

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760099

研究課題名(和文) 高精細ステレオ三次元測定システムによるオンマシン3D砥石性状解析

研究課題名(英文) On-machine grinding wheel surface topography analysis with 3D stereo measuring system

研究代表者

尾島 裕隆(Ojima, Hirotaka)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：90375361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ステレオ法による砥石作業面トポグラフィの3次元計測が可能であり、かつ研削加工機から砥石を脱着させることなくオンマシンで計測できるシステムを開発した。本システムにより得られた試料の3次元形状をレーザー顕微鏡のものと比較して、水平方向に-3.7%、垂直方向に+0.8%の精度で計測できていることを確認した。また、研削加工における砥石作業面トポグラフィの追跡観察を行い、加工による砥粒切れ刃の挙動を3次元データによって確認した。さらに、砥粒切れ刃の形状や分布の定量的な解析を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, I have developed the on-machine 3D measurement system to measure the surface topography of grinding wheel by binocular stereopsis without demounting the wheel from the grinding machine. Furthermore, I confirmed that accuracy of this system is -3.7% in the horizontal direction and +0.8% in the vertical direction, in comparison to the result measured by laser microscope. Thereafter, we analyzed the variation of grinding wheel surface 3D topography and the abrasive behavior by performing tracking observation of the grinding wheel working surface in the grinding process by using this system. In addition, The shape and distribution of abrasive grains of the grinding wheel were quantitatively analyzed.

研究分野：画像処理応用

キーワード：3次元計測 ステレオ視法 ウェーブレット変換

1. 研究開始当初の背景

研削砥石作業表面の砥粒切れ刃の形状や分布は、形直し・目直し作業や工作物仕上げ面粗さ良否、砥石寿命の判断指数になるほか、研削特性そのものに影響を及ぼす。したがって、高精度な研削加工を実現するためにはそれらを正確に計測することが極めて重要である。研削砥石の工具としての特徴は「切れ刃の形状、配列状態が不規則である」点であり、研削機構を正しく理解するためには砥石作業面性状をトポグラフィとして3次元的に捉えることが必要となる。また、砥石作業面トポグラフィは研削の進行に伴う砥粒切れ刃の摩滅、脱落、破碎現象によって刻々と変化しており、加工工程における砥粒切れ刃の挙動を解明しようとする場合、研削砥石を着脱することなく、研削機上において計測を行う必要がある。

一方、3次元計測法の一つにステレオ法がある。代表者は3次元計測を行うために、対応点をPCにより自動的に探索するアルゴリズムを考案し、SEM(走査型電子顕微鏡)画像からステレオ法による3次元計測を行った実績がある。また、ウェーブレット変換(WT)を用い、ノイズ除去や輪郭抽出などの画像処理技術に関する応用研究を行ってきた。

2. 研究の目的

ステレオ立体視法による研削砥石表面性状の高精細3次元測定システムを開発する。とくに研削中の砥石表面状態(ボンドや気孔、砥粒微小形状・突出し量、切れ刃密度)の変化をドレッシング条件も考慮した上、3次元計測する。2台のカメラによる1回のステレオ撮像により、精密な砥石表面性状を取得できるようにし、ウェーブレット変換を駆使した砥粒・ボンド・気孔識別と砥粒形状抽出による高精度な砥粒3次元輪郭形状と砥粒突出し量・切れ刃密度取得を実現する。開発したシステムによって得られた砥粒形状や突出し量、切れ刃密度の具体的な変化過程を、分布関数として取り入れた研削シミュレーションを試み、開発システムの性能も検証する。

3. 研究の方法

本研究の内容は、(1)ステレオ画像からの高精度・高速度での三次元データ構築、および(2)表面シミュレーションの構築の2つから構成される。

(1) Step1では、砥石表面の加工時の変化を取得するために、加工装置の砥石軸にロータリエンコーダを設置し砥石の同一箇所からステレオ撮像を可能にする。また、ステレオ画像からの三次元データ構築については既に着手し、その基本になるアルゴリズムは完成しており、写真の倍率などに依存するがマイクロメータの精度が得られている。ここでは、ウェーブレット変換を導入した高精度・高速度のア

ルゴリズムを開発し、加工機上でのオンマシン3D計測システムを構築する。さらにカラーステレオ画像の撮像から、砥石表面の砥粒・ボンド・気孔の識別や砥粒・ボンド境界の特定をウェーブレット変換を利用して実現する。

(2) Step2では、まずStep1で取得した砥石、砥粒の3次元形状データ(座標)を利用して、砥粒パラメータ(砥粒突き出し量、切れ刃間隔、砥粒形状)や断面形状を取得する。それらのデータから断面形状の多項式近似や、単一砥粒の分布関数化を行い、特に時間的変化を解析する。そして、時間変化をする砥粒分布や断面形状を取り入れた新たな粗さシミュレーションを構築することを目的とする。構築したシミュレーションの結果と研削実験の比較により、シミュレーションおよび計測装置の妥当性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 3次元計測システムの開発について、①ハードウェアおよび②ソフトウェアに分けて述べる。

① ハードウェアの開発について、当初測定対象としていた研削盤と異なり、図1に示す研削加工機上での計測を行うことになった。それに伴い、計測システムの再設計を行った。この加工機には、計測対象である砥石とウエハテーブルまでの距離が160mmという機械的制約があり、計測システムのサイズがこれを超える場合は、従来のように砥石作業面に対して垂直にマシンビジョンを配置することができない。そこで、砥石作業面とマシンビジョンを水平に設置し、その間にミラーを設置し光路を90°曲げ、ステレオ画像を撮影するシステムを提案した。このとき、ミラーの角度を変えることによってステレオペア画像を撮影する。

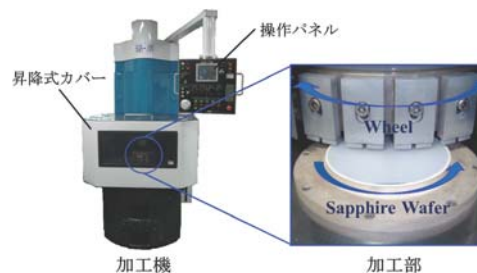


図1 加工機の外観

ミラーを用いたステレオ計測システムの撮影原理を図2に示す。砥石作業面とミラー平面がなす角が45度であるとき、砥石作業面に対して垂直にカメラを配置したものと同等な仮想カメラ0'を定義することができる。さらに、ミラーの角度が45度の状態からさらにミラーを θ 傾けたとき、カメラは仮想カメラ0'を定義

することができる。このとき、図 2 の光路となす角度は幾何学的に 2θ と求めることができ、視差 2θ をもつステレオペア画像を撮影することができる。

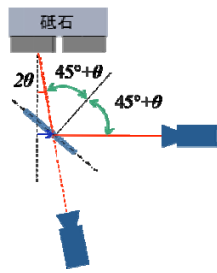


図 2 撮影原理

本研究で使用するマシンビジョンは被写界深度が浅いため、ミラーを傾けて砥石表面を撮影すると画像合焦位置と非合焦位置が混在する。これはステレオマッチングの際のミスマッチングの原因となる。そこで、砥石表面の深さ方向に焦点位置を変化させながら撮影した複数画像より、合焦位置を検出・合成し、視野内すべての位置で焦点が合っている画像である全焦点画像を作成し、ステレオ画像として利用する。また、この手法を用いることにより、被写体の高さがカメラの被写界深度より大きい場合においてもステレオマッチングを行うことが可能となる。処理は右画像と左画像のそれぞれに別々に行う。

上記の再設計により、開発した機上 3 次元測定システムの外観を図 3 に示す。

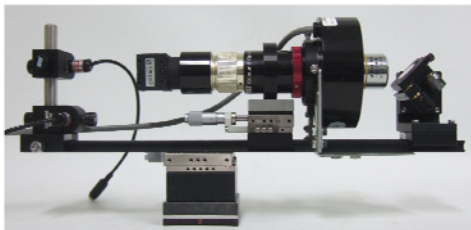


図 3 ステレオ撮影システムの外観

- ② ソフトウェアについては、主に画像処理アルゴリズムの改善および開発を行なった。本研究では、ステレオ写真視野内各点の視差に基づき、その奥行き(高さ)情報を求めるアルゴリズムを開発した。アルゴリズムのフローを図 4 に示す。図中 (a) は原画像である。処理は大きく分けて前処理、本処理、後処理の 3 つに分かれる。

主に本研究で開発・改良したのは、後処理における異常値除去のアルゴリズムである。特徴点の対応付けを行い、2 枚の画像における特徴点の座標を得たら、3 次元

座標を計算し、その間を直線補間して面を構成し表示する。垂直方向の高さが周囲に比べ、極度に大きい(あるいは、小さい)点が見られるが、これは対応付けの際にミスマッチングが生じた影響で、これらを異常値として除去する。本研究では、ヒストグラム分析により異常値とみなすデータ点を決定する方法、ウェーブレット変換を用いて異常値を除去する方法の 2 つを施すことで、より高精度な計測結果を得ることが出来た。

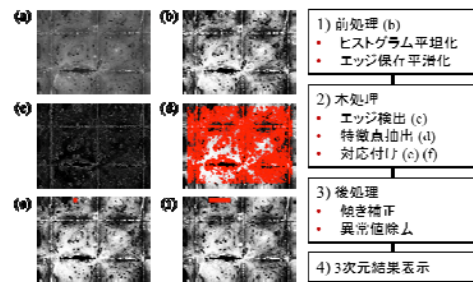


図 4 アルゴリズムのフロー

- (2) 粗さシミュレーションの構築に対する結果は、主に砥粒パラメータの取得についての結果のみとなっている。

- ① 3 次元計測システムによって得られた 3 次元トポグラフィの精度を確認するため、オフラインにおけるテスト計測実験を行い、レーザー顕微鏡の 3 次元データと比較した。ピラミッド形状のフィルム研磨剤表面の計測結果から得られたラインプロファイルの比較結果を図 5 に示す。比較の結果、水平方向に -3.7% 、垂直方向に $+0.8\%$ の相対誤差となり、本手法により高精度な計測が実現できていることを確認できた。

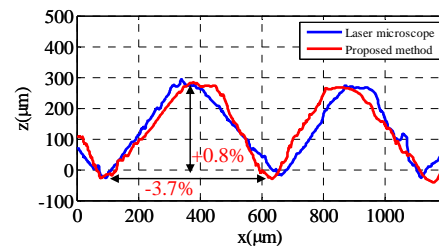
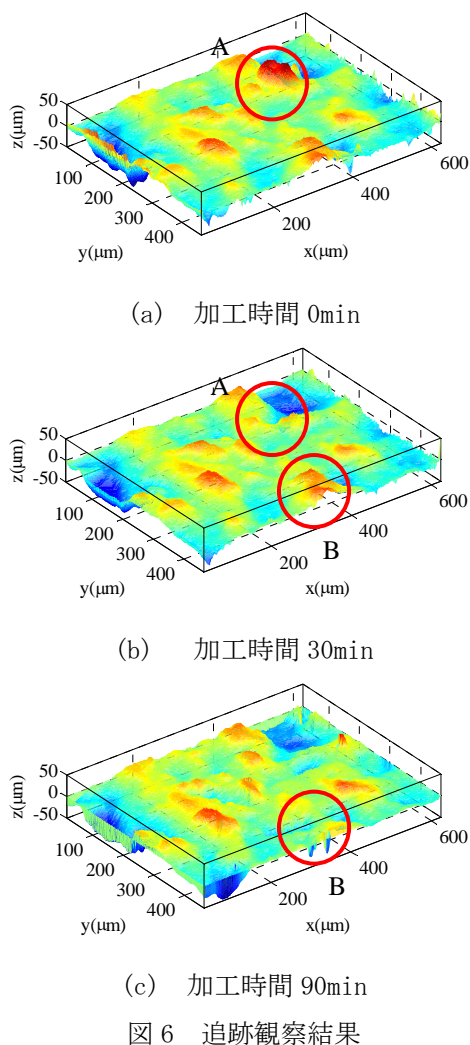


図 5 ラインプロファイル比較結果

- ② 本システムを用いて、加工における砥石表面の砥粒の挙動の追跡観察実験を行い、砥粒パラメータの時間変化について調査した。計測は決められた時間ごとに加工を一旦中断して行う。

加工時間 0 分、30 分、90 分における砥石作業面の 3 次元データの代表例を図 6 に示す。それぞれの結果を比較すると、図中の A, B で示す砥粒が加工の進行に伴い脱落していく様子が確認できる。



得られた砥石表面トポグラフィから砥粒切れ刃形状を知ることができる。砥粒 A の研削方向の砥粒切れ刃断面形状を簡易的にモデル化し、この砥粒切れ刃断面形状を、先端半頂角 α_F 、 α_B と先端平坦部長さ L_α 、突き出し量 T で特性化した。その結果が図 7、8 である。

図 7、8 に示すように、砥粒パラメータの取得は出来る。今後の展望として、これらのパラメータ取得をさらに進め、新たな粗さシミュレーションを構築するための砥粒分布関数の構築を行っていくことが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 尾島裕隆、周 立波、清水 淳、『大口径 Si ウエハ表面形状の計測評価技術に関する研究—第 2 報：ウェーブレット変換を用いたノイズ除去手法の適用—』、精密工学会誌、79 巻、677-681、2013. 7、査読有
- ② Hirofumi Ojima、Kazutaka Nonomura、Libo Zhou、Jun Shimizu、Tepei Onuki、

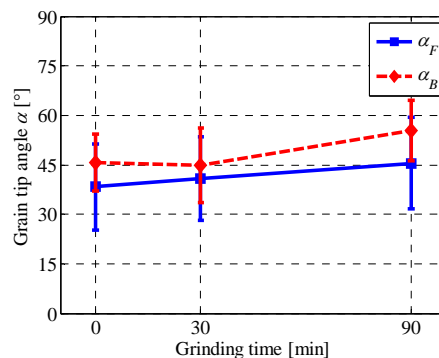


図 7 加工に伴う砥粒切れ刃の先端半頂角 α_F 、 α_B の変化

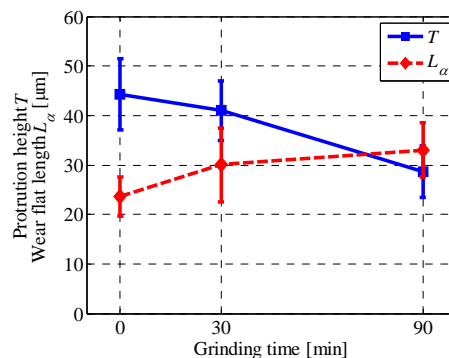


図 8 加工に伴う先端平坦長さ L_α と突き出し量 T の変化

『Research on digital filters for Si wafer surface profile measurement - Design of filters by total variation -』、Advanced Materials Research、565 巻、656-661、2012、査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 尾島裕隆、長山拓矢、周 立波、清水 淳、小貫哲平、『ステレオ法を用いた研削砥石作業面トポグラフィの機上 3 次元計測システムの開発に関する研究』、2015 年度精密工学会春季大会学術講演会、2015. 3. 19、東洋大学・白山キャンパス (東京都文京区白山)
- ② 尾島裕隆、長山拓矢、周 立波、清水 淳、小貫哲平、『ステレオ法による研削砥石作業面の機上 3 次元計測システム開発に関する研究』、2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会、2014. 9. 16、鳥取大学・鳥取キャンパス (鳥取県鳥取市湖山町)
- ③ 長山拓矢、尾島裕隆、小貫哲平、清水 淳、周 立波、『ステレオ画像による砥石作業面トポグラフィの機上 3 次元計測システム開発に関する研究』、2014 年度精密工学会春季大会学術講演会、2014. 3. 18、東京大学・本郷キャンパス (東京都文京区本郷)
- ④ 尾島裕隆、鈴木泰樹、周 立波、清水 淳、小貫哲平、『2 次元デジタルフィルタを

- 用いた面領域ウェーブレット変換の開発』、2014年度精密工学会春季大会学術講演会、2014.3.18、東京大学・本郷キャンパス（東京都文京区本郷）
- ⑤ 尾畠裕隆、鈴木泰樹、周立波、清水 淳、小貫哲平、『面領域ウェーブレット変換と2次元デジタルフィルタの開発に関する研究』、2013年度精密工学会秋季大会学術講演会、2013.9.14、関西大学・千里山キャンパス（大阪府吹田市山手町）
- ⑥ 鈴木泰樹、尾畠裕隆、周立波、清水 淳、小貫哲平、『2次元画像に適応するための面領域ウェーブレット変換の開発』、第14回高エネ研メカ・ワークショップ、2013.4.12、高エネルギー加速器研究機構・3号館1階セミナーホール（茨城県つくば市大穂）
- ⑦ 野口秀崇、長山拓矢、尾畠裕隆、小貫哲平、清水 淳、周立波、『ステレオ法を用いた砥石作業面トポグラフィのオンマシン3次元計測システム開発に関する研究』、2013年度精密工学会春季大会学術講演会、2013.3.14、東京工業大学・大岡山キャンパス（東京都目黒区大岡山）
- ⑧ Taiju SUZUKI、Hiroataka OJIMA、Libo ZHOU、Jun SHIMIZU、Teppei ONUKI、『Development of Areal Wavelet Transform applying to the 2D image』、International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology (ISUPEN)、2013.3.13、東京工業大学・大岡山キャンパス（東京都目黒区大岡山）
- ⑨ 尾畠裕隆、鈴木泰樹、富田大介、周立波、清水 淳、小貫哲平、『Wavelet 変換を用いた画像処理によるキズ検出法に関する研究』、第9回生産加工・工作機械部門講演会、2012.10.27、秋田県立大学・本荘キャンパス（秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口）
- ⑩ 野口秀崇、尾畠裕隆、小貫哲平、清水 淳、周立波、『ステレオ視法による砥石砥粒形状の3次元計測』、第20回茨城講演会、2012.8.24、茨城大学・日立キャンパス（茨城県日立市中成沢町）

〔その他〕

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/Profiles/7/0000697/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾畠 裕隆 (OJIMA HIROTAKA)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号：90375361

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し