

5 軸シリアル-パラレルメカニズムマシンを用いた 未知の加工面に対する倣い研磨加工法の開発

慶應義塾大学 ○大場勇太, ◎柿沼康弘

要旨

車体塗装後の補修研磨工程は、その研磨の難しさから技術者により手作業で行われている。この工程を自動化することで作業時間や製品品質のバラつきの抑制といったメリットがあり、その要求は大きい。本研究では、この工程の自動化のために熟練技術者の研磨技術を抽出し、平面において再現する技術の開発を行った。本研究では未知の加工面に対する倣い研磨加工法の開発を行い、この技術を平面から曲面に応用することを目的とする。

1. 緒論

現在、自動車の車体塗装後に行われる補修研磨工程は、その研磨の難しさから技術者により手作業で行われている。この工程を自動化することで作業時間や表面品位のバラつきの抑制といったメリットがあり、その要求は大きい。本研究では、この工程の自動化のために熟練技術者の研磨技術を抽出し、平面において再現する技術を開発した。本研究では、熟練研磨技術を平面から曲面に応用することを考え、未知の加工面の法線方向に対して姿勢と力を制御する倣い研磨加工法の開発に取り組んだ。

2. 5 軸シリアル-パラレルメカニズムマシン

図1に2軸シリアルメカニズム(X-Y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マシンを示す。制御する上で運動学を解くことが困難であるパラレルメカニズム部には、Quarry 行列[1]を用いたモードディカップリング手法を適用し、姿勢と力を独立に制御する。

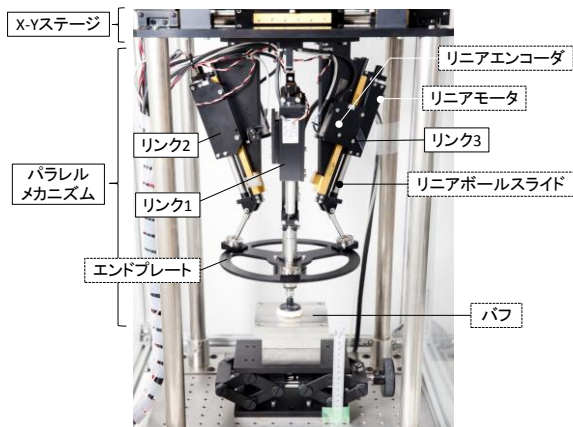


図1 開発した5軸シリアル-パラレルメカニズムマシン

3. 未知の加工面の法線方向に対する姿勢制御法

加工面の法線方向と工具軸線が一致しない場合、バフの片当たりにより発生する外力の影響で工具の送り方向とZ軸方向がなす面に対して垂直な力 F_t が検出されるが、法線方向と工具軸線が一致する場合は偶力となり、 F_t が検出されない(図2)。よって、 F_t を0に制御すれば法線方向は工具軸線と一致する。本研究では F_t と工具の姿勢角 θ_f の関係を式(1)のようにモデル化した。

$$C(s) = \frac{F_t}{\theta_f} = \frac{1}{K_\theta + C_\theta s} \quad (1)$$

ここで K_θ はばね定数、 C_θ は減衰係数を表す。図3のように制御系を設計し、 F_t の指令値を0とすることで、未知の加工面の法線方向に対する姿勢制御を行った。

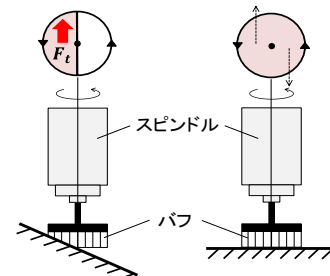


図2 外力 F_t の様子

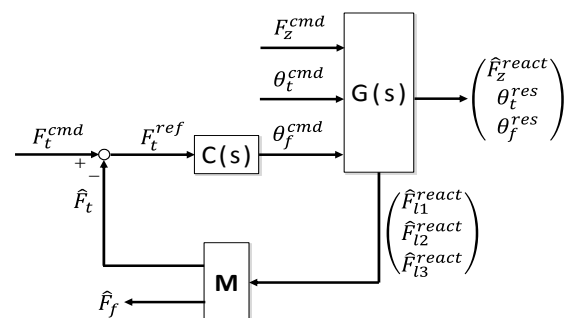


図3 姿勢制御系

4. 未知の加工面の法線方向に対する力制御法

工具をY軸方向に一定速度で運動させ、Z軸方向に力制御を行った際、工具にかかる力の様子を図4に示す。このときZ軸方向の運動方程式とY軸方向の力のつりあいの式はそれぞれ式(2)(3)と表される。

$$\cdot Z \text{ 軸方向} \quad M_a a_z = -F_z + F_n \cos \theta_p - F'_{fric} \sin \theta_p \quad (2)$$

$$\cdot Y \text{ 軸方向} \quad F_y = F_n \sin \theta_p + F'_{fric} \cos \theta_p \quad (3)$$

ここでZ軸方向の加速度 a_z は微小であるため、式(2)における慣性力項 $M_a a_z$ を無視できるとすると、式(2)(3)よりZ軸方向の力 F_z は式(4)と表される。

$$F_z = \frac{F_n}{\cos \theta_p} - F_y \tan \theta_p \quad (4)$$

式(4)においてY軸方向の力 F_y と工具の姿勢角 θ_p をモニタリングし、法線方向の力 F_n に所望の値を代入することで、Z軸方向の力 F_z

の指令値を生成する．このように式(4)を用いることで法線方向の力 F_n を制御する．

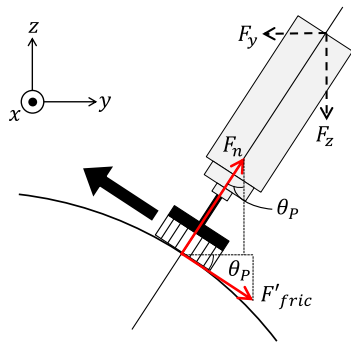


図4 工具が受ける力の様子

5. 実験環境

図5に研磨実験を行う環境を示す．工具のピッチング方向に傾きを持つ面が来るよう曲面を設置し，曲面の下には切削動力計を設置する．ここで切削動力計は，実際に曲面が受ける力の計測のみに用いる．

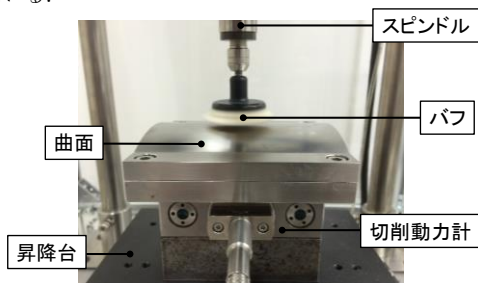


図5 実験環境

6. 倣い研磨加工法の検証実験

曲面の中心から送り速度 4.0mm/s で往復運動，法線方向に 3.0N で力制御を行い，研磨加工実験を行った図6に未知の加工面に対して倣い研磨を行う様子を示す．また図7より曲面の角度と姿勢角の応答値の最大の誤差は 1.89° であり，目標とする誤差 2° 以内を満たす結果が得られた．

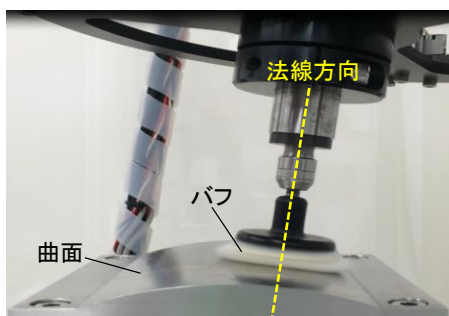


図6 倣い研磨の様子

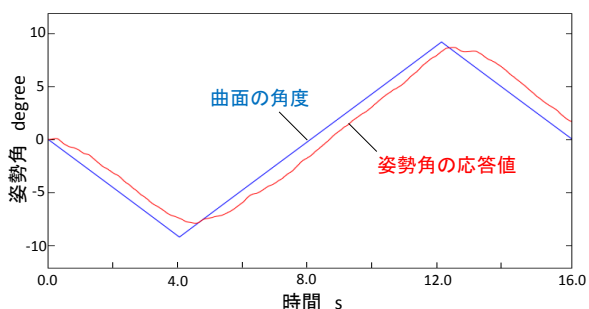


図7 姿勢角の応答結果

図8に切削動力計を用いて計測したY軸，Z軸方向の力の法線方向成分と，それらの和である法線方向の力 F_n を示した．結果より F_n に対して $F_y \sin \theta_p$ の影響が微小であり， $F_z \cos \theta_p$ が支配的要素であることがわかった．つまり曲面の角度が小さい場合，法線方向の力とZ軸方向の力はほぼ同じであると考えられる．また法線方向の力実測値と指令値は，リンクの切り替え時を除いて最大で 0.5N の誤差となった．リンクの切り替え時に誤差が大きくなった原因として，各リンクの反力推定オブザーバ[2]における摩擦補償値と実際の摩擦の誤差の影響が考えられる．

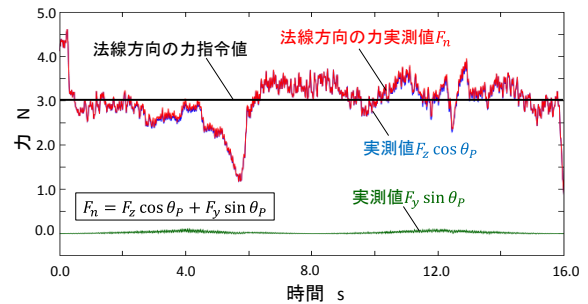


図8 切削動力計を用いて計測した力実測値

7. 熟練技能再現技術への応用

本研究で開発した未知の加工面に対する倣い研磨加工法を用いて，熟練研磨技術を曲面上で再現した．なお倣い研磨加工法の検証実験より，法線方向の力とZ軸方向の力はほぼ同じであることがわかっているため，本実験ではZ軸方向に対して力制御を行う．図9より，曲面の角度と姿勢角の応答値の最大の誤差は 3.8° であったが，平均誤差は 1.5° であった．

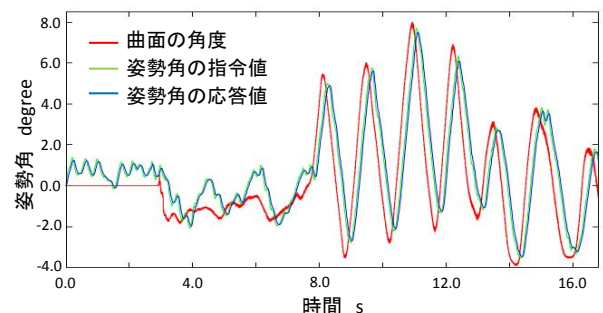


図9 姿勢角の応答結果

8. 結論

本研究では5軸シリアル-パラレルメカニズムマシンを用いて，未知の加工面に対する倣い研磨加工法を開発した．この手法により，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面の法線方向に対して姿勢と力を制御する倣い研磨を実現した．また倣い研磨加工法を用いることで，熟練技能再現技術を平面から未知の曲面へ応用することができた．

9. 参考文献

- [1] S. Katsura, "Quarry of Modal Information from Environment for Advanced Motion Control", 電気学会論文誌, Vol. 126, No. 4, Page. 372-378, 2006
- [2] T. Murakami, "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 2, Page. 259-265, 1993