

任意形状の三次元測定における精度保証に向けた調査研究

渡邊真莉*

(2020年1月31日受理)

Survey on the 3D measurement of freeform shapes

WATANABE Mari

Abstract

Products have freeform shapes to be designed with their good performances. Such complex shapes can be realized by various manufacturing techniques. To verify how different a form of manufactured and designed products is, 3D measurement systems are utilized. To assure the manufacturing process, the verification of measuring uncertainty is indispensable. The demand of quality assurance is strict especially in industrial field. However, the uncertainty assessment of freeform measurement has not been realized. Here, the survey on metrology of freeform shapes using 3D measurement systems is reported.

1. はじめに

近年、例えば自動車部品における軽量化や耐久性向上等、製品に要求される性能はますます高度化しており、要求される性能を満たすために、複雑な形状に設計された部品が使用されるようになってきた。それら複雑な形状は、精密加工技術の進歩や、3Dプリンティング等、材料を接合して製品を作る付加製造 (Additive manufacturing) の普及により、作成できるようになってきている。

一方、製造業界が垂直統合型から水平分業型へと移行する中で、工業製品では品質保証への要求が厳密になってきており、特に、航空機部品や自動車部品のサプライチェーンにおいて顕著である。複雑な形状を加工するプロセスの能力 (加工精度) を検証し、保証するためには、加工された製品に対する三次元測定が必要となる。さらに測定に使用するシステムについて、その測定能力 (測定不確かさ) を定量的に評価し、測定結果から長さの国家標準までのトレーサビリティを確保する必要がある。

製品の検証に使用する測定システムに要求される測定不確かさは、検証される加工精度への要求向上に応じて

小さくなる。製品の形状のうち、平面や円筒等、単純な形状を測定する能力については、既に検証法が確立している。しかしながら、複雑な形状を測定する能力を検証する方法は、歯車形状を除き、これまで構築されてこなかった。そこで、歯車以外の複雑形状測定の検証方法を構築する第一歩として、調査研究を行った。本稿ではその調査結果について報告する。

最初にもものづくりにおける任意形状測定の背景と、調査研究の目的について述べる。次に任意形状測定における重要な技術である三次元測定について、その特徴を簡単に紹介する。続いて任意形状測定の精度保証を目的とした国内外の研究動向について整理する。そして、現状における任意形状測定と不確かさの推定における課題を述べ、今後の展望を示す。

2. 任意形状測定の背景と研究目的

本章では、①任意形状部品に関する需要、②三次元測定に関する需要、③三次元測定の精度保証に関する需要について報告し、④本研究の目的について述べる。

Freeform (自由形状) という用語によっても表現される任意形状について、本論文では、平面や円、円筒、

* 工学計測標準研究部門幾何標準研究グループ

球等の単純形状を曲率が一定の形状と定義し、任意形状を曲率が変化する、または数式による表現が困難な複雑な形状と定義する。よって本論文における任意形状には、楕円や放物線、B-Spline 曲線等も含まれる。

2.1 任意形状部品に関する需要と実現

産業部品は例えば、家電製品に用いられる樹脂部品や板金部品、自動車の車体、火力、風力発電機、航空機に用いられるタービンプレードや、圧縮機のインペラ等、様々な形状をもつ。これまでは単純な形状をもつ複数部品の組み合わせとして実現されていた機械要素等でも、産業部品数・組立工程数を削減し、製品を軽量化、小型化することにより、コストを抑えつつ機能性を高める試みがなされている。

その結果、形状が複雑になる代わりに、単一部品として実現することができるようになっている。近年では製品の高機能化を実現するため、不要な構造部をくり抜く設計技術（トポロジー最適化）等が活用され、産業部品の形状はますます複雑化している。

従来の加工技術では実現が困難であった複雑な形状についても、3D プリンティング技術の導入が進み、実現しやすくなってきている。他にも、インクリメンタルフォーミング¹⁾等、複数の部品を一体化して加工する技術も発展し、接続部の接着不良の恐れなく、多様な形状の造形が可能となりつつある。

2.2 三次元測定の需要と要求不確かさ

ものづくりでは、

- 1) 要求仕様に基づいて部品形状を設計
- 2) 設計データに基づいて部品を加工
- 3) 加工品の形状を測定
- 4) 測定値を設計値と比較
- 5) 加工プロセスの修正量を決定
- 6) 修正されたプロセスで再加工
- 7) 再加工品の測定
- 8) (繰り返し)

というサイクルによって、加工精度を向上している²⁾。この一連のサイクルにおいて加工品の形状を設計データ (CAD データ) と比較するために、三次元測定システムを用いたデジタル測定データの取得に対する高い需要がある。

産業製品における要求加工精度（製品サイズと公差の相対精度）は図1に示すように、およそ 10^{-5} に到達し、三次元測定システムの測定精度も加工精度を上回ることが要求されている。産業界では、幾何学量が校正された

ゲージ（幾何形状ゲージ）によって機械式、光学式等の三次元測定システムの測定精度を検証し、校正された三次元測定システムを用いて産業部品の測定が行われている（三次元測定とその校正の一般的な解説は文献³⁾⁻⁶⁾を参照）。近年では寸法計測が可能な計測用 X 線 CT も利用されている。

平面や円等の単体の単純形体をもったゲージは既に広く使われており、相対不確かさ 10^{-5} から 10^{-6} 程度の高精度な測定技術が確立されている。例として、校正・測定能力に関して国際度量衡局 (BIPM) が管理するデータベース (KCDB Appendix C) によると、円筒形体が規則的に並べられたホールプレートにおいて、円筒形体の中心座標測定の拡張不確かさは、480 nm（相対不確かさでは 10^{-6} のオーダー）である。

単純な形状の幾何形状ゲージの校正は図2に示すように、産業技術総合研究所 計量標準総合センター (NMIJ) において、機械式測定機にレーザー干渉計を取り付けることで行っている。単純形状に限らず、任意の形状において、 10^{-5} から 10^{-6} 程度の相対不確かさで形状を計測することが望まれている。

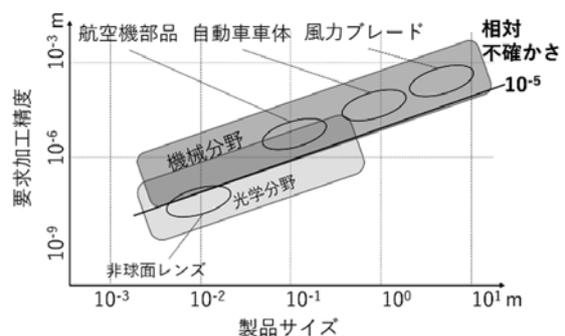


図1 製品サイズと要求加工精度の関係

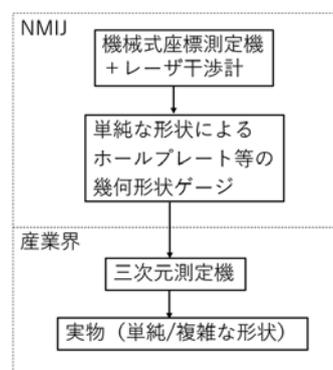


図2 NMIJ での幾何形状測定の標準供給

2.3 三次元測定の精度保証に関する需要

2011年から2017年の三次元測定に関連する特許・論文を調査した結果をまとめたレポート⁷⁾によると、三次元測定に期待する目的・効果は利便性・経済性向上や測定の高速度・対象拡張を上回って、高精度性・信頼性向上が30%と最も大きな割合を占めている⁷⁾。高精度性については、高精度な三次元測定により製品形状の加工不良を早期に発見できれば、人的被害を及ぼす製品事故を未然に防ぐことにつながる等、産業製品の品質が担保される効果をもたらす。高信頼性については、特に自動車分野において、サプライチェーンに加わる事業者に対しての要求事項として、校正業務に関するISO 17025にメーカー側と顧客側の要求が加味された規格IATF16949⁸⁾への対応が2016年から加わる等、製品の品質保証における三次元測定が果たす役割への要求が具体化、厳密化している。

例えば自動車分野における部品サプライヤーがIATF16949に対応する方法の一つとして、ISO 17025認定を受けている外部試験機関で製品の測定、検査を行い、その結果を付与して製品を納品する、という方法がある。しかしながらNMIJで現在実施している依頼試験では円や平面等の単純な形状を測定対象としており、複雑な形状についてはインポリュート歯車の歯形や歯すじにとどまっている。従ってその他の複雑な形状に対する依頼試験サービスは提供していない。

世界的に見ても、任意形状測定に関して、KCDB Appendix-Cには現時点では登録がされていない。そのため、従来の標準供給体制に加えて、あらゆる形状に対しても測定精度を保証できる体制の構築が産業界から望まれている。

2.4 本研究の目的

そこで、本稿ではあらゆる形状に対する測定精度の保証体制の構築を目的として、任意形状の三次元測定における課題と、その解決のための国内外の研究動向について調査した結果をまとめる。ここでは、2011年から2017年の三次元測定に関する特許・論文調査⁷⁾より、応用分野のうち45%を占めると報告されている産業分野、特に規格が厳密な自動車、航空機部品への要求を満たせるような手法を、主な調査対象とした。

3. 三次元測定の測定原理

本研究で測定精度の保証を目指す三次元測定には、代表的な原理として①機械式測定、②光学式測定、③X線CTがある（三次元測定システムの原理の詳細は文

献⁹⁾を参照)。

機械式測定は有限の径をもつプローブが表面に接触したときのプローブ位置を検知する測定手法である。そのため測定機自体の精度は高いものの、接触によって変形を生じる柔らかい物体の測定には不向きである。また、プローブ径よりも小さい曲率半径をもつ隅部（凹部）の測定はできない。数百mm立方程度を測定範囲とする門型機械式測定機の測定精度は $\pm < 5 \mu\text{m}$ である¹⁰⁾。

光学式測定で代表的なものは物体表面に照射したレーザー光の干渉縞や光格子パターンの歪を三角測量から求める手法である¹¹⁾。そのため、非接触な測定が可能となるが、光を透過する透明な物体や光を吸収する黒色の物体、乱反射を起こしやすい光沢のある物体の測定では反射光を正しく検出できず、白色スプレーの塗布といった表面処理を行う必要がある。また、隅部における多重反射の影響もある¹²⁾。光学式測定機の測定精度として、数百mm立方程度の測定サイズに対して $1 \mu\text{m}$ オーダーに至るのは難しい。

X線CTは物質の密度によってX線の透過力が異なることを利用した測定手法である。そのため、内部構造の非破壊測定が可能となるが、膨大なデータ量の処理に課題がある。X線CTの測定精度として、高精度な装置を用いた有利な測定条件下の球間距離測定では10mmに対して数 μm が達成可能であるが、測定条件及び測定対象によっては10 μm を超える場合もある。また数百mm立方程度の測定サイズに対しては、測定分解能の問題から、測定精度は高々10 μm 程度である。X線CTについては時間軸を加えた4次元計測の試みもあり、産業製品は実際には動的に使用する場面が多く、今後は画像としてだけでなく動画として、内外形状の変化を計測できる技術が益々求められるだろう。

光学式測定とX線CTは、機械式測定に比べてデータ量に対する測定時間が短いため、ものづくりの現場での利用が増えている¹³⁾⁻¹⁵⁾。反面、機械式測定とは異なり、妥当性が確認されていない社内基準の方法を用いて精度検査を行っている等、トレーサビリティ体系が完全には確立されていない¹⁰⁾。

このように現状では、三次元形状の測定精度として相対不確かさ 10^{-5} を満足できているのは機械式測定のみである。よって以下では、機械式測定、特に座標測定機（Coordinate Measuring Machine: CMM）による測定精度保証の手法に注目する。

4. 国内外の研究動向

CMM 三次元測定機の精度保証の方法は、大きく2つに分かれる。

一つは測定環境も含めた測定システム全体をモデル化し、シミュレーション手法により測定の不確かさを推定する方法である。この方法にはモンテカルロ法により、測定機や測定環境等の誤差要因を考慮した測定をシミュレーションし、測定の不確かさを推定する、Virtual CMM と呼ばれる方法がある。この方法が適用できる形状は離散点測定による単純形状の測定のみで、任意形状測定に対しては現状開発されていない。

もう一つは実際の測定対象に似た形状をもつゲージを作成して校正値を付与し、そのゲージを測定したときの測定値と校正値とを比較し、測定の偏りとばらつきを評価する方法である。この方法については、2.2 節で触れたように単純な形体をもつゲージは既に実用化、商用化されている。任意形状の測定に用いる新たなゲージについては、各国では開発が進められている。

今後、短期的、中期的に見て、任意形状測定の精度評価では、後者の方法が主流に特に産業界において主流になると予想される。そこで、本章では、National Physical Laboratory (NPL)、Czech Metrology Institute (CMI)、NMIJ 等国内外で開発されているゲージの実例を紹介する。なお、Model Base Engineering を推進している National Institute of Standards and Technology (NIST) からは、任意形状測定に用いるゲージの開発状況について公に報告されていない。

4.1 複雑な設計曲面をもつゲージ

任意形状の測定に用いるゲージとして、CAD モデルに基づき多軸加工機等を用いて複雑な設計曲面が切削されたゲージが開発されている。

図3は、CMIが開発した、双曲放物面 (hyperbolic paraboloid) によって表現された自由曲面をもつゲージである。120 mm 四方のゲージのサイズに対して、機械式測定による測定精度は $0.9 \mu\text{m}$ であった¹⁶⁾。

図4は、光学式測定の性能比較用に、イタリアのトリノ工科大学によって開発された鋳型ゲージ (200 mm 四方) である。あらゆる製品形状を代表した形状をもつよう、凹凸面が1つのゲージに施されている。また、凹凸面間は NURBS 曲面で繋げられている。鋳型ゲージを測定したときの測定値の標準偏差 (繰り返し精度) は、機械式離散点測定の場合で $10 \mu\text{m}$ オーダ、機械式スキャン測定の場合で $60 \mu\text{m}$ であった¹⁷⁾。

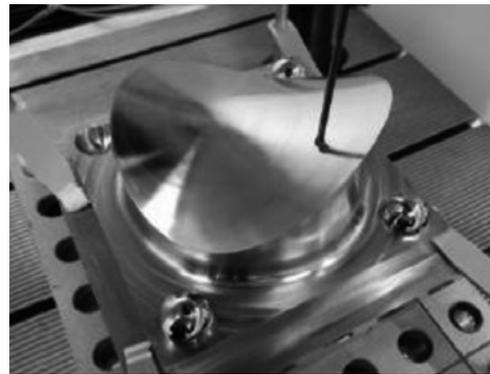


図3 CAD モデルに基づいたゲージ (CMI, hyperbolic paraboloid)¹⁶⁾

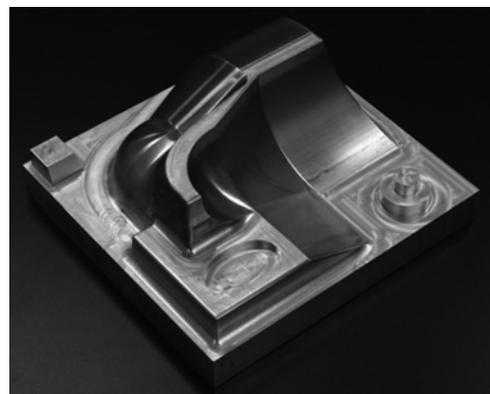


図4 CAD モデルに基づいたゲージ (トリノ工科大学, 鋳型ゲージ)¹⁷⁾

4.2 単純形体を組み合わせたゲージ

任意形状の測定に用いるゲージとしては、単純形体を組み合わせたゲージも開発されている。

図5は、光学式測定機校正用に英国の計量研究所である NPL によって開発された光学式測定機校正用の自由形状の NPL freeform artefact (300 mm 四方) である。NPL freeform artefact は一つのゲージに単純形体を複数組み込み、自由表面を模していることが特徴である。設計値と機械式測定による測定値との差 (加工誤差) は、図5の4隅の平面上の各球形体の直径では $1 \mu\text{m}$ のオーダ、図5の中央の曲面上の各単純形体の直径では $10 \mu\text{m}$ のオーダである¹⁸⁾⁻²⁰⁾。

PTB では歯車の形状を模擬したゲージを用いて歯車測定機の精度評価が行われているが、ゲージを高精度に製作することが困難であるため、測定不確かさは $1 \mu\text{m}$ 程度にとどまっている。そこで NMIJ にて歯車測定機の測定精度評価用に開発されたゲージを図6に示す。歯形

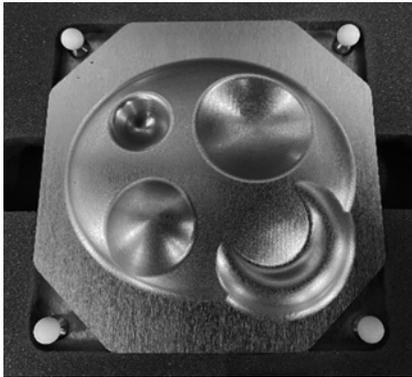


図5 単純形体を組み合わせたゲージ
(NPL, NPL freeform artefact)

形状は効率良く歯車同士がかみ合うため、円筒に巻き付けた糸を引きほどくときに糸の先端が描く曲線、インボリュート曲線を描くが、インボリュート曲線が部分的には円弧で当てはめられることに着目し、単純な球形体としてゲージ形状が表現されている。このゲージの校正対象量は球の直径と球の中心間距離のみであり、レーザ干渉計とCMMを組み合わせることで、サブ μm オーダで校正可能である。このゲージを用いることで、円板直径が130 mmのゲージのサイズに対して、測定精度がサブ μm オーダに到達した歯車測定機の精度検査が可能となった²¹⁾。

Modular Freeform Gauge (MFG) は幾何学量が校正された平面や球、円筒、円錐、リング等の形体の組み合わせを用いて自由形状の表面を模した基準ゲージであり、イタリアのパドバ大学のSavio氏によって提案された。図7は、タービンプレード(右)の測定精度の検証を想定して提案された、円筒と平面を組み合わせた基準ゲージ(左)である。同様に、タービンプレード形状を模擬するため円筒形体を斜めに配置したMFGに対して、機械式測定を行ったとき、円筒直径が100 mmのゲージのサイズに対して、測定不確かさは11.2 μm と推定している²²⁾⁻²⁴⁾。

図8は、本研究所と三菱日立パワーシステムズ株式会社(現:三菱重工業株式会社エナジートランジション&パワー事業本部)が発電タービンプレードの測定精度検証用に考案したゲージである。タービンプレード形状の測定を、少数かつ比較的角範囲の大きい円弧の組み合わせを用いたゲージ形状の測定で模擬している²⁵⁾。CMMによるこのゲージの校正方法については研究が進められており、60 mm四方のゲージのサイズに対して、1 μm 程度の不確かさで校正が可能と予想されている。



図6 単純形体を組み合わせたゲージ
(NMIJ, 歯車基準器)²¹⁾

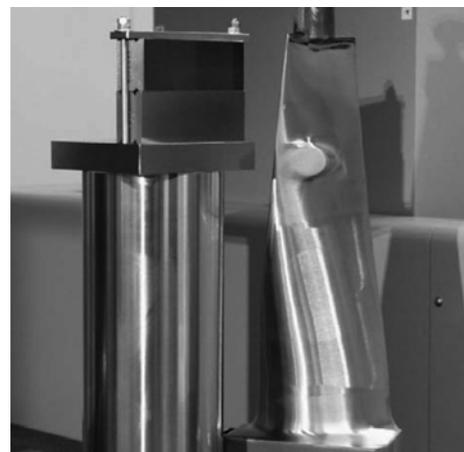


図7 単純形体を組み合わせたゲージ
(パドバ大学, Modular Freeform Gauge)²³⁾

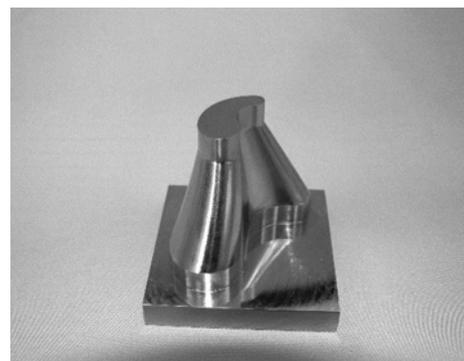


図8 単純形体を組み合わせたゲージ
(NMIJ, 発電タービンプレードゲージ)

4.3 任意形状測定に用いるゲージ開発の課題

各ゲージにおける課題として、4.1節の複雑な設計曲面をもつゲージや4.2節のNPL freeform artefactのようにゲージが具体的な産業製品とはかけ離れた形状をもち、製造の需要がある形状の測定に十分に近似できてい

ないことが挙げられる。そのため、産業部品の実形状に対する測定不確かさの算出には至っておらず、実際の産業部品の形状測定の精度保証にこれらのゲージが使用されていない。また、4.1節の複雑な設計曲面をもつゲージのようにゲージ形状自体も複雑になると高精度な加工が難しく、ゲージそのものの形状誤差やゲージごとのばらつきが大きいことも懸念される。

4.2節の歯車基準器、Modular Freeform Gauge、発電タービンブレードゲージは単純形体の組み合わせによってゲージ形状が表現されており、ゲージの設計値との形状差は比較的小さい。歯車基準器は実製品の形状測定の校正に既に使用されており、歯車測定機の精度評価規格にも取り入れられている。Modular Freeform Gaugeと歯車基準器に比べ、発電タービンブレードゲージは異なる曲率をもつ円弧の要素を独自に加え、複雑な形状の表現の自由度が増している。

5. 任意形状測定の研究課題

前章にて任意形状測定の精度評価用として開発されているゲージを紹介した。ゲージ形状が改良されても、任意形状の測定方法自体に大きな不確かさ要因があれば、ゲージを小さな不確かさで測定することができず、高精度に加工された任意形状部品の形状測定精度評価を、ゲージを用いた測定によって検証することはできない。

ゲージを小さな不確かさで測定するためには、任意形状の測定方法の課題を把握し、解消する必要がある。この課題は大きく分けて、以下の二つがある。

1. 測定対象表面抽出における課題
2. 測定不確かさの推定における課題

この節ではそれぞれの課題と、その解決方法について説明する。

5.1 測定対象表面抽出における課題

機械式三次元測定によって取得されるのは測定物との接触位置ではなく、プローブの中心位置である。そこで測定対象表面の位置を抽出するために、プローブの中心位置から接触位置へ方向を推定し、その方向に半径分を補正する処理が行われる。

図9に示すように、単純形状の場合、例えば、平面を測定する場合、取得した全プローブ中心位置から最小二乗平面を計算し、その平面に垂直な方向に各プローブ中心位置からプローブ半径分を補正することができる。円筒を測定する場合では、取得した全プローブ中心位置から円筒の中心位置を計算し、その位置に向かって放射線

状に各プローブ中心位置から半径分を補正できる。

一方、複雑形状の場合、プローブの中心位置から接触位置への方向が不明である。これまで、接触位置を推定する方法がいくつか提案されている。

1つ目に、プローブ上の接触位置を検出できるプローブ自体を開発する方法で、力センサを装置に取り付けて、接触面の法線方向を推定し、その方向にプローブ半径分を補正する方法²⁶⁾や、プローブ球に直接、抵抗薄膜を覆い、接触位置を検出する方法がある²⁷⁾。前者の方法では、力センサによって感知されるプローブの接触方向と、実際の接触面の法線方向とが厳密には一致しないという問題がある。後者の方法では、プローブ球と測定対象との間に抵抗薄膜があるため、プローブ半径分の補正量に誤差を生じるという問題がある。

2つ目に、設計CADデータから接触面の法線方向を推定し、その方向にプローブ半径分を補正する方法がある。この場合、CADと実際の測定物との座標系のずれや固定による僅かな歪み等により、CADで推定した接触面の法線方向は実際の接触面の法線方向と必ずしも一致しない。また、この手法は設計CADのない形状には適用できない。

3つ目に、取得した隣接するプローブ中心位置から面を作成し、各面の法線方向にプローブ半径分を補正する方法がある²⁸⁾。この手法は、測定精度の低い機械式測定機で測るときや、高い点密度で測るとき、急峻な曲面を測るとき、取得したプローブ中心位置に僅かに誤差があると、図10のように、プローブ半径分を補正した位置が不連続になってしまう。これにより、プローブが通過

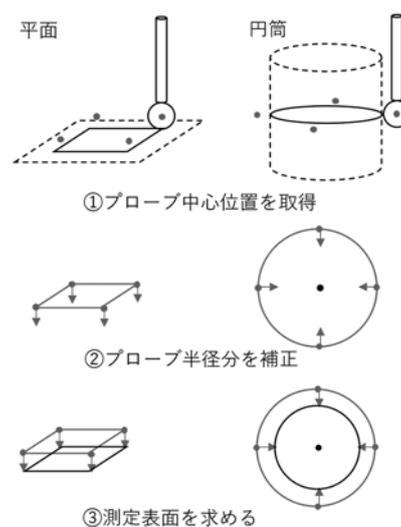


図9 単純形状におけるプローブ接触位置の推定

した領域や測定物の内部に推定された接触点が存在する、という矛盾が生じてしまう。

よって、形状に依らずプローブ半径分を補正できる方法の開発が課題である。

以上より、任意形状の測定対象の表面抽出における課題に対して、従来の方法ではプローブ半径分を補正する方向を推定することによって測定対象表面を決定しようとしていた。しかし、正確にプローブ半径分を補正する方向を決定できないことが技術的な課題となっていた。

そこで、産総研ではプローブ半径分を補正する方向の推定を行わずに物体表面位置を算出する方法の適用を進めている²⁹⁾。この方法は触針式粗さ計等を用いて表面粗さ等の表面性状を測定する際に用いられる、モルフォロジカルフィルタと同様の考え方に基づくものである³⁰⁾。

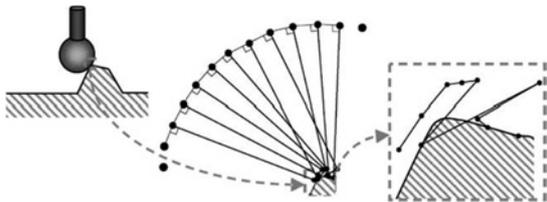


図 10 任意形状測定におけるプローブ接触位置の推定に関する問題²⁸⁾

5.2 任意形状の測定不確かさの推定における課題

任意形状における測定不確かさでは、単純形状における測定不確かさ u に加えて、前章のプローブ半径補正の影響による不確かさが無視できない大きさとなるため、これを考慮する必要がある。従来の方法ではプローブ半径分を補正する方向を推定してプローブ半径分を補正していた。しかし、任意形状では正しくプローブ半径分を補正する方向が分からない。そのため、プローブ半径分を補正する方向の誤差がどの程度かが分からず、プローブ半径分を補正した場合の物体表面の位置の不確かさを算出できなかった。

そこで、産総研ではプローブ半径分を補正する方向を求めることなく、物体表面の位置を算出でき、その位置の不確かさも推定できる方法の開発を行う。

単純形状として、例えば球の半径測定の不確かさ要因には、下記が挙げられる。

- ・プローブ中心の位置誤差 u_{scale}
- ・プローブ寸法の不確かさ u_{size}
- ・プローブ形状の不確かさ u_{form}
- ・測定物の熱膨張補正の不確かさ u_{therm}
- ・繰り返し誤差 u_{rep}

ここで、球赤道の全周を測る場合、プローブの赤道上の全周が測定結果に均等に寄与するため、プローブ球形

状誤差の影響は無視できるほど小さい。

一方、任意形状では、取得されるのはプローブ中心位置であり、プローブ球のどこで測定表面を接触しているかは不明である。それはプローブの形状不確かさに相当する。また、傾斜面を測定する場合、目標断面の測定位置の不確かさ u_{pos} を考慮する必要がある。目標断面の測定位置の不確かさ u_{pos} は、測定物の傾斜角と1点繰り返し測定の不確かさを u_{single} 、座標原点 z の不確かさを u_z 、測定物の傾斜角を θ とすると

$$u_{pos} = u_{single} \times u_z \times \cos\theta \quad (1)$$

と表すことができる。

さらに、急峻な曲面のとき、先行手法²⁸⁾における不確かさ U は、プローブの中心位置から接触位置までの方向を推定することによるバイアス E をもち、

$$U = k\sqrt{u^2 + E^2} \quad (2)$$

となる。

図 11 のように、鋭角が 15° の形状を直径が 1 mm のプローブを $30\text{ }\mu\text{m}$ の測定点間隔で測定するという条件でモンテカルロシミュレーションを行った結果を図 12 に示す。機械式測定機のスケール誤差等によりプローブの中心位置の標準偏差が $0.5\text{ }\mu\text{m}$ である場合、この先行手法によりプローブ半径分を補正した位置は $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度不連続にプローブの内部に計算された。

プローブ半径分を補正する方向を求めることなく、物体表面の位置を算出する方法では、物体表面の位置を、プローブが通過した領域の包絡面として算出する。このとき、包絡面上の点の位置の不確かさは、

- ・プローブ中心の位置誤差 u_{scale}
- ・プローブ寸法の不確かさ u_{size}
- ・プローブ形状の不確かさ u_{form}

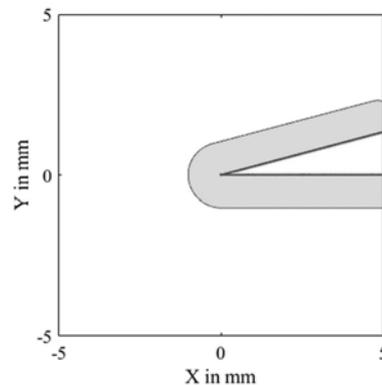


図 11 シミュレーションに用いた 15° の鋭角形状（黒色太線）及びプローブが通過した領域（灰色表示）

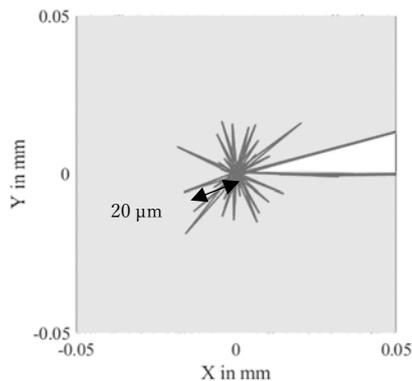


図 12 接触位置への法線方向を推定する先行手法²⁸⁾により、プローブ半径分を補正して得られた形状（灰色線）。図 11 のスケールを 100 倍に拡大している。

表 1 産総研の CMM を使用して球の断面形状を測定したときの不確かさの推定例

不確かさ要因	不確かさ [μm]
プローブ中心の位置誤差	0.08
プローブ寸法の不確かさ	0.20
プローブ形状の不確かさ	0.49
傾斜角に依存する誤差	0.09
熱膨張補正の不確かさ	0.01
繰り返し誤差	0.12
合成標準不確かさ [μm]	0.56
拡張不確かさ ($k=2$) [μm]	1.1

の合成として評価できる。

表 1 に産総研の CMM を使用して球の断面形状の不確かさを推定した例を示す。プローブ半径分を補正する方向を求めることなく、物体表面の位置を算出する方法では、1 μm 程度の不確かさで、断面形状を決定可能である。

6. 今後の方針

短期的な方針として、5 章に研究課題として挙げた、形状に依らずプローブ半径分を補正できる方法の開発及びその不確かさ評価を完成させる。

先行手法²⁸⁾ではプローブ中心位置から接触位置までの方向を推定することによるバイアスをもち、急峻な曲面においてそれが不確かさに大きく影響することがシミュレーションにより本調査研究で明らかになった。そこで、この接触位置までの方向を推定せずに、プローブ半

径分を補正する手法を開発する。先行手法と我々が開発する手法によるプローブの接触位置の計算結果を比較することで、このバイアスを実験的に評価する。

まず、単純な形状として、球の赤道面や円筒断面等のプローブが垂直に当たり曲率が一定の形状において、我々が開発する手法が適用できることを検証する。次に、複雑な形状として、球の斜面のある断面や、円筒を斜面に測る等、曲率が変化するような形状において、開発手法が適用できるかを検証する。さらに、測定物の傾斜角や曲率の大きさ、その変化率、プローブ半径、測定点間隔等を変えて測定値を比較することで、それらがどのように不確かさに影響するかを検証する。

これらにより確立した任意形状の測定技術は、標準供給を行う公設研や実際に製品開発を行っている企業と共有し、産業利用を目指す。

将来的には、三次元測定の国際規格である ISO 15530 を担当する ISO TC213 において任意形状測定における測定精度評価法の規格化を目指す。

7. まとめ

任意形状の三次元測定の動向として、

- ・産業分野における形状の複雑化
- ・産業製品の品質要求の厳密化
- ・設計値と測定値のデータ照合化

の動きがある一方、現状の課題として、

- ・任意形状に対する標準供給が実現していない
- ・曲面を含む形状測定においてプローブ接触位置の推定が困難である
- ・産業製品の形状測定に用いるゲージ開発の開拓が乏しい

ことがわかった。

以上を踏まえて、産業製品の形状測定に用いる任意形状の測定技術開発に取り組み、産業界への貢献を目指す。

謝辞

本調査研究を進めるにあたり、計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 幾何標準研究グループの佐藤理主任研究員、松崎和也主任研究員に直接的に指導いただき、同グループの阿部誠前研究グループ長（現・ミットヨ）、渡部司研究グループ長、鍛島麻理子主任研究員をはじめ、幾何標準研究グループ及び長さ標準研究グループの皆様が多角的に助言いただきましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 荒井裕彦, “平成 30 年度日本塑性加工学会 技術開発賞 受賞講演”.
- 2) 運営協議会, “産業技術総合研究所地域連携戦略予算プロジェクト 3D 計測エボリューション 実施ガイドライン,” 2016-2018.
- 3) J. A. Sladek, “Coordinate Metrology, Springer Tracts in Mechanical Engineering”, 55-125, 2016.
- 4) 大澤尊光, 高辻利之, 佐藤理, “ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定”, *Synthesiology*, 2, 2, 101-112, 2009.
- 5) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 梅津健太, “座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報計量標準モノグラフ”, 5, 4, 283-289, 2007.
- 6) 大澤尊光, “ステップゲージの校正法と不確かさ評価”, 産総研計量標準報告, 469, 1-19, 2013.
- 7) 特許庁, “平成 30 年度特許出願技術動向調査報告書 三次元計測”.
- 8) Automotive Industry Action Group (AIAG), “IATF 16949: 2016”.
- 9) 松崎和也, “計測用 X 線 CT の高精度化に関する調査研究,” 産総研計量標準報告, 9, 3, 311, 2016.
- 10) G. Rodger, D. Flack, M. McCarthy, “A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces,” NPL REPORT DEPC-EM 014, 2007.
- 11) Z. M. Bi, L. Wang, “Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications,” *Integrated Manufacturing*, 26, 403, 2010.
- 12) 経済産業省委託, “平成 29 年度省エネルギーに関する国際標準の獲得・普及促進事業委託費 各種 IT ツールの活用を保証するデータ基盤に関する国際標準化成果報告書”.
- 13) M. Wieczorowski, M. Rucinski and R. Koteras, “Application of optical scanning for measurements of castings and cores,” *Archives of Foundry Engineering*, 10, 1, 265, 2010.
- 14) R. Martin, A. Sabato, A. Schoenberg and R. Giles, “Comparison of nondestructive testing techniques for the inspection of wind turbine blades’ spar caps,” *Wind Energy*, 21, 11, 1, 2018.
- 15) Z. Wu, Z. Li, W. Huang, H. Gong, Y. Gao, J. Den and Z. Hu, “Comparisons of nozzle orifice processing methods using synchrotron X-ray micro-tomography,” *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 13, 3, 182, 2012.
- 16) V. Zelený, I. Linkeová, J. Sýkora, P. Skalný and J. Hynek, “Good practice guide for verification of area-scanning on-board metrology systems on machine tools,” IND62 TIM.
- 17) L. Iuliano, P. Minetola and A. Salmi, “Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers,” *Measurement Science and Technology*, 21, 1, 2010.
- 18) A. Robinson, M. McCarthy, S. Brown, A. Evenden and L. Zou, “Improving the Quality of Measurements through the Implementation of Customised Reference Artefacts,” 3rd International Conference on 3D Body Scanning Technologies, 2012.
- 19) B. Acko, M. McCarthy, F. Haertig and B. Buchmeister, “Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines,” *Measurement Science and Technology*, 23, 9, 2012.
- 20) J. D. Barnfather, M. J. Goodfellow and T. Abram, “Photogrammetric measurement process capability for metrology assisted robotic machining,” *Measurement*, 78, 29, 2016.
- 21) Y. Kondo, K. Sasajima, S. Osawa, O. Sato and M. Komori, “Traceability strategy for gear-pitchmeasuring instruments: development and calibration of a multiball artifact,” *Measurement Science and Technology*, 20, 6, 2009.
- 22) E. Savio and L. De Chiffre, “An artefact for traceable freeform measurements on coordinate measuring machines,” *Precision Engineering*, 26, 58, 2002.
- 23) E. Savio, H. N. Hansen and L. De Chiffre, “Approaches to the Calibration of Freeform Artefacts on Coordinate Measuring Machines,” *CIRP Annals*, 51, 1, 433, 2002.
- 24) E. Savio, L. De Chiffre and R. Schmitt, “Metrology of freeform shaped parts,” *CIRP Annals*, 56, 2, 810, 2007.
- 25) 福原義也, 寺澤正人, 佐藤理, 松崎和也, “ゲージ, その製造方法, 形状測定機の精度評価方法, 形状測定機の補正データ取得方法, 及び測定データの補正方法,” 特願 2019-060510, 2016.
- 26) J. Park, K. Kwon and N. Cho, “Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor”, *Measurement Science and Technology*, 17, 2380-2386, 2006
- 27) H. Aoyama, M. Kawai and T. Kishinami, “A New

- Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface”, CIRP, 38, 1, 517-520, 1989.
- 28) S. Liang and A. Lin, “Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering”, Computers in Industry, 48, 241-251, 2002.
- 29) M. Watanabe, K. Matsuzaki, O. Sato, Y. Fukuhara and M. Terasawa, “Feasibility study of performance assessment gauge for freeform measurement”, International Journal of Automation Technology (IJAT), 15, 6, 824-830, 2021.
- 30) S. Lou, X. Jiang and P. J. Scott, “Geometric computation theory for morphological filtering on freeform surfaces”, Proceedings of the Royal Society A, 469, 1-19, 2013.