

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500119

研究課題名(和文)三次元物体検索のためのスケーラブルな次元圧縮技術とセグメンテーションの研究

研究課題名(英文)On Scalable Dimensional Reduction and Segmentation for 3D Shape Retrieval

研究代表者

青野 雅樹 (Aono, Masaki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00372540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：三次元物体検索技術として、スケーラブルな検索インデックスの次元圧縮技術の開発に成功した。また、三次元の機械部品に多く観察される「穴」「凹凸」などの特徴を捉えられる新たな特徴量に関する論文を2013年国際会議で発表し、ベストペーパー賞を受賞した。一方、三次元物体のセグメンテーションの研究を通じて得られた分割技術を応用し、部分検索にも対応可能な特徴量に基づく検索手法と、二次元の写真から被写体の三次元物体を簡便かつ高精度に検索できる手法を開発した。

これらの検索技術の有効性を証明するため、三次元物体検索の国際コンペに参加し、2013年度、世界最高検索精度を達成できた。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in developing a new method for dimensional reduction that can deal with 3D shape data in a scalable way. We have also developed a highly accurate 3D shape descriptor suited to mechanical parts having "holes" and "surface roughness", with which we received the best paper award at an International Conference in 2013. Meanwhile, by applying our 3D segmentation technologies, we have developed a new method for 3D partial shape retrieval as well as a method to search 3D shapes from a 2D picture as query.

To prove the effectiveness of our methods, we participated in SHREC2013 (Shape Retrieval Contest) and won the world best accuracy for 3D shape search.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：マルチメディア・データベース

キーワード：情報検索 マルチメディア情報表現

1. 研究開始当初の背景

(1) 代表者が研究開発・特許出願を行ってきた「多重フーリエスペクトル特徴量」(MFSD 特徴量)は、「教師なし学習」として、デジタル三次元物体の形状類似検索で世界最高レベルの検索精度を達成した。しかし、複合特徴量ゆえに「検索用インデックス」の肥大化、機械部品に多く観察される「穴」「凹凸」などの微細な構造をうまく捉えられないこと、外から見えない内部の形状をうまく捕らえられないこと、ならびにスケーラビリティの克服が問題となっていた。

(2) 一方で MFSD 特徴量を用いた三次元物体の検索システムを開発してきたが、三次元物体が手元にないと検索できない、という不便さをかかえていた。また、検索においては、三次元物体の「全体」から別の三次元物体の「全体」形状との類似度を計算するというスタイルのみの検索を行っていた。

2. 研究の目的

(1) MFSD 特徴量の有する問題点を克服し、スケーラブルで、コンパクトで、高精度な三次元物体の検索エンジンを構築することが最大の目的である。スケーラビリティとコンパクトな検索インデックスに関しては、大規模で高次元データを次元削減して圧縮できる技術を開発することが目標となる。高精度化に関しては、MFSD が苦手とする、外から見えにくい内部表現や、機械部品の三次元形状に頻繁に観察される「穴」「凹凸」に対応できる特徴量の開発が目標である。

(2) 三次元物体をクエリとしてデータベース中の形状が類似する三次元物体を検索する、というフレームワークだけでなく、二次元の一枚の写真画像から三次元物体を検索できれば、簡便性が向上する。そこで、この機能を新たな検索のフレームワークとして追加すること、ならびに「全体」から「全体」の検索を行うだけでなく、セグメント化された「部分」から「全体」を検索するフレームワークでも成果を出すことが目標である。

3. 研究の方法

(1) 検索インデックスの次元削減等による圧縮技術に関しては、主成分分析に代表される線形な次元圧縮手法や過去に代表者が開発した非線形次元圧縮法(線形拡散射影法)を、特徴量次元それぞれに適用する方法や、そもそも新特徴量を原理的にコンパクトに表現できる方法の開発が理想である。一方、三次元物体の内部をより正確に捉えるためには、空間を適当なサイズのボクセルにいきなり分割してフーリエ変換等で全体形状のスペクトルを検索インデックスとして保持するのではなく、近傍領域(ブロック)の連続性を考慮した方法の開発が求められる。機械部品に多い「穴」「凹凸」に関しては、「穴」情報の明示的な特徴量化、「凹凸」情報を「輪郭とは異なる投影画像の内部的な陰影の

ターン」と解釈し、「画像のモルフォロジー演算」等で捉える方法の開発が求められる。(2) 三次元物体をクエリとする検索に加えて、二次元の写真から、三次元物体を検索するためのフレームワークとして、写真を二次元画像と解釈し、そこから得られる特徴量で、三次元物体空間の任意のビューからのレンダリング画像の一致性を検証できる統一的な特徴量とその比較方法の開発が望まれる。特に回転不変な手法の開発が期待される。一方、三次元物体の全体から全体を検索するのではなく、部分から全体を検索できるフレームワークとして、部分ができるだけ際立つ特徴量とその符号化手法の開発が求められる。

4. 研究成果

(1) MFSD よりも検索インデックスがコンパクトかつスケーラブルで、同時に、三次元物体の内部をより正確に捉えられる手法として、特許出願にリストした①、ならびに論文リスト②に掲載する「密ボクセル特徴量」(Dense Voxel Spectrum Descriptor (DVD 法))を開発した。

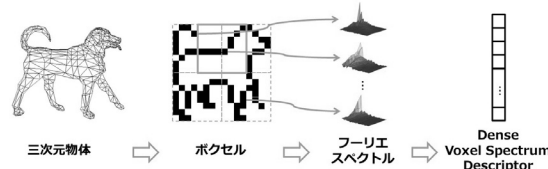


図1 DVD法の計算手順の概要(ボクセルは本来3Dだが、わかりやすくするため2Dで表現している)

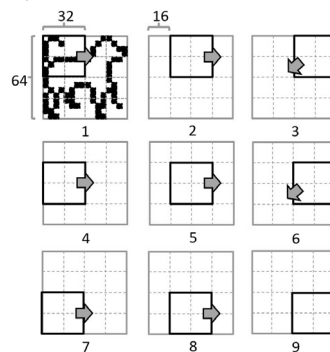


図2 ボクセル空間の「セル」による重複分解

DVD 法は、図1に示すように、三次元物体が与えられると大きく3つのプロセスで特徴量を生成する。まず、三次元物体に姿勢正規化を行い、三次元のボクセル表現に変換する。次に図2に示すように、一定の大きさの間隔で、複数の「セル」に重複分解し、セルごとのフーリエスペクトルを計算する。セルから計算したフーリエスペクトルの低周波成分を、全体の総和で正規化して、これを三次元物体のDVD特徴量と定義する。DVD特徴量単独でも検索において高精度を達成できるが、実装においては、MFSDで成功していた4つの特徴量のうち、「奥行きバッファ」(Depth Buffer)特徴量は、DVD特徴量と独立する関係にあるため、これを残し、DVD+DB特徴量と

し、さらに最終的な特徴量計算の前に主成分分析を行い、次元を圧縮した。その結果、MFSD に比べ約 1/10 の検索インデックスとなり、平均検索精度は向上する、という結果が得られた。MFSD 法を含め、これまで知られている代表的な手法を PSB (Princeton Shape Benchmark) で実験を行った。結果の再現率・適合率曲線は図 3 のようである。

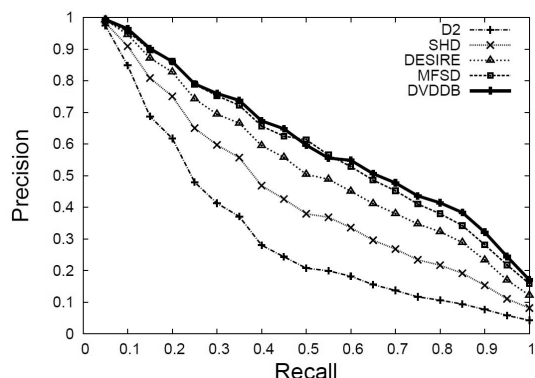


図 3 DVD ならびに DVD+DB 法の再現率 (Recall)・適合率 (Precision) 曲線

(2) 「穴」「凹凸」等の部分形状に基づく形状類似検索手法として、学会発表の④に掲載する HSRD 法 (Hole and Surface Roughness Descriptor) を開発した。これは、三次元の機械系の CAD システムで利用される三次元データに「穴」やギザギザなどの「凹凸」が多い、という観測に基づいたものである。HSRD 法では、三次元物体に対して図 4 に示すような幾つかのプロセスを経て、「穴」(Hole)「輪郭」(Contour)「直線 (Line)」「円弧 (Circle)」「凹凸 (Surface Roughness)」情報を抽出し、これらのフーリエスペクトルの複合特徴量で三次元データを表現する。

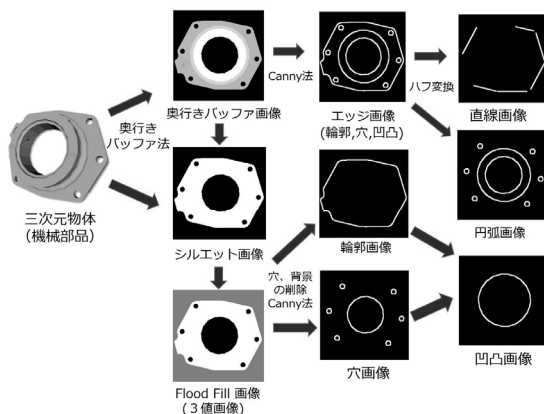


図 4 「穴」や「凹凸」の多い機械部品に好適な HSRD 特徴量の抽出手順

HSRD 法では、初めに三次元物体を多視点から奥行きバッファ法により、「奥行きバッファ画像」と「シルエット画像」を生成する。奥行きバッファ法における距離は  $[0, 255]$  の整数値で量子化した。次に、「奥行きバッファ画像」に Canny 法を用い、「エッジ画像」を生成する。

一方、「シルエット画像」に Flood Fill 法で「穴」を除いた背景を塗りつぶし、3 値で表現した「Flood Fill 画像」を生成する。続いて、「Flood Fill 画像」から得られた「穴」を白色で塗りつぶした「穴画像」と、「穴」を除いた背景を白色で塗りつぶした背景画像を生成する。さらに、「穴画像」と背景画像に Canny 法を用い、輪郭の形状を抽出した「輪郭画像」と「穴」を抽出した「穴画像」を生成する。その後、「エッジ画像」から「穴画像」と「輪郭画像」との差分を取り、「凹凸」の形状を抽出した「凹凸画像」を生成する。最後に、「エッジ画像」にハフ変換を適用し、「直線」と「円弧」の形状を抽出した「直線画像」と「円弧画像」を生成する。これらの画像に対して、極座標変換を行い、フーリエ変換を適用し、これらの特徴量を複合したものが、HSRD 法である。このように画像間の差分に代表されるモルフォロジー演算だけで、「凹凸」をモデル化した点が本手法の最大の特徴である。

図 5 は、機械部品からなる ESB (Engineering Shape Benchmark) を利用して、検索精度を幾つかの他手法と比較したものである。HSRD 法がもっとも高精度であることが確認できた。なお、この手法を発表した国際会議でベストペーパー賞を受賞した。

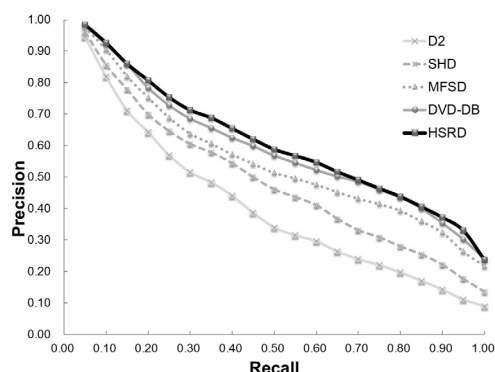


図 5 ESB データにおける、HSRD 法と他手法の再現率・適合率曲線での精度比較

(3) 三次元物体をクエリとし、別の三次元物体を検索するフレームワークが三次元物体検索では一般的であるが、ユーザに三次元物体を用意させるのは負担が大きい。そこで、一枚の写真から、その被写体にある物体の三次元データを検索できる手法の開発を行った。論文は、学会発表リスト⑨に対応する。全体の流れは図 6 に示す通りである。

まず、三次元モデルと同様に、入力要求である二次元画像も製作者や撮影者により、解像度・物体の大きさ・位置が任意である。そこで特徴量として、位置や大きさの影響を受けにくくするため、特徴量計算の前処理として二次元画像についても (姿勢) 正規化を行う。まず、二次元画像に写っている物体を包囲する包囲長方形を用い、物体の比率を変化させずに解像度を一定とした。物体の大きさの正規化は、物体を包囲する半径 1 の単位包

囲球を用いて正規化を行った。位置の正規化は、物体の重心を画像の中心に平行移動することで行った。正規化を行った後、入力要求の画像からシルエット画像とグレースケール画像を生成する。一方、デジカメ等で撮影される画像に向きや大きさの正規化は期待できないので、多視点からの投影での特徴量を三次元モデル側でも持たせることとした。

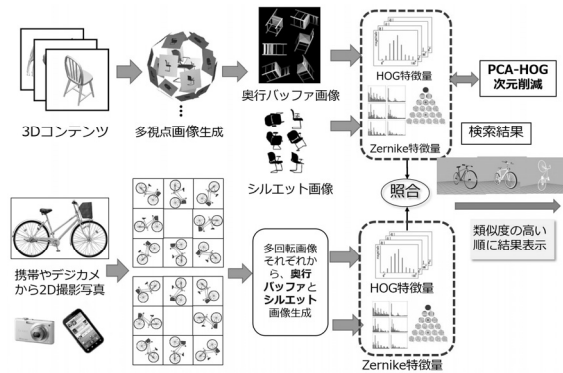


図 6 Zernike モーメントと HoG 特徴量による 2D 写真からの 3D 形状類似検索の流れ

具体的には複数視点からの投影画像で奥行バッファ画像とシルエット画像を作成しておく。生成された 2 種類の画像に、回転不変な、[1]Zernike モーメントを求め、これを第一特徴量とする。これに、表面形状の特徴を表現するため、エッジに着目した特徴量である、[2] HOG 特徴量(Histograms of Oriented Gradients)を加え、これら 2 つの特徴量の複合で新たな三次元物体の表現をすることにした。なお、HOG 特徴量は回転不変でないため、45 度ずつ回転させたグレースケール画像 8 枚と、その線対称な(鏡像の) 8 枚の合計 16 枚から、生成することとした。

最終的な検索では、特徴量間の距離計算が必要となる。これに対して、Zernike モーメントに対しては、マンハッタン距離の和で距離計算を行い、HOG 特徴量間では、疎な高次元ベクトルであるため、非ゼロな成分同士だけを考慮できるバチャタリヤ距離で計算を行った。

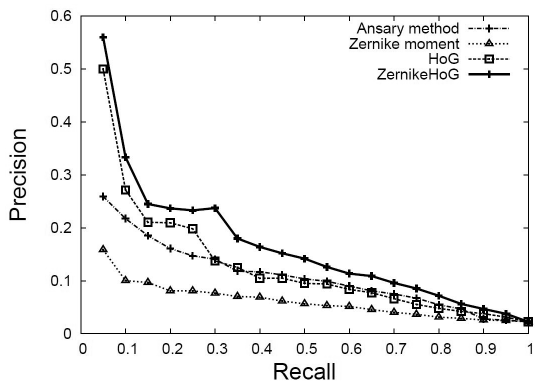


図 7 提案手法 (ZernikeHog) とその他の手法の再現率・適合率曲線での比較

評価実験としては、T. F. Ansary が 2007 年に発表した類似研究との精度比較を行った。実験に使ったデータは、三次元側が PSB で、写真は自動車、人間、樹木、人工衛星などインターネットで入手した画像を用いた。提案手法の Zernike モーメントと HoG を合成した手法が平均精度(図 7)でもっともよい結果となった。

(4) 部分検索に向けた部分の分割技術は、非常に重要な技術である。実際、レーザスキャナや KINECT のようなセンサで入力される三次元データは点群であり、何も構造を持たない。そこで、点群をまずメッシュに変換し、変換されたメッシュ、すなわちポリゴンにセグメンテーションする独自技術を開発した。これは学会発表<sup>14)</sup>に対応する。

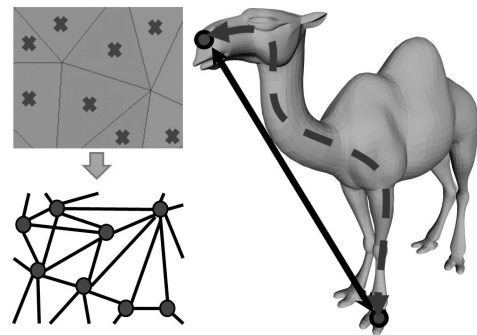


図 8 ポリゴンをグラフに変換し、グラフから測地線距離を求める。この距離に基づきセグメンテーションを行う

具体的には、「突起形状に着目したセグメンテーション技法」を開発した。内容的には、まず、「突起形状」を探索し、「突起周辺」を切り出し、残りの物体でまた突起形状を探索するという反復処理を、セグメンテーションしたい回数だけ繰り返す。このため図 8 のように、入力ポリゴンから、ポリゴンの頂点をグラフの頂点とし、頂点間の連結の有無をエッジとするグラフを作成した。物体を「美しく」セグメンテーションするためには、2 点間の距離はユークリッド距離ではなく、測地線距離が必要となる。通常のダイクストラのアルゴリズムでは、 $O(N^3)$  の計算量がかかるため、「ランダムマーク」と我々が呼称する頂点サンプルで高速に、測地線距離を近似するアルゴリズムを開発した。

ランダムマークとしては、頂点数を 1/10 にする場合、1/20 にする場合、ならびに 1/100 にする場合の 3 種類で実行した。その結果は、図 9 に示すようである。図 9 のサンプルでは、測地線距離 (Geodesic Distance: GD) を直接計算する方法では、672.3 秒の計算時間がかかるが、ランダムマークで近似すると、1/20 で 10 倍の速度向上、1/100 で約 20 倍速度が向上することがわかる。

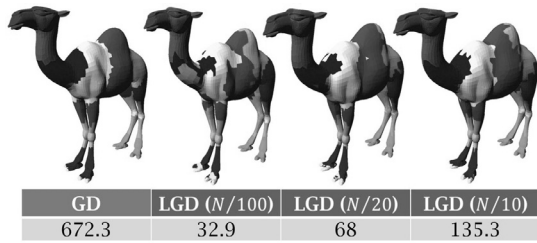


図 9 測地線距離 (Geodesic Distance: GD) とランドマーク距離 (Landmark Geodesic Distance: LGD)での速度 (単位: 秒) とセグメンテーション結果

セグメンテーション結果の「美しさ」とランドマーク距離での近似による速度向上は、互いにトレードオフの関係にあることがわかる。

こうして得られたセグメンテーション結果を入力データ (クエリ) として、部分から全体を検索する部分検索法の開発と実験結果は学会発表②で報告した。具体的には、図 10 に示すように、部分を与え、全体を検索する手法 (KVLAD 法) を開発した。

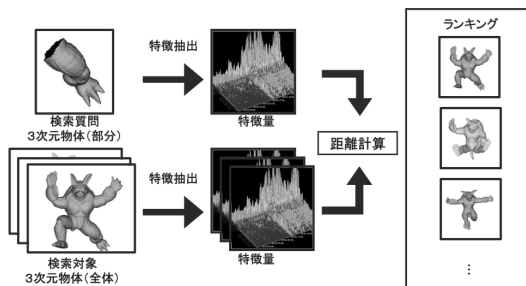


図 10 KVLAD 法による局所特徴量に基づく、3D 部分形状から全体形状の検索手法の流れ

評価実験として、SHREC2009 に、3D レンジスキャナで取得された 3D データに基づく 3D の部分検索タスクがあり、当時の参加者と提案手法である KVLAD 法の検索精度を比較したのが図 11 である。

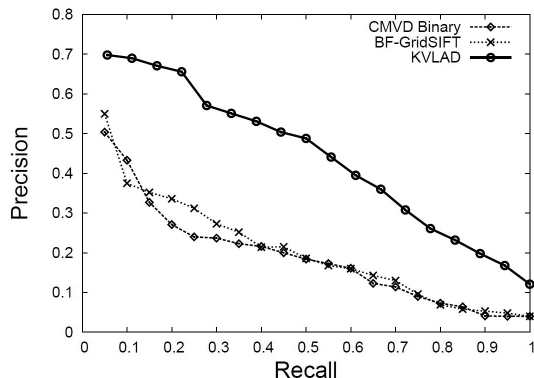


図 11 SHREC2009 部分検索データによる KVLAD 法とコンテスト参加者との比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 立間淳司, 青野雅樹, 多視点画像の局所的な特徴の相関に基づく三次元物体の形状類似検索, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 25, No. 1, pp. 556-567, 2013, 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.3156/jsoft.25.556>
- ② 立間淳司, 青野雅樹, ボクセル空間の重複分解により空間的特徴を捉えた特徴量を用いた三次元物体の形状類似検索, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J95-D, No. 12, pp. 2090-2101, 2012, 査読有, [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j95-d\\_12\\_2090&category=D&year=2012&lang=J&abst=](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j95-d_12_2090&category=D&year=2012&lang=J&abst=)
- ③ 立間淳司, 青野雅樹, 大域的なデータ分布を考慮したカーネル密度関数による外れ値検出, DBSJ Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 61-66, June, 2012, 査読有, <http://dbsj.org/wp-content/uploads/journal/vol11/no1/dbsj-journal-11-01-061.pdf>, pagespeed. ce. DHR8mvw4s4. pdf

〔学会発表〕 (計 16 件)

- ① Lydia Ling Yieng Chen, 立間淳司, 青野雅樹, 空間段階分割した CSLBP 特徴量による二次元スケッチ画像を検索質問とした三次元物体の形状類似検索, 第 6 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2014), 電子情報通信学会データ工学研究専門委員会, 日本データベース学会, 情報処理学会データベースシステム研究会, 淡路島夢舞台, 3月4日, 2014.
- ② 小坂龍一, 立間淳司, 青野雅樹, 複数視点画像の局所特徴量を用いた三次元物体の部分検索手法, pp. 23-26, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, No. 56, 福井県あわら市まつや千千, 12月9日, 2013.
- ③ Nihad Karim Chowdhury, Atsushi Tatsuma, Masaki Aono, A New Shape Descriptor based on Local and Global Features for 3D Shape Retrieval, pp. 19-22, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, No. 56, 福井県あわら市まつや千千, 12月9日, 2013.
- ④ Masaki Aono, Hitoshi Koyanagi, Atsushi Tatsuma, 3D Shape Retrieval Focused on Holes and Surface Roughness, Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA2013), Kaohsiung, Taiwan, October 31<sup>st</sup>, 2013.
- ⑤ 田代翔輝, 青野雅樹, フーリエスペクトルを用いた写真からの三次元形状類似検索, 第 12 回情報科学技術フォーラム

- (FIT2013), 鳥取大学鳥取キャンパス, 9月4日, 2013.
- ⑥ 田代翔輝, 青野雅樹, 2次元画像による3次元物体モデルの検索, 情報処理学会第75回全国大会, 東北大学川内キャンパス, 3月7日, 2013.
- ⑦ 小柳 斉, 青野雅樹, 穴と凹凸に着目した3次元物体の形状類似検索, 情報処理学会第75回全国大会, 東北大学川内キャンパス, 3月7日, 2013.
- ⑧ 奥村 泰明, 青野雅樹, 多視点画像からの複合特徴量に基づく3次元形状モデルの分類, 第5回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 電子情報通信学会データ工学研究専門委員会, 日本データベース学会, 情報処理学会データベースシステム研究会, 福島県磐梯熱海, March 5th, 2013.
- ⑨ Masaki Aono, Hiroki Iwabuchi, 3D Shape Retrieval from a 2D image as Query, Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Los Angeles, USA, December 6, 2012.
- ⑩ Atsushi Tatsuma, Hitoshi Koyanagi, and Masaki Aono, A Large-Scale Shape Benchmark for 3D Object Retrieval: Toyohashi Shape Benchmark, Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Los Angeles, USA, December 6, 2012.
- ⑪ 小坂龍一, 青野雅樹, 自己組織化写像を用いた3次元モデルのセグメンテーション, C1-8, 1p. 平成24年度電気関係学会東海支部連合大会, 豊橋技術科学大学, 愛知県豊橋市, 9月24日, 2012.
- ⑫ 村上桌, 青野雅樹, アフィニティ・プロパゲーションを用いた高精度な3次元モデル分割方法, 第22回Webインテリジェンスとインタラクション研究会 (WI2), 電子情報通信学会 HCG 第2種研究会 (SIG-WI2), 中央大学, 3月17日, 2012.
- ⑬ 小柳 斉, 立間淳司, 青野雅樹, 多視点画像からのEdge特徴量に基づく3次元物体の形状類似検索, 第4回データ工学と情報マネジメントフォーラム (DEIM2012), 神戸市舞子, 3月3日, 2012.
- ⑭ Masaki Aono, Shiro Wakida, and Atsushi Tatsuma, Protrusion Based Segmentation of Complex 3D Shape Models, APSIPA2011 (Asia Pacific Signal and Information Processing Association), Xi'an, China, October 20, 2011.
- ⑮ Atsushi Tatsuma and Masaki Aono, Diffusion Hashing, APSIPA2011 (Asia Pacific Signal and Information Processing Association), Xi'an, China, October 20, 2011.

- ⑯ 岩淵寛樹, 青野雅樹, 2次元画像を入力要求とした3次元モデル類似検索, 第10回情報科学技術フォーラム (FIT 2011), 函館大学, 9月8日, I-069, 2011.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 3 件)
- ① 名称: 三次元物体モデルを検索するための方法、コンピュータプログラム及びシステム、及び、三次元物体を分類するための方法、コンピュータプログラム及びシステム  
発明者: 青野雅樹、立間淳司  
権利者: 同上  
種類: 特許権  
番号: 特願 2012-275452  
出願年月日: 2012年12月18日  
国内外の別: 国内
- ② 名称: 三次元モデル検索方法、及び三次元モデル検索システム  
発明者: 青野雅樹、立間淳司、真田知佳  
権利者: 同上  
種類: 特許権  
番号: 特願 2014-053956  
出願年月日: 2014年3月17日  
国内外の別: 国内
- ③ 名称: 三次元モデル特徴抽出方法、及び三次元モデル・アノテーションシステム  
発明者: 青野雅樹、立間淳司、鈴木将也  
権利者: 同上  
種類: 特許権  
番号: 特願 2014-053957  
出願年月日: 2014年3月17日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

- ① 名称: 三次元モデルの検索方法、コンピュータプログラム及び三次元モデルの検索システム  
発明者: 青野雅樹、立間淳司、関洋平  
権利者: 同上  
種類: 特許権  
番号: 特許第 5024767 号  
取得年月日: 2012年6月29日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kde.cs.tut.ac.jp/publications/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青野 雅樹 (AONO, Masaki)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00372540