

6軸で正確な位置決めを行う ヘキサポッド

ジョン・ウォレス

ヘキサポッドは、高精度、高正確度、高耐荷重のバージョンが提供されており、組み立て、シミュレーション、振動絶縁(防振)など、さまざまな処理に向けた光学部品のアライメントに用いられている。

ヘキサポッドは、テストプラットフォームのベースに対する相対位置を6自由度(6DoF: six Degrees of Freedom)で制御するためのシンプルで優れた手段である。ここで、可動プラットフォームと固定ベースが正三角形であるとすると、典型的なヘキサポッドは八面体に似た構造で、側面の6つの辺は長さが延長可能で、上面と底面の3つの辺は固定である(ただし、実際のヘキサポッドの中には、八面体でないものも存在する)。

これにより、機械エンジニアが静定構造と呼ぶ構造が形作られる。この構造は、他のコンポーネントに応力を加えることなく形状や位置を変えることにより、支柱(実際には直線形のアクチュエータ)の長さの変化に自動的に適応することができる。さまざまなアクチュエータ長の変化を適切に計算することにより、テストプラットフォームを、 x 、 y 、 z 、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z の軸方向に、個別または同時に移動させることができる。このモーションは複雑であるため、通常はコンピュータソフトウェアによって調整される。直線形アクチュエータの精度に応じて、ヘキサポッドの精度はナノメートルレベルにも及ぶ。

スチュワートプラットフォームとも呼ばれるヘキサポッドは、科学や産業の分野の多くの高精度光学部品の設定

において重要な役割を担う。本稿では、提供されているヘキサポッド製品のうちのほんの一部しか紹介できないが、現在提供されているものを代表する例を取り上げたいと思う。また、本稿で取り上げるすべてのメーカーが、要求に応じてカスタムメイドのヘキサポッドを製造していることにも言及しておく。

ヘキサポッドの定義

ヘキサポッドは、さまざまなサイズとレンジで製造されている。米フィジック・インスツルメンテ社(PI: Physik Instrumente)のマーケティング担当副社長を務めるステファン・フォルンドラン氏(Stefan Vorndran)によると、PI社は1990年代初頭に、ハワイの天体望遠鏡用の高精度ヘキサポッド・モーション・プラットフォームの設計に着手したという。PI社は現在、0.5~2000kgの荷重に対応する、ヘキサポッドとそれに関連する6軸並行モーションシステムを製造しており、モデルとバリエーションは100種類を超える。フォルンドラン氏は、「すべてのタイプがサブミクロンの精度を備え、なかにはナノメートル精度を達成するものもある。ヘキサポッドを使用するほとんどの用途で、非常に高い安定性と精度による高速なステップとセトリング(高精度ポジショニング・ヘキサポッド)が求められ、さらに連続的な高速モーション

を必要とするもの(モーション・ヘキサポッド)もある」と述べる。

ブラシレス・サーボモーター、リニアモーター、圧電リニアモーター、ステッパモーターがヘキサポッドで使用可能だと、フォルンドラン氏は説明した。ブラシレスモーターは、高いダイナミクスと、24時間年中無休で稼働する場合に重要な長い寿命を備える。リニアモーターは最も高速だが、サイズに対して力が比較的弱い。圧電モーターは、サブナノメートルの分解能と自己ロック機能を備えるので、真空や非磁性の用途に適している。

動力伝達には、ボールねじ、ローラーねじ、親ねじ、ダイレクトドライブ(リニアモーター)システムが使用される。ローラーねじは最も剛性が高く自己ロック式であるのに対し、ボールねじはコストと速度の適切なバランスがとれている。

屈曲ジョイント(摩擦、遊び、摩耗がない)は、高速モーション・ヘキサポッドや超高精度ヘキサポッドなど、低荷重の用途で使用されるとフォルンドラン氏は述べた。より高い荷重に対する頑健性が求められる場合は、 z オフセットを持つカルダンジョイント(ユニバーサルジョイント: 自在継手)が、剛性と向きに依存しない性能を最良の組み合わせで備えるが、オフセットジオメトリを処理するためのより高度な制御アルゴリズムが必要になる(正確でスムーズな6軸経路計画のために、毎秒数百万回の演算が実行可能な高速コントローラが必要であることを意味す

る)。フォルンドラン氏によると、ボールジョイントは良い選択肢のように見えるかもしれないが、剛性が低く向きに依存するので、ほとんどの用途で推奨されないという。

一例としてPI社の小型ヘキサポッド「H-811.i2」は、5nmの分解能、34×32×13mmの x - y - z 軸移動量、20×20×41°の角度移動量を備え、20mm/秒の最大速度で5kgの荷重を積載できる。ブラシレス・サーボモーターと低摩擦のボールねじが採用されている。ターゲット用途は、光学レンズやファイバのアライメントと、シリコンフォトニクス(SiP)製造である。H-811モデルには、EtherCAT対応のコントローラが搭載されており、すべての座標変換を内部で処理する他、ユーザープログラム可能なピボットポイント(回転中心)と、異なるツール/加工対象物座標系の計算を行う。光パワーメーターなどの外部計測器に対する高速入力や、ファームウェアベースの高速アライメントルーチンによって、自動アライメント処理の高速化が図られている。

SiPデバイスのテストとパッケージングには、ナノスケールのアライメントが必要だが、視覚的または機械的な基準を使用して実行することはできない。光学スループットそのものを最適化しなければならないためである。SiPには、入出力が相互に作用する複数の並列光学経路が設けられる場合が多く、経済的および物理的な理由から、そのすべてを同時に最適化する必要がある。サイズの制約もあるので、アライメント装置はできるだけ小さくなければならない。メカニクス、コントローラ、ソフトウェアが組み合わされたH-811のような、コンパクトで低慣性の6DoFモーションシステムの能力は、SiP製造を平面テストからパッケージ

ングまで進める上でカギを握ると、フォルンドラン氏は述べる(図1)。

ヘキサポッドの多数の機能

ヘキサポッドは、高精度モーションデバイスとして複数の機能を備える。米ムグCSA社(Moog CSA)は、高精度ポジショニング、高周波モーションシミュレーション、振動絶縁の3つの主な用途を対象に、ヘキサポッドやその他の多自由度モーション制御システムを製造していると、同社のヘキサポッド製品マネージャーを務めるライアン・スニード氏(Ryan Sneed)は説明した。

高精度ポジショニング用ヘキサポッドは、モーター駆動のローラーねじアクチュエータを一般的に使用して、準静的な位置決めや低速トラッキングを行い、1 μ mと1 μ rad以上の分解能を達成することができる。ペイロードは、小さなセンサから大規模な地上望遠鏡用の5000kgのミラーまで、多岐にわたるとスニード氏は述べた。モーションシミュレーション用ヘキサポッドは、

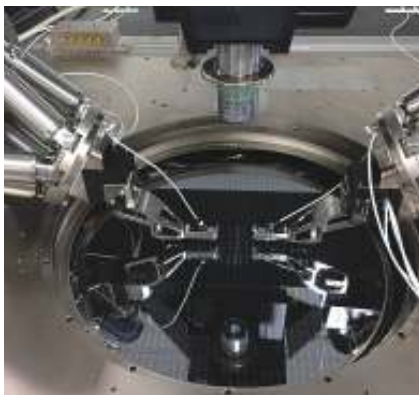


図1 PI社の高速マルチチャンネルフォトニクスアライメント(FMPA: Fast Multichannel Photonics Alignment)用小型ヘキサポッド「H-811」2台が、米カスケード・マイクロテック(Cascade Microtech)社のシリコンフォトニクス・ウエハプローバ上に配置されている。(提供:カスケード・マイクロテック社、現在は米フォームファクタ社[FormFactor]傘下)

ボイスコイルアクチュエータを搭載し、最大数百Hzの周波数成分を持つモーションプロファイルと外乱プロファイルを作成する。振動絶縁用ヘキサポッドは、ほぼ摩擦のない空気ベアリングを備える空圧式支柱に基づき、レーザと光学システムのベース外乱からの振動レベルを低減するために使用される。絶縁に一般的に用いられるソフトな機械式ばねに、重力によるたるみを生じさせることなく、ターゲットとする周波数範囲全体にわたって60dBの絶縁性を達成することができる。

スニード氏は、高周波モーションシミュレーション用ヘキサポッドの例として、光学部品やフォトニクス部品の一連の重要な用途に対応する、ムグ社の「HX-M350」を挙げた。ボイスコイルアクチュエータにより、最大180kgのペイロードに対応し、 $\pm 2.5^\circ$ のティップ/ティルト回転範囲、 ± 251 mmと ± 11 mmの横方向/縦方向移動範囲を達成する。プラットフォームベースのリアルタイムな制御により、アクチュエータ軸のみに対する限られた制御ではなく、ヘキサポッドの個々の軸を制御システムによってチューニングすることができる。反射メモリインタフェースにより、高周波外乱によって飛行時のジッタ条件を再現する、HIL(Hardware In the Loop)のミサイル追尾コシミュレーション用の高速なデータ転送が可能である。

またHX-M350は、衛星光学センサ用に、6DoFの軌道上振動環境のシミュレーションも行う。従来の加振機システムは、一度に1つの直線軸のモーションに限定されていた(図2)。スニード氏によると、カメラの手ぶれ補正アルゴリズムのテストや、製品完全性の検証などの用途にも、この技術が適用できるといふ。

高い熱安定性

仏シメトリー社 (Symétrie) は、高精度な位置決めとダイナミックなモーションが可能な、高さが68mm ~ 4mのヘキサポッドを製造していると、シメトリー社のマーケティングおよびセールスマネージャーを務めるアンヌ・デュゲ氏 (Anne Duget) は述べた。同氏によると、高精度ポジショニングシステムは、サブミクロン分解能で、ミラーや試料をビームラインに合わせたり、ミラーを衛星や望遠鏡に合わせたりするために使用され、モーションシステムは、船、トラック、戦車、航空機のモーションをシミュレーションし、最大速度2m/s、加速度4gの環境に搭載される予定の電気光学システムのテストに使用されるという。ペイロードは、数gから数十トンまでさまざまだという。「ヘキサポッドには6個のアクチュエータが搭載されているので、簡単にペイロードをそれらの間で分散させることができる」とデュゲ氏は述べた。

シメトリー社の「ZONDA」という高性能ヘキサポッドは、高精度、高荷重、長い移動量を必要とする用途に対応すると、デュゲ氏は述べた。最大400kgのペイロードを50nmの分解能で配置するように設計されており、 x 軸と y 軸の移動量は400mm、 z 軸の移動量は300mm、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 軸の移動量は 40° である。高い熱安定性は、インバー材、リニアアブソリュートエンコーダ、そして「特に堅固なジョイント」を採用しているからだ、デュゲ氏は付け加えた。インバーは、熱膨張係数が $1\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ で、鋼鉄($11\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)やアルミニウム($23\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)と比べて非常に低い。

「ZONDAヘキサポッドは、真空室や無菌室でも使用できる。宇宙用光学計測器の校正(独エアバス・ディフェン

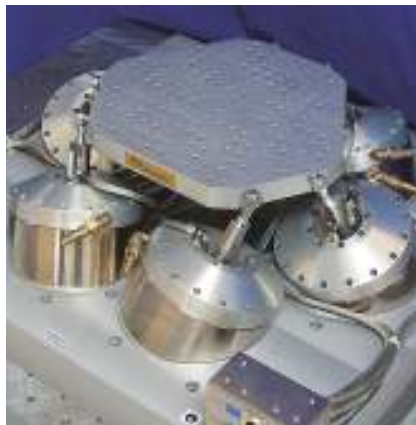


図2 ムーグCSA社の「HX-M350」は、モーションシミュレーション用ヘキサポッドで、衛星光学センサ用に、6DoFの軌道上振動環境のシミュレーションを行うことができる。(提供:ムーグCSA社)

ス・アンド・スペース社 [Airbus Defence and Space]、仏バーティン・テクノロジー社 [Bertin Technologies]、ベルギーのリエージュ宇宙センター [Liege Space Center]、独OHBシステムズ社 [OHB Systems AG、図3]、仏タレス・アレニア・スペース社 [Thales Alenia Space] など) や、ミラーや試料のビームラインとのアライメント (欧州シンクロトロン放射光研究所 [European Synchrotron Radiation Facility] など) によく使われる」と、デュゲ氏は述べた。



図3 シメトリー社の「ZONDA」ヘキサポッドは、インバー材とリニアアブソリュートエンコーダの採用によって、高い熱安定性が実現されており、宇宙用光学計測器の校正によく使われる。写真は、OHBシステムズ社向けに開発した製品である。OHB社はEnMAPの主契約業者として、ドイツ航空宇宙センター (DLR: German Aerospace Center) と契約し、独経済エネルギー省 (German Ministry for Economic Affairs and Energy) の助成を受けている (整理番号: 50 EP 0801)。(提供:シメトリー社)

パラレルキネマティクス

独スマーアクト社 (SmarAct) が提供する、ヘキサポッドに似たプラットフォーム「SmarPod」は、ポジショナがパラレルキネマティック構造に配置されており、3つの x - y テーブルにグループ化された6つのリニアステージを持つ。各 x - y テーブルの上には、傾斜したパッシブガイドウェイがキネマティックなボールジョイントに接続されており、ボールジョイントはSmarPodの上板に固定されていると、同社の最高経営責任者 (CEO) を務めるジョージ・ミゲル氏 (Jorge Miguel) は説明した。各テーブルの x - y 座標の位置が変わると、各ボールジョイントの x - y - z 座標の位置が移動し、上板の線形座標と角座標が変わるといふ。

非磁性材料、高真空 (10-6mbar)、超高真空 (10-11mbar) などのオプションがある。個々のリニアステージの分解能 (1nm) と再現性 ($\pm 25\text{nm}$) は、全体で1nmと $1\mu\text{rad}$ の線形分解能および角分解能と、 $\pm 200\text{nm}$ の上板位置の双方向再現性に相当する。その他の仕様としては、最大速度が20mm/s、標準耐荷重が5 ~ 10Nで、異なる向

きで使用できること(上下逆、可変)などがある。

SmarPodのMCSまたはMCS2コントローラは、ユーザーが指定した上板の所望の目標位置から、6つのリニアポジションの個々の位置への、コンピュータ計算によるパラレルキネマティック変換を送信する。LabVIEWおよびC++のドライバに加え、スマーアクト社独自の制御GUI(Graphical User Interface)が提供されている。

円筒対称構造のSmarPodにおいて、6つのリニアステージは、システムの周囲に120°間隔で対称的に配置された3つのx-yテーブルにグループ化されている。標準的な移動範囲はモデルによって異なるが、「SmarPod 110.45」の場合で、 $\pm 10\text{mm}(x-y)$ 、 $\pm 5\text{mm}(z)$ 、 $\pm 10^\circ(\theta_x \text{と} \theta_y)$ 、 $\pm 20^\circ(\theta_z)$ である。パラレルSmarPodには、長めのリニアステージ(x軸とy軸に沿ってそれぞれ3つ)が並列に配置されており、2つ一組に結合されて、対応するボールジョイントの位置決めを行う。これにより、xとyの両方向の線形移動範囲が増加する。「SmarPod P-SLL」は、x軸方向の移動範囲が最大1200mmと非常に長くなるように設計されており、3つのx軸アクチュエータは、1本のレール上の台車になっている。これは、複数のステップからなる動作を並列に実行する場合に特に有効だと、ミゲル氏は述べた。

「SmarPod 110.45は、コンパクトで多機能な6DoFのキネマティックプラットフォームで、光学およびフォトンクス用途に特に適している」とミゲル氏は述べた。「当社のスティックスリップ圧電モーター技術と高分解能エンコーダを、個々のポジションに搭載することにより、数十mm/度の移動範囲で1nm/1 μ radの分解能を達成す

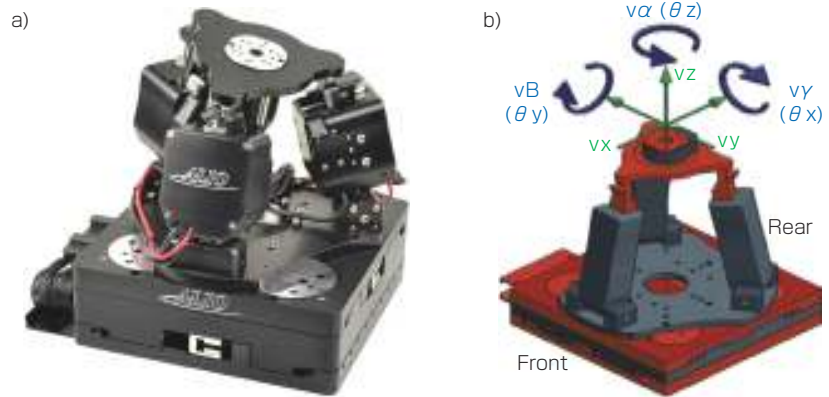


図4 (a)はアリオ社の「Hybrid Hexapod」。 (b)はHybrid Hexapodの6自由度のモーションを示している。(提供:アリオ社)

る。サイズがコンパクトなので、山登り法(HC:Hill Climbing)アルゴリズムを使用して自動アライメント操作を実行したり、空間的に制約のある環境で複数の方向を走査したりできる。また、回転の中心を自由に選択して、例えば、光ファイバの先端やコリメートレンズに配置できるというのは、エミッタと検出器の間の最適な多次元配置を最小限の時間で決定する必要のある、オプトエレクトロニクス用途においてきわめて重要な機能である」(ミゲル氏)。

ミゲル氏によると、SmarPod 110.45は、スマーアクト社の多数の微細組立ステーションにおいて、中核的な要素として採用されているという。例えば、同社の速軸コリメーション(FAC:Fast Axis Collimation)レンズ・アライメントステーションでは、FACレンズをトレイから取り上げてレーザバーの前に配置するグリッパとともにこれが使用されている。SmarPodは、そのレンズの位置を6DoFの全方向にアクティブに調整し、最適な状態になるまでアライメント指標(近傍界/遠方界ビームプロファイルや強度、コリメーションなど)を最適化する。UV硬化接着剤やUVダイオードを使用して、レンズをレーザバーに固定し、硬化過程がア

ライメントに影響を与えないようにする。「このシステムに、付属のピックアップ・ステージやグリッパを組み合わせることにより、オペレーターの監視を最小限に抑えた、完全な微細組立製造ラインを構成することができる」とミゲル氏は述べた。

ハイブリッド型ヘキサポッド

米アリオ社(ALIO)は、18年前に圧電モーターを使った従来型のヘキサポッドの製造を開始した。およそ5年前には、「Hybrid Hexapod」(HH)と呼ぶものを設計して構築した。同社の創設者でCEOのC・ウィリアム・ヘネシー氏(C.William Hennessey)によると、多数の特許技術が採用されているという。HHは、リニアモーター・トライポッドをナノ精度のリニアx-yモーションシステム上に搭載することによって5軸モーションに対応するが、回転テーブルの追加によって6軸モーションに対応することもできる(図4)。移動範囲は10mmから数メートルまで拡張できるように設計されている。

「欧州の従来型のヘキサポッドには数ミクロンの遊びがある。ヘキサポッドの脚には動きごとに圧縮力と引張力がかかるので、そのことを精度仕様に記

載すべきなのに記載されていない。ALIO HHは、動作ゾーンの全領域で100nmの3D精度を備える。従来のヘキサポッドは数百マイクロン(ナノメートルにも達しない)で、データシートから判断して、それはz軸の単方向モーションのみに対する値である」とヘネシー氏は説明した。HHは、10mmから1m以上にまで拡張可能である。動作ゾーン内の標準的な3Dポイント再現性は、100nm未満だとヘネシー氏は述べた。

応用分野についてヘネシー氏は、4Kレンズ(4K解像度カメラのレンズ)の組み立てを、HHの高精度組み立てに対する能力が発揮される適例として挙げた。「ハイエンドな4Kレンズと従来の5Kレンズに対応できる、唯一のモーションシステムといえるかもしれない。5K解像度にはさらに高い精度が必要になるためだ。アリオ社の能力が特に発揮されるのは、5Kレンズのパイプライン処理で、それを実現できる高精度プラットフォームはHHしかない。5Kが主流にならない理由の1つは、メーカーが4Kに使われていた古いモーションシステムでそれを実装しようとしているからだ」とヘネシー氏は述べた。

4Kレンズには精密な湾曲レンズがあり、それをCCDにボンディングする必要があると、ヘネシー氏は説明した。「ALIO HHは、レンズと同じカーブで正確に回転するために必要な、精度と工具中心点(TCP: Tool Center Point)のプログラミングによって、最適な組み立てを検索し、TCP精度でボンディング点に移動し、座標系を変えてパスに沿ったボンディングモーションを実行する。欧州で製造されているヘキサポッドは、座標系を変更するためのTCPが欠けている。そのため、一度に1軸ずつという不規則なモーションで

ボンディング点に移動するので、不正確なボンディング位置によって、デバイスが破損したり、歩留まりが低下したりする可能性がある」とヘネシー氏は述べた。

ヘキサポッドの誤差は、各軸に対して加算される。ヘネシー氏によると、HHの場合、x軸方向のモーションは、6軸すべてではなく1軸の1つの誤差しか生成しないので、プログラム可能なパスモーションや、最良の位置への後戻りによって、どの5軸または6軸モーションプラットフォームよりも数ケタ高い精度を達成するという。1つのプログラムで複数のTCPを扱うという問題は、レンズとCCDの組み立てと同様に、ナノメートル精度でシームレスに解決することができる。

ポインティング用途に適したヘキサポッド

米エアロテック社(Aerotech)のヘキサポッドは、6DoFの位置決めが可能で、2つのサイズで提供されている。大きいほうのモデル(HexGen HEX500-350H)は最大200kg、小さいほうのモデル(HexGen HEX300-230HL)は最大45kgの荷重に対応すると、エアロテック社の事業開発マネージャーを務めるR. J. ハート氏(R. J. Hardt)は述べた。どちらも、ベアリングとボールねじがあらかじめ取り付けられた6本の独立した支柱によって作動する。小さいモデルは、線形移動量110mm、角度移動量40°で、最小移動単位はx、y、z軸方向に20nm、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 軸方向に0.2 μ radである。大きいモデルは、線形移動量60mm、角度移動量30°で、最小移動単位はx、y、z軸方向に20nm、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 軸方向に0.2 μ radである。

「HEX500-350HLは、X線回折、センサのテスト、強い力でのデバイス操作などの用途に適している。ブラシレ

スでスロットレスのACサーボモーターによって、デバイスの寿命と性能の最大化が図られている。サーボモーターを、アクチュエータのボールねじに直接結合することで、ベルトやギヤヘッドや規格準拠の継手を採用する競合設計よりも、高い駆動剛性およびポジショニング精度と、優れた最小移動単位が実現されている。支柱のピボットジョイントは、低摩擦で高剛性になるように設計されている」とハート氏は述べた。

ハート氏によると、HEX500-350HLは、センサデバイスをテストする際のポインティング用途向けに特に設計されたものだという。ヘキサポッドによって、センサを搭載する長さ1mのタンジェントアームの位置決めを行う必要があった。したがって対象点は、ヘキサポッドの可動プラットフォームから1m離れていた。エアロテック社のモーションコントローラ、キャリブレーション技術、キネマティック・ツールポイント・コマンドを使用して、対象点においてわずか数マイクロンの精度でセンサの操作が行われる。ハート氏によると、この手法を採用しない場合は、はるかに複雑で、おそらくはより高額な、シリアルキネマティックシステムを導入せざるを得ないという。

汎用型ヘキサポッド

米ニューポート社(Newport)のヘキサポッドは、高精度、高正確度、高耐荷重という3つのファミリーに大きく分類される。高精度版は、軽量かつ堅固で可動ケーブルがなく、高正確度版は、軸モーション時のx、y、zの精度と、ピッチとヨーの偏差が保証される。高耐荷重版は、中心耐荷重が最大450kgで、長い範囲を高速に移動する。同社はコントローラと、真空対応のヘキサポッドも製造している。