

連続視域レンズ板三次元像の幾何学的性質 ——多眼式レンズ板三次元像——

Geometrical Characteristics of Multi-Aspect Lens-Plate Three-Dimensional Images

濱 崎 襄 二*・深 沢 正 志*

Joji HAMASAKI and Masashi FUKAZAWA

多眼式レンズ板三次元像の技術は、ホログラフィーと同様に、広い角度から連続的に裸眼観察できる三次元像を提供する技術である。しかし、ホログラムと比較して、取り扱う情報量が極めて少ないため、近い将来には、裸眼観察できるテレビジョンなど、三次元映像を必要とする広い応用範囲での実用が期待されている。

本文では、この技術が対象とする三次元像の幾何学的性質について、空間の標準化、記録・表示の像変換、拡大・縮小と歪、空間の広さ、横飛び・奥行き飛び、光学瞳によるボケ、標準化誤差、人間の両眼光学系との比較など、重要と思われる事項を整理して解説する。

1. は じ め に

多眼式レンズ板三次元像技術では、普通照明光の下で彩色被写体が、瞬時に、普通解像力の記録媒体上に記録される。その再生映像は、普通照明光を用いた環境の下で、ほとんど連続的な視域から、裸眼で、観察される。このような三次元像は、写真、テレビジョンを始めとして、コンピュータ・グラフィックスなど三次元映像表示を必要とする広い分野で利用可能である¹⁻⁴⁾。

レンズ板上に(疑)連続視域三次元像(3D像と略称する)を表示する場合、記録と表示の典型的な組み合わせは次の三つである。すなわち、(1)“多眼記録”と“(多眼)投射表示”，(2)“多眼記録”と“直接表示”，(3)“直接記録”と“直接表示”の組み合わせである。

多眼記録では、多数の投影像が一連のカメラ・レンズを通して、個々に記録される。投射表示では、多眼記録で得られた投影像が、一連のレンズを通して、後焦点面に拡散性反射膜を持つレンズ板(反射性レンズ・スクリーン)の上に個々に投射され、このスクリーンの作用により3D像が表示される。多眼記録と投射表示では、共に、3D像の画像データは投影像群である。

直接記録と直接表示では、投射表示においてレンズ板焦点面に得られる画像が3D像の画像データである。すなわち、レンズ板近傍に逆視像を形成する光学系を用いたとき、レンズ板の各素レンズ上に到来する光束のフーリエ強度像が画像データである。直接記録では、このデータは投影像の記録なしに光学的に直接形成される。多眼記録・直接表示では、表示用の画像データは投影像群から光学的にまたは電子的に変換形成される。

本文では、上述のように種々な形式を持ちうる3D像に共通な幾何学的性質を、“多眼式レンズ板三次元像”としてまとめて記述し、撮像装置と表示装置の設計指針となる事項、および、被写体となる物体を撮像・表示する際の留意事項を解説したい。表示においては人間の両眼光学系モデルから得られる3D像の性質と比較考察し、その特色を明らかにしたい。

2. 人間の両眼光学系の簡略モデル³⁾⁵⁾

図1では、人間の両眼光学系の簡略モデルを説明する。L1は薄肉レンズ(屈折力約60diopter, 焦点距離約 $f \approx 17$ mm)であって、無限遠を見ている状態の左眼の角膜と水晶体との複合レンズ系を近似している。L1の焦点面上には、視細胞(錐体)のモザイク構造で形成された網膜面Aがある。この面はピッチ a (網膜中心の黄斑部では $a \approx 2 \mu\text{m}$)の等間隔配列で近似される⁵⁾。

本節では、左眼と右眼に属する記号を、それぞれ、'なし記号と'付き記号で区別する。両眼輻輳と水晶体調節には深い相関があるので、両者をまとめて、L1およびL1'と近接した一枚の薄肉レンズL2で近似する。L1とL1'との中心間距離(瞳間距離)を P ($P \approx 65\text{mm}$)とする。L1とL2の中心を含む垂直面をCとし、両中心点の中央点に原点を持ち、面Cに垂直な z 軸を持ち、水平面内に z - x 平面を持つ直角座標系を (x, y, z) とする。L2の光軸は z 軸と一致し、L1とL1'の光軸は z 軸と平行である。L2の焦点距離 F は調節と輻輳に従って可調節である。 $z = F$ にある垂直面E上には、AとA'にある二つの配列の像が重なって同一の配列となって現れる。E面は(瞬時的な)“注視面”である。その面上での解像距離 e は

$$e = F\delta, \quad \delta = a/f (\approx 1.2 \times 10^{-4} \text{rad}), \quad (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第3部

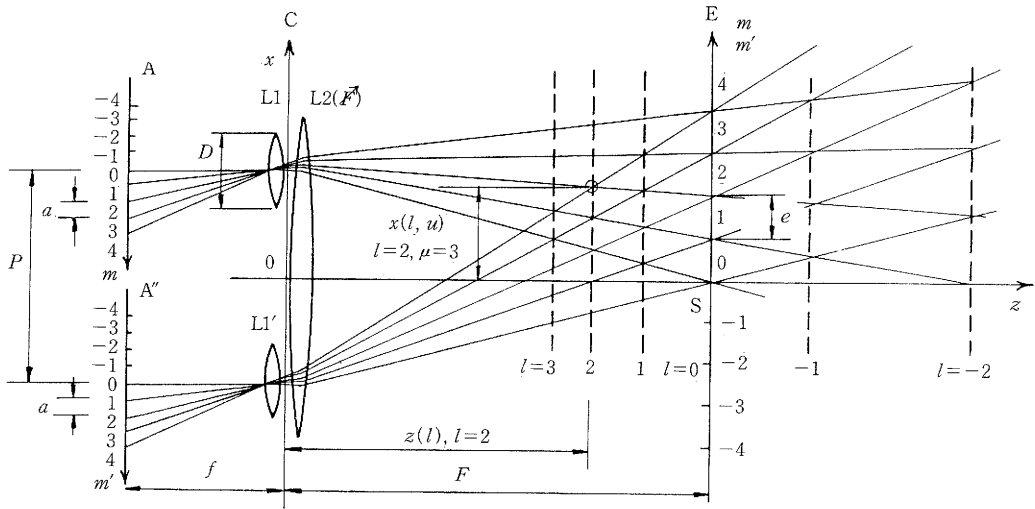


図1 両眼光学系のモデル

L1, L1' : 角膜と (無限遠ピント) 水晶体レンズ L2 : 輻輳と調節を受け持つレンズ
 A, A' : 網膜上の視細胞配列 S : 注視点 E : 注視面 (視細胞配列の像)
 C : 瞳面 P : 瞳間距離

で表される。ここに、 δ は両網膜のモザイク構造ピッチと焦点距離によって決まる解像角である。瞳直径を $D = 2 \text{ mm}$ 、波長を $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ とすると、解像角 δ は瞳による回折角と同程度 (またはそれ以下) となる。

両網膜上の視細胞を同時に一つずつ刺激する光線は、E 上の配列点の一つと L1 の中心点とを通る直線と E 上のもう一つの配列点と L1' の中心点とを通る直線との交点から発せられた光線である。この交点を物空間の“標本点”と呼ぶ。標本点を含む垂直面を“標本面”と呼ぶとき、標本面は整数指標 l で代表される。

原点から標本面までの距離の逆数 $1/z(l)$ は、

$$1/z(l) = 1/F + l\delta/P, \quad l = m' - m. \quad (2)$$

ここに、 m と m' は、それぞれ、A と A' 上にある配列点の整数指標であり、同時に、E 上に像として形成された配列の指標でもある (図 1)。この標本面上の標本点の x 座標 $x(l, \mu)$ は、次式で表される。

$$x(l, \mu)/z(l) = \mu\delta, \quad \mu = (m' + m)/2. \quad (3)$$

ここに、 μ は標本点の x 方向指標であり、 l の偶奇に従って整数値または半整数値をとる。

式 (2) と (3) は、像空間の構造と解像距離を表す式である。両網膜上の対応点にある視細胞を同時に刺激する (ホプター上) の標本点は、 $l = 0$ の面上にある。すなわち、 l は対応点からのズレ細胞数でもある。 $\delta = 1.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ と $P = 65 \text{ mm}$ を仮定すると、奥行き解像指数 δ/P の値 (感知可能な遠方限界距離 P/δ の逆数) は、 $\delta/P = 1/433 \text{ m}$ となる。

図 1 のモデルは、解剖学あるいは心理学で知られている多数の事実を簡略・省略したものであるが、次の特色

を示している。すなわち、(1) $1/F$ が変化するとき網膜視細胞モザイクの投影像により視空間は体積走査されていること、(2) $1/F$ の変化が δ/P の整数倍ならば標本面は不変となること、(3) $x(l, \mu)/z(l)$ は F と無関係に μ で定まることなどである。また後述するように、標本点分布等について、人間の眼と“多眼式レンズ板 3D 像”との間に相似性が高いことをも示すものである。

物点が注視面 E 上にないときには、網膜上の像はボケる。このボケの直径が a と等しくなる距離は、次式のとおりとなる。

$$|1/z(l_m) - 1/F| = \delta/D. \quad (4)$$

ここに l_m は上記の条件下で、注視面から最も遠い標本面の指数である。式 (4) の条件下で十分良く網膜上に結像している標本面の数は、高々 $2P/D$ 枚である ($D = 2 \text{ mm}$ と $P = 65 \text{ mm}$ を仮定するとき 65 枚)。

図 2 は人間の平均的な眼の屈折力誤差と視力との関係を示す実験結果である⁹⁾。横軸と縦軸とは、それぞれ、球面屈折力誤差と非点収差 (円柱面屈折力誤差) を diopter 単位で表している。この図より、非点収差許容量は δ で決まる幾何光学的量よりもはるかに大きいことがわかる (1 diopter の遠視と共存した 1 diopter 程度の非点収差は視力劣化に影響しない)。この事実があるので、双眼式ステレオ 3D 像および水平視差のみを持つレンズ板 3D 像は利用可能となる。すなわち、表示される 3D 像について、水平視差によって形成された水平方向に関する光線集束点の奥行き距離と、垂直方向に関する光線集束点の奥行き距離とは、相当に異なっても視力低下は起こらない。また、垂直解像力が良いならば 3D 像の解像力は

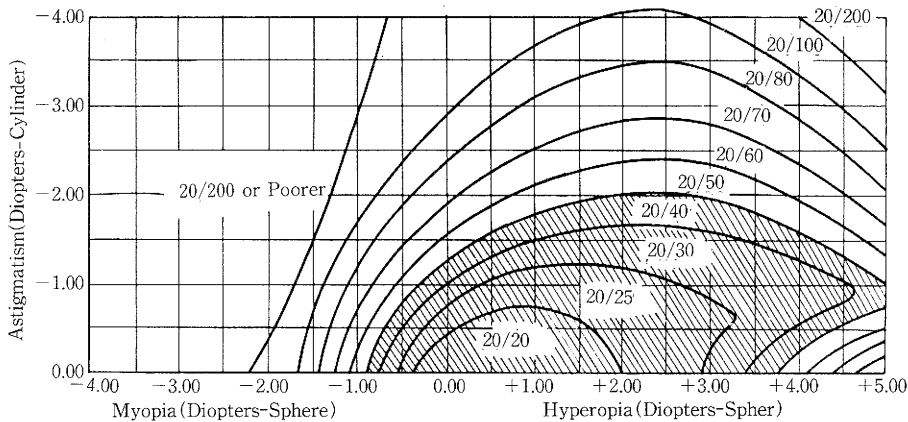


図2 眼球レンズの屈折力誤差と視力との関係

横軸：球面屈折力誤差 縦軸：円柱面屈折力誤差 等高線：視力一定
視力は、Snellen visual acuity (1,920個の眼についての平均) による。
(文献6) Hammond and Schmidt (1986) より引用

良く感知される。

3. 多眼式レンズ板3D像

図3は多眼式レンズ板3D像の空間の説明図である。この空間は共通な z 軸(光軸)を中心とし、これに垂直な二枚の配列面によって構築される。

面E(“録点面”と呼ぶ)上の配列は小さなピッチ e を持ち、縦横方向の分解能を決定する。その配列点を“録点”と呼ぶ。レンズ板の素レンズ中心、あるいは、ある変換光学系によって素レンズ中心が変換されて作られた像点は録点となりうる。もう一つの面C(“相点面”と呼ぶ)上の配列は大きなピッチ $c(c > e)$ を持っている。この配列は物体投影像の投影中心配列であって、同時に、録点における解像角を決定する。配列点を“相点”と呼ぶ。

任意の一録点と任意の一相点とを通る直線と(部分的に)一致する光線を“特徴光線”と呼ぶ。“多眼式レンズ板3D像”とは、特徴光線によって決定・記述される3D像である。この像は、特徴光線の交点となる離散的点群で形成されている。録点では、すべての相点からの特徴光線が分解され、相点では、すべての録点からの特徴光線がほぼ分解されていなければならない。

カメラ・レンズ中心、投射レンズ中心、反転プリズム眼点等は相点となりうる、また、これらが光学的に変換されて作られた像も相点となりうる。

録点群において再生された特徴光線によって、光学的にも、相点は形成される。録点面がレンズ板である場合、一つの相点を発した特徴光線群はレンズ板後焦点面では、周期的な位置に到達・記録される。そのピッチ(周期)を e' とすると、その値は素レンズピッチ e よりわずかに大きい。記録から特徴光線を再生するならば、レンズ

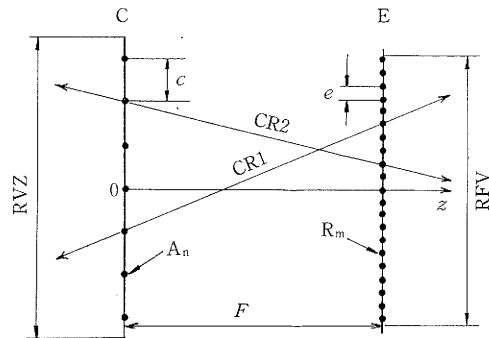


図3 多眼式レンズ板三次元像の空間

C：相点面 A_n ：相点(ピッチ： c)
E：録点面 R_m ：録点(ピッチ： e)
CR1, CR2：特徴光線 RVZ：基準視域
RFV：基準視野

板から光学的に形成された相点面までの距離 F は、次式のとおりととなる。

$$F = g / (e' / e - 1). \quad (5)$$

ここに、 g はレンズ板の素レンズ焦点距離である。

図3と図1とを比較するならば、図3の相点面と録点面とは、それぞれ、図1の瞳面と注視面とに対応している。図3では、瞳は任意の相点上に置くことができる。一本の特徴光線に随伴している光束の広がり方が適切であるならば、相点面上の配列面積部分は一様に覆われ、瞳はこの面積部分内の任意の位置に置くことができる。すなわち、連続視域が得られる。

図1において面E上に配列が形成されたのと同様に、録点は相点群において再生された特徴光線から光学的にも形成される。録点面上の録点配列で覆われた面積部分を“基準視野”と呼び、相点面上の相点配列面積部分を

“基準視域”と呼ぶ。実際の視域は、必ずしも基準視域と一致する必要はない。相点と録点のそれぞれの密度が高い場合には、実際の視距離には広い範囲が許される⁷⁾。この問題については第6節で考察する。

水平視差と垂直視差とを共に記録・表示する場合には、録点と相点とは共に二次元配列でなければならない。また、レンズ板の素レンズは球面レンズでなければならない。水平視差の記録・表示のみでよい場合には、相点は水平方向一次元配列上に配置される。また、レンズ板素レンズとしては垂直方向に円柱軸を持つ円柱面レンズが用いられる。水平視差のみの場合には、垂直方向には広い観察域が得られ、また、垂直方向解像力が高いならば、3D解像力も高く感知させる。

3D写真の実験結果によると、3D像質の劣化を招く他の原因を除外したとき、 $e/F < 10^{-3}$ と $c < 30\text{mm}$ とが共に満たされるならば、基準視域からみた3D像はまず良好である。 $e/F < 3 \times 10^{-4}$ と $c < 10\text{mm}$ とが共に満たされるならば、精緻な3D像が得られる。

なお、記録装置および表示装置を設計し、また、ある3D像を記録・表示する際に、重要構成要素となる“変換光学系”については付録を参照されたい。

4. 物空間と像空間における標本点

図4(a), (b)には、それぞれ、3D像の記録時における物空間と、表示時における像空間とを示す。両空間共に、もし変換光学系があるならば、変換された後の空間を示す。物空間と像空間の記号には、それぞれ、添字 r と

d を付け、両者を区別する。

図4(a)において、録点面 E_r は高解像記録を最も必要とする物体断面である。もう一つの面 C_r は、物体側から(変換光学系を通して)見た相点面である。図4(b)においては、相点面 C_d は基準視域面であって、観察者にとって最も精緻な3D像が見える瞳面である。もう一つの面 E_d は観察者側から(変換光学系を通して)見える録点面である。

本節と次節では、相点ピッチ c_d の整数 J 倍が瞳間距離 P に等しいとし($c_d J = P$)、観察者の瞳面は面 C_d 上にあるとする。この仮定が成立しない場合については、第6節で説明する。

さらに、物空間と像空間の双方において、録点面の大きさは、それぞれ、 $c_r J$ および $c_d J$ より大きいとする。

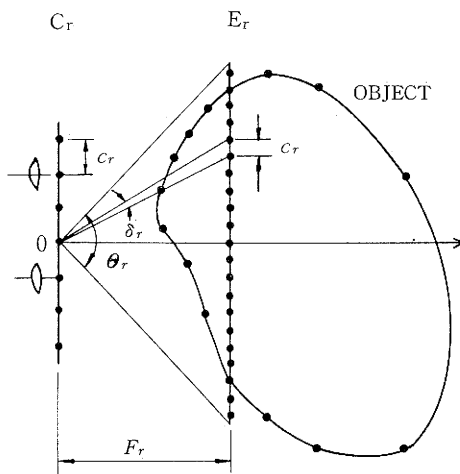
物空間と像空間のそれぞれの視野角を Θ_r および Θ_d とし、それぞれの録点ピッチを e_r および e_d とする。また、それぞれの空間において相点面から録点面に至る距離を F_r および F_d とする。

物空間と像空間のそれぞれにおける解像角 δ_r および δ_d を次式で定義する。

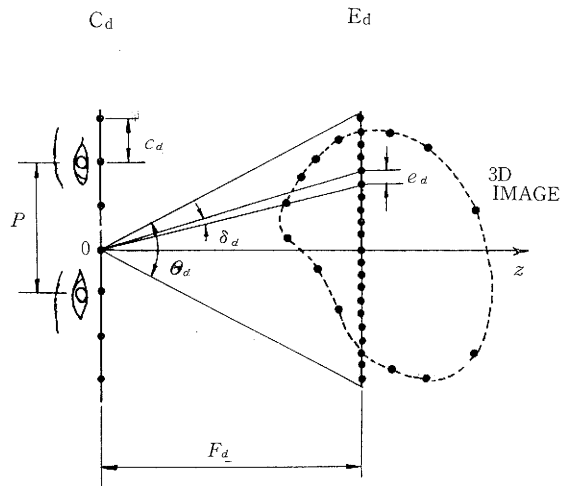
$$\delta_r = e_r / F_r, \quad \delta_d = e_d / F_d, \quad (6)$$

両空間において視野内での角解像数は、それぞれ、 Θ_r / δ_r および Θ_d / δ_d である。しかし、記録・表示された3D像を観察するときには、記録と表示における二つの角解像数の内はるかに大きいほうのものは無効である。したがって、小さいほうのものを選ぶことにし、他方は次式

$$\delta_r / \Theta_r = \delta_d / \Theta_d, \quad (7)$$



(a) OBJECT SPACE
(RECORDING AN OBJECT)



(b) IMAGE SPACE
(DISPLAYING A 3D IMAGE)

図4 記録・再生による三次元像の変換

(a)記録光学系(被写体空間) 添字 r (b)再生光学系(再生像空間) 添字 d
 E_r, E_d : 録点面 e_r, e_d : 録点間隔 C_r, C_d : 相点面 c_r, c_d : 相点間隔
 Θ_r, Θ_d : 視野角 δ_r, δ_d : 横解像角 F_r, F_d : 相点面と録点面との距離

を満たすように δ を置き換えても、表示された3D像の角解像数に変化はない。以下においては、物空間と像空間の相点総数は相等しく、かつ、両空間の角解像数は式(7)の条件の下で相等しいものとする。

図4(b)と図1とを比較するとき、図4(b)では瞳位置が c_d の整数倍だけ移動可能である点を除いて、双方の配置は相似的である。両瞳の中央点の x 座標を x_0 とするとき、その値は $x_0 = \nu c_d$ と与えられる。ここに、 ν は観察位置の横座標の指数であって、 J の偶奇に従って整数値または半整数値をとる。

図4(a)と(b)のそれぞれに図示された物空間と像空間は、図1と同様に、標本面と標本点を持っている。空間相互間の幾何学的パラメータ Q 、 R および S を、次式で定義する。

$$Q = c_d / c_r, \quad R = \Theta_d / \Theta_r, \quad S = F_d / F_r. \quad (8)$$

標本面の整数指数を l とし、標本点の横座標指数を μ とすると、 μ は z 軸から(x_0 からではない)の距離に対応する指数で、 l の偶奇に従って整数または半整数をとる。物空間の標本点座標を $[z_r(l), x_r(l, \mu; \nu)]$ で表す。同様に、物空間標本点に対応した像空間標本点の座標を $[z_d(l), x_d(l, \mu; \nu)]$ で表す。さらに、次式のとおりに、それぞれの座標成分を規格化する。

$$\begin{aligned} Z_d(l) &= z_d(l) / F_d, \quad X_d(l, \mu; \nu) = x_d(l, \mu; \nu) / (c_d J), \\ Z_r(l) &= z_r(l) / F_r, \quad X_r(l, \mu; \nu) = x_r(l, \mu; \nu) / (c_d J). \end{aligned} \quad (9)$$

また、3D係数 K および規格化解像力 Δ を次式で定義する。

$$K = Q / (RS), \quad \Delta = e_d / P. \quad (10)$$

式(2)および(3)と同様にして、指標 $(l, \mu; \nu)$ を持つ標本点の規格化座標は、次式で表される。

$$1/Z_d(l) - 1 = (1/K)[1/Z_r(l) - 1] = l\Delta, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_d(l, \mu; \nu) / Z_d(l) &= (1/K) X_r(l, \mu; \nu) / Z_r(l) \\ &= (\mu + l\nu/J)\Delta. \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)と(12)は、像空間と物空間において標本点の分布を表すと同時に、両空間の標本点座標成分の幾何学的関係を表す。これらの式は、式(2)および(3)と同一またはほとんど同一の形式を持つ。したがって、もし観察者が両眼の F と δ とを、像空間の F_d と δ_d とにそれぞれ等しくするように調整できるならば、像空間に表示されたすべての情報を受け取ることが可能である。

5. 3D像の幾何学的性質

5.1 像の拡大率と歪

3D係数 K は、大越⁹⁾によって説明されたパラメータと同一のものである。 $K=1$ が成立する場合には、無限遠の物点は無限遠に表示され、像空間と物空間とは線形関係で結ばれる。このとき、物空間から像空間へ変換した際の奥行き(z)拡大率と横(x)拡大率とは、それぞれ、 S および Q に等しい。また $S=Q$ が成立する場合には、上記二

つの拡大率は録点面近傍において相等しい。さらに、 $K=1$ と $S=Q$ とが同時に成立する場合には、 $R=1$ となり、像空間は物空間と幾何学的に相似であって、その拡大率は Q である。

指標 l と μ との小さな増分を、それぞれ、 l' と μ' で表す。指標増分 l' による z_d および z_r の増分は、それぞれ、次のとおりである。

$$dz_d \doteq -z_d^2 l' \delta_d / P, \quad dz_r \doteq -(Q/R) z_r^2 l' \delta_d / P. \quad (13)$$

ここに、 z_r と z_d との関係は次のとおりである。

$$z_r / z_d = (R/Q) / [1 - (z_d/F_d)(1 - 1/K)]. \quad (14)$$

指標増分 l' と μ' とによる x_d および x_r の増分は、それぞれ、次式で表される。

$$\begin{aligned} dx_d &\doteq [\mu' + (\nu/J - x_d/P) l'] z_d \delta_d, \\ dx_r &\doteq (1/R) [\mu' + (\nu/J - Q x_r/P) l'] z_r \delta_d. \end{aligned} \quad (15)$$

像空間のベクトル増分(dz_d, dx_d)は、物空間のベクトル増分(dz_r, dx_r)が変換されたものである。式(13)、(14)および(15)は両空間の線素の幾何学的関係を表し、標本化された局所的空間における拡大率と歪を与える。

5.2 空間の境界

物空間と像空間において、相点面から最も遠い標本面の l 値を、それぞれ、 l_r^* と l_d^* で表すと、それらは次式のとおりのとなる。

$$l_r^* = -[1/(K\Delta)], \quad l_d^* = -[1/\Delta]. \quad (16)$$

ここに、 $[x]$ は x を超えない、かつ、 x に最も近い整数(ガウスの記号)を表す。

物空間と像空間において、相点面に最も近い標本面の l 値を、それぞれ、 l_r^{**} と l_d^{**} で表すと、それらは録点配列面積の大きさに関係する。式(7)の条件の下では、両者は相等しい。その値を l^{**} とするならば、

$$\begin{aligned} l^{**} &= l_r^{**} = l_d^{**} = M, \\ M &= \Theta_d / \delta_d = \Theta_d F_d / (P\Delta). \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、 M は前述の角解像数であり、 x 方向の録点総数に等しい。もし、特徴光線の随伴光束の広がりを無視するならば、 l_r^* と l_d^* との内で大きいほうを l^* とすると、 l が取りうる範囲は $l^* < l < l^{**}$ となる。

相点総数を N として $\nu^* = (N - J)/2$ により ν^* を定めるとき、 ν が取りうる範囲は $-\nu^* < \nu < \nu^*$ である。また、 $\mu^* = (M - |l|)/2$ によって μ^* を定めるならば、 μ が取りうる範囲は $-\mu^* < \mu < \mu^*$ である。

5.3 像の飛び角

3D像を相隣る二つの瞳位置 ν と $\nu+1$ から順次に見るとき、標本面は共通であるが、指標 l を持つ標本面上の標本点横座標は $(l/J) \delta_d z_d(l)$ だけズレを起こす。物点にある認知されうる大きさの物粒は、実際には多数の物点の集まりである。指標 l を持つ標本面上にある認知可能な物粒の像の飛び角を $H_d(l)$ とすると、その値は次のとおりとなる。

$$H_d(l) = l \delta_d / J. \quad (18)$$

相点が密なとき (すなわち J が大きいとき) に像の飛びが小さくなる理由は, ある位置 (ν) から見えなかった物粒上の点が次の位置 ($\nu+1$) からは見えることによる. 物粒上の二つの点の x 座標の差を相点面から見た角度差で表すとき, その値は (l/J) とこれに最も近い整数との差の δ_d 倍である. このような状況は, 人間の自然視でも起こっていることである.

5.4 像の奥行き飛び (カード・ボーディング)

式(13)において l' の係数 $(Q/R)z_r^2\delta_d/P$ の値が大きいときには, 与えられた奥行き $|dz_r|$ に割り当てられる標本面の数 (増分 l' の値) は小さい. このとき, ある奥行きを持つ物体 (たとえば人物) を横切る標本面の数は小さくなり, その結果, その物体を3D像として記録できなくなる. また, 式(16)において K が極めて大きいとき, 標本面指数 l には正直しか許されない. このとき, 少し遠方では標本面間隔が極めて粗となる. 一つの物体の画像データを記録できる標本面の数が極端に少なくなると, 再生像空間では像の奥行き飛びが顕著となる. そのため, 標本面の奥行き位置に平板上に描かれた絵が立てられているように見える.

5.5 3D像点の幾何学的ボケ

記録と投射表示において, 相点に置かれた光学瞳の開口径は実際には有限の大きさを持つので, 図1の場合と同様に, 3D像点は幾何学的ボケを持つ. 物空間と像空間において, 録点面側から見える相点上の光学瞳の直径を, それぞれ, D_r および D_d とする. 式(4)の場合と同様に, 幾何学的ボケの直径が録点ピッチによる解像距離と等しくなる奥行きを, ボケが少ない奥行き限界とするならば, 物空間と像空間において限界奥行きにある標本面の指数 l の値, l_r および l_d は,

$$\begin{aligned} -l_r < l < l_r, \quad l_r &= [P/(QD_r)], \\ -l_d < l < l_d, \quad l_d &= [P/D_d]. \end{aligned} \quad (19)$$

ここに, $[\]$ の意味は式(16)の場合と同一である. 両空間において, それぞれ指標 l_r あるいは l_d を持つ標本面上では, 解像角は幾何学的ボケを無視した場合の約2倍となる. 記録と表示を共に必要とする3D像を見る場合には, 総合解像角は両空間のそれぞれの解像角のほぼ和となる. コンピュータ・グラフィックスなど3D像の記録を必要としない場合には, 総合解像角は表示系の解像角である. 解像角がある限度 δ_m を越えると奥行き知覚が困難となる. この限度角は, 極概略の経験値として, $\delta_m \approx 3 \times 10^{-3}$ の程度である.

被写体の奥行きおよびその3D像の奥行きを制限する最大の要因は, 相点にある光学瞳による幾何学的ボケである. 小さな瞳を用いるためには, 像の輝度を光学的あるいは電子的に明るくすることが必要である. また, 光学瞳による回折ボケを防ぐには, 光学瞳直径の値を人間の瞳径程度より大きく選ぶことが必要である⁹⁾.

5.6 基準視域の連続性

像空間の録点群において特徴光線が分離されていることは相点群を形成するために必要であるが, 一方, 連続的な視域を得るためには, 特徴光線の随伴光束が相点面 (基準視域) をほぼ一様に覆っていることが必要となる. すなわち, レンズ板素レンズとその後焦点面上の画像データとを一組としたときの解像力について, それによる光束広がり相点面を一様に覆うことが要求される. このように録点面の角解像力が相点密度と整合しているならば, 録点群から再生された特徴光線の随伴光束が, 隣の相点に集まる光束とちょうど相接する状態となる.

6. 視域の奥行きと3D像の標本化誤差¹⁰⁾

観察者は相点面から映像を見るときは限らない, そのため, 観察者が見る映像は表示したい像と若干異なる.

瞳間隔 P をもつ観察者が, 録点面の前方 F の距離の所から, 表示された3D像を見るとき, P および F は, それぞれ, 表示系の相点間隔 c_d の整数倍および録点面・相点面間距離 F_d と, 必ずしも等しくないとする.

録点間隔が視細胞間隔による解像距離より大きいとする. このとき図1において, 面 E が録点面となり, 表示系の録点間隔 e_d が図示の e となる. 図1では両瞳中心の中央点の x 座標は零であるが, 一般には, ある値 x_0 を持つ. このとき, 観察者が見ることができる標本点の座標は, 図1の場合と同様に,

$$\begin{aligned} 1/z(l) - 1/F &= le/(PF), \quad l = m' - m \\ x(l, \mu; x_0)/z(l) &= (\mu + lx_0/P)e/F, \quad \mu \\ &= (m' + m)/2. \end{aligned} \quad (20)$$

指数 l , m , m' ; μ および $'$ の意味は図1と同じである.

一方, 3D像の表示光学系が図4(b)において両瞳を除いたものであるならば, 任意の二つの相点から見える標本点の座標は, 式(11), (12)より次のとおりである.

$$\begin{aligned} 1/z_d(l; J_d) - 1/F_d &= le/(c_d F_d J_d), \\ x_d(l, \mu; \nu_d, J_d)/z_d(l; J_d) &= (\mu + l\nu_d/J_d)(e/F_d), \end{aligned} \quad (21)$$

ここに, J_d は両相点の間隔が $c_d J_d$ となるような整数, ν_d は二つの相点の中央点の x 座標が $c_d \nu_d$ となるような整数または半整数である.

任意の二つの相点から録点 (m , m') を見るとき (l , μ) は確定するが, z_d は J_d の関数であり, x_d は (J_d , ν_d) の関数である. 録点にはすべての (J_d , ν_d) についての画像データが記録されており, それらからすべての特徴光線とその随伴光束とが再生されている.

式(21)の座標値は表示系で定まる座標値, すなわち表示したい3D点の座標である. しかし, このような標本点が全部見えるのは, 任意の (J_d , ν_d) を選ぶう仮想観察者が, 録点面の前方 F_d に瞳面を置き, 瞳間距離を $c_d J_d$ に調整し, 両瞳中央点 x 座標が $c_d \nu_d$ となる位置で (任意の二つ

の相点に両瞳を置いて、見た場合である。

実際には、瞳間距離 P を持つ観察者が距離 F の面から像を見るのであるから、式 (20) の座標値にしか 3D 点を見ることができない。そのため、3D 映像には、像を見る位置に依存し、また、瞳間隔に依存するような局所的な歪 (標本化誤差) が発生する。

ある任意の位置に瞳を置いて一つの録点を見たとき、離散的である特徴光線は、一般には、瞳中心を通らない。しかし、その随伴光線は広がりを持つので、その録点から再生された特徴光線の内、最も瞳中心に近い所を通過するものが瞳に入ると仮定しよう。相点の指数を n (整数) とし、 z 軸上の相点指数を $n=0$ とし、 n は相点 x 座標と共に増加するとする。上記仮定の下では、左右の眼の視野内にそれぞれ指数 (m, m') の録点が含まれているとき、左右それぞれの瞳に入る特徴光線の相点指数 (n, n') は、次式のとおりとなる。

$$\begin{aligned} n + \varepsilon &= (F_d/F) [me(F/F_d - 1) + x_0 + P/2]/c_d, \\ n' + \varepsilon' &= (F_d/F) [m'e(F/F_d - 1) + x_0 - P/2]/c_d, \\ -1/2 < \varepsilon \leq 1/2, -1/2 < \varepsilon' \leq 1/2. \end{aligned} \quad (22)$$

ここに、 n, n' は整数であり、 $\varepsilon, \varepsilon'$ は端数である。 $\varepsilon, \varepsilon'$ は m, m', F, x_0, P によって不連続的に変化する小さな変数 (標本化誤差変数) である。見ている 3D 点 $[z(l), x(l, \mu; x_0)]$ に対応する J_d, ν_d の値は

$$\begin{aligned} J_d &= n - n' \\ &= (F_d/F) [P + le(1 - F/F_d)]/c_d - (\varepsilon - \varepsilon'), \\ \nu_d &= (n + n')/2 \\ &= (F_d/F) [x_0 - \mu e(1 - F/F_d)]/c_d - (\varepsilon + \varepsilon')/2. \end{aligned} \quad (23)$$

$F \neq F_d$ の場合、 J_d は像点の奥行き指数 l により変化し、 ν_d は位置 x_0 と像点の横指数 μ によって変化する。

観察者が見ることができる 3D 標本点と表示したい 3D 標本点との間の座標関係は、次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} [z(l) - F]/[z_d(l; J_d) - F_d] \\ &= 1 + (F/F_d) c_d (\varepsilon' - \varepsilon) / (P + le) \equiv \Gamma \\ \Gamma x_d(l, \mu; \nu_d, J_d) / x(l, \mu; x_0) \\ &= 1 + (F/F_d) c_d (m\varepsilon' - m'\varepsilon) / (\mu P + lx_0). \end{aligned} \quad (24)$$

Γ は、録点面上に原点を持つ座標系で得られる奥行き拡大率である。 $\varepsilon, \varepsilon'$ が共に零となるとときには座標値の誤差も零である。すなわち、標本化誤差変数を無視する限り、観察位置 (F, x_0) および瞳間距離 P と無関係に 3D 映像の座標は確定し、表示したい 3D 像の座標と一致する。このようにオートステレオスコピックな像が得られることは、多眼式レンズ板 3D 像の顕著な特色である。

$\varepsilon, \varepsilon'$ が零ではない場合、 $\Gamma \neq 1, x/x_d \neq 1$ となり、座標値の標本化誤差が現れる。 $(F/F_d) c_d$ が小さいときにはその値は小さいが、 J_d と ν_d の変化 (映像のツギハギ) の周期が短くなる。 l が大きいとき (録点面前方に飛び出して

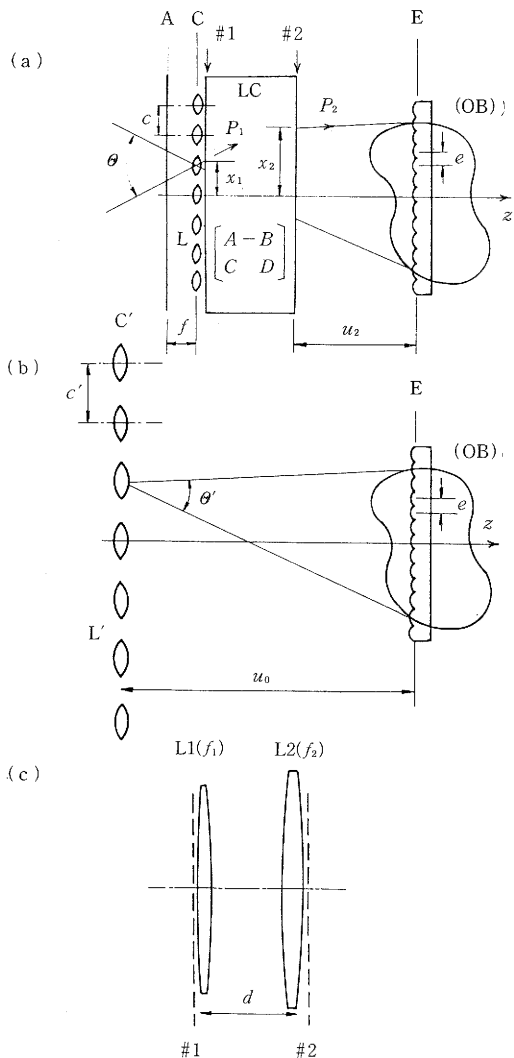
いる像点では) 標本化誤差は小さくなる。このとき、 F が F_d より小さい場合、相点総数で決まる限界値を J_d が越えると 3D 像は分解を起こす。

なお、 $z(l)$ と $z_d(l; J_d)$ とは原点が異なる。それらの比は Γ と J_d とを用いて次の式で表される。

$$z(l)/z_d(l; J_d) = \Gamma P / (c_d J_d) \quad (25)$$

7. お わ り に

本文では、多眼式レンズ板 3D 像に固有な幾何学的性質について解説した。この 3D 像は二つの基準標本面 (録点面と相点面) によって標本化された空間における像である。このような像の記録と表示における基本関係式、お



図A1 相点面からの変換 (記録、投射表示)
 (a) 光学系LCによる変換 (実際の配置)
 (b) 等価配置
 (c) 二枚レンズの変換光学系

よび、標準化が像に及ぼす影響について説明した。本文で述べた事項が、記録装置、表示装置の設計にあたって、また、実際に3D像を記録・表示する場合において活用されるならば筆者の幸いである。

終わりに臨み、多眼レンズ板三次元像の研究に長年にわたってご協力とご援助を賜った本所内外の方々に心からお礼を申し上げる。 (1989年8月8日受理)

付録 視域・視野角と視距離の変換光学系

3D像の表示では人間の視覚能力が鋭敏であるため、記録光学系の定数値選択の際に、表示される3D像についての視覚特性を十分考慮に入れなければならない。投射表示の場合にも光学系定数値の選択自由度が多いので、同様な配慮が必要となる。また、直接表示の場合、視距離調整のため、レンズ板ピッチと画像データのピッチとの比率調整が必要となることがある。このような場合、変換光学系を用いることによって、大きな自由度が得られる。

A.1 相点配列のみの変換

この変換は、多眼記録、直接記録、および、投射表示で用いられる。ここでは投射表示について説明する。

図A1(a)において、LCはz軸を光軸としたレンズ系であり、L(焦点距離f)は相点にある投射レンズの一つであって、Lの光軸はz軸と平行である。Lの後焦点面には画像データ表示面Aがあり、この面の像面がレンズ板面(録点面)Eである(記録の場合には、E面は被写体上の注視面である。多眼記録ではLは投影像記録レンズ、Aは投影像記録面である。直接記録の場合にはL、Aは反転プリズムに含まれ、プリズムの眼点がLの中心に対応する)。

LCの入射面#1と出射面#2における光線の位相空間座標を、それぞれ、 $(x_1, p_1)^t, (x_2, p_2)^t$ (x は位置、 p は光線成分、 t は転置を表す)とすると、相互の関係を表す光線行列(行列要素: $A, -B, C, D$)は次のように定義される。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ p_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

図A1(a)においては、EとAとが相互に像となるように u_2 が選ばれている。同図(b)に示したように、E側から見たLの像L'が並んでいる面が相点面C'である。

相点面と録点面との距離 u_0 (本文中では記号Fまたはそれに添字を付けて表している)と、L'の相互間隔 c' とLの相互間隔 c との比 M_c ($M_c = c'/c$: 視域拡大率)、および、 u_2/u_0 が与えられたとき、調整すべき行列要素 A, B, C, D の値は次のとおりとなる。

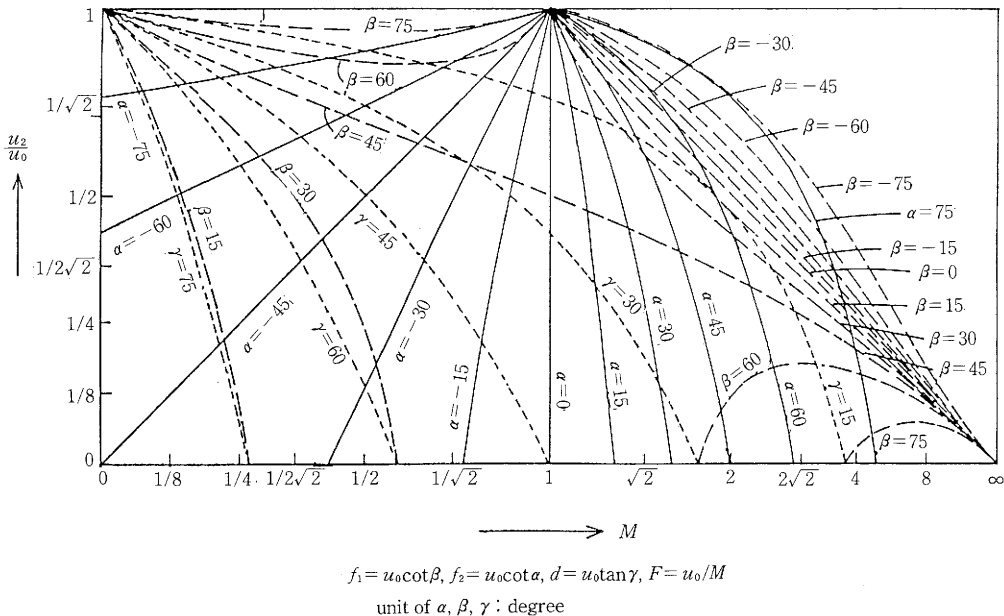
$$\begin{aligned} A &= 1/M_c, \quad B = (u_0/M_c)(1 - u_2/u_0), \\ C &= M_c/u_0, \quad D = M_c u_2/u_0. \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

レンズLにおける視野角を Θ 、レンズの像L'における視野角を Θ' とすると、 M_c は視野角縮小率に等しい($M_c = \Theta/\Theta'$)。投影像表示面Aと録点面Eとの間の拡大率 M_a は $M_a = -1/(fC)$ となる。

特に、図A1(c)に示されたように、LCが間隔 d だけ離れた二枚のレンズL1, L2(焦点距離はそれぞれ f_1, f_2)で構成されているときには、 $M = M_c$ として、次式によって f_2, f_1 および d が求められる。

$$\begin{aligned} 1/f_2 &= (M/u_0)(1 - 1/M)/(1 - u_2/u_0), \\ 1/f_1 &= (M/u_0)(1 - Mu_2/u_0)/(1 - u_2/u_0), \\ d &= (u_0/M)(1 - u_2/u_0). \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

図A2は、 u_0 と M とが与えられたとき、 $f_2, f_1, d, u_2(>0)$ を求める図である。ただし、 $f_2/u_0, f_1/u_0, d/u_0$ は図の下方に示した式に従って、角度パラメータ α, β, γ (単位: 度)で表されている。



図A2 拡大・縮小率 M を得るための光学定数の値(二枚レンズの変換光学系)

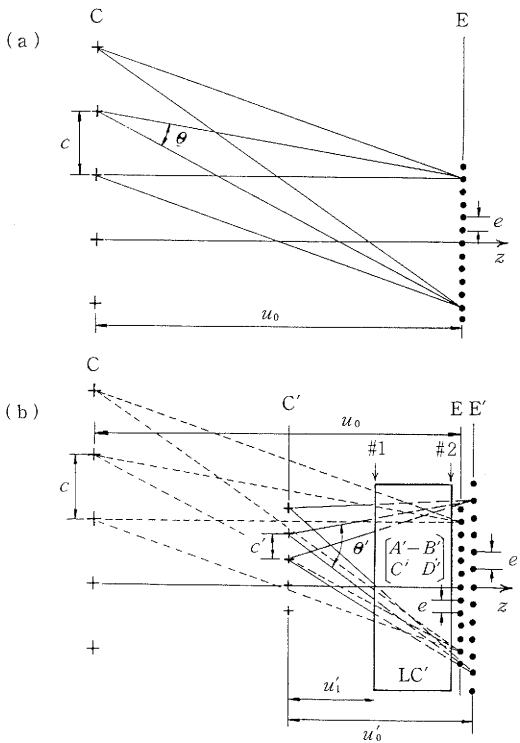


図 A3 相点面と録点面の変換 (再生, 直接記録)
(a) 無変換の系 (b) 光学系 LC' による変換

A.2 録点配列の変数を伴う場合

この変換は視距離変換を含む場合に有用である。記録光学系主要部分の相互間、表示系主要部分の相互間の互換性を高めるためには、規格化視距離に変換して記録しておき、表示の際に適切な視距離に再変換する。

図 A3(a) は光学変換しない場合を示した図である。面 E 上の録点間隔は e 、面 C 上の相点間隔は c 、面 C と面 E との距離は u_0 である。同図 (b) に示したように、 z 軸を光軸としたレンズ系 LC' を面 E に接して配置し、その光線行列要素を (A', B', C', D') とする。面 E 側から LC' を通して LC' の面 #1 の左方 u_1' の位置にある面 C' を見たとき、C' の像面が同図 (a) の相点面 C と一致したとする。面 C' 上の相点像の間隔は c' であるとする。また、C 側から LC' を通して面 E を見たとき、その像 E' は C' から距離 u_0' の位置に現れたとする。

基準視野上での視野拡大率を M_e 、基準視野上での視野拡大

率を M_e とするならば、図 A1 の場合と同様に次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} M_e &= e'/e, \quad M_c = c'/c, \quad u_0'/u_0 = M_e M_c, \\ A' &= M_c + (M_e - M_c) u_1'/u_0', \\ B' &= (u_0'/M_e) (1 - u_1'/u_0'), \\ C' &= (M_e - M_c)/u_0', \quad D' = 1/M_e. \end{aligned} \quad (A4)$$

LC' が図 A1(c) と同様な構成 (ただし、' で区別する) の場合には、式 (A3) において、 $M = M_e$ とし、 u_2/u_0 と d/u_0 とは、それぞれ、 u_1'/u_0' と d'/u_0' とで置換し、 u_0/f_2 は u_0'/f_1' で置換し、 u_0/f_1 は $u_0' (1/u_0 + 1/f_2')$ で置換することによって、 f_2' 、 $f_1'd$ を求める関係が得られる。したがって、図 A2 よりこれらの概数が求められる。

参考文献

- 1) 濱崎, 岡田, 宇都宮: “正逆視変換光学系を用いたレンズ板三次元写真機—三次元写真機の基礎事項—”, 生産研究, 40 巻, 3 号, pp. 127-136, (1988)
- 2) 濱崎: “三次元映像によるディスプレイ”, 電気学会誌, 109 巻, 3 号, pp. 223-226, (1989)
- 3) 濱崎: “多眼式 3 次元映像表示”, テレビジョン学会誌, 43 巻, 8 号, pp. 768-775, (1989)
- 4) J. Hamasaki, M. Okada, S. Utsunomiya, S. Uematsu, O. Takeuchi, K. Kambayashi, S. Shimada: “Recent experiments on an autostereoscopic 3D television directly seen on Braun tube by the naked eyes (invited paper)”, The 1989 International Conference on Three Dimensional Media Technology, Montreal, (1989)
- 5) M. Katz: “The human eye as an optical system”, Clinical Ophthalmology, vol. 1, chap. 33, pp. 24-32, Harper & Row Publisher, New York, (1979)
- 6) R.S. Hammond, P.P. Schmidt: “A random dot E stereogram for the vision screening of children”, Arch. Ophthalmol., vol. 104, pp. 54-60, (1986)
- 7) 高橋, 濱崎, 岡田, 宇都宮: “多眼式三次元映像の視域拡大光学系の実験”, テレビ学会技術報告, 12 巻, 35 号, pp. 53-58, VVI'88-42, (1988)
- 8) 大越: “三次元画像工学”, 第 4 章, pp. 48-53, 産業図書, 東京, (1972)
- 9) B.C. Burckhardt, R.J. Collier, T. Doherty: “Formation and inversion of pseudoscopic images”. Applied Optics, vol. 7, pp. 627-631, (1968)
- 10) 深沢, 濱崎: “レンズ板三次元像の幾何学的性質”, テレビ学会技術報告, 12 巻, 35 号, pp. 59-64, VVI'88-43, (1988)