4 板撮像方式における画素ずらし効果についての検討

正会員 菅 原 正 幸[†], 正会員 三 谷 公 二[†], 正会員 齋 藤 敏 紀[†]
 正会員 藤 田 欣 裕[†], 末 次 圭 介^{††}

A Study on the Advantages of Spatial-pixel-offset Method in Four-chip CCD Imaging

Masayuki Sugawara[†], Kohji Mitani[†], Toshinori Saitoh[†], Yoshihiro Fujita[†]
 and Keisuke Suetsugi^{††}

Abstract A new image acquisition system is proposed to meet the increasing demand for a compact HDTV camera with high performance. The main idea of this system is to solve the contradiction between the shrinkage of the optical format size and the camera performance by equipping the camera with four-chip CCDs. In the newly developed color-separating system of the prototype camera, two of the four CCDs are assigned for the green light component and one each for the red and the blue component. We succeeded in improving the resolution by introducing spatial pixel offset imaging, in which the two G-CCDs are aligned by one-half pitch of a pixel and one of them is aligned with the R-CCD and the other with the B-CCD. This new method has two major advantages: it prevents the resolution degradation caused by the chromatic aberration of the lens and improves the resolution of chromatic signals over a wide range.

1. ま え が き

ハイビジョンが黎明期から普及期に移行するにつれ、現行方式と同様の番組制作形態に対応できるカメラが求められている。現行方式と同等の使い勝手を実現するには、レンズを含めたカメラヘッドを小型化する

ことが必要で、そのためには、2/3 インチ光学系の CCD 撮像素子を用いることが必須である。しかし、画素数をそのまま光学サイズを縮小すると、画素サイズが小さくなり、感度、ダイナミックレンジなどの CCD の性能は劣化する。そこで、画素数を少なくすることによって性能を確保し、必要な解像度は空間画

キーワード：CCD、画素ずらし、ハイビジョン、テレビカメラ、3 板撮像方式、色収差

1993 年 7 月 21 日、1993 年テレビジョン学会年次大会で発表

1994 年 7 月 8 日受付、1994 年 10 月 17 日再受付

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

^{††} 松下電器産業株式会社 映像音響情報研究所(〒571 門真市大字門真 1006, TEL 06-900-9680)

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

^{††} Audio Video Information Technology Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. (1006, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571, Japan)

素ずらし法により得る方式をとった3板方式カメラが開発されている¹⁾²⁾。これらは、いずれも性能バランスのとれた小型カメラではあるが、さらなる高画質化のためには多画素化とCCD素子単体の性能向上が求められる。半導体製造技術の進展と共にCCDの性能向上が図られてきたが、現在、小型化と多画素化に伴い画素間隔は数ミクロンとなり、今後の性能向上は容易には期待できない。

本論文では、CCD単体の画素数を増やさずに、カメラに使用するCCDを4枚にすることにより高画質化を図る新たな撮像方式(4板撮像方式)を提案する。本方式では、4枚のCCDを、画素ずらしが効果的に行われるように配置した。この配置により、従来のRGB3板方式と比べて、本方式が有彩色信号の解像度において有利であること、およびレンズの色収差による解像度劣化が少ないことを計算により明らかにし、試作カメラによって検証した。

2. 4板撮像方式

2.1 色分解系と空間画素ずらし

カラーカメラにおける色分解光学系は、3分解ダイクロックプリズムを用いたものが放送用カメラの分野では多く用いられている。水平方向にも離散サンプルする固体撮像素子とこの光学系とを組合せることにより、空間画素ずらし法が提案された³⁾。この技術を適用した色分解系として、これまでにRGB方式およびデュアルグリーン方式(3板)が、NTSCおよびハイビジョン用のカメラで報告されている^{1)~4)}。このうち、RGB方式ではR、G、Bがそれぞれ同レベルの入射光、すなわち無彩色の信号については、画素ずらしの効果が完全となるが、それ以外の信号では完全な効果が得られない欠点がある。また、スペクトルの異なる入力光間で画素ずらしを行うため、光学系の色収差の影響により解像度が劣化する。一方、デュアルグリーン方式では、その点は良いが、R、Bに割り当てられる画素数が少ないので、R、B光が輝度信号の高域の変調度に寄与せず、特に、R単色、B単色などの特殊照明下では解像度が得られないという問題が残る。

新たに提案する4板撮像方式では、撮像素子を4枚にすることで空間サンプル点の総数を単一素子の4倍とし、そのサンプル点の配置と割当を工夫することによって、これら2つの3板撮像方式よりも優れた性能が得られる。

2.2 4板撮像方式における画素ずらし

撮像素子を4枚用いた系に空間画素ずらし法を適用

図1 CCDの配置と輝度信号の構成比

Chip arrangement and component ratio of luminance signal.

する場合、色分解系と画素ずらしをする素子の組合せはいくつか考えられる。そのなかで、色分解系については、これまでのプリズムとの整合性と、後述するようにBとRの間でも画素ずらしができることから、RGBに色分解し、さらにGを2分割する方式とした。Gを2分割した理由は、ハイビジョンの輝度信号の約70%がGから成り立っており⁵⁾、図1に示すようにG₁とG₂を画素ずらしの関係とすることにより、効果的に解像度が向上することが望めるからである。さらにG₁にRを、G₂にBを合わせることで、RとBの間でも画素ずらしを行う。このことにより本方式は、R単色、B単色以外のすべての入力光に対して画素ずらしの効果を持つ。

またこの組合せにおける輝度信号の構成比は、GとR、Bを独立に設定できるので、図1に示すRGB方式のG:B:R=0.5:0.25:0.25のような、ハイビジョンの規格から大きくはずれた設定とする必要はない。そこで本方式における構成比は、規格になるべく近く、かつ折り返し信号を完全にキャンセルするように選び、G:B:R=0.7:0.15:0.15とした。以下に述べる検討および測定においては、この構成比を用いた。

3. 有彩色信号の解像度

色分解系における空間画素ずらし法では、通常、無彩色の信号に対して最も効果が大きくなるように輝度信号比を設定する。したがって、有彩色については効果が完全ではない。このことは、画面上では解像度の改善効果の減少と折り返し成分の残留という形で現れるが、後者の方が画質に与える影響が大きい。4板撮像方式をRGB3板撮像方式と比べると、前者がGどうし、かつRとBの間で画素ずらしを行っていることから、後者よりも有利であることは容易に推察できる。このことを定量的に明らかにするために、CIE色度図上で2つの方式について折り返し成分を計算した。

図 2(a) 色空間における折り返し成分：RGB 方式
Calculated alias component in RGB system.

図 2(b) 色空間における折り返し成分：4 板方式
Calculated alias component in Quad system.

XYZ 色空間の $y = \text{一定}$ 平面において、画素ずらしの効果完全でないことにより発生する折り返し成分を計算し、CIE 色度図上に投射する方法で行う。入力光の空間周波数は、画素ずらしをして得られるナイキスト周波数とする。

まず、 $y=0.1$ 平面上 $(x_i, y_i, z_i): y_i=0.1$ で x_i, z_i を変数として折り返し成分を計算する。 $y=0.1$ は、輝度信号の構成比において最も小さい値 0.087 を持つ B が単独で輝度信号を構成する場合に、100% を大きく越えない値として選んだ。折り返し成分は RGB 方式 A_{rgb} 、4 板方式 A_{quad} それぞれについて、以下の式で与えられる。

$$A_{rgb} = \text{ABS}[0.5g - 0.25r - 0.25b] \quad (1)$$

$$A_{quad} = \text{ABS}[0.15r - 0.15b] \quad (2)$$

ここで ABS は絶対値を、 r, g, b は、R, G, B それぞれのレベルを表す。

r, g, b と x_i, y_i, z_i は、ハイビジョン規格⁵⁾ から導出した以下のマトリクスを用いて変換する。

$$\begin{aligned} r &= 3.508 x_i - 1.740 y_i - 0.544 z_i \\ g &= -1.068 x_i + 1.977 y_i + 0.035 z_i \end{aligned} \quad (3)$$

$$b = 0.056 x_i - 0.097 y_i + 1.051 z_i$$

次に、この結果を $y=0.1$ 平面から原点を通して $x+y+z=1$ 平面 (x_u, y_u, z_u) に投影する。

$$x_u = x_i / (x_i + y_i + z_i) \quad (4)$$

$$y_u = y_i / (x_i + y_i + z_i) \quad (5)$$

最後に、結果を $z=0$ 平面に平行に投影して CIE 色度図上にプロットする。

結果を図 2 に示した。輝度の信号成分と折り返し成分の比を表示している。0% は折り返し成分が 0、す

なわち、画素ずらしにおいて完全に折り返しが抑圧されていることを示し、100% は信号成分と同じレベルの折り返し成分が発生していることを示す。

RGB 方式では、R, G, B のレベルが $2g=r+b$ の関係を満たすときに折り返し成分がよく抑圧されている。これは (1) 式に対応している。この直線から離れた部分、R, G, B の単色に近い部分や、R, B の間の部分では、ほとんど抑圧効果がない。

一方、4 板方式では広い範囲で折り返し成分が抑圧されていることがわかる。特に、2 つの G の間で画素ずらしを行っていることから、G 成分の折り返しは完全に抑圧されている。さらに、R と B の間でも画素ずらしを行っているので、R と B の間にある信号についても、折り返しが少なくなっている。ただ、画素ずらし効果のない R 単色、B 単色近傍で折り返しが多くなっている。

4. レンズの色収差の影響

撮像素子の固体化および高精細化に伴って、レンズ系における色収差の問題が顕在化してきている。その理由として、画像周辺部も中心部と同等の解像度であるという固体撮像素子の特長を活かす必要があることと、カメラにおいてレジストレーション補正による倍率色収差の修正が不可能なことが挙げられる。ハイビジョン用レンズの倍率色収差の目標値として、全画面で走査線の 1/2 以下という値が掲げられている⁶⁾。空間画素ずらしにおいては、画素サイズの半分程度の“ずれ”を問題とするので、色収差の影響が撮像方式によって異なることが予想される。4 板撮像方式と

図 3(a) 色収差と変調度の関係：RGB 方式
Relation between chromatic aberration and MTF :
RGB system.

図 3(b) 色収差と変調度の関係：4 板方式
Relation between chromatic aberration and MTF :
Quad system.

RGB 3 板撮像方式について、倍率色収差の解像度に与える影響を検討した。

入力光として無彩色すなわち R, G, B の強度が同じである 1 次元のスweep信号を考える。この入力光が、G を基準にして R, B がそれぞれ d , $-d$ の倍率色収差のあるレンズ系を通るとする。そのときの出力光は G, B, R それぞれについて

$$g = \cos[\pi f^2] \quad (6)$$

$$r = \cos[\pi f^2 + 2\pi f/f_p] \quad (7)$$

$$b = \cos[\pi f^2 - 2\pi f/f_p] \quad (8)$$

となる。ここで、 f は信号の空間周波数、 f_p は d を周期とする空間周波数である。

これらの信号から輝度信号 Y を合成すると、RGB 方式における Y のレベル y_{rgb} は

$$\begin{aligned} y_{rgb} &= 0.5g + 0.25r + 0.25b \\ &= 0.5 \cos[\pi f^2] + 0.25 \cos[\pi f^2 + 2\pi f/f_p] \\ &\quad + 0.25 \cos[\pi f^2 - 2\pi f/f_p] \\ &= \cos[\pi f/f_p]^2 \cos[\pi f^2] \end{aligned} \quad (9)$$

4 板方式における Y のレベル y_{quad} は

$$\begin{aligned} y_{quad} &= 0.7g + 0.15r + 0.15b \\ &= 0.7 \cos[\pi f^2] + 0.15 \cos[\pi f^2 + 2\pi f/f_p] \\ &\quad + 0.15 \cos[\pi f^2 - 2\pi f/f_p] \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

したがって、空間周波数が $f_p/2$ の場合、すなわち、ピッチが $2d$ の周波数を見ると、RGB 方式ではレスポンスが 0 になるのに対して、4 板方式では G から得られる成分が R, B によりキャンセルされる分を差し引いても約 40% 残るので、色収差がある条件下でも変調度を保つことができる。

(9), (10) 式の包絡線を、 d をパラメータに計算した結果を図 3 に示す。計算は 2/3 インチ光学系について行った。結果は、130 万画素 CCD の開口率が 50%

とした場合のアパーチャ効果も含んでいる。RGB, 4 板方式いずれも収差 d が大きくなるにつれて変調度が小さくなるが、RGB 方式の方がその度合いが大きい。色収差の目標値である $2.5 \mu\text{m}$ (走査線の 1/2) では、4 板式がハイビジョン規格デジタルサンプルの限界である 1080 TV 本において約 14% の変調度があるのに対して、RGB 方式では 0 となる。

5. 4 板撮像方式カメラの試作

以上の検討を基に、本方式による小型・高性能なハイビジョンカメラの有効性を示すために、カメラを試作した。

5.1 4 分解プリズム

図 4 に、新たに検討した 4 分解プリズムの模式図を示す。入射光のうち、第 1 のダイクロイック面で B 光が反射し、次の面で R 光が反射、それぞれもう一度反射した後、B, R の CCD に導かれる。残った G 光はハーフミラーで 2 分割され、直進する光はそのま

図 4 4 分解プリズムの模式図
Schematic diagram of the four beam splitting system.

ま G_1 CCD に、反射される光はさらにもう一度反射され、 G_2 CCD に到達する。写真 1 に 3 分解プリズムとの比較を示す。試作 4 分解プリズムは 2/3 インチ光学系の規格を満たすように設計されており、3 分解プリズムと比べてわずかに体積、重量が増加しているが、カメラ全体への影響はほとんどない。また、口径を大きくすることは 3 板式に比べて難しくなるが、試作プリズムの F ナンバーは 2.0 であり、実用上は問題ない。

5.2 試作カメラ

試作カメラのブロック図を図 5 に示す。カメラとしての基本的な構成は、RGB 3 板式と同じである。異なる点は、色分解光学系と CCD およびその駆動回路、ヘッドアンプが 1 枚分多いことである。3 板式と重量、体積、消費電力を比べると、それぞれの増加分はカメラ全体で見ると、増えた CCD 1 枚の駆動に要する電力がわずかに影響するほかは、ほとんど影響がない。2 つの G チャンネルを合成した後は、RGB 3

板式と同じ信号処理となる。撮像素子は 2/3 インチの 130 万画素 CCD⁷⁾ である。

表 1 に試作カメラの諸元を示す。感度、 S/N は、撮像素子が大きく入射エネルギーが大きい 1 インチ CCD カメラに及ばないが、十分に実用レベルにある。限界解像度は 1200 TV 本であり、200 万画素 CCD 単体から得られる値を超えている。図 6 に AR の測定結果を計算値と合わせて示す。計算値は、理想レンズ、光学 LPF、CCD のアパーチャ特性を総合して算出した。写真 2 にカメラの外観を示す。大きさ、重量

表 1 試作カメラの諸元
Specifications of the prototype.

撮像方式	4 CCDs, Quad (GGRB)
水平解像度	1200 TV lines
感 度	2000 lx, F 5.0
S/N	52 dB

写真 1 3 分解プリズムと 4 分解プリズム
Three beam splitting system and four beam splitting system.

図 6 AR の測定値と MTF の計算値
Measured amplitude response and calculated MTF.

図 5 試作カメラのブロック図
Block diagram of the prototype.

写真 2 試作カメラの外観
External view of the prototype.

は、2/3 インチ 3 板式カメラとほぼ同等にできることが示された。

5.3 有彩色信号に対する折り返しの測定

本方式が、3 章で述べたように色空間の広い範囲にわたって折り返し妨害の少ないことを検証するために、試作機により測定を行った。折り返しの少なさを示す値として、信号成分と折り返し成分の比、SA (Signal to Alias) 比を導入した。800 TV 本の正弦波パターンを入力として、カメラの輝度信号出力を FFT することにより、画素ずらしが不完全な場合に現れる 600 TV 本の折り返し成分との比を SA 比とした。試作カメラに用いた撮像素子はハイビジョン用 130 万画素 CCD であるので、単一素子の水平ナイキスト周波数は約 700 TV 本となる。空間画素ずらしを行った撮像素系で、単一素子の水平ナイキスト周波数を超える 800 TV 本のパターンを撮像した場合、信号成分の 800 TV 本に対して、単一素子で標準化した時に現れる偽信号 600 TV 本の成分が小さいほど、画素ずらしの効果が大きいといえる。白色光および 6 種類の有彩色光に対する SA 比を測定した。有彩色光は白色光に色フィルタを挿入することにより得た。各フィルタの色度図上の位置を図 7 に示し、得られた SA 比を表 2 に示す。

RGB 方式においては、白色光に対して有彩色信号で SA 比が大きく劣化している。画素ずらし効果の得られるシアン、イエローを除き、いずれも 0 dB 以下となっている。これに対して 4 板式は、R、B 単色を除いて有彩色信号の広い範囲にわたって、折り返し成分が抑圧されている。この結果は、3 章の図 2 で検討した結果と同じ傾向を示している。

5.4 色収差の影響の測定

倍率色収差の影響を評価するために、2 つの方式に

図 7 色フィルタの色度
Chrominance of color filter.

表 2 有彩色信号に対する SA 比 (dB)
Measured SA ratios on chromatic signals.

	白色	シアン	イエロー	マゼンタ	グリーン	ブルー	レッド
4 板	25.0	19.0	16.2	13.8	20.6	6.6	-1.6
RGB	11.8	6.0	6.8	-3.2	-6.0	-4.2	-5.0

表 3 画面中心および周辺での 800 TV 本の AR 測定値 (%)
Measured ARs at the center and peripheries of an image.

	中心	四隅平均	左上	右上	左下	右下
4 板	29.9	17.5	18.6	19.8	12.6	19.0
RGB	30.4	10.8	16.7	7.0	8.3	11.3

ついて、画面の中心と周辺部における 800 TV 本の AR を測定した。結果を表 3 に示す。倍率色収差のない画面中心では双方ともほぼ同じ AR となっているが、周辺部(四隅平均)を中心部と比較すると、RGB 方式が 36% となっているのに対して、4 板方式では 59% と低下が少ない。これは 4 章で検討した結果と一致しており、4 板方式では倍率色収差の影響による周辺部の解像度劣化が少ないことが検証された。

6. む す び

ハイビジョンの普及期における番組制作形態に対応した、小型でかつ高性能なカメラを実現する新たな撮像方式として 4 板撮像方式を提案し、カメラを試作し

た．この方式は，撮像素子の画素数を抑えることにより画素サイズの縮小に伴う撮像性能の劣化を防ぎ，不足する空間サンプル点は素子の枚数で確保しようというものである．試作カメラによって，少ない画素数の素子で高画質な映像を得るために本方式は優れていることを示すことができた．

本方式は，4枚の素子をGに2枚，R，Bにそれぞれ1枚ずつ割り当てている．これにより，RGB方式に比べて色収差の影響を受けにくく，また，広い範囲の有彩色信号に対して折り返しを生じないという特長を持つことを理論的計算により示し，試作カメラを用いた測定により検証した．

最後に，本研究を進めるに当たり，ご指導いただいたNHK放送技術研究所先端制作技術研究部 二宮部長(現同所研究主幹)に深謝いたします．また，ご協力

いただいた関係各位に感謝いたします．

(参 考 文 献)

- 1) 藤田ほか：“デュアルグリーン方式を用いたハイビジョン2/3インチ小型CCDカメラ”，テレビ誌，47，2，pp.203-211(Feb. 1993)
- 2) 山村ほか：“ハイビジョンEFPシステムと応用例”，テレビ学技報，17，7，pp.19-23(Jan. 1992)
- 3) 山中ほか：“3 CCD カラーカメラ方式”，テレビ学技報，ED-395(Sep. 1978)
- 4) 河野ほか：“DUAL-GREEN方式高解像度CCDカラーカメラ”，テレビ大全(1982)
- 5) BTA S-001：“1125/60 高精細度テレビジョン方式スタジオ規格”
- 6) 片桐：“HDテレビジョン用撮影レンズ”，テレビ学技報，14，53，pp.29-34(1990)
- 7) 豊田ほか：“2/3インチ130万画素FIT-CCD撮像素子”，1991年テレビ年次大，2-9(July 1991)

すがわら まさゆき
菅原 正幸 昭和58年，東北大学大学院工学研究科修士課程修了．同年，NHKに入局．神戸放送局を経て，62年より，同放送技術研究所に勤務．固体撮像素子およびハイビジョンカメラの研究に従事．正会員．

みに こうじ
三谷 公二 昭和62年，京都大学大学院修士課程修了．同年，NHKに入局．NHK放送技術研究所勤務．画像処理，カメラシステムの研究に従事．正会員．

さいとう としのり
齋藤 敏紀 平成2年，新潟大学大学院工学研究科修士課程修了．同年，NHKに入局．仙台放送局を経て，平成4年より，同放送技術研究所に勤務．ハイビジョンカメラの研究に従事．正会員．

ふじ た よしひろ
藤田 欣裕 昭和51年，東京大学工学部電気工学科卒業．同年，NHKに入局．大阪放送局を経て，56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．

すえつぎ けいすけ
末次 圭介 平成元年，九州芸術工科大学音響設計学科卒業．同年，松下電器産業(株)に入社．以来，映像音響情報研究所にてハイビジョンカメラの開発に従事．