

Haptic Device を用いた 5 軸制御加工のための 工具姿勢呈示手法の開発

電気通信大学 ○ 圃 知哉, 電気通信大学大学院 ◎ 森重功一

要旨

先行研究では、5 軸制御加工に対し、仮想空間内の物体を操作できる力覚呈示装置を用いて、直感的に工具姿勢を呈示するシステムを開発してきた。本報では、先行研究で開発されたシステムに、力覚を利用して特徴点へ工具を誘導する機能と、呈示した姿勢から工具経路全体の姿勢を算出する機能を追加した。この機能により、インペラなどの複雑な形状に対して、干渉のない工具経路を容易に生成できることを確認した。

1. 序論

5 軸制御工作機械は、工作物に対して様々な工具姿勢を取れることから、複雑な形状の加工ができるため、産業界での需要が高いが、複数の軸を手動で同時に操作することは難しいため、CAM により工具経路を生成することが一般的である。しかし、工具経路の生成や修正を行う場合、姿勢を数値入力で設定するため、作業者の意図する姿勢を反映することが困難となっている。

先行研究では、数値入力の代わりに、姿勢を直感的に与えることができる Haptic Device (HD) を使用し、工具経路を生成するシステムを作成した。本研究では、作業者に工具の位置を指示する機能、工具経路の姿勢を滑らかにする機能、干渉を回避する機能を開発した。

2. 工具経路の生成手法

2.1 システムの概要

本研究では、走査線加工を対象としている。図 1 に示すように、加工面上に工具中心点を配置し、最初のパスの始点 P_{00} と終点 P_{0m} 、最後のパスの始点 P_{n0} と終点 P_{nm} 、計 4 つの工具中心点に対して HD で姿勢を入力する。

入力した姿勢の中で、始点となる P_{00} 、 P_{n0} の 2 点における姿勢を用いて全てのパスの始点の姿勢を補間し、パスの終点に関しても終点となる P_{0m} 、 P_{nm} を用いて同様に補間を行う。得られた始点と終点からツールフィード方向に対して補間を行い、図 2 に示すような工具経路が生成される。

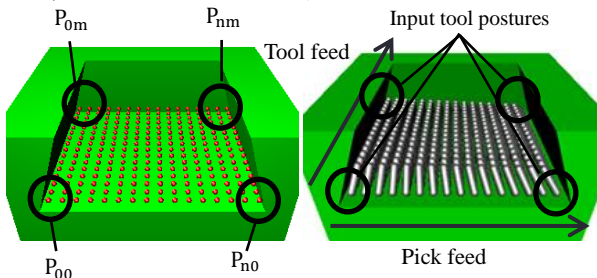


Fig.1: Setting of tool center points Fig.2: Generated tool path

2.2 力覚呈示装置

HD は、仮想空間内の物体を操作し、物体が接触した際の反力を、力覚として作業者に提示する装置である。仮想空間内に工具と目標形状を設定し、HD と仮想工具を同期させ、工具姿勢を入力する。

本研究では、東京工業大学佐藤研究室で開発された、図 3 に示す SPIDAR-G を用いた。SPIDAR-G は、直進 3 自由度と回転 3 自由度の力覚を出力できるため、図 4 のように直進 3 自由度のみの HD と比較して、適切な姿勢を入力できる。

2.3 力覚生成

姿勢入力時の工具と目標形状の干渉の度合いを、干渉深度としてリアルタイムで計算を行う。干渉深度は、図 5(a) に示した物体の移動ベクトルである直進干渉深度ベクトル V_T と、図 5(b) に示した姿勢変化を表す回転干渉深度ベクトル V_R とし計算される。

SPIDAR-G から出力される力覚は、仮想的なバネモデルを定義することで計算している。 V_R の成分から得られる回転ベ

クトル R 、HD の動作から得られる力点の速度を v 、角速度を ω とする。これに加え、バネ定数 k 、直進移動のダンパ定数 b_F 、回転移動のダンパ定数 b_T とし、直進力 F とトルク T を以下の式(1),(2)から計算している。

$$F = -kV_T - b_F v \quad (1)$$

$$T = -kR - b_T \omega \quad (2)$$

これらの式を用いることで、干渉した際に強い力覚が呈示され、干渉のない姿勢の入力が可能となる。

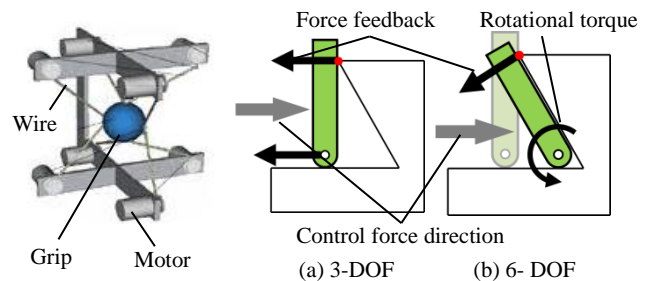


Fig.3: SPIDAR-G

Fig.4: Comparison of DOF of force feedback

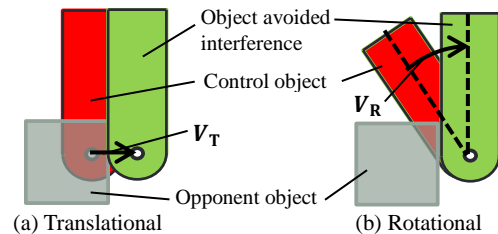


Fig.5: Comparison of penetration depth vector

3. 開発した機能

3.1 工具誘導機能

本研究では、適切な位置の姿勢を入力するために、図 6 に示すように仮想工具を目標点へ誘導する機能を開発した。誘導力 F_1 は、目標点を P_t 、仮想工具の工具中心点を P_c 、ばね定数を k とし、式(3)から得られる。この機能で仮想工具を目標点に誘導することによって、正しい入力が可能となる。

$$F_1 = -k(P_t - P_c) \quad (3)$$

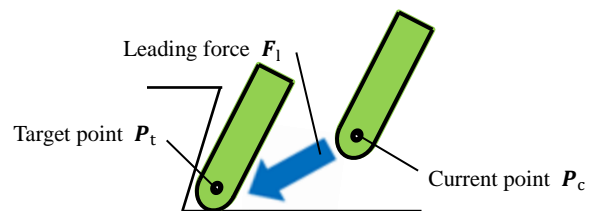


Fig.6: Function of tool leading

3.2 加重平均を用いた姿勢補間

工具経路の姿勢は、始点と終点の間で滑らかに変化する必要がある。そこで、入力した点以外の工具中心点の姿勢は、既に姿勢が決定されている点の工具軸ベクトルに、処理の対

象となる工具中心点との距離の逆数を重みにした加重平均により決定する. 決定されている工具軸ベクトルを T_1, T_2, \dots, T_n , 求める工具中心点との距離を d_1, d_2, \dots, d_n として, 計算する工具軸ベクトル T_{cal} の計算式を式(4)に示す.

$$T_{cal} = \frac{\frac{T_1}{d_1} + \frac{T_2}{d_2} + \dots + \frac{T_n}{d_n}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{1}{d_n}} \quad (4)$$

この計算を用いて補間を行うことによって, 図4に示すように, ピックフィード方向とツールフィード方向の双方向に対して, 姿勢が滑らかに変化する工具経路が生成される.

3.3 干渉した工具経路の修正

工具経路を生成後, 工具の干渉チェックを行う. 補間により作成した姿勢で干渉が検出された場合は, 工具経路の修正を行う. 説明のために, 図7に示すポケット形状に干渉物A, Bを加えた形状を用いる.

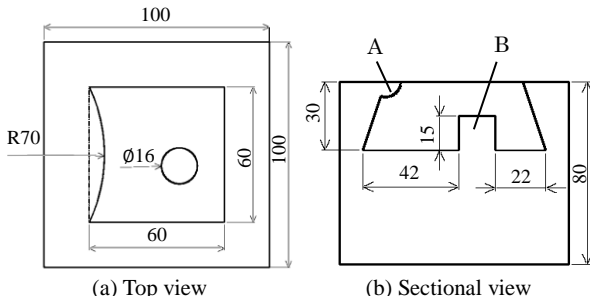


Fig.7: Target pocket shape with interference objects

まず, 点 $P_{00}, P_{0m}, P_{n0}, P_{nm}$ に対して姿勢を入力し, 図8に示すような工具経路が生成される. この経路に対して干渉判定を行うと, 干渉物A, B近辺の姿勢で目標形状との干渉が生じる. そこで, 図9に示すように, 干渉物付近の点 P_{c1} と P_{c2} における姿勢を入力する.

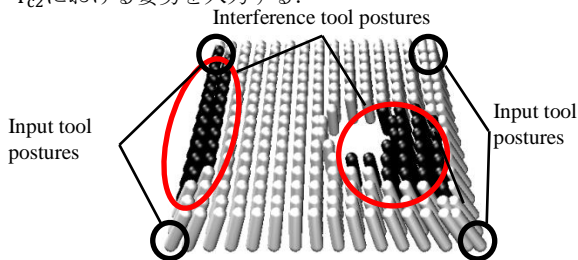


Fig.8: Generated tool path for pocket shape with interference

境界付近の姿勢は, 図9(a)のように, 再入力点 P_{c1} が近くに存在している最初のパスの点 $P_{01} \sim P_{0m-1}$ における姿勢を, 再入力点 P_{c1} とパスの両端の点 P_{00}, P_{0m} における姿勢を用いた3点の加重平均, その他の境界の点 $P_{10} \sim P_{n-10}, P_{1m} \sim P_{n-1m}, P_{n1} \sim P_{nm-1}$ における姿勢を, 両端の点 P_{00} と P_{n0}, P_{0m} と P_{nm}, P_{n0} と P_{nm} における姿勢を用いた2点の加重平均により算出する.

図9(b)のように, 境界内部の点 P_{ij} における姿勢は, 再入力点 P_{c1} と P_{c2} , 決定された境界の点 $P_{0j}, P_{10}, P_{1m}, P_{nj}$ における姿勢を用いた6点の加重平均により算出する.

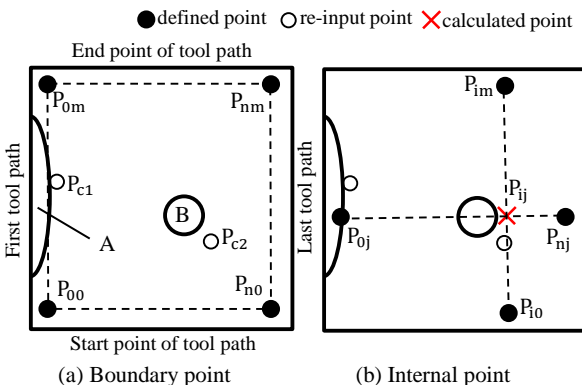


Fig.9: Tool path generation without interference

生成した工具経路で干渉判定を行い, 干渉が検出された場合は再び姿勢を入力し, 工具経路を修正する. 干渉がなくなるまで修正を繰り返す.

4. 検証実験

開発した手法を検証するために, インペラを加工するための工具経路を生成した. インペラは, ブレードの形状が複雑な曲面となっているため, 干渉のない工具経路を作成することが困難である. また, 図10に示すように加工面の内部にスプリッターブレードを加えることで, より干渉が生じやすい形状とした.

工具経路の作成では, 図11(a)のようにフルブレードとスプリッターブレード付近で工具干渉が生じていたが, 干渉点付近で姿勢の再入力を行うことで, 図11(b)のように干渉を回避した工具経路に修正された. 加工シミュレーションの結果, 生成された工具経路では干渉は確認されなかった.

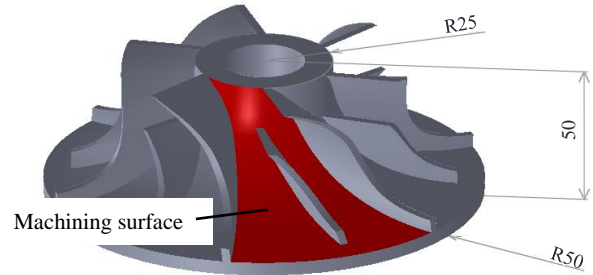


Fig.10: Model used to validate experiment

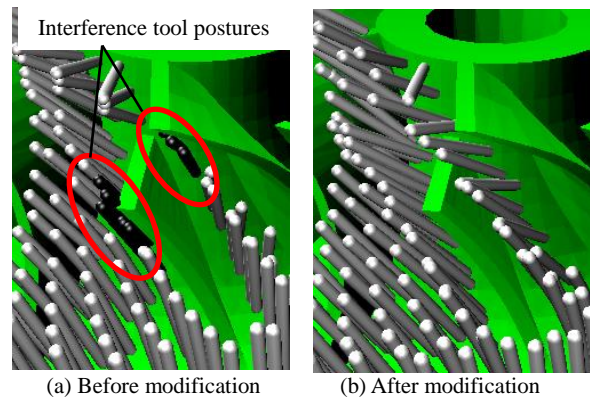


Fig.11: Comparison of the tool path of the impeller

5. 結論

本研究では, 5軸加工を対象として, HDを用いて直感的に工具姿勢を呈示し, インペラのような複雑な形状に対して, 干渉のない工具経路を生成することを目的としている. 工具誘導機能, 加重平均を用いた姿勢補間, 工具経路を修正する機能を実装し, 以下のような結論を得た.

- (1) 誘導機能を用いることで, 工具を目標点に誘導できることを確認した.
- (2) 加重平均を用いた姿勢補間により, ツールフィード方向とピックフィード方向の双方向に対して, 姿勢変化が連続的な工具経路を生成することができた.
- (3) 生成した工具経路で干渉が発生した場合でも, 姿勢を再入力して経路を修正することで, 干渉を回避した工具経路を生成できることを確認した.

参考文献

- [1] S. Kobori, K. Morishige: Development of Operation Interface for Machine Tool using 6-DOF Haptic Device - Guidance of Tool Movement using Force Sense -, Key Engineering Materials Vol.516 p.337-342 (2012/6)
- [2] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D2 No.7 p.887-894, (1991/7)