

5軸シリアル-パラレルメカニズム研磨機を用いた 未知の加工表面に対する研磨加工制御法の開発

慶應義塾大学 ○浅賀亮介, ◎柿沼康弘

要旨

自動車の塗装工程で行われる補修研磨作業は、その研磨の難しさから未だに熟練技術者の手作業で行われている。しかし、熟練技術者の減少や製品品質のバラつき等の理由から、自動化が求められている。本研究室では、熟練技術者の研磨技能を抽出し、平面において再現することに成功した。本研究では、熟練研磨技能再現技術を平面から未知の自由曲面に応用するため、曲面の法線方向に対し工具の姿勢と力を同時制御する手法を開発した。

1. 緒論

自動車の製造における塗装工程で行われる車体表面の補修研磨作業は、熟練技術者が自らの経験に基づき手作業で行っている。しかし、熟練技術者が減少していることや、習熟度の差によって製品品質にバラつきが生じてしまう等の理由から、補修研磨作業の自動化が求められている。本研究室では補修研磨作業の自動化のため、熟練技術者の研磨技能を抽出し、平面において再現することに成功した[1]。しかし、車体表面は曲面で構成されているため、熟練研磨技能再現技術を平面から未知の自由曲面に適応させる必要がある。そこで本研究では、一般的に用いられる CAD データや外部センサを用いず、サーボ情報のみを用いて曲面の法線方向を推定し、工具姿勢・研磨力を同時に制御する手法を開発した。

2. 5軸シリアル-パラレルメカニズム研磨機

本研究では、図1に示すような2軸シリアルメカニズム(XYステージ)と3軸パラレルメカニズムを組み合わせた5軸シリアル-パラレルメカニズム研磨機を用いる[2]。そして、パラレル部の制御にはモードディカップリング手法を用いて、パラレル部が上下するZ軸モード、Y軸回りに回転するY軸回転モード、X軸回りに回転するX軸回転モードの三つのモードを独立に制御する。

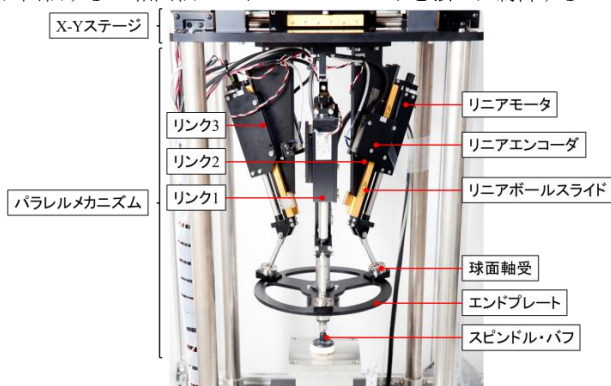


図1 5軸シリアル-パラレルメカニズム研磨機

3. センサレス力制御

本研究では、外部センサを用いずセンサレスで力制御を行う。センサレス力制御系を図2に示す。電流指令値と位置応答値の差からモータに加わった外乱を推定し、事前に同定した摩擦力と重力を外乱から差し引くことで、工具が受けた反力のみを推定する。本研究では、以上の手法を反力推定オブザーバと呼ぶ。

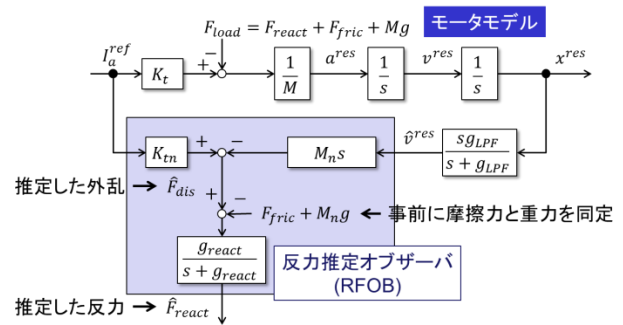


図2 センサレス力制御

4. 未知の加工表面に対する姿勢制御法

図3のように加工表面の法線方向と工具の軸線が一致していない時、バフが加工表面に片当たりするため摩擦力が片方向のみに発生する。一方、加工表面の法線方向と工具軸線が一致している時は摩擦力が対称に発生するため偶力となり打ち消される。この性質に基づき、摩擦力を0に制御することで姿勢を法線方向に制御する。ここで式(1)のように摩擦力 F_{ext} と姿勢角 θ をバネ・ダンパ系でモデル化した。ここで K はバネ定数、 C は減衰係数を表す。

$$G(s) = \frac{F_{ext}}{\theta} = \frac{1}{K + Cs} \quad (1)$$

図4は姿勢制御法のブロック線図である。本研究ではY軸方向の力を0に制御することでY軸回りの角度を、X軸方向の力を0に制御することでX軸回りの角度を法線方向へ制御する。

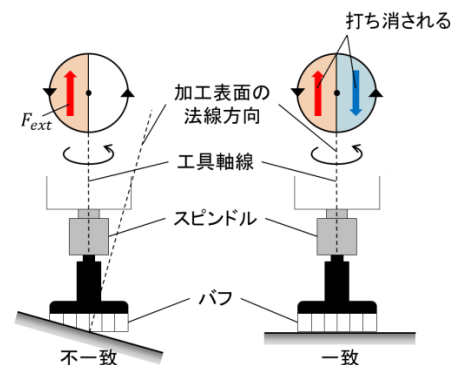


図3 摩擦力の様子

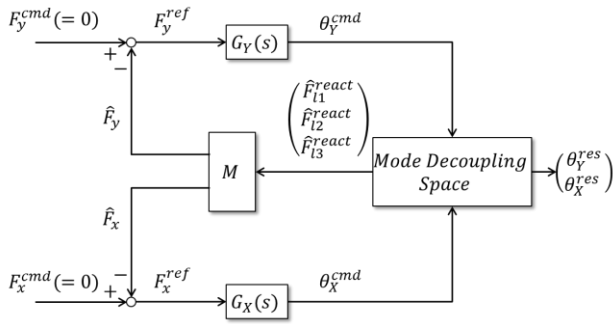


図4 姿勢制御法のブロック線図

5. 未知の加工表面に対する力制御法

姿勢制御法により θ_y, θ_x 傾いた工具の法線方向は、図5のようにその角度を基に描いた直方体の対角線方向となる。そしてX軸方向の力 F_x 、Y軸方向の力 F_y 、Z軸方向の力 F_z を法線方向に分解し、足し合わせることで式(2)のように法線方向の力 F_n を求めることができる。本研究では、Z軸方向に力制御を行うため、式(2)を F_z について解いた式(3)を指令値として用い、法線方向が所望の値になるようZ軸方向の力を制御する。

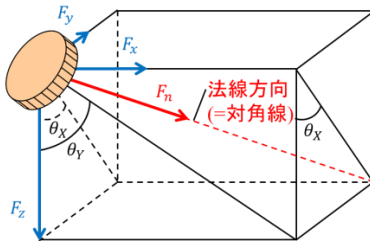


図5 法線方向の力制御

$$F_n = \frac{F_x \tan \theta_y + F_y \tan \theta_x + F_z}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_y + \tan^2 \theta_x}} \quad (2)$$

$$F_z = F_n \sqrt{1 + \tan^2 \theta_y + \tan^2 \theta_x} - F_x \tan \theta_y - F_y \tan \theta_x \quad (3)$$

6. 未知の加工表面に対する姿勢・力制御実験

図6のように未知の加工表面として多方向に傾きのある球面型のワークピースを用いて実験を行う。工具の送りは最初にX軸方向(Y軸回転方向)、次にY軸方向(X軸回転方向)に往復運動を行い、最後に円運動を行う。

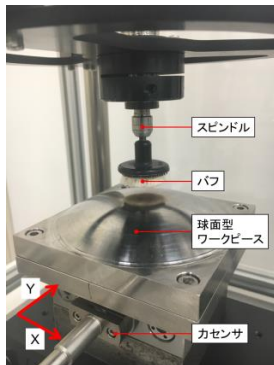


図6 球面型ワークピース

図7,8に姿勢制御法の実験結果、図9に力制御法の実験結果を示す。X軸回りの回転角度 θ_x は平均誤差 1.51° 、Y軸回りの回転角度 θ_y は平均誤差 1.15° で姿勢制御を行うことができた。遅れの原因と

しては、バネ・ダンパモデルの減衰係数 C の影響が考えられる。ここで、減衰係数 C を小さくすると遅れを解消することができるが、同時に振動が発生してしまう、よって、振動を抑制できる範囲で減衰係数 C を調整する必要がある。力制御においては、 6.00N の指令に対し、反力推定オブザーバで推定した力推定値は平均 5.94N 、力センサを用いて計測した力測定値は平均 5.92N の力で力制御を行うことができた。誤差の原因は力センサのノイズ・ドリフトや反力推定オブザーバに用いた摩擦・重力の同定に誤差があったこと、またパラレル部のバックラッシュの影響でエンドプレートが振動してしまったことが考えられる。

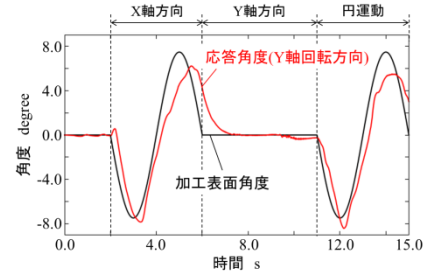


図7 姿勢制御法実験結果(Y軸回り)

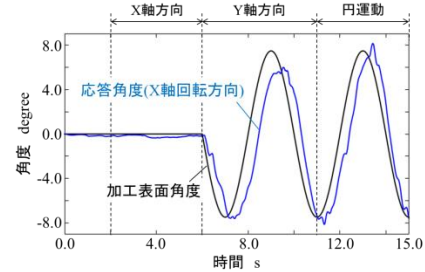


図8 姿勢制御法実験結果(X軸回り)

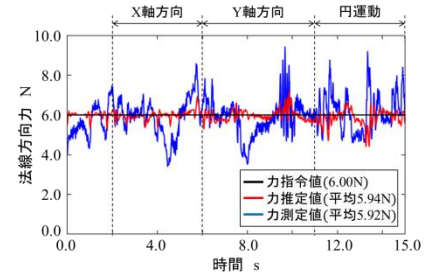


図9 力制御法実験結果

7. 結論

本研究では、CADデータや外部センサを用いずに、サーボ情報のみを用いて未知の加工表面の法線方向に工具姿勢と研磨力を制御する手法を開発した。球面型ワークピースを用いて実験を行った結果、加工表面の法線方向に工具姿勢と研磨力を制御することができた。

参考文献

- [1] Y. Oba, Y. Yamada, K. Igarashi, S. Katsura, Y. Kakinuma. Replication of skilled polishing technique with serial-parallel mechanism polishing machine. *Precis Eng*, 2016, 45, pp.292-300.
- [2] Y. Kakinuma, K. Igarashi, S. Katsura, T. Aoyama. Development of 5-axis polishing machine capable of simultaneous trajectory, posture, and force control. *CIRP Ann - Manuf Technol*, 2013, 62, pp.379-382.