平成29年度

戦略的基盤技術高度化•連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「X線CT装置を用いた

リバースエンジニアリング技術の高度化とシミュレーションへの展開」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者株式会社エイ・エス・アイ総研

目 次

| 第1章 研究開発の概要 | 1- |
|--|--------|
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 | |
| 1-2 研究体制 | |
| 1-3 成果概要 | 7 - |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口 | 11 - |
| 第2章 本論(1) 【1】サイノグラム補正アルゴリズムの開発 | 12 - |
| 2-1 概要 | 13 - |
| 2-2 【1-1】サイノグラムの作成 | 14 - |
| 2-2-1 CMMデータからのサイノグラム生成 | •14• |
| 2-2-2 X線CT装置からのサイノグラム作成 | 16 - |
| 2-3 【1-2】 高精度サイノグラムを算出する波形処理アルゴリズムの開発 | 18 - |
| 2-3-1 画像処理を活用した補正アルゴリズムの開発 | 18 - |
| 2-3-2 信号処理を活用した補正アルゴリズムの開発 | 21 - |
| 第3章 本論(2) 【2】サイノグラムからの3次元形状モデル作成技術の高精度化 | 25 - |
| 3-1 概要 | 26 - |
| 3-2 【2-1】2次要素メッシュ作成による曲面形状の再現性向上 | 26 - |
| 3-2-1 曲面近似法の開発 | 26 - |
| 3-2-2 形状再現性向上の評価 | 29 - |
| 3-3 【2-2】X線の線質硬化に対して頑健な高精度形状抽出 | • 31 • |
| 3-3-1 勾配の極大値面に基づく形状抽出 | •31• |
| 3-3-2 精度向上の評価 | 33 - |
| 第4章 本論(3) 【3】計算機援用システムX線CTのシームレス連結に関する研究開発 | 36 - |
| 4-1 概要 | 37 - |
| 4-2 【3-1】シミュレーションメッシュの生成とレンダリング機能の開発 | 38 - |
| 4-3 【3-2】計測現場におけるシミュレーション機能の開発 | 39 - |
| 最終章 全体総括 | • 43 - |
| 5-1 研究履行状況について | 44 - |
| 5-2 研究開発における課題と対処方法について | 44 - |
| 5-3 事業化に至るまでのスケジュール | 44 - |
| 5-4 販売戦略 | 46 - |
| 5-5 アドバイザーからの意見 | 47 - |

第1章

研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- ※ 中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針
- (二) 情報処理に係る技術に関する事項
 - 1 情報処理に係る技術において達成すべき高度化目標
 - (3)川下分野横断的な共通の事項
 - ①川下製造業者等の共通の課題およびニーズ
 - ウ.ものづくりにおける研究・開発・製造等の生産性向上を支援する技術の高度化

※ 研究開発の背景

ものづくりの現場では、コンピュータ技術の発達により、「設計」から「生産」までの製造プロセ スをデジタル化し、熟練技術者がいなくても一定水準のものづくりが可能となるデジタルエンジニ アリングシステムの導入が進んでいる。デジタルエンジニアリングシステムは、高機能 CAD/CAM システム、3次元造形システム、3次元計測システムを融合し、開発から製造までの効率化と高品 質化の実現が可能である。高品質、高性能、信頼性の高い製品を低コストで開発するためには、設 計の上流段階からデジタルエンジニアリングシステムを活用する必要がある。このシステムは、デ ジタルモデルの構築から様々なシミュレーションまで計算機上で利用することができ、原理上、実 モデルを利用した様々な性能試験を実施することなく製品の開発が可能である。特にシミュレーシ ョンは、詳細設計において、設計案が要求性能を満たしているか確認するために有用なツールとな る。川下製造業者である自動車メーカーは、設計にデジタルエンジニアリングシステムを活用し、 開発期間の長期化や人件費などを抑える努力が行われている。設計終了後、川下製造業者は、各部 品の製造を下請け企業へ依頼する。下請け企業は、中小企業が大半であり、コスト面で製造プロセ スにおいてデジタル化を導入することは難しい。また、量産品には金型を用いた成型手法が主流で あり、巣穴や型抜きを考慮した結果、生産現場の判断で金型の修正を行うケースが多い。そのため、 シミュレーションにより、コンピュータ上で安全性、耐久性、仕様確認等のために性能試験を実施 し、安全性を確保したとしても実際に部品を組み付ける場合には、強度試験や振動試験などの部品 の性能試験を実試料で実施することが不可欠となっている。特に、アドバイザーであるスタンレー 電気が製造しているヘッドライトは、リフレクタやレンズ等様々な部品を組み合わせるため、下請 け企業の数が多い。それ故、シミュレーション結果と実試料による性能試験との乖離が多くなり、 設計を一からやり直す危険性が高くなっている。このような現状から、川下製造企業では下記表に 示した要望が存在している。

| 川下製造業者の要望 | 技術説明 |
|--------------|-----------------------------------|
| 形状比較 | 試作品と CAD モデル、部品同士、耐久試験前後の部品等の形状比較 |
| 形状追跡 | 各工程ごとに試作品の形状変化の追跡 |
| 現物 CAE | 現物形状を計測して作成された現物モデルを用いたシミュレーション |
| CADへのフィードバック | 実験などを経て最適化された試作品形状をCADモデルに反映すること |

表 1.1 川下製造業者の要望

これらの要望を実現するために、CAD 図面と製造品を比較するリバースエンジニアリング技術の 開発が進展している。特に、X線 CT 装置は、リバースエンジニアリング技術の核として期待され ている。X線 CT 装置は、物体を様々な方向から X線で撮影した画像を再構成処理することで、物 体の内部構造を含む 3 次元画像を得ることができる。さらに、この画像を直接モデリングすること で、CAD 図面との比較や様々な構造解析に用いることが可能である。しかしながら、X線 CT によ る 3 次元モデリング法は、実用に耐えうるものではなく、現状、リバースエンジニアリングの実現 には程遠い。そのため、川下製造業者からは、高精度な 3 次元モデリングを可能とするリバースエ ンジニアリング技術の高度化が求められている。

本研究の研究課題と開発目標、開発目標に対しての実施結果等を表 1.2-表 1.4 示す。実施項目は 全て目標の 100%達成することができた。

| 【1】サイノグラムの補正 | アルゴリズムの開発 | | |
|--------------|-----------------|------------------|--------|
| 開発項目 | 開発目標 | 開発目標に対する実施結果 | 達成率(%) |
| 【1-1】 | | | |
| サイノグラムの生成 | ・管電圧、管電流、フィル | ・管電圧、管電流、フィルタ、 | |
| | タ、線源と試料台との距離、 | 線源と試料台との距離 | |
| | 線源と検出器との距離、焦 | (FCD)、線源と検出器との距 | 1000/ |
| | 点サイズを変更した際の全 | 離(FDD)、焦点サイズを変更 | 100% |
| | 体サイノグラムとエッジサ | した際の全体エッジサイノグ | |
| | イノグラムを生成するアル | ラムとエッジサイノグラムの | |
| | ゴリズムを開発。 | 算出が可能となった。 | |
| 【1-2】 | | | |
| 高精度サイノグラムを | ・【1-1】 で算出した全体サ | ・【1-1】 で算出した全体サイ | |
| 算出する波形処理アルゴ | イノグラムをエッジサイノ | ノグラムをエッジサイノグラ | |
| リズムの開発 | グラムで補正する波形処理 | ムで補正するアルゴリズムを | |
| | アルゴリズムを開発。 | 開発した。 | |
| | | | |
| | ・高精度サイノグラムとシ | ・小焦点サイノグラムを正解 | 100% |
| | ミュレーションで作成した | とし、開発アルゴリズムの評 | |
| | 正解サイノグラムを比較 | 価を実施した結果、RMSE(ず | |
| | し、最もズレが少ない最適 | れの度合い)を最大、大焦点サ | |
| | な波形処理方法を決める。 | イノグラムの 1/15 に縮小可 | |
| | ズレの度合いは、最小二乗 | 能となった。 | |
| | 法で 1/10 以下とする。 | | |

表 1.2 研究項目【1】の実施結果について

| | 1.3 研究項目【2】の実施結果(| こついい | Ĉ. |
|--|-------------------|------|----|
|--|-------------------|------|----|

| 【2】サイノグラムからの | 3次元形状モデル作成技術の語 | 高度化 | |
|--------------|-----------------|--------------------|--------|
| 開発項目 | 開発目標 | 開発目標に対する実施結果 | 達成率(%) |
| 【2-1】 | | | |
| 2 次要素メッシュ作成 | ・曲面形状を有する形状の | ・2 次曲面を要素として有す | |
| による曲面形状の再現性 | 再現性を向上させるため、2 | るメッシュを生成するアルゴ | |
| 向上 | 次曲面を要素として有する | リズムを開発した。 | |
| | メッシュを生成するアルゴ | | |
| | リズムを開発。 | | 100% |
| | | | |
| | ・従来の平面要素によるメ | ・ルビー球を用いて評価を行 | |
| | ッシュ形状と比較し、同じ | い、従来の平面要素と比較し | |
| | 要素数で 1/10 以下の形状 | た結果、同じ要素数で 1/10 | |
| | 誤差。 | 以下の形状誤差を実現した。 | |
| [2-2] | | | |
| X 線の線質硬化に対し | ・【1】で開発した補正アル | ・【1】で開発した補正アルゴ | |
| て頑健な高精度形状抽出 | ゴリズムに対応した CT 再 | リズムに対応した CT 再構成 | |
| | 構成アルゴリズムを開発。 | アルゴリズムを開発した。 | |
| | | | |
| | ・従来の形状抽出の精度は | ・ステップシリンダを用いて | 100% |
| | 検出器素子の 1/5 程度であ | 評価を行った結果、CMM で | 10070 |
| | るが、精細化された像を用 | 計測した円筒面からの偏差の | |
| | いて素子サイズの 1/10 以 | 平均値、標準偏差ともに素子 | |
| | 下の精度とする。 | サイズの 1/10 (12µm) 以 | |
| | | 下に収まっていることを確認 | |
| | | した。 | |

表 1.4 研究項目【3】の実施結果について

| 【3】計算機援用システムとX線CTのシームレス連結に関する研究開発 | | | | | | |
|--|---|---|--------|--|--|--|
| 開発項目 | 開発目標 | 開発目標に対する実施結果 | 達成率(%) | | | |
| 【3-1】 シミュレーションメッ シュの生成とレンダリン グ機能の開発 | ・既存のシミュレーション ソフト・寸法検査ソフトに インポート可能な汎用のデ ータ形式 *で、生成された形 状モデルを出力すること。 ※ Nastran フォーマット、 STL データ ・生成されたメッシュ、お よび再構成された CT ボリ ュームデータをレンダリン グする機能を有したソフト を作成する。 ・CMM と比較し寸法誤差が ±3.5µm 以内とする。 | ・既存のシミュレーションソ フト・寸法検査ソフトにイン ポート可能な汎用のデータ形 式*で、生成された形状モデ ルを出力できる技術を開発し た。 ・生成されたくメッシュ、およ び再構成された CT ボリュー ムデータをレンダリングする 機能を有したソフトを開発し た。 ・ステップシリンダを用いた 評価において、誤差の平均値 が±3.5µm 以内となってい ることを確認した | 100% | | | |
| 【3-2】 計測現場におけるシミ ュレーション機能の開発 | ・線形応力解析を行い、変 形図および応力図を可視化 する技術を開発すること。 ・解析結果を市販ソフトと 比較し、妥当性を検証する こと。 | ・静的応力線形解析ソフトを 開発した。また、研究項目【1】 と【2】を統合したGUIの開発 ・市販ソフト(Nastran)と 結果比較し、変位、応力共有 効桁6桁一致することを確認 した。 | 100% | | | |

1-2 研究体制

本事業の研究体制および課題解決に向けた各研究実施機関の取り組みを示す。





1-3 成果概要

本事業で行った各研究項目の成果を図 1.2-図 1.4 に示す。

| | | | | | 撮 | 象条件 | | |
|--------|------------|---------|------------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| 1 | 3 | 5 | 0 | No. | 1),5 | 2,6 | 3,7 | (4), |
| R | P | | 2 | 管電圧 (kV) | 300 | 100 | 280 | 100 |
| | ••• | | 6/6 | 管電流 (µA) | 160 | 50 | 160 | 50 |
| | | | | フィルタ | あり | なし | あり | なし |
| 2 | | 6 | 8 | FCD (mm) | 376 | 376 | 287 | 287 |
| | e l' | | 0 | FDD (mm) | 1005 | 1005 | 1007 | 1007 |
| 全体サイノグ | ラム(No.①~④) | エッジサイノグ | うム(No.5~8) | 焦点 サイズ | 大 | <i>\</i> \ | 大 | 小 |

全体サイノクラム(No.①~(4)) エッンサイノクラム(No.⑤~ エッジサイノグラム:エッジのみ強調したサイノグラム 撮像条件に関係なく生成可能

(a)研究項目【1-1】の成果



(b)研究項目【1-2】の成果 図 1.2 研究項目【1】の成果



(a)研究項目【2-1】の成果



誤差の平均値が±3.5µm 以内となっていること

(b)研究項目【2-2】の成果



ボリュームレンダリングの成果(STL データの拡大表示)

(a)研究項目【3-1】の成果



境界条件設定画面



要素情報のデジタル表示

(b)研究項目【3-2】の成果(1)





テトラ2次要素 テストモデル01

テトラ2次要素 節点数:63 要素数:18 節点数:252,466 要素数:167,936 テストモデル02

表 開発技術と市販ソフト(Nastran)との結果比較

| #=1 | テストモ | デル01 | テストモデル02 | | | | |
|------------|------|------|----------|----|--|--|--|
| 何里 | 変位 | 応力 | 変位 | 応力 | | | |
| Body force | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| O∶有効析6桁一致 | | | | | | | |

表 大規模モデル(shaft)の市販ソフト(Nastran)との結果比較(変位)

| nada | Feat | | | | Nastran | | | 差(Feat-Nastran)/Nastran | | |
|-------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------------------|-----------|--|
| node | Х | Y | Z | Х | Y | Z | Х | Y | Z | |
| 1001 | 2.00250E-07 | -8.46189E-06 | 2.11663E-05 | 2.00250E-07 | -8.46189E-06 | 2.11663E-05 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 1002 | 6.14522E-08 | -2.20639E-06 | 3.00482E-05 | 6.14520E-08 | -2.20639E-06 | 3.00482E-05 | 3.255E-06 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 1003 | 2.87029E-07 | -7.40914E-06 | -1.46446E-05 | 2.87028E-07 | -7.40914E-06 | -1.46446E-05 | 3.484E-06 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 1004 | 1.64364E-07 | -4.80173E-06 | 3.99471E-06 | 1.64364E-07 | -4.80173E-06 | 3.99471E-06 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 1005 | 1.49544E-07 | 3.05859E-06 | -2.94862E-05 | 1.49544E-07 | 3.05859E-06 | -2.94862E-05 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10001 | 7.43121E-06 | 2.56206E-05 | -2.59425E-04 | 7.43122E-06 | 2.56206E-05 | -2.59425E-04 | -1.346E-06 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10002 | 4.51915E-06 | -7.90426E-05 | -1.52192E-04 | 4.51915E-06 | -7.90426E-05 | -1.52192E-04 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10003 | 9.91629E-06 | 8.66147E-05 | -3.50364E-04 | 9.91629E-06 | 8.66147E-05 | -3.50364E-04 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10004 | 6.12588E-06 | 8.80944E-05 | -2.09546E-04 | 6.12589E-06 | 8.80944E-05 | -2.09546E-04 | -1.632E-06 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10005 | 1.76072E-06 | 4.15919E-05 | -6.19273E-05 | 1.76072E-06 | 4.15919E-05 | -6.19273E-05 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |

表 大規模モデル(shaft)の市販ソフト(Nastran)との結果比較(応力)

| | Feat | | | Feat Nastran | | | 差 (Feat-Nastran)/Nastran | | |
|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------------------|------------|-----------|
| Elom | σx | σy | σz | σx | σy | σz | σx | σy | σz |
| Liem | 最大主応力 | ミーゼス広力 | | 最大主応力 | ミーゼス応力 | | 最大主応力 | ミーゼス応 | |
| | (σ1) | | | (σ1) | | | (σ1) | カ | |
| 1 | -8.6164E-03 | -3.6928E-03 | -3.6928E-03 | -8.6164E-03 | -3.6927E-03 | -3.6928E-03 | 0.000E+00 | -2.708E-05 | 0.000E+00 |
| ' | 2.9904E-01 | 5.2861E-01 | | 2.9904E-01 | 5.2861E-01 | | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 2 | -1.6986E-02 | -7.2795E-03 | -7.2795E-03 | -1.6985E-02 | -7.2795E-03 | -7.2795E-03 | -5.888E-05 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
| 3 | 2.4007E-01 | 4.3686E-01 | | 2.4007E-01 | 4.3686E-01 | | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10001 | 1.1780E-02 | 4.8493E-02 | -2.0867E-02 | 1.1780E-02 | 4.8493E-02 | -2.0867E-02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
| 10001 | 5.6128E-02 | 1.2074E-01 | | 5.6128E-02 | 1.2074E-01 | | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |
| 10002 | -5.8720E-02 | -1.3741E-01 | -4.2609E-02 | -5.8720E-02 | -1.3741E-01 | -4.2609E-02 | 0.000E+00 | 0.000E+00 | 0.000E+00 |
| 10003 | 4.0539E-02 | 2.1299E-01 | | 4.0539E-02 | 2.1299E-01 | | 0.000E+00 | 0.000E+00 | |

(c)研究項目【3-2】の成果(2)

図 1.4 研究項目【3】の成果

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

名称: 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

住所: 〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-10

連絡窓口: 開発本部 開発企画室

Tel: 03-5530-2528 Fax: 03-5530-2458

第2章

本論(1)

【1】サイノグラム補正アルゴリズムの開発

2-1 概要

X線CT装置を用いた3次元モデリングの精度は、X線焦点サイズおよび検出器のピクセル数に 大きく依存しており、測定精度向上のためには、これらの物理的性能を向上させる必要がある。X線 は一般的に、電子線をターゲットに照射させることで発生させている。焦点サイズは、電子線を絞る ことで小さくなるが、その場合は管電圧および管電流をあげられないため、透過能力が落ち、金属材 料の内部観察ができない。逆に焦点サイズを大きくすれば当然、エッジの明瞭度が落ちる。

この問題を解決するために、試料のエッジ部分は小焦点 X 線源で、概形および内部は大焦点 X 線 源により計測可能であることに基づく、新しい計測手法を提案する。

図 2-1 のように、大焦点 X 線源により得られる断面画像は、透過能力が大きく物体の内部まで見ることができるが、物体の境界が不明瞭となる。一方、小焦点 X 線源では物体の境界が明瞭となるが、 透過能力が小さいため、内部で見えない領域が発生する。この両者の長所を生かすように、それぞれのサイノグラムを適切に統合するような、補正アルゴリズムを開発することが目的である。



<u>高精度な内部形状再現</u>のため、デュアル線源X線CT装置を用いた補正アルゴリズムを開発

図2-1 本研究項目の概要

本研究項目では、サイノグラムを CMM の測定データと実測から得る2種類を生成する方法を開発 した。その後、これらのサイノグラムを用いて、画像処理を活用した補正アルゴリズムと信号処理を 活用したアルゴリズムの開発を行った。その後、開発した補正アルゴリズムについて評価を行い、有 効性を確認した。 2-2 【1-1】サイノグラムの作成

2-2-1 CMMデータからのサイノグラム生成

CMM の測定データからサイノグラムを生成する技術を開発した。計算手順を図 2-2 に示す。図 2-3 に本研究で開発した技術を適用したサンプルを示す。図 2.2 の右図は、CMM 測定評価用の基準器である。また、中央の図の立方体は今回の測定サンプルの立体形状であり、その側面に並ぶ測定用の点群を左図に示している。図 2.4 から図 2.7 に算出結果を示す。







図 2-3 CMM 測定データを活用したサイノグラム生成用のサンプル



図 2-4 CMM からのサイノグラム算出結果(1)



図 2-5 CMM からのサイノグラム算出結果(2)



図 2-6 CMM からのサイノグラム算出結果(3)



図 2-7 CMM からのサイノグラム算出結果(4)

2-2-2 X線CT装置からのサイノグラム作成

形状および撮像条件に依存せず、サイノグラムを生成する技術を開発した。本研究は、補正アルゴ リズム活用のため、サイノグラムを全体サイノグラムとエッジサイノグラムに分離した。全体サイノ グラムは各座標の画素値を透過率としたサイノグラム、エッジサイノグラムは全体サイノグラムにエ ッジ検出の処理を行ったサイノグラムである。

エッジ検出では Sobel フィルタを活用した。Sobel フィルタは、ある注目画素を中心とした上下 左右の9つの画素値に対して、以下に示すような係数をそれぞれ乗算し、結果を合計する処理である。 本研究では水平方向および垂直方向に対し、下記の係数行列を活用した。

| -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 |
|----|---|---|---|---|----|
| -2 | 0 | 2 | 2 | 0 | -2 |
| -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 |

(a) 水平方向のカーネル

| -1 | -2 | -1 | 1 | 2 | 1 |
|----|----|----|----|----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 1 | -1 | -2 | 1 |

(b)垂直方向のカーネル

| f = (i - 1, j - 1) | f = (i, j - 1) | f = (i+1, j-1) |
|--------------------|----------------|----------------|
| f = (i - 1, j) | f = (i, j) | f = (i+1,j) |
| f = (i - 1, j + 1) | f = (i, j+1) | f = (i+1, j+1) |
| | | |

※ た(i, j)を注目画素とする。 iを水平方向、jを垂直方向とする

(c) 乗算対象の座標値

図 2-8 本研究で使用する Sobel フィルタのカーネル

上記処理を行った結果を図 2-9 に示す。図 2.8 より撮像条件に関係なく、全体サイノグラムとエッジサイノグラムを生成できているのが分かる。



図 2-9 全体サイノグラムとエッジサイノグラムの生成結果

次に補正アルゴリズムの基盤技術を開発するため、大焦点と小焦点の撮影を行い、ボケの違いを確認した。その結果を図 2-10 と図 2-11 に示す。この結果は、補正アルゴリズム開発の方針となる。



図 2-10 大焦点全体サイノグラムと小焦点サイノグラムのパターン比較



図 2-11 大焦点全体サイノグラムと小焦点サイノグラムの拡大図

2-3 【1-2】 高精度サイノグラムを算出する波形処理アルゴリズムの開発 2-3-1 画像処理を活用した補正アルゴリズムの開発

本研究では大焦点全体サイノグラムと大焦点エッジサイノグラムを活用した補正アルゴリズムを 開発した。以下に流れを示す。図 2-12 および図 2-13 に補正アルゴリズムの適用した結果を示す。

1. 全体サイノグラムからエッジサイノグラムを算出する。

2. 全体サイノグラムにステップ 1 で算出したエッジサイノグラムを合わせこむ。必要に応じて合わせこむ強さを調整する。

3. 各 View にステップ 1.-2.の処理を適用する。



全体サイノグラム



エッジサイノグラム



補正アルゴリズム適用結果

図 2-12 画像処理を活用した補正アルゴリズムの適用結果(1)



(a) 大焦点

(b) 補正アルゴリズム

図 2-13 画像処理を活用した補正アルゴリズムの適用結果(2)

次に補正アルゴリズムの評価を行った。評価の流れを示す。下記評価を実施した結果を図 2-14 に示す。

1. 試料に対し、焦点のみ変更した撮像条件で撮影を行い、各焦点の全体サイノグラムを生成 する。

2. 本研究で開発した補正アルゴリズムを適用し、大焦点全体サイノグラムから補正サイノグ ラムを算出する。

3. ステップ 1.およびステップ 2.で生成したサイノグラムを活用し、画像再構成を行い、断 面画像を取得する。

4. 中心差分により、各位置におけるエッジ座標を算出する。

5. 小焦点サイノグラムを入力としたステップ3より算出された値を正解とし、RMSEを算 出する。RMSE 算出の式は次の通りである。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(L_i - S_i)}$$

※N: 母数, Li:評価対象エッジ座標, Si:小焦点エッジ座標(正解データ)



開発した画像処理を活用した補正アルゴリズムにより、RMSE を最大で最大 1/15 に縮小可能となった。また、単純な形状だけでなく、実部品への適用も可能となった。今後は CMM 測定データを活用や後述する信号処理を活用した補正アルゴリズムとの組合せを行い、さらなる精度向上を目指す。

2-3-2 信号処理を活用した補正アルゴリズムの開発

本手法は、図 2-15 のようにデュアル X 線源 CT 装置で得られるマイクロサイノグラムとナノサ イノグラムを統合し、より高精度なサイノグラムを生成する手法である。初めに、両サイノグラムに 対し、畳み込み演算による信号処理を適用する。その後、シグモイド関数のような非線形関数を用い て確率分布関数をモデル化し、事後確率を最大化するようなサイノグラムを推定し、高精度サイノグ ラム出力とする。





次に理論的枠組みについて説明する。大焦点サイノグラムΨと小焦点サイノグラムΦが与えられた 時の事後確率分布密度pを下式に示す。

$$p(u|\Psi, \Phi) = \frac{p(\Psi, \Phi|u)p(u)}{p(\Psi, \Phi)}$$

本アルゴリズムは上式を最大化するするようなサイノグラムである下式を推定する。また、Uは確 率密度関数を表す記号である。

$$U = \operatorname{argmax} p(u|\Psi, \Phi)$$

上式による確率推定を行うためには、赤池情報量基準などに基づき十分な量のサンプルデータを学習する必要がある。しかし、既存のサンプルデータ量が著しく不足しており、事前学習は困難である。 そのため、簡略化した推定値や特徴量などを用いる必要がある。具体的には、以下の通りである。

まず、確率変数や状態変数などパラメータの数を極力少なくするため、確率モデルを以下のように 単純化した。また、pは離散確率を表す記号である。

$$p(\Psi, \Phi|u) = p(\Psi|u)p(\Phi|u)$$

uの確率分布密度は、 $u = \Psi$ 、 $u = \Phi$ は有限の値を持つものとする。ここでは、次に示す式に仮定した。なお、 δ はディラックのデルタ関数である。

 $p(u|\Psi, \Phi) = \delta(u - \Psi)P(u = \Psi|\Psi, \Phi) + \delta(u - \Phi)P(u = \Phi|\Psi, \Phi)$ 確率の法則により、次の式が成立する。

$$\int p(u|\Psi,\Phi)\,du=1$$

そのため、先ほど仮定した式に確率の法則を代入すると次の式が得られる。

 $P(u = \Psi | \Psi, \Phi) + P(u = \Phi | \Psi, \Phi) = 1$

次に、大焦点サイノグラムに対する小焦点サイノグラムの局所的高周波成分を、両者の存在確率を 反映する特徴量とした。また、高周波成分抽出のための畳み込み演算には、次式に示す Gaussian 微 分フィルタを用いた。

$$G_x(x,y) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\delta^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2}\right)$$
$$G_y(x,y) = \frac{-y}{\sqrt{2\pi}\delta^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2}\right)$$
$$(\Phi) = \sqrt{(G_x * \Phi)^2 + (G_y * \Phi)^2}$$

このとき、大焦点サイノグラムに対する小焦点サイノグラムの局所的高周波成分の比を、*G*(*Φ*)から大焦点サイノグラムの平均値と標準偏差により正規化した次式により定義する。

$$\overline{G}(\Phi) = \frac{G(\Phi) - \mu_{\Psi}}{\sigma_{\Psi}}$$

ここではG(Φ)が大きいほど小焦点サイノグラムの生成確率が1に近づくようにする。また確率分布 モデル関数として、その精度や安定性のため広く用いられている、シグモイド関数を用いる。

$$P(u = \Phi | \Psi, \Phi) = \frac{1}{1 + \exp(-\overline{G}(\Phi))}$$

なお、確率の法則により大焦点サイノグラムは以下となる。

$$P(u = \Psi | \Psi, \Phi) = 1 - P(u = \Phi | \Psi, \Phi)$$

最後に、事後確率分布を簡略化した近似として、以下のように期待値を用いる。

$$U = E(u) = \int p(u|\Psi, \Phi) u \, du$$

$$\int p(u|\Psi,\Phi)u \, du = \int \{\delta(u-\Psi)P(u=\Psi|\Psi,\Phi) + \delta(u-\Phi)P(u=\Phi|\Psi,\Phi)\}u \, du$$
$$= P(u=\Psi|\Psi,\Phi)\Psi + P(u=\Phi|\Psi,\Phi)\Phi$$

最終的に以下の式が得られる。

$$U = \frac{\Psi - \exp(-\overline{G}(\Phi))\Phi}{1 + \exp(-\overline{G}(\Phi))}$$

上記の計算モデルに従いアルゴリズムを構築するが、次元が大きすぎるため、簡略化する。アルゴ リズムを簡潔に表現するため上記計算モデルの連続値表現をそのまま用いるが、実際のプログラムで は計算を離散点上で行う。そのため、座標x,yはサイノグラム画像のピクセル座標*i*,*j*を用いる。以 下に処理の流れを示す。

1. サイノグラムのビュー番号 n に対し、すべての座標点に対して以下の計算を行う。

(1)小焦点サイノグラム $\Phi(x,y)$ に対し、高周波成分 $\tilde{\Phi}(x,y)$ を下式により算出する。

$$G_{\chi}(x,y) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\delta^3} \exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2})$$

$$G_y(x,y) = \frac{-y}{\sqrt{2\pi}\delta^3} \exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2})$$
$$\widetilde{\Phi}(x,y) = \sqrt{(G_x * \Phi)^2 + (G_y * \Phi)^2}$$
$$\widetilde{\Phi}(x,y) = \sqrt{\left\{ \int G_x(x-s,y-1)\Phi(s,t)dsdt \right\}^2 + \left\{ \int G_y(x-s,y-t)\Phi(s,t)dsdt \right\}^2}$$

(2)以下の式によりサイノグラム確率分布 $P(\Phi(x,y)|u) \ge P(\Psi(x,y)|u)$ を求める。また、 μ_{Ψ} 、 σ_{Ψ} はそれぞれ大焦点サイノグラムの平均と標準偏差である。

$$\overline{G}(x,y) = \frac{\widetilde{\Phi}(x,y) - \mu_{\Psi}}{\sigma_{\Psi}}$$

$$P(u(x,y) = \Phi(x,y)|\Psi(x,y), \Phi(x,y)) = \frac{1}{1 + \exp(-\overline{G}(x,y))}$$

$$(\Psi(x,y)|u) = 1 - P(\Phi(x,y)|u)$$

(3)ビュー番号 n に対応する高精度サイノグラム
$$U(x, y)$$
を次式により求める。

$$(x, y) = E(u) = \int p(u|\Psi, \Phi)u \, du$$

$$= \int \{\delta(u - \Psi)P(u = \Psi|\Psi, \Phi) + \delta(u - \Phi)P(u = \Phi|\Psi, \Phi)\}u \, du$$

$$= P(u = \Psi|\Psi, \Phi)\Psi + P(u = \Phi|\Psi, \Phi)\Phi$$

$$= P(\Psi(x, y)|u)\Psi(x, y) + P(\Phi(x, y)|u)\Phi(x, y)$$

2. ビュー番号nを1増やして1.に戻り、全てのビューに渡って繰り返す。

3. 上記処理で精度が悪い場合、シグモイド関数を用いた確率分布関数を下記式に適用し、 再度上記処理を行う。

$$P(u = \Phi | \Psi, \Phi) = \frac{\exp(-(\Phi/\theta_{\Phi})^2)}{1 + \exp(-(G(\Phi) - \mu_{\Psi})/\sigma_{\Psi})}$$

次に補正アルゴリズムの評価を行った。評価の流れを示す。評価方法は画像処理を活用した手法で記載した方法と同じである。評価を行った結果、信号処理技術を活用した補正アルゴリズムでも同様に、 大焦点サイノグラムで生じていたボケを低減することが可能となった。



図 2-16 信号処理を活用した補正アルゴリズムの評価結果

本研究で開発した信号処理を活用した補正アルゴリズムを活用することで、エッジの鋭さとエッジ の位置の両方を大焦点サイノグラムと小焦点サイノグラムの中間にすることが可能となった。

今後の課題としては、事前学習が可能となるような十分な学習用データの取得とそれによる補正ア ルゴリズムの改良である。一例として、ニューラルネットワーク、ベイジアンネット、確率的勾配法 が考えられる。

本論(2)

【2】サイノグラムからの 3次元形状モデル作成技術の高精度化

3-1 概要

X線 CT 装置により再構成される 3 次元画像は通常、画素値が直交格子状に並んだグレースケー ル画像である。そのため、格子に沿っていない物体形状を抽出するには、画素の値を用いて形状を推 定する必要がある。しかしこの推定精度には限界があり、X線 CT による 3 次元形状抽出の精度を 低下させる要因の一つとなっている。そこで本事業では、サイノグラムデータから直接ポリゴンメッ シュを生成する手法を提案する。本項目の最終目標は、CT 装置から出力される X線投影像列である サイノグラムから、高精度に曲面形状を再現した形状モデルを生成することである。

開発したアルゴリズムにより、模擬データによる検証で精度向上を確認することができた。図 3.1 に従来手法(左図)[文献 1] と提案手法(右図)により得られたメッシュの比較を示す。従来は均 ーサイズの正方格子から1次要素メッシュを生成しており、曲面上に階段状のアーチファクトが存在 し、またエッジ上に鋸歯状のエリアシングアーチファクトが確認される。比して、提案手法は曲面形 状を2次要素により滑らかに表現することができており、またメッシュ最適化手法によりエッジを精 度よく近似可能である。以下に提案法の詳細を示す。



図 3-1 従来手法(左図)と提案手法(右図)により得られたメッシュの比較

3-2 【2-1】2次要素メッシュ作成による曲面形状の再現性向上

3-2-1 曲面近似法の開発

(1) 2次要素の表現方法の検討

2次要素で構成されるメッシュ生成を行う上で、適切にメッシュの要素を表現するための数学 的な表現方法の検討を行った。通常のシミュレーションで用いられる2次要素は、曲線である要 素の辺を表現するために、その辺が通過する1点を指定する形式で表現される。この表現方法は シミュレーションの際には扱いやすいが、形状モデル生成を行う上で最適なものであるとは言え ない。そこで、提案法では、メッシュの要素を「三角形 Bezier 要素」として表現することとし た。下記に詳細を述べるが、Bezier 要素は任意の次数の形式である次要素の形式で定義されて おり、2次要素に留まらず3次以上の要素も容易に表現可能である。 n次の三角形 Bezier 要素は、3つのパラメータu, v, wを用いた3次元空間内のパラメトリック S曲面として、次のように定義される。

$$\mathbf{S}(\mathbf{u}) = \sum_{\substack{i \\ i+j+k=n}}^{i} \mathbf{C}_{i} B_{i}^{n}(\mathbf{u})$$

 $\mathbf{i} = (i, j, k)^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{u} = (u, v, w)^{\mathrm{T}}, \ u + v + w = 1$

ここで、 C_i は制御点と呼ばれる3次元空間上の点の座標である。次数n = 2の場合には図 3-2 左に示すように、制御点は6つとなる。また、パラメータはuu, v, wの3変数として表記されて いるが、等式u + v + w = 1により制約を受けるので2自由度を持ち、図 3-2 右に示すようにパ ラメータ空間において三角形上の点となる。基底関数 $B_i^n(u)$ はBernstein 多項式と呼ばれるもの であり次のように定義される。

$$B_{\mathbf{i}}^{n}(\mathbf{u}) = \frac{n!}{i!\,j!\,k!} u^{i} v^{j} w^{k}$$

三角形 Bezier 要素は三角形のコーナ以外の制御点は通過しないが、辺上の点を計算すること により、通常のシミュレーションで用いられる表現形式に容易に変換可能である。



図 3-2 三角形 Bezier 要素: 2 次の場合の制御点(左図)とパラメータ空間(右図)

(2) 三角形 Bezier 要素によるメッシュ生成アルゴリズムの開発

本事業で研究開発する2次要素メッシュ生成アルゴリズムは、提案者がこれまでに開発した1 次要素メッシュ生成法であるサイノグラムポリゴナイザー[文献 2]を拡張するかたちで設計し た。計算の基本的な流れはサイノグラムポリゴナイザーに従い、メッシュ形状の最適化のルーチ ンを前述の三角形 Bezier 要素に対応するものに変更した。下記にその計算の詳細を述べる。

メッシュ生成は、2種類の計算処理を交互に繰り返すことにより行われる。1つ目の処理は四面体メッシュ上でのCT再構成計算であり、2つ目の処理はBezier要素の制御点の位置の最適化である。これら2つの計算を十分に繰り返すことで、エッジやコーナを再現し、かつ曲面形状を高精度に近似した2次要素メッシュを得ることができる。具体的な流れは下記の通りである。 また、図3-3に2次元の場合における計算の様子を示す。 1. ランダムに3次元空間上の点群を生成する。

2. Delaunay 四面体分割を行い、各四面体の重心位置における CT 値をフィルタ逆投影法により計算する。(図 3-3 左)

3. CT 値を等値面の T_{iso} 閾値と比べることで、すべての四面体を物体の内部 (T_{iso} より大きい)と外部 (T_{iso} より小さい)に分類し、内外の境となる境界面の三角形メッシュを抽出する。

4. 抽出された 1 次要素三角形メッシュを三角形 Bezier 要素の初期形状とし、各要素の面内 に 3 つのサンプル点を生成する。

5. 二分法を用いて各サンプル点が等値面上に乗るように移動し、サンプル点の位置と法線 (正規化された勾配ベクトル)を計算する。(図 3-3 中央)

6. サンプル点の情報を用いて三角形 Bezier 要素の制御点位置を最適化する。(図 3-3 右)

7. 最適化の目的関数である近似誤差が許容値以内に収まったら計算を終了する。そうでない 場合は Bezier 要素のコーナの3点の制御点を点群としてステップ2に戻る。



図 3-3 2 次元の場合の三角形 Bezier 要素抽出アルゴリズムの説明 左:CT 再構成結果(下)、初期三角形分割(上)。中央:閾値処理の結果とサンプル点の位置 と法線ベクトル。右:最適化により得られた三角形 Bezier 要素とその制御点

上記のステップ6で三角形 Bezier 要素の制御点を最適化する際には、次の式で表される目的 関数を最小化する。

$$E = \sum_{i} \sum_{j=1}^{3} \left(\mathbf{S}^{(i)} \left(\mathbf{u}_{j}^{(i)} \right) - \mathbf{q}_{j}^{(i)} \right)^{2} + \left(\mathbf{S}_{u}^{(i)} \left(\mathbf{u}_{j}^{(i)} \right) \cdot \mathbf{g}_{j}^{(i)} \right)^{2} + \left(\mathbf{S}_{v}^{(i)} \left(\mathbf{u}_{j}^{(i)} \right) \cdot \mathbf{g}_{j}^{(i)} \right)^{2}$$

ここで、 $S^{(i)}(\mathbf{u})$ は*i*番目の三角形 Bezier 要素であり、 $S_u^{(i)} \ge S_v^{(i)}$ はそれぞれパラメータ*u*, *v*に 関する微分を表す。また、図 3-4 に示すように、 $\mathbf{q}_1^{(i)}$, $\mathbf{q}_2^{(i)}$, $\mathbf{q}_3^{(i)}$ は $S^{(i)}$ に対応する3つのサンプ ル点の位置であり、 $\mathbf{g}_1^{(i)}$, $\mathbf{g}_2^{(i)}$, $\mathbf{g}_3^{(i)}$ は各点での法線を、 $\mathbf{u}_1^{(i)}$, $\mathbf{u}_2^{(i)}$, $\mathbf{u}_3^{(i)}$ は対応するパラメータを表 す。



図 3-4 各三角形 Bezier 要素の制御点位置の最適化で用いるサンプル点

3-2-2 形状再現性向上の評価

実測データであるサイノグラムには X 線源のスポットサイズや X 線の散乱現象に起因する画像の ボケやノイズが存在するため、アルゴリズムの検証において始めから実測のサイノグラムを用いるこ とは得策ではない。そこで、ノイズやボケの問題を排除する目的で模擬データを用いてアルゴリズム の研究開発を行った。今回、模擬データとしては再構成された CT 画像を模した陰関数を用いた。陰 関数の値は、物体の内部で 1、外部で 0 を持つように設定し、物体の境界面は値 0.5 の等値面によ り定義されるものとした。

まず、基本形状として球面を用いた結果を図 3-5 右に示す。要素数は 964 である。比較として 同数の要素を用いて拡張前の手法 [文献 2] で作成した 1 次要素メッシュが左図である。 1 次要素を 用いた場合にはポリゴンの粗さが目立つが、 2 次要素を用いることにより曲面の形状をよく再現でき ていることが分かる。また、 2 次要素上に密に点を配置し、 再現したい球面からの誤差を計算したと ころ、 球の直径 20 [mm]に対し、 すべての点が±2[µm]以内に収まっていた。 通常の CT スキャ ンでは計測物を程度のボクセルに分解することを考えれば、 この精度はボクセルサイズの 10 分の 1 オーダであり、 曲面形状の十分な再現性を有することが確認できた。



拡張前のサイノグラムポリゴナイザーで作成した1次要素メッシュ(左) 拡張したサイノグラムポリゴナイザーによる2次要素メッシュ(右)

図 3-5 球面の模擬データによる検証結果

続いて基本形状を組み合わせた形状を用いた検証を行った。図3-6 に示すように、平面と円筒が組み合わされており、エッジや角を有する形状である。図3-5 と同様に1 次要素との比較により有効性の確認を行った。要素数は2766 である。サイノグラムポリゴナイザーの特長はエッジや角の再現が可能である点であるが、その特長を保存しつつ曲面形状である円筒面を再現可能であることが確認できた。



拡張前のサイノグラムポリゴナイザーで作成した1次要素メッシュ(左) 拡張したサイノグラムポリゴナイザーによる2次要素メッシュ(右) 図 3-6 エッジと角を有する模擬データによる検証結果

図 3-6 に示した結果においては、わずかな曲面の折れの存在が確認された。そこで、図 3-7 のようにカラーマップを用いて、メッシュ最適化の際に用いられる誤差関数の値を可視化した。折れの存在する箇所においては、形状の近似誤差が大きくなっていることが分かった。このような箇所においては、メッシュを適合的に分割することで適切な近似形状が得られることが予想できるため、製品化にて解決すべき問題とする。



曲面が不適切に折れている箇所では、誤差が大きくなっていることが分かる 図 3-7 三角形 Bezier 要素の制御点における近似誤差の値を可視化した結果

3-3 【2-2】X線の線質硬化に対して頑健な高精度形状抽出

本事業では、項目【2-1】の2次要素メッシュを使った曲面形状の再現性向上に加えて、形状の 数学的定義を改良することによる寸法精度向上を行う。この改良は、X線の線質硬化の影響で不均 ーな CT 値が算出されるケースでも、精度よく形状を抽出できることを目的とする。具体的には、 従来の等値面による形状定義から、勾配の極大値面による定義へ変更を行った。

既存の 1 次要素メッシュを生成するサイノグラムポリゴナイザーに対して、改良を加えた。図 3-8 に、その結果と有効性を示す。下段左が改良前の結果、下段右が改良後の結果であり、カラー マップは正しい球面との誤差を表している。改良前は、ルビー球が樹脂に埋没しているために線質 硬化が発生し、20 [μm] 以上の誤差が発生している個所が存在する。比べて、改良後では、その 誤差をおおよそ半分程度に抑えることができている。以下の項目で、行った改良に関する技術的な 詳細を述べる。



上段中央から右:入力サイノグラム

下段左: 従来の等値面として抽出された球形状(あてはめ直径は7.157 [mm]) 下段右: 提案する勾配の極大値面として抽出された球形状(あてはめ直径は7.140 [mm])。

3-3-1 勾配の極大値面に基づく形状抽出

X線CT画像の値はX線の減弱係数を表すため、物体が存在しない点ではゼロになり、物体が存在する点では材質固有の値となる。そのため、単一材質の物体をスキャンした場合には、その材質に対応するCT値の半分の値により定義される等値面を表面形状として抽出すればよい。しかしな

がら、ほとんどの産業用 CT 装置には白色 X 線源が搭載されているため、X 線の線質硬化により透 過長に依存して平均的な減弱係数が変化してしまい、 CT 値は材質固有の値からずれてしまう。 図 3-9 の右に CT 値が均一となっていない画像の例を示す。 このような CT データに対して等値面 抽出を行うと、 右上の図のように CT 値が下がっている箇所で形状が縮んでしまい、 歪んだ形状が 抽出されてしまう。



上段中央と右:等値面による形状抽出結果、下段中央と右:勾配の極大面による形状抽出結果 図 3-9 CT 値が不均一な場合(左)の形状抽出の結果

上記の問題を解決するために近年よく用いられる手法として、勾配の極大値面を用いる手法が挙 げられる。勾配の極大値面とは、図 3-10 に示すように CT 画像の勾配の大きさ(隣接画素の値 の差)を考え、その極大点(右図の橙色の点群)の集合により構成される曲面である。ここで、極 大点を定義するためには方向場を考える必要があるが、多くの場合には画像の勾配ベクトルの方向 が用いられる。この定義は、画像処理の分野でよく知られている Canny のエッジ抽出法 [文献 3] で使われている。図 3-9 右下に示すように、勾配の極大曲面により抽出した形状は CT 値が 不均一であっても形状の歪みが生じにくい。また、等値面は閾値の選び方により形状の寸法値が若 干変化してしまうが、勾配の極大値面を用いればそのような問題が生じないという利点もある。



勾配の大きさの極大点は、右図における橙色の点 図 3-10 2 次元の CT 画像を用いた勾配の極大面の説明

本事業において、線質硬化などに起因する形状抽出の精度低下を低減するために、勾配の極大値 面を採用するものとした。最終的には、2次要素メッシュを生成するサイノグラムポリゴナイザー の作成を目指すが、本年度は勾配の極大値面を 1 次要素メッシュをとして抽出するアルゴリズム を作成した。以下にそのアルゴリズムの詳細を述べる。

提案する形状抽出法は、初期メッシュの頂点を勾配が極大となる点へ山登り法により移動させる ことにより計算される。具体的には、下記のステップを行う。

1. サイノグラムポリゴナイザーにより等値面を1次要素メッシュとして抽出する。

2. メッシュの各頂点において、勾配の大きさを微分した下記のベクトルを計算する。

$$\nabla \|\nabla I\| = \nabla^2 I \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}$$

ここで、IはCT値を表し、VIは勾配ベクトル、V²Iはヘッセ行列を意味する。

3. メッシュの各頂点vを初期メッシュの法線ベクトルnに沿って、以下の式により移動させ

$$\mathbf{v} \leftarrow \mathbf{v} + \lambda \nabla \| \nabla I \| \cdot \mathbf{n}$$

ここで、移動のステップサイズを意味するはメッシュ全体で同じ値を使うものとし、∇||∇/||の ノルムの最大値に反比例する値とした。

4. 各頂頂点の移動量が十分に小さい場合には計算を終了する。そうでないならば、ステップ 2 へ戻る。

上記のステップ3において、CT 値を2 階まで偏微分する必要があるが、サイノグラムを偏微 分した値を逆投影することにより高精度に計算可能である。

3-3-2 精度向上の評価

る。

勾配の極大値面を用いるように改良したサイノグラムポリゴナイザーの有効性を確認するために、 図3-11 中央の写真に示すアルミ製の5段のステップシリンダを用いて実験を行った。実寸は表3-1 を参照されたい。このステップシリンダは CT 装置の寸法精度を評価することを目的に産業技術総合 研究所で設計された形状である。撮像に用いた CT 装置はコーンビーム型であり、管電圧 180kV、 プリフィルタは厚さ 0.5 [mm] の銅板を用いた。フラットパネル検出器は 2048×2048 個、検出 器ピッチは 0.2 [mm] であるが、ノイズの影響を低減するために 2×2 のビニングを行った。サイ ノグラムの画素サイズは回転軸の位置に換算して 120 [µm] であり、通常のボクセルを用いた CT 再構成はこの値がボクセルサイズとなる。本実験においては、ボクセル上への再構成は行わないが、 サブボクセル精度の形状抽出を目指す観点ではこの値が参照値となる。なお、撮像枚数は 800 枚で ある。

続いて、抽出した形状と実すを比較することにより、寸法精度の評価を行った。表 3-1 にその結果を示す。実寸は接触式の座標計測器を用いて、各段の中央付近の断面円の直径を計測した値を用い

た。ステップシリンダは、内側にストレートの抜き穴が開いており、その直径も内径として評価に利用することが可能である。また、上から4段目と5段目の内径の値は、座標計測器のスタイラスが届かなかったため、評価の対象外とした。CT撮像においてはステップシリンダを傾けて計測を行ったため、底面に平面あてはめを行うことにより高さを定義する基準面を作成した。表より、等値面により得られた形状では、一部の箇所は実寸とよく合っているものの、大きく外れている箇所が存在する。比べて、勾配の極大値面を用いると、ほとんどの箇所において10分の1ボクセルサイズ以内で実寸と一致していることが分かる。また、上側で一部誤差が大きい理由は、基準面が傾いていることが考えられるため、今後は計測基準となるデータムの決め方を工夫する必要がある。繰り返し再現性を確認する目的で、上記の実験は3回行っている。3回ともほぼ同じ結果が得られたため、数値データは1回目のものを記載した。

同様にテトラ2次要素生成による曲面形状の再現性向上を図った。その結果を図3-12に示す。 その結果、平面要素によるメッシュ形状と比較し、同じ要素数で1/10以下の誤差に抑えることが できた。



従来の等値面(左)に比べて、改良した勾配の極大値面(右)では歪みが半分程度に抑えられている 図 3-11 アルミ製ステップシリンダを用いた形状の歪みの評価

| | 接触式計測器 外径 / 内径 [mm] | 等値面の誤差 外径 / 内径 [µm] | 極大値面の誤差 外径 / 内径 [µm] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 段目: 高さ 54mm | 19.999 / 10.008 | +12 / +1 | -11 / -11 |
| 2 段目: 高さ 44mm | 29.991 / 10.030 | +6 / -23 | -6 / -14 |
| 3 段目: 高さ34mm | 40.001 /10.008 | +13 / -3 | -6 / -6 |
| 4 段目: 高さ24mm | 49.978 / | +23 / | -6 / |
| 5段目: 高さ14mm | 59.974 / | +2 / | -4 / |



フィッティング球の直径誤差 12.3μm
 フィッティング球の直径誤差 0.4μm
 既存のソフトウェア 1 次要素(2千個)
 開発したソフトウェア 2 次要素(2千個)
 図 3-12 テトラ2 次要素生成による曲面形状の再現性向上結果

参考文献

[文献 1]

W. E. Lorensen, and H. E. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", ACM siggraph computer graphics, Vol. 21, No. 4, 1987.

[文献 2]

D. Yamanaka, Y. Ohtake, and H. Suzuki, "The Sinogram Polygonizer for Reconstructing 3D Shapes", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 19, No. 11, pp. 1911–1922, 2013.

[文献3]

J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698, 1986.

第4章

本論(3)

【3】計算機援用システムと X線CTのシームレス連結に関する研究開発

4-1 概要

サイノグラムを入力とし、形状を既存のシミュレーションソフト・寸法検査ソフトにインポート 可能な汎用のデータ形式(Nastran フォーマット、STL データ)変換する技術を開発した。また、 2 次要素のテトラメッシュを生成する技術、出力されたメッシュ、再構成された CT データをレン ダリングする機能の開発を行った。そして、研究項目【1】と【2】を融合し、CT 計測システムと CAD / CAE / CAT などの計算機援用システムをシームレスに連結するためのソフトウェア技術開 発した。統合した後、ステップシリンダを用いた評価において、 3 次元測定器(CMM)と比較した 結果、誤差の平均値が±3.5µm 以内となっていることを確認した。

その後、プリ・ポスト機能を備えた GUI の設計と各モジュールのインターフェイス、サイノグラムからテトラ要素メッシュを生成するモジュールの実装、線形静的応力解析の機能追加に伴う境界条件設定画面の追加、線形静的応力解析の結果表示において節点情報(変位、応力)をデジタル表示する機能の追加、入力画面・表示画面の操作性向上を行った。現物 CAE の一例として、CT 再構成後に生成されたテトラメッシュ(1 及び 2 次要素)を対象とする有限要素法による線形静的応力解析の開発を行なった。開発技術の検証として、汎用構造解析の市販構造解析ソフト(Nastran)との解析結果を比較した。その結果、変位及び応力共有効析 6 桁一致し、開発技術が妥当性を有することがわかった。



計算機援用システムとX線CTのシームレス連結に関する研究開発

4-2 【3-1】シミュレーションメッシュの生成とレンダリング機能の開発

サイノグラムに対して、STL データとテトラメッシュを出力し、レンダリング可能な技術を開発 した。その結果を図 4-2 に示す。また、ステップシリンダを用いた評価において、 3 次元測定器 (CMM)と比較した結果、誤差の平均値が±3.5µm 以内となっていることを確認した。その結果を 図 4-3 に示す。



STL データの生成



ボリュームレンダリングの成果(STL データの拡大表示)

図 4-2 STL データ出力技術およびレンダリング機能開発の成果



図 4-3 ステップシリンダを用いた誤差平均値の評価

4-3 【3-2】計測現場におけるシミュレーション機能の開発

提案技術を盛り込んだ各ソフトをシステム的に利用できるようにGUIの開発を行った。主な機能 を示す。また、開発したソフトウェアの画面を図4-4、システム概略を図4-5に示す。

(1)高精度サイノグラム生成(研究項目【1】)

大焦点並びに小焦点サイノグラムを読み込んで高精度サイノグラムを生成し表示する。

(2)メッシュ CT 再構成(研究項目【2】)

CT パラメータを読込み FEM 用メッシュデータ(1次、2次要素)を生成する。 (3)線形静的応力解析(研究項目【3】)

テトラ1次および2次要素による線形静的応力解析機能を有する。

荷重は節点荷重、自重、強制変位および面圧力荷重を与えることができる。また、これらの荷重 を組み合わせた解析も可能である。



実行(A法)ボタン 実行(T法)ボタン

図 4-4 開発したソフトウェアの画面



図 4-5 本事業で開発したソフトウェアのシステム概略

次に、リバースエンジニアリングを実用化するためにテトラ1次および2次要素による線形静的 応力解析ソフトを開発した。開発した解析で選択可能な荷重の種類は節点荷重、自重、強制変位お よび面圧力の4種類である。この4種類の荷重を自由に組み合わせて解析することが可能である。 本事業で開発したソフトウェアに対し、幾つかのモデルで解析を行い、市販ソフト(Nastran)と結果 を比較た。その結果、反力、変位および応力は有効桁6桁一致し、妥当性を有することを確認した。 解析モデルを図4-6および図4-7、妥当性の評価結果を表4-1から表4-4に示す。なお、市販ソ フトと比較し、有効数字6桁以上一致している場合、Oが記載されている。



・テトラ1次要素 節点数:24 要素数:36 ・テトラ2次要素 節点数:63 要素数:18

図 4-6 テストモデル (小規模)

| ±₹ 4 | テトラ ^ | 1 次要素 | テトラ2次要素 | | |
|-------------|-------|-------|---------|----|--|
| 何里「 | 変位 | 応力 | 変位 | 応力 | |
| Nodal force | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Body force | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 | |

表 4-1 テストモデル(小規模)における解析結果の妥当性評価(荷重 1 種)

表 4-2 テストモデル(小規模)における解析結果の妥当性評価(混合荷重:2種)

| 荷香 1 | 芦手 つ | テトラ | 1 次要素 | テトラ2次要素 | |
|-------------|-------------|-----|-------|---------|----|
| | 19里∠ | 変位 | 応力 | 変位 | 応力 |
| | Body force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nodal Force | Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Nodal Force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Body force | Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Nodal Force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Disp. Load | Body force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pressure | Nodal Force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Body force | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 |

| 表 4-3 | テストモデル | (小規模) | におけ | る解析結果の妥当性評価 | (4 | 種混合荷重) |
|-------|--------|-------|-----|-------------|----|--------|
|-------|--------|-------|-----|-------------|----|--------|

| 芸手の知り合わせ返 | テトラ1次要素 | | テトラ2次要素 | |
|-------------------------|---------|--------|---------|---------|
| 何里の組み百行は順 | 変位 | 応力 | 変位 | 応力 |
| Nodal Force+Body force | 0 | 0 | \cap | \cap |
| +Disp. Load+Pressure | U | \cup | U | U |
| Disp. Load+Nodal Force | \circ | 0 | \circ | \circ |
| +Body force+Pressure | 0 | U | 0 | 0 |
| Pressure+Disp. Load | \circ | 0 | \circ | \circ |
| +Nodal Force+Body force | 0 | U | 0 | 0 |
| Body force+Pressure | 0 | | 0 | 0 |
| Nodal Force+Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 |



節点数:35,273、要素数:167,936 テトラ1次要素

節点数:252,466、要素数:167,936 テトラ2次要素

図 4-7 テストモデル (大規模)

| 甘青す | テトラ | 1 次要素 | テトラ2次要素 | | |
|-------------|-----|-------|---------|----|--|
| 何里丨 | 変位 | 応力 | 変位 | 応力 | |
| Nodal force | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Body force | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Disp. Load | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Pressure | 0 | 0 | 0 | 0 | |

表 4-4 テストモデル(大規模)における解析結果の妥当性評価

また、開発技術における主メモリーの最適化及び処理時間の短縮を試みた。主メモリーの短縮は、 「縮小可能な配列の調査を行い縮小を図る」、「使用していない変数の削除」、「未使用 Format 文の 削除」を行った。処理時間の短縮は、「不必要な処理の調査と削除」、「Do ループ内の If 文を少なく する」、「大きなループでの関数呼び出しを削減」を行った。





5-1 研究履行状況について

本事業は計画通りの研究内容を実施した。各研究共同体の各構成者は事業計画に対し遅延無く遂行 した。同様に、共同体の各構成者は当初予算を予定通り執行しており、予算上でも遅滞なく履行し た。また、当初の計画通りに各研究項目は全て目標を達成した。製品化に向けて各研究成果を統合 し、GUIを駆使して利便性を考慮したシステムを構築した。各研究項目の成果や概要は第1章から 第4章を参照していただきたい。

5-2 研究開発における課題と対処方法について

参画機関同士で個別及び合同会議を通じて技術や進捗の検討及び情報共有を頻繁に行なっており、 研究開発体制に問題はなかった。推進会議時にいただいたアドバイザーからの意見は最終章 5-5 ア ドバイザーからの意見を参照していただきたい。

研究実施機関とプロジェクトリーダーを中心に問題解決に当たる体制ができた。申請時、プロジェ クト開始後もアドバイザーの方々から情報を得るように努めている。また、アドバイザーが参画して いる該当分野の研究会あるいは CT 装置メーカーや関連ソフトの展示会などに参加して最新の動向 や市場ニーズ情報を得ている。

サポイン事業は開発した事業を成功させることが最終目標である。社内打合せに当社の他部門から も参加してもらっており、製品化後、迅速に顧客を獲得し、事業化を推進する。

5-3 事業化に至るまでのスケジュール

事業化に至るまでのスケジュールを表 5-1 に記載する。事業化は主に導入期、成長期、成熟期の 3 つにわける。各期間に行う内容は以下のとおりである。

① 導入期(H30年度)

アドバイザーからの意見を集約し、製品化へ向けたソフトウェアの整備 販売確保を中心に実施。開発品の性能を産業界に提案

② 成長期(H31年度~H33年度)

市場投入後、開発品の特性や優位性をアピール

トライアル期間を設け、ユーザーに利用していただく機会を増やす

アドバイザーに利用していただき、適用分野の拡大を目指す

③ 成熟期(H34 年度~)

ユーザーの意見を積極的に取り入れ、ソフトウェアをバージョンアップ

| 声 类 左 庄 | 導入期 | 成長期 | | | 成熟期 | |
|----------------|-------------|-----|-----|---------|-----|--|
| 尹未牛皮 | H30 | H31 | H32 | H33 | H34 | |
| サンプルの出荷 | ── → | | | | | |
| 追加研究 | _ | | | | | |
| 製品等の販売 | | | | | | |

表 5-1 事業化に至るまでのスケジュール

また、導入期(H30年度)に行う内容を記載する。導入期では、以下に示す5つの実施項目を予定 している。なお、スケジュールを表 5-2 に示す通りである。

<ソフトウェアの評価>

アドバイザーへ貸し出しを行い、本事業で開発したソフトウェアの評価 <補正技術の改良>

X線の減衰や検出器のノイズなどの補正に関する改良

<実用化に向けた品質改良>

有限要素メッシュの品質をチェック

<改良技術の評価>

改良した技術を実装したソフトウェアの評価

<製品化に向けた準備>

マニュアル、カタログ、ライセンス・キーなどの整備

以上の項目を1年間実施し、平成31年4月に販売を開始する予定である。

| 中佐百日 | H30年度 | | | | |
|-----------|-------|------|----------|------|--|
| 天旭項日 | 4~6月 | 7~9月 | 10~12月 | 1~3月 | |
| ソフトウェアの評価 | | | | | |
| 補正技術の改良 | | | → | | |
| メッシュ品質の改良 | | | | | |
| 改良技術の評価 | | | | | |
| 製品化に向けた準備 | | | | | |

表 5-2 導入期(H30年度)のスケジュール

5-4 販売戦略

販売にあたり実施体制を図 5-1 に示す。販売は、エイ・エス・アイ総研が直販形態で実施するが、 川下事業者のユーザーと関わりのあるCT装置および計測器メーカーからの販売形態も予定する。 また、開発モジュールを川下事業者の装置(CT、CMM)へ組み込む方法での販売も併せて考える。



図 5-1 販売実施体制

本事業で開発したソフトウェアのアピールポイントは次の3点である。

- ・高精度なポリゴンメッシュの出力
- ・サイノグラムポリゴナイザーを活用した高精度な物体形状面抽出
- ・開発したソフトウェアでリバースエンジニアリングおよび線形静的応力解析が可能

これらの機能を持ち合わせた商品は市場に未だないため、これら差別化できる特徴を生かして販売 を促進していきたい。販売価格は、競合製品のVG Studio Maxよりも約40%安価な価格設定を 行い、中小企業への拡大・浸透も図る。現段階では表 5-3 のように一般企業向けに買い取り(永久 ライセンス)価格 350 万円、年間ライセンスを 200 万円、教育機関には買い取り価格 70 万円、 年間ライセンス 40 万円を予価とする。なお、機能の一部をオプション化して、購入し易くして、 ユーザー層の拡大を図る。

| | 買い取り (万円) | 年間ライセンス (万円) |
|------|--------------|-----------------|
| 一般 | 350 | 200 |
| 教育機関 | 70 | 40 |

| 表5-3 | 販売価格(税抜き) | 予格 |
|------|-----------|----|
| | | |

事業目標は10年間で60以上のソフトウェアライセンス獲得とする。施策を以下に示す。

- •H314月の販売開始を目指す。
- ・販売開始3年後に売り上げ 2,000 万円以上を目標
 - エイ・エス・アイ総研の既存顧客へのアプローチ(例: 航空宇宙産業の非破壊検査)
- ・プログラムの期間限定貸し出し
- ・ユーザーの声を反映したソフトウェアのアップグレードを年に1回継続的に実施
- ・大手商社からの営業支援を獲得(H33 以降)

5-5 アドバイザーからの意見

本事業中に開催した研究開発推進委員会やアドバイザー向けの個別デモ活動等で伺った内容を以下に示す。

<H27年度>

・2次要素は社内の構造解析でよく使っていて精度も良いことがわかっており是非、システムに取り入れて欲しい。

・ピン角の再現性は機械部品のシミュレーションで重要なので是非行って欲しい。

・要素の高次化は学術的にも興味深い。2次のみではなくより高次へ拡張出来ればより精度を必要とする光学シミュレーションへも対応できるのではないか。

・デュアルX線CT装置で撮影された形状がどの程度鮮明に再現されているか知りたい。 <H28年度>

・補正アルゴリズムに形状認識技術を取り入れて精度向上を図って欲しい。

- 各装置メーカーの測定データや様々な出力形式に対応して欲しい。
- ・形状の複雑さによってメッシュの粗密度を調整できる機能が欲しい。
- ・CAEへの応用だけではなく計測にも活用を考えてほしい。

<H29年度>

・応力解析を必要としない場合もあるので、応力解析モジュールをオプションとして扱うのもよい

・GUIをわかり易く、特に専門知識が無くても操作できるようにした方が良い。

•再構成時の CT 値はボクセル再構成を一回試行して当りをつけるとのことだがユーザー にとっては閾値設定が難しいかもしれない。 寸法精度が最適となる CT 値を知りたいとこ ろである。

・他商品に対するアドヴァンテージを示せることが肝要である。

※今後もアドバイザーの方々に個別にご意見・コメント等をいただき製品化に向けたシステム構築 に役立てゆく。

以 上