

新構造イメージセンサー 「スーパー CCD ハニカム」の原理と応用

田丸 雅也* , 小田 和也* , 乾谷 正史*

Principles and Applications of a New Structure Image Sensor “ Super CCD ”

Masaya TAMARU*, Kazuya ODA*, and Masafumi INUIYA*

Abstract

Recently, the pixel number of Digital Still Camera is on the increase. Though this trend achieved a remarkable improvement in image resolution, the simultaneous decrease of electronic capacity of each pixel caused the deterioration of total image quality due to a reduced dynamic range. To solve this problem, we have developed a new structure CCD which improves both image resolution and electronic capacity.

1. はじめに

デジタルスチルカメラ(以下 DSC)の民生市場はここ数年急速な拡大を続けている。それに伴い、画質も著しく進歩しており、Lサイズのプリントとしてはすでに実用十分な画質を確保している。この高画質化を支えてきた立役者は紛れもなく CCD(Charge Coupled Device)である。Fig. 1 に示すように、DSC に搭載される CCD の画素数は増加の一途をたどっており、この多画素化傾向は今後も続いていくものと予想される。

しかし、CCD の画素数をむやみに増やしても高画質な画像が得られるとは限らない。なぜなら、CCD のチップ

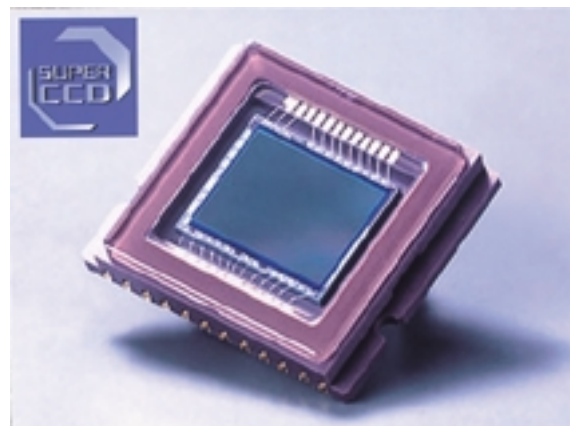


Photo 1 Super CCD.

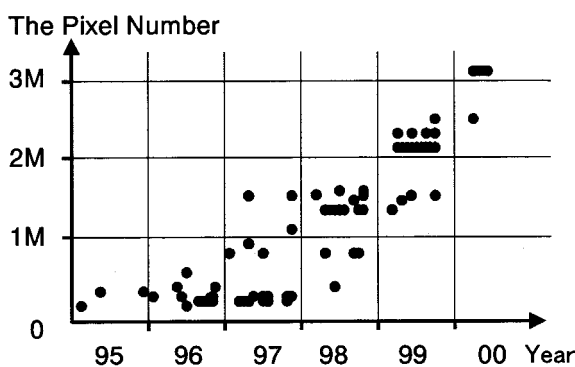


Fig. 1 Pixel number trend of digital still camera.

本誌投稿論文(受理2000年10月5日)

* 富士写真フイルム(株)電子映像事業部 開発部
〒351-8585 埼玉県朝霞市泉水3-11-46

* Product Planning & Development Div.
Electronic Imaging Products Div.
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Senzui, Asaka, Saitama 351-8585, Japan

サイズを変えずに画素数を増やした場合、確かに解像度は向上するが、それと引き換えに1画素あたりの受光面積は減少するからである。このため CCD が確保できる信号電荷量は減少し、感度や S/N といった重要な画質特性が悪化する。すなわち、解像度と信号電荷量はトレードオフの関係にあり、これらを両立させることが高画質化の重要なポイントである。

解像度と信号電荷量を両立させるための第1の方法は、単純に CCD チップサイズを大型化する方法である。この方法では単位画素あたりの面積を変えずに多くの画素を配置できるため、信号電荷量を保持したまま解像度を向上することができる。しかしながら、この方法は民生用の DSC には適さない。CCD といえど半導体デバイスであり、大型化すれば歩留まりは悪化し、コストアップは避けられないからである。また、光学系も大型化する必要があるため、カメラボディも大きくなりデザイン面でも不利である。

第2の方法は、CCDのチップサイズを大きくせずに、単位画素面積を小さくすることによって画素数を増やす方法である。もちろん、信号電荷量の確保という面では不利であるが、CCDの微細加工技術の進歩によって集光率の向上、暗電流ノイズの減少を実現させ、実質的な信号電荷量を確保している。現在の主流はこの第2の方法であり、DSCの画素数増加はこのCCD微細加工技術の進歩によって支えられてきたといえる。

しかしながら、最近の市場評では解像度よりもむしろ多画素化に伴うS/N劣化が問題になってきている。これは激しい画素数競争の影響によって、解像度と信号電荷量のバランスを崩してでも解像度を優先させた結果といえる。そして、このことは同時にCCDの微細加工技術による信号電荷量の確保が限界に近づきつつあることを示唆している。

このような状況において求められる第3の方法は、大型化でも微細化でもなく、根本的な構造を見直すことにより、解像度と信号電荷量を両立させる新しいタイプのCCDであった。

2. スーパー CCD ハニカムの開発

以上のような状況において、富士写真フイルム(株)と富士フイルムマイクロデバイス(株)は解像度と信号電荷量を両立させた新しい構造のCCDを共同開発した。それが「スーパー CCD ハニカム」である。以下ではその原理と応用について説明する。

2.1 スーパー CCD ハニカムの構造

スーパー CCD ハニカムの構造はFig. 2のようになっている¹⁾。これを従来型CCDの代表であるインターライン型CCDと比較すると、インターライン型CCDはFig. 3のようにフォトダイオード(PD)が正方形格子状に配置されているのに対し、スーパー CCD ハニカムは1水平ラインごとにPDの位置が1/2水平ピッチだけずれているような市松格子状に配置されている。垂直転送路はその間を縫うようにジグザグに配置されている。また、PD形状を比較すると、インターライン型CCDは長方形であるのに対し、スーパー CCD ハニカムは八角形である。

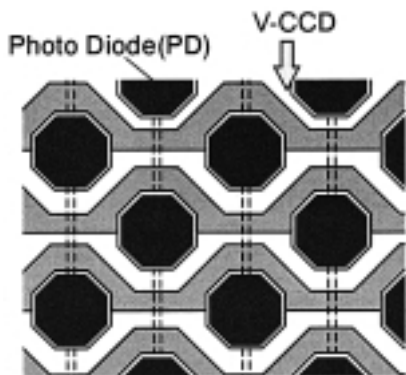


Fig. 2 Structure of Super CCD.

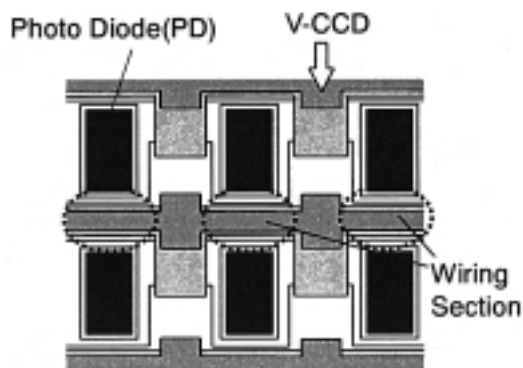


Fig. 3 Structure of interline CCD.

2.2 信号電荷量における優位性

スーパー CCD ハニカムは、従来のインターライン型CCDに比べ、信号電荷量の点で有利である。

一般に、CCDでは垂直転送路(V-CCD)の各電極を水平方向に配線する必要があるが、インターライン型CCDではこの電極を配線するために、PD間配線部(Wiring Section)というスペースを設ける必要がある。しかし、このPD間配線部は信号電荷量にはまったく寄与しないスペースであり、多画素化に伴い単位画素あたりの面積が小さくなればなるほど、この無効領域の影響が大きくなる。

一方、スーパー CCD ハニカムではこのPD間配線部を設ける必要がない。なぜなら、隣り合う垂直転送路が構造上接しているからであり、この接している部分を通して電極を配線することができる。したがって、CCD表面のほとんどをPDと垂直転送路のためにレイアウトすることができ、結果的に信号電荷量を多くすることができる。Fig. 4は1/2インチサイズでのインターライン型CCDに対するスーパー CCD ハニカムの信号電荷量比を表したものである。このように、スーパー CCD ハニカムの信号電荷量特性は、単位面積あたりの画素数が多くなればなるほど、その優位性は大きくなる。

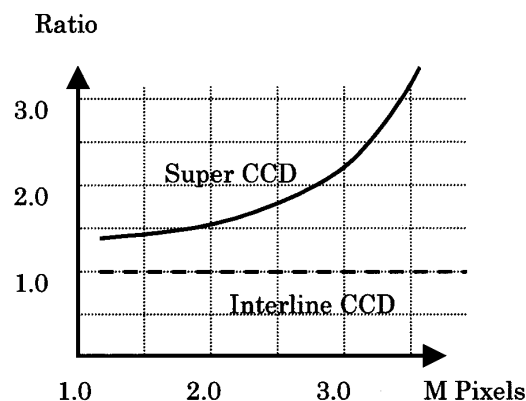


Fig. 4 Ratio of electronic charge on one pixel between Super CCD and Interline CCD.

また、PD形状が八角形であることも電荷蓄積においてメリットとなる。現在では一般に、CCD表面上にマイ

クレンズを搭載することにより集光率を向上させている。このマイクロレンズによって形成される錯乱円がPD形状の中にすべて収まれば、マイクロレンズで集光した光を100% PDに伝えたことになる(Fig. 5 (a))。しかし、カメラの絞りを開放側にすると、マイクロレンズには斜め方向から光が入射するため錯乱円が大きくなる(Fig. 5 (b))。この時、インターライン型CCDのような長方形のPD形状を持つ場合は、錯乱円が遮光壁によって遮られやすくなる。これによってCCD出力が低下する現象を「F値依存の感度低下」と呼ぶ。スーパーCCD八ニカムの場合、PD形状は円に近い八角形であるため、このF値依存の感度低下が起こりにくい。したがって、F値を開放側にしたときの信号電荷量は、インターライン型CCDよりも有利になる。

以上のような信号電荷量の向上は、感度、S/N、ダイナミックレンジといった画質性能の向上に貢献する。

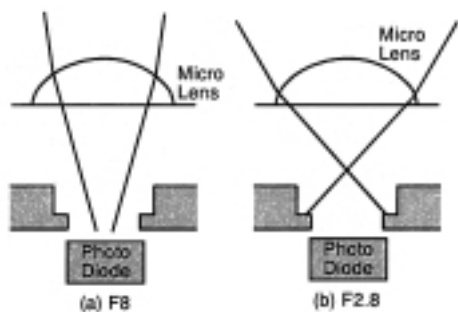


Fig. 5 Sensitivity decrease depending on F-number.

2.3 解像度における優位性

スーパー CCD八ニカムは、インターライン型CCDに比べて解像度の点においても有利である。ここではまず、スーパー CCD八ニカムをモノクロ CCDと考えた場合の解像度優位性について述べる。

Fig. 2, Fig. 3で示したように、スーパー CCD八ニカムは市松格子サンプリング構造を持ち、インターライン型CCDは正方格子サンプリング構造を持つ。以下では、スーパー CCD八ニカムの45度方向の画素ピッチとインターライン型CCDの水平および垂直方向の画素ピッチが等しい場合について考える。この条件は、言い換えれば同一チップサイズで同一PD数のCCDを比較していることになる。

両者の解像度の違いを実空間で考えた場合、水平および垂直方向の白黒のラインが判別できる細かさが、Fig. 6のようにスーパー CCD八ニカムの方が細かい、つまり解像度が高いことがわかる。

次に、周波数空間で考えた場合、それぞれのサンプリング構造のナイキスト周波数はFig. 7のようになる。ナイキスト周波数は、そのサンプリング構造で再現可能な帯域を意味する。Fig. 7に示すように、インターライン型CCDの再現帯域は正方形となり、その正方形を45度回転させた形がスーパー CCD八ニカムの再現帯域となる。両者を比較すると、水平方向と垂直方向にはスーパー CCD八ニカムの方が2倍だけ再現帯域が伸びており、45度方向にはその反対の特性となっていることがわかる。

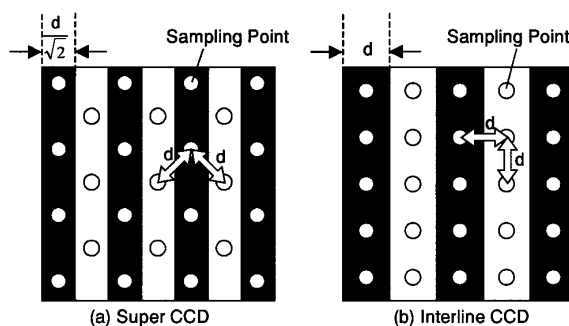


Fig. 6 Line pattern sampling.

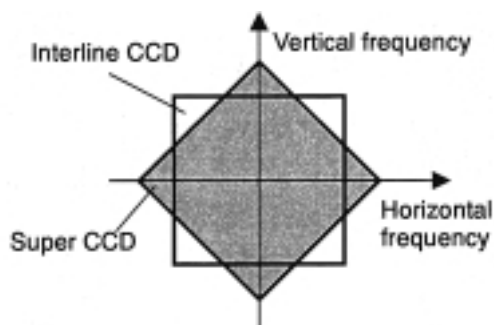


Fig. 7 Reproducible frequency band.

この特性の違いこそが、スーパー CCD八ニカムが解像度的に有利な理由である。なぜなら、世の中の被写体を持つ空間周波数特性のパワースペクトル分布は、スーパー CCD八ニカムの再現帯域の形に近い分布をしているからである。たとえば、Fig. 8はランダム抽出した500シーンのパワースペクトルの平均を求めたものであり、水平、垂直方向に高周波成分が分布していることがわかる。したがって、スーパー CCD八ニカムは世の中の被写体を再現するのに非常に効率のよいサンプリング構造を持っていることがわかる。



Fig. 8 Power spectrum average on about 500 scenes.

このことを図式的に示したものがFig. 9である。Fig. 9は、左の列がスーパー CCD八ニカムを用いて、右の列がインターライン型CCDを用いて被写体を撮像したときの空間周波数成分の捕捉の様子を示している。両者の再現帯域を考えると、インターライン型CCDの方は高周波成分の情報欠落が大きい、スーパー CCD八ニカムではその欠落が少ないことがわかる。

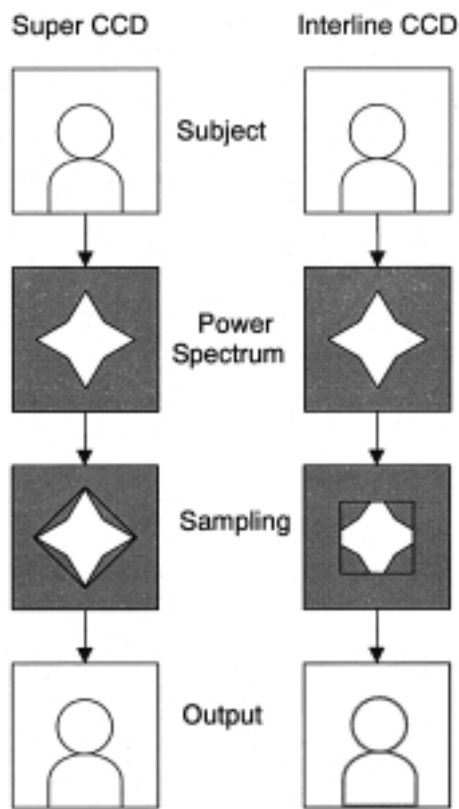


Fig. 9 Sampling characteristics.

また、人間の視覚の周波数特性は、Fig. 10に示すように45度方向でレスポンスが最も低く、水平、垂直方向に最も高い²⁾。この特性は、従来から画像圧縮技術などで広く利用されている。この観点から考えても、水平、垂直方向の解像度が高いスーパーCCDハニカムは視覚的に有利な構造であるといえる。

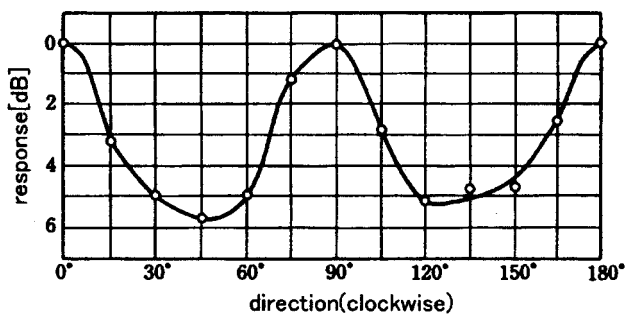


Fig. 10 Directional characteristics of human visual sensation.

2.4 カラー信号処理

次に、以上の理論を拡張し、スーパーCCDハニカムをカラーCCDと考えた場合でも同様に解像度優位性が成り立つ理由について説明する。これは、一般の単板式カラーDSCの場合に相当する。

単板式カラーDSCの場合、1枚のCCD上に複数のカラーフィルタを設け、そのCCD出力を補間処理することにより、各画素ごとにRGB信号を生成している。このプロセスをカラー信号処理と呼んでいる。

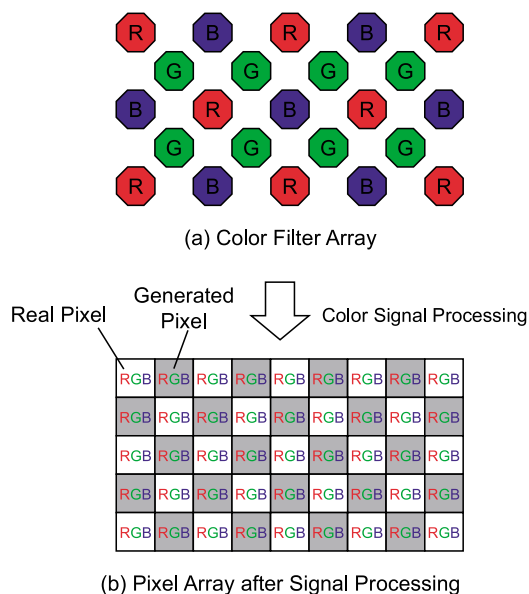


Fig. 11 Color signal processing for Super CCD.

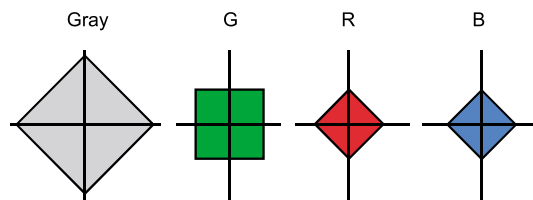


Fig. 12 Reproducible frequency band of super CCD.

Fig. 11は、スーパーCCDハニカムでのカラー信号処理を示したものである³⁾。カラーフィルタ配列としてはFig. 11(a)のような配列であり、この場合、それぞれのカラーフィルタ別の再現帯域はFig. 12のようになる。なお、Grayとは被写体をグレーと仮定した場合の再現帯域であり、これはFig. 7で示した再現帯域と同じである。

つまり、カラー信号処理ではR,G,Bの各再現帯域をGrayの再現帯域まで拡張しようとしていることになる。もちろん、実際にはR,G,BはFig. 12のそれぞれの再現帯域を超えた情報は持たない。しかし、実際の被写体はRのみ、Gのみ、Bのみのような単色ではなく、中間色で構成されることが多いため、カラーフィルタの異なる隣接画素間にも高い相関が発生する。この相関を利用すれば、中間色の再現帯域をGrayの再現帯域まで近づけることができる。

このことは、高周波成分をGrayと仮定して帯域拡張することを意味し、現在の一般的なカラー信号処理アルゴリズムでもよく用いられる概念である。そして、どこまで再現帯域を伸ばせるかはその信号処理の性能次第だが、その理論限界はあくまでもGrayの範囲までである。

このように、単板式カラーDSCの場合、その解像度に関しては信号処理の性能が大きく左右する。しかし、理論限界であるGrayの帯域が水平垂直方向に伸びているスーパーCCDハニカムは、単板式カラーDSCに搭載した場合でも有利であるといえる。

また、スーパー CCD ハニカムのカラー信号処理の特徴は、CCD 上に実際に存在する画素(実画素)の間に新たな画素を生成することである(Fig. 11(b))。これはスーパー CCD ハニカムが水平、垂直方向に持っている高周波情報を一般の画像処理系(つまり、正方格子状の画像形式)において再現させるために必要な処理である。この結果、スーパー CCD ハニカムを用いた DSC では、信号処理後の画素数は必然的に実画素数の 2 倍となる。

われわれはスーパー CCD ハニカムの開発と同時に、単板式 DSC に搭載する際のカラー信号処理アルゴリズムも開発した。スーパー CCD ハニカムとこの信号処理アルゴリズムの組み合わせによって、従来の DSC に比べて高い解像度を実現している。

3. 実写評価

スーパー CCD ハニカムを用いた実験機で解像度チャートを撮影し、これを前述のカラー信号処理アルゴリズムで処理して画像を作成した。さらに、同一の実験機を用いて CCD だけをベイア配列のインターライン型 CCD に載せ換えて撮影し、ベイア配列用のカラー信号処理アルゴリズムで処理して画像を作成した。これらの画像を同一 PD 数で同じ画角となるような条件で比較した結果を Fig. 13 に示す。

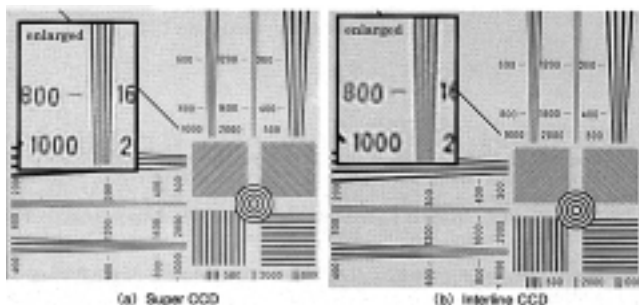


Fig. 13 Resolution chart images recorded by the two types of CCD.

この画像より、インターライン型 CCD の解像度は約 800TV 本であるのに対し、スーパー CCD ハニカムの解像度は約 1,000TV 本であることがわかる。この結果からも、インターライン型 CCD と比べてスーパー CCD ハニカムの方が解像度が勝っていることが確認できる。また、スーパー CCD ハニカムによって得られた画像の鮮鋭さは、約 1.6 倍の画素数を持つインターライン型 CCD によって得られた画像の鮮鋭さに相当するという報告もある⁴⁾。

4. まとめ

新しく開発したスーパー CCD ハニカムは、信号電荷量および解像度の点で従来の CCD よりも高いアドバンテージを持つ。われわれは、このデバイスを用いてトータル画質の向上を目指した DSC をすでに発売している(Fig. 14)。

FinePix 4700Z は、240 万画素のスーパー CCD ハニカムを搭載し、常用感度 ISO 200 を実現した光学 3 倍ズーム搭載のコンパクト DSC である。FinePix 40i は、単焦点ながら画質の基本性能は FinePix 4700Z とほぼ同等であり、さらに MP3 プレーヤーを内蔵しつつ、よりコンパクトなボディを実現している。FinePix S1 Pro は、大型(23.3 × 15.6mm)で 340 万画素のスーパー CCD ハニカムを搭載し、ニコン F マウントのレンズ交換式一眼 DSC である。常用感度は ISO 400 である。

今後も、スーパー CCD ハニカムの設計、製造、処理技術をさらに発展させ、その利点を最大限に生かした DSC の開発を目指す。



Fig. 14 Digital still cameras using Super CCD.

参考文献

- 1) T. Yamada et al. A Progressive Scan CCD for DSC Application. ISSCC (2000)
- 2) K. Hiwatashi. Spatial sine-wave responses of the human visual system. Vision Res. 8, p.1245-1263 (1968)
- 3) H. Tamayama et al. High-Definition Still Image Processing System using the New Structure CCD Sensor. IS&T/SPIE's 12th International Symposium on Electronic Imaging (2000)
- 4) 内藤ほか. 新型撮像素子を搭載したカメラで撮影した画像の鮮鋭さ. 日本写真学会誌 63 (3), 1-5 (2000)

(本報告中にある“スーパー CCD ハニカム”、“FinePix”は富士写真フイルム(株)の商標です。)