

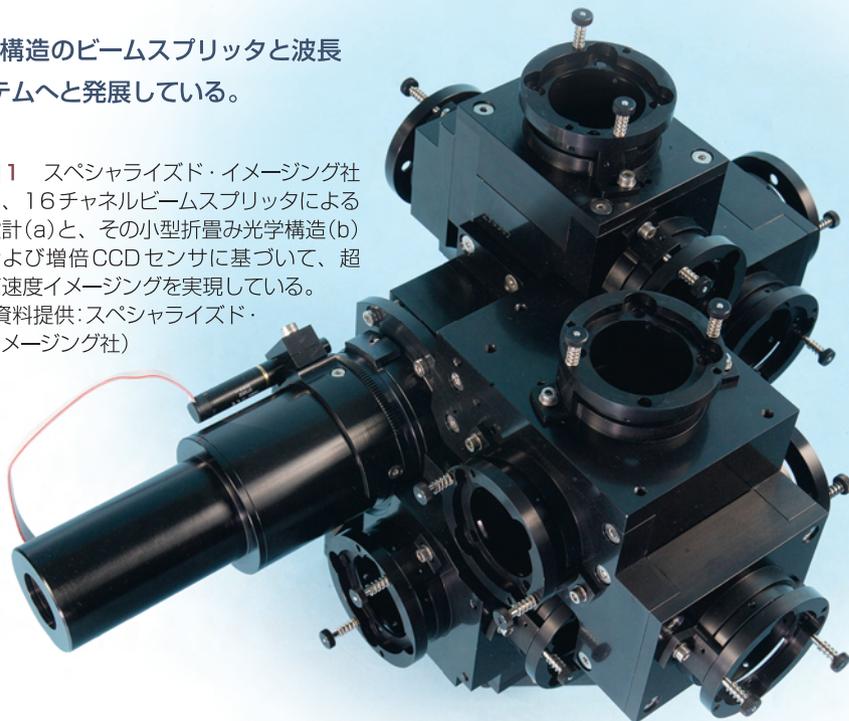
理想的な「超高速」の取得

ワイ・チャン、キース・テイラー

超高速フレーミングカメラは独自の折畳み構造のビームスプリッタと波長選択部品を使用して単一プラグ&プレイシステムへと発展している。

超高速フレーミングカメラは伝統的に、高圧放電、亀裂伝播、爆発、超高速粒子衝突などの研究に使われてきた。現在、これらの伝統的な科学は生物医学や植物学の研究、ナノテクノロジーおよび宇宙科学と結びついている。そこでは撮影速度が最重要の要件とは限らず、毎秒50万以下のフレーム速度 (fps) が受入れられる場合もある。しかし、動きを「凍結」し、細部の正確な解析を可能にする高画質で高分解能の画像が取得できる能力は最重要とされている。これまでは事象の良好な連続写真を取得できれば十分であったが、今日では正確なタイミング、高分解能および短い露光による画像が必要とされる。画像データはシミュレーションデータと関係付けられ、事象に含まれている物理的過程を深く理解するた

図1 スペシャライズド・イメージング社は、16チャンネルビームスプリッタによる設計(a)と、その小型折畳み光学構造(b)および増倍CCDセンサに基づいて、超高速イメージングを実現している。(資料提供: スペシャライズド・イメージング社)



めの数値モデルの調整に使われることも多い。

新しい撮像エンジン

最近まで、ビームスプリッタの設計を

用いた超高速カメラは、非常に大型で、なおかつ画像には口径食、視差、非点収差などのアーチファクトが発生することもあった。英スペシャライズド・イメージング社 (Specialised Imag-

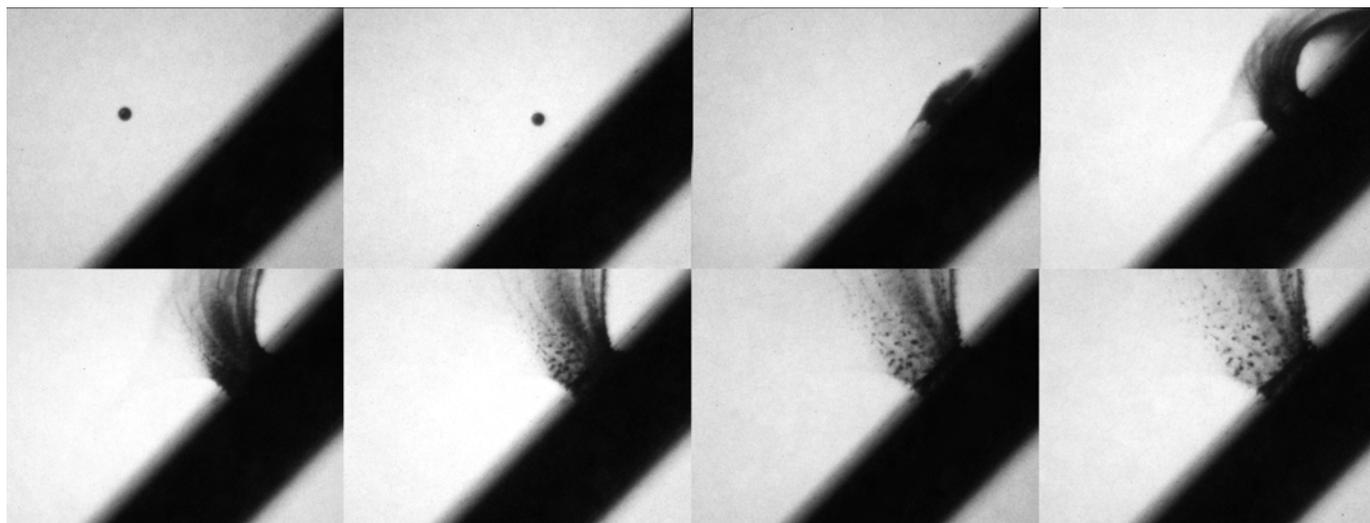


図2 80~200mmのf2.8レンズとSIM×8フレーミングカメラを使用して、直径1mmの飛翔体が25×20mmの視野で取得された。このカメラのスタンドオフ距離は50cmであり、データは80万fpsのカメラと5nsの露光を用いて取得された。後方照明はキセノン閃光ランプの光源から供給された。(資料提供: NASA ホワイトサンド試験施設)

ing)は光学設計会社の英レゾルブ・オプティクス社(Resolve Optics)と共同して、通常の光学収差を排除できるビームスプリッタ方式のSIMカメラを開発した。光学収差はマルチチャンネルフレーミングカメラの効果を制約してきた。

光学モデリングソフトウェアツールを使用し、SIMカメラの16のビューポートに入力するすべての波長の経過時間が等しくなるように、小型の折畳み光学系を設計した。ビームスプリッタに入る波長は予測できないため、使用するレンズは入念に設計し、350~900nmの範囲にあるすべての可視波長の焦点面が一致するようにした(図1)。スプリッタ上のそれぞれのビューポイントには1380×1040ピクセル画素の行間転送CCDセンサを結合した18mm高分解能イメージ増倍管を取付けた。

仏フォトニス社(Photonis)がSIM用に特別に開発した増幅CCD(ICCD)は、600万チャンネルをもつ6 μ mピッチのマイクロチャンネルプレート(MCP)で構成され、50lp/mmの空間分解能が得られた。光電陰極を素早くオンオフして、3nsの短い露光を可能にした。こ

れは、結果として、非常に高速のシャッターとして機能する。増倍管の出力部にある蛍光面は蛍光減衰が比較的遅いため、CCDセンサは画像の取得に十分な時間が得られる。

MCPはプレートのポテンシャルが変化するとき電子が増倍され、利得が可変になるため、光強度が迅速に増加し減少する事象(爆発、プラズマ、放電など)の画像を取得するときは、カメラに内蔵するすべてのICCD部品の感度を整合し、フレーム間の感度の変化を精密に制御しなければならない。細かいピッチのMCPと微粒で高感度のP43蛍光体を組合せ、低歪で4mm長の光ファイバスタブを用いて、CCDセンサと注意深く結合すると、50lp/mmの空間分解能が得られる。

各チャンネルのCCDセンサからのアナログビデオ信号は、ICCDに近づけて配置した専用ビデオ信号プロセッサを用いてデジタル化され、すべての雑音と干渉は最小化されて主要な制御電子回路に送られる。次に、大型のフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)を使用し、8個の個別12ビットデータチ

ャンネルを一つ的高速信号ブロックに統合して、制御用パーソナルコンピュータ(PC)へのダウンロードが必要になるまでの画像シーケンスを保留する。この高速データ量を扱い、雑音の不必要な導入を防ぐには、プリント回路基板(PCB)の注意深い設計と配置が必要になる。

フレキシブル制御

数秒間的高速事象を捕獲するには注意深い制御が必要になる。しかし、継続時間が100万分の1秒以下しかない現象を画像化するには、タイミングの非常に精密な制御と高度で簡単かつフレキシブルなトリガシステムの両方が必要になる。SIM系列のカメラのトリガシステムは-50~+50Vのすべての電気信号に対応できる。トリガ信号は1GHzの速度でサンプリングされ、2nsの短いパルスは非常に再現性よく(および<1nsのジッタで)検出される。トリガシステムは二つの分離されたトリガ入力を利用するSURESHOT機能を使って増強される。SURESHOTは、まず、既知の分離距離にある二つのトリガ点を用いて速度を1ns以内に測定

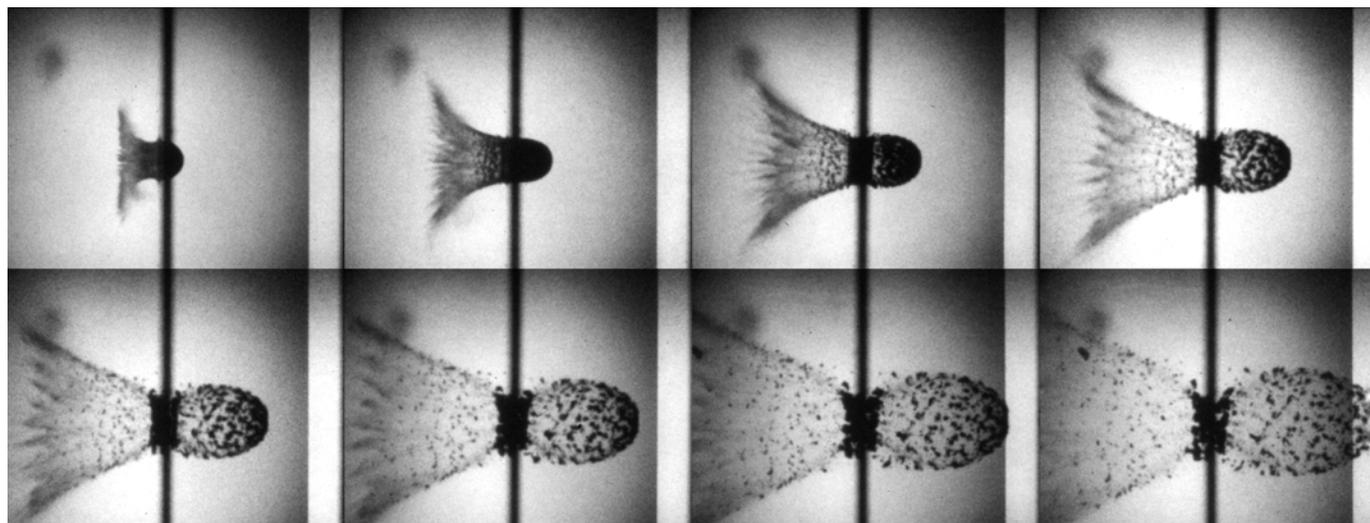


図3 105mmのf2.5レンズとSIM8フレーミングカメラを使用して、2.0mm厚のアルミニウム2024ターゲットに4119m/sの速度で衝突した直径3.0mmのアルミニウム1100飛翔体によるデブリ雲の発展が63mmの水平視野で撮像された。データは20万fpsのカメラと20nsの露光およびキセノン閃光ランプからの後方照明を用いて取得された。(資料提供: ティオ・エンジニアール研究所)

する。次に、これらのトリガ点からカメラの視野までの距離を検出し、タイミング回路を用いて、視野内の事前に設定した点を移動する物体の厳密な遅延を計算する。この遅延は第1画像の信頼性のある捕捉に必要となる。この機能を利用すると、速度が変化し予測が不可能な場合であっても、ユーザは記録を開始する瞬間を厳密にピンポイントで決定できる。

トリガが起きると、その信号は高速タイミング発生器に送られ、すべてのICCDチャンネルが同期し、シャッター時間の重複を許容すれば、最大で10億fpsまでのフレーム速度が得られる。FPGAに内蔵された独自のランダムアクセスメモリ(RAM)のタイミング発生器を用いると、1ns~10msまでの最先端シャッターパルス間隔を得ることができる。複合アルゴリズムを用いると、それぞれのICCDチャンネルにおける1nsステップごとの個別制御が3nsから10msの露光タイミングで可能になる。次に、タイミング信号は高電圧パルス列へ変換され、イメージ増倍管は適切な時間でオンオフされる。

超高速の動作

超高速粒子衝突は、一般に飛翔体の飛行速度が分からないため、その研究はひどく骨の折れる実験であり、画像は2~4cm²の小さな視野(FOV)において高倍率で取得されるのが標準的である。飛翔体は通常は2~5km/sの範囲の速度で飛行する。そのため、速度のわずかな変化でも、事象を捕らえるか、完全に見逃すかを左右することになる。1km/sの場合、1μsの露光で取得する画像では1mmの被写体ぶれが発生するが、これはFOVが6.3×5cmしかない場合(特にこの画像からのデータ解析が必要となる場合)は、許容できない。

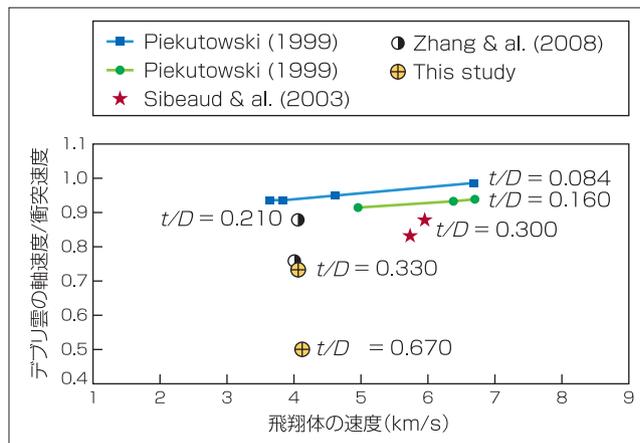


図4 SIMカメラの画像から得られたデブリ雲の速度と他の方法による文献値とを比較して示している。図のt/D値は飛翔体の直径(D)に対するターゲット板厚(t)の比率を表している。(資料提供: ティオ・エンジニアリング研究所)

アルミニウム板ターゲットに8km/sの速度で衝突する1mmの飛翔体の超高速衝突を研究する実験では、特許取得済みのSURESHOTトリガをすべてのSIMカメラに内蔵して、連続画像を取得した(図2)。ターゲットから離れた距離にある2本のレーザビームによる割込みトリガを使用して、まず、トリガ間の距離をSIMソフトウェアに入力した。次に、飛翔体を最初のフレームに入れるために必要となるFOVの点と第2のトリガとの距離を入力した。SIMX8は速度の変化に関係なく、二つのトリガ点間の速度を実時間で正確に測定し、第2のトリガからの遅延時間を調整して、飛翔体の位置が常に第1フレームのなかにあるようにした。その結果、高速事象のジッタのないトリガを小さな視野で行うことができた。

同様の超高速イメージング実験で

は、SIMカメラを用いて、小さな飛翔体から生じたデブリ雲の発生を非常に細かい破砕度で捕獲した(図3)。この超高速衝突の実験配置からは、その古典的「バドミントンドライブ」が初めての画像として特性化された。これらの測定とターゲットの回復からは非常に定量的な情報が得られ、計算機モデリングによる結果との密接な相関を確認できた。また、チャンらは実験時に測定したデブリ雲の軸方向速度と、伝統的なシャドーグラフ写真法を含めた他の方法による結果との比較を行った(図4)^{(1)~(4)}。この比較から、われわれの結果は他の方法による文献値と一致し、シャドーグラフ法の値に非常に近く、デジタルSIMイメージングは信頼性と正確性のあるデータの生成に必要な画質と空間分解能をもつことが分かった。

謝辞

著者らは実験データと実験結果の提供を受けた仏ティオ・エンジニアリング(Thiot-Ingenierie)のP・ヘレル氏、A・ラシャウド氏およびJ・メスプール氏に感謝する。

参考文献

- (1) A.J. Piekutowski, Int. J. Impact Eng. 23, 711-722(1999).
- (2) P.L. Hereit et al., Centre d'Etudes de Gramat Report T2001-00059/CEG/NC, Gramat, France(2001).
- (3) J.M. Sibeaud et al., Int. J. Impact Eng. 29, 647-658(2003).
- (4) Q. Zhang et al., Int. J. Impact Eng. 35, 1884-1891(2008).

著者紹介

ワイ・チャン(Wai Chan)はスペシャライズド・イメージング社のマネージング・ディレクタ、キース・テイラー(Keith Taylor)は同社のテクニカル・ディレクタ。e-mail: wai@specialised-imaging.com