超高精細撮像装置における斜め画素ずらしの検討

正会員 三 谷 公 二[†], 正会員 藤 田 欣 裕[†], 正会員 島 本 洋[†]A Study of Spatial Offset Method in the Diagonal Direction
for a Very High Resolution Pickup SystemKohji Mitani[†], Yoshihiro Fujita[†] and Hiroshi Shimamoto[†]

Abstract An experimental 2,000-line image pick-up system using the four-imager pick-up method is studied with the aim of developing an ultrahigh-definition image pick-up system that surpasses a high-definition system. Using existing high-definition pick-up elements and lenses, a 2,000-line image pick-up experimental system with improved vertical resolution has already been developed. In this development, the pixels are offset diagonally between the image pick-up elements of two imagers to make the four-imager pick-up method used to improve resolution even more efficient. In addition, a technique where by spatial sample points are taken to be quincunx samples is studied in an effort to improve horizontal and vertical resolution.

In this paper, we report on our investigations into achieving greater horizontal and vertical resolution by offsetting pixels diagonally using HDTV 2/3-inch 2M-pixel charge modulation devices (CMD). We also report on our success in achieving both a horizontal and vertical limiting resolution of more than 1300 TVL through image pick-up testing.

In regard to the approach used to achieve ultrahigh-definition through the multi-imager method, comparisons were made between two-imager pixel offset high definition and simple multi-pixel high definition. We verified that there was no deterioration in S/N and sensitivity, and that there was a gain in dynamic range. In addition, simulation showed a limitation resolution curve that included errors in the mounting position of the prisms for the two-imager pick-up elements. The relation between the limiting resolution point and mounting precision is also studied.

1. ま え が き

近年、ネットワークの発達、およびパーソナルコンピュータの普及を背景とした将来のデジタル社会における大容量情報伝達媒体のひとつとして、超高解像度映像システムが提案され¹⁾、基礎技術の検討や電子新聞、遠隔医療などへの応用の検討が行われ始めた。

一方、我々は番組制作の観点から、超高精細映像が

NTSCやハイビジョンなど既存メディアの映像効果をより多彩にするものと考え、従来の3板撮像方式とは異なる4板撮像方式を提案し²⁾、2000ライン撮像実験装置の検討を行ってきた³⁾。この2000ライン撮像実験装置は、ハイビジョンを超える超高精細撮像装置の開発をめざし、その第一段階として既存のハイビジョン撮像素子およびレンズを用い、垂直方向への高精細化を図ったものである。ハイビジョン用2/3インチ

キーワード：超高精細撮像装置、4板撮像方式、200万画素CMD、画素ずらし

[†] NHK 放送技術研究所 (〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-2312)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories (1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157, Japan)

200 万画素 Charge Modulation Device (以下 CMD と記す)⁴⁾ 撮像素子を用い、緑(G)信号用に用いる 2 枚の撮像素子の間で垂直方向に画素ずらしを行うことにより、G 信号において垂直解像度 1800 TV 本を達成した。

ここで用いた 4 板撮像方式は、1 台の撮像装置に使用する撮像素子の枚数を増やし、撮像素子間に空間画素ずらし法を導入することによって高解像度映像を得る方法である。このような多板化によるアプローチは、1 枚の撮像素子内での多画素化による高解像度法に比べ画素サイズの大きい撮像素子を用いることができるため、単体素子としては感度、 S/N 、ダイナミックレンジなど、基本撮像特性の良い撮像素子を用いることができる。反面、2 つの撮像素子の出力信号合成によるノイズの増加、画素ずらしの際の 2 つの撮像素子の開口重なり、および画素ずらし位置の誤差による高域周波数特性の低下など、検討課題も多い。

本論文では、超高精細撮像実現へ向け、4 板撮像方式を用いてより効果的に高解像度化を図るため、2 つの 200 万画素撮像素子を用いて斜め方向への画素ずらしにより空間サンプル点を五の目配置とし、水平・垂直両方向へ高解像度化する方法を検討した。まず、超高精細映像を得る方法として、画素ずらしを用いた多板方式と 1 枚の撮像素子の画素数を増やす多画素方式を S/N 、感度およびダイナミックレンジの点から比較した。さらに、多板方式を用いた超高精細撮像において、解像度向上効果を大きく左右する画素ずらし位置について位置誤差と解像度の関係を明らかにした。また、実際に 2/3 インチ 200 万画素 CMD 撮像素子を用いて撮像実験を行い、水平・垂直方向に解像度改善効果を確認した。

2. 多画素化撮像方式と多板化撮像方式の比較

まず、基本的な撮像素子モデルを用い、多画素化、および多板化撮像方式による単位画素あたりの信号電荷およびノイズ電荷について比較する。Charge Cou-

図 1 撮像素子の簡単な等価回路モデル
Simple model of an image sensor.

pled Device (CCD) を想定した撮像素子の基本的なモデルを図 1 に示す。撮像素子を光電変換部と出力アンプ部に分け、光電変換部は入射光に応じた光電荷信号 Q_s を生成し、出力アンプ部は電荷信号を電圧信号に変換し出力する機能を持つものとした。また、発生する付加ノイズとしては暗電流に起因したノイズ Q_{in} 、およびリセットノイズなどアンプ部で発生するノイズ Q_{an} を考える。図 2 にこの撮像素子モデルを基にした、多板方式の最も単純な場合としての 2 板方式による画素ずらし撮像モデル(a)、および画素面積を半分にし、多画素化した撮像素子の回路モデル(b)を示す。光電荷信号量は、入射光学像をプリズムで 2 つに分解する多板方式(a)と、画素単位面積が半分となる多画素方式(b)とも、基準モデルの半分となる。また、アンプノイズ電荷量に関しては、多板方式の信号合成回路において 2 つの素子出力が理想的に切り替えられ、付加的なノイズは加わらないものと仮定すると、単位画素あたりのノイズ量は両方式とも基準モデルと変わらない。両方式で大きな差が生じるのは暗電流によるノイズである。多画素方式(b)は、単位画素面積が小さくなるため暗電荷量が減少し、暗電流に起因したノイズは基準モデルの $1/\sqrt{2}$ となる。一方、多板方式(a)では、単位画素面積は基準モデルと変わらないため暗電流によるノイズ量も変わらない。つま

図 2 高解像度撮像における多板化撮像法と多画素化撮像法の単位画素あたりのノイズ量の比較

The theoretical noise comparison between the multi-imager pickup method using spatial offset between the imagers and the pickup method using a high resolution imager.

り、撮像素子において暗電荷に起因したノイズが支配的であれば、多板化(2板化)による高精細化は多画素化方式に比べ、 S/N が最大3dB低下する。しかし、現状のハイビジョン用200万画素CCDにおいては、相関2重サンプル回路などを用いてアンプノイズを抑圧しても、出力信号におけるノイズ成分はアンプノイズが支配的であり⁹⁾、暗電荷に起因したノイズはほぼ無視できる。さらに、上記の検討は素子温度が変わらないという条件の下で成り立ち、実際には多画素方式の方が素子の駆動周波数が高く素子の温度上昇により暗電荷が発生しやすくなるため、両方式の差は縮小する傾向にある。またノイズの見え方について比較すれば、2板方式の方が素子単体出力においてノイズの粒が大きい。しかし、理想的な切り替え回路によって多画素方式と同等なものとなると考えられる。以上の結果より、多画素方式と多板方式により得られる出力信号の S/N は現状では同等であると考えられる。

次に、他の撮像特性として感度、ダイナミックレンジを考える。感度に関しては多板方式で用いるプリズムでの光損失がなく、また多画素方式での画素縮小による開口率劣化がなければ、先述したように単位画素から同量の光信号が得られるため、両方式ともほぼ同等の感度であると推定できる。

一方、ダイナミックレンジに関しては、入射光をプリズムで分解し、画素面積の大きい撮像素子で受光する多板方式の方が有利である。図2に示す素子モデルで比較した場合、単位画素の飽和電荷量が単位画素面積に比例すると仮定すると、(a)の方が(b)に比べ飽和入射光量は2倍大きくなる。

上記の検討より、画素面積が小さく、多画素化すると基本撮像特性を維持できなくなるような超高精細撮像の領域では、多板方式が適していると考えられる。ただし、多板方式では撮像素子間での画素ずらし誤差、および開口重なりにより出力される映像出力の高域周波数応答が低下する可能性がある。

以下では、斜め画素ずらしにより2000ライン撮像装置を高解像度化する際の、画素ずらし精度による解像度特性への影響について検討した。

3. 斜め画素ずらしにおける解像度特性の検討

空間サンプル点を五の目配置とする方法は水平・垂直方向の解像度が斜め方向の解像度に対し敏感な人間の視覚特性⁹⁾に適する方法として、ディジタル信号処理においてもよく用いられている⁷⁾。

画素ずらしを用いて五の目サンプルを実現しようとした場合、ディジタル信号処理の場合と異なる点がいくつかある。ひとつは、プリズムに固着する撮像素子の位置誤差により五の目サンプルパターンが多少変形する点である。特に画素ピッチが極めて狭くなる超高精細撮像の領域では、微小な位置合わせ誤差が画素ずらし効果に大きく影響する。ふたつめは五の目サンプルを行う入力信号、つまり光学像に対し充分なプリフィルタ処理を行うことができない点である。また、出力信号の S/N とも関係するが、最近の撮像素子の画素における開口率はマイクロレンズ技術により大きく向上しており、画素ずらしを行った場合、2つの撮像素子間で開口が重なり合い、高域の変調度が低下する可能性がある。

そこで、まず光学系の特性モデルを用い、理想位置からの誤差による解像度特性劣化を検討し、十分な性能を実現するための素子の貼り合わせ精度について述べる。次に、光学系に光学ローパスフィルタ(以下、光学LPFと記す)を挿入し入射光にプリフィルタ処理を行ったときの解像度特性の変化をシミュレーションする。

3.1 レンズおよび画素の開口モデルとその周波数特性

画素のモデルとして図3に示すような光学アパーチャ特性を持つ画素を用いる。この画素はオンチップレンズアレイによるアパーチャ特性を考慮し、面積開口

図3 正方面素配列構造を持つ2枚の撮像素子を斜め方向に空間画素ずらしした時の光学像に対する空間サンプリング位置

The spatial sampling point using the spatial offset method between two imagers in the diagonal direction.

図 4 超高精細カメラによる光学系の空間周波数特性，およびその 2 次元周波数特性モデル
An example of spatial frequency response of optical system in the ultra high resolution pickup system and the model of the 2D spatial frequency response.

図 5 2 次元空間における画素ずらしモデル，およびその 2 次元周波数平面におけるキャリア配置
The calculation model of the spatial offset imaging method on the image plane.

率が 60% となる円形のアパーチャ特性を持つものとする．この円形アパーチャの周波数特性，および 2/3 インチ，F4 の理想レンズにおける周波数特性，およびそれらの総合特性を図 4(a) に示す．図より，約 3000 TV 本でその応答がヌルとなり，それ以上の周波数成分はほとんど現れないことがわかる．また，変調度の低下は周波数に対しほぼ直線近似できる．よって以下の解析ではレンズおよび画素開口特性の総合特性として，図 4(b) に示す円錐特性で近似した 2 次元周波数特性を用いた．

3.2 画素ずらし誤差による解像度特性劣化

X 軸方向に x_0 ピッチ，Y 軸方向に y_0 ピッチで配置された正画素配列構造を持つ 2 枚の撮像素子の相対的な撮像位置を図 5(a) のように (x, y) だけずらした場合，2 次元周波数平面 (μ, ν) 上でのキャリアの配置はそれぞれの素子のサンプリング位置のフーリエ変換を加算したものとなり，次式のように表される．

$$F(\mu, \nu) = \frac{1}{x_0 y_0} \sum_k \sum_l \delta\left(\mu - \frac{k}{x_0}, \nu - \frac{l}{y_0}\right) \cdot \left\{ 1 + e^{-2\pi j \left(\frac{kx}{x_0} + \frac{ly}{y_0} \right)} \right\} \quad (1)$$

このときの各々のキャリアの配置は図 5(b) のようになり，各キャリアの振幅レベルは (1) 式の第 2 成分で表される．光学像が入射すると，これらのキャリア成分を中心に入射信号成分が 2 次元空間周波数面上に広がる．2 枚の撮像素子の相対位置が斜め方向へ正確に $(x, y) = (2.5 \mu\text{m}, 2.6 \mu\text{m})$ だけずれている場合には，図 5(b) の点線で示された線上に存在するキャリア成分は抑圧され，ベースバンド帯域内への折り返しが抑圧され高域解像度が改善される．つまり，画素ずらしで得られる出力信号の解像度特性は，周囲のキャリア成分による折り返し成分の合成電力とベースバンド帯域内の電力で決定される．実際には帯域内の変調度特性も考慮する必要があるので，ベースバンド成分と折り返し成分の電力比とモニタ上で観測される限界

図 6 画素ずらし誤差による限界解像曲線の変化
The relationship between the accuracy of the offset position and the limiting resolution in the image offsetting method.

解像度とを直接関係づけることは容易ではない。しかし、ナイキスト限界などのように信号成分と折り返し成分の量が一致する点を解像度限界点のひとつの目安とし、解像度特性を評価することは可能である。ここでは、周囲のキャリアによる折り返し成分とベースバンド成分が等しくなる点を限界解像点と仮定し、2枚の素子の相対的位置の理想画素ずらし位置 $((x, y) = (2.5 \mu\text{m}, 2.6 \mu\text{m}))$ からのずれ $(\Delta x, \Delta y)$ により限界解像点がどのように変化するかを図示した (図 6)。画素ずらしが理想的に行われている $((\Delta x, \Delta y) = (0, 0))$ 場合、水平・垂直の限界解像点は約 1700 TV 本となる。しかし、画素ずらしの位置が理想的な位置から水平・垂直方向にずれた場合には、それぞれの方向に対する解像度が劣化していることがわかる。この図より、貼り合わせ誤差が $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内であれば、水平・垂直両方向の限界解像度は 1300 TV 本以上を達成できることがわかる。また、理想的なサンプル位置でも限界解像点は約 1700 TV 本しか達成されない原因は、入射光学像の周波数特性が図 4(b) に示す円錐形特性であるため、キャリア (1, 1) により折り返し成分がベースバンド内に達し水平・垂直方向の解像度を低下させているためである。そこで次に、光学 LPF によりプリフィルタを設けた場合について検討する。

3.3 光学 LPF の効果

光学系内に斜め方向に効果を持つ光学 LPF を挿入し、ベースバンド内に折り返す光学像の斜め方向成分を抑圧することにより、限界解像度特性を改善することを考える。斜め方向のナイキスト周波数の 1.5 倍の周波数応答がヌルとなるコサイン特性を持つ光学

図 7 光学ローパスフィルタを用いたときの画素ずらし誤差による限界解像曲線の変化
The relationship between the accuracy of the offset position and the limiting resolution in the image offsetting method with optical low-pass filter.

LPF を 2 枚挿入し、先ほどと同様に限界解像点の算出を行う。画素ずらし誤差による限界解像点の変化を図 7 に示す。光学 LPF を挿入することでベースバンド帯域内に混入する折り返し成分は減少し、位置誤差がない場合には、水平・垂直方向の限界解像点は約 2000 TV 本に達する。また、貼り合わせ誤差を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内に抑えれば、限界解像点は 1500 TV 本以上を達成できる。ただし、光学 LPF を用いた場合には、そのコサイン特性のため帯域内の変調度も低下する。例えば、貼り合わせ誤差のない場合の水平・垂直方向の 1500 TV 本における変調度は、光学 LPF を用いない場合に比べ約半分となる。この変調度低下は、輪郭補償回路などを用い水平・垂直方向の高域周波数特性を持ち上げることで電氣的に補正することができる。また、補間合成によっても変調度の低下が考えられるが、これも同様に補正が可能である。しかしながら、実際に輪郭補償を行う場合には S/N の劣化を考慮する必要がある。

4. 撮 像 実 験

4.1 実験装置の仕様

上述の検討を基に実際に撮像実験を行った。本実験装置の仕様を表 1 に示す。基本クロックは将来ハイビジョンへの切り出しを考慮し、ハイビジョンの基本周波数の 74.25 MHz の 4 倍の 297 MHz とした。また、撮像素子は順次走査可能な 2/3 インチ 200 万画素 (1920(H) × 1035(V)) CMD 撮像素子を 2 枚用いた。2 線読み構成の CMD 撮像素子の水平シフトレジスタを 74.25 MHz で駆動することにより、1 枚の撮像素

子から 1000 ライン順次走査，60 フレーム/秒の映像信号を得ている．さらに，斜め方向に画素ずらしされた 2 つの撮像素子の出力信号を補間，合成することにより 2000 ライン化を達成している．

モニタとしては，表示アスペクトが 1 対 1 の 2000

ラインカラーモニタを用いた．撮像素子の有効エリアのアスペクト比は 16 対 9 であるため，撮像映像のうち水平方向に半分の部分を切り出して表示し，表示映像の真円率をできるだけ 1 に近づけ，9/8 とした．

4.2 実験装置の構成

図 8 に実験装置の構成図を示す．レンズで集光された光学像はハーフプリズムにより 2 つに分けられ，2 枚の CMD 撮像素子に結像される．本撮像実験では輪郭補償回路を持たないので，帯域内の変調度を高く維持するため斜め方向の光学 LPF は用いていない．2 枚の CMD 撮像素子の出力信号はプリアンプ直後で，A/D 変換され，光リンクモジュールによりデジタル信号処理部に伝送される．デジタル信号処理部では，固定パターンノイズ（FPN）抑圧処理，合成・補間処理，ガンマ補正処理，および切り出し回路を通過後，D/A 変換によりアナログ信号に変換され，モ

表 1 実験装置の仕様

Specification of the experimental pickup system.

システム	60 フレーム/秒，2000 ライン順次走査方式
撮像方式	200 万画素 2 板式，斜め画素ずらし
撮像素子	ハイビジョン用 2/3 インチ 200 万(1920×1035)画素 CMD 順次走査駆動 駆動レート 74.25 MHz×2 線読出し
表示モニタ	2048(H)×2048(V)画素，アスペクト比 1：1 (実際はシャドウマスクにより水平は 1600 ドット)

図 8 試作カメラのブロックダイアグラム
Blockdiagram of the experimental image pickup system.

図 9 素子出力の合成法，および画素補間法
The signal composing and the pixel interpolation to generate the display area data with 2K×2K dots.

写真 1 ハイビジョン用レトマチャートの撮像例
Reproduced picture of HDTV retoma chart.

写真 2 写真 1 の中央部拡大写真
Enlarged central portion of Photo. 1.

ニタに出力される。信号の合成・補間処理は図 9 に示すように、2 つの撮像素子の出力信号を時間圧縮し、合成するとともに、標本点の存在しない部分のデータは上下左右の画素データから補間した。図 9(b) に示すように、全撮像データの半分の水平 1920 ドット、垂直 2070 ラインを切り出し、モニタへ出力した。写真 1 にモニタ表示画像を示す。2000 ラインモニタでの表示画像は先に述べたように真円率は 1 とはならず、横方向に 9/8 倍された映像となる。写真 2 は写真 1 を拡大したものである。水平・垂直ともに限界解像度約 1300 TV 本以上を達成した。上記の検討結果を考慮すると、素子の貼り合わせ精度が限界解像度の主たる制約要因であると考えられる。

今後は貼り合わせ精度の向上を検討するとともに、

光学 LPF、輪郭強調回路を用い、より高解像度化を図りたい。

5. む す び

ハイビジョン用 200 万画素撮像素子を 2 枚用い、斜め方向に画素ずらしを行うことにより水平・垂直両方向への高解像度化を検討し、実際に撮像実験を行うことによりその効果を確認した。2 板画素ずらしによる高精細化は多画素化による高精細化に比べ、S/N、感度の点では劣化がなく、ダイナミックレンジの点では有利であることを確認した。また、シミュレーションにより 2 枚の撮像素子のプリズムへの貼り合わせ位置に誤差が含まれる場合の限界解像度曲線を示し、限界解像度と貼り合わせ精度の関係について論じた。以上の検討結果を基に、実際に 2/3 インチ 200 万画素 CMD 撮像素子を用い、撮像実験を行い、水平・垂直方向の限界解像度 1300 TV 本以上を達成した。

〔参 考 文 献〕

- 1) S. Ono, et al.: "All-Digital Super High Definition Images", Signal Processing: Image Communication, 4, pp. 429-444 (Aug. 1992)
- 2) 菅原ほか: "4 板撮像方式における画素ずらし効果についての検討", テレビ誌, 49, 2, pp. 212-218 (Feb. 1995)
- 3) 三谷ほか: "4 板撮像方式を用いた 2000 ライン動画撮像実験装置", テレビ誌, 50, 2, pp. 295-301 (Feb. 1996)
- 4) T. Nomoto, et al.: "A 2/3-inch 2M-Pixel CMD Image Sensor with Multi-Scanning Function", ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 196-197 (Feb. 1993)
- 5) 峯ほか: "2/3 インチ 200 万画素ハイビジョン CCD カメラ", テレビ学技報, 19, 65, pp. 25-30 (Nov. 1995)
- 6) 坂田: "テレビ雑音の見え方の周波数特性", テレビ誌, 34, 3, pp. 239-245 (1980)
- 7) Y. Ninomiya: "MUSE Coding System for HDTV Broadcast", Trans. HD-TV Work Shop by EURASIP, 2, pp. 1-16 (1986)

三谷 公二 1987 年、京都大学大学院修士課程修了。同年、NHK に入局。現在、同放送技術研究所に勤務。画像処理、カメラシステムの研究に従事。正会員。

藤田 欣裕 1976 年、東京大学工学部電気工学科卒業。同年、NHK に入局。大阪放送を経て、1981 年より、同放送技術研究所に勤務し、現在に至る。固体撮像素子の評価、固体カメラの研究に従事。正会員。

島本 洋 1991 年、東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年、NHK に入局。金沢放送局を経て、1991 年より、同放送技術研究所に勤務し、現在に至る。固体撮像カメラの研究に従事。正会員。