

違法造形物の 3D プリンタによる製造を規制するための 3D データ照合技術の高精度化

Improvement Techniques of 3D-data Matching Precision for Regulating Fabrication of Illegal Objects Using 3D-printer

茂出木 敏雄
Toshio Modegi

[抄録]

3D プリンタに関しては、拳銃などの危険物が製造されたり、猥褻物の 3D データが Web サイトにアップロードされるという刑事事件が既に発生している。現在、国内で市販されているスキャナ、プリンタ複合機、Adobe Photoshop® など民生・業務用を問わず殆どの 2D 画像処理機器やツールには、中央銀行偽造防止グループ (CBCDG) が開発した紙幣の偽造防止ソフトウェアが実装されている。これと同様に、紙幣に匹敵する違法造形物の形状認証と出力規制が行えるセキュリティ機能を 3D プリンタ出力系に実装することが、今後重要になる。先報告にて、違法造形物の 3D プリンタ出力を規制するため、3D プリンタ出力用のポリゴンデータを特徴ベクトルに変換してブラックリストと照合し、出力可否判定を行なう手法を提案した。本稿では、互いに独立した特性をもつ 2 種類の特徴ベクトルを選定して 2D ヒストグラムに統合し、2D ヒストグラムどうしで照合を行うことにより、ポーズ変更に対する耐性ももたせた高精度方式について紹介する。

[Abstract]

There were already two kinds of criminal cases related to 3D-printer applications: producing weapons (handguns) and uploading 3D-data for creating obscene figures (sexual organs). Security systems for 2D-imaging equipment such as photo-copy machines have been developed by the Central Bank Counterfeit Deterrence Group (CBCDG). This deterrence tool has been implemented into 2D-imaging processors even in popular photo-editing software such as “Adobe Photoshop®”. Therefore, we think the similar system will be required, where it can inspect 3D-data processing in front-end of a 3D-printer and control rejecting to fabricate illegal objects whose social impact is equal to bank notes. In the previous report, we have proposed a 3D-printing regulation system in fabricating illegal objects, which can determine to reject or permit given polygon data to be passed to 3D-printing by matching their converted feature-vectors with black-list databases. In this paper, we propose a high-precision matching method using improved feature-vectors composed of 2D-histograms, calculated by two kinds of independent feature-parameters, which will support a pose-robust matching function with pose-transformed 3D-models.

キーワード :3D プリンタ, 特徴ベクトル, 2D ヒストグラム, ハイブリッド照合, 部分照合,
ポーズ耐性

Keywords:3D-printer, feature-vector, 2D-histogram, hybrid matching, partially matching, pose
robustness

1. はじめに

3D プリンタは、従来の切削加工や金型を用いた製造方法では実現できないクリエイティブな 3D 形状の造形を可能にし、スキルや資金に乏しい素人や個人に対してもモノ作りへの参入を容易にした。そのため、2013 年 5 月に米国で、個人により 3D プリンタが拳銃製造に悪用されるという事件が発生した。その直後の 2013 年 7 月に、国内の家電量販店でも個人用の 3D プリンタの販売が開始されている。これに対して、筆者らは、3D プリンタに 3D スキャナを加えた 3D 複写機でモノの違法コピーや模造品が製造される危険性を感じ、モノに対する“電子透かし”のようなセキュリティ技術の開発に着手した¹⁾。

2D 画像の分野において、カラーデジタル複写機が開発されていた 1987 年頃に、大規模な紙幣の偽造事件があったため、販売にあたり紙幣の偽造防止機能の搭載が検討された。現状では、国内で市販されているスキャナ、プリンタ複合機、Adobe Photoshop® など民生・業務用を問わず殆どの 2D 画像処理機器やツールには、中央銀行偽造防止グループ (CBCDG)²⁾ が開発した紙幣の偽造防止ソフトウェアが実装されている。これと同様に、出力データの形状認証と違法造形物の出力規制を行うセキュリティ機能を 3D プリンタ出力系に実装することが今後重要になると思われる。そこで、ウイルス対策ツールと同様に、違法造形物のポリゴンデータをあらかじめブラックリストに登録し、3D プリンタ出力用ポリゴンデータに対してブラックリストと照合し、出力可否判定を行える 3D プリンタ出力規制システムの開発にも着手した³⁾。

3D プリンタには、インターネットを介して情報だけでなく、モノを遠隔地に間接的に伝搬できる革新性を備えている (テレポーション機能⁴⁾)。そのため、これまで税関で規制されていた銃砲・刀剣などの危険物データが国境を越えて流布され、3D プリンタによりモノとして容易に入手可能になるという問題が懸念される。更に、出力物の材料が樹脂であると、セキュリティゲートの金属探知機でも見逃されるという問題もある。もっとも、法人向けに金属材料が使用できる 3D プリンタは既に販売されており、民生にも手が届くレベルの低価格な機種も出始めているため、金属製の銃砲・刀剣などが製造されるのも遠い話ではない。

筆者らが 3D プリンタのセキュリティ技術の開発に着手してから約 1 年後、前述の 3D プリンタ出力規制システムについて開発が進み、その成果につき文献⁵⁾ の通り対外発表を準備していた最中の 2014 年 5 月に、国内でも 3D プリンタによる拳銃製造の逮捕事件が発生した。その上、国内で猥褻物の 3D データが Web サイトにアップロードされるという逮捕事件も発生した (2014 年 7 月)。米国では、2015 年 2 月に、テレビのスポーツ中継で使用されたマスコット・キャラクター "Left Shark" の 3D モデルが、"Shapeways" などのマーケットプレイスにアップロードされるという著作権侵害事件も発生し、2015 年

9月に、TSA（米運輸安全局）鍵の空港検査用「マスターキー」の合鍵の3DデータがWebサイトにアップロードされる事件も発生している。今後、3Dプリンタや3Dスキャナの性能向上とともに低価格化が進むと、新規な問題が引き起こされる懸念がある。

このような様々な形態の違法造形物の3Dプリンタ出力を規制するためには、危険物等の違法造形物のポリゴンデータが登録されているブラックリストDBを構築する必要があるが⁶⁾、ポリゴンデータを不可逆的な特徴ベクトルに変換する方法を提案した⁷⁾。3Dポリゴンデータに対する特徴ベクトル生成技術に関する先行研究として、Osadaらによる“Shape Distributions”⁸⁾があり、先報告¹¹⁾にて、これを基に拡張手法を提案した。

先報告¹¹⁾では、これらの特徴ベクトルを2D画像からも生成可能にし、3Dポリゴンデータと2D画像とのハイブリッドな照合^{9) 10)}を実現可能にした事例を紹介した。また、提案した特徴ベクトルには、3D形状を構成する全ての部品の特徴ベクトルを包含しているため、DB登録されている完成モデルの構成部品と特徴ベクトルによる部分照合¹²⁾を実現する手法についても言及した。その後、特徴ベクトルの生成方式について種々の改良を加え、部分照合を高精度に行えるように改良を加えてきた^{13) - 16)}。

図1は、筆者らが構想する違法造形物の3Dプリンタによる出力規制システムに要求される3D形状の高度な照合技術を示す。図1-(A)の3D/2Dハイブリッド照合と図1-(B)のパーツとの部分照合については、先報告¹¹⁾において既に言及しているが、本稿では図1-(C)のモデルポーズ耐性照合技術についても新たに提案する。これは、著作権保護対象であるフィギュアのポーズを変更して3Dプリンタ出力する行為を規制するもので、ポーズ変更に対するロバストな照合技術が必要になる。しかし、先報告¹¹⁾の1Dヒストグラムを基本とした特徴ベクトルを用いた照合方式により、図1の3種の照合を高精度に実現するには、限界が見えてきた。

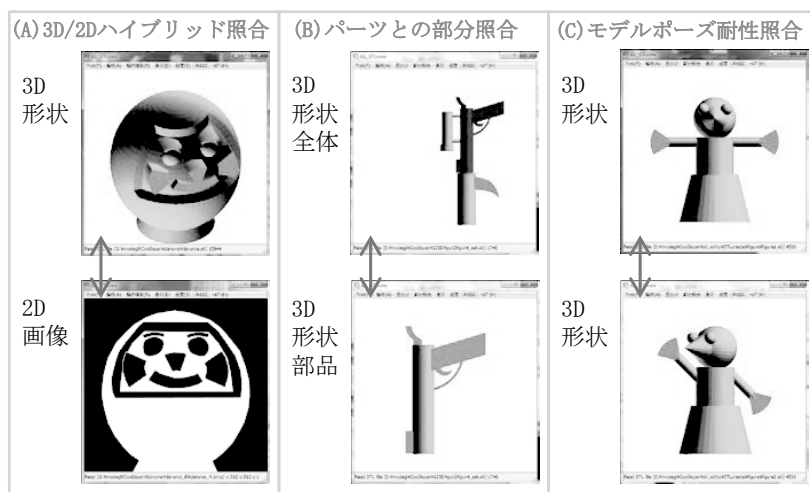


図1 違法造形物の3Dプリンタによる出力規制システムに要求される3D形状の照合技術

そこで、互いに独立した特性をもつ2種類の特徴ベクトルを選定して2Dヒストグラムに統合し、2Dヒストグラムを基本とした特徴ベクトルどうしを2次元空間で照合する方法を提案した¹⁷⁾。この2Dヒストグラムを基本とした照合技術は、近年目覚ましく進展したディープラーニングを用いた画像認識技術と相性が良く、違法造形物の判定にあたっては、人工知能を活用することができる。本稿では、先報告¹¹⁾で紹介した2D画像とのハ

イブリッド照合、完成モデルと構成部品との部分照合の他に、図1-(C)に示されるポーズ変更に対する耐性をもたせた高度な照合¹⁸⁾も高精度に実現できる改良手法について紹介する。

2. 提案する特徴ベクトルを用いた 3D プリント出力規制システムの概要

2.1. 提案する 3D プリント出力規制システムの構成

図2は先報告¹¹⁾で提案した、2D/3D ハイブリッド照合をサポートするクラウド型 3D プリント出力規制システムの構成を示す。出力規制技術の主要機能は、文献6)で提案したものと基本的に同様で、出力拒否すべき危険物や著作権侵害物のポリゴンデータを事前に特徴ベクトルの形式に変換した上でブラックリストにDB登録しておく。入力された3D プリント出力用データに対しても同様な特徴ベクトル形式に変換し、この特徴ベクトルを事前にDB登録されている全ての特徴ベクトルと照合し、適合するものが1件でも見つければ、プリント出力系に出力拒否指令を出すものである。この特徴ベクトルは3D ポリゴンデータのスケールやアングルに不変であるため、文献6)で提案した構成では重要であったポリゴン正規化処理は不要になる。また、図2左上の処理ブロックj)-k)に示されている通り、この特徴ベクトルは2D 画像からも変換してブラックリストf)に登録することができる。これにより、ブラックリストf)には、3D ポリゴンから変換された特徴ベクトルと2D 画像から変換された特徴ベクトルとがハイブリッドに混在し、2D 画像形態の著作物と類似した3D ポリゴンデータの3D プリント出力を規制することも可能になる。

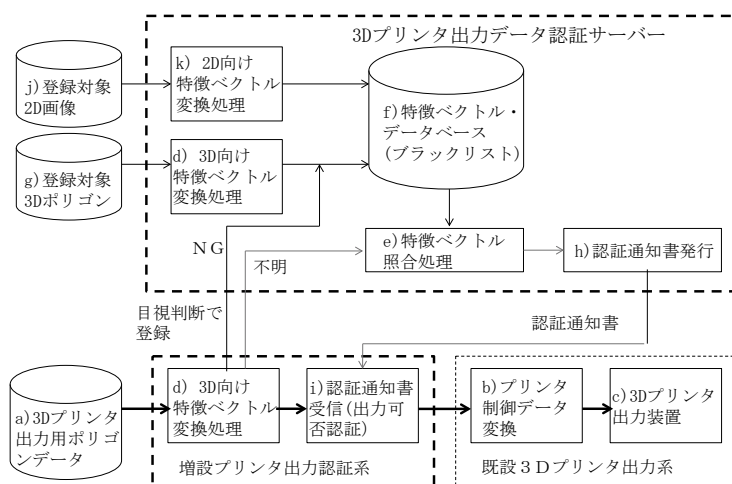


図2 3D/2D ハイブリッド照合をサポートするクラウド型 3D プリント出力規制システム

図2右下は、既設の3Dプリンタ出力系b) c)で左端のポリゴンデータa)を受け取って造形物を出力するもので、そのフロントエンドの増設プリンタ出力認証系d) i)と上側の3Dプリンタ出力データ認証サーバーd) -h)は筆者らが提案する出力規制系である。増設プリンタ出力認証系d) i)は、3Dプリンタ出力データ認証サーバーd) -h)と通信しながら、左下のポリゴンデータa)を認証し、場合により出力停止などの制御を行う。現状では単一の造形物の出力に平均数時間オーダーの時間を要するため、左下のポリゴン

データ a) の出力処理が開始されるとともに、同ポリゴンデータ a) がフロントエンドの 3D 向け特徴ベクトル変換処理 d) を介して特徴ベクトルに変換されて上側の特徴ベクトル照合処理 e) にも送られ、ブラックリスト f) と順次照合される処理が並行して行われる。そして、ブラックリスト f) のいずれかのデータと適合するか否かが判明次第、認証通知書がフロントエンドの認証通知書受信 i) に返却され、NG の場合、出力中のプリンタジョブを中断させる制御を行う。

図 2 は、既設の 3D プリンタ出力系に出力規制システムを実装する構成であるが、これを実現するにあたっては、関連メーカーとの交渉が必要になると、ブラックリストをどのように構築するかが問題になる。そこで、第 1 段階としては、図 2 に示す構成で半自動の運用を行い、3D プリンタ受託出力事業者向けにサービスを行う。現状、3D プリンタ受託出力事業者は、顧客から支給された 3D データに対して人手で受け入れ審査を行っているが、この工程を省力化する。目視で NG 判定された 3D データは特徴ベクトルに変換され、順次ブラックリストに追加登録される一方、目視判断がつかない 3D データに対しては、クラウド上のデータベースに照会される。この方法では、既設の 3D プリンタ出力系に手を加える必要が無く、3D プリンタ受託出力事業者の協力が得られれば運用できる。

第 1 段階の運用により、ブラックリストが充実した段階で、図 2 の構成で個人を含む 3D プリンタ所有者向けのサービスを展開する。この方法では、既設の 3D プリンタ出力系のフロントエンドに図 2 左下に示す増設プリンタ出力認証系を追加する必要があるため、関連メーカーとの交渉が必要になるが、処理負荷は殆ど増大しないため、ソフトウェアの僅かな修正で対応できる。

2.2. 先提案の 3D 形状と 2D 画像向け特徴ベクトル方式

図 3- (1) (2) は、先報告¹¹⁾ で提案した 3D 形状と 2D 画像のハイブリッド照合を実現するのに最適な特徴ベクトル方式である。これらは、Osada らの "Shape Distributions D3 および A3"⁸⁾ を基に拡張したものである。3D 形状を構成するポリゴン重心または 2D 画像のエッジ点よりランダムに 3 点を抽出して三角形を構成し、各三角形の外接円または内接円の半径のヒストグラム分布を特徴ベクトルとするものであった。三角形の 3 頂点を (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) とし、3 辺の長さを $a = \{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}^{1/2}$, $b = \{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2\}^{1/2}$, $c = \{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2\}^{1/2}$ とすると、ヘロンの公式により三角形の面積 S は、 $d = (a + b + c) / 2$ として、 $S = \{d(d - a)(d - b)(d - c)\}^{1/2}$ となり、外接円半径は $abc / (4S)$ 、内接円半径は S / d で算出できる。

図 3- (1) において、ヒストグラム分布を算出するにあたり、先報告¹¹⁾ では三角形を構成する 3 つのポリゴンの面積の平均値で重み付けする方法をとっていたが、文献 14) 15) では後述する部分照合を高精度に実現するため、図 3- (3) に示されるように 3 つのポリゴンの位置関係と各々の法線ベクトルを考慮した高精度な重み付けを行う方法を提案した。図 3- (3) は、図 3- (1) に示される三角形を構成する 3 つのポリゴンを取り出したもので、三角形の重心から各頂点までのベクトルと各ポリゴンの法線ベクトルを図示したものである。三角形の重心から各ポリゴン重心までの単位ベクトルと当該ポリゴンの法線ベクトルとの内積値を当該ポリゴンの面積値に乗算した値を 3 つ算出し、それらの平均値で重み付けする。そうすると、ポリゴンで囲まれる形状内部が材料で詰まっているか否

かを識別でき、特徴ベクトルにおけるポリゴンモデルの微細な特徴を含む識別性が向上する。

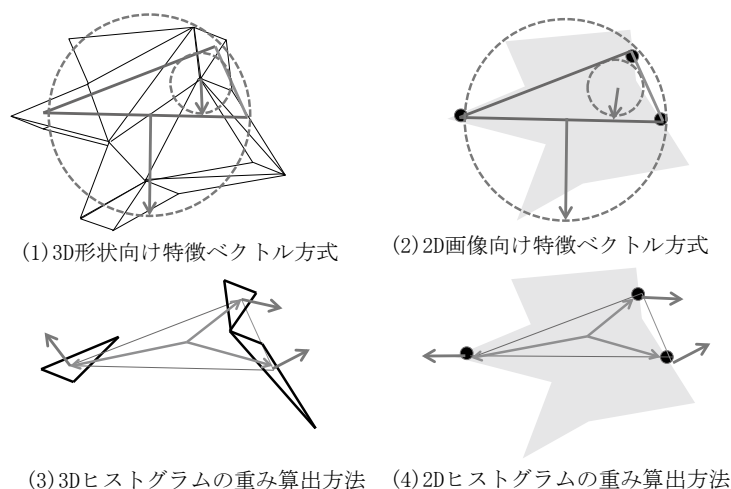


図3 先提案の3D形状と2D画像向け特徴ベクトル方式

3D形状と2D画像のハイブリッド照合の用途においても、図3-(4)に示されるように、図3-(3)と同様な重み付けを2D画像から生成される特徴ベクトルに対しても施すことができる。図3-(4)は、図3-(2)に示される三角形を構成する3つのエッジ点を取り出したもので、三角形の重心から各エッジ点までのベクトルと各エッジ点でのエッジ方向ベクトルを図示したものである。三角形の重心から各エッジ点までの単位ベクトルと当該エッジ点におけるエッジ方向ベクトルとの内積値を当該エッジ点のエッジ強度に乗算した値を3つ算出し、それらの平均値で重み付けする。これにより、エッジ点で囲まれる図形内部が塗りつぶされているか否かを識別でき、特徴ベクトルにおける2D画像の微細な特徴を含む識別性が向上し、2D/3Dハイブリッド照合の精度を向上させることができる。

3. 特徴ベクトルを用いた3Dポリゴンモデルの部分照合の実現

3Dプリンタは、複雑なフィギュアを表面の絵柄を含めて完成形態で一括出力できるという従来の製造方法では実現できない優れた特徴があるが、拳銃などの危険物の製造においては、部品単位にばらして3Dプリンタ出力される方法が一般的にとられる。理由としては、人手による調整が必要な精度が要求される可動機構があるため、その他、3Dプリンタで出力できない金属材料部品・電子部品などが必要な場合、プリンタ出力サイズの制約から一括出力できない場合、完成モデルの形態が不安定で造形中に崩れやすい場合などにも、部品単位にばらして3Dプリンタ出力される。そのため、3Dプリンタ出力規制システムの実現において、ブラックリストに登録されている全体モデルと3Dプリンタ出力される部品モデルとの部分照合が要求される。

本章では、先報告¹¹⁾で言及した特徴ベクトルを用いた3Dポリゴンモデルの部分照合技術¹²⁾について、その後の具体的な開発経緯を以下述べる。

3.1. 構成部品の特徴ベクトルの特性

本節では部分照合を実現する上でのキーとなる特徴ベクトルの特性について述べる。図4-(1)で示される3D形状の完成形が、図4-(2)に示される部品モデルAと部品モデ

ル B という 2 つの部品で構成される場合、これらの 3D 形状に対して 2. 2 節で述べた特徴ベクトルを適用すると、図 4- (1) に基づいて算出される 3D 形状のヒストグラム分布は、部品モデル A から選択される 3 つのポリゴンで構成される三角形を基に算出されるヒストグラム分布と、部品モデル B から選択される 3 つのポリゴンで構成される三角形を基に算出されるヒストグラム分布と、部品モデル A から選択される 1 つまたは 2 つのポリゴンと部品モデル B から選択される 2 つまたは 1 つのポリゴンで構成される三角形を基に算出されるヒストグラム分布が合成されたものになる。即ち、3D 形状のヒストグラム分布には、構成される部品モデル A のヒストグラム分布と部品モデル B のヒストグラム分布の各々を包含することになる。この特性は、構成される部品の数が増えても同様に成立し、完成モデルのヒストグラム分布は、全ての構成部品のヒストグラム分布を包含するという特徴がある。従って、完成モデルのヒストグラム分布から特定の構成部品のヒストグラム分布を分離・抽出できれば、特徴ベクトルを介して、完成モデルと特定の構成部品との部分照合を実現することができる。

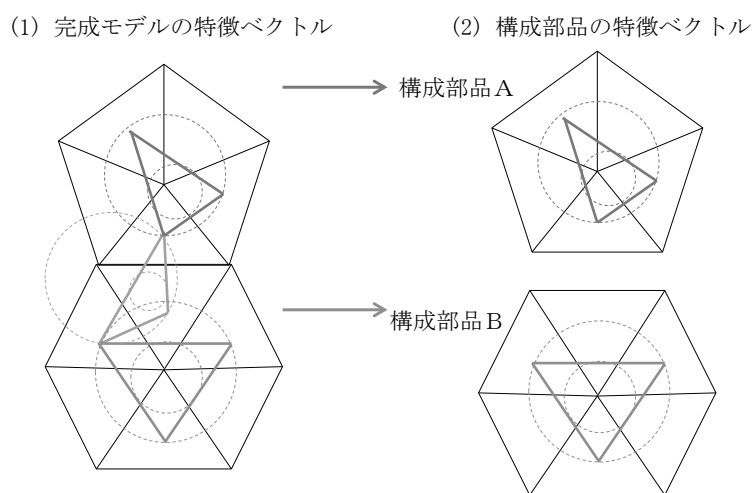


図 4 3D 形状の完成形と構成部品との特徴ベクトルの関係

完成モデルのヒストグラム分布には、複数の構成部品をまたがって形成される三角形を基に算出されるヒストグラム成分も多く含まれる。この場合、三角形の重心から 3 つのポリゴン重心への方向と、各ポリゴンの法線ベクトルの方向は揃いにくい。そこで、2. 2 節で述べたように、特徴ベクトルを算出する際に、図 3- (3) に示されるように 3 つのポリゴンの位置関係と各々の法線ベクトルを考慮した重み付けを行うと、完成モデルのヒストグラム分布において、複数の構成部品をまたがって形成される三角形を基に算出されるヒストグラム成分を抑圧することができる。

3. 2. 先提案の 3D 形状の部分照合システムの構成

図 5 は文献 14) 15) で提案した特徴ベクトルを用いた 3D 形状の部分照合方法で、図 5- (1) (2) の完成モデルおよび部品モデルの 3D ポリゴンデータに対して、図 3- (1) (3) の方式で特徴ベクトルに変換した結果が図 5- (3) (4) である。各々上のグラフは外接円半径のヒストグラム分布、下のグラフは内接円半径のヒストグラム分布を示す。始めに、図 5- (5) において、図 5- (4) の部品モデルの各分布の横軸の半径のスケールを図 5- (3)

の完成モデルの分布に整合させる。これは図5-(2)の部品モデルを図5-(1)の完成モデルの構成部品として3Dプリンタに倍率設定して出力することを想定している。

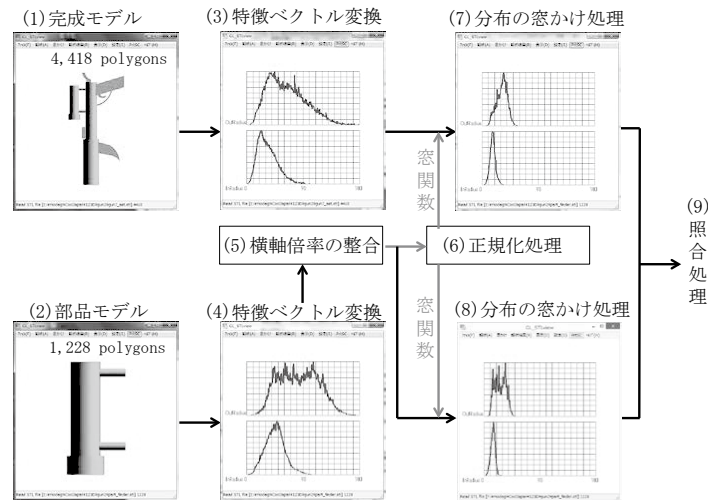


図5 特徴ベクトルを用いた3D完成モデルと構成部品モデルとの部分照合システムの構成

3.1節で述べたように、この段階で、図5-(3)の完成モデルの分布には図5-(5)により整合させた部品モデルの分布が包含されている。そこで、部品モデルに対応する成分を抽出するため、後述する方法で部品モデルの分布を基に窓関数を作成して窓かけ処理を行う。この窓関数を用いて、図5-(3)の完成モデルと図5-(5)により整合させた部品モデルの分布に対して各々重み付けを行い、図5-(7)(8)を得る。そうすると、図5-(7)に示されるように、図5-(3)の完成モデルの分布より、図5-(5)により整合させた部品モデルに相当する成分を概ね抽出できる。最後に、図5-(9)で、図5-(7)の完成モデルの分布と図5-(8)の部品モデルの分布を照合する。

窓かけ処理に使用する窓関数は、図5-(5)で整合させた部品モデルのヒストグラム分布の縦軸を図5-(6)の正規化処理により0～1の範囲に正規化し、1/4乗を施したものを与える。この窓関数の作成にあたり、1未満の実数値を累乗する理由は次の通りである。図5-(3)の完成モデルの分布には、図5-(5)により整合させた部品モデルの分布に対応する成分だけでなく、対応しない他の部品モデルに対応する成分も多く含まれている。そのため、図5-(3)の完成モデルの分布に、図5-(5)により整合させた部品モデルの分布をそのまま窓関数として乗算すると、他の部品モデルに対応する成分も強調されてしまう。そこで、窓関数の勾配をなだらかにし、図5-(3)の完成モデルの分布に窓かけ処理をする際、完成モデルの分布に含まれる図5-(5)により整合させた部品モデルの分布に対応しない他の部品モデルの成分に対して強調させないようにする。

図5-(9)の照合方法として、先報告¹¹⁾では正規化相関係数を用いていたが、部品モデルに相当する成分以外の他の部品の構成成分が多いと相関が低く算出されやすい。そこで、各々の分布で最大ピーク位置を検出し、その差異(距離)で類似性を判定する方法を提案する。具体的には、分布の横軸の外接円または内接円半径の最大値を M とし、 $0 \leq M \leq 1$ の範囲で、完成モデル側のピーク位置を Pa 、部品モデル側のピーク位置を Pp とすると、ピーク位置類似度 Dp ($-300 \leq Dp \leq 100$)を、 $Dp = |M/4 - |Pa - Pp|| \cdot 400/M$ で与える。これにより、ピーク位置類似度が正規化相関係数と同程度のオーダーの%値に

なる。図5において、図5-(7)と図5-(8)の正規化相関係数を計算すると、外接円半径分布は68.46%、内接円半径分布は73.03%となり、ピーク位置類似度を計算すると、外接円半径分布は61.11%、内接円半径分布は94.44%となる。これに対して、図5において、図5-(5)の横軸倍率の整合を行わずに完成モデルとスケールを合わせない状態で、図5-(7)と図5-(8)の正規化相関係数を計算すると、外接円半径分布は66.77%、内接円半径分布は68.50%となり、上記に比較して正規化相関係数では完成モデルとスケールを整合させた場合とでは、相関値に有意差が殆ど見られていない。一方、ピーク位置類似度を計算すると、外接円半径分布は13.33%、内接円半径分布は46.67%となり、上記完成モデルとスケールを合わせた場合に比べ顕著に低下する。

3.3. 先提案の3D形状の部分照合システムを用いた照合事例と問題点

3.2節で述べた方法に基づいて、図6に示す模擬拳銃の完成モデル及びその構成部品を用いて部分照合実験を行った。評価方法として、照合対象の構成部品に対して、図5-(5)の横軸倍率の整合を行わずに完成モデルとスケールを合わせない状態で照合する場合と、横軸倍率の整合を行い完成モデルとスケールを合わせた状態で照合する場合とを比較する方法をとった。照合方法として、3.2節で述べたピーク位置類似度を用いた。それらの結果の一例を図7に示す。図7-(1)は模擬拳銃の完成モデルで、図5-(1)と同一である。図7-(2)(3)はいずれも完成モデルの一部である図6に示す部品モデルc)で、図7-(2)は図7-(1)と同一スケールになっており、図7-(3)は図7-(1)とはスケールを合わせていない状態になっている。図7-(1)の完成モデルおよび図7-(2)の部品モデルに対して、図5のフローに従い特徴ベクトル変換を行い、図5-(3)に対応する完成モデルに特徴ベクトル変換を行った分布が図7-(4)で、図5-(4)に対応する部品モデルに特徴ベクトル変換を行った分布が図7-(5)である。図5-(7)に対応する完成モデル側に窓かけ処理を行った分布が図7-(7)で、図5-(8)に対応する部品モデル側に窓かけ処理を行った分布が図7-(8)である。図7-(1)と図7-(2)はポリゴンモデルの段階で、スケールが整合しているため、図5のフローにおける図5-(5)の横軸倍率の整合は行わない。3.2節で述べた方法に基づいて、図7-(7)と図7-(8)の照合を行うと、外接円半径分布のピーク位置類似度は70.68%、内接円半径分布の同値は91.86%となった。

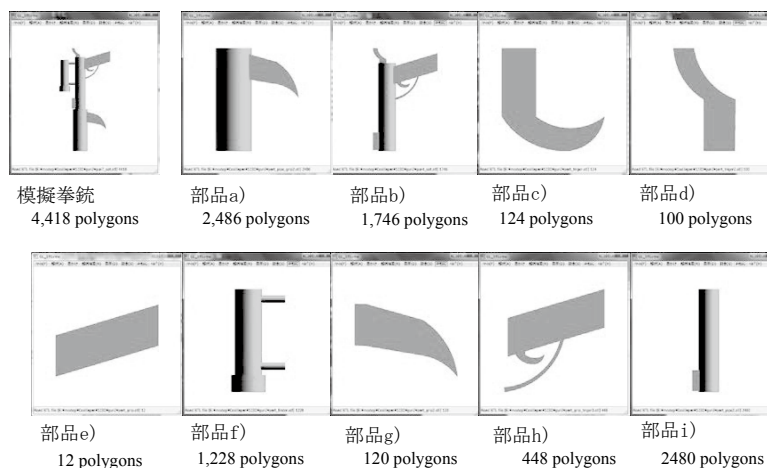


図6 評価実験に使用した完成モデルと構成部品（模擬拳銃）

一方、図7- (1) とはスケールを合わせていない図7- (3) の部品モデルに対して、図5のフローに従い特徴ベクトル変換を行い、図5- (4) に対応する部品モデルに特徴ベクトル変換を行った分布が図7- (6) である。図5- (8) に対応する部品モデル側に窓かけ処理を行った分布が図7- (9) である。同様に図5のフローにおける図5- (5) の横軸倍率の整合は行わず、スケールが不整合の状態ですべて図7- (7) と図7- (9) の照合を行った。その結果、外接円半径分布のピーク位置類似度は55.74%、内接円半径分布の同値は70.19%となり、前述の図7- (7) と図7- (8) の照合結果に比べ減少が見られ、先提案の部分照合処理は適切な動作をしているが、先の方式では精度的には十分とはいえないことがわかる。

図7と同様に、図6に示す模擬拳銃の完成モデル及びその構成部品を用いて、部品のスケールを整合させない場合と整合させる場合とで全9通りの部分照合実験を行った結果を表1に示す。表1の各数値のペアは、外接円半径分布と内接円半径分布の各々ピーク位置類似度を示す。本提案の部分照合処理が適切に動作している条件として、倍率整合ありの対応するピーク位置類似度が、倍率整合なしのピーク位置類似度に比べ顕著に大きな値になっていなければならない。しかし、表1では全9件中の2件においてスケールが合っていない方が、外接円半径分布および内接円半径分布のピーク位置類似度が高くなる場合があり、更に内接円半径分布のピーク位置類似度のみが高くなる場合が1件あった。即ち、準備した数少ない実験用サンプルの範囲でも、スケールが整合しない部品の方が整合する部品より部分照合結果の相関が高くなるという矛盾した結果が生じる場合があり、先提案の特徴ベクトル方式と窓かけ処理に対しては見直しが必要であった。

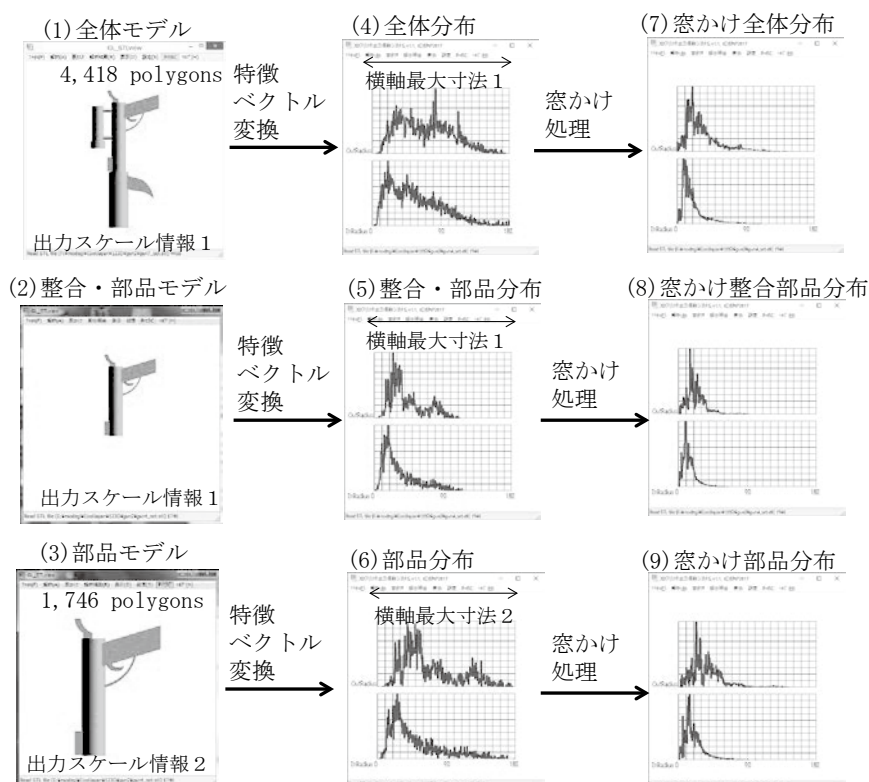


図7 模擬拳銃モデルとその構成部品との部分照合実験例

表1 模擬拳銃モデルとその構成部品との部分照合実験結果

照合対象	倍率整合なし	倍率整合あり
模擬拳銃とa)パイプ・グリップ2	12.26, 55.59	85.53, 83.20
模擬拳銃とb)拳銃本体	55.74, 70.19	70.68, 91.86
模擬拳銃とc)トリガー1	12.38, 41.15	-5.84, 5.25
模擬拳銃とd)トリガー2	39.83, 52.90	1.47, 3.49
模擬拳銃とe)グリップ1	-10.37, 2.72	16.56, 52.27
模擬拳銃とf)ファインダー	27.96, 62.47	52.65, 87.54
模擬拳銃とg)グリップ2	51.73, 82.14	55.47, 54.77
模擬拳銃とh)グリップ/トリガー3	19.88, 30.35	34.86, 45.89
模擬拳銃とi)パイプ2	36.45, 48.55	84.08, 87.00

4. 提案する 2D ヒストグラムを用いた改良型特徴ベクトル変換方式

4.1. 提案する 2D ヒストグラムに拡張した特徴ベクトルの概要

図8は、本稿で提案する 2D ヒストグラムを用いた改良型特徴ベクトル方式の説明図である¹⁷⁾。これまで提案した特徴ベクトルは、2種の特徴パラメータに対する2種の1Dヒストグラムで構成されていたが¹¹⁾、本稿では2種の特徴パラメータに対して2Dヒストグラムを算出し、これを新たに特徴ベクトルとすることで照合精度の改善を狙ったものである。2種の特徴パラメータとして、文献14) 15)では、Osadaらの”Shape Distributions D3およびA3”(4)を基に拡張し、図3-(1)(2)のように、3D形状を構成するポリゴン重心または2D画像のエッジ点よりランダムに3点を抽出して三角形を構成し、各三角形の外接円半径を第1特徴パラメータ、内接円半径を第2特徴パラメータとしていた。

その後、内接円半径は外接円半径に比べ形状識別性が顕著に劣ることが判明し、外接円半径と相関があるため、文献16)では、第2の特徴ベクトルとして、外接円半径の2乗を三角形の面積で割った面積比率の3乗根をとった値に改良を加えている。

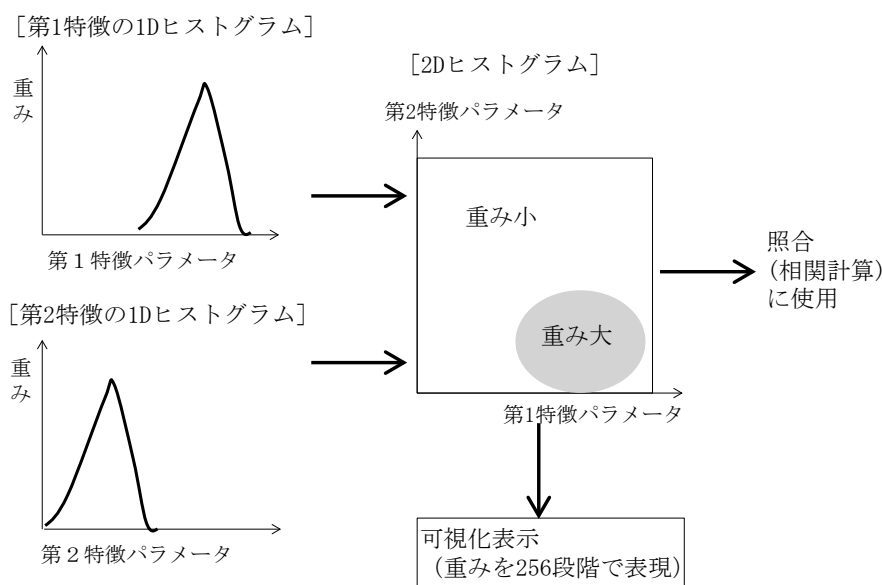


図8 提案する 2D ヒストグラムを用いた改良型特徴ベクトル方式

4.2. 2種の特徴パラメータ算出方法の見直し

文献16)等で提案した既提案の特徴ベクトル方式では、図1-(C)のようなポーズが変更された3Dモデルを識別できない。原因として、2種の特徴パラメータの算出の基礎となる三角形を形成する際、ポリゴンの法線ベクトルやエッジ点のエッジ方向ベクトルが考慮されていないことが挙げられる。そこで、図9-(1)(2)に示されるように、3つのポリゴン重心または3つのエッジ点で形成される三角形に対して、同図右側のように、各頂点における法線ベクトルやエッジ方向ベクトルを用いて補正を施す方法を提案する¹⁸⁾。

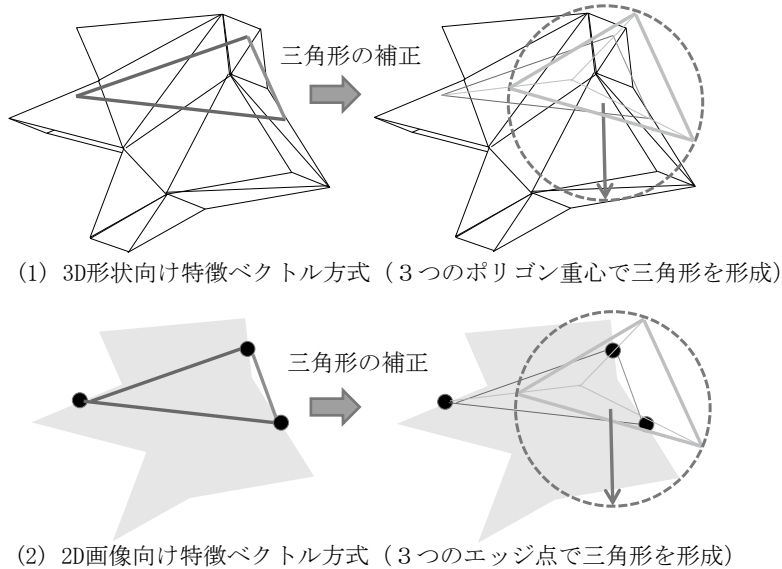


図9 新規提案の3D形状と2D画像向け特徴ベクトル方式

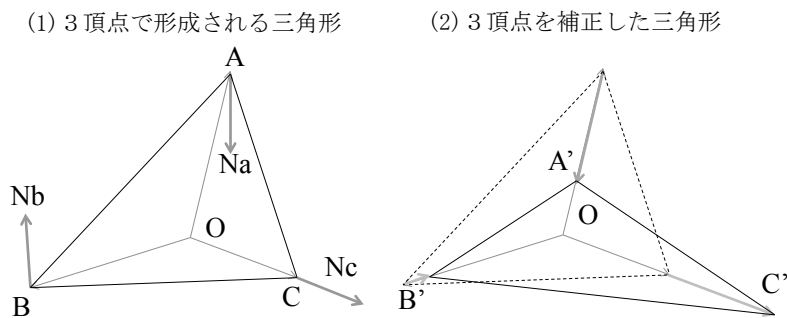


図10 3つのポリゴン重心またはエッジ点で形成される三角形の補正

第1特徴パラメータとしては、補正後の三角形に対する外接円半径を用いる。第2特徴パラメータとしては、補正後の三角形の面積と補正前の三角形の面積との面積比率を用いる。与えられた3D形状または2D画像に対して算出される外接円半径の最大値をMaxとすると、第1特徴パラメータは、算出される外接円半径を最大値 $\text{Max} \times a$ の範囲で1Dヒストグラムまたは2Dヒストグラムの横軸にプロットし、第2特徴パラメータは、算出される面積比率の $1/4$ 乗を $\text{Max}^4 \times \beta$ の範囲で1Dヒストグラムまたは2Dヒストグラムの縦軸にプロットする。 a と β はヒストグラムの分布位置を調整するパラメータである。また、1Dヒストグラムまたは2Dヒストグラムにプロットする際、補正後の三角形の面

積で重みを加えると、ヒストグラムの分布がシャープになるため、部分照合を行う時以外は重みを加える。

図10は、図9-(1)(2)における三角形の補正方法を説明したものである。ランダムに選択された3つのポリゴン重心またはエッジ点をA, B, Cとし、各ポリゴンの法線ベクトルまたは各エッジ点のエッジ方向ベクトル(単位ベクトル)を \vec{Na} , \vec{Nb} , \vec{Nc} とする。三角形ABCの重心をO、 $Ea = (\vec{OA} \cdot \vec{Na}) / |\vec{OA}|$ 、 $Eb = (\vec{OB} \cdot \vec{Nb}) / |\vec{OB}|$ 、 $Ec = (\vec{OC} \cdot \vec{Nc}) / |\vec{OC}|$ として($-1 \leq Ea, Eb, Ec \leq 1$)、補正後の3頂点A', B', C'を $\vec{OA}' = \vec{OA} + Ea \cdot \vec{OA}$ 、 $\vec{OB}' = \vec{OB} + Eb \cdot \vec{OB}$ 、 $\vec{OC}' = \vec{OC} + Ec \cdot \vec{OC}$ のように算出する。

5. 提案方式の高度な3D形状照合への適用例

5.1. モデルポーズ耐性照合

図11は、図1-(C)の事例に対して、文献15)で提案した既提案の特徴ベクトル方式により、1Dヒストグラムおよび2Dヒストグラムを算出し、照合を行った事例である。ポーズが異なる3D形状を照合する場合、一方の特徴パラメータで両者が同一であると認識するとともに、もう一方の特徴パラメータではポーズに相違があることを認識できる必要がある。1Dヒストグラムどうしで正規化相関係数で照合すると、外接円半径が97.48%、内接円半径が98.98%となり、両者が同一であることは認識しているが、ポーズに相違があることが認識できていない。

本稿提案の2Dヒストグラムどうしを照合する場合、2Dヒストグラム分布全体で正規化相関係数を算出する方法と、局所ピークを抽出しピーク点に限定して正規化相関係数を算出する方法の2通りで評価するようにした。図6に対して、全体で照合すると95.36%、ピーク点で照合すると89.35%となり、同様に両者の相違は認識できていない。

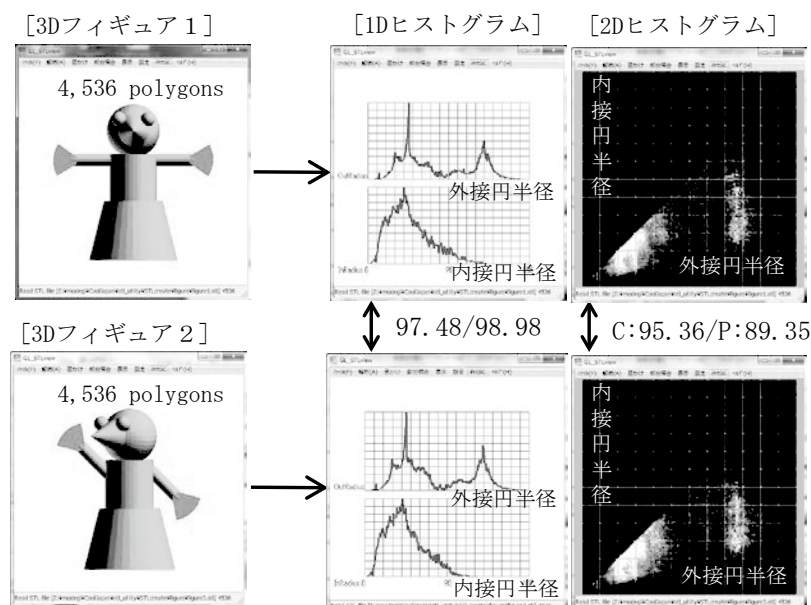


図11 ポーズ変更3Dモデルとの照合事例1(従来方式、文献15))

図12は、同事例に対して、本稿で提案した改良型特徴ベクトル方式により、1Dヒストグラムおよび2Dヒストグラムを算出し、照合を行った事例である。同様に1Dヒストグラムどうしで正規化相関係数で照合すると、外接円半径が96.21%、面積比率が5.06%となり、外接円半径により両者が同一であることを認識するとともに、面積比率によりポーズに相違があることも認識できている。2Dヒストグラムどうしで正規化相関係数で照合すると、全体で照合すると9.64%、ピーク点で照合すると-9.52%となり、同様に両者の相違を認識できている。

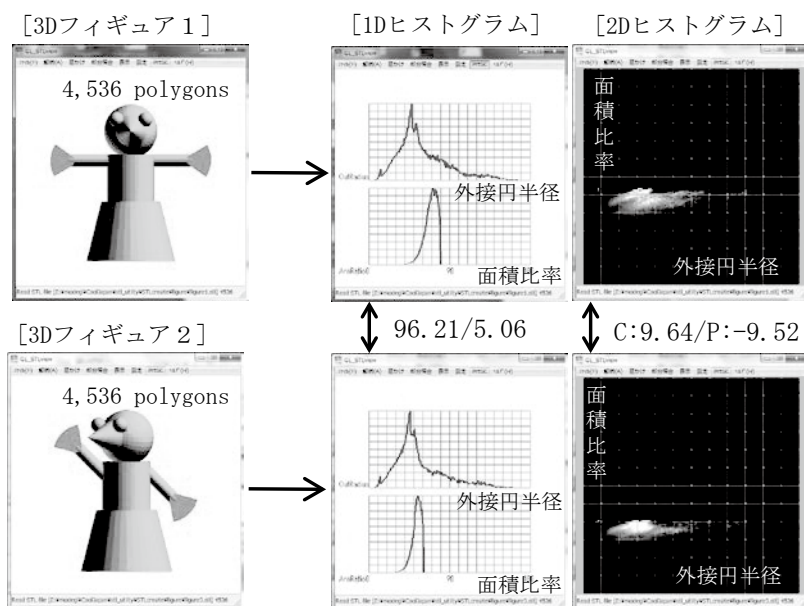


図12 ポーズ変更3Dモデルとの照合事例2 (本稿提案方式)

5.2. 3D/2Dハイブリッド照合

図13-(1)(2)は。図1-(A)の事例に対して、文献15)で提案した従来方式および本稿提案方式により各々2Dヒストグラムを算出し、照合を行った事例である。従来方式により、2D画像から生成される特徴ベクトルには、2D円形パターンから生成される特徴ベクトルを3D球体パターンから生成される特徴ベクトルに一致させるように球面補正15)を施していたが、本稿提案方式ではこのような補正は不要である。従来方式により算出された2Dヒストグラムどうしを正規化相関係数で照合すると、全体で照合すると86.79%、ピーク点で照合すると78.33%となり、本稿提案方式により算出された2Dヒストグラムどうしで照合すると、全体で照合すると87.32%、ピーク点で照合すると98.27%となり、いずれの方式においても両者が同一であることを適切に認識しており、双方の方式において差は認められない。しかし、従来方式の2Dヒストグラムの分布は本稿提案方式に比べ顕著に広がっており、異なる形状に対する識別性能については疑問が残る。

そこで、図13-(3)に示されるように、3D形状を図13-(2)の2D画像とは異なる図11の3Dフィギュア1に変更して同様な照合を行ってみた。従来方式により算出された2Dヒストグラムどうしを正規化相関係数で照合すると、全体で照合すると26.53%、ピーク点で照合すると-33.67%となり、両者に若干相関が見られ、完全に異なるものである

ことを認識できていない。一方、本稿提案方式により算出された2Dヒストグラムどうしで照合すると、全体で照合すると-2.05%、ピーク点で照合すると-19.79%となり、両者が異なるものであることを適切に認識できている。

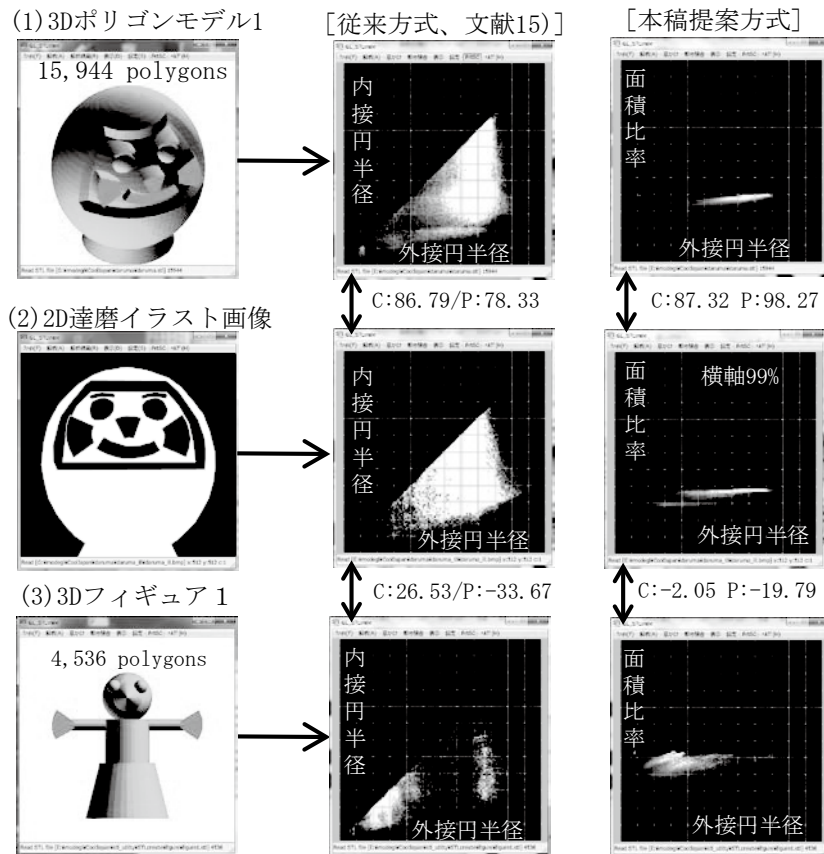


図1.3 3D/2Dハイブリッド照合事例（従来方式と本稿提案方式の比較）

5.3. パーツとの部分照合

図1.4は、3.3節で提示した図7と同一の事例に対して、文献16)で提案した既提案の特徴ベクトル方式により2Dヒストグラムを算出して照合し直したものである。特徴ベクトルが2Dヒストグラム形態になっただけで、特徴ベクトルの算出方法および部分照合方式は既提案と同様で、部品モデルの出力スケールを全体モデルの出力スケールに整合させる方法で照合を行ったものである。既提案の方法では、全体モデルの2Dヒストグラム分布には部品モデルに含まれない他の部品モデルの成分を多く含むため、そのまま整合させた部品モデルと照合すると、不整合という判定になりやすい。一方、整合させた部品モデルの2Dヒストグラム分布が左下方向に偏る傾向があるため、全体モデルおよび整合させた部品モデルの分布に窓かけ処理を行い、左下方向の領域に強調して照合する方法をとった。

図1.4で、窓かけ処理を行わずに全体モデルの特徴ベクトル(4)と出力スケールが不整合の部品モデルの特徴ベクトル(6)を、全体で照合すると54.01%、ピーク点で照合すると16.57%となり、やや相関が見られる結果となった。これに対して、窓かけ処理を行わずに全体モデルの特徴ベクトル(4)と出力スケールを整合させた部品モデルの特徴ベ

クトル (5) を、全体で照合すると 69.11%、ピーク点で照合すると 57.91% となり、相関がやや強くなっている。更に、全体モデルの特徴ベクトル (4) 及び出力スケールを整合させた部品モデルの特徴ベクトル (5) の各々に窓かけ処理を行い、それらの特徴ベクトル (7) と特徴ベクトル (8) を全体で照合すると 80.95%、ピーク点で照合すると 86.07% となり、相関が増大した。しかし、全体モデルの特徴ベクトル (4) 及びが不整合の部品モデルの特徴ベクトル (6) の各々に対して窓かけ処理を行い、それらの特徴ベクトル (7) と特徴ベクトル (9) を全体で照合すると 54.98%、ピーク点で照合すると 20.50% となり、こちらも相関が微増している。従って、全体モデルと部品モデルの出力スケールを整合させた状態で照合した結果は、全体モデルと部品モデルの出力スケールが不整合の状態での照合した結果に比べ、その差は顕著ではない。その理由として、既提案の部品モデルの出力スケールを全体モデルに整合させ、窓かけ処理を施す方法では、照合対象が 2D ヒストグラム分布の左下方向の局所領域に限定されるため、十分な照合精度が得られないと考えられる。

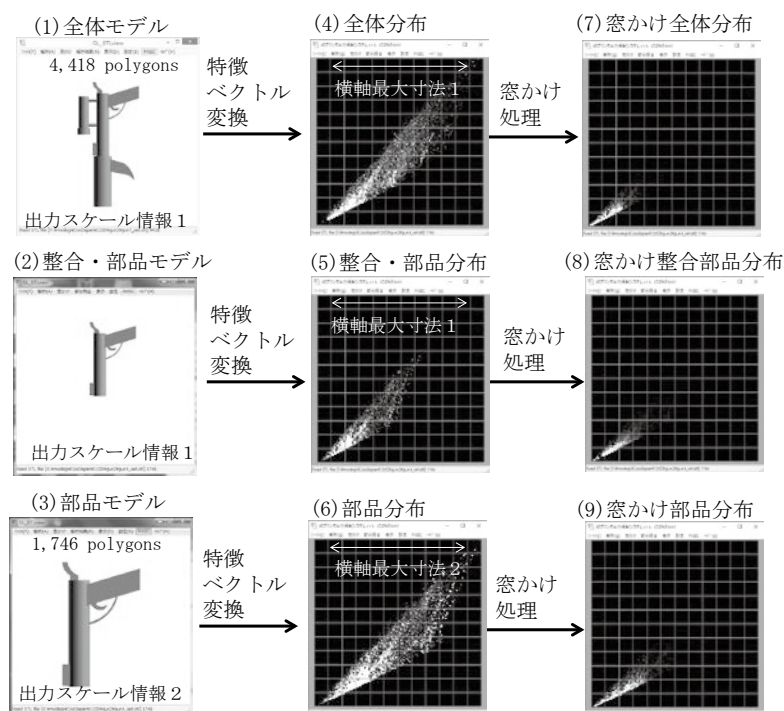


図 1 4 既提案の部分照合法に基づく 2D ヒストグラムを用いた部分照合事例

そこで本稿では、図 1 5 のように、既提案の方法とは逆に全体モデルの出力スケールを部品モデルに整合させる方法をとる。部品モデルを基準に 2D ヒストグラムの縦横スケールを統一させて、整合させた全体モデルの 2D ヒストグラムを算出すると、座標軸外にはみ出る成分が多く発生するが、これらはプロット対象から外す。そうすると、全体モデルの 2D ヒストグラムの左下方向の局所領域がトリミングされ拡大された状態で、部品モデルの 2D ヒストグラム全体と照合されるため、既提案の窓かけ処理は不要になり、既提案より精度の高い照合が可能となる。

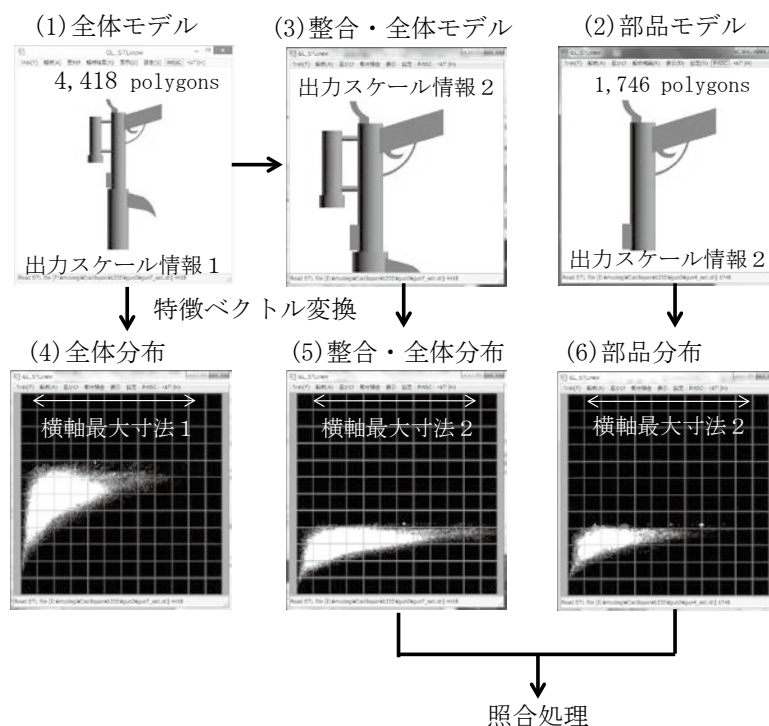


図15 本稿提案の2Dヒストグラムを用いた部分照合事例

図15で、全体モデルの特徴ベクトル(4)と出力スケールが不整合の部品モデルの特徴ベクトル(6)を、全体で照合すると-3.79%、ピーク点で照合すると-20.52%となり、相関が見られない結果となった。これに対して、出力スケールを整合させた全体モデルの特徴ベクトル(5)と部品モデルの特徴ベクトル(6)を、全体で照合すると82.67%、ピーク点で照合すると77.13%となり、顕著に相関が強くなっている。全体モデルと部品モデルの出力スケールが不整合の状態では照合した結果に比べ、その差は顕著になっている。即ち、図14の既提案方法に比べ、全体モデルと部品モデルの出力スケールが不整合の状態では照合する際の識別性能が顕著に向上していることがわかる。

6. おわりに

本稿では、先報告の違法造形物の3Dプリンタ出力を規制する3Dプリンタ出力規制システムを実現するため、3Dプリンタ出力用ポリゴンデータに対してブラックリストと高度な照合を高精度に行えるようにする改良開発事例を紹介した。本稿で提案する高度な照合技術としては、先報告でも言及した3D/2Dハイブリッド照合とパーツとの部分照合に加え、モデルポーズ耐性照合技術を挙げている。これらの高度な照合を実現するにあたり、ブラックリストDBに登録対象の3Dポリゴンモデルまたは2D画像、および3Dプリンタ出力対象の3Dポリゴンモデルを特徴ベクトルに変換する方法と、変換された特徴ベクトルどうしを照合する方法がキーになる。しかし、先報告の1Dヒストグラムを基本とした特徴ベクトル方式では、部分照合において十分な精度を得ることが困難で、ポーズ耐性照合においては殆どお手上げ状態であり、精度的に限界が見えていた。

そこで、本稿では、特徴ベクトルとして互いに独立した特性をもつ2種類の特徴パラメータで形成される2Dヒストグラムを用いて照合する方法を提案した。併せて特徴パラメータの算出方法についても見直し、算出の基礎となる三角形を形成する際、ポリゴンの法線ベクトルやエッジ点のエッジ方向ベクトルを考慮するように改良を加えた。本稿提案の方法により、特に既提案の方法では適切に照合できなかったポーズが変更された3Dモデルに対して対応可能になった。また、パーツとの部分照合において、出力スケールの整合方法についても見直すことにより、既提案の窓かけ処理は不要になり、既提案より精度の高い照合が可能になることを確認できた。更に、3D/2Dハイブリッド照合においても既提案の方法に比べ識別性能の一層の向上を確認できた。

今後は、より多くのサンプルを用いて、モデルポーズ耐性照合、3D/2Dハイブリッド照合、パーツとの部分照合の性能確認を進め、提案方式の実用化に向け検証と改良を重ねる予定である。そして、これらの技術を基に、クラウド型3Dプリンタ出力規制システムを構築し、3Dプリンタ受託出力事業者に提案する予定である。

引用文献

- 1) 今井政敬, 茂出木敏雄, 廣川慧吾, 櫻井快勢, 有吉俊雄, 加藤大樹:「X線CTスキャナによる3Dプリンタ造形物内部の二次元コードの検出」,『電子情報通信学会・技報』, EMM2013-87, Vol.113, No.291, pp.113-118, Nov.2013.
- 2) Banknotes & Counterfeit Deterrence System by CBCDG, <https://rulesforuse.org/> (Accessed in January, 2018) .
- 3) 茂出木敏雄:「ポリゴン照合による危険物の3Dプリンター出力規制技術の提案」,『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-7, pp.198, Mar.2014.
- 4) 田中浩也:『SFを実現する 3Dプリンタの想像力』,講談社現代新書, Jun.2014.
- 5) 茂出木敏雄:「ポリゴン照合による危険物と著作権侵害物の3Dプリンター出力規制技術の提案」,『電子情報通信学会・技報』, EMM2014-5, Vol.114, No.33, pp.23-28, May.2014.
- 6) 茂出木敏雄:「総説:危険物の3Dプリンター出力規制技術の提案」,『日本印刷学会誌「特集:デジタルファブリケーション」』, Vol.51, No.4, pp.246-255, Aug.2014.
- 7) 茂出木敏雄:「3D形状の特徴ベクトル照合による危険物等の3Dプリンター出力規制技術の提案」,『画像関連学会連合会(日本印刷学会・秋期研究発表会)予稿集』, PC-13, pp.73-76, Nov.2014.
- 8) Robert OSADA, Thomas FUNKHOUSER, Bernard CHAZELLE, and David DOBKIN: "Shape Distributions", ACM Transactions on Graphics, Vol.21, No.4, pp.807-832, Oct.2002.
- 9) 茂出木敏雄:「特徴ベクトルを用いた3D形状と2D画像のハイブリッド照合による著作権侵害物等の3Dプリンター出力規制技術の提案」,『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-5, pp.188, Mar.2015.
- 10) Toshio MODEGI: "Proposal for 3D-Printing Regulation Technique in Fabricating Dangerous Devices Using Feature-Vector Based Matching Algorithm of 3D Shapes", Proc. of the First International Conference on Advanced Imaging, T505-04, pp.502-505, Jun.2015.
- 11) 茂出木敏雄:「違法造形物の3Dプリンタによる製造を規制するための3Dデータ照合技術に関する研究」,『尚美学園大学紀要「芸術情報研究」』, Vol.25, pp.101-120, Mar.2016.
- 12) 茂出木敏雄:「特徴ベクトルを用いた3D形状の部分照合機能をもたせた違法造形物の3Dプリンタ

- ー出力規制技術の提案」,『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-11, pp.224, Mar.2016.
- 13) 茂出木敏雄:「3D 形状の部分照合機能をもたせた違法造形物の 3D プリンター出力規制技術の提案」,『日本印刷学会・春期研究発表会・予稿集』, A-09, pp.37-40, May.2016.
 - 14) 茂出木敏雄:「3D 形状の部分照合機能をもたせた違法造形物の 3D プリンター出力規制技術の提案」,『電気学会・電子情報システム部門大会・予稿集』, GS7-6, pp.1169-1174, Aug.2016.
 - 15) Toshio MODEGI: “Proposal for 3D-Printing Regulation Technique in Fabricating Illegal Objects Using Feature-vector Based Matching Algorithm of 3D Shapes”, Proceedings of the SICE Annual Conference, Th2aPo2.1, pp.877-883, Sep.2016.
 - 16) 茂出木敏雄:「違法造形物の3Dプリンター出力規制システムにおける3Dデータ照合方式の改良」,『画像関連学会連合会（日本印刷学会・秋期研究発表会）予稿集』, PC26, pp.25-28, Nov.2016.
 - 17) 茂出木敏雄:「3D 形状の2D ヒストグラム照合による違法造形物の3D プリンター出力規制技術の提案」,『電子情報通信学会・総合大会・予稿集』, D-21-1, pp.157, Mar.2017.
 - 18) 茂出木敏雄:「3D 形状の2D ヒストグラム照合による違法造形物の3D プリンター出力規制技術の提案」,『電気学会・電子情報システム部門大会・予稿集』, GS9-4, pp.1480-1485, Sep.2017.

