

磁気センサー信号処理と認識

HAYANO, Seiji / SAITO, Yoshifuru / 斎藤, 兆古 / 早野, 誠
治 / SENOO, Isamu / 妹尾, 勇

(出版者 / Publisher)

法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science
Research Center, Hosei University

(巻 / Volume)

14

(開始ページ / Start Page)

97

(終了ページ / End Page)

102

(発行年 / Year)

2001-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00024923>

磁気センサー信号処理と認識

妹尾 勇, 早野 誠治, 斎藤 兆古
法政大学工学部電気電子工学科

本論文では、磁界入力に対する応答信号が被測定対象の磁化特性、導電率、位置、形状などの多くの情報を含有している点に着目し、磁気センサー信号を可視化し、画像認識的手法を用いて被測定対象の位置情報識別可能性に関して検討する。より具体的には、時系列の磁気センサー信号から3次元リサーチ図を作成し、1次元時系列信号を3次元画像へ変換する。本論文は、このようにして得られた3次元画像へ画像認識手法を適用し、被測定対象の位置推定に関する結果を報告する。

1. はじめに

近年、情報処理・通信などアナログからデジタルに移行するに伴い、センサーにおいてもアナログ処理からデジタル処理に変わりつつある。これまでのセンサーには様々なものが存在するが、大部分のセンサー信号処理は、センサー信号を直接評価するか、特定の周波数成分を取り出し評価する形式で行われる。

この中で、磁気センサーは、非接触でセンシング対象の渦電流や、磁化ベクトルを検知可能であることから、主として非破壊検査に広汎に利用されている。従来、磁気センサー信号処理は主として応答信号の有無、波形、振幅情報を熟練技術者が評価する方式でなされる。

本論文では、磁界入力に対する応答信号が被測定対象の磁化特性、導電率、位置、形状などの多くの情報を含有している点に着目し、磁気センサー信号を可視化し、画像認識的手法を用いて被測定対象の位置情報識別可能性に関して検討する。より具体的には、時系列の磁気センサー信号から3次元リサーチ図を作成し、1次元時系列信号を3次元画像へ変換する。本論文は、このようにして得られた3次元画像へ画像認識手法を適用し、被測定対象の位置推定に関する結果を報告する。

具体的には、まず、最初に、いかなる条件下においても被測定対象物の持つ共通な特性を抽出する方法として、サーチコイルに誘起する電圧信号から3次元リサーチ図を生成する。磁気信号は、被測定対象物の位置情報がセンサー信号の振幅情報に含まれることに着目し、リサーチ図の半径に位置情報を包含する。従来のリサーチ図法は磁気信号の時間依存性を削除するが、同一軌跡を描く線分の重複度を勘案しない。本論文で採用する3次元リサーチ図法は、同一軌跡を描く線分の重複度をリサーチ図形の高さで勘案する。さらに、3次元リサーチ図の生成法を微分型と積分型の2種類提案し、良好な信号認識性を有する3次元リサーチ図の生成について吟味する。

つぎに、3次元リサーチ図法の具体的応用例として、差動コイル型磁気センサーの信号認識問題を取り上げる。ターゲット金属として、直径20mmのアルミニウム球、直径20mmの鉄球、直径12mmの鉄球、それぞれに対する差動コイル型磁気センサー出力信号の3次元リサーチ図を生成し、3次元リサーチ図から個々のターゲットの位置を識別する。ターゲットの位置を識別するため、3次元リサーチ図から線形システム方程式を導く。当然ながら、得られる線形システムは不適切であり、厳密な解ベクトルを得ることが困難である。本論文では、最小自乗法を用いて近似解を導く。その結果3次元リサーチ図生成に採用した磁気信号から最小自乗法を用いて、ターゲットの位置認識がある程度可能であることが判明したのでここに報告する。

2. 3次元リサーチ図法による磁気センサー信号認識

2.1 実験装置

図1に、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。

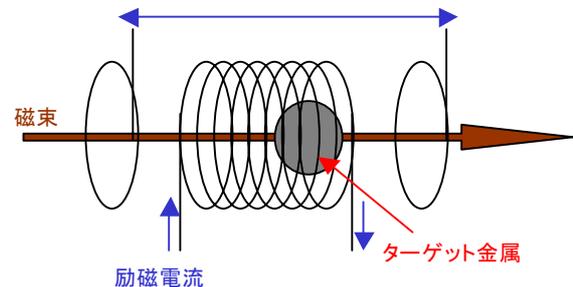


図1 実験装置の原理図

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5kHz最大振幅1Vの正弦波である。図2に入力電圧波形を示す。図3にアルミ球が左端のセンサーコイルからそれぞれ0,3,5,7cmの位置における差動コイルの出力信号波形を示す。(d)はターゲットがセンサーの中央部に位置し、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。

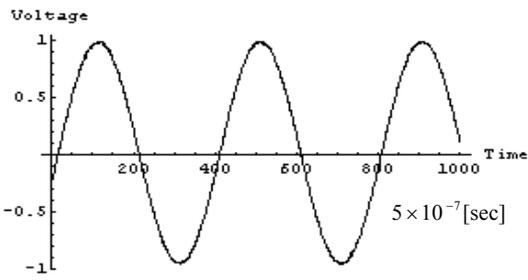
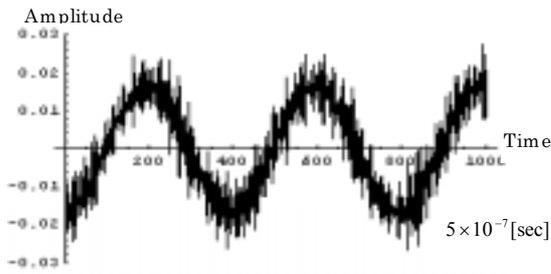
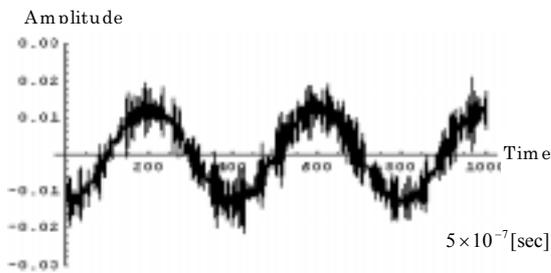


図2 入力波形



(a)左端から 0cm



(b)左端から 3 cm



(c)左端から 5 cm



(d)中央部 (左端から 7 cm)

図3 アルミ球の位置とセンサー出力波形

2.3 3次元リサージュ図の生成

センサー信号の時間位相を削除するため、センサー信号とそれ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ジュ図を生成する。通常のリサージュ図では、軌跡が重なる部分を勘案しない。しかし、本論文では、リサージュ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 次元リサージュ図を生成する。

ターゲットの存在に起因する磁気信号が持つ固有の特徴は、以下のように、大まかに列記できるであろう。

- 1) 振幅情報にはターゲット金属の位置情報が含まれている。
- 2) 入力信号に対する出力信号の位相差にターゲット金属の物理定数等の情報が含まれている。
- 3) 3次元リサージュ図はセンサー出力信号の時間の長短に依存しない。
- 4) 磁気信号の 3次元リサージュ図は必ずしも被測定対象物の単一特性で生成されない。これは、被測定対象物の特性として多くの物理的パラメータに起因する情報が出力信号に含まれるためである。すなわち、被測定対象物には物性、形状、大きさ、位置等の情報があり、これらすべてが 3次元リサージュ図の形状に反映する。本論文では主として 1)のターゲット金属の位置情報 (センサー信号の振幅情報) に焦点を当て、ターゲットの位置認識に関する検討を行う。

リサージュ図を生成するには、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。

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 4 はノイズのない正弦波、そして積分型のリサージュ生成法を用いた 3次元リサージュ図と微分型のリサージュ生成法を用いた 3次元リサージュ図である。図 5 は、一様乱数で生成した図 4 に示す正弦波の 5% 振幅を持つノイズを図 4 の正弦波へ重畳した波形、および、積分型、微分型 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 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。

3. 磁気センサー信号の認識

3.1 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、図 6,7,8 に示す 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 列の長方システム行列 \mathbf{C} を構成する。

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

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。

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

(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識別された出力信号となる [2,3]。

(1) 式の 3次元リサージュベクトルのそれぞれに対応する原出力信号波形を、 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n$ とすれば、(3) 式の解ベクトル \mathbf{X} から生成される出力信号 \mathbf{G} は (4) 式で与えられる。

$$\mathbf{G} = \sum_{i=1}^n X_i \mathbf{V}_i \quad (4)$$

3.2 最小自乗解

図 6,7,8 は識別対象とするセンサー信号出力の 3次元リサージュ図である。これらのリサージュ図を構成するデ

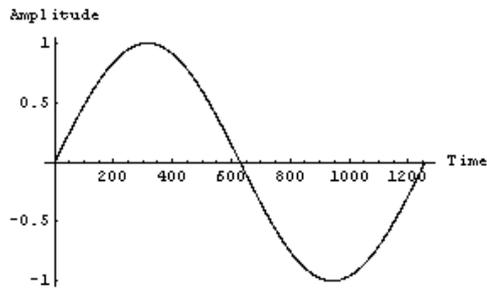
ータを並べ直して(2)式の入力ベクトル \mathbf{X} を作成し、(5) 式の誤差ノルムを最小化する解ベクトルを(6)式を用いて計算する。すなわち、(2)式のシステム方程式は n 個の未知数に対し、 64×64 個の式数であり、 $64 \times 64 > n$ とすれば、全ての式を同時に満足する解は特別な場合を除いて存在しない。このため、誤差ベクトルのノルム

$$\varepsilon = \|\mathbf{Y} - \mathbf{C}\mathbf{X}\| \quad (5)$$

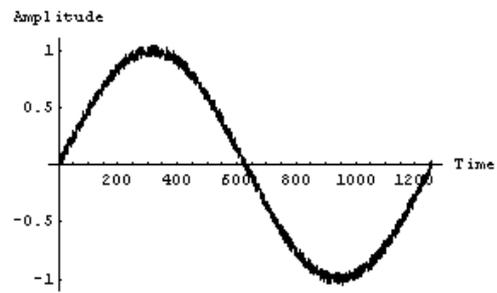
を最小にする解ベクトル、すなわち、最小自乗法による解ベクトルは (6) 式より (2) 式の近似解を得る。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

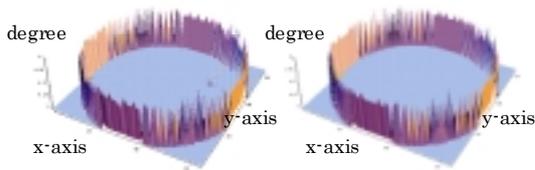
直径 20mm のアルミ球、直径 20mm の鉄球、直径 12mm の鉄球の位置を 5mm 間隔で位置を変更して 28 点のセンサー信号出力を測定した。しかし、センサーの中心から左右において対称になる為、本報告では中心から左側の部分 14 点について吟味する。すなわち、全体として 14 個のデータベースを構築した。よって、(2)式のシステム行列 \mathbf{C} は 64×64 行 14 列の長方形列となる。



(a) 正弦波 (原信号)

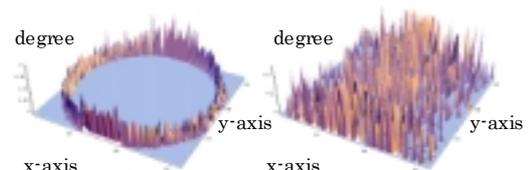


(a) ノイズを含んだ正弦波 (原信号)



(b) 積分型

(c) 微分型

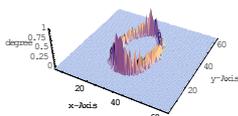


(b) 積分型

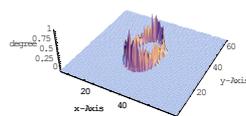
(c) 微分型

図 4 信号波形と 3次元リサージュ図

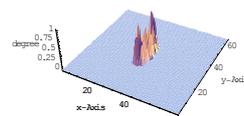
図 5 ノイズが重畳した信号波形と 3次元リサージュ図



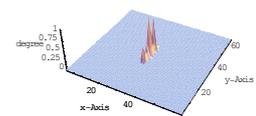
(a) 左端から 0cm



(b) 左端から 3cm

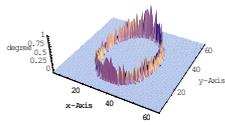


(c) 左端から 5cm

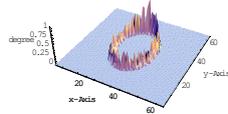


(d) 中央部 (左端から 7cm)

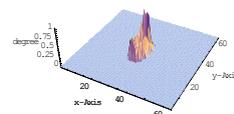
図 6 直径 20mm のアルミ球の 3次元リサージュ図



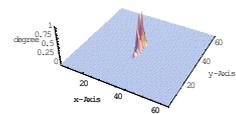
(a)左端から 0cm



(b)左端から 3cm

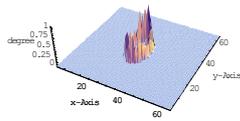


(c)左端から 5cm

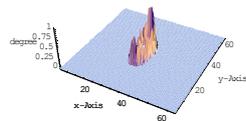


(d)中央部 (左端から 7cm)

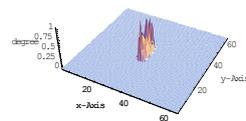
図 7 直径 20mm の鉄球の 3 次元リサージュ図



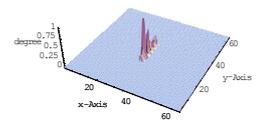
(a)左端から 0cm



(b)左端から 3cm

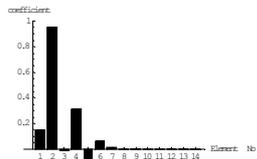


(c)左端から 5cm

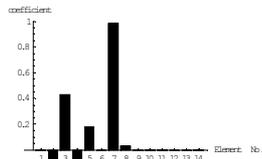


(d)中央部 (左端から 7cm)

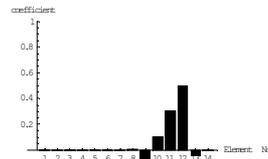
図 8 直径 12mm の鉄球の 3 次元リサージュ図



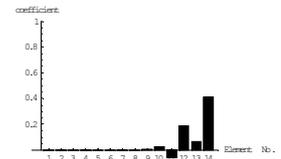
(a)左端から 0cm



(b)左端から 3cm

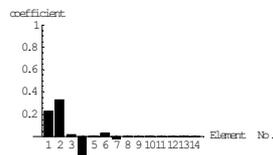


(c)左端から 5cm

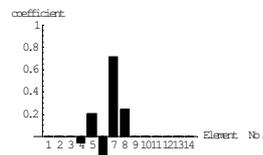


(d)中央部(左端から 7cm)

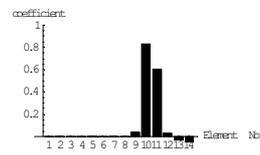
図 9 直径 20mm のアルミ球の最小自乗解



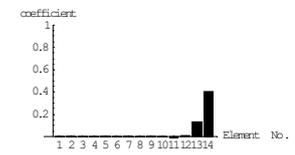
(a)左端から 0cm



(b)左端から 3cm

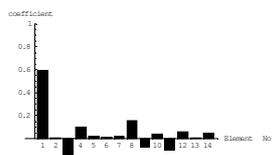


(c)左端から 5cm

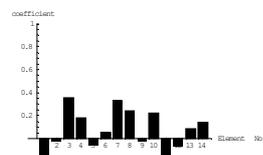


(d)中央部 (左端から 7cm)

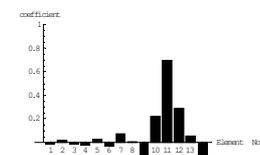
図 10 直径 20mm の鉄球の最小自乗解



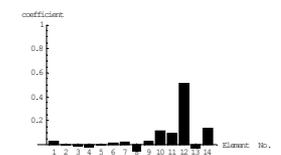
(a)左端から 0cm



(b)左端から 3cm



(c)左端から 5cm



(d)中央部(左端から 7cm)

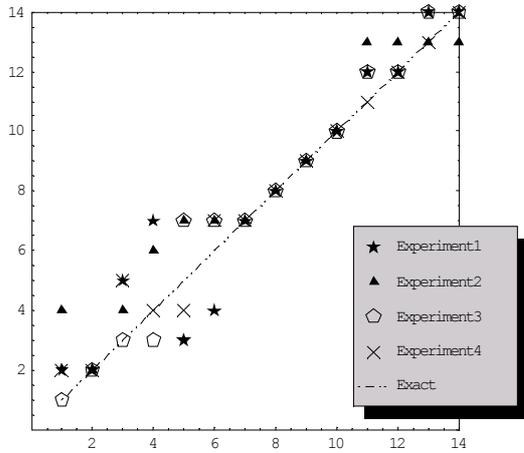
図 11 直径 12mm の鉄球の最小自乗解

3.3 例題

図 6,7,8 に図 3 の信号(直径 20mm のアルミ球)および直径 20mm の鉄球、直径 12mm の鉄球のそれぞれに対する 3 次元リサージュ図を示す。図 6,7,8 から、対象物の位置の差異によって異なる 3 次元リサージュ図が生成されることがわかる。図 9,10,11 は、図 6,7,8 に示す直径 20mm

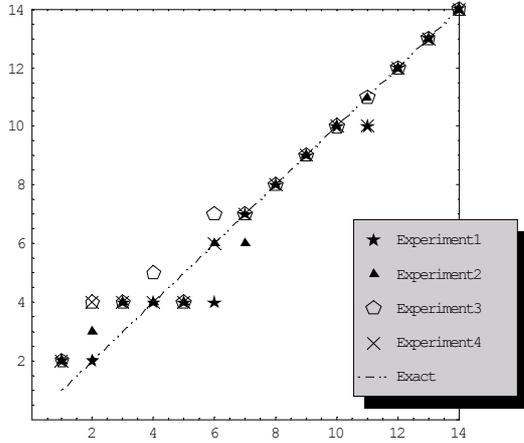
のアルミ球、直径 20mm の鉄球、直径 12mm の鉄球の 3 次元リサージュ図を入力とした場合に、(6)式から得られる解ベクトル X の要素である。明らかに、それぞれの解ベクトル X 中で、特定の要素の値が最大値を取っており、他は全てゼロまたは比較的小さい値である。これは、識別対象とした磁気センサー信号がほぼ完全に識別されたことを意味する。

解の位置



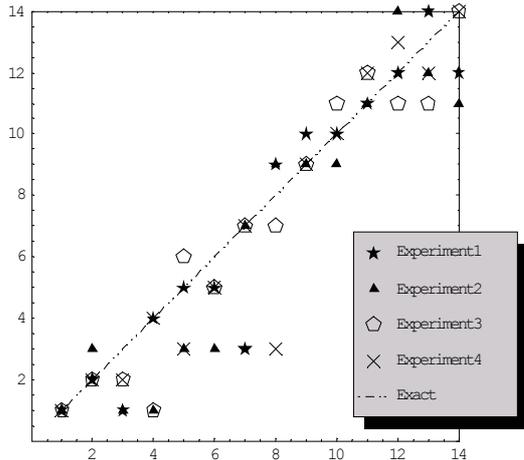
(a)直径 20mm のアルミ球 正解の位置

解の位置



(b)直径 20mm の鉄球 正解の位置

解の位置



(c)直径 12mm の鉄球 正解の位置

図 12 解の分布図

4. まとめ

本論文では、差動型磁気センサー出力信号の情報から被測定対象物固有の情報を抽出した 3 次元リサージュ図の概念を提案し、3 次元リサージュ図の具体的生成の一方法として、磁気センサー出力情報の 3 次元リサージュ図を生成した。抽出した 3 次元リサージュ図から線形システム方程式を導き、磁気センサー信号認識問題を線形システムの解問題へ定式化した。線形システム方程式の近似解ベクトルを得る一方法として最小自乗法を採用した。その結果、アルミニウム球、直径 20mm の鉄球、直径 12mm の鉄球の位置情報が識別可能であることが判明した。

図 12 からも見受けられるように、鉄とアルミでは、同一直径では鉄のほうが認識率が高い。これは、渦電流よりも磁性体の磁化ベクトルの影響が大きいことを意味する。

寸法は、コイルの直径に近い 20mm の球が高感度であり、精度も期待できる。これは、サーチコイルに鎖交する磁束は、サーチコイルに占める球の大きさに比例して変化するためである。

本論文の主要な目的は、従来、筆者等が提唱する 3 次元リサージュ図を用い、磁気センサー出力信号から被測定対象の固有情報を抽出し、被測定対象物の位置推定に関する検討である。この意味で、目的達成を果たしたと考える。

参考文献

- [1] 妹尾 勇、早野 誠治、斎藤 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、2000 年 7 月、P1-008.
- [2] 斎藤兆古 著、ウェーブレット変換の基礎と応用 (朝倉書店、1998 年 4 月)。
- [3] H.Takahashi,S.Hayano,Y.Saito, “Visualization of the Currents on The Printed Circuit Boards”, *IEEE Visualization 1999, Late Breaking Hot Topics*, pp.37-40,Oct. 1999.
- [4] 妹尾 勇、早野 誠治、斎藤 兆古、「画像処理的手法による磁気センサー信号解析」、マグネティックス研究会資料、2000 年 6 月、MAG-00-115.

キーワード

磁気センサー、最小二乗法、三次元リサージュ図.

Summary.

Magnetic sensor signal processing and cognition

Isamu Senoo Seiji Hayano Yoshifuru Saito
Department of Electrical and Electronic Engineering, Hosei University

Cognition of the time domain signals has been mostly depended on the experiences of the skillful observers. We have proposed a new methodology in order to carry out for human voice cognition [1]. Since the human voice depends on each of the persons even if the same word pronouncing, then it is essentially accompanying the data based learning process.

To overcome this difficulty, we have proposed the image processing methodology for which the human voice signals are converted into the three-dimensional monochrome images. The human voice time domain signals are converted into the three-dimensional image data by means of the modified Lissajous diagram.

In the present paper, 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. Thus, we have succeeded in the time domain magnetic sensor signal cognition by means of the image cognitive technology.

Keywords.

magnetic sensor, least squares, 3D Lissajous diagram.