207 応答曲面法と切削用 NC データ解析技術を用いた NC データの最適化

Optimization of NC Data using response surface methodology and NC simulation

江渡 寿郎・伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

Hisao Eto, ITOUCHU Techno-Solutions Corporation

大西 慶弘・伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

Yoshihiro Ohnishi, ITOUCHU Techno-Solutions Corporation

越水 重臣・産業技術大学院大学

Shigeomi Koshimizu, Advanced Institute of Industrial Technology

Our group has been focusing on Modeling and analysis of NC toolpaths via Physics-Based Methods. This modeling based on Physics-Based Methods is necessary for the understanding the cutting process and the load balancing approach which enable the tangible reduction of cycle time. But it is difficult to decide the optimized cutting condition because many factors must be considered in cutting process even though Physics-Based simulations were able to be done on CAD/CAM system. So in this study, the new system based on synthesis of this NC analysis and response surface methodology was created for the optimization of NC toolpaths. The optimization system showed the flexible NC optimization designed using tool life equation and machine specification. Additionally, the consideration about depth of cut like the toolpath geometry was done.

Key Words: Optimization of NC data, Response surface method, CAD/CAM/CAE, Cutting simulation

1. 緒言

近年 CAD/CAM ソフトウェアが普及するようになり、NC(Numerical Control)による機械加工が人手による機械加工を代替するようになってきている。CAD/CAM によるシミュレーションは正確な幾何形状に基づく幾何シミュレーションを行うが、加工される被削材の材料特性に応じた物理シミュレーションを行っているわけではない。我々の研究グループでは CAD/CAM 上の幾何シミュレーションに有限要素法解析結果を適用する Semi-Empirical 法による NC 解析に取り組んでいる⁽¹⁾(図 1)。本研究ではこの NC 解析技術と応答曲面法を組み合わせ切削用 NC データを最適化する方法を提案する。

2. Semi-Empirical 法

切削加工分野のシミュレーション手法としては有限要素法(Finite Element Method, FEM)による解析が広く用いられている。しかしこの手法は解析の時間増分を十分小さくとらないと解析精度を保てないため解析コストに難がある。そのためときに数時間におよぶ加工プロセスの加工条件や工具軌道を記載した NC 全体に有限要素法解析を適用することは難しい。そのような背景から、我々の研究グループでは解析の対象とする旋盤加工の工具が受ける工具すくい面上の垂直方向および平行方向の分力に相当する切削負荷係数を以下に示す式で表現し、式中の材料定数を有限要素法解析結果を用いて同定する Semi-Empirical 法により NC 解析を実施している。

$$K = C \cdot (t_{ave})^a \cdot V^b \cdot (1 - \sin \alpha)^c \quad (1)$$

ここで、 K : 切削負荷係数、 t_{ave} : 平均切削厚み、 V : 切削速度、 α : 工具すくい角、 C, a, b, c : 材料定数、である。この手法であれば旋盤モデルの場合、被削材が 1 回転するごとの切削負荷の値を(1)式を用いて算出することができるので、有限要素法解析に比べ解析コストの面で優れる。

Semi-Empirical 法を NC 解析に適用する事例を図 2 に示す。対象とする被削材は SUS304 とし旋盤マシンにより加工を行う。NC 中に記載される加工条件や部品形状に応じて削り代や切削条件が変化するため加工中は切削負荷が一定になっているわけではない。Semi-Empirical 法による解析ではそのような切削負荷の変動を評価することが可能となる。さらに Semi-Empirical 法による解析では解析者が切削負荷の値を指定すると(1)式に基づき、その切削負荷となる平均切削厚みの値より工具送り量を算出することができる。図 2 に示す事例は切削負荷計算結果に対し切削負荷(主軸動力)を 4kWatt になるように NC 中の送り量を最適化した事例である。

図2 負荷平滑化前後における主軸動力値の比較

3. 応答曲面法を用いた最適加工条件の探索

Semi-Empirical 法による解析では解析者が指定した切削負荷となるように NC 中の送り量を調整することができるが工具にどの程度切削負荷をかけることで最適な加工となるのか決定的な知見を与えてはくれない。そこで本研究では応答曲面法(Response Surface Methodology, RSM)を用い NC 最適化を試みた。NC 最適化のためのフローを図 3 に示す。

図3 切削用のNCデータ最適化フロー

最適加工条件探索のための目的関数は加工時間の最小化とする。そのための設計変数として負荷平滑化時の主軸動力(4.0-7.0kWatt)および主軸回転数(150-900RPM)を考慮する。制約条件には以下の考察より工具寿命指数を用いた。旋削加工における工具寿命は以下の式にて表現される。

$$C = V \cdot f^a \cdot T^b \quad (2)$$

ここで、 V は切削速度、 f は送り量、 T は工具寿命、 C, a, b は材料定数である。Semi-Empirical法による解析では被削材一回転ごとの V, f および加工時間を算出しているため、ここでは簡易的に V, f から求まる工具寿命時間に対する被削材一回転の加工時間をパーセントの値で評価し、加工中のその値の和を工具寿命指数と定義した。工具寿命指数が100となるとき工具は寿命と判断されるが、今回の試行では対象とするパーツの加工個数を考慮して工具寿命指数5を制約条件とした。

応答曲面による近似最適化を行う前にラテン超方格により20ケースの実験計画を行った。応答曲面は放射対象基底関数(Radial Basis Function, RBF)により作成した。結果を図4に示す。負荷平滑化時の主軸動力値の増加は加工時間短縮への寄与が大きい。主軸回転数の増加は低回転時に加工時間短縮に対する大きな寄与が認められる。主軸動力値や回転数の増加は工具寿命を劣化させるが、加工時間を短くする因子でもあるため工具寿命指数を改善する場合がある。

図4 応答曲面 (a)加工時間、(b)工具寿命指数

応答曲面法を用いて近似最適化を行うと最適な加工条件は負荷平滑時の主軸動力が7.0kWattおよび主軸回転数が231RPMとなった(図5)。主軸動力に機械の上限7.0kWattを使用することで加工時間の短縮を図る一方で工具寿命を考慮し主軸回転数が231RPMに最適化された。設計変数の上下限および制約条件を満たしながら加工時間を70%削減する加工条件を見出した。

図5 応答曲面法による最適化結果

同様の手法を合金鋼であるSNCM439の加工にも適用する。被削材が変更されることにより材料特性が変わるため解析で使用する材料定数がSUS304とは異なる。これら材料定数を用いて応答曲面法によりSNCM439の最適な加工条件を探索した結果を図6に示す。SUS304より被削性が劣る本鋼種の加工では負荷平滑化時の主軸動力値が5.6kWattおよび主軸回転数が150RPMと最適化された。

図6 SUS304とSNCM439の最適加工の比較

本手法では制約条件や設計変数の上下限を満たすように主軸回転数と負荷平滑化時の主軸動力値を最適化するがツールパスの軌道については変化させていない。そこで今回はSNCM439の加工に対しツールパス軌道を変更する検討を行った。すなわち図6に示した切込み量2.4mmによるピッチ10の加工と、切込み量4.8mmによるピッチ5の加工とを比較した。切込み量4.8mmの加工時に応答曲面法による最適加工条件の探索を行った結果を図7に示す。

図7 切込み量が異なる加工プロセスにおける最適加工比較

4. 結言

応答曲面法と切削用NCデータ解析技術を用いNCデータを最適化する方法を提案した。本研究で得られた最適加工条件を表1に示す。被削材やツールパス軌道の変更が生じても制約条件および設計変数の上下限を満たすNCデータを出力できることを示した。

表1 最適加工条件の比較(加工開始位置)

材料	切削速度 (m/min)	送り (mm/rev)	切込み (mm)	主軸動力 (kWatt)	加工時間 (s)
SUS304	69	1.26	2.4	7.0	66
SNCM439	45	1.05	2.4	5.6	115
	62	0.70	4.8	7.0	68

参考文献

- 1) 江渡寿郎ら：NC ツールパスコード最適化問題に対するFEM解析の適用，自動車技術会学術講演会前刷集(2012)82-12, p.1-4