

磁気センサーの解析手法について

妹尾勇*, 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古(法政大学)

Methods of analysis for magnetic sensor

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

ABSTRACT

We are now exploiting a magnetic sensor. In the present paper, we propose two methods of analysis for the magnetic sensor signals.

First method is as follows. We apply the image cognition technology of the human voice to the cognition of magnetic sensor signals. At first, the time domain signals are converted into the three-dimensional monochrome images, which construct the signal database system. Secondly, when we measure a time domain signal, this signal is also converted into the three-dimensional image. This three-dimensional image becomes an input vector of a least square system. Least squares solution gives a composite signal as a linearly combined database signals. Extracting the most dominant term from the least squares solution reveals the cognized signal. The second method is based on the physical characteristic value such as a time constant of the electric circuits. This second method 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. Furthermore, this method is applied to the space domain signal recognition.

Thus, we have succeeded in the time as well as space domains magnetic sensor signal cognition.

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 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。

本論文は、従来1次元信号から系の状態を反映する情報を熟練技術者の経験に基づき抽出せざるを得なかった信号診断を完全に自動化するシステム開発を究極の目的とする知的信号処理方法の基幹技術について述べる。

具体的には、時間軸、若しくは空間軸に沿って測定された1次元信号を

- 1) 3次元リサーチ法、
 - 2) 等価固有値を用いた固有パターン法、
- によって2次元可視化信号へ変換し、画像認識的手法を用いて、信号認識を行う。

検証用に用いる信号は、

- 1) 差動コイル型磁気センサー信号、
- 2) 振動型金属センサー信号、
- 3) 1次元空間軸信号、

である。

検証例題を通して、

- 1) 3次元リサーチ法は、信号が不連続であっても適用可能な反面、ある程度の誤差を許容せざるを得ない、
- 2) 等価固有値を用いた固有パターン法は、信号が物理系の固有な情報を含む連続量であることを必要とす

るが、与える結果は全て厳密にデータベースと一致する。現実的には、電子・電気回路の電流は、連続量として観測可能であることから、3次元リサーチ法と等価固有値を用いた固有パターン法を併用して診断する事で、大部分の知的可視化信号処理は可能と考えられる。

2. 三次元リサーチ法

2.1 実験装置

図2.1は、本論文で採用した差動磁気センサーの概略図を示す。中心部に位置するコイルが励磁コイルであり、両端がサーチコイルである。中心部に位置する励磁コイルに交流電流を通電し、被測定対象物（ターゲット金属）の影響による磁界の差異を左右のサーチコイルに誘起する差動電圧によって感知する。

尚、励磁コイルは直径 0.8mm のホルマル線を 100 回巻、両端のセンサーコイルは直径 0.4mm のホルマル線を 60 回巻で作成した。

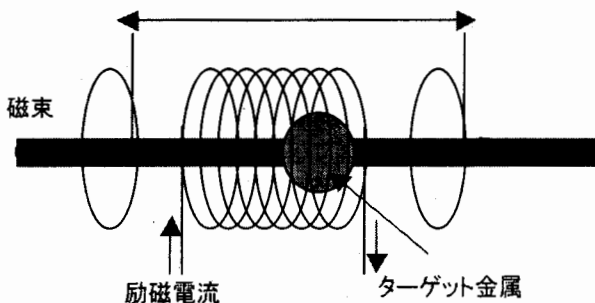


図2.1 実験装置の原理

2.2 入力波形と出力波形

励磁コイルには電流測定のため、抵抗 1Ω を直列接続した。印加電圧は 50 kHz 最大振幅 1V の正弦波である。図 2.2 に入力電圧波形を示す。図 2.3 にアルミ球が左端のセンサーコイルからそれぞれ $3, 5, 7\text{cm}$ の位置における差動センサーコイルの出力信号波形を示す。(c) はターゲットが励磁コイルの中央部に位置し、ターゲットが存在しない場合の差動コイル出力電圧波形に対応し、明らかに周辺ノイズである。

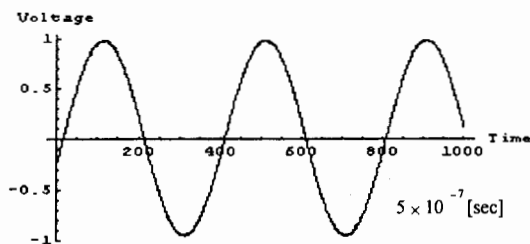
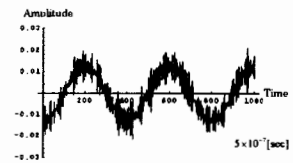


図 2.2 入力波形



(a)左端から 3 cm



(b)左端から 5 cm



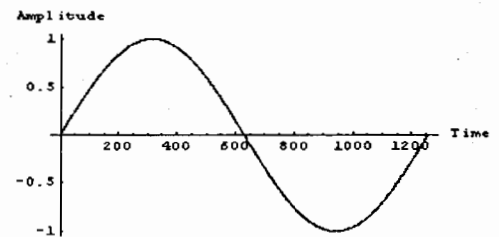
(c)中央部 (左端から 7 cm)

図 2.3 アルミ球の位置とセンサー出力波形

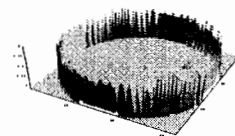
2.3 3次元リサーチ図の生成

センサー信号の時間位相を削除するため、センサー信号とその微分若しくは積分した 90 度時間位相の異なる信号間のリサーチ図を生成する。但し、通常のリサーチ図では、軌跡が重なる部分を勘案しない。しかし、本論文では、リサーチ図の軌跡が重なる情報をヒストグラムとして勘案する 3次元リサーチ図を生成する。

リサーチ図を生成するには、原時系列信号以外に時間位相が 90 度異なる時系列信号が必要である。時間位相が 90 度異なる信号は 2 種類生成可能である。



(a)正弦波 (原信号)

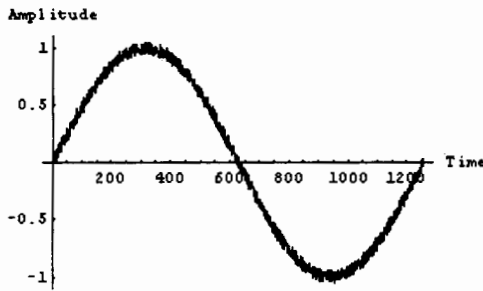


(b)積分型

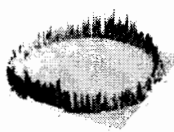


(c)微分型

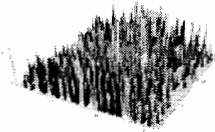
図 2.4 信号波形と 3次元リサーチ図



(a)ノイズを含んだ正弦波 (原信号)



(b)積分型



(c)微分型

図 2.5 ノイズが重畳した信号波形と 3 次元リサージュ図

一方は時間位相が 90 度進んだ信号であり、原信号を時間軸方向へ積分することで得られる。他方は時間位相が 90 度遅れた信号であり、原信号を時間軸方向へ微分することで得られる。

図 2.4 はノイズのない正弦波、そして積分型と微分型、それぞれの方法で生成した 3 次元リサージュ図である。図 2.5 は、一様乱数で生成した図 2.4 に示す正弦波の 5% 振幅を持つノイズを図 2.4 の正弦波へ重畳した波形、および、積分型、微分型による 3 次元リサージュ図である。明らかに、微分型はノイズを拡大するのに対し、積分型はノイズを削減し、図 2.4 に示す 3 次元リサージュ図をほぼ再現している。一般に微分演算はノイズ若しくは個体差情報を拡大するため、本論文では原信号を時間積分して、原信号よりも 90 度位相の進んだ信号を生成して、3 次元リサージュ図を生成する。

2.4 磁気センサー信号の認識

2.4.1 システム方程式

3 次元リサージュ図を映像情報と見なせば、3 次元リサージュ図は、それぞれ 64x64 画素からなるため、1 次元配列に並べ替えると、64x64 次のベクトルとなる。このようにして得られる n 個の 3 次元リサージュベクトル $\mathbf{c}_i, i=1,2,\dots,n$ を使って、(1) 式の n 行 64x64 列の長方形システム行列 C を構成する。

$$C = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n] \quad (1)$$

いま、任意の出力信号の 3 次元リサージュ図を 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、システム方程式は (2) 式で与えられる。

$$\mathbf{Y} = C\mathbf{X} \quad (2)$$

(2) 式で解ベクトル \mathbf{X} の要素を

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n] \quad (3)$$

とすれば、最大値を取る要素が認識された出力信号とする。

2.4.2 最小自乗解

リサージュ図を構成するデータを並べ直して(2)式の入力ベクトル \mathbf{X} を作成し、(4)式の誤差ノルムを最小化する解ベクトルを(5)式を用いて計算する。すなわち、(2)式のシステム方程式は n 個の未知数に対し、64X64 個の式の数であり、64X64 > 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

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

を最小にする解ベクトル、すなわち、(2) 式の近似解を最小自乗法 (5) 式で得る。

$$\mathbf{X} = (C^T C)^{-1} C^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

直径 20mm のアルミ球、直径 20mm の鉄球、直径 12mm の鉄球の位置を 5mm 間隔で位置を変更して 28 点のセンサー信号出力を測定した。しかし、センサーの中心から左右において対称になる為、では中心から左側の部分 14 点について吟味する。従って、全体として 14 個のデータベースを構築した。よって、(2) 式のシステム行列 C は 64x64 行 14 列の長方形行列となる。

2.5 識別

図 2.3 に示すセンサー出力波形は、センサー周辺の電磁環境で異なるため、同一ターゲット位置に対して 4 回測定し、信号認識に対する再現性を検討した。図 2.6 が結果である。図 2.6 で、対角線上に位置すれば正確に認識された事を意味する。位置 2 から 7 で認識精度が低下する事が判る。これは、図 2.1 に示す励磁コイル端部から中心部の位置であり、この種の差動コイル型センサー

では、センサーコイル近傍にターゲット金属が位置する場合にセンサーコイルに鎖交する磁束が乱されるためである。信号中に含有される情報量の低下は認識精度の低下となる。

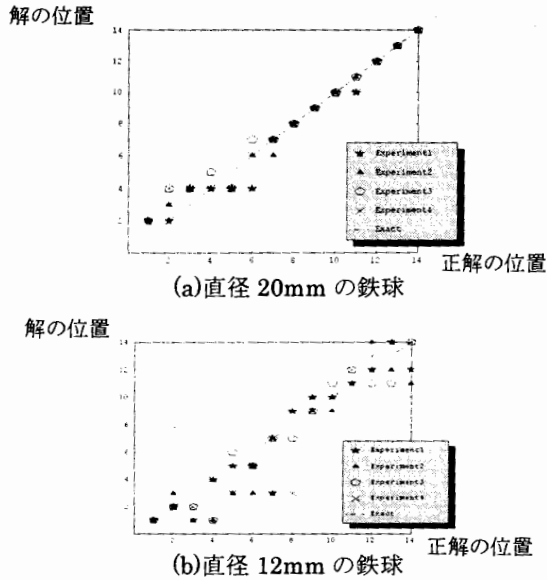


図 2.6 解の分布図

3. 等価固有値による固有パターン法

3.1 試作磁気センサー

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。本論文では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ーコイルを装着する。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。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。

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 3.1 に示す原理検証センサーを試作した

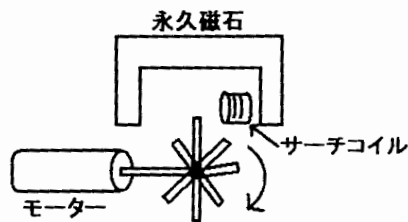


図 3.1 実験装置

3.2 センサー信号

図 3.1 のセンサー出力の例を図 3.2 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ため、等価固有値 ECV(Equivalent Characteristic Value)を提案する。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。

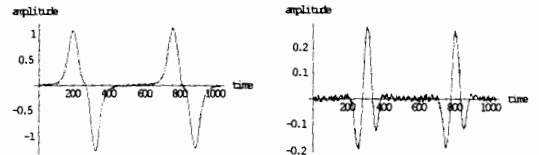


図 3.2 センサーからの出力信号
右: 磁性体 左: 非磁性体

3.3 ECV (Equivalent Characteristic Value)

3.3.1 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 3.3 のように時間変化する。

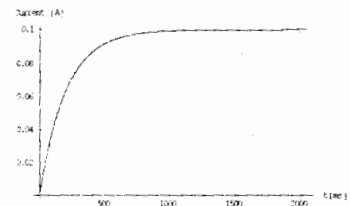


図 3.3 R-L 直列回路の過渡電流

図 3.3 の任意の時点 $n\Delta t$ における電流 $i_{n\Delta t}$ は (6) 式で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + [i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}] e^{-\lambda \Delta t} \quad (6)$$

R-L 直列回路の等価固有値 ECV は (7) 式で与えられる。図 3.3 の波形に (7) 式を適用して得られる ECV を図 3 に示す。明らかに、線形なシステムから得られる EC は一定値の実数である。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right] \quad (7)$$

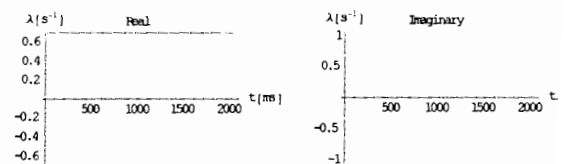


図 3.4 図 3.3 の電流の ECV
左: 実数部 右: 虚数部

3.3.2 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 3.6 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。

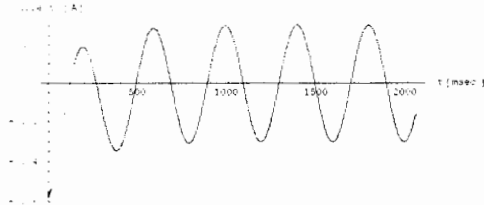


図 3.5 交流電圧を R-L 直列回路に印加したときの過渡電流

このノイズを削減するため、図 3.7 に示すように ECV を加算平均処理する。図 3.7 から明らかなように、実数部の ECV 値は図 3.4 と同じ ECV 値へ収束する。他方、虚数部は交流入力角周波数へ対応する ECV 値へ収束する。

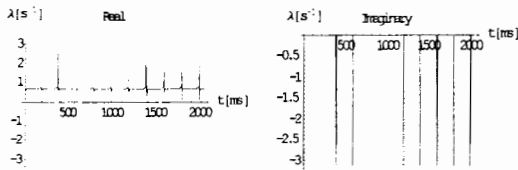


図 3.6 図 3.5 の電流における ECV
左:実数部 右:虚数部

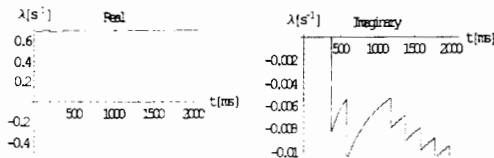


図 3.7 図 3.5 の電流における加算平均 ECV
左:実数部 右:虚数部

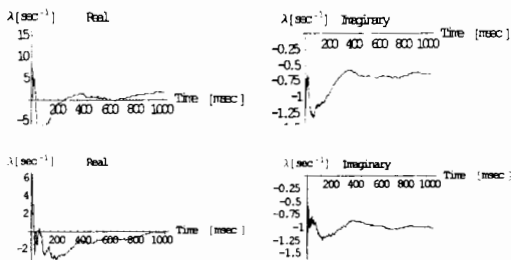


図 3.8 磁気信号の加算平均 ECV
上:磁性体 下:非磁性体

図 3.8 は図 3.2 に示されているセンサ信号の加算平均 ECV である。明らかに、磁性体に起因するセンサ信号

の実数部の ECV は正值を取る。他方、非磁性体のそれは、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。つまり 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。よって、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。

3.4 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。

3.4.1 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。

時間領域波形について固有パターンを生成した一例を図 3.9 に示す。

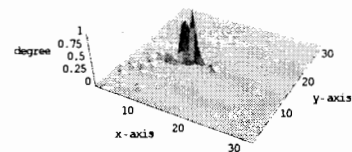


図 3.9 時間領域信号の固有パターン

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、最小自乗法を用いて識別し、全てを完全に認識できた。図 3.10 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。その結果、最大値 1 を取る要素が認識され、正解となった。

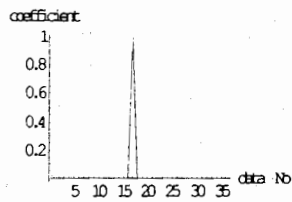


図 3.10 解ベクトルの一例

データベースより 17 番目の要素を識別

3.5 空間領域信号の ECV

3.5.1 空間領域信号の測定

図 3.11 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。

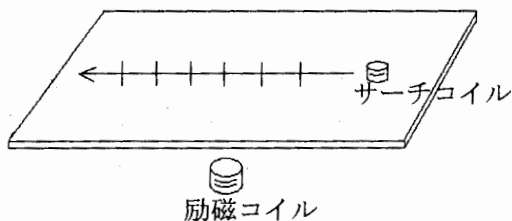


図 3.11 空間領域信号測定の実験装置

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 3.12 に示す。

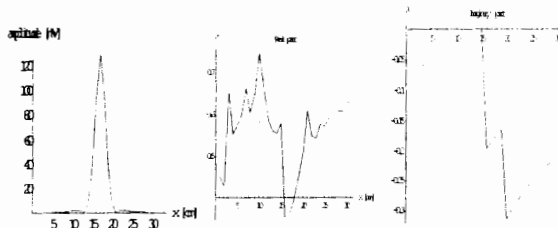


図 3.12 空間領域信号(左)、
ECV の実数部 (中央)、 ECV の虚数部 (右)

3.5.2 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 3.13 に示す。

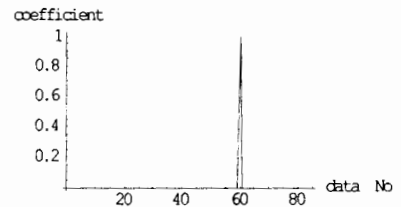


図 3.13 空間領域信号の識別 84 のデータベースより 60 番目の要素を識別

4. まとめ

本論文は、従来 1 次元信号から系の状態を反映する情報を熟練技術者の経験に基づき抽出せざるを得なかった信号診断を完全に自動化するシステム開発を究極の目的とする知的信号処理方法の基幹技術について述べた。

検証例題を通して、3 次元リサージュ法は、信号が不連続であっても適用可能な反面、ある程度の誤差を許容せざるを得ない事と、等価固有値を用いた固有パターン法は、信号が物理系の固有な情報を含有する連続量であることを必要とするが、与える結果は全て厳密にデータベースと一致する事を述べた。

現実的には、電子・電気回路の電流は、連続量として観測可能であることから、3 次元リサージュ法と等価固有値を用いた固有パターン法を併用して診断する事で、大部分の自動信号処理は可能と考えられる。

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。
- 4) 妹尾 勇、早野 誠治、齋藤 兆古、「ウェーブレット画像処理法による音声認識」、可視化情報学会研究資料、P1-008、2000 年 7 月。

原稿受付日

平成 13 年 2 月 28 日