

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820022

研究課題名(和文) NC工作機械を用いたバニシングと仕上げ切削による金属曲面処理法の開発

研究課題名(英文) Development of curved surface finishing method combined burnishing and cutting process using NC machine tool

研究代表者

岡田 将人 (Masato, Okada)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：60369973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、滑らかで耐摩耗性と疲労強度を有する金属表面を簡便かつ高効率で創成するために、高硬度の工具を加工対象面に擦り付けるバニシング加工と微量の切込みによる仕上げ切削加工を組み合わせた加工法の開発と評価を行った。本研究により、力制御が可能な5自由度加工機を用い、良好な表面性状のダイヤモンドチップをバニシング工具とすることで、切削工程を省略しても良好な仕上げ面が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study develops curved surface finishing method which can generate smooth metal surface with superior abrasion resistance and fatigue strength in a simple and high efficiency. This method achieved by combining burnishing process, which slides hard material tool on target surface, and cutting under fine depth of cut. The finishing curved surface having superior roughness can be obtained even in omitting the cutting process by using smooth diamond tip as burnishing tool and five degree of freedom machine tool with force control function.

研究分野：切削加工，塑性加工

キーワード：バニシング加工 表面処理 自由曲面 表面性状 パラレルメカニズム 力制御

1. 研究開始当初の背景

金属の表面処理により耐摩耗性、疲労強度を向上させるには、対象物の表面層を硬化させ、圧縮残留応力を付与することが効果的であり、既存処理法として、表面層の材料自体を改質するショットピーニング、窒化処理などがある。また、対象面に硬質層を付加する方法として蒸着処理などがある。しかし、これらの処理は工作機械で形状を創成した後に、別工程として専用設備を要するため、処理時間、コストの観点で、より効率的な方法が求められる。

効率的な加工法の一つとして、回転する棒状工具の端面を対象面に押しつけ、対象面上の微小凹凸に塑性変形を付与することで圧縮残留応力を有する加工硬化層を創成するバニシング加工がある。この処理法のメリットは、工作機械上で処理できることであり、自動運転が可能な NC 工作機械が普及した現代において魅力的な特徴である。しかし、現在普及しているバニシング加工は、一部に平面を対象にしている場合はあるものの、大多数が旋削の要領で、工作機械主軸により回転する軸形状工作物の内外周面を対象としたものであり、自由曲面を有する立方体形状の工作物に対するバニシング加工は開発されていない。そのため曲面へのバニシング加工の適用が有用と考えた。

2. 研究の目的

本研究では、工具先端に半球形状を有するバニシング工具を用い、曲面を有する対象面にも適用が可能なバニシング加工法を開発することを目的とした。これまでの報告において、金属製の平坦端面を有する回転工具を用いた平面を対象とした摩擦攪拌作用によるバニシング加工では、対象面上に表面荒れが生じることが報告されている。そのため、改質層生成のためのバニシング加工により対象面上の表面荒れが認められる場合は、ボールエンドミルを用いて改質層厚さ以下の極微量の切込みによる仕上げ切削を行うことで、良好な表面性状と良好な改質層特性の両者を有する仕上げ面が得られる加工法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

工具を対象面に押し付けて圧縮力を付与するバニシング加工は、付与する押付力が、仕上げ面性状に大きく影響を及ぼす。一方、バニシング加工は並進方向の位置制御を主とした工作機械で行われることが多く、前加工面の寸法形状の誤差が押し込み量の変化に直結し、加工面品質の不安定化、工具の破損、工作機械への過負荷といった問題につながる。そのため、多くの場合、バニシング工具にスプリングを内蔵したり、油圧機構を設けることで、この問題に対応している場合が多いが、このような場合、工具姿勢が対象面に対し限定されたり、工具の機構が複雑化す

るため、曲面への適用は難しい。加えて曲面を対象とする場合、安定した仕上げ面性状を獲得するには、加工点に対し工具押付力の法線方向成分を一定に制御する必要がある。そこで本研究では、加工中の工具-工作物間に作用する3成分力をフィードバック可能な力制御機能を有する空間5自由度パラレルメカニズムを加工機として用いた。

本研究の当初の計画では、バニシング加工において良好な仕上げ面粗さが得られない場合、生成された改質層厚さ以下の切込みによる仕上げ切削を行うことで、良好な仕上げ面粗さを獲得することとしていた。しかしながら、バニシング加工のみで、良好な仕上げ面粗さも獲得できれば、工程の短縮化が可能となり、より有意な加工法となる。そこで、先端に半球形状のダイヤモンドチップを備えたバニシング工具を用いて、バニシング工程で良好な仕上げ面粗さの獲得が可能かについて検討した。

バニシング加工の基本的な加工特性を検討するために、平坦な対象面に対し、種々の加工条件でバニシング加工を施し、その加工条件が仕上げ面粗さ、仕上げ面表層の硬さに及ぼす影響を検討した。

ダイヤモンド工具を高速で摺動させることで生じる摩擦熱による工具摩耗、仕上げ面性状への影響を検討するため、バニシング加工中における工具温度測定を試みた。

最後に、曲面を有する円筒面形状の工作物に対し、本研究で開発した加工法を適用し、その仕上げ面性状から、本加工法の有用性を検討した。

4. 研究成果

(1) 力制御機能を有する空間5自由度ハイブリッドパラレルメカニズム型加工機

図1(a)に加工機として用いた空間5自由度ハイブリッドパラレルメカニズム型加工機の外観を示す。本加工機は、Z方向並進と回転2自由度の計3自由度を有する上部のパラレルメカニズムとXY方向並進2自由度を有する下部の平面案内テーブルより構成されており、合計5自由度を有するとともに広い動作域を実現している。上部パラレルメカニズムの機構学モデルを図1(b)に示す。上部パラレルメカニズムは3つの連鎖($i=1,2,3$)を有し、各連鎖は、ベースから回転1自由度関節 J_{1i} (位置: P_{1i})、直動1自由度関節 J_{2i} 、回転3自由度関節 J_{3i} (位置: P_{3i})の順に構成され、 J_{2i} を入力関節とする。出力節の位置姿勢は並進3自由度、回転3自由度で表現できる。回転3自由度は、絶対座標系 Σ_0 のZ軸周りにX正軸から θ_1 回転したベクトル周りの回転を θ_2 、 θ_2 回転した座標系のZ軸周りの回転を θ_3 として表現する。出力節は J_{1i} により動作拘束を受けるため、位置姿勢6自由度のうち任意に与えられるのは3自由度であり、図1の機構では、Z方向並進と θ_1 および θ_2 回転を指

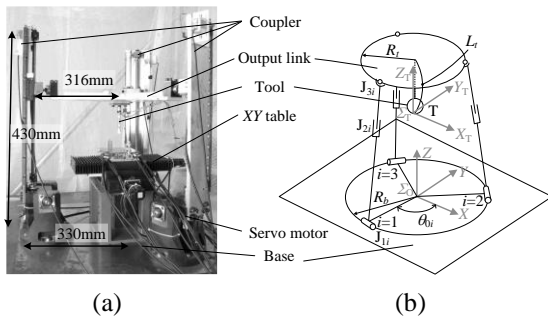


Fig. 1 Machine tool of a hybrid type parallel mechanism, (a) Overall view of the machine tool, (b) Kinematic model of a 3 degree-of-freedom parallel mechanism



Fig. 2 Details of diamond tipped tool

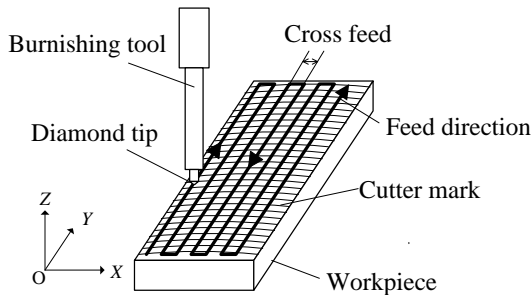


Fig. 3 Schematic illustration of burnishing process for plane surface

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Stainless steel AISI 316
Burnishing tool	Spherical diamond tip $R = 1.5$ [mm]
Feed rate	$f_r = 12.7$ [mm/sec]
Cross feed	$CF = 40 \sim 100$ [μm]
Thrust force	$F_t = 20 \sim 100$ [N]
Lubrication	UP-21KN, Unitech Co. Ltd.

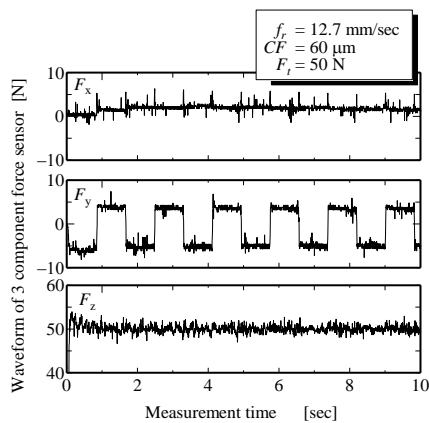


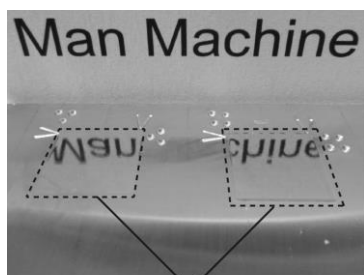
Fig. 4 Output waveform from force sensor

定する. また, 同拘束により θ_3 は動作せず, XY 方向並進は θ_1 および θ_2 の回転に伴って従属的に動作する. この XY 方向の従属的な並進は下部案内テーブルにより補正した.

本研究では, アドミッタンス制御による力制御を用いて, 工具先端と対象物間にコンプライアンスを与えることで, 対象物へ目標の力を生じさせながら加工を行った. アドミッタンス制御では, 高ゲインで安定した位置制御によりコンプライアンスを制御することに加え, 本加工機は機構先端の負荷がアクチュエータに伝わりにくく, 高剛性な力制御に適する. 出力点に作用する並進力を計測する力センサは, 工具を回転させない場合は工具側センサと下部案内テーブル側センサに分かれた構造とした. また, 工具を回転させる場合は下部案内テーブル側センサのみで3方向の並進力を測定可能な構造とした. 本センサにより測定された作用力をフィードバックすることで定力制御を可能とした.

(2) ダイヤモンドチップを用いたバニシング加工における仕上げ面性状の検討

ダイヤモンドチップを備えたバニシング工具による仕上げ面性状について確認した. 図 2 に用いたバニシング工具の外観を示す. 先端半径は $R1.5$ の半球形状を有している. 図 3 に加工時の模式図を示す. 本節では, 平面の工作物対象面に対し鉛直方向よりバニシング工具を定力で押し付けて加工を行った. 表 1 に主な加工条件を示す. 工作物はステンレス合金 SUS316 を採用した. バニシング加工は前加工面の表面性状の影響を受けるため, 正面フライスにより一定条件下で仕上げた切削加工面を前加工面として採用した. 工具は正面フライスのカッターマークに対して直行する方向に送り, 所定の距離を送ると一定量のクロスフィードを付与することで仕上げ面を得た. 加工部には冷間加工用油を塗布した. 図 4 に加工中の工具-工作物間に作用した 3 成分力動力計の出力波形の一例を示す. F_x , F_y , F_z はそれぞれ図 3 に示す座標系と揃えた. 図より送り方向成分である F_y は一定の間隔で出力が逆転しており, クロスフィードごとに, 工具送りによる摩擦力の作用方向が周期的に逆転していることがわかる. また, F_z は送り方向によらず目標押付力である 50N で一定の出力を示しており, 定力でのバニシング加工が実現できていることが確認できる. 図 5 に加工後の仕上げ面の一例を示す. 図にみるように, 加工面は周囲の前加工面と異なり, 鏡面状の良好な外観が得られていることがわかる. 得られた仕上げ面の表面粗さ R_a はいずれの場合も概ね $0.1\mu\text{m}$ 以下であり, ダイヤモンドチップを用いたバニシング加工により良好な表面粗さを得られることがわかった. これらのことから, バニシング工具にダイヤモンドチップを用いることで, 後工程の仕上げ切削を要しない良好な仕上げ面粗さが得られるため, 本研究で



Burnished region

Fig. 5 Overview of finished surface using diamond tipped burnishing tool

は、バニシング加工の加工特性に焦点を絞って検討することとした。

(3) バニシング条件が仕上げ面性状に及ぼす影響

バニシング加工の加工特性を明らかにするため、種々の条件により得られたバニシング加工面の表面性状を検討した。図6に工具の工作物対象面に対する押付力を変化させた場合の表面粗さ R_a , R_z の傾向を示す。加工条件は表1と同様である。図にみるように、押付力 $F_t = 20$ N においても、前加工面より顕著に表面粗さが低減できていることがわかる。また F_t の増加に伴い表面粗さは改善傾向を示し、概ね $F_t = 60$ N 以降は同様の表面粗さとなった。次に同様にクロスフィード量 CF を変化させた場合の結果を図7に示す。図より、 CF の減少に伴い表面粗さが向上する傾向が得られ、概ね $CF = 60 \mu\text{m}$ 以下では得られる表面粗さが同程度であった。また、 $CF = 100 \mu\text{m}$ においては、前加工面より表面粗さが劣化しており、 CF は加工結果に大きな影響を有するといえる。 CF を小さくすることは加工効率の低下に直結することから、適切な値を選定することが肝要であるといえる。

次に、加工点における摺動速度と摺動距離を増加させるために、工具を回転させながら加工を行った仕上げ面表層の硬度測定を行うことで、工具を回転させることによる効果を検討した。回転工具を用いる場合、工作物対象面に対し工具回転軸を法線方向とすると、加工点における工具の周速度は理論的に0となり摺動作用は得られない。そこで、図8に示すように工具回転軸を傾斜させて加工を行った。これにより、工具傾斜角と工具回転数、工具送り速度により加工点に付与する摺動作用を制御できる。図9に工具-工作物間の摺動速度と仕上げ面表面から $10 \mu\text{m}$ の位置における表面層硬さとの関係を示す。摺動速度は、工具傾斜角と工具回転数より理論的に求めた値を示している。表面層硬さは、加工後の工作物を切断し、その断面表層部をマイクロビッカース硬度計により測定した値である。図より、工作物内部（未加工部）がHV200程度、切削加工後の前加工面でHV290程度であるのに対し、工具無回転時 ($v_b = 0$ m/min) でHV320、回転時 ($v_b = 50$ m/min) で

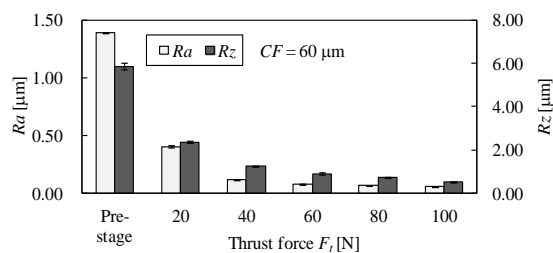


Fig. 6 Relationship between thrust force and surface roughness

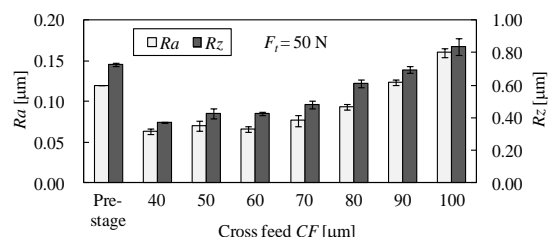


Fig. 7 Relationship between cross feed and surface roughness

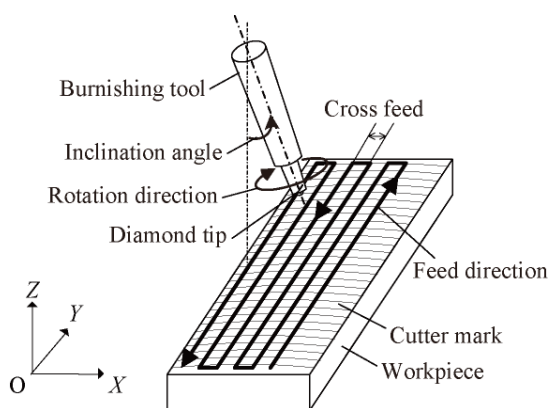


Fig. 8 Schematic illustration of burnishing process with inclined rotating tool

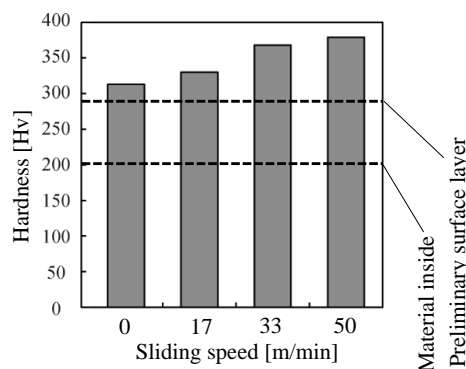


Fig. 9 Influence of sliding speed on hardness on burnished surface layer

HV380程度に達している。このことから、本加工法により得られる仕上げ面は、加工前と異なり高い硬度が得られていることがわかる。このことから工具を回転させることで、無回転時よりも、より優れた改質層特性が期

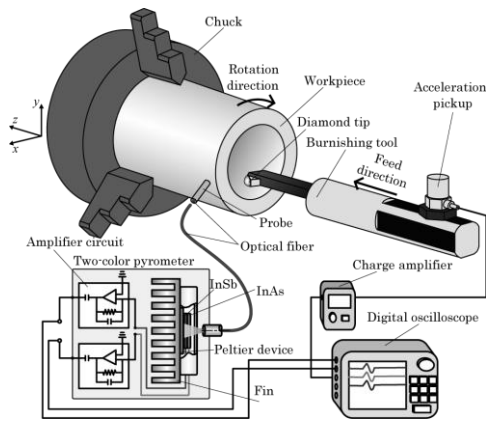


Fig. 10 Temperature measurement of diamond tipped tool during burnishing processing

待できることを明らかにした。なお、工具を回転させることによる表面粗さの悪化は認められず、摺動速度の増加により、表面粗さにも有意な効果が期待できることを付言する。

(4) バニシング加工部の温度測定

(3)にて前述の通り、本研究では工具を回転させて傾斜させながら加工対象面にバニシング加工を施すことで、摺動作用を積極的に発生させて優位な加工特性を期待している。しかしながら、加工点における摺動速度を増加させることは、摩擦熱による工具温度の上昇を招くと考えられる。特に本研究のように工具にダイヤモンドチップを用い、加工対象が鉄系材料の場合には、高温接触状態における化学的な工具摩耗が懸念される。そこで、ダイヤモンドチップを工作物上で高速で摺動させた場合の接触点の温度測定を試みた。高速の摺動状態を容易に実現するために温度測定実験では、図 10 に示すように旋盤主軸に取り付けた筒状工作物内面にダイヤモンドチップを定力で押付け、その際に工具から放射される赤外線を経由して光ファイバで伝送し、赤外線検出素子により電気的な出力を得る方法で測定を行った。工作物には高硬度で熱伝導率が低く、工具温度が高温となりやすいと考えられる SUS420J2 の焼入れ材 (HRC53) を用い、加工点の摺動速度を 200 m/min、押付力を 180 N として、前節の平行メカニズムを用いた場合よりも過酷な摺動条件とした。実験の結果、工具に明らかな摩耗が認められる加工距離までは、用いた赤外線温度計からの出力が認められなかった。本温度計の最低測定温度が 150°C 以上であることから、それ以下の温度で推移していたと考えられる。なお、工具摩耗が進行して温度計からの出力が認められた段階で、工具温度は 250 - 300°C 程度であった。温度計からの出力が認められた工具摩耗状態では、明らかな加工面の劣化が認められていることから、本加工法では、良好な表面粗さが得られている条件下では、ダイヤモンドチップの熱的要因による摩耗が生じる温度域に加工部が達していないことを明らかにした。

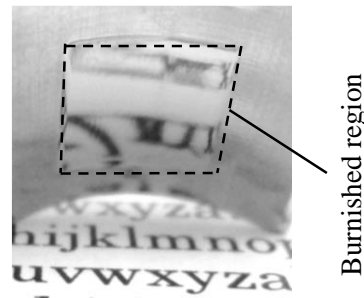


Fig. 11 Appearance of burnished curved surface

(5) 曲面を対象としたバニシング加工

本研究の目的である定力の押付力による曲面を対象としたバニシング加工を試みた。工作物は SUS316 で、R15 の円筒曲面に対し、その円周方向を工具送り方向とすることで、工具送りに伴い常に加工点における法線方向が変化する加工条件を模した。図 11 に加工面外観の一例を示す。図にみるように、加工部は周囲の未加工部に比べ、明らかに平滑化された外観を示しており、本加工法の曲面加工への適用が可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Masato Okada, Hiroaki Kozuka, Hiroshi Tachiya, Taira Iwasaki, Yorihiro Yamashita, Burnishing process by the spherical 5-degrees hybrid type parallel mechanism with force control, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 8, No. 2, 2014, pp.243-252.

〔学会発表〕(計 1 件)

Kei Watanabe, Masato Okada, Taira Iwasaki, Hiroshi Tachiya, Hiroaki Kozuka, Consideration of the integrity of various free-curved surfaces burnished by a parallel mechanism type machine tool with force control, Proceedings of the 15th International Conference on Precision Engineering, pp. 876-877, 2014 年 7 月 24 日, Kanazawa, Ishikawa.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：バニシング加工装置
 発明者：岡田将人, 立矢宏, 岩崎平
 権利者：金沢大学
 種類：特許
 番号：特願 2014-140092
 出願年月日：2014 年 7 月 8 日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡田 将人 (OKADA, Masato)
 金沢大学・機械工学系・助教
 研究者番号：60369973

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし

(4)研究協力者
浅川 直紀 (ASAKAWA, Naoki)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号：80270924