

3次元物体データベースにおける類似物体検索の検討

西村 剛¹, 寺本 純司¹, 長田 秀信², 紺谷 精一¹
¹NTTサイバースペース研究所
²北海道大学
go@isl.ntt.co.jp

あらまし

個人が簡単に3次元モデルを生成、利用することが可能となり、今後一般に流通するモデルデータが増えることが予想され、大量の3次元モデルデータを扱う技術が重要になっている。我々は、大量のモデルデータの中から、概観の似たモデルデータを高速に検索する3次元物体類似検索システムの実現を目指している。

本稿では、複数の形状特徴における次元数と検索精度の関係を調べ、より少ない次元で効率的に類似検索を実現することを目標に、各特徴の評価をおこなった。本研究では、3角形ポリゴンによって構成された3次元モデルデータより、複数の特徴を多次元ベクトルとして抽出し、特徴の類似度をもとに、人間の主観に沿った類似検索を実現する方法を検討した。

キーワード 類似検索 3次元形状 マルチメディアデータベース

3D Object Retrieval based on Shape Similarity

Go NISHIMURA¹, Junji TERAMOTO¹, Hidenobu NAGATA², Seiichi KONYA¹
¹NTT Cyber Space Laboratories
²Hokkaido University
go@isl.ntt.co.jp

Abstract With the growth of computer power and network communication, it is expected that modeling and re-using the three-dimensional objects increase and becomes important that the technique searching and managing a large amount of 3D model data. We are studying the 3D shape similarity search and developing the fast 3D object retrieval system on a large amount of model data. In this paper, we evaluate the retrieval accuracy of multiple shape features and examine the relation between the accuracy and dimension of each feature. We extract three types of feature vectors from the 3D model data constructed from triangle and discuss the shape similarity search matching human's perception.

key words similarity search, 3D shape, multimedia database

1. はじめに

パーソナルコンピュータや家庭用ゲーム機の高性能化により、あらかじめレンダリングした画像を配布するのではなく、3次元モデルデータを配布する形態が普及しつつある。市場の開拓にともない、奥行き情報の取得できるカメラや3次元スキャナ等、3次元形状取得装置の小型化、携帯化が進んでおり、また、複数のアングルで撮影した2次元画像をもとに3次元形状を復元するソフトウェア技術等の研究も進んでいる。個人が簡単に3次元モデルを生成、利用することが可能となり、今後ますます一般に流通するモデルデータが増えることが予想され、大量の3次元モデルデータを扱う技術が重要になっている。

我々は、大量のモデルデータの中から、概観の似たモデルデータを高速に検索することが可能なシステムの実現を目指している。3次元モデルの形状特徴を抽出してデータベースに格納し、データベース内の特徴空間で類似検索をおこなうことで類似した3次元形状を検索する方式を研究している。

本稿では、複数の形状特徴における次元数と検索精度の関係を調べ、より少ない次元で効率的に類似検索を実現することを目標に、各特徴の評価をおこなった。本研究では、3角形ポリゴンによって構成された3次元モデルデータより、複数の特徴を多次元ベクトルとして抽出し、特徴の類似度をもとに、人間の主観に沿った類似検索を実現する方法を検討した。

2. 3次元形状の類似検索

3次元形状の表現するための方法を大別すると、ワイヤフレーム、サーフェイス、ソリッドの3種類がある。3次元形状の検索では、ワイヤフレームモデルあるいはサーフェイスモデルのサーフェイスの各頂点あるいは制御点の座標、およびサーフェイス情報をもとに物理特徴を抽出して検索をおこなう方法、そして関数プリミティブモデル等のソリッドモデルにおけるプリミティブのパラメータや相関関係をもとに検索をおこなう方法がある。

サーフェイスモデルの代表的な記述方法としてメッシュモデルがある。Bezier, NURBS等の自由曲面表現手法によって表現されたCGモデルは、物体の概観の表現能力において優れており、広く一般的に利用されている。また前述自由曲面を

ポリゴンの集合に近似するパッチの研究も数多くおこなわれており[1,2]、3次元形状を、点とベクトルの集合という単純な構成によって扱うことが可能である。一方、ポリウムモデルでは、形状をプリミティブとしてパラメトリックな記述におきかえて表現する為、形状認識をおこない類似検索を行うアプローチにおいて特に有効である。複雑な形状を超二次関数等のプリミティブの集合として記述する研究がおこなわれている[3]。

3次元形状の記述に加え、VRMLデータの3次元形状記述言語におけるノードの記述等モデルデータの論理構造に基づく検索の研究もおこなわれている[4]。しかし、モデルの論理構造は、モデルデータの生成方法に依存し、必ずしもモデルの形状を表現するものではないため、同じデータを探すが目的の検索においては有効だが、類似する物体の検索をおこなうためには、論理構造だけではなくモデルの形状も考慮した検索が必要である[5,6]。

本研究では、高品位、高精細なモデルデータが大量に流通しているメッシュモデルで構成された物体を対象として実験をおこなった。

メッシュモデルの形状を構成する要素としては以下のようなものがある。

- ・形：モデルのスケール・表面積・体積・重心位置・構成するポリゴン数、各ポリゴンの位置座標・面積・法線ベクトル・裏表等。
- ・位置関係：各ポリゴンの隣合うポリゴンと成す角・モデル重心等特定の座標からの距離、法線とモデル重心等特定の座標方向との成す角等。

特に、各ポリゴンに関する要素に対しては分布を特徴と捉え、離散化して得たヒストグラムを特徴とすることで、物体全体の形や複雑さを近似する方法が考えられる。特徴量をヒストグラムで表現することで、ポリゴン数の多い複雑な形状のモデルに対しても、高速に検索をおこなうことが可能である。

また、各ポリゴンのマテリアルカラー、テクスチャ画像等の色情報も重要な特徴である。これら色情報に関しては、すでに2次元画像検索の分野で多くの研究がされており、これらの成果を応用することで、さらに精度の高い類似検索が実現できると思われる。

3. 特徴の抽出

3角形ポリゴンによって構成されるメッシュデータより、ポリゴンの頂点とそれらを結ぶ線分を

物理特徴として採用した。類似検索をおこなう場合、回転を含めて類似とするか否かによって、特徴の選定も異なる。今回は、回転を含めずに、モデルデータに付随される物体の向きをもとに正面を決定し、外接直方体の大きさをもとにモデルデータのサイズを正規化した後特徴の抽出をおこなった。

今回抽出した特徴は、次の3種類である。

3.1 頂点座標

モデルデータの全ポリゴンの頂点の分布を特徴とする。物体を囲む外接直方体を n^3 の単位立方体に分割し、各単位立方体に含まれる頂点の度数を、全頂点数で割り、式(1)のように形状特徴をベクトル \vec{p} で表す。 n は外接立方体の一辺の分割数を表し、 i, j, k は、単位立方体の一を表す番号である。

$$\vec{p} = (p_{111}, p_{112}, \dots, p_{ijk}, \dots, p_{nnn}) \quad (1)$$

3.2 重心距離

物体を囲む外接直方体重心と各ポリゴンの重心との距離の分布を特徴とする。物体を囲む外接直方体重心と各ポリゴン重心とのX,Y,Z軸それぞれについて、距離の分布を離散化する。外接直方体の頂点と重心の距離を n 等分し、各ポリゴンについて重心が含まれる区間に、ポリゴンの面積を足しこんだ。これを各区間の積算値で割り、式(2)のように形状特徴をベクトル \vec{g} で表す。 n は外接直方体の頂点と重心間の分割数を表し、 g^x, g^y, g^z は、それぞれX軸、Y軸、Z軸における距離の分布の離散を表す。

$$\vec{g} = (g^x_1, \dots, g^x_n, g^y_1, \dots, g^y_n, g^z_1, \dots, g^z_n) \quad (2)$$

単純に外接直方体重心と各ポリゴンとの距離の分布を離散化したのでは、たとえば曲率をもとにポリゴンに分割されているモデルデータ等、構成するポリゴンの面積に偏りがある場合、モデルの概観ではなく、ポリゴンの構成が大きな影響を及ぼすことが予想される。そこで、ポリゴンの面積による重み付けを行うことで、モデルごとのポリゴンの構成による影響を少なくする。

3.3 法線ベクトル

各ポリゴンにおける法線ベクトルの分布を特徴とする。物体の各ポリゴンの法線ベクトルのXY成分およびXZ成分について、角度の分布を N 等分して離散化する。重心距離の特徴量と同様、各角度の含まれる区間に、ポリゴンの面積を足しこむ。これを各区間の積算値で割り、式(3)のように形状特徴をベクトル \vec{d} で表す。 n は単位円を分割する数を表し、 d^{xy}, d^{xz} は、それぞれZ軸、Y軸を軸とするXY成分、XZ成分における角度の分布の離散を表す。

$$\vec{d} = (d^{xy}_1, \dots, d^{xy}_n, d^{xz}_1, \dots, d^{xz}_n) \quad (3)$$

4. 実験と結果

4.1 実験方法

本研究では、3次元モデルデータとして、DE ESPONA INFOGRAFICA社より発売されている、市販のCGモデリングソフト用の著作権フリーの3次元モデル素材集「DE ESPONA 3D ENCICLOPEDIA」[7]を用いた。素材集の中であらかじめ分類されているカテゴリの中から、車、飛行機、動物、椅子、その他の各カテゴリより、各々20モデル程度を無作為に抽出、計107データを実験対象とした。用いたモデルは、およそ3,000~50,000個のメッシュにより構成された精細なものである。NURBSモデルのデータから3角形ポリゴンのパッチモデルへの変換は、同じく市販のCGモデリングソフトでおこない、各3角形ポリゴンの頂点および頂点を結ぶ線分の情報をもとに、前述3つの方法を用いて特徴として抽出した。

抽出した特徴は多次元ベクトルとしてORDBMSに格納し、特徴空間内でのマンハッタン距離の近さより類似度を求める。検索には内部キーを利用し、GUIでデータベースに格納されたモデルデータをキーとして指定し、任意の複数の特徴に関して指定した重み付けをおこなって類似度を算出し、類似度の近い順にすべてのデータを返す実験システムを構築した。図1は、実験システムのGUI画面である。評価は、同一カテゴリに属するモデルデータを正解集合として、各々のモデルに関して検索を実行、検索結果上位 N 件の正答率を求め、各カテゴリ毎に平均した値を用いた。

4.2 カテゴリの違いによる精度の評価

実験に用いたモデルデータは多様であり、カテ

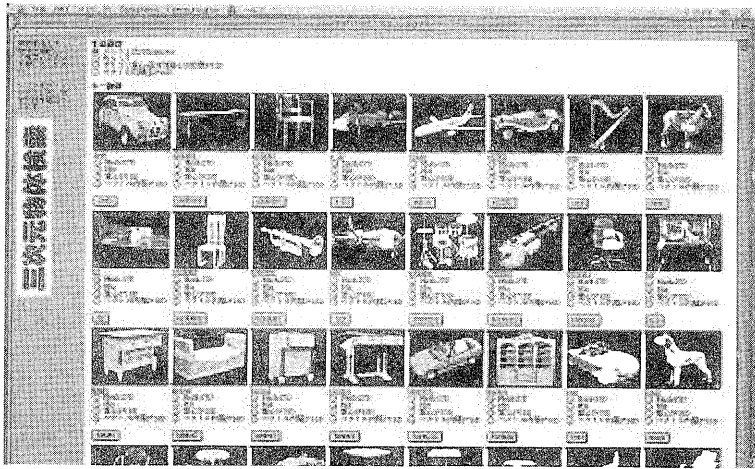


図1. 実験システムのGUI画面

ゴリーによって、直線を基調としているか、曲線を基調としているか、曲面が開いているか閉じているか、対象形であるか否か等、形状の性質が大きく異なる。こうしたモデルデータの性質の違いによる、各々の特徴量の有効性を評価した。

図2は、カテゴリ毎のRecall-Precisionグラフである。グラフより、カテゴリによって正答率に大きな違いがあることがわかる。車のカテゴリは、どの特徴をもちいた検索においても比較的高い正答率を示す。

最も正答率の高い頂点分布では、車と他のカテゴリとの正答率の差が激しい。車の場合、タイヤやボディー等の局所的な形状は大きく変わることがなく、また相対的な位置関係にも類似性がある。外接直方体の大きさで正規化したことによって、ポリゴンの位置や法線の向きに関して類似した特徴が抽出されたこと、そして、車に類似する

形状が他のカテゴリにあまり存在しないことの2点が理由で正答率が上がったと思われる。一方、同じ人工物であっても、飛行機や椅子は、人間の直感的には、似たような形状に見えても、翼の形状や傾き、足の長さや背もたれの形状、角度等の細かな部分の差異が大きく、これが正答率を下げる原因となっている。

動物のカテゴリは、頂点分布の特徴を用いた検索では精度がおちるが、重心距離および法線ベクトルの特徴を用いた検索では、半分以上のモデルデータが、上位7割に入っており、車について良い結果を得た。動物の場合、足や頭部、胴体等の各部の太さや長さがモデルごとに異なる為、各部の位置がモデルごとに異なり、頂点分布の特徴を用いた検索の正答率が低くなっていることに影響している。しかし、各部を局所的にみた場合には、形状に類似する部分が多いことが、他の2方

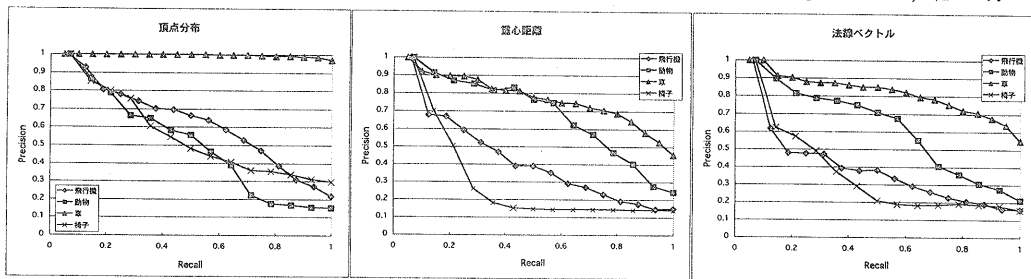


図2. カテゴリ毎の検索精度の比較

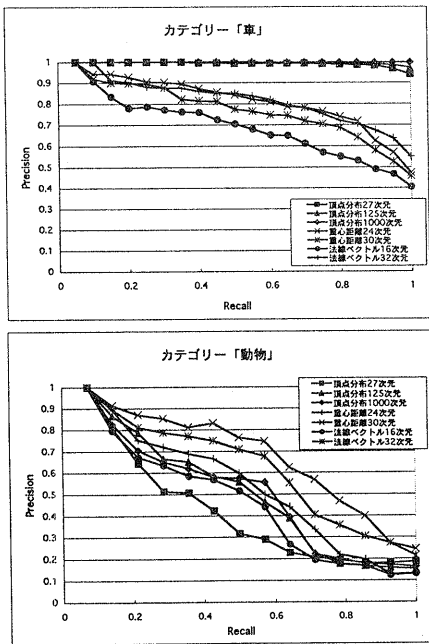


図3. 次元数の違いによる検索精度の比較

式で精度のあがる一因と思われる。

今回用いた特徴は、車のように概観だけでなく部分の構造も類似しているモデルに関しては精度が良くなる反面、たとえば一枚板で背もたれが構成された椅子と、複数の板の組み合わせで構成された椅子では、得られる特徴が異なるように、大局的には類似していても部分が異なるモデルに対しては精度が得られなかった。

4.3 次元数の違いによる精度の評価

各特徴に関して、形状特徴の分布を離散化する際に分割するサイズの変化が及ぼす影響を調べるために、次元数の異なるデータを用意し検索精度の評価をおこなった。物理特徴空間を少ない次元数で構成することができれば、多次元インデキシングによる検索の高速化が期待できる。

図3は、同一の特徴に関して、異なる次元数で離散化した特徴量を用いてプロットしたRecall-Precisionグラフである。カテゴリと特徴の組み合わせによって、次元数を変化させた場合の精度の違いはまちまちである。必ずしも次元数を多くすれば多くしただけ精度があがるわけではない。頂点分布27次元と125次元、重心距離24次元と30

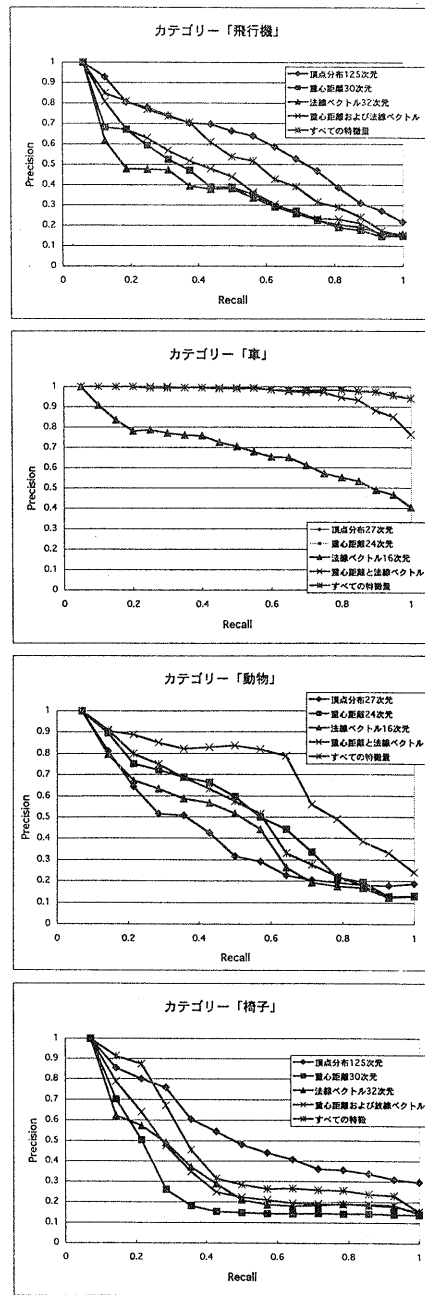


図4. 複数の特徴量の組み合わせによる検索精度の比較

次元、法線ベクトル16次元と32次元では、各再現率における正答率は、それぞれ多くても1割程度の差しかない。

車のカテゴリにおいては、次元数が多くなるにつれ精度があがる傾向がある。しかし、動物のカテゴリにおいては、重心距離の特徴において、24次元の方が30次元より精度が良い。これは、離散化する際の分割するサイズによって、ヒストグラムのピーク・ディップがどの区画に含まれるかによって特徴が大きく異なる可能性があることを示している。

4.4 複数の特徴の組み合わせによる検索の評価

図4は、頂点座標27次元、重心距離24次元、法線ベクトル16次元、重心距離と法線ベクトル、すべての特徴をそれぞれ組み合わせる検索をおこなった結果である。複数の特徴を組み合わせることで、単一の特徴を用いた検索と比較して、安定した正答率が得られる。場合によっては、単一の特徴で検索をおこなうよりも正答率が高くなる。特に組み合わせる特徴の正答率が近い場合に、この傾向は観察され、逆に組み合わせる特徴の正答率に開きがある場合には、両者の中間付近に落ち着く傾向にある。

5. 考察

4章では、モデルデータの概観をもとに検索結果評価、分析をおこなった。本章ではこれをふまえ、モデルデータと抽出した特徴量をもとに、より詳細な考察をおこなう。

図5は、車と動物のカテゴリよりそれぞれ2つずつ選択したモデルの頂点分布、重心距離分布と法線分布に関する特徴量を各々125次元、90次元、100次元で抽出しプロットしたものである。

動物、車、共に頂点分布と法線分布において極端なピークが目立つ。まず頂点分布に関しては、モデルデータにおけるポリゴンの密な部分と疎な部分の差が大きいことに原因がある。動物の場合、足の指や爪、鼻先、車の場合、タイヤやホイールといった細かな部分を表現するために、大量のポリゴンが使われており、これがピークとなっていると思われる。こうした局所的に密な部分が存在するために生じる特徴量のピークは、モデルの特徴を示すものとして今回の車のカテゴリのように効果的に働くことがある。しかし逆にピークが大きすぎると、それ以外の次元の特徴量の差異が目立たなくなってしまい精度が落ちる可能性が高

い。ポリゴン密度の分布を一つの特徴として捉える方法を考えると同時に、たとえば大きいポリゴンは分割して、全体的に密度を平均化することで対応できる。

次に法線分布におけるピークに関しては、XY成分、XZ成分の分布を特徴量としていることが影響していると思われる。曲面で構成されるモデルであっても、モデルの向きとZ軸あるいはY軸が等しければ、法線が軸に直交するポリゴンが多くなる可能性は高い。図中の動物の例では、モデルデータがあらかじめ正面方向と軸をあわせて作成してあるため、ピークが生じたものと思われる。モデルと軸の関係によって特徴量に変化がでしまう点は問題であり、今後改善の必要がある。

重心距離の分布は、車と動物に関して安定した精度が得られた。ポリゴン面積の重みづけをおこなった効果があり、ヒストグラムのスケールもほぼ等しく、大局的な特徴を捉える方法として期待できる。

今回、モデルより抽出した特徴量をプロットした結果、曲面で構成される複雑なモデルであっても、想像以上にヒストグラムに鋭いピークがあらわれることがわかった。ピークが鋭く大きいため、離散化する際の区間の分割数によって、ピークの位置と分割点がかぶる恐れがあり、特徴の傾向が大きく変わらう。ピークの影響を少なくする為に、平滑化する必要がある。

6. むすび

本稿では、3次元形状の類似検索を実現するために、複数の物理特徴を用いて類似形状の検索をおこなう評価システムを構築し、5つのカテゴリに分類されるモデルデータより頂点分布、モデル重心と各ポリゴン重心の距離の分布、各ポリゴンの法線ベクトル分布の3つの特徴を抽出、データベース化し、検索精度の評価をおこなった。

今回用いた特徴では、車のような概観だけでなく部分の構造も類似しているモデルに関しては精度が良くなる反面、概観は類似していても部分が異なるモデルに対しては精度が得られなかった。精細なモデルデータを用いた実験により、モデルの細かな部分の構造が、検索精度に大きな影響を与えることが明らかになった。また、形状特徴の分布をヒストグラムにした場合、鋭く大きなピークが生じる事があり、離散化の方式にも注意を要することがわかった。

今後、実用的なシステムを実現するためには、

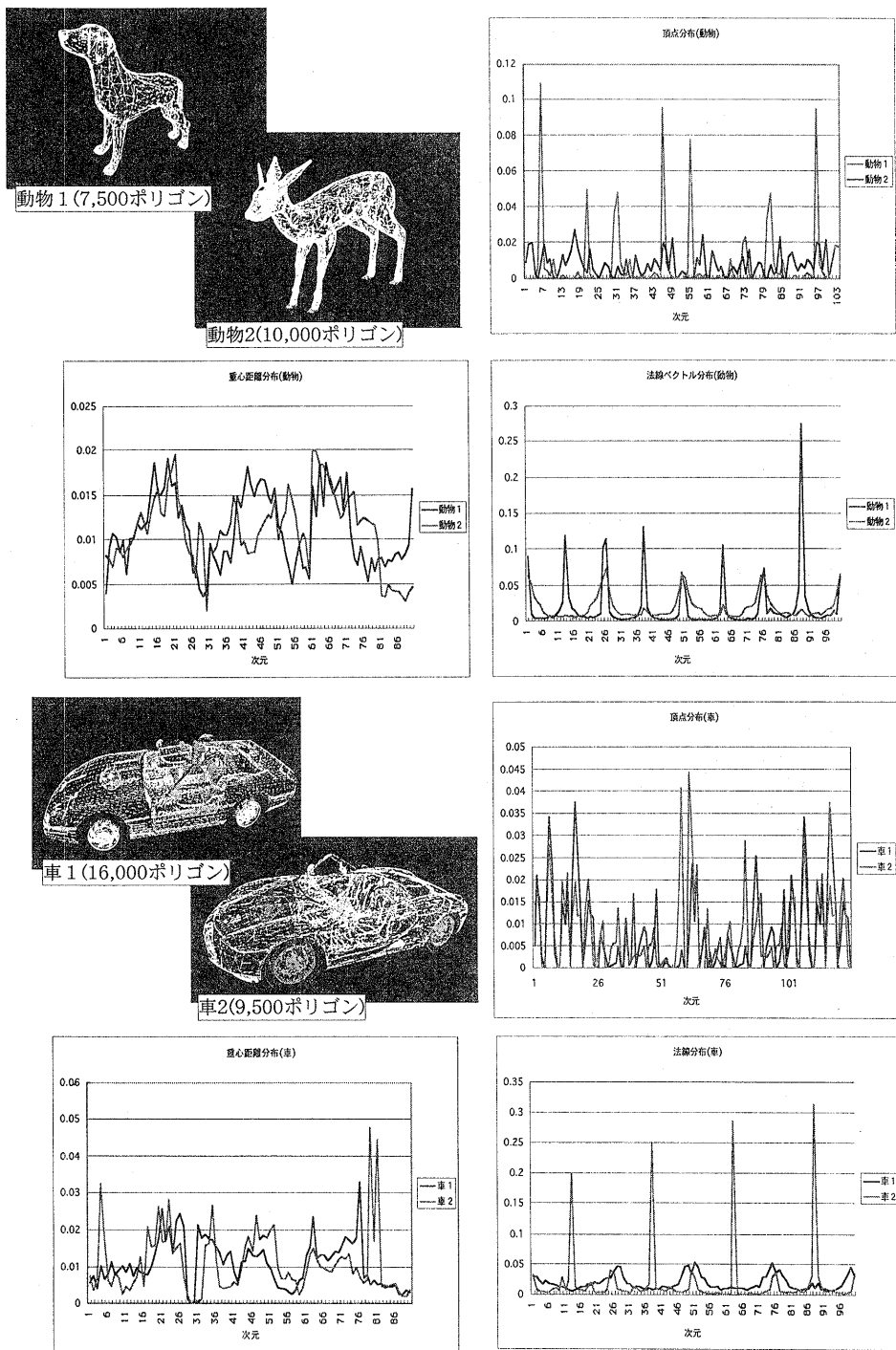


図5. モデルデータと抽出した特徴量の一例

詳細な部分に着目して、類似したモデルを検索したいのか、あるいは概観が似ていればそれで良いのか、という検索のニーズに合わせた特徴の抽出を考える必要がある。

今回、複数の特徴の組み合わせにより、単一の特徴を用いた検索より精度のあがる可能性を示した。今後、さらにモデルの大局的な構造と局所的な構造を表現する特徴量の検討、各特徴の効果的な離散化手法の検討、そして組み合わせる際の重み付けの検討をすることで、少ない次元数で、安定した検索精度が得られるよう検討を続ける。

参考文献

- [1]P.Bézier, Numerical control: Mathematics and Application, Jhon Wiley & Sons. London, translated by R.Forrest,1972.
- [2]P.Castejau,Shape Mathematics and CAD, Kogan Page,London 1986.
- [3]堀越力,末永康仁,中根一成, 超2次関数膨張法と球面調和関数による3次元形状の記述,信学論(D-II), vol. J78-D-II, no.1, pp.50-60, 1995.
- [4]山田秀秋,木邑信夫,上原邦昭,田中克己,VRML検索エンジンの設計と実装,信学技報,DE97-12, 1997.
- [5]Eric Paquet, Marc Rioux, A Content-based Search Engine for VRML Databases, Proc IEEE CVPR 98, pp.541-546, 1998.
- [6]鈴木一史,加藤俊一,築根秀男,主観的類似度に適応した3次元多面体の検索,信学論(D-I), vol.J82-D-I, no.1, pp.184-192, 1999.
- [7] De Espona Infografica
(<http://www.deespona.com>)