

研究課題名：

産業用 X 線 CT 装置による自由曲面を有する切削加工品の測定精度の高精度化に関する研究

高橋 勇一

群馬県立群馬産業技術センター 計測係 係長

I 研究目的

自由曲面を有する切削加工品の測定において産業用 X 線 CT 装置（以下、産業用 CT）は接触式の三次元計測機や非接触デジタイザ等と比較して、スタイラスチップやレーザーの接触・照射が困難な箇所でも形状データを取得できるという利点を持つ¹⁾。しかし、産業用 CT による測定では、ワークの X 線減弱係数が測定結果に大きな影響を与えることが知られており、VDI/VDE 2630 規格で規定されているルビー球を用いた球間距離測定誤差評価では、十分な精度保証ができない場合がある²⁾。また、アーチファクトと呼ばれるノイズが測定対象物の形状や内部構造を不明瞭にし、寸法測定や欠陥検出の精度を低下させる要因となる³⁾。

そこで本研究では、産業用 CT を用いた自由曲面を有する切削加工品の寸法測定の高精度化を目指し、以下の二つの課題に取り組んだ。

①深層学習による球間距離測定誤差補正手法の検討: SUS 球を用いた産業用 CT 用評価治具を作製し、深層学習を用いて球間距離測定誤差を縮小化する手法を提案し、その有効性を検証する。VDI/VDE 2630

規格の評価法に深層学習に展開。

②深層学習を用いたアーチファクトの低減: 教師なし学習である CycleGAN に基づいた画像生成モデルを構築し、産業用 CT による SUS 製歯車・ギヤの断面画像からアーチファクトを低減することで、寸法測定の向上を実現する。この研究独自のアプローチ。

II 研究の過程及び成果

II-1 深層学習による球間距離測定誤差補正手法の検討

II-1-1 評価器の作成

VDI/VDE 2630 規格では、球間距離測定誤差は、x 軸、y 軸、z 軸の 3 方向の評価が必須とされている。装置に付随する日本ベーカーヒューズ(株)製校正および評価治具は、ルビー球を 1 次元的に配列したものであるため、各軸方向の評価を別々の測定で行う必要がある。また、繰り返し精度はそれぞれ 3 回行うことになるため、3×3 回の測定を行う必要がある。

本研究では、1 回の測定で x 軸、y 軸、z 軸方向の評価が可能な図 1 に示す産業用 CT の校正器⁴⁾の評価治具として

SUS304 の球（以下、SUS 球）で作製し、球間距離測定誤差を計測した。この評価治具は、厚み 2 mm の CFRP を、 $\phi 50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ の円筒状に加工し、上端から 16 mm、34 mm、52 mm の高さに正五角形の頂点の位置に SUS304 球 ($\phi 2 \text{ mm}$) を配置し、合計 15 個の球を使用した

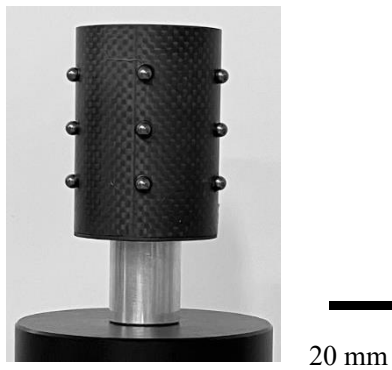


図 1 本研究で使用した評価器

を図 2 に示す。グラフの縦軸が誤差 (mm)、横軸が球間距離 (mm) である。FOD (Focus to Object distance) を、320 mm、FDD (Focus to Detector distance) を 600 mm とした。球間距離測定誤差の計測結果から、SUS 球においては $\pm 13 \mu\text{m}$ の誤差が生じていることが分かった。

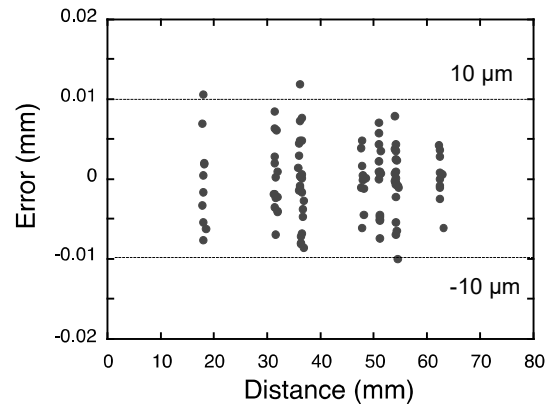


図 2 球間距離測定誤差 (SUS 球)

II-1-2 研究に使用した装置

本研究で、CT 測定に使用した産業用 CT は、高分解能計測用 X 線 CT システム (Phoenix v|tome|x m 240/180 ; 日本ベーカーヒューズ(株)) である。断面画像のボリュームデータ化、球間距離測定計測および表示は、VG Studio max3.2 (ボリュームグラフィックス(株)) を用いた。

評価具の値付けには、高精度三次元座標測定機 (LEGEX9106 ; 株) ミットヨ) を用いた。

II-1-3 球間距離測定誤差の結果

評価器の CT 測定の測定条件は、管電圧 : 200 kV、管電流 : 200 μA 、金属フィルタ : Cu 0.5 mm、ビュー数 : 1800 枚である。

SUS 球の球間距離測定誤差の計測結果

II-1-4 球間距離測定誤差補正

この誤差を小さくするため、三次元空間上の点群データにおける実測値とノミナル値の誤差を最小化する手法を実装した深層学習に基づく誤差補正モデルを開発した。入力データとして、各点の実測値 (x, y, z) およびノミナル値 (a, b, c) を持つデータセットを用いる。まず、特徴量エンジニアリングにより、各点の平均距離、距離の標準偏差、方向角度、クラスタ内の平均距離を算出する。これらの特徴量は、実測値とノミナル値の差異を捉える指標となる。

次に、これらの特徴量を用いて、実測値とノミナル値の距離の誤差を予測するよ

う学習させる。学習には、損失関数として平均二乗誤差、最適化アルゴリズムとして Adam を用いる。

最後に、補正後の実測値を含むデータセットを出力する。これにより、ノミナル値との誤差が最小化された実測値を得ることができる。加えて、補正前後の点間距離を計算することで、SUS 球の球間距離測定誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$ に低減可能であった。図 3 に球間距離測定誤差の補正結果を示す。

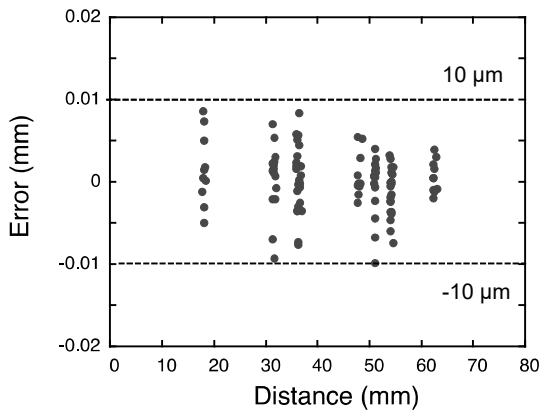


図 3 深層学習による球間距離測定誤差 (SUS 球) の補正結果

深層学習を用いた誤差補正モデルにより、球間距離測定誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$ に低減可能であることを確認した。この結果は、深層学習を用いることで球間距離測定誤差を補正できる一方で、ルビー球を用いた評価治具の球間距離測定誤差が $\pm 5 \mu\text{m}$ であることから、誤差補正モデル以外の SUS 球のメタルアーチファクトの低減等の補正方法を用いる必要性が示唆された。

II-2 深層学習を用いたアーチファクトの低減

II-2-1 研究に使用した施設、装置

本研究では、大型放射光施設 (SPring-8) の放射光 CT は、BL28B2 ラインの高エネルギー X 線⁵⁾を使用した。図 4 に測定系を示す。

産業用 CT は、高分解能計測用 X 線 CT システム (Phoenix v|tome|x m 240/180 ; 日本ベーカーヒューズ(株))、断面画像の表示は、VG Studio max3.2 (ボリュウムグラフィックス(株)) をそれぞれ使用した。

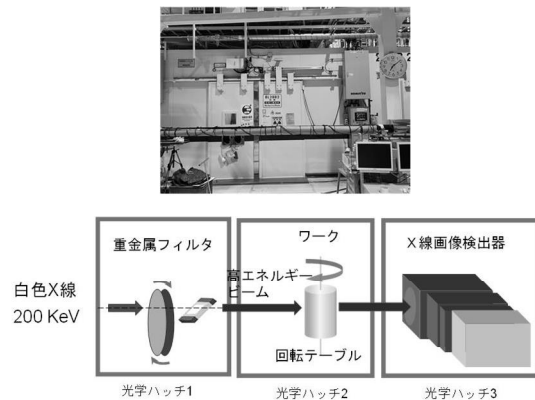


図 4 大型放射光施設 (SPring-8) BL28B2 ライン

II-2-2 歯研平歯車の断面画像

メタルアーチファクトの低減は、高エネルギーの放射光 CT の利用が有効である。本研究では、自由曲面を有する切削加工品として SUS 製歯車を取り扱う。図 5 に歯研平歯車 (MSG1-18 ; 小原歯車工業(株)) を示す。

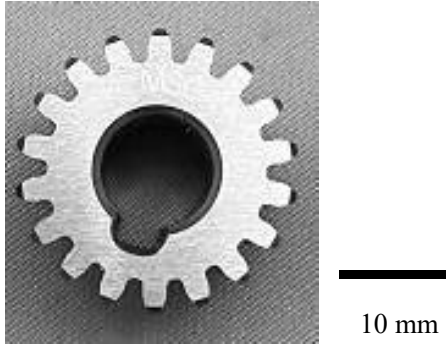


図 5 歯研平歯車

図 6 に歯研平歯車の産業用 CT による断面画像、図 7 に歯研平歯車の放射光 CT による断面画像をそれぞれ示す。

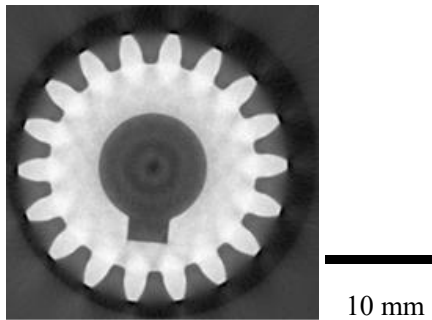


図 6 断面画像（産業用 CT）

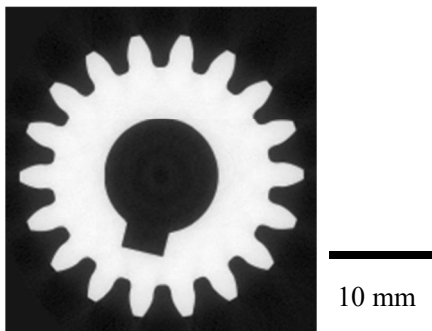


図 7 断面画像（放射光 CT）

産業用 CT の測定条件は、管電圧：200 kV、管電流：100 μ A、金属フィルタ：Ag

0.5 mm、撮像枚数 1200 枚である。

放射光 CT の測定条件は、白色 X 線：200 keV、金属フィルタ：W 0.5 mm+Pb 2 mm、撮像枚数 3600 枚である。

アーチファクト、とりわけメタルアーチファクトの低減は、高エネルギーの大型放射光施設の高エネルギー X 線 CT（以下、放射光 CT）の利用が有効であるが、コストやアクセス性の観点から、日常的に利用可能な測定方法が求められる。一方、産業用 CT は安価で普及しているが、得られる断面画像はアーチファクトの影響を受けやすい。

本研究では、深層学習を用いた画像生成モデルにより、SUS 製歯車の放射光 CT の断面画像と産業用 CT の断面画像からアーチファクトを低減し、測定精度向上を試みた。

II-2-3 深層学習による画像生成モデルの構築

本研究は、放射光 CT と産業用 CT の利点を組み合わせ、高品質な断面画像を生成することで、自由曲面を有する切削加工品として SUS 製歯車のその寸法や形状の計測精度を向上させる技術を開発する。

本研究で特に重要となるのは、深層学習の教師なし学習を用いて、少数の放射光 CT による断面画像と大量の産業用 CT による断面画像というアンペアなデータから学習が可能な画像生成モデルを構築することである。

II-2-4 画像生成モデルの訓練データ、学習

本研究では、放射光 CT の高品質画像と産業用 CT の利便性を組み合わせ、少数の放射光 CT による断面画像と大量の産業用 CT による断面画像というアンペアなデータから学習が可能な教師なし学習である CycleGAN⁶⁾を用いて、カッピングアーチファクトやメタルアーチファクトを低減させた。

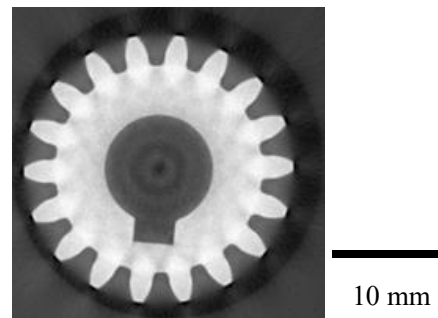
使用したワークは、歯研平歯車 (MSG1-18 ; 小原歯車工業(株)) に加え、歯研はすば歯車 (KHG1-20R ; 小原歯車工業(株))、歯研平歯車 (SSG1-15; 小原歯車工業(株)) を用いた。

ターゲットドメインのデータは、放射光 CT で測定した歯車の断面画像 100 枚とオフラインデータ拡張を用いて生成した 900 枚の合計 1000 枚を用いた。ソースドメインのデータは、CT 測定した歯車の断面画像 8000 枚とオフラインデータ拡張を用いて生成した 72000 枚の合計 80000 枚を用いた。

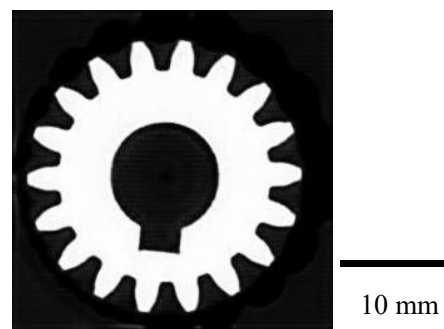
訓練データは 128px×128px に圧縮・変換し、Adam optimizer を用いて学習を行った。学習は epoch 数 10 まで行った。

II-2-5 生成画像のアーチファクト低減効果

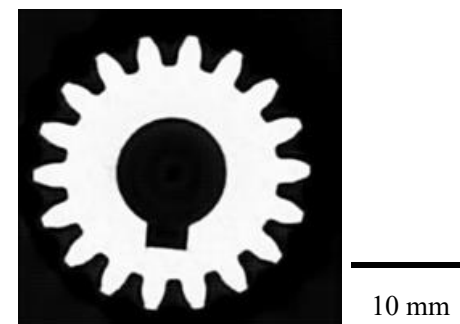
学習を行った画像生成モデルに図 6 の産業用 CT の断面画像を入力した結果を図 8 に示す。epoch 数は 1、2、5 である



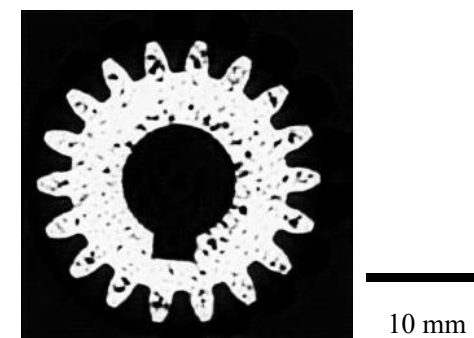
(a) 産業用 CT 断面画像



(b) epoch 数 : 1



(c) epoch 数 : 2



(d) epoch 数 : 5

図 8 画像生成モデルの出力

epoch1 で、産業用 CT の断面画像と比較してメタルアーチファクトが低減された画像が生成された。epoch5 で、メタルアーチファクトの低減と同時に形状に変化や変形が生じることが分かった。本研究で作成した画像生成モデルは epoch1 を最適な結果とした。

II-2-6 生成画像の評価

産業用 CT の断面画像と生成画像について、赤い直線上の画素値を測定（ラインプロファイル測定）した。図 9 は産業用 CT の断面画像、図 10 は生成画像でラインプロファイル測定結果である。

図 9、図 10 から、表 1 に示す画素値の均一性の指標となる標準偏差を求めた。画像生成モデルによる生成画像は、断面画像と比較し、空気、SUS とも均一性は増し、面画像とアーチファクトを低減させ、SUS およびその周辺の形状の鮮明化が実現できた。

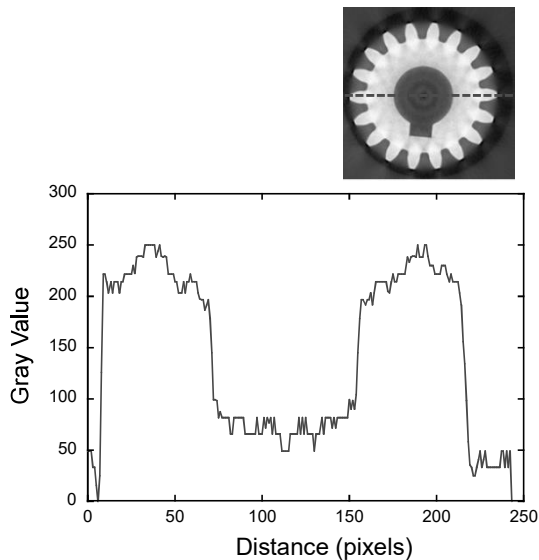


図 9 ラインプロファイル測定
(断面画像)

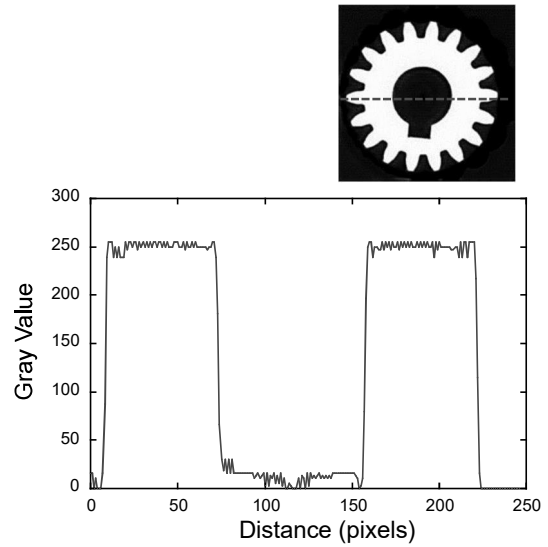


図 10 ラインプロファイル測定
(生成画像)

表 1 画素値の標準偏差

	Air	SUS
断面画像	21.69	24.56
生成画像	16.34	10.42

II-3 結論

本研究では、深層学習を用いた球間距離測定誤差補正手法の検討を行い、SUS 球を用いた評価治具により、球間距離測定誤差が $\pm 10 \mu\text{m}$ に低減可能であることを確認した。この結果から、深層学習を用いることで、X 線減弱係数の影響による測定誤差を効果的に補正できる可能性が示唆された。

さらに、深層学習技術を用いた画像生成モデルにより、産業用 CT で測定した SUS 製歯車の断面画像上のアーチファクトを低減し、形状の鮮明化を実現できた。また、内部欠陥の抽出精度の向上を確認

2024 年度大澤科学技術振興財団年報からの再録である。

した。

これらの成果は、産業用 X 線 CT 装置を用いた自由曲面を有する切削加工品の測定精度の高精度化に貢献するものである。

III 研究発表

1) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、須田高志、小林正和：深層学習による断面画像上のメタルアーチファクト低減方法、非破壊検査協会、2023 年度秋季講演大会講演概要集 pp.263-264

2) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、小林正和：Deep Learning による X 線 CT 断面画像上のアーチファクト低減効果、日本鑄造工学会、第 183 回全国講演大会講演概要集 pp.98

参考文献

1) 鈴木宏正、大竹豊、長井超慧、堀田淳、松川光彦：精密工学会誌 84 (2018)2,118

2) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、黒岩広樹：計測用X線CTの寸法計測結果に及ぼすワークの平均原子番号の影響、鑄造工学、第93巻、第10号 (2021)

3) 戸田裕之：X 線 CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用、共立出版、東京、(2019) pp.7-9.

4) 高橋勇一、中村哲也、小谷雄二：X 線 CT 装置の校正器、特開 2014-190933 (日本)、2014.10.6

5) 上杉健太郎、星野真人、竹内晃久：放射光を使った X 線 CT による 3D 観察、まてりあ、61 巻、2 号 69-71 (2022)

6) Jun-Yan Zhu, Taesung Park, Phillip Isola, Alexei A. Efros: IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), (2017)

謝辞

本研究の遂行するあたり、公益財団法人大澤科学技術振興財団のご支援をいただいたことに深く感謝申し上げます。