現物融合型エンジニアリング専門委員会 産業応用における 3D スキャニング技術の活用*

Industrial Applications Utilizing 3D Scanning Technology

大竹 豊**
Yutaka OHTAKE

Key words digital engineering, surface scanning, X-ray CT scanner, three dimensional measurement

1. はじめに

本専門委員会は、実際のモノ（現物）とデジタルエンジニアリングの融合を目指し、それを「現物融合型エンジニアリング」と名付けて2004年に設立された。図1に委員会のコンセプトを示す。近年急速に発達してきている3Dスキャニング技術により現物をデジタルモデル化し、それをフル活用した設計・製造のIT支援技術（CAD/CAM/CAE/CAT）を確立していくことを目指している。詳しくは初代委員長の鈴木宏正委員による解説記事¹⁾を参照されたい。

本稿では、現物融合型エンジニアリングにおいて基盤となる技術に関して、現状と今後の展望を中心に述べていく。具体的には、2章で光学式スキャナとCTスキャナによる3Dスキャニング技術について紹介する。続く3章では、近年注目されているX線CTスキャナで、デジタルエンジニアリングで用いられる高精度な形状モデルを生成する技術を説明する。

2. 3D スキャニング技術

設計・製造支援を目的として現物形状を非接触スキャン

図1 現物融合型エンジニアリングのコンセプト

する方法を大別すると、光学式スキャンとCTスキャンの二通りがある。図2に、同一の樹脂製部品に対して、これら二通りのスキャンを行って得られた形状データ（表面メッシュ）を示す。光学式スキャン（左図）では外側からよく見える部分の形状は忠実にデータ化できているが、部品内側の入り組んだ形状を欠損なく完全にデータ化することは難しい。生じた欠損のため、本来ならば見えないはずのメッシュの裏面（暗色の箇所）が見えてしまっている。それに対して、CTスキャン（右図）では放射線の透過量を基に形状を得るため、内部の複雑な形状も欠損なくデータ化可能である。しかし、この図の形状前面の平面部分に実在しない微小な高さの凹凸が現れており、光学式スキャンほど忠実に形状が得られていないことが分かる。また、放射線の種類やエネルギーに依存してスキャン可能な物体の材質や大きさに制限があり、光学式スキャンと比べて汎用性が高くない。

上述のように、これら二通りのスキャン方法は一長一短であり、いずれも万能であるとはいえない。当委員会では「用途に応じた適切な使い分け」または「2つの方法の併用」により、高度なデジタルエンジニアリング技術の確立を目指している。続く2.1節と2.2節では、それぞれのスキャン方法に関してより詳しく述べていく。

2.1 光学式スキャン

光学式スキャナにはさまざまな方式があるが、設計・製造の支援を目的として最も多く普及しているのは、三角測量の原理に基づく能動型の据え置きタイプである。具体的には、レーザーやパターン光を物体に照射し、その反射位

図2 光学式スキャン（左）とCTスキャン（右）により得られるデータの比較

*原稿受付 平成25年8月19日

**正会員 東京大学大学院工学系研究科（東京都文京区本郷7-3-1）

図3 表面スキャナの性能向上の様子（左：一昔前のスキャナ，右：最新型のスキャナ）

置をセンサで計測することにより，スキャナから物体までの距離データを得るものである。この原理は古くから用いられているものであるが，近年のスキャナ技術の発達により得られる距離データの精度は飛躍的に向上している。

図3は，機械部品の平面部分を2種類の光学式スキャナでデータ化した結果である。現物には製造工程に起因して生じた数十 μm 程度のうねりが存在するが，そのうねりを確認するために最小自乗平面からの距離に応じたカラーマップ表示がなされている。一昔前のスキャナ（左）と比較して最新型スキャナ（右）を用いた場合には，ノイズの量がおおよそ数分の1程度に抑えられていることが分かる。筆者はこのデータを初めて見たときにあまりのノイズの少なさにCAD曲面と勘違いをした。それほどにデータのクオリティは高い。また，従来の光学式スキャナが苦手としていた立ち壁（スキャン方向と平行に近い面）や，鏡面反射度が高い面のデータ取得に関しても，目覚ましい技術進歩があり，図2左に示したデータの欠損領域も大幅に減らすことが可能となってきている。

据置型のスキャナに加えて，最近では高精度な小型のハンディースキャナの研究開発もなされている。狭い空間や大型の装置をもち込めない場所でも，手軽に高精度な形状データを取得することができれば，スキャニング技術の活用範囲が大きく広がることが期待できる。

光学式スキャナの抱える問題点は，ワンショットのスキャン精度と比較して，多方向からのスキャンにおいては精度が著しく低下する場合があることである。複数方向からのデータの位置合わせ計算がうまくいかないことがその原因である。マーカなどによる物理的手法に加えて，位置合わせ処理の高精度化は重要な今後解決すべき課題である。

2.2 CT スキャン

産業用 X 線 CT スキャナは，以前より工業製品の内部欠陥（亀裂や鑄造巣など）の有無を非破壊で検査することを目的として用いられてきた。近年の焦点サイズの微小化・検出器の高性能化により，形状を精度よくスキャンする目的でも用いられるようになってきた。

図4に，コーンビーム型 X 線 CT によるスキャンの概要を示す。左上の装置概略図にあるように線源と検出パネルの間にスキャンしたい物体を置き，1周回転させて X

図4 X 線 CT スキャンの概要

図5 CT 再構成アルゴリズムの比較（左：フィルタ逆投影法，右：逐次法）

線投影像列（左下）を得る。その後，投影像列から断面像列（右）を CT 再構成と呼ばれる計算機処理により得る。近年の装置の高性能化により，投影像・断面像ともに高解像で鮮明な画像を得ることが可能となっている。

CT スキャナの性能は，線源と検出器のようなハードのみでなく，ソフトすなわち CT 再構成アルゴリズムにも左右される。図5は，アルミブロックの断面像を2つの異なるアルゴリズムにより再構成した結果の比較である。左図は，現在ほとんどの産業用 X 線 CT スキャナで採用されているフィルタ逆投影法による結果であるが，本来ならば一定であるはずの物体内部の CT 値が不均一となってしまう，さらに物体周辺にノイズが発生している。比べて，繰り返し最適化手法である逐次法²⁾の一種の CONVEX 法による結果である右図では，左図でみられる問題が緩和しているのが分かる。現行でこの逐次法が用いられない理由は，その非実用的な計算量の多さであるが，マルチコア CPU や GPU による並列計算により実用可能なレベルの計算速度を達成することが予想される。加えて，逐次法は放射線の減弱のみでなく散乱を考慮することが原理的に可能であり，断面像のさらなる鮮明化を目的として採用を検討すべきであると考えられる。

また，CT スキャナは放射線の透過が十分でないと正確なスキャンが行えないため，鉄などの金属や厚い物体には適していない。この問題の解決に向けて高エネルギーマイクロフォーカス X 線源 CT 装置（産総研）や小型中性子線源 CT（理研）などが開発されつつある。従来はスキャンが困難であった材質やサイズの物体に対する高精度スキャ

図6 閾値処理（左）と可変閾値処理（右）による形状抽出

図7 複数材質物体のCTデータにおける形状抽出結果

ンの実現に注目が集まっている。

3. CT スキャンデータの処理と活用

CT ボリューム（断面像の列）を設計・製造支援に応用する場合、データ形式自体は医療用のものと同じであるが、そのデータ処理方法は大きく異なる。その理由には、スキャン対象が少数の均一な材質で構成される機械部品であること、ボクセル（CT ボリュームの3次元画素）のサイズより厳しい寸法精度が要求される、という点が挙げられる。そのため、画像処理技術のみでなく、ポリゴンメッシュなどを対象とした三次元形状処理技術を組み合わせてデータ処理が行われる。本章では、そのいくつかの事例を紹介していく。

3.1 形状抽出

CT ボリュームからの形状抽出にはCT 値の等値面を表面メッシュで近似する手法（マーチングキューブ法）が最も単純であり、よく用いられる。図6はCT 値が不均一に変化する模擬CT ボリューム（中央図は断面像）から形状抽出を行った結果である。左図が等値面を用いて得られた形状であるが、不均一なCT 値の影響を受けて太さが一定になっていない。また、閾値の設定を変えると形状寸法が変化してしまう点も問題である。

上記の問題解決法としては、可変閾値処理と呼ばれる手法がある。その計算の仕組みは、表面メッシュの頂点をCT 値の勾配が極大となる位置（画像のエッジ）に配置するものである。図6右に示すように、CT 値が多少不均一に変化したとしても望ましい形状に近づけることができる。可変閾値処理は勾配の極大点の数学的定義に幾つかのバリエーションが存在するが、なかでも基準となる形状の法線ベクトルを用いる手法³⁾はいくつかの市販ソフトウェアで実装されている。

また図7に示すように、複数材質物体の形状をサブボクセル精度で抽出する場合でも、可変閾値処理は有効である⁴⁾。図の中央と右のメッシュにおける色の違いは、異なる材質間の境界面の種類を表している（空気-アルミ、空気-鉄、アルミ-鉄の三通り）。この手法の改善すべき点は、勾配計算のノイズに対する頑健性であり、CT 再構成の画質の向上がその鍵であると考えられる。

3.2 寸法計測

前節ではCT 値の不均一な変化により得られる形状寸法

図8 線質硬化補正による形状抽出精度の改善（左：補正なし，右：補正あり）

図9 シリコン MEMS の寸法計測の例

が不正確になることを述べ、その問題を緩和する手法を紹介した。そもそもCT 値が不均一になるのは、通常のCT スキャナで用いられる白色X 線の線質硬化が原因である。そのため形状の高精度な寸法計測を目的とする場合には、可変閾値処理に加えて、X 線投影像列を線質硬化補正することが必須となる。産業用X 線CT スキャナではスキャンされる物体が少数の均一な材質で構成されることを仮定して、投影値（投影像の画素値）の補正を行う。

図8に単一材質の物体に対する線質硬化補正⁵⁾によるCT 値の均一性の向上、および形状精度の改善の一例を示す。スキャンした物体は長さ100 mm 程度のアルミ部品であり、円柱の直径や平面間の距離を確認したところ、補正前は0.1 mm 台の寸法精度であったが、補正により0.01 mm 台に改善した。また、図9には2 mm 角程度のシリコン MEMS の寸法計測結果を示す。左図がSEM の写真、中央図が線質硬化補正を適用した投影像列をCT 再構成して得られた形状である。図中の表のように、補正によりレーザー顕微鏡を用いた計測結果とほぼ同じ値を得ることができている。手法⁵⁾の他にも単一材質から成る物体の場合

図10 直交格子（上段）と非構造格子（下段）を用いたCT再構成と表面メッシュ抽出

の補正法はいくつか存在し、望ましい結果を得ることができる。

しかしながら、複数の材質で構成された物体の投影像の補正は非常に難しい問題となる。その理由は、補正量を算出するためには各材質の形状を知る必要があるが、一方で正しい形状を得るためには投影像の補正が必要となるためである（チキン-エッグ問題）。これまでは、CT再構成と補正を逐次的に行う手法（Iterative Artifact Reduction法⁶⁾）などが提案されているが、今後のさらなる研究が必要であると思われる。

3.3 物理シミュレーション

CTスキャンで得られた形状を基に構造解析などの物理シミュレーションを行うには有限要素メッシュが必要であり、それには二通りの生成方法がある。一つはCTボリュームのボクセルを要素とするボクセルメッシュ生成、もう一つは表面メッシュを生成した後に多面体を要素とする非構造メッシュを生成する方法である。ボクセル解析はメッシュ生成が単純であるものの、産業用CTボリュームの解像度は非常に高いため生成される要素数が膨大となり計算コストが高い。そこで、非構造メッシュをできるだけ簡便かつスキャンデータに忠実に生成する手法が望まれている。以下では、その要望を受けて開発した新しい手法⁷⁾を紹介する。

一般的にCTボリュームは直交格子でCT値を計算した形式であるが、CT値の計算は非構造格子上でも可能である。直交格子が広く用いられている理由はディスプレイへの表示に適しているためであるが、形状精度を追求する産業応用においては最適であるとはいえない。図10に直交格子（上段）と非構造格子（下段）によるCT再構成の結果、および抽出された表面メッシュを示す。図中のメッシュの三角形数を比較すると、直交格子の場合は70万であるのに対して、非構造格子を用いた場合は7万である。少ない要素数で、効率的に形状の特徴を表すことができてい

図11 図10下段のCT再構成時に生成された四面体メッシュ

図12 非構造格子CT再構成法により得られたメッシュを用いた構造解析の結果

図10上段に示す表面メッシュを基に有限要素メッシュを生成しようとする、直交格子から生成した表面メッシュには問題が多いため（要素数の過多、段状の格子アーチファクト、三角形の低アスペクト比）、まず表面メッシュ処理（簡略化、平滑化、再メッシュ化）が必要となる。しかし、これらの処理の多くは見栄え重視のコンピュータグラフィックス分野で開発されており、処理を適用した場合の精度のトレースは困難である。結果として、得られる有限要素メッシュの表面形状が、スキャンで得られた初期形状と大きく異なってしまう危険性がある。

これに対して、図10下段のメッシュはCT再構成と形状に沿った四面体メッシュ生成（図11）のアルゴリズムを組み合わせで生成されている。本稿では、この新しいアルゴリズムを非構造格子CT再構成法と呼ぶ。この手法では有限要素解析に適したメッシュを直接得ることができる。また、四面体メッシュは物体内側のみでなく外側にも生成されるため、物体周りの流れの解析にも利用可能であ

ると考えられる。図 12 は非構造格子 CT 再構成法により得られた四面体メッシュを入力として静弾性体解析を行った結果である。変形量は強調して表示しており、色はミーゼス応力値に対応している。なお、解析結果のレンダリングには 3D プリントを用いており、メッシュの辺を円柱として造形した。

非構造格子 CT 再構成法は単一材質物体のみを対象としているが、現在、複数材質に対応できるよう拡張中である。

4. 専門委員会の活動

本委員会のメンバは 2013 年 8 月現在、企業会員 32 社、個人会員 42 名である。企業会員は 3D スキャナのメーカー/ベンダ、スキャナを業務に利用するユーザ企業、スキャンデータ処理ソフトウェアのメーカー/ベンダにより構成されている。また、個人会員は計測技術開発、および形状モデリングを専門とする研究者からなる。委員構成は、スキャニング技術からそのデータ活用に至るまでのあらゆる段階を網羅している。

以下に過去数年間における本委員会の活動を紹介する。

○例会

年に 5、6 回の例会を開催し、委員による発表や、外部講師による講演を行い情報の共有を図った。企業における業務や開発内容、最新のスキャナやソフトウェアの紹介、研究機関による研究紹介をしていただいた。2013 年 6 月の例会で、第 50 回を迎えた。

○シンポジウム

2008 年に「三次元画像解析のための最新ソフトウェア技術」、2010 年に「内部構造を明らかにする可視化・計測技術の現状と今後の進展」、2011 年に「Dimensional X 線 CT セミナー」を開催し、多数の参加者を得た。

○標準化活動

産業用 X 線 CT 装置による座標計測に関する標準化の検討を 2008 年から 2009 年に行った。2010 年からは JIS 原案作成委員会が発足し、活動を引き継いだ。

○標準 Data Format の検討

内田孝尚委員（本田技研）を中心とし、「測定データ→面データ化において、中間標準 Data Format の検討」を 2010 年度から 2011 年度まで行った。スキャンデータを

CAD/CAM/CAE/CAT で有効に活用するための将来像が作成された。

○Volumetric Image Analysis の勉強会と邦訳

CT ボリュームのデータ処理の基礎を普及させるために、洋書 Volumetric Image Analysis (G. Lohmann 著) の邦訳を行い、勉強会を行った。また、邦訳された文書の出版を行った⁸⁾。

5. ま と め

本稿では、現物融合型エンジニアリングにおける基盤技術となる 3D スキャン技術とスキャンデータ処理を中心に紹介した。また、本専門委員会の活動を報告した。今後も委員の協力のもと精力的に活動を続けたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 鈴木宏正：3 次元計測とデジタルエンジニアリングの融合、精密工学会誌, **71**, 10 (2005) 1205.
- 2) 日本医用画像工学会：医用画像工学ハンドブック, (2012).
- 3) C. Heinzl, K. Johann and G. Eduard: Surface Extraction from Multi-Material Components for Metrology Using Dual Energy CT, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **13**, 6 (2007) 1520.
- 4) Y. Ohtake and H. Suzuki: Edge Detection Based Multi-Material Interface Extraction on Industrial CT Volumes, Proceedings of Asian Conference on Design and Digital Engineering, (2012).
- 5) T. Nishihata, Y. Ohtake, H. Suzuki and M. Moriguchi: A Non-Iterative Data-Driven Beam Hardening Correction for Single-Material Objects, Proceedings of Conference on Industrial Computer Tomography, (2012) 135.
- 6) M. Krumm, S. Kasperl and M. Franz: Reducing Non-Linear Artifacts of Multi-Material Objects in Industrial 3D Computed Tomography, NDT & E International, **41**, 4 (2008) 242.
- 7) D. Yamanaka, Y. Ohtake and H. Suzuki: The Sinogram Polygonizer for Reconstructing 3D Shapes, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (to appear).
- 8) G. Lohmann (翻訳 精密工学会現物融合型エンジニアリング専門委員会)：3 次元画像処理、ポーンデジタル, (2009).

大竹 豊

2002 年会津大学大学院博士課程修了。博士（コンピュータ理工学）。2002 年マックスプランク情報科学研究所博士研究員、2004 年理化学研究所研究員、2007 年東京大学講師（工学系研究科精密工学専攻）を経て 2010 年同准教授。研究分野は形状処理、コンピュータグラフィクス。