

令和 2 年 4 月 19 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18804

研究課題名（和文）工作物のトポロジー最適化に基づいた切削加工の工程設計に関わる技能の体系化

研究課題名（英文）Systematization of Process Planning for Machining Operations Based on Topology Optimization of Workpiece

研究代表者

中本 圭一（NAKAMOTO, Keiichi）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90379339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：3次元形状の複雑な工作物にトポロジー最適化を適用し、荷重の位置や大きさ、方向に応じて工作物の支えも含めた加工途中の最適な工作物形状を算出した。また、トポロジー最適化の計算で用いる設計変数によって、荒加工工程の各加工段階での工作物形状の差である、複数の除去領域の加工順序を決定する妥当性を検証した。さらに、トポロジー最適化の計算における収束過程の設計変数を用いて、各加工段階の工作物形状と除去領域の加工順序を同時に決定する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既に実績ある汎用性・効率性に着目すれば、切削加工は先進的な材料や創造的な形状を迅速に加工するアジャイル生産（ものづくり）に最も適した加工法と考えられる。これまで工具や加工条件など膨大な組合せのため標準化が遅れていた切削加工の工程設計において、本研究により曖昧な暗黙知を明確な形式知へと変換しながら技能の体系化を進めることで、合理的で妥当性ある工程設計が可能になれば切削加工の大きな革新となる。

研究成果の概要（英文）：A determination method of complex workpiece shapes during a rough machining operation is proposed based on topology optimization. In the method, topology optimization is used to calculate workpiece shapes to ensure the stiffness by dividing a rough machining operation into several steps. Moreover, a determination method of cutting sequence is proposed by using the design variables obtained in the calculation process of topology optimization of workpiece. In order to estimate the machined shape based on the proposed cutting sequence, cutting experiments are conducted. The results show the effectiveness of the proposed cutting sequence to reduce the deformation of workpiece during a rough machining operation in complex parts machining.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：工程設計 フライス加工 トポロジー最適化 複雑形状部品加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

様々な工具を使い分け、複数の加工機能を具備した工作機械が開発され、それらに対応したCAMシステムの活用も進んで、インペラなど複雑形状の加工も比較的容易になっている。特に、工作物の最終形状に倣って工具を走査する仕上げ加工では、同時多軸制御や工具経路生成技術の信頼性が飛躍的に向上して切削加工の高精度化に寄与している。一方、最終形状に至るまでの荒加工では、工具や加工条件など工程設計に膨大な組合せが存在するため、市販のCAMシステムでは自動的に決定できない。このため、熟練者の経験や技能といった暗黙知に依存して工程設計が施され、手間やコストのかかる試し加工も必要になっている。これまでも複雑形状の高精度加工を目指して盛んに研究されてきたが、産業界だけでなく世界的な学術界においても工程設計の標準化は解決すべき課題と認識されている。

2. 研究の目的

工作機械の高速・高精度化は、高硬度な耐熱合金や薄肉で複雑な形状の部品加工の効率化に貢献している。しかし、どこをどのように加工するかを決定する工程設計は加工精度やコストを大きく左右するものの、未だに熟練者の技能や経験に頼っているのが実情である。さらに、工程最適化のための試し加工には無駄も多く、切削加工の更なる効率化には工程設計の標準化が急務である。特に、高付加価値な工作物には、航空機部品のように薄肉で複雑な3次元形状が増えており、素材から最終形状に至る加工途中で工作物の剛性が大きく変化する。このとき生じる工作物の変位は、加工精度や工具寿命に大きな影響を与えるため、これを最小化する工程設計を施す必要がある。そこで加工現場では、工作物の剛性を確保するために“捨てリブ”などと呼ばれる支えになる箇所を残しながら加工を進めるが、支えの数や形状は試行錯誤により決定されている。そこで、熟練者の巧みな工程設計を導いている技能を明らかにし、曖昧な暗黙知を明確な形式知へと置き換えることで、属人的な技能の体系化に挑戦する。この萌芽的な取組みの端緒として、複雑形状加工の高精度化を目的に、剛性や固有振動数が最大となる加工途中の工作物形状をトポロジー最適化に基づいて算出し、その形状を具体化するように工具の選定や加工条件の決定、工具経路の生成などの工程設計を実現し、CAMシステムを開発して有効性を確認する。

3. 研究の方法

自由度の高い切削加工の工程設計を標準化して複雑形状加工を高精度・高効率化するため、まずトポロジー最適化に基づいて支えを含めた加工途中の工作物形状を算出する手法を確立する。薄肉複雑形状の航空機部品を目標として、3次元形状の複雑な工作物にトポロジー最適化を適用するプログラムを作成し、荷重の位置や大きさ、方向に応じて工作物の支えも含めた加工途中の最適な工作物形状を算出できるようにする。また、この最適化計算に必要な工作物に加わる荷重を概算するために、切削力の予測と加工誤差の推定手法を考案する。さらに、加工途中形状と荷重を具体化する工具や加工条件、工具経路などの工程設計に関わる技能の体系化に取り組む。最終的に、5軸制御マシニングセンタを用いた複雑形状加工の工具経路生成の知見も加えて、薄肉の航空機部品を対象とした実用性の高いCAMシステムを開発する。

4. 研究成果

トポロジー最適化とは、予め決められた設計・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一つであり、構造体の設計段階における剛性最大化や固有振動数最大化などの様々な問題を扱うことができる。しかし、荒加工工程では様々な工具を用い、それに従って工具経路などの加工手順や切削条件が異なるため、荷重などの境界条件が変化する際に取扱いが困難という課題も考えられる。従って、トポロジー最適化の計算手順をそのまま適用して、加工途中の工作物形状を決定することはできない。そこで、図1に示すように工作物の初期形状から目標形状へ至る荒加工工程を工作物の体積などに応じていくつかの段階に区切り、その各段階で想定される平均切削力に対して最も剛性が高くなる工作物形状を算出する。一般に、荒加工工程ではいくつかの段階に分けて加工することにより高精度な加工を実現しているため、各段階で想定される荷重に対する剛性を考慮することが求められ、段階的にトポロジー最適化を適用することで、荒加工工程を通じて剛性を確保した工作物形状を算出できる利点がある。

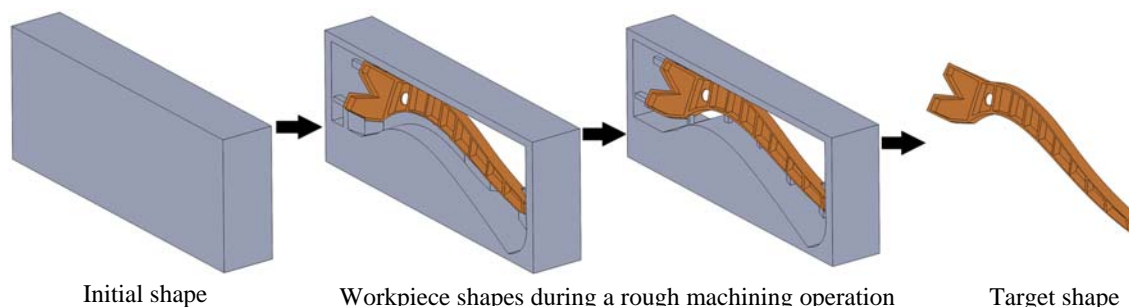


Fig. 1 Rough machining operation is divided into several steps corresponding to certain unmachined volume. The optimized workpiece shape is calculated depending on applied loads at each machining step.

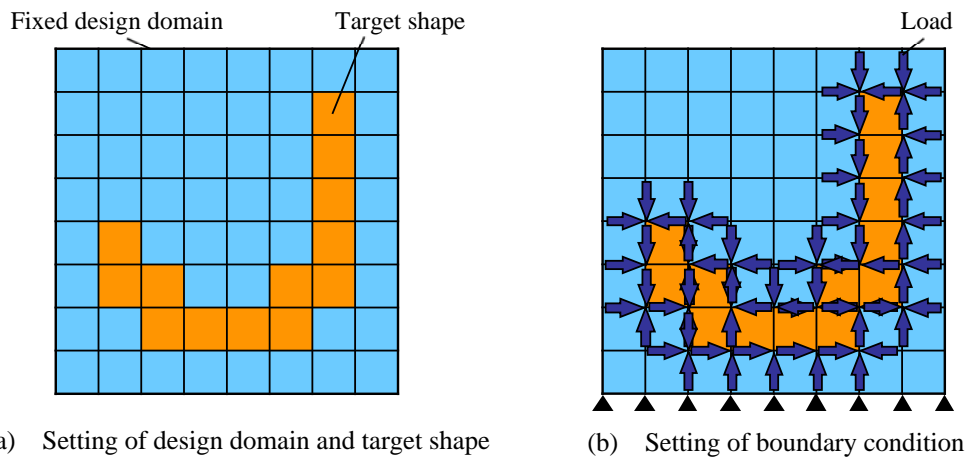


Fig. 2 Target shape and divided fixed design domain are prepared in workpiece, and nodes on the tip of triangles are fixed on boundary and loads are set around target shape.

各加工段階での工作物形状を算出する手順を簡略化のため 8 x 8 の要素数に正方形要素で分割した以下の 2 次元形状で説明する. ここではまず, 図 2 (a) のように固定設計領域に内包されるように目標形状を配置し, 工作物を任意の要素数で分割する. 次に, 境界条件として, 同図 (b) に示すように, 黒い三角形の先端にある節点は把持部であるため, 変位は 0 として節点を固定する. また, 目標形状と工作物が接する境界の節点には, 目標形状の法線方向およびそれと垂直なせん断方向の荷重をそれぞれ任意に設定する. このとき, 工作物の変形に伴う切削力の増減は無視し, 各加工段階で想定される平均切削力を荷重として用い, すべての節点で同一の大きさとする. また, 紙面に向かって垂直な方向に工具回転軸が一致したエンドミル加工を想定しているため, せん断荷重は工具回転 (時計回り) 方向に沿って負荷している. 各加工段階で工作物へ体積制約を与えて工作物形状を算出した後, 得られた工作物形状に従って固定設計領域を更新して, 目標形状に十分近づくまでトポロジー最適化の計算を繰り返す.

しかしながら, 上記で荒加工工程の各加工段階での工作物形状をトポロジー最適化によって決定しても, 複雑な目標形状を創成する加工順序や工具経路は作業者が設定しており, 工程設計の標準化には課題が残っている. 例えば, 図 3 に示すように, 連続する 2 つの加工段階間の工作物形状の差分を抽出し, 後続の加工段階で消失した領域が各加工段階間で除去すべき除去領域として明らかとなるが, 除去する加工順序については不明である. 一方, 各除去領域で工作物の剛性に寄与する度合いが分かれば, 工作物が変形しにくい順に加工することで工作物の剛性をできる限り確保した荒加工工程が実現できると考えられる. そこで, トポロジー最適化で得られた除去領域ごとの加工順序をトポロジー最適化の計算で用いる設計変数によって決定した.

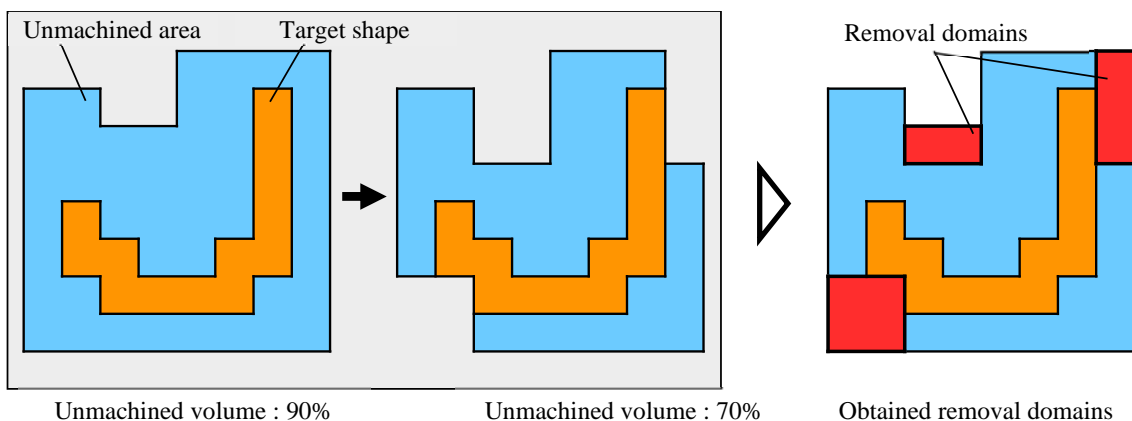


Fig. 3 Removal domains are obtained by extracting the difference of successive calculated workpiece

決定した加工順序に基づき, 200 x 200 x 3 mm のアルミニウム合金 (A5052) の工作物に対し立形マシニングセンタ (VCN-410A, マザキマザック) を用いて実際に加工した. ここでは, 目標形状および工作物と垂直方向に生じる力は考慮しないため, 樹脂の板を工作物の下に敷いて加工した. 使用工具のカタログで推奨されたアルミニウム合金に対する加工条件を用いた. 各除去領域の工具経路は, 市販の CAM システム (ESPRIT2017, DP テクノロジー) で輪郭のオフセットと円弧動作を組み合わせた ProfitMilling を選択して生成した. なお, 最終加工段階である未除去体積率 7% と 4% 間において, 比較のために設計変数の小さい除去領域の順とその逆順で加工した.

図 4(a)に設計変数の小さい順に加工したときの最終的な加工形状を示す. 同図(b)は, (a)内の丸で囲まれた箇所拡大図であり, 目標形状の CAD モデルと比較して示している. 同図(c)は逆順で加工した形状の同じ箇所であり, 設計変数の小さい領域順に加工した場合と比べて大きな変形が生じていることが分かる. この変形は, 目標形状上部を加工する際に重要な役割を果たした領域を加工する際に変形が大きくなったことが原因と考えられ, 設計変数の小さい領域順では後半に除去され, その逆順の加工では先に除去される. 以上から, 設計変数の小さい順による加工順序の方が工作物の変形を抑えられ, 設計変数が加工順序決定の際の指標として妥当であることが確認できた.

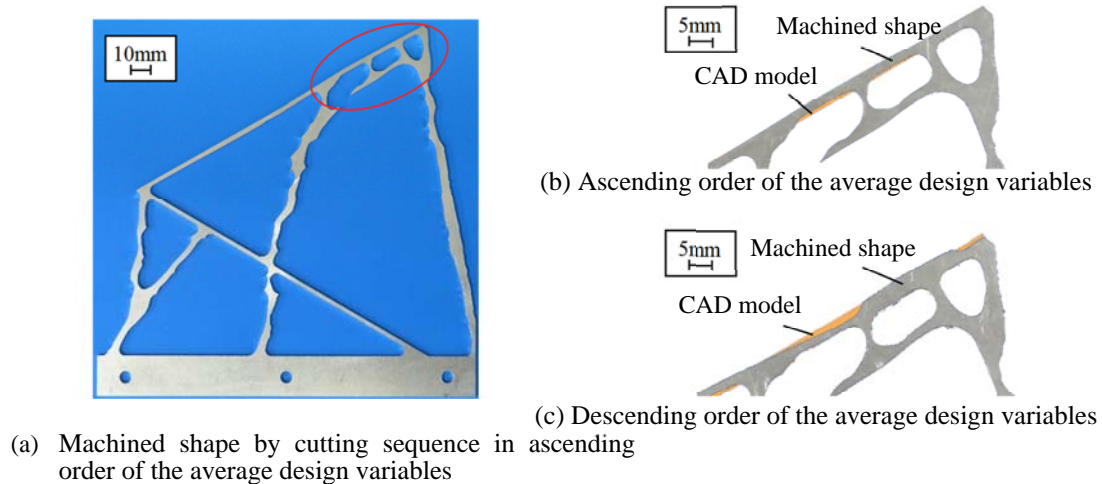


Fig. 4 Comparison of machined shapes depending on different cutting sequences. (b) and (c) are the enlarged views indicated using a circle in (a).

トポロジー最適化の計算において, 中間的な材料密度となる要素の発生を抑えて最適形状を明確に表現するため, 設計変数の値は 0 もしくは 1 に近づく. このため, 先に述べた手法では, 複数の除去領域で設計変数の平均値がほぼ同じ値となり, 加工順序を決定できないこともある. これを解決するためには, 除去領域が小さくなるように加工段階の分割数を増やす必要がある. しかし, 荒加工工程の分割数を増やすことは, トポロジー最適化の計算回数が大幅に増加するために計算コストの観点から現実的ではない.

そこでさらに, トポロジー最適化の計算過程で更新される設計変数を足し合わせて, 各要素の剛性への寄与の度合いの指標とした加工順序決定手法を提案した. 設計変数は, 最適性規準法や凸線形化法などの最適化問題の解法を用いることで, 目的関数である平均コンプライアンスが最小となるように更新されていき, 最終的には構造を決定するために必要な設計変数へと収束する.

提案する加工順序決定手法ではまず, 荒加工工程の最終段階における未除去体積率を制約条件として, 工作物へトポロジー最適化を適用する. 次に, トポロジー最適化の計算過程で得られる設計変数から, 要素ごとに平均値を計算し, 加工段階ごとの工作物形状を決定する. ここで, 設計変数の初期値は全要素で同じであり, 要素ごとの平均値を求める際には含めない. 工作物形状は, 図 5 に示すように設計変数の平均値の大きい要素から順に, 各加工段階の制約体積率を満たすよう要素を加えて決定する. このため, 実際の加工工程とは逆順で加工途中の工作物形状が算出される. 最後に, 得られた各加工段階の工作物形状を基に, 連続する 2 つの加工段階間の工作物形状の差分を順次抽出し, 抽出された除去領域ごとに加工順序を決定する.

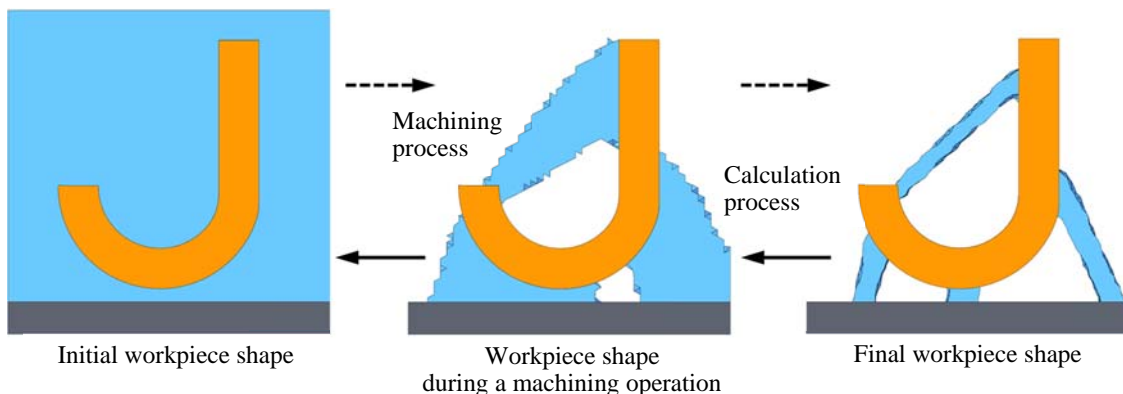


Fig. 5 Workpiece shapes during a machining operation are calculated as the reverse order of machining process by adding an element in descending order of the average value of design variable.

加工順序は、除去領域ごとの設計変数の平均値を計算して、その値の小さい順に決定する。ただし、各要素の設計変数は、要素ごとの設計変数の平均値に置き換える。なお、ここで制約体積を満たすように加える要素の順に工具経路を生成することも可能ではあるが、隣接しない要素を結ぶ工具経路となるなど非効率な工具経路となるため、一定の要素をまとめた除去領域ごとの加工順序を決定する。

トポロジー最適化の計算過程での設計変数を用いた加工順序決定手法の有用性を確認するため、再度加工実験を実施した。ここでは、最適化計算の収束後の設計変数を用いて加工順序を決定した前章の結果と比較する。加工形状を比較して同程度の加工精度であれば、1回だけのトポロジー最適化の計算により計算コストを抑えつつ、工作物の剛性を確保した適切な加工順序が決定できることが分かる。目標形状は前のケーススタディと同じであり、荒加工工程の分割数を4として未除去体積率をそれぞれ30, 15, 8, 5%と設定した。目標形状および工作物と垂直方向に生じる変形を抑えるため、工作物素材は厚さを増した200 x 200 x 5 mmのアルミニウム合金(A5052)とした。また、トポロジー最適化の計算過程の設計変数を取得するため、市販CAEソフトウェア(Optistruct, Altair)を用いた。ここで、市販ソフトウェアの要素分割機能を用いて工作物を分割し、提案手法では従来手法と同じ要素サイズとなるように14509の四面体要素で、従来手法では各加工段階の工作物形状を14509, 9006, 7229, 5560の四面体要素でそれぞれ分割した。なお、Windows 10 Pro for Workstations, Intel Xeon W-2104 CPU, 32 GB DDR4 RAMの計算機を用いた。

計算時間は、この手法では20分57秒、先に述べた手法では30分53秒であり、荒加工工程の分割数を6に増やすと提案手法の計算時間はほぼ変化しないのに対し、41分43秒と長くなった。ここで、トポロジー最適化の計算回数と計算時間に比例関係がみられないのは、先に述べた手法では形態を変化させる設計領域が順次狭くなるのに対して、提案手法では一定で広いことから、目的関数が大きく変動して設計変数が収束するまでに時間を要するためである。しかしながら、工具経路生成を想定した場合にはより多くの分割数が求められるため、提案手法では計算コストが大きく抑えられることが明らかである。

計算過程の設計変数より決定する提案手法と、収束後の設計変数により決定する先に述べた手法で、除去領域ごとの設計変数を計算し、それぞれ決定した加工順序に従って、工具経路を市販のCAMソフトウェアで生成し、加工実験を実施した。使用する工具は高速度鋼2枚刃エンドミルであり、加工条件は工具カタログでの推奨条件を基に決定した。

図6に示した提案手法による加工後の工作物形状を測定し、目標形状のCADモデルと比較した結果、図中にi, iiで示した箇所で削り残しが確認されたが、他の箇所は目標形状と0.1 mm以内に収まっていた。同図(b)は、i周辺の拡大図であり、最大で0.3 mmの削り残しが生じていることが分かる。また図中のA-Aにおける断面図である同図(c)から、削り残しは断面の中央より下側で大きく生じており、iiでも同様であったことから、今回の検証実験では考慮していないねじれ方向の荷重が原因と考えられる。なお、iとiiの箇所は、未除去体積が8%から5%となる間で、同一の支えを除去する際に新たに創成される。したがって、ねじれ方向の荷重など3次元形状を加工する際の荷重の設定に課題は残すものの、提案手法により計算コストを抑えながら適切に除去領域の加工順序を決定し、加工途中の工作物の剛性を確保できることを確認した。

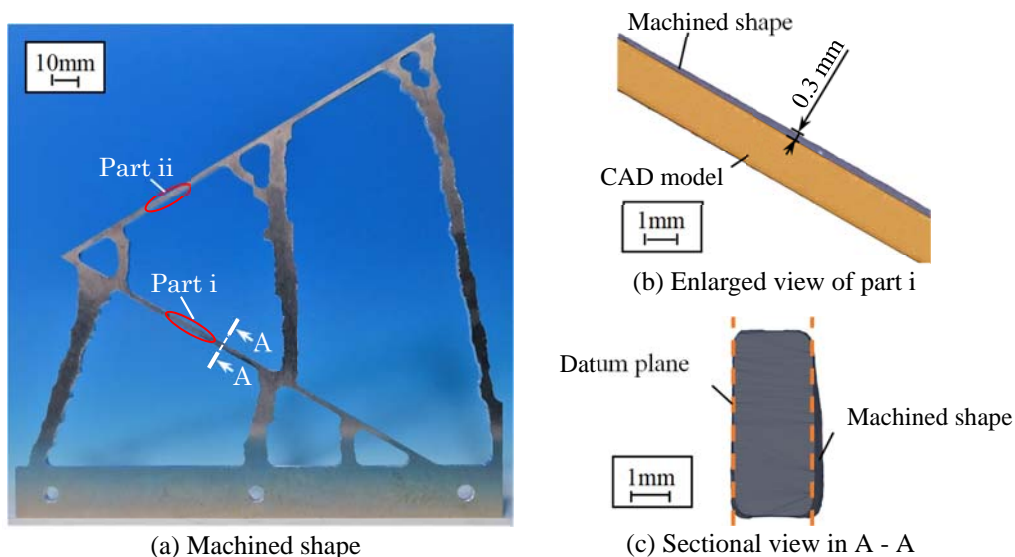


Fig. 6 Comparison of machined shape using the proposed method and original CAD model.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 榑野仁司, 熊野谿真帆, 中本圭一	4. 巻 85巻, 880号
2. 論文標題 工作物のトポロジー最適化に基づく荒加工工程の加工順序決定手法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/transjsme.19-0022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H. Kushino, M. Kumanotani, K. Nakamoto
2. 発表標題 A Study on Tool Path Generation During a Rough Machining Operation Based on Topology Optimization of Workpiece
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2019 & Manufacturing Systems Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kumanotani, H. Kushino, K. Nakamoto
2. 発表標題 Proposal of Complex Parts Machining Securing Dynamic Stiffness of Workpiece During a Rough Machining Operation
3. 学会等名 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kushino, M. Kumanotani, K. Nakamoto
2. 発表標題 Proposal of a Determination Method of Cutting Sequence Based on Optimal Workpiece Shapes During a Machining Operation
3. 学会等名 17th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榑野仁司, 熊野谿真帆, 中本圭一
2. 発表標題 トポロジー最適化を用いて生成した工具経路による3次元形状加工に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榑野仁司, 熊野谿真帆, 中本圭一
2. 発表標題 加工途中の工作物の剛性を確保するための工具経路生成に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榑野仁司, 熊野谿真帆, 中本圭一
2. 発表標題 工作物のトポロジー最適化に基づいた荒加工工程の加工順序決定手法に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊野谿真帆, 榑野仁司, 中本圭一
2. 発表標題 トポロジー最適化による動剛性を考慮した加工途中の工作物形状決定手法の提案
3. 学会等名 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榑野仁司, 熊野谿真帆, 中本圭一
2. 発表標題 工作物のトポロジー最適化による荒加工工程の工具経路生成に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://web.tuat.ac.jp/~nakalab/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笹原 弘之 (SASAHARA Hiroyuki) (00205882)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	