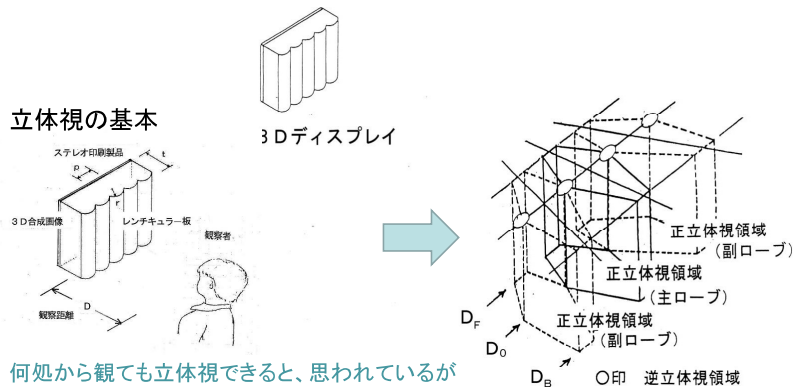
元日本工業大学 元凸版印刷株式会社
山田 千彦

はじめに

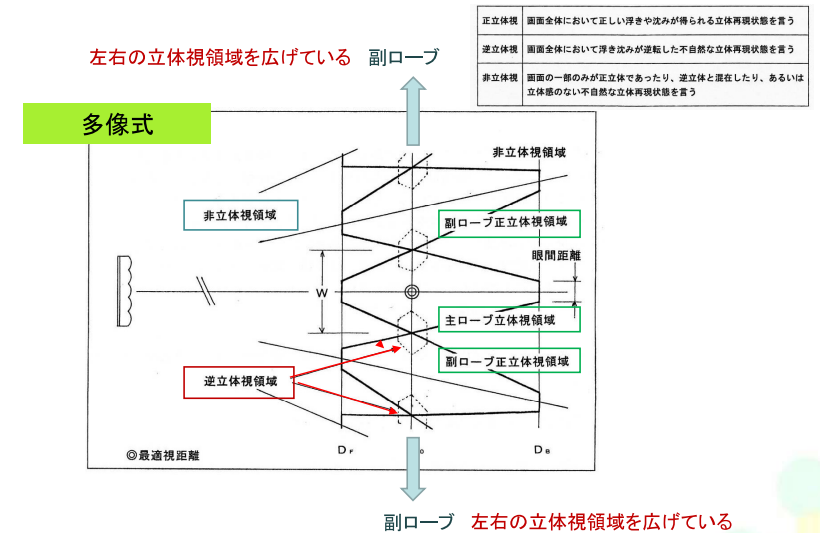


立体視領域の基本

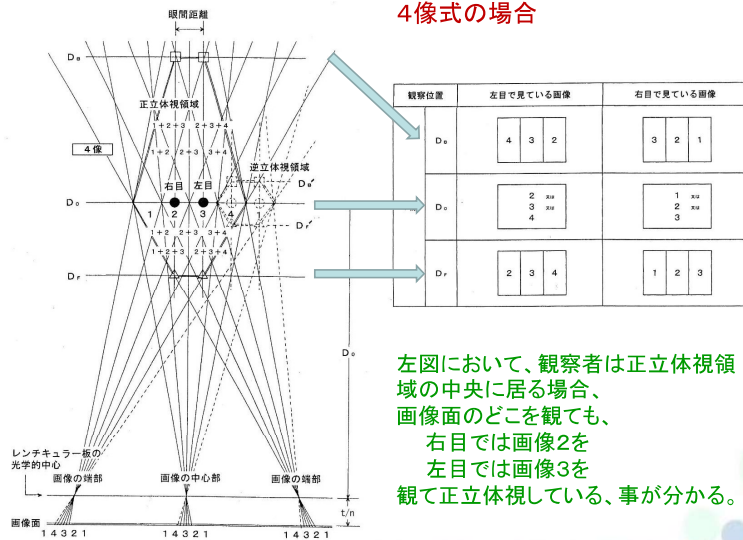
立体視できる場所、立体視できない場所
が存在している
立体視できる領域は六角柱の中にある



立体視領域の三態



立体視領域を幾何学的に表示する

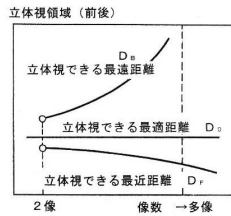


立体視領域を求める計算式

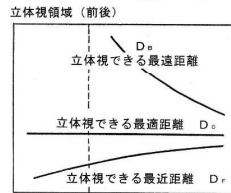
- p : レンチキュラーのピッチ[mm]
- t : レンチキュラー板の厚さ[mm]
- n : 樹脂の屈折率
- N : 合成画像枚数]
- A : 画像の横幅寸法[mm]
- D_0 : 立体視できる最近距離[mm]
- D_0' : 立体視できる最適距離[mm]
- D_0'' : 立体視できる最遠距離[mm]
- W : 立体視できる左右の幅/ロープ[mm]
- D_0', D_0'', W' : 逆立体視領域

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

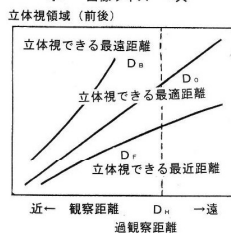
像数 画像サイズ 観察距離 と 立体視領域



画像数:
2像式で立体視領域が最も狭く、像数の増加に伴って領域が広がる。



画像の横幅:
サイズが小さいと立体視領域が広く、サイズが大きくなるほど領域が狭くなる。

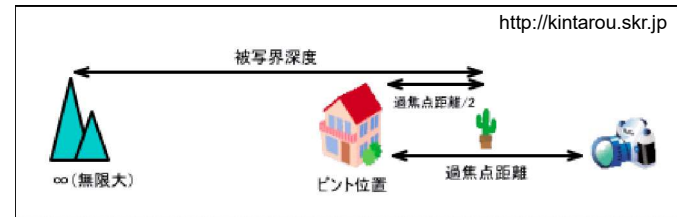


最適距離を変える:
最適距離を小さくすると立体視領域は狭く、最適距離を大きくすると領域は広がる。

これらの図の中で共通して言えることは、
 $D_0 = \infty$ となる点があることである。

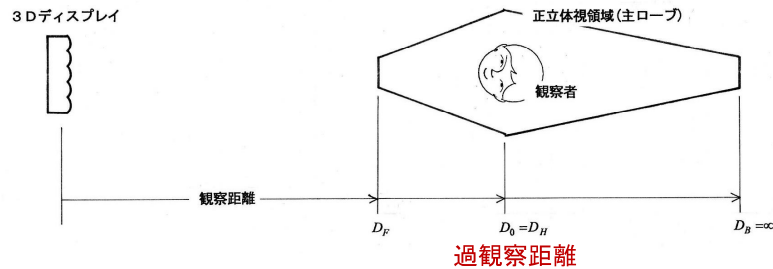
一般の写真撮影における パンフォーカス撮影

一般の写真撮影では「パンフォーカス撮影」という撮影距離を設定する方法がある。



撮影距離を
撮影距離 = 過焦点距離
と設定した時、ピントの合う前後(被写界深度)の範囲が最も広くなる。
この時のピントの合う最遠距離は無限大である。

ステレオ印刷製品における 過観察距離を提案する



立体視領域を求める計算式の中から、 D_B =無限大となる条件、式の分母=0となる $x=\Delta x$

から、

$$D_0 = D_H = \frac{A-p}{p} \left(\frac{t}{n} \right)$$

となる。

9

過観察距離の具体的な計算例

レンチキュラー板:

$r=1.41$ $p=1.2700$ $t=3.81$ mm

PMMA樹脂 $N=1.49$

製品サイズ:

A全判(約600×850 mm)

観察距離:

$D_0=2,500$ mm に設定

連続多像式から

$D_0=2,500$ mm

における立体視領域を計算すると

$D_F=902$ mm

D_B =無限大

同様に

$D_0=D_H=1,205$ mm

と置くと

$D_F=688$

D_B =無限大

過観察距離を計算すると

$D_H=D_0=1,205$ mm

$D_F=603$

D_B =無限大

製造設計時に設定された観察距離: $D_0=2,500$ mm は間違っていない。しかし、ここに過観察距離: $D_H=1,205$ mm に設定すると、立体視領域を広くできる、ことが分かる。

この時、 D_F 値が異なるので注意することが必要か。

10

おわりに

ステレオ印刷製品は、どこから見ても立体視できると思われており、事実、何処から観ても立体視できるという利点を持っている。

それぞれの製品には、それぞれの観察環境に適した観察位置が決められている。しかし、現実にはそれは有限であり、製造設計上、把握しておきたい技術である。

もし、ステレオ印刷製品を製造している時、レンチキュラー板のピッチと印刷画像のピッチとの間にずれが発生すると、観察距離が変化し、立体視領域も変化してしまう。本稿では述べていないが、課題の一つである。この点も製造時には注意が必要となる。

本稿が、製造設計において、お役に立てば幸いである。

11

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「過観察距離」を提案する

ご清聴、ありがとうございました

元日本工業大学 元凸版印刷株式会社

山田 千彦

© 2017 山田 千彦

12

付録

① レンチキュラー形状を設計する上で2つの式が存在する。

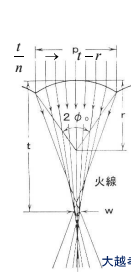
一般式

$$t = \frac{n}{n-1}r$$

実用的には
大越式の答
が適している

大越式

$$t = \frac{g(\phi_0)}{n^2 - 1} \{x(\phi_M) + r \sin \phi_0\} + r(1 - \cos \phi_0)$$



$$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{r}{2f}$$

$$\phi_M = \frac{\phi_0}{2}$$

$$x(\phi_M) = r \frac{f(\phi_M) - f(\phi_0)}{g(\phi_M) + g(\phi_0)}$$

$$f(\phi) = \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \cos \phi$$

$$g(\phi) = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + n^2 \cos \phi}{\sin \phi}$$

大越孝敬「三次元画像工学」産業図書1972年刊 pp.71-77

② 本稿に提示して
いる計算式の中で

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

に置き換えた方が実用に近い計算結果が得られる。