

令和 3 年 6 月 29 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03867

研究課題名(和文) アディティブマニュファクチャリングの後処理機械加工工程を考慮した積層形状計画手法

研究課題名(英文) Process planning method for additive manufacturing with consideration of post machining process

研究代表者

金子 順一 (Kaneko, Jun'ichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80375584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、積層造形に際して設定されるサポート形状を、後工程の機械加工において必要とされる諸条件を考慮して自動的に最適化することを目的とする。本研究の独自性は、機械加工における加工誤差を事前に予測する手段を開発し、問題を前工程である積層造形の段階にフィードフォワードすることで解決しようとする点にある。これに対して、サポート位置の配置およびそのサポート切断時の作用力の作用による造形物の変形、および、加工面全域に対する仕上げ切削加工によるワークの変形を事前にFEMモデルにより予測し、ワーク形状の変形が最小となるサポート除去の順序、および工具経路・工具姿勢を計画するシステムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、新しい製造技術として今後産業界での実用が期待されている積層造形において、現状では作業者の属人的な作業に依存している後処理の効率化を実現することを目指している。新しい加工プロセスそのものの部分最適化にとどまらず、工程全体の最適化を目指す際に解決すべき課題について、その具体的な解決方法をソフトウェア的に実現するという点で大きな社会的意義があると考えられる。また、三次元形状に対して高速な幾何形状処理をこれらの工程最適化に導入する例は少なく、学術的にも大規模三次元形状の処理技術の開発として重要であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research was to automatically optimize shape of the support set for additive manufacturing, taking into account the various conditions required in the finishing machining process. The uniqueness of this research lies in the fact that it tries to solve problems by developing a means to predict the machining error in advance and feed forward the problems to the previous step of additive manufacturing. For this purpose, we have developed a new system that uses FEM models to predict deformation of the workpiece caused by the placement of supports and the loaded force when the supports are removed, and to plan the order of support removal, tool path, and tool posture that minimize the deformation of the workpiece shape.

研究分野：機械加工

キーワード：機械加工 積層造形 AdditiveManufacturing 工程設計 工具経路 弾性変形 干渉回避 最適化

1. 研究開始当初の背景

近年顧客のニーズの多様化により、多品種少量生産の需要が急増している。多品種少量生産は在庫リスクを減らすという利点の反面、生産効率の低下や製造コストの増加などの課題があり、解決が強く求められている。この中では特に航空宇宙分野はブロック材から 90%程度の体積を切削加工によって除去するため生産効率が低く、難削材を対象とすることから工具等のコストの低減が課題となっている。そこで積層造形 (Additive Manufacturing : AM) と呼ばれる、層状に材料を堆積して形状を創成する加工技術の産業利用が注目されている。この積層造形では治具や金型の準備といった段取り工程を最小限として完成形状に近いニアネットシェイプを直接造形することができ、難削材であるチタン合金等を利用する航空機分野において利用が開始されている。例えば、GE aviation では旅客機のタービブレードの量産を実用化している。

ところで、AMによる金属部品の製造では、得られた完成面の性情がそのまま製品に利用可能な例は少なく、機械的加工によって後処理をすることが多い。ワイヤ材料をアーク放電で熔融し積層する WAAM 方式や、材料粉末と熱源を造形部分に同時に照射し熔融・積層する DED 方式では、それぞれ材料の融解を伴うため、一般的な機械部品の形状精度を獲得するためには、切削・研削といった除去加工による後処理が必須となる。一方、床に粉末材料を薄く敷き、上面に部分的に熱エネルギーを与えて粉末材料を焼結する SLS 方式の積層では、材料の熔融・固化時の温度変化に起因する熱変形を防ぐため、ベースプレートと造形物を繋ぐサポート形状の付与が必須となり、後工程ではこれらのサポート形状を造形物より除去する必要性が生じる。(図 1) 従来からこれらの後工程のサポート形状除去はニッパー等の工具を用いて作業者の手作業で行われており、サポートの配置や除去順序、および除去時の過大な負荷力の作用による造形物の破損等の回避は積層時には考慮されておらず、後工程になって対策が行われてきた。

2. 研究の目的

これらの背景に対し、積層造形の実用化および量産においては、積層工程そのものの効率化に加えて、これらの後工程の自動化および最適化が大きな課題となる。

大型の積層物の処理では、自らよりも大きな物体に対してサポートの除去が可能な産業用ロボットが使用されると考えられるが、作業者の手首よりもはるかに剛性を有するロボットによるサポート除去の自動化では、除去に伴う負荷力の作用や、それによる造形物の破損の回避は造形前のサポート位置の考慮の段階で実施する必要がある。すなわち積層終了後の除去作業における制約を考慮したサポート形状の配置や除去順序の計画が必要とされる。

そこで本研究では、産業用ロボットアームとエアニッパーによる除去を想定し、FEM (有限要素法) を用いて造形物の変形を予測するシステムの開発を行う。これによりサポート形状の配置・除去順序の修正を行うシステムの開発を実施する。

3. 研究の方法

開発するシステムの概要を図 3 に示す。このシステムは (I) サポートの生成、(II) サポート除去順序及び工具姿勢の決定、(III) サポート除去時の造形物の変位量解析から構成され、再帰的に除去可能性と変位量の解析を繰り返してサポート配置・除去順序を決定する。本研究の検証では図 2 のような負荷力の影響を受けやすい最大刃厚 10mm のチタン製タービブレード翼形状を対象とした。サポートは $\phi 2\text{mm}$ の円柱でニッパーによる除去が可能なエッジ部に配置し、FEM を用いてサポート除去時にかかる負荷力を除去順に適用することで除去時の変位量の解析を行う。

(1) サポートの生成

サポートの生成には AUTOSESK 社の FUSION360 を使用した。ベースプレート上に設定した配置面にサポート断面のスケッチを配置し、造形物からベースプレートにサポートを 1 本ずつ独立して押し出し、それぞれの識別が可能なようにモデルを生成する。最後にベースプレートのスケッチを用いて切り取りしながら押し出すことにより、一定の基準間隔でそれぞれの積層造形の制約に沿ったサポート形状の設定を可能とした。(図 3: (i))

(2) サポート除去順序及び工具接近姿勢の決定

サポート除去順序及び工具接近姿勢の決定には、過去の多軸制御切削加工に関する研究で開発されたポリゴンモデルによる干渉判定手法を用いた。ニッパーとサポート付きの造形物のモデルの STL モデル同士が干渉しているかの判定を繰り返し実施する。このとき、ロボットアームに入力する除去順序の経路と同じ経路において干渉の有無を判定する。干渉発生の場合は、サポート形状の中心軸を中心にニッパーの侵入方向を回転して変更し、干渉が発生しない工具接近姿勢の探索を再帰的に実施する。(図 4: (ii))

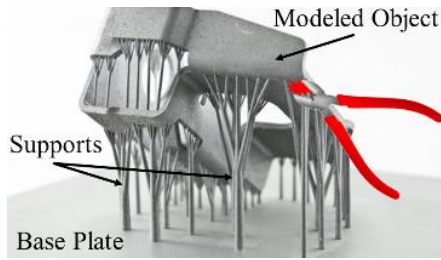


Fig. 1 Removal process of support shape

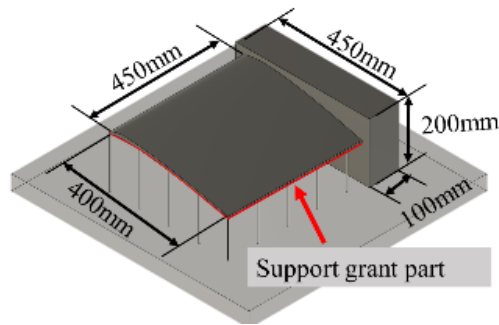


Fig. 2 Sample : Blade shape model

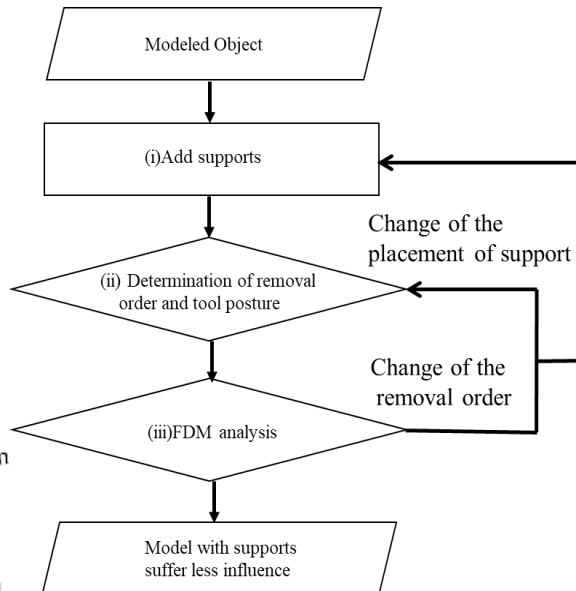
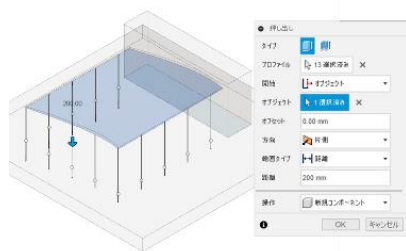
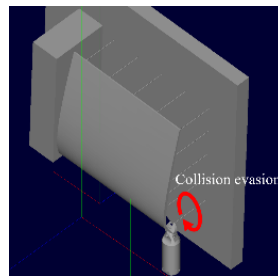


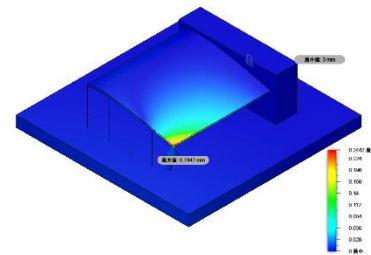
Fig. 3 Flow of the proposed planning system



(i) Arrangement of the supports



(ii) Collision detection and accessibility estimation



(iii) Estimation of deformation in removal process

Fig. 4 Images of the simulation process in the proposed system

(3) サポート除去時の造形物の変位量解析

サポート除去時にワーク側に作用する負荷力によって、ワークにもたらされる弾性変形量の解析を行う。負荷力は動力計を用いた切断実験(図5)より計測し、材料ごとに切断するサポート径に対する切断方向、およびそれに鉛直なスラスト方向への作用力として取得した。

これらの負荷力によって生じる変位量の解析には、商用CAMシステム(FUSION360)に統合されたFEMソルバを用いた。ニッパーによるサポートの切断位置を作用点とし、実験的に測定した負荷力によってもたらされるワーク形状の全域にわたる変位量の分布を解析する。この解析をサポート1本ずつの除去に対してそれぞれにおいて実施し、エアニッパーによる除去の変更により、積層物の各所における変形の大小を比較可能とする。(図4:(iii))

4. 研究成果

(1) サポート切断実験

φ2mmのチタン丸棒のエアニッパーによる切断実験の結果を図6に示す。複数回の切断実験を繰り返し行い、サポートの中心軸に対するニッパーの切断方向がなす相対角度θを5°刻みで変更し、それぞれの負荷力を測定した。切断時の作用力の推移を図7に示す。切断抵抗力の作用時間は2~3msとなり、サポートの中心軸に鉛直な方向に押し込むように最大力が作用し、その後、引っ張り上げるような力が短時間継続する。各相対角度別の結果を比較すると、θ=-40°付近の条件でサポート中心軸方向に作用する負荷力が最大となる傾向がみられた。弾性変形量の最大値の推定では、これらの結果から切断時の材料のばらつきも考慮し、負荷力の最大値を60[N]として解析を行っている。

(2) サポート切断時の造形物の変位量解析

造形対象物に対するサポート間の距離と本数を変更したサポート形状案を4種自動生成し、それぞれ、サポート間隔200mm・本数7本(図8(a))、サポート間隔100mm・本数13本(図8(b))、サポート間隔200mm・本数9本(図8(c))、サポート間隔200mm・本数11本(図8(d))

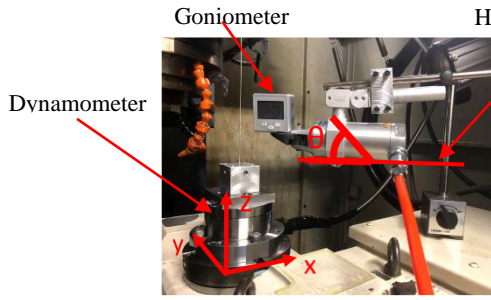


Fig. 5 Cutting experiment for titanium support

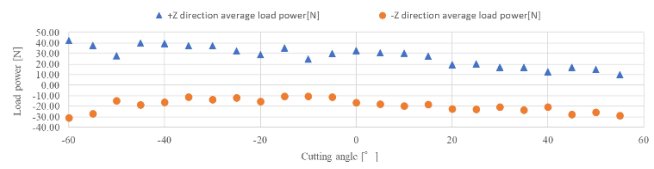


Fig. 6 Relationship between nipper angle and cutting force in support removal process

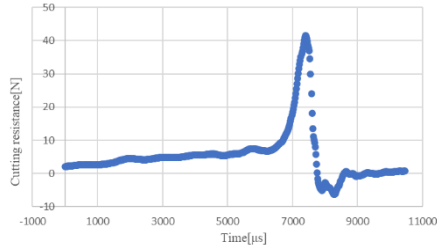


Fig. 7 Measured Instantaneous cutting force

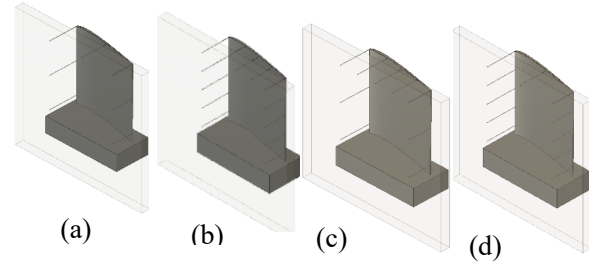


Fig. 8 Blade model and generated support arrangement

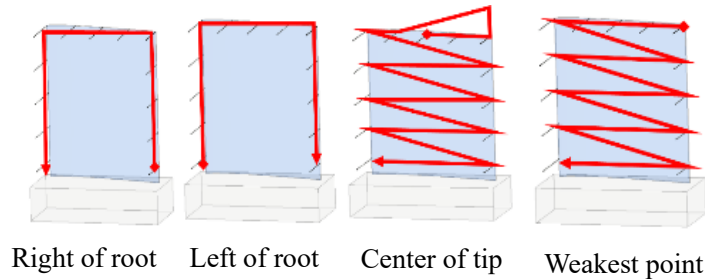


Fig. 9 Generated removal sequence patterns

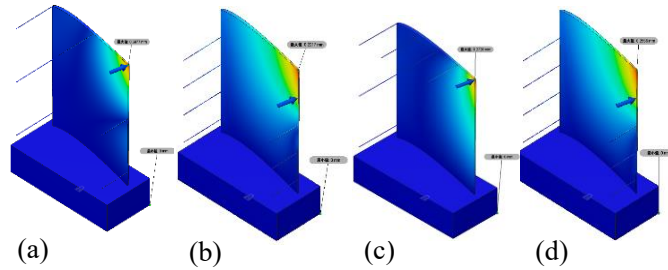


Fig. 10 Distribution of surface deformation in support removal process

Table 1 Results of FEM analysis about maximum deformation in support removal process

Model (a)					
Removal order pattern		Right of root	Left of root	Center of tip	Weakest point
Maximum displacement	[mm]	0.5207	0.5559	0.5527	0.3977
Model (b)					
Removal order pattern		Right of root	Left of root	Center of tip	Weakest point
Maximum displacement	[mm]	0.3994	0.4925	0.225	0.2217
Model (c)					
Removal order pattern		Right of root	Left of root	Center of tip	Weakest point
Maximum displacement	[mm]	0.2726	0.5804	0.5182	0.3491
Model (d)					
Removal order pattern		Right of root	Left of root	Center of tip	Weakest point
Maximum displacement	[mm]	0.5511	0.4971	0.3392	0.2556

のそれぞれについて除去順序を(図9)に示すように変更した場合の変形量解析を行った。各モデルにおいてサポート切断の瞬間における積層物の弾性変形が最も抑制可能となった場合の変位分布の例を図10に、最大変位量のまとめを表1に示す。

(3) 実験・解析結果の考察

エアニッパーによる切断実験において、付加力が -40° 付近で最小となったのは、エアニッパーの切れ刃すくい角が 40° となっており、サポートの中心軸方向に切断時の主分力成分が作用しないからだと考えられた。

サポートの配置、および切断順序の比較では、いずれの場合にも切断時の弾性変形量が大きくなる剛性のもっとも低い先端部のサポートから除去を開始する順序を採用すると最大変位量が低下する傾向がみられた。また、サポートの間隔を密にすると最大変位量を有意に抑制することができるが、均一に配置すると加工時間がサポート本数に比例して線型的に増加するため、剛性の低い、除去時に弾性変形の生じやすい箇所に集中的にサポートを配置することが有効であると考えられる。今後のサポート配置においては、切断箇所に要求される寸法公差を満たしつつ、加工時間を短縮するためのサポート間隔を最適化する計画システムの開発が期待される。

(4) 結言

本研究では、商用CAEシステム(AUTOSES社 のFUSION360)とエアニッパー・ロボットと加工対象物との干渉検出・回避システムを用いることで、積層終了後の造形物の後処理における弾性変形を考慮したサポート形状の配置・および弾性変形の予測システムの開発を行った。これにより、設計したモデルの造形前に後処理時の積層造形物の変形を抑制するためのサポート形状の配置・除去順序の検討を可能にすることができた。

今後の課題では、サポート形状の創成システム内部において開発した計画を同時に実施することで、作業者が意識することなくこれらの問題を考慮した最適化を実施するための自動化の実現が挙げられる。また、本システムでは、エアニッパーを固定し、加工対象物をロボットによって移動する比較的小規模な積層物の処理を対象としていたが、今後は航空機部品などの大型薄肉部品を対象に、エアニッパー側がロボットによって移動するセットアップでの解析および最適化手法の自動化が対象になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小島雄太, 神永昂周, 金子順一, 阿部壮志, 堀尾健一郎
2. 発表標題 積層造形後の除去プロセスを考慮したサポート形状の計画手法
3. 学会等名 2019年度 砥粒加工学会 学術講演会 (ABTEC2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大熊優輝, 金子順一, 堀尾健一郎, 阿部壮志
2. 発表標題 加工対象物の切削抵抗による変形を考慮した工具姿勢計画法の開発
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------