

334 ウェーブレット変換による信号処理の一方法

茂田幸康[○], 早野誠治, 斎藤兆古(法政大学)

A Method of Signal Processing by Wavelet Transform

Y.Shigeta, S.Hayano, and Y.Saito

ABSTRACT

We are now exploiting a magnetic sensor, which detects magnetic materials embedded into the ground and concrete walls. Our magnetic sensor is composed of the mechanically vibrating DC magnet having the sensing coils. When there are no metallic materials in the DC vibrating magnetic field, no magnetic field distortion senses no magnetic materials. However, if there is a kind of metallic materials in the DC vibrating magnetic field, then the magnetic field distortion induces a signal at the sensing coils. Analysis of this sensor signal leads to the physical properties of the target metallic material. In the present paper, we propose a method of analysis for magnetic sensor signals. Based on the physical characteristic value such as a time constant of the electric circuit, our methodology tries to work out an equivalent characteristic value reflecting the physical property of the target metallic material. As an initial experiment, we have carried out an evaluation whether the target metallic material is a magnetic or non-magnetic material. As a result, we have succeeded in cognition of the magnetic and non-magnetic materials. Thus, second stage of our smart magnetic sensor developing is reduced into the equivalent characteristic data compression technique employing the discrete wavelet transform. Thus, this paper reports that our characteristic data may be compressed in a quite small data quantity by means of the wavelets.

Keywords: Magnetic sensor, Characteristic values, Signal analysis, Signal recognition

1. まえがき

災害や事故を未然に防ぐため、飛行機の機体、原子炉の熱交換器など、装置中の部品検査、そして橋梁やトンネルなどの建設物の機械的強度を検査するために、非破壊検査は重要な役割を持つ。すなわち、主として金属の非破壊検査は、人工的構築物の機械的信頼性を確保する決定的な方途である。

以上のような社会的必要性を鑑み、筆者らは磁気信号を用いた金属センサーを開発している。磁気センサーの長所は非接触で対象を測定できる点にある。さらには熱やほこりの影響を受けにくい点もあげられる。磁気センサーには大きく分けて2種類あり、最初は直流磁界を直接に測定する方法である。多くの場合、ホール効果が顕著な半導体素子や超電導体を用いて直流磁界は測定される。他方は交流磁界を測定するセンサーである。地球自

身が磁気を帯びているし、また、自動車や列車などは構造物として磁性体が使われ、且つ、電動機や変圧器などの磁気装置が組み込まれている。このため、磁気センサーの出力信号は必然的に周辺ノイズを含んで得られる¹⁾。

本論文では、磁気信号処理の一方法について述べる。センサーの時間領域情報の特性を双曲線関数の指数値として抽出する方法である。この指数値は初期値問題の固有値へ対応するため、本論文では等価固有値(Equivalent Characteristic Value、以下 ECVと略記)と呼ぶこととする。仮に与えられた信号が初期値問題の解として記述される関数であれば、信号を生成する系の固有値を信号から推定する逆問題の解が ECV である。ECV は、信号が双曲線関数の指数部を計算可能な最小離散化点数、3 点毎に計算可能である。系から与えられる時間領域の信号を初期値問題の解と仮定して解析することで系の性質、すなわち、系の特徴量 ECV を抽出する。

本論文では、実際に試作した磁気センサーの信号から ECV を計算し、その結果、磁性体と非磁性体の判別が可能であることを報告する。また、ECV データ量を圧縮する手段として離散値系直交ウェーブレット変換の適用性を検討する。その結果、原信号データの圧縮は、波形としての再現性が期待できる。しかし、ECV としては再現性が乏しく、このため、ECV データそのものの圧縮が有効であることを報告する。

2. 磁気センサーの信号処理

2.1 試作磁気センサー

2.1.1 動作原理

開発予定の磁気センサーは建設構造物中の金属探査を主目的としているこのため、外部に電源を必要としないか、若しくはバッテリー動作が可能であることを前提とする。

基本的な動作原理は以下の通りである。(1) 直流磁界を機械的に振動させて、装置自身は直流磁界を持つが装置周辺へ交流磁界を与える。超電導干渉素子 (SQUID) を用いて直流磁界が高感度に測定可能であるが、建設物の内部においては極めて多くの磁気ノイズが存在するため、機械的振動を利用した交流磁界法を採用する。建設物の内部では、交流磁界のノイズも存在するが、本装置では意図的に与える機械的振動周波数成分のみを検出することで交流磁界のノイズも削減可能である。(2) 近年の広汎に開発されている高性能なレアメタル系永久磁石を前提とする。すなわち、直流磁界を生成するために、電源が不要で比較的強力な磁界生成が可能な永久磁石を採用する。(3) 永久磁石の磁極近傍にセンサコイルを装着する。このセンサコイルは、永久磁石と相対的運動をしないため、機械的振動によってセンサー信号、すなわち、出力電圧は生じない。しかし、センサコイル近傍に金属が存在すれば、金属は交流磁界に曝されると渦電流を生じもとの交流磁界を乱す。渦電流が生成する磁界はセンサーの機械的振動周波数を持つ交流磁界である。この交流磁界によってセンサコイルに出力電圧が誘起する。磁界分布を乱す要因は、渦電流のみでなく、磁性体の存在にもある。本論文では、センサー信号から渦電流、または磁性体の自発磁化による磁界の乱れかを判別する方法として、ECV 法を提案する。

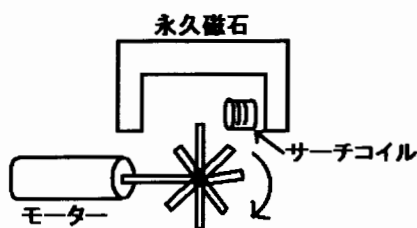


Fig. 1 Tested magnetic sensor for experimental verification.

2.1.2 試作磁気センサー

基本的な動作原理は、センサー装置と対象金属が相対運動を行えばよいから、Fig.1 に示す原理検証センサーを試作した。

2.1.3 センサー信号

Fig.1 のセンサー出力の例を Fig.2 に示す。明らかに回転運動する金属が磁性体か非磁性体かで異なる信号波形となる。この識別を計算機で自動的に行うことを可能とするため、ECV を提案する。

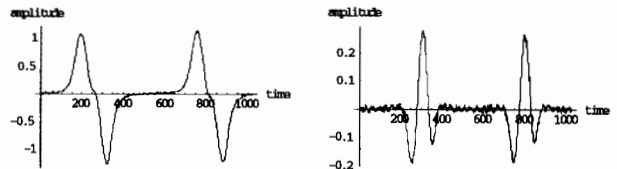


Fig. 2 Typical sensor output signals, Left: magnetic material, Right: non-magnetic material.

2.2 ECV (Equivalent Characteristic Value)

2.2.1 電気回路の ECV

電気抵抗 R とインダクタンス L が直列に接続された電気回路へ直流電圧 V が印加された場合、出力電流は Fig.3 のように時間変化する。

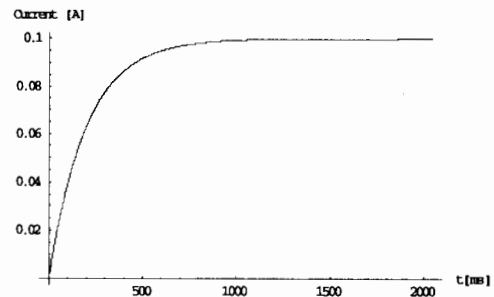


Fig. 3 Transient current of a R-L series circuit.

Fig.3 の任意の時点 $n\Delta t$ における電流 $i_{n\Delta t}$ は (1) 式で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + [i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}] e^{-\lambda\Delta t} \quad (1)$$

R-L 直列回路の等価固有値 ECV は (2) 式で与えられる。Fig.3 の波形に (2) 式を適用して得られる ECV を Fig.4 に示す。明らかに、線形なシステムから得られる ECV は一定値の実数である。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right] \quad (2)$$

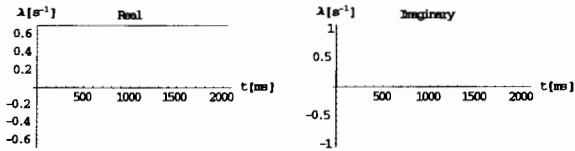


Fig. 4 Equivalent characteristic values evaluated by applying Eq. (2) to the data in Fig. 3.

2.2.2 加算平均 ECV

直流電圧の入力に対する応答から、ECV は正確に計算される。しかし、Fig.5 に示す交流入力に対する応答信号からは、Fig.6 に示すように信号の時間変化率が小さい部分でノイズが生ずる。このノイズを削減するため、Fig.7 に示すように ECV を加算平均処理する。Fig.7 から明らかなように、実数部の ECV 値は Fig.4 と同じ ECV 値へ収束する。他方、虚数部は交流入力の角周波数へ対応する ECV 値へ収束する。

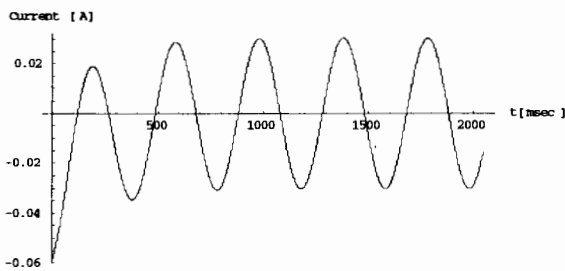


Fig. 5 Transient current of a R-L series circuit when impressing AC voltage.

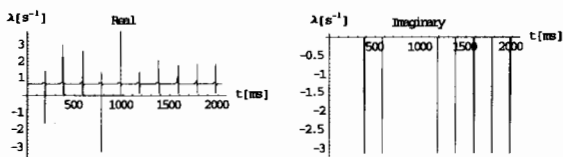


Fig. 6 ECV values evaluated from the AC response current in Fig. 5, Left: real and Right: imaginary parts.

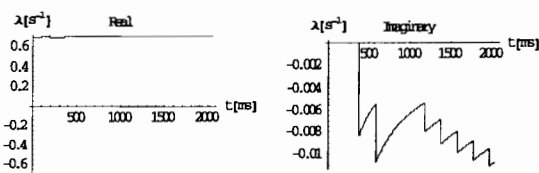
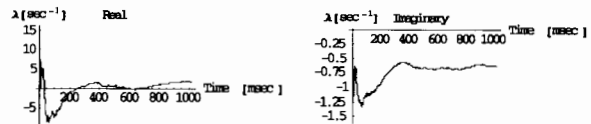
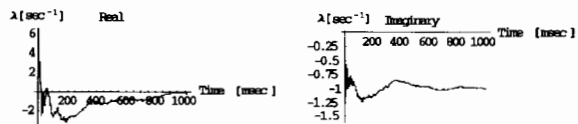


Fig. 7 Averaged ECV values evaluated from the AC response current in Fig. 5, Left: real and Right: imaginary parts

Fig. 8 は Fig.2 に示されている磁気センサ信号の加算平均 ECV 値である。明らかに、磁性体の実数部の ECV は正值を取る。他方、非磁性体のそれは正負値を交互に取りつつ、最終的にはゼロへ収束する傾向である。何れの ECV 値の虚数部は回転数に比例する角周波数で変化している。すなわち、ECV 値の実数部は磁性体の磁化を反映する。他方、ECV 値の虚数部は機械的回転数を反映する。したがって、ECV 値を用いて計算機で磁性体か否かの識別が可能となる。



Magnetic material



Non-magnetic material

Fig. 8 Averaged ECVs of the magnetic (upper) and non-magnetic (lower) materials.

2.3 ウェーブレット変換による ECV データ圧縮

磁気センサーから得られる信号は、被測定対象金属の物理的性質や形状に依存した ECV 値を取る。本論文で提案するセンサーは、あらゆる形状を持つ異種類の金属を識別することを究極の目的としている。このため、実際のフィールドテストを行う前に膨大なデータベースを構築しなければならない。現実問題として、全く同一の被測定対象金属は存在しないため、典型的な形状や物性を持つ被測定対象に対するデータベースを構築する必要性がある。この意味で、センサー信号の持つ特徴抽出へウェーブレット変換を適用する方が考えられる。しかし、個々のセンサー信号の特徴は既に ECV 値から抽出可能であることが判明している。従って、データベースは ECV を用いて構築することが望ましい。

ここでは、以下の点について検討する。(1)マザーウェーブレットスペクトラム近傍要素のみを用いる領域法で原センサー信号を圧縮した場合の再現性²⁾、(2)再現された信号から生成した ECV の再現性、(3)ECV の領域法による圧縮と再現性。Fig.9 は、Fig.2 に示されている磁性体に対する磁気センサー信号をドビッシーの 6 次基底関数を用いて 20% のデータ量へ圧縮したデータから再現

された信号波形であり、Fig.2中の原信号と0.99の相関係数を持つ。しかしながら、Fig.9から計算されるECV値では実数部、虚数部とも全く相関がとれない。すなわち、単純な原信号の圧縮は信号の固有な成分を失うことが判明した。

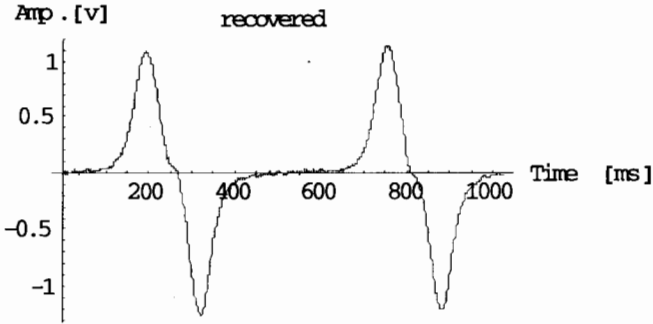


Fig.9 Recovered sensor signal from 20% compressed data by wavelets transform using the Daubechies' s 6th order base function.

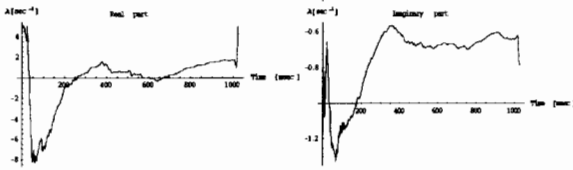


Fig.10 Recovered ECV from the 20% compressed ECV data by wavelets transform using the Daubechies' s 6th order base function.

Fig.10はFig.8に示す磁性体のECV値をドビッシーの6次基底関数を用いて20%のデータ量へ圧縮したデータから再現されたECVであり、Fig.8中の原信号と、実数部で0.98、虚数部で0.97の相関係数を持つ。すなわち、離散値系の直交ウェーブレット変換の領域法を用いて磁気信号データを圧縮する場合、抽出されたECVデータそのものへ適用する方法が理想的である。これは、ECV値が既に信号の特徴を抽出したデータであること、さらに加算平均処理が平均値を抽出していることに拠る。

3. まとめ

本論文では、建築物内の金属を非破壊的に探査する磁気センサーの提案を行った。すなわち、振動型磁気センサーの提案と原理検証である。

その結果、本磁気センサーは意図した原理で動作することが確認され、続いて、センサーの出力信号から被測定対象固有の情報を抽出するECV法を提案した。

ECVは、金属材料中の磁性材料と非磁性材料を計算機で識別可能な情報を提供することが確認された。

広汎な非測定対象を識別するには、典型的な測定対象のデータベースを構築する必要がある。この要求を現実的に満足させる方途として、離散値系直交ウェーブレット変換の領域法によるデータ圧縮を試みた。その結果、ECV値は、値そのものが信号の特徴を抽出した結果であるため、効果的に圧縮が可能であることが判明した。

参考文献

- 1) 河内、早野、齋藤、國井 “磁気センサー出力信号処理の一方法”、電気学会マグネチックス研究会資料、MAG-99-140、5-8 (1999年11月)
- 2) 齋藤兆古 著、ウェーブレット変換の基礎と応用 (朝倉書店、1998年4月)