画素数削減ハイビジョン撮像方式のシミュレーション検討

正会員 降 旗 隆[†], 正会員 東 信 雄[†], 正会員 溝 添 博 樹[†]

Simulation of a High-Definition Camera Using a Pixel-Reduction Method

Takashi Furuhata[†], Nobuo Azuma[†] and Hiroki Mizosoe[†]

Abstract To reduce the size and cost of a consumer-use solid-state high-definition camera, a new image-sensing technology with a pixel reduction method has been studied by simulation. This simulation confirmed that a resolution of more than 700 TV lines can be obtained for horizontal and vertical directions. This high resolution is due to a newly developed color signal-processing algorithm that eliminates the aliasing caused by the use of three 0.43-Mpixel sensors: two sensors to pick up signal G with a pixel-offset arrangement and one sensor to pick up signals B and R with an interleaving arrangement.

1. ま え が き

新しい世代のテレビ放送システムであるハイビジョンは、マルチメディアの進む高度情報化社会のコアとして大きな期待が寄せられている。この潮流でハイビジョンの試験放送が本格化し、市場でのテレビ受像機の低価格化も進んで徐々に普及する兆しを見せている。この普及に弾みをつけるためには、家庭用HD-VTRやHDスチルカメラなどのパッケージメディアが重要な鍵を握っており、これに欠かせないものが家庭用HDカメラである。ハイビジョン用固体撮像カメラとして、現在、130～200万画素クラスのCCDを用いて解像度1000TV本を実現するものが試作され、すでに実用化されたものもあるが^{1)～3)}、一般民生用として展開するためには、その汎用性を高めるためのもうひとつ大きな壁を乗り越えなければならない。

本論文では、固体撮像HDカメラの小型化と低コスト化を実現する上で撮像画素数の削減が有効であることに着目し、これとインタフェースさせるHD-VTRなどのパッケージ系の特性に整合させることによって撮像情報量を最小化し、また、2次元画素ずらし^{4)～7)}とサブサンプリング撮像法を適用して撮像画素数を削減する手法について検討を行った。

その結果、40万画素クラスの固体撮像素子を3板用いる構成で、水平・垂直共に解像度700TV本以上の高精細画像の得られる画素配列法と信号処理のアルゴリズムを明らかにし、シミュレーションによりその画質性能を確認した。

2. パッケージ対応固体撮像カメラの構成

これまでに一般業務用として実用化され、あるいは一般民生用として提案されたカセット式ハイビジョン

キーワード：固体撮像，CCD，画素削減，順次走査，ハイビジョン，シミュレーション

1993年6月30日受付，1993年11月25日最終受付

[†] 株式会社日立製作所 映像メディア研究所(〒244 横浜市戸塚区吉田町292, TEL 045-881-1241)

[†] Image & Media System Laboratory, Hitachi, Ltd. (292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244, Japan)

(a) 原画

(b) 横ストライプ BR 撮像

(c) インタリーブ BR 撮像

写真2 自然画像による画素削減撮像のシミュレーション結果
Simulation pictures of color image using pixel reduction method.
(a) Original picture,
(b) Interpolated picture with horizontal-stripping BR filter,
(c) Interpolated picture with interleaving BR filter.

VTR^{10)~12)}によると、水平解像度 600~700 TV 本、輝度信号帯域にして 16~20 MHz、色信号帯域にして 4~7 MHz の仕様のものが多く、色信号については線順次式が共通して採用されており、この仕様で実用上十分な画質が得られることも報告されている¹³⁾。

これらのパッケージ系を考慮し、その代表的仕様として、ここでは水平解像度 700 TV 本、3 dB 低下の遮断周波数で輝度帯域 20 MHz、色帯域 5 MHz の 4:1:0 色線順次コンポーネント形式を想定し、この仕様を満足する固体撮像カメラについて検討を行った。

有効走査線数 $n_v (=1035)$ のハイビジョン画像で、水平および垂直解像度 700 TV 本以上を得るためには、輝度信号帯域にして 20 MHz 以上が必要であり、その撮像のための標準化周波数に、本シミュレーションで使用した 64.8 MHz を想定すると、水平有効画素数 n_H にして 1670 画素、フレーム有効総画素数 $N (=n_v \times n_H)$ にして 173 万画素が必要となる¹⁴⁾。

本論文では、図 1 に示す撮像システムを想定して、輝度撮像系については、CCD₁ と CCD₂ を図 2 に示す画素配置にして輝度総画素数を 1/2 の 86 万画素に削減し、サブサンプリングに伴う折り返し妨害、インタ

レース化に伴うフリッカ妨害、画素補間に伴う動解像度低下などを改善する手法を明らかにした。

また、色撮像系については、CCD₃ を後述の図 9 に示す画素配置にして色総画素数を 1/4 の 43 万画素に削減させ、線順次形式に適合した撮像を行わせる手法を明らかにした。

3. 輝度撮像系の画素削減

3.1 2 ビーム撮像系の周波数解析

図 2 の撮像系で輝度情報は、ライン数 $L (=n_v/2)$ 、水平有効画素数 $n_h (=n_H/2)$ の 2 つの CCD を水平方向に 1/2 画素ピッチ ($a/2n_h$)、垂直方向に 1/2 ラインピッチ ($b/2L$) ずらして配置して緑色 G 信号(あるいは輝度 Y 信号)として 2 板同時に撮像(2 ビーム撮像)される。ここで、次式で表せる 2 次元画像

$$f(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right) \right\} \quad (1)$$

を CCD₁ と CCD₂ それぞれで、ライン周波数 f_H 、フィールド周波数 f_V 、サンプリング周波数 $f_0 (=1/T)$ で順次走査撮像⁸⁾して得られる信号を $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$ とすると、そのフーリエ変換は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} G_1(f) &= \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - hf_0) \\ G_2(f) &= \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^h (-1)^m A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - hf_0) \end{aligned} \quad (2)$$

2 ビームで順次撮像したこの 2 つの信号をフィールド周期 T_V で交互に切換えてインタレース走査変換した信号 $g_w(t)$ のフーリエ変換は、フレーム周波数を f_p として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} G_w(f) &= \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \{ 1 + (-1)^h (-1)^i (-1)^m \} C_i A_{mn} \\ &\quad \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - if_p - hf_0) \end{aligned} \quad (3)$$

図 1 画素削減固体撮像系の構成
Structure of HD camera using pixel reduction method.

図 2 CCD 2 板による 2 ビーム撮像系
Image-sensing system using two-beam subsampling.

$$C_i = \begin{cases} \frac{1}{2} & \dots i=0 \\ \frac{(-1)^k}{(2k+1)\pi} & \dots i=2k+1 \end{cases}$$

これより、基本波成分として次式が得られ、

(1) $h=0, i=0, m=2l$ のとき

$$G_{00}(f) = \frac{1}{T} \sum_m \sum_n A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V) \quad (4)$$

(2) $h=0, i=2k+1, m=2l+1$ のとき

$$G_{01}(f) = \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_p) \quad (5)$$

また、 f_0 による折り返し成分として次式が得られる。

(3) $h=1, i=0, m=2l+1$ のとき

$$G_{10}(f) = \frac{1}{T} \sum_m \sum_n A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - f_0) \quad (6)$$

(4) $h=1, i=2k+1, m=2l$ のとき

$$G_{11}(f) = \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_p - f_0) \quad (7)$$

この $G_w(f)$ の周波数スペクトルを図3に示す。ここで、周波数軸の上側に基本波成分を、下側に折り返し成分を示す。これより G_{00} と G_{01} 、および G_{10} と G_{11} が周波数インタリーブされる。

一方、上記(2)式の2ビーム撮像信号を加算平均した信号 $g_a(t) = \{g_1(t) + g_2(t)\}/2$ のフーリエ変換は

$$G_a(f) = \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{1 + (-1)^h (-1)^m\} \frac{1}{2} A_{mn} \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - hf_0) \quad (8)$$

で与えられ、これより基本波成分 G_{a0} と折り返し成分 G_{a1} が次式で与えられる。

$$G_{a0}(f) = G_{00}(f), \quad G_{a1}(f) = G_{10}(f) \quad (9)$$

以上から G_{00} と G_{10} 、および G_{01} と G_{11} が周波数インタリーブ関係になる条件(図3の状態)が設定でき

ば、基本波成分と折り返し成分の分離が可能となり、2ビーム加算平均信号 $G_a(f)$ を用いて、インタレース信号 $G_w(f)$ から折り返し妨害を除去することができる。その条件は、サンプリング周波数 f_0 をフレーム周波数 f_p の奇数倍に設定することである。

これは、撮像系のサンプリング位相をフィールド間でオフセットさせることに他ならない。

同様に、従来の1ビームによるインタレース撮像方式(CCD₁とCCD₂を同一の走査線上に配置し、 $2L$ =奇数としてフィールド交互に撮像する方式)で、サブサンプリングによる折り返しが除去できる条件を求めると、フレーム間でサンプリング位相をオフセットさせることである。また、1ビームによる倍速順次撮像方式($2L$ =偶数としてライン交互に撮像する方式)では、フィールド間でサンプリング位相をオフセットさせることである。

しかし、画素配置の固定された固体撮像系では、フィールド間あるいはフレーム間で、素子を水平方向に1/2画素ピッチ摂動させてサンプリング位相をオフセットさせるような手法⁹⁾を除けば、上記の条件はいずれの場合も、全画素数 N のうちフィールドあるいはフレーム毎に $N/2$ の画素を交互にその全画素 N を撮像しなければならないことを意味し、画素数を削減する条件とは相容れないことがわかる。

3.2 輝度撮像系の画素補間

以上の検討から、画素配置の固定された固体撮像系では、サンプリング周波数 f_0 はフレーム周波数 f_p の偶数倍に設定される。これより、画素削減によりサブサンプリングを行うと、折り返し妨害を免れることはできないから、画素補間によってその影響を最小限にとどめるようなアルゴリズムの確立が不可欠となる。

図2の撮像系で、撮像されなかった画素をそれに隣接する上下ラインの撮像された画素の加算平均値で補間した場合を考えると、CCD₁の撮像信号 $g_1(t)$ に

図3 2ビーム撮像インタレース走査変換 $G_w(f)$ の周波数スペクトル
Frequency spectrum of two-beam sensing signal with interlace-scanning: $G_w(f)$.

CCD₂の画素で補間した信号 $g_{s1}(t)$ は

$$g_{s1}(t) = [g_1(t) + \{g_2(t + T_H/2) + g_2(t - T_H/2)\}/2]/2 \quad (10)$$

与えられ、CCD₂の撮像信号 $g_2(t)$ に CCD₁の画素で補間した信号 $g_{s2}(t)$ は次式で与えられる。

$$g_{s2}(t) = [g_2(t) + \{g_1(t + T_H/2) + g_1(t - T_H/2)\}/2]/2 \quad (11)$$

次に、この2つの補間された信号をフィールド周期で交互に切り換えてインタレース変換した信号 $h_w(t)$ のフーリエ変換は、次式で与えられる。

$$H_w(f) = \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} [1 + (-1)^h (-1)^i (-1)^m + \{(-1)^i + (-1)^h (-1)^m\} \cdot \cos(\pi f T_H)] C_i A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - if_p - hf_0) \quad (12)$$

これより、基本波成分として、

(1) $h=0, i=0, m=2l$ のとき

$$H_{00}(f) = \frac{1}{T} \sum_m \sum_n \cos^2(\pi f T_H/2) A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V) \quad (13)$$

(2) $h=0, i=2k+1, m=2l+1$ のとき

$$H_{01}(f) = \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \sin^2(\pi f T_H/2) \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_p) \quad (14)$$

また、折り返し成分として

(3) $h=1, i=0, m=2l+1$ のとき

$$H_{10}(f) = \frac{1}{T} \sum_m \sum_n \cos^2(\pi f T_H/2) A_{mn} \delta(f - mf_H - nf_V - f_0) \quad (15)$$

(4) $h=1, i=2k+1, m=2l$ のとき

$$H_{11}(f) = \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \sin^2(\pi f T_H/2) \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_p - f_0) \quad (16)$$

が得られる。この $H_w(f)$ のスペクトルを図4に示す。これより、画素補間によって折り返し成分 G_{10}, G_{11}

図4 上下ライン加算平均補間 $H_w(f)$ の周波数スペクトル
Frequency spectrum of interpolated signal: $H_w(f)$.

図5 インタレース走査変換の2次元スペクトル
Spectrum of interlace-scanning signal in temporal-vertical frequency domain.

は H_{10}, H_{11} に抑圧されるものの完全には除去しきれず、水平・垂直の高域(画像の斜め輪郭部)で折り返し妨害が残る。また基本波に対しては、自乗余弦、自乗正弦の振幅項が作用して垂直解像度を若干低下させるが、水平解像度の低下はない。したがって、輝度系に必要な総画素数を173万画素とすると、以上の画素削減撮像により、その1/4の43万画素のCCDを2板用いる構成で、水平解像度700TV本以上が達成可能となる。なお、上記の画素補間はすべて、2ビーム撮像によって同時にフィールド内撮像された画素を基に処理されるため、動解像度を低下させることはない。

次に、インタレース信号 $h_w(t)$ の時間周波数 λ ・垂直空間周波数 ν の2次元スペクトルを図5に示す。

これより、 $\theta = \pi\nu/n_v$ として、図5の標本点●に対しては、垂直方向に $\cos^2\theta$ の帯域制限が作用し垂直方向のレスポンスが低下するが、標本点○に対しては、 $\sin^2\theta$ の帯域制限が作用し、インタレース変換に伴って $(f_p, 0)$ に折り返るフリッカ成分を抑圧させる効果がある。

3.3 画素ずれの影響

(1) 水平方向の画素ずれ

以上の解析は、2つのCCDの2次元的な(水平・垂直両方向の)画素ずらしの精度が充分とれた場合を想定したものであるが、その取り付け精度が悪く画素ず

図 6 水平画素ずれを生じた $H_w(f)$ の周波数スペクトル
Frequency spectrum of interpolated signal with horizontal pixel-offset $\Delta_H : H_w(f)$.

れが残ると、新たなスプリアスを発生する問題がある。

ここで、CCD 間の水平方向の取り付け誤差 Δ_H を、サンプリング周期 T に対する時間的オフセット量 τ を用いて $\Delta_H = \tau/T$ で定義し、CCD₁ に対し CCD₂ が正規位置より水平方向に Δ_H ずれて取り付けられたとする。

この水平画素ずれ Δ_H を生じた 2 つの CCD で互いに補間されて得られる次式の 2 つの信号

$$\begin{aligned} g_{s1}'(t) &= [g_1(t) + \{g_2(t + T_H/2 - \tau) + g_2(t - T_H/2 - \tau)\}/2] \\ g_{s2}'(t) &= [g_2(t - \tau) + \{g_1(t + T_H/2) + g_1(t - T_H/2)\}/2] \end{aligned} \quad (17)$$

をフィールド交互に切り換えてインタレース変換した信号 $h_w(t)$ のフーリエ変換は、 $\xi = -j2\pi\Delta_H$ として、上記(12)式に代わって次式で与えられる。

$$\begin{aligned} H_w(f) &= \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} [1 \\ &\quad + (-1)^h (-1)^i (-1)^m \exp(h\xi) \\ &\quad + \{(-1)^i + (-1)^h (-1)^m \\ &\quad \cdot \exp(h\xi)\} \cos(\pi f T_H)] C_i A_{mn} \\ &\quad \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - if_P - hf_0) \end{aligned} \quad (18)$$

これより、基本波成分は何ら変化せず上記(13)、(14)式で与えられるが、折り返し成分は次式に示すように $\cos(\pi\Delta_H)$ の振幅項によって若干抑圧される。

$$\begin{aligned} H'_{10}(f) &= \frac{1}{T} \sum_m \sum_n \cos(\pi\Delta_H) \cos^2(\pi f T_H/2) A_{mn} \\ &\quad \cdot \exp(\xi/2) \delta(f - mf_H - nf_V - f_0) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} H'_{11}(f) &= \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \cos(\pi\Delta_H) \sin^2(\pi f T_H/2) \\ &\quad \cdot \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \\ &\quad \cdot \exp(\xi/2) \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_P - f_0) \end{aligned} \quad (20)$$

しかし、同時に次の新たなスプリアスが発生する。

(a) $h=1, i=0, m=2l$ のとき

$$\begin{aligned} H''_{10}(f) &= \frac{1}{T} \sum_m \sum_n \sin(\pi\Delta_H) \cos^2(\pi f T_H/2) A_{mn} \\ &\quad \cdot j \exp(\xi/2) \delta(f - mf_H - nf_V - f_0) \end{aligned} \quad (21)$$

(b) $h=1, i=2k+1, m=2l+1$ のとき

$$\begin{aligned} H''_{11}(f) &= \frac{1}{T} \sum_k \sum_m \sum_n \sin(\pi\Delta_H) \sin^2(\pi f T_H/2) \\ &\quad \cdot \frac{2(-1)^k}{(2k+1)\pi} A_{mn} \\ &\quad \cdot j \exp(\xi/2) \delta(f - mf_H - nf_V - (2k+1)f_P - f_0) \end{aligned} \quad (22)$$

以上の $H_w(f)$ のスペクトルを $\Delta_H = 0.2$ の場合を例に図 6 に示す。このように、水平画素ずれ Δ_H を生ずると、画素補間による妨害の抑圧作用が低下し、基本波が $\sin(\pi\Delta_H)$ の重みをもってスプリアスとして折り返る。その D/U は、基本波成分とスプリアス成分の比で定義して、次式で与えられ、これより求まる水平画素ずれ Δ_H と D/U の関係を図 7 に示す。

$$\begin{aligned} \left| \frac{H_{00}(f)}{H''_{10}(f)} \right| &= \left| \frac{H_{01}(f)}{H''_{11}(f)} \right| = \frac{1}{\sin(\pi\Delta_H)} \\ D/U &= -20 \log[\sin(\pi\Delta_H)] \quad \text{dB(p-p/p-p)} \end{aligned} \quad (23)$$

図 7 水平画素ずれと D/U
 D/U ratio vs. horizontal pixel-offset Δ_H .

図 8 垂直画素ずれを生じた $H_w(f)$ の周波数スペクトル
Frequency spectrum of interpolated signal with vertical pixel-offset Δv : $H_w(f)$.

(2) 垂直方向の画素ずれ

同様に CCD 間の垂直方向の取り付け誤差 Δv を、ライン間隔 b/L と垂直位置ずれ量 d を用いて、 $\Delta v = d/(b/L)$ で定義し、CCD₁ に対し CCD₂ が正規位置より垂直方向に Δv ずれて取り付けられたとすると、 $\xi = -j2\pi\Delta v/L$ として、上記(18)式で $h\zeta \rightarrow n\xi$ を代入すると次式が得られる。

$$H_w(f) = \frac{1}{T} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \cdot [1 + (-1)^h (-1)^i (-1)^m \exp(n\xi) + \{(-1)^i + (-1)^h (-1)^m \exp(n\xi)\} \cdot \cos(\pi f T_H)] C_i A_{mn} \cdot \delta(f - mf_H - nf_V - if_P - hf_0) \quad (24)$$

垂直画素ずれ $\Delta v = 0.2$ を生じた場合の $H_w(f)$ のスペクトルを図 8 に示す。これより、上記の補間方法を用いる限りでは、垂直方向の画素ずれは、水平方向のそれより影響が軽減されることがわかる。

4. 色撮像系の画素削減

4.1 色撮像系の画素配列

4:1:0 線順次コンポーネント方式では、その情報量から P_B , P_R の色撮像系の総画素数を輝度総画素数の 1/4 の 43 万画素まで削減可能である。

しかし、図 1 の構成で色撮像系に光学フィルタによる帯域制限を用いないで輝度系と同じ広帯域の光学系を適用すると、サブサンプリングに伴う折り返しの他に、色線順次化に伴うスプリアスの発生が大きな問題となる。図 1 の青色 B 信号と赤色 R 信号撮像用の CCD₃ に用いる BR 色フィルタの画素配列とその水平 μ -垂直 ν の 2 次元スペクトルを $a_0 = a/n_h$, $b_0 = b/L$ として図 9 に示す。これより、(a) の横ストライプ配列は、線順次化の走査線構造と整合性は良いが、線順次化に伴う垂直方向の折り返し妨害が最も大きく、ま

た(b)の縦ストライプ配列では、サブサンプリングに伴う水平方向の折り返しが最も大きい。これに対し、(c)のインタリーブ配列では、折り返しを与える隣接標本点との距離を最も大きくとることができ、スプリアスの影響を最も小さくできる。

4.2 カラー撮像の信号処理

以上の手法に基づき、40 万画素クラス CCD を 2 板用いる 2 次元画素ずらしの G 撮像系と、同 CCD を 1 板用いるインタリーブ配列の BR 撮像系で画素削減されて撮像された G, B, R 信号より、4:1:0 線順次

図 9 BR 色フィルタの配列と 2 次元スペクトル
BR filter arrangements and spectra in horizontal-vertical frequency domain.
(a) Horizontal striping, (b) Vertical striping, (c) Interleaving arrangement.

コンポーネント形式で出力する信号処理アルゴリズムの概要を図 10 に示す。

GBR 撮像方式の場合、輝度情報に関し、 $Y_{i,j}$ と $Y'_{i,j}$ をそれぞれ第 1 および第 2 フィールドの i ラインの j 番目の画素として、次式のマトリクス演算が行われる。なお、下線部は、 G の画素に対し、空間的に一致して撮像される B , R の画素の真値を示す。

$$Y_{i,j} = \alpha \underline{G_{i,j}} + \beta \underline{B_{i,j}} + \gamma \underline{R_{i,j}} \quad \alpha = 0.7154$$

$$Y_{i+1,j} = \alpha \underline{G_{i+1,j}} + \beta \underline{B_{i+1,j}} + \gamma \underline{R_{i+1,j}} \quad \beta = 0.0721$$

$$Y'_{i,j+1} = \alpha \underline{G'_{i,j+1}} + \beta \underline{B_{i,j}} + \gamma \underline{R_{i,j}} \quad \gamma = 0.2125$$

$$Y'_{i+1,j+1} = \alpha \underline{G'_{i+1,j+1}} + \beta \underline{B_{i+1,j}} + \gamma \underline{R_{i+1,j}} \quad (25)$$

ただし、

$$R_{i,j} = (R_{i-1,j} + R_{i+1,j} + R_{i,j-2} + R_{i,j+2})/4$$

$$B_{i+1,j} = (B_{i,j} + B_{i+2,j} + B_{i+1,j-2} + B_{i+1,j+2})/4$$

5. シミュレーションによる画質評価

以上の画素削減撮像方式を実際に視覚評価するため

に、次のパラメータを設定し、

マスターサンプリング周波数： $f_s = 64.8$ MHz

フレーム総画素数： $1125(V) \times 1920(H) = 2.16$

Mpixel

映像帯域 (3 dB 低下遮断周波数)： $f_c = 20$ MHz

の原画像に対し、

サブサンプリング周波数： $f_0 = 32.4$ MHz

有効走査線数： $n_v = 1035$

水平有効画素数： $n_H = 1670$

有効総画素数： $N = 1.73$ Mpixel

とし、図 1 で $N/4 = 43$ 万画素の CCD を 3 板用いる構成を想定し、図 10 の信号処理アルゴリズムに基づきシミュレーションによって画質評価検討を行った。

輝度系の画素削減で得られたモノスコパターン (の部分拡大) を写真 1 に、その解像度を表 1 に示す。

(a) の原画 ($G/B/R = 4:4:4$) では、インタレース走査に伴うフリッカ妨害が検知されるのに対し、画素削減した (b) の YBR 撮像 ($Y_1 - Y_2/B/R = 4:1:0$)、

図 10 カラー撮像信号処理のアルゴリズム
Algorithm of color signal processing.

(a) 原画

(b) VBR 撮像, 上下補間

(c) GBR 撮像, 上下補間

写真1 モノスコパターンによる画素削減撮像のシミュレーション結果

Simulation pictures of monoscope pattern using pixel reduction method.

(a) Original picture, (b) interpolated picture after YBR sensing, (c) interpolated picture after GBR sensing.

表1 画素削減撮像方式の解像度

Horizontal and vertical resolutions obtained by pixel reduction method.

画素削減撮像方式 (有効総画素数)	画素補間方式	解像度 (TV 本)	
		水平解像度	垂直解像度
G/B/R=4:4:4 (3×1.73 Mpixel)	原画	710	750 (~950)
Y ₁ -Y ₂ /B/R=4:1:0 (3×0.43 Mpixel)	隣接する左右の 画素で平均補間	650	750 (~950)
G ₁ -G ₂ /B/R=4:1:0 (3×0.43 Mpixel)	隣接する上下の ラインの画素で 平均補間	710	750
		700	700

(注) カッコ内はラインフリッカが検知される状態の限界解像度。

写真3 くさび画像による水平画素ずれのシミュレーション結果

Effect of horizontal pixel-offset on wedge-shaped image.

と(c)のGBR撮像($G_1-G_2/B/R=4:1:0$)では、上下画素補間を用いることにより、斜め方向でスプリアスが検知されるものの、ラインフリッカは除去され、水平・垂直共にバランス良く解像度700TV本以上が得られている。特にフリッカ妨害が除去されるため、静止画としては視覚的に最も安定感が得られている。

次に、カラー画像として自然画像のシミュレーションで得られた結果(部分拡大)を写真2(61ページに掲載)に示す。

(a)の原画に対し、横ストライプ配列のBRフィルタを用いた(b)では、線順次化に伴う垂直方向の折り返し妨害(低域に折り返る偽色)が顕著であり、その除去には、BR撮像系に専用の光学フィルタが不可欠となる。これに対し、インタリーブ配列を用いた(c)では、線順次化の帯域制限に起因する垂直方向の色のにじみが認められる程度で、光学フィルタを用いずともスプリアスが大幅に軽減され、実用に供し得るレベル

の画質が得られている。

写真3は、上記の画素ずれの影響を視覚できるように、シミュレーションで数値計算によって等価的な画素ずれを起こさせて得られたくさび画像を示す。これより、水平画素ずれの検知限は、 $\Delta_H=0.1$ 程度（許容限にして0.2以上）であり、図7の D/U で約10 dBp-p/p-pである。

6. む す び

固体撮像 HD カメラの小型化、低コスト化実現の一手法として、輝度撮像に2次元画素ずらしとサブサンプリングを適用して2ビームで順次走査撮像する方法を用い、色撮像にはインタリーブ形式の画素配列を用いて、撮像総画素数を1/2以下に削減する手法について、シミュレーションによる検討を行った。その画質評価により、画素削減に伴うスプリアスを低減するための信号処理アルゴリズムを構築し、水平・垂直共に700 TV本以上の高精細のカラー撮像系が実現可能であることを確認した。この2ビームによるフィールド内処理のインタレース撮像方式は、フリッカ妨害を除去できる副次的作用があり、フィールド間処理の必要となる1ビームインタレース撮像方式と比較して、動解像度の低下を防止でき、フィールド内処理の1ビーム倍速順次撮像方式と比較して、素子の動作速度を抑えることができ省力化に有利である。

以上の手法は、アナログに限らず、デジタル記録のパッケージシステムとも整合性が良く、共通して応用展開が可能である。

最後に、本研究を進める上で日頃ご指導頂く関係各位に深く感謝致します。

〔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) 川島ほか：“HDTV カメラ用1インチ150万画素IT-CCD撮像素子”，テレビ誌，47，2，pp.212-218 (Feb. 1993)
- 3) 中島ほか：“1インチ200万画素CMDイメージセンサ”，テレビ誌，47，2，pp.219-225 (Feb. 1993)
- 4) 山中ほか：“3 CCD カラーカメラの方式”，テレビ誌，33，7，pp.516-522 (July 1979)
- 5) 高橋ほか：“補間画素配置を用いた高解像度 MOS 型撮像素子”，テレビ誌，37，10，pp.812-818 (Oct. 1983)
- 6) 吉田ほか：“固体撮像素子の2次元ナイキスト限界とMTF”，テレビ誌，37，10，pp.819-825 (Oct. 1983)
- 7) 斉藤ほか：“2枚のNTSC用CCDによる倍走査線画像入力実験”，テレビ学技報，17，6，IPU 93-3，pp.15-20 (Jan. 1993)
- 8) 石上ほか：“1/2インチ38万画素全画素読み出し方式CCD撮像素子”，テレビ学技報，17，16，IPU 93-14，CE 93-13，pp.39-44 (Mar. 1993)
- 9) 原田ほか：“スウィング CCD イメージセンサー”，テレビ誌，37，10，pp.826-832 (Oct. 1983)
- 10) 大場：“新しいハイビジョンVTR-1/2インチカセット型UNIHI-”，NHK 技研 R & D，6 (Aug. 1989)
- 11) T. Furuhashi, et al.: “A 1/2-in. High-definition VCR using a Single-Channel Analog Baseband Recording Method”，SMPTE J., 101, 2, pp.76-82 (Feb. 1992)
- 12) 山下ほか：“民生用ハイビジョンVTR仕様”，テレビ学技報，15，50，VIR 91-33，pp.1-12 (Sep. 1991)
- 13) 竹田ほか：“広帯域映像信号の磁気記録における S/N改善検討”，テレビ誌，46，10，pp.1262-1269 (Oct. 1993)
- 14) 溝添ほか：“画素数削減高精細カメラの基礎検討”，テレビ学技報，17，51，IPU 93-40，pp.1-6 (Sep. 1993)

ふるはた たかし
降旗 隆 昭和44年、東京工業大学理工学部電子物理工学科卒業。同年、(株)日立製作所に入社。同社映像メディア研究所に勤務し、現在に至る。自動制御、磁気記録、画像信号処理、ビデオ関連機器の研究開発に従事。工学博士。正会員。

あずま のぶお
東 信雄 昭和49年、名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年、(株)日立製作所に入社。同社映像メディア研究所にてビデオ関連機器の研究開発に従事。現在、同社知的所有権本部で特許関係の業務に従事。正会員。

みづたに ひろき
溝添 博樹 平成3年、京都大学理学部細胞生物学教室卒業。同年、(株)日立製作所に入社。同社映像メディア研究所に勤務し、現在に至る。ビデオ関連機器の研究開発に従事。正会員。