

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——

Lens-Plate 3D Camera Using Orthoscopic-Pseudoscopic-Image-Conversion Optic

——Basic Principles of the 3D Camera——

濱崎 襄 二*・岡田 三 男*・宇都宮 昇 平*

Joji HAMASAKI, Mitsuo OKADA and Shōhei UTSUNOMIYA

眼鏡なしで、ある範囲の方向から自由に観察できるような彩色三次元映像を、白色照明のもとで普通の解像力を持った大型カラー・フィルムの上に、瞬時に撮像することができる三次元写真機について、その原理と基礎事項の理論的な結果を述べる。この写真機で記録したフィルムを現像・定着し、撮像の際に用いたレンズ板と同種のレンズ板を重ねて位置合わせし、後方から白色光で照明するならば、前方にいる観察者は三次元映像を観察することができる。

この解説では、基本となる原理(光線方向反転結像)、理想反転板の近似的実現方法、実際の正逆視像変換光学系により得られる逆視像の光学的性質、記録面上に記録される像の性質等を主に説明する。

1. 序 論

三次元映像は、人間の高度に発達した視覚能力に適合した様式で、極めて多量の情報を迅速に伝えることが可能となる情報伝達媒体である。この三次元映像に対して最近特に高い関心が寄せられている理由は、近い将来の情報伝達媒体としてその重要性が再認識され、一方、過去の知識と経験の集積、および周辺技術の発達によって、三次元映像の技術的問題点が今度こそ解決できると期待されているからであろう。

一枚の平面記録から三次元映像を光学的に浮き上げて見せるという試みは、1903年F.E. Ivesのパララックス・バリヤを用いたパララックス・ステレオグラムに始まる。1908年にはM.G. Lippmannがインテグラルフォトグラフィーを発表した。前者はパララックス・パノラマグラムに発展し、さらにはレンチキュラー・シートの利用により、今日のレンズ板三次元映像技術に受け継がれて来ている。しかし、長い間、瞬時撮像は難しく、再生像の三次元的歪は大きいものと考えられて来た。後者については実験成功例が極端に限定されていた。そのため、一枚の平面記録から、鑑賞可能な精細度の三次元映像を再生し、人々がその精緻さに眼をみはつたのは、1962年にE.N. LeithとJ. Upatnieksが二光束ホログラフィーの実験に成功した時であった(発達史については文献1), 2), 3)を参照されたい)。

本文の三次元写真機は、Ives-Lippmannの系譜に属するものである。この方法はホログラフィーと比較するとき、照明光、写真フィルム、再生法等の種々な面で遙かに自由度が大きい。また、記録・再生すべき情報量も何

桁も小さい。では、なぜインテグラル・フォトグラフィーの実験が難しかったのであろうか。この問題について、まず、考察と批判が必要である。

Lippmannの方法では、球面レンズの二次元配列(蠅の眼レンズ、一種のレンズ板)を用いて被写体の微小な倒立実像を多数、一枚の写真フィルム上に記録する、と説明されている。現像されたフィルムに撮像に用いたレンズ板を重ねて位置合わせし、後方から散乱光で照らすならば、フィルム上の一点から発した光線は撮像時の光路を逆にたどるから、三次元映像が再生されることになる。

しかし、この説明が成立するためには、レンズ板が無収差でありフィルム解像力が極めて高いこと、さらに、焦点深度が極めて深いことが必要となる。これらの条件が満たされるのは、蠅の眼レンズが針孔配列で置換された場合となるので、インテグラル・フォトグラフィーは針孔配列を用いたときに限って、実験的に成功したのであった(A.P. Sokolov, 1911年)。

明るい像を記録するには針孔はレンズで置き換えられなければならない。その場合に、レンズ板の素レンズによりフィルム上に記録すべきものは、筆者等の理解では、Lippmannの説明にある被写体の倒立実像ではなくて、素レンズに入射した(離散的空間周波数をもった)波面のフーリエ変換像である。

倒立実像とフーリエ変換像とは、針孔を用いた場合には同一となるが、ある直径と焦点距離を持った薄肉レンズを用いた場合には著しく異なる。写真フィルムのように光の強度のみが記録され位相が棄却される場合には、レンズ面と光点との距離が正、零、負のすべての場合を通じて、フーリエ変換像はレンズの後焦点面に生ずる。

*東京大学生産技術研究所 第3部

この点は、レンズの結像公式に支配される実像と全く異なる所である。再生可能な位相棄却型フーリエ変換像が記録されるためには、フーリエ変換像が離散的な像となることが必要で、それらが互いに重なってはいならない。重なりを生じていなければ、記録と再生において各素平面波の進行方向は逆平行となり、三次元映像の再生と認識が可能となる。レンズが収差を持ち、フィルムが有限な解像力を持つ場合でも、フーリエ変換像が互いに重ならない限り、三次元映像の再生は可能である。

Ivesの系譜のパララックス・パノラマグラム (C.W. Kanolt, 1918年) では、説明の用語は異なっていたけれども、周期的な細隙の後方でフィルム上に記録される像は、細隙面に入射する波面の一次元フーリエ変換像であり、しかも、それは離散的なものであった。したがって、細隙が円柱面レンズとなり (レンティキュラー・シートと呼ばれているレンズ板の一種)、像の明るさが増大された後も、フィルム面上の記録は入射波面の離散的な一次元フーリエ変換像であり続けた。その結果、パララックス・パノラマグラムの実験は成功し続けた。

以上のように整理してみると、Lippmannのインテグラル・フォトグラフィーは、その説明に基礎を置く限り、蠅の眼レンズを用いたときには成立しない。Kanoltのパララックス・パノラマグラムの考え方は蠅の眼レンズに拡張されるべきものである。従来解説書では、Lippmannのインテグラル・フォトグラフィーにおける微小な倒立実像記録が根本であり、それを一次元レンズ配列に単純化したものがKanoltのパララックス・パノラマグラムであるかのように説明されているが、実際には、この二つの方法の間には大きな飛躍があった。

逆視像 (奥行き方向が逆転した像) の問題は早い時期に気づかれていたが、その光学的解決法については長い間未解決であった。筆者等は、正逆視像変換光学系の考案⁴⁾と試作に成功し、主題の三次元写真機の試作と実験に成功した⁵⁾。本文では、この写真機の基本原理解 (光線方向反転結像)、理想反転板の近似的実現方法 (正逆視像変換光学系)、この方法による逆視像の光学的性質、記録面上で記録されるべき像の性質等について、近軸光線理論によって導かれ理論的結果を説明したい。説明を簡単にするため、光軸に垂直な面内の水平方向 (x -方向) について主として説明するが、これらの結果は垂直方向 (y -方向) にも容易に拡張可能である。これらの結果は、三次元写真機的设计、光学的素子の選択、撮像条件の選定の際の重要参考数値を与えるものである。試作した写真機の性能、実験結果については別の機会に説明したい。本文に関連した主要な文献は末尾に掲げておくので参考にされたい。

2. レンズ板による波面の記録と再生

2.1 レンズによるフーリエ変換

レンズ板を用いた三次元映像の記録・再生法は“投影法 (projection method)”に属する方法である。投影法では、被写体を色々な方向から見た像 (投影像) を一枚の平面上に同時に記録する。記録面のある位置では色々な方向から到来した波面が重畳しているの、到来した位置と共に、到来方向も記録されなければならない。ホログラフィーでは、被写体から来た物体光の進行方向は、一定位相を持つ参照光との干渉縞の形で記録される。この干渉縞の方向と間隔により到来方向が記録され、干渉縞の強さ (変調度) により物体光の強さが記録されている。レンズ板を用いる場合には、レンズのフーリエ変換作用によって、到来方向は記録面上の位置に変換されて記録される。

ある位置に到来した物体光の波面は、無数の (素) 平面波の重畳として表される。図 1 (a) において、焦点距離 f の薄肉レンズ L の光軸を z 軸、前後焦点面をそれぞれ面 1、2 とし、 z に垂直な座標を (x, y) とする。ある位相を持った (素) 平面波が面 1 に到来したとき、この平面波は面 2 では、光軸から

$$x = -f\theta \tag{1}$$

だけずれた光点に変換される。 θ は到来方向と光軸とが成す角 (入射角) である。面 2 上の光点を持つ位相は (定係数を除けば) 平面波の面 1 上での位相に等しい。レンズが持つこの性質はレンズのフーリエ変換作用と呼ばれる。

波長を λ とするとき、空間周波数の x 成分 ξ は

$$\xi = \lambda^{-1} \cos \alpha, \quad \alpha = \pi/2 + \theta, \tag{2}$$

で定義される。 $\cos \alpha$ は (素) 平面波の方向余弦の x 成分である。面 1 における物体光の空間周波数 ξ と、面 2 における位置 x との関係は、波動光学により

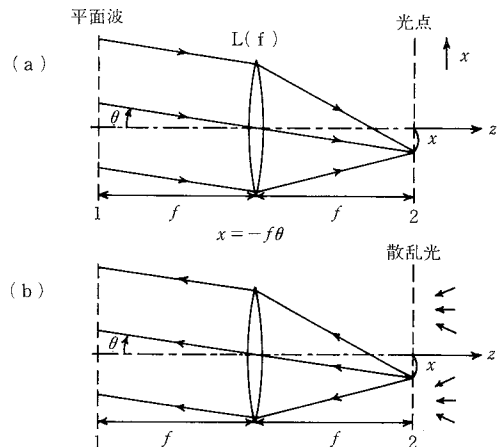


図 1 レンズによるフーリエ変換

$$x = \xi \lambda f \quad (1')$$

となることが示される。この事実が“フーリエ変換”と呼ばれる理由である。

さて、面 1 に到来した波面が離散的な空間周波数を持つように標準化されているならば、すなわち波面が離散的な入射角を持つ成分の和で表されるならば、面 2 では離散的な光点群となる。面 2 上で記録の際に写真フィルムが用いられるならば、波面の位相は棄却される。したがって、各素平面波を分離記録するためには、波面は空間周波数上で標準化されていなければならない。

なお、位相情報が棄却される場合には、面 1 はレンズ L の左方任意の位置に、たとえば L の直前に、あってもよい。

2.2 正視像 (orthoscopic image) と逆視像 (pseudoscopic image)

図 1 (a) の面 2 で記録された点像群を、右方から散乱光で照明すると、同図 (b) に示したとおり、光線の逆進原理により各素平面波が (位相を除いて) 再生される。実際には点像には拡がりがあり、またレンズには取差があるため、各素波は若干の拡がりを持つ。この拡がりにはレンズ板三次元映像では本質的重要性を持つものであるが、簡単のため、無視して説明する。

“レンズ板 (LP)” とは、微小なレンズの配列と等価であって、その後面が素レンズの後焦点面と一致しているような板状の光学素子である。

図 2 (a) に示されたように、2 点 S1, S2 がレンズ板 LP によって記録される場合を考えてみる。ここに、物点の“前後”は、観察者が物点から到来する波面 (光線) に向かった姿勢で判定されることに、留意しなければならない。S1, S2 を発した波面が、何等かの方法で角度的に標準化されているならば、波面を構成する素平面波の強度は、前述のとおり、記録されまた再生される。記録の際

には図 2 (a) のとおり光線は右方へ進行する故に、観察者は S1 が前方の点であると認識する。

再生の際には、図 2 (b) に示されたように、再生された光線は左方へ進行する故に、観察者は再生像点 S2 が前方の点であると認識する。この例で明らかとなっており、記録と再生において、レンズ板内の光線進行方向が逆転するという理由によって、必然的に前後関係の逆転が起こる。図 2 (a) の物点 S1, S2 と同一の前後関係が保持された像は正視像 (orthoscopic image) と呼ばれる。これに対し、同図 (b) で観察されるように、前後関係が逆転した像は逆視像 (pseudoscopic image) と呼ばれる。

人の顔の逆視像は、その顔のお面を作り、その裏側から、色彩と明暗については表側から見るとおりのままで見た像である。観察者は逆視像を見慣れていないのが普通である。そのため、逆視像を見せられても前後関係の逆転に気付かないことが多いが、何か不自然な感じが残るというのが一般的に経験されている。上述のようにレンズ板を用いて三次元映像を記録・再生する場合には、必然的に逆視像が現れるので、正しく三次元映像を再生するためには、あらかじめ光学的に逆視像を作りこれをレンズ板で記録しなければならない。

3. 光線方向反転結像

3.1 理想反転面 RP

光線の進行方向単位ベクトルにその場所の屈折率を乗じたものは光線ベクトル (ray vector) と呼ばれ、その座標成分は光線成分 (ray component) と呼ばれる。

“理想反転面 (RP)” とは、その面に平行な光線成分の符号を反転するという性質を持つ面である。図 3 において反転面 RP に垂直に z 軸をもつ直角座標系 (x, y, z) をとり、z = 0 に RP があるとす。ある光線の光線ベクトルを (p, q, r) とし、RP の前後 z = +0, z = -0 に面 1, 2 をとる。このとき、(x, p) に関する光線方程式は、厳密に

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ p_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。(y, q) に関しても同様となるが、(z, r) については単位行列を持った光線方程式となる。式 (3) の行

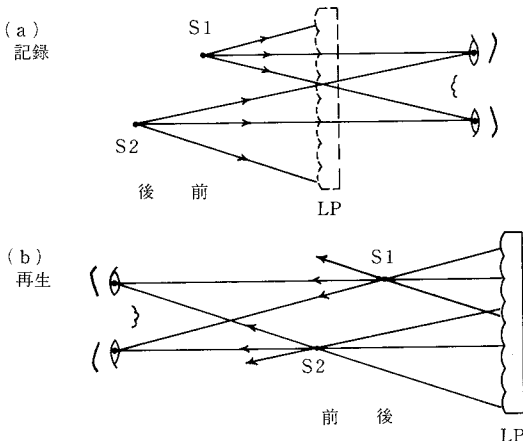


図 2 再生時における逆視像の出現

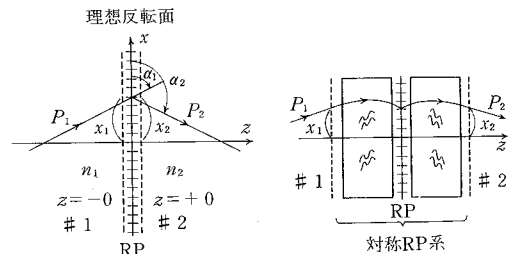
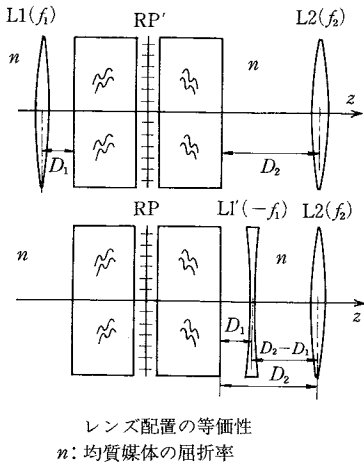


図 3 理想反転面 RP と対称 RP 系



レンズの焦点距離の変換

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & -1 \end{vmatrix} \quad (a)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix}$$

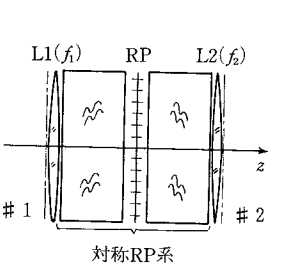
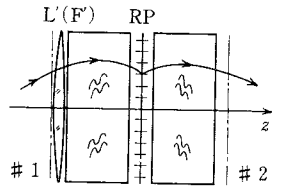
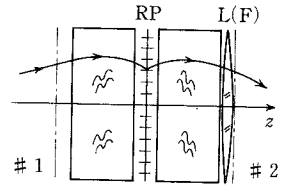
均質媒体中の距離の変換

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -D/n \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -D/n \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (b)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & -D/n \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & D/n \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

レンズ配置の等価性
n: 均質媒体の屈折率

図 4 理想反転面による近軸光線の変換



(c)

図 6 非対称RPの等価表現

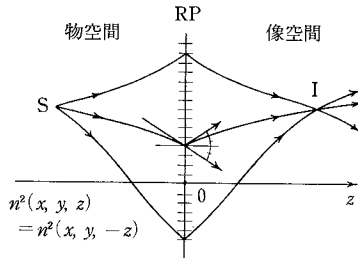


図 5 理想反転面による結像(対称RP系) $n(x, y, z)$: 屈折率

列(光線行列)の行列式の値は-1であるから, RPは相対的素子ではない。しかし後述のように, 相対的素子の配列を用いて近似的に実現することは可能である。

理想反転面は波動光学における共軛波面鏡(conjugation mirror)と同様な, 興味深い光学素子である。近軸の範囲で例示すると, 図4に示したとおり, 理想反転板の前後において, 距離の符号および薄肉レンズ焦点距離の符号が反転される。

3.2 対称RP系による逆視像の生成

図5に示したように, 屈折率分布あるいは透明な光学素子配置が, 理想反転面RPに関して鏡面对称である場合, この光学系を“対称RP系”と呼ぶ。物点Sを発した光線がRPに到達するならば, 光線ベクトルのRP面に平行な成分の符号が反転される。像空間の屈折率分布は物空間のそれと鏡面对称であるから, 像空間の光路は物空間の光路と鏡面对称となる。よって, RPに関してSと鏡面对称な点Iに完全結像する。すなわち, 対称RP系による像は, 拡大率1:1の無歪, 無収差の完全な実像形式の逆視像である。また任意の対称RP系の(RPに関して対称な) 入射面に関する光線方程式は式(3)と一致する。言いかえると, 対称RP系では, 物空間における歪と収差は, 像空間において完全に補償される。

3.3 非対称RP系

“非対称RP系”とは, “対称RP系”と1枚の薄肉レンズとの組み合わせと等価な光学系を指すものとする。すなわち, 本文で“非対称RP系”と言うときには一般的に非対称であるのではなく, 上記のとおり限定された非対称性を備えた光学系である。

図6(a), (b), (c)の3つの光学系は, 次の条件

$$F^{-1} = -F'^{-1} = f_2^{-1} - f_1^{-1} \quad (4)$$

を満たすとき互いに等価となり, いずれも非対称RP系を表現している。したがって, 1枚(または奇数枚)のRPと複数の共軸レンズ系との組み合わせはいずれも一般的には非対称RP系である。図6(a)の表現法を用いたとき薄肉レンズLを“非対称素子”と呼ぶ。同図(c)で表現されたとき, RPに関して物体側のレンズを“対物レンズ”, 像側のレンズを“像レンズ”と呼ぶことにする。

3.4 非対称RP系による逆視像

図7には, 非対称RP系による逆視像の生成を説明する。図示のとおり, RPからQの距離に非対称素子Lがあるときには, LのRP側の面と, RPに関してその面と対称な面に基準面を選ぶ。その理由は, この2つの基準面間の光学系は対称RP系であるから式(3)で簡明に記述されるからである。

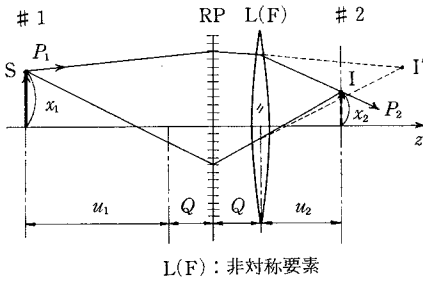


図7 非対称RP系による結像

物空間基準面から物点までの距離を u_1 、像空間基準面から像点までの距離を u_2 とすると、結像条件は

$$u_2^{-1} - u_1^{-1} = F^{-1} \quad (5)$$

となる。また、像の横拡大率 m および、奥行き方向 (z 方向) の (微分) 拡大率 m' はそれぞれ

$$m = u_2 u_1^{-1}, \quad m' = m^2 \quad (6)$$

で与えられる。

一般に L は収差を持つので非対称RP系による結像は完全ではない。また m と m' は一般に異なるので、三次元歪を持つ。

4. 理想反転面の近似的な実現

4.1 反転プリズム

ある適切な z 軸を選び、かつ、ある適切な入出射面 1, 2 を選んだとき、次の光線方程式

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ p_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

で表されるような光学素子を“反転プリズム”と呼ぶ。式(7)の光線行列の行列式の値は +1 であるから、反転プリズムは反相的素子であり、したがって、近軸の範囲でこの素子を実現することは容易である。式(7)が成立するような (適切に選ばれた) 入出射面を“プリズム主要面”と呼び、 z 軸を“プリズム光軸”と呼ぶ。また、主要面と光軸との交点を“プリズム眼点”と呼ぶ。

プリズム眼点に (任意の方向から) 入射する光線を“C-光線”と呼ぶ。式(7)より C-光線については $x_1 = x_2 = 0$ であるから、横座標は不変である。したがって、反転プリズムにおいて C-光線のみに着目するならば、反転プリズムは理想反転面 RP の無限小面積部分と等価である。

4.2 プリズム板 (PA) による結像

“プリズム板 (PA)”とは、互いに平行な光軸を持ち、主要面が共通な面となるように配置された、反転プリズムの (一次元または) 二次元配列である。

図8では、PAと2枚のレンズL1, L2とが共軸に配置されている。PAの主要面と両レンズとの距離Qは両レンズの焦点距離と比較して十分小さいとする。物点Sを発生

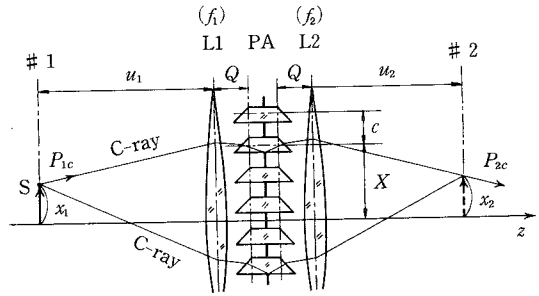


図8 ICOのC-光線による結像

したC-光線に着目するならば、PAはRPと置換してよいため、結像公式は式(5)で与えられる。ただし $F^{-1} = f_2^{-1} - f_1^{-1}$ である。同様に、拡大率は式(6)で与えられる。物点Sを発生した光線がC-光線であるための条件は次のとおりである。すなわち、対物レンズL1を通してPAを見ると、L1によるPAの虚像 (PA') が見える。物点SからPA'の各プリズム眼点を狙う方向に発生した光線はいずれもC-光線である。

ある物点Sを発生した多数のC-光線が一点で交わった点 (散らばりが最小となる点) をSの“3D像点”と呼び、この面を含み光軸に垂直な面を“3D像面”と呼ぶことにする。

4.3 正逆視像変換光学系 (ICO)

図8において、C-光線に着目している限りでは、レンズL1, L2の働きは拡大・縮小を可能とするに過ぎない。しかし、実際にプリズムを通過する光線のほとんど全部はC-光線ではない。非C-光線については、式(7)に示されたとおり、通過に当たって方向と同時に位置を変えるので、光束の発散・集束を逆転することはできない。すなわち、プリズムの入射光束が発散性であれば、出射光束は同一の発散性を保っている (RPでは、入射光束が発散性であれば出射光束は集束性である)。したがって、補助レンズL1, L2は発散・集束を逆転するために必要な素子となる。

L1, L2の焦点距離をそれぞれ f_1, f_2 とすると、 $u_1 = f_1$ の面上の物点Sから発生した光線はプリズムに入射する際には平行光線である。式(7)より出射光線も平行となり、したがって $u_2 = f_2$ の面上において焦点を結ぶ。他方、式(5)から、この面はC-光線の集束面、すなわち3D像面である。物点が対物レンズの前焦点面上に存在する条件を“焦点面条件”と呼ぶことにする。焦点面条件が満たされるときには、像レンズの後焦点面が3D像面となり、3D像点の拡がりはレンズの収差でできる。

焦点面条件を満たさない物点については、各プリズムを出射した光束がおのおの集束する面と3D像面とは一致しない。その結果、3D像点では若干の拡がりを持つことになる。しかし、この拡がりが小さな範囲では、図8

に示されたL1, PA, L2の組み合わせは, RPを近似的に具現したものとなる. この組み合わせを“正逆視像変換光学系(ICO)”と呼ぶことにする.

5. ICOにより形成された逆視像の性質

5.1 3D像点の幾何学的拡がり

三次元映像を記録するためには, 反転プリズムの有効断面積は無限小であってはならない. しかし有限の断面積を持ったプリズムの配列を用いるならば, 前節に述べたとおり, 3D像点は幾何学的拡がりを持つ.

各反転プリズムの出射光束がおのおの集束する面と, 像レンズL2との距離 u_2' は, 次の方程式により求められる.

$$(u_2'^{-1} - f_2^{-1}) + (u_1^{-1} - f_1^{-1}) + 2Q(u_2'^{-1} - f_2^{-1})(u_1^{-1} - f_1^{-1}) = 0 \quad (8)$$

レンズの収差を無視すると, この収束面と3D像面とが一致しないために, 3D像点に拡がりが生ずる. この拡がりを“幾何学的拡がり”と呼び W で表すならば, W は次式で与えられる.

$$W = 2a |1 - u_2 f_2^{-1}|. \quad (9)$$

ここに, a は反転プリズムの実効幅である.

一つのプリズム出射光束について, (3D像面における)方向拡がり V は次式のとおりととなる.

$$V = au_2^{-1} [1 - 2(1 - Qf_2^{-1})(1 - u_2 f_2^{-1})] \cdot [1 - (1 - u_2 f_2^{-1})Q u_2^{-1}]^{-1} \quad (10)$$

焦点面条件が満たされないとき, W は3D像点のボケの最大要因である. 後述のように記録・再生に用いるレンズ板がいかに高性能であっても, ボケの許容値によって, 三次元映像の撮像・再生空間は著しい制約を受けることになる. レンズ板が無収差である場合には, 角度拡がり V は光束のフーリエ変換像の拡がりを決定する. 実際に視域の広い映像を記録する場合には, レンズ板の収差の影響のほうに著しい場合が普通である.

5.2 ICOによる逆視像の明るさ

図8において, プリズム配列は二次元配列であって, その x, y 方向の個数はそれぞれ N, N' であるとする. また, 反転プリズムの x, y 方向の実効幅はそれぞれ a, b であるとする. 通常のレンズ系の明るさの指数(F 数)は無遠点基準であるが, ICOの明るさの指数(“ G 数”と呼んでおく)は, 焦点面条件を基準とするほうがよい.

ICOの素子のフレネル反射損と吸収損によって定まる強度透過率を T とするとき, G 数は次式で定義される.

$$G = (TabNN')^{1/2} f_2^{-1} \quad (11)$$

対物レンズL1から u_1 の距離にある物体の輝度を B とするとき, ICOで結像された逆視3次元像の光束密度 E は次式で与えられる.

$$E = E_0 (u_2 f_2^{-1})^{-2} [1 + (1 - u_2 f_2^{-1})Q u_2^{-1}]^{-2} \quad (12)$$

ただし $E_0 = BG^2$ であって, E_0 は焦点面条件が満たされた

ときの E である.

高解像度の逆視像を得るためには, a, b は小さくなければならない. 記録・再生に用いられるレンズ板とフィルムの解像力が与えられ, レンズ板ピッチが与えられると, N, N' の最大値も後述のように定まってしまう. このような理由で, 逆視像の解像度と明るさについては妥協点を見いだすことが必要となる.

5.3 大口径レンズによる色分散

図8の構成において, 大口径レンズL1, L2の色分散によって, 3D像点には色分散が発生する. 緑色光を基準とし, 青色および赤色の場合と緑色の場合とを比較することにする. 表記法 dX は, 変数 X の指定色(青または赤)における値と緑における値との差を表す. ただし, dX (青) + dX (赤) = 0が満たされているとする.

焦点距離 f_1 と f_2 の逆数(レンズのpower)の変化分をそれぞれ df_1^{-1} , df_2^{-1} と表すならば, 3D像点の z 方向変位量 du_z は次式のとおりとなる.

$$du_z = -u_2^2 (df_2^{-1} - df_1^{-1}) \quad (13)$$

物点位置が (u_1, x_1) で与えられているとき, 3D像点の横方向変位量 dx_2 は

$$dx_2 = x_1 u_1^{-1} du_z \quad (14)$$

で与えられる. したがって, 3D像点が色によって変位しないための条件(色消し条件)は

$$df_1^{-1} = df_2^{-1} \quad (15)$$

である. 対物レンズと像レンズとがPAに関して鏡対称であるならば, 式(15)は自動的に満たされる.

指定色における3D像点の幾何学的拡がりを W'' とすると, W'' は

$$W'' = 2a |1 - u_2 f_2^{-1}| (1 - u_2 df_2^{-1}) - u_2^2 f_2^{-1} df_1^{-1} | \quad (16)$$

となる.

レンズL1, L2が共に薄肉球面レンズで近似される場合には, それぞれのレンズ材料の屈折率を n_1, n_2 とすると, df_1^{-1}, df_2^{-1} は次式で表される.

$$df_j^{-1} = f_j^{-1} (n_j - 1)^{-1} dn_j \quad (j=1, 2) \quad (17)$$

レンズの前後面の曲率半径を R_{1j}, R_{2j} (凸面のとき正)とすると

$$f_j^{-1} (n_j - 1)^{-1} = R_{1j}^{-1} + R_{2j}^{-1} \quad (18)$$

であるから, 実効曲率半径 $(R_{1j}^{-1} + R_{2j}^{-1})^{-1}$ が dn_j に比例しているならば色消し条件が成立する.

焦点面条件が緑色光において満たされていて, L1とL2が屈折率 n の同一材料で作られている場合には

$$W'' = 2af_2 f_1^{-1} (n-1)^{-1} |dn| \quad (16')$$

となる. 色分散による3D像点の拡がりも, プリズムの実効幅 a に比例する.

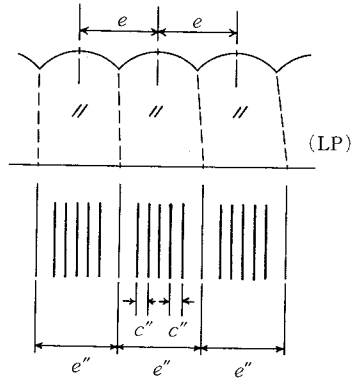
5.4 3D像点の拡がりを起こすその他の要因

物点が焦点面条件を満たし, 物体光が単色であり, かつ, レンズ配置が対称である場合には, 3D像点の拡がりは極めて小さい. この場合の拡がりは, 補助レンズの残

表1 部分空間の境界を決定する距離

z''_r ($r=a, b, c, d, e$) : LPからPA'に向けて測られた距離
 u_{jr} ($j=1, 2, r=f, g$) : LjからLP (またはLP'') に向けて測られた距離
 $v = u_{LP} + Q', Q' = Q(1 - Qf_2^{-1})^{-1}$

交叉斜線部分空間	LPの前方空間	$z''_a = v/[1 + c'N/(eM)]$
	LPの後方空間	$z''_b = v/[1 - c'N/(eM)]$
斜線部分空間	LPの前方空間	$z''_c = v/[1 + P/(eM)]$ $z''_d = v/[1 - (c'N - 2P)/(eM)]$
	LPの後方空間	$z''_e = v/[1 + (c'N - 2P)/(eM)]$
部分空間の制限	$f_1 > f_2, 0 < u_2 < u_{2f}$ (縮小系)	$u_{2f} = (f_2^{-1} - f_1^{-1})^{-1}$
	$f_1 < f_2, 0 < u_1 < u_{1g}$ (拡大系)	$u_{1g} = (f_1^{-1} - f_2^{-1})^{-1}$



e'' : 線像群相互間のピッチ
 c'' : 一つの線像群中の線像相互間のピッチ

図11 フィルム面の結像 (LPがレンチキュラー・シートであるとき)

では、素レンズが球面レンズであるときには一点となる(素レンズが円柱面レンズであるときには一線となる)、素レンズ当りの標本の数はx方向についてNであるから、後焦点面に置かれたフィルム上のx方向については、Nケの標本点が一群を形成し、そのような群がM群存在することになる。図11には、説明の便宜上、円柱面レンズの場合に相当した線像が示されている。ここに説明したLPの裏面にある一群の標本点(または線)が、その前面にある素レンズに、(離散的空間周波数を持って)入射した波面のフーリエ変換像である。

素レンズの焦点距離を f_{LP} とすると、群間の周期 e'' 、および一群の中の点像(あるいは線像)の周期 c'' は、それぞれ、次式で与えられる。

$$e'' = e(1 + f_{LP}v^{-1}), c'' = c'f_{LP}v^{-1}, \quad (20)$$

$$v = u_{LP} + Q' \quad (21)$$

e'' は e よりわずかに大きい。経験的に、 c'' は瞳間距離の半分より小さくしなければならないことが知られている。その理由は、 c'' が大きいつまには、標本間で起こる像の飛びが著しく、そのため、観察者は自然な三次元映像を見ることができないからである。通常、 $f_{LP} \ll v$ であるから、 c'' は e 、 c' と比較して著しく小さい。この c'' をピッチとする点像群(または線像群)が、フィルム上には記録されなければならない。

フィルムの解像力を最も有効に利用するには、一様に点像(または線像)が分布することが望ましい。この一様性を得るにはICOの視域幅とLPの素レンズの後方の幅 e'' の帯状のフィルム部分とが整合ししなければならない。このICOとLPとの整合条件は次式のとおりとなる。

$$f_{LP} = f_{LPM}, f_{LPM} = ev(c'N - e)^{-1} \quad (22)$$

f_{LPM} は、ICOが与えられたとき、使用可能なLPの焦点距離の最大値でもある。もし、 f_{LPM} より長い焦点距離のLPを用いるならば、標本群相互の間でフィルム上で重なりを生じ、実質的な視域幅が減少するからである。LPが与えられたときには、Nを減らすことによりこの重なりを避けることができる。

6.3 分解可能距離 (格子点の間隔)

二枚の針孔配列、PA'とLP、が平行に配置されたとき、PA'から格子面に至る距離 $z'(i)$ は次式となる。

$$z'(i) = v(1 + ie/P)^{-1} \quad (23)$$

ここに i は格子面の指標(整数)であって、 $-P/e$ より大きく、かつ、 $z'(i)$ の距離にありz軸に垂直な面の一部が図10の交叉斜線部にあるとする。また、 P は c' の整数倍、すなわち $P = c'J$ (J は2より大きな整数)となる整数 J が存在しているものとしている。 $z'(i)$ は等間隔ではない($1/z'(i)$ が等間隔となる)ことに留意されたい。横方向(x方向)については、同一格子面上における格子点は等間隔である。

x方向およびz方向の格子点間隔は、それぞれの方向の分解可能距離である。x方向およびz方向の分解可能距離をそれぞれ $g(i)$ 、 $h(i)$ とするならば、それらはそれぞれ、次のとおりに表示される。

$$g(i) = e(1 + ie/P)^{-1}$$

$$h(i) = g(i)z'(i)P^{-1} = (e/P)v(1 + ie/P)^{-2} \quad (24)$$

式(24)の $g(i)$ 、 $h(i)$ は、二枚の針孔配列で標本化された空間に固有である。言いかえると、PA'とLPとによって記録光学系が構成されている限り、ボケのない完全な逆視像が形成されていても、式(24)で示された分解可能距離より精緻な像を記録することはできない。しかし他方において、再生の際にフィルム上に記録された標本が若干の拡がりを持ちLPが収差を持っていても、LPを通し

て標本が互いに重ならない状態で見えている限り、記録された像の分解可能距離は式(24)で与えられる。このような閾値の存在は標本化に固有な重要な性質である。

6.4 物空間の標本化

物空間では、対物レンズL1によるPAの虚像PA'のプリズム眼点の配列は一枚の針孔配列と考えるとよい。像空間においてLPの素レンズ中心を通るC一光線を逆にたどるならば、この光線はPA'のプリズム眼点を通り、さらにさかのぼると、ICOを通るC一光線で形成されたLPの像(逆視像)LP'の素レンズ中心を通らなければならない。言いかえるならば、物空間には、PA'の眼点配列と、LP'の素レンズ中心配列の二枚の針孔配列を考慮することができる。したがって、物空間も像空間と同様な格子状空間で構成されているとしてよい。

拡大像を形成するICO ($f_1 < f_2$) の場合には、ある有限の $u_1 = u_{1g} < \infty$ にある物点の像は、像空間では $u_2 = \infty$ に逆視像を生ずる。したがって、この場合には、物空間は $u_1 < u_{1g}$ の範囲に制限しておかなければならない。 u_{1g} は表1に示されている。

7. レンズ板三次元写真機についてのその他の考察

7.1 観察者の瞳孔径による3D像点の拡がり

図9において、観察者の瞳面はPA'の主要面に置かれ、LPの近傍に再生された再生像を見ているとする。瞳孔直径を D 、PA'の主要面とLPとの距離を v とする。説明を簡単にするため、観察者の左右両眼にはLP上の異なった二点(実際には有限の幅 e を持つ)からの光束が入り、ある深さに3D像点を認めているとする。距離変数 $z'(i)$ は連続変数で近似する。

LPから3D像面までの距離を z'' とし、LPの前方 (PA'側) にこの面があるとき、 z'' は正とする。図12(a)に示されたように、このときの3D像点の拡がり $|dx|$ は次式のとおりとなる。

$$|dx| = D |z''| v^{-1}, \tag{25}$$

ここに、

$$z'' = v - z', \quad v = u_{LP} + Q' \tag{25'}$$

である。 $|dx|$ を小さくするため、 v と比較して $|z''|$ は小さくしなければならない。

7.2 フィルム面上のフーリエ変換像の重なりによる3D像点の拡がり

LPは収差を持ち、フィルムの解像力も有限であるため、フィルム面上に記録された離散的フーリエ変換像は、その本来の拡がり Vf_{LP} (V は式(10)で与えられる) より広い拡がり幅 s'' を持つ。また、再生に用いるLPも収差があるので、それによる拡がりも s'' に含めておくことにする。 s'' が c'' (一つの素レンズによるフーリエ変換像の中にある離散的な点像(または線像)のピッチ) より大きい場合には、 $w'' = s'' - c''$ の幅の重なりを生ずる。この重

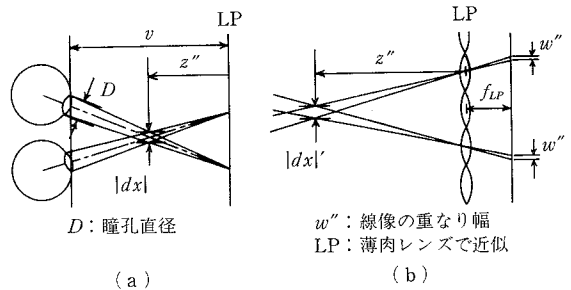


図12 瞳孔直径と線像の重なりによる像拡がり

なりは再生された3D像点を不確定なものとするので、一種の点拡がりとなる。図12(b)に示されたように、この原因による3D像点の拡がり $|dx|'$ は次のとおりとなる。

$$|dx|' = z'' w'' f_{LP}^{-1} \tag{26}$$

(ただし $w'' = s'' - c'' > 0$)

解像力不足で重なりが大きくなると、この $|dx|'$ は再生像空間を著しく制限する。

7.3 両瞳により鮮明な二つのパララックス像が得られる確率

観察者は固有の瞳間距離を持ち、像の明るさに応じた瞳径で三次元映像を見る。視域PA'内に両瞳を置いたとしても、フィルム面上のフーリエ変換像の重なりと切りかわりがあるため、また瞳孔径が有限なため、必ずしも二つの鮮明なパララックス像が得られるわけではない。瞳面とLPとの距離を v' とし、 $v' = v$ の条件が満たされたとしたとき、両瞳により鮮明なパララックス像が得られる確率 R は

$$R = 1 - (w + D + |P - c'' J|) c'''^{-1}, \tag{27}$$

$$\text{ただし } c''' = v' c'' f_{LP}^{-1}, \quad w = v' |w''| f_{LP}^{-1}, \tag{27'}$$

($v = v'$ のとき $c''' = c''$)

の程度である。ここに、 J は整数 (6.3 節) であり、 P は $c'' J$ に近いと仮定している。 R を 1 に近づけるためには、 c'' が D より十分大きいこと、重なりが少ないこと、 $P = c'' J$ が近似的に成り立っていることが必要である。 s'' が c'' より小さく、離散的フーリエ変換像の間に間隙があるときには、ある瞳位置では像が見えない。このときも R は式(27)で表される。

7.4 フィルム上の離散的フーリエ変換像の明るさ

離散的フーリエ変換像の拡がり幅 s'' が c'' より小さい場合には、フーリエ変換像の平均的な明るさは、素レンズ前面にフィルムを置いたときの明るさより明るくなる場合が起こる。三次元カメラ全体の光学系の明るさの指数を、ICOの G 数と同様に考え、この指数を G' 数と呼ぶと、

$$G' = GH^{1/2}. \tag{28}$$

ここに H はレンズ板による補正係数であって

$$\text{レンティキュラー・シートの場合 } H = c'' s''^{-1} T',$$

$$H = (c''s''^{-1})^2 T' \quad (28')$$

(ただし T' はレンズ板の強度透過率)

である。露光が過大となるとフィルム上のフーリエ変換像が重なりを生じるので、被写体の中の最も明るく記録される物点について、露光が過大とならないことが必要である。

8. 結 言

本文では、眼鏡なしで、ある範囲の方向から自由に観察できるような彩色三次元映像を、白色照明のもとで普通の解像力を持った大型カラー・フィルムの上に瞬時に記録できる三次元写真機について、その原理と、設計・撮像の基本となる事項の理論的な結果を解説した。試作した写真機の詳細と、それによる実験結果については、別の機会に譲ることにし、文献を挙げるにとどめた。

(1988年1月29日受理)

参 考 文 献

三次元映像技術発達史の参考書

- 1) L.P. Dudley; "Stereoptics", McDonald & Company, London, (1951)
- 2) N.A. Valyus, "Stereoscopy", The Focal Press, London, (1966)
- 3) 大越孝敬; "三次元画像工学", 産業図書, 東京, (1972)

本文の主題に直接関係した論文等

- 4) 樋口, 濱崎, 横田, 岡田; "視域の標本化を行った多眼式三次元画像とその実時間伝送", 第9回画像コンファレンス, 8-3, (1977)
- 5) 濱崎, 岡田; "光線方向反転結像を用いた水平・垂直両視差三次元写真機の提案", 昭和59年度電子通信学会総

合全国大会, S14-18, (1984)

- 6) 濱崎, 岡田, 宇都宮; "水平・垂直両視差三次元写真機による彩色映像の瞬時撮像再生実験", 昭和60年度電子通信学会総合全国大会, 1283, (1985)
- 7) 濱崎, 岡田, 宇都宮; "レンズ板三次元写真機とその応用——水平・垂直両方向の視差を持つ三次元彩色像の瞬時撮像——", テレビジョン学会技術報告, IDP 90-5, VVI 65-5, IPA 73-5, (1984)
- 8) 濱崎, 岡田, 宇都宮; "三次元彩色像の瞬時撮像——正視・逆視変換光学系の理論——", テレビジョン学会技術報告, VVI 71-4, (1985)
- 9) 濱崎; "水平・垂直両視差を記録する三次元写真機", 生研リーフレット, No.164, (1987)

理論の構成要素を記述した論文

- 10) J. Hamasaki and K. Yokota; "Direct recording and reconstruction of 3-D x-ray images", Appl. Opt., 17, pp. 3125~3132, (1978) "——: some experiments", Appl. Opt., 18, pp. 4039~4045, (1979)
- 11) H. Higuchi and J. Hamasaki; "Real-time transmission of 3-D images formed by pallalax panorama-grams", Appl. Opt., 17, pp. 3895~3902, (1978)
- 12) J. Hamasaki; "Autostereoscopic television experiments", AIP Conf. Proc., No. 65, Subseries on Optical Science and Engineering No. 1, "Optics in Four Dimensions—1980", chap. 13, pp. 531~556, (1981)
- 13) 濱崎; "レンティキュラ画像", 画像電子学会誌, 10, pp. 415~428, (1981)
- 14) J. Hamasaki; "Three-dimensional photography and its applications", Proc. of Int'l. Symp. on Image Processing and its applications, "Progress in Image Processing", pp. 149~158, (1984)