# サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化

機械加工科	主任	研究員	福	田	洋	平
機械加工科	主任	研究員	梅	木	宣	明
研究企画課	主任	研究員	瀧	内	直	祐
長崎大学大学院工学研究科	教	授	矢	澤	孝	哲
長崎大学大学院工学研究科	助	教	大	坪		樹

本研究は、長崎県内で構築されている航空機エンジン部品のサプライチェーンを強化することを目的としてい る。航空機エンジン部品の製造を行う県内企業からのニーズに基づき、①ブレードの高品位仕上加工技術の開発、 ②ブレード形状と加工条件から仕上面品質を予測するシステムの開発に取り組むとともに、宇宙・エネルギー産 業への拡大を図りたいという県内企業の要望に応えるため、③超耐熱合金の加工技術開発に取り組む。本報告は、 工作機械の主軸に取り付けられた工具のエッジを高精度に計測するシステムを開発し、評価した結果である。

## 1. 緒言

平成 30 年の長崎県航空機産業クラスター協議会の 発足を契機に航空機産業進出に向けた県内企業の意欲 が高まり、工業技術センターでは令和元年度から令和 3年度の3年間、県内企業の航空機産業への新規参入 を促すため、戦略プロジェクト研究「航空宇宙関連産 業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化」に取り 組んできた<sup>[1-3]</sup>。しかしその間、新型コロナウィルス感 染症拡大の影響により航空機機体部品の需要は一時的 に減少し、新規参入への足踏みが余儀なくされた。-方、航空機エンジン部品は、定期的な部品交換による 安定した需要が見込めることから、長崎県内でサプラ イチェーンが構築され、今後のアフターコロナにおい ては需要拡大も見込める。本研究では、長崎県の航空 機産業の拡大に向け、航空機エンジン部品の製造技術 の高度化に取り組み、サプライチェーンの更なる強化 を図る。

本研究は航空機エンジン部品のブレード加工におけ る生産性の向上と表面性状の向上との両立を図るもの である。県内企業は、表面性状と工具寿命の突発的な ばらつきを抑えたいという課題を抱えており、①従来 よりも高度なプロセス管理(切れ刃管理、主軸の動的 振れ管理、切れ刃の転写性管理)を提案し、現場への 適用を図る。また、②新製品立ち上げ時のNCプログ ラミングのトライ&エラーを削減するため、AI技術 を活用し、ブレード形状と加工条件をインプットする ことで仕上げ面の表面粗さを予測するシステムを開発 する。更に、③宇宙・エネルギー産業への横展開を目 指した超耐熱合金加工への技術応用を図る。 本報告は、工作機械の主軸に取り付けられた工具の エッジを高精度に計測するシステムを開発し、評価し た結果を報告する。

## 2. 計測原理

前報<sup>[4]</sup>において、工作機械主軸の振れを測定し、主 軸の振れがエンドミル加工面の表面性状に及ぼす影響 を評価した。一方、主軸の振れが無い理想的な条件に おいても、多刃工具の各切れ刃形状の不揃いや、工具 と工具ホルダとの取り付け誤差などがあった場合、 図1に示すように表面性状の悪化を生じさせる。



図1 各切れ刃の形状が不揃いな工具による 加工面のイメージ

ボールエンドミルによるブレード加工おいては、加 工面に対する工具軸の傾斜を一定に保ちながら加工す る方法が多く採用されている。表面性状の悪化を防ぐ ためには、加工面の創成に寄与する各切れ刃の一部分 に対して、各切れ刃形状の不揃いと、工具と工具ホル ダとの取り付け誤差などがどのように作用しているか を高精度に計測する必要がある。

開発する装置に求められる仕様として、①非接触、 ②高精度エッジ検出および③機上計測が挙げられる。 これらを実現するため、空間周波数フィルタリング、 長作動距離設計の無限補正対物レンズ、およびチュー ブシステムを採用した計測装置の開発に取り組んだ。

### 2.1 空間周波数フィルタリング

高精度エッジ検出手法として採用した、空間周波数 フィルタリングを用いたエッジ検出法の計測原理を 図2に示す。測定物にレーザを照射すると、エッジ部 からは透過光と回折光が発生する。この時、受光素子 上に像を結像させると、透過光と回折光が干渉し、測 定物のエッジの判別が困難になる。輝度情報のライン プロファイルでは、エッジ付近がなだらかな曲線とな り、エッジ位置の判別が難しい。そこで、空間周波数 フィルタとして機能するアンチピンホールをレンズ1 の後側焦点位置とレンズ2の前側焦点位置に設置する。 これにより透過光が遮断され、回折光のみで像が結像 される。取得画像上では、明一暗一明の像が得られ、 エッジ位置は暗線となる。輝度情報のラインプロファ イルでは、エッジ位置は二つの極大値の間の極小値と なり、定量的なエッジ検出が容易になる。



#### 3. 光学設計および定盤上での評価

#### 3.1 要求仕様

開発した装置の要求仕様を表1に示す。ブレードの 仕上面には表面粗さ Rz1.6  $\mu$ mよりも高い品位が要求 され、工作機械上で1  $\mu$ mの各刃の不揃いを確実に捉 える必要があるため、計測分解能は0.1  $\mu$ mとした。 また、計測対象となるボールエンドミルのボール半径 は R6 mm と R8 mmを想定しており、測定時の安全性と 作業性を考慮して、対物レンズの作動距離は20 mm以 上とした。装置サイズは、当センターの牧野フライス 製作所製マシニングセンタD500のテーブル( $\phi$ 500 mm) 上に設置可能であることとした。

#### 3.2 照明系

使用したレーザの仕様を表2に示す。装置を小型化 する観点から光源はレーザダイオードモジュールとし、 光学的なエッジ分解能を高めるため、波長は青色を採 用した。また、イメージング光学系鏡筒内での散乱に よる迷光を防ぐため、レーザダイオードモジュールと 測定対象物の間にピンホールを配置し、受光素子の観 察視野から外れる光を遮断した。

表1 要求仕様

計測分解能	0.1 $\mu$ m
作動距離	20 mm 以上
装置サイズ	φ500 mm 以内

表2 レーザ仕様

メーカ	THORLABS
型式	CPD405
ピーク波長	404.6 nm
出力	4.4 mW

# 3.3 イメージング光学系

# 3.3.1 対物レンズ

開発する装置には、高倍率、高分解能、および長作 動距離が要求されるため、長作動距離用無限補正対物 レンズと結像レンズを組み合わせた構成とした。この 構成によって、対物レンズを交換するだけで光学倍率 を変更することが可能となり、装置の汎用性を高める ことができる。対物レンズと結像レンズの仕様を表3 に示す。

表3 対物レンズ仕様および結像レンズ仕様

対物レンズ			
メーカ	ミツトヨ		
型式	M-PLAN APO SL 20X		
倍率	20 倍		
作動距離	30.5 mm		
分解能	1.0 $\mu$ m		
結像レンズ			
メーカ	ミツトヨ		
型式	MT-2		
倍率	2倍		
焦点距離	400 mm		

# 3.3.2 受光素子

使用した小型 CMOS カメラの仕様を表4に示す。画素 サイズは縦横ともに3.45 µm であり、光学20 倍の対 物レンズと光学2 倍の結像レンズを組み合わせること によって、1 画素あたりの分解能は0.0863 µmとなる。 ゲイン、露光時間、およびフレームレートは専用のソ フトウェアを用いて任意に設定することが可能である。

メーカ	オムロンセンテック
型式	STC-MBS163U3V
撮像素子	モノクロ CMOS
有効画素数	1440 (H) $\times$ 1080 (V)
セルサイズ	3.45 $\mu$ m(H) $\times$ 3.45 $\mu$ m(V)
撮像エリア	4.97 mm(H) $\times$ 3.72 mm(V)

表4 小型CMOS カメラ仕様

#### 3.3.3 リレーレンズ

空間周波数フィルタリングを実現するためには、結 像レンズの後段に1組のリレーレンズを設ける必要が ある。光学調整の容易性、瞳の伝播、および回折光取 り込みの観点から、リレーレンズは焦点距離 100 mm で直径 25.0 mm の平凸レンズを採用した。

### 3.3.4 分解能の評価

設計した光学系の計測分解能を確認するため、定盤 上にリレーレンズを含む光学系を組み、評価実験を実施した。評価基準には一目盛が10 μmの反射型対物ミ クロメータを用いた。

ミクロメータ目盛部の投影画像と輝度情報のライン プロファイルを図3に示す。反射型対物ミクロメータ に光を透過させて取得した画像であるため、エッジ部 は不明瞭であるが、輝度情報のラインプロファイルに おいて、4目盛分(40  $\mu$  m)の画素数は460 pixels となっており、1画素あたりの分解能は0.087  $\mu$  m で あることが確認できた。

## 3.4 アンチピンホール

空間周波数フィルタリングにおいて、ピンホールは 透過光成分のみを通過させ、アンチピンホールは透過 光成分のみを遮断する役割を果たす。ミラーの反射膜 の一部を除去することで透過光成分のみを遮断し、空 間周波数フィルタリングを実現できることが確認され ており、開発する装置においてもこの手法を採用した。

設計した光学系に適したアンチピンホールのサイズ を確認するため、ガラス基板にアルミコーティングを 施した平面ミラーに対して、ボール半径が RO.3 mm の CBN ボールエンドミルを用いてφ200 μm、φ300 μm、 φ400 μmのアンチピンホールを形成した。アンチピンホールの顕微鏡観察画像を図4に、各アンチピンホールを用いて取得した画像と、輝度情報のラインプロファイルを図5に示す。なお、測定対象にはカッターナイフの刃を用いた。





図4 平面ミラーに形成したアンチピンホール



図5 アンチピンホール径が像に及ぼす影響

ラインプロファイル解析の結果において、二つの極 大値とその間の極小値との差が大きいほど、カッター ナイフのエッジを明瞭に捉えているといえる。3条件 の実験結果から、開発するシステムには最も明瞭に エッジを捉えることができたφ200 μmのアンチピン ホールを採用した。

暗線幅について、二つの極大値の距離は約 2.0  $\mu$ m となっている。光学分解能 1.0  $\mu$ mの対物レンズと光 学倍率 2 倍の結像レンズを用いていることから、本光 学系の光学分解能は 2.0  $\mu$ m 相当となっており、暗線 の細線化を図るためには対物レンズの変更が必要となる。

# 4. 計測手順およびソフトウェア

### 4.1 計測手順

マシニングセンタの手動パルサを用いることで、 テーブル上に設置した計測システムと主軸に取り付け られたボールエンドミルの相対位置を精密に調整し、 座標情報を取得できる。

ボールエンドミルの任意の位置の切れ刃エッジを計 測する手順を以下に示す。

- ボールエンドミルのシャンク径は既知であり、 主軸に取り付けられたボールエンドミルの シャンク部エッジ計測することによって、工具 軸の座標を取得する。
- 2. ボールエンドミル先端のエッジを計測するこ とにより、工具先端の座標を取得する。
- ボールエンドミルのボール半径は既知であり、
  幾何学計算によって計測対象位置の座標を取得する。
- 手動パルサを用いて計測対象座標に位置決めし、主軸を手で回して切れ刃エッジが明瞭に見える角度に調整する。
- ラインプロファイル解析によってエッジを計 測する。

# 4.2 ソフトウェア

前述した手法によりエッジを計測するにあたって、 ソフトウェアに要求される仕様を以下に示す。

- 1. 取得画像をリアルタイム表示できること
- 2. 任意の角度でのラインプロファイル解析が可 能であること
- 3. リアルタイムで取得画像のラインプロファイ ル解析が可能であること

上記の3つを実現するソフトウェアとして、本シス テムではオープンソースの画像処理ソフトウェア ImageJ を採用した。また、リアルタイム解析には WebCam Capture プラグインを使用した。

### 5.機上計測システム

開発した装置の外観写真を図6、光学部品配置図を 図7に示す。リレーレンズを含む長い光路を工作機械 のテーブル上に配置するため、4枚の平面ミラーを用 いて光路を蛇行させ、幅 385 mm、奥行き 200 mm のメ インプレート上に納めた。また、チューブシステムを 採用することで光学部品を可能な限り一体化し、装置 移設時の光学部品のズレ、工作機械上における振動の 影響、および外乱光の影響を低減している。さらに、 アンチピンホールを形成した平面ミラーを一軸ステー ジでスライドすることにより、投影画像とアンチピン ホール画像を容易に切り替えることができる。

> アンチピンホール / CMOSカメラ







### 6. 加工実験

開発した装置の効果を検証するため、振れ調整機構 を備えた工具ホルダを用いたボールエンドミルによる 平面加工実験を実施した。加工実験の条件を表5、振 れ調整前後のエッジ計測結果を図8、加工面の断面プ ロファイルを図9、加工面の拡大写真を図10に示す。

開発した装置を用いることで、調整前の2枚の切れ 刃の不揃いが1.8 μmであることを確認できた。また、 輝度情報のプロファイルを見ながら工具の振れを調整 することによって、2枚の切れ刃の不揃いを 0.3 μm に低減することができた。

断面プロファイルと観察写真から、2枚の切れ刃の 不揃いを精密に調整することによって、表面粗さが良 好な加工面を生成できることが確認された。

表5 実験条件

工具ホルダ	大昭和精機	
	振れ調整式 RA ホルダ	
工具	2枚刃ボールエンドミル	
ボール半径	R3 mm	
工具傾斜	20° (チルト角)	
主軸回転数	$5000 \text{ min}^{-1}$	
一刃あたりの送り	0.2 mm/tooth	
切込み	0.1 mm	









図10 加工面の拡大写真

# 7. 結言

工作機械の主軸に取り付けられた工具のエッジを高 精度に計測するため、空間周波数フィルタリング、長 作動距離設計の無限補正対物レンズ、およびチューブ システムを採用した機上計測装置の開発に取り組んだ。

開発したシステムを用いることで、工作機械の主軸 に取り付けられたボールエンドミルの切れ刃の不揃い を 0.1 µm の分解能で計測することができた。

さらに、開発したシステムと振れ調整機構を備えた 工具ホルダを併用することで、加工面の創成に寄与す る各切れ刃の不揃いに対して、サブミクロンオーダー の調整が可能となった。

また、加工面の創成に寄与する各切れ刃の不揃いを 調整することで、加工面の表面粗さを改善できること が確認された。

# 参考文献

- [1] 福田、瀧内、三木:長崎県工業技術センター研究 報告、No. 49, pp. 1-5, 2020.
- [2] 福田、瀧内、三木:長崎県工業技術センター研究 報告、No. 50, pp. 1-4, 2021.
- [3] 福田、瀧内、三木、小林、荒井、佐藤、水野:長 崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 1–5, 2022.
- [4] 福田、瀧内、梅木:長崎県工業技術センター研究 報告、No. 52, pp. 1-4, 2023.