

《様式B》

研究テーマ 「測定器と人がともに成長する画像情報に基づいた研削加工補助システムの開発」

研究責任者 所属機関名 中部大学

官職又は役職 講師

氏名 古木 辰也 メールアドレス furuki@isc.chubu.ac.jp

共同研究者 所属機関名 株式会社黒田精機製作所

官職又は役職 岐阜工場・製造チームリーダー

氏名 若杉 真央

(令和2年度募集) 第33回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

研削加工の技能者スキル依存度を軽減することを目的に、回転中砥石表面画像から砥石表面情報を定量化し、砥石異常状態を作業者に伝達する装置およびシステム開発を行った。

はじめに、高速で回転する研削砥石表面の撮影が可能な装置の開発を行った。通常、高速回転体の撮影には高価な高速度カメラを必要とするが、当該装置は安価なCMOSカメラに視覚効果であるストロボ撮影を組み合わせることで砥石表面を任意の回転角で撮影することを可能とした。パーソナルコンピュータおよびシングルボードコンピュータを組み合わせることで複数の電子機器と光学機器を一括制御することを可能とした。また当該装置を操作する作業技術者の負担を減らすべく、簡単かつ直観的に操作が可能なグラフィカルユーザインターフェイスを備えたソフトウェアを搭載している。

次に、アルミニウム合金 A6061 に対して研削加工を実施した砥石の回転中砥石表面画像に対して砥石異常判定システムを開発した。モーションブラーや砥石作用面形状に依存する照明の反射度合い、噴霧したクーラントによる低解像度化やノイズなど、これらを除くしなければ、砥石作用面状態を正しく判定できない。したがって、砥石部と目詰り部を明瞭に区別するための輝度分布のヒストグラム平坦化処理技術、砥石部と目詰り部の区別が明瞭にならない微小ノイズのバイラテラルフィルタを用いたノイズ除去技術、FAST アルゴリズムと Harris コーナ評価を用いた目詰り部を検出する画像解析技術、1つの目詰り部を複数の目詰りと判断しないためのプロブ解析による摩耗部のセンタリング処理技術、目詰り部特徴量を演算するための HoG 特徴量解析技術、解析した目詰り部特徴量を教師データとするサポートベ

クタマシン（教師あり機械学習）モデルの構築を行うことで、砥石表面情報である砥石目詰まり率の定量化手法を開発した。目詰り判定の誤判定率は最大約 4%と極めて小さく、従来は熟練技能者でなければ判定困難であったインプロセスな砥石異常判定を自動化した。また、開発システムは回転中の砥石作用面画像と目詰り率を常に技術者に提示しているため、この情報を閲覧することで技術者の砥石状態判定スキルの向上に貢献している。

当該試作装置は継続して共同研究者である黒田精機製作所にて稼働させて、砥石および製品良否判定の機械学習習熟度の向上および安定した運用の可否を判断した後、他加工機への展開を図る予定である。当該装置の実現に大きく貢献しているのはソフトウェア部分であり、特許公開により模倣が容易なことから特許申請による公開は避ける見込みである。

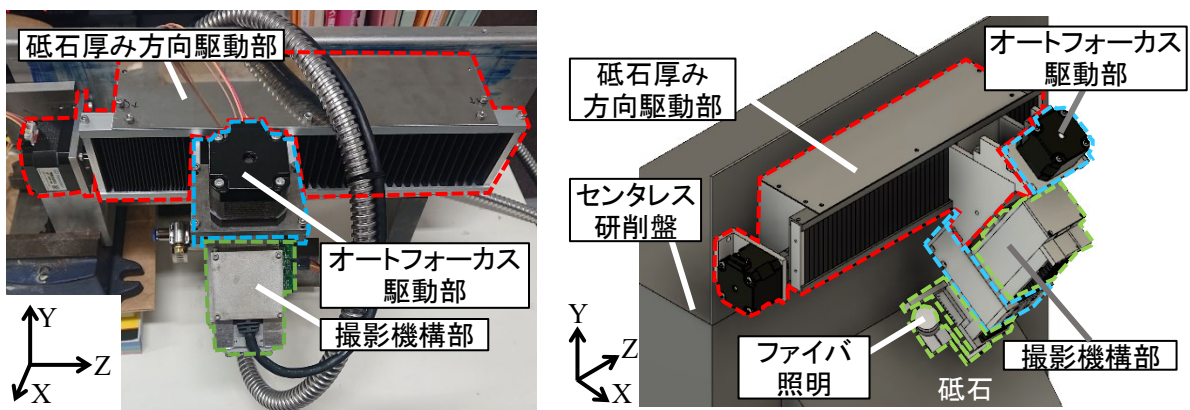
## 2. 実施内容および成果の説明

### 2.1 はじめに

通常、砥石のように高速回転する工具の摩耗や寿命を判断するには、研削抵抗の測定や、砥石を停止させて目視で確認する、加工された製品の表面や寸法を確認・測定する必要がある。しかし、研削抵抗の測定は導入コストが高いことや加工できる製品に制約がある。また砥石を停止させると非加工時間の増加を招くため、実際の生産現場での導入は避けたい。したがって、砥石を停止させず(インプロセス)に砥石の摩耗や寿命を判定することが1つ目の目的である。さらに、砥石状態の判定は、技術者スキルに大きく依存しており、技能伝承が難しいスキルの1つである。よって、本研究課題では、砥石作用面の状態を定量的に表すとともに、砥石状態の判定結果を技術者に伝達するシステムを構築することで、技術者スキルの向上を促すことも目的である。

### 2.2 インプロセス砥石作用面撮影装置の製作

はじめに、インプロセスで砥石作用面を撮影するための撮影装置を作製した。図1に作製した砥石作用面撮影装置を示す。撮影装置は、砥石厚み方向の撮影位置を変更することができるように「砥石厚み方向駆動部」と、砥石摩耗による砥石半径減少が生じた際にも砥石作用面を撮影できるように「オートフォーカス駆動部」、砥石作用面を撮影するための「撮影機構部」で構成される。駆動部はともにステップモータとボールねじ、リニアスライダで構成されており、駆動はシングルボードコンピュータ arduino で制御しており、arduino への指令伝達は装置制御用 PC (Lightning AJ, 本研究課題で導入) により行っている。砥石厚み方向には 150 mm、オートフォーカス方向には 70 mm の移動が可能である。撮影機構部内には、撮影のための光学系を有している。カメラには当初は 3 倍レンズを用いたが、より精細な画像の取得のために光学倍率 10 倍のテレセントリックレンズ(SOD-10X, 本研究課題で導入)を用いた。砥石は高速回転しているため、撮影時のカメラ露光時間を短くしなければならず、受光素子の受光量が小さく、明るい画像の取得が困難である。したがって、カメラのビニング機能を用いても十分な解像度を得られるように、解像度が 2048×1536 pixel、ピクセルサイズが 3.45  $\mu\text{m}$ ×3.45  $\mu\text{m}$  の USB3.0VisionCMOS カメラ(VCXU-51C, 本研究課題で導入)を採用した。照明には高輝度な照射が必要なため、ファイバ照明を採用している。また、撮影機構部や照明が砥石に干渉しないように(ソフトリミットも併用)、超音波センサにより測長している。さらに長時間の安定した撮影が可能ないように、ボールねじ等の駆動部やレンズ正面に常時圧縮エア(スクロールコンプレッサ, 本研究課題で導入)を供給し汚損を抑制している。



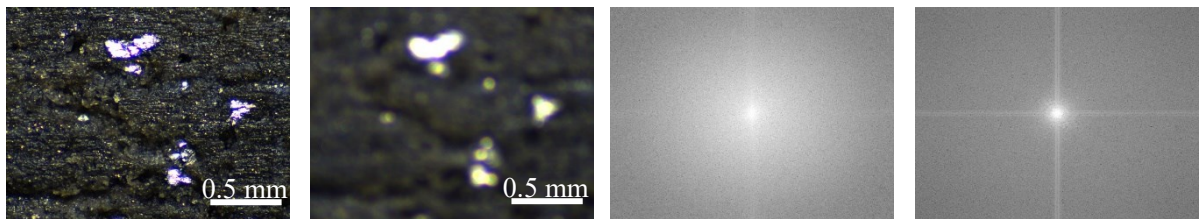
(a) 外観写真

(b) 3DCAD モデル

図1 製作したインプロセス砥石作用面撮影装置

### 2. 3 オートフォーカスシステムの構築

研削砥石は摩耗やドレッシング(砥石作用面の目直し作業)により、砥石半径が減少する。したがって、砥石作用面とレンズ間の距離(焦点距離)を常に一定に保つ必要がある。本装置では、撮影機構部が現在いる位置付近でピントが合っている位置を、撮影画像を用いて判定する手法を構築した。図2(a), (b)にピントが合っている場合と合っていない場合の砥石作用面の撮影画像を示す。ここで、試作中の測定器を実際の研削盤に取り付けることは誤作動を起こす可能性があり危険なため、小径の研削砥石を保持・回転させることのできるスピンドル(カッター ISPEED3+BMF-322, 本研究課題で導入)を備えたテストスタンドを製作し、実験を行った。またこのテストスタンドは砥石位置のシングル  $\mu\text{m}$  オーダの調整が可能であるため、開発装置の不具合発見に貢献した。図2の砥石作用面画像を高速フーリエ変換処理したときのパワースペクトル図を図2(c), (d)に示す。このパワースペクトル図は輝度分布を表しており、中央が低周波帯、外周側が高周波帯を示す。すなわち、ピントが合致している画像では、輝度分布は敏感な変化を示すので高周波帯に分布する一方で、ピントが不合致な画像では低周波帯が支配的となる。したがって、パワースペクトルの分散が大きいほどピントが合っている状態といえると考えた。この最大の分散を求める演算工程を、撮影部が現在位置する点から砥石半径減少する負の方向に実施することで常にピントの合った画像を取得することを可能とした。



(a) ピント合致画像 (b) ピント不合致画像 (c) 合致時の FFT (d) 不合致時の FFT

図2 ピント状態の違いによる作用面画像とパワースペクトル図

### 2. 3 装置制御および解析情報提示のためのソフトウェア作成

装置の駆動および砥石作用面の撮影を行うためのソフトウェア UI を図3に示す。開発装置を取り扱うのは現場技術者であるため、負担とならないようにほぼすべての作業が1ボタンで実行可能となっている。また、現在の砥石作用面の画像が出力されるとともに、後述する砥石作用面の目詰り状態を数値で出力する。さらに、砥石作用面状態と製品



図3 装置制御および撮影用ソフトウェア UI

の状態を紐づけることで、砥石作用面の情報から製品状態を推定できるようにするため、その時点での製品状態を選択(技術者がソフトウェアに情報を教示)するようになっている。

## 2. 4 高速回転中の砥石作用面の撮影

研削加工中の砥石は高速回転(周速度:10~30 m/s)しており, この砥石の円周方向に細かいピッチで画像撮影するのは, 一般的な CMOS カメラのフレームレートでは不可能である. そこで, 一般的な CMOS カメラでも高速回転中の砥石を撮影するために, ストロボ視効果を採用した. ストロボ照明下で提示される運動視覚対象は, 一定の周期で発生するフラッシュによって照射され, 瞬時露出提示される. したがって, 視覚対象者から観察者に送られる情報は位置の変化に関するものに限られ, その間を補完する時間的連続性に関する情報は送られてこない. そのため, 連続情報をもって現れる発光光点とそれをもたない支持体との間に遊離現象を生じる. このような, 視覚刺激の断続提示条件下での観察をストロボ視と呼び, この効果を利用することにより, 低フレームレートによる砥石全周の撮影を実施した. ストロボ効果により砥石作用面を精細に撮影するには, フレームレート  $f$  を式1で求める. ここで,  $N$  は砥石回転数,  $n$  は砥石周回数,  $\theta$  は撮影画像間の砥石回転角である. また, カメラの露光時間を短くしなければ図4(b)のようなモーションブラーが発生し, 正確な作用面情報を得られない. したがって, 高輝度照明を用いて短い露光時間で撮影することで図4(a)のような精細画像を得られる.

$$f = \frac{6N}{360n \cdot \theta} \quad (1)$$

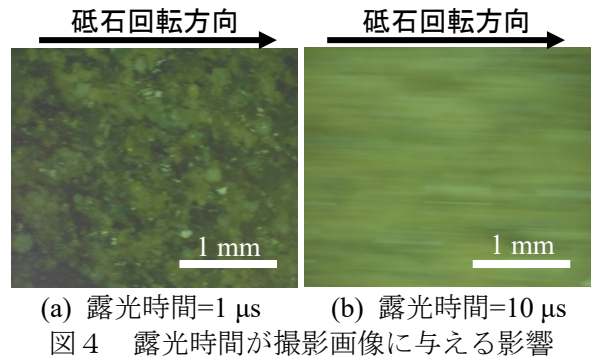


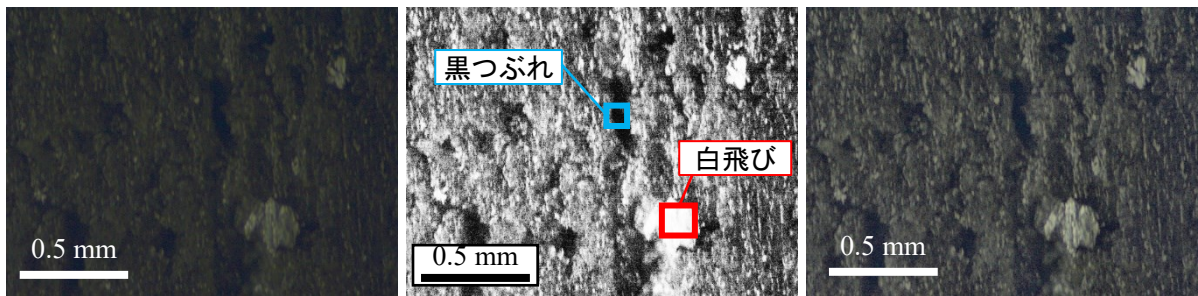
図4 露光時間が撮影画像に与える影響

## 2. 5 撮影した砥石作用面のクレンジング処理

### 2. 5. 1 ヒストグラム平坦化処理より高コントラスト画像の作成

高輝度照明を用いているが, 砥石作用面の目詰りの有無や目こぼれなどの状態を明瞭に区別するには不十分である. そこで, 撮影画像のヒストグラム平滑化を実施した. コントラストの低い画像では出現する輝度値が一部に集まるが, コントラストの高い画像では出現する輝度値が全体的に広く分布する. そこですべての輝度値の画素数を平均画素数と一致するように変換することでコントラストの高い画像を得られ, これがヒストグラム平滑化である. 本開発では, RGB 色空間の撮影画像を  $L^*a^*b^*$  表色系に変換した後に輝度値である  $L^*$  のみに対して式2によりヒストグラム平滑化を行った. ここで,  $I'(x,y)$  は出力輝度値,  $I(x,y)$  は入力輝度値,  $H(x,y)$  は入力輝度値の度数,  $I_{MAX}$  は入力画像の輝度値の最大値,  $S$  は入力画像の総画素数である. 図5に平滑化処理前後の画像を示す. また図5(b)は画像全体を一括処理した場合, 図5(c)は画像を小領域に分割し各々に処理を行った場合である. 一括処理した場合は白飛びにより情報の欠落が確認できるが, 小領域で処理した場合にはそのような現象は見られない. したがって, 撮影画像を小領域に分割してヒストグラム平滑化を実施することとした.

$$I'(x,y) = \frac{I_{MAX}}{S} \sum_{i=0}^{I(x,y)} H(x,y) \quad (2)$$



(a) 元画像 (b) 一括平滑処理 (c) 小領域分割後に平滑化処理

図5 ヒストグラム平滑化による撮影画像の明瞭化

### 2. 5. 2 バイラテラルフィルタを用いたノイズ除去

撮影画像には種々ノイズが含まれており、これらを適切に除去しなければ画像特徴量の抽出において誤差要因となる。ノイズ除去フィルタの代表的な手法にガウシアンフィルタがあるが、これは画像の輪郭も曖昧にするため不適切と考えた。したがって、輪郭情報を残したまま平滑化が可能なバイラテラルフィルタを用いてノイズ除去を実施した。バイラテラルフィルタとは注目画素の輝度値と周辺画素の輝度値の差を利用して重みを付けたフィルタとガウシアンフィルタを組み合わせた、重み付きガウシアンフィルタである。バイラテラルフィルタとガウシアンフィルタ、各々の処理を撮影画像に施し、処理後の画像のラプラシアン値(輝度値の分散、大きいほど画像は鮮明である)により評価した結果を図6に示す。バイラテラルフィルタの方がラプラシアン値は大きくノイズ除去の効果が高いことがわかった。

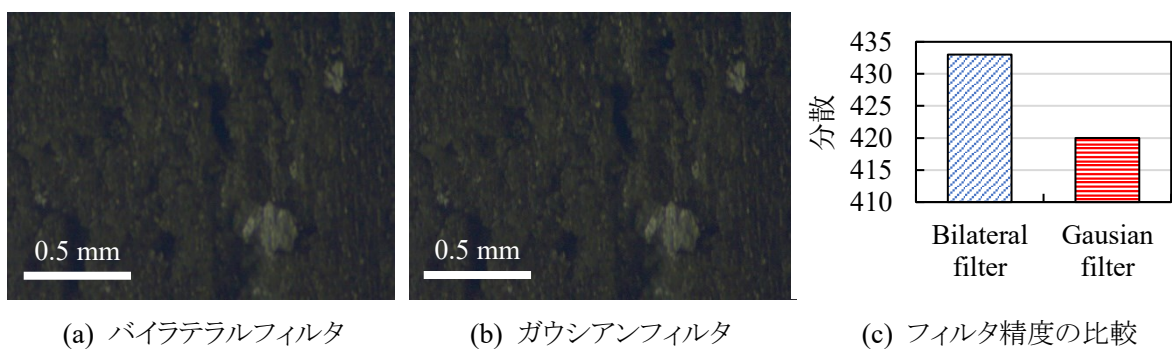


図6 ノイズ除去フィルタによるノイズ除去効果の比較

### 2. 5. 3 目詰り部の抽出

目詰り位置の推定には特徴量抽出を行い抽出した、特徴量の位置(=特徴点)を利用する。特徴量とは画像内に含まれる物体を判別する上で特徴的な領域を指し、輝度値の変化から判断される。特徴的な部分とはエッジ部やコーナ部、平坦部の三種類に分類される。コーナ部はパッチ領域を縦方向への移動と横方向への移動の両方で輝度値が大きく変化する領域で、エッジ部は縦方向への移動もしくは横方向の移動のどちらか一方で輝度値が大きく変化するパッチ領域、平坦部は縦方向への移動と横方向への移動の両方で輝度値が変化しないパッチ領域である。この中でもコーナ部は縦方向への移動と横方向への移動の両方で輝度値が大きく変化するため、他の特徴点と明確に異なると判断できる。つまりコーナで抽出した特徴量は識別性が高い特徴量であるといえる。以上より、目詰り部のコーナの検出には FAST アルゴリズムおよび Harris のコーナ評価を用いることで検出を可能とした。

#### 2. 5. 4 ブロブ解析を用いた目詰り領域のセンタリング処理

画像間をまたがる目詰り部を複数個としては判定しないために、画像を2値化した後に目詰り部の重心を演算し、これを用いるブロブ解析を考えた。算出した重心位置を元画像に抽出する。同一の目詰り部に対して算出した重心は近い位置に集合するため重心間のユークリッド距離を計算し、閾値以下の重心を削除することで同一の目詰り部に対して唯一のトリミング位置が現れる。重心をトリミングの基準とすることで目詰り部を切り取ったトリミング画像の中心に配置することを可能とした。

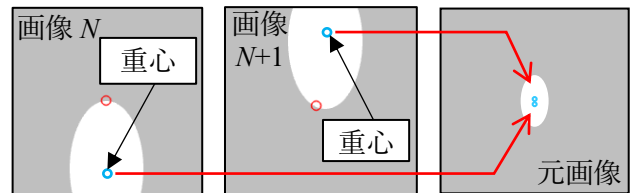


図7 ブロブ解析の概要図

#### 2. 6 HoG 特徴量とサポートベクターマシンによる機械学習モデルの構築

前述の方法で抽出した目詰り部と正常な作用面の画像に対して HoG 特徴量(局所領域における輝度値の勾配方向をヒストグラム化した特徴量)を演算し、目詰り有無のデータセットを作成し、これをサポートベクターマシンの教師データとして用いた機械学習モデルを構築した。目詰り部データを 800 個、正常部データを 200 個の計 1000 個と学習データとしては少データを学習させて、有効性検証を行った。検証には、円筒形状製品の量産に用いられるセンタレス研削盤に開発器を設置した。被削材はアルミニウム合金 A6061 で、砥石は GC ファイバ砥石、回転数は  $1000\text{min}^{-1}$  (16 m/s) である。図8に開発器により解析した目詰り率と顕微鏡で実測

した目詰り率の測定結果の比較を示す。目詰り率は砥石作用面面積に対する目詰り部の面積である。実験前に砥石のドレッシングを行った後に、研削距離が 72 m になるまでセンタレス研削加工を行った段階での目詰り率を評価に用いた。本実験の結果、測定器による解析結果と実測値の間には最大で約 4% の誤差と極めて小さいことを確認し、構築した機械学習モデルが有効であるとわかった。

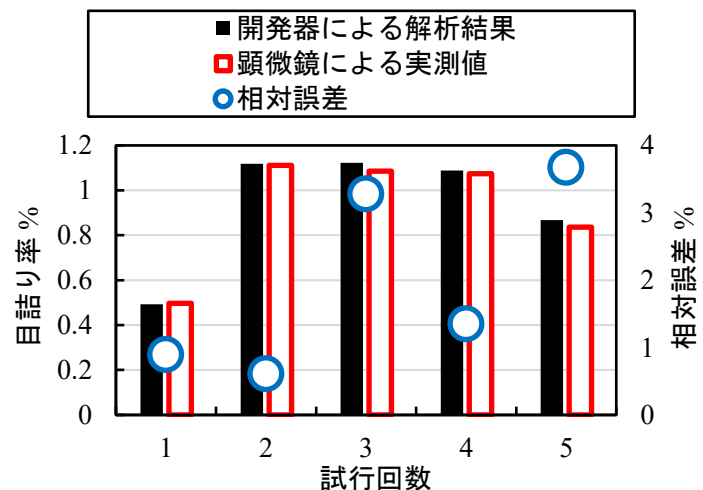


図8 開発システムの有効性・精度検証結果

#### 2. 7 おわりに

本研究開発で作製したインプロセス砥石作用面撮影装置および砥石状態定量化のための画像解析・機械学習システムにより、従来は熟練者依存技術であった砥石異常状態の判定を智能化することが可能となった。また、開発システムは目詰りのような砥石エラーを画像解析技術により自動で抽出するため、学習器への教師データを手作業で作成する必要もない。さらに、システムによる判定情報を技術者に提示することで、現在の砥石状態と製品状態を紐づけることが可能となり、未熟練者の砥石状態判断スキルの向上に貢献できるようになった。

本研究開発の目的である、暗黙知的な研削加工技術をデジタル化し、技能伝承に貢献するツールの実現を達成した。以上の成果を得られたことについて、貴財団のご支援に深く感謝を申し上げます。