

磁気センサー信号処理に関する考察

茂田 幸康 早野 誠治 斎藤 兆古
法政大学工学部電気電子工学科

多くの磁気センサー信号は時系列の1次元データとして得られる。他方、磁気センサーを移動することにより磁気センサー信号の空間分布も知ることが可能である。本報告で提案する磁気センサー信号処理とは、時系列信号特性としてのみならず、磁気センサー信号の空間分布特性を前提とする1連の信号処理方法に関するものである。周知のように磁気センサー信号は、磁界入力に対する被測定対象の応答信号であり、この応答信号は被測定対象の磁化特性、導電率、形状などの物理情報を反映したものである。したがって、磁気センサーの出力信号から被測定対象の物理情報を分離すれば、被測定対象の物理情報が得られることとなる。このように磁気センサー信号から物理情報を計算機で自動的に抽出する信号処理が本研究の究極の目的である。本報告では、このような信号処理方法開発の予備実験として、時系列1次元信号から被測定対象固有の特性抽出法について吟味する。より具体的には、馬蹄形磁石のNS磁極間を被測定対象が一定速度通過する場合、サーチコイルに誘起する電圧波形から被測定対象が磁性体か否か、形状などを計算機で判定する方法について吟味する。

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、地中やコンクリートに埋まった金属を検知する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。この事は熱やほこりの影響を受けにくい事を意味する。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。

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。この難点を克服するために本論文では、磁気信号処理の1方法について述べる。センサーの時間領域情報の特性および空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。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。そして ECV 値を用いて固有パターンを生成し、最小二乗法により波形の認識を試みる。その結果、比較的良好な結果が得られたので、ここに報告する。

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。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。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。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。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。

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、図1に示す原理検証センサーを試作した。

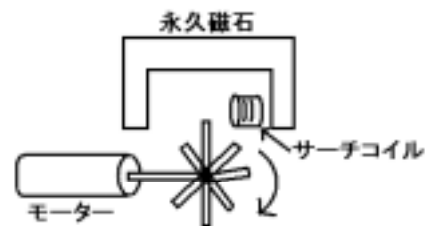


図1. 実験装置

2.1.2 センサー信号

図1のセンサー出力の例を図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。

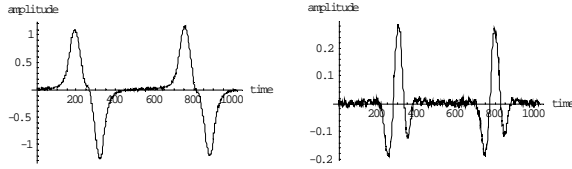


図2 . センサーからの出力信号
右：磁性体 左：非磁性体

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、出力電流は図3のように時間変化する

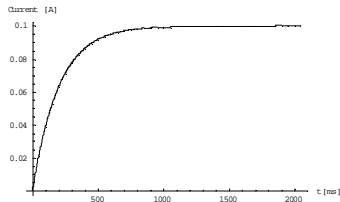


図3 . R-L 直列回路の過渡電流

図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。図3の波形に(2)式を適用して得られる ECV を図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。

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

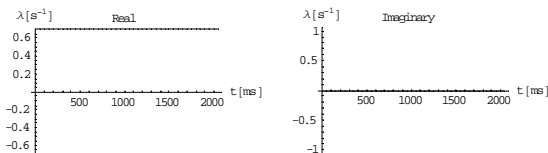


図4 . 図3の電流の ECV
左：実数部 右：虚数部

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、図5に示す交流入力に対する応答信号からは、図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。

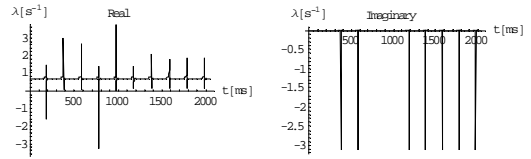


図6. 図5の電流における ECV
左：実数部 右：虚数部

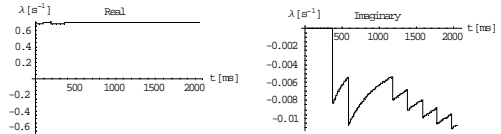
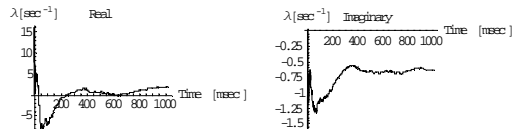
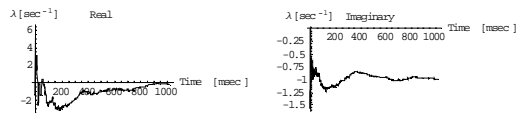


図7 . 図5の電流における加算平均 ECV
左：実数部 右：虚数部

図8は図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、磁性体に起因するセンサー信号の実数部の 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。



磁性体



非磁性体

図8 . 磁気信号の加算平均 ECV
上：磁性体 下：非磁性体

2.3. 時間領域信号の識別

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がある。本論文では、センサー信号識別の第1段階として、データベースを構成する個々のセンサー信号が識別可能かを吟味する。

2.3.1 固有パターン

磁気センサーからの出力信号にはノイズや金属の種類、ターゲットからの距離など様々な信号が含まれている。そこで金属固有の特徴を抽出するために固有パターン法を提案する。

固有パターンは ECV 値の実数部分と虚数部分で修正リサージュ図形を作成する。この修正リサージュ図形は、従来のリサージュ図形と異なり、同一座標値を取る軌跡に対してヒストグラムの加算を行うため、固有パターンと呼ぶ。

図 9 にデータベースとなる時間領域波形の例を示す。最初の 2 個は磁性体を回転させた場合で、残りの 2 個は非磁性体を回転させた場合の波形である。図 9 の時間領域波形のそれぞれについて固有パターンを生成し図 10 に示す。

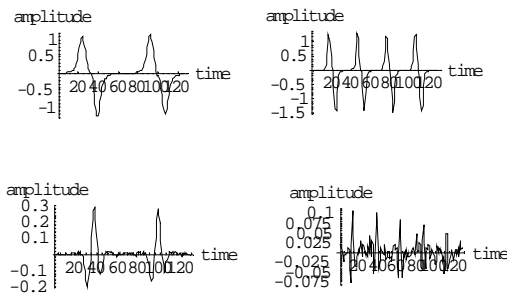


図 9 . 時間領域信号

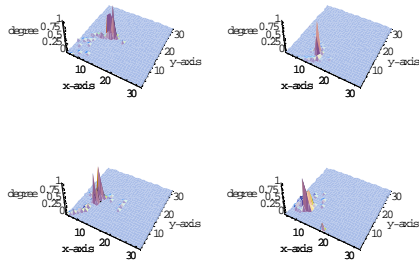


図 10 . 時間領域信号の固有パターン

2.3.2. システム方程式

図 10 に示す固有パターンは、それぞれ 32×32 画素からなるため、1次元配列に並べ替えると、 $32 \times 32 = 1024$ 次のベクトルとなる。このようにして得られる n 個の固有パターンベクトル $\mathbf{c}_i, i=1,2,\dots,n$ を使って、(3)式から n 行 32×32 列の長方システム行列 C が構成できる。

$$C = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n] \quad (3)$$

いま、任意のセンサー信号の固有パターンを 1次元配列へ並べ替えて得られる入力ベクトルを \mathbf{Y} とすれば、解くべき線形システム方程式は (4) 式で与えられる。

$$\mathbf{Y} = C \mathbf{X} \quad (4)$$

(4) 式で解ベクトル \mathbf{X} の要素を

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \quad (5)$$

とすれば、最大値を取る要素が識別された信号となる。

2.3.3. 最小二乗解

(3)式のシステム方程式は n 個の未知数に対し、 8×8 個の式の数であり、 $32 \times 32 > n$ とすれば、全ての式を同時に満足する解は特別な場合を除いて存在しない。このため、誤差ベクトルのノルム

$$\varepsilon = \|\mathbf{Y} - C\mathbf{X}\| \quad (6)$$

を最小にする解ベクトル、すなわち、最小自乗法による解ベクトルを (7) 式から計算する。

$$\mathbf{X} = (C^T C)^{-1} C^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

ここではターゲット金属の材質、センサーからの距離の異なる 36 個の時間領域信号を用いて磁気センサーからの出力信号に対する固有パターンを生成してデータベースを構築し、(5)式の解ベクトルを計算した。その結果、システム行列生成に採用した原信号を入力とした場合、全てを完全に認識できた。図 11 に解ベクトルの一例を示す。データベースの中の 17 番目に入ったデータの識別を試みた。結果、最大値 1 を取る要素が認識され、正解となった。

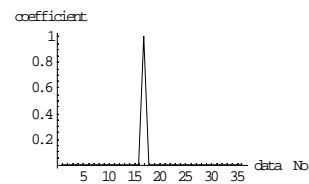


図 11. 解ベクトルの一例データベースより 17 番目の要素を識別

2.4. 空間領域信号の ECV

2.4.1. 空間領域信号の測定

図 12 に示す励磁コイルに交流電流を流し、交流磁界を作る。その上にサーチコイルを配置し、交流磁界を検出する。サーチコイルを 0.5cm 間隔でスライドさせ 33 点測定した。Table1 に励磁コイルとサーチコイルの直径を示す。

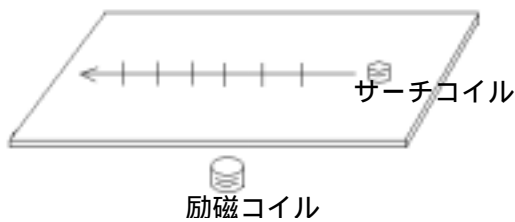


図 12. 空間領域信号測定の実験装置

Table1 コイルの直径

	サーチコイル	励磁コイル
直径	1.0 cm	1.0, 1.3, 1.5, 2.0 cm

サーチコイルと励磁コイルの間隔と、励磁コイルの大きさを変えて、84 個の空間領域信号を測定した。それぞれ時間領域信号の場合と同様に ECV を計算し、固有パターンを生成した。その一例を図 12 に示す。

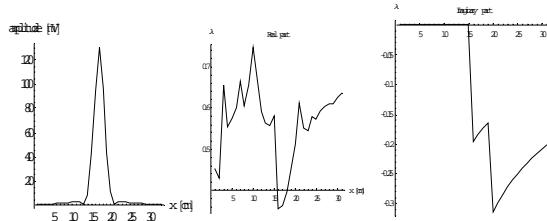


図 12 空間領域信号(左)、ECV の実数部 (中央)、 ECV の虚数部 (右)

2.4.2. 空間領域信号の識別

84 個の固有パターンでデータベースを構築し、識別を行った結果、全ての正確に識別することに成功した。ここでは解ベクトルの一例を図 13 に示す。

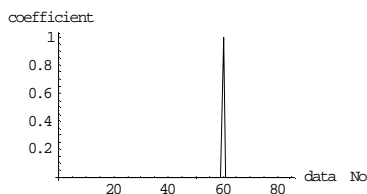


図 14.空間領域信号の識別
84 のデータベースより
60 番目の要素を識別

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、さらに、センサーの出力信号から被測定対象固有の情報抽出する 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。そこで、データベースを構成する信号が個々に識別可能とするために固有パターンを提案した。データベース中の個々の信号を識別する方法として、最小自乗法を適用した。その結果、固有パターン法は信号認識問題へ極めて強力な方法であることを示した。この方法は空間領域信号にも適用ができた。このようにして、我々は磁気センサー信号処理の決定的な方法を確立することに成功した。

参考文献

- [1] 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古, "磁気センサー出力信号処理の一例", 第 28 回可視化情報シンポジウム講演論文, 2000 年 7 月
- [2] 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古, "磁気センサー信号処理-概念と一例-", 電気学会マグネチクス研究会資料, MAG-00 - 116, 2000 年 6 月

キーワード.

磁気センサー、固有値、信号解析、信号認識

Summary.

A study of magnetic sensor signal analysis

Yukiyasu Shigeta Seiji Hayano Yoshifuru Saito
Department of Electrical and Electronic Engineering, Hosei University

We are now exploiting a magnetic sensor, which detects metallic 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 the 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 to recognize a datum from the signal database. Furthermore, this method is applied to the space domain signal recognition.

As a result, this paper reports that the equivalent characteristic value extracted from our sensor signal is a useful quantity in order to examine the physical nature of the target.

Keywords.

Magnetic Sensor, Characteristic Values, Signal Analysis, Signal Recognition