

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330133

研究課題名(和文) スケッチによる手軽でスケーラブルな3Dモデル検索

研究課題名(英文) Scalable and easy-to-use sketch-based 3D model retrieval

研究代表者

大淵 竜太郎 (OHBUCHI, Ryutarou)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号：80313782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スケッチによる手軽でスケーラブルな3Dモデル検索を目指して次の3つのアプローチで研究を行った：(1) スケッチが3Dモデルの見かけとかけ離れている問題を解決するため、検索しやすいスケッチを描画するよう計算機が人を支援する、スケッチを検索要求とした3Dモデル検索の手法、(2) 部分を提示し、これを含む3Dモデルを検索するため、3Dモデルをランダムな位置・向き・大きさを持つ多数の部分体積へ分割し、これと検索要求を比べる手法、(3) 3Dモデル相互を高速に比較し検索を行うため、3D形状を直接ないし間接に2値ベクトルとして表現し、これをハミング空間で高速に比較する複数の手法。

研究成果の概要(英文)：Aiming for a convenient and scalable sketch-based 3D model retrieval system, we worked on the following three sub-goals; (1) A sketch-based 3D shape retrieval algorithm having an interactive sketch drawing assistance feature driven by sketch based image retrieval technology, (2) A part-based 3D shape retrieval algorithm that employs randomized volume subdivision by using numerous subvolumes having random position, orientation and size, (3) A fast 3D shape comparison algorithm by using binarized feature vector that are generated directly or indirectly from 3D shapes and compared in Hamming space.

研究分野：マルチメディア検索

キーワード：3次元形状検索 スケッチ検索 3次元形状特徴 多様体学習 深層学習

1. 研究開始当初の背景

3Dモデル検索の要求はあるものの、実利用は進んでいなかった。その主たる理由には以下のような制約がある。

- **3Dモデル例示検索は非現実的:** 欲するモデルと十分に類似した3Dモデルは手元に無い。
- **部分では探せない:** 全体ではなく、部分形状の一致で検索したいのに、できない。
- **速度と精度がスケールしない:** 大規模データベースでは速度も精度も不十分。

3Dモデルを検索しようとする場合、検索したい3Dモデルと十分に類似する形状の3Dモデルを手元に持つことはむしろ例外である。スケッチによる検索は、多くの人が、手軽に、形(の2次元投影)を指定して検索できる利点を備える。また、タブレット等のタッチ入力デバイスが普及した現在、スケッチ検索はその手軽さ、有用性を増してきたといえる。

スケッチによる3Dモデル検索の既存手法では、3Dモデルを、多視点(10~100以上の視点)から、(線画)スケッチと類似した2D画像にレンダリングし、これをスケッチと比較する。3Dモデルの2D画像化には、ある視点から見た3Dモデルの輪郭、谷線、山線などをとらえた特徴稜線レンダリングが多く用いられる。しかし、スケッチによる3Dモデルの検索の検索精度は実用に程遠かった。3Dモデル検索の国際コンテストSHRECでは、2012年と2013年にスケッチによる3Dモデル検索の部門があった。しかし、これらコンテストで成績上位の手法も、その検索精度は平均の平均適合度(mAP)で十数パーセントと低かった。

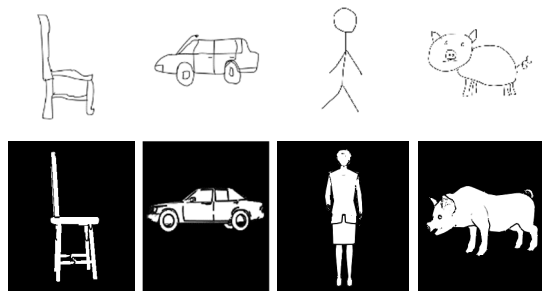


図1. 手描きのスケッチ(上)と、それらで検索されるべき3Dモデルの特徴稜線レンダリング画像(下)。スケッチとレンダリング画像の差が大きい場合も多い。

我々が2013年度に発表した機械学習に基づく超ドメイン特徴多様体(CDMR)法[9]は、スケッチ画像—3Dモデルレンダリング画像間の類似度に加え、スケッチ画像特徴間の類似度、3Dモデルレンダリング画像の類似度、をもとにスケッチ画像ドメインと3Dモデルレンダリング画像ドメインを統合したCDMRを教師なしで学習し、この特徴多様体を用いてスケッチと3Dモデル(のレンダリング画像)を比較する手法である。CDMR法はSHREC 2013スケッチ検索部門で1位のLiらの手法を凌ぐ精度を得た。しかし、CDMR法の検索精度も十分とは言えなかった。

上記2つ目の課題である部分による検索は、3Dモデル検索の現実的利用シナリオでしばしば要求される。例えば、とあるノートPC筐体の複雑な形を持つヒンジ部分と似た形状を持つ3Dモデルを検索し、編集の上で再利用したい、というような場合である。

しかし、研究開始当初まで、部分検索に有効な手法は提案されていなかった。検索要求となる部分形状が与えられても、検索対象となる3Dモデルのどの部分(3自由度)に、どんな向き(3自由度)で、どんなスケール(1自由度)の部分形状が含まれるのかわからない。データベース中の多数の3Dモデルのそれぞれに対し、しらみつぶしに7自由度の探索を行うのは計算量が非常に大きくなる(図2)。



図2. 検索要求と比較すべき部分形状の数を、ある3Dモデル内の位置、スケール、向き、並びにモデルの個数で列挙すると大きな数になる。

上記の3つ目の課題は、3Dモデル検索の精度を保ちつつ速度を大幅に向上することである。2013年時点で、3Dモデルのデータベースは大規模化しつつあり、Trimble 3D Warehouseではすでに1千万のオーダーの3Dモデルが蓄積されていた。これに對し当時の研究で用いられていたベンチマーク用のデータベースは高々1千個~1万個の3Dモデルからなっていた。データベースの3Dモデル数が1千万個を超えると、特徴の格納する空間計算量、特徴比較の時間計算量、が大きな問題となってくる。しかし、2013年時点の3Dモデル検索の研究は検索精度に注目しており、検索を効率化するための時間計算量、空間計算量の改善はあまり意識されていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、手描きスケッチなどの簡便な検索要求提示手法を用い、3Dモデルをその部分又は全体形状で比較し、大規模データベースを対象とした、高精度かつ高速な、3Dモデル検索手法の開発である。

3. 研究の方法

上述の目的に向け、次の3つの具体的目標を設定して研究を進めた。

- **スケッチ検索:** 手描きスケッチと検索対象である3Dモデルを線画としてレンダリングした画像との隔たりは大きく、効果的な比較ができない。そこで、我々は、検索システムがリア

リアルタイムで人のスケッチ描画を支援し、人の描画を 3D モデルの線画レンダリング画像に類似した描画に誘導する手法を研究した。

- 部分検索: 意味のある規模のデータベース、例えば 3D モデル 10k 個以上の 3D モデルデータベースを対象に、部分を検索要求として提示して形状類似検索を行うことができる手法を目指して研究を行った。
- スケーラブルな検索: 意味のある規模、例えば 3D モデル 10k 個以上の 3D モデルデータベースを対象に、部分を検索要求として提示して形状類似検索を行うことができる手法を目指して研究を行った。

4. 研究成果

(1) スケッチ検索

スケッチに基づいて 3D モデルを検索する際、提案された殆どすべての手法において、3D モデルを多視点からスケッチに類似した画像群をレンダリングし、これらとスケッチ画像を比較する。しかし、スケッチ様レンダリング画像と人の描くスケッチ画の間には差があることが多い。立体物を正しく並行投影や透視投影で描くことは困難である。自転車のように複雑な物体は、過って描かれることも多い。さらに、出来上がるスケッチは、ユーザの作画技術や作画スタイル、抽象化（例えば手足が棒状の人間など）などに大きく影響される。必ずしも形が類似するとは限らないスケッチと 3D モデルレンダリング画像をより高精度に比較するため、CDMR 法[9]等、機械学習を用いてスケッチの特徴と 3D モデル画像の特徴との比較を改善する手法なども提案されてきた。しかしこれらの手法の検索精度も十分とは言えない。

そこで、我々は、リアルタイム描画支援により人の描くスケッチ画を 3D モデルレンダリング画像に近づけ、その結果としてスケッチと 3D モデルレンダリング画像との比較の精度を高める、というこれまでになかったアプローチを提案した[学会発表 1]。このアプローチによる 3D モデル検索の処理手順を図 3 に示す。

図 4 はプロトタイプ・システムの描画・検索インタフェースの画像である。左下の白い正方形の区画が描画領域で、そこに検索したい 3D モデルのスケッチを描く。ユーザがストローク(描線)を追加するごとに、システムは、ユーザが作画中のスケッチの背景に、リアルタイムに(例えば 0.1 秒以内に)手本となる「shadow (影)」を表示する。描画領域の上には、描きかけのスケッチの中から検索された影画像 4 枚が表示される。これら影画像はデータベース中に存在する 3D モデルから生成された特徴稜線画像で、これらの中に欲しい 3D モデルの稜線画像がある場合にはそれを選択して検索結果とすることもできる。

図 5 に見るように、作画支援なしの場合に比べ、提案手法で作画支援した場合のスケッチ画像は 3D モデルをレンダリングした画像に似た画像になる。3D モデル検索シナリオでの小規模な検索実験で評価した結果、作画の改善による検索精度の向上が認められた。

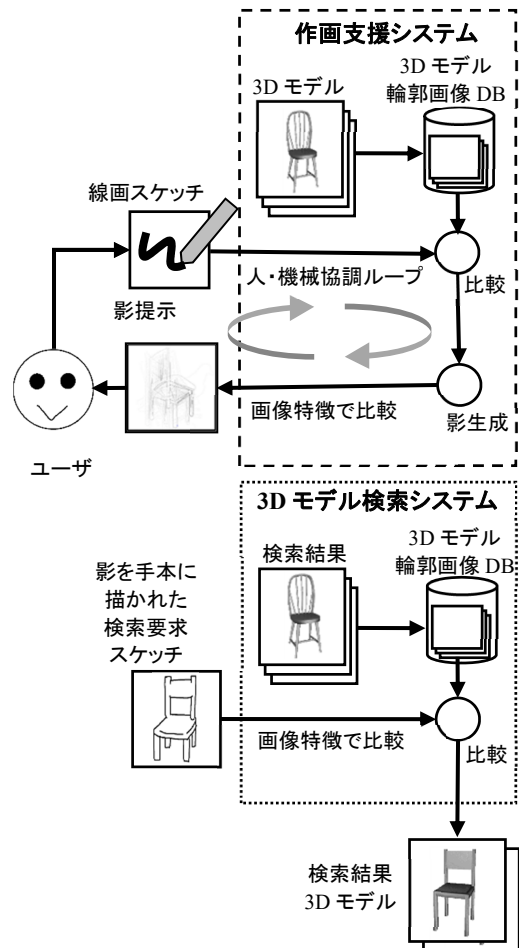


図 3. スケッチ描画を支援する仕組みを持ったスケッチによる 3D モデル検索システムの構成。

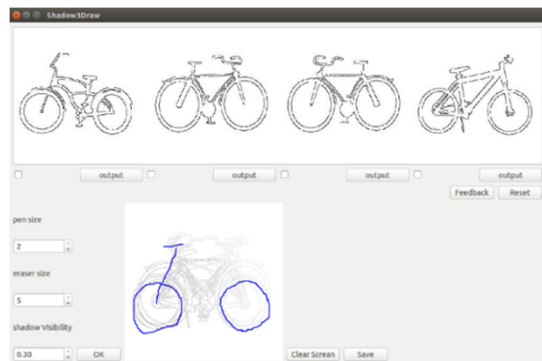


図 4. スケッチに 3D モデル検索のインタフェース画面。



(a) 支援なし (b) 支援あり (c) エッジ画像

図 5. 作画支援なしの場合 (a) に比べ、提案手法による作画支援ありで得られたスケッチ (b) のほうが 3D モデルを特徴稜線レンダリングした画像 (c) に類似する。

(2) 部分検索

部分形状を検索要求とする 3D モデル検索の手法は、少数ではあるがこれまでも提案されてきた。しかし、それらはみな、大規模な 3D モデルデータベースの検索を対象にしたものではなく、1 つの 3D モデル、ないし小規模(数十個程度)の 3D モデル群を対象に、部分形状からなる検索要求に類似した部分を探る手法であった。

我々が目指したのは、「小さくはない」3D モデルデータベース、例えば 10k 個以上の 3D モデルからなるデータベースを対象に、部分形状を検索要求とした形状類似検索を行うことである。しかし、すでに述べたように、力づくで部分を探ると場合の数が増え、時間計算量と空間計算量が増大する。我々は、ランダムなアスペクト比、大きさ、向きを持つ部分体積への分割と、この部分体積の形状を記述するコンパクトな 2 値特徴ベクトルを用いてこの問題の解決を試み、一定の成果を得た。提案する Part-based 3D Model Retrieval by Randomized Sub-Volume Partitioning (P3D-RSVP, 乱雑化部分体積分割を用いた部分による 3D モデル検索)法[7]の処理の流れを図 6 に示す。

ポリゴンからなる 3D モデルはまず 16k 個の有向点の集合に変換され、直方体のバウンディングボックスで囲まれる。次いで、点群モデルは、ランダムな向きと間隔を持つ $3 \times 3 \times 3$ の格子で 27 個の部分体積に分割される。この分割はランダムに 50 回繰り返され、1 モデル当たり合計 1,350 個の部分体積が作られる。この分割処理を Randomized Sub-Volume Partitioning (RSVP)と呼ぶ。もし 50k 個の 3D モデルからなるデータベースならば、全体で 68M 個の部分体積が作られる。各々の部分体積は多数の SPFH 特徴を用いて記述され、Super Vector Coding でエンコードされ、統合されて部分体積当たり約 8k 次元の実数値ベクトルとなる。この実数値特徴ベクトルはカーネル PCA で 512 次元に圧縮した後、ITQ ハッシングで 512bit の 2 値特徴ベクトル写像される。

2 値特徴ベクトル対の比較は Hamming 空間において Hamming 距離で行われる。Hamming 距離は、最近の CPU の持つ bit 幅の広い SIMD 演算命令と“1”ビット計数命令を組み合わせることで非常に高速に計算できる。

本手法を実験的に評価するにあたり、我々は、評価用のデータベースを作成した。これまで、3D モデルの部分検索を目的とした相応の規模のデータベースが存在しなかったためである。先行研究が存在しないために精度の比較はできないものの、いくつかの比較対象に比べて高い検索速度と精度を得ることができた。

時間計算量、空間計算量を評価したところ、50k 個の 3D モデルを含むデータベースにおいて検索要求提示から 1.9 秒で検索が終了し、検索処理の所要メモリ量は 4.0GByte であった。これは十分に実用的な処理時間および所要メモリ量である。クラスター PC や GPU を用いるなどして処理の並列化、高速化を図ればより大きなデータベースに対する部分検索も可能であろう。

図 7 は検索結果の例を示す。検索結果は左ほ

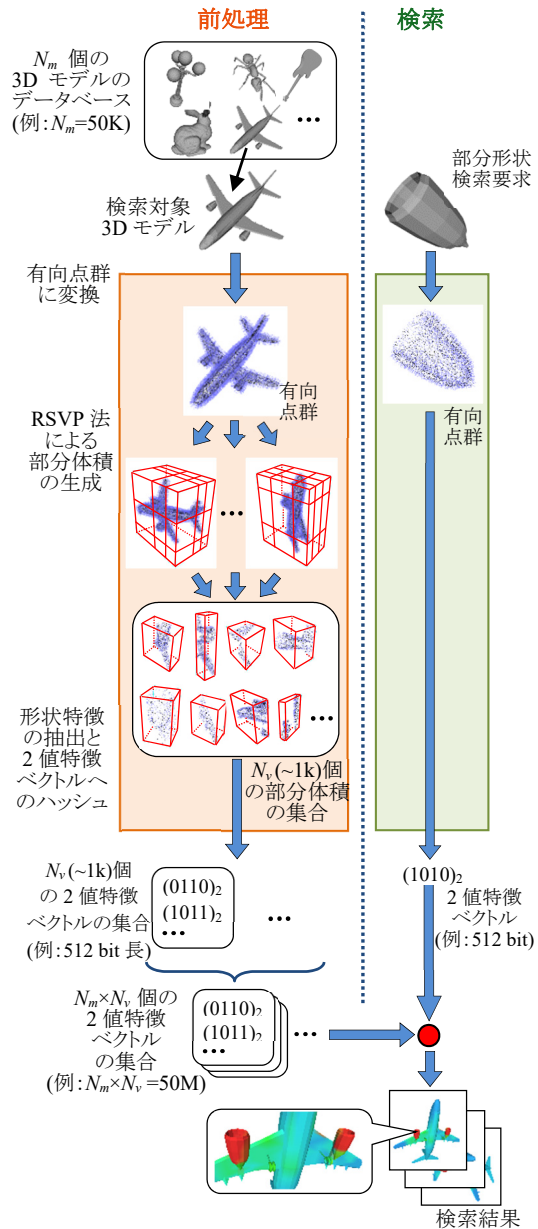


図 6. P3D-RSVP 法[8]の処理の流れ。前処理として、データベース中の 3D モデルを、多様な位置、スケール、向きを持つ N_v 個の部分体積に分割する。各部分体積を記述する特徴は 2 進特徴ベクトル(例えば 512bit)でコンパクトで、かつ比較が非常に高速である。

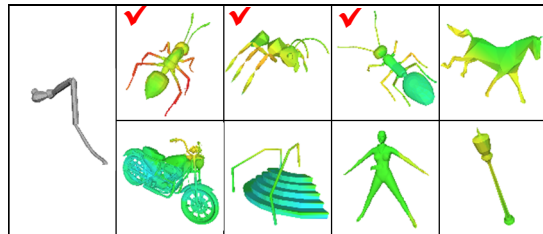


図 7. 検索結果の例。左端が検索要求、右側の 8 個が検索結果である。検索結果は似たものほど左側・上側にある。色は尤度を示し、赤いほど類似度が高い。検索要求と検索対象モデルのどの部分がマッチしているか色で確認できる。

ど検索要求に近く、またチェックマークの付いた検索結果が正解である。アリの前足を検索要求とした場合もアリの3Dモデルが上位に来ており、検索に成功していることがわかる。また、バイクのハンドル、ウマの足、等は、不正解ではあるが検索要求に形が類似している。

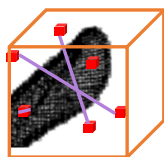
(3) スケーラブルな検索

スケーラブルな検索の技術は、上記の部分検索において重要であった。検索要求である部分形状と比較すべき検索対象の部分形状の数が非常に多くなり、特徴比較の時間計算量、並びに特徴格納のための空間計算量が大きくなるためである。

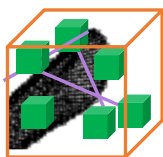
この問題に対し、我々は、2値特徴ベクトルの利用を試みた。2値特徴ベクトルはビット列のためのコンパクトで、かつHamming距離を用いた類似(距離)比較の演算が非常に高速であるという特徴を持つ。

我々が提案した超ドメイン特徴多様体(CDMR)を用いたスケッチによる3Dモデル検索の手法[9]は先行手法に比べて精度が高かったものの、CDMR上での距離比較に処理時間を要する欠点があった。そこで、我々は、CDMRをハッシングによりハッシングにより2値特徴ベクトル空間に写像し、高精度を維持したまま高速化を図る手法を提案した[10]。

また、我々はボクセル3Dデータから、軽量の計算により、2値特徴ベクトルを直接抽出する手法である3DORBを提案した[1][8]。3DORBは注目する立方体状の近傍(VOI)のボクセル値の分布をもとに3次元回転の正規化を行う。次いで、VOI内のボクセル対の値の大小比較よりビット列を得る。N対のボクセル値比較でNbitの2値特徴ベクトルが得られる(図8)。3DORBの特徴抽出処理は大小比較のみのため高速で、また3軸回転の正規化により一定の回転不変性を持つ。また、得られる特徴は512bit程度の2値特徴ベクトルであり、コンパクトである。



3DORBは、立方体上の注目体積中のN個のボクセル対の値を比較した結果の大小をNbitの2値特徴ベクトルの各ビットの値とする。



3DORBLでは、ノイズの影響を減らすため、複数のボクセル値(緑色)を平均した結果の対を比較し、2値特徴ベクトルの各ビットの値とする。

図8. 3DORBとその派生手法3DORBL [1][8].

3DORBにはいくつかの派生手法がある。例えば3DORBLでは、ボクセル値のノイズの影響を低減するため、1対のボクセル値の比較に変え、複数のボクセル値の平均を対として大小比較を行う(図8)。抽出処理の手間が増えるものの3DORBLのほうが3DORBよりも検索精度が高い。

3Dモデル検索のシナリオを用いて実験的

評価を行った結果、旧来よりも特徴ベクトル(2値特徴ベクトル)がコンパクト(例えば256次元で256bit/特徴)で、かつ、抽出処理がより軽量であるにもかかわらず、旧来手法とほぼ同等の検索精度が得られることが分かった。

2値特徴ベクトルを得る別のアプローチとして、いったん実数値特徴ベクトルを求めたのち、何らかの手法でハッシングして2値特徴ベクトルに写像する。高精度の実数値特徴に適用することで、高精度の2値特徴ベクトルが得られることが期待される。しかし、多くの場合、2値ベクトルへの写像によって情報損失があり、もとの実数値特徴ベクトルに比べて検索精度が低下することがあり、2値ベクトルへの情報損失の少ない写像が求められる。

我々は、浅いニューラルネットワークであるk-Sparse Auto Encoderを用い、極力精度を落とさず、実数値特徴ベクトルから2値特徴ベクトルへと写像する、SSB法並びのその高速版であるfSSB法を提案した[4]。3Dモデルから多数の局所特徴を抽出し、これらを3Dモデル当たり1つの特徴ベクトルに統合する手法で比較すると、局所特徴が実数値特徴ベクトルであるSuper Vector(SV)法等にくらべ、SSB法やfSSB法の局所特徴の集合が要するメモリ容量ははるかに小さい[4]。例えば、3Dモデル1つあたりの局所特徴集合の格納にSV法では97.2Mbyteを要するのにに対し、SSB法やfSSB法では高々0.04Mbyteで済む。それにも関わらず、SSB法やfSSB法の検索精度は、SV法やFisher Vector法、Diffusion on Manifold法[7]などと同等かそれ以上の結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計15件)

[1] 松田 隆広, 古屋 貴彦, 大淵 竜太郎, 軽量な局所2値特徴を用いた3次元形状の比較, 情報処理学会論文誌, **57**(11), pp. 2456-2466 (2016-11-15), ISSN 1882-7764 (査読有り) (Permalink: <http://id.nii.ac.jp/1001/00175929>)

[2] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Deep Aggregation of Local 3D Geometric Features for 3D Model Retrieval”, *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC) 2016*, pp 1-12, BMVA Press, (2016) (査読有り)

[3] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Accurate Aggregation of Local Features by using K-sparse Autoencoder for 3D Model Retrieval”, *Proc. ACM International Conference on Multimedia Retrieval 2016 (ICMR 2016)*, pp 293-297, (2016) (査読有り) (DOI: 10.1145/2911996.2912054)

[4] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Aggregating sparse binarized local features by summing for efficient 3D model retrieval”, *Proc. Second IEEE Int’l Conf. on Multimedia Big Data (BigMM 2016)*, pp 314-321, (2016). (査読有り)
(DOI: 10.1109/BigMM.2016.32)

[5] Bo Li, Yijuan Lu, Chunyuan Li, Afzal Godil, Tobias Schreck, Masaki Aono, Martin Burtscher, Qiang Chen, Nihad Karim Chowdhury, Bin Fang, Hongbo Fu, Takahiko Furuya, Haisheng Li, Jianzhuang Liu, Henry Johan, Ryuichi Kosaka, Hitoshi Koyanagi, Ryutarou Ohbuchi, Atsushi Tatsuma, Yajuan Wan, Chaoli Zhang, Changqing Zou, “A comparison of 3D shape retrieval methods based on a large-scale benchmark supporting multimodal queries”, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, 131, pp 1-27, (2015) (査読有り)
(DOI:10.1016/j.cviu.2014.10.006)

[6] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Diffusion-on-Manifold Aggregation of Local Features for Shape-based 3D Model Retrieval”, *Proc. ACM International Conference on Multimedia Information Retrieval (ICMR) 2015*, pp 171-178, (2015) (査読有り)
(DOI: 10.1145/2671188.2749380)

[7] Takahiko Furuya, Seiya Kurabe, and Ryutarou Ohbuchi, “Randomized Sub-Volume Partitioning for Part-Based 3D Model Retrieval”, *Proc. Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval (EG 3DOR) 2015*, pp 15-22, (2015) (査読有り)
(DOI: 10.2312/3dor.20151050)

[8] T. Matsuda, T. Furuya and R. Ohbuchi, “Lightweight Binary Voxel Shape Features for 3D Data Matching and Retrieval”, *2015 IEEE International Conference on Multimedia Big Data*, Beijing, 2015, pp. 100-107. (査読有り)
(DOI: 10.1109/BigMM.2015.66)

[9] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Similarity Metric Learning for Sketch-based 3D Object Retrieval”, *Multimedia Tools and Applications*, 74(23), pp 10367-10392, Springer, (DOI: 10.1007/s11042-014-2171-3) (査読有り)

[10] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Hashing Cross-Modal Manifold for Scalable Sketch-based 3D Model Retrieval”, *Proc. International Conference on 3D Vision (3DV) 2014*, pp 543-550, (2014) (査読有り)
(DOI: 10.1109/3DV.2014.72)

[11] Takahiko Furuya, Ryutarou Ohbuchi, “Fusing Multiple Features for Shape-based 3D Model Retrieval”, *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC) 2014*, BMVA Press, (2014).

(査読有り)
(DOI: dx.doi.org/10.5244/C.28.16)

[12] Bo Li, Yijuan Lu, Afzal Godil, Tobias Schreck, Benjamin Bustos, Alfredo Ferreira, Takahiko Furuya, Manuel J. Fonseca, Henry Johan, Takahiro Matsuda, Ryutarou Ohbuchi, Pedro B. Pascoal, Jose M. Saavedra, “A comparison of methods for sketch-based 3D shape retrieval”, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, 119, February 2014, Pages 57-80, ISSN 1077-3142, (査読有り)
(DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2013.11.008)

[学会発表] (計 2 件)

[1] 長田 茜, 古屋 貴彦, 大淵 竜太郎, リアルタイム作画支援を備えたスケッチによる 3 次元モデル検索システム, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2016, 東京, 早稲田大学国際会議場, 2016 年 6 月. (査読有り)

[2] 松田 隆広, 大淵 竜太郎, 局所 2 値特徴を用いたボクセル 3 次元モデルの形状比較, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2014, 東京, 早稲田大学国際会議場, 2014 年 6 月. (査読有り)

[その他]

ホームページ:

<http://www.kki.yamanashi.ac.jp/~ohbuchi/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大淵 竜太郎 (OHBUCHI, Ryutarou)
山梨大学・大学院総合研究部・教授
研究者番号: 80313782