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

高橋 辰伍^{*1}, 板野 健太郎^{*2}, 中本 圭一^{*3}

Proposal of a decision method of workpiece shapes during a rough machining operation based on topology optimization

Shingo TAKAHASHI^{*1}, Kentaro ITANO^{*2} and Keiichi NAKAMOTO^{*3}^{*1,*3} Department of Mechanical Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan^{*2} Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan

Received: 1 June 2017; Revised: 6 July 2017; Accepted: 20 August 2017

Abstract

Agile manufacturing that can rapidly machine advanced materials or creative shapes is expected as an important key to realize mass customization of industrial products. Most of high-value-added workpieces have three dimensional and complex shapes. Thus, the workpiece shape and stiffness vary greatly according to cutting procedure during a rough machining operation. The induced displacement of workpiece strongly affects machining accuracy and tool life. However, it is difficult to automatically determine the process planning in commercial CAM system because of a large number of combinations. Therefore, the process planning has been designed by skillful experts to achieve complex parts machining. In order to realize future high efficient machining, it is necessary to obtain these tacit knowledges and to formulate the implicit machining know-how owned by skillful experts. As the first step, a method is proposed to decide workpiece shapes during a rough machining operation to ensure the workpiece stiffness based on topology optimization in this study. Topology optimization that is known as one of the highly flexible structure optimization methods enables to deal with the target configuration and shape. By introducing changeable fixed design domain and discretized characteristic function, an optimization problem can be converted to a problem of material distribution. In this study, the topology optimization is applied to decide workpiece shapes during a rough machining operation. As a purpose of minimizing their mean compliance, the optimized workpiece shape is calculated depending on applied loads at each machining step. By using the calculated workpiece shapes, a case study of complex parts machining is conducted. From the result, it is confirmed that a rough machining operation of complex parts can be achieved according to the decided workpiece shapes.

Keywords : Process planning, Topology optimization, CAM, Cutting, Complex parts

1. 緒 言

工業製品のマス・カスタマイゼーション化には、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の実現が鍵となる。高付加価値な工作物には複雑な3次元形状を有するものが多く、例えば航空機部品は、軽量化による燃費の向上が重要な課題であり、集約化、大型化が進んで5軸制御加工が必要な複雑形状が増えている。また、CAD/CAMの進歩と工作機械の高速化、多軸化、複合化も相まって、板厚の大きな圧延材から90%以上の材料を除去して高い精度が要求される複雑形状部品を削り出す加工法が定着している(井上, 2009)。一方、複雑形状部品の荒加工工程では、素材から最終形状へ至る加工途中に工作物の剛性が大きく変化するため、工作物の振動や変位を引き起こし、加工精度や工具寿命に大きな影響を与える。また、工作物の把持や治具による固

No.17-00249 [DOI:10.1299/transjsme.17-00249], J-STAGE Advance Publication date : 4 September, 2017

本論文は、第11回生産加工・工作機械部門講演会 講演論文集(2016), No.B01の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 学生員, 東京農工大学大学院 工学府 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)^{*2} 東京農工大学 工学部^{*3} 正員, 東京農工大学大学院 工学研究院

E-mail of corresponding author: s164005s@st.go.tuat.ac.jp

定方法は無数にあり (Li et al., 2015), 工具経路や加工条件の設定などにも多くのパラメータが存在する. この膨大な組合せを市販の CAM ソフトウェアで自動決定することは困難であり (青山, 2015), 工程設計は熟練者の技能や経験に依存しているのが実情である. しかしながら, 熟練度による工程設計のばらつきを排除して標準化するためには, 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, ノウハウをエンジニアリング化することが求められる (竹内, 2012).

そこで本研究では, 熟練者の技能や経験によって決定している複雑形状部品加工の工程設計の自動化に向け, 初期形状から目標形状に近づく荒加工工程においてトポロジー最適化を適用し, 想定される平均切削力に対して剛性を最大化する工作物形状を力学的根拠に基づいて決定する手法を提案する.

本研究と同様に工作物形状を決定する取組みとして, 目標形状から材料を付加しながら, 逐次工作物の変位を有限要素解析で求め, 加工途中の変位を最小化する工具経路を生成する手法が提案されている (小池他, 2010). しかしながら, 立壁を模した単純な薄板形状を対象としており, 要素数が多くなる複雑形状には適用されていない. また, 適切な余肉を配して薄肉形状を高精度に加工する手法 (Smith et al., 2012) では, 立壁の左右に支えとなる箇所を残すことで適切に加工できることが確認されているが, 残した支えを一意に決定しているため, 最適な工作物形状とはなっている保証はない.

一方, トポロジー最適化を用いて, 航空機部品の加工に必要な治具製作に向けた設計手法が提案され (Calabrese et al., 2017), 論理的に剛性を確保し, 人間には思いつかない治具形状を得ている. 他にも, トポロジー最適化を構造設計に用いる研究は数多いが, 切削加工途中の工作物へ適用した例はない.

2. 剛性最大化問題におけるトポロジー最適化

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 (堀尾他, 2014) や固有振動数最大化 (竹澤他, 2005) などの様々な問題を扱うことができる. トポロジー最適化では, 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により解く. 例えば図 1 では, 目的関数を平均コンプライアンス, 設計変数を体積密度, 制約条件を体積制約として最適構造を得た例を示す. このとき, 最適構造として得られる本来の設計領域 Ω_d を包含する拡張された固定設計領域 D と, 式 (1) で示す 0 と 1 の離散化された値をもつ特性関数 χ_Ω を導入する.

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

この特性関数を決定する目的関数を定義し, 任意の制約条件を与え, 最小化 (もしくは最大化) することにより, 最適な形状・形態を表現することが可能となる. しかし, 離散化された特性関数は固定設計領域のあらゆるところで 0 か 1 の値となり, 不連続性が憂慮される. そこで, このような特性関数を扱うために設計空間を緩和しなければならない. 代表的な緩和法として, 均質化法 (Bendsøe and Kikuchi, 1988) があげられるが, 本研究では西

Fig. 1 (a) Topology optimization that is known as one of the highly flexible structure optimization methods enables to deal with target configuration and shape. (b) By introducing changeable fixed design domain and discretized characteristic function, an optimization problem can be converted to a problem of material distribution.

脇らの方法 (2013) を参考にして、静的な剛性最大化問題を解くために密度法 (Sigmund and Maute, 2013) を採用する。また、このとき密度法的一种である SIMP 法を用いることで特性関数を連続関数である密度関数に置き換え、弾性体の変形しやすさを取り扱う。SIMP 法は式 (2) で表され、設計領域の材料が等方性材料であると仮定する。弾性テンソル $\mathbf{E}$ が正規化された体積密度である設計変数 ρ のべき乗に比例するという考え方であり、そこで得られる均質化された弾性テンソル $\mathbf{E}^H$ を用いて最適化する。

$$\mathbf{E}^H = \mathbf{E} \rho^p \quad (2)$$

$$0 \leq \rho \leq 1 \quad (3)$$

ここで、 p はペナルティパラメータと呼ばれる値である。このパラメータを変化させることにより明瞭な材料分布構造を得ることができ、本研究では $p = 3$ と設定している。また、設計変数は式 (3) で定義され、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。次に、目的関数として弾性体の変形しやすさである平均コンプライアンス $l(\rho)$ を、式 (4) のように最小化することにより剛性が最大となる形状を決定する。このとき、式 (5) で表すように任意に設定した体積制約下における剛性最大化問題として取り扱う。

$$\underset{\rho}{\text{minimize}} \quad l(\rho) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (4)$$

$$\text{subject to} \quad g(\rho) = v(\rho) - v_{\text{target}} \leq 0, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (5)$$

ここで、 ρ は固定設計領域の各要素内に設定した密度、 $\mathbf{U}$ は節点変位ベクトル、 $\mathbf{K}$ は全体剛性マトリクス、 v は固定設計領域の体積、 v_{target} は事前に設定した任意の体積制約量である。

3. 工作物へのトポロジー最適化の適用

3・1 提案手法の概要

段階を経ない通常のトポロジー最適化では、一度荷重を設定すれば任意の体積制約量の最適形状を得られるという利点はあるが、荒加工工程では様々な工具を用い、それによ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、前章で述べたトポロジー最適化の計算手順をそのまま適用して、工作物形状を決定することはできない。そこで本研究では、図 2 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。

以下では、図 3 に示した提案手法のフローチャートにおける各処理を説明する。なお、説明を簡略化するため、工作物の初期形状を 2 次元の正方形、目標形状をアルファベットの J の形とした場合を例として用いる。

Fig. 2 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. 3 Flowchart of a decision method of workpiece shapes during a rough machining operation.

3・2 固定設計領域と境界条件の設定

提案手法では、まず工作物の初期形状を入力し、最適構造を求める領域である固定設計領域を工作物の初期形状の内側に設定する（図3のStep 1）。ここで、図4（a）のように固定設計領域をある要素数で分割し、初期形状から目標形状へ至る荒加工工程を除去すべき領域の中でまだ加工が済んでいない体積（以下、未除去体積）の割合に応じて分割する。なお、ここでの例は要素数を8 X 8、荒加工工程の段階数を4としているが、要素数は必ずしも縦横で一致する必要はない。また、図4（b）に示すように、式（3）の設計変数 ρ を各要素に設定する。

次に、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として節点を固定する（図3のStep 2）。図4（c）では、黒い三角形の先端にある節点が固定されていることを示している。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に荷重を設定する。なお、本研究では、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、工具回転（時計回り）方向に沿ったせん断荷重を負荷している。ただし、目標形状に隣接する要素の設計変数が0であれば、図4（d）のように節点から除去する。これは、目標形状周りの余肉が除去され、加工が完了している領域においては荷重が発生しないことを意味している。また、目標形状に隣接する余肉が多く残っているほど工具から目標形状へと伝わる荷重は小さくなると仮定し、次式により、荷重方向に隣接して残存する要素数に反比例させて荷重の大きさ F' を決定している。

$$F' = F/b \quad (6)$$

ここで、 F は単位荷重、 b は荷重方向に隣接して残存する要素数である。なお、単位荷重の大きさ F は1としている。図5には、目標形状の左方向に隣接して要素が2つ、上方向に隣接して要素が1つ残存している例を示す。このとき、左方向から負荷されている荷重の大きさは残存する要素数が2であることから、法線方向、せん断方向ともに $F/2$ となり、上方向から負荷されている荷重の大きさは F となる。

3・3 有限要素解析と収束判定

設定した境界条件を基に、有限要素解析から各要素の要素剛性マトリクス $\mathbf{K}_e$ を得て、それらを重ね合わせることで全体剛性マトリクス $\mathbf{K}$ を求める（図3のStep 3）。さらに、目的関数であり、弾性体の変形しやすさを表す平均コンプライアンスを式（7）から計算する。

$$l(\rho) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (7)$$

また，固定設計領域の体積 v （2次元の場合には面積）を次式より計算する（図3のStep 4）.

$$v = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i \quad (8)$$

ここで， n は全要素数， ρ_i と v_i は i 番目の着目している要素と体積である．式（9）より，目標として設定した体積制約において設計変数 ρ の更新前後の変動量が ς 以下となって収束している場合には図3のStep 5へと進んで工作物形状を決定する．収束していない場合には図3のStep 6，Step 7へと進んで設計変数を更新する．

$$\|l(\rho)^{(k+1)} - l(\rho)^{(k)}\| \leq \varsigma \quad (9)$$

ここで， k は設計変数の更新回数である．

Fig. 4 Computational procedure of a proposed method consists of 4 steps. (a) Target shape and mesh-divided fixed design domain are prepared in workpiece. (b) Design variable is set to each element. (c) The nodes on the tip of triangles are fixed on boundary and loads are set around target shape. (d) Loads are removed and magnitude of load is changed.

Fig. 5 Magnitude of load is modified based on unmachined volumes remaining around target shape.

3・4 設計変数の更新

目的関数を収束させるために、式 (4), (5) に表すように制約付き最適化問題としてこれらを満たす最適解を導き出す。このとき、最適性基準法を用いるため、式 (10) で表されるラグランジアン L から、一次の最適性の必要条件である式 (11) を満たすラグランジュ乗数 λ を導入する。さらに、目的関数と体積の設計感度を計算して、式 (12) で表される体積制約に関する上限値と下限値の範囲内で設計変数を更新することで、式 (5) の制約条件を満たす最適解を得る (図 3 の Step 6, Step 7)。ここでいう設計感度とは、設計変数の 1 階微分のことである。また図 6 に示すように、ラグランジュ定数 λ は二分法で算出する。

$$L(\boldsymbol{\rho}, \lambda) = l(\boldsymbol{\rho}) + \lambda g(\boldsymbol{\rho}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_i} = \frac{\partial l(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} + \lambda \frac{\partial g(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} = 0 \leftrightarrow \frac{\frac{\partial l(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i}}{-\lambda \frac{\partial g(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i}} = M_i = 1 \quad (11)$$

$$\rho_i^{(k+1)} = \begin{cases} \text{Max} \left\{ 0, \rho_i^{(k)} - m \right\} & \left(\rho_i^{(k)} (M_i^{(k)})^q \leq \text{Max} \left\{ 0, \rho_i^{(k)} - m \right\} \right) \\ \text{Min} \left\{ 1, \rho_i^{(k)} + m \right\} & \left(\rho_i^{(k)} (M_i^{(k)})^q \geq \text{Min} \left\{ 1, \rho_i^{(k)} + m \right\} \right) \\ \rho_i^{(k)} (M_i^{(k)})^q & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 m は設計変数の変動限度、 q はダンピング係数であり、 $m=0.15$ 、 $q=0.5$ と設定した。更新後の設計変数を基に、図 3 の Step 3 で再度有限要素解析が行われる。

Fig. 6 Example of optimal value search of design variables. Firstly, initial value ρ related to the prescribed volume limit is given and movable range is defined. Then, λ is given by the bisection method. Basically, the midpoint λ is decided according to eq. (13). The calculation is repeated until λ is converged.

3・5 工作物形状の決定

目的関数が収束した場合には、決定された設計変数から工作物形状を出力する (図 3 の Step 5)。このとき、ある未除去体積で計算される設計変数は、SIMP 法を用いているため式 (3) の定義により一般に小数となり、図 7 の左図のように得られる。しかし、切削加工の工作物においては材料が 0.3 だけ存在するといった状況はあり得ない。そこで、得られた設計変数を目標とする体積制約を満たすように、値が大きいものから 1 とし、それ以外の設計変数は全て 0 と修正する。さらに、目標形状を構成する要素の設計変数が 0 となる場合は、強制的に 1 とする。以上の 2 値化処理により、工作物の有無を明確にした設計変数は図 7 の右図のようになる。ここで、予め定めた最終段階の未除去体積に達した場合には、工作物形状を決定する計算を終了する。一方、それ以外の場合には次の段階の工作物形状を算出するために現在得られている 2 値化された設計変数を各要素へ再設定して、図 3 の Step 1 へ戻り計算を繰り返す。荒加工工程の段階数を 4 としたとき、制約である体積を減らしながら、初期形状から目標形状に近づく荒加工工程を想定して工作物形状を決定した例を図 8 に示す。橙色部分が目標形状の

領域, 白色部分が既に除去された領域, 水色部分がまだ加工されていない領域を表しており, 各工作物形状の下に記している数字は初期形状に対する未除去体積の割合である. なお本研究では, 荒加工工程を分割した各段階で使用する工具や加工条件が異なることを想定している. また, 分割した荒加工工程の各段階において, 得られた設計変数を工具経路の生成などに利用することも考慮して, 確率的に最適解を得る遺伝的アルゴリズム(申他, 2013)ではなく, パラメータスタディが可能な SIMP 法で得られた設計変数に対して 2 値化処理を行っている.

Fig. 7 Workpiece shape is described by binary code that shows the existence of materials clearly.

Fig. 8 Workpiece shapes corresponding to unmachined volumes during a rough machining operation.

4. ケーススタディ

提案した手法に基づき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し, その形状に基づいて実際に加工したケーススタディについて述べる. 工作物の初期形状は 100 X 100 X 10 mm の平板, 目標形状は図 9 に示す蛇を模した形状である. 図 10 に示すように工作物の初期形状の内側に固定設計領域を 40 X 40 の要素数で分割し, 2 次元で近似した目標形状は固定設計領域に内包されるように配置した. 荒加工工程の段階数を 3 とし, 算出された各段階での工作物形状を未除去体積の割合と合わせて図 11 に示す. なお, 計算には MathWorks 製の MATLAB R2011b を用い, 使用した PC の仕様は Windows 7 Professional 32 bit, メモリは 4 GB で, 計算にかかった時間は 1 分 30 秒程度であった.

実機による荒加工では, アルミニウム合金板 (A5052) の板厚方向と工具軸を合わせて, 各段階の工作物形状をエンドミルで創成し, 最終的に仕上げ加工を施した. 加工途中の様子を図 12 に, 切削条件を表 1 にまとめて示す. 加工に用いた工作機械はヤマザキマザック製 3 軸制御立型マシニングセンタ (VCN-410A) であり, 切削条件には使用した工具 (材質: 高速度鋼, 刃数: 2 枚刃) のカタログから, アルミニウム合金に対する推奨条件を適用した. 工具経路は DP Technology 製 CAM ソフトウェア ESPRIT 2015 を用いて, 図 13 に示すように各除去領域でそれぞれ生成した. なお, 荒加工にはスクエアエンドミルを, 仕上げ加工にはボールエンドミルを用いたが, 要素一辺の大きさ 2 mm と同じ直径の工具を採用することで特に荒加工工程での工作物形状の創成を容易にしている. 図 14 には, 図 11 に示した計算結果に従って得られた荒加工工程の工作物形状を仕上げ加工後の形状と合

わせて示す。定性的ではあるものの、熟練者の技能や経験によって決定している複雑形状部品加工のように、工作物の剛性を確保する支え部分が得られており、目標形状に近づく荒加工を実現できることが確認できた。

Fig. 9 Target shape for case study.

Fig. 10 Located target shape in workpiece.

Fig. 11 Rough machining operation is divided into 3 steps that the rate of unmachined volume is 35%, 16%, and 6%, respectively. It is recognized that pillar-like supports that are often found in parts machining of thin-walled complex shapes are obtained to ensure the workpiece stiffness.

Fig. 12 Machined workpiece in rough cutting experiment.

Table 1 Cutting conditions.

	Rough cut	Finish cut
Spindle speed [min^{-1}]	9500	9500
Feed rate [mm/min]	160	25
Cutting speed [m/min]	59.66	59.66
Axial depth of cut [mm]	1.00	-
Radial depth of cut [mm]	1.00	1.00

Fig. 13 Example of generated tool paths. Tool diameter is equal to one side of element length.

Fig. 14 Machined results according to decided workpiece shapes.

5. 結 言

航空機部品などの複雑形状部品の荒加工工程において、熟練者の技能や経験によって決定している工程設計を自動化するため、トポロジー最適化により剛性を最大化する工作物形状を力学的根拠に基づき決定する手法を提案した。提案手法の基本的な有用性を確認するため、平板状の初期工作物形状から蛇を模した2次元の目標形状を創成することを想定し、提案手法により荒加工工程の工作物形状を決定するケーススタディを実施した。さらに、決定した工作物形状に従って実機を用いて加工した結果、提案手法により目標形状に近づく荒加工工程が実現できることを確認した。

本研究では荒加工工程をいくつかの区切った各段階で想定される平均切削力を荷重として目標形状に同時に負荷している。一方、実際の荒加工工程における荷重は個別の位置に別々に負荷される。このため、工具経路などの加工手順や切削条件に応じた適切な荷重の設定と荒加工工程の分割は今後の課題であり、またトポロジー最適化により決定する工作物形状の3次元化も不可欠である。

謝 辞

本研究の一部は、(公財) 工作機械技術振興財団および(公財) 大澤科学技術振興財団の研究助成により行われたことを記し、感謝の意を表す。

文 献

- 青山英樹, 3D-CAD/CAM の現状と方向性, 精密工学会誌, Vol.81, No.3 (2015), pp.206-210.
- Bendsøe, M.P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, No.2 (1988), pp.197-224.
- Calabrese, M., Primo, T. and Prete, A.D., Optimization of machining fixture for aeronautical thin-walled components, Procedia CIRP, Vol.60 (2017), pp.32-37.
- 堀尾仁志, 小木曾望, 乙守正樹, 山田崇恭, 西脇眞二, 面外変形を考慮した薄板構造の剛性最大化を目的としたレベルセット法に基づくトポロジー最適設計, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.811 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0054.
- 井上真一, 次世代航空機構造部品と加工技術, 精密工学会誌, Vol.75, No.1 (2009), pp.157-158.
- 小池雄介, 松原 厚, 西脇眞二, 泉井一浩, 山路伊和夫, 加工点工作物変位を最小化する切削プロセスの設計, 精密工学会誌, Vol.76, No.12 (2010), pp.1406-1410.
- Li, Y., Liu, C., Hao, X., Gao, J.X. and Maropoulos, P.G., Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.64, No.1 (2015), pp.173-176.
- 西脇眞二, 泉井一浩, 菊池 昇, トポロジー最適化 (2013), 丸善出版.
- 申 鉉眞, 平野義鎮, 轟 章, エリート初期集団 GA を用いる多目的トポロジー最適化の効率化, 日本計算工学会論文, Vol.2013 (2013), DOI: 10.11421/jscs.2013.20130006.
- Sigmund, O. and Maute, K., Topology optimization approaches, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.48, No.6 (2013), pp.1031-1055.
- Smith, S., Wilhelm, R., Dutterer, B., Cherukuri, H. and Goel, G., Sacrificial structure preforms for thin part machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.61, No.1 (2012), pp.379-382.
- 竹内芳美, 多軸・複合・高性能・超精密加工機の最新の動向について, 精密工学会誌, Vol.78, No.9 (2012), pp.735-739.
- 竹澤晃弘, 斉藤真大, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, フレーム要素を用いたトポロジー最適化 (固有振動数最大化を目的とした場合), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.710 (2005), pp.3018-3025.

References

- Aoyama, H., State of the art and future trend of 3D-CAD/CAM, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.3 (2015), pp.206-210 (in Japanese).
- Bendsøe, M.P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, No.2 (1988), pp.197-224.
- Calabrese, M., Primo, T. and Prete, A.D., Optimization of machining fixture for aeronautical thin-walled components, Procedia CIRP, Vol.60 (2017), pp.32-37.
- Horio, H., Kogiso, N., Otomori, M., Yamada, T. and Nishiwaki, S., Level set-based topology optimization of thin plate structure for maximizing stiffness under out-of-plane deformation, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.811 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0054.
- Inoue, S., Structure parts for next generation aircrafts and machining technology, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.75, No.1 (2009), pp.157-158 (in Japanese).
- Koike, Y., Matsubara, A., Nishiwaki, S., Izui, K. and Yamaji, I., Cutting process design for minimizing workpiece

- displacement at cutting point, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.76, No.12 (2010), pp.1406-1410 (in Japanese).
- Li, Y., Liu, C., Hao, X., Gao, J.X. and Maropoulos, P.G., Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.64, No.1 (2015), pp.173-176.
- Nishiwaki, S., Izui, K. and Kikuchi, N., Topology Optimization (2013), Maruzen (in Japanese).
- Shin, H., Hirano, Y. and Todoroki, A., Efficiency improvement of multi-objective topology optimization using elite initial individuals of genetic algorithm, Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science (in Japanese), Vol.2013 (2013), DOI: 10.11421/jsces.2013.20130006.
- Sigmund, O. and Maute, K., Topology optimization approaches, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.48, No.6 (2013), pp.1031-1055.
- Smith, S., Wilhelm, R., Dutterer, B., Cherukuri, H. and Goel, G., Sacrificial structure preforms for thin part machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.61, No.1 (2012), pp.379-382.
- Takeuchi, Y., Current state of the art in multi-axis control, multi-tasking, multi-function and ultraprecision machine tools, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.78, No.9 (2012), pp.735-739 (in Japanese).
- Takezawa, A., Saitou, T., Nishiwaki, S., Izui, K. and Yoshimura, M., Topology optimization using frame elements (for cases where eigen-frequencies are to be maximized), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.71, No.710 (2005), pp.3018-3025 (in Japanese).