

インテリジェント差動磁気センサ

河村 憲作, 早野 誠治, 斎藤 兆古* (法政大学大学院)

Intelligent Differential Magnetic Sensor

Kensaku Kawamura, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito (Graduate School of Hosei University)

Abstract

After Newton mechanics had been established, major effort of human innovation had been devoted to enforce the human physical power, such as hand, foot and fighting power by many physical tools and mechanical devices. After spreading use of digital computers, most of the human innovative efforts are now devoting to work out the artificial human brain or compensative tool of human brain works.

In the present paper, one of the methodologies to carry out the line signal diagnosis is proposed based on the some assumptions in natural phenomena.

キーワード：磁気センサ, 可視化信号処理, 知的プロセッシング

(Magnetic Sensor, Visualized Signal Processing, Smart Processing)

1. はじめに

映像情報は、医学などで見られるように、極めて具体的な現実の状態把握を可能とする。

筆者らは、映像情報獲得手段の広範な普及を鑑み、可視化情報から特異点や規則性を計算機の強力な反復計算能力を用いて抽出する知的可視化情報処理 (Smart Visualized Information Processing, Svip と略記) を提案した⁽¹⁾。

筆者らは、ライン信号を可視化するため、3次元リサージュ図法を提案した⁽²⁾。ライン信号から3次元リサージュ図を生成するためにSvipのツールとして開発された等価固有値法とポアンカレ法を提案した。本報告は前者の等価固有値法に関するものである。等価固有値法は磁気センサ出力であるライン信号からセンシング対象を含む系全体の固有値を第1近似で得ようとする方法である。この方法は、数値シミュレーションで離散化誤差が無視できる場合、系の正確な固有値へ厳密に対応する等価固有値を与える。しかし、実際の磁気センサでは信号に必然的に含まれるノイズのため、第1近似固有値を平均化した精度を有する固有値情報程度に止まる問題点があった。本稿は、従来の等価固有値法が過渡状態を前提とするのに対し、定常状態に於ける系の入出力特性から3次元リサージュ図を生成する方法を提案する。すなわち、センシング対象を含む系全体の定常状態伝達関数を可視化し、ライン信号からセンシング対象を識別する方法を提案する。その結果、センシング対象間で比較的直交性の高い可視化情報が得られることが判明したので此処に報告する。

2. 磁気センサー信号処理

2.1 等価固有値(Equivalent Characteristic Value)

ECVは系が与える時間領域の応答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、系の固有値情報を求める方法である。ECVは応答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⁽³⁾。

2.2 シミュレーションによる電気回路の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1のように時間変化する。図1の任意の離散化された時間 $n\Delta t$ における電流は式(1)で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + \left[i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t} \right] \mathcal{E}^{-\lambda\Delta t} \quad (1)$$

R-L直列回路の等価固有値 ECV は式(2)で与えられる。

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

図1の波形に式(2)を適用して得られる ECV を図2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。

また、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、交流入力に対する応答信号からは、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、ECV を加算平均処理し、ECV 値の実数部は入力に依存せずシステムに固有の値を取り、虚数部は交流入力の角周波数へ対応する ECV 値へ収束することは既に報告した⁽⁴⁾。

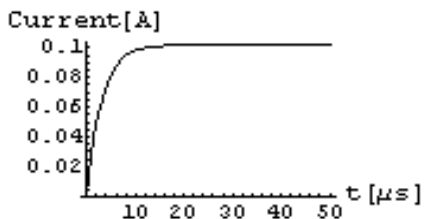
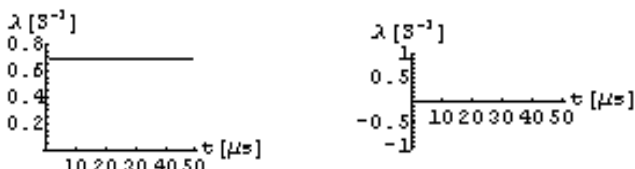


図1 R-L直列回路の直流入力応答

Fig.1 DC transient Current of a R-L Series Circuit



(a) Real Part (b) Imaginary Part

図2 図1から求めた等価固有値 (ECV)

Fig.2 ECV Evaluated from the Current in Fig.1

2.3 実験による電気回路のECV

実験データにおいては、ECV法が、ノイズを拡大するという欠点があり、ノイズ処理の問題があった。しかし、実験データへ繰り返し加算平均処理を適用することで、ノイズの影響を減らすことが可能となり、シミュレーションと同様の結果が得られることは既に報告した⁽²⁾。

さらに、繰り返し加算平均処理を、周波数・波形・位相変化した実験データに適用した結果、いずれも解析解のECV値とほぼ同様の結果が得られた。

3. ライン信号識別

3.1 3次元リサージュ図

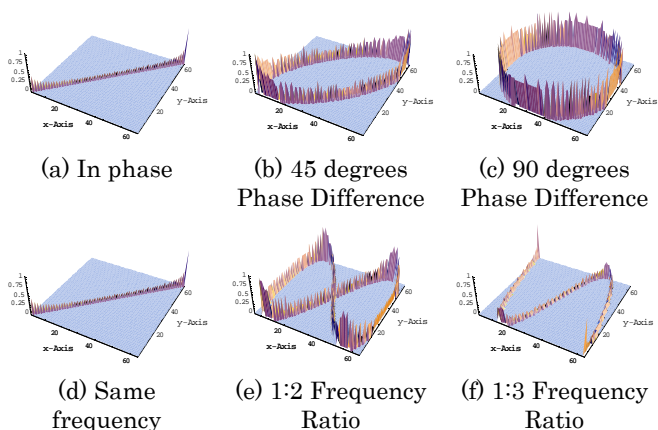


図3 各種の3次元リサージュ図

Fig.3 Various 3Dimension Lissajous

ライン信号の可視化画像、本稿ではこれを固有パターンと呼ぶ。固有パターンは信号のリサージュ図形である。リサージュ図形とは2個の信号を用い、x軸に一信号、y軸に他の信号を入力し、時間軸をパラメタとして描いた図のこと

である。従来の単純なリサージュ図では軌跡の重複情報が削除される。このため、軌跡の重複度をヒストグラムの加算し重複情報を高さ情報として維持する3次元リサージュ図を考える。図3は位相差や周波数の相違を表す3次元リサージュを示す。

図3から、3次元リサージュ図は振幅、位相、周波数、そして時間情報などを巧みに表現する画像化方法であることが分かる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

3.2 最小二乗法

画像データは2次元スクリーン上のピクセルに格納されている。すなわち、2次元画像データは以下のようにあらわすことができる。

$$G = g(i, j) \quad i=1,2,3,\dots,l \quad j=1,2,3,\dots,l \quad (3)$$

画像認識のシステム方程式の入力ベクトル Y は、画像データ G の要素を1次元ベクトルへ並べ替えて得られる。

$$Y = [g(1,1), \dots, g(1,l), g(2,1), g(2,2), \dots, g(l,l)] \quad (4)$$

画像認識のシステム方程式の係数行列を構成する列ベクトルは、予め用意された n 個のデータベース画像から入力ベクトル Y と同様に、それぞれの画像データをベクトルデータへと変換し、

$$\begin{aligned} C_1 &= [g(1,1), g(1,2), \dots, g(1,l), g(2,1), g(2,2), \dots, g(2,l), g(3,1), \dots, g(l,l)] \\ C_2 &= [g(1,1), g(1,2), \dots, g(1,l), g(2,1), g(2,2), \dots, g(2,l), g(3,1), \dots, g(l,l)] \quad (5) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$C_n = [g(1,1), g(1,2), \dots, g(1,l), g(2,1), g(2,2), \dots, g(2,l), g(3,1), \dots, g(l,l)]$
得られた n 個の画像データベクトル $c_i, i=1,2,\dots,n$ を使って、 n 行 m 列のシステム行列 C を構成する。

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (6)$$

任意の画像データを1次元配列へ並べ替えて得られる入力ベクトルが Y であるから、システム方程式は式(7)で与えられる。

$$Y = CX \quad (7)$$

式(7)で解ベクトル X の要素を

$$X = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n] \quad (8)$$

とすれば、最大値を取る要素が識別された画像データとなる。

式(6)の画像データベクトルのそれぞれに対応する原画像データベクトルを、 V_1, V_2, \dots, V_n とすれば、式(8)の解ベクトル X から生成される画像データ G は式(9)で与えられる。

$$G = \sum_{i=1}^n X_i V_i \quad (9)$$

次に解ベクトル X を求める方法について述べる。一般に、式(7)の線形システム方程式のシステム行列 C が正方行列の場合 C の逆行列を求めることで解ベクトル X を求めること

ができる。しかし、式(7)のシステム行列 C は長方形列であるから不適切なシステム方程式となる。この不適切な線形システム方程式の解を導くため、最小二乗法を用いて近似解を導く。

式(7)のシステム方程式は n 個の未知数に対し、 m 個の式数であり、 $m > n$ 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

$$\varepsilon = \|\mathbf{Y} - \mathbf{C}\mathbf{X}\| \tag{10}$$

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用いて式(7)式の近似解式(11)を得る。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \tag{11}$$

4. 磁気センサ信号識別への応用 1

4.1 サンプル

図 4 に示す空き缶の識別を行なう。3次元リサージュ図を用いて缶の識別を行う。サンプルはアルミ缶(Sample1 ~ 4)とスチール缶(Sample5 ~ 9)である。



図 4 供試缶

4.2 試作磁気センサ

缶の識別データを得るため、図 5 に示す磁気センサを試作した。試作磁気センサは励磁コイルと差動センサコイルからなり、励磁コイルは直径 9[cm]で 0.5[mm]のホルマル線 200 回巻きの有限長ソレノイドであり、両端の差動コイルは同一仕様であり、それぞれ直径 8[cm]で 0.5[mm]のホルマル線 200 回巻きの有限長ソレノイドである。この磁気センサの励磁コイルへ周波数 400[Hz]の正弦波電圧を印加し、差動コイルの一方に図 4 に示す缶を挿入した場合に得られる差動コイルの出力信号を缶の識別データとして得る。この識別データ信号から図 4 に示されている個々の缶を識別する。

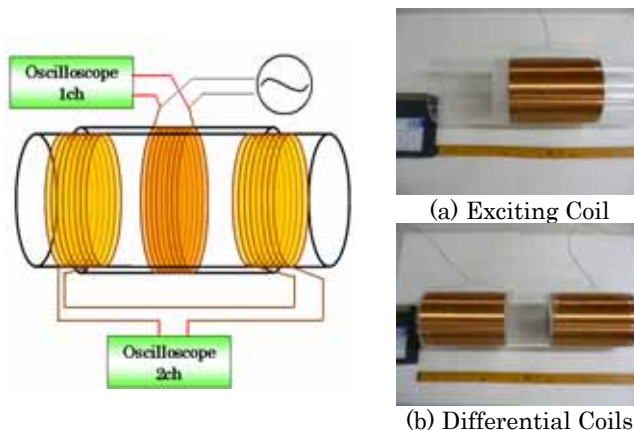


図 5 供試差動磁気センサ
Fig.5 Tested Differential Coil Type Magnetic Sensor

4.3 識別結果

図 6 は励磁コイルの入力信号と差動コイルの出力信号を用いた 3次元リサージュ図である。図 6 は、アルミ缶とスチール缶の違いが位相差として表現している。このため、図 6 の 3次元リサージュ図から個々の缶の相違が観察できる。

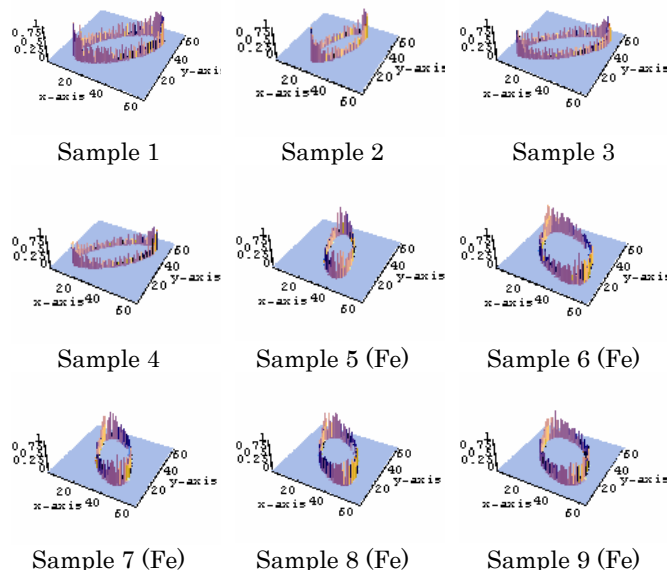


図 6 3次元リサージュ図
Fig.6 3Dimension Lissajous

図 6 の 3次元リサージュ図を用いて 3.2 節で述べた最小二乗法で缶の認識を行う。解ベクトル \mathbf{X} の要素を図 7 に示す。各解ベクトル中の最大値をとる要素番号がデータベース中の認識された画像である。図 7 の結果から、3次元リサージュ法は、振幅、位相、周波数、そして時間情報などを的確に可視化する方法であり、すべての缶が磁気センサ信号から識別できることが分かる。

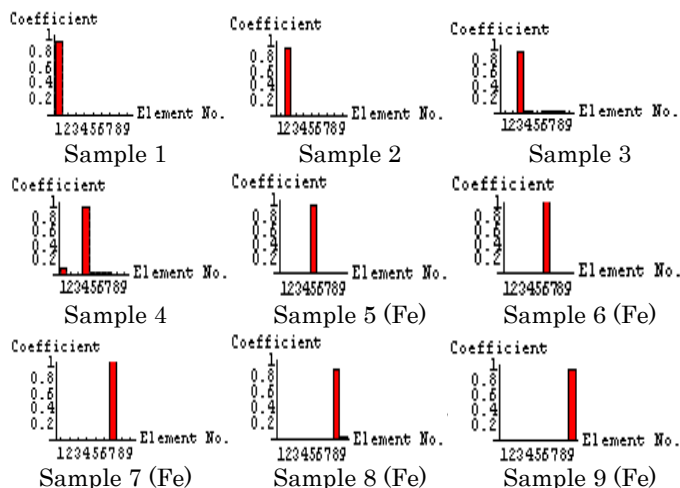


図7 解ベクトルXの要素
Fig.7 Elements of Solution Vector X

5. 磁気センサ信号識別への応用2

5-1 金属球の位置識別

試作した磁気センサを図8に示す。中心部に位置するコイルが励磁コイルであり、直径2.5[cm]で0.6[mm]のホルマル線100回巻きの有限長ソレノイドコイル、両端の差動コイルは同一仕様であり、直径3.5[cm]で0.6[mm]のホルマル線60回巻きの有限長ソレノイドコイルである。図8に示した中心部に位置する励磁コイルに周波数5[KHz]の正弦波電圧を印加し、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差動コイルに誘起する差動電圧によって感知する。そして、得られた入出力信号を用いてターゲットの位置識別に関する検討を行う。

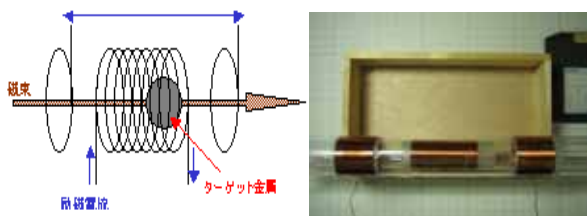


図8 供試差動磁気センサ

Fig.8 Tested Differential Coil Type Magnetic Sensor

5-2 サンプル

図9に位置識別に用いる金属球を示す。サンプルはスチール球、銅球、アルミ球でそれぞれ、直径20[mm]の球である。この球を磁気センサの端から端まで1[cm]毎にずらし30点を測定する。磁気センサの中心は、端から15[cm]に位置しており、また片方の差動コイルの中心は端から7[cm]に位置している。

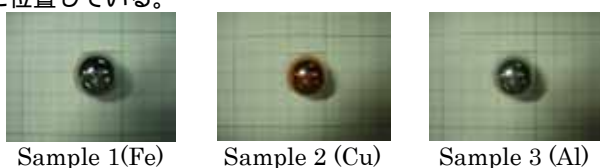


図9 供試球
Fig.9 Tested Sample balls

5-3 識別結果

図10, 図11はスチール球・銅球をそれぞれ移動させた時の励磁コイルの入力信号と差動コイルの出力信号を用いた3次元リサージュ図である。図10は、位置の違いが位相差として表現されている。このため、図10の3次元リサージュ図から金属球の位置の相違が観察できる。

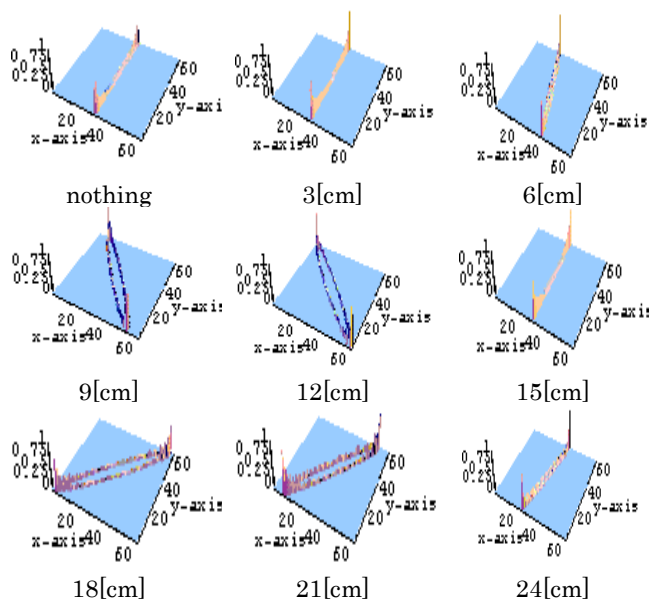


図10 スチール球の3次元リサージュ図
Fig.10 3Dimension Lissajous (Fe)

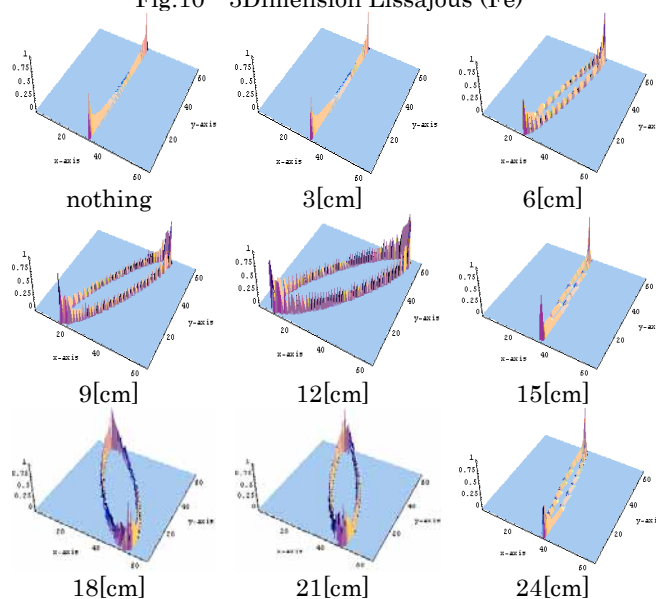


図11 銅球の3次元リサージュ図
Fig.11 3Dimension Lissajous (Cu)

図10と図11を比較すると、リサージュの向きから信号の位相差は磁性体と非磁性体（透磁率）の違いにより発生することがわかる。

また、図10の3次元リサージュ図を用いて3.2節で述べた最小二乗法で金属球の位置識別を行なう。5回の測定結果を畳み込みした解ベクトルXの要素を図12に示す。各解ベクトル中の最大値をとる要素番号がデータベース中の認識された画像である。

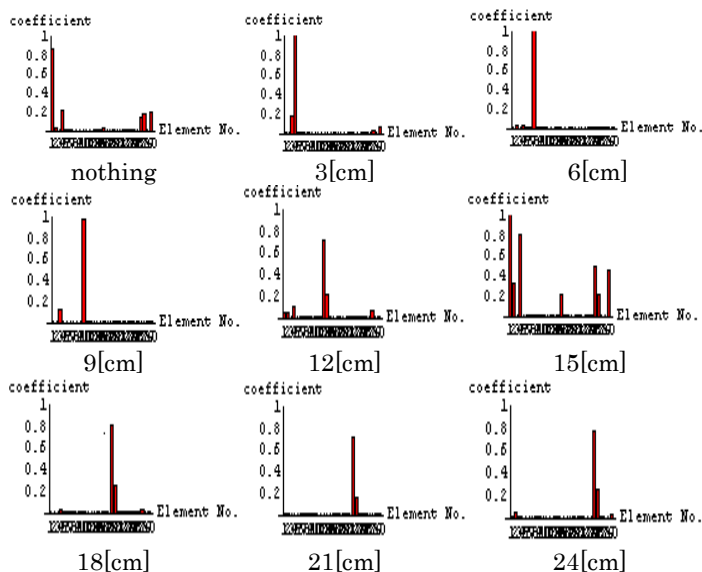


図 12 解ベクトル X の要素
Fig.12 Elements of Solution Vector X

図 12 から、15[cm]の位置で誤認識が起きていることがわかる。これは、図 10 をみてわかるように出力がほぼ出ていない為であると考えられる。

そこで、識別結果をまとめたものを表 1 に示す。また、表 1 のトータルは、3 種類の各々の位置だけでなく、金属球の種類識別も含めて行った結果である。表 1 を見てわかるように、スチール球の識別率は、9 割であった。誤認識は、先に説明したように出力がゼロ近傍で多く存在した。また、銅・アルミ球の識別率は 8 割弱で、スチール球と同様の傾向が見られた。これから、スチール球と銅・アルミ球との識別率の差は、磁性体と非磁性体による出力の違いに拠る。すなわち、銅・アルミ球がターゲットである場合、センサ端部で出力が低下する。

表 1 識別結果

Table 1. Recognition result

30 点測定結果	Fe	Cu	Al	Total (90 点)
誤認識[個]	3	6	5	17
識別率[%]	90	80	83	81

誤認識は、上に示したように、図 13 の差動コイルの両サイド外側 5[cm]の出力が低い場所で起こっていた。そこで、金属球が何もない場合のデータと両サイド 2[cm]のデータを削除した 25 点の測定データを用いて再度識別を行なった。その結果を表 2 に示す。

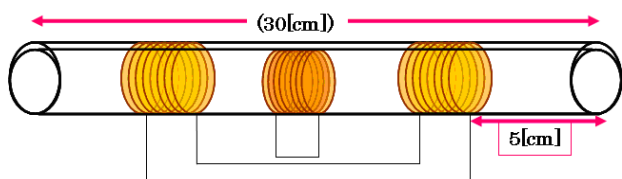


図 13 磁気センサの略図
Fig.13 Rough sketch of Magnetic Sensor

表 2 低出力データを削除した識別結果

Table 2. Recognition result of deleting Extra data

25 点測定結果	Fe	Cu	Al	Total (75 点)
誤認識[個]	2	2	0	4
識別率[%]	92	92	100	94

表 2 の結果より、出力の低い両サイドの測定データを取り除くことにより、9 割以上の識別が可能となることがわかる。また、銅・アルミ球に関しては、飛躍的に識別率が上がったことがわかる。つまり、表 2 の結果から表 1 のスチール球と銅・アルミ球との識別率の差は、素材による出力の違いにより、銅・アルミ球は、端の方で、出力がゼロの物が多く出たためであると考えられる。

最終的に、表 2 の結果から再現性が高い有力な出力が得られる場合、金属球の位置識別は 9 割以上の識別が可能であることがわかる。

この結果より、3 次元リサージュ法は、金属球の位置識別問題に対して有効な手段であることが判明した。

6. まとめ

本稿は、等価固有値法が過渡状態を前提とするのに対し、定常状態に於ける系の入出力特性から 3 次元リサージュ図を生成する方法。すなわち、センシング対象を含む系全体の定常状態伝達関数を可視化し、ライン信号からセンシング対象を識別する方法を提案した。

その結果、3 次元リサージュ法を用いることで、空き缶の識別においては、全ての空き缶の識別が可能であり、また金属球の位置認識においては、出力の出ている部分では、良好な認識が可能であることを述べた。

すなわち、入出力信号が得られる場合、センシング対象間で比較的直交性の高い可視化情報が得られることが判明した。今後は、音声信号など入力信号の測定が事実上不可能な場合における、出力信号だけによる信号認識または信号評価の可能性に関し検討を行う必要がある。

文 献

- (1) 河村憲作, 早野誠治, 斎藤兆古:「赤外線画像から熱伝導率の推定」, 可視化情報学会誌, pp-219-222 (2004 Vol.24)
- (2) 河村憲作, 早野誠治, 斎藤兆古:「等価固有値法によるライン信号処理」, 可視化情報学会誌, pp-63-66 (2005 Vol.25)
- (3) 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-」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-116 (2000)
- (4) 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古:「等価固有値法による磁気センサ信号処理」, 2002 年度法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文 (2003)
- (5) 木村祐二, 早野誠治, 斎藤兆古:「ライン信号の可視化と信号認識」, 可視化情報学会誌, pp-235-238 (2004 Vol.24)
- (6) 妹尾 勇, 「信号認識と磁気センサ」, 2001 年度法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文 (2002)