

ロボット研磨における動特性とピックフィードの影響

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○奥石翔太 ◎柿沼康弘

要 旨

現状、金型研磨は手作業で行われているが、熟練工の減少や健康被害などの問題から粗研磨作業の自動化が求められている。一方で、ロボット研磨では表面形状の制御、加工条件や工具経路の生成に課題がある。これらの基礎試験として、研磨ロボットの動特性とピックフィードに基づく影響を評価した。工具接触力を安定化するために構造の共振を励起しない回転数調整の必要性、ピックフィードに応じた研磨面の違いを確認した。

1. 緒 言

金型の製造工程において、研磨は、寸法精度と形状精度の向上、機械寿命の延長、外観や美観の向上を実現する重要な工程である。しかし、研磨工程は熟練工の手作業によって行われており、人口減少による熟練作業者の不足、研磨剤飛散による健康被害、表面品質のばらつきといった問題点がある[1][2]。研磨の仕上げ工程は非常に複雑で熟練者に頼らざるを得ないが、粗研磨作業は比較的単純で自動化の余地がある。このような背景から、ロボットによる粗研磨作業の自動化が求められている。一方で、ロボット研磨には表面形状の制御、加工条件や工具経路の生成に課題がある。

そこで、接触力と工具回転数をロボットの姿勢と同時に制御することで、高精度なロボット研磨の実現を目指す。広い可動領域を持つ6軸の垂直多関節ロボットの手に力制御機能と、工具回転数制御機能を備えたエンドエフェクタを装着することで、マクロ-マイクロメカニズムを応用したロボット研磨システムの開発を目的とする。また、CAMと連携したロボット研磨の自動化に向けた基礎試験として、研磨ロボットの動特性とピックフィードの影響を調べた。

2. 研磨加工理論に基づくロボット研磨

2.1. 研磨加工の理論

本研究では、プレストンの法則を基に研磨を行う[3]。これは、材料除去における経験則であり、材料除去高さ dz [mm]が、研磨圧力 p [MPa]、工具と工作物の相対速度 v [mm/s]、工具滞留時間 dt [s]の積に比例することが知られ、プレストン係数 K_p [mm²/N]を用いて式(1)のように表される。

$$dz = K_p \cdot p \cdot v \cdot dt \quad (1)$$

ここで、3つのパラメータを調整したロボット研磨を実現するために、プレストンの法則のモデル化を行う(Fig. 1)。本研究では、工具の回転数と比較して送り速度が十分に小さいと考えることができるため、工具相対速度は工具回転数と等しいとみなす。また、工具滞留時間は、ある地点を工具が通過する時間である。以上より、Fig. 2に示すように、研磨圧力 p は研磨接触力 F を接触面積 S で除算した値、工具相対速度 v は工具回転数 v_r 、工具滞留時間 dt は微小長さ dL を工具送り速度 V で除算した値を与えると、式(2)のように表すことができる。

$$dz = K_p \cdot \frac{F}{S} \cdot v_r \cdot \frac{dL}{V} \quad (2)$$

この式より、研磨接触力、工具回転数、工具送り速度の同時制御をすることにより、高精度なロボット研磨の実現を目指す。本研究では、垂直多関節ロボットの先端に、エンドエフェクタと工具主軸を装着し[4]、それぞれにおいて位置制御、力制御、回転数制御を行い、研磨加工モデルに基づいた連動制御を行う。

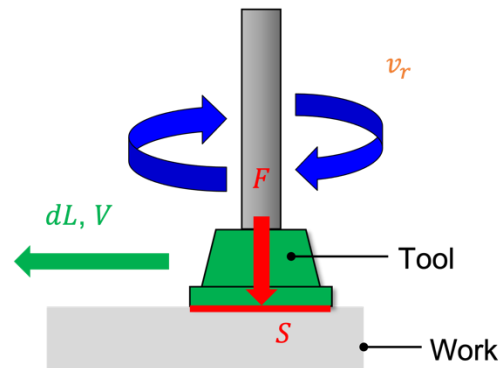


Fig. 1 Polishing process

2.2. ロボット研磨システム

本研究では、上位コントローラから、エンドエフェクタに対して接触力指令が、工具主軸コントローラに対して回転数指令が送られる。一方で、事前にCAMで生成した研磨パスに応じてロボットは動作し、各リンクの位置情報と姿勢情報がロボットコントローラから上位コントローラに返される。その情報を基に上位コントローラ側で工具先端点の送り速度を算出し、その送り速度に応じて新たな接触力指令と回転数指令がそれぞれエンドエフェクタ、工具主軸コントローラに送信され、各構成要素が連動制御される(Fig. 2)。

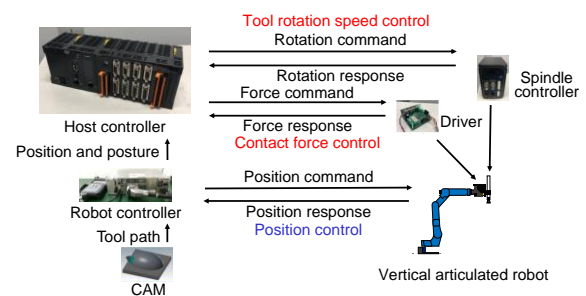


Fig. 2 Robot polishing system

3. 研磨ロボットの動特性評価

研磨ロボットの動特性を評価するため、工具先端点でハンマリング試験をおこなった。工具主軸の上部に加速度センサを取り付け、反対側からインパルスハンマにより加振した(Fig. 3)。これによって得られた周波数応答関数を Fig. 4 に示す。10, 16, 30 Hz 付近に回転軸方向の共振点を確認した。また、共振の影響を評価するため、回転数を 1000~15000 min⁻¹ で変化させて

1 Nでの工具接触試験を行った。その際の力変動振幅を調べた結果を Fig. 5 に示す。共振を励起する 1000, 2000 min^{-1} の工具回転のとき反力推定値のノイズが大きくなることを確認した。

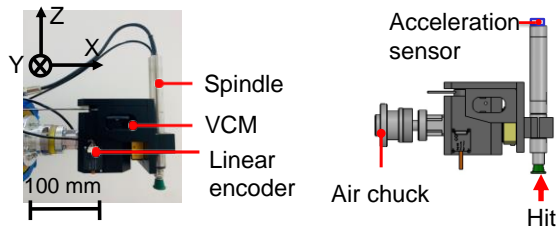


Fig. 3 Vibration from the z direction

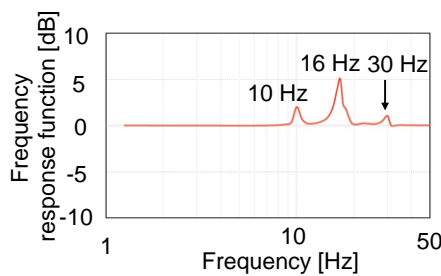


Fig. 4 Dynamic characteristics of polishing robot

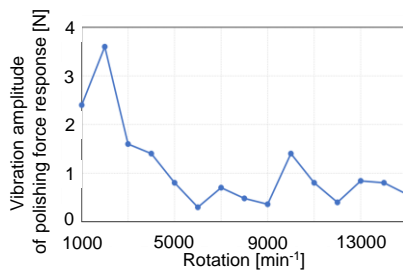


Fig. 5 Vibration amplitude of polishing force response

4. ピックフィードに基づく研磨形状の影響

ピックフィードによる表面形状への影響を評価するため、ピックフィードを 1~5 mm で変化させて 2 パスの平面研磨実験をおこなった。実際に研磨しているときの様子を Fig. 6 に示す。1 パス目の最大除去高さに対する 1 パス目と 2 パス目の重なり部分の中心での除去高さの比率を、実験値とプレストンの法則に基づいた理論値で比較した。実験結果を Fig. 7 に示す。ピックフィードの大きさに関わらず、実験値は理論値に比べて常に小さくなった。理由として、工具弾性が低いために削る範囲が限定されてしまうこと、1 パス目と 2 パス目で削る平面形状が異なることが考えられる。

ここで、実験結果に基づき重ね合わせにおける材料除去高さの提案を行う。Fig. 8 の左図の赤丸は、2 パス目の工具先端が当たる中心位置を示している。1 パス目の材料除去高さは数 μm ほどであるため工具先端が当たる部分は平面として圧力分布に変化はないと仮定する。したがって、2 パス目は Fig. 7 の右図に示すように、この赤丸を原点とした 1 パス目と同じ形状で研磨されると考えることができる。この提案手法を加えた理論値と実験値の材料除去比率を Fig. 7 に示す。結果より、従来の理論値と比較して、

提案した理論値が実験値に近い値を取ることを確認した。

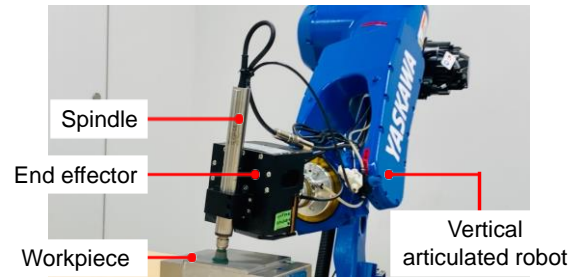


Fig. 6 Robot polishing

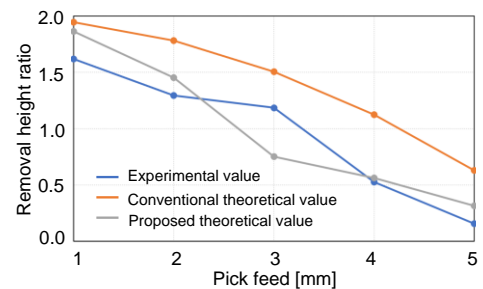


Fig. 7 Removal height ratio

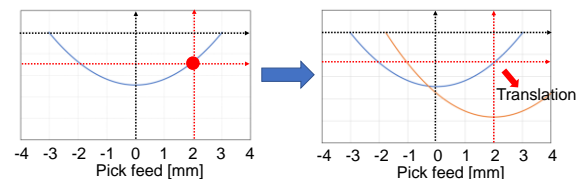


Fig. 8 Proposed removal height

5. 結言

本研究では、研磨ロボットの動特性とピックフィードの影響を評価した。ハンマリング試験を行い、工具主軸における共振点を確認した。さらに、工具接触試験を行い、共振を励起する工具回転のとき、反力推定値のノイズが大きくなることを確認した。また、ピックフィードを変えて研磨実験を行い、ピックフィードによる表面形状への影響を評価した。

参考文献

- [1] W. Lin, P. Xu, B. Li, and X. Yang, "Path planning of mechanical polishing process for freeform surface with a small polishing tool," *Robot. Biomimetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2014.
- [2] F. Tian, C. Lv, Z. Li, and G. Liu, "Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 55–64, 2016.
- [3] F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines," *Journal of the Society of Glass Technology*, vol. 11, no. 44, pp. 214–256, 1927.
- [4] A. Sharon, N. Hogan, and D. E. Hardt, "The macro/micro manipulator: An improved architecture for robot control," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 10, no. 3, pp. 209–222, 1993.