

トポロジー最適化を用いた加工途中形状の決定手法の提案

東京農工大学 ○板野 健太郎, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

高い熟練技能により加工された複雑形状は、その把持や固定の方法さえ想像がつかず、工具の工夫や加工条件の設定にも分からないことが多い。このような技能の技術化には、高度な機械加工を達成するプロセスに熟知した技能者のノウハウをアルゴリズム化する必要がある。そこで本研究では、特に薄肉複雑形状の荒加工において、初期形状から目標形状まで至る加工途中形状をトポロジー最適化を用いて決定する手法を提案する。

1. 緒 論

現在は多様化した消費者のニーズに合わせ、多品種少量の生産方式が主流となっている。一方、今後は工作機械の普及によって機械加工の価値が低下し、これからは個々の感性に合わせた個性的な価値の高い製品が望まれていると考えられる。この要求を満たすためには、機能を複雑なまま処理し、工芸品のような製品を生み出す巧妙な加工方法の確立が求められる。工芸品・芸術品など複雑な形状をもつ製品は加工プロセスの決定に熟練した職人や作業者の、素材の把持、固定方法、特殊な治具の準備や加工条件の設定などのノウハウが求められる¹⁾。

そこで本研究では、高度な機械加工を達成するプロセスの決定に熟練した技能者のノウハウをアルゴリズム化することを目指し、技能者でなくても初期形状から目標形状までの加工途中形状を決定する手法の提案を目的とする。

2. 加工途中形状の決定手法

本研究で決定する加工途中形状は、加工のプロセスを未除去体積に応じて複数の段階に分け、各段階でかかる荷重に対して工作物の剛性が最も高くなる形状とする。このとき、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して加工途中形状を決定する。

トポロジー最適化とは、**図1**に示すように、形態・形状ともに変更可能な最も自由度の高い構造最適化の方法である。トポロジー最適化では、**図2**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 、それを包含できる拡張された固定設計領域 D 、式(1)で示す0と1の離散化された値をもつ特性関数を導入する。

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

ここで x は設計領域内の任意の位置を示す座標である。固定設計領域 D と特性関数 χ_{Ω} を用いることにより最適設計問題は固定領域 D における材料分布問題に置き換えられる。また、この特性関数 χ_{Ω} により、固定設計領域 D において任意の最適な形状・形態を表現することが可能となる²⁾。

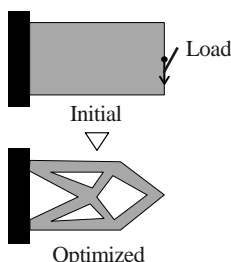


Fig. 1 Example of optimization

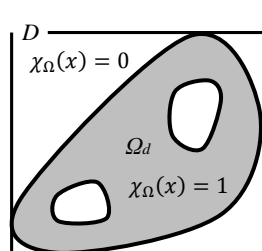


Fig. 2 Fixed design domain D ²⁾

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、加工途中形状を決定する手法は以下ようになる。

- 図3**に示すように、工作物の内側に固定設計領域 D と目標形状を設定する。メッシュで分割された領域全体を固定設計領域 D とし、目標形状を黒色で示す。初期形状から目標形状までに至る加工の段階を、目標形状を得るための未除去体積に応じて分割する数を決定する。
- 図4**に示すように、設計変数として正規化された体積密度 ρ を固定設計領域 D に設定する。体積密度 ρ は次式で定義される。0に近づくほど材料が存在していない状態を表し、1に近づくほど材料が存在している状態を表している。この設計変数は加工途中形状に基づいて決定する。

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

- 固定条件として、固定設計領域と工作物の初期形状との境界にある全ての節点の変位を0と設定する。**図5**では黒い三角形の先端にある節点が固定されており、灰色の矢印で示した荷重は、目標形状に隣接している全ての要素の設計変数が1のとき、垂直方向とせん断方向に荷重がかかるように節点に対して設定する。また、**図6**のように、目標形状に隣接している要素の設計変数が一つで

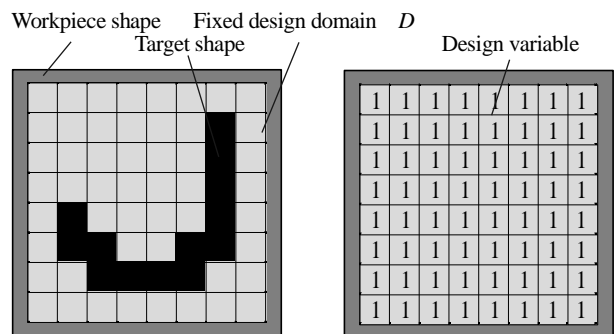


Fig. 3 Design domain and target shape

Fig. 4 Design variable

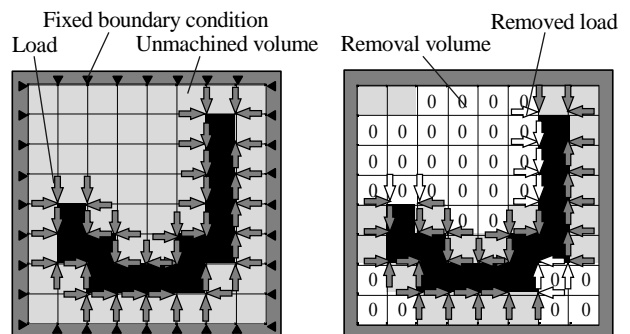


Fig. 5 Fixed boundary condition and load

Fig. 6 Removed load

も 0 の場合には、要素が存在していない節点の荷重を除去する。荷重の大きさは目標形状に隣接して残っている要素の数に反比例させる。

- (d) 固定設計領域 D を有限要素により分割し、それぞれの要素の要素剛性マトリクスを求め、全体剛性マトリクスを求める。
- (e) 目的関数である、弾性体の変形しやすさを表す平均コンプライアンスを計算する。さらに、固定設計領域 D の体積（2次元では面積） Ω を計算する。
- (f) (a)で目標として設定した未除去体積内で、設計変数 ρ の更新前後における変動量が収束しているか判定する。収束していれば(i)へ、収束していなければ(g)へ進む。
- (g) 目的関数と体積の設計感度を計算する。ここでいう設計感度とは、設計変数 ρ の1階微分のことである。
- (h) 最適性の必要条件である KKT 条件³⁾を満たす最適解を探すことで最適設計解を求める最適性基準法を用いて、(a)で目標として設定した体積内で平均コンプライアンスを最小化する設計変数を求め、設計変数を更新し(d)へ戻る。
- (i) 目的関数が収束して決定された設計変数 ρ から加工途中形状を出力する。
- (j) (a)で設定した最終段階の加工途中形状が得られていれば最適化を終了する。それ以外の場合には次段階の加工途中形状を得るために(b)のステップへ戻る。

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加工途中形状を決定し、その形状に基づいて実際に加工したケーススタディの結果について述べる。

工作機械はヤマザキマザックの3軸制御の立型マシニングセンタ(MAZATROL 640M NEXUS)を用いた。工作物の材質はアルミ板(A5052)である。工具は高速度鋼の直径2mmの2枚刃エンドミルを用いた。切削条件を表1に示す。工作物の初期形状は100×100×10mm、目標形状は図7に示す蛇を模した形状である。目標形状を2次元で簡略化し、固定設計領域 D の要素の数は40×40、加工の段階は未除去領域の体積を35%、16%、6%の3段階とし、各段階で得られた加工途中形状と合わせて示す。目標形状は黒色、未除去領域は灰色、除去された領域は白色で示している。

この加工途中形状に基づいた荒加工の途中形状と、仕上げ加工後の結果を図8に示す。加工途中形状において、薄肉複雑形状の航空機部品の加工のように、剛性を確保する柱が論理的に得られ、目標形状に至る荒加工が実現できることが確認できた。

5. 結 論

トポロジー最適化により、工作物の初期形状から目標形状に至る加工途中形状を決定する手法を提案した。また、ケーススタディの結果から提案手法の有用性を確認した。

参考文献

- 1) 濱田大地, 中本圭一, 石田 徹, 竹内芳美: 入れ子を有する複雑形状の巧妙加工, 日本機械学会論文集(C編), 77巻, 780号, (2011), pp.3127-3136.
- 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).
- 3) 穴井宏和: 数理最適化の実践ガイド, 講談社, (2013).

Table 1 Cutting conditions

	Rough cut	Finish cut
Spindle speed [min^{-1}]	9500	9500
Feed [mm/min]	160	25
Cutting speed [m/min]	59.66	59.66
Depth of cut [mm]	1.00	—
Tool type	Square	Ball

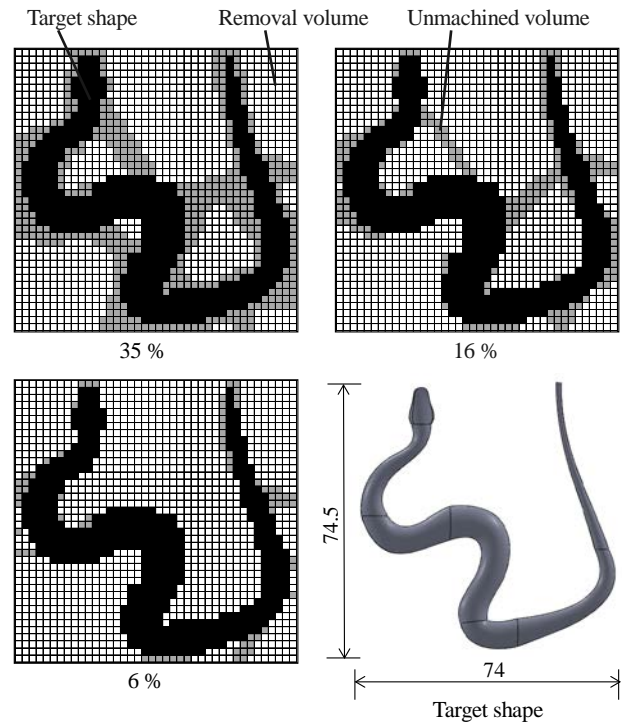


Fig. 7 Target shape and optimized workpiece shapes while machining

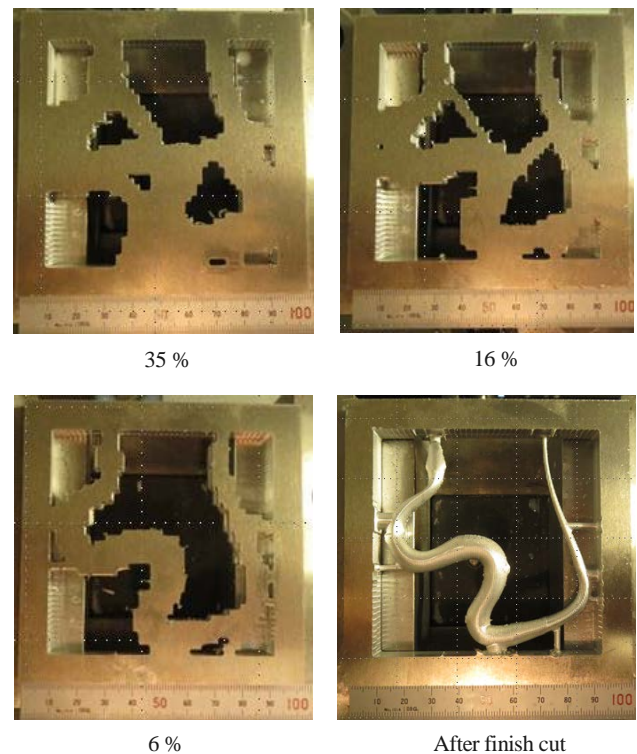


Fig. 8 Machined results according to decided workpiece shapes