

2005 年度

修士論文

ライン信号の可視化信号処理

Visualized Time Domain Signals Processing

法政大学大学院工学研究科

電気工学専攻修士課程

かわむら けんさく
河村 憲作

学籍番号：04R3216

指導教授：齋藤 兆古

Abstract

This paper introduces a new concept to extract the essential and distinct characteristics of time dependent signals. A key idea is to calculate a three-dimensional Lissajous diagram, which is able to represent the characteristics information of a time dependent signal e.g. frequency, amplitude, phase difference.

Nowadays, cognition of the time domain signals has been mostly depended on the highly experienced experts. With the developments of modern high speed and reasonable priced computers, most of the works requiring human experience and skill are now planning to replace the computers, for example Artificial Intelligence and neural network studies. This means that most of things will be diagnosed by the computers in near future. Principal purpose of this paper is to develop the system, which is capable of cognizing various information by a computer.

Thus, in this paper, the followings are carried out as concrete examples of signal diagnosis. First, it is carried out to cognize a position of target metallic materials and a kind of cans by means of both input and output signals of a differential magnetic sensor. Second, it is tried to cognize a kind of cans by using only one output signal. Finally, the three-dimensional Lissajous and the image cognition techniques are applied to the Biomagnetics signal recognition.

In order to convert signal to image, this paper employs the Lissajous diagram. When it is taken into account the overlapped information by means of histogram, the three-dimensional Lissajous diagram can be obtained by taking one time dependent signal to the x-axis and the other time dependent signal to the y-axis. Thus, the time domain signals are converted into the three-dimensional monochrome images, which construct the signal database system.

When a time domain test signal is measured, 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 element from the least squares solution reveals the cognized signal. Thus, it has been succeeded in the time domain magnetic sensor signal cognition by means of the image cognitive technology.

Appendix describes a supplementary explanation about the equivalent characteristic value previously proposed. Namely, it is shown that conventional equivalent characteristic values extracted from the practical experiments are not the deterministic parameter of the system because of the noise influence accompanying the experiments.

- 目次 -

第 1 章 緒論	1
第 2 章 ライン信号識別	2
2.1 信号の画像化	2
2.2 識別手法	4
第 3 章 実際の磁気センサー信号への応用	7
3.1 空き缶識別	7
3.2 金属球の位置識別	13
3.3 まとめ	17
第 4 章 単一信号識別	18
4.1 サンプル	18
4.2 試作磁気センサーと出力信号	18
4.3 単一信号から 3 次元リサージュ図の作成	18
4.4 出力信号から作成した 3 次元リサージュ図	19
4.5 識別結果	20
4.6 まとめ	22
第 5 章 生体磁気信号識別	23
5.1 心電図	23
5.2 心電図波形の測定	24
5.3 測定波形の取り出し	25
5.4 心電図波形の 3 次元リサージュ図生成と識別結果	26
5.5 補間による改善	28
5.6 まとめ	30
第 6 章 結論	31
付録 A 磁気センサー信号処理	32
A.1 等価固有値(Equivalent Characteristic Value)	32
A.2 シミュレーションによる電気回路の ECV	32
A.3 実験による電気回路の ECV	33
A.4 繰り返し一般加算平均処理によるノイズ処理	33
A.5 等価固有値法を用いた固有パターン	36
A.6 まとめ	36
付録 B 金属球の位置認識の追加実験	37
参考文献	40

第1章 緒 論

映像情報による判断は、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。たとえ言語が異なる民族ですら、映像情報で意志伝達を行えば誤解無く伝わる。このように人間の視覚情報処理は全地球人類共通の強力な知的機能である。

ニュートンは林檎が木から落下する現象を自分の視覚で観察し、最終的に現代力学の最も基礎的な体系であるニュートン力学を集大成した。この意味で視覚情報から物理的現象の因果関係を把握するため、人類の視覚機能では直接観察不可能な現象を可視化する試みがなされている。医学での可視化は、X線から始まり核磁気共鳴を利用したMRI画像まで実用化されている。工学・物理学では、電子顕微鏡やX線結晶構造解析法が発明された後、材料中の物理現象に関する因果関係が明らかにされた。

筆者らは、このような過去の経過とインターネットによる時間・空間的相違を克服した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全く新しい学術分野の開拓を試みている。この学術を我々は「知的可視化情報処理 (Smart Visualized Information Processing, Svip と略記)」と呼び、従来の「可視化情報処理」と区別している。これは、訓練された人間の視覚情報処理能力を前提とする従来の可視化情報処理と異なり、計算機で全ての可視化情報処理、すなわち、特異点抽出や規則性抽出などを行うことを前提とするためである。

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。

まず、1次元時系列信号を3次元画像へ変換する手法として3次元リサージュ図法を提案し、それについて詳述する。また、その3次元画像データをデータベースとした画像識別手法を用いた信号識別手法について述べる。より具体的には、まず、最初に空き缶を用い、種類、大きさ、形状などの識別の可能性について検討し、また金属球の位置推定に関する結果を次いで報告する。次に、音声信号等の単一信号しか得られない場合を想定し、出力信号のみを用いた空き缶識別結果を報告する。さらに、この手法が磁気センサーだけでなく、様々な信号識別・評価に適用可能であることを検証するため、生体電気信号に適用し、生体信号識別への新たな可能性に関して述べる。

補足として、付録に上に述べた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に対し、過渡状態を前提とするSvipのツールとして開発された等価固有値法について述べる。等価固有値法は磁気センサー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、実際の信号ではノイズ影響で等価固有値法はより高度な実験的技術を必要とする点に関して述べる。

第 2 章 ライン信号識別

本章では、本論文で述べる磁気センサーおよび生体磁気の信号識別に関する手法について説明する。従来の信号評価・信号識別はセンサー信号の特徴抽出を行い、それを熟練技術者が評価・識別するものである。従来の特徴抽出方法は主として信号の波形や振幅の特徴を抽出する等、フーリエ変換によって周波数成分に変換し、評価・識別を行うものである。しかしながら、本論文では、従来の手法にとらわれず新しい信号評価・識別手法に関する提案を旨としている。具体的には信号の特徴抽出として信号を可視化画像へ変換し、画像識別手法を適用することにより信号識別・評価を行うものである。

2.1 信号の画像化

2.1.1 リサージュ図形

ここでは、まず 1 次元時系列信号の特徴抽出法について述べる。電気・電子回路やセンサー信号、音声信号など一般的に信号評価といったとき、その多くは 1 次元信号の評価に直面する。そして、1 次元時系列信号に含まれる情報として振幅情報、位相情報、周波数情報をあげることができる。これらの信号の特徴抽出方法としてリサージュ図の概念を採用し信号の画像化を行った。

一般的にリサージュ図形は通信の分野において送信信号と受信信号との周波数差を測り、周波数の調整を行うために用いられていた。リサージュ図形とは 2 信号を用い、 x 軸に 1 信号、 y 軸に 1 信号をとり、描いた図のことである。このことから、リサージュ図形は時間情報を削除する図法であることが分かる。たとえば周波数、振幅ともに同じである正弦波と余弦波をそれぞれ x 、 y 軸に取るとリサージュ図は円を描く。それでは、リサージュ図形はどのような情報を持っているのだろうか。まず振幅情報であるが、2 信号の振幅情報はリサージュ図形の円の半径方向に影響を与える。また、2 信号間の位相差情報は円の形に影響を及ぼす。たとえば、2 信号が同相、位相差 180 度であるときリサージュ図形は直線を描く。位相が 90 度、270 度等ずれた 2 信号の場合は円を描くが、その他の位相差のときは楕円もしくは、直線を描くことになる。そして、2 信号間の周波数の違いは位相差の時と同様に円の形に影響を及ぼす。ただし、形としては楕円形に歪むのではなく、8 の字を描いたりする方向に作用する。例題として位相差と周波数比によるリサージュ図への影響を図 1 に示した。この図から、リサージュ図は明かに信号の特徴を抽出していることがわかる。

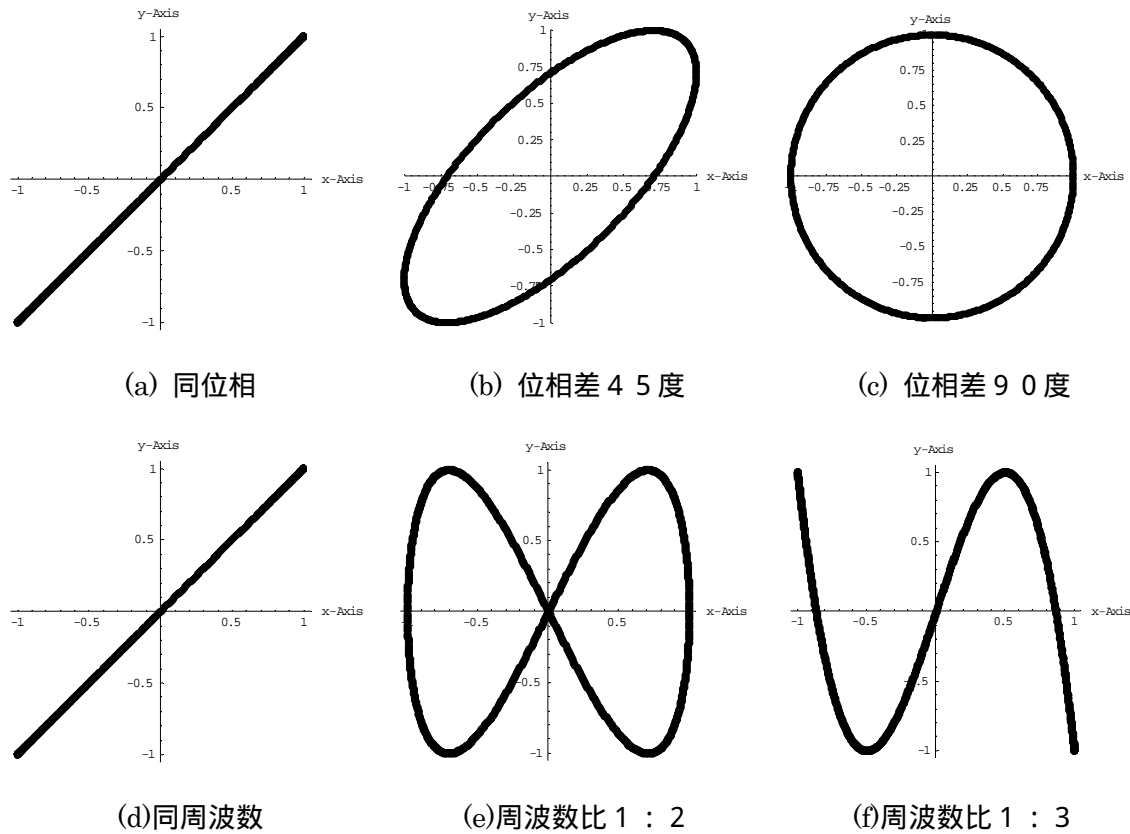


図 1 位相差と周波数比によるリサージュ図

2.1.2 3次元リサージュ図

従来、信号評価を行うときには特定の周波数、位相差、振幅といった所望の信号を抽出し、それぞれ技術者が信号評価を行うのが通例である。しかしながら、リサージュ図を用いて画像識別法を適用することにより、振幅、位相、周波数のすべての情報を一度に勘案し評価することが可能となる。このことからリサージュ図の有用性がある。しかしながら、従来のリサージュ図においてはリサージュ図を描くにあたって、軌跡の重複する情報が削除されている。ここで、リサージュ図の重複度をz軸方向にヒストグラムの手法で加味し、より多くの情報を包含している3次元のリサージュ図を描くことが可能となる。3次元リサージュ図の例として、先ほど図1に示した位相差と周波数比の違いによる従来のリサージュ図を3次元リサージュ図として図2に示す。

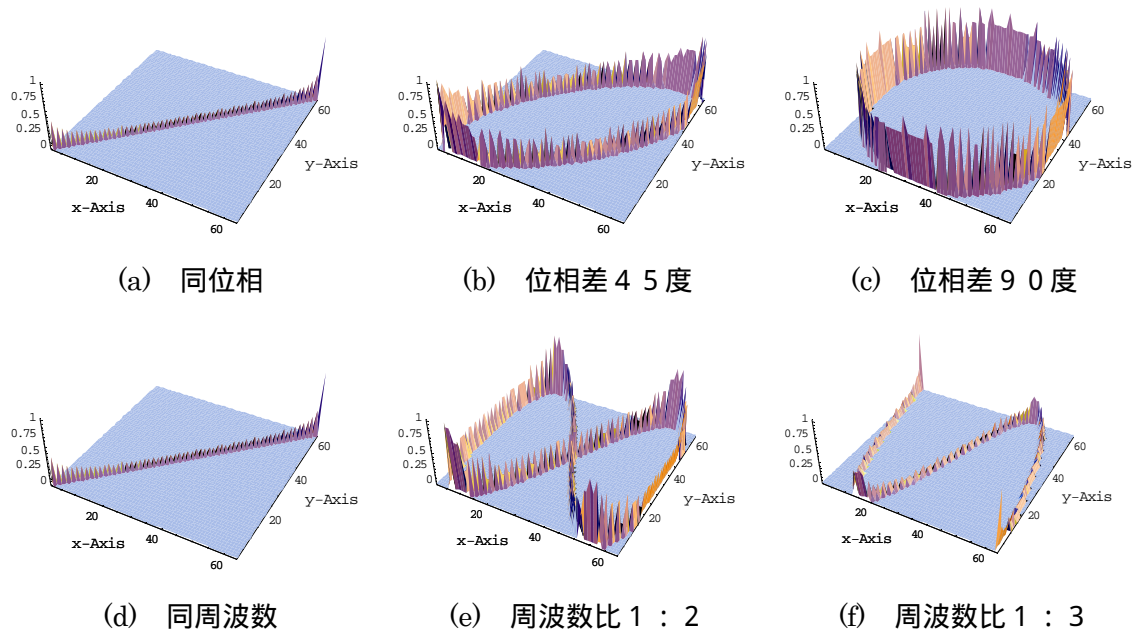


図 2 位相差と周波数比の違いによる 3 次元リサージュ図

この図 2 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効率良く抽出する画像化方法であることが分かる[1][2]。

2.2 識別手法

ここでは画像識別手法に関して説明する。後に述べる信号識別は画像識別手法を適用することにより行う。具体的には、信号の画像化を行い、得られた画像を用いて識別を行う。信号の画像化手法としては、前述の 3 次元リサージュ法を用いて行う。さて、その画像識別手法であるが、ここで述べる画像識別手法とは線形システム方程式の解を導くことに基づく方法である。しかしながら、得られる線形システム方程式は不適切なシステム方程式であるため、ここでは最小二乗法を用い近似解を導く。換言すれば、あらかじめ用意した画像データをデータベースとし、その中から誤差ノルムが最小となる解要素を最小二乗法により求める方法である。

2.2.1 入力ベクトル

画像データの構成を考えると、画像データは 2 次元でありピクセルにより構成されている。3 次元リサージュもこの構成となっている。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。

$$G = g(i, j) \quad (1)$$

$$i=1,2,3,\dots,l \quad , \quad j=1,2,3,\dots,l$$

入力ベクトル Y は、画像データ G の要素を 1 次元配列に並べ替えたベクトルとなる。

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

2.2.2 システム行列

あらかじめ用意された 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する。

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

写真など映像情報を画像データと見なせば画像データはそれぞれ 2 次元配列の画素からなるため、1 次元配列に並べ替えると、 m 次のベクトルとなる。このようにして得られる n 個の画像データベクトル c_i , $i=1, 2, \dots, n$, を使って、式(4)の n 行 m 列の長方システム行列 C を構成する。

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (4)$$

2.2.3 システム方程式

いま、新たな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を Y とすれば、システム方程式は、式(5)で与えられる。

$$Y = CX \quad (5)$$

式(5)で解ベクトル X の要素を

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n] \quad (6)$$

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[3][4]。

式(4)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(6)の解ベクトル X から生成される画像データ G は式(7)で与えられる。

$$G = \sum_{i=1}^n X_i V_i \quad (7)$$

2.2.4 最小二乗法

次に解ベクトル \mathbf{X} を求める方法について述べる。一般に、式(5)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 \mathbf{X} を求めることができる。しかし、式(5)のシステム行列 C は長方形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(5)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

$$\varepsilon = |\mathbf{Y} - C\mathbf{X}| \quad (8)$$

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(5)の近似解式(9)を得る。

$$\mathbf{X} = (C^T C)^{-1} C^T \mathbf{Y} \quad (9)$$

第3章 実際の磁気センサー信号への応用

近年、様々な分野において自動化処理が進む中、センサーの必要性は益々高まってきている。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、振幅情報等を熟練技術者が評価する方式でなされる。しかしながら、コンピュータの普及に伴い信号評価の自動化の研究が進められている。本論文はその一手法を提案するものである。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、画像識別的手法を用いて被測定対象の情報識別可能性に関して検討する。すなわち、本章では3次元リサージュ図法と画像識別手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識別問題を取り上げ、その手法の有用性を検討する。

3.1 空き缶識別

3.1.1 サンプル



(a) サンプル1 (アルミ)



(b) サンプル2 (アルミ)



(c) サンプル3 (アルミ)



(d) サンプル4 (アルミ)



(e) サンプル5 (スチール)



(f) サンプル6 (スチール)



(g) サンプル7 (スチール)



(h) サンプル8 (スチール)



(i) サンプル9 (スチール)

図3 識別対象の空き缶

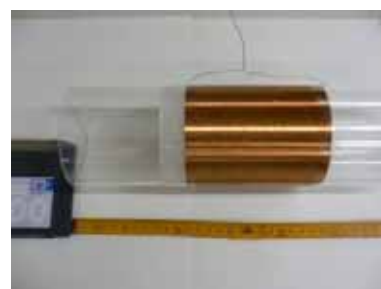
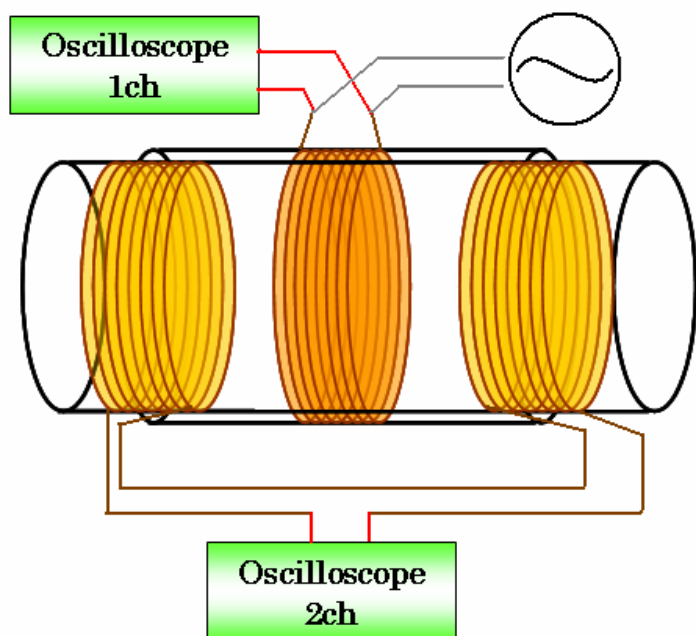
図3に示した空き缶を用いて缶の識別を行なう。3次元リサージュ図を用いて缶の識別を行なう。アルミ缶4個(サンプル1~4)とスチール缶5個(サンプル5~9)の9個の空き缶の識別,また形状の識別を計算機で識別することを目標とする。

3.1.2 試作磁気センサー

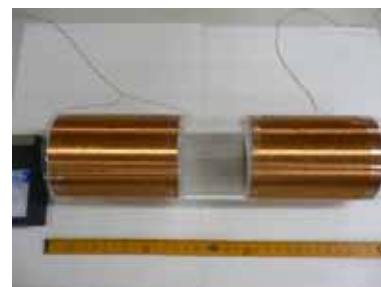
缶の識別データを得るため,図4に示す磁気センサーを試作した。この試作磁気センサーのコイルの諸定数を表1に示す。図4また表1に示したように,試作磁気センサーは励磁コイルと差動センサコイルが主要部である。この磁気センサーの励磁コイルへ周波数400[Hz]の正弦波電圧を印加し,差動コイルの一方に図3に示す缶を挿入した場合に得られる差動コイルの出力信号を缶の識別データとして得る。この識別データ信号から図3に示されている個々の缶を識別する。

表1 コイルの諸定数

コイル	巻数[回]	コイルの直径	コイルの長さ	コイルの素材
励磁コイル	200	90[mm]	115[mm]	直径0.5[mm]のホルマル線
差動センサコイル (両端とも同一仕様)	200	80[mm]	110[mm]	直径0.5[mm]のホルマル線



(a) 励磁コイル

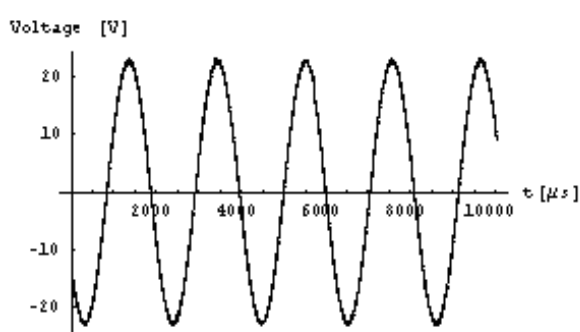


(b) 差動コイル

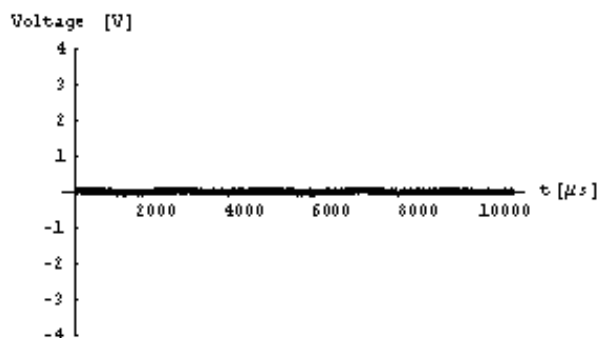
図4 試作磁気センサー

3.1.3 入出力信号

図5には入力信号と金属類が何も無いときのセンサー出力信号を示す。また,図6には図3のそれぞれの缶を用いた時の出力信号を示す。

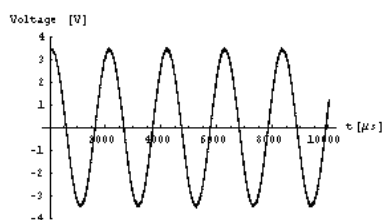


(a) 入力信号

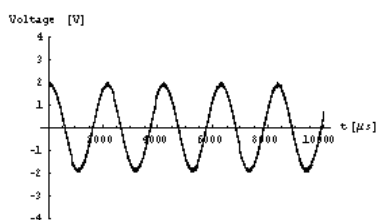


(b) 出力信号

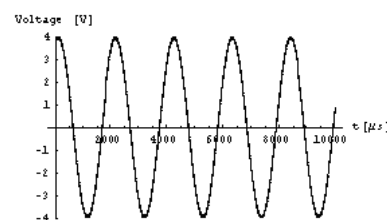
図5 入出力信号



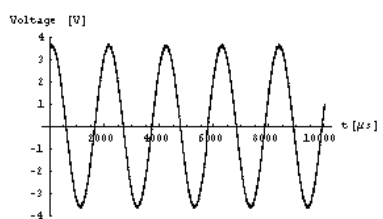
(a) サンプル1 (アルミ缶)



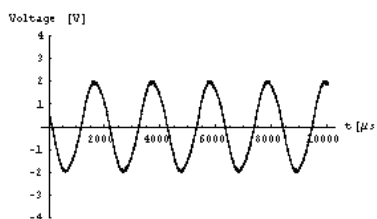
(b) サンプル2 (アルミ缶)



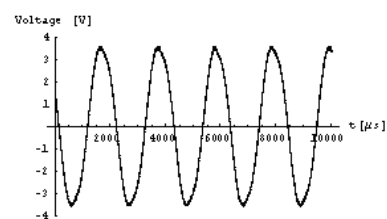
(c) サンプル3 (アルミ缶)



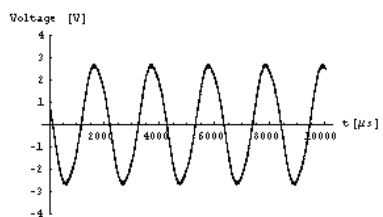
(d) サンプル4 (アルミ缶)



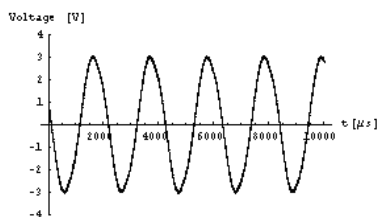
(e) サンプル5 (スチール缶)



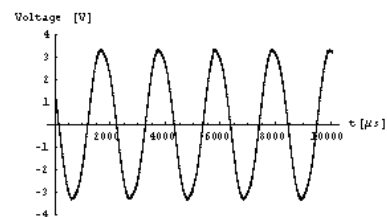
(f) サンプル6 (スチール缶)



(g) サンプル7 (スチール缶)



(h) サンプル8 (スチール缶)



(i) サンプル9 (スチール缶)

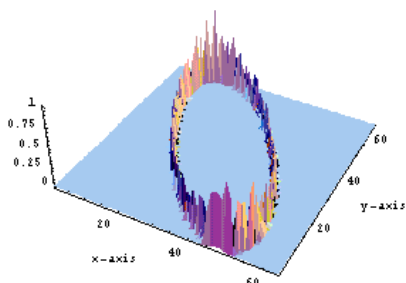
図6 図3に示された缶が一方の差動センサー内にある場合の出力信号

ここで、本論文で採用した差動型のセンサーにおける振幅、位相、周波数の違いの要因を考える。振幅情報としては、金属のサーチコイルからの距離、そして、(サーチコイルの大きさを一定とすることが前提)サーチコイルに占める金属の割合、すなわちサーチコイルの径方向への金属の大きさ情報が含まれる。また、金属が同じ位置にあるとき、金属の種類が異なれば基本的に振幅は異なる値を取る。次に位相情報であるが、位相情報といってもこのセンサーの場合サーチコイルが1個であるため比較が難しい。仮に入力電圧と出力電圧の位相差について考えてみると、鉄(強磁性体)をサーチコイルの中に置いたとき、アルミニウム(非磁性体)を用いたときでは位相が異なる。これは、鉄を用いたとき、鉄は強磁性体であ

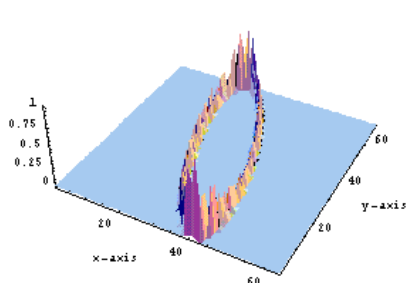
るため磁束が鉄に吸収されるように鉄に磁束が集まり，鉄を置いた方のサーチコイルの出力が鉄を置いてない側のサーチコイルの出力より大きくなることにより出力信号が発生する．

しかし，アルミニウムを同様に置いたときはどうであろうか？アルミニウムは非磁性体であり，磁束は渦電流のため打ち消されるように分布する．そのため，アルミニウムを置いた側のサーチコイルの出力は，アルミニウムが存在しない側のサーチコイルに比べ鎖交磁束数が少なくなり，アルミニウムが存在しない側のサーチコイルの出力が大きくなり，その差により出力信号が発生する．このことから出力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．さらに，出力信号の周波数情報としては基本的には入力信号の周波数に依存する．しかしながら，異なる周波数成分が出力信号に含まれる場合がある．それには以下のことが考えられる．第一は磁性体を用いたときの入力磁界による磁性体の磁化過程に起きるバルクハウゼンジャンプである．第二は磁性体の磁気飽和に起因する出力信号の歪である．

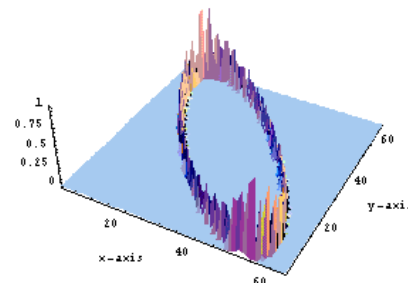
3.1.4 入出力信号を用いた3次元リサーチ図



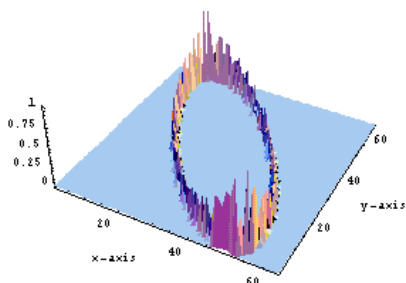
(a) サンプル1 (アルミ缶)



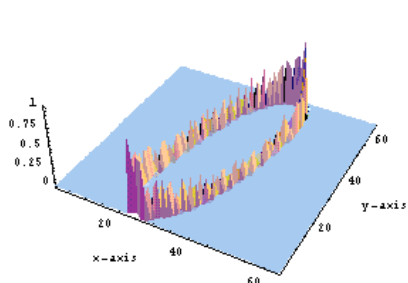
(b) サンプル2 (アルミ缶)



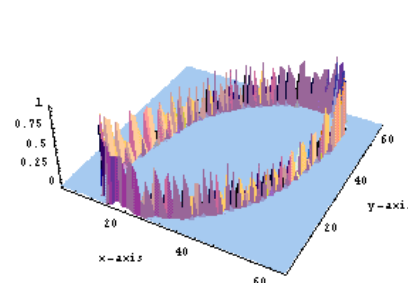
(c) サンプル3 (アルミ缶)



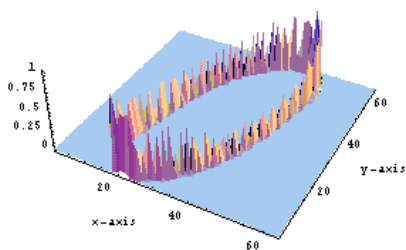
(d) サンプル4 (アルミ缶)



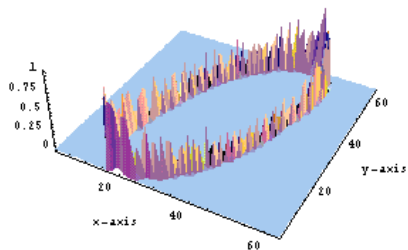
(e) サンプル5 (スチール缶)



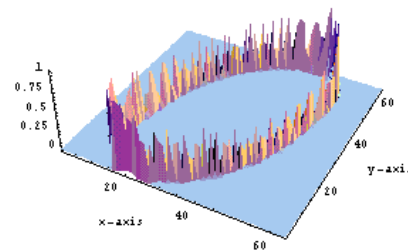
(f) サンプル6 (スチール缶)



(g) サンプル7 (スチール缶)



(h) サンプル8 (スチール缶)



(i) サンプル9 (スチール缶)

図7 3次元リサーチ図

図7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。すなわち、センサー系の伝達関数の3次元軌跡である。図7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7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。

3.1.5 識別結果

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9個の3次元リサージュベクトル $c_i, i=1, 2, \dots, 9$ を使って、2章で説明した最小二乗法で缶の識別を行なう。すなわち、式(5)のシステム方程式は9個の未知数に対し、64x64個の式数であり、64x64>9であるため、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式(9)より式(5)の近似解を得る[4]。

図7の3次元リサージュ画像について、得られた解ベクトル X の要素を図8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識別された画像である。

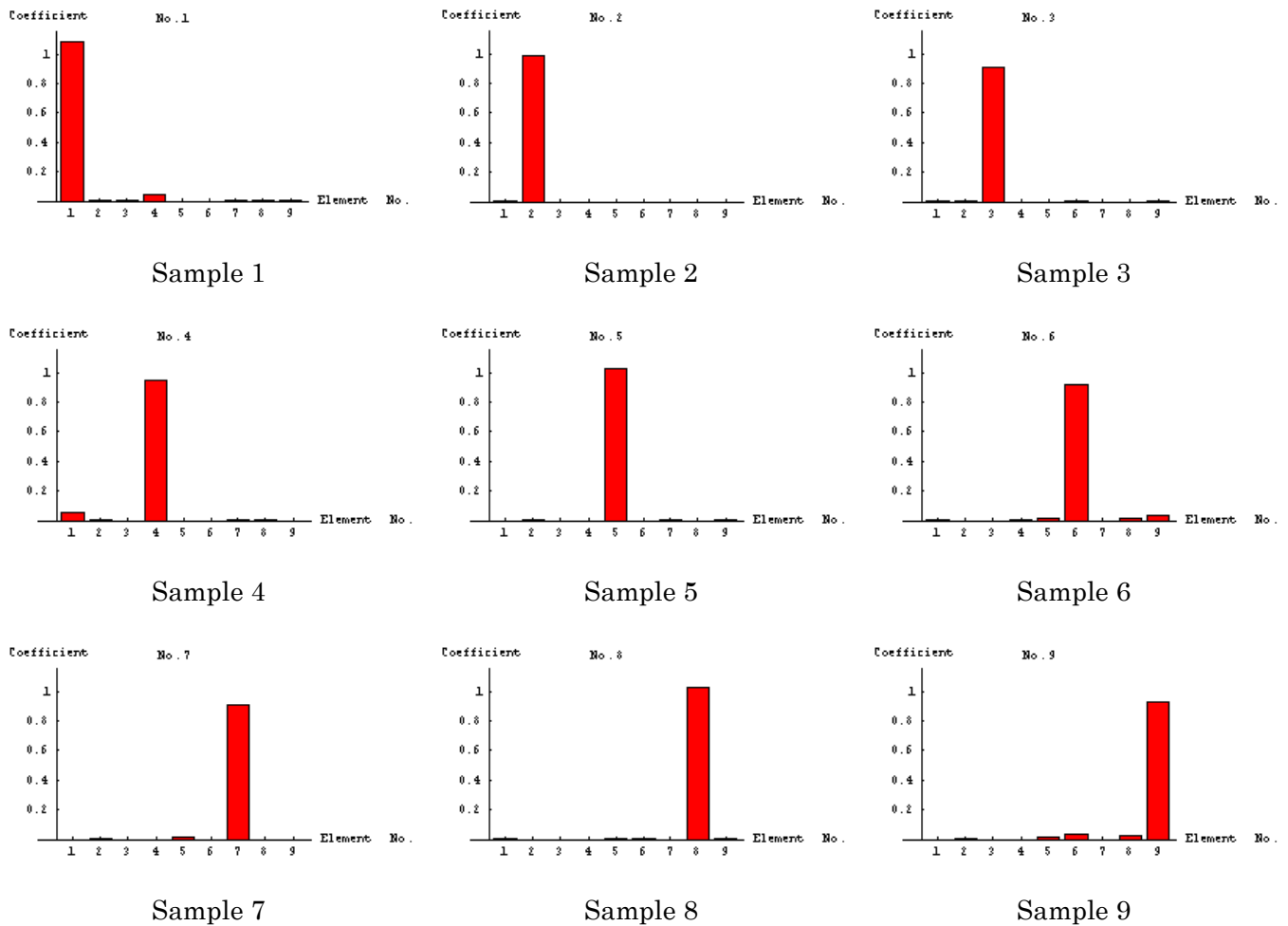


図8 解ベクトル X の要素

さきほど示したように，図7から対象物の相違によって異なる3次元リサージュ図が生成されていることがわかる．そして，図8は，得られた解ベクトル X の要素であるが，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，他はすべてゼロまたは比較的小さな値である．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．言い換えると，各解ベクトル中の最大値をとる要素番号はデータベース中の識別された画像を示す．すなわち，図8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ー信号から識別できることが分かる．再現性を確認するため5回実験を行ったが，すべて識別可能であった．

3.2 金属球の位置識別

3.2.1 試作磁気センサー

本実験の狙いはターゲット缶の物理的寸法や物性の相違による識別感度の変化を評価するためである。図10は、試作した金属球の位置識別磁気センサーを示す。中心部に位置するコイルが励磁コイルであり、両端に位置するコイルが同一仕様の差動コイルである。この試作磁気センサーのコイルに関する諸定数を表2に示す。図9で、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が与えるセンサーの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。

表2 2[cm]球用のコイルに関する諸定数

コイル	巻数[回]	コイルの直径	コイルの長さ	コイルの素材
励磁コイル	100	25[mm]	55[mm]	直径0.6[mm]のホルマル線
差動センサコイル (両端とも同一仕様)	60	35[mm]	30[mm]	直径0.6[mm]のホルマル線

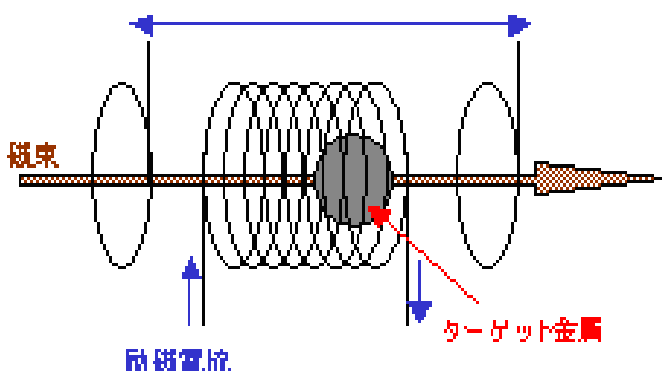


図9 実験装置の原理図

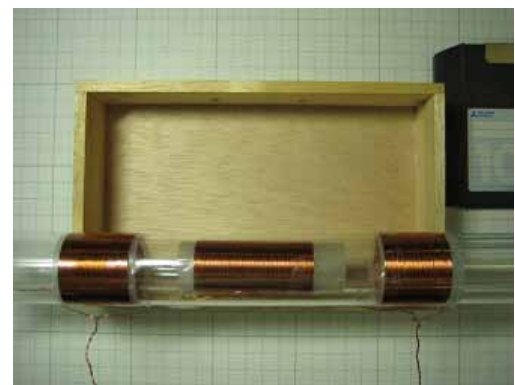


図10 試作磁気センサー

3.2.2 サンプル金属球



(a) サンプル1 (スチール球)



(b) サンプル2 (銅球)



(c) サンプル3 (アルミ球)

図11 実験に用いた金属球

図 1 1 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．各球をセンサーの端から端まで 1[cm]毎に移動しセンサーの入出力信号を 30 点測定する．センサーの中心は，端から 15[cm]に位置する．

3.2.3 入力波形と出力波形

図 1 2 には励磁コイルの入力信号と金属類が存在しない場合のセンサー出力信号を示す．また，図 1 3 はスチール球移動時の差動コイルの出力信号を示す．

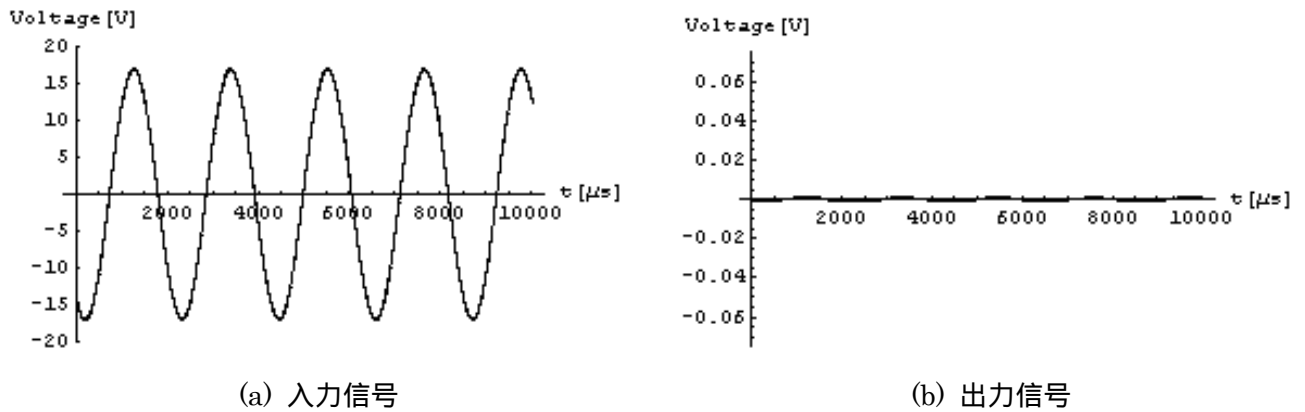


図 1 2 入出力信号

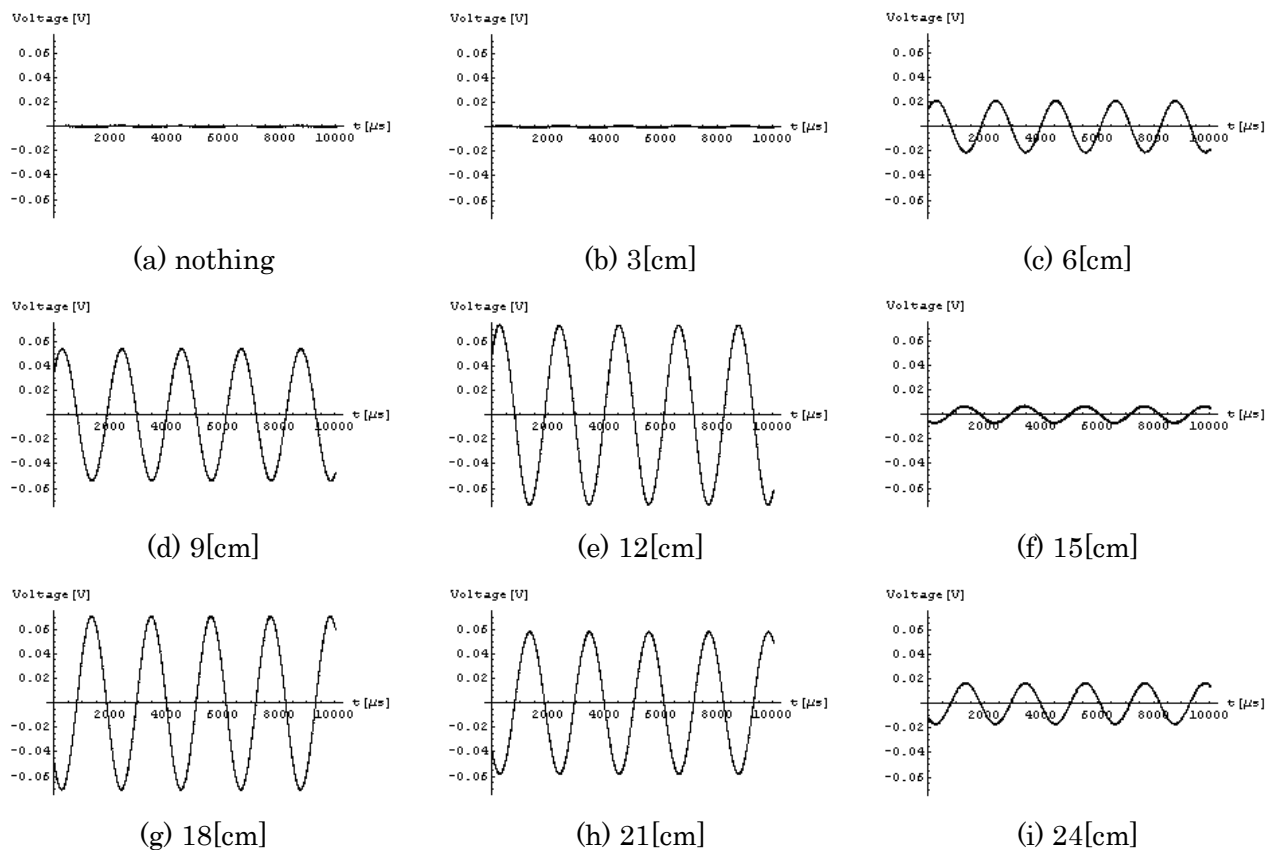


図 1 3 スチール球を移動させた時の出力信号

センサーの中心は、端から 15[cm]に位置することから、金属球が 15[cm]の位置に存在する時、出力波形はほぼゼロとなることがわかる。また、15[cm]を境に出力波形の振幅は反転することが図 1 3 からわかる。

3.2.4 入出力信号を用いた 3 次元リサーチ図

図 1 4、図 1 5 は、スチール球と銅球が移動時に於ける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 次元リサーチ図である。

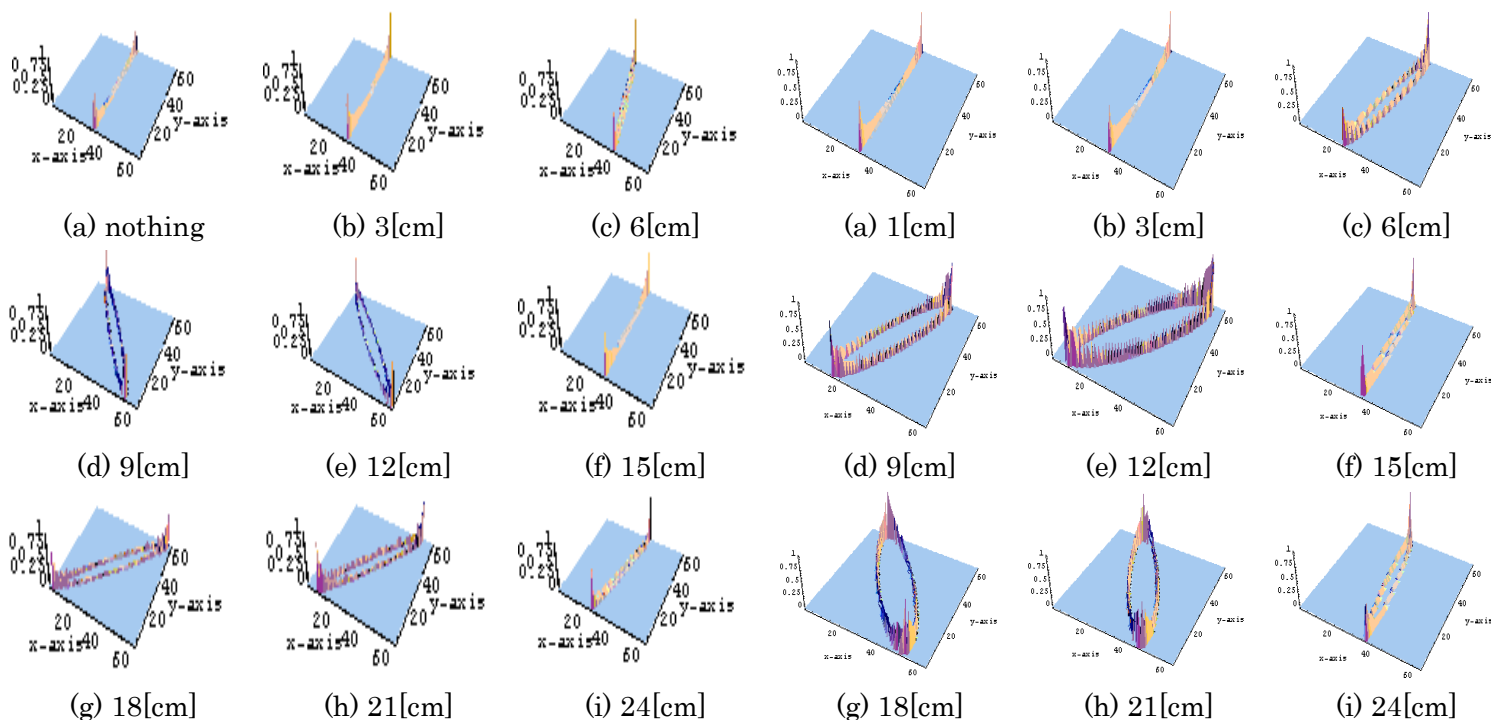


図 1 4 スチール球の 3 次元リサーチ図

図 1 5 銅球の 3 次元リサーチ図

図 1 4、図 1 5 の比較からわかるように、リサーチ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。

3.2.5 識別結果

図 1 4 の 3 次元リサーチ図を用いて 2 章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 1 6 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識別された画像である。

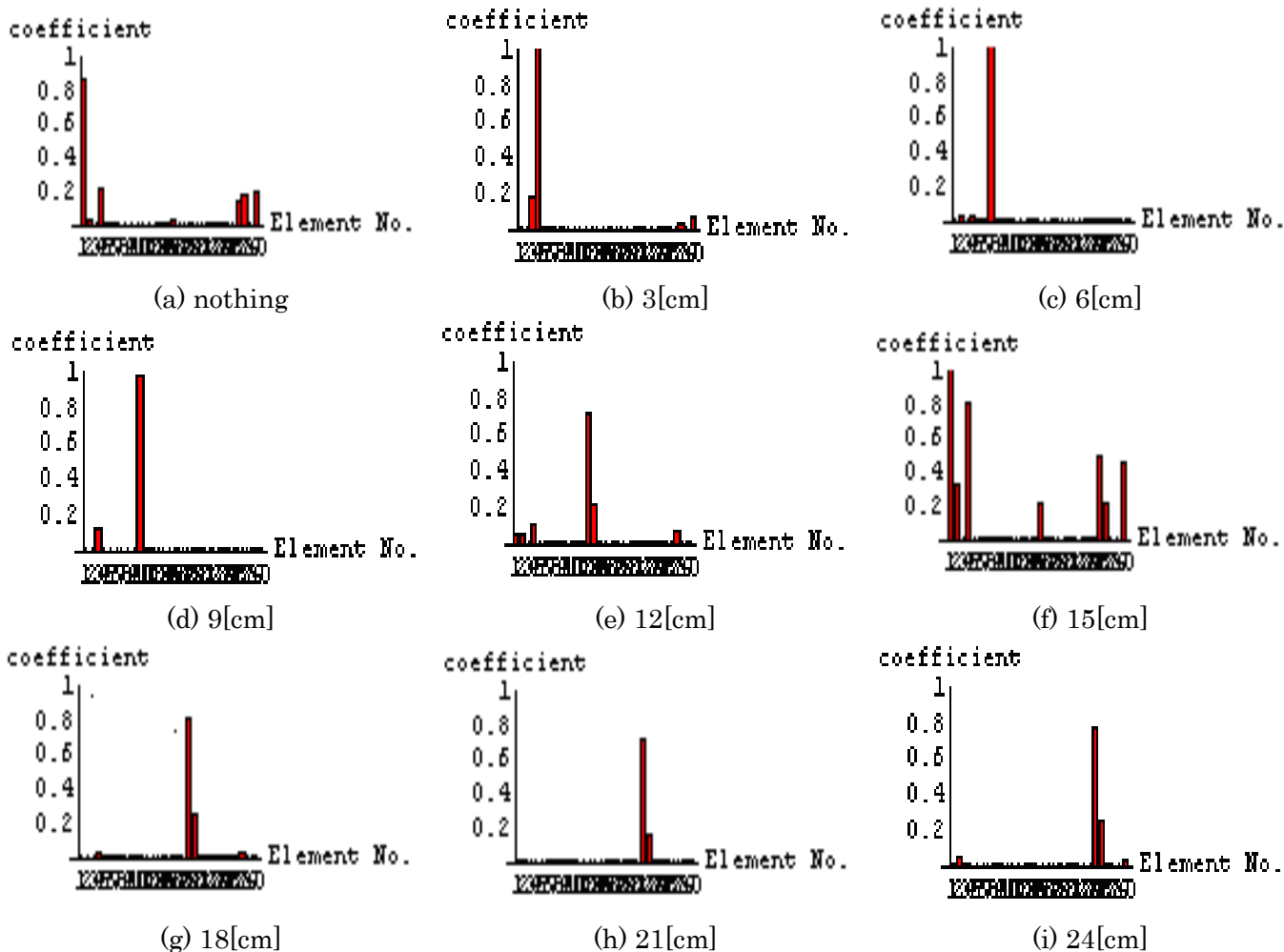


図 16 スチール球の解ベクトル X の要素

識別結果を表 3 に示す。また、表 3 のトータルは、スチール・銅・アルミ球を各々測定した時の 30 点を合わせた 90 点を識別した結果である。表 3 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。そのうち、誤った識別は、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、非磁性体である銅・アルミ球がターゲットである場合、センサー端部で出力が低下する。

表 3 2[cm]球用の識別結果

30 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(90 点)
誤識別個数[個]	3	6	5	17
識別率[%]	90	80	83	81

3.2.6 誤識別の解決策

3.2.5 節で述べたように，誤識別は，図 1 7 で示す差動コイルの両サイドの外側 5[cm] の出力が低い場所で起こっていた．そこで，金属が存在し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 点のデータを用いて再度識別を行ない，その結果を表 4 に示す．

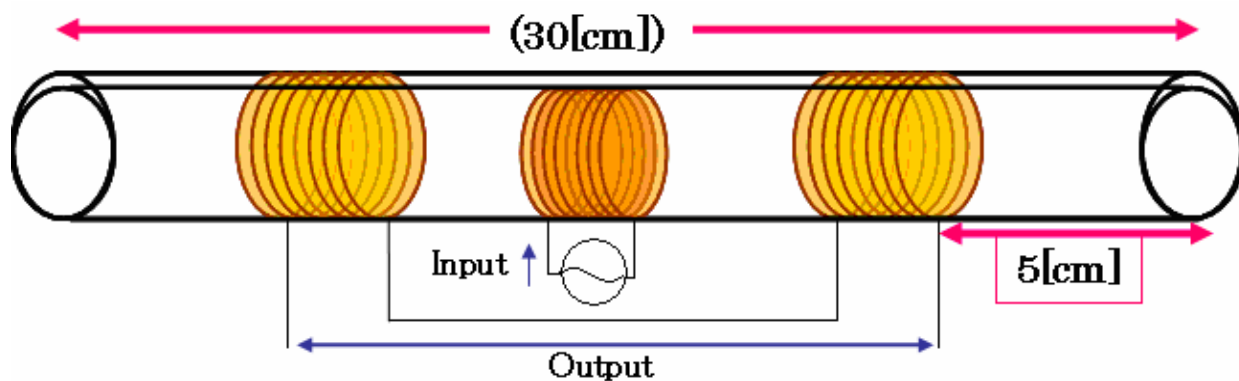


図 1 7 磁気センサーの略図

表 4 2[cm]球用の識別結果

25 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(75 点)
誤識別個数[個]	2	2	0	4
識別率[%]	92	92	100	94

表 4 の結果より，出力の低い部分の両サイドを取り除くことにより，再現性が高い有力な出力が得られ，9 割以上の識別が可能となることがわかる．この結果より，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．

また，金属球の位置識別実験の追加実験について付録 B に記す．

3.3 まとめ

本章は，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，また金属球の位置識別においては，有効出力が得られる場合，良好な位置識別が可能であることを述べた．

特筆すべきは，有効な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点にある．このことは 3 次元リサージュ図法と画像識別技術が時系列信号のコンピュータによる評価法として有用であることを示唆し，知的センサーによる非破壊検査の一方法として期待できることを意味する．

第 4 章 単一信号識別

3 章ではリサージュ図を描くにあたり入力信号と出力信号の 2 信号を用い 3 次元リサージュ図を利用した。しかしながら，本章では，音声信号など入力信号の測定が事実上不可能な場合を想定し，出力信号だけによる信号識別または信号評価の可能性に関し検討を行う。

4.1 サンプル

3 章の空き缶識別で使った図 3 の空き缶を用いて缶の識別を行なう。今回は，音声信号など入力信号の測定が不可能な場合を想定し，磁気センサーから得られる出力信号のみを用いて 3 次元リサージュ図を作成し，缶の識別を行なう。3 章同様，アルミ缶 4 個(サンプル 1 ~ 4)とスチール缶 5 個(サンプル 5 ~ 9)の 9 個の空き缶の識別，また形状の識別を計算機で識別することを目標とする。

4.2 試作磁気センサーと出力信号

3 章の図 4 に示した試作磁気センサーを用い，缶の識別データを得る。この磁気センサー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 3 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 3 に示されている個々の缶を識別する。

図 6 に示したそれぞれの缶を用いた時の出力信号のみを用いて，缶の識別を行なう。

4.3 単一信号から 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)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。2)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。3)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包含されるためである。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 3)のターゲット金属の物性・形状・大きさ情報（センサー信号の振幅情報）に焦点を当て，空き缶識別に関する

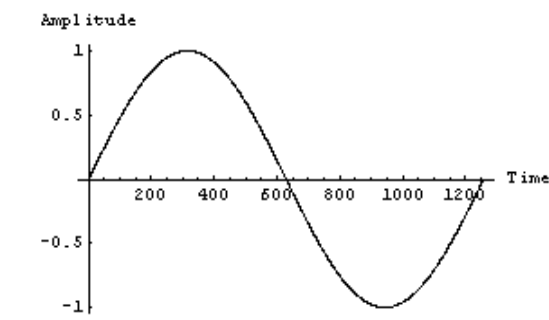
検討を行う。

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。

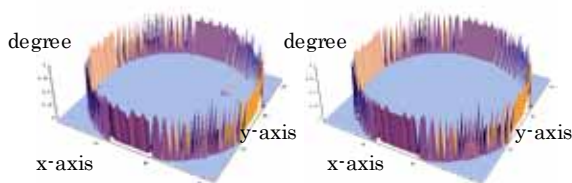
一方は時間位相が 90 度進んだ信号であり、原信号を時間軸方向へ積分することで得られる。他方は時間位相が 90 度遅れた信号であり、原信号を時間軸方向へ微分することで得られる。

図 1 8 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 1 9 は、一様乱数で生成した図 1 8 に示す正弦波の 5% 振幅を持つノイズを図 1 8 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 1 8 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。



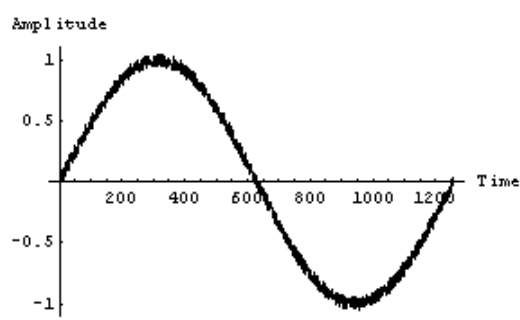
(a) 正弦波 (原信号)



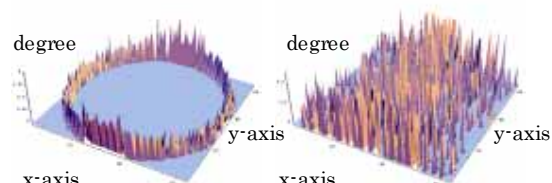
(b)積分型

(c)微分型

図 1 8 信号波形と 3 次元リサージュ図



(a) ノイズを含んだ正弦波 (原信号)



(b)積分型

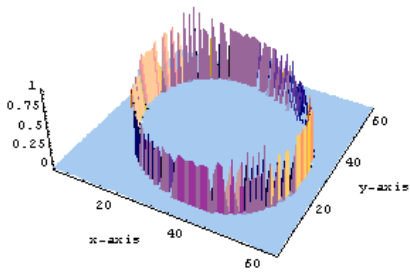
(c)微分型

図 1 9 ノイズが重畳した信号波形と 3 次元リサージュ図

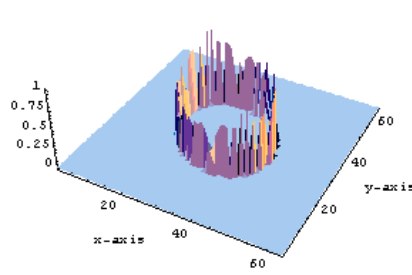
4.4 出力信号から作成した 3 次元リサージュ図

図 6 の出力波形の単一信号を用いて 3 次元リサージュを作成する為、4.1.3 節で説明したように、原信号を時間積分し、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。図 6 の出力波形と、出力波形よりも 90 度位相の進んだ信号を用いた 3 次元リサージュ図を図 2 0 に示す。

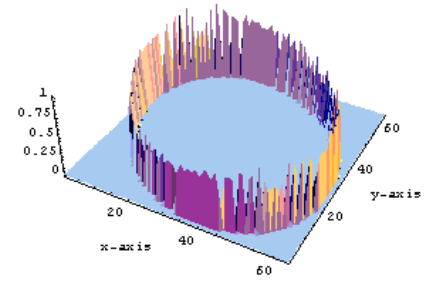
3 章における図 7 の 3 次元リサージュ図では、アルミ缶とスチール缶の違いが位相差として表現されていた。それに比較して、図 2 0 では位相差情報は削除され、センサー信号の振幅情報のみで 3 次元リサージュ図が描かれていることがわかる。



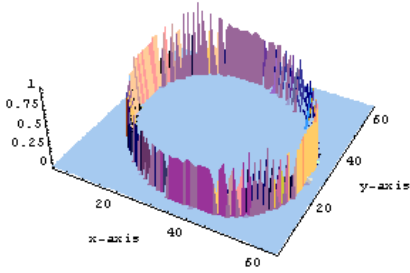
(a) サンプル1 (アルミ缶)



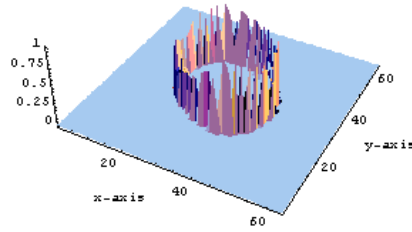
(b) サンプル2 (アルミ缶)



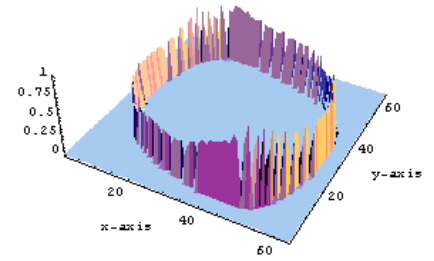
(c) サンプル3 (アルミ缶)



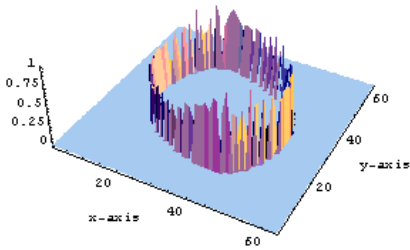
(d) サンプル4 (アルミ缶)



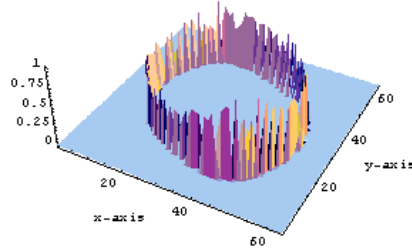
(e) サンプル5 (スチール缶)



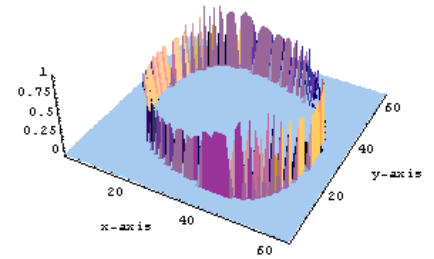
(f) サンプル6 (スチール缶)



(g) サンプル7 (スチール缶)



(h) サンプル8 (スチール缶)



(i) サンプル9 (スチール缶)

図20 3次元リサージ図

4.5 識別結果

第2, 第3章同様に, これらのリサージ図を構成するデータを並べ直して(5)式の入力ベクトル Y を作成し, (8)式の誤差ノルムを最小化する解ベクトルを(9)式を用いて計算する. 誤差ベクトルのノルム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(9)式より(5)式の近似解を得る.

図20の3次元リサージ画像について, 得られた解ベクトル X の要素を図21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.

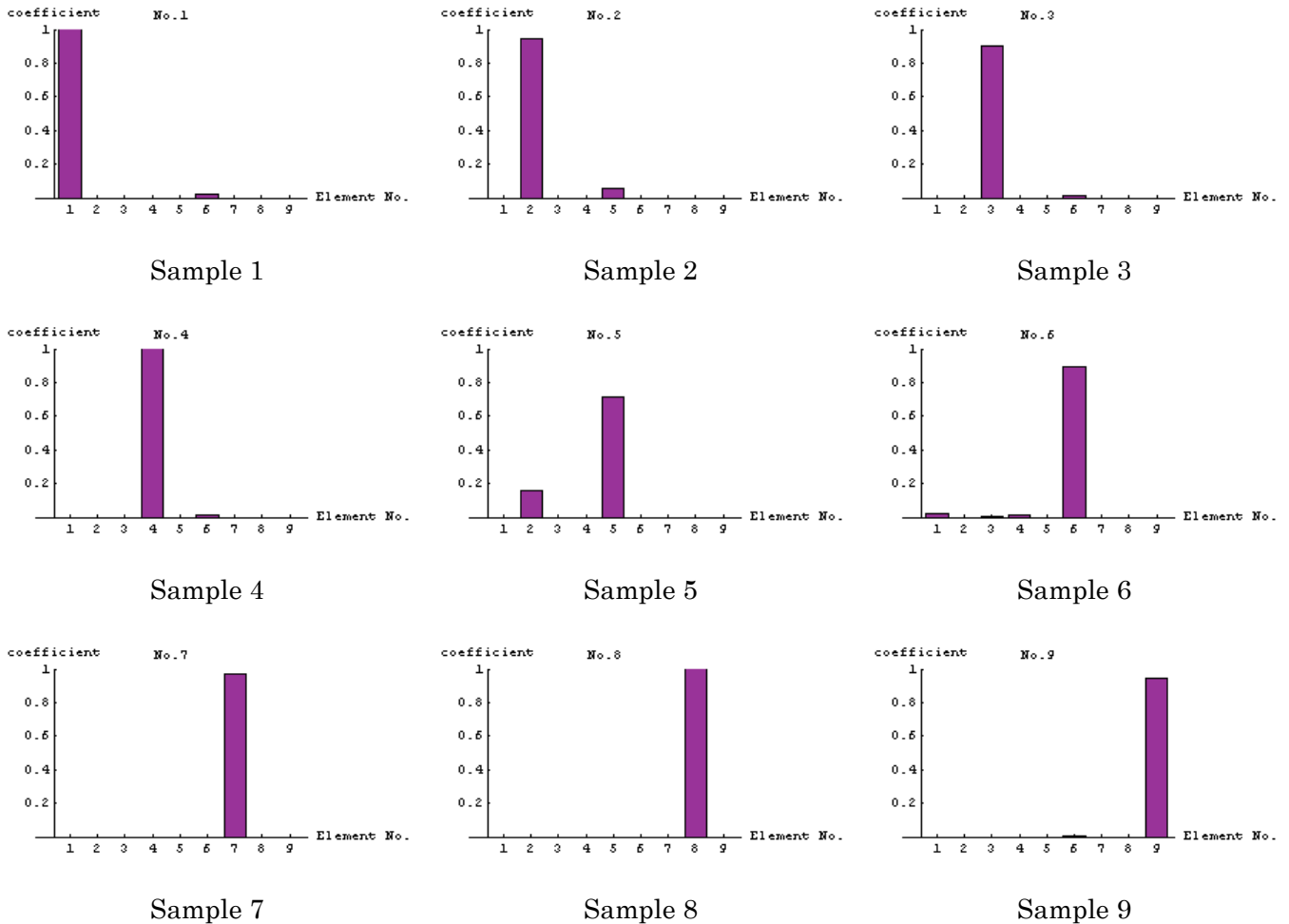


図 2 1 解ベクトル X の要素

図 2 1 は、得られた解ベクトル X の要素であるが、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、他はすべてゼロまたは比較的小さな値である。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。言い換えると、各解ベクトル中の最大値をとる要素番号はデータベース中の認識された画像を示し、すべての缶が磁気センサー信号から識別できたことが分かる。再現性を確認するため 5 回実験を行ったが、すべて認識可能であった。

ここで、3 章で入出力信号を用い 3 次元リサージュ図を作成した場合の識別結果図 8 と、出力信号のみで 3 次元リサージュ図を作成した場合の識別結果図 2 1 を比較すると図 8 の識別結果の方が、SN 比がよいことがわかる。このことは、単一信号で作成した 3 次元リサージュ図は、入出力信号の 2 信号から作成する 3 次元リサージュ図の情報量で劣る為に、識別の SN 比も低下することを意味する。すなわち、信号数が増えるほど識別精度が上がるということが了解できる。しかしながら、この章で述べた単一信号で作成した 3 次元リサージュ図を用いた識別結果は、空き缶を全て識別可能であり、SN 比も比較的良好であり、信号識別に有効であることがわかる。

4.6 まとめ

ここでは、音声信号などの様に、入力信号の測定が不可能である場合の信号評価方法として、出力信号だけによる信号識別・評価方法に関して検討を行った。その結果、識別率もしくは、識別可能な情報量が3章で述べた入出力信号を用いた場合と比べると多少低下するものの、空き缶の識別に関しては識別が十分可能であることが判明した。言い換えれば、センサー信号がターゲットの各種情報を包含していることは確実であり、識別率に影響を及ぼす可能性は多少あるが、一方では、出力信号だけを用いた信号識別・評価が十分に可能であることが判明した。

しかし、3章の結果と比較すると識別のSN比が多少下がったことから、情報量が少なくなれば識別の精度も下がるということはさけられない。

第5章 生体磁気信号識別

自動認識技術としてバーコード、情報を電子回路に記憶した IC タグ・無線タグを用いたもの、磁気カードなるものが世に出ており、現在では生体認識として声、顔、指紋、網膜、虹彩などを認識するものや、カメラ等で読み込んだ画像データをコンピュータによって認識する技術が、商品化されて売り出され、さらに精度や技術向上を目指し研究が進められている。

この中の音声信号について、4章で述べた手法を用いることで信号識別・評価が十分に可能であることはすでに筆者の研究室において示された[2]。

そこで、本章ではこの手法が磁気センサーだけでなく、様々な信号識別・評価に適用可能であることを検証するため、生体磁気信号に適用し、生体信号識別への新たな可能性に関して述べることにする。

厚生労働省が発表している人口動態統計の主要死因別にみた死亡率の年次推移を見ると、20世紀後半の日本は、高血圧をコントロールする国民的取り組みで脳血管疾患の死亡率を劇的に低下させたことが読み取れる。また、癌についても、免疫療法や遺伝子治療の発展等によって、低減への道筋がみえてきている。それに対して、心臓病への具体的な取り組みは今後の課題となっている。

このような現状を踏まえて、生体磁気信号には、心電図や筋電図から脳波まで幅広くあるが、本章では最も人間の生命をつかさどる心臓の動きを計測した心電図波形を用いて検討を行なう。

5.1 心電図

心電図とは、心筋が収縮する際に微細な電流が発生する電気現象を心電計で記録したものである。心電図からわかることとしては、不整脈や心筋の虚血や傷害、心房・心室の肥大や拡大、心膜疾患、電解質異常など命に関わることが数多くあるが、心電図だけでは、全ての心臓の形態や活動について確実に鑑別することは出来ない。しかし、ほとんどの健康診断では、コンピュータ自動解析心電図計を使用しており、心電図の結果判定には心電図の波形異常とその程度をコード化したミネソタコードを用いている。そして、自動診断のプログラムは異常所見を取り過ぎることはあっても、見落とすことは少ないように設定されているので極めて有効な手段といえる。一方で、心電図記録に影響を与える因子としては、皮膚抵抗、呼吸、胸壁の厚さ、心臓の位置、筋肉の震え、服薬、感染症、労作、不安や恐怖、電解質の異常、他に機械自体や操作に関わる要因等数多くあるが、正しいデータを得る為には、リラックスした状態での検査が必要不可欠となっている。すなわち、心電図の信号識別は、波形のピーク間距離や面積などに関する古くからある経験データを集大成したものであり、2～4章で述べたような汎用的な一般時間領域信号識別と原理が根本的に異なっている。その意味で、運動負荷時の心拍波形識別は現在ある診断プログラムにはあてはまらず、まだまだ研究余地のある技術と言える。

そこで、運動負荷時の心拍波形識別を含めたプログラムの確立を目指すことにする。本論文では、この第一段階として、4章で述べた手法を安定した状態で測定した心電図波形に適用し、信号識別・評価が可能かを探ることにする。具体的には、ミネソタ規格のような古くからのデータ蓄積量がない為、初めから心臓病の有無を見極めることが難しいので、心電図波形を用いて人物識別が可能か検証を行なうこととする。

5.2 心電図波形の測定

心電図は、デジタルオシロスコープを用いても対象波形出力が低い為にノイズが大きく、検出が出来ない。そこで、心電図の測定には、医師の診断の補助的な役割を目的として販売されている図 2 2 (a) に示す心電図記憶装置を用いた。さらに、図 2 2 (b) に示す健康管理ソフトを用いてデータを採取した。

測定は 9 人に対して数回行い、各々最も安定した状態の波形を用いることにする。図 2 3 に測定した波形の一例を示す。心電図は通常、得られた波形をレコーダー等で記録紙に印刷するか液晶で表示するのみであるので、測定した波形データはアナログ方式で保存されており、デジタル数値で取り出すことは出来ない。



図 2 2 (a) 東芝心電図記憶装置 SCS-H10R

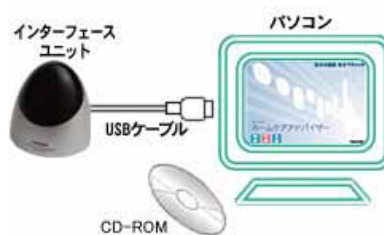


図 2 2 (b) 東芝健康管理ソフト SCS-AD10

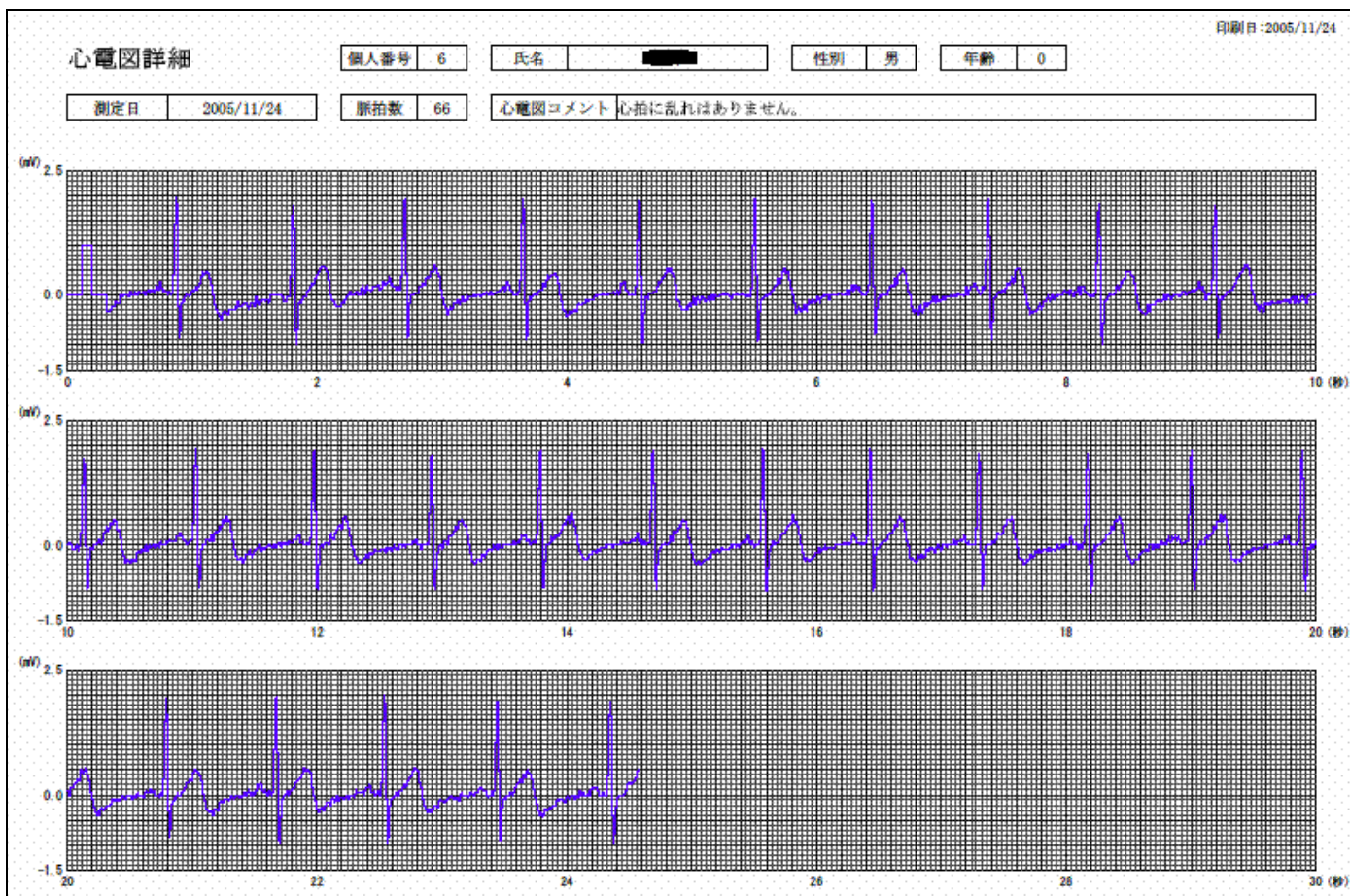
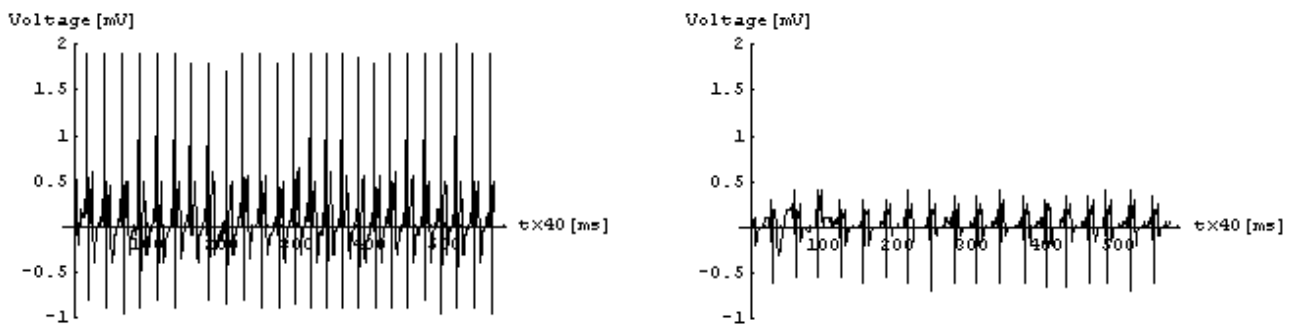


図 2 3 測定波形の一例

5.3 測定波形の取り出し

5.2 節で述べたように，図 2 3 に示した波形はアナログデータであるので，前章で述べた手法を適用するにはデジタルデータが必要となる．そこで，1 メモリの中で波形の動きは細かくあるが，デジタルデータに置き換える為に 図 2 3 から 1 メモリ(0.04[s])刻みでデータを読み取り Excel データへ打ち込み直した．図 2 3 のデータを Excel データに直した波形を図 2 4 (a)に，また異なる人物の波形を図 2 4 (b)に示す．

図 2 4 の(a)，(b)を比較すると人によって，心電図波形に個人差が存在することがわかる．



(a) B君

(b) C君

図 2 4 アナログデータをデジタルデータへ入力し直した波形

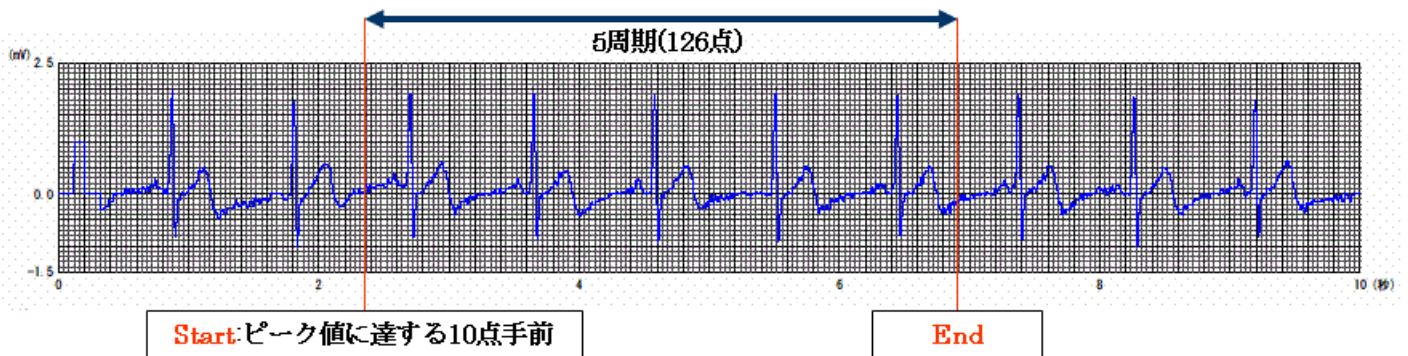


図 2 5 測定波形の一例

図 2 4 に示したデータでは，周期回数を多く含みすぎている為，前章で述べた識別手法に適さない．このため，図 2 5 に示すように図 2 4 の 567 点のデータから始点をピーク値の 10 点手前とし，126 点後のデータを 1 データとして 4 回分のデータを抜き出す．このうち 1 データをデータベースとし，残り 3 データの識別結果を畳み込みして識別を試みる．

抜き出した 9 人分の心電図波形のそれぞれ 1 データを図 2 6 に示す．図 2 6 の心電図波形を比べると，各々異なる波形が出ていることがわかる．

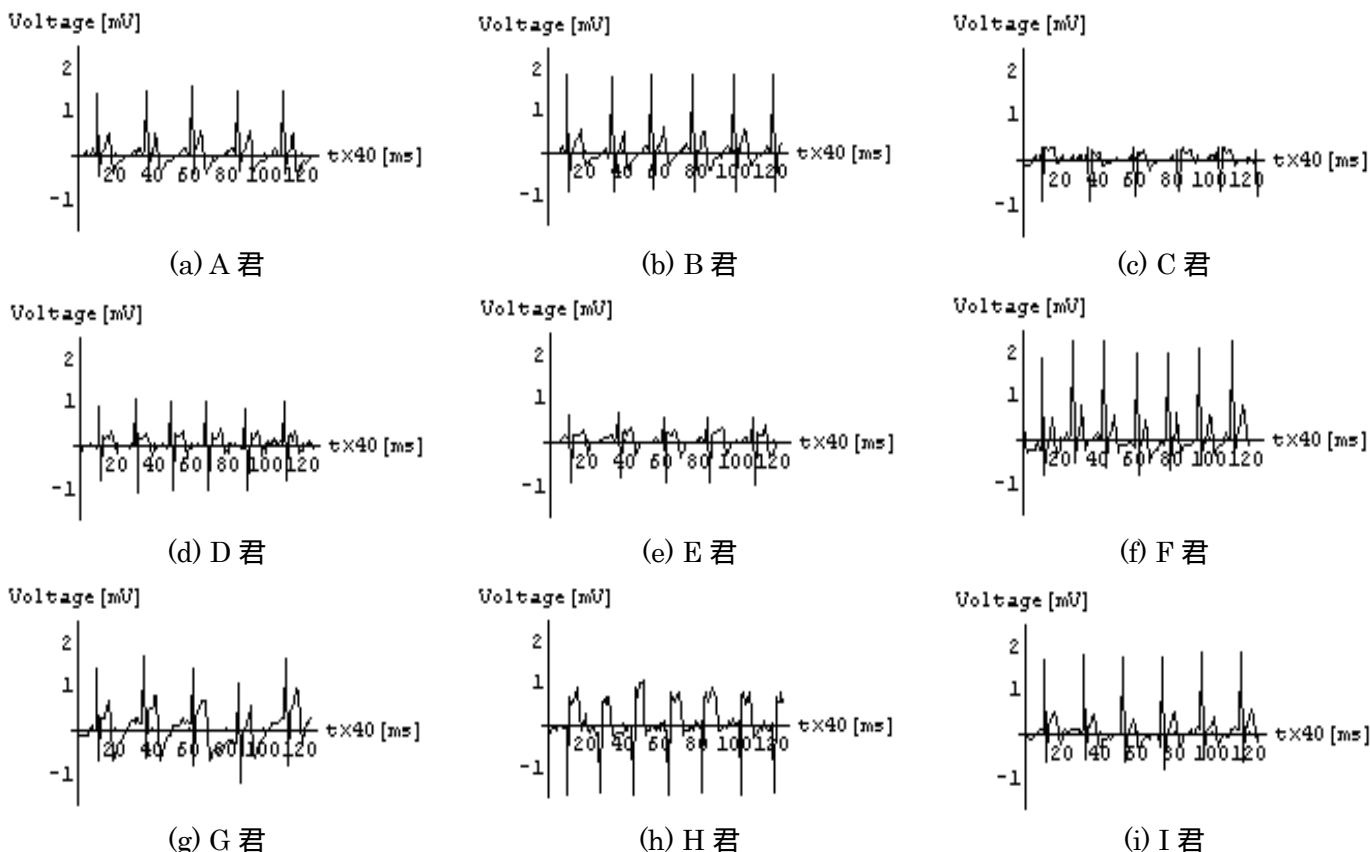


図 2.6 抜き出した心電図波形

5.4 心電図波形の3次元リサージュ図生成と識別結果

4.3 節で述べた手法を用いて心電図波形から3次元リサージュ図を描く。しかしながら、心電図波形は、これまで述べたような磁気センサーから得られる波形と異なり、個人によって周期の長さが異なる。また、個人によっても周期が微妙に異なる。その為、90度位相をずらした波形を生成する手法において、各々の周期を決める必要がある。そこで、各々の波形からそれぞれ周期の平均値を取り、得られた値を個人の周期とし、3次元リサージュ図を描く。

図 2.6 の波形を用いて描かれた3次元リサージュ図を図 2.7 に示す。また、図 2.7 の3次元リサージュ画像について、得られた解ベクトル X の要素を図 2.8 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 2.7 を見ると、磁気センサーで描かれた3次元リサージュ図のような規則性がみられず、まばらなデータが出ていることがわかる。また、図 2.8 の識別結果をみてみると、(g)と(i)に関しては、誤った識別がされていることがわかる。これらの原因として、Excel データとして抜き出した際にデータ数が削減され、特徴信号である振幅の増減が激しい部分が削除されたことが考えられる。このため、3次元リサージュ図を描く場合、ピーク時周辺の特徴が消失し、固有情報の削除となり、結果として、2個の誤識別に繋がったと考えられる。

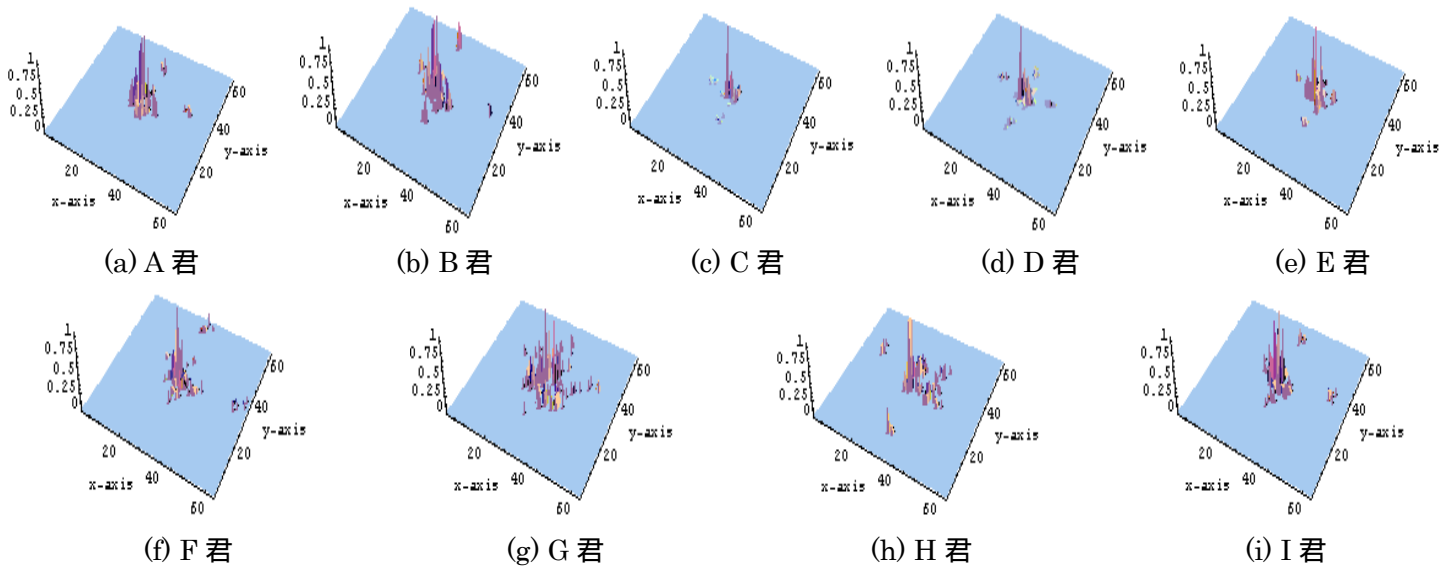


図 2 7 3次元リサージュ図

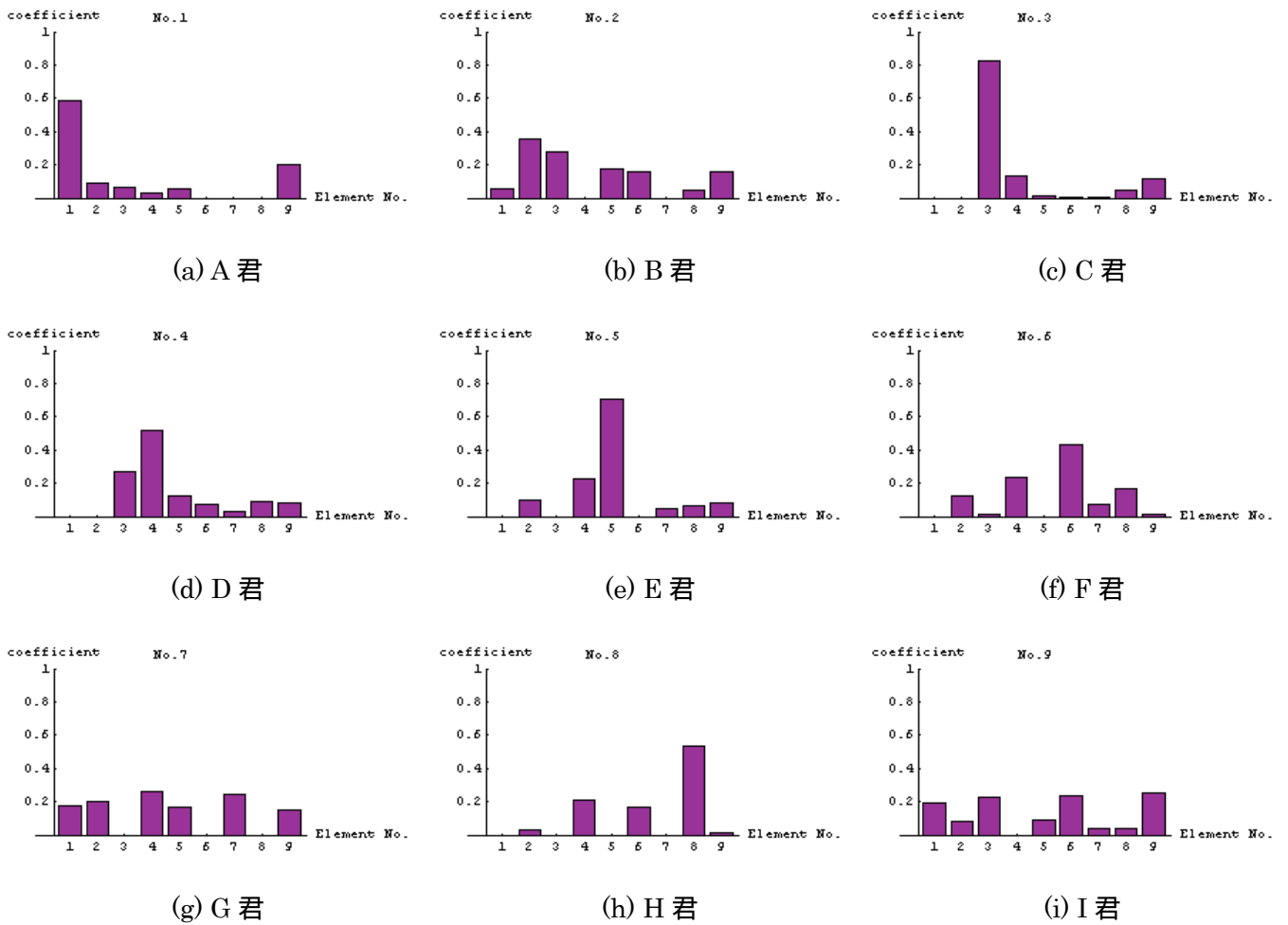


図 2 8 解ベクトル X の要素

5.5 補間による改善

5.4 節で述べた誤識別を改善する策として、図 2 6 に示した波形データの補間を行ない、データ数を増加することでピーク値周辺の変化を滑らかにする。図 2 6 の波形データに 3 回補間を行い、データ数を 8 倍にした波形を図 2 9 に示す。補間を行なうことで、ピーク値周辺の傾きが滑らかになった。

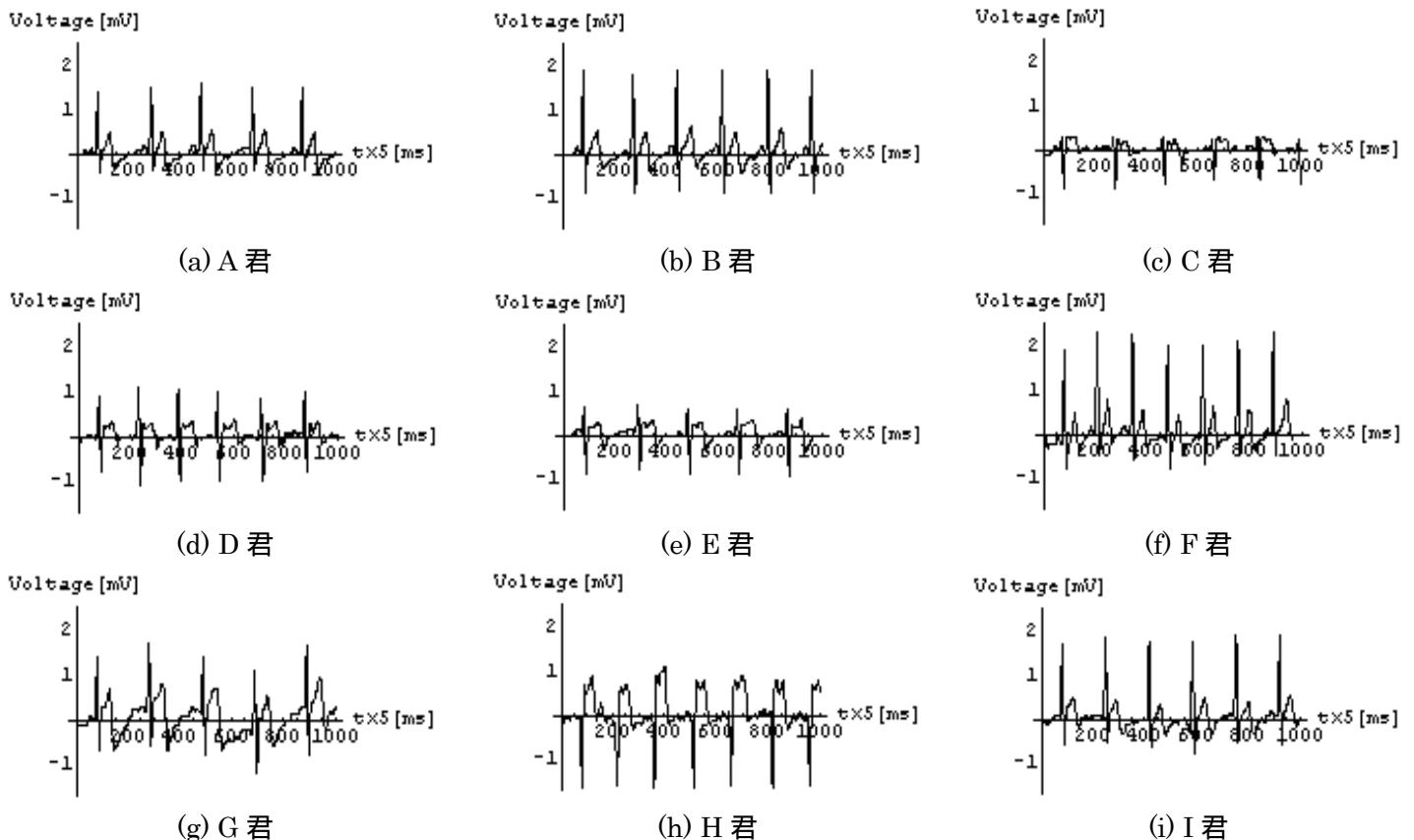


図 2 9 補間で波形データ数を 8 倍にした心電図波形

図 3 0 に図 2 9 の波形を用いて描かれた 3 次元リサージュ図を示す。また、図 3 0 の 3 次元リサージュ画像を用いて得られた解ベクトル X の要素を図 3 1 に示す。

図 3 0 を図 2 7 と比較すると、補間して描かれた図 3 0 では、図 2 7 には見られなかった 3 次元リサージュ図の規則性が抽出されていることがわかる。これは、補間を行なうことで、荒く描かれていた 3 次元リサージュ図が、細かく描かれた為であると考えられる。その結果、図 3 1 の識別結果を見てみると、補間を行なう前に識別できなかった (g) と (i) に関しても正しく識別され、9 人全員の識別が正しく行なわれたことがわかる。また、SN 比も向上することがわかる。

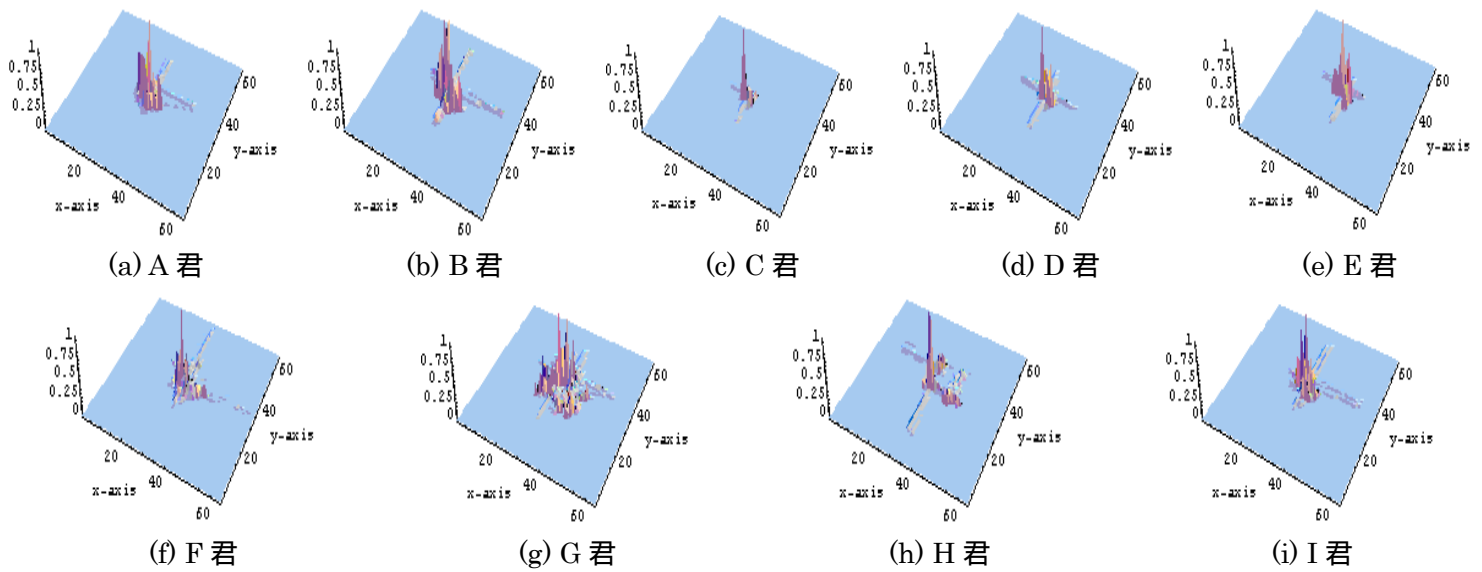


図 3 0 3次元リサーチ図

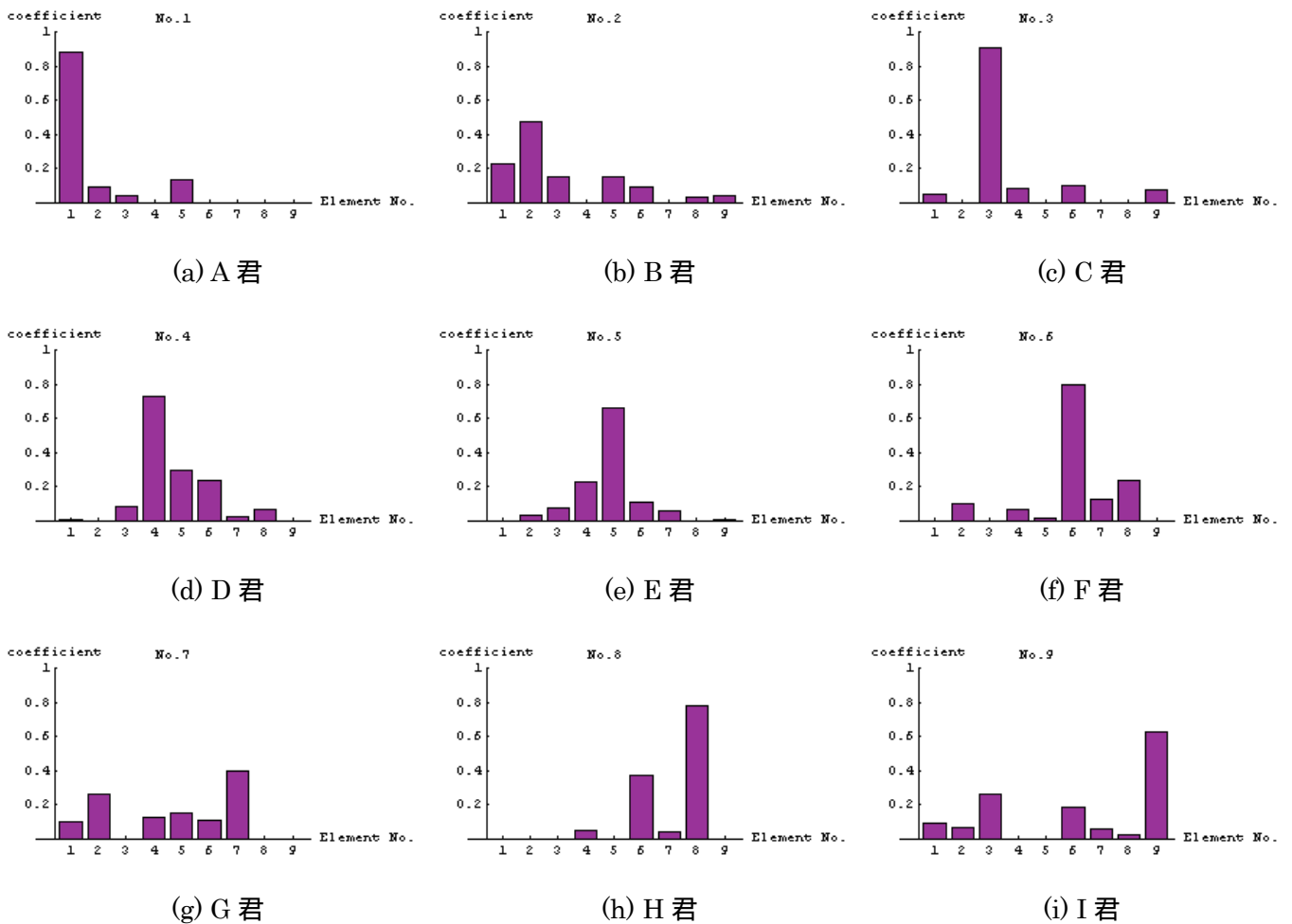


図 3 1 解ベクトル X の要素

5.6 まとめ

本章では、3次元リサーチ法が磁気センサーや音声信号だけでなく、様々な信号識別・評価に適用可能であることを検証するため、生体磁気信号の心電図波形に適用し、生体信号識別への新たな可能性に関して述べた。心電図波形の波形異常検知は、健康診断のコンピュータ自動解析心電図計にミネソタコードとして導入されているが、これは安定時の波形から心電図異常を読み取るものである。また、本論文で用いている識別法とは異なることから、本章では、運動時の心電図波形異常の識別を目指し、その第一歩として、安定時の心電図波形に3次元リサーチ法が適用可能かを人物の識別を通して試みた。

心電図波形は単一信号である為、4章で述べた単一信号識別の手法を用いた。測定した心電図波形からデジタル信号として抽出し、リサーチ図を描くのに必要な情報を抽出し、心電図波形のリサーチ映像情報を生成した。抽出した3次元リサーチ図を用いて線形システム方程式を導き、生体信号識別問題を線形システムの解析問題へ定式化した。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結果、安定した状態で測定した心電図波形を用いれば、個人の識別が可能であることが判明した。

本章の主要な目的は、心電図波形に対して4章で述べた手法を用いることで個人識別の可能性を検討する点にあった。この意味で、所期の目的は達成できたと考える。さらに、今回デジタルデータを必要とし、得られたアナログ波形を読み取り幅が大きかったことから、アナログで得られたデータ程度の解像度でデータを用いることが可能となれば、識別の精度はさらに高くなり、SN比も向上すると考えられる。

以上、心電図波形を用いることで、個人識別が可能であったことから、当初の目的である心電図波形から波形異常検知を行なうことが、3次元リサーチ法を用いて行なえる可能性が非常に大きいと考えられる。すなわち、データ量さえ蓄積出来れば、運動時の異常検知も行なえると考えられる。

また、心電図波形データに心拍数や血圧値、体重や体脂肪率等のデータを組み合わせることで、さらに異常感知の精度向上が期待できる。

第6章 結 論

本論文では、時間領域信号の特徴を抽出する手法として、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する手法、信号評価方法として画像認識技術をそれぞれ採用した。

具体的な例題としては、空き缶の種類識別、金属球の位置識別、さらに、生体磁気信号識別への適用可能性に関して実験を行った。その結果、磁気センサー信号識別問題だけに拘わらず、生体磁気信号識別問題に関しても、3次元リサージュ図が1次元時系列信号の特徴を効率良く抽出し、良好な識別結果を得た。特筆すべきは、有効な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点にある。このことは3次元リサージュ図法と画像認識技術が時系列信号のコンピュータによる評価法として有用であることを示唆し、知的センサーによる非破壊検査の一方法として期待できることを意味する。また、運動時の心電図波形異常波形検査に適用できるという可能性が示唆された。

補足として付録に、3次元リサージュ図法が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手法に対し、過渡状態を前提とする Svip のツールとして開発された等価固有値法について述べた。そして、等価固有値法がノイズを拡大するという欠点を、加算平均処理を適用することでノイズを取り除くことが可能であることを述べた。

総合的にみると、電子・電気回路の電流および音声信号、生体磁気信号である心電図波形などは、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補足で述べた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の可能性が判明した。

付録 A 磁気センサー信号処理

本稿は Svip のツールとして開発された ECV (Equivalent Characteristic Value)法がノイズを拡大する欠点を克服するため、実験データへ繰り返し加算平均処理を適用し、ノイズの影響を減らすことが可能であることを述べる[5]。ECV の応用例として、ECV から得られた実部と虚部を用いた固有パターンの作成手法を述べる。

A.1 等価固有値(Equivalent Characteristic Value)

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り、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 を抽出する考え方に基づく[6]。

A.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 A.1 のように時間変化する。図 A.1 の任意の時点 $n\Delta t$ における電流は式(a1)で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + \left[i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t} \right] e^{-\lambda\Delta t} \quad (\text{a1})$$

R-L 直列回路の等価固有値 ECV は式(a2)で与えられる。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right] \quad (\text{a2})$$

図 A.1 の波形に式(a2)を適用して得られる ECV を図 A.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。

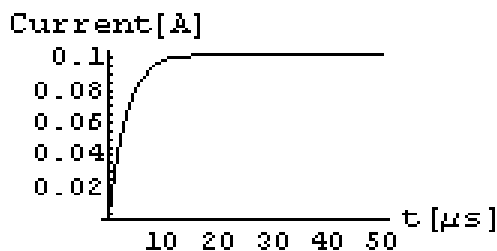
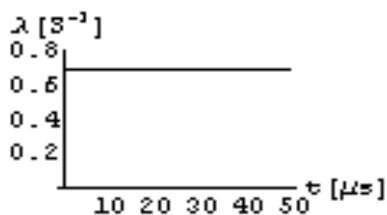
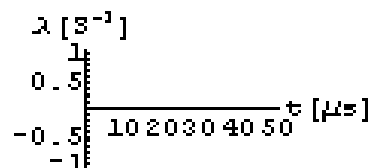


図 A.1 R-L 直列回路の過渡電流



(a) 実数部



(b) 虚数部

図 A.2 図 A.1 における電流の ECV

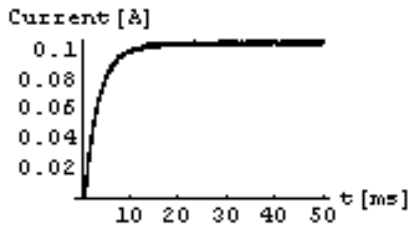
直流電圧入力に対する応答から ,ECV は正確に計算される .しかし ,交流入力に対する応答信号からは ,信号の時間変化率が小さい部分でノイズが生ずる .このノイズを削減するため ,ECV を加算平均処理し ,ECV 値の実数部は入力に依存せずシステムに固有の値を取り ,虚数部は交流入力の角周波数へ対応する ECV 値へ収束することは既に報告した[7] .

A.3 実験による電気回路の ECV

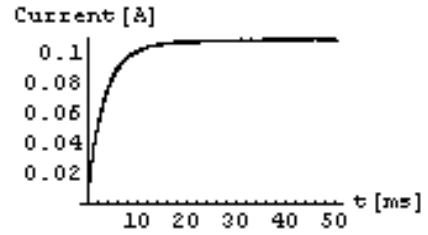
シミュレーション同様 ,R-L 回路を用いた実際のデータを取る .150 回巻きの試作コイルを用い ,400[Hz] 時の抵抗 $R=98.23[\Omega]$, $\omega L=2.677[\Omega]$ で得られた波形を図 A.3(a)に示す .実際の実験データにはサンプリングノイズが含まれており ,加算平均処理を用いて ,ECV 値を出しても図 A.4 に示すようノイズが抽出されてしまう .

A.4 繰り返し一般加算平均処理によるノイズ処理

ECV 法は ,双曲線関数の指数部を抽出するため ,Log 計算を用いている .その為にノイズを拡大する作用が働き ,加算平均処理だけではノイズを取り除くことが出来ない .そこで ,一般加算平均処理を繰り返し行なうことで ,隣同士のデータのバラツキを減らし ,指数関数上にデータを集めることが可能になる .一般加算平均処理を 1000 回行った結果 ,図 A.3(b)のようになり ,これから得られる ECV 値は ,図 A.5 に示したようになる .加算平均処理を繰り返すことで ,データ数が減るといふ欠点はあるものの ,図 A.5 を見てわかるようにノイズ処理され ,シミュレーションとほぼ同様の結果が得られることがわかる .

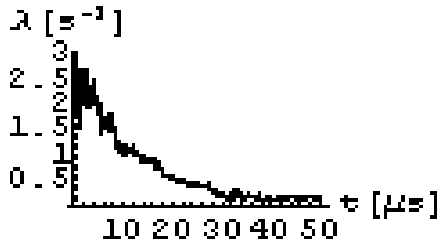


(a) 実験データ

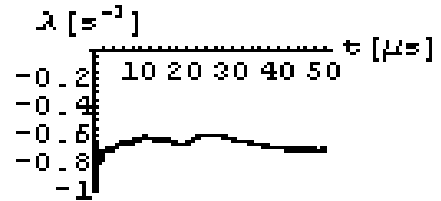


(b) ノイズ処理後のデータ

図 A.3 R-L 直列回路の過渡電流

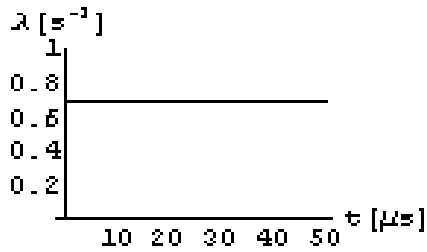


(a) 実数部

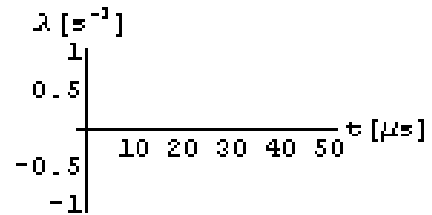


(b) 虚数部

図 A.4 図 A.3(a)における電流の ECV



(a) 実数部

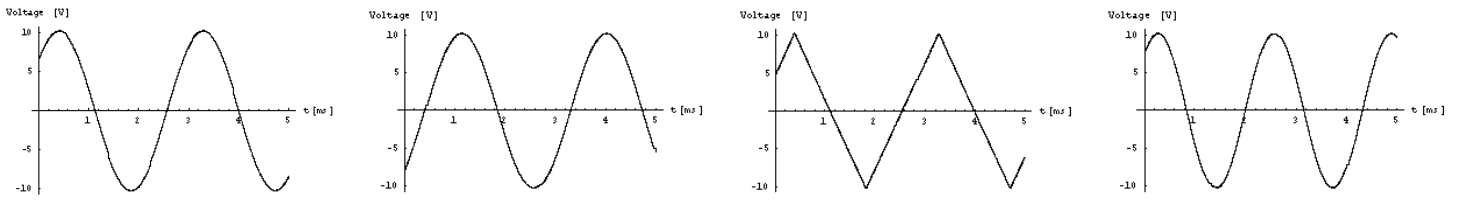


(b) 虚数部

図 A.5 図 A.3(b)における電流の ECV

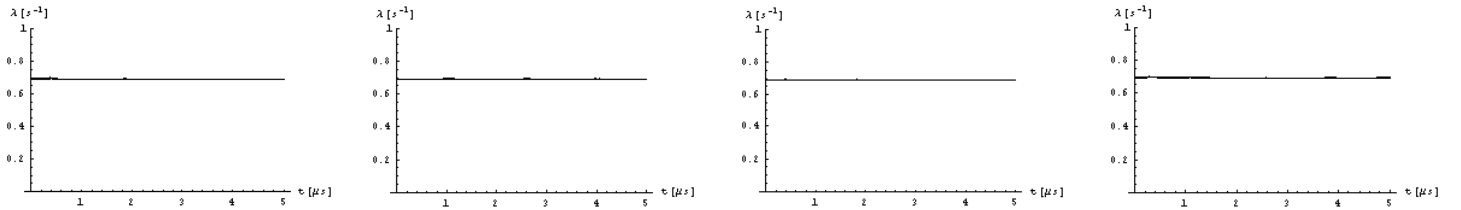
次に交流電圧を印加した波形，さらに波形・位相・周波数を変えた場合の実験データに，さきほどと同様に一般加算平均処理を繰り返し行ない，ノイズを削減した波形を図 A.6 に示す．また，図 A.6 に ECV を適用して得られた実数部を図 A.7・図 A.8 へ，虚数部を図 A.9 へ示す．

いずれの波形においても，一般加算平均処理を繰り返し行なうことで解析解の ECV 値とほぼ同様の結果が得られる．さらに ECV 値の実数部について詳しく見てみると，波形・位相・周波数を変化させても ECV の実数部はほぼ一定値に決まっていることから，実数部は，入力に依存せずシステムに固有の値を取ることがわかる．



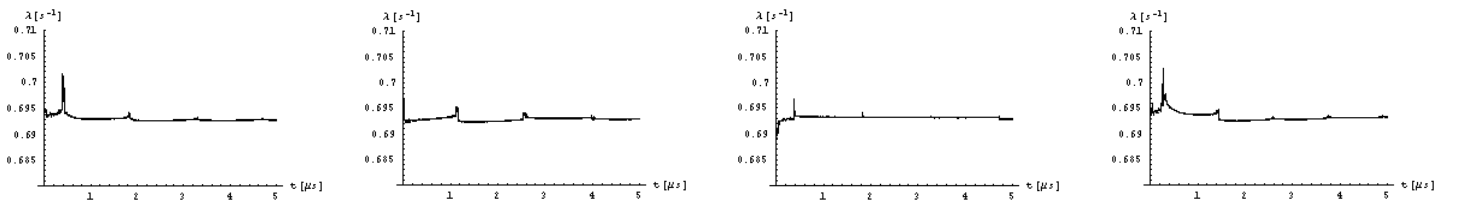
(a) 交流入力 (b) 位相変化 (c) 波形変化(三角波) (d) 周波数変化

図 A.6 交流電圧入力に対する応答信号(R-L 直列回路)の実験データ (一般加算平均処理)



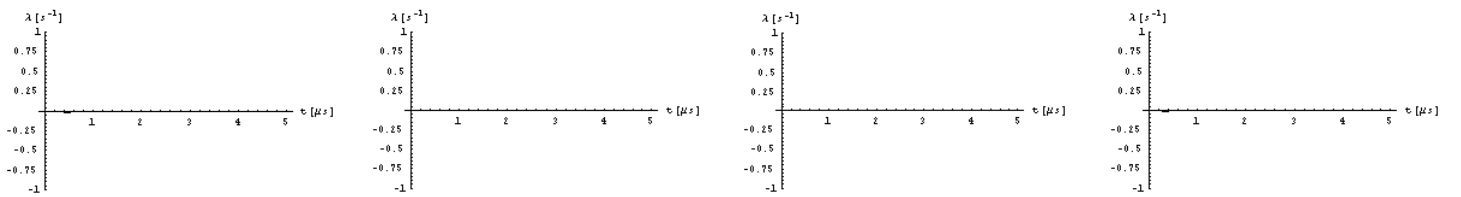
(a) 交流入力 (b) 位相変化 (c) 波形変化(三角波) (d) 周波数変化

図 A.7 図 A.6 の ECV 実数部



(a) 交流入力 (b) 位相変化 (c) 波形変化(三角波) (d) 周波数変化

図 A.8 図 A.6 の ECV 実数部の拡大



(a) 交流入力 (b) 位相変化 (c) 波形変化(三角波) (d) 周波数変化

図 A.9 図 A.6 の ECV 虚数部

今回は R-L 回路についての考察を行なったが、R-L 回路と同様のシミュレーション・実験を R-C 回路に関しても行なったところ同様の結果が得られた。

A.5 等価固有値法を用いた固有パターン

等価固有値法を用いた固有パターンは ECV 値の実数部分と虚数部分で修正リサージュ図形から作成される。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[6]。固有パターンの一例を図 A.10 に示す。図 A.10 は系の物理的特徴を抽出している。

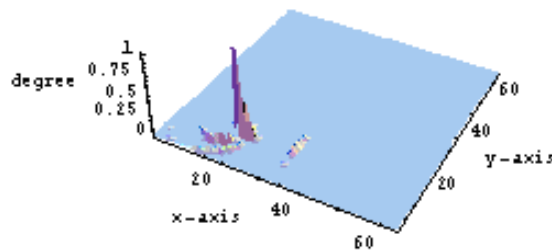


図 A.10 固有パターンの一例

A.6 まとめ

本稿は Svip のツールとして開発された ECV (Equivalent Characteristic Value)法がノイズを拡大する欠点を克服するため、実験データへ繰り返し加算平均処理を適用し、ノイズの影響を減らすことが可能であることを述べた。ECV の応用例として、ECV から得られた実部と虚部を用いた固有パターンを作成し、ライン信号識別を以前試みた[5]。しかしながら、センサーから得られた信号の ECV 値の虚部の値が極めて小さく正確な固有パターンが得られず、ライン信号識別は不可能であった。

その為、繰り返し加算平均処理は、ノイズ削減に有効である反面、高周波情報の削減や最適加算平均回数等の問題があり、フーリエ解析やウェーブレット解析を用いたノイズ処理を試みる必要がある。

他方、本論文で述べたライン信号の可視化法として提案した 3 次元リサージュ法は信号識別問題に対して極めて有効な手段である。

[B] 金属球の位置認識の追加実験

この付録 B において，3.2 節で行なった金属球の位置識別の追加実験について述べる．

B.1 試作磁気センサーとサンプル金属球

3.2 節で行なった 2[cm]球の実験と同様に，1[cm]球の金属球を用いて同様の実験を行なう．図 B.1 に試作した金属球の位置認識磁気センサーを示す．この試作磁気センサーのコイルに関する諸定数を表 B.1 に示す．2[cm]球と同様，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が与える．センサーの入出力信号を用いてターゲットの位置認識に関する検討を行う．

表 B.1 1[cm]球用のコイルに関する諸定数

コイル	巻数[回]	コイルの直径	コイルの長さ	コイルの素材
励磁コイル	100	25[mm]	55[mm]	直径 0.6[mm]のホルマル線
差動センサコイル (両端とも同一仕様)	60	16[mm]	30[mm]	直径 0.6[mm]のホルマル線



図 B.1 試作磁気センサー

図 B.2 に位置認識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 10[mm]の球である．各球をセンサーの端から端まで 1[cm]毎に移動しセンサーの入出力信号を 30 点測定する．センサーの中心は，端から 15[cm]に位置する．



(a) サンプル 1 (スチール球)



(b) サンプル 2 (銅球)



(c) サンプル 3 (アルミ球)

図 B.2 実験に用いた 1[cm]金属球

B.2 認識結果

3.2 節同様，図 B.2 に示した金属球を図 B.1 の試作磁気センサー内を移動させ，励磁コイルの入力信号と差動コイルの出力信号を用いて 3 次元リサージュ図を描き，最小二乗法を用いて位置識別を試みる．識別結果を表 B.2 に示す．

また，3.2.6 節と同様，誤識別を減らす為に，センサー出力の低い両サイド 5 点ずつを除いた 20 点の識別結果を表 B.3 に示す．

表 B.2 1[cm]球用の識別結果

30 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(90 点)
誤識別個数[個]	5	9	6	22
識別率[%]	83	70	80	76

表 B.3 1[cm]球用の識別結果

20 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(60 点)
誤識別個数[個]	0	1	0	3
認識率[%]	100	95	100	95

識別結果をみてわかるように，出力が十分得られるデータを用いれば，1[cm]の金属球においても位置識別が可能であることがわかる．

B.3 同一センサーによる異なる大きさの金属球識別

3.2 節，B.1 節で述べた位置識別は金属球の大きさに応じて磁気センサーを試作し，実験を行なった．そこで，3.2 節で述べた 2[cm]球用の磁気センサーを用いて 1[cm]球について実験を行い，さらに 2[cm]球についても再度実験を行い，大きさの異なる金属球の位置識別が同一センサーで可能かを検証する．

今回は，出力の低い部分である両サイドを削除した波形を用いて識別を行なった．1[cm]球の識別結果を表 B.4 へ，2[cm]球の識別結果を表 B.5 へ示す．また，1[cm]球と 2[cm]球の 3 次元リサージュ図を同系列に並べて識別を行なった結果を表 B.6 へ示す．

表 B.4 1[cm]球用の識別結果

20 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(60 点)
誤った識別個数[個]	5	5	4	16
識別率[%]	75	75	80	73

表 B.5 2[cm]球用の識別結果

25 点測定結果	スチール	銅	アルミ	トータル(75 点)
誤った識別個数[個]	3	1	0	12
識別率[%]	88	96	100	84

表 B.6 1[cm]+2[cm]球の識別結果

1[cm]+2[cm]球	トータル(135 点)
誤った識別個数[個]	33
識別率[%]	76

表 B.5 と 3.2 節の表 4 を見比べるとわかるように、同一センサーを用いて同一の大きさの金属球を計測したにも関わらず、3.2 節では、3 個の金属球を同系列上に並べて識別を行なった結果が 94% だったのに対してここでは 84% に識別率が低下している。これは、計測時のデータの取り方の習熟度等が、この誤差を生んだと考えられる。しかしながら、単一の金属球では位置識別が 9 割以上行なうことが出来、金属の種類も区別するのに 8 割以上の識別率が得られている。

また、表 B.4 を見ると、B.2 節の結果と比べると識別率が非常に低いことがわかる。やはり、2[cm]球の大きさに合わせた磁気センサーを用いて計測したことによって、出力が低下し、識別率が下がったと考えられる。すなわち、当然のことではあるが、その球の大きさに合わせた磁気センサーを作成することが最も識別率を向上させる。

しかしながら、表 B.6 を見る限り、金属球の大きさ・種類・位置の全てを一度に識別を行なっても 75% 以上の識別率が得られていることから、総合的に見て 3 次元リサージュ図法は、位置識別に非常な有効な手段であることがわかる。

参考文献

- [1] 木村祐二,早野誠治,斎藤兆古,堀井清之:ライン信号の可視化と信号認識,可視化情報学会誌,vol.24, No.1, pp.235-238, 2004
- [2] 妹尾 勇:信号認識と磁気センサー,2001年度法政大学修士論文,2002
- [3] 斎藤兆古:*Mathematica*によるウェーブレット変換,朝倉書店,1996
- [4] 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
- [5] 河村憲作,早野誠治,堀井清之,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, vol.33, No.1, pp.63-66, 2005
- [6] 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
- [7] 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ー信号処理,2002年度法政大学修士論文,2003

研究業績

2004年7月 第32回 可視化情報シンポジウム

河村憲作, 早野誠治, 堀井清之, 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, No.1, pp.219-222

2004年度 法政大学計算科学研究センター

河村憲作, 早野誠治, 斎藤兆古: 「等価固有値法を用いた熱伝導率の推定」, 法政大学計算科学センター報告論文

2005年7月 第33回 可視化情報シンポジウム

河村憲作, 早野誠治, 堀井清之, 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, No.1, pp.63-66

2005年11月 可視化情報全国講演会(新潟 2005)

河村憲作, 早野誠治, 堀井清之, 斎藤兆古: 「磁気センサー信号の知的可視化信号処理」, 可視化情報学会誌, No.2, pp.137-138

2005年度 法政大学計算科学研究センター

河村憲作, 早野誠治, 斎藤兆古: 「磁気センサー信号を用いた知的可視化情報処理」, 法政大学計算科学センター報告論文

2006年3月 電気学会マグネティックス研究会 「電力用磁気および磁気応用一般」

河村憲作, 早野誠治, 斎藤兆古: 「インテリジェント差動磁気センサ」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-06-8

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの助言とご指導を頂いた齋藤兆古先生、早野誠治先生、多くの協力を頂いた齋藤兆古研究室・早野研究室の皆様にご心より感謝いたします。