3D-MEMS 光スイッチモジュールの高速・安定化スイッチング制御アルゴリズムの提案と基本動作実証*

水上 雅人** 山口 城治** 根本 成**

Proposal of the Switching-Control Algorithm for 3D-MEMS Optical Switch Module and Its Demonstration

Masato MIZUKAMI, Joji YAMAGUCHI and Naru NEMOTO

A switching-control algorithm is necessary in order to connect the optical paths between input and output ports by using MEMS mirrors in a free-space optical system. We propose a new search algorithm that finds the maximum optical power by using the motion control technique of MEMS mirrors. We apply the algorithm to peak search control for optical path connection with maximum optical power and to the optical power stabilization control in the case of environment changes, such as temperature change. The results confirm that the algorithm is suitable for practical use.

Key words: MEMS, peak search algorithm, motion control, optical network system, optical switch

1. 緒 言

LSI 製造技術を用いて、半導体基板上に電気、機械、光学部品を形成した MEMS デバイスの光デバイスへの適用では、高集積化、小型化による高速応答が可能となる特長を有していることから、光偏向器として利用可能な 2 軸回転 MEMS ミラーの検討等が、これまで多数報告されている^{1) 2)}。さらに MEMS ミラーを空間光学系と組み合わせて光ビームの偏向を行うことにより、光信号のまま光パスを切り替える光スイッチの開発も報告されている。例えば、波長多重化された入力光信号に対し、波長ごとに出力ポートを選択できる波長選択光スイッチ (Wavelength Selectable Switch: WSS)³⁾ や、光クロスコネクタ (Optical Cross-Connect: OXC) 装置用として、100 ポートを超える大規模化が可能な 3D-MEMS 光スイッチ (SW)^{4) 5)} が提案されている。

3D-MEMS 光 SW の基本構成を図 1 に示す。空間光学系を用いた 3D-MEMS 光 SW は低挿入損失、低波長依存性、低偏波依存損失性などの利点があり、また大規模化に向けた構成として着目されている。この光 SW では、入出力光ポート間に 2 軸回転動作可能なマイクロミラー素子を配置し、マイクロミラーの回転角に応じて任意の出力光ポートに入力光ポートからの光を切り替えて、スイッチングを行う。このような 2 軸回転マイクロミラーを用い、光入力部から 3 次元空間に出射された光ビームを最終的に光出力部に結合させる空間光学系では、伝播損失を最小にするために出力光パワーを最大にするピークサーチ制御が必要となる。通信用光デバイスへの適用では、光接続時に数十 ms 程度以下の応答速度が求められることが多いため、ピークサーチ制御もこのオーダー以下で実現する必要がある。また、このような 3D-MEMS 光 SW では最大光パワーでの光接続後に、温度変化などの環境変化がある場合や外乱ノイズに対しても常に最大光パワーを保持する安定化制御も求められる。

本報告では、2 軸回転 MEMS ミラーを用いた空間光学系での光

接続時に必要なスイッチング制御アルゴリズムの検討について報告する。具体的には、ミラー振動制御により最適駆動電圧を求めるフーリエ変換を利用した高精度最大値推定方法と安定化制御において、適切な光パワー変動幅となるよう振動範囲を増減させる光パワー変動幅設定方法を実装したスイッチング制御アルゴリズムを提案する。光接続時のピークサーチ制御及びその後の温度変化など環境変化時にも常に最大光パワーの保持 (安定化) を行う光パワー安定化制御へ提案アルゴリズムを適用し、検証した結果を述べる。

2. MEMS ミラーのスイッチング制御とその課題

MEMS ミラーのスイッチング制御は、図 2 に示すように①光接続時に光パワー最大値を得るミラー角度に制御するピークサーチ制御と、②光接続後に周囲の環境変化に起因する損失変動が起きた場合でも、最大光パワーの探索・保持を行う安定化制御に大別される。いずれの場合も光パワー最大値を得るミラーの最適角度の検出が必要となる。ここでは 1 対の 2 軸回転 MEMS ミラーの回転角制御により光接続する光 SW を対象としている。次に図 3 に示す空間光学系の基本構成を例に光パワー最大値探索方法を説明する。入力側コリメータからの出射光が 2

Fig.1 Configuration of a three-dimensional MEMS optical switch fabric

* 平成 22 年 7 月 27 日

** 正 会 員 日本電信電話 (株) マイクロシステムインテグレーション研究所 (神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

つの2軸回転ミラーの回転角に応じて反射され、出力側コリメータに入射される。このとき出力側の光パワーが最大値を得るように、出力側光パワーをモニタしながらミラーの回転角を制御するピークサーチが実行される。光モジュールの低コスト化を指向し、角度センサを各々のミラーに搭載していないため、この光パワー最大値探索には出力光パワー P から2軸回転ミラー1, 2の最適駆動電圧値($V_{x1}, V_{y1}, V_{x2}, V_{y2}$)の推定が必要となる。そこでミラー1, 2を順に2軸回転方向に微小角度移動(以下、摂動)させ、得られた光パワー変動から各々のミラーの最適駆動電圧を求める摂動制御法を採用する。通常の最大値探索として、ミラーを現在角度から各軸方向に摂動させて、各軸各々の移動角度での光パワー情報を比較し、最大値を得た角度を次の探索開始角度として、順次最大値を探索していく、3点摂動山登り法がアルゴリズムの簡便性から利用されることが多い(図4)。但し、一般的にはMEMSミラーの減衰定数は小さいため、高速駆動の場合に残留振動が大きく発生することが危惧される。そのため、この方法をMEMSミラー制御へ適用する場合には、ミラー動特性による残留振動のため各点移動時間を十分にとる必要があるなど実用上の問題がある。その結果、多大な調整時間を必要とすることとなり、通信用光デバイスへの適用領域拡大の阻害要因の一つとなっている。一方、安定化制御ではシステム側で要求される許容光パワー変動幅での光パワー安定化が求められる。摂動制御法ではミラー摂動による光パワー変動を利用することから、最大光パワーの探索、保持のためには適切な光パワー変動幅を設定可能な方法が必要とされる。

3. 高速・安定化スイッチング制御法の提案

前述の課題に対してミラー動特性による残留振動を低減し、高速駆動可能な摂動制御を用いた最大光強度探索アルゴリズムを考案した。以下、順に高速化して精度よく最大光パワーを求めるための①ミラー摂動時の残留振動を低減し、高速駆動可能な摂動軌跡形状の設計、②ミラー摂動制御により最適駆動電圧を求めるフーリエ変換を利用した高精度最大値推定方法、③安定化制御において、適切な光パワー変動幅となるよう摂動範囲を増減させる光パワー変動幅設定方法について述べる。

3.1 摂動軌跡形状設計

スイッチング制御におけるピークサーチでは高速探索が求められる。そこでミラーの動特性を考慮して、ミラー摂動時の残留振動を低減し、高速駆動可能な摂動軌跡形状の設計を行った。前提として、最大値方向上の摂動軌跡上に最適電圧値を設定するため、ミラー摂動点が初期(最適)値を原点とする4象限に必ず軌跡点が1つ以上ある必要がある。また摂動による高速・高精度最大値推定には、入出力ミラー摂動間・摂動点間残留振動を抑制する摂動駆動方法が必要となる。図5に示すように、摂動軌跡として、光軸調整等で用いられる螺旋軌跡を用いた場合には起点と終点が一致しないことから、開始点が最適値付近であった場合には移動量大となり、残留振動の影響が大となる。高速駆動時の残留振動を減らすためには、MEMSミラー自体の共振周波数を上げるか、ノッチフィルタ等を用いて抑制するなどの方策があるが、デバイスなどハードウェアの改良は行わず、ここでは運動軌跡などの駆動方法を改良することで、簡便に残留振動を抑制する方法について考察を行なった。

まず、軌跡の最終点での残留振動に対して、本方法では入出力ミラー間摂動時の残留振動の影響を最小限に抑制し、スムーズな連続的動作を実現するため、起点と終点が一致した円形状

Fig.2 Switching control of MEMS mirrors

Fig.3 Configuration of a free-space optical system using MEMS mirrors

Fig.4 Conventional search method of peak optical power

Fig.5 Design of motion trajectory of MEMS mirror

をベースとした振動軌跡とした。次に振動点間での残留振動に関して、振動点間の移動時間設定によっては、各点の残留振動が大きく発生する問題があることを確認した（図6）。そこで、一般的に静電駆動型MEMSミラーの動特性モデルとして用いられる1自由度振動系で、実測したパラメータによるミラー振動駆動時シミュレーションを行い、各点駆動時間間隔を最適化する検討を行った。その結果、1振動あたり20点の駆動を20msで実行することで残留振動抑制が可能となることを確認した。最大値方向推定のための計算時間と移動時間として数msを見込むと、1回のピークサーチ制御には2つのミラーの駆動を行なうため、ピークサーチ制御に必要な時間を最短で50ms程度に高速化できる見通しを得た。

3.2 高精度最大値推定方法

ピークサーチ制御及び安定化制御の両方に必要となる最大光強度を得る最適電圧値を求めるため、振動による限られた光パワー変動量情報から制御電圧を高精度に推定することが必要となる。そこで、フーリエ変換を利用して最大光強度を求める高精度推定方法を新たに提案する。図7を用いて最適電圧値の算出原理を説明する。本方法では、ミラー駆動電圧 V_x , V_y を周期関数とした振動軌跡（図7(a)）を用いて、その周期性から離散フーリエ変換を利用して最適電圧値の推定を行う。図3に記載されている空間光学系で、ミラーに対して光を入射してミラー駆動電圧 V_x , V_y をある範囲で変化させて出射される光強度分布の形状を見た場合には、デシベル表記で2次曲面形状となる。この場合、駆動電圧と出力光パワーの位相差角度は光強度の最大値方向を向いている。これを利用して最大光強度を推定する。最大光強度探索と安定化制御の手順は以下の通りである。

- ① 初期値 V_x, V_y の値から半径電圧 V_s 分ずらした位置を開始点として、 V_x, V_y の軌跡が円を描くように設定分割点分を移動する(式(1))。
- ② それぞれの振動点電圧のときの光強度値を測定する。
- ③ 取得した出力光強度の時系列データは余弦関数に近似できる(式(2))として、この余弦関数と円軌跡振動の際の振動点電圧パターン設定に用いた正弦または余弦関数との位相差 θ を計算する(図7(b))（ピークサーチ制御）。
- ④ 位相差を光強度の最大値を得る方向角度 θ とし、その方向角度 θ 上にある振動円上の電圧値を算出し、その点を次の振動円の中心とする。
- ⑤ ①～④を繰り返して動作する（安定化制御）。

$$\begin{aligned} \text{円形駆動時電圧: } V_x[i] &= V_{x0} + V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ V_y[i] &= V_{y0} - V_s \cdot \cos(\omega \cdot t) + V_s \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{円形駆動時光パワー出力: } P &= P_0 + \Delta P_p \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta) \quad (2) \end{aligned}$$

ΔP_p : 円軌跡振動中の光強度変動幅
 θ : 位相差 $\Rightarrow$ 光強度の最大値を得る方向角度

上記のシーケンスにより、最大光強度を探索、保持することが可能となる。位相差算出には離散フーリエ変換を用いており、光パワー測定値に外乱ノイズが加わった場合でも高精度な最大値方向推定が可能となる特長がある。

Fig.6 Simulation result obtained with a dynamic characteristics model of a MEMS mirror

Fig.7 Peak search method based on discrete Fourier transformation

Fig.8 Circular motion trajectory

3.3 光パワー変動幅設定方法

本方法を適用した安定化制御においては、摂動による光パワー変動を利用した最適電圧推定を行うことから、光パワー変動幅が大きすぎる場合は安定性が悪く、逆に光パワー変動幅が小さいと、十分な推定精度が得られない課題がある。そこで、光パワー変動幅が許容設定値内の適当な値となるよう、ミラー摂動時の半径電圧を増減するアルゴリズムの導入について検討を行った。まず、円形軌跡摂動の半径電圧増減動作について説明する。(2)式により計算された円軌跡摂動時の損失変動幅推定値 ΔP_p と、設定された損失変化量許容値 ΔP を比較し、次の円軌跡摂動に用いる半径量 V_s を設定する。具体的には、円軌跡摂動時に出力光の光強度の値から算出される損失変動幅推定値 ΔP_p とあらかじめ設定される損失変化量許容値 ΔP から下記の(3)式に基づいて次の半径量 V_s' を算出する。ここで、出力光強度変動幅 ΔP_p が損失変化量許容値 ΔP よりも大きい場合には、次の摂動に用いる円軌跡の半径を小さくし、出力光強度変動幅 ΔP_p が損失変化量許容値 ΔP よりも小さい場合には次の摂動に用いる円軌跡の半径を大きくするように円軌跡摂動に用いる半径電圧を更新する(図 7(a) $V_s \Rightarrow V_s'$)。なお、下式 (3) において、 k は半径電圧の一摂動あたりの変化幅を決めるパラメータである。

$$V_s' = V_s + (\Delta P - \Delta P_p) \cdot k \quad (3)$$

このようにして、以降の摂動パターンに用いる半径量 V_s を出力光強度変動幅に応じて逐次更新することにより、許容変動幅内での安定化制御が実行できることになる。以下では本提案方法による最大光パワー探索と安定化制御の原理確認をシミュレーションと実験により行った結果を示す。

4. シミュレーション

図8に示される、推定された最適電圧値を円中心とする円軌跡は簡易に全方位探索が可能となる軌跡として考えられる。そこで、まずは円軌跡による提案方法の原理確認を行った。図9に2次曲面光強度分布を仮定した場合に、円軌跡摂動を用いて、最大光パワーの探索を行った時の半径電圧の増減をシミュレーションした結果を記載する。その結果、円中心が光パワー分布中心に一致する場合には、許容設定値に関わらず半径電圧が拡大方向に進み、推定電圧値移動時に光パワー変動が大きくなる問題が発生することが分かった。これは、円中心が光パワー分布中心に一致することにより、光パワー変動情報が得られなくなり、十分な推定精度が得られなくなるが原因と考えられる。そこで、最大値推定電圧値が摂動軌跡上にあり、推定値を原点とする4象限に摂動点を持つ軌跡を新たに考案した。図10に提案する8字型軌跡を示す。摂動開始点を中心として、両側に円軌跡を組み合わせた軌跡となっている。図中上側の円軌跡の角度($0^\circ \sim 360^\circ$)と下側の円軌跡の角度($360^\circ \sim 720^\circ$)での最大値方向角度を推定することになる。この場合も駆動電圧は周期関数となり、3.2項記載の最大値推定方法が適用可能である。

以下、シミュレーションと実験により、8字型軌跡での最大値推定方法の基本動作と最大光パワーの探索と許容設定値内の光パワー変動幅となる安定化制御の検証を行った結果を示す。

2個のミラーを用いた空間光学系において、2次曲面光パワー分布を仮定し、8字型摂動軌跡を用いたシミュレーションにより、安定化制御方法の基本動作検証を実施した。

Fig.9 Simulation results for radius voltage (Circular motion trajectory)

Fig.10 Figure-8 motion trajectory

Fig.11 Simulation results for radius voltage (Figure-8 motion trajectory)

図11に円軌跡と8字型軌跡の両者において、本方法により最大光パワーの探索を行った際の半径電圧の増減結果を示す。本結果から最大光パワー推定電圧値が光パワー分布中心の近傍となる場合でも、必要な出力パワー変動情報が得られ、半径電圧の増加を抑制可能なことを確認した。次に図12に最大光パワー探索の過程において、入力光パワーと出力光パワーの差分をプロットしたグラフを示す。図は損失変化量許容値を0.2dBに設定したシミュレーション結果である。損失変化量許容値内に収まっていることが分かる。本結果から、光パワーレベルの変動が大きく発生せず、光パワーが許容設定値内で安定化できる可能性を確認した。

5. 評価実験

本提案方法による最大光パワー探索と安定化制御を実験により検証した結果を示す。図3に示した空間光学系を用いて、光パワー変動幅の許容設定値として、実用上よく用いられる0.2dBを設定した。実験では、①スイッチング時のピークサーチ制御及び接続中の光パワー変化を模擬して、最適電圧に誤差電圧(0.5dB 相当)を与えた場合の最大光パワー探索と、②最適電圧からの最大光パワー保持の両動作を検証した。図13に入力光パワーと出力光パワーの差分をプロットした実験結果を示す。実験結果から、光パワーの最大値探索が実現可能なこと、および最大光パワーから目標設定した0.2dB以内で安定保持動作が可能なことを実証した。

次に3D-MEMS 光スイッチモジュールに外部振動などの印加により、出力光信号にノイズが加わる場合を模擬した最大光パワー探索動作を検証した。外部振動として通信デバイス分野で用いられる信頼性規格である Telcordia GR-63 の Office Vibration 規格をもとに、0.1G (5~100Hz) の加振を行った状態での動作検証を行った。図14にサンプルパスとして、MEMS ミラーを大きく傾ける対角接続(140-8, 135-3)とあまり傾けない対向接続(73-84)を設定し、ピークサーチ及び安定化制御動作を行った結果を示す。振動印加時でも、ノイズに起因して最大値推定に誤ることはなく、最大光パワーの探索が正常実行可能であり、かつその後の安定化動作時にも光パワー変動が大きくなることはないことを実証した。以上から8字型振動軌跡による最大値推定方法を用いたピークサーチ及び安定化制御方法の有用性を確認した。

6. 結 言

3D-MEMS 光スイッチモジュールにおける2軸回転MEMS ミラーを用いた空間光学系での光接続時に必要なスイッチング制御アルゴリズムについて、ミラー振動制御による最大光強度探索アルゴリズムを提案した。スイッチング動作時のピークサーチ制御及びその後の最大光パワーの保持を行う安定化制御への適用検証をシミュレーションおよび実験により行い、本方法の有用性を実証した。

参 考 文 献

- 1) D.J. Bishop, C.R. Giles, and G.P. Austin "The Lucent Lambda Router: MEMS technology of future here today", IEEE Comm. Mag., **40**, 3,(2002) 75.
- 2) R. Sawada, J. Yamaguchi, E. Higurashi, A. Shimizu, T. Yamamoto, N. Takeuchi, and Y. Uenishi, Improved single crystalline mirror actuated electrostatically by terraced electrodes with high-aspect ratio torsion spring, 2003 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, (2003) 153.
- 3) M. Usui, S. Uchiyama, E. Hashimoto, K. Hadama, Y. Ishii, N. Matsuura, T. Sakata, N. Shimoyama, Y. Sato, H. Ishii, T. Matsuura, F. Shimokawa, Y. Uenishi, , Electrically Separated Two-axis MEMS Mirror Array Module for Wavelength Selective Switches, Optical MEMS 2009, (Clearwater FL, Aug 17-20, 2009), WP13, 158.

- 4) 山口 城治, 山本剛, 清水彰, 竹内信行, 日暮栄治, 澤田廉士, 上西祐司 "MEMS 光 SW モジュール", 信学技報 EMD2003-17(2003).
- 5) 水上雅人, 山口城治, 根本成, 河尻祐子, 下川房男 "MEMS ミラーを用いた光スイッチの制御回路及び自動特性評価系の検討", 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, F22 (2009).

Fig.12 Simulation results for optical power stabilization

Fig.13 Experimental results for optical power stabilization

Fig.14 Experimental results for peak search and optical power stabilization at Telcordia GR-63 office vibration test