

インタラクティブなブラウジング画像検索システムの開発

代表研究者 浦 浜 喜 一 九州芸術工科大学教授
共同研究者 小 野 直 樹 九州芸術工科大学助教授

1. まえがき

インターネットの通信性能は急速に進展しており、画像やビデオなどを高速に送受できるようになってきている一方で、それらの膨大なデータを効率的に検索するシステムが必要とされている[1]。画像やビデオなどのマルチメディアの検索では従来の検索法のようにキーワードなどの添付情報に頼らずにメディアの内容を直接に参照する検索技術が必要であり、実際に最近多くの内容検索技術が開発されている[2]。そのような内容検索ではユーザが検索キーとなるサンプル画像を入力して、それに類似する内容の画像をデータベースから抽出する。通常1回の検索では所望の画像は得られないので、関連フィードバックなどを援用してキー画像を次々に変えながら検索が繰り返される。現在の多くの検索システムがこのような逐次探索法を採用している。しかしながらこの探索法はデータベース空間の局所的な小領域を連続的に移動していくので、所望の画像が最初にある程度具体的に分かる場合はよいが、検索要求が曖昧な場合には初期キー画像を指定するのは困難であるし、不適切な初期画像から出発しても所望の画像にはたどり着けないことが多い。

画像や映像の検索において内容を表すメタ情報の表現法はMPEG-7として世界的に標準化され、この2001年9月から使えるようになる。これによって検索で使用されるメタ情報は統一されるであろうが、MPEG-7では検索エンジンの部分については何も規定しておらず、検索システムの設計者にまかされている。実際にユーザが検索を行うときの使い勝手は、この検索エンジンの性能に大きく依存する。そこで今後、ユーザが使い易い検索システムの開発が世界中で行われていくものと予想される。

2. 研究目的

本研究では、以上のような現状と技術要求を背景として、ユーザが使い易い画像検索システムを構築するための基礎研究として、データベースの構造の視覚化とブラウジングによるユーザとのインタラクションを交えて検索を進めていくような画像検索システムの基礎技術を開発することを目的とする。本研究で開発を計画しているのは、データベースの内容を大域的に捉えながら探索範囲を絞り込んでいくような画像検索システムである。本システムはユーザの視覚的な把握能力と関連フィードバックを活用したインタラクティブな探索法を用いる。

大量のデータの構造を視覚的に表示するにはクラスタリングなどのデータ要約法が必要である。本研究では、通常使われているクリスプなクラスタリングではなく、ファジークラスタリングを用いることにより詳細なデータ構造を保存したデータ表現を求める。このファジークラスタリングの手法として、グラフスペクトル法の1種に基づく新しい方法を開発して使用する。次にデータの画面への表示法としてファジークラスタリングと同様にグラフスペクトル法の1種を用いて2次元や3次元空間に画像を配置表示する手法を開発する。この配置法はスプリングモデルや自己組織化位相保存写像などよりも高速なので画面を次々に更新していく際にもリアルタイムに応答することができる。以上のファジークラスタリングとデータ視覚化法を用いて画像を検索するブラウジング画像検索システムを作成する。

3. 研究結果および開発システム

本研究で開発する画像検索システムの基礎となる手法はグラフスペクトル法と総称されるアルゴリズムである。本検索システムでは、まず最初にデータをクラスタリングする。次にこのクラスタ情報に基づいて画像やビデオのハンテイング検索システムやブラウジング検索システムを構築する。ブラウジング検索ではデータ間の類似度が視覚的に捉えやすいようにデータを画面上に配置表示する。以上において、クラスタリングやデータ配置にグラフスペクトル法を用いる。本節では以下、まず最初にグラフスペクトル法によるクラスタリングについて説明し、次にそれに基づく検索システムを紹介する。

3.1 グラフスペクトル法によるファジークラスタリング

データの数が多くなると全体を1度に処理するのが難しくなり、またデータの構造も捉え難くなる。そこで大量データを扱う際には、まず最初にクラスタリングが行われ、データをいくつかのグループに分け、データ構造を階層的に解

析するアプローチがよくとられる。データ検索ではこれまでクリスプなクラスタリングが使われてきたが、クリスプなクラスタリングでは各データの各クラスへのメンバシップは0か1であるので、クラスタの内部の構造情報が失われ、細かいデータ構造を捉えることができない。そこで本研究ではファジークラスタリングを使うことにした。ファジークラスタリングではメンバシップは0から1までの範囲の実数値をとるので、データ間の関係がメンバシップに要約されて保持されており、データ構造を柔軟に捉えることができる。

ファジークラスタリングのアルゴリズムとしてはファジーc平均法が有名であるが、ファジーc平均法はデータ間の類似度だけが与えられる場合には適用することができなく、画像やビデオなどではデータ間の類似度しか与えられない場合も多い。そこで本研究ではファジーc平均法よりも広い範囲に適用できるファジークラスタリング法として、グラフスペクトル法の1種に基づくアルゴリズムを開発した。以下、その手法について、データの類似度行列が与えられる場合と共起関係行列が与えられる場合についてそれぞれ説明する。

3.1.1 類似度行列に基づくファジークラスタリング

データが複数個あって、それらの間の類似度 s_{ij} が与えられるとする。このとき、クラスタとは類似度が大きいデータの固まりである。データ i がクラスタに所属する割合を x_i とすると、クラスタのまとまりの強さは $\sum_i \sum_j x_i s_{ij} x_j$ で評価することができる。そこでこれが最も大きくなるような x_i を求めれば、それが与えられたデータの中の最も主要なクラスタとなる。線形代数学でよく知られているように、このような x_i は類似度行列 $S=[s_{ij}]$ の第1固有ベクトルで与えられる。このようにして第1クラスタは類似度行列を固有値分解することによって求められる。次に2番目に大きいクラスタは、与えられたデータから第1クラスタに所属する分を取り除いた残りのデータに対して同じことを行えばよい。これは第1クラスタのメンバシップの係数を類似度行列にかけた行列の固有値問題となる。同様にして第3クラスタは第1クラスタと第2クラスタのメンバシップを類似度行列にかけた行列の固有値問題によって求められる。詳しいことは例えば文献[3]などを参照されたい。このようにして次々にクラスタを抽出していくことができる。問題は抽出をどこで止めるかであるが、各クラスタの大きさはそのときの行列の第1固有値で与えられる。そこで固有値の値をプロットしていき、これが小さな値になり、あまり減らなくなったところで止めることにした。このようにするとクラスタの数を自動的に決めることができる。ファジーc平均法ではクラスタの数を決めるには複雑な処理を要するが、このように比較的簡単にクラスタ数を決められることが本方法のメリットの1つである。またクラスタ抽出を止めた後に残ったデータはどのクラスタにも属さないとして捨てられる。従って本方法はノイズデータがあっても、それらに影響されずにクラスタを抽出することができる。

3.1.2 共起関係行列に基づくファジークラスタリング

以上はデータ間の類似度が与えられる場合であったが、検索では例えば各データにキーワードが付けられる場合も多い。このようなときはデータとキーワードの割り当て関係を表すデータ行列すなわち共起関係行列でデータ間の関係が表される。例えば画像 i にキーワード j が付いているとき共起関係行列の要素 d_{ij} は1となり、その他では0となる。このとき画像 i がクラスタに所属する割合を x_i 、キーワード j の所属度を y_j とすると $\sum_i \sum_j x_i d_{ij} y_j$ が最大になるような x_i と y_j を求めれば、それが最も主要な第1クラスタとなる。そのような x_i と y_j は共起関係行列 $D=[d_{ij}]$ を特異値分解することによって求められる。第2クラスタ以降の求め方やクラスタ数の決定法などは前節と同様である。詳しくは文献[4]を参照されたい。

3.2 ファジークラスタリングに基づくハンティング検索

ユーザとの関わり方の違いによって、検索はハンティング検索とブラウジング検索とに大別される。ハンティング検索ではクエリと呼ばれる検索のキーとなるデータがユーザによって入力され、システムはそのクエリに似ているデータをデータベースの中から選び出してユーザに提示する。一方ブラウジング検索ではユーザはクエリを提示することなく、最初にシステムが複数個のデータを画面上に表示して、ユーザはそこから適当なものを選択し、それによって画面が更新され、再びデータを選択するというのを繰り返して所望のデータに近づいていく。

本節では、上記のファジークラスタリングをハンティング検索に利用する手法を紹介する。ハンティング検索ではクエリとデータベースのデータとの類似度を計算する必要がある。ここでは、この類似度をクラスタへのメンバシップを並べたベクトル間の角度のコサインで評価した。このハンティング検索法をキーワードによる画像検索に応用した結果、文書検索の1手法として有名なLSI (Latent Semantic Indexing)法とほぼ同等な検索性能を得ることができた[4]。検索に要する時間は本方法の方がLSI法よりも短い。

3.3 階層的ファジークラスタリングによるブラウジング検索

3.1節で述べたファジークラスタリング法は階層的なクラスタリングに拡張することができ、クラスタを階層的に選んでいくようなブラウジング検索に応用できる。その1つの例として、キーワードによる画像検索として、各階層のク

ラスタの代表画像と代表キーワードとを表示し、ユーザが選択したクラスタについて次の階層のクラスタを表示するというインタラクティブな検索システムを構築し、有効性を確認した[4]。

しかし、このようなブラウジングシステムは原始的なものであり、人間が持つ高い視覚把握能力を有効に使っているとは言い難い。そこでもっと視覚的にデータ構造を把握し易いデータ表示法を用いる必要がある。そのようなブラウジング検索システムへの1つのアプローチとして、グラフスペクトル法の1種によるデータ配置表示法による方法を以下に紹介する。

3.4 グラフスペクトル法によるデータ表示

ブラウジング検索を効率的に行うためには、データをどのように画面に表示するかが重要である。複数のデータは一般にグラフとして表すことができる。従ってデータ表示はグラフの視覚化の問題とみなされる。これまでに種々のグラフの視覚化法が提案されてきており、スプリングモデルによる方法が有名である。しかしこの手法は反復計算によって最適なデータ配置を求めるので、計算時間が長く、検索のようにリアルタイムの応答が要求される場合には適していない。そこで本研究では、上記の方法でファジークラスタリングした結果を利用してグラフスペクトル法の1種でデータを配置する方法を開発した。データを配置するグラフスペクトル的な手法としては数量化3類と数量化4類が有名である。以下、これらの配置法を応用したブラウジング検索法を紹介する。

3.4.1 数量化3類によるデータ表示

数量化3類は共起関係行列に基づいてデータを配置する手法であり、グラフスペクトル法の1種である。複数のサンプルとアイテムとがあって、アイテム j がサンプル i に該当する度合い d_{ij} が与えられるとする。これらのサンプルとアイテムとを配置するとき、互いに関連が高いもの同士が近くなるように配置するのが望ましい。数量化3類はそのような配置を求める手法であり、共起関係行列 $D=[d_{ij}]$ に係数をかけた行列の特異値分解によって各サンプルとアイテムの配置座標が求められる。詳しくは多変量解析のテキストを参照されたい。

この数量化3類をグラフの視覚化に用いるには、グラフのノードをクラスタリングして、サンプルをグラフのノードとし、アイテムをクラスタとすると、各ノードが各クラスタに所属するメンバシップが d_{ij} となるから、上記の数量化3類によってグラフのノードを配置することができる。この方法が優れている点は、データの数に関係なくいつでもクラスタ×クラスタのサイズの行列の固有値を求めるだけで全データの配置が得られることである。またスプリングモデルのような反復法ではないので、配置が一意に求まる。文献[5]ではこの配置法をキーワードが割り振られた画像データに適用して、クラスタ構造が視覚的に把握し易い配置表示が得られることを示した。本方法によって画像とキーワードのクラスタリング結果を表示した例を図1に示す。図中の画像は各クラスタの代表画像である。また文献[6]では本配置法の応用例として、ユーザの映画の好みに基づいてユーザと映画を同じ画面に配置表示して、各ユーザが自分の好みに合う映画を検索することができる視覚的協調フィルタリングシステムやコンピュータプログラムのモジュールを配置表示することによってプログラムの構造を視覚化するシステムおよびウェブページとキーワードとを同じ画面に配置表示することによりウェブページを視覚的に検索するシステム、また複数群の製品とユーザの印象に基づいて製品と印象語とを同じ画面に配置表示することによって印象に基づいて製品を検索できるとともに各製品間のコーディネート支援するシステムなどを構成した。図2に最後の応用例であるソファとカーペットと印象語とを1つの画面上に配置表示した例を示す。このような配置表示では各製品に関連した印象が該当製品の近くに位置し、従って印象が似ている製品同士も互いに近くに位置するので、ユーザは印象に基づいて製品を検索することができ、また印象が似たソファとカーペットを知ることができ、印象がコーディネートされた家具の組み合わせを設計するのに利用することができる。

また文献[7]では本クラスタリング法と配置法を有向グラフに拡張し、リンク構造に基づいてウェブページを配置表示して、各クラスタのオーソリティページとハブページの視覚化や各ページに対するリンクの推薦などに利用できることを示した。またスプリングモデルと並んでよく用いられるデータ配置法である自己組織化写像(SOM)についても本方法と比較を行い、計算時間が本方法の方が圧倒的に短く、またクラスタ構造が捉え易いことを示した。

上でも述べたように本手法はスプリングモデルやSOMよりも安定しており、計算時間も短い。またスプリングモデルやSOMでは全データを同等に配置するのでクラスタ構造が捉え難いが、本方法による配置はデータのクラスタ構造が分かり易い配置が得られる。

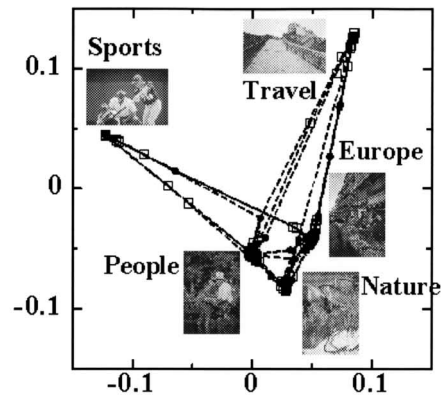


図1 画像とキーワードの表示

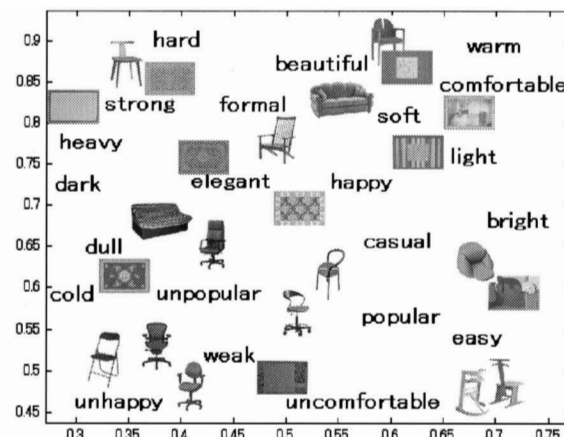


図2 ソファ、カーペットと印象の配置

3.4.2 数量化4類によるデータ表示

数量化4類は類似度行列に基づいてデータを配置する手法であり、数量化3類と同様にグラフスペクトル法の1種である。データ間の類似度が与えられているとき、互いに類似度が高いデータ同士が近くなるようにデータを2次元や3次元に配置する。数量化4類では類似度行列に基づく固有値分解によってそのような配置が得られる。我々は以前に、データを階層的にファジークラスタリングし、クラスタの代表点を数量化4類で配置表示して、ユーザがクラスタを選択しながら画像を検索していくシステムを提案した[3]。またデータが共起関係行列で与えられるときにも数量化4類による配置表示が可能であることを示し、キーワードによる画像のブラウジング検索に応用した[8]。

また文献[9]では、数量化3類を用いた文献[6]と同じような応用例として、画像と印象語とを数量化4類によって同じ画面上に配置表示し、印象に基づく画像の感性検索や製品コーディネート支援、ビジュアル協調フィルタリングなどに応用した。図3に絵画と印象語およびユーザ（図中A,B,C等と記されている）を配置した例を示す。このような画面を見ると各ユーザは自分の近くにある絵画を視覚的に検索することができ、またどんな人が自分と感性が似ているかも知ることができる。

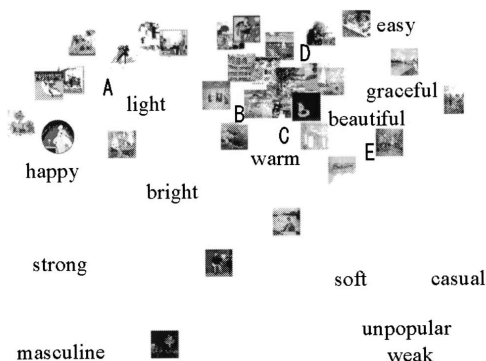


図3 画像、印象語および人の配置

3.5 低次元空間でのナビゲーション画像検索

ブラウジング検索ではユーザの選択と画面の更新とが繰り返されて検索が進められる。従って画面の更新は高速でなければならない。従来のスプリングモデルやSOM等は非線形な反復計算を要するのでリアルタイム処理が難しかった。上記の数量化3類や4類による配置法はこれらの非線形法よりも計算が速いが、データが変わる度に配置を計算し直す必要があり、やはりリアルタイム処理には不適當である。そこで次に、データ集合によらないデータ配置法を考え、ブラウジング画像検索に応用した。画面上にデータを配置するにはデータの次元を2次元か3次元に落とす必要がある。ここでは3次元表示をすることにした。各画像をカラーヒストグラムで表し、ヒストグラム間の距離を2次形式距離で表すと、色の類似度行列を固有値分解することによって次元を低くすることができる。この次元削減は主成分分析などと似ているが、違う点は、主成分分析では射影行列がデータ集合によって変わるのでデータが変わる度に行列計算をやり直さねばならないのに対し、本方法では射影行列は画像によらず共通であるので、データが追加されたりしても、それまでのデータの配置はそのまま、追加データを射影して表示するだけでよい。

この配置表示法を使ってここでは、kNN検索を支援するシステムを作成した[10]。本システムの画面を図4に示す。左側のウィンドウには画像が10枚表示される。ユーザはこのなかから適当な画像を1枚クリックする。すると左側のウィンドウは選択された画像の近傍10枚の表示に更新される。一方、右側のウィンドウには常時データベース全体の画像が表示されており、左側のウィンドウで画像が選択される度に、前に選択された画像から現在の画像に線が引かれる。左右どちらのウィンドウもVRMLで表示されているので、ユーザは左右別々に自由に表示を回転したりズームしたりできる。従来のブラウジング検索システムではこの図の左側のように数枚の画像が次々に表示されていくタイプが多いが、そうすると途中で現在自分がどの辺りを探索しているのか分からなくなり、検索の進行が混乱することが多かった。本システムでは右側のウィンドウのように、データベース全体のなかで現在自分がどの辺りにいるかを把握することにより探索に迷わないようにしている。本システムはリアルタイムに動作することを確認している。

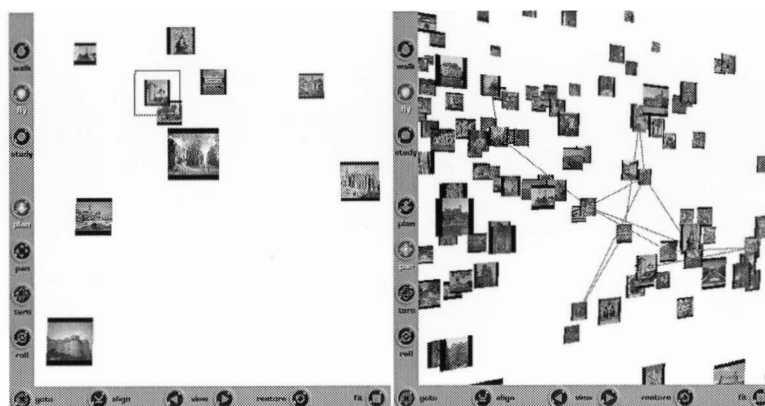


図4 kNN検索のナビゲーションシステム

4. むすびと今後の展望

以上のように本研究では使い易い画像検索システムを構築するための基礎研究として、ファジークラスタリングとデータの配置表示法とを組み合わせたブラウジング検索システムを開発してきた。検索システムには高速性が要求されるので、ファジークラスタリングおよびデータ配置法の両方でグラフスペクトル法に基づく方法を開発して使用した。

実際に製作した検索システムのプロトタイプでの実験では一定の評価が得られたが、なお幾つかの課題が残された。課題の一つは、ファジークラスタリングの性能である。本研究で開発して使用した方法では球状のクラスタが抽出され、帯状に分布するようなクラスタは分断されてしまう。そこで任意の形状のクラスタを抽出することができるように、データのある空間へ一旦射影し、その空間でファジークラスタリングする方法を開発した[11]が、これについて更なる改良が必要である。また別の課題として、クラスタ数の決定法の改善があげられ、これについても新たな方法を提案した[12]が、自動化が望まれる。

また検索システムではリアルタイム動作が要求されるが、kNN検索のようにデータベース画像のなかからクエリに近い画像をk個選ぶにはかなりの計算時間がかかり、更なる高速化が必要である。そこでkNN検索を高速化するために、画像を低次元空間に射影し、まず低次元で粗く検索してデータを篩落とし、残ったデータについて元の次元での正確な検索を行うフィルタリングによる高速化法を開発した[13,14,15]が、これについても更に改良が必要である。

更に、本研究では主に静止画像の検索システムを開発したが、インターネットで送受されるマルチメディアコンテンツとしては、今後ビデオ映像に比重が移っていくものと思われる。そこでビデオの検索システムが重要になってくる。

我々もファジークラスタリングによるビデオのセグメンテーション法[16]や画像集合間距離に基づくビデオの高速検索法[17]などを提案したが、更に高度なビデオの内容記述法と高速な検索アルゴリズムを開発していく必要がある。ビデオは時間変化を含み、各ビデオの内容を分かりやすく画面に表示するのは難しく、未だに有効な表示法は開発されていない。また1本のビデオが含む内容の情報量は静止画に比べて格段に多いので、どうしても計算時間が長くなる。これらのことから、ビデオの検索では静止画のとき以上に高度なデータ表示法と、より一層の高速化が要求される。そのようなデータ表示法と高速検索法の開発が今後の課題である。

参考文献

- [1] 西尾章治郎、田中克己、上原邦昭、有木康雄、加藤俊一、河野浩之；情報の構造化と検索、岩波書店、2000年3月
- [2] A.W.M. Smeulders and R. Jain; Image databases and multi-media search, World Scientific, Singapore, 1997年
- [3] 井上光平、堀田政二、浦浜喜一；ファジークラスタリングと数量化4類によるデータの階層表示、電子情報通信学会論文誌、J82-D-II, 7, pp.2423-2427, 1999年12月
- [4] 井上光平、浦浜喜一；共起関係行列に基づくファジークラスタリングとデータ検索への応用、電子情報通信学会論文誌、J83-D-II, 3, pp.957-966, 2000年3月
- [5] 堀田政二、井上光平、浦浜喜一；ファジークラスタ構造の可視化、映像情報メディア学会誌、54, 2, pp.319-321, 2000年2月
- [6] 堀田政二、浦浜喜一；グラフのファジークラスタリングによるデータ構造の視覚化、映像情報メディア学会誌、54, 12, pp.1748-1755, 2000年12月
- [7] 堀田政二、井上光平、浦浜喜一；ファジークラスタリングによる視覚化と検索のグラフ構造データへの応用、情報処理学会論文誌：データベース、42, SIG 1(TOD 8), pp.70-79, 2001年1月
- [8] 井上光平、堀田政二、浦浜喜一；キーワードと画像の同時ブラウジングによる検索、電子情報通信学会論文誌、J82-D-II, 11, pp.2178-2179
- [9] 堀田政二、井上光平、浦浜喜一；数量化4類によるブラウジング感性検索、映像情報メディア学会誌、54, 6, pp.901-903, 2000年6月
- [10] 堀田政二、浦浜喜一；低次元空間でのナビゲーションによる画像検索、映像情報メディア学会誌、54, 12, pp.1792-1795, 2000年12月
- [11] 井上光平、浦浜喜一；多変量写像法による任意形状クラスタの抽出、電子情報通信学会論文誌、J84-D-II, 2, pp.229-237, 2001年3月
- [12] 浦浜喜一、井上光平；類似度行列に基づくファジークラスタリング、電子情報通信学会技術研究報告、PRMU2000-236, pp.101-106, 2001年3月
- [13] 井上光平、浦浜喜一；低次元でのフィルタリングを利用した画像検索、電子情報通信学会論文誌、J84-D-II, 1, pp.222-224, 2001年1月
- [14] 堀田政二、井上光平、浦浜喜一；次元削減とクラスタリングに基づくフィルタリングによる画像検索の高速化、電子情報通信学会技術研究報告、PRMU2000-235, pp.95-100, 2001年3月
- [15] 井上光平、浦浜喜一；低次元での多段階フィルタリングを利用した画像検索、電子情報通信学会技術研究報告、PRMU2000-238, pp.115-120, 2001年3月
- [16] 堀田政二、浦浜喜一；ファジークラスタリングを活用したビデオの検索、映像情報メディア学会誌、53, 12, pp.1750-1755, 1999年12月
- [17] 堀田政二、井上光平、浦浜喜一；画像集合間距離に基づくビデオの類似検索、映像情報メディア学会誌、54, 11, pp.1653-1656, 2000年11月

＜ 発 表 資 料 ＞

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
画像集合間距離に基づくビデオの類似検索	映像情報メディア学会誌	2000年11月
低次元空間でのナビゲーションによる画像検索	映像情報メディア学会誌	2000年12月
グラフのファジィクラスティングによるデータ構造の視覚化	映像情報メディア学会誌	2000年12月
低次元でのフィルタリングを利用した画像検索	電子情報通信学会論文誌	2001年 1 月
ファジィクラスティングによる視覚化と検索のグラフ構造データへの応用	情報処理学会論文誌：データベース	2001年 1 月
多変量写像法による任意形状クラスタの抽出	電子情報通信学会論文誌	2001年 2 月
重み付きグラフからのファジィクラスタ抽出	電子情報通信学会論文誌	2001年 3 月
類似度行列に基づくグラフのファジィクラスティング	電子情報通信学会PRMU研究会	2001年 3 月
低次元での多段階フィルタリングを利用した画像検索	電子情報通信学会PRMU研究会	2001年 3 月
次元削減とクラスティングによる画像検索の高速化	電子情報通信学会PRMU研究会	2001年 3 月
2次形式距離に基づくカラー図形の検索	電子情報通信学会総合全国大会	2001年 3 月