

工具主軸の回転速度制御を用いたロボット研磨の評価

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○古藤捷希 ◎柿沼康弘

要 旨

ブレードの製造と補修において、研磨加工は熟練工の手作業で行われている。しかし、生産効率やコスト、作業人口の減少といった問題から研磨加工の自動化が強く求められている。そこで本研究では、回転速度制御可能なスピンドルと力制御可能なアクチュエータを有するロボット研磨用エンドエフェクタを開発した。本システムにおいて、接触力を一定に保ち、工具主軸の回転速度を調整しながら研磨加工できることを確認した。

1. 緒 言

タービンブレードはジェットエンジンの部品であり、その多くがロストワックス法で製造されている。ジェットエンジンの稼働により、タービンブレードは高温ガスによる腐食や表面の傷といった劣化が生じ、定期的な補修が必要である。この製造と補修において、現在も熟練工の手作業で研磨加工が行われている。しかし、手作業では時間とコストがかかることに加え、作業者の減少や研磨時に生じる粉塵による健康被害の問題もある。

こうした問題から、製造現場ではロボット研磨の需要が高まっている。ロボット研磨の機構的な実現方法として、ロボットアームの手先にエンドエフェクタを取り付けるシステムが提案されている[1]。ロボット研磨用エンドエフェクタは、高剛性を目指した機構設計と接触力を一定に保つための動作制御法が盛んに研究されている[2]。一方で、研磨理論から考えれば研磨量は研磨圧力に加え、工具主軸の回転速度にも依存する。

そこで本研究では、回転速度制御可能なスピンドルと力制御可能なアクチュエータを有するロボット研磨用エンドエフェクタの開発を目的とする。これにより、研磨量を制御可能なロボット研磨の実現が期待できる。なお、エンドエフェクタの開発のうち、登壇者は工具主軸システムの構築を行った。

2. 研磨加工理論に基づくロボット研磨

2.1. 研磨加工理論

本研究において、基本となる理論はプレストンの法則である。材料除去にまつわる経験則であり、圧力転写方式の研磨加工を理論的に扱う際広く用いられる。プレストンの法則により、材料除去量 z [mm]は工具と工作物間の圧力 p [MPa]、相対速度 v [mm/s]、加工時間 t [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。

$$z = K_p p v t \quad (1)$$

本研究では、工具回転軸が工作物の接触面と垂直方向になるよう工具を押し付け、接触面に沿った送り速度を与え研磨加工を行うことを想定する(図 1)。プレストンの法則と加工条件を対応させると、圧力 p は接触力 f [N]、相対速度 v は回転速度 v_r [min⁻¹]、加工時間 t は送り速度 v_{feed} [mm/s]の逆数と比例関係があるといえる。したがって、材料除去量との関係は式(2)のように表される。

$$z \propto \frac{f v_r}{v_{feed}} \quad (2)$$

この材料除去量を一定にすることで、均一な表面形状の実現を目指す。本研究では、送り速度と回転速度の比に着目し、主軸1回転あたりの送り量を等しくする回転速度調整手法を提案し、ロボット研磨システム(図2)に実装した。

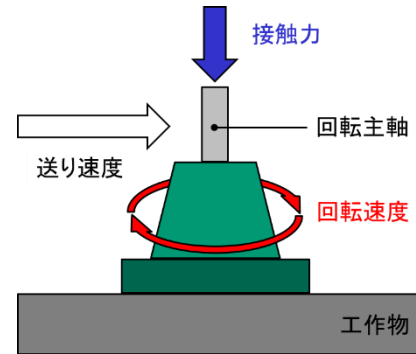


図1 研磨加工のイメージ

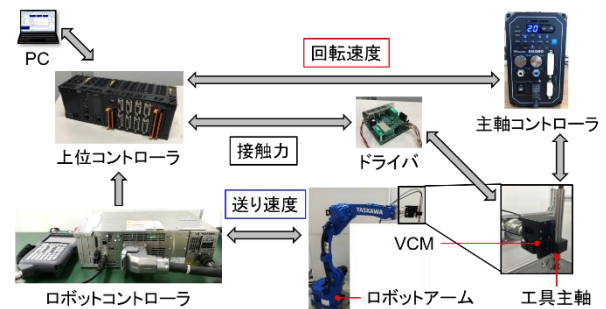


図2 提案するロボット研磨システム

2.2. ロボット研磨システム

開発したエンドエフェクタはボイスコイルモータ(VCM)により駆動し、外乱オブザーバと反力推定オブザーバを用いたセンサレス力制御[3]を実装することで、0.1 Nの分解能で研磨力を調整できる。また、エンドエフェクタには速度制御できる工具スピンドルが搭載されている。提案手法によるロボット研磨を実現するため、ロボットアームの工具軌跡に応じて、工具主軸の回転速度、エンドエフェクタの接触力を同期して制御する。ロボットアーム先端の動作指令は教示によりロボットコントローラから与え、アーム先端の送り速度応答はロボットコントローラにフィードバックされた後、上位コントローラへと送られる。工具主軸の回転速度指令は取得した送り速度応答を基に上位コントローラで生成し主軸コントローラへ与える。同様にアーム先端の送り速度から接触力指令を上位コントローラで演算した後、VCMのドライバへ与え、接触力を制御する。

3. 機械特性

エンドエフェクタをロボットアームに取り付けた研磨ロボットのハンマリング試験を行い、振動特性を評価した。加速度計をエンドエフェクタの下側に取り付け上側からインパルスハンマ

で叩き、エンドエフェクタの動作方向の振動を検知した。加振力と加速度を2回積分して得た位置情報の比から、周波数応答関数を導出した(図3)。ロボット研磨システムは11, 83 Hz付近に共振点, 14, 31 Hz付近に反共振点が存在した。工具主軸, ロボットアーム単体においても同様に実験し結果を比較すると, 20 Hzより低い周波数ではロボットアームの特性が支配的で, 20 Hzより高い周波数ではエンドエフェクタの特性が支配的であるといえる。ロボットアームを加振する要因はエンドエフェクタの上下動作であるため, 11 Hz付近の動作を伴う接触力制御は避けなければならない。エンドエフェクタを加振する要因は工作物との相互作用であるため, 83 Hz付近の振動を引き起こす送り速度や回転速度条件は避けなければならないことがわかった。

4. 制御特性

4.1. 実験条件

金属平板を対象にロボット研磨したときの, 主軸回転速度の追従性を評価した。実験の様子を図4に示す。表1に示すように, 低速と高速の2種類の加工条件を設定した。1回転あたりの送り量は $12\ \mu\text{m}$ で一定になるように, 送り速度応答の5000倍の値を回転速度指令として与えた。送り速度指令はステップ入力を与え, 工作物の中央付近で低速から高速, 高速から低速に変化させ実験を行った。

4.2. 実験結果

2 mm/s から4 mm/s に送り速度を変化させたときの回転速度応答と接触力応答, 4 mm/s から2 mm/s に送り速度を変化させたときの回転速度応答と接触力応答を図5と図6にそれぞれ示す。送り速度の応答性は数ミリ秒であるのに対して, 回転速度の応答性は数百ミリ秒ほどあることがわかった。回転速度応答に関して, 減速する場合に比べ, 加速する場合の方が, オーバershootもなく応答性も高かった。接触力応答は, 主軸回転速度が高くなるにつれ, 変動が大きくなった。このことから, 許容される接触力の変動に応じて, 回転速度の上限を設定する必要があることがわかった。

5. 結言

プレストンの法則に基づき主軸回転速度制御を用いたロボット研磨法を提案した。回転速度制御可能なスピンドルと力制御可能なアクチュエータを有するロボット研磨用エンドエフェクタを開発し, ロボットアームの動作に応じて主軸回転数, 接触力を同時制御する研磨手法をロボット研磨システムに実装した。実装した提案手法における各応答の追従性を評価し, 許容される接触力の変動に応じて回転速度の上限を設定する必要があることがわかった。

参考文献

- [1]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.
- [2]Z. Ma, A. N. Poo, M. H. Ang, G. S. Hong, and H. H. See, "Design and control of an end-effector for industrial finishing applications," Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 53, no. April, pp. 240–253, 2018.
- [3]Y. Kakinuma, K. Igarashi, S. Katsura, and T. Aoyama, "Development of 5-axis polishing machine capable of simultaneous trajectory, posture, and force control," CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 63, no. 1, pp. 379–382, 2013.

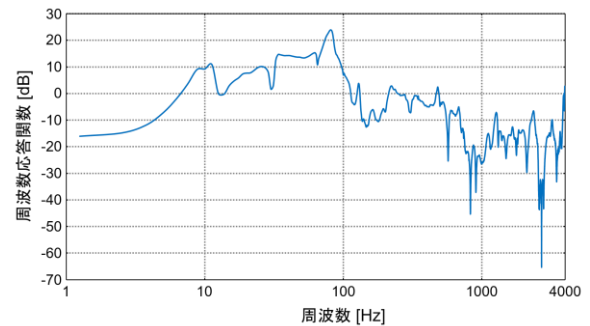


図3 エンドエフェクタの動特性

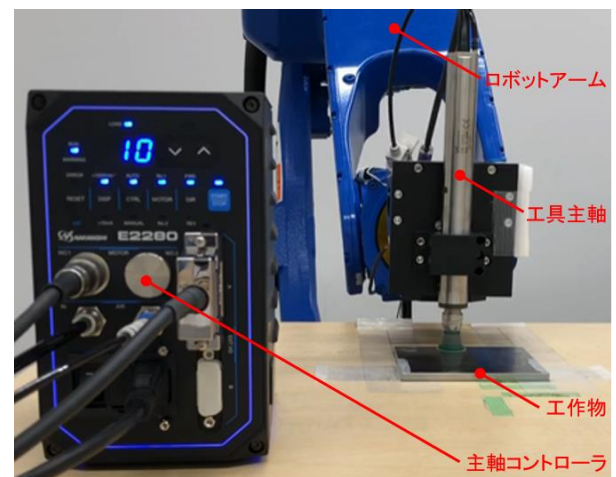
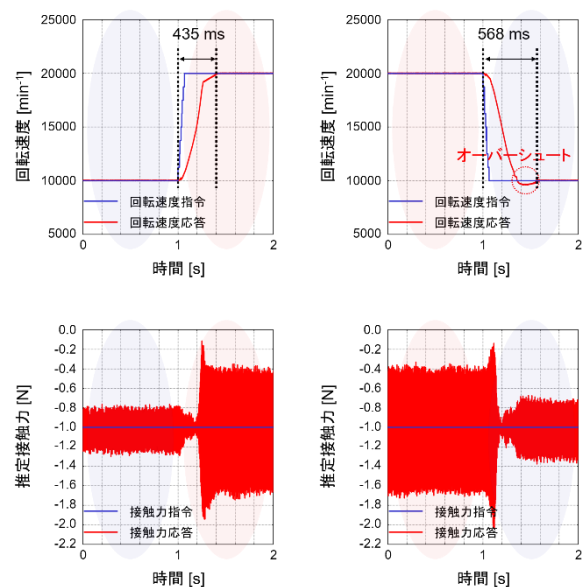


図4 ロボット研磨の様子

表1 加工条件

	低速	高速
送り速度 [mm/s]	2	4
回転速度 [min^{-1}]	10000	20000
接触力 [N]	1	1



(a) 低速から高速

(b) 高速から低速

図5 ロボット研磨の実験結果