

AN04: パルス式X線源による画像処理

はじめに

多くのX線イメージングアプリケーションでは、X線源の電源は常に入っています。これはX線透視診断モードあるいは連続モードと呼ばれて、ラドアイイメージセンサーとシャドボックスカメラの初期設定はこのモードになっています。連続モードでは、イメージャーとカメラは画像フレームをデータ取り込みシステムであるフレームグラバーに常に送信しています。タイミングつまりフレームレートは、マスタークロックによってのみ決まり、1フレームの読み出しが終わるとすぐに次のフレームの読み出しが始まります。

連続モードの主な利点は、X線イメージングシステムの各部分の同期が不要なので設定が非常に簡単なことです。X線画像は連続していて、フレームグラバーは画面表示の更新が必要な場合に次のフレームを取り込むだけでよいのです。ところが、X線管のパワー散逸のために短いX線パルスしか使用できないとか、撮影する物体への露光を最小限に抑える必要があるとか、連続モードが使用できない場合があります。

パルス式イメージングアプリケーションは、X線源、イメージャー、データ取り込みシステム間の同期を慎重に行う必要があります。イメージャーはX線源がパルス式で動作するときに読み出しサイクルが停止するようにコントロールされなければならない、データ取り込みシステムは前後のフレームではなく実際に露光されたフレームを取り込むように始動しなければなりません。この説明書は、ラドアイイメージャーやシャドボックスカメラを用いてパルス式イメージングシステムを設計する上での考え方を示しています。もちろん多くの解決法があって、それぞれのアプリケーションは少しずつ異なっています。この説明書で、パルス式X線システムで初めて画像を撮影するのに十分な情報を提供できればと思います。先へ進む前に、ラドアイとシャドボックスのデータシートによく目を通してください。以下を読むには製品の機能について基本的なことを理解している必要があります。

シャドボックスカメラ

まず、シャドボックスカメラ、デジタルフレームグラバー、シャドカムイメージングソフトウェアを用いる場合のパルス式X線システムの必要条件を説明します。シャドボックスカメラは、連続モードかフレームモードで動作します。後者の場合は、フレームグラバーか別の装置から供給される外部同期パルスが必要になります。

1. 手動操作

手動操作の場合はX線コントロールパネルのボタンを押すか離すかしてX線パルスのトリガーをかけますが、トリガーをかける前にX線源を作動させなければならない場合があります。露光はX線コントロールパネルのパルス幅コントロールがmA/mAs設定で決まります。

Table 1 – Camera frame period control

	Signal Connection	Min. Frame Period ¹	Max. Frame Period	Pulse Width
Data Translation DT3157	parallel interface (EXSYNC)	440 ms	1.7 sec	n/a
Imagination PXD1000	parallel interface (EXSYNC)	440 ms	6.7 sec	10 ms
External Pulse Generator	SMA connector (Ext. Sync In)	440 ms	60 sec ²	1-10 ms

¹Minimum frame period is determined by the length of the image readout sequence.

²Maximum frame period is limited by the timeout counter in the ShadoCam software.

手動モードでは作業者がX線源、カメラ、フレームグラバーの同期をとらなければなりません。X線パルスのタイミングを適切にするには、作業者はカメラが画像データをフレームグラバーに転送する時間を知る必要があります。この読み出し期間中に、カメラの電子回路はイメージャーを列ごとにスキャンして、処理中の各ピクセルをリセットします。X線パルスは、読み出し過程の間にあるブランク期間中に発生するようにタイミングを合わせなくてはなりません。幸いなことに、このブランク期間は、カメラの露光時間がフレーム期間を調整することによって必要な長さに設定できます（シャドカムのAcquisitionメニューからFrame Exposureを選択します）。最大フレーム期間は、フレームグラバーのハードウェアによって決まります（表1を参照）。もっと長いフレーム期間が必要な場合は、外部パルス発生器を使用しなければなりません。

カメラの読み出しタイミングを知る簡単な方法は、カメラのフレームシンク出力にLEDを接続して試みることです。フレームシンク信号はTTLパルスで、読み出し期間中はハイになり、ブランク期間中はローになります。図1は、適切な結線図を示しています。LEDには直列に小型の抵抗（通常は100-500オーム）

を接続してフレームシンク出力に直結します。この図では外部シンク入力にパルス発生器が接続されています。外部パルス発生器を用いる場合は、フレームグラバーの露光コント

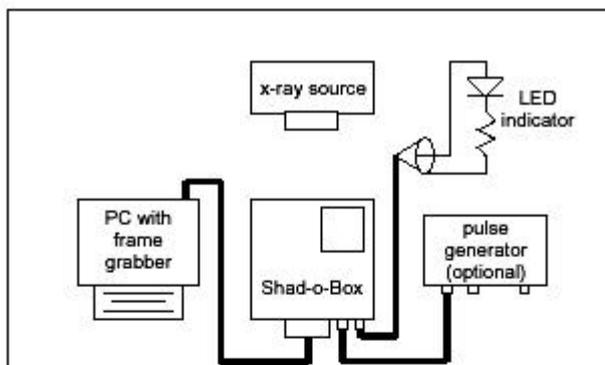


Figure 1 – Manual operation.

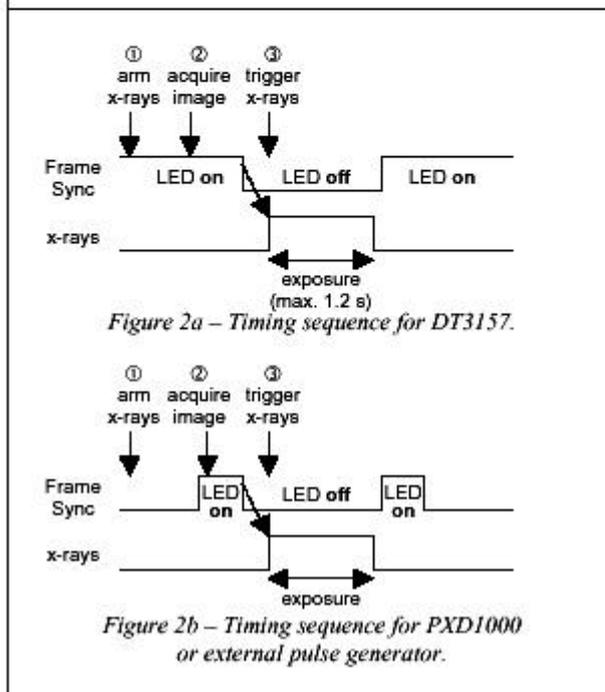


Figure 2a – Timing sequence for DT3157.

Figure 2b – Timing sequence for PXD1000 or external pulse generator.

ロールを無効にするためにシャドカムのフレーム露光が10ms以下に設定されていることを確認してください。パルス発生器は、パルス幅が1msから10msの正のTTLパルスが発生するように調整しなければなりません。パルスの周波数でカメラのフレーム期間がコントロールされます。

図2は、X線画像を取り込む一連のタイミングを示しています。DT3157フレームグラバーのタイミングは少し異なっていて、画像の取り込みが要求されるまでカメラは連続的に読み出しモードになっています。そのためLEDは常に点灯して、画像取り込みコマンドの後のブランク期間中だけ消えます。これは図2aに示しています。ほかのシステムではカメラのタイミングは反復するスタートパルスでコントロールされるので、LEDはカメラが画像を読み出すたびに一定の間隔で点灯します（図2b）。

画像を取り込む第1ステップは、（必要な場合は）X線源を作動させることです。次にLEDが点灯している間に、作業者はソフトウェアに画像を取り込むことを知らせます（シャドカムのAcquisitionメニューからSingle Imageを選択します）。これでフレームグラバーは次の画像を取り込みます。LEDが消えたらすぐに作業者はX線源を始動させます。フレーム期間が正しく設定されていれば、X線パルス全体が現在のブランク期間中に落ち込んで終了してから、次の読み出しを告げるLEDが再び点灯するはずですが、そうするとフレームグラバーが露光されたフレームからデータを読み込んでPCモニターに画像を表示します。

2. 自動操作

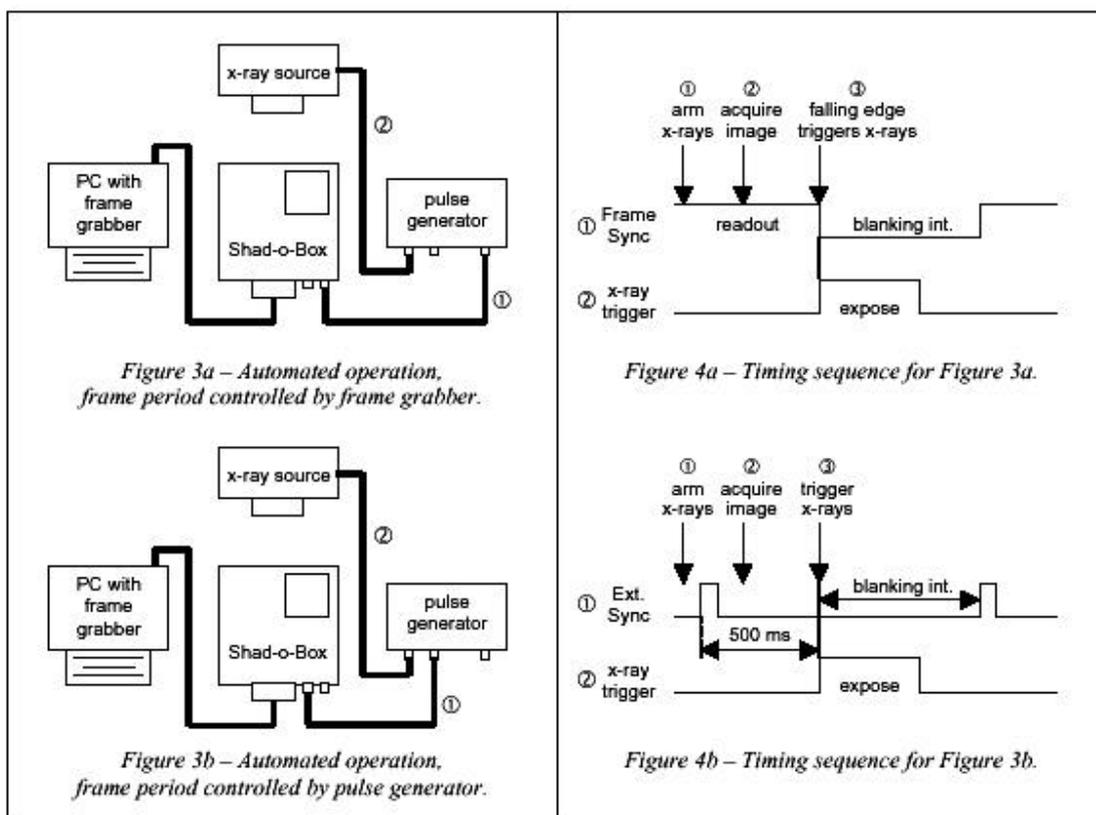
上に述べた画像取り込み過程は、X線源をコントロールする別のパルス発生器を用いて自動化できます。これにはX線源を外部コントロール信号で始動させることが必要です。図3は必要な結線を示しています。図3aの場合、カメラのフレーム期間はフレームグラバーによってコントロールされます。カメラからのフレームシンク出力は、LEDの点灯に用いないで、パルス発生器のトリガーに用いています。フレームシンク出力の立ち下がりエッジがX線パルスの始動に用いられて、この場合もカメラのブランク期間中に落ち込むようなタイミングに設定されます。パルス発生器がカメラとX線源の両方をコントロールする場合は、図3bに示した結線が用いられます。この場合パルス発生器は、反復するスタートパルスでカメラに出力し、約500ms遅れてX線源用のトリガーパルスが出力されます。各場合のタイミングダイヤグラムは図4に示しています。

ここで述べた自動化の方法は、使用するX線システムの特定の条件に合うように修正が必要な場合もあり、露光を行う前に手動で作動させなければならないシステムもあります。また、画像が取り込まれるときだけX線源が作動するように、X線源用のトリガーパルスにゲートを設ける必要があることもあります。さらに、画像の取り込みがなされる前に、ソフトウェアのコマンドによって手動でフレームグラバーにトリガーをかける必要がある

場合もあります。たいていのフレームグラバーにはハードウェアトリガー入力も備わっていますが、この機能の使用についてはこの説明書では扱いません。

3. オフセットとゲインの補正

シャドボックスカメラで最良の画質を得るには、シャドカムソフトウェアに備わっているオフセットとゲインの補正機能を使用しなければなりません。オフセット画像は、上に述べたどのイメージングモードでも、X線源の電源が入っていない状態で画像を取り込むだけで容易に得られます。ダーク信号のオフセットが一致するように、オフセット画像と実際のX線画像の積算時間が同じになっていることを確認してください。



ゲイン画像を得るのは、もう少し複雑です。シャドカムは、ゲイン補正アルゴリズムからのノイズを最小にするために、複数のフラットフィールド画像を取り込んで平均化するようにプログラムされています。取り込みシステムを完全に自動化しないかぎり、作業者が複数のフレームにわたってX線源とカメラを同期させる必要があります。オフセット補正された画像を1枚取り込んで、Gain Imageダイアログボックスの中の"Make ... gain image"機能を用いてその画像をゲイン画像として用いるほうが簡単かもしれません。

フレームの平均化が必要な場合は、さらに考慮する点があります。コンピュータとフレームグラバーのハードウェアは連続画像を取り込めない場合があります。ハードウェアの性能を確かめるには、シャドカムを"Continuous Acquisition"モードにして、ステ

ータスパーのフレームカウント数をシャドボックスカメラのフレームシンク出力と比較します。特にDT3157フレームグラバーの場合は、フレーム期間のコントロールに露光カウンタが用いられる場合は取り込みの間に2-3フレームが省かれる傾向があります（図2a）。この遅れは予測できないので、この場合はカメラのコントロールにパルス発生器を用いることを勧めます。外部コントロールを用いる場合、DT3157は通常1枚おきにフレームを取り込みます。

ラドアイイメージャー

ラドアイイメージャーは、画像取り込みのタイミングのコントロール性能についてはシャドボックスX線カメラと同じです。ラドアイにはそれに加えて、シャドボックスには組み込まれていない上級のイメージングモードがいくつか備わっています。

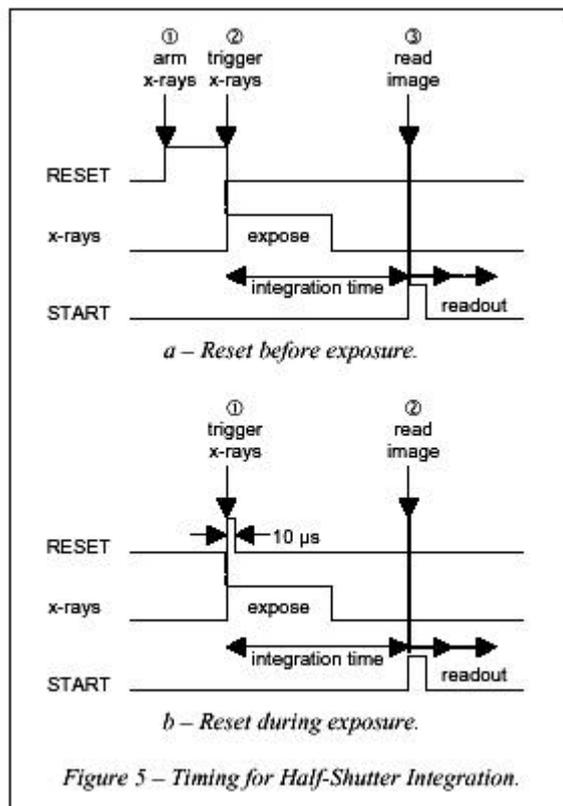
1. スタンダードモード

パルス式X線アプリケーションの場合、ラドアイイメージャーはシャドボックスカメラについて述べたのと同じ方法でコントロールできます。ラドアイのフレーム出力はカメラのフレームシンクと同じ働きをします。（けれどもラドアイイメージャーには直接LEDをつなぐことができません！ラドアイイメージャーの出力信号はすべてバッファ処理をしなければなりません。）ラドアイイメージャーのスタート入力、シャドボックスの外部シンク入力に相当します。イメージングシステムのコントロールにはパルス発生器を用いることができます。

2. ハーフシャッター積算

ラドアイイメージャーには、電子的なハーフシャッター積算モードの実行を可能にするリセット入力追加されています。ハーフシャッターは、X線の露光が始まる前に積もった信号をすべて露光の開始時に（したがってシャッターの「開く」ときに）素子から捨て去ることができます。シャッターはX線の電源を切ることによって「閉じる」必要があり、それから素子が読み出しを行います。図5は、このモードのタイミングダイアグラムを示しています。

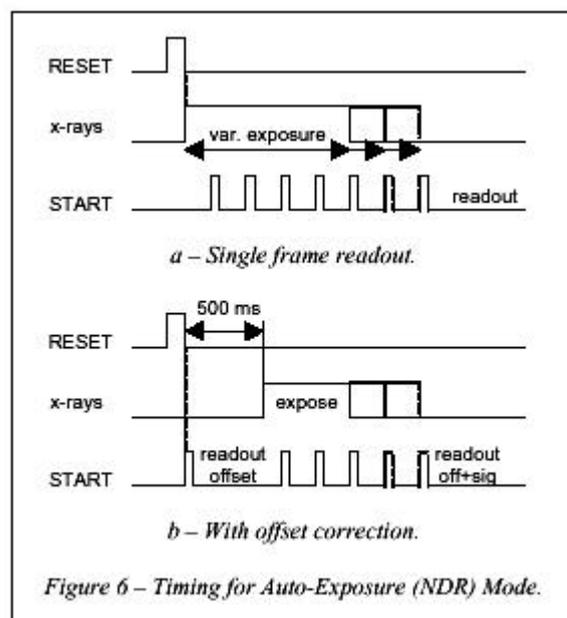
このモードの利点は、イメージャーのタイミングをX線源からコントロールできることです。作業者がX線を作動させると、素子からすべての電荷を取り除くためにリセット入力が始動します。X線にトリガーがかかると、リセット入力は解除されて、イメージャーは露光の開始と同時に信号の積算を始めます。露光が終わると、スタートパルスが送られてイメージャーはフレームの読み出し過程を開始します。リセットパルスは非常に狭くできるので（10 ns）、X線にトリガーをかけるのと同時に信号を著しく失わないでこのパルスを発生させることも可能です。図5bはこの可能性を示しています。ラドアイイメージャーはフォトダイオードの各列を、読み出されるごとにリセットするので、シャッターはX線の露光を終了させて「閉じ」なければなりません。そうしなければ、各列が受け取る信号の量が違ってきます。



3. 非破壊読み出し

ラドアイイメージャーには、自動露光機能の実行に使用できる非破壊読み出し(NDR)モードが備わっています。NDR入力がハイに設定されていると、フォトダイオードは読み出し過程の一部としてリセットされることはありません。したがってイメージャーは、信号が積算されている間に複数回の読み出しができます。（NDRモードについて詳しくはラドアイデータシートを見てください。）

自動露光の設定では、信号が積算する速さで、フォトダイオードが十分な信号があるかどうかをチェックする頻度が決まります。幸いなことに、これを決める前にフレーム全体を読み出す必要はありません。たとえば、最初の10列を反復してスキャンすることが可能で、この場合は特定のピクセルが（クロック周波数に応じて）2-5ミリ秒に1度モニターされます。イメージャーがスタートパルスを受け取るたび



に、スキャンレジスタがリセットされて、読み出し過程が再び始まります。ピクセルはリセットされないため、連続した各フレームの部分はその前のものよりもわずかに多い信号があるだけです。取り込みソフトウェアが十分な信号があると判断すると、(X線の電源を切ることによって)露光を終了させて、センサーからフレーム全体の読み出しを始めます。これは図6aに示しています。先ほど説明したハーフシャッターモードでの露光の開始時のように、フォトダイオードをリセットする必要があることに注意してください

自動露光モードの実用的な例を図6bに示しています。NDRが作動すると、ラドアイイメージャーに備わっている固定パターン抹消回路が無効になります。したがって取り込んだ画像でオフセット補正を実行することが非常に重要になります。オフセットキャリブレーション画像はいつでも取り込めますが、露光過程の一部として取り込むのが便利です。これを行うには、上に述べた露光過程が開始する前に、リセットパルスの発生後に完全な画像を読み出します。この最初の画像には装置の固定パターンオフセットがすべて含まれていますが、2番目の画像には固定パターンに加えて積算された信号が含まれています。2つの画像の差から信号自体がわかります。このタイミングモードのさらなる利点は、処理中にピクセルがリセットされないためピクセルのリセットノイズも除かれることです。リセットノイズによって、一般にラドアイイメージャーのダークノイズは150エレクトロンrmsまでに制限されます。

まとめ

パルス式X線源とともにシャドボックスX線カメラやラドアイイメージャーを使用する方法を説明しました。正しい動作順序を守るために外部タイミング発生器か作業者を調達できる場合は、カメラもイメージャーもX線源と同期が可能です。ラドアイイメージャーはタイミングモードが追加されていて、ハーフシャッターモード、非破壊読み出し、自動露光というように融通性が高まっています。

この説明書で述べたシステムの設定とタイミングダイヤグラムは、パルス式X線イメージングシステム設計の指針として役立つことを目的としています。これらの装置のコントロールとデータのインターフェースに関するほかの情報についてはシャドボックスとラドアイのデータシートを参照してください。最新の情報は弊社のホームページ <http://www.rad-icon.com> からダウンロードできます。