

高速カメラの選択： 新しいイメージングセンサと技法を理解

ゲイル・オーバートン

安価なデジタルカメラでも1000フレーム/秒の速度に達するものが存在するが、生物学や産業分野のプロセスの瞬間を捉える科学用カメラでは、新しい検出器やイメージング技法を駆使して数千から最大で100万フレーム/秒もの処理速度が達成されている。

ウィキペディアによると、高速カメラとは、フレームレートが毎秒250フレーム(フレーム/秒)を超えるものを指すという。しかし科学的観点からは、そのような速度ではまるで子供のおもちゃだ。安価なデジタルカメラでもごく普通に1000フレーム/秒を超えており、非常に高速なものでは、1兆フレーム/秒もの速度を達成するカメラが開発されている。

しかし、多くの研究施設でレーザーによる点火、超高速産業用製造ラインにおける組み立てや加工、化学的および

生物学的事象、さらには自動車衝突試験結果の研究用に用いられる科学用カメラは、数千から100万フレーム/秒程度のイメージング速度を備える、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体)カメラ、またはCCD(Charge Coupled Device: 電荷結合素子)カメラである。

当然ながら、イメージング速度はイメージング解像度と光量に密接に関わりがある。絶えず進化し続ける高速イメージングカメラの能力を分析すると、とどまることなく拡大していく一

連のアプリケーションに対して、その瞬間をユーザーが捉えられるようにしているのは、フォトリソグラフィ分野の進歩であることがわかる。

カメラの中心要素

カメラはすべて、光学部品、オプトメカニクス部品、検出器、筐体、電子データのストレージおよび制御部品を備える、完全なオプトエレクトロニクスシステムである。しかし一般的にどのようなカメラも、その性能はイメージングセンサによって決まり、イメージングセンサを中心としてその他すべてのシステム構成要素が設計されている。

一般的に、CMOSセンサは高速イメージング分野に最適と考えられている。限られた数のピクセルからなるCCDセンサは、各ピクセルで入射光が電圧に変換され、電圧は限られた数(1~数個)の出力ノードを介してアナログ信号としてチップへと送信される。一方、CMOSセンサは、センサチップ内にアンプやD/Aコンバータ(DAC)を搭載しており、消費電力が高く読み出しに時間がかかるという、オフチップのCCD画像処理の問題を回避することができる。

「CMOSセンサは、多くの高速カメラの中心要素であり、センサチップ・チャンネル数を増やして光子から電子への変換を高速に行い、センサから電子を

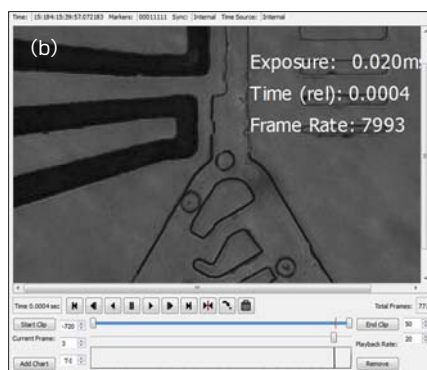
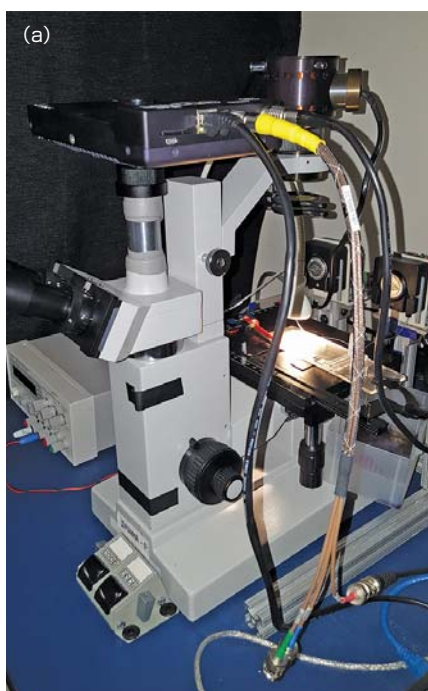


図1 高速カメラIL5(a)は、5000フレーム/秒という同製品の最適速度で微小流体回路(b)を撮影する。カメラによって回路制御信号が記録され、フレームごとのメタデータの一部として保存される(提供: ファステック・イメージング社)。

すばやく『取り出す』ことが最大の検討事項となっている」と米フォトロン社 (Photron) のセールスおよびマーケティング担当ディレクターを務めるアンドリュー・ブリッジズ氏 (Andrew Bridges) は述べる。「D/A コンバータの数が多くなると、大量の熱が生成される可能性がある。メモリの容量拡大に対する需要も高まっており、それも熱の生成につながる。幸い、理想的なオンボードメモリも、データをすばやくオフロードする技術によって CMOS で実現することができる」(ブリッジズ氏)。

生成熱とセンサノイズの低減に加えて、「光感度は、高速イメージング分野における重要な要素だ」とブリッジズ氏は述べる。「FASTCAM SA5 が 2008 年頃に発売されたとき、1万という ISO 感度は画期的だった。現在、当社の FASTCAM SA-Z に搭載されている新しいセンサ電子部品によって、12ビットのモノクロ画像で 5万、36ビットのベイヤー (Bayer) カラー画像で 2万の ISO 感度が、どちらも $20\mu\text{m}$ 四方のピクセルを用いて達成されている」と同氏は言う。ブリッジズ氏によると、ゲインを増加させつつノイズを大幅に抑える新しい回路設計の開発によって、感度が改良されたという。

「当社の FASTCAM カメラは、高いフレームレートにおける模範的な光感度に関する業界規格 ISO Ssat 12232 に厳格に準拠して測定を行っている。照明を追加することなく、同一の光量条件の下で、シャッター・露光速度はより短く、被写界深度はより深くなっている」とブリッジズ氏は述べている。

標準的なエリアスキャンカメラの代わりに、ラインスキャンカメラを使用することもできる。ラインスキャンカメラの速度は、1秒あたりのフレーム数ではなく、センサによって移動体が

スキャンされるときに、数千ピクセルからなる数ラインでデータを収集する周波数で測定される。これらのカメラは露光時間が短く、産業用マシンビジョン分野向けに、通常は高輝度光源を備える。

独クロマセンス社 (Chromasens) のトライリニアカメラは、3本の RGB センサラインを非常に近接して配置して移動体の画像をキャプチャすることにより、高い色精度を達成する。「allPIXAwave」カメラは、最大ライン長 1万 5000 の 4本のラインからなるクアッドリニアの CMOS カラーラインスキャンセンサをベースとしており、150kHz の速度で 850メガピクセル/スループットで動作する。

カナダのテレダイン・ダルサ社 (Teledyne DALSA) は、CCD カメラの一般的なラインレート数万程度に対して、1億フレーム/秒でのイメージングが可能なカスタムセンサとカメラを 2003 年に開発した。フレームレートの高いこのカメラは、非常に短時間のイメージング (バースト) が必要で、限られた数 (10~15) の画像をキャプチャし、それらの画像を低速で読み出して、単一の事象に付随するインシデントに関連する詳細情報を取得する用途を対象に、ピクセルがカスタム設計されていた。

レーザ誘起衝撃、マイクロデトネーション、超高速衝突などの弾道事象や、一部の生物学的プロセスなど、持続時間が数十マイクロ秒から数十ナノ秒の超高速事象に対し、英米スペシャライズド・イメージング社 (Specialised Imaging) は、光学ビームスプリッタを中心として構成された、複数の非常に高解像度 (最大 1360×1040 ピクセル) のセンサを採用している。100フレーム/秒から最大 10億フレーム/秒までの任意のフレームレートで、各センサを順

DAYLIGHT SOLUTIONS®

中赤外 3~12um

チューナブル外部共振型
量子カスケードレーザー

Headhog

New!!



Side Kick

特徴

- ・パルス、CW オペレーション
- ・広い波長チューニング領域
- ・1台のレーザーヘッドに最大 4台のモジュール搭載 (MIRcat™ シリーズ)
- ・狭線幅
- ・モードホップフリー波長チューニング (CW-MHF シリーズ)
- ・ハイパワー 最大 2W (Aris™ シリーズ)
- ・高速チューニング $>1000\text{cm}^{-1}/\text{sec}$ (Hedgehog™ シリーズ)
- ・コンパクトなコントローラ (GUI & SDK 付き USB/Ethernet)

アプリケーション

- ・ナノスケール・イメージング & 赤外分光
- ・光音響分光 (PAS)
- ・ハイパースペクトル・イメージング
- ・時間分解赤外分光

<http://www.japanlaser.jp/>

E-mail: lase@japanlaser.jp

JLC 株式会社 日本レーザー

本社 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0853 (直)

大阪支店 TEL: 06-6323-7286
名古屋支店 TEL: 052-205-9711

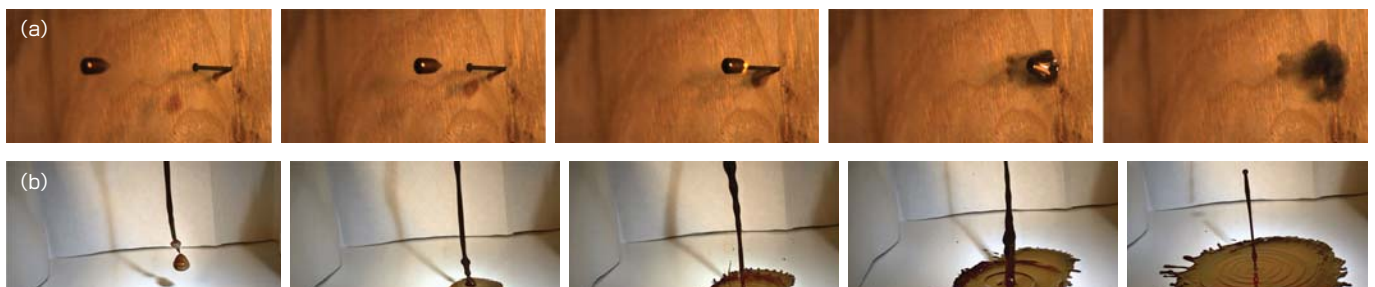


図2 高速イメージングカメラFASTCAMによって、釘頭に衝突する弾丸(a)とインクジェット噴射(b)を撮影した画像(提供:フォトン社)。

に起動することで、センサデータの高
速読み出しが必要な場合の制約を回避
することができる。ピームスプリッターは、
100lp/mmを超える空間解像度とほぼ
ゼロの視差で、歪みのない画像を維持
しつつ、一次画像を最大16のポートに
分割する。

スペシャライズド・イメージング社の
カメラは、ICCD(Intensified CCD)セ
ンサを採用している。このセンサは、
ゲート時間わずか数ナノ秒の電気光学
シャッターとして機能するとともに、短
い露光をCCDで記録可能なレベルに
まで増幅するゲイン段としての役割も
果たす。CCDは、マイクロチャンネル
チューブプレートに光ファイバ結合され
ている。高速蛍光体(残光時間[decay
time]:300ns)とライン転送型CCDを
採用することにより、1つのICCDか
ら2つのフレームを550nsのフレーム
間隔以内にキャプチャ可能で、基本的
に145万フレーム/秒という最高速度
を備える16フレームカメラが、8チャ
ネルのICCDカメラから構築されてい
ることになる。

フレームレートとデータストレージ

「数年前、当社のFASTCAM ultima
APX-RSは、幅128ピクセル、高さ16ピ
クセルの非常に小さな解像度で25万フ
レーム/秒という市場最高速のビデオカ
メラだった。現在、FASTCAM SA-Z
は、128×8ピクセル(幅×高さ)で毎秒

210万フレーム、つまり、384×128ピク
セル画像で毎秒25万2000フレームを
記録することができる」とブリッジズ
氏は述べる。

しかし、米ファステック・イメージング
社(Fastec Imaging)の製品マネージャ
ーを務めるティム・ブランド氏(Tim
Brandt)は、フレームレートが高いこと
が必ずしも、有意情報を捉えるため
の最良の方法とは限らないと警告する。
「解像度が高ければ、広い視野をカバー
してより良い処理を行うことが可能だ。
フレーム内を動く被写体の動きを特性
化するために5枚の画像を取得したい
としよう。障害を伴わない被写体は、
非常に限られた視野内を、大きな物体
よりも格段にすばやく動くので、その
限られた視野において5枚の画像を取
得するには、より高いフレームレートが
必要になる」と同氏は述べる。「しかし、
より広い視野を使用することには2つ
の主要な利点がある。1つめは、その
ような高いフレームレートが不要であ
ることで、2つめは、より長い時間を
かけて被写体の画像を取得することにな
るので、量的にも質的にもその動作
に関するより良い情報が得られること
だ」(ブランド氏)。

高速カメラである「Fastec TS」と
「Fastec IL」のフレームレートは、最大
で1万8000~約6万フレーム/秒だが、
最適速度は768×300ピクセル画像で
約5000フレーム/秒である。このミッ

ドレンジ性能を、100万フレーム/秒の
カメラよりも格段に低いコストで達成
することができる(図1)。

「ほとんどの高速カメラにおいて、高
いフレームレートで1度に記録できる
のはわずか数秒間である。カメラに搭
載可能な高速メモリの容量に限度があ
るためだ。例えば、1メガピクセルの
解像度で毎秒1000フレームを記録す
る8ビットカメラは、1秒につき1GBも
の未加工画像データを生成する」とブ
ランド氏は述べる。「弊社のTS/IL4と
TS/IL5は、内蔵SSD(Solid State Disk:
ソリッドステートディスク)ドライブに
直接記録することができる。フレーム
レートと解像度によっては最大1TBも
の容量を何分間にもわたって記録可能
で、8GBの内蔵高速メモリをバッファと
して使用することによってSSD帯域幅
における遅延を調整し、内蔵ドライブ
に対して最大450MB/秒のデータレ
ートを維持する」(ブランド氏)。

ブランド氏はさらに、「SSDを装備
するFastec ILとTSのカメラはすべて、
メモリを最大16のセグメントに分割し
て、前のセグメントがドライブに転送
されている間に、各セグメントに高速
ビデオを順に記録することができる。
この『FasFire』機能により、ユーザー
は揮発性メモリへの保存と並行して
高速バーストを連続記録することが可
能だ」と続けた。ブランド氏によると、
画像がSSDに保存されるまでの時間が

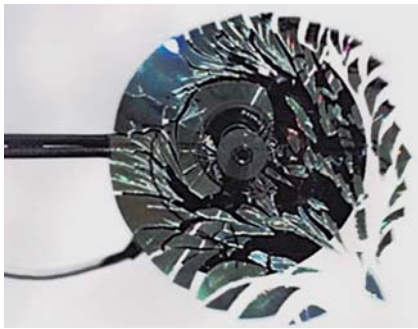


図3 CDを2万3000rpmで回転させると、湾曲し始めた後に粉々に碎ける。画像は、その様子を17万フレーム/秒で撮影したもの(提供:ビジョンリサーチ社)。

非常に短いので、カメラが次のショットのためにバッファをクリアするのをユーザーが待たなければならないことは、あったとしてもまれだという。これはワークフローに変化を与え、非常に短い時間で多数のテストを連続的に実行できるようになるため、対応可能な高速アプリケーションの範囲が拡大されるという。

そして当然ながら、フレームレートと解像度の間には密接な相関関係がある。米ビジョンリサーチ社(Vision Research)の「Phantom Miro C-110」は12ビット、0.5インチのCMOSセンサ(カラーまたはモノクロ)を搭載し、1280×1084のフル解像度で記録できるのは毎秒800フレームだが、解像度を落とせば最大で毎秒2万9840フレームに対応する。8GBの内蔵メモリによって、フル解像度かつ最大フレームレートで最大5秒間の記録が可能である。

進歩を促す応用分野

木片や飛散防止ガラスを貫通する弾丸といった昔からある典型的な画像以外にも、高速イメージングでは、科学、生物学、産業の分野における重要なプロセスの科学的理解を深める上で不可欠な事象を明らかにすることができる(図2)。

フレームレートが数万、さらには数

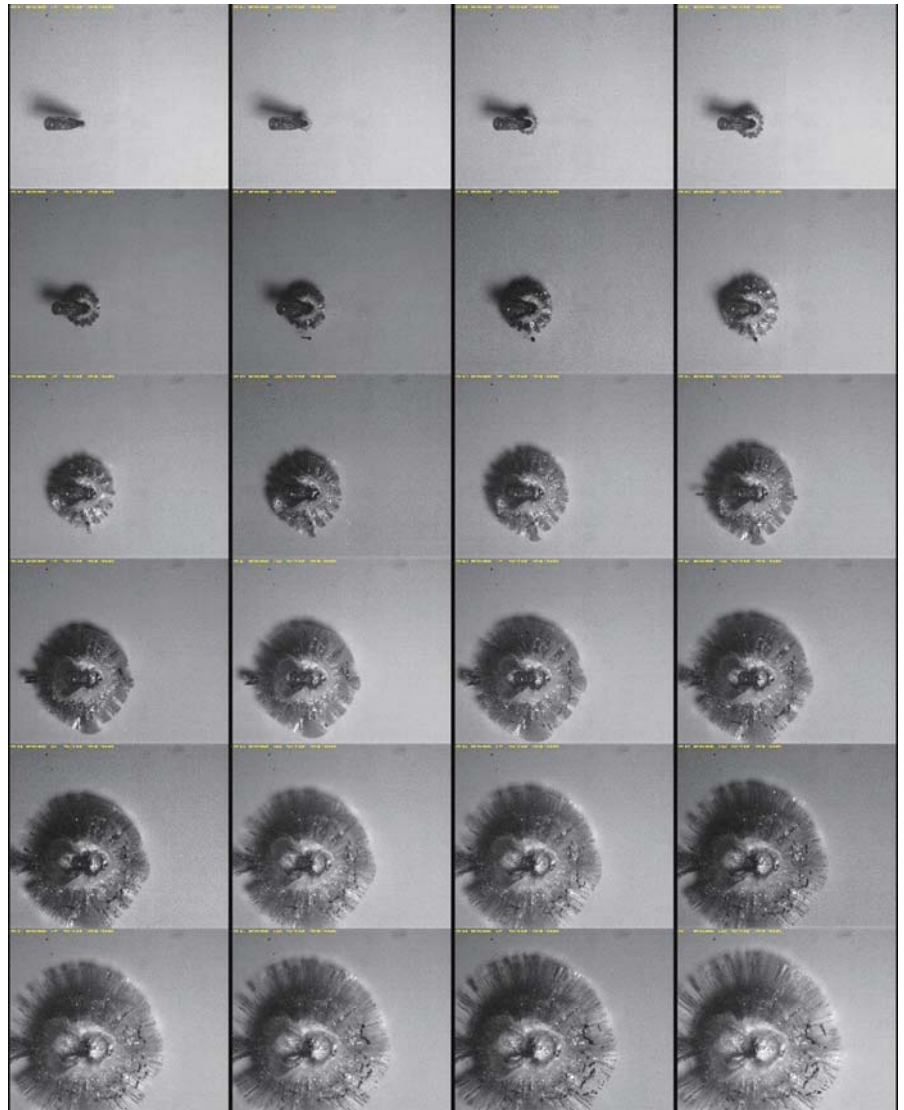


図4 3000フィート/秒で飛行する徹甲弾が防弾ガラス複合材に衝突する様子を、Kiranaカメラによって200万フレーム/秒、500nsの露光時間で撮影した180フレームの中から、8の倍数のフレームを抜き出したもの。被写体は1000 Jのキセノンフラッシュランプによって前面から照らされている(提供:スペシャライズド・イメージング社)。

十万にも届きつつある中、ビジョンリサーチ社のカメラは、高度な並列処理やパイプライン処理に加えて、独自のFPGAコードを使用して、速度、解像度、感度のバランスをとりつつ、画像処理を行う。同社の「Phantom V2511」カメラは、2万3000rpmという臨界破壊点を超えた速度で回転させたときに粉砕するコンパクトディスク(CD)を、17万フレーム/秒で撮影することができる(図3)。その他の高速イメージング

の興味深い例としてwww.highspeedcameras.comには、ダミー衝突試験、エアバッグの展開、典型的な弾丸貫通や砲口爆風などが掲載されている。

弾道関連の別の例として、3000フィート/秒で飛行する弾丸が防弾ガラス複合材に衝突する際の画像からは、亀裂が材料を伝播する様子が見え(図4)。それに使われているのと同じスペシャライズド・イメージング社の「Kirana」カメラが、サウジアラビア・ア

ブドラ王立科学技術大 (King Abdullah University of Science and Technology) の研究者らによっても使用されている。同大では、固体表面に衝突する液体の時間分解画像を500万フレーム/秒で撮影した。この画像からは、インクジェット印刷やその他の噴霧塗装の用途に関する重要な情報が得られる。

また航空分野では、ジェット機の構成要素や機内操作に関する理解を深める上で高速カメラは重要な役割を担う。NASAのエンジニアは、ジェット機のコックピット内でハンドヘルド型の「Fastec TS3」を使用し、別のジェットによる衝撃波の高速シュリーレン画像を撮影した。3機目のジェット機の翼によって日光を遮ることにより、必要なコリメート照明を生成した。

シャッターオプションも、タービンやプロペラのイメージングに重要な要素である。「今日のCMOSセンサには、全ピクセルが同時に露光される、電子式のグローバルシャッターが採用されている。これによって、ローリングシャッターに昔から伴う問題を回避することができる。ローリングシャッターは、各ピクセルラインが順に露光されるために被写体がライン間でずれることがあり、目に見える収差が生じてしまう(図5)」とブリッジ氏は説明を添えている。

制約事項

低光量時の高速イメージングは難しい。低光量時には通常、画像細部を適切に収集するために長時間の露光が必要になるためだ。米フォトメトリクス社 (Photometrics) の製品マネージャーを務めるラチット・モヒンドラ氏 (Rachit Mohindra) は、「例えば、細胞機能のイメージングには、高速性に加えてかなりの感度が必要である。生理学的関



図5 全ピクセルが同時に露光される電子式グローバルシャッターを装備する高速ビデオカメラではなく、ピクセルが1ラインずつ露光されるローリングシャッターを採用するカメラで撮影すると、航空機のプロペラ翼が垂れた画像が得られてしまう(提供:フォトロン社)。

連性は、定量性能だけに依存するのではない。恒常的環境を維持するには、照明を絶対最小限に抑えなければならず、高速フレームレート時にこれは、難しい要件である」と述べる。「EMCCD (Electron-Multiplying CCD: 電子増倍型 CCD) カメラは、広帯域幅の出力アンプにオンチップでの画像信号増倍を組み合わせることによって、速度と感度の間のこのトレードオフの問題に対処する。その結果、入力換算電子読み出しノイズは0.3eRMS未満となっている。この条件下で検出信号をさらに向上させるために、センサには90%を超えるQE (Quantum Efficiency: 量子効率) で後方から光が照射される」(モヒンドラ氏)。

「きわめて動的な細胞事象に対するイメージング速度をさらに高めようと

する場合に、まず犠牲になるのは視野である。ROI (Region of Interest: 対象領域) を絞ることによって、必要な高いフレームレートを達成することが行われる」とモヒンドラ氏は続けた。フォトメトリクス社は、同社の「Evolve 512 Delta」カメラにLightSpeedモードを開発した。ピクセル読み出しをパイプライン化して、さらに高いフレームレートを達成しつつ、ROIの位置には制約を与えず、ピンングとの併用が可能という重要な柔軟性を維持する。LightSpeedモードでは、最大3000フレーム/秒のフレームレートでの高速事象検出が可能である。

一部の低光量の生物学分野では、数千フレーム/秒の速度でさえも達成するのが難しい場合があるが、新しい用途の中には数百万フレームでも不十分な場合が存在する。「当社では数百万フレーム/秒ものカメラを提供しているにもかかわらず、顧客は一部のレーザおよびX線解析、高度な弾道学研究、超高速亀裂伝播研究に対して、さらに高いフレームレートを要求し続ける」とブリッジ氏は最後に述べた。「In Situ Image Storage (略語はISISとイスラム国と同じで、現在の世界情勢を考えると残念なことである) では、センサそのものに画像のフレームが格納されるが、ISISセンサアーキテクチャでは500万フレーム/秒で180フレーム、記録時間に換算するとわずか36 μ sしか保存できない。多くの顧客が一般的に、数秒間相当のデータを記録する傾向にある。そうすることで、事象を逃さないようにカメラを確実に起動するという負担を大きく軽減している。つまり、センサアーキテクチャとそれをサポートする電子部品が、究極的にはイメージング速度を制約している」(ブリッジ氏)。

LFWJ