

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03883

研究課題名（和文）工作機械の主軸テーパ穴内面の摩耗を定量測定可能とする新たな光学的計測法の研究

研究課題名（英文）Newly Optical Measurement Method for Internal Form of Taper Sockets of Machine Tool

研究代表者

吉田 一郎（YOSHIDA, Ichiro）

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：80409466

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）：本助成事業では、主軸テーパ穴内面の摩耗深さ計測可能な新しい原理を確立することを目指し、画像処理・認識アルゴリズムの開発と計測装置の光学系構築の検討を行った結果、次の成果が得られた。（1）摩耗深さを計測する光学原理、および、画像解析アルゴリズムを開発した。（2）試作した光学系、および、解析アルゴリズムの信頼性を実験・検証した結果、計測値の繰返し性と再現性はマイクロメートルからサブマイクロメートルオーダーであることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今の生産現場では効率化・自動化が強く求められており、工作機械のメンテナンス技術や計測技術も自動化・半自動化している。しかし、工作機械と、機械加工の命である工具とを連結する主軸テーパ穴の内面の幾何形状の検査や修正研削などのメンテナンスは、旧態依然として光明丹を使った職人技とも言える官能検査的な方法が主流である。そこで、本研究では、湾曲した内面の摩耗深さを計測する原理を検討し、マイクロメートルからサブマイクロメートルオーダーの精度を達成できることが確認された。この原理を応用した計測装置の研究開発により摩耗深さの数値管理化が期待され、官能検査の脱却とIoT化の促進が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this grant project, the following contributions were achieved as a result of the study of image processing and recognition algorithm, and an optical system for measurement, aiming to develop a measurement principle that measure the wear depth of the female taper surface of machine tool. (1) An optical measurement principle and an image analysis algorithm were developed to measure the wear depth. (2) The reliability of the developed prototype optical system and image processing and recognition algorithm were tested and verified, it was confirmed that the repeatability and reproducibility of measured values are on the order of micrometer to submicrometer.

研究分野：計測工学，加工学・生産工学，データサイエンス

キーワード：主軸テーパ穴内面 摩耗の定量測定 画像認識 画像処理 光学的計測法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

生産現場では、加工精度や生産効率を維持するため、工作機械の主軸テーパ穴の内面の摩耗や幾何偏差の検査が行われている。この内面の精度低下は、取り付けられた工具や砥石の振れ精度に影響するため、加工品の形状精度や品質の低下だけでなく、工具摩耗を促進させ生産効率をも低下させる。特にマシニングセンタでは、頻繁な工具の自動交換や、重切削時にテーパ面の摩耗が進みやすいことから、定期的な検査の必要性がさらに高い。

現在、この検査方法は、テーパゲージという円錐形状の金属ゲージに光明丹やブルーペースト塗料を塗布し、熟練技能者による目視の当たり検査が主流であり、修正研削を含む作業時間は工作機械一台あたり半日から一日もの時間を要する。工業規格 (JIS B 3301:2008) (ISO 296: Machine tools Self-holding tapers for tool shanks) においても、この検査方法が標準のままである。しかし、人手不足による作業効率の向上や後継者不足によるスキルレス化が叫ばれる日本の現状において、定量的な計測原理による数値管理化は必須であり、本研究による新たな定量的計測原理の研究が必要である。今後、更なる生産性向上を目指す Industry4.0 や IoT の促進のためにも、生産現場だけでなく工作機械メーカ、ツーリングメーカ、ゲージメーカにおいても熟練技能に依存しない計測原理の確立を待ち望んでいる。

小径ハイアスペクト穴の内面の形状精度は学術的にも重要であるため、その計測法に関する学術研究は広く行われている。リング状レーザ光による内面計測 (T. Yoshizawa et al., Proceedings of SPIE, Vol.6382) やペンタプリズムとコーナキューブを用いたレーザ誘導方式 (甲木昭雄ら, 精密工学会誌, 2011) の研究では、ともに高アスペクト比の小径穴が計測可能だが、分解能が 10 μm 程度とノギスレベルであるため本申請の研究課題に対応できない。一方、小径穴の高精度な計測を可能とする研究も行われている。計測精度を維持しつつ計測可能な深さ範囲をメートルオーダまで大幅に拡大する計測原理の研究 (E. Okuyama, W. Yoshinari, Y. Suzuki, R. Yoshida, I. Yoshida, and M. Iwakata, Advanced Materials Research, 2014) を行っているが、本研究への適用に関しては計測時間の課題がある。また、光ファイバプローブを用いた方法 (村上 洋ら, 精密工学会誌, 2010) は計測精度: $\pm 0.03 \mu\text{m} \sim \pm 0.1 \mu\text{m}$ であり、ヨウ素安定化 He-Ne レーザの測長による形状計測法 (八日市屋ら, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集) は計測精度: $\pm 0.15 \mu\text{m}$ と高精度なことが特徴である。しかし、これらの方法は、計測可能な穴の深さがそれぞれ 70 μm および 500 μm しかなく、本申請の研究課題の数十 mm という深さの穴に対応できない。また、高精度計測にレーザ干渉の原理を活用している研究として、タンデム低コヒーレンス干渉 (松井ら, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集) や広視野レーザ顕微鏡 (月山ら, 精密工学会誌, 2015) を用いた方法があり、ともに 0.05 $\mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$ という高い精度を有するが、それぞれ、走査方式であるため計測時間が長くなる課題、および、光学系の構成の兼ね合いから小径穴では内面が計測できない課題がある。

以上のように、従来研究には、主軸テーパ穴の幾何形状計測の実現に向けた学術的な研究課題が残っている。そこで本研究では、これらの課題を解決し学術的にも新しい計測原理を確立する。

2. 研究の目的

本助成事業では、IoT 化や Industry4.0 を背景に更なる生産革新を推進する生産現場への貢献を目指し、工作機械の主軸テーパ穴の幾何精度の光学計測原理の研究を行う。工作機械の主軸テーパ穴は比較的小径でハイアスペクト比であり、内面の摩耗計測にはマイクロメートルからサブマイクロメートルの計測精度が産業の生産現場から要求されている。これらに加えて、短い計測時間の要望もある。主軸テーパ穴のように小径ハイアスペクトな穴の内面の計測に関する研究は古くから行われているが、これらの要求仕様をすべて満たす研究成果はない。そこで、本研究では、工作機械の主軸テーパ穴の摩耗計測で求められるこれらの要求仕様を満たす新たな計測原理を研究開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の方法は、次のようにまとめられる。

- (1) 小径ハイアスペクトな主軸テーパ穴の内面の形状を短時間かつ高精度に計測可能な光学系を検討する。検討の結果、内面に塗布した光明丹の膜厚差から摩耗深さを計測するために、光明丹の輝度値を撮像するための光学系を構築した。光学系として、光源には赤外線ライトを、カメラには赤外線カメラを用いる。また、偏光フィルタを赤外線カメラに配置し、光明丹を塗布した内面にはシリンドリカルレンズを配置する。このような光学系で、塗布した光明丹を撮像する。
- (2) 開発した光学系を用いて、撮像した光明丹の画像を解析するためのアルゴリズムを研究開発する。アルゴリズムでは、輝度値の解析アルゴリズム、デジタルフィルタリングのアルゴリズム、摩耗した深い谷部分と未摩耗の平坦な部分を分離解析するアルゴリズムを研究開発する。
- (3) (2)の解析アルゴリズムの妥当性を確認するために、表面性状計測定機の結果との比較検証を実施する。これにより、計測の不確かさ解析の基礎となるデータを得る。

4. 研究成果

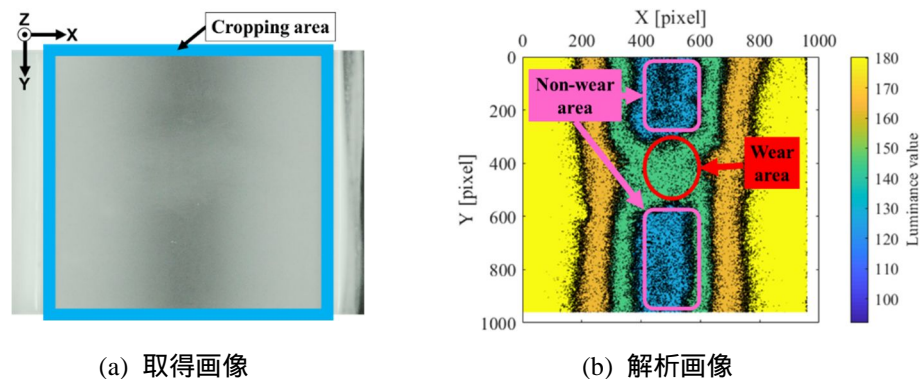
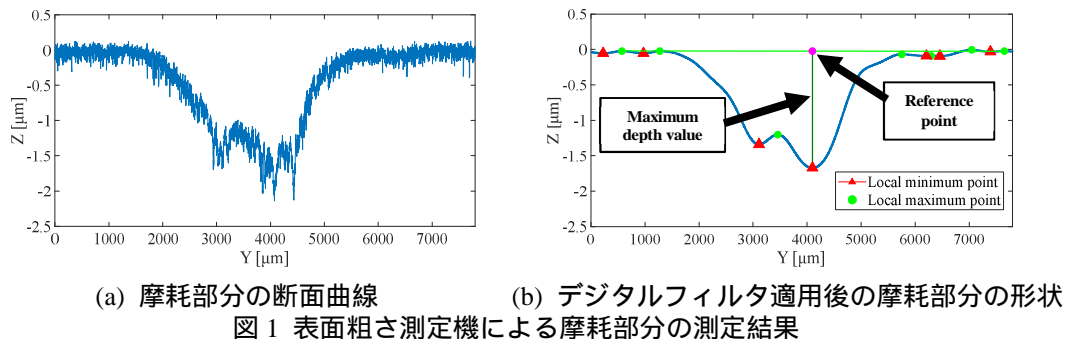
本事業で得られた研究成果をまとめると次のようになる。

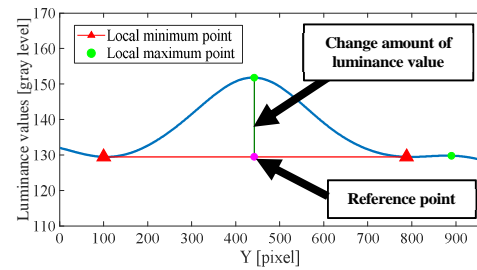
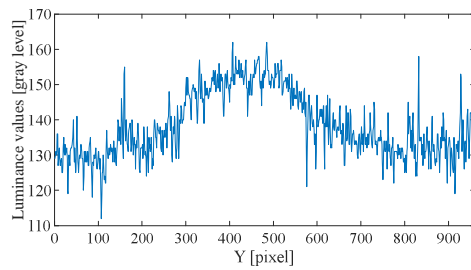
- (1) 本研究で開発した手法により、特殊な技能や感覚を必要とせずに工作機械の主軸テーパ穴の内面の摩耗深さの定量計測を可能にした。
- (2) 主軸テーパ内面の摩耗深さを計測する光学原理を確立し、計測装置化の検討のための光学系を構築した。比較検討の結果、光源には赤外線ライトを、撮像系には赤外線カメラと偏光フィルタを配置し、内面に塗布した光明丹にシリンドリカルレンズを密着させる光学系を考案した。このような光学系で、塗布した光明丹を撮像する。
- (3) 主軸テーパ内面の摩耗深さを画像解析するためのアルゴリズムを開発した。提案手法は塗布した光明丹の輝度値の違いといった相対的な変化を利用して摩耗部の最大深さ値を計測する方法であるため、塗料の膜厚の絶対的な値を必要とせずに計測できる。
- (4) 本研究で開発した手法の信頼性の検証実験より、提案手法の再現性は $0.1\ \mu\text{m}$ 未満、繰返し性は $0.05\ \mu\text{m}$ 未満という結果が得られ、マイクロメートルからサブマイクロメートルオーダーの高い計測精度を実現した。

検証実験では、図 1(a)のように表面粗さ測定機によって摩耗部分を計測し、得られた摩耗深さを妥当性確認のための参照値とした。摩耗深さ値の算出では、図 1(a)の短波長成分の除去のためにデジタルフィルタを開発し、摩耗部分の長波長の形状成分を抽出した(図 1(b))。図 2(a)は本研究で開発した光学系によって取得した画像であり、図 2(b)は開発した解析アルゴリズムによって解析した画像である。また、図 3(a)は、図 2(a)の画像の中心の輝度分布を抽出した曲線である。図 3(b)は、図 3(a)の曲線にデジタルフィルタを適用し、摩耗深さを算出する基準点と極大点を導出した結果である。基準点と極大点の輝度値差と既に求めてある輝度値差と深さ値の係数を演算することで、摩耗部分の深さ値を算出する。

表 1 は、図 2、図 3 の解析から得られた摩耗部分の深さ値の計測結果である。表 1 では、摩耗部分への付け外しを 10 回繰り返して計測結果の再現性を確認した。この再現性の検証実験より、表面粗さ測定機で得られた摩耗深さ: $1.65\ \mu\text{m}$ に対して、開発した手法による摩耗深さの平均値は $1.80\ \mu\text{m}$ となり、摩耗深さの差異は $0.15\ \mu\text{m}$ という結果が得られた。また、標準偏差は $0.068\ \mu\text{m}$ 、最大値は $1.90\ \mu\text{m}$ 、最小値は $1.68\ \mu\text{m}$ という結果が得られた。

- (5) 提案手法の検証実験では画像解析に用いる原画像にムラがあると測定結果が影響を受けることが明らかとなった。本事業によって判明した課題については、今後、解決する手法の必要性が明らかとなった。





(a) 図 2 の摩耗部分の輝度値の分布曲線 (b) 図 3(a)にデジタルフィルタを適用した結果
図 3 摩耗深さを算出するためのデジタルフィルタの適用

表 1 開発した手法の計測結果，および，再現性

Times	Difference value of luminance [gray level]	Maximum wear depth [μm]
1st	22.36	1.84
2nd	22.99	1.90
3rd	21.16	1.75
4th	21.94	1.81
5th	20.69	1.71
6th	21.65	1.79
7th	20.38	1.68
8th	21.83	1.80
9th	22.53	1.86
10th	22.24	1.83
Average	21.78	1.80
Measurement error	1.78	0.15
Standard deviation	0.83	0.068

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1 . 著者名 Dan Nakaya, Ichiro Yoshida	4 . 巻 8
2 . 論文標題 Study on wear amount measurement method using paint for maintenance of female taper surface of machine tool	5 . 発行年 2021年
3 . 雑誌名 Transactions on GIGAKU	6 . 最初と最後の頁 08006/1-08006/8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34468/gigaku.8.1_08006-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1 . 発表者名 Dan Nakaya, Ichiro Yoshida
2 . 発表標題 Study on wear amount measurement method using paint for maintenance of female taper surface of machine tool
3 . 学会等名 The 5th International Conference on “ Science of Technology Innovation ” 2020（国際学会）
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Shun Yokota, Ichiro Yoshida, Makoto Abe
2 . 発表標題 Evaluation of measurement accuracy of 3D optical coordinate measuring systems for surface color of target object
3 . 学会等名 The 5th International Conference on “ Science of Technology Innovation ” 2020（国際学会）
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kaori Yashiki, Ryo Sakakibara, Dan Nakaya, Ichiro Yoshida
2 . 発表標題 Development of Parabolic Hough Transform for Omnidirectional Cameras
3 . 学会等名 The 5th International Conference on “ Science of Technology Innovation ” 2020（国際学会）
4 . 発表年 2020年

1．発表者名 Dan Nakaya, Ichiro Yoshida
2．発表標題 Feasibility study of wear measurement method by interference fringe analysis for female taper surface of machine tool
3．学会等名 The 4th International Conference on Science of Technology Innovation 2019 (国際学会)
4．発表年 2019年

1．発表者名 中谷 暖, 近藤 雄基, 吉田 一朗
2．発表標題 工作機械の主軸テーパ穴内面の摩耗量測定における塗料の膜厚差を用いた定量計測法の研究
3．学会等名 第10回 超異分野学会 本大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 中谷 暖, 近藤 雄基, 吉田 一朗
2．発表標題 工作機械の主軸テーパソケット内面の摩耗を定量測定可能とする新たな光学的計測法の研究
3．学会等名 第9回 超異分野学会 本大会
4．発表年 2020年

1．発表者名 吉田 一朗, 中谷 暖, 近藤 雄基
2．発表標題 工作機械の主軸テーパ穴内面の摩耗を定量測定可能とする新たな光学的計測法の研究
3．学会等名 第8回 超異分野学会 本大会
4．発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 表面形状測定方法及び表面形状測定装置	発明者 吉田 一郎，中谷 暖	権利者 学校法人 法政大 学，聖和精機 株 式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-160278	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------