

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

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 所属 ○小川翔太郎, ©柿沼康弘

要旨

金型の製造工程において、研磨工程は今もなお手作業で行われている。しかし、熟練工の高齢化といった問題から、研磨工程の自動化が強く求められている。そこで本研究では、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を提案した。本システムにおいて、シリアルリンクロボットの送り速度に応じてエンドエフェクタの接触力を制御できることを確認した。

1. 緒論

金型は、樹脂を原料とした射出成形をはじめ、プレス加工や鋳造などで用いられており、現代の製造業において欠かせない部品となっている。金型の設計工程や機械加工はCADやCAM、NC工作機械の普及により効率化や自動化が進められている。一方、研磨工程は未だに熟練工の手作業によって行われている。しかし、熟練工の高齢化や金属微粒子の飛散による健康への悪影響、習熟度の違いによる表面品質のバラつき等の理由から研磨工程の自動化が強く求められている[1]。そこで本研究では、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を提案する。

2. 研磨理論に基づくロボット研磨システムの提案

本研究では、研磨加工による表面形状の変化に関する理論であるプレストンの法則に基づき、ロボット研磨システムの開発を行う。プレストンの法則は、式(1)のように表される[2]。

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

式(1)より、材料除去量 dz は、研磨圧力 p 、研磨相対速度 v 、工具の滞留時間 t に比例する。 K_p はプレストン係数である。研磨加工において、材料除去量 dz を一定にすることで表面形状が均一化される。

ここで、研磨圧力 p 、研磨相対速度 v 、工具の滞留時間 dt を式(2)、(3)、(4)のように表すと、式(1)は式(5)のように表すことができる。

$$p = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$v = v_t \quad (3)$$

$$dt = \frac{dL}{V} \quad (4)$$

$$dz = K_p \cdot \frac{F}{S} \cdot v_t \cdot \frac{dL}{V} \quad (5)$$

式(5)より、高精度なロボット研磨を実現するためには、研磨接触力 F 、工具回転速度 v_t 、ロボットの送り速度 V を同時に制御する必要があると考えられる。しかし、シリアルリンクロボットだけでは高精度な位置制御、力制御は望めず、高精度なロボット研磨の実現は難しい。そこで、本研究ではマクロ-マイクロメカニズムを応用したロボット研磨システムを提案する。マクロ-マイクロメカニズムとは、ロボット〈マクロメカニズム〉の先端に付加的装置〈マイクロメカニズム〉を装着する機構である。

Fig. 1に示すように、本研究ではマクロメカニズムとしてシリアルリンクロボットを、マイクロメカニズムとして工具スピンドルを有するエンドエフェクタを用いる。Fig. 2に示すシステムにおいて、まず上位コントローラからシリアルリンクロボット、エンドエフェクタ、工具スピンドルに対しそれぞれ位置指令、力指令、回転速度指令が送られる。次に、シリアルリンクロボットから上位コントローラに対して位置情報が返され、その情報をもとに上

位コントローラで演算が行われ各構成要素を連動させる。本研究では、この研磨ロボットシステムの開発の第一歩として、回転速度は固定し、ロボットの送り速度の変化に応じてエンドエフェクタの接触力制御の構築を目指した。

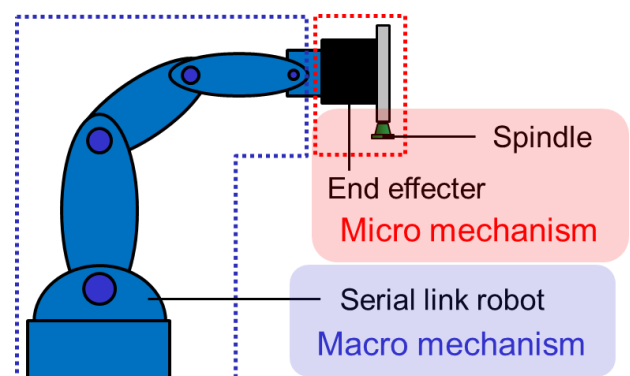


Fig. 1 Concept of polishing robot adopting macro-micro mechanism

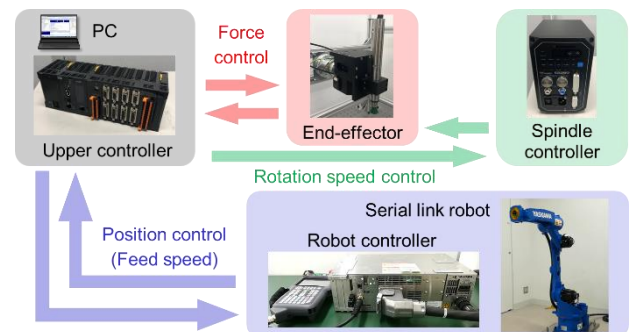


Fig. 2 System configuration of the proposed polishing robot

3. 接触力プロファイル関数の作成

式(5)の右辺において、研磨接触力 F とロボットの送り速度 V のみを変数としたうえで、ロボットの送り速度の変化に応じてエンドエフェクタの接触力を制御する接触力プロファイル関数を式(6)のように作成した。サーボ周期 $T(=0.4 \text{ ms})$ 毎に送り速度の応答値 $V^{res}(t)$ の変化率が逐次算出され、それに応じて接触力の指令値 $F^{cmd}(t)$ が生成される。

$$F^{cmd}(t) = F^{cmd}(t-T) \times \frac{V^{res}(t)}{V^{res}(t-T)} \quad (6)$$

エンドエフェクタの研磨接触力 F とロボットの送り速度 V の比を一定にすることで、理論的には材料除去量 dz が一定となり表面形状を均一に研磨することができると考えられる。

4. 力指令値算出の演算性能評価

式(6)において、送り速度応答値 $V^{res}(t)$ を受け取り力指令値 $F^{cmd}(t)$ が算出されるまでの演算時間を評価した。手順としては、まずプログラミングペンダントを用いてロボットに送り速度1200 mm/sの正方形パス(Fig. 3)を教示した。次に、ロボットを自動再生操作し、送り速度応答値 $V^{res}(t)$ と力指令値 $F^{cmd}(t)$ のモニタリング結果を出力した。

出力結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)より、逐次算出される送り速度応答値の変化率に応じて力指令値 $F^{cmd}(t)$ が生成されることを確認した。

さらに、パスが step1 から step2 へ移行する際の送り速度応答値 $V^{res}(t)$ の変化開始の様子を拡大した図を Fig. 4(b)に示す。送り速度応答値 $V^{res}(t)$ を受け取った後、力指令値 $F^{cmd}(t)$ が生成されるまでの演算遅れはほぼない。一方でロボットの速度応答値 $V^{res}(t)$ はロボットコントローラより 4ms 毎に上位コントローラに送信されることを確認した。

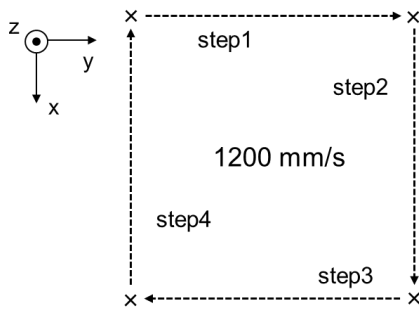
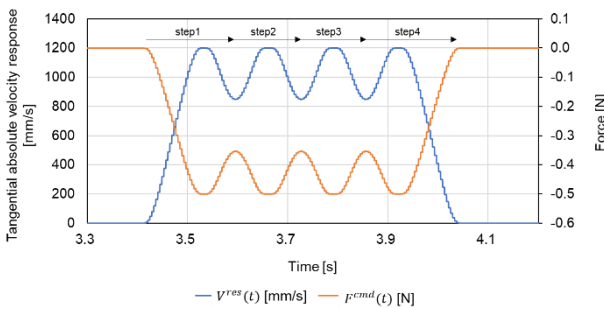
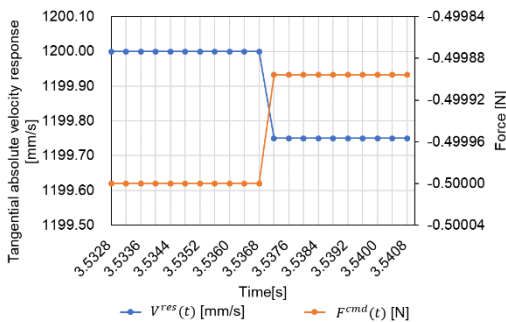


Fig. 3 Square path for evaluation of arithmetic capacity



(a) Behavior of force command according to velocity response



(b) At the start of velocity change (From step1 to step2)

Fig. 4 Relation between velocity response and force command in the macro-micro mechanism

5. 力指令値に対する反力推定値の追従性評価

反力推定オブザーバで推定される反力推定値 $\hat{F}_{react}(t)$ の追従性を、送り速度応答値 $V^{res}(t)$ 、力指令値 $F^{cmd}(t)$ 、反力推定値 $\hat{F}_{react}(t)$

の観測結果から評価した。手順としては、まずプログラミングペンダントを用いてロボットに送り速度 10, 15, 20 mm/s で変化する直線パス(Fig. 5)を教示した。次に、工具スピンドルは回転させずに、エンドエフェクタを金属平板に接触させ、ロボットを自動再生操作した。その際の送り速度応答値 $V^{res}(t)$ 、力指令値 $F^{cmd}(t)$ 、反力推定値 $\hat{F}_{react}(t)$ の挙動を Fig.5 に示す。遅れやオーバーシュートは生じるものの、力指令値 $F^{cmd}(t)$ に対し反力推定値 $\hat{F}_{react}(t)$ が速やかに追従することがわかった。また、反力推定値の動的誤差は ± 0.1 N 程度であり十分に小さいことを確認した。

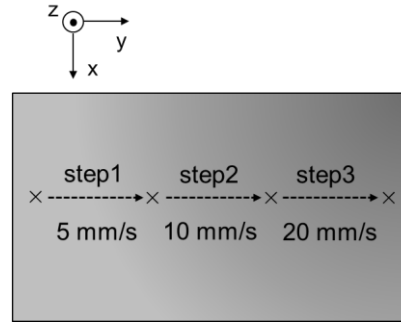


Fig. 5 Straight path in step response test

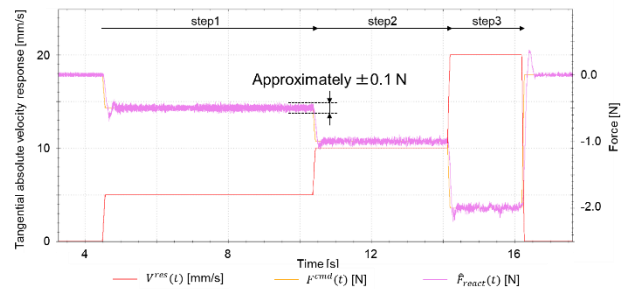


Fig. 6 The behavior of force response in the end-effector according to change of velocity in the serial-link robot

6. 結論

本研究では、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行った。得られた成果を以下に示す。

1. サーボ周期毎に送り速度応答値の変化率を逐次算出し、それに応じて接触力の指令値を生成する接触力プロファイル関数を作成した。
2. 接触力プロファイル関数を用いて、力指令値生成の時間遅れを評価した。シリアルリンクロボットの速度応答値の変化に応じて力指令値は遅れなく算出されることがわかった。
3. エンドエフェクタの反力推定値の追従性を評価した。その結果、遅れやオーバーシュートは生じるものの、どの力指令値の変化に対しても反力推定値が速やかに追従し、反力推定値のずれは ± 0.1 N 程度に抑えられることがわかった。

参考文献

[1] J. Chaves-Jacob, J.M. Linares, J.M. Spraul. "Control of the contact force in a pre-polishing operation of free-form surfaces realised with a 5-axis CNC machine". CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64, pp.309-312.
 [2] F.W.Preston. "The theory and design of plate glass polishing machines". Journal of the Society of Glass Technology, 1927, 11, pp.214-256.