

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)

A study of magnetic sensor signal analysis

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

ABSTRACT

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 circuits, we try 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 cognition.

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

キーワード: 磁気センサー、固有値、信号解析、信号認識

(Magnetic sensor, Characteristic values, Signal analysis, Signal cognition)

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、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中の金属を探知する磁気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測定できる点にある。これは熱やほこりの影響を受けないことを意味する。

磁気センサーには大きく分けて2種類あり、第1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が測定される。第2は交流磁界を測定するセンサーである。

磁気センサーの問題点はセンサー信号に含有されるノイズにある。地球自身が磁気を帯びている。また、自動車や列車などは構造材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。この問題点を克服するために本論文では、磁気センサー信号の一処理方法を提案する。具体的にはセンサーの時間領域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 点毎に計算される。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。さらに、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

開発中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は交流磁界を与える。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。さらに、近年、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、電源が不必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ーコイルを装着する。このセンサーコイルは、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、センサー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ー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か、あるい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 法を採用する。

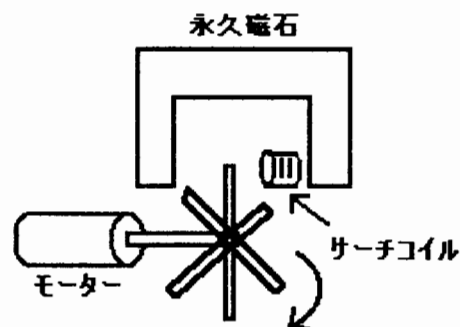


図1. 実験装置

2.1.2 試作磁気センサー

基本的な動作原理は、センサー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。

2.1.3 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 を定義する。

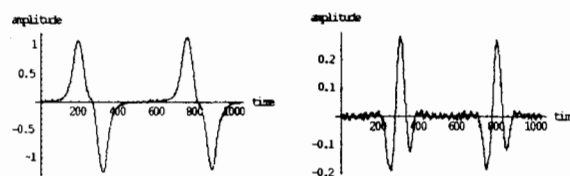


図2. センサーからの出力信号
右：磁性体 左：非磁性体

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、周知のように、出力電流は図3のように時間変化する。

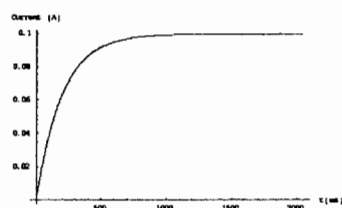


図3. R-L 直列回路の過渡電流

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。

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

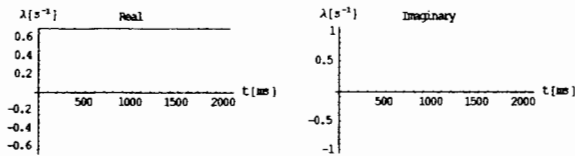


図4. 図3の電流の ECV
左: 実数部 右: 虚数部

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、(2)式の数値計算の数値誤差に起因してノイズが生ずる。

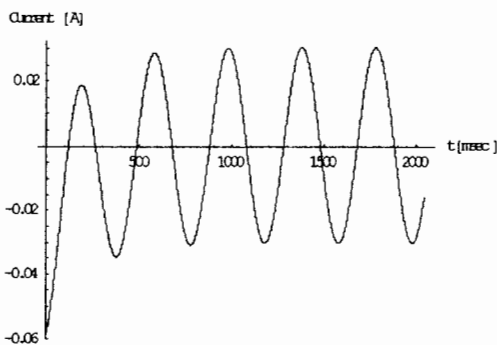


図5. 交流電圧を R-L 直列回路に印加した場合の過渡電流

このノイズを削減するため、図7に示すように ECVを加算平均処理する。図7から明らかなように、実数部の ECV値は図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。

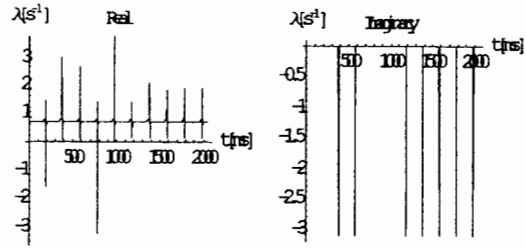


図6. 図5の電流における ECV
左: 実数部 右: 虚数部

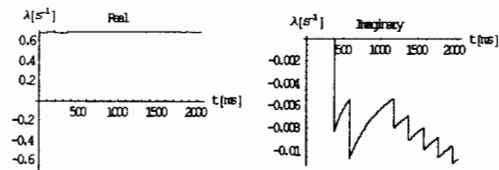
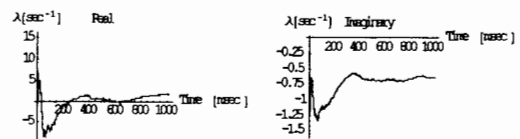
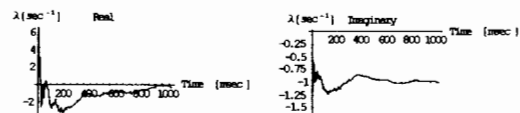


図7. 図5の電流に対する加算平均 ECV
左: 実数部 右: 虚数部

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へ収束する。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。



(a)磁性体



(b)非磁性体

図8. 磁気信号の加算平均 ECV

(a)磁性体 (b)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性がある。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

磁気センサーの出力信号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情報を含んでいる。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、修正リサージュ図形を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波形は磁性体を回転させた場合で、残りの2波形は非磁性体を回転させた場合のセンサー信号である。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。

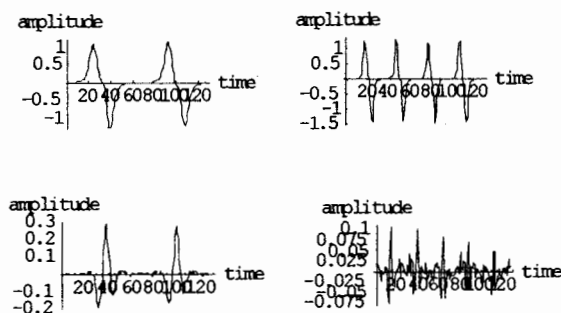


図9. 時間領域信号

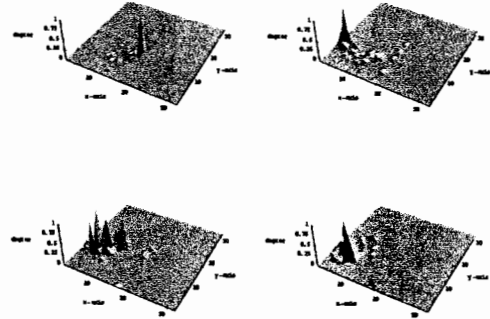


図10. 時間領域信号の固有パターン

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 $c_i, i=1,2,\dots,n$ 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。

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (3)$$

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 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。

$$Y = CX \quad (4)$$

(4)式で解ベクトル X の要素を

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

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、 32×32 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

$$\varepsilon = \|Y - CX\| \quad (6)$$

を最小にする解ベクトル、すなわち、最小二乗法による

解ベクトルを (7) 式から計算する。

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

ここではターゲット金属の材質、センサーからの距離が異なる 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第 17 番目に入ったデータの識別を試みた。その結果、最大値 1 を取る要素が第 17 番目となり、正しく認識された。

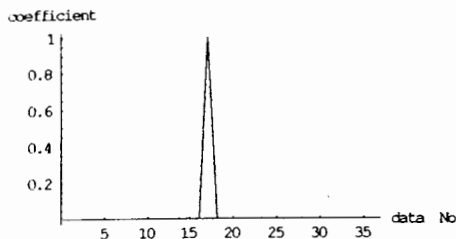


図 11. 解ベクトルの一例
データベースより
第 17 番目の要素を識別

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通電し、交流磁界を生成する。励磁コイル上方へ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 間隔で移動し 33 点測定した。Table 1 に励磁コイルとサーチコイルの諸定数を示す。

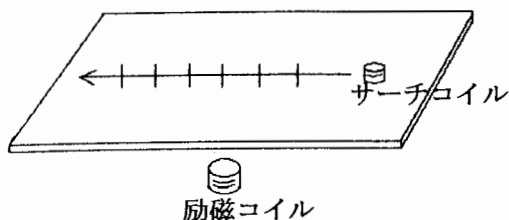


図 12. 空間領域信号測定の実験装置

Table 1 サーチ・励磁コイルの直径

	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間の距離と、励磁コイルを変更して、84 個の空間領域信号を測定した。それぞれ、時間領域信号と同様に空間領域の 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。

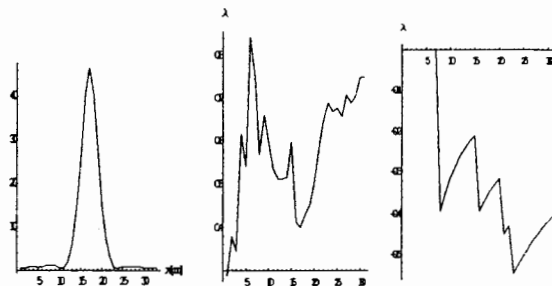


図 12 空間領域信号(左)、
ECV の実数部 (中央)、 ECV の虚数部 (右)

2.4.2 空間領域信号の識別

84 個の固有パターンを用いて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。解ベクトルの一例を図 13 に示す。

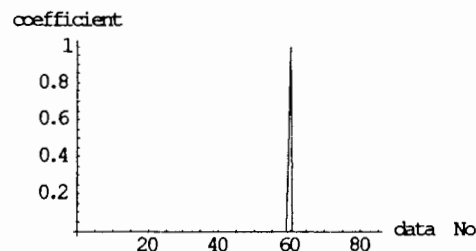


図 13. 空間領域信号の識別
84 個のデータベースより
60 番目の要素を識別

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と初期実験結果について述べた。すなわち、振動型磁気センサーの提案と原理検証である。

振動型磁気センサーの動作原理を検証し、さらに、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ために ECV 法を適用した。

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を個々に識別可能とするため、時間・空間位相の差異を削減する固有パターンを提案した。さらにデータベース中の個々の信号を識別する方法として、最小二乗法を適用した。その結果、固有パターンは信号認識問題へ極めて強力なツールであることを時間・空間領域信号を用いて検証した。

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”、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-99-140 (1999 年 11 月)。
- 2) 茂田、早野、齋藤 “ウェーブレット変換による信号処理の一方法”、第 28 回可視化情報シンポジウム講演論文集 (2000 年 7 月)。
- 3) 茂田、早野、齋藤、“磁気センサー信号処理-概念と一例-”、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-00-116 (2000 年 6 月)。

原稿受付日

平成 12 年 10 月 17 日