

3次元形状の検索

大淵 竜太郎

山梨大学

1. まえがき

3次元形状モデル(3Dモデル)はマルチメディアデータ型としてすっかり定着した。産業用途では、自動車、携帯電話、建築物などの形状や機構の設計あるいは強度評価などに使われる。映画では3Dモデルを用いたコンピュータグラフィックス(CG)映像がメインのものも多くなり、すでに「特殊」効果ではなくなった。携帯電話やゲームコンソール用のゲーム、各種のAR(Augmented Reality, 拡張現実)アプリケーション、3次元医療画像による診断や治療支援、医薬品候補化合物の3次元立体構造に基づいた選別、考古学的遺物の管理や再構築、レンジスキャナを用いた生体認証、など、いたるところで3次元形状モデルの利用が拡大している。ユーザ生成コンテンツとしての3Dモデルやそれを用いたコンピュータグラフィックス(CG)アニメーションなどがユーザ生成コンテンツとして蓄積・流通するなど、以前は考えられなかった。しかし今では、プロ顔負けのCG動画が多数、動画共有サイトに置かれ、また、何100万個ものユーザ生成3DモデルがGoogle 3D Warehouse [19]に蓄積されている。

3Dモデルが広まった背景には、CPU処理能力とメモリ容量の増大、Windows 7などにおける3次元CGの(実質的)必須化とそれに伴うグラフィックス処理用ハードウェア(GPU)の普及などがある。最近話題の(立体視の意味での)3D TVや3D映画が普及すると、映像コンテンツ制作に3Dモデルを使う機会がさらに増えるだろう。

このように3Dモデルの利用が広まると、量、複雑度、種類ともに爆発した3Dモデルを効率よく管理するため、3Dモデルを形状等の内容に基づいて検索する技術が重要となる[47][8][21]。3Dモデルの検索が可能になれば、作成済みの3Dモデルを検索して再利用する、あるいは作成済みの3Dモデルを複数検索し「良いとこ取り」して組み合わせる新たなモデルを作る[15]、などが可能となる。

2. 3Dモデルの検索

3Dモデルの検索は、大筋ではほかのマルチメディアデータの検索と変わらない(図1)。前処理として、検索対象となる3Dモデルの特徴を抽出し、これをその3Dモデルと共にデータベース(DB)内に保存する。ユーザから何

らかのクエリが与えられると、システムはそのクエリから特徴を抽出する。ついで、クエリから求められた特徴とデータベース内の全3Dモデルの特徴との間で相違度計算を行い、モデル対の相違度を求める。最後に、相違度を昇順に並び替えた3Dモデルの順序リストを検索結果としてユーザに提示する。

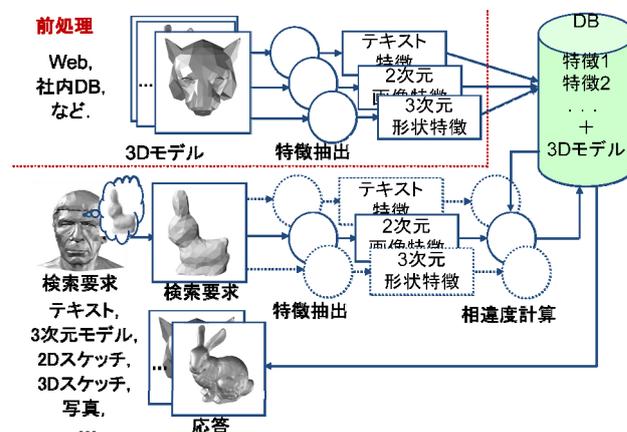


図1. 3次元形状モデル検索システムの例

2.1. 3Dモデルの何で比べるか

時間変化の無い(静止)3Dモデルをその内容で検索する際に最も重要なのは、3Dモデルに本質的な形状である。形状のほかに、(静止)3Dモデルの表面の属性(例えば、CGモデルの色やテクスチャ、分子モデルの電荷)、およびモデル内部の属性(例えば、温度(スカラー)や流速場(ベクトル))などに基づく検索も考えられる。形などの時間変化に注目した検索も考えられる。しかし、広い意味での形や属性の時間変化に基づく3Dモデル検索の研究はほとんど無く、有関節のCGキャラクターのアニメーションデータの検索・編集・再ターゲットング等の研究に限られている。本稿では、時間変化の無い「静止」した3Dモデルを形状の類似性で検索する場合に話題を絞る。

形状といっても、全体に注目するのか、部分に注目するのか、で手法も困難さも変わる。全体検索は、クエリの全体と検索対象モデルの全体を形状で比較する。これに対し部分検索では、部分をクエリとしてその部分を含む全体を検索したり、あるいは、全体をクエリとしてその全体に含まれる部分形状を持つ全体を検索したりする。

形状比較のもう一つの分類として、比較する3次元の形を剛体モデルと考えるか、それとも大域の変形(global deformation)や姿勢変化(articulation)を許容した姿勢変化モデルと考えるか、がある。例えば、ヒトのモデルは、走っていてもしゃがんでいても類似として扱いたい。

既存の3Dモデル検索の手法は, その殆どが剛体を仮定した全体検索で, 用途を限ればその検索性能は実用域に入りつつある. また, 姿勢変化や大域の変形を許容する全体検索については, 近年一定の成果が得られた. 本稿では, 剛体の全体検索を中心とし, 姿勢変化を許容する全体検索にも言及する. 部分検索の研究はまだこれからである.

2.1. クエリの提示

どうやってクエリを与えるかは, 他のマルチメディアデータの場合と同様, 3Dモデルにとっても重要な課題である. これまで最も多いクエリの与え方は3Dモデルの例示だが, 検索したいモデルに類似した3Dモデルが手元に有るとは限らない. そこで, テキスト, 2次元(2D)スケッチ, 3Dスケッチ, 写真[3], 印象語, およびこれらの組み合わせによるクエリも用いられる. クエリの形式が変われば, 当然, 用いる特徴やその比較方法も変わってくる.

図2は初期の代表的な検索エンジン Princeton 3D Model Search Engine [14]の検索インターフェースである. この例では2Dの3面図スケッチをクエリとしているが, 同システムでは他に, テキスト, 3Dスケッチ, 例示3Dモデルのアップロード, さらに, いずれかの手法で得た検索結果中の3Dモデルを選択して例示, というように複数のクエリの与え方が利用できる.

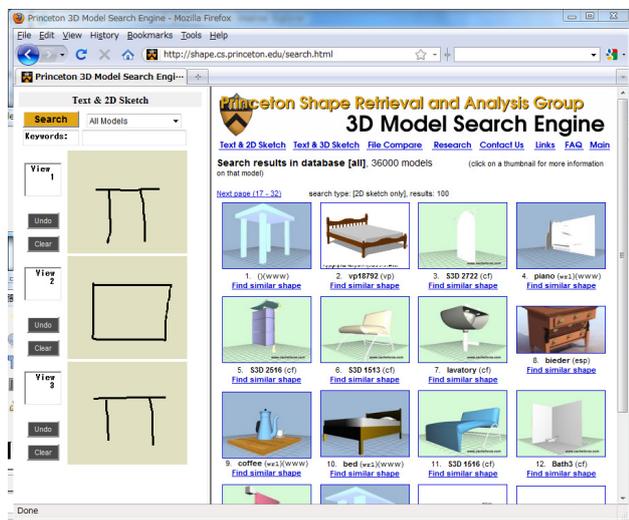


図2. Princeton 3D Model Search Engine [14]

このほか, 「検索」をせずにブラウズすることで必要とするモデルを探す方法もある. この際, 形状の類似性による階層クラスタリングなどの(半)自動構造化, (半)人手によるカタログ化, 等でDBを構造化し, ブラウジングを効率化するやり方が試みられている[7][12].

2.2. 特徴抽出と比較

内容によるメディアデータの類似比較では, 弁別的であること, しかし過度に弁別的ではないこと, 抽出や比較が容易であること, 等の要求がある. 3Dモデルを形で比べる場合, 加えて, 大域的な幾何変換(主に相似変換)に対する不変性, および多種多様で互いに互換性の無い形状表現に対する対応が求められる. また, 使い道によっては有関節モデルの姿勢変化や大域変形に対する不変性が求められることもある.

3Dモデルは, 多様で, しばしば相互互換性の無い表現形式を用いている. この点で, 常に画素の2D配列に落とせる2D画像とは異なる. CG目的の3Dモデルは見かけが重要で, 複数のメッシュとポリゴンの集合であるポリゴンスプの場合が多い. 例えば, 図3の右端のアリのモデルでは, 多角形が相互貫入していたり, 逆に離れていたりする. このようなモデルは, (このままでは)体積は計算できないし, 表面の曲率も満足には計算できない. これらのポリゴンスプや(開いた)メッシュは3次元の立体(ソリッド)ではないが, 機械CADの3Dモデルはソリッドを表現したB-rep(境界表現)モデルの事が多く, 体積も計算できる. この他, ボクセル列挙, 有向点群(oriented point set), CSG(Constructive Solid Geometry)等, 数々の表現がある. また, ポリゴンメッシュに限っても, ポリゴン(頂点)のサンプル密度, 3角形以外に4角形や5角形も許すか, 穴を許すか, 等で違ってくる. 表現は同じとしても, その符号化(メッシュの位相構造の表記は, 数値は整数か, 有効数字は何桁か, など)および書式(ヘッダの位置, 幾何要素の並び方, など)が少しずつ異なる多種のファイル形式があり, その互換性も問題になる.

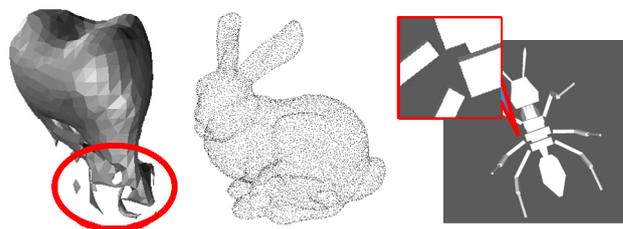


図3. 3Dモデルは3次元立体でないことが多い. また, 単連結でないメッシュ, 点群, ポリゴンスプ, など, 多種多様な, 互いにしばしば非互換な表現が使われる.

3Dモデルから特徴を抽出する際, 与えられた表現(たとえばポリゴンメッシュ)では必要な特徴(例えば3D Zernike変換)を計算できないことがある. その場合は, 特徴抽出のために, 以下のような中間表現(例えば3次元ボクセル)に変換してから特徴抽出を行う.

- 3次元画像 (立体のボクセル, 面のボクセル) [24][48][30]
- 面群 (メッシュ, 独立ポリゴン) [16]
- 線群 (スライスの輪郭, など) [40]
- 点群 (無向点群, 有向点群) [38][49][34]
- 2D画像群 [2][3][4][5][9][10][13][28][29][33][36][39][48]

3Dモデルの比較では, 形状表現に対する不変性に加え, 大域的な相似変換 (一様スケーリング, 平行移動, 回転, の組み合わせ) に対する不変性が要求される. その自由度は7と高く, 中でも回転の3自由度に対する不変性の実現が課題である. 相似変換に対する不変性を実現するには, 以下のような方法が用いられる.

- Pose normalization (姿勢正規化) と部分的に幾何変換不変な特徴を組み合わせる.
- 相似変換に対し完全に姿勢正規化をする.
- 相似変換に不変な特徴を用いる.
- 比較対ごとに姿勢をすり合わせる.

メッシュやポリゴンスープのモデルを相似変換に対して姿勢正規化するには, 各ポリゴンに面積密度一定の質量があると仮定し, これを質点でモンテカルロ近似するなどして共分散行列を作り, 主成分分析する手法が多く用いられる. こうして得られた主軸の正負の向きは未定なので, 鏡像対称の場合の数6も含め, 合計48の場合の数で比較する場合[29]もある. しかし, 現実にはしばしば姿勢正規化に失敗し, 検索性能が低下する.

このほか, 各種のノイズ, 例えば, 頂点座標値への雑音重畳, 不要な穴やトンネル, 独立ポリゴン, 縮退したポリゴン, 重複した幾何要素 (同一位置に複数の頂点やポリゴン等が存在する) などに対する不変性・頑強性なども要求される場合が多い.

2.2.1. 見かけの特徴による比較

見かけによる比較手法は, 3Dモデルをレンダリングして生成したシルエット画像や深さ画像などから抽出した特徴を用いるため, 点群やポリゴンスープなどの多様な形状表現に対応でき, また検索性能も高いものが多い. さきがけとなったChenらのLight Field Descriptor (LFD) [9]は当時としては大変高性能であった. LFDは, 多視点からのレンダリングと, 画像の面内で回転不変な2D画像の全体特徴を組み合わせる3D回転の不変性を実現する. 残された平行移動と一様スケーリングに対する不変性は, レンダリングの前に行う姿勢正規化で実現する.

LFDの登場後, 数多くの見かけに基づく3D形状比較手

法が提案された. 相似変換不変性の実現は, 完全に姿勢正規化する[39][29][48], 一部分 (平行移動と一様スケーリング) を正規化する[9][13][32][36], 一對ごとに姿勢をすり合わせる[28], 姿勢正規化をせずに3Dモデル表面上に配置した局所特徴の集合で比べる[5], などいろいろである. 特徴抽出に用いる画像にはChenらの用いたシルエットと輪郭のほか, 深さ画像[48][33][36]やモデル面の曲率の画像[4]などが用いられる. レンダリングした画像から抽出する全体特徴には, 2D Fourier変換, 2D Zernike変換, 輪郭の多重解像度解析[29], これら複数の組み合わせ[9][10], などが用いられる. また, 画像から局所特徴を抽出する例にはLoweのSIFT [27]を用いた手法[36][13]がある.

多視点レンダリングと (面内で) 回転不変な画像の全体特徴を組み合わせるLFDのような手法では, 視点数を十分取れば, 回転の姿勢正規化の失敗は心配しなくてよい. しかし, 1モデルを視点の数だけの特徴の集合で記述するため, モデル1対の比較は特徴集合対特徴集合の比較となり, 計算コストが高い. そこで, 比較の手間を減らすため, 弁別性の高い少数の視点を選択して選び出す手法[2]が提案された. 別の方法では, 多視点の画像群から抽出した多数の局所特徴をBag-Of-Features (BOF) 法を用いて3Dモデルあたり1つの特徴に統合する[36][13]. こうすれば, 1対の3Dモデルの比較が1対の特徴ベクトルの比較となる. さらに, 多視点レンダリング, コンテキストを無視したBOF法そしてSIFT特徴の幾何変換不変性が相まって, モデル全体の相似変換に加えてモデルの姿勢変化にもある程度不変な比較が可能となる.

2.2.2. 3次元の幾何特徴による比較

見かけによる比較は, レンダリングさえできれば多様な形状表現に対応できるという点で大変便利である. しかし, 機械CADモデルなどでは, 外からの見かけのみならず内部構造が重要である. このような場合は, 3次元の形状特徴を, 3次元の点群[38][49][34], ボクセル[24][30][48], などから抽出して比較する手法が有利となる.

3次元の形状特徴はほぼ全てが全体特徴である. 良く用いられるのは回転不変な3D Zernike変換[30]やSpherical Harmonic変換[24]で, これらを一様スケーリングと平行移動に対する姿勢正規化と組み合わせる. 3次元特徴ではないものの, 相似変換に対して姿勢正規化した3Dモデルを輪切りにした一群の輪郭からも3次元的内部構造を捉えることができる[40]. ポリゴンスープを受け付け, 相似変換不変な3D特徴もある. OsadaらのD2 [38]では, ポリゴン面をランダムに撒いた点群でサンプルし,

そのすべての点对距離の1次元(1D)ヒストグラムをとる(図5). D2にヒントを得てこれを拡張したAAD[34]やSPRH[49]は, 点对間の距離に加えて, 点对の法線ベクトルの内積や捻り角などを加えた結合ヒストグラムである. これらをモルフォロジ的な多重解像度表現[32], さらには距離空間の学習[35]と組み合わせると, 機械部品モデル等において高い検索性能を得る.

3次元の局所特徴の集合を用いた手法は, 主にその特徴抽出と比較の手間が大きいことから, ごく少数しか存在しない. その一つ, Shilaneらの手法[43]では, 3Dモデルに多数配置した局所3D特徴の弁別性を学習し, モデルごとに少数個の局所特徴を選択する. これにより, 検索性能を低下させることなく比較の手間を減らしている.

図4は2D特徴と3D特徴を組み合わせるPapadakisらの手法[39]である. 相似変換に対し姿勢正規化した後, 6軸方向の深さ画像からFourier変換で2D特徴を, またSpherical Harmonic変換により3D特徴を, それぞれ抽出し, この2つの特徴を組み合わせる.

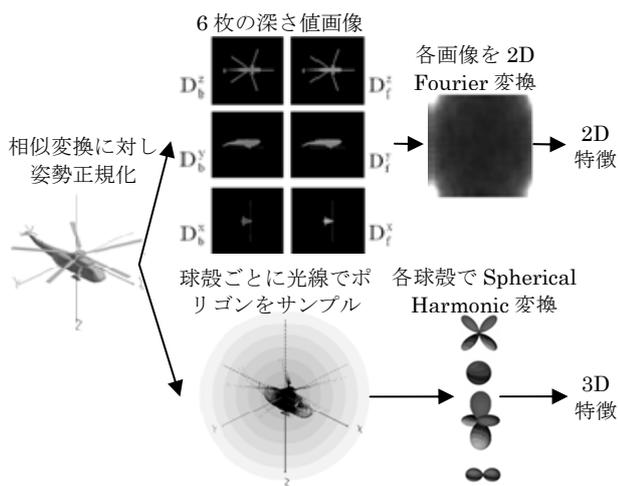


図4. 2D特徴と3D特徴を組み合わせるPapadakisらの手法[39] (Images in the figure used under permission from P. Papadakis.)

2.2.3. 位相特徴による比較

3Dモデルの位相的な特徴, 例えばスケルトンやReebグラフ, メッシュの低次元スペクトラ, 多様体上の局所特徴の関係, などを用いた検索手法[1][6][22][45][41][46]は, 姿勢変化や大域変形に強い利点がある.

スケルトンは(閉じた)メッシュやボクセル化したソリッドから求め, その位相と, スケルトンの部分ごとに対応した数値特徴(例えば半径)で形状を記述する. しかし,

いわゆるスケルトンの計算は困難で, 幾何・位相ノイズに弱いことが多く, またスケルトン相互の比較も困難である. 最近では, 多様体メッシュを入力とし, スケルトンではなく, 多様体上の多数の注目点における局所的数値特徴の関係をそのままそのメッシュの特徴とする手法[1][22][45][41][46]が注目されている. これらの手法では, 多様体上の多数の注目点において局所特徴, 例えば点間の測地線距離や点の近傍の曲率を求め, これを多様体上の距離(測地線距離, 拡散距離, など)でパラメタ化したものを特徴とする. こうして得られた特徴は, 注目点間の多様体上の距離が変わらない大域変形や姿勢変化に対してほぼ不変である. スケルトンと比べると, これらの手法は幾何および位相ノイズに対し頑強である. 弱点は, 直接に適用できる形状表現が単連結で閉じたメッシュに限られることである.

3次元モデルの検索コンテストSHape REtrieval Contest (SHREC) 2010 [44]のうち, 姿勢変化モデルの検索を競うNon-rigid 3D Shape (非剛体3D形状)部門では, Smeetsらの, 局所特徴を多様体上でパラメタ化した特徴群による手法[46]が, Furuyaらの, 多視点からの見かけの局所特徴をBOFで統合した後に距離空間の学習をした手法[13]と同着で1位となった.

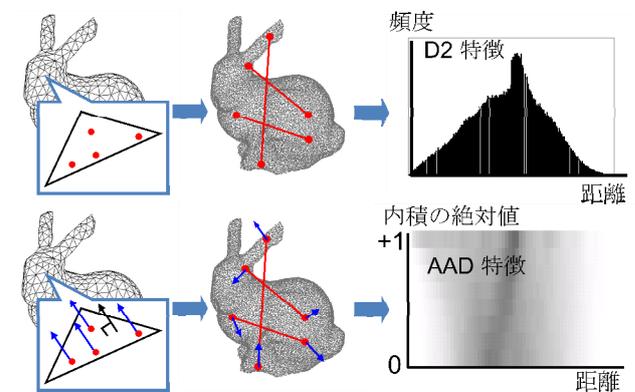


図5. D2特徴[38]とAAD特徴[34].

2.2.4. 相違度の計算

特徴の比較は, ベクトル対ベクトルの比較か, 集合対集合の比較になる. 特徴ベクトル間の相違度の計算は, 多くの場合, L1, L2, L0.5, Cosine 尺度, Kullback-Leibler Divergenceなどの固定された距離関数で行われる. また, 集合対集合の相違度計算には, Earth Mover's Distanceなどが用いられてきた. しかし, 最近ようやく, 特徴の分布を距離計算に反映させて相違度計算を行う手法も導入されつつある.

2.3. セマンティックな検索

多数により共有され定着した「意味」,あるいは検索セッションごとのユーザの「意図」,をクエリとしてどのようにシステムに伝えどどのように検索するか,は3Dモデルの検索にとっても大変重要である[17].しかし,3Dモデル検索の研究では,特徴の抽出と比較に注意が向いていたためか,意味や意図の扱いが軽視されてきた.これまで,有意度フィードバックを用いて意図(単一意味カテゴリ)を伝える手法が中心に研究されてきた[11][26][31][37]が,最近,SVM [20],教師付き多様体学習[35],Boosting [25]などを用いてオフラインで複数の意味カテゴリの学習を行う手法も見られるようになった.また,3次元モデルをテキストで検索するための自動ラベル付け(ラベルの伝播)の研究[18]も始まった.

特徴抽出や比較では3Dモデル独自のところも多々ある.しかし,意味や意図の扱いは画像や動画像など他のメディアとほぼ共通で,今後これら他分野の研究から学ぶべきところが多い.

2.4. 性能評価とベンチマーク

10年前には公開されたデータベースも正解クラス付きのベンチマークもなく性能評価に苦労した.その後公開されたPrinceton Shape Benchmark (PSB)[42]は多様な形状の3Dモデルを含み,剛体の全体検索の評価を目指したものである.教師付き学習を意図し,全1814モデルが学習用と評価用に2等分される.他に姿勢変化モデルのベンチマーク[50],機械部品のベンチマーク[23]などもある.

国際的な検索性能のコンテストSHRECは2006年に初めて開かれ,以来,毎年開催されている[44].2006年には,剛体の全体検索を評価する1種目のみが行われたが,以後,CADモデル,顔モデル,分子モデル,姿勢変化モデル,など多様なトラックが開かれた.

研究を進めるうえで今欲しいのは,手法のスケーラビリティも評価できるような,正解カテゴリ付きでモデル数が1万を超える(できれば10万を超える)大規模なベンチマークデータベースである.Google 3D Warehouse [19]には,建築物関連に偏ってはいるものの,タグ(ノイズは有るが)の付いた,10万を軽く超える数の3Dモデルが集まっている.しかし,残念ながら,そのスナップショットは未公開である.

3. むすび

本稿では,3次元形状の,形状の類似性に基づく検索について述べた.3次元形状モデルと言っても多種多様な表

現がある.2次元画像(類)に例えれば,いわゆる画像(画素の2次元配列)と2次元グラフィックス(物体ベースの2次元グラフィックス)をひとくくりで扱っているようなものである.そのため,筆者の非力も相まって,手法の説明が整理不足となったことをお詫びする.

最近話題の(立体視の意味での)3D TVは,ある意味で,単一視点からの3次元形状(深さ)データである.今後,画像,グラフィックス,といった垣根を越えて,3次元(時間も含めて4次元)データの内容や意味に基づく比較・検索・分類などの処理の研究が進むであろう.数年後にもう一度整理しなおすとき,どうなっているのか楽しみである.

参考文献

- [1] A. Agathos, I. Pratikakis, P. Papadakis, S. Perantonis, P. Azariadis and N. Sapidis, Retrieval of 3D Articulated Objects Using a Graph-based Representation, *Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval (EG 3DOR'09)*, pp. 29-36, (2009).
- [2] T. F. Ansary, M. Daoudi, J-P Vandeborre, A Bayesian 3-D Search Engine Using Adaptive Views Clustering, *IEEE Tran. on Multimedia*, **9**(1), pp. 78-88, (2007)
- [3] T. F. Ansary, J-P. Vandeborre, M. Daoudi, 3D-Model search engine from photos, *Proc. 6th ACM Int'l Conf. on Image and Video Retrieval (CIVR) 2007*, pp. 89-92, (2007).
- [4] J. Assfalg, A. Del Bimbo, P. Pala, Curvature Maps for 3D CBR, *IEEE ICME'03*, (2003).
- [5] J. Assfalg, A. Del Bimbo, P. Pala, Retrieval of 3D objects by visual similarity, *6th ACM Int'l Workshop on Multimedia Information Retrieval (MIR'04)*, pp. 77-83, (2004).
- [6] S. Biasotti, S. Marini, M. Spagnuolo, B. Falcidieno, Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes, *Computer-Aided Design (CAD)*, **38**(9), pp. 1002-1019, (2006).
- [7] B. Bustos, D. Keim, C. Panse, T. Schreck, 2D Maps for Visual Analysis and Retrieval in Large Multi-Feature 3D Model Database, *poster, IEEE Visualization*, pp. 598.2, (2004).
- [8] B. Bustos, D. Keim, D. Saupe, T. Schreck, Content-Based 3D Object Retrieval, *IEEE Computer Graphics and Applications (CG&A)*, **27**(4), pp. 22-27, (2007).
- [9] D-Y Chen, X-P Tian, Y-T Shen, M. Ouhyoung, On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval, *Computer Graphics Forum*, **22**(3), (2003).
- [10] P. Daras, A. Axenopoulos, A Compact Multi-view Descriptor for 3D Object Retrieval, *7th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI)*, pp. 115-119, (2009)
- [11] M. Elad, A. Tal, S. Ar., Content Based Retrieval of VRML Objects - An Iterative and Interactive Approach, *Proc. 6th Eurographics workshop on Multimedia*, pp. 107-118, (2001).
- [12] S. Endo, T. Baba, S. Shiitani, Y. Uehara, S. Nagata, Shape based 3D model retrieval without query, *Proc. 6th ACM Int'l Conf. on Image and Video Retrieval (CIVR) 2007*, pp. 218-225, (2007).
- [13] T. Furuya, R. Ohbuchi, Dense Sampling and Fast

- Encoding for 3D Model Retrieval Using Bag-of-Visual Features, *Poster, Proc. 8th ACM International Conference on Image and Video Retrieval (CIVR)*, No. 26, (2009)
- [14] T. Funkhouser, P. Min, M. Kazhdan, J. Chen, A. Halderman, D. Dobkin, D. Jacobs, A search engine for 3D models, *ACM Transaction on Graphics*, **22**(1), pp. 83-105, (2003)
- [15] T. Funkhouser, M. Kazhdan, P. Shilane, P. Min, W. Kiefer, A. Tal, S. Rusinkiewicz, D. Dobkin, Modeling by Example, *ACM Transaction on Graphics*, **23**(3), pp.652-663, (2004).
- [16] R. Gal, D. Cohen-Or, Salient Geometric Features for Partial Shape Matching and Similarity, *ACM Transaction on Graphics*, **25**(1), pp. 130-150, (2006).
- [17] B. Gao, H. Zhen, S. Zhang, An Overview of Semantics Processing in Content-Based 3D Model Retrieval, *2009 Int'l Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, pp. 54-59, (2009).
- [18] C. Goldfeder, P. Allen, Autotagging to improve text search for 3D models, *Int'l Conf. on Digital Libraries*, pp. 355-358, (2008)
- [19] Google 3D Warehouse,
<http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>
- [20] S. Hou, K. Lou, K. Ramani, SVM-based Semantic Clustering and Retrieval of a 3D Model Database, *Computer-Aided Design and Applications*, **2**(1-4), pp. 155-164, (2005).
- [21] M. Iyer, S. Jayanti, K. Lou, Y. Kalyanaraman, K. Ramani, Three, Dimensional Shape Searching: State-of-the-art Review and Future Trends, *Computer-Aided Design*, **37**(5), pp. 509-530, (2005).
- [22] V. Jain, H. Zhang, A Spectral Approach to Shape-Based Retrieval of Articulated 3D Models, *Computer-Aided Design*, **39**(5), pp. 398-407, (2007).
- [23] S. Jayanti, Y. Kalyanaraman, N. Iyer, K. Ramani, Developing An Engineering Shape Benchmark For CAD Models, *Computer-Aided Design*, **38**(9), pp. 939-953, (2006).
- [24] M. Kazhdan, T. Funkhouser, S. Rusinkiewicz, Rotation Invariant Spherical Harmonics Representation of 3D Shape Descriptors, *Symposium of Geometry Processing (SGP) 2003*, pp. 167-175, (2003).
- [25] H. Laga, M. Nakajima, A boosting approach to content-based 3D model retrieval, *5th int'l conf. on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*, pp. 227-234, (2007).
- [26] G. Leifman, R. Meir, A. Tal, Semantic-oriented 3D shape retrieval using relevance feedback, *Visual Computer*, **21**(8-10), pp.865-875, (2005).
- [27] D. G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, **60**(2), pp. 91-110, (2004).
- [28] A. Makadia, K. Daniilidis, Spherical Correlation of Visual Representations for 3D Model Retrieval, *IJCV*, DOI:10.1007/s11263-009-0280-7, (2009)
- [29] T. Napoleon, T. Adamek, F. Schmitt, N.E. O'Connor, SHREC'08 entry: Multi-view 3D retrieval using multi-scale contour representation, *IEEE Shape Modeling International (SMI) 2008*, pp. 227-228, (2008).
- [30] M. Novotni, R. Klein, 3D Zernike Descriptors for Content Based Shape Retrieval, *ACM Symp. on Solid Modeling and Applications 2003*, pp. 216-225, (2003).
- [31] M. Novotni, G. J. Park, R. Wessel, R. Klein, Evaluation of Kernel Based Methods for Relevance Feedback in 3D Shape Retrieval, *4th Int'l Workshop on Content Based Multimedia Indexing (CBMI'05)*, (2005).
- [32] R. Ohbuchi, T. Takei, Shape-Similarity Comparison of 3D Models Using Alpha Shapes, *11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics) 2003*, pp.293-302, (2003).
- [33] R. Ohbuchi, M. Nakazawa, T. Takei, Retrieving 3D Shapes Based On Their Appearance, *5th ACM SIGMM Int'l Workshop on Multimedia Information Retrieval (MIR 2003)*, pp. 39-45, (2003).
- [34] R. Ohbuchi, T. Minamitani, T. Takei, Shape Similarity Search of 3D Models by using Enhanced Shape Functions, *International Journal of Computer Applications in Technology (IJCAT)*, **23**(3/4/5), pp.70-85, (2005).
- [35] R. Ohbuchi, A. Yamamoto, J. Kobayashi, Learning semantic categories for 3D Model Retrieval, proceedings of the ACM International Multimedia Conference, *ACM Int'l Workshop on Multimedia Information Retrieval (MIR) 2007*, pp. 31-40, (2007).
- [36] R. Ohbuchi, K. Osada, T. Furuya, T. Banno, Salient local visual features for shape-based 3D model retrieval. *IEEE Shape Modeling International (SMI) 2008*, pp. 93-102, (2008).
- [37] R. Ohbuchi, T. Shimizu, Ranking on semantic manifold for shape-based 3D model retrieval, *1st ACM Int'l. Conf. on Multimedia Information Retrieval*, pp. 411-418, (2008).
- [38] R. Osada, T. Funkhouser, Bernard Chazelle, David Dobkin, Shape Distributions, *ACM Transaction on Graphics*, **21**(4), pp. 807-832, (2002).
- [39] P. Papadakis, I. Pratikakis, T. Theoharis, G. Passalis, S. Perantonis, 3D Object Retrieval using an Efficient and Compact Hybrid Shape Descriptor, *2008 Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval (3DOR)*, (2008).
- [40] J. Pu, Y. Liu, G. Xin, W. Liu, Y. Uehara, 3D Model Retrieval Based on 2D Slice Similarity Measurements, *2nd Int'l Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT) 2004*, pp. 95-101, (2004).
- [41] M. R. Ruggeri, G. Patane, M. Spagnuolo, D. Saupe, Spectral-driven isometry-invariant matching of 3D shapes, *IJCV*, DOI:10.1007/s11263-009-0250-0, (2009).
- [42] P. Shilane, P. Min, M. Kazhdan, T. Funkhouser, The Princeton Shape Benchmark, *Proc. Int'l Conf. on Shape Modeling and Applications 2004 (SMI '04)*, pp. 167-178, (2004). <http://shape.cs.princeton.edu/search.html>
- [43] P. Shilane, T. Funkhouser, Distinctive Regions of 3D Surfaces, *ACM Transaction on Graphics*, **26**(2), (2007).
- [44] SHREC Home Page, R.C. Veltkamp, et al., 2006~2010, <http://www.aimatshape.net/event/SHREC>
- [45] K. Siddiqi, J. Zhang, D. Macrini, A. Shokoufandeh, S. Bioux, S. Dickinson, Retrieving Articulated 3-D Models Using Medial Surfaces, *Machine Vision and Applications*, **19**(4), pp. 261-275, (2007).
- [46] D. Smeets, T. Fabry, J. Hermans, D. Vandermeulen, P. Suetens, Isometric deformation modelling for object recognition, *13th Int'l Conf. on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP) 2009*, LNCS 5702, pp. 757-765, (2009).
- [47] J.W.H. Tangelder, R.C. Veltkamp, A survey of content based 3D shape retrieval methods, *Multimedia Tools and Applications*, **39**, pp. 441-471, (2008)
- [48] D. Vranić, 3D Model Retrieval, *Ph.D. thesis*, University of Leipzig, Germany, (2004). (この博士論文は複数の検索

大淵竜太郎, 「3次元形状の検索」, 講座: 第7回 マルチメディア検索の最先端,
映像情報メディア学会誌 2010年7月号, pp. 93-98.

手法を提案・評価している.)

- [49] E. Wahl, U. Hillenbrand, G. Hirzinger. Surflet-Pair-Relation Histograms: A Statistical 3D-Shape Representation for Rapid Classification, *4th Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, pp. 474-481, (2003).
- [50] J. Zhang, R. Kaplow, R. Chen, K. Siddiqi, The McGill Shape Benchmark, (2005)
<http://www.cim.mcgill.ca/shape/benchMark/>