

形状の検索・分類の技術と類似形状検索エンジン “エンジニアリングサーチ”

Technology of Shape Retrieval-classification and a New Shape Search Engine “Engineering Search”

石 橋 研 二

要 約 設計ノウハウを再利用したいエンジニアにとって「類似の製品」とは「類似の属性」、すなわち、類似の形状、材質、工程、公差、使用方法などを持っていることである。これらの属性の中で類似性を最も比較・評価しにくいものが形状であるが、形状検索の技術を用いることによって、形状に関連づけて、強度解析や生産工程の情報が参照できるようになる。コンピュータの処理能力の飛躍的な向上と高度なデータ解析技術を駆使することによって形状検索は実用のレベルに達しつつある。2011年2月、それまでの研究成果を総合して形状検索エンジン「エンジニアリングサーチ」を開発し実務に適用することができ、これにより広範囲な設計ノウハウの再利用が可能となった。

Abstract From the viewpoint of design engineers who want to reuse design knowledge, ‘similar products’ usually means those designs that have ‘similar attributes’ such as shape, materials, processes and applications. Among those attributes, shape is the most complex attribute to compare and evaluate with regard to similarity. However, by using a shape search techniques, stress analysis and production processes information can be referenced in association with the shape. Shape retrieval is reaching the level of practical use by advanced data analysis technologies and dramatic improvement of the processing power of a computer. This time, we’ve developed the shape search engine named “Engineering Search” by integrating our research results and the engine is able to apply to a practical businesses. And thus extensive reuse of design knowledge has become possible.

1. は じ め に

3次元形状モデル（3Dモデル）によるものづくりはすっかり定着した。特に自動車、携帯電話、建築物などでは、CAD/CAM/CAE^{*1}の急速な普及で、3Dモデルを用いた設計や強度解析などが業務の中心になっている。さらに、技術者のノウハウを織り込んだ設計、製品データ管理（PDM）やCADデータからCAEやCAMへの統合が行われてきた結果、データの量も急激に増加している^{*2}。

設計・開発・生産の業務プロセスで作成された成果物はProduct Lifecycle Management（PLM）システムで管理され、デジタルマニュファクチャリングが実践されている。これらの業務プロセスの75%が流用設計（すでに設計された部品の形状や設計ノウハウを新たな設計問題に活用する）であるといわれている。しかし、PLMシステムで部品やノウハウをキーワード、ファイル名、部品番号、CADデータに付加された属性で検索しても、以下の理由で十分な情報の収集ができない。

- ・すべての CAD モデルに属性が付加されているわけではない
- ・プロジェクトコードや部品番号を知らないユーザがいる（若手の社員など）
- ・検索するためには事前に適切な付加属性の設計が必要である
- ・属性が変更される場合がある

再利用されるのは CAD データだけではなく、加工のための治工具の情報、コストやリードタイムの情報などエンジニアリングに係わるすべての情報が含まれるため、設計データの再利用は以下の効果がある。

- ・部品種類により、品質対策費や保証サービス費を抑えることができる
- ・不必要な部品種をなくすことにより、在庫回転率を向上させることができる
- ・不必要な部品種をなくすことにより、試作や実験作業を削減することができる
- ・設計仕様を固定することにより、さらに標準化を図ることができる

設計ノウハウを再利用したいエンジニアにとって「類似の製品」とは「類似の属性」、すなわち、類似の形状、材質、公差、仕様などを持っていることであり、これらの属性の中で類似性を最も評価しにくいものが形状である。類似の形状を検索することができれば、それに関連づけて、強度解析や生産工程の情報が参照できるようになり、より広範囲なノウハウを再利用することができる。そのため、日本ユニシスでは 2011 年 2 月、類似形状検索エンジン「エンジニアリングサーチ」を開発し、実務への適用を開始した。

本稿では、2 章で形状検索の技術動向を、3 章で学習を利用した形状検索を説明し、4 章で「エンジニアリングサーチ」の基本機能を紹介する。

2. 形状の検索

製品のライフサイクルに亘る設計情報の再利用の流れを図 1 に示す。図中の「形状ベースの情報検索」が本章以降で説明する形状検索に相当する。

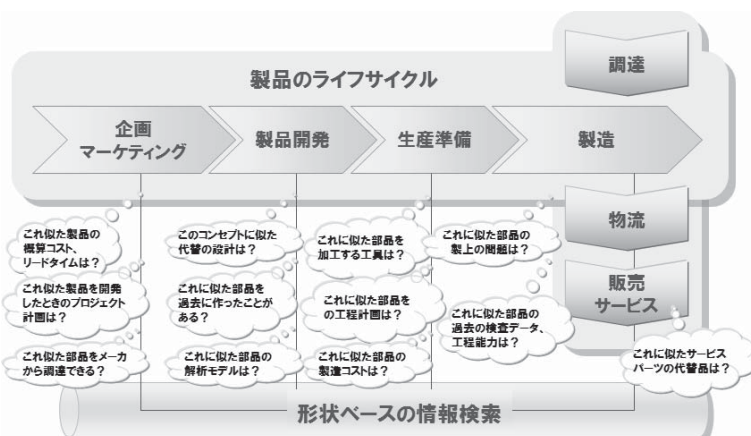


図 1 製品のライフサイクルに亘る設計情報の再利用の流れ

形状検索の処理手順（図 2）はエンタープライズサーチエンジンによる文書検索の手順（オフライン処理：クロール、インデックスフィード、オンライン処理：クエリーリクエスト、クエリーリザルトなど）とほとんど同じである。前処理としてオフラインで検索対象となる形状

の特徴を抽出し、これをそのモデルへのリンク情報、部品名、部品番号、材質など属性情報と共にデータベース内に保存する。ユーザから検索要求（クエリ）があるとシステムはそのクエリで指定された形状から特徴を抽出する。抽出した特徴とデータベース内の全モデルの特徴との間で相違度を求め、その昇順に並び替えたモデルのリストを出力する。最後に出力されたリストをページ整形し検索結果としてユーザに提示する。

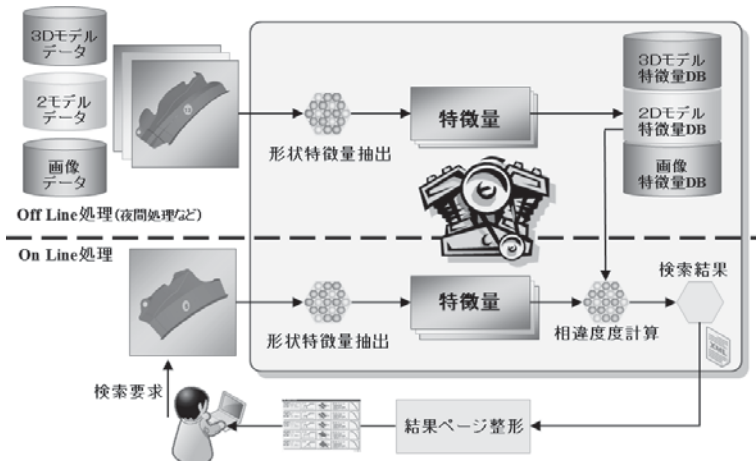


図2 形状検索の処理手順

モデルを形状で比べる場合、形状の特徴には、大域的な幾何変換（主に相似変換）に対する不変性が求められる。また、多種多様で互換性のない形状表現、たとえば異なる種類のCADで作られたモデルから特徴を抽出することが求められる。

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。全体検索は既に実用レベルに達している。部分検索は2009年の形状検索コンテスト SHREC'09^{*3}で課題が出題されて以降、盛んに研究が行われ実用レベルに達しつつある。

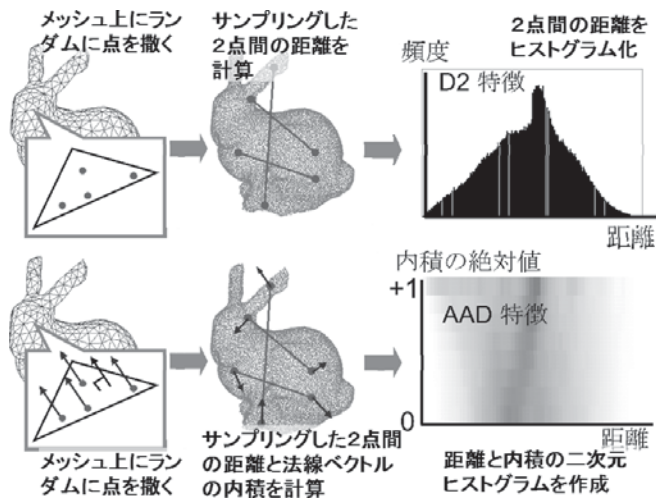
本章では形状の検索において重要な技術である形状、図面、画像の特徴の抽出と相違度の計算について説明する。

2.1 3D形状の特徴

様々な3D形状の特徴抽出の方法が提案されているが、大きく「ヒストグラムに基づく方法」「変換に基づく方法」「位相に基づく方法」「見かけに基づく方法」とそれぞれの組み合わせに分類できる。本節ではこの四つの方法を説明する。

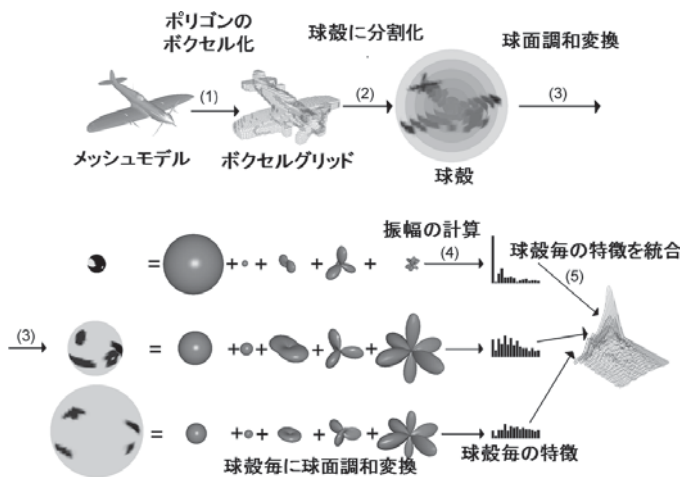
2.1.1 ヒストグラムに基づく方法

3D形状の全体特徴と局所特徴をヒストグラムで表わす^{[1][2]}。この方法は一般的にインプリメンテーションが簡単で処理も高速であるが、検索性能があまり良くない場合があり、機械学習で検索性能を高める試みもある^[3]。図3にD2形状特徴とAAD形状特徴の例を示す。

図3 D2 および AAD 形状特徴^{[1][2]}

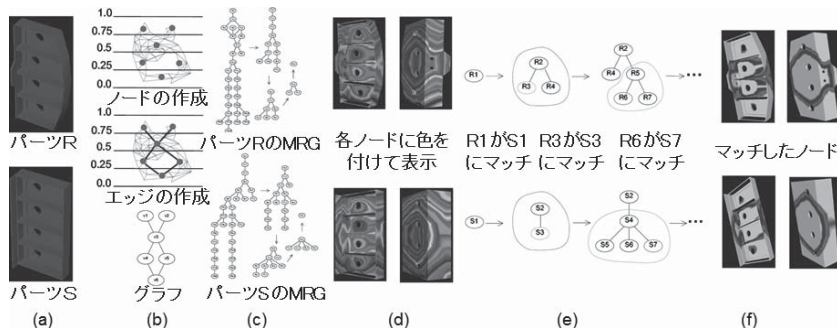
2.1.2 変換に基づく方法

回転不変な3D ゼルニケ変換^[4]や球面調和変換^[5]と、一様スケーリングと平行移動に対する姿勢正規化を組み合わせる方法である。変換してできた多項式の係数や振幅が特徴量になる。球面調和変換の例を図4に示す。

図4 球面調和変換による形状特徴^[5]

2.1.3 位相に基づく方法

3D モデルの位相的な特徴を用いる方法である。より複雑な処理が必要であるが、幾何と位相の両方の情報を利用することができ、検索性能の高いポテンシャルを持っている^{[6][7]}。スケルトンやReeb グラフ (図5)、多様体上の局所特徴の関係などが用いられ、姿勢変化や大域変形に強い。また、部分検索に対応できるなどの利点がある。



- (a) 多面体表現の CAD モデル
 (b) μ 関数の値をすべての頂点に対して計算，メッシュを正規化された μ 値でパーティション化し，最高解像度のグラフを作成 (μ 関数には多面体を構成する三角形間の測地線距離などが使用される)
 (c) 粗い解像度のグラフは，隣接する μ 値のノードを統合して作成
 (d) MRG の最高解像度での各ノードの位置
 (e) MRG は解像度の粗いほうから細かいほうに比較
 (f) 両方のモデルで一致するノード
 合計類似値をノードの各マッチングペアの類似性に基づいて計算

図5 多重解像度 Reeb グラフ (MRG) を用いた 3D モデルの類似性評価^[7]

2. 1. 4 見かけに基づく方法

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グラフィックボードの Z バッファを使用したデプス画像などから特徴を抽出する．そのため，レンダリングできる形状の表現であれば対応できる．Chen^[8]らによってインプリメントされたこの方法（図6）は，処理時間は幾分長いが，良好な検索性能を提供している．

レンダリングした画像から全体特徴を抽出する例には 2D Fourier 変換，ART 変換，これらの複数の組み合わせなどが用いられる．また，画像から局所特徴を抽出する例には Lowe の SIFT^[9]を用いた手法^[10]がある．一様スケーリングと平行移動に対する姿勢の正規化を施した後，多視点からのレンダリング画像を作成する．面内で回転不変な画像の特徴量（ART 変換や極座標系 Fourier 変換）を組み合わせることによって 3 次元回転，平行移動，一様スケーリングの不変性を実現している．

見かけに基づく方法では 3D モデルを複数の画像の集合として取り扱うため，スケッチ画像から 3D モデルを検索するようなクロス検索が可能である．

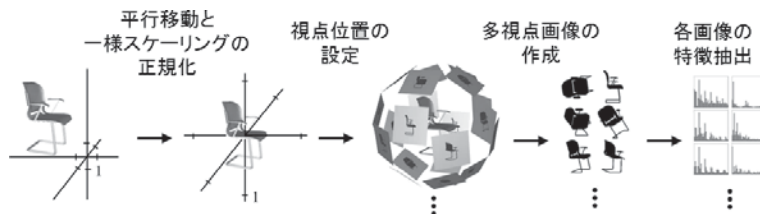


図6 (LFD) Light Field Descriptor^[8]

2.2 図面（ベクトル図形）の特徴

2.1.1 項で紹介した3次元のヒストグラムに基づく方法は2次元に応用できる．その例を図7に示す．

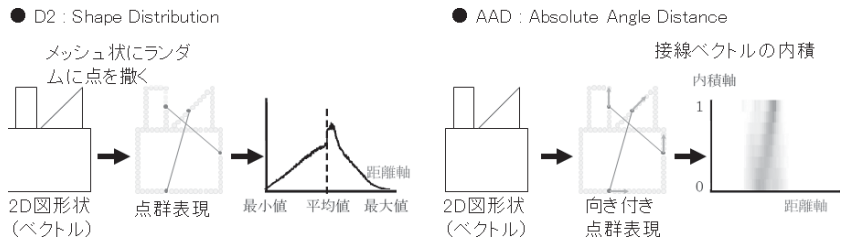


図7 ベクトル図形の形状特徴

2.3 画像の特徴

画像の特徴として，MPEG-7で採用されているエッジヒストグラムとリージョンシェイプを紹介する．

2.3.1 ヒストグラムに基づく方法（エッジヒストグラム）

細かく分割した画像を図8に示す5パターンで分類しヒストグラムにしたもので，輪郭形状の特徴を表すのに向いている．

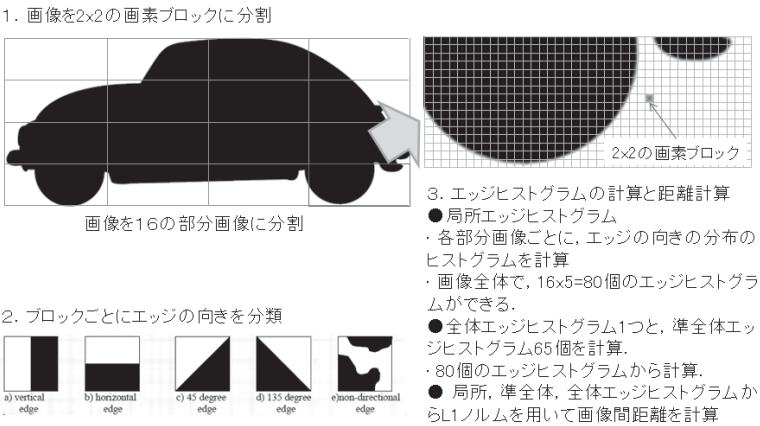


図8 エッジヒストグラムによる形状特徴

2.3.2 変換に基づく方法（リージョンシェイプ）

図9で示す ART（Angular Radial Transform）変換を対象となる画像に対して行い，得られた ART 係数を形状特徴とする．

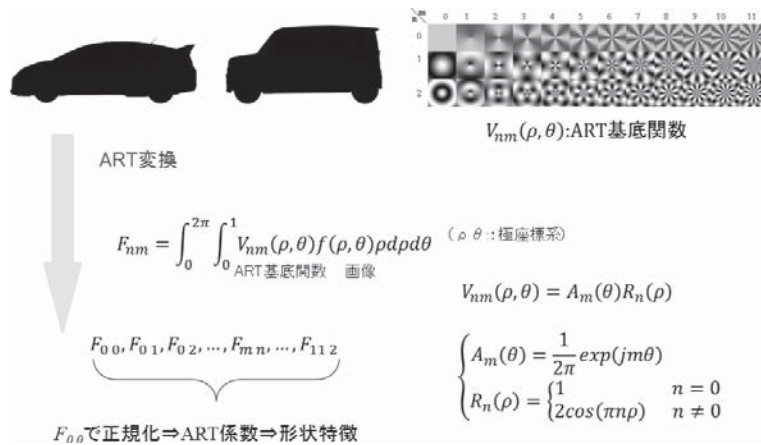


図9 リージョンシェイプによる形状特徴

2.4 形状の相違度の評価

抽出した形状の特徴を比較することで形状の相違度を評価するが，ベクトル対ベクトル，集合対集合の比較になる．特徴ベクトル間の相違度計算は，図10に示すようなミンコフスキー距離（L1, L2, L0.5 など），ベクトル間の角度のコサインで評価するコサイン尺度，情報法理論のエントロピーに基づく Kullback-Leibler Divergence などの距離関数で行われる．集合対集合の相違度計算には，動的計画法を用いた弾性マッチング^[11]や最適化問題の一つ，輸送問題の考え方に基づいた Earth Mover's Distance（EMD）^[12]などが用いられている．

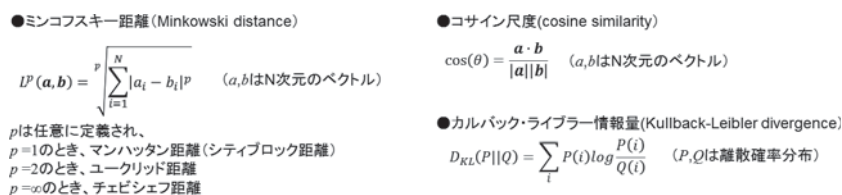


図10 形状の相違度を評価する関数

3. 形状の検索と機械学習

前章では，形状特徴の抽出方法，形状特徴の相違度の計算方法を紹介したが，これらを組み合わせても検索性能が十分に満足できない場合がある．本章では学習を利用した検索性能の向上について紹介する．

3.1 特徴ベクトルの次元削減による検索性能の向上

検索性能が十分でない理由として，計算された形状特徴が3Dモデルの形状を正しく捉えていない，形状特徴の相違度を正確に計算できない，という問題が挙げられる．特に形状の特徴

ベクトルが数百次元もの高次元になると、形状特徴空間で距離を正確に計算することが困難となる。そこで、学習によって元々の高次元の特徴空間から重要な情報のみを含むと推定される低次元空間への写像を見つける次元削減を行い、検索性能を向上させる方法がとられている。次元削減の方法としては主成分分析（PCA）に代表される学習が用いられるが、形状特徴空間の非線形性が強い場合は Locally Linear Embedding（LLE）^[13]などの多様体学習が利用される。

3.2 形状の分類

検索した結果をグルーピングし視認性を向上させることで、検索性能の向上を図ることができる。形状特徴はクラスタリング手法によって分類することができる。クラスタリングの手法としては予めグループの数を指定してクラスタリングする k-means やグループの数を指定しないでクラスタリングする mean-shift^[14]などがある。形状特徴が高次元の場合、処理時間が長くなってしまうので、前節で紹介した次元削減された特徴量を利用する。

3.3 サンプル付き学習による形状の分類

穴がある/ない、取っ手がある/ないなど、特定の特徴で形状を分類したい場合は、位相に基づく形状特徴などを用いて局所特徴量を持つサンプルに「穴あり」、「穴なし」などのラベルを付けて事前に学習させることで形状の識別ができるようになる。この手法は教師付き機械学習と呼ばれ、特定の特徴を識別することで検索の性能を向上させることができる。

4. 類似形状検索エンジン

これまでに説明してきた手法を発展・統合して形状検索エンジン「エンジニアリングサーチ」(図 11)を開発したので、その特徴と機能概要を紹介する。

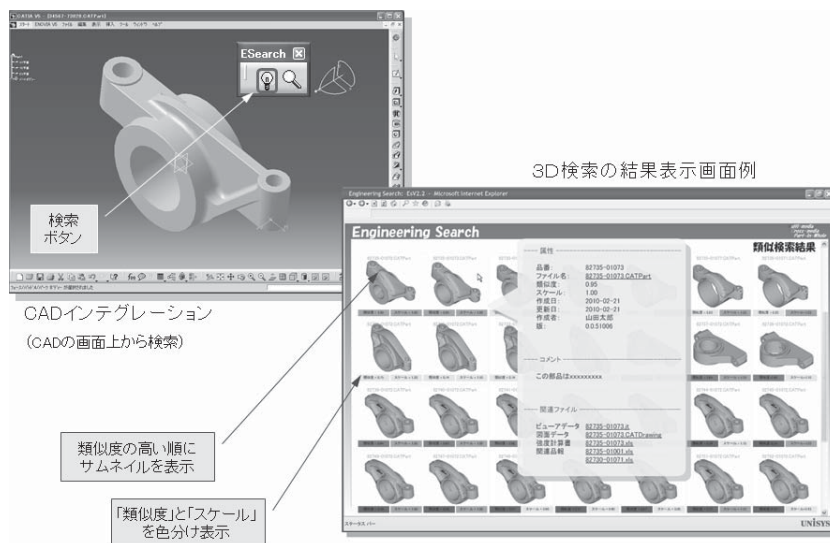


図 11 エンジニアリングサーチ画面例

4.1 エンジニアリングサーチのユニークな特徴

エンジニアリングサーチは、3D モデルの検索だけではなく、以下のような様々な検索が可能である

- ・ 3D モデル、2D、画像のマルチ検索
- ・ 3D ⇔ 2D ⇔ 画像データ間のクロス検索
- ・ 全体形状の検索と、特徴的な部分を指定した部分類似検索
- ・ 検索結果をグルーピングして表示

形状の検索の他、形状に紐付けられた関連文書の参照や、検索履歴（アクセスログ）を活用した関連情報の提示（レコメンデーション）が可能である。カスタマイズも容易であり、エンジニアリングサーチの Web サービス機能を利用して、形状検索機能を持つアプリケーションが開発できる。また全文検索エンジンと連携することで形状から文書へのチェーン検索も可能である。

4.2 エンジニアリングサーチの機能概要

基本機能の一覧を表1に示す。

表1 エンジニアリングサーチの基本機能

機能名	機能概要
3D形状検索	3D形状をキーにして3D形状を検索
2D形状検索	2D形状をキーにして2D形状を検索
画像検索	画像をキーにして画像を検索
クロス検索	「3Dをキーにして2Dを検索」「2Dをキーにして3Dを検索」「2Dをキーにして画像を検索」「画像をキーにして2Dを検索」「画像をキーにして3Dを検索」「3Dをキーにして画像を検索」のクロス検索
部分検索	特徴的な部分を指定した部分類似検索
クラスタリング	形状の「分類」と、既に定義された分類のどれに属するのかを「識別」する
CADインテグレーション	CADにメニュー（ボタン）を追加し、画面に表示されている形状をキーにして3D(2D)形状を検索
MS Officeインデグレーション	Microsoft Officeにメニュー（ボタン）を追加し、画面に表示されている形状をキーにして形状を検索
クローラ	指定されたサーバ、フォルダを巡回して検索のためのインデックスを作成。クローリングする時間、場所、ファイルのタイプが指定可能
データインポート	PDMやドキュメント管理システムで管理しているCADデータ、ドキュメント、属性データの検索用インデックスをデータベースと連携して作成
属性登録	検索のためのインデックスに作成日時、作成者、材質、重量などの任意の属性を付加
関連情報の参照表示	検索結果の形状に紐付けられた関連文書の参照が可能
レコメンデーション	テキストマイニングや全文検索の最新テクノロジー（共起分析、トピック抽出など）の形状検索への応用や、検索履歴やアクセスログを活用したレコメンデーションで賢い検索を実現
Webサービス	検索のリクエストと検索結果の受け取りをXML形式でやり取りするWebサービスを提供。この機能を利用してユーザの要望にマッチした検索アプリケーションを簡単に作成可能

4.3 検索エンジンの構成

エンジニアリングサーチの検索エンジンの構成を図12に示す。図中のインデクサーで形状特徴を抽出し、マッチャーで相違度を計算している。3D モデルとして直接扱えるのは VRML や STL のメッシュモデル、2D モデルとして直接扱えるのは DWG、DXF 形式、画像データとして扱えるのは BMP、JPEG、TIFF 形式であり、これら以外の形式を扱う場合は前処理で形式を変換する。

一種類の形状特徴を用いた形状の相違度計算で目標の検索性能が得られない場合、数種類の形状特徴を組み合わせて検索エンジンをチューニングする必要がある。形状特徴の選択とチューニングにはある程度ノウハウが必要であり、今後は特徴の自動選択やパラメタの最適化が必要である。

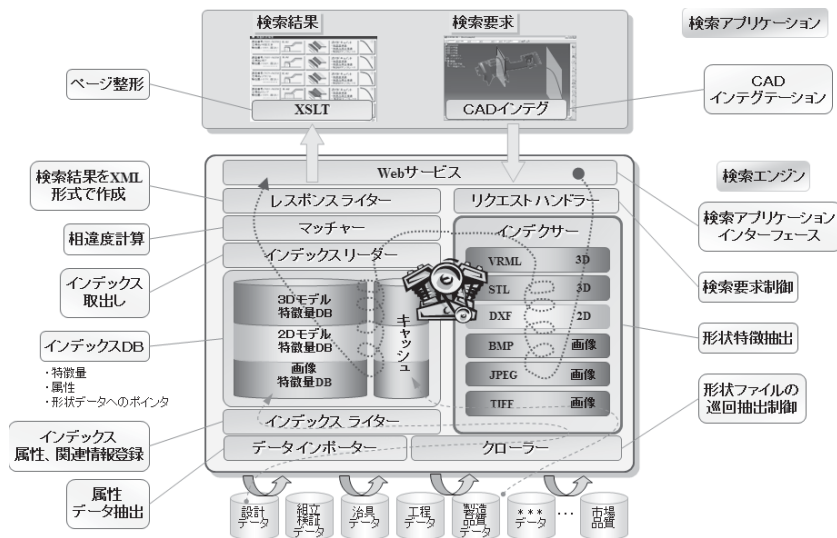


図12 エンジニアリングサーチの構成

5. おわりに

検索に対するニーズの高度化、爆発的に増え続ける形状データへの対応が今後の課題として挙げられる。これまでの形状検索の研究では、特徴の抽出と比較に注力していたため、意図や意味を持った高度な検索への研究があまり行われていない。このセマンティックな検索は文書の検索が先行している。また、急速に利用が拡大したソーシャルメディア内の情報や、e-コマースでのユーザ行動を示すクリック履歴や購買履歴など、いわゆるビッグデータの分析に検索エンジンを応用している例もある。先行するこれらの研究例を参考に、課題の解決に当たりたい。

今後、形状検索でのこれまでの形状特徴の抽出と比較の研究成果がエンタープライズサーチエンジンのフレームワークに統合され、形状と文書がシームレスに検索できる環境が製品のライフサイクルに亘る設計情報の再利用をさらに加速するものと確信している。

- * 1 Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering
- * 2 ある自動車会社では毎日、数テラバイトの3Dモデルが作成されている。
- * 3 SHREC'09 <http://www.aimatshape.net/event/SHREC/shrec09>

- 参考文献 [1] R. Osada, T. Funkhouser, Bernard Chazelle, David Dobkin, "Shape Distributions, ACM Transaction on Graphics", 21(4), pp. 807-832, (2002).
- [2] 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(2/3/4), pp. 70-85, (2005).
- [3] R. Ohbuchi, M. Nakazawa, T. Takei, "Retrieving 3D Shapes Based On Their Appearance", 5th ACM SIGMM Int'l Workshop on Multimedia Information Retrieval

- (MIR2003), pp. 39-45, (2003).
- [4] M. Novotni, R. Klein, “3D Zernike Descriptors for Content Based Shape Retrieval”, ACM Symp. on Solid Modeling and Applications 2003, pp. 216-225, (2003).
 - [5] 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).
 - [6] M. Hilaga, Y. Shinagawa, T. Kohmura and T. L. Kunii, “Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes”, Proc. of ACM SIGGRAPH, 203-212, Los Angeles, USA, Aug. 2001.
 - [7] D. Bespalov, A. Shokoufandeh, and W. C. Regli, “Reeb graph based shape retrieval for CAD” In DETC’03, 2003.
 - [8] D-Y Chen, X-P Tian, Y-T Shen, M. Ouhyoung, “On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval”, Computer Graphics Forum, 22(3), (2003).
 - [9] D. G. Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, International Journal of Computer Vision (IJCV), 60(2), pp. 91-110, (2004).
 - [10] 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).
 - [11] 内田 誠一, “DP マッチング概説 ～基本と様々な拡張～” 信学技報 PRMU2006-166, Dec. 2006.
 - [12] Y. Rubner, C. Tomasi, L. J. Guibas, “A metric for distributions with applications to image databases”, In IEEE International Conference on Computer Vision, pages 59-66, January 1998.
 - [13] S. T. Roweis, L. K. Saul, “Nonlinear Dimensionality Reduction by Locally Linear Embedding”, Science, AAAS, Vol. 290 no. 5500 pp. 2323-2326, (2000).
 - [14] Yizong Cheng, “Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (IEEE) 17(8): pp. 790-799, August 1995.

執筆者紹介 石 橋 研 二 (Kenji Ishibashi)

2005 年入社. PLM システムの企画, プリセールスを製造業を中心に活動. 2008 年からサーチベースアプリケーションの企画・開発を担当.

