インテグラル立体映像方式における要素画像群の歪曲の影響

Effects of Elemental Images Distortion in Integral Three-dimensional Imaging

正会員 佐々木 久幸[†], 正会員 河北 真 宏[†], 正会員 洗 井 淳[†], 正会員 岡 野 文 男[†],
末 廣 晃 也^{††}, 正会員 配 野 泰 行^{††}, 正会員 吉 村 真^{††}, 佐 藤 正 人^{††}

Hisayuki Sasaki[†], Masahiro Kawakita[†], Jun Arai[†], Fumio Okano[†],
Koya Suehiro^{††}, Yasuyuki Haino^{††}, Makoto Yoshimura^{††} and Masahito Sato^{††}

Abstract We have been conducting research with the objective of achieving three-dimensional (3D) television using integral photography. Extremely high-resolution (EHR) elemental images are necessary to enhance integral 3D image quality. Presently, projection display systems are practical for displaying EHR images and have some advantages for 3D imaging. However, any geometric distortion of the projection lens will cause a positional error between the elemental images and elemental lenses. This positional error subsequently results in a distortion of the reconstructed image and a smaller viewing area. We theoretically and experimentally analyzed the effects of distorted elemental images on a reconstructed image. As a result, a slight distortion of the projection lens, which is proportional to the square of the image height, caused a positional error of the reconstructed 3D image. The depth-direction error of the reconstructed image was larger than that of the lateral direction. Furthermore, the viewing area decreased due to the distortion of the elemental images. From experimental results using a projection-type integral system, we found that image processing for distortion compensation is effective in eliminating distortion and improving the viewing area of the reconstructed 3D image.

キーワード：立体映像，インテグラル式，要素画像，投射型ディスプレイ，幾何学歪み，視域

1. ま え が き

近年，高臨場感映像技術に対する期待が高まっており，研究開発や実用化への取組みが活発になっている．高臨場感映像の研究動向としては，観察者が没入感を得られる広視野で高精細な映像技術や，あたかもそこに物体があるかのような実在感を得られる立体映像がある．立体映像表示には多くの方式があり，大別すれば2眼式や多眼式，体積表示型，像再生型などに分類できる¹⁾．これらの中でも，特に像再生型立体表示は，光により空間に像を再構成する方式であるため，実物を直接観察する時と同様に，自然で見やすい立体像が表示できる．

像再生型の一方式であるインテグラル立体映像方式²⁾³⁾

は，撮影と表示時に微小なレンズの集合体（要素レンズアレー）を用いる．本方式は，特殊な眼鏡が不要であるとともに，水平方向のみならず垂直方向の視差情報を有するなど家庭用立体テレビに適した特徴を持つ．

これまで，著者らは，走査線2000本の映像技術に応用したインテグラル立体テレビシステムを試作し，実時間の撮影・表示機能など，テレビシステムとしての基本性能を実証してきた⁴⁾．今後，立体映像の表示性能の向上を図るには，さらなる要素画像群の高精細化が必要である．そこで，現在ハイビジョンの16倍の画素数を持つSuper Hi-Vision (SHV) 映像技術^{5)~7)}の立体表示への応用を進めている．現在のところSHV映像表示は投射型ディスプレイにより実現されている．また，投射型ディスプレイを用いたインテグラル立体映像表示では，表示サイズを自由に変化させることができ，さらに，原理的にモアレが発生しないなどの利点が多い．しかし，投射レンズは一般的に，投射画像の中心からの距離である像高の高次関数で表される歪曲特性を有するため，表示された要素画像群は幾何学歪みを持つ．この要素画像の歪曲は，要素画像と要素レンズとの位置ずれを引き起こすため，再生立体像に空間的な歪曲や視域の制限が生じ，画質が低下する．これまで，投射型のインテ

2007年10月18日，立体映像技術研究会，情報ディスプレイ研究会で発表
2008年1月7日受付，2008年8月13日再受付，2008年10月15日採録
† NHK 放送技術研究所 人間・情報

(〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-3313)

†† 日本ビクター株式会社 技術本部

(〒239-8550 神奈川県横須賀市神明町 58-7, TEL 046-836-7405)

† NHK Science & Technical Research Laboratories

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan)

†† Technology Development Division, Victor Company of Japan, Ltd.
(58-7, Shinmei-cho, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-8550, Japan)

グラル立体映像表示に関する研究はいくつかあるが^{8)~10)}, 要素画像群を単一の高精細映像として投射表示した場合について, その投射歪みが再生立体像に与える影響の解析や, 改善策に関する報告はなされていない。

そこで本論文は, 投射型インテグラル立体映像方式に関する一般的な性質として, 要素画像群の幾何学歪みとその再生立体像の画質への影響の関係を明らかにすることを目的とする。

まず, 1次元のレンズアレーモデルを用いて, 要素画像群の幾何学歪みと, 再生立体像の正規の位置からのずれについて解析する。解析結果に対し, 幾何学歪みの一例として投射レンズの歪曲率が像高の2乗に比例する場合について, 具体的な数値を適用して再生像の歪曲の様子を調べる。同時に, 直視型液晶モニタを用いて, 数値計算と同じシステムパラメータの表示実験系を組み, 要素画像群に計算によって歪曲を与えて投射レンズの歪曲をシミュレートする。その状態で再生像の歪み測定を行い, 数値計算と比較検討して解析結果の妥当性を検証する。

また, 投射レンズの歪曲収差が視域角に与える影響を理論的に解析する。同時に緑色画像の単板素子を用いた投射型インテグラル立体映像表示系を組み, 実際に視域角が制限される様子確かめる。

最後に, 要素画像群への歪み低減の画像処理が, 再生立体像の歪曲の解消と制限されていた視域角の改善に効果的であることを実証する。

2. 投射型インテグラル立体映像方式

投射型インテグラル立体映像方式の原理を図1に示す。撮像系では, レンズアレー中の各要素レンズによって, 各々に対応する要素画像をカメラで取得する。このため, 各要素画像は被写体を少しずつ違った角度から撮影したものになる。また, 図1に示すように, 撮影用に屈折率分布 (Gradient-index; GRIN) レンズアレーを用いることで, 再生像の逆視現象を防ぎ, テレビシステムに要求される実時間の撮影・表示機能を実現できる¹¹⁾。

表示系では, 撮影した要素画像群をスクリーンに投射表示し, レンズアレーを通して観察する。撮像系で撮影された被写体からの光線が, この表示系により忠実に再現され, 空間に自然な立体像を再構成することができる。これらのシステムでは, 奥行きも含めた3次元の空間情報を2次元の画像として撮影・記録・伝送・表示できるため, テレビシステムに適した特徴を持っている。インテグラル立体映像方式において, 再生立体像の一面素に相当するものはレンズアレーを構成する要素レンズ一個である。そのため要素画像群に必要な総画素数は, 要素レンズ数と一要素画像の画素数の積となり, 超高精細な要素画像群が必要となる。また, 再生立体像の解像度と, 立体像を観察できる範囲である視域の確保を両立するためにも, 膨大な画素数を持つ画像が要求される。

図1 投射型インテグラル立体映像方式の原理
Principle of projection type integral 3D imaging system.

インテグラル立体映像方式では要素画像と要素レンズとの幾何学的な位置関係のずれによる画質低下が問題となる。これは直視型ディスプレイを要素画像群の表示に用いる場合にも一部問題となるが¹²⁾, 投射型のシステムでは, 投射レンズやハーフミラーなど, 投射光学系の歪曲収差に起因する要素画像群の幾何学歪みが問題となる。なかでも, 投射レンズの歪曲収差の影響が支配的である。

3. 要素画像群の幾何学歪みが再生立体像に与える影響

図2に示すような1次元のレンズアレーモデルを用いて, 要素画像群の幾何学歪みと, それに起因する再生立体像の歪曲の関係を解析する。実際のインテグラル立体映像方式では, 2次元のレンズアレーを用いるが, ここでは, 歪曲の影響を端的に調べるため, 1次元レンズアレーモデルで考える。なお, 2次元レンズアレーの場合の考察については, 第6章で詳述する。

要素画像群の幾何学歪みがない場合, 各要素画像からの光線是对应する要素レンズを介して $A(x_0, z_0)$ 点に集光し, 再生像が形成されるものとする。 i 番目の要素画像における, A 点の再生に寄与する点の位置 $x_{e,i}$ は,

$$x_{e,i} = \frac{iP_x - x_0}{z_0} f \quad (1)$$

となる。ただし i 番目の要素レンズの光軸と要素画像の交点を原点とする。 P_x はレンズピッチ, i は像高0の位置の要素レンズ (または要素画像) を0番目とした場合の要素

レンズ（または要素画像）の番号である． f はレンズアレーと要素画像間の距離であり，レンズアレーの焦点距離に等しい．

この場合， i 番目の要素レンズにより与えられる光線の x 座標を $x_i(z)$ とすれば，

$$x_i(z) = -\frac{x_{e,i}}{f}z + iP_x = \frac{x_0 - iP_x}{z_0}z + iP_x \quad (2)$$

と表すことができる．

一方， $x_{e,i}$ が幾何学歪みにより Δx_i ずれた場合の位置 $x_{d,i}$ は，

$$x_{d,i} = x_{e,i} + \Delta x_i = \frac{iP_x - x_0}{z_0}f + \Delta x_i \quad (3)$$

となる．よって，要素画像群に幾何学歪み Δx_i が生じた場合の光線の x 座標 $x'_i(z)$ は，

$$x'_i(z) = -\frac{x_{d,i}}{f}z + iP_x = \left(\frac{x_0 - iP_x}{z_0} - \frac{\Delta x_i}{f} \right) z + iP_x \quad (4)$$

と記述できる．

要素画像群に幾何学歪みが生じた状態では，各要素レンズによって与えられる光線は一点に収束せず，図 2 に示す様な広がりをもつ．なお，各光線が最も集光する位置の代表点を $B(x', z')$ 点とする．

像再生に寄与する要素レンズの個数 N_x は，再生像の位置と要素画像の領域で決まる（付録 A）．要素画像群に幾何学歪みがない場合の再生点 A において，番号昇順に b 番目から t 番目の要素レンズが再生に寄与するとすれば，

$$N_x = t - b + 1 \quad (5)$$

と表すことができる．また，中心となる要素レンズを m 番目であるとする，

$$m = \frac{t+b}{2} \quad (6)$$

である．

要素画像群に幾何学歪み Δx_i がある場合に，この m 番目を中心とする要素レンズ群によって与えられる光線群の x 座標の平均値 $\overline{x'_m(z)}$ は，式 (4) から以下のように求められる．

$$\begin{aligned} \overline{x'_m(z)} &= \frac{1}{N_x} \sum_{i=b}^t \left[\left(\frac{x_0 - iP_x}{z_0} - \frac{\Delta x_i}{f} \right) z + iP_x \right] \\ &= \left(\frac{x_0 - mP_x}{z_0} - \frac{\overline{\Delta x_m}}{f} \right) z + mP_x \end{aligned} \quad (7)$$

$$\overline{\Delta x_m} = \frac{1}{N_x} \sum_{i=b}^t \Delta x_i \quad (8)$$

各要素レンズによって作られる光線同士の幾何学的位置の分散が，最も小さくなる時，各光線が最も集光している点と見なせる．各光線とそれらの平均値との距離の 2 乗和

図 2 要素画像群の幾何学歪みによる再生像のずれ（1 次元レンズアレーモデル）

Geometrical error of reconstructed image causes the elemental images geometrical errors (One dimensional lens array model).

$\sigma_x^2(z)$ は，

$$\sigma_x^2(z) = \frac{1}{N_x} \sum_{i=b}^t \left[x'_i(z) - \overline{x'_m(z)} \right]^2 \quad (9)$$

である．また，その導関数 $\frac{d}{dz}\sigma_x^2(z)$ は，

$$\frac{d}{dz}\sigma_x^2(z) = \frac{2}{N_x} \sum_{i=b}^t \left[X_i^2 z - (m-i)P_x X_i \right] \quad (10)$$

となる．ただし，

$$X_i = \frac{(m-i)P_x}{z_0} + \frac{\overline{\Delta x_m} - \Delta x_i}{f} \quad (11)$$

とする． $\frac{d}{dz}\sigma_x^2(z) = 0$ になる点が，最も集光する位置の代表点であるから， $N_x \geq 2$ の時， $B(x', z')$ 点の座標は，

$$z' = \frac{\sum_{i=b}^t (m-i)P_x X_i}{\sum_{i=b}^t X_i^2} \quad (12)$$

$$x' = \left(\frac{x_0 - mP_x}{z_0} - \frac{\overline{\Delta x_m}}{f} \right) z' + mP_x \quad (13)$$

と記述できる．なお， $N_x = 1$ の時は，

$$z' = z_0 \quad (14)$$

$$x' = x_0 - \frac{\Delta x_m}{f} z_0 \quad (15)$$

とみなせる．

すなわち， $A(x_0, z_0)$ 点に再生されるべき光学像は，要素画像群の幾何学歪みの影響を受けると，式 (12) および式 (13)，または式 (14) および式 (15) による座標変換を受けて， $B(x', z')$ の位置にずれる．

図3 放射方向の歪曲収差（歪曲率が像高の2乗に比例）

(a):糸巻き型歪み (b):樽型歪み 実線:歪みなし 破線:歪みあり

Effect of radial distortion (Distortion is proportional to the square of the image height).

(a): Pincushion distortion, (b): Barrel distortion.

Solid lines: no distortion, Dashed lines: with distortion.

4. 投射レンズによる要素画像群の幾何学歪み

4.1 投射レンズの歪曲収差

本節では第3章で解析した要素画像群の幾何学歪みが、特に投射レンズの歪曲収差に起因するものである場合について考察する。

レンズには歪曲収差があり、大きく分けて、放射方向の歪曲と、接線方向の歪曲とに分類できる¹³⁾¹⁴⁾。一般的に、接線方向の歪曲は放射方向の歪曲に比べて小さく、投射画像に与える影響も少ないため、ここでは放射方向の歪曲のみを考慮し、その歪曲率が、像高の2乗に比例する場合を考慮¹⁵⁾。

図3のように、歪曲率 D が像高の2乗に比例する場合、任意の像高 l_0 における歪曲率 $D(l_0)$ は、

$$D(l_0) = \frac{l_d - l_0}{l_0} = Cl_0^2 \quad (16)$$

と表すことができる¹⁶⁾。ただし、 l_0 は歪曲がない場合の像高、 l_d は歪曲後の像高、 C は歪曲係数である。したがって、画像の最大像高 H における歪曲率 $D(H)$ は、

$$D(H) = CH^2 \quad (17)$$

$$C = \frac{D(l_0)}{l_0^2} = \frac{D(H)}{H^2} \quad (18)$$

である。これから l_0 の点における歪み量 Δl は $D(H)$ を用いて次のように表すことができる。

$$\Delta l = l_d - l_0 = Cl_0^3 = \frac{D(H)}{H^2} l_0^3 \quad (19)$$

なお、本稿では、画像の中心（投射系の光軸）から像高が最大となる要素レンズの位置を最大像高と定義する。

第3章の図2の要素画像群に関して、放射方向の歪曲について考える。この場合、光線 x'_i に対応する要素画像要素の像高は式(4)から、

$$x'_i(z)|_{z=-f} = x_{e,i} + iP_x + \Delta x_i = \frac{iP_x - x_0}{z_0} f + iP_x + \Delta x_i \quad (20)$$

表1 歪曲収差の計算パラメータ
Calculation parameters of distorted aberration.

Pitch of elemental lens (P_x)	2.64[mm]
Focal length of elemental lens (f)	8.58[mm]
Number of elemental lenses	141[pieces] ($-70 \leq i \leq 70$)
Position of reconstructed image (z_0)	± 100 [mm]
Distortion in maximum image height ($D(H)$)	$\pm 0.25, \pm 0.50, \pm 0.75, \pm 1.00, \pm 1.25\%$

である。また、 $i_{\max}$ 番目の要素レンズの位置が最大像高になり、歪曲率を定義するための l_0 と l_d は、図3において破線の矢印で示すような x 軸上の像高になる。よって、式(19)の Δl と l_0 の関係を式(20)の Δx_i と $x_{e,i} + iP_x$ にあてはめると、

$$\Delta x_i = \frac{D(H)}{H^2} \left(\frac{iP_x - x_0}{z_0} f + iP_x \right)^3 \quad (21)$$

$$H = i_{\max} P_x \quad (22)$$

となる。

式(21)および式(22)に表1の各パラメータを与え、式(12)および式(13)を用いて、像高の2乗に比例した歪曲収差が生じた場合の再生像の位置を計算した結果を図4に示す。横軸が再生像の奥行き方向位置、縦軸が再生像の横方向位置を表している。

破線は、再生像の位置が連続的な歪曲の変化に伴ってどのように変化するか、歪みがない場合の再生像の12点の像高 x_0 について調べたものである。再生像の奥行き方向位置は、歪曲率が正値を示す糸巻き型歪みの場合、観測者から見て奥の方向に歪む。逆に、歪曲率が負値を示す樽型歪みの場合、観測者側手前方向に歪む。この傾向は再生像の位置が表示レンズアレー面の手前であっても（図4(a)）、奥であっても（図4(b)）同じである。一方、再生像の横方向位置は、再生位置が表示レンズアレー面の手前にある場合、図4(a)の破線からわかるように、糸巻き型歪みでは画面の内側方向に歪み、樽型歪みでは外側方向に歪む。また、再生像の位置が奥にある場合は逆に、図4(b)の破線のように、糸巻き型歪みでは画面の外側方向に歪み、樽型歪みでは内側方向に歪む。奥行き方向、横方向共に、再生位置歪みは画面中心付近では小さく、画面の中心からの距離に従って大きくなる。像高の2乗に比例するレンズの歪曲収差が再生位置歪みにも反映されていることがわかる。

次に、最大像高における歪曲率 $D(H)$ を0.50%に固定し、歪みがない場合の再生像の奥行き位置 z_0 を、200[mm]から-200[mm]の範囲で50[mm]毎に変化させた場合の計算結果を図5に示す。破線は、再生像の横方向の位置と z_0 の関係について、図4の場合と同様に12点の像高 x_0 について調べたものである。再生像の奥行き位置が表示レンズアレー面から離れているほど、要素画像群の幾何学歪みの影響を大きく受けている。 $x_0 = 100.32$ [mm] ($m = 38$) の場合の具体的数値を表2に示す。例えば、 $z_0 = 100.0$ [mm] の位置に再生像を形成した時、正規の再生奥行き距離の約

図 4 レンズの歪曲収差による再生像位置のずれ
(a):再生像が表示面の手前にある場合 ($z_0 = 100[\text{mm}]$),
(b):再生像が表示面の奥にある場合 ($z_0 = -100[\text{mm}]$)

Geometrical error of reconstructed image based on lens distortion.
(a):When reconstructed image is in front of the lens array,
(b):When reconstructed image is behind the lens array.

表 2 再生像の奥行き方向の歪み [mm]
($D(H) = 0.50\%$, $x_0 = 100.32[\text{mm}]$, $m=38$)

Depth directional distortion of reconstructed image [mm]
($D(H) = 0.50\%$, $x_0 = 100.32[\text{mm}]$, $m=38$).

z_0	-200.0	-150.0	-100.0	-50.0	50.0	100.0	150.0	200.0
z'	-212.9	-157.0	-102.9	-50.7	49.1	96.7	142.9	187.6
Δz	-12.9	-7.0	-2.9	-0.7	-0.9	-3.3	-7.1	-12.4
σ_x	0.165	0.064	0.016	0.001	0.002	0.022	0.074	0.173

3% (3.3[mm]) に相当する量だけ再生像の位置が奥行き方向に変化することがわかる。また、 $\sigma_x(z')$ は式 (9) の平方根であり、再生像の広がりの程度を表している。前述の条件下では、再生像の画素に相当する要素レンズの直径に比較すると 10 分の 1 以下の値である。

再生像の奥行き位置 z_0 と、 x 軸方向のずれ量 $\Delta x = x' - x_0$ の関係を図 6 に示す。ただし、 $D(H) = 0.50\%$ とした。このグラフは、図 5 において破線の傾きとして表されている再生像の横方向のずれ量と、 z_0 の関係を示したものである。像高 $x_0 = mP_x$ と再生像のレンズアレーから

図 5 再生像の奥行き位置と歪曲の関係 ($D(H) = 0.50\%$)
Relation of reconstructed image position and image distortion ($D(H) = 0.50\%$).

図 6 再生像の奥行き位置と横方向の歪曲の関係 ($D(H) = 0.50\%$)
Relation of lateral direction ($D(H) = 0.50\%$).

の距離 z_0 に応じて、ずれ量の絶対値 $|\Delta x|$ が大きくなっている。これは奥行き方向のずれ量の絶対値 $|\Delta z|$ に比べると小さいが、再生像の位置によっては要素レンズの直径に比べて大きな値になるため、再生像に与える影響は無視できない。

4.2 液晶モニタを用いたインテグラル立体表示装置による実測

走査線 2000 本の直視型液晶モニタ（有効表示領域の対角約 21[inch]）を用いたインテグラル立体表示装置において、投射歪みをシミュレートして測定実験を行った。実験系の仕様を表 3 に、構成と外観をそれぞれ図 7 および図 8 に示す。

実験では、理論検討で定義した像高の 2 乗に比例する歪みを忠実に再現できるように、直視型モニタを用いた。このモニタには、理論解析で導出した計算式を基に生成した歪みのある要素画像群を表示して、その再生位置を測定し、理論検討と実験の比較ができるようにした。

表 3 測定実験系の仕様
Specifications of experimental setup.

LCD panel	Effective number of pixels	$\approx 3200(\text{H}) \times 2160(\text{V})$
	Pixel width	0.1245[mm]
Lens array	Lens diameter	2.64[mm]
	Number of lenses	160(H) $\times$ 125(V)
	Focal length	8.58[mm]

図 7 再生像位置の測定系

Measurement system of reconstructed image position.

図 8 再生像位置の測定系

Measurement system of reconstructed image position.

再生像としては、レンズアレイ面から 130[mm] の位置に浮かぶ点像を考え、それを再生する理想的な要素画像群を計算して生成した。その理想要素画像群の各点について、式 (21) に基づき、レンズによる像高の 2 乗に比例する歪曲収差を受けた時と同じ変換を要素画像群に与えた。

実験に用いた要素画像群の例の一部分を拡大したものを図 9 に示す。実際の要素画像群は、このような輝点群を画面内に多数配置し、それぞれの画素に対してその像高に応じて前述の歪曲収差を与えたものである。1 次元モデルの理論検討について、同等の条件でその妥当性を検証するため、この実験では、1 次元のレンズアレイによって再生される光線を考えて要素画像群を作成した。なお、要素画像では発光点を表現するため、中心となる画素の光度を最大とし、近傍の隣接する 8 画素も使用して再生像の測定に必要な光度を得られるようにした。また、要素画像の位置も周辺画素で線形補間することでサブピクセルオーダの調整を行った (図 9 拡大部)。このように、要素画像の発光点は理想的な点ではなく、有限の大きさを持つため、レンズを通して形成される光線は広がりを持つ。理想的な発光位置

図 9 実験に用いた要素画像群の一例

(点像の再生に寄与するレンズの数: $N_x = 15$, 要素画像の画素数: 21.3[pixels])

Portion of the elemental image for experiment (number of lenses which contribute to reconstructed point image: $N_x = 15$, number of pixels in an elemental image: 21.3[pixels]).

図 10 レンズの歪曲収差による再生像位置のずれ (実験と計算)

Geometrical error of reconstructed image based on lens distortion (experimental and calculated result).

が画素の位置と一致しないために線形補間をした部分では、より多くの画素で発光点を表現することになるため、その広がりにはさらに大きくなる。

要素画像群に擬似的に加える歪みは、最大像高における歪曲率で $\pm 0.25, \pm 0.75, \pm 1.25\%$ の 6 種類とし、それぞれについて測定を行った。その他の仕様は、第 4.1 節において計算時に使用した表 1 に記載のものと同一である。

測定では図 7 および図 8 に示すように、光線が拡散板 (すりガラス) 上で最も集光する位置を結像点とした。結像点位置の同定は、 z 軸については拡散板とレンズアレイ表面相互の距離を計測することによって行った。 x 軸については、拡散板上に結像点をプロットし、歪曲収差を与えていない画像を要素画像群として用いた場合の結像点 (基準となる結像点) との相互の距離を計測して求めた。

測定結果を第 4.1 節の理論値の計算結果に重ねて示したものが図 10 である。歪曲率が大きくなるに従い、 z 軸方向および x 軸方向に再生位置がずれている。傾向は理論値と

図 11 歪曲収差が再生立体像の視域角に与える影響
(a):歪みなしの場合 (b):歪みありの場合

Effect of distortion for reconstructed image viewing angle.
(a):Without distortion, (b):With distortion.

同じであり、数値もほぼ一致している。

測定時、拡散板上で点像の広がり方が確認された。この広がりには、歪みの影響による収差の他に、再生像がレンズアレー面から遠くなるほど解像度が低下するインテグラル方式の特性¹⁸⁾が寄与していると考えられる。ただし、理論解析結果(表2)で示したように、歪みによる再生像の広がり程度 $\sigma_x(z')$ の値は小さい。そのため、レンズアレー面から遠ざかることによるデフォーカスの影響が支配的であり、加えて、画素が大きさを持つことや、複数の画素で要素画像の発光点が構成されていることが大きく影響していると考えられる。

また、部分的に実験結果の値と理論値との間にずれがあるのは、この点像の広がり起因する測定誤差の影響であると推定できる。

5. 投射レンズによる要素画像群の幾何学歪みが視域角に与える影響

投射レンズによる要素画像群の幾何学歪みが再生立体像の視域角に与える影響について解析する(図11)。視域角とは、正しい再生立体像を観察することができる範囲(視域)を見込む角度であり、要素画像群の幾何学歪みの影響を受ける。図11(a)のように要素画像群に幾何学歪みがな

図 12 投射レンズの歪曲率と視域角の関係

(計算結果; $H = 184.8[\text{mm}]$, $f = 8.58[\text{mm}]$)

Relation between projection lens distortion and viewing angle
(calculated result; $H = 184.8[\text{mm}]$, $f = 8.58[\text{mm}]$).

い理想的な状態において、レンズアレーから距離 L 離れた場所での視域を V とすると、視域角 θ との関係は、

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{V}{2L} \quad (23)$$

である。要素画像群の最大像高における歪み量を Δx とすると(図11(b))、影響を受けた視域角 θ' は、

$$\tan \frac{\theta'}{2} = \frac{V}{2L} - \frac{\Delta x}{f} \quad (24)$$

となるので、これから、

$$\theta' = 2 \arctan \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{|\Delta x|}{f} \right) \quad (25)$$

の関係がなりたつ。式(25)より、要素画像群の幾何学歪みによって視域角が狭くなることがわかる。また、式(19)から、

$$\theta' = 2 \arctan \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{|D(H)|H}{f} \right) \quad (26)$$

となる。図12は、投射レンズの歪曲率に応じて再生立体像の視域角が狭くなる様子を式(26)を基に、最大像高 $H = 184.8[\text{mm}]$ 、レンズアレーと要素画像群間の距離 $f = 8.58[\text{mm}]$ として求めた結果である。要素画像群の幾何学歪みによる視域角の低減量は、要素レンズの開口数で決まる設計視域角に対して一定の比率で低減し、その低減率は投射レンズの歪曲率にほぼ比例している。

表1のパラメータを持つシステムにおいて試算すると、理想視域角は設計上 17.5° となるが、例えば、投射レンズに起因する要素画像群の歪曲率が 0.05% の時、実際の視域角は 16.3° になる。

次に、投射型のインテグラル立体映像表示実験系において、歪曲収差が視域におよぼす影響と画像処理による改善効果を調べる。第4.2節の実験では直視型モニタを用いたが、本実験では、投射型表示系を用いる。その理由は、投

表 4 表示実験系の仕様
Specifications of experimental setup.

LCOS panel	Effective number of pixels Pixel width	$\approx 3400(\text{H}) \times 2300(\text{V})$ 6.8[μm]
Lens array	Lens diameter Number of lenses Focal length	2.64[mm] 160(H) $\times$ 125(V) 8.58[mm]
Projection lens	Distortion	1.1%

(a)

(b)

図 13 歪曲収差が再生立体像の視域へ与える影響の様子
(単板の LCOS パネルを使った表示実験結果)
(a):歪み補正なしの場合 (b):歪み補正ありの場合

Effect of distortion for reconstructed image viewing zone
(Experimental results of displaying using a LCOS panel).
(a):Without distortion compensation,
(b):With distortion compensation.

射レンズの歪曲収差に起因する視域の制限や再生像の奥行き歪みが、歪み補正によって改善されることを実際に確かめるためである。使用した表示実験系の仕様を表 4 に示す。対角 1.3[inch] の LCOS (Liquid crystal on silicon) パネル単板を使用し、緑色の波長領域で要素画像群を再生表示した。それを背面投射スクリーン（有効表示領域の対角約 21[inch]）へ投射し、レンズアレーを介すことにより立体表示を行った。投射レンズは、最大像高で 1.1%の歪曲率があるものを使用した。

図 13(a) に要素画像群の幾何学歪みを補正しない場合の再生立体像を示す。画面周辺に弧状の黒い部分が見られ、視野が狭くなっていることがわかるが、これは視域角の低減に伴うものである。また、視点を左右に移動させた場合、再生像の奥行き位置が見る位置により変化するため、再生像が歪んでいることがわかる。

そして、この要素画像群に、投射レンズの 1.1%の歪みを補正する画像処理を行い、立体表示した結果が図 13(b) である。弧状の黒い部分が消え、視野が広がっていることから、視域角の拡大が確認できる。この時、実際に視域角を測定してみると理想視域角と同じ 17.5°であった。再生像の奥行き方向の歪みも解消し、より撮影時の被写体に近い状態に補正できることが確認できた。この画像処理に幾

何学補正装置¹⁷⁾を用いることで、実時間で撮影・表示も可能となる。

6. 2次元レンズアレーの場合の考察

本論文では、要素画像群の歪みが再生立体像に与える影響の基本特性を調べるために、 x 軸方向のみの 1 次元のレンズアレーモデルを用いてきたが、 x , y 軸からなる 2 次元レンズアレーの場合についても同様の方法で調べることができる。

y 軸方向の要素レンズの番号を j 番目と表現すると、要素画像群に幾何学歪み Δx_{ij} , Δy_{ij} が生じた場合の光線の x 座標 $x'_{ij}(z)$ および y 座標 $y'_{ij}(z)$ は式 (4) のように、

$$x'_{ij}(z) = \left(\frac{x_0 - iP_x}{z_0} - \frac{\Delta x_{ij}}{f} \right) z + iP_x \quad (27)$$

$$y'_{ij}(z) = \left(\frac{y_0 - jP_x}{z_0} - \frac{\Delta y_{ij}}{f} \right) z + jP_x \quad (28)$$

と記述できる。

2 次元レンズアレーの場合、 y 軸では番号昇順に d 番目から u 番目の要素レンズが再生に寄与するとすれば、像再生に寄与する y 軸方向の要素レンズの個数 N_y と、中心となる要素レンズの番号 n は式 (5) および式 (6) と同様に、

$$N_y = u - d + 1 \quad (29)$$

$$n = \frac{u + d}{2} \quad (30)$$

である。また、 x 軸方向 m 番目、 y 軸方向 n 番目を中心とした場合を考えると、像再生に寄与する要素画像群の幾何学歪みの平均値 $\overline{\Delta x_{mn}}$ と $\overline{\Delta y_{mn}}$ (式 (8) に相当) は、

$$\overline{\Delta x_{mn}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u \Delta x_{ij} \quad (31)$$

$$\overline{\Delta y_{mn}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u \Delta y_{ij} \quad (32)$$

となる。各光線とそれらの平均値との距離の 2 乗和 $\sigma_{xy}^2(z)$ は式 (9) と同様に、

$$\sigma_{xy}^2(z) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u \left\{ \left[x'_{ij}(z) - \overline{x'_{mn}}(z) \right]^2 + \left[y'_{ij}(z) - \overline{y'_{mn}}(z) \right]^2 \right\} \quad (33)$$

である。また、その導関数 $\frac{d}{dz} \sigma_{xy}^2(z)$ は、

$$\frac{d}{dz} \sigma_{xy}^2(z) = \frac{2}{N_x N_y} \sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u \left[(X_{ij}^2 + Y_{ij}^2) z - (m-i)P_x X_{ij} - (n-j)P_y Y_{ij} \right] \quad (34)$$

となる。ただし、

$$X_{ij} = \frac{(m-i)P_x}{z_0} + \frac{\overline{\Delta x_{mn}} - \Delta x_{ij}}{f} \quad (35)$$

$$Y_{ij} = \frac{(n-j)P_y}{z_0} + \frac{\overline{\Delta y_{mn}} - \Delta y_{ij}}{f} \quad (36)$$

とし、 y 軸方向のレンズピッチを P_y とする。したがって、要素画像群に幾何学歪みがある場合の像の再生位置を表す、各光線が最も集光する位置の代表点 $B(x', y', z')$ の座標は、 $\frac{d}{dz}\sigma_{xy}^2(z) = 0$ から次のように求められる。

$$z' = \frac{\sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u [(m-i)P_x X_{ij} + (n-j)P_y Y_{ij}]}{\sum_{i=b}^t \sum_{j=d}^u (X_{ij}^2 + Y_{ij}^2)} \quad (37)$$

$$x' = \left(\frac{x_0 - mP_x}{z_0} - \frac{\overline{\Delta x_{mn}}}{f} \right) z' + mP_x \quad (38)$$

$$y' = \left(\frac{y_0 - nP_y}{z_0} - \frac{\overline{\Delta y_{mn}}}{f} \right) z' + nP_y \quad (39)$$

$B(x', z')$ を表す式 (12) および式 (13) に比べると、 y 軸方向の光線に関する Y_{ij} の項が加わり、その寄与の分を総和する形になっている。すなわち、1次元レンズアレーモデルは $u = d = 0$ の場合の特殊解であることがわかる。

ここで、投射レンズによる要素画像群の歪みは、画面中心から放射方向への歪みが支配的であり、歪曲率 D は像高の2乗に比例するものとする。この場合、要素画像群の幾何学歪み Δx_{ij} と Δy_{ij} は式 (21) の Δx_i と同様に、

$$\begin{aligned} \Delta x_{ij} = \frac{D(H)}{H^2} & \left[\left(\frac{iP_x - x_0}{z_0} f + iP_x \right)^3 \right. \\ & \left. + \left(\frac{iP_x - x_0}{z_0} f + iP_x \right) \left(\frac{jP_y - y_0}{z_0} f + jP_y \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} = \frac{D(H)}{H^2} & \left[\left(\frac{jP_y - y_0}{z_0} f + jP_y \right)^3 \right. \\ & \left. + \left(\frac{jP_y - y_0}{z_0} f + jP_y \right) \left(\frac{iP_x - x_0}{z_0} f + iP_x \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (41)$$

$$H = \sqrt{j_{\max}^2 P_x^2 + j_{\max}^2 P_y^2} \quad (42)$$

となる。ただし、 $j_{\max}$ 番目の要素レンズの位置を y 軸方向の最大像高とした。 x 軸方向と y 軸方向はそれぞれ独立ではなく、相互に影響しあう関係にある。 x 軸上だけを考えた $j = 0$ の時、 Δx_{ij} は Δx_i に等しい。

つまり、2次元レンズアレーの場合、 x 軸方向と y 軸方向の要素画像の歪み量が相互に影響しあい、それが再生像にも反映される。このため、再生像の位置は1次元レンズアレーモデルの場合と同様に、要素画像の糸巻き型や樽型の歪みに応じて、画面中央方向や周辺方向、そして奥行き方向へと歪む傾向にあるが、その絶対値は1次元モデルの場合に比べて強調される。

また、式 (35) から式 (39) において、レンズピッチ P_x , P_y は、 mP_x や $(m-i)P_x$ のように原点や要素レンズ群中心から各要素レンズまでの距離の値として影響している。このため、2次元レンズアレーにおいて、 x 軸方向と y 軸方向でレンズピッチが異なる $P_x \neq P_y$ の場合でも、その影響は像再生に寄与するそれぞれの軸方向の光線の密度が異なることだけである。すなわち、正方格子や俵積みなど、レンズの配置構造の違いに起因する歪曲特性の変化はないことがわかる。

7. む す び

本論文では、投射型インテグラル立体表示システムにおける要素画像の歪みが、再生像に与える影響を1次元レンズアレーモデルによる解析と実験により明らかにした。投射レンズによるわずかな歪曲収差が、再生立体像に大きな歪みをもたらすことがわかった。特に周辺部に再生される立体像の奥行き方向のずれが顕著であった。また、視域への影響も大きく、歪曲率にほぼ比例して視域角が低減することが明らかになった。要素画像群の幾何学歪みを逆補正する画像処理を施すことで、以上の歪みによる悪影響を低減できることも実験により実証できた。

今回の結果より、SHV のように超高精細なプロジェクタを用いた立体映像表示システムを設計・開発する際には、要素画像群の歪みを極めて低く抑えることが必要であると推測される。今後、要素画像と要素レンズの誤差を解消するための低歪みの光学部品設計や高度な画像補正処理技術の導入により、高画質なインテグラル立体映像表示の実現に向けた取組みを行う。

なお本研究は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「多並列・像再生型立体テレビシステムの研究開発」(2006～2010 年度) の一部として実施したものである。

〔文 献〕

- 1) 岡野 文男: “立体映像技術の研究動向”, 映情学誌, **61**, 5, pp.612–613 (May 2007)
- 2) M. G. Lippmann: “Épreuves réversibles donnant la sensation du relief”, J. de Phys., 4^e série, **VII**, pp. 821–825 (Nov. 1908)
- 3) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: “Three-dimensional video system based on integral photography”, Opt. Eng., **38**, 6, pp. 1072–1077 (June 1999)
- 4) J. Arai, M. Okui, T. Yamashita and F. Okano: “Integral three-dimensional television using a 2000-scanning-line video system”, Appl. Opt., **45**, 8, pp. 1704–1712 (Mar. 2006)
- 5) K. Hamada, M. Kanazawa, I. Kondoh, F. Okano, Y. Haino, M. Sato and K. Doi: “A Wide-Screen Projector of 4k×8k Pixels”, SID Symposium Digest of Technical Papers, **33**, 1, 46.3, pp. 1254–1257 (May 2002)
- 6) M. Sugawara, M. Kanazawa, K. Mitani, H. Shimamoto, T. Yamashita and F. Okano: “Ultrahigh-Definition Video System with 4000 Scanning Lines”, Proc. SMPTE Motion Imaging, pp. 339–346 (Oct./Nov. 2003)
- 7) M. Kanazawa, K. Hamada, I. Kondoh, F. Okano, Y. Haino, M. Sato and K. Doi: “An ultrahigh-definition display using the pixel-offset method”, J. Int. SID, **12**, 1, pp. 93–103 (Mar. 2004)
- 8) H. Liao, M. Iwahara, T. Koike, N. Hata, I. Sakuma and T. Dohi: “Scalable high-resolution integral videography autostereoscopic display with a seamless multiprojection system”, Appl. Opt., **44**, 3, pp. 305–315 (Jan. 2005)

- 9) Y. Kim, J. Park, S. Min, S. Jung, H. Choi and B. Lee: "Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array", Appl. Opt., **44**, 4, pp. 546-552 (Feb. 2005)
- 10) M. Okui, J. Arai, Y. Nojiri and F. Okano: "Optical screen for direct projection of integral imaging", Appl. Opt., **45**, 36, pp. 9132-9139 (Dec. 2006)
- 11) J. Arai, F. Okano, H. Hoshino and I. Yuyama: "Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images", Appl. Opt., **37**, 11, pp. 2034-2045 (Apr. 1998)
- 12) J. Arai, M. Okui, M. Kobayashi and F. Okano: "Geometrical effect of positional errors in integral photography", J. Opt. Soc. Am. A, **21**, 6, pp. 951-958 (June 2004)
- 13) D. C. Brown: "Close-Range Camera Calibration", Photogrammetric Eng., **37**, 8, pp. 855-866 (1971)
- 14) J. Weng, P. Cohen and M. Herniou: "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation", IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., **14**, 10, pp. 965-980 (Oct. 1992)
- 15) J. C. McGlone, ed.: "Manual of Photogrammetry", Fifth edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland (2004)
- 16) 関海克, 白石賢二, 渡辺一光, 福岡宏樹, 大橋和泰: "デジタルカメラにおける画像補正技術", Ricoh Technical Report, 31, pp. 103-110 (Dec. 2005)
- 17) 日下部裕一, 金澤勝, 岡野文男: "超高精細映像表示システムのコンバーゼンス誤差と素子位置調整の自動化", 映像学誌, **60**, 2, pp. 234-241 (Feb. 2006)
- 18) J. Arai, H. Hoshino, M. Okui and F. Okano: "Effects of focusing on the resolution characteristics of integral photography", J. Opt. Soc. Am. A, **20**, 6, pp. 996-1004 (June 2003)
- 19) K. E. Iverson: "A Programming Language", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 12 (1962)

〈付 録〉

A. 像再生に寄与する要素レンズの範囲

ここでは、像再生に寄与する要素レンズの範囲を考える。図2のモデルにおいて、要素画像群に幾何学歪みがない場合の再生点であるA点の再生に、番号昇順に**b**番目から**t**番目の要素レンズが寄与するものとする。なお、像高0の位置に対応する要素レンズを0番目とする。

t と**b**の値を求めるにあたり、まず、任意の実数を整数化する二つの関数を以下に示すように定義する¹⁹⁾。

$$\lfloor r \rfloor = \text{floor}(r) = \max\{s \in \mathbb{Z} \mid s \leq r\} \quad (\text{付} \cdot 1)$$

$$\lceil r \rceil = \text{ceiling}(r) = \min\{s \in \mathbb{Z} \mid r \leq s\} \quad (\text{付} \cdot 2)$$

ただし、整数の全体からなる集合を $\mathbb{Z}$ で表す。式(付・1)は、任意の実数 r をそれを上回らない最大の整数に変換する床関数である。一方、式(付・2)は任意の実数 r をそれを下回らない最小の整数に変換する天井関数である。

各要素レンズが、ある位置における像再生に寄与しているか否かは、図2に示すように、それぞれのレンズと対応する要素画像の領域、そして像の再生位置の相互の幾何学的関係によって決まる。式(1)から、

$$\begin{cases} |x_{e,t}| = \left| \frac{tP_x - x_0}{z_0} f \right| = \frac{tP_x - x_0}{|z_0|} f \leq \frac{P_x}{2} \\ t \leq i_{\max} \end{cases} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

$$\begin{cases} |x_{e,b}| = \left| \frac{bP_x - x_0}{z_0} f \right| = \frac{x_0 - bP_x}{|z_0|} f \leq \frac{P_x}{2} \\ b \geq -i_{\max} \end{cases} \quad (\text{付} \cdot 4)$$

である。なお、最大像高の位置の要素画像に対応する要素レンズの番号を $i_{\max}$ とした。これらから、 t と**b**はそれぞれ、

$$\begin{aligned} t &= \max \left\{ i \in \mathbb{Z} \mid i \leq \frac{x_0}{P_x} + \frac{|z_0|}{2f}, i \leq i_{\max} \right\} \\ &= \min \left(\left\lceil \frac{x_0}{P_x} + \frac{|z_0|}{2f} \right\rceil, i_{\max} \right) \end{aligned} \quad (\text{付} \cdot 5)$$

$$\begin{aligned} b &= \min \left\{ i \in \mathbb{Z} \mid i \geq \frac{x_0}{P_x} - \frac{|z_0|}{2f}, i \geq -i_{\max} \right\} \\ &= \max \left(\left\lfloor \frac{x_0}{P_x} - \frac{|z_0|}{2f} \right\rfloor, -i_{\max} \right) \end{aligned} \quad (\text{付} \cdot 6)$$

と表すことができる。

佐々木 久幸 1999年、筑波大学第三学群工学システム学類卒業。2001年、同大学大学院工学研究科構造工学専攻修士課程相当修了。同年、NHK入局。秋田放送局を経て、2006年より放送技術研究所勤務。立体映像の研究に従事。正会員。

河北 真宏 1990年、九州大学大学院修士課程修了。同年、NHK入局。鹿児島放送局を経て、1992年より放送技術研究所勤務。液晶プロジェクタや3次元カメラの研究開発に従事。2004年より(財)NHKエンジニアリングサービスへ出向。2006年より放送技術研究所勤務。立体映像の研究に従事。博士(工学)。正会員。

洗井 淳 1995年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、NHK入局。現在、放送技術研究所にて、立体テレビ方式の研究に従事。博士(工学)。正会員。

岡野 文男 1978年、東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、NHK入局。名古屋放送局を経て、1981年から放送技術研究所勤務。ハイビジョンシステムの研究開発をカメラ中心に進める。その後、高臨場感映像システムの研究に転じ、超高精細映像、インテグラルフォトグラフィやホログラフィなどの立体映像の研究に従事。博士(工学)。正会員。

末廣 晃也 1994年、九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。1996年、日本学術振興会特別研究員(DC)。1997年、総合研究大学院大学博士課程中退。同年、日本ビクター(株)入社。技術本部にて計算機ホログラム応用システム開発、立体ディスプレイの研究開発に従事。

配野 泰行 1986年、東京電機大学工学部電子工学科卒業。同年、日本ビクター(株)入社。以来、ハイビジョン、スーパーハイビジョン関連の研究開発および商品化開発に従事。現在、技術本部にて計算機ホログラム応用システム開発、立体ディスプレイの研究開発に従事。正会員。

吉村 真 1978年、早稲田大学工学部電気工学科卒業。同年、日本ビクター(株)入社。CRTディスプレイ、ハイビジョンTV等の研究開発、商品化に従事。現在、技術本部コア技術開発センターにてスーパーハイビジョン等の超高精細D-ILAプロジェクタの研究に従事。正会員。

佐藤 正人 1976年、明星大学工学部電気工学科卒業。1981年、日本ビクター(株)入社。以来、コンピュータ応用システム、画像圧縮LSI、スーパーハイビジョンプロジェクタ等の研究開発に従事。現在、同社技術本部コア技術開発センター新映像システムユニットユニットリーダー。