連成振動を用いた高速・広角・小型MEMSミラー

産業技術総合研究所
岡本有貴

1．はじめに

微小電気機械システム（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）技術を用いた光走査デバイスである MEMS ミラー（MEMS スキャナ）は，その小型性・低消費電力・高速応答性から，レーザ走査を必要とする多様な応用分野において中核的な役割を担ってきた[1]。具体的には，三次元（3D）イメージング[2]，ピコプロジェクタ[3]，そして自動運転車や自律移動ロボット，ドローンなどに搭載される光測距（LiDAR: Light Detection and Ranging），さらには拡張現実／仮想現実（AR/VR）デバイス[4]へと，その適用範囲は着実に拡大している。従来のガルバノミラーやポリゴンミラーといった機械式走査機構に比べ，MEMS ミラーはバッチプロセスによる低コスト製造が可能であり，装置の飛躍的な小型化・低消費電力化を実現する点で本質的な優位性を有する。

一方で，応用分野ごとに要求されるデバイス仕様は大きく異なる。LiDAR 用途では，長距離測定のために大口径（5×5 mm² を超える大型）ミラーと大きな走査角，そして高速応答が同時に要求される[5]。これに対し AR/VR スマートグラス用途では，眼鏡フレーム内への実装を前提とするため，極めて小さなダイサイズと，高速かつ広角な走査性能の両立が求められる。しかし，ミラー径は光学系の要求から概ね 1 mm 程度に固定されるため，ダイサイズを縮小するとアクチュエータに割り当てられる面積が急激に減少し，走査角が低下するという本質的なトレードオフが存在する。このように，小型化・高速化・広角化・大口径化という相反する要求をいかに同時に満たすかが，MEMS ミラー研究における普遍的な課題となっている。

本稿では，まず MEMS ミラーの基本的な動作原理と代表的な駆動方式を概観し，その性能評価指標を整理する。続いて，非駆動部に大きな変位を生じさせる連成振動（resonant coupling）を積極的に利用することで，周波数と走査角を同時に高める高性能化技術について，筆者らの取り組みを交えて詳述する。あわせて，小型化に適した圧電アクチュエータの特長や，実用化に不可欠な位相補償技術についても触れる。

2．MEMS ミラーの原理

2-1　基本構造と動作

MEMS ミラーの基本構造は，光を反射するミラー部と，これを支持・回転させるトーションばね（ねじりばね），およびミラーに回転運動を与えるアクチュエータから構成される。多くのデバイスはシリコン・オン・インシュレータ（SOI）ウエハの活性層（デバイス層）を用いており，BOX 層（埋め込み酸化膜）と裏面シリコンを除去する（リリース工程）ことで可動構造にする。ミラー表面には金属薄膜が成膜され，反射率が確保される。アクチュエータが発生する力または変位は，ばねを介してミラー部のねじり回転運動へと変換され，入射レーザ光の走査が実現される。

MEMS ミラーの駆動方式は，大きく共振駆動と非共振（準静的）駆動に分類される。共振駆動は，構造の機械共振周波数近傍でミラーを振動させることで振幅を増幅できる方式であり，小さな駆動力