

# 圧電式ヘキサポッドモーションシステムによる、手ぶれ補正と画像解像度の改善

ステファン・ボンドラン、スコット・ジョーダン

光学エンジニア向けに提供されている高速機械式システムは、画像解像度と手ぶれ補正を改善するとともに、光学系、制御系、アルゴリズムの全体的な有効性を試験するために多軸モーションをシミュレーションする手段を備える。

さらに高い解像度で画像処理を行うために、モーション制御装置の光学設計者やメーカーには、物理的な制約を克服することが求められている。民生カメラ市場における最大の目的はまだ、画素数を上げることにあるようだが、科学的分野では状況は異なる。感度と解像度の間にはトレードオフがあり、大気や流体中の振動や揺らぎなどの乱れは、特に低光量の条件下において、画質を低下させる。

画像ディザリング手法と、精密機構やモーション制御に基づく能動的な手ぶれ補正(画像安定化)は、デジタル画質を改善するための現代的な手段である。精密モーション制御は、試験装置においても重要性を増しつつある。このような装置では、車両の振動や、人間の筋肉系に起因するカメラのぶれなど、さまざまな環境をシミュレーションするヘキサポッドプラットフォーム上で、記録済みの振動シーケンスを6次元のモーション軌跡として「再生」することが行われる。

## モーション制御による画質

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体)チップやCCD (Charge Coupled Device: 電荷結合素子)チップなどのデジタルイメージングセンサにおいて電気的ノイズが問題にならない場合、画質は

最小限のコストで大幅に改善することができる。しかし、実世界では、光子数が少ないと、S/N比 (signal-to-noise ratio: 信号対雑音比)が望ましくないレベルになり、天体観測から顕微鏡検査にいたるまでの画像処理が困難になる。非常に感度の高い検出器は必要な解像度を備えず、最も解像度の高い検出器は感度が低い。その結果、細部が欠けるか、露光時間が長くなって画像が過度にぶれるかのいずれかが生じる。

デジタル画像記録手法の解像度は、主にセンサのピクセル数によって決まり、これを高めるには、面積(センサのサイズ)を大きくするか、ピクセルサイズを小さくするかのいずれかが必要になる。残念ながら、前者には異なる画像処理光学系が必要で、後者の場合は、ピクセルサイズに応じて光感度が低下するために信号が低下してしまう。

しかし、蛍光顕微鏡、白色光干渉計、

光干渉断層法(OCT: Optical Coherence Tomography)、または、監視カメラや航空撮影用カメラなど、さまざまな応用分野の画像解像度を直ちに向上させることのできる機械式モーション制御システムに基づく手法が存在する(図1)。

モーション制御ハードウェアとソフトウェアアルゴリズムの両方を使用することにより、画像解像度を比較的容易に大幅に改善することができる。さらに、これらの機械式手法では、ジッタや振動を伴う難しい環境のシミュレーションも可能で、画像処理の解像度と品質を高める手ぶれ補正手法の開発に役立てることができる。

## 圧電アクチュエータ: 速度と解像度

小さなパッケージで高い精度、速度、力が求められる用途に対し、特殊な形の圧電(ピエゾ)アクチュエータが広く用いられている。逆圧電効果に基づき、圧電セラミックディスクは電界を印加すると膨張し、それによってアクチュエータが動く。このような圧電システ



図1 建物の航空画像。右側は手ぶれ補正と高解像度化を適用した場合、左側は適用しない場合(提供:PI社)。

ムをOEM設計者にとって扱いやすいものにするために、メーカーは、アクチュエータを屈曲構造の内部にパッケージングすることにより、精密なガイダンスとモーションの増幅を達成するとともに、シンプルな搭載インタフェースを実現している。

屈曲構造は通常、アルミニウム、銅、またはチタンでできている。屈曲構造でモーションを増幅することにより、ナノメートルレベルまでの解像度で、一般的に最大2mmの移動範囲が達成可能である。能動的なセラミック要素の剛性が高いことから、ダイナミクス(加速と停止をすばやく行う能力)に優れており、走査周波数を最大で数kHzにすることができる。

圧電アクチュエータは摩耗することがなく、潤滑油が不要で、磁界を発生せず、真空に対応する。摩擦や摩耗がないため、保守なしで数十億サイクルの使用が可能である。独フィジック・インスツルメンテ社(PI: Physik Instrumente)が提供するセラミックに封入されたPICMAアクチュエータは、NASA・JPLによって寿命試験が行われ、故障することなく1000億サイクルの使用に耐えた。同製品は、マーズローバー(Mars Rover:火星探査車)のサイエンスラボ(MSL: Mars Science Lab)で、4年近くの間稼働し続けている。

ただし、屈曲構造で増幅を行う圧電アクチュエータは移動範囲が大きくなる代わりに、代償が伴う。増幅率を上げると、剛性と応答性がともに低下する。それでも、適切に設計された圧電屈曲アクチュエータならば、ステップアンドセトル時間を1ミリ秒未満と、他のどの従来型アクチュエータよりも格段に高速にすることができる。また、屈曲構造に搭載すれば、圧電アクチュ

エータによって多軸モーションを提供することができる。例えば、ハイエンドなカスタムカメラに搭載して、ピクセルサブステッピング(ステップ幅を1ピクセル未満とする)の原理に基づいて、手ぶれを補正したり、解像度を高めたりすることができる。

## ピクセルサブステッピング

ピクセルサブステッピングを画像処理システム内で適用すると、センサの記録領域が、1ピクセル未満のステップ幅で、定義されたパス上を定義された周波数で移動する。移動距離がピクセルサイズよりも小さいこのディザリングにより、ピクセルは記録領域上に複数回露光されることになり、実質的に「ピクセル乗算器」が形成されて、解像度を大幅に高めることができる(図2)。データ処理を加え、この方法で生成された多様な画像を重ね合わせることで、最終的な高解像度画像が形成される。この過程は、超解像画像処理としても知られている。

この手法はモーションに基づくため、機械的精度と寿命に関するすべての性能基準を満たす機械式ドライブが必要になる。ドライブは応用分野によって

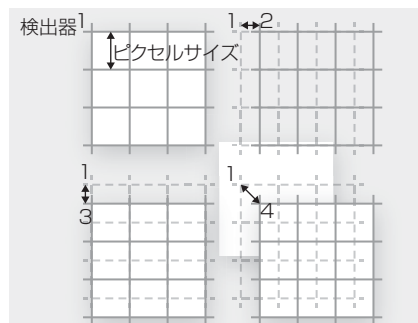


図2 ピクセルサブステッピングによって画像解像度を高めることができる。検出器チップを、ピクセル幅の半分の単位で、水平、垂直、対角方向に移動させると、4つの異なる画像が生成され、それらを処理することによってより解像度の高い画像を形成することができる(提供:PI社)。

異なるが、すべてにおいて重要な機能は共通している。つまり、センサチップのモーションが十分な線形性を備えて2次元で再現可能であること、そして、移動距離がピクセルサイズ程度(数十マイクロメートル以下)であることだ。

必要なダイナミクスは、静止画像の場合で数Hzから、動画を録画する場合で最大kHzレベルまでと幅広い。例えば、指紋によって人間を識別するために用いられる高解像度のCCD/CMOS生体スキャナの基本要件は、走査周波数が1~5Hz、応答時間が1ms未満である。ドライブの移動距離は5~15μm、最小搭載面積における精度は0.5μmよりも高くなければならない。

## 天体観測/顕微鏡検査の応用分野

圧電駆動の高速走査デバイスは、天体観測や顕微鏡検査の分野の画像処理も改善することができる。天体観測の分野では、アクティブミラー(チップ・チルトモーション)やアダプティブミラー(複数のアクチュエータで鏡面を変形)によって、空間分解能が1ケタ以上改善されている。

最新式の望遠鏡は、巨大な主鏡によって集光する。鏡が大きいくほど、多くの光子が収集される。ハワイのマウナケア山に設置されているすばる望遠鏡は、主鏡の直径が8.3mにもわたる。光は、それよりも小さな複数の鏡に送られ、最終的にイメージング検出器に到達する。

地上に設置された望遠鏡は、大気中の乱れによる波面のゆがみ(人間はこれを星のまたたきとして認識する)や、吹き付ける風によって引き起こされる望遠鏡構造内の振動の影響を受ける。このような制約を緩和するために、高速で非常に精密な機構が2次鏡と3次鏡に設けられている。下流に位置するより小型で軽量のこれらの鏡を利用し

て、サブミクロンの線形精度、サブマイクロラジアン の角度精度、数百Hzの帯域幅を備えるモーション制御部品によって、外部の乱れを抑えることができる。

圧電セラミクスは、このようなアクティブシステム（能動光学系）やアダプティブシステム（補償光学系）に使用されることが多い。大きな力を発生し、ミリ秒未満の応答性と原子レベルの分解能を備えるためだ。例えば、ドイツのフラウンホーファー研究機構の応用光学・精密機械工学研究所（Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering: IOF）とPI社が共同で進める補償光学プロジェクトの目標は、2024年にチリのアタカマ砂漠に建設予定の天体望遠鏡E-ELT（European Extremely Large Telescope）用に、1万1000個のPICMA多層圧電アクチュエータに基づく新世代の超高精度補償光学装置（XAO: extremely accurate adaptive optics）を開発することである。

光学顕微鏡の回折限界を超えるために、ナノメートル分解能の圧電ドライブを利用する複数の走査手法が利用できる。超解像顕微鏡では、走査が高速になるほど、画像取得が高速になり、光退色のリスクが低下する。

およそ30年前に初めて回折限界を大きく超えた光学顕微鏡が、走査型近接場光顕微鏡（SNOM: scanning near field optical microscope）だった。開口部が波長よりも小さい、先端の細いプローブによって表面を走査しつつ、先端とサンプルの間の距離をナノメートル範囲で正確に維持する。SNOMが正しく動作するには、走査装置と、先端とサンプル間の距離の制御の両方で、ナノ精度の機構が必要である。

この他に、ステファン・ヘル氏（Stefan Hell）が、半導体業界用の透明な3次元の光導電性微細構造を測定

する手段を求めて1994年に初めて考案した、誘導放出抑制（STED: stimulated emission depletion）顕微鏡法という手法がある。STED顕微鏡では、環状のレーザー光線によって、蛍光体を一度にナノメートル単位の量だけ励起する。ナノメートル分解能の機構で光線を走査し、収集した光学データを正確な位置に相関することにより、超解像画像が得られる。

光シート顕微鏡や4Pi顕微鏡など、他の多くの超解像手法には、プローブ、サンプル、光学系の走査や、建設的および破壊的干渉の制御に、何らかの形のナノメートル精度の機構が必要になる。例えば、「PI nano」ステージなどの多軸圧電スキャナは、互いの間隔が1ミクロン未満しかない複数のプレーンにおける生体サンプルをすばやく走査することにより、高解像度の3D生体画像を生成することができる。各走査プレーンのデータをソフトウェアによって結合することで、非常に詳細な多次元画像が生成される。

## モーションのシミュレーション

画像解像度を高めるための上記の機構は、高速コントローラとアルゴリズムによってその機能の大部分が実現されている。全体的な有効性を試験し、



図3 PI社が提供する6軸ヘキサポッドモーションシステム「H-840」は、CIPAが定める加振装置の認証規格に基づいて、手ぶれ補正システムを試験するためのカメラぶれをシミュレーションする（提供：独イメージ・エンジニアリング社）。

システムを改良するためには、モーションのシミュレーションが必須である。ここで基盤となるのが、記録済みまたは合成済みのパターン化されたモーションを高い再現性で実行することのできる、コントローラとソフトウェアを備える精密な多軸機構である。

モーションのシミュレーションは現在、自動車／航空機の振動試験や、ハイエンドカメラやスマートフォンなどに使用される加速度計・ジャイロ스코ープ・イメージセンサの応答試験など、非常に幅広い種類の応用分野で利用されている（図3）。再現可能な多軸モーションのシミュレーションは、手ぶれ補正システムにおける高度なアルゴリズムの微調整や、光学機械式または電子式スタビライザの性能検証に役立つ。

カメラ製造に携わる会員によって構成される国際的な業界団体である一般社団法人カメラ映像機器工業会（CIPA）は、手ぶれ補正システムの試験と評価に関する規格を制定している。DC-011-2015は、モーションのシミュレーション試験条件に関する同団体の最新規格である。

品質の高い試験結果を得るために、モーションシミュレータは、シミュレーション対象とする元のモーションとまったく同じダイナミクス（振動の方向、加速度、大きさ）のモーションを、非常に高い再現性で提供する必要がある。そのためには、対応する複数軸のダイナミクスを高精度の軌跡で実行しなければならない。

ヘキサポッド（6脚ロボット）と一般的に呼ばれるスチュワートプラットフォームは、高い精度が求められる多軸シミュレーションの標準となっている。ヘキサポッドは、上下のプラットフォームの間に並列に配置された6つのアクチュエータで構成される並列運動シ

システムである。ヘキサポッドは、低慣性でダイナミクスに優れ、パッケージサイズが小さく、剛性が高いなど、直列の運動ステージに勝る多数の利点を備える。また、ヘキサポッドは、従来の6軸ポジションナよりも柔軟性が高く、回転中心のプログラムや乱数化が可能である。

高度なヘキサポッドコントローラは、ヘキサポッドの座標系の原点と向きを、システムの機械的構成によって固定することなく、空間における任意の位置に変換することもできる。

## ヘキサポッドのドライブの種類と応用

負荷や周波数範囲に応じて、複数の種類のドライブが利用できる。電磁式ブラシレスサーボモータとねじ式アクチュエータを装備するヘキサポッドは、高い負荷耐性、剛性、低い消費電力をバランスよく備える。100ポンド(約45.4kg)以上の負荷に耐え、駆動系やセンサの機械構造を適切に設計すれば、2gの加速度が達成可能である。電源切断時に位置を維持できる、本質的に駆動力の高い機械構造を備えてもいる。

屈曲ガイドを備える直接駆動のヘキサポッド「H-860KMAG」に採用されているような音声コイルドライブ(ラウドスピーカードライバの原理に基づく。https://youtu.be/BQJg7I-4620を参照)を使用すれば、さらに高い性能が達成できる。ここでは、分速数百ミリメートルで、最大4gの加速度が可能である。摩擦のない屈曲ガイドとジョイントによって、従来の機械式ベアリングで引き起こされる振動ノイズを生じることなく、ガタつきのないモーションが得られる。つまり、機械システムから結合される望ましくない周波数成分によって、測定が影響を受けることはない。

H-840ヘキサポッドを用いたドローン



図4 このGUI(Graphic User Interface: グラフィックユーザーインターフェイス)環境に示されているように、パターン化された多軸モーションツールによって複雑なモーションプロファイルがプログラミングされる(提供:PI社)。

カメラのぶれ補正試験(https://youtu.be/RPjNstX7wA)に加えて、工業オートメーションと、移動する車両や船舶のモーション安定化を目的とした「PI H-900KSCO」ヘキサポッドも設計されている。最大130ポンド(約59kg)の負荷に対応しつつ、最大で200mm(X、Y、Z軸方向)、66°(ピッチ、ヨー、ロール)のモーション範囲を、それぞれ80mm/sと30°/sの速度で提供する。最後に、高ダイナミクスの音声コイルヘキサポッド「H-860」は、炭素繊維でできたストラット材を採用して、駆動系全体を摩擦のない屈曲構造とすることで、回転要素に起因する微小振動を排除する(https://youtu.be/SIKMu29zbM4)。

## ヘキサポッドの波形生成

ヘキサポッドコントローラに組み込まれた波形生成機能は、数百万ものターゲット位置を内部生成して、最大で1秒あたり数千ポイントの速度で、複雑な多軸モーションプロファイルを、サブマイクロメートル精度で実行することができる。これにより、エイリアスやモーション生成のアーティファクトが抑えられる。ポイント間の距離が小さいほど、モーションは滑らかになり、不要な振動が抑えられる。コントローラは、TCP/IP Ethernet、SPI、EtherCAT、リアルタイムTTLなどの

高速インターフェースを介した迅速な通信によって、外部事象と同期する。

複雑なモーション波形のアプリケーションを迅速に開発できるようにするには、Windows、OS X、LinuxのすべてのOSで動作するソフトウェアツールが必須である。動的ライブラリは、任意の言語による簡単で生産性の高いプログラミングを可能にし、シンプルでニモニックなASCIIコマンドセットは、端末や任意のスクリプト環境でのすばやい操作を可能にする。

包括的でありながら適切に絞り込まれたクロスプラットフォーム対応のLabVIEWライブラリも、そのプラットフォーム上での詳細で直感的なユーザーインターフェースの開発を促進する(図4)。サンプルアプリケーションでは、正弦波、方形波、三角波、のこぎり波、掃引正弦波によるアクチュエーションを個別に選択する機能や、位置と時間の関係を示したカスタムまたはプロプライエタリな表をスプレッドシート形式でインポートする機能が用意されている。

物理的なサイズ、許容負荷、速度、精度、移動範囲、コストなど、多様なモーション制御パラメータが存在することから、1つの圧電機構や多軸モーションシステムですべての応用分野に対応することはできないことは明らかである。しかし、提供されている多数の標準システムによって簡単に概念検証を行うことができ、OEM設計エンジニアにはカスタムメイドのソリューションが提供されている。

### 著者紹介

ステファン・ボーンドラン(Stefan Vorndran)は、PI社のマーケティング担当副社長として米国マサチューセッツ州に勤務。スコット・ジョーダン(Scott Jordan)は、ナノオートメーション技術担当シニアダイレクター兼PIフェローで、カリフォルニア州勤務。  
e-mail: stefanv@pi-usa.us, scottj@pi-usa.us  
URL: www.pi-usa.us