

トポロジー最適化に基づく工作物の加工途中形状の決定に関する研究

東京農工大学 ○雪下 侑真, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

複雑形状部品の荒加工工程では、加工精度を維持するために工作物の剛性の確保が重要となる。本研究では構造最適化手法の一つであるトポロジー最適化を工作物へと適用し、工作物の初期形状から目標形状に近づく荒加工工程の工作物形状を決定する手法の確立を目的とした。複数の荷重負荷パターンに応じて工作物形状を算出し、各加工結果を比較するケーススタディを実施し、実加工時を再現する荷重負荷パターンを明らかにした。

1. 緒 言

多様化した消費者のニーズに応えるため、5軸マシニングセンタや複合加工機などの多軸制御工作機械とCAD/CAMシステムにより、様々な機械加工が実現されている。一方、航空機部品では軽量化のため、より複雑な三次元形状が要求されている。このような複雑形状部品の荒加工工程において、高い加工精度を実現するためには工作物の剛性の確保が重要となる。このためトポロジー最適化という構造最適化手法を工作物へと適用し、初期形状から目標形状に近づく荒加工工程の工作物形状を決定する手法が考案されている¹⁾。

先行研究では、トポロジー最適化の計算において必要な荷重の負荷位置や負荷方法の設定が不明確であるという問題があった。そこで本研究では、トポロジー最適化における荷重負荷の条件設定を検討、改善することにより、実加工時を再現する荷重負荷パターンにより工作物の加工途中形状を決定する手法を確立する。

2. 工作物形状の決定手法の概要

本研究では、剛性最大化問題におけるトポロジー最適化を切削加工における工作物に適用することにより、加工途中の工作物形状を決定する。初期形状から目標形状に至るまでの荒加工工程を未除去体積に応じて任意の段階に分割し、各段階において設定した荷重に対して工作物の剛性が最大となる形状を算出する。

トポロジー最適化とは、寸法最適化や形状最適化と比較して自由度の高い構造最適化の方法であり、剛性最大化や固有振動数最大化など様々な問題を扱うことができる。図1に示すような最適構造として得られる本来の設計領域 Ω_d を包含できる固定設計領域 D と、式(1)に示す0と1で離散化された材料の有無を示す特性関数 χ_Ω を導入することで、構造最適化問題を固定設計領域内における材料分布問題へ置き換えることで解く²⁾。

$$\chi_\Omega(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{x} \in \Omega_d) \\ 0 & (\mathbf{x} \in D \setminus \Omega_d) \end{cases} \quad (1)$$

ここで \mathbf{x} とは固定設計領域における任意の座標である。この特性関数を決定する目的関数を、弾性体の変形のしやすさである平均コンプライアンスとし、任意の制約条件を与えて最小化することにより最適な形状、形態を表現する。

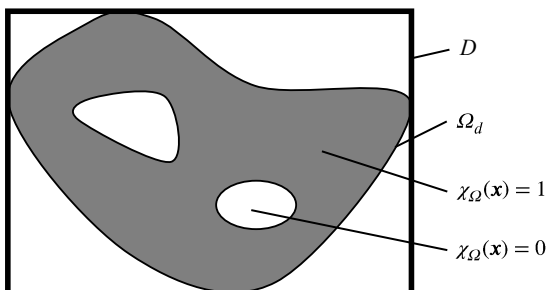


Fig. 1 Fixed design domain and characteristic function

3. トポロジー最適化の工作物への適用

剛性最大化を目的としたトポロジー最適化を工作物へと適用し、加工途中の工作物形状を決定する手法を以下に示す。

(i) 目標形状を包含する工作物の初期形状の内側に固定設計領域を設定し、任意の要素数で分割する。式(2)に表される正規化された体積密度 ρ を定義する。ここで、0に近づくほど材料が存在していない状態を、1に近づくほど材料が存在していることを表している。

$$0 \leq \rho \leq 1 \quad (2)$$

- (ii) 固定条件として節点の変位を0に設定する。位置は工作物の把持方法を考慮して決定される。荷重条件はエンドミルを用いたダウンカットによる切削加工を想定し、目標形状に対して垂直、水平方向に設定して大きさはすべて1とする。
- (iii) トポロジー最適化の計算を行う。この時、工学的に実現可能な形状を出力するため、設定した体積制約に適した設計変数のしきい値を計算し、二値化処理を行い0と1で工作物形状を表現する。ここでは図2に示すように目標形状を支えるために必要最低限な支えを有した形状を算出する。
- (iv) (iii)で求めた形状を新たな目標形状として設定する。固定条件は(ii)と同様に設定する。荷重条件は、予め指定した荷重負荷パターンに従う。
- (v) (iii)と同様にトポロジー最適化の計算を行う。ここでは図3に示すように各段階で任意に決定された体積制約を満たすような形状を算出する。
- (vi) (v)で求めた工作物形状を用いて固定設計領域を変更する。
- (vii) (v), (vi)を指定回繰り返すことにより各段階における加工途中の工作物形状を得る。

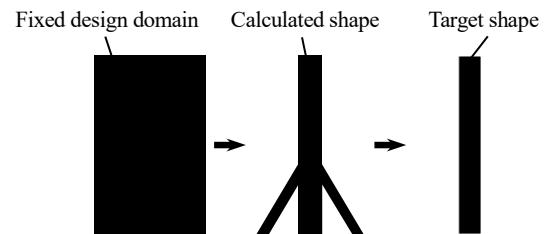


Fig. 2 First target shape to calculate optimized workpiece shape

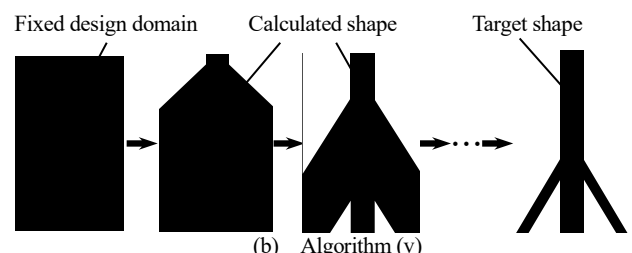
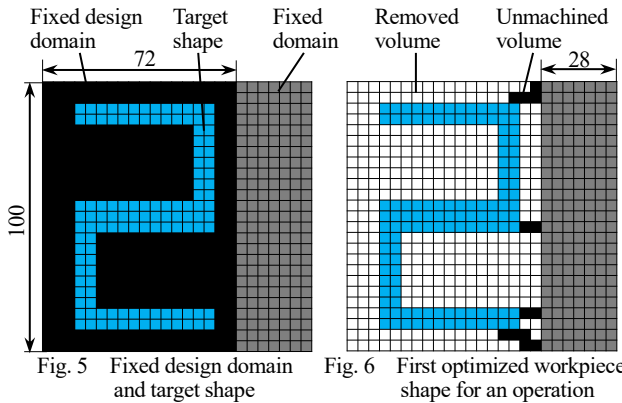
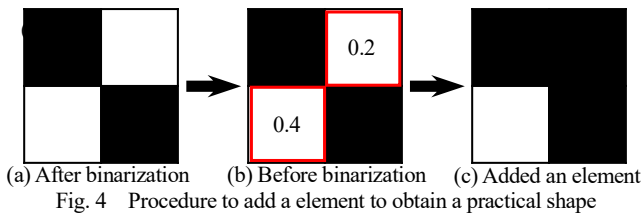


Fig. 3 Algorithm to calculate workpiece shapes during a rough machining operation



最後に出力された加工途中の工作物形状に対して追加の処理を行う。図4(a)に示すように、計算結果として二つの要素が非多様体で出力される可能性がある。このような形状を切削加工で表現することは困難であるため、二つの要素を結合させる。同図(b)に示すようにそれらと隣り合う要素を探し出し、二値化する前の設計変数を比較する。最後に、同図(c)に示すように値が大きい要素の設計変数を1に変更することにより、加工途中の工作物形状を更新する。

4. ケーススタディ

提案した手法を用いて、工作物の初期形状から目標形状に至るまでの荒加工工程において、各荷重負荷パターンに応じて変化する工作物形状の加工結果を比較するケーススタディを実施した。

工作機械はユニテックシステム製の5軸制御NC工作機を用いた。工作物の材質はアルミ板(A5052)である。工具は直径4 mmの超硬2枚刃エンドミルを使用し、切削条件は回転数を 6000 min^{-1} 、送り速度を 60 mm/min 、軸方向切込みを 0.5 mm に設定した。工作物の初期形状は $100 \times 100 \times 3 \text{ mm}$ で目標形状は図5に示す数字の2を模した形状とした。固定設計領域を初期形状内部に $72 \times 100 \text{ mm}$ の大きさで設定し、一辺が4 mmの要素となるように 18×25 に分割した。荒加工工程は8段階とし、初期形状から目標形状を除いた未除去体積の割合がそれぞれ約40%、35%、30%、25%、19%、14%、9%、4%となるように設定した。荷重負荷パターンは、目標形状の周りに荷重を負荷するパターンAと固定設計領域から目標形状を除いた支え部分に荷重を負荷するパターンBで加工途中の工作物形状を算出した。図6に目標形状を支えるために必要最低限の支えを有した加工途中の工作物形状を示し、図7に各段階の体積制約を満たすような加工途中の工作物形状の一例を示す。目標形状を青色、未除去領域を黒色、除去された領域を白色で示している。

これらの加工途中の工作物形状に基づき、実際に加工した結果を図8に示す。どちらのパターンでも剛性を確保する柱が論理的に算出され、目標形状に近づく荒加工工程が実現できることが確認できた。次に目標形状の寸法をノギスで測定した。パターンAでは、設定した寸法に対して $+0.75 \sim -1.25 \text{ mm}$ のばらつきが存在し、パターンBでは $+0.50 \sim -1.50 \text{ mm}$ のばらつきが存在することが確認できた。この結果、パターンAの目標形状周りに荷重を負荷した場合に、工作物の剛性を高い状態を保つことができたと考えられる。

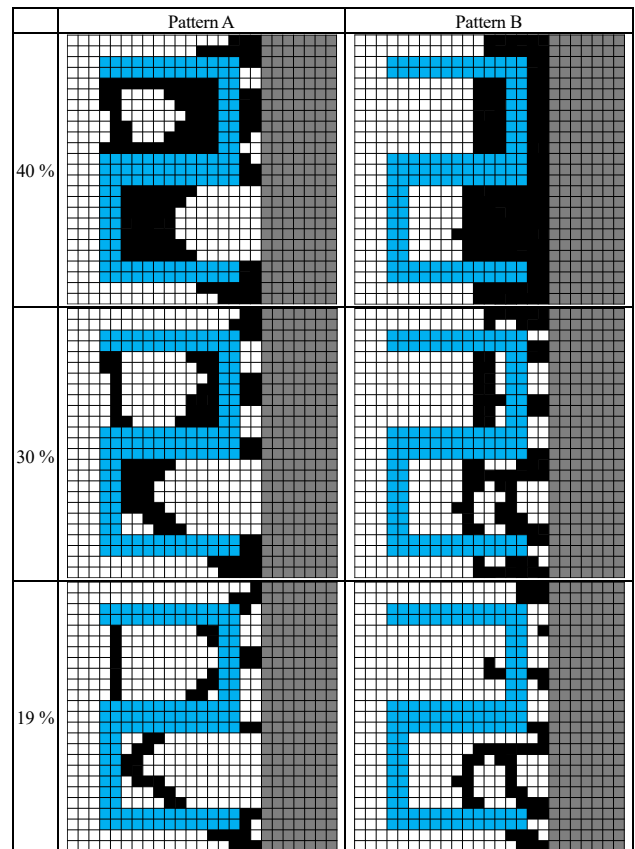


Fig. 7 Optimized workpiece shapes during a rough machining operation

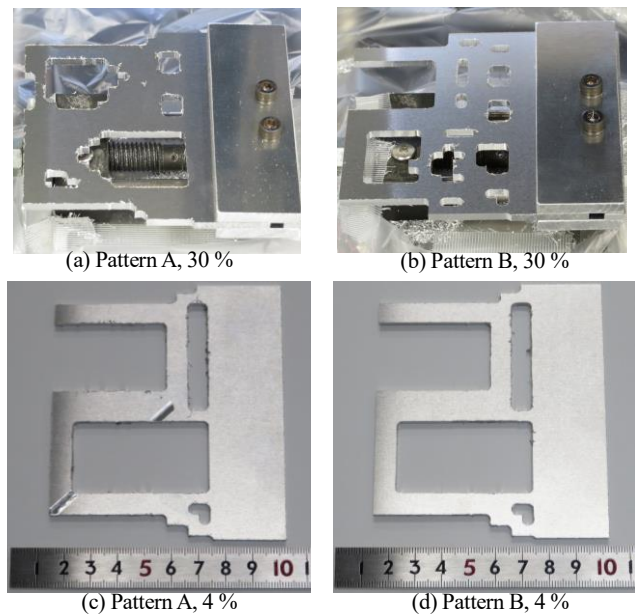


Fig. 8 Machining results according to decided workpiece shapes

5. 結 言

トポロジー最適化を工作物に適用し、加工途中の工作物形状を決定する手法を確立するための2種類の荷重負荷パターンを提案し、ケーススタディによりそれぞれの加工結果を比較して実加工時を再現する荷重負荷パターンを明らかにした。

参考文献

- 1) 高橋辰伍, 板野健太郎, 中本圭一: トポロジー最適化による荒加工工程の工作物形状決定手法の考案, 日本機械学会論文集, **83**, 856, (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00249.
- 2) 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池昇; 計算力学レクチャーコース トポロジー最適化, 丸善出版, (2013) 25-26.