縞投影型測定機のインラインへの展望*

Prospects for Mass Production Line Using Fringe Projection Type Measuring System

赤羽孝彦**
Takahiko AKABANE

Key words

digital 3D scanner, camera type scanner, digitizing, fringe projection, automated scanning, quality control, off-line teaching

1. はじめに

弊社が非接触測定システムの取り扱いを開始して今年で21年目となる。当初は3次元形状をコンピュータに取り込むこと自体が最大の目的であり、測定対象物には工芸品や考古学上の出土物も多く、工業製品のスキニングはデザイン用途が主であった。

15年ほど前より測定精度の向上やソフトウェアの機能拡張が進み、工業製品の検査としての用途が増えてきた。今では弊社お客さまのご使用用途として工業製品の検査が全体の9割を超え、分野別では自動車が多くなり、航空宇宙、重工業、家電や一般消費財、大学や研究機関等へと続いている。近年ではスキナーをロボットアームに取り付け、自動計測化が急速に進んでいる。本稿では、縞投影方式での3次元形状計測の原理や手法、近年のトピックとして計測の自動化を挙げ、本方式におけるインラインへの展開までを解説する。

2. 測定原理

2.1 センサー校正

本方式は何らかの光源を用いてプロジェクター部より縞状の明暗パターンを測定対象物に投影し、CCDやCMOS等のカメラで撮像した画像をデータ処理して3次元形状をコンピュータ内に再構築するものである。

機器の基本構成としては、投影部であるプロジェクターと撮像部であるカメラとなるが、最低限両者1個ずつあれば測定系を構築できる。両者は互いの位置座標を事前に認識しておく必要があり、通常、センサー校正を行うことで計測準備が完了する。一般的には、多数のドットパターンが印字された基準パネルをスキナーで複数方向から撮像させることで、スキナー前方の空間を3次元的に座標や原点を設定し、同時にカメラ側のレンズ収差の補正を行

い、カメラが複数ある場合は相互の位置認証も行っている。このセンサー校正を行うことでプロジェクター部とカメラ部の座標位置が特定され、相互間距離と角度が算出でき、撮像された画素ごとに三角測量が適用できることとなる。

2.2 ステレオカメラ方式

また、近年ではカメラを二つ用いたスキナーも多く、これは同一センサー内にプロジェクターと左カメラ、右カメラとそれぞれでの測定系をもち、さらに左右のカメラを用いたステレオ方式での測定系をもつこととなる。この方式ではカメラが二つであるため撮影画像が倍となりデータ処理も増えることになるが、以下のような利点もある。図1にステレオカメラの概念図を示す。

単一カメラのスキナーでの測定系から得られた点の座標は、同測定系にて算出された結果であるが、算出結果の妥当性を確認する術をもたない。これに対しステレオ方式では左右双方にて同一点の測定結果をもつため、計測結果の確からしさを確認しながら計測を続けることができるのが利点である。また、左右で同じフレームレートのカメラを使用し、双方を同期させて連続撮影した画像を並行処理することで、ある点の移動を追跡して連続した3次元的な座標の変位を計測することも可能となる。図2に移動点

図1 ステレオカメラ測定系の概念図

*原稿受付 平成31年2月20日

**丸紅情報システムズ(株) (東京都新宿区大久保3-8-2号 新宿ガーデンタワー)

図2 移動点の追跡計測概念図

図4 パターン投影を組み合わせた測定系概念図

図3 明暗縞パターン投影例と位相シフト概念図

図5 測定結果としてのポリゴンデータの例

を追跡計算する測定系の概念図を示す。

このことは移動点を追尾して表示させる機能だけでなく、複数ポイントが付加されたプローブの位置を把握して接触式ポイント計測を行うことや、スキャナー自身の測定対象物からの3次元的な相対位置をリアルタイムで把握することも可能となるため、測定対象物上に計測点や基準線を投影マッピングすることでも利用されている。

2.3 パターン投影

前述までは点座標の計測であったが、明暗縞状のパターンを投影し画像処理を行うことで、カメラ視野角内のエリアを一度に面的にデータ化し3次元形状を把握することが可能となる。光を用いて対象物に投影する手法は幾つか存在し、レーザーをライン状に照射し別角度からカメラ等で撮像する光切断法、明暗パターンを一定の幅で照射した後、倍の幅のパターンを連続投影し暗=1、明=0と二値化してエリアごとに2進数の番号を付けていく空間コード化法、複数の異なる縞状パターンを重ね合わせて、その周期のずれにより発生する縞模様を使用するモアレ法等が挙げられる。本稿では、位相シフト法に関して以下に記述する。

位相シフト法では正弦波状の明暗パターンを用いるが、位相の異なる複数の正弦波パターンを対象物に投影する。一般的にはパターンの1/4波長分を縞の垂直方向に4回移動させ、都度カメラで撮像する方式を取る。撮影したこれらの画像を重ね合わせデータ処理を行い各画素の位相を求

め、これに三角測量で求められた結果を合わせることで3次元形状が取得できることとなる。投影した正弦波パターンの例と位相シフト概念図を図3に、縞投影とステレオカメラを組み合わせた測定概念図を図4に示す。位相シフト法では他の方式よりも計算処理が複雑となるが、得られるデータはノイズが比較的少なく実形状に近いものが得られる傾向がある。

このようにして基本的には1画素につき1点、3次元情報をもつデータが得られるため、カメラ視野角に映った対象物の形状が画素数分の膨大な座標点として、ソフトウェア画面上に実形状に沿った形で再構築されることとなる。形状データは非常に膨大な点データの集合体であるために「点群」と呼称されることも多いが、パターン投影にて得られたデータは隣り合う点どうしの情報から3点で一つの三角形を形成し、多数の三角形で形状を表現する「ポリゴン（三角メッシュ）」と呼ばれる方式に計算され表示されることも多い。多くのスキャナーソフトウェアでは、形状的に曲率の小さい（平らな）部位は自動的に点数を間引き、逆に曲率の大きい（細かな形状のある）部位は点を多く残す処理を行い、形状の再現性を維持しながらデータ容量を抑える工夫が成されている。図5に測定された形状

により点数が最適化されたポリゴンデータの例を示す。

3. スキャンデータ合成手法

縞投影型測定方式は、カメラで撮像された部位をエリアスキャンし一度にデータ化するが、実際の測定において一回のスキャンで終了する計測用途はあまり存在しない。3次元における物体の形状を取得しデータ化するためには、物体をさまざまな角度からスキャンする必要があるが、対象物のサイズやデータ化が必要な部位がカメラ視野角より大きい場合、スキャナーまたは対象物の位置を移動させ、異なる部位をスキャンしていく作業が発生する。この時、異なる部位をスキャンして得られた形状データどうしを合成して測定完了範囲を拡張させていくが、その方式は一般的には以下の三つが挙げられる。

3.1 ベストフィット

異なる方向からスキャンした形状データのうち、同一部位をもとに合成する方式である。形状的に重なったエリア内の基準となる側のポリゴンデータ上の各点から合成される側のポリゴン面までの距離をすべての点において算出し、差分距離が最も小さくなる位置を最小二乗法により導く方式となる。ソフトウェア上ではワンクリック操作で行われる場合がほとんどである。

3.2 参照形状フィッティング

ベストフィットは、合成するデータどうしに特徴的な形状が必要であり、例えば緩やかな曲面をもつもののほぼ平らなデータどうしでは、表面に対して垂直方向以外には計算が収束せず、形状的に正しく合成できないことがある。この場合、測定対象物の周辺に特徴的な形状をもつ参照形状を複数配置し、対象物の表面と共にカメラ視野角内に収め、一緒にスキャンしデータ化しておく。各スキャンデータどうしの合成には、この参照形状部位を用いて計算処理が行われる。参照形状は特徴的な形状であれば合成には問題ないが、合成状況を把握するために人為的に球形状が採択されることも多い。合成時の計算処理は、基本的にはベストフィットと同様である。

3.3 参照ポイント

本方式は参照ポイントを用いてデータを合成する手法である。参照ポイントの例とスキャナーのカメラから位置認証された状態の例を図6に示す。

カメラ型スキャナーの場合、一般的には周辺が黒色で内側が白色の二重丸となっているものを参照ポイントとして使用する。同ポイントは、作業開始前に対象物の材質によりシールやマグネットなどで測定対象物表面または測定台座の上に貼り、スキャナーは同ポイントを含めたエリアのスキャンを行う。

参照ポイントは貼られた位置によりカメラから楕円として見えるため、ソフトウェアに撮像画像上で黒地に白色の楕円を検出させ、画像処理により同楕円の中心を算出させる。正確に中心を算出するためには、デジタル画像上において白色部分である楕円の長軸方向に10画素程度あるこ

図6 参照ポイントの例とカメラから位置認証されたポイント

図7 参照ポイントを利用した対象物との相対位置の把握（上）、スキャンデータ合成（下）

とが望ましい。

参照ポイントを用いる目的は、対象物上にカメラから認識できる特徴点を付加し、異なる位置からカメラで見た場合の同一座標としてソフトウェアに特定させ、楕円の中心の3次元座標を算出して短時間で合成処理を行わせることにある。空間上に座標が特定された点が3点以上あり、異なる方向からの形状データ内に同一点が三つ以上特定できれば、形状データどうしを簡単に合成することができる。また、スキャナーがステレオカメラの場合、スキャナー本体と対象物の間の相対的な位置関係をリアルタイムに把握できるため、データ合成にタイムロスがほとんど発生しない特徴もある（図7）。

4. 3D スキャナーにおける計測の自動化

4.1 加速する計測の自動化

スキャナーをロボットアームに取り付けて自動化する手法は15年以上前から見られたが、問題はティーチングと呼ばれるロボットへ動作を教示する作業に時間を要することであった。最適なカメラ角度やスキャナーの位置も、オペレータが試行錯誤後に決定する方法であり、実運用に至

図8 自動計測システムの例

図10 オフラインティーチング機能画面

図9 小型部品計測用（上）、車体全体計測用（下）

るまでに人手と膨大な工数を見込む必要があった。

また、自動計測を行うためには、スキャナー本体やロボットアームのほか、測定対象物を設置して省スペース化を図るための自動回転テーブル、オペレータを守るための安全柵等が必要であり、計測の目的や要望からの機器構成や

仕様選定に時間もかかることが常であった。

しかし、6年ほど前に3Dスキャナー、ロボットアーム、自動回転テーブル、セーフティーフェンスをシステムとしてパッケージ化した製品が開発され、以降同様の方式におけるシステムが継続的にリリースされている。本様式のバイオニア製品を図8に示す。

本製品のリリース後、数cmの小型部品から6m程度の乗用車全体までの形状測定が可能な自動計測製品シリーズが開発され、現在はさまざまな分野で導入が進んでいる（図9）。

自動計測を行うためにはロボットアーム位置の教示作業に非常に工数がかかる旨を先述したが、これは通常ロボットコントローラに付随する操作盤（ペンダント）を用いてオペレータがボタン操作等で1ポジションごとに安全性を考慮しながら最適な位置決めを行うためである。

このことを打破するために、ロボットとオンライン接続せず、コンピュータのソフトウェア上だけでロボット位置の教示を行う方式としてオフラインティーチング機能の開発が進められた。本製品のソフトウェアには標準で同機能が付帯し、自動計測システムとして同時にリリースされている（図10）。

同オフラインティーチングは、オペレータ操作も非常に簡便であり、ペンダントによるマニュアル操作はまったく必要ない。ソフトウェアが測定対象物のCADデータ上の検査項目から測定に最適なカメラ角度を算出し、スキャン位置から各測定ショットの最適な順番の提示までがすべて自動で行われる。その工程の中では、現実の測定環境と同じ機材や対象物のCADデータがソフトウェアの中で構築されているため、干渉チェックのシミュレートも行われることになる。

このように現実世界とソフトウェア上でのヴァーチャル空間におけるリンクが成されているため、1分程度の自動オフラインティーチング処理が終了後、オペレータはすぐに自動計測が開始可能であり、大幅な時間短縮が実現している。

本自動計測手法は初回品や量産段階での工業製品の多数検査に最適であり、3D計測によるCAD等の基準形状と

図 11 検査結果の例（形状比較カラーマップと傾向分析）

図 12 インライン対応の例（形状検査と検査箇所の傾向分析）

の比較検査のほか、各種工程での品質管理および統計分析に利用されている（図 11）。

5. インライン対応への展望

最後に、ドイツの自動車メーカーにおける縞投影型 3D

スキャナーのインラインへの統合例を紹介する。同社ではある車種においてフード、ボンネット、前後左右ドア、ハッチバックの全 7 ラインにそれぞれ 3D スキャナーの自動計測システムを配置し、24 時間体制で稼働中である。各ラインでは 10 部品に 1 枚の抜き取り検査が行われ、車体本体に取り付けられる直前のドアパネル部品の表裏の全体形状のほか、穴やエッジ、幾何形状等を含むすべての項目の検査が全自動で行われている。また、測定データに基づく傾向分析からの工程能力機能により、不具合が発生する前に対策が講じられるように活用されている（図 12）。

6. さ い ご に

縞投影方式によるメリットは、高精度で高速なエリア計測が行えることであり、ロボットを用いた計測の自動化も全自動オフラインティーチング機能等の付加により工業製品の検査に広く使用されている。従来は新しい技術であった本方式も、現在では計測手法として認知され、製品製造における上流工程から量産工程へ展開されている。海外においては工業製品の検査では接触式から本方式等の非接触測定への切り替えが進んでいるが、この傾向は今後も継続し、スキャナーやソフトウェアの技術向上にともない、インラインへの適用へさらに広がっていくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) GOM 社ホームページ, <https://www.gom.com/>
- 2) GOM 社 ATOS Core 専用ホームページ, <https://www.atos-core.com/jp/>
- 3) K. Galanulis, S. Adolf and H. Friebe: Optical 3D Metrology for Optimization of Sheet Metal Forming Processes, (2015).
- 4) K. Galanulis, S. Adolf and C. Reich: Automated Analysis and Series Quality Control in Car Body Manufacture using Optical 3D Measuring Technique, (2012).
- 5) J. Thesing, D. Behring and J. Haig: Free-form Surface Measurement Using Photogrammetric Fringe Projection, (2007).
- 6) M. Wiczorowski, M. Rucinski and R. Koteras: Application of optical scanning for measurements of casting and cores, (2010).

赤羽孝彦

1994 年 3 月東海大学工学部光工学科卒業。同 4 月丸紅エレクトロニクス(株)に入社、工業用印刷のプリプレス出力用の米国製大型インクジェットプリンターの技術業務に従事。1998 年 4 月よりドイツ GOM 製カメラ式非接触 3D スキャナーの取り扱い開始とともに技術業務に従事、現在に至る。