

# 2024年度共同利用研究報告書

2025年04月30日

所属・職名 朝日熱処理工業株式会社 技術室・なし

角 剛典

		整理番号	2024a007
1.研究計画題目	4n計測を必要とする形状物の三次元点群データ合成を自動化する研究		
2.新規・継続	新規		
3.種別	一般研究		
4.種目	短期研究員		
5.開催方法	ハイブリッド開催		
6.研究代表者	氏名	角 剛典	
	所属 部局名	朝日熱処理工業株式会社 技術室	職名 なし
7.研究実施期間	2024年04月01日(月曜日)～2024年04月03日(水曜日)		
	2024年09月30日(月曜日)～2024年10月02日(水曜日)		
	2025年03月24日(月曜日)～2025年03月27日(木曜日)		
8.キーワード	点群、位置合わせ		
9.参加者人数	4人		

## 10.本研究で得られた成果の概要

熱処理におけるワーク変形を評価するために、互いに欠損した点群を補完するための合成を目的とした剛体変換を、ガウスカーネルを用いたある種の適合度最適化問題と位置付けて実施した。丸棒型人工点群における点群の形状因子及び点の分布を変更して、試験的に適用してゆくことにより、この種の手法においては（１）空間的な点の分布が一様に近いこと、（２）特に欠損に寄与する方向に特別の注意を払って疎にする必要があること、が見出された。

（１）はすべての点を考慮する手法そのものに伴う自然な制約であり、（２）は欠損による悪影響を軽減するための追加的制約と位置付けられる。

（１）は点群処理の文脈において、ボクセルダウンサンプリングが確立していることから容易であると考えられるが、（２）は今回の丸棒型の場合、端面が欠損していることから軸の方向（長手方向）が重要な役割を果たすことが示唆されている。

従って、長手方向を精度よく得ることが実用上の課題であると考えられる。

実データ、とりわけ軸変形を生じ得る熱処理評価への適用を見据えると、円柱形を前提とせず長手方向を精度よく決めたい。

この課題と制約を踏まえて、丸棒型点群における長手方向を精度よく決めるための処方構築し、実データにおいてその有効性を検証した。

この結果を論文にまとめ、2025年4月30日現在Precision Engineering誌に投稿し査読中である。また、現在投稿中のこの論文の内容と結果を活用して、2025年度の短期研究員として研究課題名「光学式三次元スキャナを用いた変形シャフトの局所的な軸歪みの評価可能性」に従事している。

## 2024年 短期研究員 報告書

### 4 $\pi$ 計測を必要とする形状物の三次元点群データ合成を自動化する研究

#### 1. はじめに

製造業におけるワークの形状評価を光学式三次元スキャナで行う際、得られる点群データは、少なくとも対象物の表面を過不足なく、視覚的に充足していることが求められる。しかし、光学式 3D スキャナでは、カメラの死角となる領域の撮影が不可能であるため、これを補うには、ワークを再配置し、異なる視点から撮影した点群を合成する必要がある。

このような合成プロセスでは、相互参照に基づく位置合わせが不可欠であり、一般的には、最終的な精密位置合わせに Iterative Closest Point (ICP) 法が用いられる。その際、ICP の初期条件として、大域的な位置合わせを何らかの方法で事前に行う必要がある。

よく知られている通り、ICP 位置合わせは初期位置に対して敏感であり、不適切な初期化によって局所解に陥るリスクがある。また、この大域的な位置合わせは、インターフェースを介した手動操作で行われることが多く、属人的な手間が生じる。この属人性は、作業効率を下げるだけでなく、複数サンプルを系統的に処理する際にはボトルネックとなる。

したがって、局所解のリスクを回避し、かつ属人性を排除するためには、初期条件への依存性が低い位置合わせ手法の導入が重要であると考えられる。

本研究では、ICP 法に代わるアプローチとして、点群間の適合度に基づく最適化手法を導入した。具体的には、互いの点群の全ての点対のユークリッド距離に基づき、ガウス関数を適用し、その総和（適合度）を最大化することで、位置合わせの最適化を試みた。

#### 2. 定式化

ソース点群  $P = \{\mathbf{x}_{pi} = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) ; i=1, 2, \dots, N\}$  に対して、回転  $R \in \text{SO}(3)$  と平行移動  $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$  によって、ターゲット点群  $Q = \{\mathbf{y}_{qj} = (x_{qj}, y_{qj}, z_{qj}) ; j=1, 2, \dots, M\}$  との位置合わせを行う。

ソース点群の各点、 $\mathbf{x}_{pi}$  は回転  $R$  と平行移動  $\mathbf{t}$  によって、

$$\mathbf{x}'_{pi} = R\mathbf{x}_{pi} + \mathbf{t}$$

と変換される。

ユークリッドノルムを  $\|\cdot\|$  として、変換後のソース点群の  $i$  番目の点とターゲット点群の  $j$  番目の点の距離に対して、ガウスカーネル

$$K_{ij} = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}'_{pi} - \mathbf{y}_{qj}\|^2}{\sigma^2}\right)$$

を定義する。

本研究では、このカーネルの総和

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M K_{ij}$$

を最大化する回転  $R$  と平行移動  $\mathbf{t}$  を求めることで、点群 P と点群 Q の位置合わせを行う。

### 3. 実装

本研究における最適化は、`scipy.optimize.minimize` を用いて実装した。

回転はクォータニオン形式に類似するパラメータを採用設計を採用し、角度成分の取り扱いを安定化させた。

平行移動については、探索パラメータとして独立に設定し、同時最適化を行った。

### 4. 結果と分析

人工的に生成した、端面が互いに欠損した丸棒型点群を生成して、本手法による位置合わせを実行した。

理想的には、互いの点群は同じ丸棒のパラメータ、つまり、同じ半径と同じ軸長であるため端点座標の差が設計通りの値（直径と軸長）に収まると期待される。

この期待に基づいて、人工点群における振る舞いを確かめるためにいくつかのケースで実行してみた。

#### 4-1. 当該位置合わせ手法が有効なジオメトリの探索

丸棒（円柱型）人工点群において、片方の端面だけを欠損させる。

このような点群の生成においては、円柱のパラメータである軸長、半径（直径）に加えて、軸方向の間隔、円周方向の間隔、残された端面のメッシュ間隔（またはランダムに点を生成するか）を決める必要がある。

まずは、操作すべきパラメータを、直径、半径、軸方向の間隔のみとする。

端面はメッシュになっていることを前提とし、円周方向の間隔と端面のメッシュ間隔は、軸方向の間隔によって与えられる。

そのようにして生成した人工点群に対して位置合わせ手法が満足できる結果を与えるかどうかを確認しながら、満足な結果を与える条件を探索した：

#	軸長 L	軸方向の間隔 $\Delta z$	半径 R	結果と備考
1	50	0.5	6	X 方向に 0.1mm オーダーでズレあり
2	25	0.25	3	同上
3	25	0.125	3	セッションクラッシュ (Google Colab)
4	12.5	0.125	3	X 方向に 1mm 程度ズレあり
5	12.5	0.25	3	同上
6	12.5	0.50	3	同上
7	10	1.00	3	X 方向に 0.1mm 程度ズレあり
8	10	2.00	3	X 方向に 0.01mm オーダーでズレあり
9	100	2.00	6	端点座標の差においては理想的

以上のことから、点の間隔に対して半径や軸長は大きい方が望ましい結果を得られるのではないかという可能性が見出される。

総括すれば、点の空間密度がある程度低いことが要求されると考えられる。

#### 4-2. 軸方向間隔と角度間隔、メッシュ間隔を切り離す (空間密度の異方性の検証)

前セクションの探索により、 $\Delta z$ がある程度大きいことが要求されることは見出された。

従って、次は角度方向及び端面のメッシュ間隔の影響を独立に調べることにした。

また、端面はランダムに点を生成するパターンも考察してみることにして、以下の条件で位置合わせを実行した：

#	軸長 L	$\Delta \theta$	半径 R	端面分布	結果と備考
1	100	4°	5	$\Delta a=2.0$	Z 方向でわずかにズレ
2	100	2°	5	$\Delta a=2.0$	端点座標の差においては理想的
3	10	4°	3	$\Delta a=2.0$	X,Y 方向に $0.1 \mu\text{m}$ オーダーのズレ
4	10	4°	3	$\Delta a=0.1$	X 方向に 0.01mm 程度ズレあり
5	10	4°	3	$\Delta a=0.05$	X 方向に $1 \mu\text{m}$ オーダーのズレあり
6	10	4°	3	ランダム 100	XYZ で 0.1mm オーダーのズレ
7	10	4°	3	ランダム 500	XYZ で 0.01mm オーダーのズレ

前セクションにおける考察では、一様に空間的な点の密度が低いことを要求すると考えられたが、今回の探索の結果により、軸方向の密度と、端面および円周方向の密度とはある程度切り離して考えられる可能性が浮上した。

また、端面の点が完全にランダムであると結果を悪化させることも興味深い。

#### 4-3. 考察

前二つのセクションを踏まえると、当該手法が有効であるためには、以下のような対象点群における制約が考えられる：

1. 空間的には軸方向とそれ以外の密度の制約が異なる
2. 軸方向は特別に疎であることが要求される
3. しかし、軸方向以外も点密度それ自体は一樣であることが要請される

これらのうち、1. と 2. については、対象となる点群のもともとの非対称性、すなわち端面が互いに欠損していることに起因して、その影響を抑える必要性の示唆であると考えられる。

当該手法は、互いの点群のすべての点の点間距離を用いて、ある種の適合度を最適化する手法であるため、明確に欠損がある方向に対して、その影響を軽減する、あるいはほぼ非干渉にする必要があると考えられる。

また、3. においては、端面の点をランダムに生成した結果が好ましくない結果を与えることから、それが特に示唆される。

尤も、当該手法は前述の通り、互いの点群のすべての点の点間距離を用いて、ある種の適合度を最適化する手法であるため、前述のような異方性の要求を追加的に要求しつつ、点の空間的な密度が一樣であることは手法それ自体の要求だと考えられる。

ところで、このように振舞ったことだけでは実データへの応用が適わない。

そのため、これらの結果と考察から、実データに応用する際の条件を考えなければならない。

そして、その条件それ自体が、研究のための次の課題となると考えられる。

上述の項目をカテゴリ分けすれば、このように課題が抽出されると考えられる：

項目	課題
1. と 2.	軸方向（長手方向）を特別に疎にした点群の抽出。 すなわち、 <u>長手方向そのものの参照軸の精度良い抽出</u> 。
3.	空間密度の均一化 (点群処理ではボクセルダウンサンプリングにてほぼ実現可能)

従って、当該手法を用いて位置合わせを実施するためには、今回の場合は欠損の非対称が目立つ方向、すなわち長手方向の精度良い決定方法を考案することが課題として見出された。

#### 5. 円柱状点群の長手方向の精度良い抽出

前セクションの通り、当該手法による位置合わせの実施には、長手方向そのものを精度よく

抽出することが不可欠である。

人工点群において長手方向の軸を精度良く検出するだけであれば、円筒フィッティングなどの方法は挙げられるが、それでは実データ、ひいては報告者のような熱処理業界への適用を前提としている場合には、多少の軸歪みに対しても有効でなければならない。

このような制約を踏まえて、研究を推進し、現在、Elsevier 社の Precision Engineering 誌にて、

### “Geometric Tolerance Evaluation of Deformed Shafts Using Optical 3D Scanning”

というタイトルで論文にまとめて投稿しており、査読者による査読を受けている。

Elsevier 社に対する出版における誓約のため、この報告書では内容への言及は行わず、要旨のみの添付とさせていただきたい：

This study proposes a novel method for determining the accurate longitudinal reference axis within the measurement accuracy range (about tens of microns) from the point cloud data obtained by optical 3D scanning.

To achieve this, we developed an accurate centroid estimation method using convex hull construction and weighted centroid calculations to compute the centroid trajectory of point clouds.

Principal component analysis (PCA) was then applied to determine the reference axis.

This centroid trajectory is also used for evaluating geometric tolerance itself: as a robust profile along the longitudinal axis for straightness evaluation, and as a geometric origin for calculating the distance between the centroid and surface points in roundness evaluation.

We demonstrate our approach by applying it to the geometric tolerance evaluation of heat-treated shafts, improving straightness assessment by mitigating axis misalignment effects and providing a stable reference for roundness evaluation.

Its capability to quantify axis distortions in heat-treated shafts highlights its potential for industrial inspection applications.

## 6. まとめ

ガウスカネルを用いた、ある種の適合度最適化として位置合わせ問題を定式化して適用を試みた。

人工点群における試験的適用により、この種の最適化における、自然な制約である空間的点密度の一様性の担保と、欠損により特徴づけられる方向の特別なスパース性の要求が示唆された。

その方向とは丸棒の長手方向であり、この抽出を実データにおいて、多少の軸歪みを吸収して行うことが課題として見出された。

その課題については、論文化して Precision Engineering 誌に投稿し、査読中である。

## 4π計測を必要とする形状物の三次元点群データ合成を自動化する研究

整理番号	2024a007
種別	一般研究-短期研究員
研究計画題目	4π計測を必要とする形状物の三次元点群データ合成を自動化する研究
研究代表者	角 剛典 (朝日熱処理工業株式会社 技術室・なし)
研究実施期間	2024年4月1日(月)～2024年4月3日(水) 2024年9月30日(月)～2024年10月2日(水) 2025年3月24日(月)～2025年3月27日(木)
研究分野のキーワード	点群、位置合わせ
目的と期待される成果	<p>本研究では、光学式の三次元計測装置(三次元センサ)により取得される三次元点群データの合成の自動化を目指す。三次元センサでは共通して、カメラの死角の位置の情報を取得することができない。従って、対象の全体形状を三次元点群データとして得るためには、カメラの死角となる部位を補い合う点群データを取得し、これらを適切に合成する必要がある。</p> <p>点群処理の利活用が進む測量分野において、相補的な点群データの合成技術は、その自動合成まで含めて製品・サービス化されるほどに進んでいる。</p> <p>しかし、製造業を対象とした場合はそうではない。</p> <p>この場合には、カメラに対し裏面の情報を取得して初めて相補的な点群データの全てを得ることができるため、この制約が測量分野における自動合成とは異なる困難を生じる。</p> <p>例えば、測量分野ではターゲットを参照して位置を合わせることができる。</p> <p>しかし、製造業では対象を接地して計測を行う限り、裏面の情報を得るために対象を裏返す操作が要求される。この操作はターゲットとの位置ずれを生じるため、直接的な援用が難しい。</p> <p>従って、互いの点群を参照しながら位置合わせを行い、その後、合成して復元することになる。</p> <p>この復元作業では、互いの点群を適切に近づけておく必要がある。</p> <p>その選択は人の作業となり属人性を生じる上、その結果の妥当性・再現性も常に担保されるわけではないため、この問題を克服したい。</p> <p>本研究の成果として、裏面の情報の取得を要する場合にも、本来得られるべき全体形状を持った三次元点群データを、データとパラメータ指定だけで、つまり合成プロセスの属人性を排除して復元を行うための再現性ある処方を得られることが期待される。</p>
組織委員(研究集会)参加者(短期共同利用)	角 剛典 (朝日熱処理工業株式会社・なし)