パラレルファクタ分析法を用いた光ファイバセンサ出力の検出*

中野 公彦^{*1}, 大橋 星^{*2}, 岡部 洋二^{*3}
嶋崎 守^{*4}, 中村 弘毅^{*2}, 渡辺 尚子^{*5}

Detection of Output of Fiber-Optic Bragg Grating Sensor Using Parallel Factor Analysis

Kimihiko NAKANO^{*1}, Rui OHASHI, Yoji OKABE,
Mamoru SHIMAZAKI, Hiroki NAKAMURA and Naoko WATANABE

^{*1} Univ. of Tokyo, Interfaculty Initiative in Information Studies
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 157-8505 Japan

In this paper, a method employing PARAFAC (Parallel Factor Analysis) is proposed to filter out noise from the signal of the FBG (Fiber Bragg Grating) sensor based on the AWG (Arrayed Waveguide Grating). The experimental results show that the performance of the proposed method is similar to that of the conventional signal-averaging method, which identifies the signal in the case of multiple measurements. PARAFAC is one of several decomposition methods for three-way data and the decomposition is unique without additional orthogonality or independence constraints. When Bragg wavelength of the FBG varies upon receiving an ultrasonic wave, the outputs of two adjacent AWG ports fluctuate in anti-phase. We use wavelet transform to pre-process the AWG ports data series, then the coefficients of the wavelet transform are decomposed by PARAFAC to trilinear components, which represent frequency, temporal, and phase profiles. The factor for which the ports fluctuate in anti-phase is chosen as the target signal and restored to three-way data. The performance of the proposing method is examined in experiments and its validity is shown.

Key Words : Measurement, Signal Processing, Monitoring, Optical Measurement, Spectrogram, Optic Fiber

1. 緒 言

構造物の巨大化につれて、状態監視のために膨大かつ煩雑な設備が必要となっており、よりノイズ環境に強く、汎用性の高いセンサが求められている。近年では光ファイバセンサの一種であるファイバブラッググレーティング (FBG) センサが注目を集めている。FBG センサは光ファイバのコアに紫外線を照射し、周期性を持つブラッグ格子を構成させることで作られている。ブラッグ反射を利用することで特定の波長を持つ光を反射させ、反射波の波長シフト量よりひずみや温度の変動を直接計測することができる。また、軽量で十分な強度と柔軟性を有し、耐熱性、耐食性に優れ、電磁誘導の影響を受けないなどの特徴を持っている。FBG センサを使って超音波領域を計測する場合、ブラッグ反射波波長をすばやく計測するために、自然放射光増幅 (ASE 光源) とアレイ導波路格子 (AWG) フィルタが使われている⁽¹⁾。ASE 光源は必要とされるエネルギーが低く、異なる波長の光の検出に同時に利用できるため、必要とされる設備もコンパクトに収めることができる。AWG フィルタは波長フィルタとして、特定波長の反射波を透過させ、透過光強度を直接電圧信号に変換することで、100GHz 以上の周波数応

* 原稿受付 2011 年 10 月 9 日

^{*1} 正員, 東京大学大学院情報学環 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

^{*2} 学生員, 東京大学大学院工学系研究科

^{*3} 正員, 東京大学生産技術研究所

^{*4} 正員, 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科

^{*5} 東京大学大学院工学系研究科

E-mail: knakano@iis.u-tokyo.ac.jp

答を実現させている．文献⁽²⁾では AWG フィルタによる複数の FBG センサの信号検出に成功し，文献⁽³⁾では複合材の欠陥の検出に成功した．システムの欠点は，光源自体のエネルギーレベルが低いため，光源ノイズを受けやすく，微小信号に対する十分な感度を持っていないことである．従来の解決手法には，光源の位相が揃っていないことを利用して，同じ入力に対し繰り返し計測した後信号を平均化することによって光源ノイズを除去する加算平均法がある．しかしこの方法は常に同じ計測条件が必要とされ，超音波探傷のような能動的な計測法には有効であるが，アコースティックエミッション(AE)法のような同じ信号が入力されることがない受動的な計測への適応は難しい．

一方，心理学と化学分析の分野においては，3次元主成分分析法であるパラレルファクタ解析(PARAFAC)と呼ばれる手法が提案されている⁽⁴⁾．近年，PARAFAC は脳波解析への適用も試みられており，複素ウェーブレット変換と組み合わせることにより， α , β , θ 帯域等におけた脳波の時間変化と空間分布を調べることが可能になった⁽⁵⁾．またランダム波およびスイープ波加振に対する梁の複数箇所の加速度応答より，機械振動の固有周波数，モード形状の時間変化を明確に求めることができて⁽⁶⁾．PARAFAC は時間分解能が高いことが知られ，動きのある環境下での計測に適しており，そして多チャンネル信号を一括して処理して多次元解析を行うため，ノイズ等に強く，ロバスト性も有し，条件によっては従来の分析法よりも有効な手法となる．本研究では PARAFAC を使用して，FBG センサの計測信号から有意な信号を検出し，ノイズを除去する方法を提案する．圧電素子アクチュエータから発せるパルス波の受信信号を解析対象とし，従来の加算平均法では 1000 回以上の計測を必要とした信号を，1 回だけの計測信号より検出することを目的とする．従来の方法による結果と比較することで本手法の有効性を示す．

2. 超音波計測システム

2・1 光ファイバセンサ

図 1 には FBG センサの略図を示す．センサは光ファイバのコア部に周期性を持つブラッグ回折格子を形成することで構成され，FBG での回折光の波長はブラッグ波長 λ_B と呼ばれる．回折格子の部分に広帯域の光 I_i を入射すると，波長 λ_B の狭帯域の光成分 I_r のみを反射し，残りの波長分布を持つ光 I_t がそのままファイバを通過する．そして回折格子の部分にひずみが加わるとブラッグ回折格子の屈折率と周期間隔が変化することで波長がシフトし，そのシフト量よりひずみを推定できる．

Fig.1 Schematic view of the FBG sensor.

2・2 アレイ導波路格子

FBG センサの復調装置としてアレイ導波路格子(AWG)が使われている．AWG とはシリコンまたは石英等の基板上に石英系のクラッドとコアを堆積し光導波路を堆積した平面光回路(PLC)の一種である．AWG には Port と呼ばれる複数の狭帯域バンドパスフィルタより構成され，反射光は AWG フィルタの各導波路によって波長ごとにスペクトルを透過され，その透過光強度を直接フォトディテクタによって電気信号に変換される．本研究で

は、反射波の波長を2つ中心波長が隣り合う Port の間に調節した。その様子を図2に示す。微小信号の場合ブラッグ波長のシフト量が小さく、FBG 反射光スペクトルは2つの Port のスペクトルの間で振動することが予測される。ここでFBG 反射波のスペクトルは不変であることから、ひずみによってブラッグ波長が片方の Port の中心波長側にシフトした時、その Port のスペクトルと重なる面積が増加する一方、もう片方との面積は減少する。つまり中心波長が隣り合う Port で計測した信号の位相は常に逆転していることになる。計測された信号には光源と計測機器などのノイズを多く含んでいると考えられる。光源のノイズは全 Port に位相差なく混入し、計測器に由来するものは、各 Port に独立して混入すると考えられる。これらの信号は2Port において位相は逆転していないため、位相の逆転に注目することにより、有意な信号を見つけ出すことができる。

Fig.2 Change in the spectrum between two ports; optical powers in the areas of superposition of the spectra of the ports and the spectrum of the FBG sensor are measured.

2・3 計測実験

本研究ではパルス信号の発生装置として、圧電素子 MFC(Macro Fiber Composite) アクチュエータを使用する⁽⁷⁾。計測実験の全体図を図3に、センサの設置を図4に示す。ファンクションジェネレータより入力されたパルス信号を、MFC アクチュエータによってひずみに変え、アクチュエータの上に直接接着剤で貼り付けられた2本のFBG センサで計測し、それぞれのセンサに対し中心波長が隣り合う2つの Port, 合計4つの Port を使って信号の復調を行う。本研究で使われる AWG は40の Port から構成され、中心波長の小さい順に Port の番号をつけている。本実験では、2つのFBG センサを用いるが、そのうちの1つは Port 19, 20, もう1つは Port 28, 29 を用いる。計測サンプリング周波数は5 MHz である。

Fig.3 Schematic diagram of the experimental setup.

Fig. 4 Setting of the MFC actuator and FBG sensors.

3. 手 法

3・1 パラレルファクタ分析法

パラレルファクタ分析法 (PARAFAC) とは 3 次元主成分分析法の 1 つで, 多次元データを要素ごとに多層因子に分解する方法である. ここで, 3 次元データを W で表し, その内の 1 つの要素を W_{fip} で表すことにする. さて, 3 次元データの要素 W_{fip} を式(1)に示すように 3 つの軸 a, b, c の各要素 a_f, b_b, c_p の乗算によって表すことを考える. ただし, 全ての要素に対して成立させることはできないため, 残差 ε_{fip} が生じることになる.

$$W_{fip} = a_f b_b c_p + \varepsilon_{fip} \quad (1)$$

さらに, 3 つの軸が存在する複数の層に分解することを考える. この層の番号を l とし, その層の中での軸をそれぞれ, a_{fl}, b_{bl}, c_{pl} と表し, 層の数を N とすると, 3 次元データ W は以下の式で表されることになる.

$$W_{fip} = \sum_{l=1}^N a_{fl} b_{bl} c_{pl} + \varepsilon_{fip} \quad (2)$$

多次元データ W の 1 つの要素 W_{fip} を, 式(2)に示すような N 個 (本研究では 3 つ) の軸の各要素の乗算を各層毎に求め, 全ての層を足し合わせたものであらわすことが PARAFAC 分析の目的である. PARAFAC 分析においては, 多次元データ W の各要素の残差 ε_{fip} の全ての和が最小になるように全ての層の 3 つの軸 a, b, c が求められる. 図 5 に PARAFAC 分析のイメージを示す. 3 次元行列 W を式(2)のモデルに基づいて, a, b, c という 3 つの軸に沿って複数の層に分解する. これは, モード解析をイメージするとわかりやすい. 複数のセンサによって計測を行い, それぞれの計測結果を短時間フーリエ解析や Wavelet 解析などで, スペクトグラムを作成したものを 3 次元データと考える. この時, a 軸を周波数, b 軸を時間, c 軸をセンサ取り付け位置 (空間) と表すとすると, 各層 l はモードに相当する. a_l 軸は l 次モードの周波数, b_l 軸は l 次モードの時間変化, c_l 軸は l 次モードのモード形状を表すことになる.

Fig.5 Representation of PARAFAC.

PARAFAC 解析を行う際には、適切な因子数（層の数） N を決める必要がある．因子数を増やせば残差が減少するが、多すぎると過剰に適合してしまうためである．モード解析で言えば、何次モードまで考慮するかを考えなければならないことである．本研究では Core consistency により適応した因子数を導出する方法を用いる⁽⁴⁾．それを式(3)に示す．ここで、 T_{fp} は予測された3相因子分析モデル（Tucker3）の要素を表す⁽⁸⁾．理想的な因子数で分解した場合は100%になる．要素数が少ない時は100%に近い値となるが、増えていくにつれて、ある数を境に急激に減少する．100%に近い値を取るように、因子数を選択する．

$$CoreConsistency = 1 - \frac{\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{p=1}^{N_p} (W_{ftp} - T_{ftp})^2}{\sum_{f=1}^{N_f} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{p=1}^{N_p} (T_{ftp})^2} \quad (3)$$

Tucker3 とは PARAFAC と同じく 3 次元主成分分析のもう一つの方法で、最大の違いは PARAFAC モデルの a, b, c , 3 つのテンソルにさらに回転因子 e を加えたことである．このことより PARAFAC よりも自由度が高くなるが、分解の一意性は保証されなくなってしまう．そのモデルと PARAFAC の近似性を比較することにより、層の数の妥当性を調べている．

3・2 ウェーブレット変換

PARAFAC を行う前に、各 Port の時間歴データに対しウェーブレット変換を行い、時間と各 Port データの相対位相情報を持つ 2 次元データにさらに周波数情報を加え、3 次元データに変換する．各 Port の信号データを $s(t)$ とすると、ウェーブレット変換は式(4)のように定義される．なお、 α はスケール、 β はポジションである．

$$W_{\psi}(t)(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) dt \quad (4)$$

$\Psi(t)$ はマザーウェーブレットであり、本研究では周波数を定義しやすい、式(5)に示されるような正弦、余弦波から構成される複素数 Morlet を用いる．ここで f_b は帯域幅パラメータ、 f_c は中心周波数であり、 $f_b=1.5$, $f_c=1$ とした．またマザーウェーブレットは複素数 Morlet の場合、サンプル間隔 dt の時刻歴データとすると、スケール α と周波数 f (Hz) の関係は式(6)のようになる．

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-t^2/f_b} e^{j2\pi f_c t} \quad (5)$$

$$f = \frac{f_c}{\alpha dt} \quad (6)$$

3・3 処理の流れ

複数のセンサより計測された信号に対して複素数ウェーブレット変換を行い、そのデータをまとめて、複素数の値で構成される 3 次元データ W を作成する．その実部と虚部を分けて 2 つの 3 次元データを作り、それぞれに関して PARAFAC を行う．実部を PARAFAC 分析して求めた a, b, c を ar, br, cr とし、虚部から求められたものを ai, bi, ci とすると、PARAFAC の数学モデルは以下のようなになる．ここで、 i は虚数単位を表す．

$$W_{ijk} = \sum_{l=1}^N ar_{il} br_{ll} cr_{pl} + i \sum_{l=1}^N ai_{il} bi_{ll} ci_{pl} + \varepsilon_{fip} \quad (7)$$

3・4 ノイズ除去

PARAFAC モデルにおいて、3 次元データは各因子成分の線形結合として表されることから、分離された周波数、時間、空間要素より、信号の特性と一致する因子を有意な因子として取り出し、それ以外の因子はノイズと見なし除去した後、3 次元データに復元することができる．例えば n 番目の因子が有意であり、それ以外をノイズと判断した場合、ノイズ除去された 3 次元データ W' の各成分 W'_{fip} は式(8)のように計算される．このように PARAFAC 分析した後、周波数特性、空間特性等を見て、有意な信号か、ノイズかを判断した後に、PARAFAC

分析の再構築を行うことにより、ノイズ除去を行うことができる。なお、PARAFAC 分析を行うために膨大な計算量は必要なく、本研究のデータ数においては、ストレスなくパーソナルコンピュータで計算ができる程度である。

$$W'_{fip} = ar_{in}br_{in}cr_{pn} + iai_{in}bi_{in}ci_{pn} \quad (8)$$

4. 結 果

4・1 入力信号と計測結果

入力信号として、3 周期正弦波にハミング窓をかけたものを使用する。図 6 は周波数 200kHz であるときの入力例である。図中の $\mu\epsilon$ はひずみ (10^{-6}) をあらわしている。電圧を加えることによって圧電素子 MFC に発生するひずみであり、圧電素子 MFC に加える電圧とひずみは線形比例していることから⁽⁷⁾、与えた電圧からひずみを推定した値を記載している。この時、各 Port の計測結果の波形を図 7 と図 8 に示す。図 7 は 1 回だけの入力での計測結果に対し、図 8 は加算平均法を用い、1024 回計測した後の平均値であり、(a), (b), (c), (d), はそれぞれの Port 19, 20, 28, 29 の計測結果に対応している。図 7 と図 8 より一回だけの計測ではノイズが多く、加算平均法を適応させることで、初めてノイズが取り除かれ、きれいな波形になることがわかる。また、図 8 のグラフより、各 Port (19 と 20, 28 と 29) の信号データの位相が互いに逆転していることがわかる。なお、この時のバンドパスフィルタの範囲は両方とも 100-500kHz である。

Fig.6 Input wave: (a) and (b) figures show time history and power spectral density, respectively.

Fig. 7 Time histories of signals measured one time; (a) represents result of Port 19, (b) represents result of Port 20, (c) represents result of Port 28, (d) represents result of Port 29.

Fig. 8 Time histories of averaged measured 1024 signals; (a) represents result of Port 19, (b) represents result of Port 20, (c) represents result of Port 28, (d) represents result of Port 29.

4・2 解析結果

図9から図14までは1回だけ計測した45 μ s間の時系列データをウェーブレット変換後、PARAFACによって解析した結果であり、それぞれ周波数、時間、位相要素を表す。比較のため、周波数要素の場合、絶対値が最大の値の符号を正、値を1とし、時間要素と位相要素の場合、最大絶対値を1にするように標準化して表示する。図9と図10はそれぞれウェーブレット変換後の実部と虚部より分離された周波数要素であり、 ar_i と ai_i は各因子の周波数分布を表し、添え字は因子の順番を表す。実部のピークは449, 289, 179, 128kHzに対し、虚部は446, 289, 179, 125kHzであり、図9では ar_3 、図10では ai_3 のピークが最も入力信号の周波数に近いと分かる。複素ウェーブレット変換された信号は複素数となるが、実部と虚部は正弦と余弦の関係にある。両者の特性は同じと考えられ、ピークとなる周波数も近い値であることが確認できる。図11と図12はそれぞれ実部と虚部より分離された因子の時間要素成分であり、 br_i と bi_i は各因子の時間に関する変化を表し、添え字は因子の順番を表す。図11では br_3 、図12では bi_3 の波形を見ると図8の加算平均と似たような波形を確認することができる。図13と図14は、それぞれ実部と虚部より分離された各因子の位相成分であり、 cr_p と ci_p は各因子における各Portの相対位相を表し、添え字は因子の順番を表す。図13では cr_{p3} 、図14では ci_{p3} の各Portにおける相対位相の符号は、正、負、正、負の順であり、すなわちPort 19, 20とPort 28, 29の値の符号は反転していることが分かる。この結果より、相対位相要素 cr_{p3} 、 ci_{p3} を持つ実部と虚部の3番目の因子が有意な因子として判断される。

図15は複素数ウェーブレット変換後の絶対値分布およびPARAFACによる解析結果との比較である。左段は1回のみの計測結果に対するウェーブレット変換結果であり、上のグラフから順に、Port 19, 20, 28, 29を表している。図中の明るい箇所は、強い信号が存在していることを表している。多くのノイズの分布が確認される。中段は実部と虚部の3番目の因子の周波数、時間、位相成分より復元したデータである。右段は1024回加算平均後の信号データのウェーブレット変換結果である。中段と左段の分布図では、200kHzの近くで時間軸に様な周波数分布が存在し、どのPortにおいても信号の周波数分布がよく一致することが明らかである。PARAFAC分析を通じてFBGセンサの計測信号より有意な信号を検出できることが示された。

MFCによる入力信号の大きさを変えて検討する。図6より、MFCの入力による最大振幅は58 μ eであったが、入力信号の強さを最大振幅が48, 38 μ eとなるように減少させて、同様の方法で解析を行った。図16に最大振幅が48 μ eの時の、図17に最大振幅が38 μ eの時のPARAFAC解析の結果を示す。左段が1回の計測結果、中段がPARAFACで抽出した成分、右段が1024回の加算平均後のウェーブレット変換の結果である。最大振幅が48 μ eまでであれば、提案する手法は十分な性能を持っていることがわかるが、最大振幅が38 μ eになると、200Hzの信号を検出できない時間帯も存在することがわかる。ただし、加算平均による方法においても、入力信号の検出精度は悪化している。加算平均法と比べて1回のみ計測で行っている提案手法は、既存の手法と比べて十分な有用性を持っていることがわかる。なお、実験では、FBGセンサを2つ用いることによって、提案する手法の検出精度の向上を図っている。一方、計測を繰り返して行う加算平均法は1つのセンサだけでも十分な検出性能を持つことが推測される。しかし、複数個のセンサが必要となるとしても、提案する手法は同じ信号が入力されることがない受動的な計測にも適用できることから、従来法に比べて大きな利点を有する。

5. 結 言

本研究では、圧電素子アクチュエータによるパルス波を2つFBGセンサで計測し、4つのPortより復調した信号に対しウェーブレット変換した後、PARAFACを用いて因子分離を行った。空間要素において各Portの位相符号が逆転している因子を有意な信号と見なし、再構築することによってノイズを除去した。加算平均法によるノイズ除去の結果と比べ、両方の周波数分布がよく一致していることを示した。加算平均法は、同じ入力を複数回（本研究では1024回）与える必要があるが、提案するPARAFAC分析を用いた手法では、一回の入力によって、同様のノイズ除去ができることがわかった。これにより、FBGセンサをアコースティックエミッション(AE)法のような同じ信号が入力されることがない受動的な計測にも適用できるようになることを示した。

Fig. 9 Frequency profiles of the real part; the graphs represent ar_{f1} , ar_{f2} , ar_{f3} , ar_{f4} in the descending order.

Fig. 10 Frequency profiles of the imaginary part; the graphs represent ai_{f1} , ai_{f2} , ai_{f3} , ai_{f4} in the descending order.

Fig. 11 Temporal profiles of the real part; the graphs represent br_{t1} , br_{t2} , br_{t3} , br_{t4} in the descending order.

Fig. 12 Temporal profiles of the imaginary part; the graphs represent bi_{t1} , bi_{t2} , bi_{t3} , bi_{t4} in the descending order.

Fig. 13 Phase profile of the real part; the graphs represent cr_{p1} , cr_{p2} , cr_{p3} , cr_{p4} in the descending order.

Fig. 14 Phase profile of the imaginary part; the graphs represent ci_{p1} , ci_{p2} , ci_{p3} , ci_{p4} in the descending order.

Fig. 15 Wavelet transforms of FBG sensor data; one time measurement is left, restored by PARAFAC is middle, and the average of the 1024 signals is right; max input value is 58 $\mu\epsilon$.

Fig.16 Wavelet transforms of FBG sensor data , one time measurement is left, restored by PARAFAC is middle, and after averaging 1024 time is right; max input value is 48 $\mu\epsilon$.

Fig.17 Wavelet transforms of FBG sensor data, one time measurement is left, restored by PARAFAC is middle, and after averaging 1024 time is right; max input value is 38 $\mu\epsilon$.

文 献

- (1) Xiao, G., Z., Zhao, P., Sun, F., G., Lu, Z., G., Zhang, Z., Y. and Grover, C., P., "Interrogating fiber Bragg grating sensors by thermally scanning a demultiplexer based on arrayed waveguide gratings", *Optics Letters*, Vol.29, No.19 (2004), pp.2222-2224.
- (2) Su, H. and Huang, X., G., "A novel fiber Bragg grating interrogating sensor system based on AWG demultiplexing", *Optics Communications*, Vol.275 (2007), pp.196-200.
- (3) Takeda, N., Okabe, Y., Kuwahara, J., Kojima, S. and Ogisu, T., "Development of Smart Composite Structures with Small-Diameter Fiber Bragg Grating Sensors for Damage Detection: Quantitative Evaluation of Delamination Length in CFRP Laminates Using Ultrasonic Wave Sensing", *Composites Science and Technology*, Vol.65, No.15-16 (2005), pp.2575-2587.
- (4) Bro, R., "PARAFAC. Tutorial & applications", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 38 (1997), 149-171.
- (5) Miwakeichi, F., Martinez-Montes, E., Valdes-Sosa, P., A., Nishiyama, N., Mizuhara, H. and Yamaguchi, Y., "Decomposing EEG data into space-time-frequency components using Parallel Factor Analysis", *NeuroImage*, Vol.22 (2004), pp.1035-1045.
- (6) Nakano, K., "Application of parallel factor analysis to modal analysis in mechanics", *Proceedings of Noise and Vibration: Emerging Methods 2009 Oxford UK* (2009).
- (7) Williams, R., B., Inman, D., J., Schultz, M. and Hyer, M., W., "Nonlinear Tensile and Shear Behavior of Macro Fiber Composite Actuators", *Composite Materials*, Vol. 38, No.10 (2004), pp.855-869.
- (8) Tucker, L., R., "Some mathematical notes on three-mode factor analysis", *Psychometrika*, Vol.31, No.3 (1966), pp.279-311.