3 CCD カラーカメラの一方式

ソニー株式会社 厚木工場半導体事業部

山 中 成 介
山 崎 博 司
橋 本 武 夫
阿 部 元 昭
越 智 成 之

インターライン型 CCD を 3 個用いたカラーカメラの試作検討結果の報告を行う。CCD には、センサー電極に透明電極を採用し、埋め込みチャンネル型レジスター、オーバーフロードレインを採用した 226 (H)×492 (V) の絵素を有するものを用い、空間絵素ずらし撮像法によって実用的な解像度を得るカメラを試作した。CCD の特性とレジストレーション、小型化に伴う問題点に関して述べることにしたい。

1. ま え が き

固体カラーカメラの実用化への努力が各方面でなされてきている中で、ソニー株式会社においてもひとつの試みとして 3 CCD カラーカメラの試作検討を行ってきた。現行のテレビジョン規格ののっとり CCD を用いたカラーカメラの実用化を図るには、検討すべき課題が多く、撮像素子、撮像方式および信号処理回路に工夫が必要である。CCD の形式および構造、画面サイズ、絵素数、さらには搭載する機能等を、CCD の設計、製造の観点とカメラシステムの条件から決定し、かつ 3 色色分解により信号を得る機能を 1 チップ上に構成することは、現時点では困難な作業である。そこで、この課題を 3 チップの CCD を用いることを条件にして解決するために、撮像方式およびそれに関係する CCD の性能、駆動条件、レンズおよびプリズムの光学的・機械的性能さらには信号処理上の検討を加え試作を行ってきた。

撮像素子には、感度、特に青感度の向上を図る目的でセンサー電極に透明電極 (SnO₂) を用い、解像度上の問題を解消する目的で埋め込みチャンネル型転送レジスターを用い、ブルーミング抑圧のためのオーバーフロードレインを持ったインターライン構造の CCD を採用した。撮像法には、解像度が現行テレビジョン規格において充分な値となるよう実用解像度の向上を図る目的で、

空間絵素ずらし撮像法を採用して問題点の解消に努めた。また CCD の時空間サンプリング機能を考慮した受光蓄積モードの検討により、時空間サンプリングに基づく残像効果の軽減を図った。さらに、欠陥に基づく白点、黒点を隣接絵素情報でもって置き換える欠陥補償回路を搭載して撮像画質の向上を図り、信号処理回路の検討によって方式の特徴を生かすべく努め、所期の目的を達成することができた。以下、これらの点に触れて記すことにしたい。

2. 撮 像 素 子

2.1 CCDの概要¹⁾

本カラーカメラに用いた撮像素子は、インターライン構造の CCD である。インターライン構造の CCD は、センサー部と転送レジスター部の分離によって、両者の構造に自由度が増す利点を有し、またスミア現象が生じ難く、走査線数に相当する数の独立した絵素の行を設けることができるので、色コーディングにインターレースに基づく制約が加わらない等の特徴がある。反面、センサー部開口率の制約による感度、絵素の空間配列と受光蓄積時間関係に基づく残像現象等、設計上あるいは駆動条件に配慮が必要な点もある。表 1 に CCD の概要を示す。

イメージフォーマットは採用した 2/3 インチ光学系により決まり、絵素数は、有効走査線数、撮像方式、所要解像度、駆動回路条件および CCD のセル構造等から決定される。

¹⁾ "A Three-chip CCD Color Camera" by Seisuke Yamanaka, Hiroshi Yamazaki, Takeo Hashimoto, Motoaki Abe and Shigeyuki Ochi (Semiconductor Division, Tokyo Sony Corporation.)

表 1 CCD の概要
Outline of implemented CCD.

画 素 数	226 (H) × 492 (V)
セルサイズ	36 μm (H) × 13 μm (V)
受 光 面 積	60 μm^2 (開口率 13%)
画面サイズ	2/3 インチ光学系 (8.8 mm (H) × 6.6 mm (V))
チップサイズ	10.3 mm (H) × 9.1 mm (V)
転 送 効 率	99.996%
暗 電 流	2.5 nA/cm ²
量 子 効 率	0.77 ($\lambda=450\text{ nm}$)

垂直転送レジスター

図 1 セルの構成
Cell structure.

図 2 CCD の分光感度特性
Spectral response through the SnO₂
and Poly-silicon electrodes.

セルの構成は、図 1 で示されるものとなっている。センサーは MOS 型で、電極に透明電極 (SnO₂) を採用している。これはポリ Si 電極を用いた場合の短波長領域の吸収による感度劣化の問題解決を図ったもので、図 2²⁾ に見られるように撮像素子としての分光特性上の問題はほとんどない。青色感度は、ポリ Si 電極 (膜厚 150 nm) のものにくらべて約 5 倍の値を得ることができた。

インターライン方式では、ブルーミングは縦線状に現れるので不自然感が大きい。今回試作した撮像素子に

はオーバーフローラインを設けて、センサーから垂直レジスターに流れ出る過剰電荷をあらかじめ吸収することにより、約 20 倍の過剰入射光に対してブルーミング抑圧を行うことができた。

転送レジスターは、垂直、水平とも 2 層オーバーラップ電極を有する埋め込み N チャンネルを採用して転送効率の向上と低雑音化を図った。垂直レジスターのストレージ面積は約 100 μm^2 で、その最大転送電荷量は 2×10^5 エレクトロンである。センサーとレジスターの間のトランスファークラークを表面チャンネルにして、垂直レジスターを転送される電荷がセンサーに逆流しないポテンシャルバリアを設けている。各レジスター電極は酸化膜厚差 (210 nm と 130 nm) をもたせて転送の方向性を得、2 相クロック駆動として回路の負担を軽くした。

出力部は、フローティングディフュージョンアンプを採用した。電荷電圧変換利得は 0.7 μV /エレクトロンであるが、拡散層を自己整合プロセス化することにより、利得は 1.8 μV /エレクトロンに向上できる。

埋め込みチャンネル CCD は、表面が常に空乏化しているため一般に暗電流は大きくなるが、裏面の燐ゲッター導入により、約 2.5 nA/cm² の暗電流が得られた。1 絵素信号中の暗電荷は室温で約 500 エレクトロンであり、飽和電荷量の 0.25% に相当する。

また、埋め込みチャンネル型転送により高転送効果が得られたので、イメージ端にアルミニウムで覆った 8 列のセンサーを設けて各水平掃線期間に安定した光学的黒基準信号を得て、信号処理における基準レベルとした。

結晶やリソグラフィの欠陥により、画面には異常なパターンが生じるが、相関性のないセンサーの欠陥 (白点、および黒点) は、図 3 に示す欠陥補償回路³⁾で補償される。クロックあるいはレジスターに欠陥があると、横あるいは縦の線として画面に現れるので致命的となる。暗電流とともに、これらの欠陥をなくすプロセス技術の開発が CCD 実用化の鍵である。

2.2 CCD の受光蓄積モード

図 3 欠陥補償回路
Block diagram of defect compensator.

図4 インターライン構造の受光蓄積モード

Two integration modes of interline transfer organization.

(a) frame integration mode, (b) field integration mode.

フレーム転送型 CCD は1フィールド時間ごとに全絵素の電荷を読み出す。この場合、インターレースはフィールドごとに垂直方向の隣接する絵素の異なる対の絵素の電荷を混合し、受光中心が絵素ピッチだけ異なるようにして達成される。このモードでは、1つの絵素における受光蓄積時間は1フィールド時間なので、フィールド蓄積モードと名づける。

一方、インターライン構造の CCD では通常1フィールド時間に半数の絵素の電荷を読み出し、次のフィールドでインターレース対となる残りの半数の絵素の電荷を読み出す。このモードのとき1つの絵素における受光蓄積時間は1フレーム時間なので、フレーム蓄積モードと名づける。しかし、インターライン構造の CCD においても特殊用途にフィールド蓄積モードが使われることもある⁴⁾。両モードを模式的に図4に示す。

本カラーカメラでは、この両モードの時空間スペクトル理論⁵⁾および実験による比較検討を行い、フィールド蓄積モードの特徴を生かすものにした。フレーム蓄積モードとの比較によるフィールド蓄積モードの特徴は次の結果となる。

フィールド蓄積モードの長所

- (1) センサーの取り扱い電荷量が2倍になり、ダイナミックレンジが改善され、信号対雑音比が改善される可能性がある。
- (2) 取り扱い電荷量一定とすれば、センサー電極の電圧を下げるので、暗電流が減る。
- (3) 全絵素の電荷を1フィールドごとに読み出すとすれば、フィールドごとに読み出すセンサーと読み出さないセンサーとの区別が不要なので、センサーからの読み出しゲートの選択的な障壁は不要になる。
- (4) 全絵素の電荷を1フィールドごとに読み出すとすれば、センサー部に選択的な井戸を作っておく必要がない。

(5) 2フィールド時間蓄積による等価残像が出ない。

(6) 被写体の垂直方向に変化する成分が、インターレースによって時間成分を伴って出力されフリッカーとなる現象が起こり難い。

(7) 開口効果により、垂直方向サンプリングによる偽信号が減る。

フィールド蓄積モードの短所

(1) 開口効果により、垂直方向の変調度が下がる。

この変調度の低下が画質に与える影響は少ないものであるから、フィールド蓄積モードによる CCD の駆動は CCD の設計、再生画質両面に利点が生ずることになる。

3. 撮 像 方 法

3.1 空間絵素ざらし撮像法

従来から、単管カラーカメラにおける色コーディング法において、色フィルターによる空間サンプリングによって基底帯域信号と側波帯信号の重なり現象が見られる方法が実用に供せられてきている。この輝度信号に対する影響は、輝度信号として用いる基底帯域信号とそれに混入する側波帯信号とのレベル比によって決まるが、無彩色時には側波帯信号が発生しない方法を採用すると、側波帯信号レベルが大きくなる色の被写体を撮るときにこの影響が最も大きくなるが、一般に、

(1) 被写体には低飽和度のものが多い。

(2) 飽和度の高い場合にも、画像のエッジ部等、高周波数のエネルギーが集中する領域のみに妨害となって現れるから、大面積、高彩度領域への影響は比較的少ない。

等から、実害は少ないと考えられてきている。

離散的な有限個の絵素によって空間サンプリングを行う CCD において、上述の経験的事実を生かし、輝度信号帯域を、制限条件があるものの、等価的に伸張させる効果をねらったものが、空間絵素ざらし撮像法である。この効果は、複数の CCD を用いることによって、輝度信号帯域を等価的に2倍に伸張することができる点にあり、絵素数が不十分な場合には、直接的に、例えば水平方向輝度信号帯域の伸張に、また充分な場合にも、そのレスポンス改善に利用することができる。

側波帯信号を抑圧する条件は、本方式の場合、次式で表わされる。

$$\cos\left(2\pi\frac{x_{12}}{X}\right) = \frac{E_3^2 - E_1^2 - E_2^2}{2E_1E_2} \quad (1)$$

図 5 空間絵素ずらし撮像法の例
Two conditions of spatially offsetting
imaging technique.

$$\cos\left(2\pi\frac{x_{13}}{X}-\pi\right)=\frac{E_3^2+E_1^2-E_2^2}{2E_1E_3} \quad (2)$$

x_{1i} : CCD 1 と CCD i との間のずれ

($i=2, 3$)

X : 絵素周期

E_i : 輝度信号を合成する際の信号レベル

($i=1\sim 3$)

(i) $E_1=E_2=E_3$ のとき

この状態は、図 5(a)に示される。空間絵素ずらしの量は、

$$x_{12}=\frac{1}{3}X, \quad x_{13}=\frac{2}{3}X$$

となる。

(ii) $E_1/0.5=E_2/0.33=E_3/0.17$ のとき

この状態は図 5(b)に示される。空間絵素ずらしの量は、

$$x_{12}=\frac{1}{2}X, \quad x_{13}=\frac{1}{2}X$$

となる。

輝度信号と 2 つの色差信号の伝送を行う現行のテレビシステムにおいては、輝度チャンネルの輝度信号の赤、緑および青の合成比の規格値からの逸脱や補正の量、

信号の扱い方等からくる誤差は、色差チャンネルに含まれる輝度成分が規格を満たすものである限り輝度再現誤差としてのみ再生され、これは色再現誤差と比較して許容度が大きく、(ii)の条件で全帯域にわたる絵素ずらし効果を得ることができる⁶⁾。また輝度信号の高周波数成分の合成比にはさらに自由度があるため、(i)の条件で高域成分のみに空間絵素ずらし効果を取り入れることも考えられる³⁾。

この撮像法においては、CCD のレジストレーションが精密に行われる必要がある。一般に、3 管カラーカメラの画面中央の垂直レジストレーションは、画面高の 0.1% 以下にする必要があるとされているが、これは、2/3 インチサイズの場合約 $7\mu\text{m}$ の精度を要するというものであり、3 CCD カラーカメラの場合にも、これと同等あるいはそれ以上の精度にする必要がある。一方、水平方向は、絵素ずらし効果を得るために可能な限り合致させる必要があり、絵素ピッチによって絶対精度は異なるが、垂直方向と同等以上の精度が要求される。

3.2 信号処理によるレジストレーション誤差の補正

従来から固体撮像素子を複数枚用いたカメラにおいては、機械的手段によるレジストレーションの方法のみの検討に終る嫌いがあったが、ここでは本方式の効果を生かすために検討した、信号処理によるレジストレーション誤差の補正法について記すことにしたい。

CCD の出力信号は、PAM された信号であり、1 次元表示すると近似的に次式で表わすことができる。

$$E_i(t)=E_i(P)\left[\cos\left\{2\pi Pt+2\pi\left(\frac{x_{1i}}{X}-\frac{t_{1i}}{T}\right)TP\right\}+\cos\left\{2\pi\left(\frac{1}{T}-P\right)t-2\pi\left(\frac{x_{1i}}{X}-\frac{t_{1i}}{T}\right)TP-2\pi\frac{t_{1i}}{T}\right\}+\dots\right] \quad (3)$$

E_i : 絵素開口効果およびレベルを含めた係数 ($i=1\sim 3$)

P : 被写体の繰り返し周波数

x_{1i}, X : (1)式および(2)式におけると同じ

t_{1i} : 信号合成時における CCD 1 と CCD i との時間差 ($i=2, 3$)

T : 絵素周期に対応する読出し時間周期

ただし、ここではサンプルホールド効果によるローパス特性は省略してある。

(3)式のかっこ内第 1 項は基底帯域信号成分で、第 2 項は搬送波の基本波のまわりに発生する側波帯信号の下側波帯成分である。

(1) (3)式において $x_{1i}/X=t_{1i}/T$ とすると下側波帯成分は、

$$E_i \cos \left\{ 2\pi \left(\frac{1}{T} - P \right) t - 2\pi \frac{t_{1i}}{T} \right\}$$

となり、これを抑圧する条件は(1)式および(2)式から見出すことができる。つまり側波帯成分の抑圧は、CCDのレジストレーションに対応する時間差の関係をつくり、適当な合成比で輝度信号を作成することで実現できるわけで、先の(i)および(ii)の条件もこの範疇に属するものである。しかしながらベクトル和が零になる条件から逸脱すると成り立たなくなるのは明らかである。

(2) 基底帯域信号の遅延時間誤差は、 $x_{1i}/X = t_{1i}/T$ を満たさない限り生じるが、3つの基底帯域信号の合成によって作成される輝度信号の周波数特性の劣化が許容される範囲では問題はない。そこで特定の周波数 $P = P_0$ のときに側波帯信号成分を抑圧することによって、周波数 P_0 を中心とする一定の帯域の撮像画質の品質を上げることができる。この場合、側波帯の位相 $2\pi \{ TP_0 x_{1i}/X + (1 - TP_0) t_{1i}/T \}$ と E_i が(1)式および(2)式を満たせば良い。 $P_0 = 1/(2T)$ とすれば効果は出ると期待される。

(3) (3)式において $x_{1i}/X = t_{1i}/T$ のとき、基底帯域信号間の遅延時間誤差はない。このとき、基底帯域信号と側波帯成分の $1/T$ までの帯域の信号は、

$$E_i(t) = E_i \left[\cos \{ 2\pi P t \} + \cos \left\{ 2\pi \left(\frac{1}{T} - P \right) t - 2\pi \frac{t_{1i}}{T} \right\} \right] \quad (4)$$

となる。(4)式における基本波成分と側波帯信号は、二重平衡変調回路を通すと入れ換わる。つまり、二重平衡変調回路の出力の $1/T$ までの信号は、

$$E_i(t) = E_i \left[\cos \left\{ 2\pi P t - 2\pi \left(\frac{t_i - t_{1i}}{T} \right) \right\} + \cos \left\{ 2\pi \left(\frac{1}{T} - P \right) t - 2\pi \frac{t_i}{T} \right\} \right] \quad (5)$$

t_i : 二重平衡変調器の搬送波の基準点からの時間差

となる。(5)式における側波帯信号の位相は、空間ずらしにはまったく関係なく信号処理回路にて与えたもので、抑圧の条件式(1)および(2)式を満たすようにすることができるのは明らかである。つまり、この手法を用いると機械的な空間ずらし量に対応した時間関係を作ったうえで処理することにより、ずらし量の誤差を電気回路で吸収することができるわけである。一方、(5)式の基底帯域信号は空間ずらし量 x_{1i}/X と搬送波の時間差の割合 t_i/T の差の影響を受けるが、それは輝度信号の周波数特性の劣化が許容される微小な範囲であれば問題がないのは(2)で記した通りである。

以上のように、信号処理によるレジストレーション誤差の補正の可能性と有効性が確認されたが、この補正は補助的手段であり、機械的なレジストレーション手段の精度と回路の増加を見通して採否を決めることになる。

4. カメラ構成

系統図を図6に示す。ここでは信号処理の特徴点と走査系LSIに関して記すことにしたい。

4.1 輝度信号の処理

空間絵素ずらしの量を前記条件(ii)とすると、輝度信号は次式で表わされる。

$$Y' = 0.33R' + 0.50G' + 0.17B' \quad (6)$$

R', G' および B' はガンマ補正後の原色信号

図6 3 CCD カラーカメラの系統図
Block diagram of the 3 CCD color camera.

図 7 色信号
Color components of camera output signal.

また分離輝度の取り扱いを行って、

$$Y^{1/7} = (0.33R + 0.50G + 0.17B)^{1/7} \quad (7)$$

と表わすこともできる。先述のように、どちらもテレビジョン規格からはずれているため、輝度再現誤差が伴うが、実用的な問題はない。(7)式は(6)式にくらべて信号の混合が CCD 出力端により近いところで行われるの

で、回路のばらつき、調整誤差の影響を少なくすることができるので採用している。

4.2 色差信号

2 軸同一帯域の色信号を得るときには、 $R' - Y'$ 、 $B' - Y'$ の各色差信号を平衡変調するのが通常の方法であるが、この場合、ホワイトバランスの $R' - G'$ 、 $B' - G'$ が必要な場合にマトリックスが複雑になる。これをさけるためには、 $R' - G'$ 、 $B' - G'$ から色信号を合成することができれば良い。ところで、

$$R' - Y' = 0.7(R' - G') - 0.11(B' - G') \quad (8)$$

$$B' - Y' = 0.89(B' - G') - 0.30(R' - G') \quad (9)$$

であるから、図 7 に示すレベル軸で NTSC の色信号を得ることができる。

4.3 走査系 LSI

低電力、小型化を目的として、CCD の走査系 LSI を開発した。この LSI は約 1000 素子からなる $3.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ のアルミゲート CMOS 構成で、24 ピンの DIP にモールドパッケージされ、電源電圧 9V、消費電力 180mW である。

この LSI は、14.31818 MHz ($4f_{sc}$) パルスおよびこ

写真 1 撮像例
Example of reproduced image.

の周波数に同期する同期発生用 LSI からの HD, VD の各信号を入力として、水平・垂直各クロック、センサーゲート、プリチャージクロック、サンプリングクロック等を出して、ドライバーを介して CCD を駆動するものである。水平クロック周波数は、 4.77 MHz ($4/3f_{sc}$) であり、クロック出力は、埋込みチャンネルレジスターの利点としての転送効率のクロック波形依存性がないことを生かし、2 相の非オーバーラップ波とし、出力に混入するクロック成分を少なくすることができた。

5. む す び

試作カラーカメラの性能²⁾は、

水平解像度；280 本

垂直解像度；350 本

S/N ；40 dB 以上

最低被写体照度；700 lx ($F2$)

と、透明電極、埋込みチャンネル型転送レジスターを採用したインターライン型 CCD と空間絵素ずらし撮像法の効果を確認できるものになっている。

今後は、暗電流を減らし、欠陥をなくすデバイス側の検討と、レジストレーションの安定化および回路のより小型・低消費電力化を検討していく必要があるものと考え。最後に、撮像例を写真 1 に示す。

本研究の御指導をいただいている岩間社長、川名半導

体事業部副長、吉田ビデオ事業部研究部長に深謝の意を表します。また CCD の開発に当られた半導体製品開発部 CCD 開発課、LSI の試作に当られた半導体企画部ならびにカメラの設計、試作に当られた半導体製品開発部固体システム課の関係者の諸氏に感謝の意を表するものです。

(昭和 53 年 12 月 28 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 岡田, 高田, 松本, 安藤, 狩野, 桑沢, 萩原: 高密度構造インターライン転送方式 CCD 撮像素子, 信学会半導体トランジスタ研究会資料, SSD 78-5 (1978.4)
- 2) 小室, 高田, 安井, 西村, 中田: 3 CCD カラーカメラの一構成法, テレビ学会方式回路研資, TBS 46-3 (1978.2)
- 3) 山中, 越智, 橋本, 名雲, 西村, 桑沢, 萩原, 島田: 市松模様・蛇行 CCD カラーカメラ, テレビ学会方式回路研資, TBS 36-3 (1977.2)
- 4) K. A. Hoagland: Television Application of Interline-Transfer CCD Arrays, Proc. of Conf. on Charge Coupled Device Tech. and Appl., Nov.-Dec. (1976) 152-156
- 5) S. Ochi, S. Yamanaka, Y. Kanoh and T. Nishimura: A Device Structure and Spatial Spectrum for Checker-Pattern CCD Color Camera, IEEE Trans., ED-25, 2, Feb. (1978) 261-266
- 6) 島田, 林, 山崎, 橋本, 小室, 岡沢, 安井, 山中: 窓明き CCD による空間絵素ずらしカラーカメラ, テレビ学会方式回路研資, TBS 36-2 (1977.2)

Abstracts

A Three-chip CCD Color Camera

*by Seisuke Yamanaka, Hiroshi Yamazaki, Takeo Hashimoto,
Motoaki Abe, Shigeyuki Ochi*

A color television camera with a resolution high enough for practical use employing three interline-transfer CCD imagers is proposed.

In the imagers, buried channel shift registers and overflow drains are employed which suppress the blooming phenomenon and realize higher transfer efficiency than surface channel shift registers.

Transparent photosensing SnO_2 electrodes rather than the conventional poly-silicon electrodes are applied to the imagers to achieve higher blue sensitivity.

Instead of the frame integration mode, the field integration mode of the interline-transfer CCD is used to suppress undesirable equivalent signal lag caused by the temporal and spatial functions of the CCD.

In order to realize high resolution, a specially offset imaging technique is introduced, and the corresponding mechanical and electrical compensation techniques for misregistration between the three CCD's are discussed.

The horizontal resolution of 280 TV lines and the SNR of close to 40 dB are achieved for a scene illumination of 700 lx at F:2.0.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 516~522

512×486 Cell CCD Image Sensor

by Kenju Horii

A charge-coupled area image sensor of the frame transfer type has been fabricated using four-phase two-level polysilicon electrode structure.

The device has 512 vertically interlaced rows and 486 resolution cells per line.

Although the fabrication technique has not advanced yet to produce defect-free devices, high quality images with few white defects are produced by introducing new driving modes.

The measured resolution limits show more than 350 TV line pairs horizontally as well as vertically.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 523~529

An Experimental Research of a Single CCD Color Camera Using a Single CCD by Sensor

by Masanobu Morishita, Takanori Tanaka

A new color television camera employing a single interline-transfer CCD image sensor with a color filter array has been developed experimentally.

This CCD image sensor has 490 Vertical×384 Horizontal picture elements.

This paper describes the color camera system configuration, color filter geometry, and the method of color signal separation, and it is concluded with the result of image pickup experiment that a single-chip CCD color camera has a bright future as a consumer product.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 530~535