

超高応答・多自由度駆動セグメント鏡の開発

東京工業大学 ○西田 莉那, ◎進士 忠彦

要旨

レーザ加工機や衛星間光通信では、レーザ光を走査する可動ミラーの大口径・高応答化が求められる。一方、ミラーの大口径化は、構造体の固有振動数の低下を招き、機構の高応答化を妨げてきた。本研究では、大口径ミラーを分割し、低次の固有振動数を数十 kHz に高めたセグメント鏡の協調制御により、全体の高応答化の実現を目指す。本報では、3自由度圧電駆動セグメント鏡の構造を提案・試作し、静・動特性評価を行ったので報告する。

1. 緒言

近年、スマートフォンなどのフレキシブル基板のレーザ穴あけ加工の生産性の向上^[1]や、衛星間の超高速光通信の高効率化、衛星における取得画像の高分解能化・大規模化^[2]などの観点から、光走査用可動ミラーの高応答化、大口径化が求められている。しかしながら、ミラーの大口径化は、その構造体の固有振動数の低下に繋がり、ミラー駆動システムの高帯域化の大きな障害となる。すなわち、制御帯域の拡大要求に対して、その帯域に数多くの振動モードが存在すると、構造上制御困難な場合も発生する。

本研究では、ミラーの大口径化と高帯域化の相矛盾する要求を満たすため、大口径ミラーを分割し(セグメント鏡)、小型の群ミラーアクチュエータとして協調制御することで、ミラー口径を損なうことなく超高応答駆動を実現することを最終目的とする。

本報では、その第一歩として、1次モードの固有振動数を 20 kHz 以上にすることが可能な 3 自由度圧電駆動セグメント鏡の構造を提案・試作し、静・動特性評価を行ったので報告する。

2. 3自由度群ミラーアクチュエータの提案

3自由度群ミラーアクチュエータの概略図を図1に示す。この群ミラーアクチュエータはチップ・チルト駆動部とその下に配置された上下駆動部で構成され、チップ・チルト駆動によって生じた隣り合うミラーの段差を、上下駆動で補償する。チップ・チルト駆動部は1ユニット3個の圧電素子で構成され、それらは1つの予圧機構に封入される。上下駆動部は1ユニット1個の圧電素子で構成され、複数のユニットが1つの予圧機構に封入される。

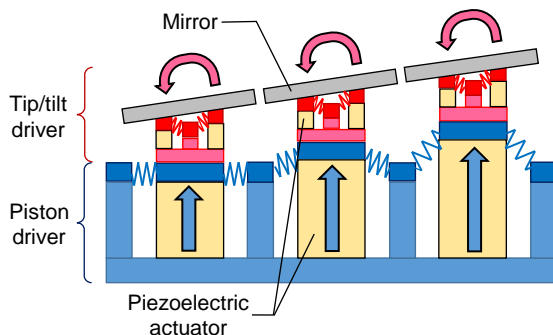


Fig.1 Concept of a swarm fast steering mirror using piezoelectric actuators

3. チップ・チルト駆動部とミラーの設計

3.1 チップ・チルト駆動部の設計

本研究では表1を群ミラー全体の性能目標として、図2のチップ・チルト駆動部を提案する。圧電素子を封入する予圧機構は、ホルダーと予圧板から構成され、ねじの軸力によって圧電素子に予圧を与える。予圧板には耐疲労性・耐クリープ性に優れたイン

コネルを用いる。予圧板の変位は、弾性ヒンジを介して無摩擦でミラーに伝達される。このため長期間の使用が可能であるだけでなく、ロストモーションがなく精密な位置決めができると考えられる。使用する圧電素子(PA3JEAW, Thorlabs)は最大発生力が 360 N, 変位量は 2.2 μm である。

3.2 ミラーの設計

高応答可動ミラーの材料には剛性が高く、軽量なものが適切である。そこで、シリコンカーバイド(SiC)と石英ガラスの2種類のミラーを検討した。SiCは宇宙望遠鏡の主鏡などに用いられ、剛性が高く軽量であるが、高硬度の半導体であるため難加工材である。一方、石英ガラスの物性はSiCには劣るが、加工が比較的容易である。本報ではまず、石英ガラスを用いたミラーを用いて設計・製作を行った。隣接するチップ・チルト駆動部が接触しないよう、ミラー面は内接円の直径が 18 mm となるような正六角形とし、厚さは 1.6 mm と定めた。

Table 1 Development target

Total mirror size	$\geq \phi 50$
Control direction	θ_x, θ_y, z
Stroke range	$\theta_x, \theta_y : \pm 0.3 \text{ mrad}$ $z : \pm 10 \mu\text{m}$
Band width	$\geq 20 \text{ kHz}$

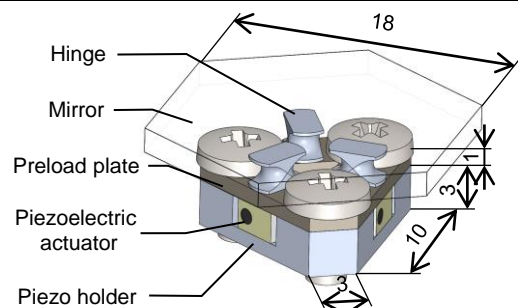


Fig.2 Design of the tip/tilt driver

3.3 チップ・チルト駆動部性能の数値解析

チップ・チルト駆動部にミラーを取付けたモデルをCADソフト(SolidWorks 2014, Dassault Systèmes SolidWorks Corporation)で作成し、固有振動数、駆動範囲、最大角発生時のミラーの平面度を解析した。この結果を表2にまとめる。

固有振動数は1次モードで 20.1 kHz, 2次モードで 21.1 kHz となった。1次モードは図3(a)のようにミラーが歪曲するモードでミラーの剛性に起因する。2次モードは図3(b)のように重心を通る軸周りにミラーが回転するモードであり、弾性ヒンジのばね特性とミラーの質量に起因する。どちらのモードも制御不可能であり、チップ・チルト駆動部の駆動周波数帯域は1次モードの固有振動数以下になる。

Table 2 Summary of the analysis about the tip/tilt driver

Natural frequency at mode 1	20.1 kHz
Natural frequency at mode 2	21.1 kHz
Stroke range	± 0.28 mrad
Flatness(RMS)	33.9 nm

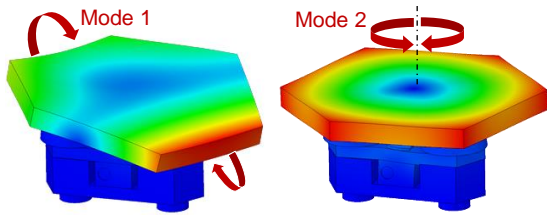


Fig. 3 Analytic vibration modes of the tip/tilt driver

4. チップ・チルト駆動部の評価実験

4.1 実験装置

図4に試作したチップ・チルト駆動部と変位センサの位置を示す。ミラーの角度と変位は、ミラーの重心を通る軸周りに 120° ずつ対称に配置した3つの静電容量型変位センサ(プローブ: Model 5504 / 5130, コンソール: Model 5300, MicroSense)を用いて測定する。チャンネル1, 2, 3の測定点をそれぞれA, B, Cとし, 対応する圧電素子もまたA, B, Cと区別する。センサの測定範囲は $\pm 25 \mu\text{m}$, チャンネル1, 2のセンサノイズは $\pm 21 \text{ nm}$, チャンネル3は $\pm 37 \text{ nm}$ である。ミラーの角度は3つのセンサの測定する変位から算出し, 測定可能な角度の範囲は $\pm 1.8 \text{ mrad}$ であり, 角度分解能は $3.1 \mu\text{rad}$ である。

計測および制御にはDSPシステム(MicroLabBox, dSPACE)を用いる。変位センサからの信号は16ビットのA/D変換器で取り込み, 圧電駆動アンプ(PZDR/松定プレジジョン)への指令電圧は16ビットのD/A変換器から出力する。

4.2 信号変換器

ミラーの指令値 θ_x, θ_y, z_0 に対応し, 圧電素子への印加電圧をDSPでリアルタイムに演算する。ミラーの弾性変形が十分小さいと仮定すると, ミラーの重心の変位と姿勢は, 測定点の変位と位置関係より幾何的に求められる。測定点と圧電素子の印加電圧の関係は, 圧電素子A, B, Cにそれぞれバイアス電圧75V, 片振幅75Vの正弦波電圧を印加し, そのときの測定点の変位と電圧の関係を線形近似することで求める。ただし, 圧電素子にはヒステリシス特性があり, 印加する正弦波電圧の片振幅が小さくなると圧電素子の変位は小さくなる。0~150Vのフルストローク駆動した実験結果から, 圧電素子の入力電圧とストロークの関係を線形近似し, 目標位置から圧電素子の入力電圧を決定する変換式を得ている。

4.3 円軌跡描画実験

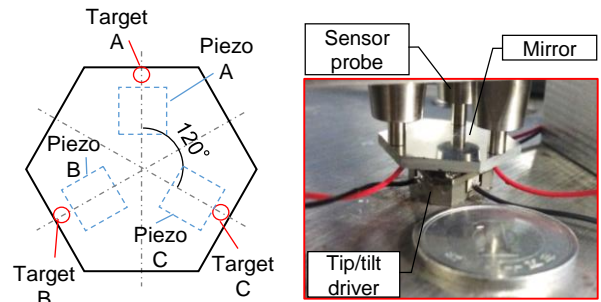
ミラーの θ_x, θ_y の指令値を0.1 Hzの正弦波とする。このとき, θ_y は θ_x から 90° 位相を遅らせる。そのときの応答を測定した結果を図4に示す。ただし, サンプル周期は100 msとする。

(a)は指令値の片振幅が0.1 mrad, (b)は0.3 mradである。圧電素子のヒステリシス特性の影響から, 指令値が小さい場合, 実際のミラーの姿勢変化が小さく, 指令値が大きい場合, 円軌道からの歪みが顕在化するが, 指令値と測定値のずれは, フィードバック制御を行うことで小さくすることができると考えられる。

4.4 周波数応答測定

θ_x, θ_y 方向へそれぞれ周波数を走査して測定した回転角度の周波数応答特性を図5に示す。ただしDSPのサンプリング周波

数は50 kHzとした。図より試作機は7.7 kHzに共振点が現れることが確認でき, これは有限要素法による解析値の1/3倍程度と小さい。この原因として, 第一にミラーとアクチュエータを接合する接着層の剛性への影響, 第二に予圧不足による変形板と圧電素子の分離が考えられる。



(a) Alignment of the piezo actuators and sensor targets (b) Photograph of the tip/tilt driver and sensors

Fig.4 Test bench for the tip/tilt driver

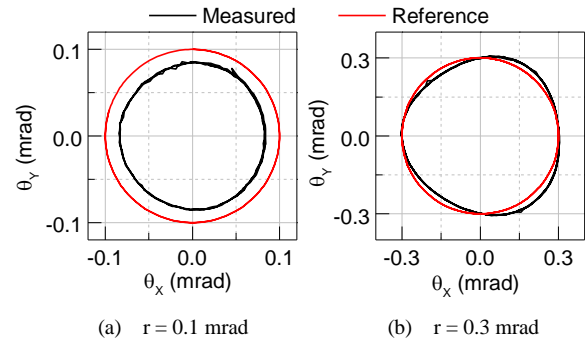


Fig. 4 Measured circle motion

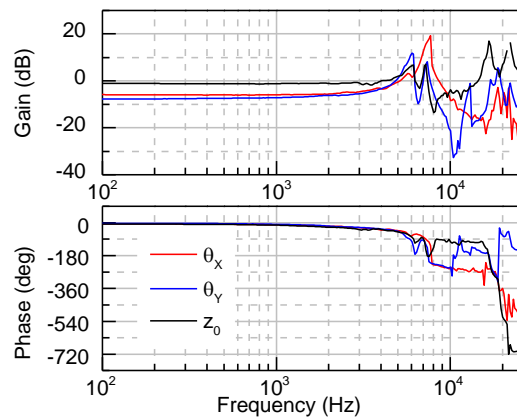


Fig. 5 Frequency responses

5. 結 言

20 kHz以上の1次モードの固有振動数を有するチップ・チルト駆動部の設計・試作を目指した。3つの圧電素子を協調させ円軌道を実現したが, 固有振動数は目標値に達成せず, 今後, 接着層やミラー材料など固有値低下の原因を改善していく。また, 上下駆動部を設計・製作, 光学センサを用いた鏡面の段差の測定方法の考案, 複数の可動ミラーの協調制御を今後の課題とする。

《参考文献》

- [1] 宮田威男 他, 大出力cw CO2レーザー用光学部品の開発, レーザー研究/レーザー学会誌, Vol. 13, No. 2, (1985) pp. 138-147
- [2] 高山佳久 他, 衛星光通信の現状と展望, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J94-B, No. 11, (2011) pp. 1443-1451