

論文

磁性体に関する論文中のグラフ自動数値化システム[†]小島 正美^{††} 神山 博^{†††} 中道 琢郎^{††††} 川添 良幸^{††††}

本研究の目的は、磁性体に関する論文中のグラフを手人に頼らず自動的に数値化するシステムの設計を行うことである。論文中で提供される情報において、取り分けグラフは大変重要で有用な意義を持つことが多い。グラフを数値化する効用には大きく分けて二つある。すなわち、グラフの持っている有効な情報をコンパクトに格納できる点とグラフの取扱いが容易になる点である。これまでに、任意の 100 論文中からのグラフ抽出には 100% 成功していたが、数値化率は 68% 程度に止まっていた。今回は図領域切り出しの際、極端に切り出し幅が少ないものを除外する新しい処理を追加し、78% まで数値化可能となった。さらに数値化率の向上を図るため多価関数などの複雑なグラフに対して開発中の新しい認識技法についても紹介する。

1. はじめに

磁性体材料は、東北大学金属材料研究所においてこれまで最も重要視して研究されてきた材料の一つである。また、我々が必要としている一次情報としては、現在既に 7,000 件程イメージスキャナで取り込まれ、KIND データベース¹⁾上に蓄積されたものが存在している。

これまで、コンピュータはほとんど数値計算用として発達してきた。しかし、近年になって文字、図形および音声などのパターン認識の分野が急速に発展して来たのに伴い、パターン情報処理におけるコンピュータの発展にも著しいものがある。例えば、文字認識を行うために大きく分けてパターンマッチング法と構造解析法の二つの手法が開発され、広く活用されている²⁾。本研究では、主に文字認識で使われているパターン認識手法のグラフ認識への適用を試みる。従来、出版された文献中のグラフの数値化はデジタイザを用いて手動で行なわれてきた³⁾。我々は論文からのグラフを前に述べたパターン情報処理により自動的に数値化するシステムを構築している^{4,5)}。そこでは任意の論文から 100% 図を切り出すことに成功したが、数値化は 68% 程度までし

か達成できなかった。今回、切り出しの際に極端に切り出し幅が小さいものを除外するという新しい技法を追加することにより約 10% 数値化率を向上させることができた。また、残りの 22% のグラフに対して誤認識の理由を詳細に検討し、数値化率改善のために Variational Connection Vector 法を提案する。本システムの実用化が可能になれば論文からのグラフの自動数値化が容易になり、磁性体材料に関するファクトデータベース構築に多大の寄与が期待される。

本研究の基礎実験である磁性体材料に関する論文からのグラフの認識に関しては第 2 章で述べ、第 3 章に於て複雑なグラフに対する応用のための新手法を紹介する。

2. グラフ部分の切り出しと数値化の基礎実験

金属材料研究所の KIND データベース上にある磁性体材料に関する論文から任意の 100 サンプルについて認識実験を行った。ここでは、図 1-(a) に示す様に文章と図が混在している論文中の 1 頁から図領域だけを抽出し、さらに抽出した図領域からグラフを自動数値化するための基礎実験について述べる。

初めに、図領域抽出のためにイメージスキャナで取り込んだ画像全体の傾きを補正する必要がある。一般に人間が紙を置くという操作に伴いイメージ

[†]Automatic Numeration System for Graphical Data on Magnetic Materials

^{††}Masami Kojima, 東北工業大学

^{†††}Hiroshi Kamiyama, 青森公立大学

^{††††}Takuro Nakamichi and Yoshiyuki Kawazoe, 東北大学金属材料研究所

contributing to the various anisotropy constants sufficiently large). This correlation, on the other hand, does serve to establish a "rule of thumb" of providing preliminary guidance in interpreting the rare earth anisotropy in h-transition metal alloys.

Observed spin reorientations are assumed to be the "simple" Type 2 variety, then the rare earth anisotropy constants, as discussed above, determine the nature of the spin flip transition. A "simple" Type 2 spin flip is defined as one which occurs as a result of the competition between the rare earth anisotropy and the transition metal sublattice anisotropies and has the following characteristics: 1) the moments of the rare earth ions are parallel (or antiparallel) to the Fe sublattice magnetization, 2) as the temperature is raised, the rare earth anisotropy constants decrease in magnitude, their axes in the K_1 , K_2 plane cross neither the axes nor transition boundaries (vide infra) 3) the transition metal contributes only to the transition metal anisotropy (this latter restriction is not necessary, it is generally assumed unless there is direct evidence to the contrary).

Table 2 shows the following inferences can be made concerning ThTiFe_{11} , DyTiFe_{11} , and HoTiFe_{11} .

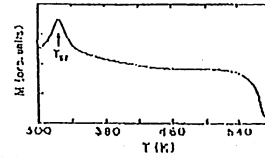


Fig. 1. Magnetization versus temperature curve for ThTiFe_{11} measured on a rough chunk sample in an applied field of approximately 1 kOe.

that follow, will be discussed further in connection with Fig. 4.

4) Since K_{1K} is positive for DyTiFe_{11} and HoTiFe_{11} , the total anisotropy constants for these systems lie in the first and second quadrants of the K_1 , K_2 plane (again assuming all spin reorientations to be "simple" Type 2 [12]). Therefore, these systems are expected to exhibit axis-to-cone (and possibly cone-to-plane) spin reorientations as the temperature is lowered.

5) Since the K_{1K} to K_{1H} ratio is larger for HoTiFe_{11} than for DyTiFe_{11} , the former is less

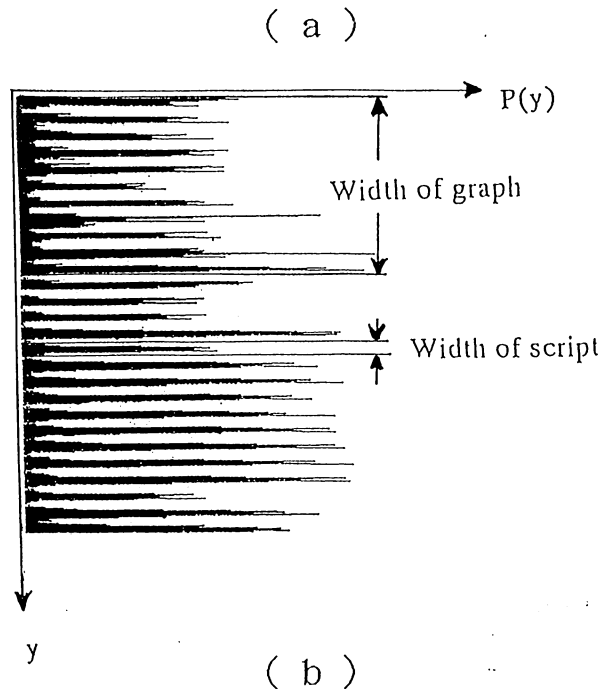


図1 グラフと文章領域とが混在したイメージデータ (文献5) の水平方向の射影 (a) グラフと文章領域とが混在したイメージデータ (b) 水平方向の射影

キヤナで画像データを取り込む場合、絶対座標軸に対して画像全体が ± 5 度以内程度の角度のずれを持つ。この程度の傾き補正には、計算時間および傾き補正の精度を考慮すると LPP (Local Projection Profile) 法⁶⁾が最も適している。LPP 法は文字密度の高い文章領域に適用され、隣合った文章領域の文

字密度の相関が最大となる様な角度を求める方法である。LPP 法により画像全体の傾き補正をした後、図1-(b)に示す様に水平方向の射影を取る。水平方向の射影がゼロでない i 番目の幅を $D_i (i = 1, \dots, n)$ とする。ここで、 n は水平方向射影のゼロでない分割数である。 $\bar{D}$ は幅 D_i の平均値である。もし D_i

contributing to the various anisotropy constants sufficiently large). This correlation, on the other hand, does serve to establish a "rule of thumb" capable of providing preliminary guide-interpreting the rare earth anisotropy in h-transition metal alloys. Observed spin reorientations are assumed to be the "simple" Type 2 variety, then the rare earth anisotropy constants, as determined above, determine the nature of the spin reorientation transition. A "simple" Type 2 spin reorientation is defined as one which occurs as a

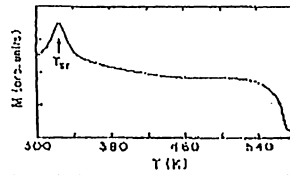
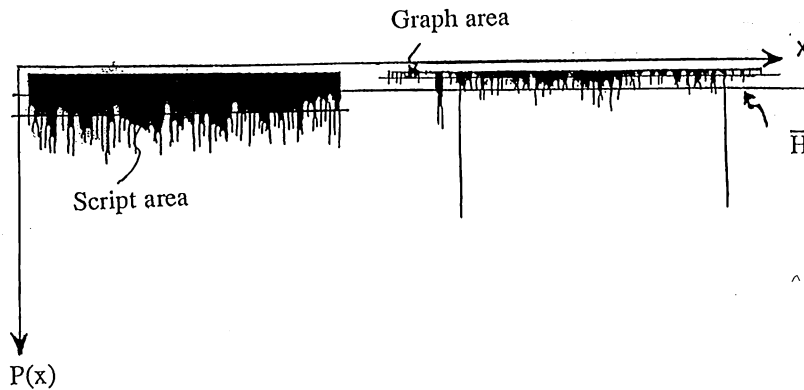


Fig. 1. Magnetization versus temperature curve for TbMgCl_6 , measured on a rough clock sample in an applied field of approximately 1 kOe.

(a)



(b)

図 2 水平方向射影により切り出されたイメージデータの垂直方向の射影 (a) 水平方向射影により切り出した例 (b) 垂直方向の射影

の値が $\bar{D}$ の値より大きければ、その D_i の領域は図領域であり、逆の場合にはその領域は文章領域である。図領域を含んだ画像領域を水平方向に切断し、取り出した図領域を図 2-(a) に示す。次に図 2-(a) に於て垂直方向射影を取る。図 2-(b) に於て $P(x)$ は垂直方向の画素数、 $H_i (i = 1, \dots, n)$ は $P(x)$ の平均値、 n は垂直方向射影がゼロとならない分割数である。例えば、図 2-(b) の場合、 n の値は 2 となる。 $\bar{H}$ は H_i の平均値である。もし、 H_i の値が $\bar{H}$ より小さければその H_i の領域は図領域であり、逆の場合にはその領域は文章領域である。この様に水平方向および垂直方向の射影を繰り返し行う事により、必要としている図領域の抽出が可能となる。

水平及び垂直方向射影時に於て、射影がゼロでない領域が 20 ドット以下と極端に小さい場合には、その領域はノイズとみなし、その領域を消去する。20 ドットという値は今回実験によって定めた値であり、データに依存するが、一般的に論文の印刷の

品質にはあまり大きなバラツキは見られないので一応の標準値と考えて良い。

次に、抽出した図の微小な傾き補正をしなければならない。何故ならば、画像全体の傾きと抽出した図の傾きは必ずしも一致しているとは限らないからである。具体的には、傾き補正に使用する軸候補を選出する必要がある。そのために、図 3 に示すように垂直方向の射影をとる。図 3 に於て、 $\bar{P}(x)$ は $P(x)$ の平均値であり、 $\bar{P}(x)$ の値の 4 倍を越えた垂直方向射影は垂直軸であると推論できる。この倍率も実験によって決定した値であり、データに依存する。この様にして垂直軸候補が選出でき、それらの平均値を $\bar{Y}$ する。我々は、図 3 中に矢印で示してある垂直軸候補の中で $\bar{Y}$ に最も近い軸候補を補正用の垂直軸に選定する。こうして、選定された補正用垂直軸に対して (1) 式に示す最小自乗法を適用し、図の微小な傾き補正を行う (図 4 参照)。ここで

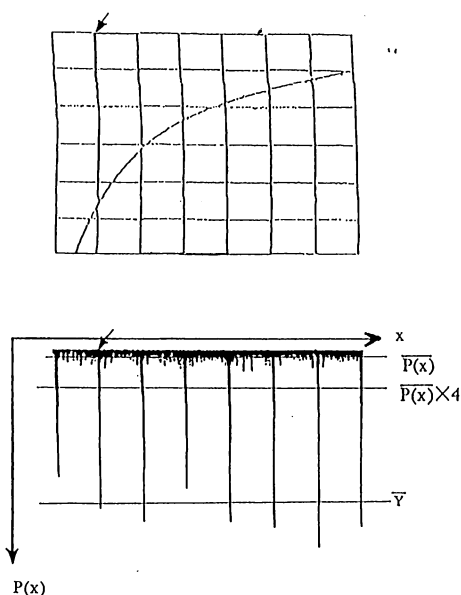


図3 補正用の垂直軸候補を選定するための垂直方向射影

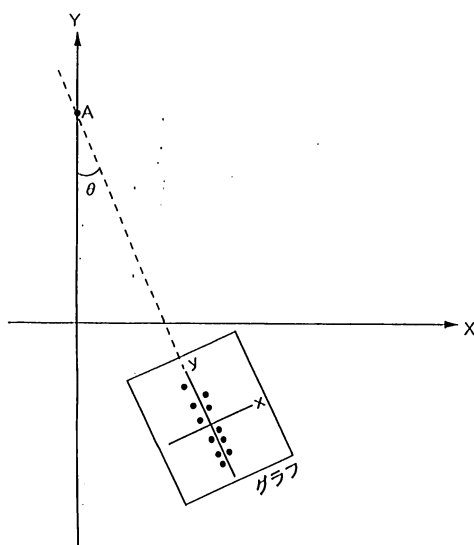


図4 補正用垂直軸の微小傾き補正を行うための説明図

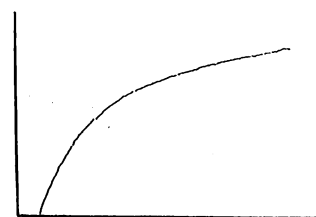
B の値は次式で与えられる。

$$B = \frac{N \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{N \sum_i (x_i)^2 - (\sum_i x_i)^2}. \quad (1)$$

こうして求めた値により、補正用垂直軸は $y = A + Bx$ という式で書ける。 N はデータ数、 X_i は i 番目の x 座標の値、 y_i は i 番目の y 座標の値であ



(a)



(b)

図5 軸消去した後の断点を線形に接続することにより曲線を再現した例 (a) 水平および垂直軸消去後のグラフ (座標軸は参照用に表示してある) (b) 軸消去した断点を線形接続してグラフを再現

る。また、 A は $x = 0$ とした時の y の値である。傾き角度 $\theta = \arctan B$ となり、この値が求まれば、正しい座標 (x', y') は (2) 式の回転座標表示により求まる。

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta, \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta. \end{cases} \quad (2)$$

この様にして図の傾き補正を行い、再び水平方向および垂直方向の射影を取り、選定された軸候補の最大の軸幅で、水平方向および垂直方向の軸を消去する。図3に於て水平軸および垂直軸を消去した例を図5-(a)に示す。水平軸および垂直軸消去時に今回認識対象としている磁性体に対する磁化曲線 (B-H 曲線) の一部を消去してしまうが、消去された部分を図5-(b)の様に単に線形に接続するだけで、ほぼ原形に再現する事が可能である。それは、図の傾き微調整を行う事により、消去される軸幅を最小に抑えるようにしたためである。

グラフの数値化の有効性を確認するために、図5に2つの異なった文献上にあるサンプルデータ (A) と (B) による B-H 曲線を同一グラフ上に再現した例を示す。この比較により、磁性体材料の成分であ

る Co の影響により、サンプルデータ (A) とサンプルデータ (B) に保持力 (B-H 曲線の x 切片の値) に顕著な違いが見られる事が容易に分かる。この章では、図上の曲線が一本の場合を例として取り上げた。また、取り出したい曲線と軸とが重なり合った場合、図中にノイズが混入した場合など、正しく数値化が行われず、認識率は 78% に止まっている。この問題の解決方法の一つとして、我々の提案するグラフ自動数値化の新手法を次章で紹介する。

3. Variational Connection Vector 法によるグラフ認識

前述のように出版論文からのグラフ部分の抽出はほぼ完全に可能となったが、LPP 法で抽出後のグラフ画像を数値化する手法では、いくつかの改善を行ってもなお認識率が 80% に満たないことが明らかになった。数値化の失敗の主な理由は次の 2 つである。

- 1) 多価関数を取り扱えない。
- 2) グラフ曲線が部分的に (あるいは全部が) 座標軸と平行になっている場合に、平行な部分を座標軸と区別できない。

これらの理由から、グラフ認識の成功率を上げるためにはグラフ中のそれぞれの曲線を、互いに独立に認識する必要があると思われる。さらに通常座標軸は、図中に数本書き込まれているが、これらをただ消去するだけではなく、座標軸相互の接続関係を考慮に入れた上で座標軸として認識すべきである。

我々はここで Variational Connection Vector 法という新しい手法を提案し、実際にグラフの数値化を試みた結果を報告する。この方法はグラフ曲線の種々な性質 (形状・線幅・接続関係) を考慮しながら認識する方法で、アルゴリズム上は 1 本の曲線を構成する各データ点の接続関係を、点同志を結合するベクトルの作る包絡線として規定する。この方法を用いれば前節で取り扱ったものより複雑な曲線を認識・数値化することが出来る。

図 7 はグラフ曲線が数値データに変換される過程を模式的に示す。この手法の最終目的はグラフデータを可能な限り忠実に表現するフィッティング関数を決定することであるが、これには最小自乗法を用いる。このとき図中に書き込まれている曲線群はそれぞれが他の曲線と区別され、これら曲線に対応す

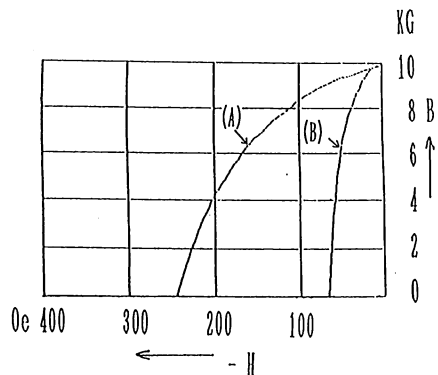


図 6 異なる文献にある二つの B-H 曲線を同一グラフに表示した例. サンプル (A): bal Fe-3.5Co-(0.6-1.0)C サンプル (B): bal Fe-3.5Cr-1.0C

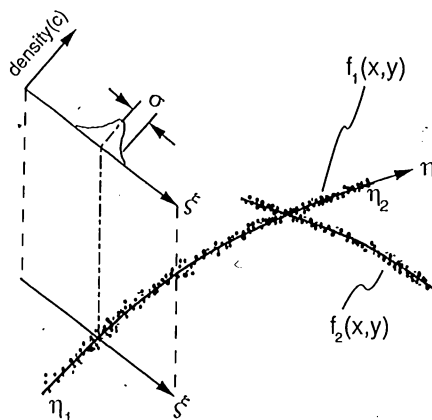


図 7 Variational Connection Vector 法の概念図

るフィッティング関数の形状は各々が独立に決定されなければならない。

それぞれのフィッティング曲線は、関数形 $f(x, y)$ および曲線の始点と終点 η_1, η_2 、幅 σ 、他の曲線との交差点の座標によって表される。図 7 に示すように、本方法ではまず座標系を (x, y) から局所座標系 (η, ξ) に変換する。ここで η -軸はグラフ曲線のフィッティング用の試行関数 $f(x, y)$ の点 (x, y) における接線、また ξ -軸は法線である。

グラフ曲線を構成するそれぞれの点からフィッティング曲線までの距離の自乗和は以下のように与えられる。

$$v = \int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta \int_{-\infty}^{+\infty} d\xi \cdot \xi^2 F(\xi, \eta) W_\sigma(\xi), \quad (3)$$

ここで $\int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta$ は曲線 f に沿った線積分、 ξ はピクセルからフィッティング関数 $f(x, y)$ までの距離である。 $W\sigma(\xi)$ はフィッティング曲線からのカットオフ距離を定める重み関数で、本研究では最も簡単なステップ関数を用いる。

$$W\sigma(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi \leq R_{cut}, \\ 0, & \xi > R_{cut}. \end{cases} \quad (4)$$

一方 $F(x, y)$ はあるピクセルが黒か白かによって1か0となる関数である。

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if pixel } (x, y) \text{ is a black dot,} \\ 0, & \text{if pixel } (x, y) \text{ is a white dot.} \end{cases} \quad (5)$$

決定すべきフィッティングパラメータは $f(x, y)$ 、 η_1, η_2 である。関数形 $f(x, y)$ は通常の最小自乗法によって簡単に求められる。一方積分範囲 (η_1, η_2) は式 (3) の v を最大にするものを選ぶ。 v は積分範囲の増加とともに単調に増加し、最後には一定値となる。本方法では ξ に関する無限大の積分はカットオフ距離 R で置き換える。すなわち、

$$v = \int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta \int_{-R}^{+R} d\xi \cdot \xi^2 F(\xi, \eta), \quad (3')$$

もしフィッティング関数の関数形が1次であって、 x 軸に平行か垂直のときには「座標軸の候補」として分類しておく。このような直線が複数あり、各々の端点が互いに接続しているときには当面の間「座標軸」とみなす。その場合でもこれら「座標軸」は他の直線でないグラフのうちの1つとして取り扱う。さらに1次の項のみからなる2つの曲線（つまり2本の直線）が一定の誤差以内で同じパラメータを持ち、相互の端点が誤差範囲内で一致している場合には「同じ曲線」に所属している事にする。この考え方により、座標軸の取り扱いをグラフ曲線と同じ要領で行う事が出来る。

図7では $f_1(x, y)$ と $f_2(x, y)$ は1点で交わり、結果的に多価関数となっている。 $f_1(x, y)$ のフィッティングパラメータを決める際、本アルゴリズムでは v の最小値を得るために、積分範囲 (η_1, η_2) を小さい値から大きな値へと徐々に変化させる。すなわち、 η_1 と η_2 はプログラム中で2重ループを構成する。例えば、 η_1 に関する積分の試行ループが η_2 に関する積分より外側にある場合、図中の点 η_2 は点 η_1 から曲線 $f_2(x, y)$ との交点まで徐々に移動す

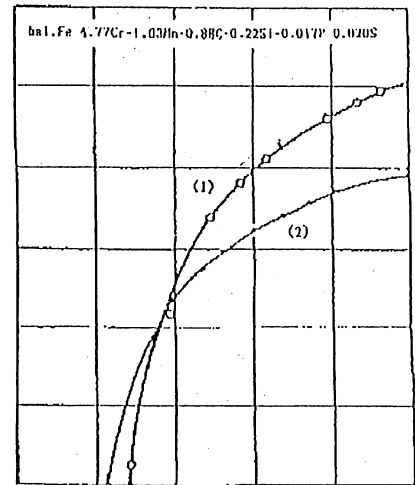


図8 曲線が交差した例。二つのヒステリシス曲線と13本のメッシュ線を同じアルゴリズムで同時に数値化することが出来る

る。点 η_2 が交点まで到達すると、近傍に $f_2(x, y)$ に属するデータ点があり、これを積分から除外する必要があるが、カットオフ距離 R を使う事によって簡単に不必要なデータ点を取り除くことが出来る。 R と共に、試行関数の傾きが急に変化しないように関数形状の制限を設ける事により、 $f_1(x, y)$ に沿った線積分が経路を離れて $f_2(x, y)$ へと移行する事を避けることが出来る。積分路がもとのカーブをたどっていれば、交点近傍での微分値が滑らかになるからである。曲線 $f_2(x, y)$ のパラメータを決定する際にも同様な手続きを行うことで多価関数の数値化を行う事が出来る。

図8は出版論文から切り出したグラフの例である。この例では、我々が数値化しようとしている曲線が2本と、6本の垂直線、7本の水平線、注釈、および曲線に付随するマークが含まれている。前節の方法とは全く異なり、本方法では2本の曲線と13本の座標線を同じ取り扱いで数値化することが出来た。

下から3番目の水平線はノイズの影響でかすれており、6個の部分に分離してしまっている。本アルゴリズムでこれを認識すると、各線分のフィッティングパラメータ（直線なので傾きと切片に相当する）が誤差範囲内で6個とも一致しているので、1本の直線として認識された。図8中の2つの曲線も本アルゴリズムを用いて2つの独立な曲線として数値化

することが出来た。これは本アルゴリズムの重要な長所であり、我々の意図していた事が実験的に確かめられた。

本アルゴリズムでも認識できなかった部分としては、図の注釈と曲線に付したマークとノイズがあった。特に注釈を認識する事は一般に非常に困難である。これらも自動認識対象として取り扱うためには高度な文字認識のアルゴリズムを使わなければならないが、現在の研究レベルでは完全を期すことは困難である。

4. むすび

本研究に於て、任意の 100 サンプル論文からの図領域の抽出には 100%成功した。さらに、抽出した図からのデータの数値化は 78%実現できた。失敗した 22 サンプルについては、現在さらに詳しく実験を行っている。また、今回は図中に抽出したい曲線がただ一つの場合の任意の 100 サンプルのデータについて実験を重点的に行って来た。しかし、第 3 章で述べた手法により図中に複数個の曲線がある場合でもグラフの自動数値化が可能なので、さらにサンプル数を増やして実験を進めたい。また、これまでグラフのスケール値だけは手入力で行って来たが、スケール値をコンピュータで自動認識させる事によりグラフの数値化を全自動化したい。そのためには、スケール値のパラメータを含めた認識を行わなければならない。現在、単純な文章中の活字文字については実用段階までに達しているが、さらに認識範囲を広げるために、人間の脳における情報処理についての研究が盛んに行われて来ている⁸⁾。これらのパターン情報処理の技法をパラメータを含めたスケール値の認識に応用する事により、実用的なグラフの自動数値化システムの構築を行いたい。

これまで実験に使用してきたサンプルデータは東北大学金属材料研究所の SQL データベース管理システム下に蓄えられている。今回実験を行ったグラフの自動数値化により得られた数値データはファクトデータベースの一つとして新たに蓄積して行く予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、貴重なアドバイスを頂いた東北大学金属材料研究所 Tabar 客員助教授、大野助教授、胡助手および熱心にご討論して頂

いた川添研究室および材料科学情報教室の皆様から感謝致します。

文 献

- 1) Y. Kawazoe, N. Mori, S. Wada, T. Itoh, Y. Akiyama, T. Nakanomyo, H. Kamiyama, X. Hu, K. Ohno, G. Kido, T. Nakamichi and Y. Nishina: *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.*, **A37** (1992), 207.
- 2) 小島, 川添, 木村: チベット文献中の文字自動認識, 情報知識学会誌, 2 巻, 1 号 (1991), 49.
- 3) 三浦, 岩田: 新材料開発と材料設計, ソフトサイエンス社, (1985), 427.
- 4) M. Kojima, T. Nakamichi, Y. Kawazoe: Automatic Numerical Data Extraction from Graphical Data on Magnetic Materials, CAMSE'92 (1992).
- 5) M. Kojima, H. Kamiyama, T. Nakamichi and Y. Kawazoe: Automatic Numerical Data Extraction from Graphical Data on Magnetic Materials, *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.*, **A37** (1992), 296.
- 6) 秋山, 増田: 書式指定情報によらない紙面構成要素抽出法, 電子通信学会論文誌, J66-D (1988), 111.
- 7) E. B. Boltich, B. M. MA, L. Y. Zhang, F. Pourarian, S. K. Malik, S. G. Sankar and W. E. Wallace: *J. Magn. Materials* 78 (1980), 364.
- 8) Rumelhart, D. E., McClell, J. L. and the PDP Research Group: *Parallel Distributed Processing*, MIT Press, Cambridge (1986).

(1993 年 5 月 15 日受付)

(1993 年 6 月 30 日採録)

著者紹介



小島 正美 (正会員)

昭和42年東北大学工業教員養成所電気科卒業，同年東北工業大学工学部助手，昭和56年同講師，平成4年同助教授，現在文学認識，ニューラルネットワーク，エキスパートシステムなどに関する研究に従事，電子情報通信学会，情報処理学会，日本ME学会，日本印度学仏教学会各会員。



神山 博

昭和56年埼玉大学理学部物理学科卒業，平成元年東北大学理学研究科博士課程修了，理学博士，同大金属材料研究所講師を経て現在青森公立大学講師，格子欠陥物資設計，データベース構築等の研究に従事，日本物理学会，応用物理学会，日本金属学会各会員，著書「はじめて学ぶコンピュータ」。



中道 琢郎 (正会員)

昭和29年3月東京大学理学部物理学科卒業，同年東北大学金属材料研究所助手，昭和42年6月同上助教授，理博，現在磁性材料関係データベース構築に従事，日本物理学会会員，日本金属学会会員。



川添 良幸 (正会員)

昭和45年東北大学理学部物理第二学科卒業，昭和50年同大学院博士課程修了，理博，同大教養部助手，同大情報処理教育センター助教授を経て，平成2年同大金属材料研究所助教授，その間，昭和56年マックスプランク研究所員として西ドイツ在住，昭和61年西オーストラリア WACAE 客員教授，平成5年カリフォルニア大学バークレー校客員教授，コンピュータシミュレーション，材料データベース，並列計算機，文字認識等の研究に従事，著書「コンピュータ概説」ほか多数，日本物理学会，電子情報通信学会，情報処理学会等会員，文部省視学委員。