

計測用 X 線 CT の高精度化に関する調査研究

松崎和也*

(平成 26 年 12 月 25 日受理)

A survey on coordinate metrology using dimensional X-ray CT

Kazuya MATSUZAKI

Abstract

X-ray computed tomography (X-ray CT) has been occupying indispensable position in geometrical and dimensional measurements in industry, which is capable of measuring both external and internal dimensions of industrial products. Since dimensional X-ray CT has problems about ensuring traceability and estimating uncertainty, requirement of developing measurement standard for dimensional X-ray CT is increasing. Some of national metrology institutes (NMIs) including NMIJ have been working on developing measurement standard. In this report, the background of coordinate metrology using dimensional X-ray CT is reviewed. Then, measurement error sources are discussed. Finally, the plan to develop high accuracy dimensional X-ray CT is presented.

1. はじめに

製造業において、製造した製品が設計したとおりの寸法、形状に作製できているかを検査することは非常に重要である。このような検査において測定、評価が要求される幾何学量は多岐にわたっており、それらすべての項目を測定できる測定機として座標測定機 (CMM) が広く用いられている。CMM は真円度測定機などの特定の幾何学量の測定に特化した測定機に比べて測定精度が劣るものの、測定結果である測定点の三次元座標データからあらゆる幾何学量を計算することができるという汎用性を持つ¹⁾。

近年では、測定対象である製造部品の形状の複雑化・微細化や、測定項目の増加、材質の多様化などが進み、従来の接触式測定では測定が困難な部分や、製品内部の形状計測や複数の部品を組み立てた状態での計測など、これまでの CMM では計測不可能だった項目の測定ニーズも高まっている。

また、別の観点では三次元 CAD や 3D プリンタの普

及に伴い、設計、製造、計測、解析のものづくりの一連の流れにおいて、データをすべて三次元のデジタルデータでやり取りする方式が注目を浴びている。そのために計測における入出力データ (測定項目、測定対象、測定結果) も三次元デジタルデータで要求されるようになってきている^{2)・4)}。

これらのニーズを満たす物体内部の寸法・形状を測定可能な測定機として X 線 CT が計測用途に用いられ始めている。

X 線 CT はもともと医療分野の観察装置として開発され、機器の改良に伴って工業製品の非破壊検査や欠陥検査に用いられるようになった。X 線 CT の周辺技術 (X 線源、移動ステージ、ディテクタ、パソコンなど) の性能向上により、高い測定の再現性と分解能が可能になったが、それらの用途の目的は検査であり、検査結果として欠陥などの寸法が得られてもその値の計測精度が保証されていなかった。しかし近年になって、観察装置ではなく計測機器として設計され、計測精度を保証した計測用 X 線 CT が市販され始めた^{5)・8)}。

しかし現時点では、それらの計測用 X 線 CT も測定精度やトレーサビリティの確保に問題があり、世界中の

* 工学計測標準研究部門 幾何標準研究グループ

研究所で研究が進められている。計量標準総合センター (NMIJ) においても標準供給に向けて研究が進められており、2017年までに標準供給を開始する予定である⁹⁾。

本稿では、計測用 X 線 CT の高精度化について方針を示すために行った調査の結果を報告する。具体的には計測用 X 線 CT とその他の座標測定機との比較、計測用 X 線 CT の概要、市場の動向、各国の研究機関の現状について調査した結果を報告する。その後、計測用 X 線 CT の誤差要因について述べ、今後の研究の方針についてまとめる。

2. 座標測定機

座標測定機は測定方式によって大きく接触式 CMM、光学式 CMM、計測用 X 線 CT の三種類に区別することができる^{10) 11)}。図 1 にそれぞれの装置を示す。



図 1 接触式 CMM, 非接触式 CMM, X 線 CT の比較
写真及びイメージ提供) 株式会社オプトン¹²⁾

2.1. 接触式 CMM

接触式 CMM は三種類の方式の中で最初に開発された方式であり、現在でも最も多く使用されている方式である。接触式 CMM では、スタイラス (触針) がワーク (試料) と接触した点の座標を記録する。この方式は測定精度が数 μm 程度と三種類の中で最も高いが、測定速度が遅く、測定項目の増加に伴って測定時間が増加する。そのため、実用的な測定時間で取得できる点数は限られており幾何学的な形状以外の測定には不向きである。また、実際に測定ワークに接触するため、柔らかい材質のワークの場合には表面が変形してしまうため測定できない、あるいはワークを適切に固定する必要があるなど測定において考慮する点も多い。

2.2. 光学式 CMM

光学式 CMM は接触式 CMM に次いで開発された方

式であり、さまざまな形式の測定機が存在しているが、一般的にレーザー光や縞形状のパターンをワークの表面に投影したものを CCD などのカメラにより三角測量することにより測定を行う。測定精度は接触式に劣り、高精度なものでも $10 \mu\text{m}$ 程度であるが、非接触であるため柔らかい材質を測定することが可能である。また、短時間で数百万点に及ぶ大量の点群データを取得することができることから、曲面形状の測定に強みを持つ測定方式である。近年の工業製品において自由曲面を持つ製品が増加したことから、測定操作が簡単で測定時間が短いことからユーザーが徐々に増加してきている。一方で、光をワーク表面で反射させるためにワーク表面の色や表面性状によって測定の可否や測定精度が左右される。

2.3. 計測用 X 線 CT

計測用 X 線 CT は上記二つの方式に比べて新しい方式であり、ワークの外形だけでなく内部の形状・寸法を測定可能な唯一の方式である。そのため、自動車のエンジンなど内部形状が非常に重要な工業製品や、電子部品のソケット部など微小な凹凸があり接触式や光学式の測定機では測定が困難な部分の測定などに応用が期待されている。また、取得できるデータが三次元のボリュームデータなので設計時の CAD データとの照合が容易であり、3D プリンタへの入力データとしても有用である。一方で装置の精度評価法が確立されておらず、国際標準化もされていないため、測定精度を接触式、光学式と同一の基準で比較することができない。現状の測定精度として限られた条件下で $10 \mu\text{m}$ 程度を表記しているメーカーは現れているが、数値の客観性に課題がある。

3. X 線 CT

3.1. X 線 CT の原理

ここでは X 線 CT による測定原理について述べる。

X 線源で発生した X 線をワークに向かって放射し、ワークを透過した X 線量を検出器で検出する (図 2)。

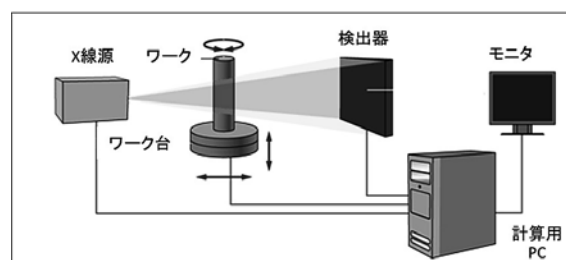


図 2 X 線 CT の構造図

放射した X 線量と検出した X 線量との差は、X 線がワークを透過する際に散乱や吸収によって減弱した量に相当し、ワークの構造や密度、透過距離によって変化する⁶⁾。このようにして検出した X 線量に対応して明暗の付いた画像は X 線投影像と呼ばれる。この投影像をワークに対して複数の方向から取得し、360°分の投影像から再構成計算を行うことによって再構成像と呼ばれるボリュームデータを取得することができる¹³⁾。この再構成像では測定空間を均等に分割した単位空間（1 ボクセル）ごとにその単位空間内の X 線減弱係数に対応づけられる数値(CT 値)が与えられている。この CT 値によって密度の異なる物質間の境界面を決定する（境界決定）。寸法や形状などの幾何学的な計測を行う場合はこの境界決定を行った三次元データに対して計算機上で仮想的な測定を行う。図 3 に実際の測定フローを示す。

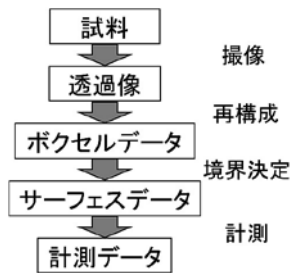


図 3 計測 X 線 CT の測定フロー

3.2. X 線 CT の構造

X 線 CT は装置としての構造は比較的単純であり、図 2 に模式図で示すとおり、主な機構は X 線源、ワークテーブル、検出器及び計算機からなる。以下にそれぞれの機構について述べる。

最も広く用いられている X 線管を用いた X 線源では、電子を発生させ、発生した電子を加速して細く絞り金属のターゲットに衝突させることで X 線と熱を発生させる。現在の X 線 CT では実効焦点サイズが約 1 μm かそれ以下のナノフォーカスと呼ばれる線源と、それよりも実効焦点サイズが大きいマイクロフォーカスの線源がある。両者の大きな違いは、分解能と発生可能な X 線の最大エネルギーである。シャープな X 線投影像を取得するためには発生する X 線の実効焦点サイズが小さい必要があり、装置の分解能はこの実効焦点サイズを超えて大幅に改善することはできない。発生する X 線の透過能力を上げるために管電圧を、得られる投影像の明るさを明るくするために管電流を上昇させるとターゲットの金属に衝突するエネルギーが上昇し、衝突点付近で発

生する単位面積当たりの熱量が上昇するため、必然的に実焦点サイズを大きくして単位面積当たりの熱量を下げることになる。熱量の問題を解決しても、電子線のエネルギーが上昇するとターゲットに衝突した電子がエネルギーを失わず散乱してしまい、実効焦点サイズを小さくすることが困難である。これらのことから一般に、高エネルギーの X 線 CT は実効焦点サイズが大きくなるため分解能が低く、低エネルギーの X 線 CT は小さな実効焦点サイズを実現し得るため分解能が高いと言える。

ワークテーブルは、測定対象について複数の方向から投影像を取得するための回転機構、測定時の拡大率を調整するための線源—検出器方向への移動機構、そしてワークの中心を X 線源の高さと一致させるための鉛直方向への移動機構を備えている。

検出器は、X 線を水平面で扇状に照射するファンビーム型ではラインディテクタと呼ばれる一次元の検出器が、あるいは X 線を円錐状に照射するコーンビーム型ではフラットパネルと呼ばれる二次元の検出器が用いられている。現在市販されている計測用 X 線 CT の大半はコーンビーム型である。ファンビーム型はワークの各水平断面において 360°全周方向の投影像を取得し、ワークの高さの分だけ測定を繰り返すことになる。そのためコーンビーム型に比べて測定に時間がかかる反面、X 線がワークを透過する際に散乱や屈折などで生じた外乱となる X 線が検出されにくくなるため X 線 CT としての SN 比は向上する。また、コーンビーム型では再構成計算の結果、再構成像の端部が歪んでしまうことが知られている。そのため、一般的にファンビーム型のほうが歪みやノイズの少ない再構成像を取得することができる。最近では、X 線の照射・検出にコーンビーム型と同様のものを使い、測定時にワークを上下方向へ移動させながら測定するヘリカルスキャン方式も研究されている。

計算機では主に、複数の X 線投影像からボリュームデータを求める再構成計算、密度の異なる物質間の境界面を決定する境界決定、得られたボリュームデータに対してソフトウェア上で幾何学形状の推定及び寸法・形状の測定を行う。再構成計算は複数の投影データから、ワークの X 線減弱係数によって明暗がつけられた断面画像を生成する数学的な処理である。この処理の前後でフィルタリングを行いノイズの除去が行われる。こうして得られた断面画像を積み重ねてボリュームデータを計算する。ソフトウェア上での計測ではこのボリュームデータに対して寸法測定、幾何学形状のあてはめ、CAD や設計値(ノミナルデータ)を用いた公差照合を行う。しかし、

このボリュームデータは3次元に並んだ各ボクセル内にX線の吸収量に相当する数値が割り当てられているだけで、密度の異なる物質間の境界がわかっているわけではない。そのため、ボリュームデータに対して境界決定と呼ばれる処理が必要となる。これは、各ボクセルに割り当てられた数値(=物質の密度)が急激に変化する領域を探索し、密度の異なる物質間の境界として表面を決定することである。そのため、隣接した物質間の密度差が小さい場合には安定した境界決定が困難になる。

4. 計測用 X 線 CT の市場の現状

現在計測用 X 線 CT を販売しているメーカーは主に欧州の座標測定機メーカーであり、これまでに蓄積した三次元計測に関する知見を活かして、座標測定機の一つとして販売している。これに対し日本ではもともと医療用や非破壊検査用の X 線 CT を販売していたメーカーが計測用のものを開発しようとしている段階であり、計測用として販売されている X 線 CT は非常に少ない。

これらの計測用 X 線 CT の性能において問題となるのは測定精度の取り扱いである。一部の装置では測定精度が記載されておらず、記載されている場合であっても測定精度評価法について国際的標準がないため、測定機メーカー毎に測定精度の算出方法が異なっている。一部の測定機メーカーでは、ドイツの VDI/VDE 2617-13¹⁴⁾、2630-1.3¹⁵⁾ (X 線 CT による寸法計測についてのガイドライン) に従って測定精度算出している。このガイドラインは接触式 CMM の規格である ISO10360 シリーズを X 線 CT の精度評価に適用する方法を定めたものである。しかしこのガイドラインに従って算出された測定精度が X 線 CT の測定能力を正確に反映しているか、については国際的な合意が取れていない。これは X 線 CT と接触式 CMM とでは主要な誤差要因が異なっているのに対し、同ガイドラインでは X 線 CT 特有の誤差要因を考慮していないためである。そのためドイツ国内ではこのガイドラインに従って算出した測定精度は接触式 CMM による測定精度と比較できる、と主張されているものの、現時点では議論が収束していない。よって、寸法測定能力評価法に関する国際的な工業標準の整備が急務となっている。また、これらの装置は長さのトレーサビリティが確保されていないという問題があり、標準供給体制の構築も課題である。

5. 各国の研究の現状

計測用 X 線 CT についての研究は、主に欧州で行われており、ドイツが最も先行しているが、現在 X 線 CT による寸法・形状測定について標準供給を行っている国は存在しない。以下にドイツ、日本、その他の国の現状を報告する。

ドイツでは 2000 年代から PTB と測定機メーカーが協力して研究を始めており、現在も PTB あるいはフラウンホーファー研究所を中心として研究が進められている¹⁶⁾。最近の研究動向としては、PTB では X 線 CT の国際標準化のための研究に重きが置かれており、X 線 CT の測定精度の検証方法や誤差要因が測定結果に与える影響についての基礎研究が行われている。フラウンホーファー研究所では計測用 X 線 CT の高エネルギー化についての研究が行われており、自動車を丸ごとスキャンできる XXL-CT といわれる世界最大の計測用 X 線 CT などが開発されている^{17)・18)}。

NMIJ ではこれまでに、島津製作所と共同で計測用の X 線 CT を開発した (図 4)。

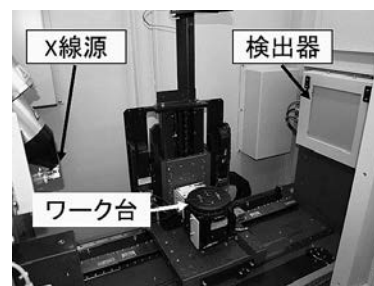


図 4 NMIJ で開発された計測用 X 線 CT

これは非破壊検査用の X 線 CT に特殊な改造を加えた仕様となっており、最も大きな特徴は剛性の高いグラナイトをベースに基幹部品を配置し、高精度な回転ステージを組み込んだことにある。これにより X 線源、ワーク、検出器の位置安定性が格段に向上し、シャープで安定した CT 画像を取得することが可能になっている。また、装置内部の温度環境を一定にするため空調を組み込んでおり、 20 ± 0.5 °C に維持することができる¹⁹⁾。しかし、この装置はまだすべての誤差評価が終わっているわけではなく、測定性能も改善の余地が残されており、標準供給を開始するには至っていない。この装置を改良することで標準供給を開始することが我々の大きなミッションの一つである。同時に、この装置で蓄積した知見を基に精度評価法を標準化することが期待されている。

NMIJ で行われているもう一つの研究は X 線 CT の高エネルギー化である。X 線 CT は発生させる X 線のエネルギーによって透過可能なワークのサイズが決まっており、より大きなサイズのワークを測定するためにはより大きなエネルギーを発生させる X 線 CT を利用する必要がある。例えば、自動車のエンジンを丸ごと測定可能な X 線源の管電圧が数 MeV の装置に大きな需要がある。しかし、一般的に X 線のエネルギーが大きくなると X 線源の実効焦点サイズが大きくなり、分解能が悪化する。そのため、測定性能を維持したまま透過能力を向上させるためには新たな線源を開発する必要がある。それと同時に、高エネルギーの X 線に耐えることができ、ワーク全体を視野に収めることができるサイズの検出器や、高エネルギーの X 線を遮蔽可能なシールドも必要になる。NMIJ では経済産業省からの委託事業として X 線 CT メーカーである日立製作所と高エネルギーかつ高分解能な計測用 X 線 CT を共同開発している。これは、特殊な線源を装置に組み込むことで現在トレードオフの関係にある高エネルギーと高分解能を両立させるもので、装置の開発を日立製作所が、開発した装置の測定性能評価を NMIJ が担っている。

ドイツ、日本以外では、イギリスの NPL でも 2010 年からニコン製の計測用 X 線 CT を導入し研究が行われている。NPL でも PTB と同じように規格化を念頭に置いた誤差要因や精度評価法に関する基礎研究が行われている^{20)・21)}。シンガポールの SIMTech でも計測用 X 線 CT について研究が行われており、画像処理研究チームが中心となり、高エネルギー化、高速画像処理、不確かさ評価などについて研究中である²²⁾。韓国では、KITECH で X 線源の開発などの研究が行われているが、検査用 CT に関する研究であるとの情報である。欧州では大学、例えばイタリアの Padova 大学やデンマーク工科大などでも、研究が行われている。

6. 工業標準の整備

座標測定機の測定精度評価法の ISO 規格として ISO10360 シリーズがある。この規格は座標測定機の受け入れ検査に関する規格であり、測定機の計測精度評価方法と受け入れ基準が規定されている。この規格によって規定された検査手順に従って検査を行うことにより測定方式によらず統一的な基準で寸法測定性能を比較することができる。この規格で規定されている検査手順は、測定機の測定能力をすべて明らかにすることではなく、ある程度限られた測定機の通常の用途での測定性

能を可能な限り少ない検査項目で明らかにすることを目的にしている。この規格はもともと直交型接触式 CMM を対象に作られた規格²³⁾であったが、様々な方式の座標測定機が普及するにつれて光学式 CMM など対象を拡張してきた²⁴⁾。計測用 X 線 CT の精度評価法規格は ISO10360-11 として現在審議中であり、日本とドイツが中心となってさまざまな検査手順の提案を行っている^{25)・31)}。

日本国内では現在 JIS B 7442³²⁾ として用語についてのみ JIS 規格が発行されており、ISO10360-11 が発行された後にそれを基に検査手順などに関する JIS 規格を定める予定である。

7. 計測用 X 線 CT の研究課題

計測用 X 線 CT の標準供給体制を確立するに当たり、ゲージに校正値を付与する必要がある。接触式・光学式 CMM については校正事業者の所有する装置校正用ゲージや比較参照用のゲージについて球間距離などの特徴的な幾何学量について NMIJ で校正値を付与し、それらのゲージを校正事業者などが使用することで標準の供給が行われている。現在のところ、X 線 CT についても同様に校正事業者などが所有するゲージの特徴量を依頼に応じて校正し、校正事業者がそのゲージを使用して CT 装置もしくは直接測定結果の評価を行うことを想定している。CT 用のゲージに校正値を付与することは接触式 CMM で可能なものもあるが、内部形状などは接触式 CMM では測定が困難であるため、計測用 X 線 CT によって標準供給する体制を構築する必要がある。さらに計測用 X 線 CT を標準供給に用いることができれば接触式 CMM より短時間で簡易に校正値を付与することができる。しかし、現状の計測用 X 線 CT では、標準供給のためには測定精度の低さが課題となる。エンドユーザの段階で有用な測定精度を確保するためには、標準供給する側の計測用 X 線 CT を高精度化する必要がある。一つの目安としては接触式 CMM、あるいは非接触式 CMM と同程度の測定精度が目標値になる。また、標準供給に際しては不確かさを算出する必要があり、そのためには様々な誤差要因の影響について明らかにする必要があり、誤差要因の影響が明らかになることで、それぞれの要因が計測結果に影響しないように装置に改良を行うことや、それぞれの要因の影響を補正するような手法の開発が可能になる。

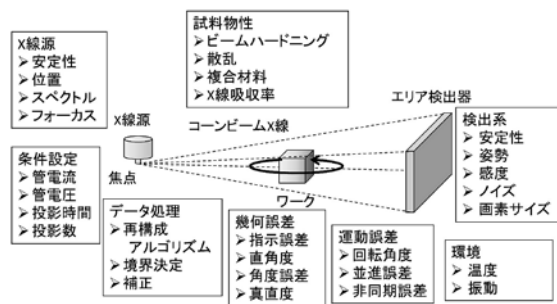


図5 計測用 X 線 CT の誤差要因

図5に示すとおり X 線 CT には非常に多くの誤差要因が存在している。それらは X 線源、ワーク台の幾何誤差、ワーク台の運動誤差、検出系、試料物性、測定条件、環境及びデータ処理に分けることができる。それぞれに対して測定結果への影響及びその補正方法を確立する必要がある^{33)・34)}。以下にそれぞれの詳細を示す。

7.1. X 線源

X 線源における誤差要因の一つは、X 線源の位置のずれである。これは、実際の測定条件が再構成計算時に仮定している装置の幾何学的な理想状態からずれてしまうこと実際の測定条件がノイズを発生する原因になる³⁴⁾・³⁷⁾。その他にも、発生する X 線のエネルギースペクトルはビームハードニングと呼ばれる誤差の発生や繰り返し測定時の再現性の悪化の原因となる^{38)・40)}。ビームハードニングとは、照射する X 線がエネルギースペクトルに広がりを持っている場合に、エネルギーの低い X 線がエネルギーの高い X 線に比べ吸収されやすいことにより、ワーク透過時の X 線減弱量と透過長さの関係が仮定している式から外れてしまうことによって物質の密度が正確に求まらなくなることである。X 線の実効焦点サイズは投影像の輪郭のコントラストに影響する⁴¹⁾。これにより、物質の境界の識別が困難になり再構成計算時のノイズや、境界決定時の境界のずれの原因となる。

7.2. ワーク台の幾何誤差

ワーク台の幾何誤差とは装置の各機構が理想的に組み上げられた状態からずれていることによる誤差である。指示誤差とはワーク台を移動させるときの移動量が正確でないこと、直角度誤差は移動機構の移動軸が X 線源-検出器の軸と直交していないこと、真直度誤差は移動軸が直線からずれていること、また、角度誤差はワーク台の姿勢が移動位置によって変化することである。

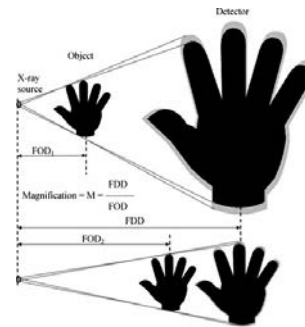


図6 装置の位置関係と拡大率の関係
出展) J. P. Kruth et al.⁸⁾

これによって、X 線源や検出器との相対的な位置関係が理想状態から外れることで、投影像の拡大率がずれて寸法に誤差を生じる(図6)、または再構成計算時に計算誤差を生じる、といった影響がある^{36)・42)}。

7.3. ワーク台の運動誤差

ワーク台の運動誤差は、測定中にワークが回転する際に指示した角度のとおり回転しないことである。これにより再構成計算の際に想定している経路がずれてしまい計算に誤差を生じてしまう。また、回転軸が X 線源-検出器の軸に対して直交していないことにより投影像がずれてしまう、回転機構が振動などを生じる場合にノイズになってしまうことなども誤差要因となる³⁶⁾。

7.4. 検出系

検出器の誤差要因の一つは、その姿勢及びその安定性である。CT での計算はすべての機構が理想的に組み立てられていると仮定して計算しているので、検出器が線源に対して傾いている場合や検出器の並びが理想状態からずれている場合には、再構成計算時に誤差を生じてしまう。同様に、測定中に検出系の姿勢や位置が変化すると投影像がぼけて誤差を生む要因になってしまう。その他にも検出器の感度差やノイズなどが誤差要因になり、正しい X 線量が検出できないといった誤差要因がある⁴¹⁾。

7.5. 試料物性

X 線がワークを透過する時の X 線減弱量を投影像から計算する際に、簡単のためにワークの X 線減弱係数をワーク内で一定として計算している。実際には減弱係数はワークの材質や密度により異なるため、計算誤差を生じる。光電効果やコンプトン散乱のような X 線とワークの相互作用の起こり方もワークの材質により異なるた

め、ワークの材質は得られる再構成像に大きく影響する。また、X 線吸収率が極端に大きいまたは小さい場合には、X 線が透過しない、あるいは X 線の減弱量が少なすぎて減弱量が検出できないなどの問題が起きる。そのほかにも、検出器と線源の直線経路以外の方向からワーク中で散乱した X 線が入射する事によるノイズや、複数の材料からなるワークの場合にそれぞれの物質の X 線との相互作用や減弱係数の違いにより投影像にノイズが生じやすくなるなどの影響がある。

その他の試料物性による影響では、測定対象が複数の材料が使用されたものだった場合の境界面決定の問題がある。幾何学量の測定においては再構成像表面上の測定点を使用するため、境界面決定は測定結果に直接的に影響する。境界面決定は CT 値の違いから X 線吸収率の異なる領域を判別して 2 つの領域の境界面を決定するもので、測定点を正しく決定するためには CT 値の違いを境界面が数学的なモデルとして計算できる精度で判別できる必要がある。境界面を挟んだ 2 つの物質の X 線吸収率の差が小さければ境界付近の CT 値の変化が小さく、正しく境界面を決定することが難しい。

7.6. 測定条件

測定条件とは測定を行う際に、測定者が装置の仕様内で操作可能な項目である。X 線 CT の場合には管電流、管電圧、投影数及び露光時間を適切な条件に設定する必要がある^{34), 37)}。管電流及び管電圧は X 線源に入力する電流及び電圧であり、これにより発生する X 線のエネルギーが変化する。これらは、同時に焦点サイズや焦点の位置安定性にも影響を与えてしまうため、ワークによって最適な条件が異なる。投影数は、ワークを回転させながら複数の方向から投影像を取得する際に同じ方向から撮影する回数である。同一の方向から複数回投影像を撮影しそれを平均してその方向からの投影像とするため、投影数が多くなると測定時間が増加する一方で平均化することにより測定結果のノイズを減らすことができる。露光時間は投影像を 1 枚取得するのに必要な時間に影響である。増加させるとより多くの X 線を検出器で検出できるため投影像が明るくなり、光子の量子化誤差を低減する効果がある。

7.7. 環境

長さ測定の標準温度が 20 °C に定められているので、測定対象を 20 °C で一定に保つことは、測定の不確かさを低減するために重要である。温度が 20 °C から外れる、測定中に温度変化がある、または測定対象に温度勾配が

ある場合にはワークや装置各部の熱膨張により正しい長さを測定することが困難となる。その他には、外部から伝わる振動が誤差要因になる。外部からの振動によりワークが測定中に動くことにより投影像がぼけるなど、良質な投影像が得られなくなり、ボリュームデータにノイズを含むことになる。

7.8. データ処理

データ処理における誤差要因には、ソフトウェア上のデータの取り扱い及び計算方法がある。計測用 X 線 CT に多く採用されているコーンビーム式 CT では再構成計算のアルゴリズムは計算過程での近似や仮定を行うため、完全な再構成像は得ることができない。これらの要因が測定結果に与える影響についても検討が必要である^{43)・44)}。再構成計算方法には逆投影を用いる Filtered Back Projection 法、重畳積分を用いた投影画像からの直接再構成法、逐次近似を用いる方法などがあり、国内の大学などでより正確な再構成計算法が研究されている。しかし、これらの計算方法はいずれも 2 次元ファンビームが傾いているとみなして計算する Feldkamp 法を用いるため、原理的に完全な再構成計算を行うことはできない。そのため、より正確な再構成像を得るためにはコーンビーム式ではなくファンビーム式などを用いるといったデータ処理以外の部分で対応する必要がある。

8. 今後の方針

研究の最終的な目標は、高精度な計測用 X 線 CT により標準供給を行う体制の構築である。そのためには、現行の装置を用いて計測 X 線 CT の誤差要因の解析、蓄積した知見を用いて現行装置の改良及び不確かさ算出方法の確立、標準供給開始という順序で研究を行う必要がある。また、最終的な標準供給の段階では、より小さな不確かさで標準供給を行うために、蓄積した知見を活かした新型 X 線 CT 装置を開発し、それによって標準供給を行うことが必要であると考え、図 7 に今後の研究の段階を示し、以下に研究内容について述べる。

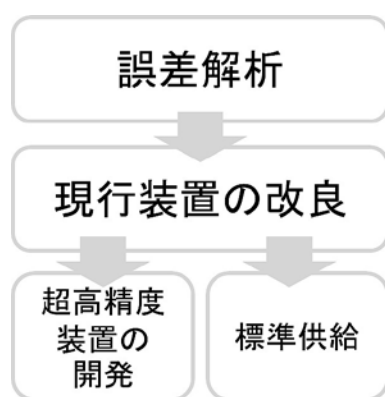


図7 今後の研究方針

第一段階として、現行装置を用いた知見の蓄積を行う。現在 X 線 CT を用いた標準供給が行われていない最大の要因は、X 線 CT による寸法・形状測定に関する知見が不足していることである。これによって、現状の X 線 CT の幾何形状計測能力が制限されており、不確かさの見積もりが行えない。NMIJ で標準供給を行うためには、X 線 CT の持つ様々な誤差要因のそれぞれについて計測結果との関係を明らかにし、それによる不確かさ算出法の確立及び装置の改良や補正計算による高精度化が必要になる。

誤差要因の中で最初に取り組むべきと考えているのは、装置の並進・回転機構に付随する誤差である。これは、投影像のぼけや再構成像のノイズとして現れる誤差で、数ある誤差要因の中でも特に影響が大きいとされている。このためには、現行の X 線 CT について校正された器物を用いて機構の位置や姿勢と測定誤差を同時に測定し、それぞれの誤差要因と測定結果との関係式を構築する。この誤差は、CMM でも同様に幾何誤差の補正計算が行われている⁴⁵⁾ので、これを応用する形で計算することは可能と考えられるが、X 線 CT ではこの誤差は X 線投影像に表れるので、今後、X 線投影像の状態でどのように測定誤差を算出するかという問題に取り組む予定である。その後、幾何誤差以外の誤差要因についても同様に研究に取り組み、各誤差要因が測定結果に与える影響を明らかにする。

第二段階として、第一段階で蓄積した誤差要因の知見を用いて、測定結果に対する補正計算方法の確立や、機器の改良を行う。補正計算方法は CMM の場合⁴³⁾を参考にすが、再構成後のデータに補正を加えるのか投影像に対して補正を加えるのかについて、より効率のよい方法を考案する必要がある。同時に、補正計算のためには補正用のパラメータ（ワーク台の移動機構の真直度な

ど)が必要となるため、その取得方法についても研究する必要がある。

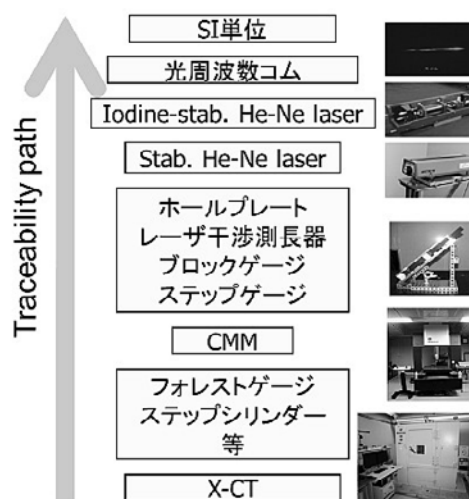


図8 想定されるトレーサビリティ

この補正方法が確立した段階で、X 線 CT による幾何形状の標準供給を開始する。ここで言う標準供給とは、ユーザの依頼を受けて依頼者所有のゲージに対して X 線 CT を用いて校正値を付与することである。この際には、図 8 に示すとおり接触式 CMM で校正を行った器物を用いることによりトレーサビリティを確保する。また、現行機の改造によって誤差を排除する方法についても検討を行い、不確かさの低減に取り組む。

第三段階として、測定の不確かさを低減するために現行機の測定精度を超える超高精度な計測用 X 線 CT を開発する。これは、エンドユーザにおいて高い測定精度を確保するためには、より測定精度の高い装置によって標準供給を行うことが必要であり、そのためには一から設計を考慮した新装置の開発が必要なためである。特に測定精度を第一に考え、コーンビームではなくファンビームやヘリカルスキャン方式などの検討も行う。その他にも第一、第二段階で得られた知見を考慮して設計を行うことにより、現行の接触式 CMM と同等の測定精度を有する計測用 X 線 CT 装置を開発し、それを用いて標準供給を行う。

9. まとめ

近年、製造現場での測定対象が複雑化しており、対象

の内部などの従来の三次元測定機では測定不可能な対象についても測定ニーズが増加している。それらのニーズを満たす測定機として計測用 X 線 CT が注目されており世界的に研究が進められている。現在のところ標準供給が行われている国は無く、標準供給の体制の構築が急務になっている。

NMIJ では、これまでに計測用 X 線 CT を開発してきたが、様々な誤差要因が測定結果に与える影響が明らかになっておらず、標準供給を開始するに至っていない。本調査研究では、これらの現状を踏まえて標準供給までの研究方針を示した。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、高辻利之計測標準研究部門副部門長兼長と計測科長ならびに阿部誠幾何標準研究室長、藤本弘之主任研究員、佐藤理主任研究員、幾何標準研究室の皆様にご多くの助言をいただきましたことを深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) R. G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke, "Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement" CIRP Annals 50 (2), 553-563, 2001
- 2) 財団法人企業活力研究所, "製造技術高度化のための3次元スキャニング利用に関する調査研究" 2010
- 3) 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, Vol. 71, No. 10, 2005
- 4) 高辻利之, 阿部 誠, 佐藤 理, 大澤 尊光, "光三次元計測の産業応用と標準化" OPTRONICS, Vol. 32, No. 380, 2013
- 5) 大澤 尊光, 藤本弘之, 三澤 雅樹, 高辻利之, "幾何形状測定する産業用 X 線 CT の動向" 非破壊検査: journal of N.D.I. 61 (4), 135-140, 2012
- 6) R. Hanke, T. Fuchs, N. Uhlmann, "X-ray Based Methods for Non-Destructive Testing and Material Characterization" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 591, 14-18, 2008
- 7) P. Müller, "Coordinate Metrology by Traceable Computed Tomography" Kgs. Lyngby, Technical University of Denmark, 2013
- 8) J. P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann, "Computed tomography for dimensional metrology" CIRP Ann. Manuf. Technol. 60, 821-842, 2011.
- 9) 計量標準整備計画 (物理標準) http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/keiryo_hyojun/pdf/report01_02_00.pdf
- 10) L. De Chiffre, H. N. Hansen, R. E. Morace, "Comparison of Coordinate Measuring Machines using an Optomechanical Hole Plate" CIRP Annals 54 (1) :479-482, 2005
- 11) S. Carmignato, E. Savio, "Traceable Volume Measurements using Coordinate Measuring Systems" CIRP Annals 60 (1) , 519-522, 2011
- 12) 株式会社オプトン
<http://www.opton.co.jp/products/3d/002113.html>
- 13) L. A. Feldkamp, L. C. Davis, J. W. Kress, "Practical Cone-Beam Algorithm" Journal of the Optical Society of America A Vol. 1, 612-619, 1984
- 14) VDI/VDE 2617-13: Accuracy of coordinate measuring machines characteristics and their testing _ Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors, 2011
- 15) VDI/VDE 2630-1.3: Computed Tomography on Dimensional Measurement – Guideline for the Application of DIN EN ISO 10360 for Coordinate Measuring Machines with CT Sensors, 2011
- 16) H. C. Saewert, D. Fiedler, M. Bartscher, F. Waldele, "Obtaining dimensional information by industrial CT scanning – present and prospective process chain" DGZfP-Proceedings BB 84-CD, 2003.
- 17) M. Salamon, N. Reims, M. Böhnelt, N. Uhlmann, M. Schmitt, V. Volland, R. Hanke, "Applications and method with high energy CT systems" 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore, 2013
- 18) "High energy computed tomography or XXL-CT" http://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/documents-live/Forschungsfelder/Zerstoerungsfreie_Pruefung/20131204_ZfP_Broschuere_xxlet_web.pdf
- 19) H. Fujimoto, "Development of dimensional X – RAY computed tomography" 11th LMPMI, Tsukuba, Japan, 2014
- 20) I W. Sun, S. B. Brown, R. K. Leach, "An overview of industrial x-ray computed tomography" NPL

- Report ENG 32, 2012
- 21) N. Flay, R. K. Leach, "Application of the optical transfer function in x-ray computed tomography - a review" NPL Report ENG 41, 2012
 - 22) Singapore Institute of Manufacturing Technology
<http://www.simtech.a-star.edu.sg/themes/image-processing.aspx>
 - 23) SO 10360-2: Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions, 2009
 - 24) ISO 10360-8: Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors, 2013
 - 25) M. Bartscher, O. Sato, F. Hartig, U. Neuschaefer-Rube, "Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography" Meas. Sci. Technol. 25 064013, 2014
 - 26) M. Bartscher, M. Neukamm, U. Hilpert, U. Neuschaefer-Rube, F. Hartig, K. Kniel, K. Ehrig, A. Staude, J. Goebbels, "Achieving traceability of industrial computed tomography" Key Eng. Mater. 437 79-83, 2010
 - 27) H. Lettenbauer, B. Georgi, W. Daniel, "Means to verify the accuracy of CT systems for metrology applications (in the absence of established international standards) " Int. Symp. on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Lyon, France, 25-27 June, 2007
 - 28) S. Carmignato, D. Dreossi, L. Mancini, F. Marinello, G. Tromba, E. Savio, "Testing of x-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard" Meas. Sci. Technol. 20 084021, 2009
 - 29) K. Kiekens, T. Ye, F. Welkenhuyzen, J. P. Kruth, W. Dewulf, "Uncertainty Determination for Dimensional Measurements with Computed Tomography" Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, 19-21 September, 2012
 - 30) R. Schmitt, C. Niggemann, "Uncertainty in measurement for x-ray-computed tomography using calibrated work pieces" Meas. Sci. Technol. 21 054008, 2010
 - 31) K. Matsuzaki, O. Sato, H. Fujimoto, M. Abe, T. Takatsuji, "Comparison of accuracy verification method for X-ray CT" 38th MATADOR Conference, Taiwan (accepted)
 - 32) JIS B 7442: 産業用 X 線装置一用語, 2013
 - 33) F. Welkenhuyzen, K. Kiekens, M. Pierlet, W. Dewulf, P. Bleys, J. P. Kruth, "Industrial computer tomography for dimensional metrology: Overview of influence factors and improvement strategies" 4th Intern. Conf. on Optical Measurement Techniques, May 25th-26th, Antwerp, Belgium, 401 - 410, 2009
 - 34) A. Weckenmann, P. Krämer, "Assessment of measurement uncertainty caused in the preparation of measurements using computed tomography" XIX IMEKO World Congress, Fundamental and applied metrology, September 6-11, Lissabon, Portugal, 2009.
 - 35) J. Kumar, A. Attridge, P K C Wood, M. A Williams, "Analysis of the effect of cone-beam geometry and test object configuration on the measurement accuracy of a computed tomography scanner used for dimensional measurement" Meas. Sci. Technol. 22 035105, 2011
 - 36) F. Vogeler, W. Verheecke, A. Voet, J. P. Kruth, W. Dewulf, "Positional Stability of 2D X-ray Images for Computer Tomography" Int. Symp. on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Berlin, 20-22 June, 2011
 - 37) K. Kiekens, W. Dewulf, A. Voet, J. P. Kruth, "A test object for calibration and accuracy assessment in X-ray CT metrology" Proc. IMEKO 10th Int. Symp. on Measurement and Quality Control, B6_86_1-4, 2010
 - 38) W. Dewulf, Y. Tan, K. Kiekens, "Sense and non-sense of beam hardening correction in CT metrology" CIRP Annals 61 (1) , 495-498, 2012
 - 39) M. Krumm, S. Kasperl, M. Franz, "Referenceless Beam Hardening Correction in 3D Computed Tomography Images of Multi-Material Objects" 17th World Conference on Non-destructive Testing, Shanghai, China, 2008
 - 40) Y. Tan, K. Kiekens, F. Welkenhuyzen, J. P. Kruth, W. Dewulf, "Beam hardening correction

and its influence on the measurement accuracy and repeatability for CT dimensional metrology applications" iCT Conference Proceedings, Wels, Austria, 2012

- 41) J. Hiller, M. Michael, M. R. Leonard, "Physical characterization and performance evaluation of an x-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications." Meas. Sci. Technol. 23 085404, 2012
- 42) P. Wenig, S. Kasperl, "Examination of the Measurement Uncertainty on Dimensional Measurements by X-ray Computed Tomography" ECNDT Proceedings, September, Berlin, Germany, 2006.
- 43) K. Kiekens, F. Welkenhuyzen, Y. Tan, P. Bleys, A. Voet, J. P. Kruth, W. Dewulf, "A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography (CT) metrology" Meas. Sci. Technol. 22 115502, 2011
- 44) S. Ontiveros, J.A. Yagüe, R. Jiménez, F. Brosed, "Computer Tomography 3D Edge detection comparative for metrology applications" Manufacturing Engineering Society International Conference, Zaragoza, June, 2013
- 45) 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, 第8号, 2005

