チップ／チルトミラーマウントで高精度安定性確保

ジョン・ウォレス

3点キネマティックマウントであろうと、フレクシャーマウント、ジンバルマウントなど別の形態であろうと、チップ／チルトマウントは多くの光学セットアップにとって不可欠である。

ラボ実験用に設計された光学マウントはどんなタイプでも「象徴的」と言われるものであるなら、それはキネマティックなチップ／チルト光学マウントということになるだろう。つまり、平面ミラーといっしょにビーム操作に最もよく使われるからだ。光学テーブル、レーザが1つあるいは2つあり、研究者やエンジニアがアイデアを実現（この場合は、マウントを回して調整）しようとすると、少なくとも数個のマウントがそこにあり、テーブルに固定されていることは間違いない。

キネマティックマウントは手動と電動の両方とも利用できるが、手動バージョンがキネマティックマウントの形態と機能を最も直接的に示している。そのようなデバイス（大小の光学系に適合するようにたくさんのサイズがある）では、ミラーや他の光学部品を可動プレートに固定し、次にアセンブリの固定箇所にキネマティックに搭載（マウント）する。これによって光学部品の位置が2つの直交方向（チップ／チルトと言う）で角度的に調整される。

固定部品と可動部品の間の3点「キネマティック」リンクは、1個の支点と2つのネジアクチュエータで構成されている。支点が確実に直交するように、アクチュエータは互いに90°になっている。支点は第3のネジであり、これによってミラーも同様に直動調整できる。

他のタイプのチップ／チルト光学マウントには、拘束的に使うフレクシャーマウントやジンバルが含まれる。ジンバルは、直交軸を含み、電動となっていることが多い。

コーン、グルーヴ、フラット拘束

レーザビームの当初の調整とは別に、「キネマティックマウントを用いることで、ユーザーは長期的な動作でのレーザポインティングの変化も調整することができる。他にも、光学設定で光学素子の照準や割り込みを修正することも可能」と米エドモンド・オプティクス社（Edmund Optics）のレーザ光学系製品ラインマネージャー、ラエフ・ミハイル氏（Ra'ef Mikhail）は言っている。同社は、手動と電動の両方で多様なサイズのキネマティックマウントを製造している。

「R&D研究所で仕事をしていたとき、レーザの実験ではキネマティックマウントは必須だった」とミハイル氏は言う。「レーザシステムの長期動作ではよくあることだが、ビームポインティングがほんのわずかに変動し、光学系全体のアライメントがずれる原因になる。しかし、2つのキネマティックマウントをレーザヘッドに使うのは一般的な方法であるので、われわれのレーザビームの方向や高さを正確にコントロールし、わずかな調整でわれわれの精密アプリケーション用のアライメントを確保することができた」。

同社のTechSpecキネマティックマウントは標準的なコーン、グルーヴ、フラット拘束システムを使用している（**図1**）。機構系は、そこにある自由度の数によって分類される。「3D剛体は6つの独立した自由度を持っている。つまり、x, y, zと回転Rx, Ry, Rz、これらはそれぞれヨー、ピッチ、ロールとして知られている」とミハイル氏は説明している。「全ての自由度が完全に拘束されるなら、マウントはキネマティックと考えてよい。調整ネジには、ネジ先端のボールチップが含まれる。ネジは、それぞれの先がキネマティックプレートに接触する。コーンコンタクトは、すべての移動自由度を拘束する（x, y, z）。グルーヴコンタクトは、ピッチ（Ry）とロール（Rz）の回転自由度を拘束する。最後に、フラットコンタクトは、ヨー（Rx）を拘束する。

ミハイル氏は次の点を付け加えている。TechSpecキネマティックマウントには、便利な特徴がある。アライメントの不要な変化を防ぐために取り外しできるサムキャップ、光学系を傷つけないように先端がナイロンになった止めネジ、それに精密光学面に触れることなく光学素子のマウントを容易にする指かけ。典型的な角度チップ／チルト範囲は±5°、角度分解能（0.25mm回

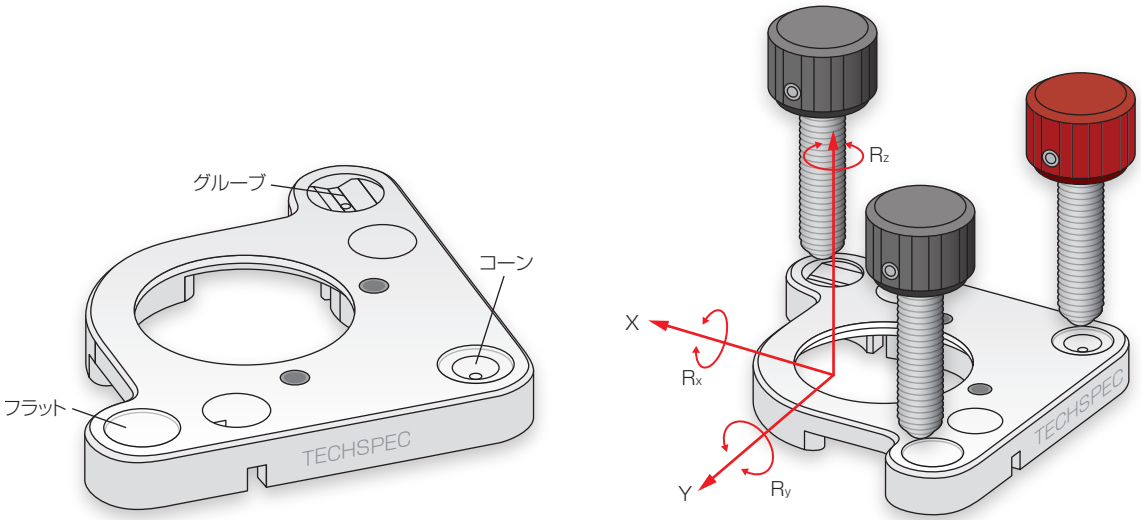

図1　エドモンド･オプティクス社のキネマティックチップ/チルトマウントはコーン、グルーヴ、フラット制御システムを使用している（左）。3つの調整ネジは、コーン、グルーヴ、フラットに適合する。2つの回転軸（黒いノブのどちらか一方を回す）と1つの移動軸（3つ全てのノブを等しく回す）は調整可能（資料提供：エドモンド･オプティクス社）。

転をベース）は0.2°、感度（1°回転をベース）4角秒、温度安定性とポインティング安定性は、それぞれ<5と1.3μrad。

熱サイクルに対する耐性

「キネマティックマウントの2つの最も重要な特徴は、安定性と調整可能性だ」とリック・セバスチャン氏（Rick Sebastian）は言う。同氏は、米ニューポート社（Newport）のオプトメカニクス向け製品マネージャー。安定性は、キネマティックマウントを一度調整したら、その位置にいかによく留まるかを示す基準、一方調整可能性は、いかに容易に特定の位置に調整できるかという指標。

セバスチャン氏によると、最も先進的で最高性能のミラーマウントはステンレス鋼でできている。ステンレス鋼は、アルミよりも3倍硬い。その結果、ステンレス鋼でできたミラーマウントは、アルミ製の同等マウントと比べて反りが1/3となるので、調整が容易になる。加えて、ステンレス鋼は温度変化中の膨張と縮小がアルミよりも少ないので、安定性が優れている。

キネマティックマウントの安定性は一般に、熱テストを通じて定量化される、とセバスチャン氏は指摘する。熱テストでは、雰囲気温度が周期的に変わるチャンバーの中にマウントを固定する。その温度サイクル中、ミラーマウントのミラーの角度位置（ピッチとヨーの両方）を時間経過とともにモニタし記録する。一般に電子式オートコリメータを使う。このテストの結果でマウントの安定性を正しく評価することができる。安定性の2つの重要な指標は、ドリフトとシフト。ドリフトは、テスト中の最大角偏向の尺度、シフトはマウントが元の温度に戻った後にマウントがいかによく元の角度位置に戻るかの尺度。ステンレス鋼マウントは、角度偏向（ドリフト）が小さく、優れた温度再現性（シフト）を示す。

「とは言え、全てのキネマティックマウントが同じタイプのステンレス鋼を使用しているわけではない」とセバスチャン氏は言う。異なるステンレス鋼の熱膨張計数（CTE）は、大きく変わる。例えば、ある400シリーズステンレス鋼は、300シリーズステンレス鋼よりもCTEが40%程度低い。

キネマティックマウントの調整可能性は、使用する調整ネジの安定性に大きく依存する、これは順繰りに何よりも先ずスレッドピッチに依存する。これは一般にインチあたりのスレッド（TPI：**図2**）で計測される。TPI値は、単純に調整ネジ、1インチの範囲のスレッド数である。TPI値の逆数が正確にノブ1回転に対する調整ネジの移動距離である点に注意。感度は、最小ノブ回転が1°であると仮定したTPIから計算できる。マウントに当てはめると、感度計測は直線から角度に変換される。

最高TPI数のアジャスタによりミラーマウントの感度は最高になる、とセバスチャン氏は言う。「何年も前から、最高の調整ネジは100-TPIスレッドだけだったが、最近この値が2倍以上に増えた」。例えば、ニューポート社のSX100シリーズミラーマウントは、254-TPIスレッドピッチのアジャスタを使用している。

エポキシフリーで光学系を保持

キネマティックマウントで多く見ら

れるデリミタの中には、アクチュエータの数やタイプ、内蔵されている光学系のサイズと形状、光学部品の保持方法、オプトメカニカルマウンティングの特徴、それに材料を含んでいるものもある、と米ソーラボ社（Thorlabs）のPolaris製品ライン主席エンジニア、ブレット・ダレシオ氏（Brett D'Alessio）は説明している。「キネマティックマウントのごくありふれたアプリケーションはビーム操作であるが、当社の特殊なキネマティックマウントの中には、他の用途のために設計されたものもある。例えば、リターダの調整。光学伝搬方向、ビームポインティング、それに光ファイバのアライメントを正常にするためなど」と同氏は言う。

2009年、ソーラボ社は、普通なら特注マウントとなる、要求の厳しいアプリケーション向けのキネマティックマウントを設計、製造する計画をスタートさせた。ダレシオ氏によると、その結果がポラリス（Polaris）製品ラインである。

「このプログラムの初期の課題の中には、マウントの性能に材料選定がどのように影響するかを理解することも含まれていた。例えば、硬化鋼、カーバイド、サファイア、その他の材料がすべてキネマティックアクチュエータの台座用に検討された。テストには、耐久性のような標準的な懸案事項も含まれていたが、マウントの温度を周期的に変化させ、系を衝撃力に晒すときに何が起こるかも調べた。わずかに変動を与えた後に、アクチュエータが元の位置に戻る能力は表面の硬さと滑らかさに大きく依存する」とダレシオ氏は言っている。サファイアの挿入により光学品質が全体として最高パフォーマンスを示すことが分かり、こうしてサファイア挿入がPolarisマウントの標準になっている。

もう1つの重要なパフォーマンスの特徴は、レンズの保持である。プログラム早期には、ソーラボ社は業界のハイエンドユーザや学術研究機関に、キネマティック光学マウントの利用に関わる経験や不満について助言を求めた。繰り返される回答の1つは、エポキシで光学系をマウントに固定する際に必要とされる妥当なパフォーマンスだった。この情報によって光学マウントにおける保持機構を設計、テストする大規模な作業が行われ、これは6年後の今でもまだ続けられている。現在、ダレシオ氏によると、Polarisには2つの保持機構がある。まずフレクシャーロック、2番目は保持リングと波形バネの組合せの利用である（特許申請中）。両方の機構によってユーザはマウント固定に接着剤を使うことなく、マウントのパフォーマンス仕様を達成できる。

数千時間メンテナンスフリーで動作可能なサブ10 fs（フェムト秒）レーザを実現するための工学的な課題はかなり大きい、とソーラボ社のレーザ部門長、ピーター・フェンデル氏（Peter Fendel）は言う。同氏は、Octavius Ti:Sapphireレーザのキャビティ中のマウントをPolarisクラスの光学マウントにアップグレードした（**図3**）。モードロックレーザのキャビティはミスアライメントに非常に敏感である。同社のレーザは、特に出荷中に、10℃を超えることがある極端な温度差に耐える必要がある。キャビティの光学系の汚染を防ぐために、レーザのマウントも低ガス放出材料でできていなければならない。

図2 ニューポート社のSuprema SX100シリーズマウントは、安定性改善のために400シリーズステンレス鋼を採用（上）。調整ネジのピッチ、TPIがネジの感度を決める。TPIが高ければ高いほど、ますます微細な調整ができるようになる（左）（資料提供：ニューポート社）。

フレクシャーマウント

チップ／チルト調整を達成するもう1つのアプローチは、キネマティックマウントに通常のコーン、グルーヴ、フラット拘束ではなく、フレクシャーベースのマウントを使うことである（**図4**）。この場合、マウント全体を単体の金属から機械加工で作製できるので、直交ヒンジの役割を果たす2つの薄い

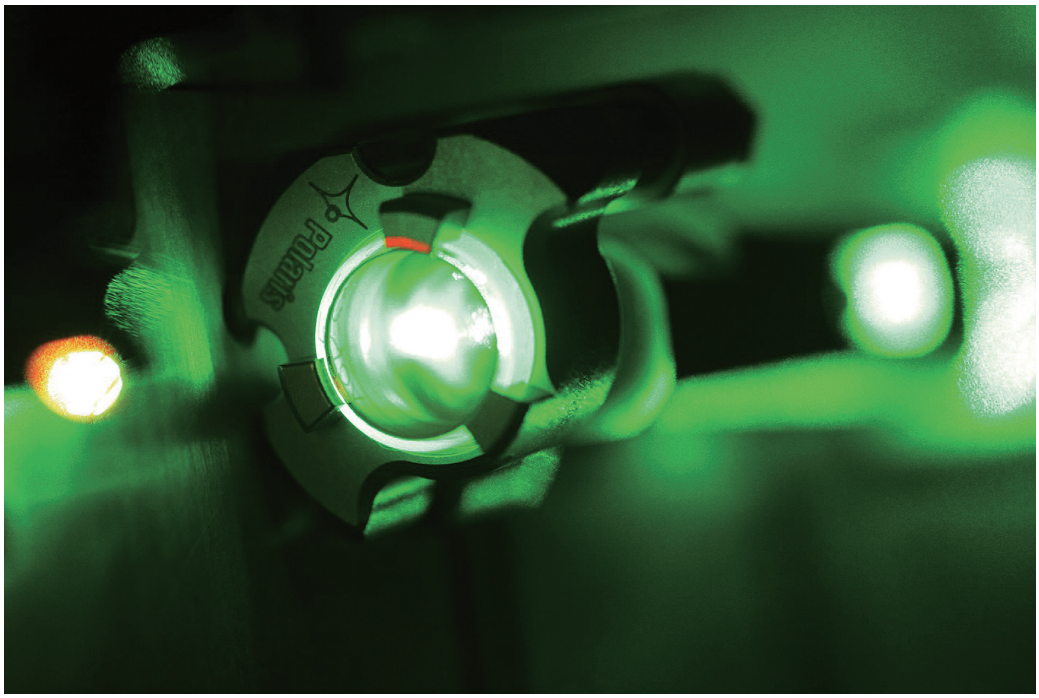

図3　ソーラボ社のPolaris-K05F2 低歪キネマティックミラーマウントは、同社の10fs Octavius Ti：Sapphireレーザキャビティで使用されている（資料提供：ソーラボ社）。

領域になる。このアプローチは、米シスキュー社（Siskiyou）が採用しており、同社はキネマティックマウントとフレクシャー光学マウントの両方を製造している。

「当社のモノリシックフレクシャーは、間違いなくドリフトが最小となる点で優れている」と同社西地区販売マネージャー、マーク・ミッテルシュテット氏（Mark Mittelstaedt）は言っている。「熱は容易に部品を通って流れ、モノリシックデザインであるので残留歪はない。厳しい位置決め向けには上方調整バージョンのキネマティクスとフレクシャーが利用できる、駆動機構（特許申請中）は光学系のマウント面に回転トルクを与えるものではない。上方調整設計によって設置サイズがより小さくなり、現場で利用しやすくなっている」。フレクシャマウントは、アルミとニッケルメッキしたスチールで提供している。

シスキュー社は、キネマティックマウントも製造している。従来の止めネジで光学部品をマウントするのではない。これは光学系に歪を与えることになる。ミッテルシュテット氏によると、同社はマウンティングクリップ採用している。これによってチルトが無くなり、波面歪曲が減少し、厳しい環境における光学系のマウントが一段と堅牢

図4　シスキュー社のフレクシャーマウントは単一金属ピースから機械加工で作製する（資料提供：シスキュー社）。

になる。シスキュー社のマウントの多くは、不要な回転をなくすためにベースにピンポケットを設けている、と同氏は付け加えている。

経路長変動を抑制するジンバル

光学系の中には、一切のマウントで極端な精度を要求するものがあるが、他の多くの光学系はより安価なマウントで済む。独キオプティック社（Qioptiq）は、両方のタイプを製造している。同社のLeesマウントは最高クラスの製品であるが、LINOS Adjust.Xマウントは廉価版である。統合型ベースプレートを持つAdjust.XマウントはLeesマウントと寸法的に互換性があるので、いつでもほとんど問題なくアップグレードが可能である。

Lees光学マウントには微調整ネジがあり、これは特殊研磨されていてほとんど反動なしに、サファイアの対向面、および特殊潤滑剤で嵌合するようになっている、と同社LINOS製品カタログ事業ラインマネージャー、オラフ・マイ

ヤー氏（Olaf Meyer）は言っている。これらのマウントは、オープンプレートマウントであり、最適アプリケーションはレーザ機器、干渉計、複雑な光学テーブル実験セットアップである、とマイヤー氏は説明している。Adjust. Xのマウンティングプレートはオープンかクローズかのいずれかとなっており、これらのマウントのアプリケーション例としては、レーザ干渉計がある。

「青銅ブッシング内のLeesマウントの調整ネジは、ステンレス鋼で造られており、現状では最高に細かな分解能を持っていると考えられる。サファイアのハードシート技術の提供は当社が初めてだった。これらのシート（台座）は非常に硬いのでマウントが脱落した時でもシートは完璧に機能することが分かっている。サファイア技術が選択されたのは、それがダイヤモンドの次に硬いからであり、表面の研磨仕上げ光学品質のためである」。

キオプティック社は、特殊作業用の一連のマウントも提供している。ミラーマウントは、スペースが限られているようなアプリケーション、光学調整が上からしかできないようなアプリケーション向けに設計されている。一例を挙げれば、ハイパワーレーザアプリケーションでの利用がある。この場合、ビームレベルあるいはその下から光学系を調整すると、害を及ぼすことがある。このようなタイプのマウントでは、調整ネジは上方に設置されている。ロールとピッチ軸の調整ネジの区別は、ネジのカラーコードで行われる。

同社はジンバルミラーホルダも生産している。このマウントでは、センターポイントのミラー面は常にミラーの回転支点にあり、チップ／チルト調整中の回転点の並進運動を回避するようになっている。ジンバルマウントは、360°の角粗動、マイクロメートル移動、微細角度移動にも対応している。

「潤滑剤には、クライトックス（Krytox）グリースを使用している。デュポン（Du Pont）によると、これは30℃で蒸気圧が8×10^{-8}から6×10^{-9}トール（Torr）であり、したがって高価な光学系にガスが放出されることはない」。「また、Krytoxは高い化学的不活性と優れた耐酸化性も有しており、したがって調整ネジは長年月使用しても元の滑らかな感触を保持している」とマイヤー氏は説明している。

ジンバルミラーホルダを製造しているもう1社が米オプトシグマ社（Opto Sigma）。同社の2軸360°ジンバル構造は、いかなる方向でもミラーの反射面を指すことができる、限界はない（少なくともすれすれの入射角までは。そのポイントにくると、ミラーホルダのフレームがビームをブロックし始める）。

2つのタイプの微調整機構をそのジンバルに統合することができる。微調整角ジンバルは光学経路の変動が最小、あるいはキネマティック微調整で、これは経路長にわずかな変動が出るが、温度と長期の特性安定性は相対的に高い（したがって、レーザキャビティ内での使用には、より適している）。

超大型ミラーの操作

米エアロテック社（Aerotech）は、直径600mmを超えるミラーセルに対応可能なジンバルや他の光学マウントを製造している。ミラーセルの枠は、特殊ペイロードを搭載するために多様な形状と取付オプションがある、とトム・マーケル氏（Tom Markel）は言う。同氏は、エアロテック社の研究、航空宇宙、防衛グループのリーダーである。

ジンバルは、直動ブラッシュレス、スロットレスサーボモーター、またはブラッシュレス回転モーターを使用する歯車駆動のいずれかで製造されている。設計的には360°回転を方位角と仰角に与えるように、あるいは交互に回転するようになっている。これはアプリケーションに応じて、動きに制限がある。エアロテック社の光学マウントは、特許となっているサブ秒角分解能の手動駆動を用い、大きくて重い光学系、その他のコンポーネントを位置決めする。

「当社のジンバルの一般的なアプリケーションには、光部品、レーザ、アンテナ、センサの精密な指向角への位置決め、ミサイル追尾装置のテストとキャリブレーション、ライダ（lidar）、電気光学センサとFLIR試験、空中目標追跡、真空での宇宙センサの光学テスト、ジャイロのような慣性センサの角度テスト、MEMS、加速度計、それに慣性基準ユニットがある」とマーケル氏は言っている。「当社の光学マウントは、優れた熱安定性とサブ秒角の分解能があるので、一般的なアプリケーションには、大規模な核融合やハイパワーレーザの研究・開発プロジェクトがある」。

エアロテック社のAMGシリーズジンバルは、ビーム操作、目標や星の追跡、ジャイロや慣性センサテスト、追尾装置やセンサ、光学部品の電気光学キャリブレーションで使われている。「AMGジンバルは、直動駆動、スロットレス、ブラシレスサーボモータを使っているので、高精度、歯車ゼロ振動、歯車摩耗による精度損失ゼロ、ゼロ反動、高速追尾、手のかからない仰角と方位角を特徴としている」。「直動モーターは結果的に、非常に安定的で滑らかな、高精度位置決めができる。特に研究や防衛アプリケーションでは重要である」とマーケル氏は付け加えている。精度は±5角秒、再現性は±0.5角秒、また分解能は0.027角秒である。 LFWJ