

Rad-Icon Imaging Corp

3193 Belick Street, Unit 1
Santa Clara, CA 95054-2404

tel 408-486-0886
fax 408-486-0882

AN08: RadEyeセンサーのための多項式ゲイン補正

はじめに

CMOSアクティブ・ピクセルセンサーは本来、CCDまたはパッシブ・ピクセルセンサーほど光への反応が直線的ではありません。基本的な検出プロセス(光子の電荷への変換)については、3種類のデテクターのどれでも同じです。CCDもパッシブ・ピクセルセンサーも、蓄積された電荷をピクセルから読み出し増幅回路へ転送してから、電荷を電圧に変換します。これに対して、アクティブ・ピクセルセンサーは、ソースフォロワーFETを使用することによって、ピクセルで直接、信号電荷に対応する電圧の変化を測定します。この手法には多くの利点がありますが、この増幅回路の転送曲線の非直線性がデテクターの全体的なゲイン反応に影響するという短所があります。

RadEye1センサーも、この規則の例外ではありません。RadEye1デテクターの反応曲線は典型的な「S」字形で、低信号側で準2次関数的な反応になり、中央部分ではかなり直線性があり、高信号側ではセンサーが飽和に達するので標準的なロールオフを示します(図1を参照)。ピクセル容量(逆バイアス・フォトダイオード)は常に一定ではなく、バイアス電圧が低くなるにつれて増大するので、大きな信号でのロールオフは実際、ゲインの圧縮を意味します。

標準的なゲイン補正

ほとんどのイメージセンサーの標準的な補正方法は、ダークオフセット・キャリブレーションとゲイン補正を含みます。キャリブレーション・ポイントが2つあるので(1つは入力信号ゼロのポイント、もう1つは任意のレベルの入力信号があるポイント)、この方法は2ポイント補正とも呼ばれます。この分析では、すべての入力データ(すなわち画像)は、単純なダークオフセット減算を使用して、ダークオフセットの変動分をすでに補正してあるものと仮定しています。

さらに、いくつかのグローバルなキャリブレーション係数を定義するのは対照的に、やりたいのは個々のピクセルのキャリブレーションであると仮定しています。グローバルな補正(すなわち画像全体に1つの係数を適用すること)は、画像の変動分を除去するほどには正確でなく、メモリまたは演算処理能力に制限がある場合のみ推奨されます。Radyeセンサーを使用するカメラは通常PCに接続されているので、これが問題になることはまずありません。

標準的なゲイン補正方法には、どのピクセルも同量の入力信号を受け取るフラットフィールド画像を用います。この入力信号の正確な強度は特に決まっていますが、最良の結果を得るには、最終的な補正画像で予想される信号レベルに近くなければなりません。デテクターの反応が直線的であれば、フラットフィールド画像は画像内のあらゆるピクセルのゲインを正確に示します。 i 番目のピクセルの反応は以下の式になります

$$y_i = a_i \cdot x,$$

x は入力信号で、 a_i は以下ようになります

$$a_i = y_i(\text{FF}) / x(\text{FF})$$

入力信号の単位は考慮していないので、フラットフィールド入力は以下のように定義できます

$$x(\text{FF}) = 1,$$

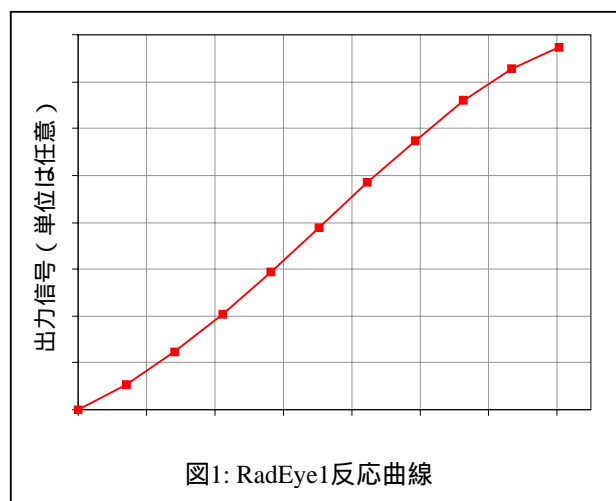


図1: RadEye1反応曲線

したがってピクセル反応は以下のようになります

$$y_i = y_i(\text{FF}) \cdot x.$$

ゲイン補正の目的は、どのピクセルについても所定の入力信号 x に対して同じ出力信号 y が得られるようにすることです。よって、望ましいピクセル反応は以下のようになります

$$y_i' = y_{\text{avg}}(\text{FF}) \cdot x.$$

x (一般に未知です)の代わりに得られる最終的な補正は以下のようになります

$$y_i' = [y_{\text{avg}}(\text{FF}) / y_i(\text{FF})] \cdot y_i.$$

言い換えると、それぞれの測定されたピクセル値 y_i をフラットフィールド信号値 $y_i(\text{FF})$ で除算してから平均フラットフィールド信号を掛けると、補正されたピクセル値が得られます。フラットフィールド画像の実際の入力信号レベルは完全に任意なので、補正をするのに入力信号レベルを事前に知る必要はありません。

多項式ゲイン補正

標準的なゲイン補正は、反応曲線が直線的なデテクターに効果的です。というのは、ピクセル反応が直線的に変化するので、傾きの変動(すなわちピクセルゲイン)のみを補正すればいいからです。デテクターの反応が非直線の場合は、もっと高度な補正方法が必要になることがあります。1つの手法は、ピクセル反応を2次または高次の多項式で近似することです。RadEye1センサーの場合は、反応曲線の下半分を近似するのに2次関数が非常に適切です。

各ピクセルの2次関数反応の特徴は、標準的なゲイン補正がただ1つの補正係数を使用するのに対して、2組の係数を使用することです。これらの係数を得る1つの方法は、均等に区切られた入力信号レベルで多数のフラットフィールド画像を取り込んでから、各ピクセルのフラットフィールド値によって最小2乗法で2次の最適値を計算することです。必要なキャリブレーション画像の数の点から、この方法は、ゲインキャリブレーションをたまにしか行わないで、入力信号をソフトウェアで容易にコントロールできる場合に適切と言えます。

最も簡単な場合では、2つのキャリブレーション係数の計算に2つの入力画像が必要です。さらに、2番目のキャリブレーション画像は入力信号レベルが正確に最初の画像の半分で取り込まれると規定できます。これは、X線mAを半分にするか露光時間を減少させることによって、簡単に行うことができます。イメージャー内の i 番目のピクセルの反応は以下のようになります

$$y_i = a_i \cdot x^2 + b_i \cdot x.$$

これは図2の赤い実線で示されます。前と同様に、信号レベル $x(\text{FF}) \equiv 1$ でフラットフィールド・キャリブレーションポイント $y_i(\text{FF})$ を測定しています。また、信号レベル $x(\text{H}) = 1/2$ で2番目の「半強度」フラットフィールド・キャリブレーションポイント $y_i(\text{H})$ を測定しています。

目的は、ピクセル反応を「直線化」して、図2の点線で示されるようにすべてのピクセルを同じ直線に沿って並ぶようにすることです。この直線化された理想的な反応は、標準的なゲイン補正で得ようとするものと同じで、以下のようになります

$$y_i' = y_{\text{avg}}(\text{FF}) \cdot x.$$

一方、未知の入力信号レベル x を置き換える必要がありますが、信号レベルは2次の反応になるので以下のように少し複雑になります

$$y_i' = y_{\text{avg}}(\text{FF}) \cdot \{ [(b_i/2a_i)^2 + y_i/a_i]^{1/2} - b_i/2a_i \}.$$

これで、キャリブレーション画像 $y(\text{FF})$ および $y(\text{H})$ から係数 a_i および b_i を計算するだけでよいということになります。これについては、元の2次のピクセル反応に戻って、 $x(\text{FF}) \equiv 1$ と定義できるので $x(\text{H}) = 1/2$ になるということを利用します。

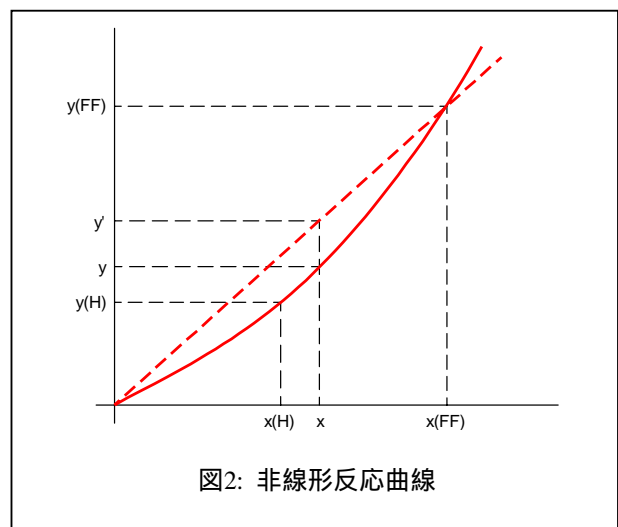


図2: 非線形反応曲線

2つのキャリブレーション画像について以下が得られます

$$y_i(\text{FF}) = a_i \cdot x(\text{FF})^2 + b_i \cdot x(\text{FF}) = a_i + b_i$$

および

$$y_i(\text{H}) = a_i \cdot x(\text{H})^2 + b_i \cdot x(\text{H}) = a_i/4 + b_i/2.$$

a_i および b_i を解くと以下が得られます

$$a_i = 2 \cdot y_i(\text{FF}) - 4 \cdot y_i(\text{H})$$

および

$$b_i = 4 \cdot y_i(\text{H}) - y_i(\text{FF}).$$

この方法は標準的なゲイン補正より計算が難しいのですが、現在のPCの演算能力を考えるとほとんど問題はありません。上の補正アルゴリズムはどんな補正コードにも簡単に組み込むことができます。しかしながら、多項式補正は標準的なゲイン補正よりもはるかに正確な直線性の反応が得られるものの、誤差に対しても敏感になるので注意しなければなりません。これは、2次の係数が、多数の画像を使用する最小2乗法でなく、2つの補正画像だけから計算されるからです。オフセット補正のわずかな誤差(すなわち温度変化による暗電流の変動)または不正確な入力信号コントロール($x(\text{H}) \neq 1/2 \cdot x(\text{FF})$)は、補正の2次項に影響すると、もっと大きい変動に増幅されます。多少意外ですが、多項式による補正画像は標準的なゲイン補正で得られる画像よりもノイズが少なくなっています。それでも、キャリブレーション画像の平均化を適用すべきです。

結論

ここでは、RadEyeセンサーファミリーの画像に適用するために標準的な2ポイント補正法を改善する比較的簡単な方法を提示しました。多項式ゲイン補正法は、RadEyeセンサーが100万エレクトロン以下の信号レベルでほとんど完全に2次の反応曲線になるということを利用してしています。必要な補正係数を計算するのに2つのフラットフィールド・キャリブレーション画像しか必要としないので、キャリブレーションの実行方法をX線イメージング作業手順に簡単に組み入れることができます。これらの画像はソフトウェアコントロールで取り込むのが望ましいのですが、方法は簡単なのでキャリブレーション画像はマニュアル操作でも得られます。

RadEyeセンサーは、優れた性能を備えています。特に、低ノイズ、高感度、きわめて低い画像ラグといった利点があります。こうした優れた性能を可能にしているアクティブ・ピクセル・アーキテクチャーは、センサー反応がCCDセンサーほど直線的でないという欠点があります。それでも、優れた直線性が重要となるアプリケーションでは、この効果をソフトウェアで補正することは可能です。センサーキャリブレーションは、高性能X線イメージングシステムには欠かせないものですが、最も簡単なイメージングシステムでも、利用可能な演算能力はこれらのキャリブレーションを実行するのに十分です。多項式ゲイン補正法は、エンドユーザーがあまり操作に煩わされることなくソフトウェアで画像を補正するのに適しています。