

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630022

研究課題名(和文) 酢酸ナトリウム水溶液の過冷却現象を利用した柔軟・難把持工作物への複雑形状創成

研究課題名(英文) Dexterous machining of soft objects by employing an aqueous solution of sodium acetate

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：工作物がゴムなどの柔軟な材料や把持困難な形状に対して切削加工により高精度に複雑形状を創成することを目的とした。このために、工作物の把持に酢酸ナトリウム水溶液の過冷却状態からの急速な凝固現象を利用し、みかけ上の剛性の確保する工作物把持手法を提案した。また、加工精度を得るのに十分な工作物の剛性を確保できるように、把持部分を含めて加工する順序を、一度削り取った部分の再生を考慮して計算する手法を考案した。さらに、多軸制御工作機械の工程設計や工具経路生成の知見も加えて実用性の高いCAMシステムを開発し、工具経路を含む加工条件の最適化を図ることで、高精度な複雑形状の創成を実現した。

研究成果の概要(英文)：It is generally difficult to machine soft objects precisely because of the deformation caused by not only the cutting force but also the clamping force itself. In order to solve this problem, flexible clasper employing an aqueous solution of sodium acetate is devised to fix a workpiece and to suppress the deformation. The workpiece is placed in a case filled with an aqueous solution of sodium acetate on a machine tool table. The aqueous solution is crystallized by applying a stimulus, and the solid sodium acetate clamps the workpiece. As a result of experimental machining, it is found that the proposed flexible clasper has the potential of realizing "Dexterous Machining" of soft objects.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：切削加工 把持具 柔軟材料 多孔質材料

1. 研究開始当初の背景

近年、いわゆる 3D プリントを用いた付加工 (Additive Manufacturing) が、設計した CAD モデルから素早く実体形状を創成する方法として注目されている。しかしながら、現状の 3D プリントで利用できる素材は限られ、形状以外に要求される質感や手触りといった属性を確認することは難しい。また金属を直接造形する場合でも、一般的な機械部品で求められる加工精度や表面性状を得ることはできない。一方、迅速で巧妙な切削加工による形状創成は、幅広い材料や生産量に対して十分な解決策になり得るため、切削加工を専門とする試作メーカーが現在も数多く存在している。

しかし、工作物が一般的な金属材料であれば簡単な加工も、ゴムやスポンジ等の弾性材料、複雑形状を有する難把持物となると格段に難しくなる。特に弾性材料は、工業部品から日用品に至るまで幅広く利用されており、一般には金型で成形されているが、多品種少量生産には向いていない。これに対して、切削加工は様々な材質の工作物を取り扱えるだけでなく、創成できる形状の自由度も高いため、リードタイムが重要となる試作などでの活用が期待できる。一方、工作物の把持力や切削力に起因して変形が生じやすいため、これら柔軟工作物の切削加工特有の問題を解消することが、高精度加工の達成には欠かせない。このため、簡便で低コストに複雑形状の柔軟工作物を把持・保持し、切削加工する手法を確立することが必要になる。

これまでも、工作物を極低温で凍結させて剛性を確保する手法が報告されているが、加工中の温度管理やコスト面で難がある。また、分割した工作物形状に応じた複数の支持具を積層造形法で作成した例もあるが、単一あるいは極少量の試作では無駄も多い。さらに、低融点金属を用いて治具を製作する手法もあるが、融点は後述する酢酸ナトリウム水溶液よりも高く、再利用する際には不利な上、加工中に人体に有害な金属ヒュームの発生が懸念される。

2. 研究の目的

試作品など、単一あるいは極めて少量を切削加工で迅速に入手したいというニーズが存在する。近年では、複雑形状も段取り替えなしで加工できる 5 軸制御マシニングセンタが普及し、設備面での環境は整っている。しかしながら、工作物がゴムなどの柔軟な材料や把持困難な形状の場合には、所望の加工を行うことが格段に難しくなる。

そこで本研究では、酢酸ナトリウム水溶液の過冷却状態からの急速な凝固現象を利用し、柔軟工作物を適切に把持・保持して切削加工時の剛性を確保することによって、目標形状通りの高精度加工を達成することを目的とする。

3. 研究の方法

過冷却状態の酢酸ナトリウム水溶液は、何らかの刺激を受けると、熱を放出しながら急速に結晶化する。通称 Hot-Ice と呼ばれるこの現象は水中でも使用できるカイロにも応用されており、酢酸ナトリウム水溶液と金属片をビニール容器内に封入し、金属片を曲げるなどして刺激を与えるだけで凝固熱が得られ、酸素が無くても 45°C 程度で 30 分程度持続する。凝固した水溶液は熱湯 (58°C 以上) で液体に戻り、室温まで過冷却させると何度でも再利用することができる。また、安価で人体に対して無害である。

そこで、上記の Hot-Ice 現象を利用した柔軟工作物の把持を実現した。酢酸ナトリウム水溶液は、過冷却状態では液体であるため、図 1 に示すように水平な工作機械テーブル上に容器を置いて、その中に水溶液と工作物を入れる。工作物の周りを水溶液で満たしておくことで、複雑形状であったとしても、水溶液が凝固すれば均一な把持力が得られ、局所的な把持による変形を回避できる。回転する工具を水溶液に浸して凝固のきっかけとなる刺激を与え、また再び液体に戻すために容器の周囲にヒーターを用意すれば、工作物の把持や解放の自動化にも対応できる。

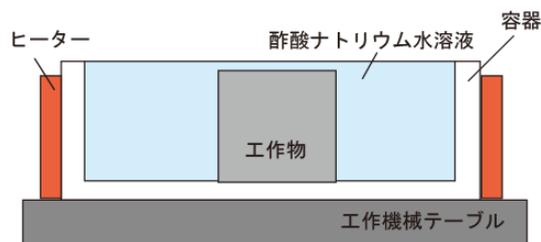


図 1 酢酸ナトリウム水溶液による工作物把持



図 2 柔軟・難把持工作物への複雑形状創成

提案する手法では、実加工中に酢酸ナトリウム水溶液で実現した把持具も共に削り取っていく。このとき、把持具の一部が失われることで工作物のみかけ上の剛性が変化し、加工精度に影響を与える。そこで、特に複雑な難把持形状を加工する場合には、酢酸ナトリウム水溶液の凝固と融解を繰り返すことで、図 2 のように必要に応じた工作物把持を実現し、十分な加工精度を確保する。

まず、柔軟工作物の代表例として、様々な分野で幅広く使われ、引っ張り強度、引き裂き強度、耐摩耗性が他のゴムより格段に優れ

ているウレタンゴムを工作物材料とし、酢酸ナトリウム水溶液で十分な把持力が得られるか調査するため、スクエアエンドミルによるウレタンゴムの溝加工において発生する切削力を測定した。軸方向の切込みを 3 mm とし、2 枚刃の超硬エンドミルで 1 刃あたりの送りを変えて水晶圧電式動力計で切削力を測定した。

次に、工作物の把持力として、ウレタンゴムと酢酸ナトリウムの接着力を測定した。試験方法は JIS K-6256 に定義されている硬い物質との接着、ASTM D 413-98 に定義されている柔らかい物質との接着を参考に、水溶液をウレタンゴムに接着させた状態で凝固させ、ウレタンゴムに界面と平行な力を徐々に加え、剥離したときの力を測定した。さらに、これを接触面積で除した値を接着力の目安とした。

以上の結果から、同様の切削条件を用いれば、工具 1 刃あたりの送り 0.025 mm/tooth (例えば、主軸回転数 6000 min⁻¹, 送り速度 300 mm/min) において、平均切削力は 30 N にも満たないと考えられる。したがって、少なくとも 1000 mm² の接触面積があれば、酢酸ナトリウムにより十分に把持が可能であることが分かった。

4. 研究成果

(1) 難把持形状の創成

5 軸制御卓上切削加工機 (ユニテックシステム製「巧み君」) を用いて、ショア硬度 90 HS と 50 HS のウレタンゴムの複雑形状加工を行い、酢酸ナトリウム水溶液を用いた把持方法の効果を確認した。目標形状としては、把持が困難で薄肉、オーバーハング部を有するイチョウの葉をモチーフとした。図 3 に 3D スキャナで取り込んだ実形状から作成した CAD モデルを示す。厚さは 1 mm であり、凸側を A 面、凹側を B 面とする。

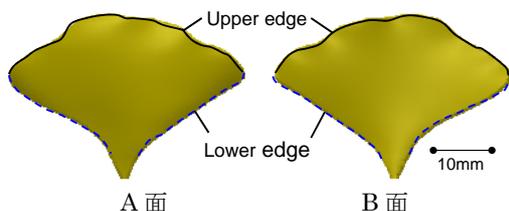


図 3 目標としたイチョウの葉の CAD モデル

加工実験では、葉の上部エッジを加工する上部加工、A 面の加工、B 面の加工、上部からは加工困難な下部エッジを加工する下部加工の 4 工程に分けて、順次加工を進めた。工程ごとに酢酸ナトリウム水溶液で容器を満たし直し、再度把持することで工作物のみかけ上の剛性を確保した。各工程では荒、中仕上げ、仕上げの順に加工を進め、荒加工ではスクエアエンドミルを用いた。また、中仕上げ、仕上げ加工ではボールエンドミルの姿勢を変えて干渉を避けながらオーバーハング部を加工した。

図 4 に例として示した加工結果を、3D レーザスキャナ (Roland 製 PICZA LPX-1200 スキャンピッチ 0.1 mm) で取り込み、目標形状の CAD モデルと比較した結果を図 5 に示す。図 5 (b) と (d) に示した把持なしの場合に比べて、同 (a) と (c) の提案する把持手法では目標形状に近い形状が得られており、高精度に加工できていることが分かる。また、把持なしの場合ではイチョウの葉周辺にも除去すべき箇所が残っているのに対し、提案する把持手法では削り残すことなく加工できている。さらに、把持なしの場合において先に加工した A 面に比べ、後に加工した B 面に削り残しが多いことから、工作物の剛性が加工精度に大きな影響を与えていることは明らかである。以上から、提案手法により柔軟工作物のみかけ上の剛性を保ちながら加工することで、切削加工の高精度化が達成できることが分かった。

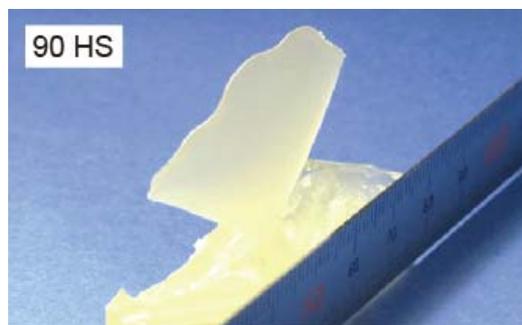


図 4 ウレタンゴム(90HS)のイチョウの葉

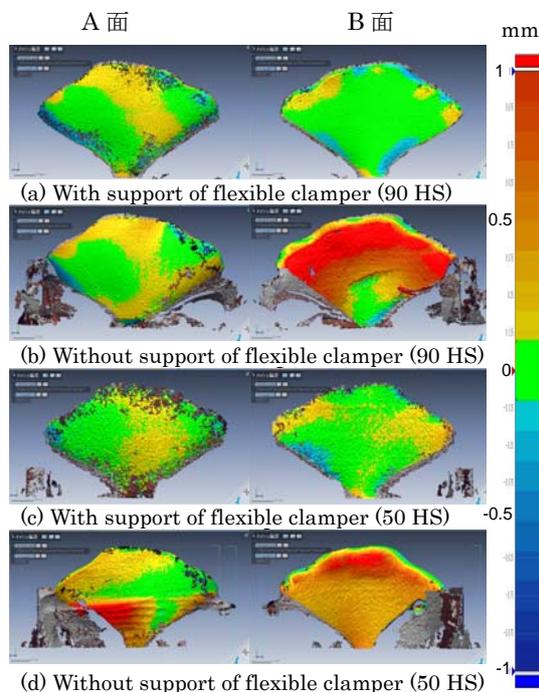


図 5 加工結果と CAD モデルの比較

(2) 多孔質材料の保持

スポンジのように内部に無数の細孔をもつ多孔質材料は、衝撃吸収性、吸音性、吸水性などの優れた性質を有することから幅広く利用されている。しかし、提案する酢酸ナ

トリウム水溶液を用いた工作物把持手法は、工作物を外部から把持するために、内部に大小様々な孔が無数に存在する多孔質材には不向きである。そこで、これを応用して多孔質かつ柔軟な工作物の内部から保持することによって、複雑形状の創成手法も提案した。

この手法では、酢酸ナトリウム水溶液が多孔質・柔軟工作物の内部へ浸潤することを利用して工作物の保持と剛性の確保を実現する。先に提案した把持手法と同様に水平な工作機械テーブル上に容器を置き、その中に水溶液と工作物を入れる。ここで、図6のように多孔質・柔軟工作物を圧縮し、内部に気泡が残らないように酢酸ナトリウム水溶液を吸収させる。その後、常温で酢酸ナトリウム水溶液に刺激を与え、容器内の水溶液と共に工作物を固化させる。

多孔質・柔軟工作物への複雑形状創成の実現可能性を検討するために複雑形状の加工実験を実施した。5軸制御立型マシニングセンタ(DMG森精機製作所:NMV-3000DCG)を用い、多孔質・柔軟工作物としてポリエステル系ウレタンフォームを対象とした。目標形状には、全面の加工を要することから把持の難しい葉形状、オーバーハングして複雑にねじれた自由曲面を有するインペラ形状の2種類を用意した。

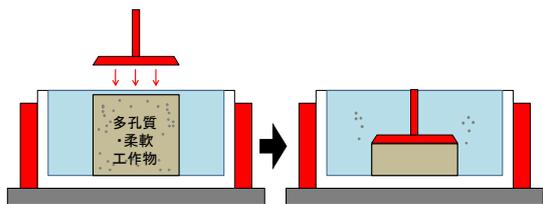


図6 多孔質柔軟工作物の内部へ浸潤

まず、全面が加工面となっている葉形状の加工を試みた。ウレタンフォームの素材形状は直方体であり、長さ150mmの葉形状は全面が加工面のため、把持するために残しておく部分が存在しない。そこで工作物を容器内で反転させて両面からの加工を行った。加工の手順としては、ウレタンフォームを保持しながら加工できるように、まず葉形状の凸面側を加工した。次に、工作物を容器から取出して凸面側が下になるように反転させ、酢酸ナトリウム水溶液を凝固させて再度保持した。最後に、残りの凹面側の荒加工と仕上げ加工を行った。反転後の位置決めにはジグを用い、工作物が反転前と同じ位置になるように配慮した。図7は加工後の葉形状であるが、これも良好な加工形状が得られている。

さらに、直径100mm、高さ50mmで羽の厚さが1mmの複雑なインペラ形状を同時5軸制御で加工した。まず直方体のウレタンフォームを円柱状へ、続いて円錐状へと外形加工を行った。その後、シュラウド面やハブ面の加工を行った。図8が加工後のインペラ形状であるが、このように複雑なインペラ形状も高精度に加工できることが確認できた。



図7 葉形状に加工したウレタンフォーム



図8 インペラ形状に加工したウレタンフォーム

ゴムやスポンジ等の柔軟工作物は、有機高分子を主成分とする弾性材料であり、一般的に工作機械で加工される金属類とは異なる多くの性質を有する。加工時の変形だけでなく把持に起因する変形も発生するため、高精度な切削加工を実現することは難しい。そこで本研究では、酢酸ナトリウム水溶液の過冷却状態からの急速な凝固現象に着目し、これを柔軟工作物の把持・保持、みかけ上の剛性確保に利用することで、特別な設備を用いることなく簡便かつ低コストで、切削加工による複雑形状の創成が可能になることを確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

- ① K. Nakamoto, T. Iizuka, Y. Takeuchi, Dexterous Machining of Soft Objects by Means of Flexible Clamper, *Int. Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol. 9, No. 1, 2015, pp.83-88.
- ② 中本圭一, 若松弘起, 竹内芳美, 多孔質・柔軟工作物の巧妙加工, *日本機械学会論文集*, 査読有, 81巻, 825号, 2015, 14-00680. DOI: 10.1299/transjsme.14-00680

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 90379339

(2) 研究分担者

笹原 弘之 (SASAHARA, Hiroyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00205882