デジタル画像相関による３次元表面変形の測定

アンドリュー・ブリッジス、アリステア・トフツ

同期させた２台の高速CMOSカメラに解析ソフトウェアを組み合わせることによって、製品設計エンジニアが使用する正確な機械的変形データを生成することができる。

デジタル画像相関（DIC:digital image correlation）は、高解像度のマシンビジョン用デジタルカメラを使用して、2次元または3次元において表面変形を正確に測定する、非接触式の測定手法である。この技術の初期の開発が始まったのは1980年代半ば、米サウスカロライナ大学（University of South Carolina）の機械工学部においてであった。

1980年代には、デジタルカメラは実質的にはまだ存在しておらず、研究者や博士号を目指す人々の間では、高品質のスキャナを利用して、フィルム写真技術による画像をデジタル画像に変換することが行われ始めていた。このようにして写真から生成されたデジタル画像は、2次元の表面変位を測定するためのマッチングアルゴリズムのテストに使用され、続いて歪みの測定に使用されるようになったが、そのプロセスは非常に時間のかかるものだった。

その後、幅広い分野でハードウェアが進歩し、マシンビジョン用デジタルカメラは解像度、ノイズレベル、収録速度が大幅に改善され、コンピュータのCPU（central processing unit:中央処理装置）はかなり高速で効率的になった。これによって、エンジニアはさらに堅牢で高速なDICアルゴリズムを開発できるようになったとともに、試料作成手法の研究と改良も進められて最大限の空間分解能が実現されることとなった。次の目標は、2台のデジタルカメラを同時に使用して、3次元の表面変形を測定することだった。1998年に、初めての商用のターンキー式2次元および3次元DICシステムが、米コリレーテッド・ソリューションズ社（Correlated Solutions）によって発売された。同社は当時、創設されたばかりの新興企業だった。

基本概念

製品の設計段階においては、最もコスト効率の高い材料を使用して、機能や安全性の要件を損なうことなく、堅牢な設計を考案することが重要である。機械的性質については、3次元CAD（computer aided design）モデルを作成し、有限要素解析（FEA:finite element analysis）を行うことが最初のステップである。これによって理論的に、応力を集中させるべき箇所や、特定の荷重条件下で故障点となり得る箇

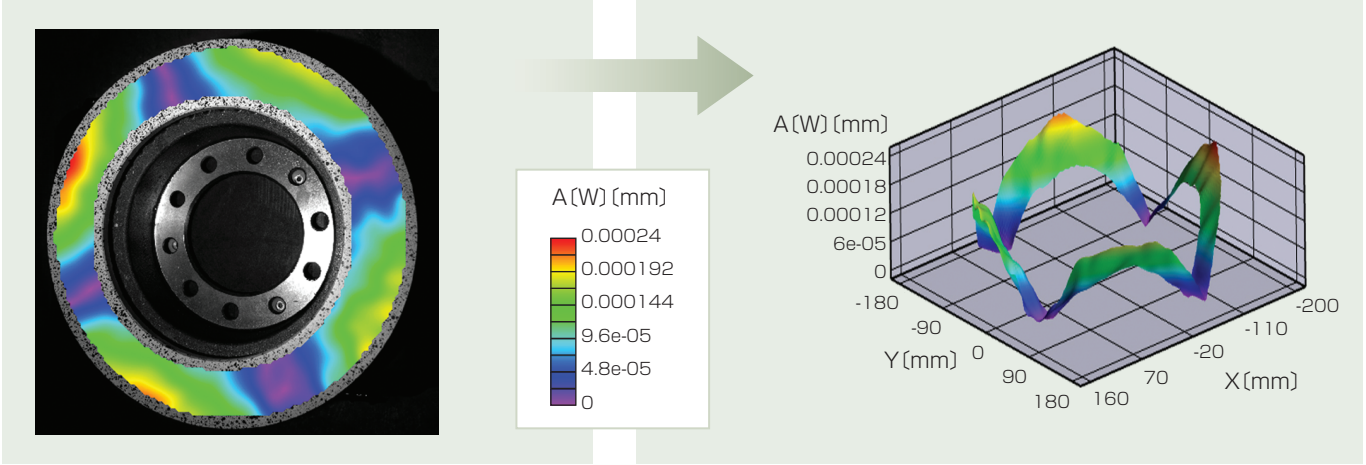

図１　フォトロン社の高速カメラ「SA5」を使用する高速DICシステム「VIC-3D」から取得したブレーキローターの全視野にわたる３次元変形測定結果（提供：コリレーテッド・ソリューションズ社）。

所を導き出すことができる。

このコンピュータモデルを検証するためには通常、テスト試料上で応力が高いと予測された箇所に実際に歪みゲージを配置し、モデルと同じ位置と方向で力を加え、歪みゲージからの歪みデータを、先ほどのFEAモデルの理論データと比較して解析する。通常は両者のデータは一致しないため、合理的な結果が得られるように、テスト（またはコンピュータモデル）を調整する方法を検討する必要がある。

デジタル画像相関を適用すれば、試料の表面全体にわたる変位と歪みが測定され、歪みゲージを正確に配置する必要がなくなるため、時間のかかるこのプロセスは不要になる。最終的な結果としては、試料表面の全視野にわたる3次元の変位および歪みの測定結果が得られる（**図1**）。理論的なコンピュータモデルの検証は、材料を効率的に使用して品質の高い製品を設計するための重要なステップである。DICは、より高速により豊富なデータを提供することによってこのプロセスを大幅に高速化する。DICシステムの多くの主要な利点の1つは、サンプルに対して機械的な操作を加えることなく、全視野にわたる3次元表面歪みを試料の表面積全体に対して測定する点である。これによって、歪みゲージは不要となり、人的時間がかなり短縮される（**図2**）。

高速DIC

DICは堅牢性、柔軟性、正確性に優れているとともに、全般的に使用が容易であることから、これまでに多くの準静的な応用分野において広く普及した。これまでは主に、準静的または適度に動的な分野で使用されてきたが、近年では高速および超高速カメラが手ごろな価格で入手できるようになったことから、動的な分野でのDICシステムの使用が急速に増加している。

非接触式の測定原理を採用し、空間分解能が高いことから、DICはこれまでにない測定能力を高い荷重速度で実現することができる。応用分野は、試験片テスト（材料のサンプルに対して実施するテスト）から、速度に依存する材料性質の特性評価や、高速荷重下における構造全体の動的特性評価まで多岐にわたる。

多くの場合、応用の最初の部分では、FEAモデルに対する入力として正確な材料パラメータが必要となり、最後の部分では、FEAモデル検証が必要となる。いずれの場合に対しても、2台のカメラによる2つの同期画像がソフトウェアによって解析され、3次元の歪み場が生成される（**図2**）。

今日では、ほとんどの高速カメラにCMOSセンサーが搭載されている。これは、高速画像処理にこれまで使用されていた旧式のCCD技術よりもコスト面で著しく進歩したことによる結果である。CMOSセンサーは単一のシリコンチップ上に制御回路と補助回路とともに集積され、別個の回路を必要としない。CCDカメラでは、別個の回路が必要となるのが一般的だった。

ノイズの問題は、最新型のCMOSセンサーにおいて解決されており、また、CMOS技術の方が消費電力が低いことも、CMOSセンサーのさらなる利点となっている。一部の特殊用途カメラにはまだ、CCD技術が採用されているが、それは画素周辺記録型撮像素子（ISIS: *in situ* image storage）のCCDアーキテクチャのためである。このアーキテクチャでは、ピクセル情報をチップ自体の上に保存可能とすることで、フル解像度で最大100万フレーム/秒もの撮影速度を実現する。

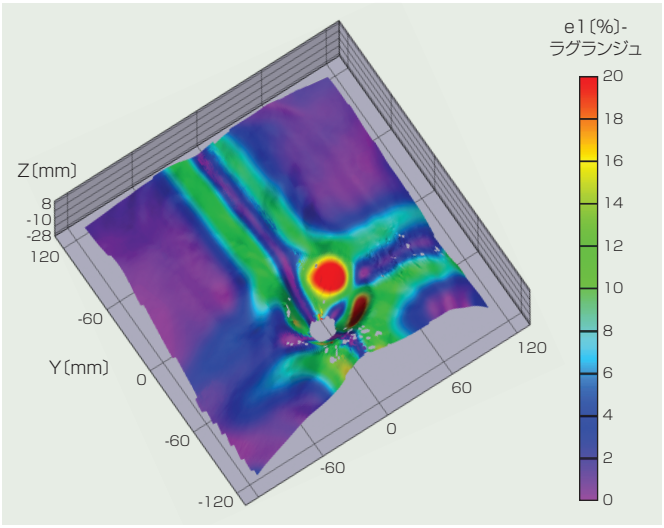

図2　銃弾の衝撃を受けた後のケブラー製ベストの第1原理計算による歪み（e1）を3次元等高線図に示したもの。データは「VIC-3D HS」システムを用いて収集した。VIC-3D HSにはフォトロン社の「Fastcam SA-X」カメラ2台が搭載され、1024×1024ピクセルの解像度で12,500フレーム/秒の速度で画像が集録された。このようなシステムには、カメラ、電子回路、ソフトウェアに加えて、ステレオマウント、LED照明、レンズ、アクセサリ部品が一般的に搭載される。2台のカメラを正確に同期させることが、3次元DICにおいて非常に重要である（提供：コリレーテッド・ソリューションズ社）。

CMOSセンサーの最大の利点の1つは、ブルーミング（テアリングとも呼ばれる）が生じないことである。ブルーミングとは、画像の最も明るい部分において、電荷が蓄積された領域から（CCDピクセルに当たった光子から変換された）電子があふれ、隣接するピクセルへと漏れ込み、明るい部分の上下に伸びた縦線が生じる現象である。CMOSセンサーは、アンチブルーミング特性に加えて、消費電力と速度においてもより優れている。余分な電荷をピクセル自体の電圧に変換することによって、シフトレジスタを不要とし、複雑なクロックタイミングや電圧バイアスも必要としないためである。

高速CMOSセンサーの感度も、約10年前に最初に登場したときから大幅に改善されている。最も初期のCMOSカメラはかなりの光が必要であったため、小さな領域に数キロワットもの光が当てられることによって熱が生じ、対象物が燃えてしまうという多大な危険性があった。今日では、高速カメラは当時よりも格段に光感度が高くなっている。開口率（fill factor:制御電子回路に対する、実際に集光専用に割り当てられた物理的な面積の割合）が大幅に改善されたことと、最大限の光量をピクセルの感光部へと集中させるためにマイクロレンズを使用するためである。

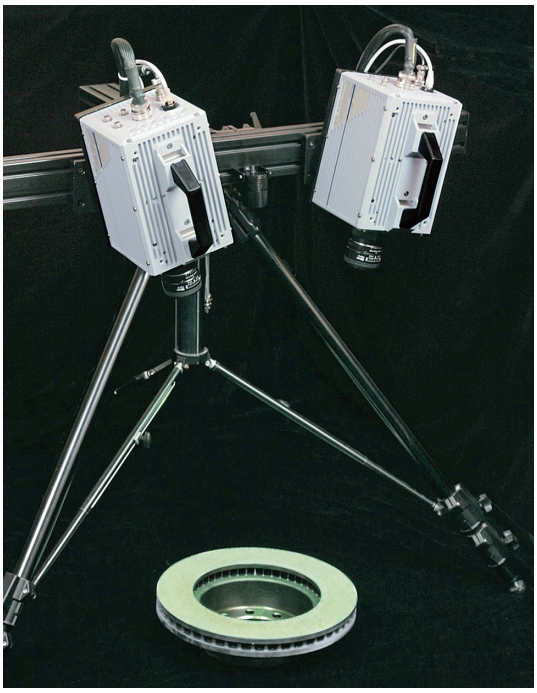

図3. テストブレーキローターの上に2台の高速撮像装置が設置された様子（提供：コリレーテッド・ソリューションズ社）。

システムにおける検討項目

購入を検討する際の問題点として、デジタルカメラの光感度の測定に使用する方法によっては、かなり突飛な値が仕様として記載されている場合があることに注意しなければならない。例えば、モノクロカメラでISO感度が30,000を超えているのに対し、カラーカメラの値がその半分か3分の1ならば、かなり疑わしいと考えるべきである。ほとんどの著名なカメラメーカーが、ISO 12232 Ssat規格を採用しているが、センサー単体ではなくカメラ全体の感度は、ブルーミングが発生する手前の100%白色露光の状態で測定される。どのような測定値についても言えることだが、値には複数の解釈（または誤解）が生じる余地がどうしても存在するため、最良の結果を得るには、実際のデモを要求して同一基準で比較を行うべきである。

デジタル画像相関では、空間的および時間的変位の計算における許容誤差を最小限に抑えるために、非常に正確にカメラを同期させることが必要である。例えば、ある高速カメラは、メガピクセルレベルの解像度（1024 × 1024ピクセル）と12,500フレーム/秒ものフレームレートで、他のカメラや、レーザ、外部信号発生器、サテライトタイムコードなどの信号源との正確な同期が可能である（**図3**）。このカメラは、遅延発生器としての役割も果たし、信号源が別の高速カメラであるか、レーザであるか、あるいはその他のデータ集録システムであるかにかかわらず、同期信号間でxナノ秒の分解能を実現する。

もう1つの重要な検討項目はシャッター時間、つまりフレームごとにピクセルがグローバルに露光される時間である。「グローバルに」というのは、行ごとではなく、すべてのピクセルが同時に露光されることを意味する。シャッター時間をフレームレート（撮影速度）と混同しないように注意してほしい。フレームレートとは、ある任意の秒数にカメラが撮影するフレーム数のことである。シャッター時間を高速にするには、より多くの光が必要である。ピクセルの露光時間を短くしつつ、画像に存在するブラーを低減または除去するためである。

フレームからフレームへと非常に高速に移動する非常に小さい点を正確に追跡しようとする場合、ブラーは障害となる。許容シャッター時間を最大（最長）にするには、対象点がフレーム間でどれだけの距離を移動する可能性があるかを計算する必要がある。一方、フレームレートを最適にする方法は通常、比較的単純で、対象点の動きを判別するために必要な1秒あたりの最小サンプル数を計算すればよい。

著者紹介
アンドリュー・ブリッジス（Andrew Bridges）は米フォトロン社（Photron）所属。URL：www.photron.com、e-mail：abridges@photron.com。アリステア・トフツ（Alistair Tofts）は米コリレーテッド・ソリューションズ社（Correlated Solutions）所属。URL：www.correlatedsolutions.com、e-mail：tofts@correlatedsolutions.com。

LFWJ