

投稿

レンチキュラー方式3Dディスプレイ
ピッチずれと観察距離の変化

Variation of Viewing Distance Accompanied by Misalignment of Pitch
in Autostereoscopic Display

山田 千彦

Chihiko Yamada

元日本工業大学、元凸版印刷(株)

p. 74 - p. 80 投稿

p. 81 - p. 98 発表画面 (パワーポイント)

提出 : 2018年9月12日

受領 : 2018年9月14日

レンチキュラー方式3Dディスプレイ ピッチずれと観察距離の変化

Variation of Viewing Distance Accompanied by Misalignment of Pitch
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（通称「ステレオ印刷」製品）がある。ステレオ印刷製品はレンチキュラー板と立体合成された画像との二層構造となっており、両者のピッチが所定の幾何学的関係からずれた場合、所定の観察距離が変化してしまうという問題がある。本稿ではピッチずれに伴う観察距離の変化により立体視領域がどう変化するか、幾何学的に解析する。

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板、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

レオ印刷製品が市場に多くみられ、お金を出して購入する人々が増えてきている。

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、ピッチずれに伴う観察距離の変化により立体視領域がどう変化するか、幾何学的に解析する。

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

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。

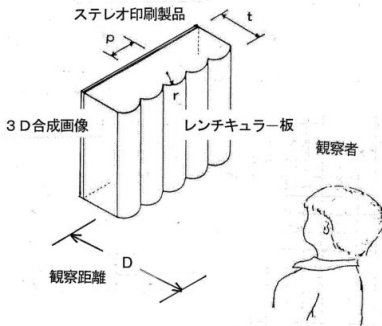


図01 ステレオ印刷製品と立体視

図02に立体視の原理説明図を示す。レンチキュラー板の裏面のほぼ焦点面には、立体合成画像が置かれている。両眼視差のある複数枚の画像が線状に収束されて、1ピッチ内に

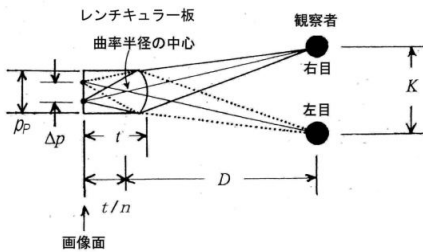


図02 立体視の原理図

に立体合成画像されて1枚の画像となっている。観察者の目線はレンチキュラー板の中に位置する曲率半径の中心で交差し、レンチキュラー板裏面に位置する画像面上の Δp の距離だけ離れた2つの異なる画像を見ている。そして、この2つの異なる画像から観察者は奥行き感のある立体画像を得ている。

この時、図02に示した幾何学的関係から、次式(01)が成り立つ。

$$\Delta p = \frac{t}{n} \cdot \frac{K}{D} \quad (01)$$

ここで、 K は観察者の眼間距離、 D は観察距離、 $\frac{t}{n}$ は曲率半径の中心から画像面までの距離である。

また、観察者はレンチキュラー板を通して距離： $\frac{t}{n}$ 離れた画像を觀ており、その時の幾何学的関係を図03に示す。

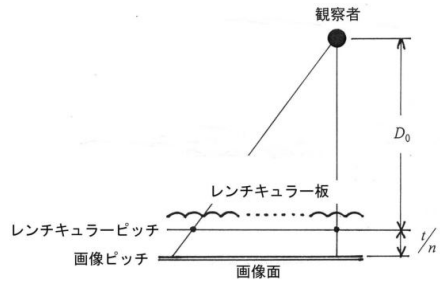


図03 レンチキュラー板のピッチと画像のピッチ
図03から次式(02)が成り立つ。

$$p_p = \left(1 + \frac{t}{nD} \right) p \quad (02)$$

ここで、 p_p は画像のピッチである。

更に、式(02)を書き直すと、

$$D = \frac{P}{p_p - p} \cdot \frac{t}{n} \quad (03)$$

となる。

式(02)が示していることは、レンチキュラー板のピッチと画像のピッチは観察距離により幾何学的に決まっていることである。

また、式(03)から分かることは、二者のどちらかにピッチずれが発生した場合観察距離がどう変化するか、求める事が出来る。

一般的に、製造設計において、使用されるレンチキュラー板が決まり観察距離が決まると、その時、画像のピッチが決まる。

しかし、ステレオ印刷製品を製造する工程内において、何らかの原因により両者にピッチずれが発生する要因が存在する。

3. ピッチずれの要因

(1) レンチキュラー板のピッチ

レンチキュラー板は、通常、金型から成型されるが、成型方法により金型と異なるピッチとなることが多く、またその再現性は低い。そこで、出来れば、製造設計時に使用するレンチキュラー板のピッチを実測しておくが良い。また、レンチキュラー板は、通常、樹脂製であり、ステレオ印刷製品の製造時における環境(温度)によりピッチが大きく変わって

しまう。

(2) 画像のピッチ

使用するレンチキュラー板のピッチが決まり、製品の観察距離が決まると、式(02)より画像のピッチが決まり、その値で立体合成が行われ、印刷工程に進む。

合成作業は、通常、PC上で行われるが、製版、印刷工程でピッチが変わってしまうことが考えられる。また、立体合成画像は、通常、ステレオ印刷製品の製造時における環境(温度、および湿度)によりピッチが大きく変わってしまう。

4. ピッチずれの実際

ピッチずれの要因は2つある。

①レンチキュラー板のピッチに対し、画像のピッチがずれてしまった場合

②画像のピッチに対し、レンチキュラー板のピッチがずれてしまった場合

どちらにも共通していることは

④画像のピッチが相対的に大きくなった(レンチキュラー板のピッチが相対的に小さくなった)場合、

観察距離が近くなる

⑤画像のピッチが相対的に小さくなった(レンチキュラー板のピッチが相対的に大きくなった)場合、

観察距離が遠くなる

ということである。

5. 立体視領域

ステレオ印刷は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 04 に立体視領域の概念を示す。

ある最適な観察距離： 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来る。これら3態を表 01 に示す。

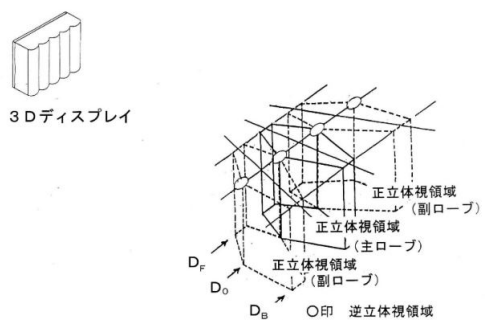


図 04 立体視領域の概念図

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 05 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けることが出来なくなる。

6. 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06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

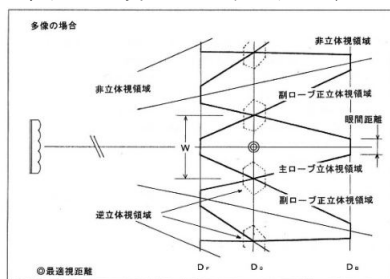


図05 多像式ステレオ印刷における立体視領域

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07に正立体視の例を示す。

7. 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

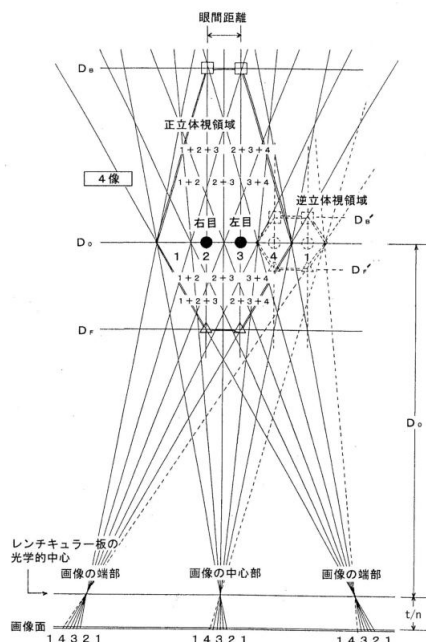


図06 4像式における立体視領域

観察位置	左目で見ている画像	右目で見ている画像
D_o'	4 3 2	3 2 1
D_o	2 x _o 3 x _o 4	1 x _o 2 x _o 3
D_r	2 3 4	1 2 3

図07 正立体視の例

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。

8. ピッチずれから立体視領域を計算

まず、ピッチずれに伴い、式(03)により観察距離の変化を計算し、そして、表02の連続多像式から変化した立体視領域を計算する。

表02 立体視領域を求める計算式

		N像式		連続多像式		
正立体視	前後方向	D_F	$D_F = \frac{A+K}{A+NK} D_0$	$D_F = \frac{(A+K)}{2(x+\Delta x_F)} \left(\frac{t}{n}\right)$ $x = \frac{A}{2D_0} \left(\frac{t}{n}\right)$ $\Delta x_F = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{t}{D_0}\right)^2 \right] p$		
		D_0	D_0			
		D_B	$D_B = \frac{A+K}{A-(N-2)K} D_0$	$D_B = \frac{(A-K)}{2(x-\Delta x_B)} \left(\frac{t}{n}\right)$ $x = \frac{A}{2D_0} \left(\frac{t}{n}\right)$ $\Delta x_B = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{t}{D_0}\right)^2 \right] p$		
	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

具体的な計算を進めるために、製造設計時に、レンチキュラー形状、および樹脂を、
 $r = 0.52$ $p = 0.4358$ $t = 1.30\text{mm}$
 PVC樹脂、屈折率： $n = 1.53$
 とし、製品例を、
 $A(\text{横})270 \times B(\text{縦})340\text{mm}$
 とする。そして、観察距離を
 $D_0 = 1,000\text{mm}$

と設定する。

この設定値から、立体合成画像のピッチを式(02)から計算すると、

$$p_P = 0.4361\text{mm}$$

となる。

この時の立体視領域は、

$$D_B = \infty$$

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

$$D_F = 404$$

である。

このステレオ製品は、店頭広告、および室内壁面の装飾用に造られている。

具体的な計算手順は、両ピッチの内一方のピッチを固定し、他方のピッチずれを

0.0001mm 単位で増減させて、先ず観察距離の変化を計算し、続けて立体視領域を求めて行く。

(1) 立体合成画像のピッチを固定し、レンチキュラーピッチが変化した場合

計算結果を表03に示し、図08にグラフを表示する。

表03 レンチキュラーピッチのずれと立体視領域

p	D	DF	DB
0.4351	326	241	762
0.4352	361	256	1,086
0.4353	404	273	1,878
0.4354	459	292	7,049
0.4355	531	314	無限大
0.4356	629	339	無限大
0.4357	773	369	無限大
0.4358	1,000	404	無限大
0.4359	1,417	447	無限大
0.4360	2,430	500	無限大
0.4361	8,520	567	無限大
0.4362	無限大	596	無限大
0.4363	無限大	596	無限大
0.4364	無限大	596	無限大
0.4365	無限大	596	無限大

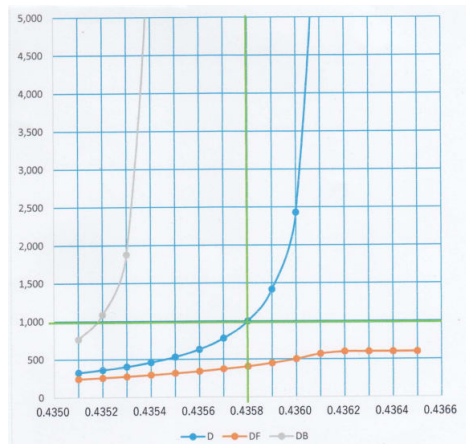


図08 レンチキュラーピッチのずれと立体視領域

もし、レンチキュラー板のピッチが何らかの理由により $p = 0.4360 \text{ mm}$ となってしまう場合、立体視領域は、

$$D_B = \infty$$

$$D_0 = 2,430 \text{ mm}$$

$$D_F = 500$$

に変わってしまう。この時のレンチキュラー板の横幅寸法は、270.0124 mm となる。わずかに 0.0124 mm の増加でこの様に立体視領域が変わってしまうことを示している。

(2) レンチキュラーピッチを固定し、立体合成画像のピッチが変化した場合

計算結果を表04に示し、図09にグラフを

表示する。

表 04 画像のピッチのずれと立体視領域

pp	D	DF	DB
0.4354	無限大	597	無限大
0.4355	無限大	597	無限大
0.4356	無限大	597	無限大
0.4357	無限大	597	無限大
0.4358	8,514	567	無限大
0.4359	2,429	500	無限大
0.4360	1,417	447	無限大
0.4361	1,000	404	無限大
0.4362	773	369	無限大
0.4363	630	339	無限大
0.4364	531	313	無限大
0.4365	459	292	7,409
0.4366	405	273	1,937
0.4367	362	256	1,109
0.4368	327	242	775

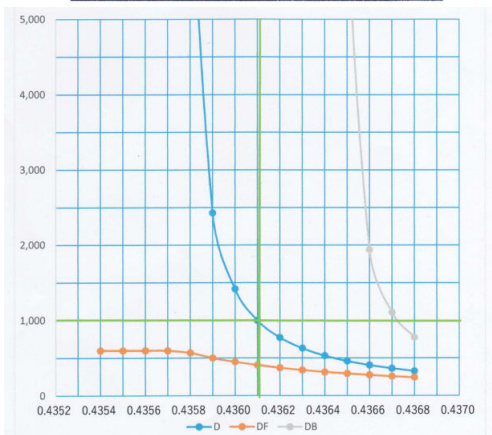


図 09 画像のピッチのずれと立体視領域

前節同様に、もし、立体合成画像のピッチが何らかの理由により $p = 0.4363 \text{ mm}$ となってしまう場合、立体視領域は、

$$D_B = \infty$$

$$D_0 = 630 \text{ mm}$$

$$D_F = 339$$

に変わってしまう。この時の立体合成画像の横幅寸法は、 270.0124 mm となる。わずかに 0.0124 mm の増加でこの様になってしまうことを示している。

9. 立体視領域の許容

製造設計において、観察距離、あるいは立体視領域を設定するとき、当然許容値が設定される。それ故、その許容値からピッチずれの量を計算することが出来る。ステレオ印刷製品を製造するときは、この許容範囲を出ない様にピッチ管理をせねばならない。図で示すと図10となる。

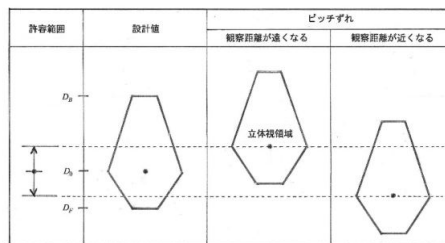


図10 ピッチずれと立体視領域の変化

10. まとめ

ステレオ印刷製品の製造設計、および納品時における立体視領域のチェックはどの程度行われているであろうか。多くの経験から、暗黙の設定(了解)となっていると思われる。付記に述べている様に、小さい製品ではそれで良いが、大きな製品になると、立体視領域の変化が注目されることになってしまう。

現実には、製造工程上ピッチずれが存在し、立体視領域が変化してしまうことが発生している。

レンチキュラー板は製造時の環境、製造条件によりピッチが決まってしまう。ロットが変わった時のピッチの一定性は低い。そのピッチずれに伴う立体視領域の変化が9章で述べている許容範囲に入っていれば良いが、入っていないことが分かったときは、そのロットのピッチに合わせて再製版せねばならない。

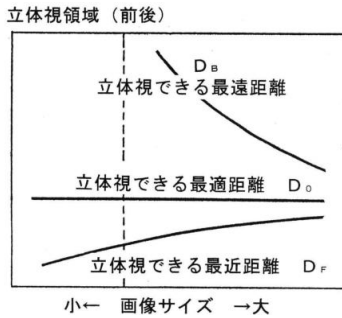
立体合成画像はPC上で合成される。しかし、印刷したときにピッチが変わってしまうことが考えられる。製造条件、および環境の変更で修正出来れば良いが、出来ないときは再製版せねばならない。

< 付記 >

立体合成画像の横寸法と立体視領域

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、その内どれか一つを変え、他を固定すると立体視領域がどの様に変化するかがわかる。

下図に画像の横寸法を変えた時の立体視領域の変化を示す。



図：画像の横寸法と立体視領域

この図の中で、縦の点線は $D_B = \infty$ となる点を示している。

画像の横寸法が小さいと立体視領域が広く、大きくなる程に狭くなる。

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、筆者は下記のよう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。

よって、実用に近い計算結果を得るためには、

$t-r$ に置き換えて計算すべきと考えている。

< 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, pp4-7 (1993-03)

以上