

機械学習を用いた大規模モザイク状光波回路の研究

A research on large-scale mosaic based optical circuits based on machine learning



藤澤 剛 (Takeshi Fujisawa, Dr. Eng.)

法政大学 理工学部 教授

(Professor, Hosei University, Faculty of Science and Engineering)

IEEE OSA 電子情報通信学会

受賞：電子情報通信学会学術奨励賞 (2010年)、他

研究専門分野：光ファイバ通信 光デバイス 光半導体光学

あらまし

大規模モザイク素子のための機械学習を用いた設計技術に関する研究を行った。具体的に、モザイク素子の各ピクセルにおける、特性変化の勾配を勾配法により算出し、最適設計におけるピクセルの反転/保持の判断に用いる、勾配援用、直接2分探索法を開発した。超小型、モザイク型パワースプリッタ、モード合波器の設計に本手法を適用し、従来法に比べて、圧倒的に早い収束を確認した。また、設計した素子を試作し、設計法の有効性を実証した。本手法により、ピクセル数が数千を超える大規模モザイク素子の設計が可能になると考えられる。

1. 研究の目的

超小型光回路を実現可能な、モザイク素子^{*1}に関する研究を行う。モザイク素子は、設計領域がサブ波長程度のピクセルに分割されており、各ピクセルの材料を削る(0)、残す(1)ことによりモザイク状パターンを形成した素子であるが、ピクセル数が数千となるような大規模モザイク素子については、従来の設計手法(直接2分探索法、DBS法^{*2})では有意な時間のうちに解が得られない可能性があった。そこで本研究では、大規模モザイク素子の効率的な設計を目的として、機械学習に基づく新規設計手法の開発により、設計時間

の短縮を図り、大規模モザイク素子の設計を可能とするための研究を行う。

2. 研究の背景

近年の、データセンタ事業の爆発的需要増加に伴い、大幅な通信量増大が見込まれている。それを受け、データセンタ内、センタ間など、幅広い伝送距離に対する通信の光化が急速に進み、将来的にはチップ間などの極短距離通信も光化していくと考えられている。これらの通信では、多数の光送受信機が用いられるが、増加し続ける伝送容量を担保するためには、光送受信機1個当たりの消費電力低減は、絶対に解決しなければならない必須の社会的課題となっている。送受信機の消費電力はその設置面積にほぼ比例するため、消費電力低減には素子の小型化が必須となる。この状況のもと、いわゆるシリコンフォトニクス^{*3}技術を用いた、構成素子の小型化、大規模集積化に関する研究が活発に行われている。従来の化合物半導体を用いた素子に比べ、1/10程度の大きさの回路を構成可能であるが、チップ間通信等には更なる小型化が望まれている。

シリコン素子の更なる小型化を実現するために、モザイク素子が注目を集め始めている[1]。モザイク素子では、図1上に示すように、Siのプレート上をサブ波長程度(～100nm)のピクセルで分割し、各ピクセルに0(シリコンを削る)、1(シリコンを残す)を適切に割り当てることにより、モザイク状パターンを生成し、目的の性能をもつ素子を実現するものである。その大きさを従来の化合物半導体素子に比べ、1/100以下にすることが可能であり、素子の究極的な小型化を実現可能である。

これらモザイク素子はほぼ全て、DBS法により設計されている。DBS法では図1下に示すように、現在のモザイクパターンから、ランダムに1ピクセル選択し、その状態を反転させ、電磁界解析により特性を算出する。このとき、特性が目標に近づけば、その反転を維持し、劣化すれば元に戻して、次のピクセルを選択する。この手法は非常に簡便だが、反復の回数だけ電磁界解析を必要とするため、ピクセル数が多い場合、膨大な計算時間が必要で、有意な時間のうちに設計が終了しない可能性がある。また、その手法の特性から、

機械学習を用いた大規模モザイク状光波回路の研究

A research on large-scale mosaic based optical circuits based on machine learning

局所解に陥りやすく、特性の良くない構造に収束することも多い。そのため、これまで検討されてきたモザイク素子は比較的小さなピクセル数（せいぜい数百個程度）を有する素子に限られていた。最近、著者らは、強力な機械学習技術であるベイズ推定を用いて、積み重なった統計情報を元に設計の方向を定めるベイズ DBS 法を開発した。ベイズ DBS 法により、設計時間を数十%削減することに成功しているが、多数の教師データを必要とする設計の初期においては、従来設計手法（DBS 法）を用いなければならないという問題点があった[2]。

促進し（物理ドリブン）、設計後期では、ベイズ推定により、統計的な理由によって、反転するピクセルを選択する（データドリブン）。本助成では、設計の初期段階で用いる、勾配法を用いてピクセル反転の有無を決定する、勾配 DBS 法の開発を行った。

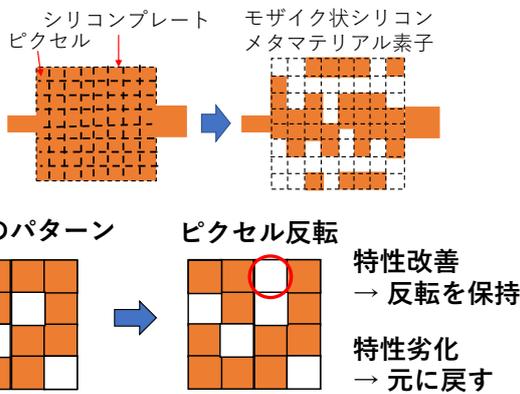


図 1 (上) モザイク素子、(下) DBS 法によるモザイク素子設計の概念図

3. 研究の方法

このような問題に鑑み、本研究では、大規模モザイク素子の設計を可能とする、機械学習に基づく新規設計法を開発する。ベイズ法を適用できない、設計の初期において、勾配法[3]と呼ばれる機械学習技術を用いて反転するピクセルを選択することで、構造の収束を速める。同時に、解析したパターンを特性を記録し、このデータが十分にたまった段階で、ベイズ推定を用いて、多数のデータから構造の特性を予想し、統計的な理由によって次の反転するピクセルを選択する。図 2 に、従来 DBS 法と、本研究による素子特性改善のイメージを示す。横軸は DBS 法の反復回数で、従来法（破線）では、反復と共にデバイス性能がゆっくりと上昇し、やがて収束する。本研究では、設計の初期に勾配法を用いることで、物理的な理由により、収束を

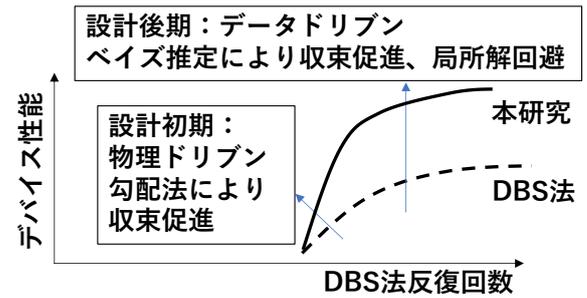


図 2 本研究によるモザイク素子設計の概念図

3.1 勾配 DBS 法

勾配法とは最適設計技術の一つであり、ある関数 $f(\mathbf{x})$ の最小値を与える引数ベクトル \mathbf{x} を求める方法である。現在の引数ベクトルを \mathbf{x}^M としたときに、 f の各要素 x_i に関する勾配が求まっているとすると、 α を調整係数として

$$\mathbf{x}^{M+1} = \mathbf{x}^M - \alpha \nabla f(\mathbf{x}^M) = \mathbf{x}^M - \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{x}^M)}{\partial x_1^M} \\ \frac{\partial f(\mathbf{x}^M)}{\partial x_2^M} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(\mathbf{x}^M)}{\partial x_n^M} \end{bmatrix} \quad (1)$$

とする更新を加えることにより、関数の最小値となる引数ベクトル \mathbf{x} を探索する方法である。

ここで考える問題においては、引数ベクトルはモザイク素子の各ピクセルの値 (0 or 1) であり、ピクセル数だけの次元をもつ。関数 f は、素子の性能指数であり、性能指数の各ピクセルの値 x_i に対する勾配を求めることで、各ピクセルを反転するか否かの指針を得ることができると考えられる。この各ピクセルの勾配情

機械学習を用いた大規模モザイク状光波回路の研究

A research on large-scale mosaic based optical circuits based on machine learning

報を援用したモザイク素子の設計法をここでは勾配 DBS 法 (gradient DBS 法 : gDBS 法) と呼び、その概念図を図 3 に示す。現在のモザイクパターンに対し、各ピクセルの性能指数に対する勾配を算出する。その符号を同図中央に示す。ここで同図に示すように、1 ピクセルはシリコンを示し、0 ピクセルはクラッド材料の SiO₂ としている。すなわち、モザイク素子内の屈折率は 2 値のみである。例えば、1 ピクセルにおける勾配の値が正であっても、それ以上の屈折率に設定することはないので、そのピクセルには変更を加えない。一方、0 ピクセルに対する勾配が正であれば、そのピクセルの屈折率はより大きいほうが特性が良くなると予想されるので、1 ピクセルに反転する。同様に 1 ピクセルの勾配が負の場合は 0 ピクセルに反転し、0 ピクセルの勾配が負の場合は変更を加えない。これらの条件から図 3 のパターンにおいて、変更するピクセルは赤丸で囲んだ 5 個のピクセルであり、それらを反転したパターンが同図右のパターンである。このパターンに対して性能指数を算出し、特性が改善されていれば反転を保持し、劣化していれば元に戻す。これを繰り返すのが勾配 DBS 法である。但し、ピクセルの屈折率は Si か SiO₂ であり、反転する場合は大きく変わるため、一度に変えるピクセルの数を N_{gDBS} として制限する。本研究では、性能指数算出の電磁界解析に有限要素法[4,5]を用い、各ピクセルの勾配は随伴変数法[3]により算出している。

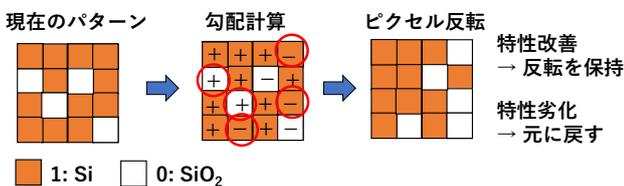


図 3 勾配 DBS 法によるモザイク素子設計の概念図

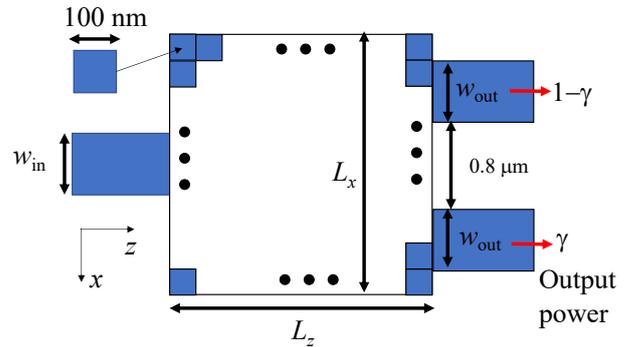


図 4 モザイク型 1×2 パワースプリッタの構造図

3.2 モザイク型 1×2 パワースプリッタ

図 4 に、モザイク型 1×2 パワースプリッタの構造図を示す。Si コア、SiO₂ クラッドを用いた、1 入力、2 出力導波路、その間のモザイク部からなる。Si コアの厚さは 220 nm、入出力導波路幅は $w_{in} = w_{out} = 0.6 \mu\text{m}$ 、モザイク部は $L_x = L_z = 2.4 \mu\text{m}$ の正方形領域からなり、100 nm 角のピクセルで分割されている。よって、モザイク部は 576 個のピクセルからなる。入力導波路に TE₀ モードを入射し、上下出力導波路への出力パワーの目標値を $1-\gamma$ 、 γ とする。例えば等分岐の場合は $\gamma = 0.5$ となる。ここで、モザイク素子を設計する際の性能指数を

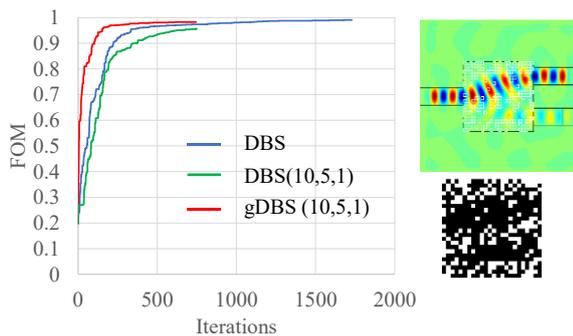
$$FOM = 1 - \left\{ \left| \gamma - T_{low} \right| + \left| (1 - \gamma) - T_{up} \right| \right\} \quad (2)$$

と定義する。ここに、 T_{up} 、 T_{low} は電磁界解析により算出した上下出力導波路への透過パワーであり、素子が理想的な特性の時 1 に最大化される。簡単のため、等価屈折率法を用いて、2 次元解析を行う。図 5(a)左に $\gamma = 0.1$ の場合の、性能指数(2)の収束の様子を示す。青線が通常 DBS 法 3 周 (576×3=1728) 分の結果であり、ほぼロスレスの構造に収束している。同図赤線は、1、2 周目を $N_{gDBS} = 10, 5$ とした gDBS 法、3 周目を通常 DBS 法とした場合の結果であり、gDBS 法部の反復回数が 174 回となっている。図から分かる通り、最初の 174 回で急激に性能が上昇し、従来 DBS 法(青線)に比べはるかに早く収束していることがわかる。同図緑線は、通常 DBS 法で、1、2 周目に変更するピクセルの数を 10、5、3 周目を 1 個とした場合であるが、特性の収束は遅くなっている。このことから、勾

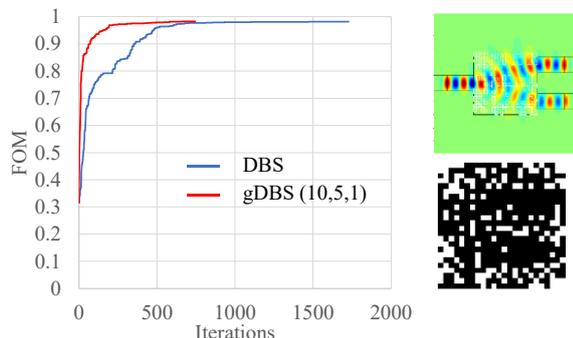
機械学習を用いた大規模モザイク状光波回路の研究

A research on large-scale mosaic based optical circuits based on machine learning

配情報に基づく gDBS 法は、設計の初期段階での「物理的なデータ」による収束促進に有効であることが分かる。同図右に、最終的に得られたモザイクパターンと界分布を示す。1:9 での分岐が達成されていることが分かる。図 5(b)に、 $\gamma = 0.4$ の場合の、性能指数(2)の収束の様子、最適構造、界分布を示す。 $\gamma = 0.1$ の場合と同様に、設計初期の急激な性能改善が確認できる。



(a)



(b)

図 5 (a) $\gamma = 0.1$ 、(b) $\gamma = 0.4$ のモザイク型パワースプリッタの性能指数の収束、収束後の界分布、モザイクパターン

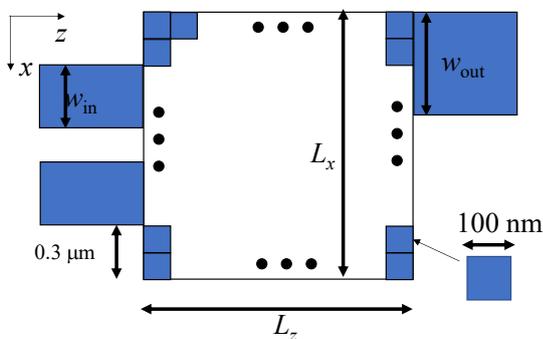
3.3 モザイク型モード合波器

図 6 に、モザイク型 2×1 モード合波器 (MUX) の構造図を示す。Si コア、 SiO_2 クラッドを用いた、2 入力、1 出力導波路、その間のモザイク部からなる。Si コアの厚さは 220 nm 、入出力導波路幅は $w_{in} = 0.6 \mu\text{m}$ 、 $w_{out} = 1.0 \mu\text{m}$ 、モザイク部は $L_x = 3 \mu\text{m}$ 、 $L_z = 4 \mu\text{m}$ の長方形領域からなり、 100 nm 角のピクセルで分割されている。よって、モザイク部は 1200 個のピクセルからなり、準大規模モザイク素子となる。上下入力導波路に TE_0 モードを入射し、上から入射した場合に出力導波路の TE_0 モード、下から入射した場合に出力導波路の TE_1 モードへと結合するように素子を設計する。本素子の性能指数を

$$FOM = |1.0 - T_{low,TE1}| + |1.0 - T_{up,TE0}| \quad (3)$$

と定義する。ここに、 $T_{up,TE0}$ 、 $T_{low,TE1}$ は電磁界解析により算出した、上側導波路入射の場合の出力導波路 TE_0 モードへの透過パワー、下側導波路入射の場合の出力導波路 TE_1 モードへの透過パワーであり、理想的な特性の時 0 に最小化される。

図 7(a)にモザイク型モード MUX の性能指数(3)の収束の様子を示す。青線が通常 DBS 法 3 周 ($1200 \times 3 = 3600$) 分の結果であり、ほぼ収束している。同図赤線は、1、2 周目を $N_{gDBS} = 10, 5$ とした gDBS 法、3、4 周目を通常 DBS 法とした場合の結果であり、gDBS 法部の反復回数が 360 回となっている。パワースプリッタの場合と同様に、gDBS 部で急激に性能が上昇し、従来 DBS 法 (青線) に比べ早く収束していることがわかる。同図(b)に gDBS 法により設計したモザイクパターンと界分布を示す。 2×1 のモード合波ができていることがわかる。

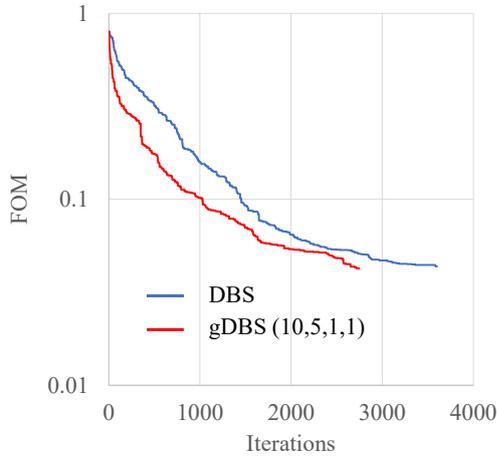


図

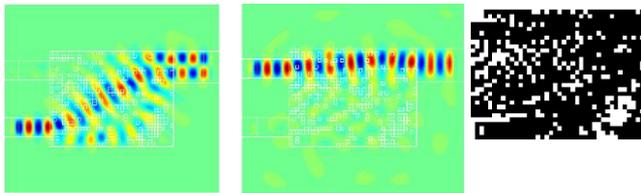
図 6 モザイク型モード合波器の構造図

機械学習を用いた大規模モザイク状光波回路の研究

A research on large-scale mosaic based optical circuits based on machine learning



(a)



(b)

図 7 (a)モザイク型モード MUX の性能指数の反復回数依存性、(b) gDBS 法により設計されたモザイク構造と界分布

4. 将来展望

本研究で開発した gDBS 法は、従来の DBS 法に比べ、明確に収束が速く、ピクセル数が数千から万となる大規模モザイク素子設計に有用であると考えられる。この手法とベイズ DBS 法を用いて、従来手法では難しかった大規模モザイク素子により、従来素子では実現困難な導波路素子を考案、実現していく。

おわりに

ピクセル数が数千から万となる大規模モザイク素子設計のための機械学習技術による新規設計法を開発した。具体的に、反転するピクセルを従来法のようにランダムではなく、各ピクセルの目標特性に対する勾配に基づき選択することで、複数のピクセルの同時反転を可能とし、従来法に比べてより速い性能収束を実現した。

謝辞

勾配法に関してご議論いただいた、室蘭工業大学、辻寧英教授に深謝する。

用語解説 関連文献

- *1 モザイク素子：モザイク状のパターンにより目的の機能を実現する素子。従来素子に比べ、大きさを大幅に小さくすることができる。
- *2 直接 2 分探索法：標準的なモザイク素子の設計法の一つ。一つ一つのピクセルを反転して特性を算出し、特性改善すれば反転を保持し、劣化すれば元に戻すことを繰り返して設計を行う。
- *3 シリコンフォトニクス：薄膜のシリコンを導波路のコアとして光波回路を構成し、各種の光デバイスを構成する技術の総称。

参考文献

- [1] B. Shen, P. Wang, R. Polson, and R. Menon, “An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint,” *Nature Photon.*, **9**, 378-382 (2015).
- [2] T. Fujisawa and K. Saitoh, “Bayesian direct-binary-search algorithm for the efficient design of mosaic-based power splitters,” *OSA Continuum*, vol. 4, no. 4, pp.1258-1270, Apr. 2021.
- [3] Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Nomura, K. Sato, and S. Nishiwaki, “,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, pp. 850-852, Apr. 2006.
- [4] Y. Tsuji and M. Koshiba, “Finite element method using port truncation by perfectly matched layer boundary conditions for optical waveguide discontinuity problems” *J. Lightwave Technol.*, **20**, 463-468 (2002).
- [5] T. Fujisawa and M. Koshiba, “A frequency-domain finite element method for modeling of nonlinear optical waveguide discontinuities,” *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 129-131 (2004).

この研究は、令和3年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和4～6年度に実施されたものです。