



映像撮影用新型CMOSセンサーにおける、 RGB解像度についての考察

ラリー・ソープ 著

Canon USA プロフェッショナルエンジニアリング&ソリューションディビジョン



CINEMA EOS
SYSTEM

映像撮影用新型 CMOS センサーにおける、RGB 解像度についての考察

©Canon USA, Inc. 不許複製

概要

世界中の映画制作に影響を及ぼす新しい機器として大型単板センサーのデジタルシネマカメラが登場した。これらのカメラで使われるほとんどのイメージセンサーはベイヤー配列のカラーフィルターを基準としている。デモザイキングアルゴリズムの大きな進歩により、ポストプロダクションにおけるカラー補正および画像修正を支援する RGB ビデオコンポーネントの生成は改善されてきた。本書では新型 CMOS イメージセンサーについて議論する。このセンサーは 3840(H) × 2160(V)のデジタルサンプリング構造を持つセンサーからフル HDTV RGB 4:4:4 コンポーネント信号を出力することを特に意図したものである。デモザイキングアルゴリズムは必要としない。イメージセンサーシステムで生成される RGB コンポーネント信号は、60P、50P、30P、25P、24P あるいは 23.98P の画像キャプチャを選択することができる。1080/60i および 1080/50i のインターレースのビデオ信号もイメージセンサー内で生成される。本書は、RGB デジタルビデオコンポーネントの構造ならびにプログレッシブおよびインターレース方式の MTF 特性について概説する。

1.0 序論

大型単板センサーの動画撮影センサーの開発活動はほぼ 10 年前に始まった。開発には CCD および CMOS 両方のテクノロジーが含まれている。大多数の開発が従来のベイヤーカラーフィルター配列を採用する一方で、RGB ストライプ配列は一部の開発で採用されている。世界中で、オプトエレクトロニック変換とフォトサイト読出し処理に続き、RGB ビデオコンポーネントを生成するためのより高度なデベイヤリングアルゴリズムの開発が継続中である。キヤノンは、デジタル映像撮影用に 3 パーフォレーションの 35mm 動画フォーマットに基づく画像サイズの CMOS イメージセンサーを開発した。

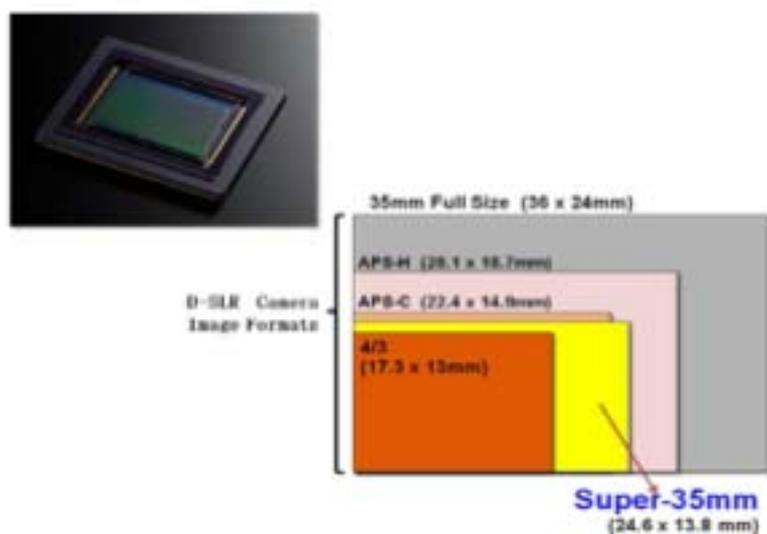


図 1 他の一般的なフォーマットサイズと比較したキヤノン CMOS イメージセンサー

2.0 画素サンプリング格子

新イメージセンサーは総画素数という観点では4206(H)×2340(V)の“4K”配列である。本イメージセンサーは最大毎秒60フレームでスキャンされ、1920(H)×1080(V)画素のRGB4:4:4ビデオコンポーネント出力を生成するように設計されている。したがって、有効画素数は3840(H)×2160(V)である。CMOSセンサーの画素は映し出された画像の輝度に感度がある。カラー情報はCMOSセンサーの画素配列と空間的に合致するように設計され、画素の上に配置されたカラーフィルターによって抽出される。この新イメージセンサーで使われているカラーフィルター配列は、図2の従来型のベイヤー[1]のパターンである。

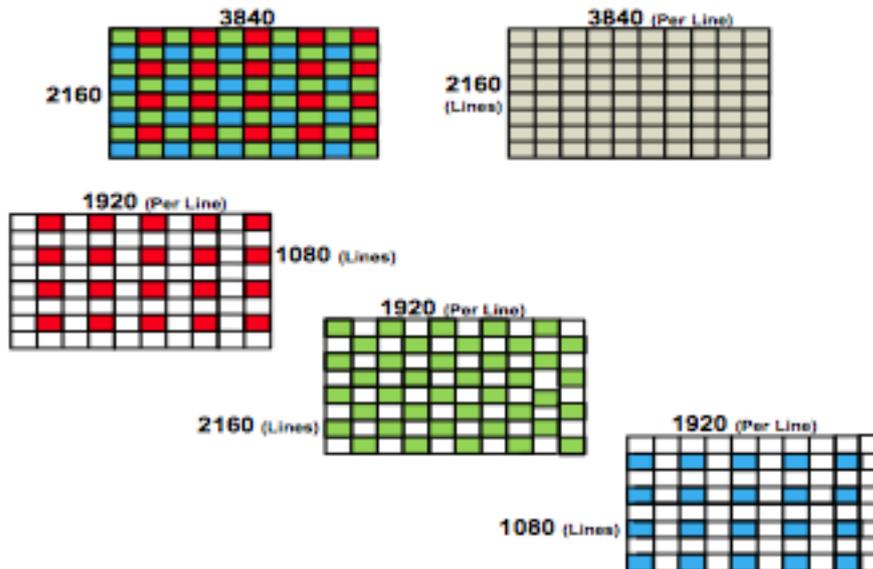


図2 カラーフィルター配列とCMOS撮像素子、ならびに各サンプリング格子の構造がわかるようカラーフィルター配列を各コンポーネントに分離して説明した図

3.0 デモザイキングによる補間作業を回避する方法

通常のベイヤー配列のイメージセンサーではR、G、Bのビデオコンポーネントを生成するためデモザイキングの作業が必要となる。これは、カメラ内で行なわれる作業であるがポストプロダクション作業でも可能である。このR、G、Bのビデオコンポーネント生成処理では、図2の[2]の3つの色ごとに分けられたカラーコンポーネントに示されている空白部分の画素を、「埋める」ことが必要となる。その実現には隣り合う周辺の画素から補間する方法がとられる。これらの処理は必ずしも完璧とは言えず、シャープネスが損なわれる、エイリアシング（モノクロ、カラーともに）の発生、生成エラー[3][4]など様々な副作用を伴うのである。特定のシーン内容やキャプチャ作業（カメラのパンニング、ティルティング、シーン内で動く被写体）によっては、これらの副作用がより目立つようになる場合がある。長年にわたり、生成の精度を上げ、副作用を最小限にすることを目的として、高度に洗練された多くのデモザイキング補間手法が開発されてきた。より洗練された一部の技術は主観的品質においては非常に優れたものもある。キヤノンのこの新型イメージセンサーシステムは、デモザイキング処理を回避するよう設計されている。新型イメージセンサーシステムはデモザイキングの代わりに3つのRGBビデオコンポーネントを別々に読み出す方法を新しく取り入れた。この点に関する詳細は、別のホワイトペーパー[5]に詳述してある。

4.0 グリーンのサンプリング格子の二重性

このイメージセンサーの読み出し手法は市松模様配列のグリーン画素からグリーンの解像度（そしてその結果マトリクス化された輝度解像度も）を最大限にするための「ディバイヤー」処理は利用していない。「4K」単板センサーのカメラで使われている従来のディバイヤー処理において、解像度は 2500-3000 本 TVL/ph 近傍に水平輝度の限界解像度がある。しかし、これは当然のことながら、レッドおよびブルーの解像度が著しく欠損することとなる[6]。

本センサーの設計戦略は、「4K」解像度を達成するものではない。R、G、B の各ビデオコンポーネントを、SMPTE の 274M HDTV 製品基準である 1920 (H)×1080 (V)の完全なデジタルサンプリング構造の生成に限定することを明確な目的としている。したがって、グリーンの市松模様配列とは根本的に異なる手法をとった。

グリーンの画素配列は、本質的に、図 3 に示すとおり 2 つの別々の 1920 (H) × 1080 (V)の格子で構成されている。これら 2 種類のサンプリング格子は、画素のサンプリング機能を実行する特定のサンプリング時間で互いに切り離される。サンプリングの具体的な時間は、画素サンプリング処理の関数となっている。水平のドメインでは、2 つの画素が水平方向のサンプリング時間で分離され、垂直方向は一本分の時間で分離されている。補間の類の加工は一切ない。本作業では、数々の独自の性能上の利点がかもとと備わっている。

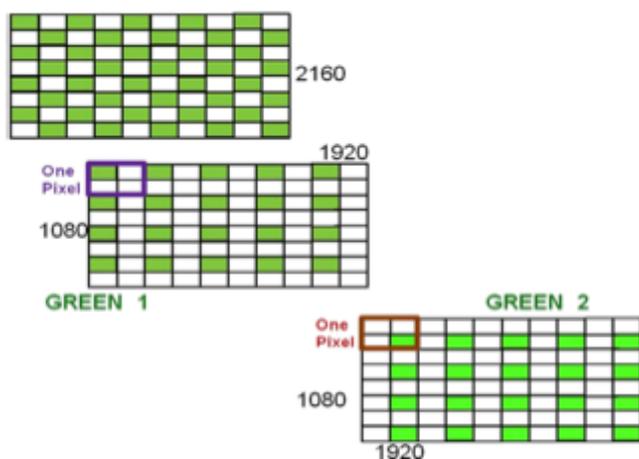


図 3 バイヤー配列のカラーフィルター内部でグリーン格子配列は 2 つの異なるグリーンのサンプリング格子に分離される。格子は各々 1920 (H) × 1080 (V)の構造を有する。

5.0 映像出力の MTF

デジタル映像撮影におけるイメージセンサーの重要な性能パラメータは、RGB ビデオコンポーネントの水平および垂直の MTF 特性である。それはそのイメージセンサーを利用するレンズ-カメラシステムが作り出すことができる画像のシャープネスを最終的に決定づけるからである。もちろん、この MTF 特性はセンサーのサンプリング格子、つまり、水平および垂直のサンプル数によってその大部分が決まる。イメージセンサー単体の MTF 特性（水平および垂直）は、従来の $\text{Sin } x/x$ 曲線にしたがっている。もちろん、最終的に映像信号を出力する時の MTF 特性はレンズの MTF 特性によってさらに変更される。RGB ビデオコンポーネントの最終的な MTF 特性は、エイリアシングを生成する可能性のある側波帯を削減するために必要な光学ローパスフィルター（センサーを利用する可能性のあるカメラには不可欠）の構造によって決まる。

アスペクト比が 16:9 の HD 生成における RGB 各ビデオコンポーネントに必要とされるサンプリング構造は、1920 (H) × 1080 (V) である。それに伴う水平の空間サンプリング周波数は、 $1920 \times 2 \times 9 \div 16 = 2160 \text{ TVL/ph}$ である。さらに、ナイキスト周波数は $2160 \div 2 = 1080 \text{ TVL/ph}$ である。

6.0 デジタルシネマカメラにおける水平 MTF に関する考察

新イメージセンサーが実現できる解像度特性を調べるには、新型のキヤノン EOS C300 デジタルシネマカメラでの実力を考察する必要がある。具体的には、コンポーネントの動画 MTF の処理と、そのサンプリング機構に伴うエイリアシングを特定することである。

最も重要なグリーンのビデオコンポーネントについてまず議論する。図 4 では、2160 TVL/ph の有効キャリア周波数より上にゼロを設定したコサイン形の光学ローパスフィルターが選択されている。図に示されているとおり、この光学ローパスフィルター特性に画素の開口の MTF 特性を畳み込んで、2 本のグリーンのビデオ出力の MTF 応答が生成される。

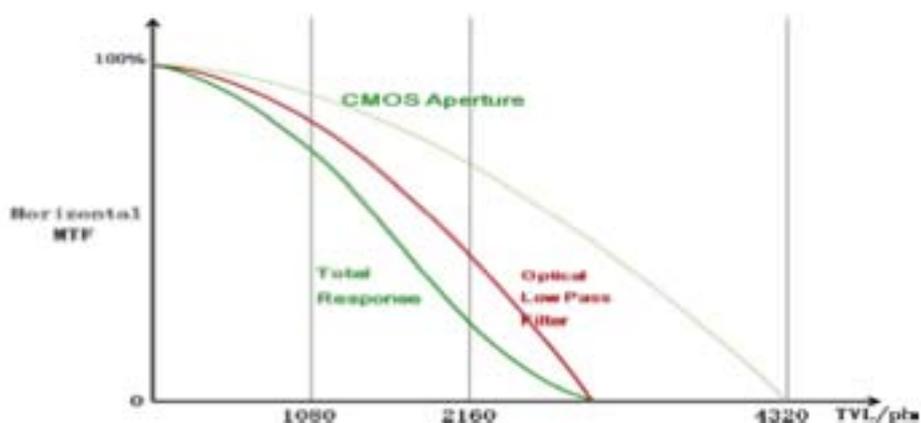


図 4 コサイン形の光学ローパスフィルター (OLP) の MTF 特性。光学ローパスフィルターは CMOS イメージセンサーの前に配置され、2 個のグリーン、レッド、ブルーのビデオコンポーネントの各 MTF 特性に等しく働く。

最終的なグリーンの MTF 特性に対する非常に重要な変更は、前述した 2 つの別々のグリーンのコンポーネントの加算である。図 5 に示したとおり、各グリーン格子の画素は水平、垂直方向ともに 0.5 画素ずつオフセットされている。

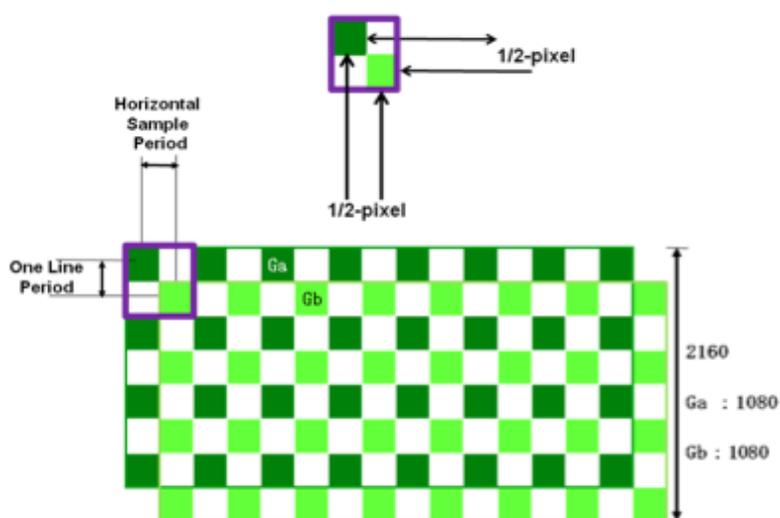


図 5 1920 (H) × 1080 (V) の 2 つのグリーンの画素格子を示す。

水平および垂直方向にずれている 2 つの対角線上の画素は読み出しプロセス中に加算される。

2 つのサンプリング格子を水平および垂直両方の方向に 0.5 画素分オフセットすることは、グリーンのビデオコンポーネントを加算する時に強力なアンチエイリアシングを可能にしている。このオフセットによって、グリーン Gb の 1 次側波帯の位相はグリーン Ga の 1 次側波帯に対して反転している。したがって、2 つのコンポーネントがグリーンのビデオ信号に加算されるとき、これらの側波帯スペクトルはたがいに打ち消し合う。これらの側波帯の打ち消し合いによって、ナイキストの制限を効果的に解決し、以下に示す図 6 の 1080 TVL/ph のナイキスト周波数を超える、有用なグリーンの MTF を延長することが可能になる。

2 つのグリーンのビデオコンポーネントの加算にはもう一つのアンチエイリアシングの効果がある。2 つのコンポーネントが加算される際、水平の有限インパルス応答 (FIR: Finite Impulse Response) のフィルタリング活動が、加算される 2 つの水平の画素の時間差によって誘発され、図 6 に示されている電子プレフィルターを形成している。

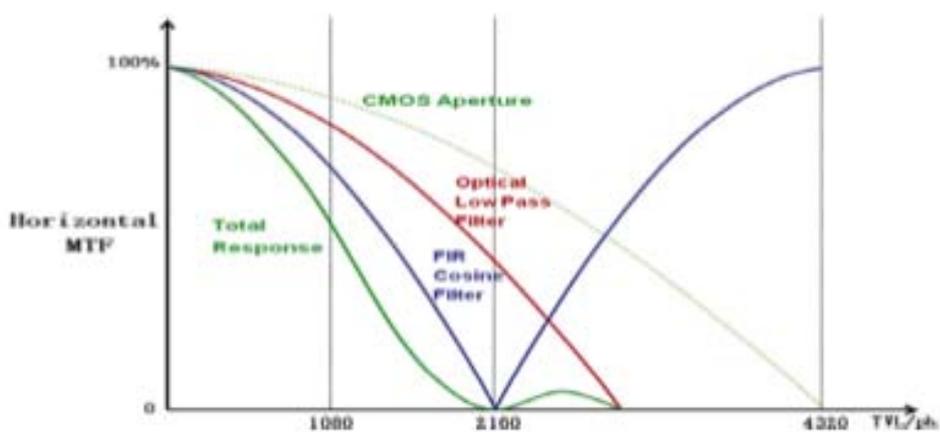


図 6 水平の FIR フィルター (読み出し中、2 つのオリジナルのグリーンのサンプリングラティスを加算することで生成される) のコンボリューション後のグリーンのビデオコンポーネントの最終応答と、光学ローパスフィルター。

最終的なグリーンの動画 MTF 特性は、FIR フィルターのコンボリューション、光学ローパスフィルター、およびイメージセンサーの画素サンプリングの $\text{Sin } x/x$ 特性より、図 6 の「最終レスポンス」に示すとおりである。グリーンの空間周波数特性は、0 から 1080 TVL/ph の HDTV の通過帯域において高い MTF 特性を有し、図 7 に示すとおりナイキスト周波数より上での劣化を非常に良く制御している。

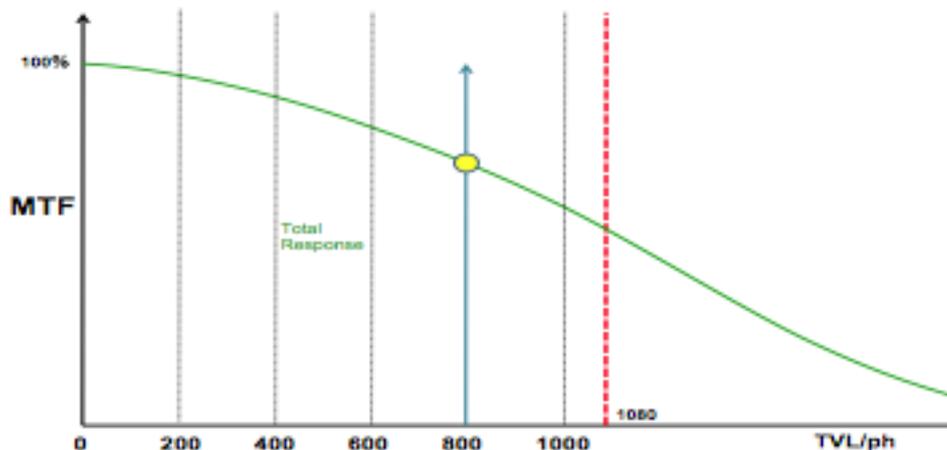


図 7 最後のグリーンの動画の水平 MTF の最終特性を示す。

センサーを 3 個搭載した 2/3 インチのハイエンドスタジオカメラにおいては、通常、HDTV の通過帯域の最高値に近い 800 TVL/ph における変調度が明記される。本 CMOS イメージセンサーでの測定値は非常に高く約 70% である。(使用するレンズにより約 60 ~65%に下がる)

7.0 プログレッシブスキャンによるグリーン動画フレームの垂直 MTF

前述したとおり、グリーンのビデオコンポーネントは、2 個のグリーン 1 およびグリーン 2 のビデオ信号を加算することで構成されている。図 8 に示されているように、一本の水平走査信号は垂直方向に分離されている 2 本の水平走査信号から加算される。

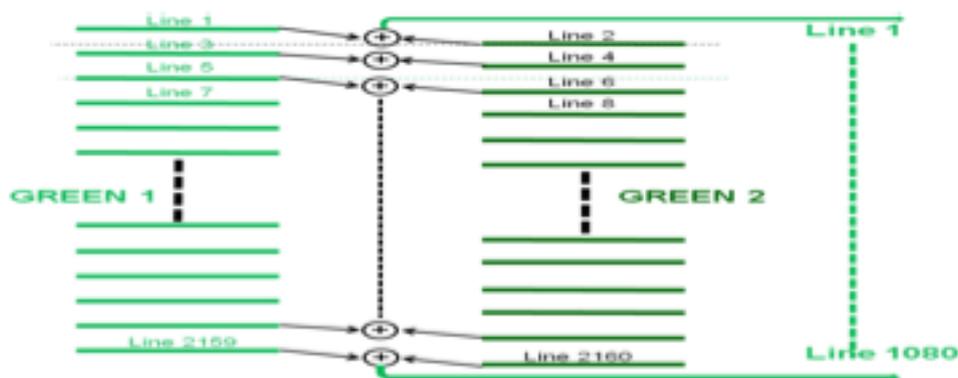


図 8 1080 本のグリーンのプログレッシブ動画生成の原理。

1 水平走査期間に垂直方向に分離している 2 本のビデオ信号を加算して 1080 本のプログレッシブビデオ信号を生成する

離れた 2 本のグリーンの信号の加算は、図 9 に示すとおり、コサイン特性と 2160 TVL/ph にゼロを持つ垂直 FIR フィルターを生成している。その結果、必要とされる 0 から 1080 TLV/ph の垂直通過帯域で高い MTF を生成できるが、2160 TVL/ph のキャリア周波数を超える場合、高いエイリアス成分が残る可能性がある。繰り返しになるが、2 本のグリーンのビデオ信号間の 0.5 画素分の垂直方向オフセットが、2 本の逆位相の垂直側波帯スペクトルを打ち消し、その結果、本質的にエイリアスのない垂直の MTF 特性となる。光学ローパスフィルターは水平方向と同じ空間周波数を超えたところでゼロになるように設計され、2 次側波帯からも保護している。図 9 は、プログレッシブスキャンモードにおけるグリーンの全体的な垂直 MTF 特性を示し、これは水平方向の特性と同じである。

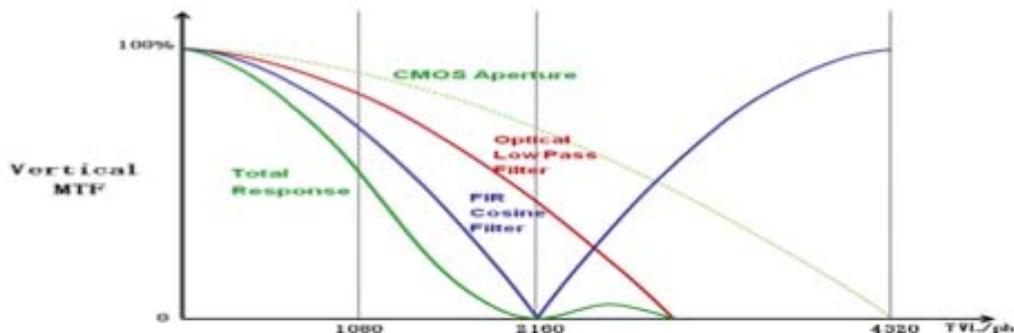


図 9 FIR フィルター、光学ローパスフィルター、画素のアーチャー特性によって形成されたグリーンの垂直方向の MTF 特性

8.0 レッドおよびブルー-60i のインターレースフレームの垂直 MTF

本イメージセンサーの読み出しシステムは、前述の通り、レッド、ブルー、グリーン Ga、グリーン Gb のビデオコンポーネント信号は 1080 本のプログレッシブのデジタルビデオ信号を形成している。出力ビデオコンポーネント信号に 1080 本のインターレース信号が必要とされる場合、読み出しは隣接する走査線を加算するように動作する。レッドおよびブルーのデジタル信号は従来同様の方法で処理される。つまり、図 10 で赤のコンポーネントについて示している通り、ビデオコンポーネント信号の加算によって 1/60 秒につき 540 本の走査線からなる垂直フィールドを形成する。その後、2 つの連続したフィールド信号によってインターレースの 30 フレームのデジタルビデオ信号を形成する。

インターレースの 30 フレームのビデオ信号の生成は、プログレッシブなフレーム信号形成に伴う固定の側波帯とそれより高域に不要な側波帯成分を生成する。後者の側波帯は 2160 TVL/ph に中心を置くが、新しいインターレースの側波帯は 1080 TVL/ph に中心を置き、各フィールドで位相が反転する。その結果、インターレース走査の特徴である極めて望ましくない 30Hz の「ちらつくエイリアス」が発生する。

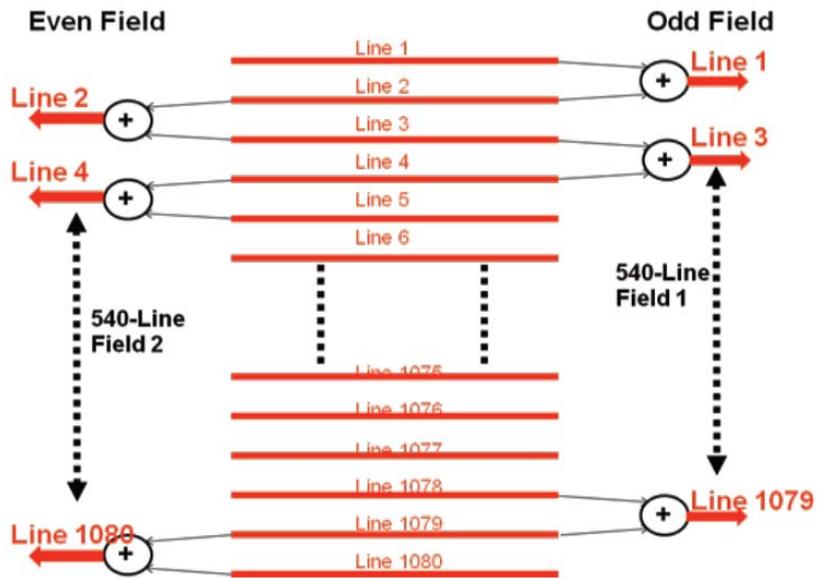


図 10 インターレース方式のレッドのビデオフレームを最後の 1/30 秒時点で構成する、1/60 秒に一度 2 つの連続した 540 本のフィールドを形成するテレビ線の加算処理

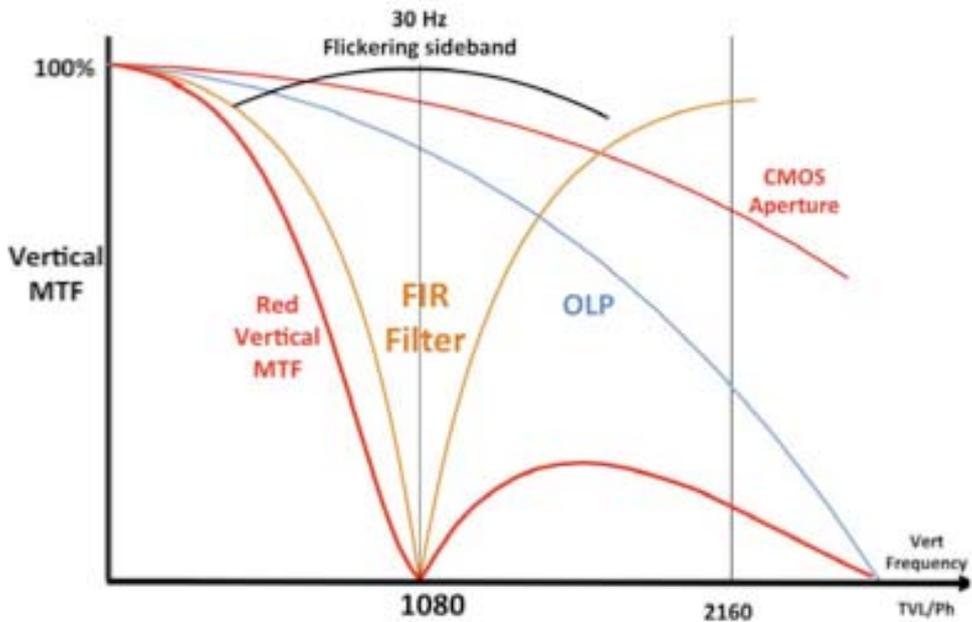


図 11 インターレース走査モードにおけるレッドの垂直 MTF 特性 (ブルーの動画でも同様である)

9.0 まとめ

新型 CMOS イメージセンサーについて記述してきた。これはキヤノンが、デジタルシネマカメラの世界市場に参入する固い決意の表れである。今後数々の進歩が起こることが期待されている。また、イメージングのこの重要な分野に、高性能・高精細の映像撮影をとくに重要視した、極めて品質の高い RGB ビデオコンポーネントのセットを投入することで、第一歩を踏み出し優位になった。今日、HDTV はハイエンドなテレビ番組作成、ならびに数々の企業、政府、教育での利用はもちろんのこと、ハイエンドな劇場用映画制作においてもますます世界的に非常に重要な役割を持っている。大型単板センサーのデジタルカメラは 35mm レンズの採用、また浅い被写界深度、長年の実績を持つ世界のシネマトグラファーの技巧に対する要望に応えたことによって、このような制作各分野におけるクリエイティブ面での柔軟性をさらに広げることには大切な役割を果たす。

新イメージセンサーは、従来の優れたバイヤーカラーフィルター配列のサンプリング格子を利用し、35mm の光学像のオプトエレクトロニック変換を実現している。しかし、この新型イメージセンサーは革新的な画素読み出し手法を用いて、デモザイキングの補間作業の必要性を完全に排除している。その結果、各々が 1920 (H) × 1080 (V) の描写が可能な RGB4:4:4 デジタルコンポーネントが、このイメージセンサーシステムの出力として生成されている。

画素の優れたノイズ特性と広いダイナミックレンジ（別のホワイトペーパーで詳述）とも相まって、この新型イメージセンサーは世界中のシネマトグラファーが求める全ての画像品質を提供できることが期待されている。

参考文献

- [1] B.E.バイヤー “Color imaging Array(カラーイメージング配列)”、米国特許 No. 3,971,06
- [2] B.K.ガンターク他 “Demosaicking: Color Filter Array Interpolation in Single-Chip Digital Cameras” (デモザイキング: 単板デジタルカメラのカラーフィルター配列補完)、IEEE カラー画像処理の特別号
- [3] R.B.ウィーラーおよび N.ロドリゲス “The Effect of Single-Sensor CFA Captures on Images Intended for Motion Picture and TV Applications”(映画および TV 使用を目的とした画像の単板センサー-CFA キャプチャの効果)、SMPTE J., 2007 年
- [4] R.ラマナス他 “Demosaicking Methods for Bayer Color Arrays” (バイヤーのカラー配列のデモザイキング手法)、Journal of Electronic imaging 誌 11 (3)、p306~315、2002 年 7 月
- [5] L.ソープ “New 35mm CMOS Image Sensor for Digital Cine Motion Imaging” (デジタル 映像撮影用の新しい 35mmCMOS イメージセンサー)
- [6] アダム・ウィルト “An Unfair Comparison of Three Different Cameras” (3 種類のカメラの非論理的比較) Camera Log、ProVideoCoalition ウェブサイト、2008 年 3 月
- [7] オットー・H・シェイド・シニア “Image Quality: A Comparison of Photographic and Television Systems” (画像品質: 写真およびテレビシステムの比較)
J. SMPTE、1987 年 6 月 p567~595