

工作物のトポロジー最適化を援用した作業設計支援手法に関する研究

東京農工大学 ○榑野 仁司, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

航空機部品などの薄肉複雑形状加工の荒加工工程では、材料が除去される過程を通じて工作物の剛性を確保し、高い加工精度を達成する必要がある。本研究では、先行研究で提案されたトポロジー最適化により剛性を最大化する工作物形状に基づき、その制約条件を満たす作業設計支援手法を提案した。また、薄肉複雑形状加工を想定したケーススタディにより、提案手法の有効性を確認した。

1. 緒 論

昨今、複雑な形状を有する部品が増加しており、それらを高精度で高効率に加工できる多軸・複合加工機の導入が進んでいる。しかし、多軸・複合加工機でますます複雑になった工程情報を決定する工程設計は、熟練技能者の経験や勘に未だに依存している。そのため、高度な機械加工を達成するための経験や技能を技術化し、ノウハウをアルゴリズム化することが求められている¹⁾。そこで先行研究では、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至るまでの加工途中の工作物形状を決定する手法を提案している²⁾。

しかし、この手法では、最適な加工途中の工作物形状を創成する工具経路や加工条件などの作業設計が不明確であった。そこで本研究では、荒加工工程の段階ごとに変化する工作物形状を補間するように加工するための作業設計支援手法を提案する。

2. トポロジー最適化

先行研究では、**図 1**に示すように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を未除去体積に応じて複数の段階に分け、各段階で負荷される荷重に対して最も工作物の剛性が高くなる形状を求めている。このとき、剛性最大化問題におけるトポロジー最適化を工作物へと適用し、加工途中の工作物形状を決定している。本研究においても同様の手法を採用する。

トポロジー最適化とは、**図 2**に示すように予め決められた設計領域・境界条件から所望の性能が最大限得られる形状・形態を求める自由度の高い構造最適化方法の1つである³⁾。具体的な計算の流れとしては、まず目標形状を内包する材料全体の有限要素モデルを作成して、荷重・拘束条件を設定する。次に、剛性最大化の目的関数と体積制約条件を与える。さらに、有限要素解析によりひずみエネルギーの分布を求め、ひずみエネルギーの小さい要素の材料密度を下げしていく。この処理を収束するまで繰り返し、最終的に剛性が最大となる最適な形状を得る。

3. 作業設計支援手法

トポロジー最適化の計算では、有限要素解析によってひずみエネルギーの分布を求める際に、**図 3(a)**に示す各要素の変形のしやすさを考慮した設計変数を算出している。設計変数は各要素に0から1の値で与えられる材料密度であり、0に近づくほど材料密度が低く、逆に1に近づくほど材料密度は高くなる。先行研究では、残存させる体積の割合に応じて**図 (b)**に示すように0か1に修正し、材料の有無を明確にした加工途中の工作物形状を算出している。これに対して本研究では、トポロジー最適化で得られる各要素の設計変数を利用して工具経路を生成する。設計変数が小さい要素は、ひずみエネルギーの小さい要素を意味し、工作物の剛性を保つ上で必要性が低い。従って、設計変数の値が小さい順番に工具経路を生成することにより、工作物の剛性を確保できると考えられる。

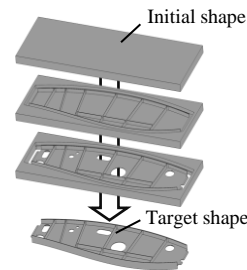


Fig. 1 Rough machining

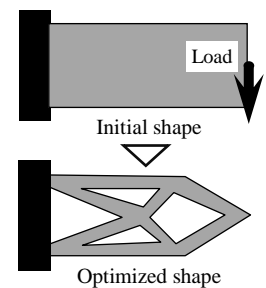


Fig. 2 Topology optimization

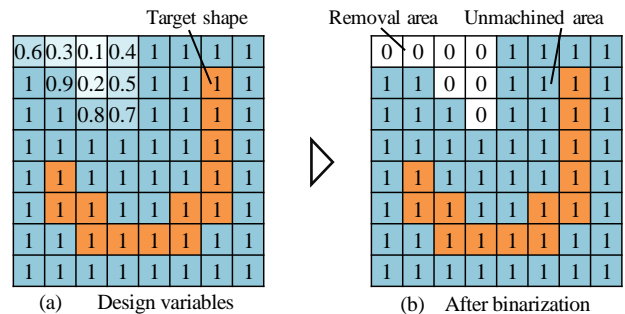


Fig. 3 Modification of design variables to determine workpiece shape

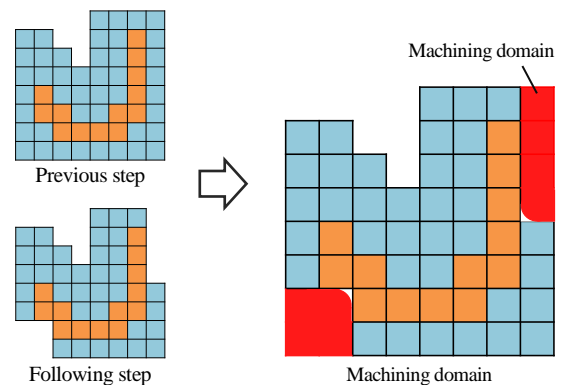


Fig. 4 Machining domain of two workpiece shapes during a operation

しかし、要素ごとに加工する工具経路では能率が極端に低くなるため、加工領域として得られた各領域で平均した設計変数を用いる。具体的には、まず**図 4**に示すように、トポロジー最適化で得られた連続する2つの加工段階間の工作物形状から差分領域を抽出する。そして、使用する工具の工具径を基に、加工領域を取得する。次にその領域内で、隣り合った各要素で構成される領域ごとに設計変数を平均化し、平均値の小さい領域から順番に工具経路を生成して加工する。また、各領域内の工具経路は、市販のCAMソフトウェアのパラメータを一律に設定することにより、一意に工具経路を決定する。以上の工具経路を生成して作業設計を支援するために、各領域の設計変数の平均値を算出するシステムを構築した。本研究では、

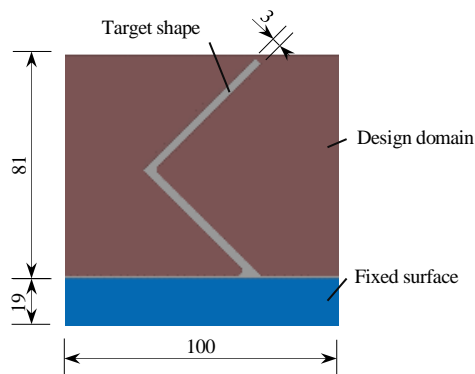


Fig. 5 Computational model of the case study

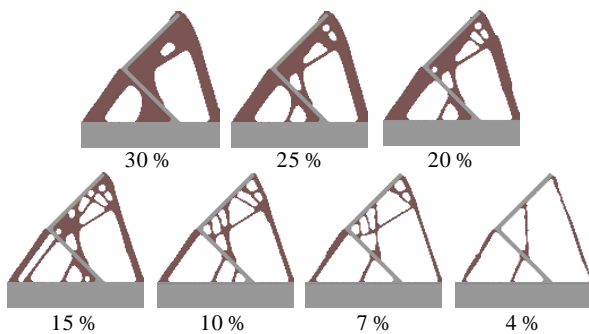


Fig. 6 Optimized workpiece shapes during a machining operation

2.5 次元形状の加工を対象に、市販のトポロジー最適化ソフトウェア (Altair 製 solidThinking Inspire)、CAD ソフトウェア (アイコクアルファ製 Simple Modeler)、システムの開発環境 (Space Claim API) を用いた。構築したシステムは、まず加工領域の CAD モデルと、トポロジー最適化によって得られた各要素の情報を入力する。要素は四面体で構成され、情報として、設計変数の値と各接点の座標値を持っている。次に、入力情報から加工領域を 1 つ取り出し、その領域に含まれている要素を調べる。そして、各要素で含まれている体積を計算して、その設計変数と含まれる体積の積をそれぞれ求める。最後に、それらの和を加工領域の体積で割り、対象とした加工領域の設計変数を算出する。この処理を他の領域でも繰り返す、全ての加工領域の設計変数を算出する。

4. ケーススタディ

高精度な加工が困難な目標形状を対象とし、初期形状から目標形状に至る加工途中の工作物形状を求め、各加工段階を補間する作業設計支援手法の有効性を確認するためにケーススタディを行った。目標形状は、図 5 に示す加工時に高い剛性が必要となる「く」の字を模した形状とした。また、工程の段階数は 7 とし、未除去体積に応じた各形状を図 6 に示す。未除去体積が大きい場合は、比較的剛性は高いため、最初の段階で体積を 70% 減らす。一方、未除去体積が小さい場合、剛性は徐々に低くなり加工手順が加工精度に大きく影響すると考えられるため、未除去体積 30% から 10% までの間は体積を 5% ずつ減らし、未除去体積が 10% 以下の場合は 4% ずつ体積を減らしていく。工具は未除去体積 30% までの段階を $\phi 6$ mm、それ以降を $\phi 4$ mm の超硬 2 枚刃エンドミルを用いることとした。そして、得られた工作物形状を基に各加工領域を取得し、構築したシステムへ設計変数の情報とともに入力して、各領域の設計変数の平均値を計算した。その一例として、未除去体積 25 - 20% 間の各領域の設計変数を図 7 に示す。

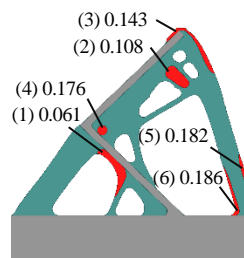


Fig. 7 Calculated average of design variables

Table 1 Cutting conditions of the case study

	100 - 30 %	30 - 4 %
Endmill type	$\phi 6$ Square	$\phi 4$ Square
Spindle speed	6000 min^{-1}	6000 min^{-1}
Feed	192 mm/min	120 mm/min
Radial depth of cut	0.8 mm	0.8 mm
Axial depth of cut	3 mm	0.5 mm

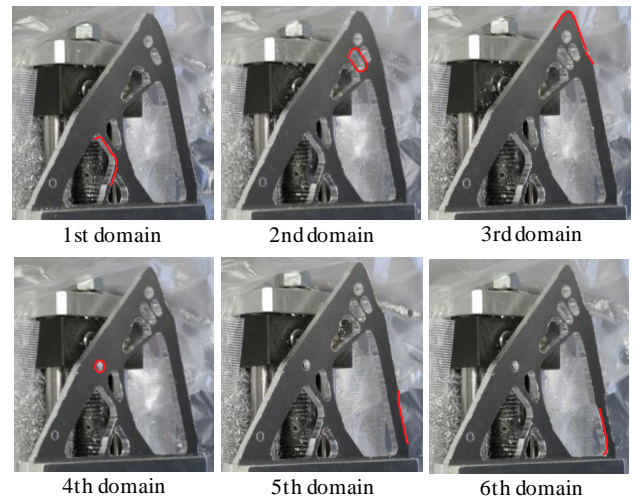


Fig. 8 Machined results of each domain during 25 - 20 % operation

各領域の工具経路は市販の CAM システム (DP テクノロジー製 ESPRIT2016) で生成し、構築したシステムで得られた設計変数に従って、各領域を加工する優先順位を決定し、一連の工具経路を生成した。100 x 100 x 3 mm のアルミニウム合金 (A5052) の工作物素材に対して卓上 5 軸 NC 制御加工機 (ユニテックシステム製 巧み君) を用いて実際に加工した。切削条件を表 1 に示す。加工結果の一例として、6 つの加工領域が生じる未除去体積 25 - 20% 間の結果を図 8 に示す。また、領域ごとの設計変数の平均値を用いることによる妥当性を検証するため、各加工段階において設計変数の平均値が大きい順番に、領域を加工する工具経路を生成して加工結果を比較した。この結果、各領域を設計変数の大きい順番に加工した際に、工作物の剛性の低下により支えの一部で加工面が荒い箇所を確認した。従って、提案手法により、加工途中の工作物の剛性を確保する加工を実現できることを確認できた。

5. 結 論

トポロジー最適化を工作物へと適用して得られた荒加工工程の段階ごとの最適な工作物形状を補間するように加工するため、設計変数を用いて工具経路を生成する作業設計支援手法を提案した。また薄肉形状加工を想定したケーススタディにより、提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 竹内芳美：多軸・複合・高機能・超精密加工機の最新の動向について、精密工学会誌, 78, 9 (2012), 735-739.
- 2) 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提案, 日本機械学会論文集, 83, 856 (2017), 10.1299/transjsme.17-00249.
- 3) 西脇真二, 泉井一浩, 菊池昇：計算力学学講座コース トポロジー最適化, 丸善出版, (2013).