

柔軟物・難把持物の加工支援システムの開発

東京農工大学 ○安藤 潤人, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

ゴムやスポンジ等の有機高分子を主成分とする弾性材料は、一般的に工作機械で加工される金属類とは異なる性質を多く持つ。このため、加工時の変形だけでなく固定に起因する変形も発生し、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、過冷却状態の酢酸ナトリウム水溶液が刺激により急速に凝固する現象を利用した、簡便な柔軟・難把持物工作物把持手法のための加工支援システムを開発した。

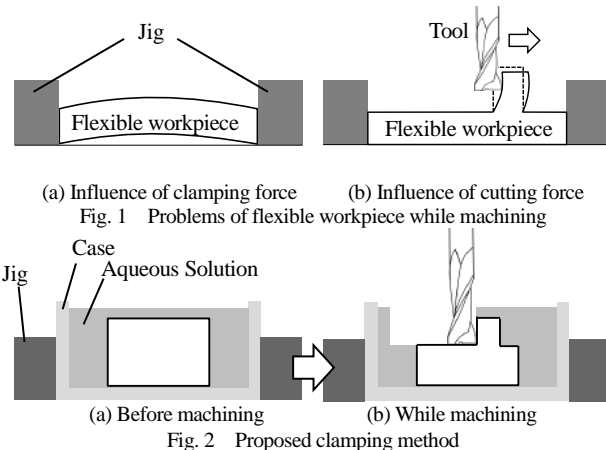
1. 緒 論

ゴムなどの柔軟物は日用品から工業製品まで幅広く利用されている。これらは一般に射出成形や押し成形で加工されているが多品種少量生産には不向きである。一方、切削加工は様々な材質の工作物を扱えるだけでなく、加工形状の自由度が高く、多品種少量生産に適している。しかし、柔軟・難把持工作物は、**図1**に示すように把持力の影響や切削力の影響を受けやすく高精度に加工することが難しい。このため、柔軟・難把持工作物の簡便で高精度な加工技術の実現が期待されている。先行研究では、酢酸ナトリウム水溶液による工作物把持手法が提案され¹⁾、この手法を用いた柔軟・難把持工作物の高精度加工の可能性が示されている。しかし、加工工程や加工順序についての検討が不十分であったため、本研究では提案された把持手法を利用した柔軟物・難把持物の加工支援システムの開発を目的とする。

2. 把持方法

酢酸ナトリウム水溶液は過飽和状態で振動などの刺激を加えると急速に凝固する性質を持つ。この性質を利用して柔軟・難把持工作物を把持すれば、切削加工中の工作物のみかけ上の剛性を確保することが可能になり、柔軟・難把持工作物の高精度な切削加工の達成が期待できる。なお、凝固した酢酸ナトリウム水溶液は熱湯で液体に戻り、室温に冷却することで何度でも再利用することができ安価で人体にも無害である。

図2に酢酸ナトリウム水溶液を用いた把持手法を示す。まず、水平な工作機械テーブル上の容器に工作物を入れ、その周囲に酢酸ナトリウム水溶液を注入する。その後、酢酸ナトリウム水溶液に刺激を与え、凝固させて工作物を把持し、加工中は酢酸ナトリウムも共に削り取る。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。また、酢酸ナトリウム水溶液の凝固と融解を繰り返すことで、必要に応じた把持を実現でき柔軟工作物のみかけ上の剛性も確保できる。



3. 把持力の調査

本研究では様々な分野で幅広く使用され、引っ張り強度、引き裂き強度、耐摩耗性が他のゴムと比べて格段に優れているウレタンゴムを柔軟・難把持工作物の代表例として使用した。

先行研究で酢酸ナトリウム水溶液の濃度が高いほど把持力が大きいことが確認されている。そこで、酢酸ナトリウム水溶液の把持力の時間変化を調査した。このとき、ウレタンゴムが酢酸ナトリウムから剥離する力を接触面積で割った値を把持力の指標とし、実験に用いた水溶液は一定の濃度となるように精製した。

酢酸ナトリウム水溶液の液面にウレタンゴムが接着した状態で水溶液を凝固させ、剥離したときの垂直方向の力を測定した。また、時間変化の基準として容器に入った酢酸ナトリウム水溶液に刺激を与えた瞬間を0分とした。**図3**に示した測定結果から分かるように時間が経つにつれて把持力が増加し、5分後から急激に大きくなり、15分後には安定し始めることが分かる。

4. 加工支援システム

本研究で利用する把持手法では、加工対象である柔軟物が容器に入っているため、容器との干渉を考慮しなければならない。そこで本研究では容器との干渉を回避するとともに、複雑形状に対応した工具経路を生成する加工支援システムを開発し、**図4**に示すばね形状を目標形状として、その有効性を検証した。

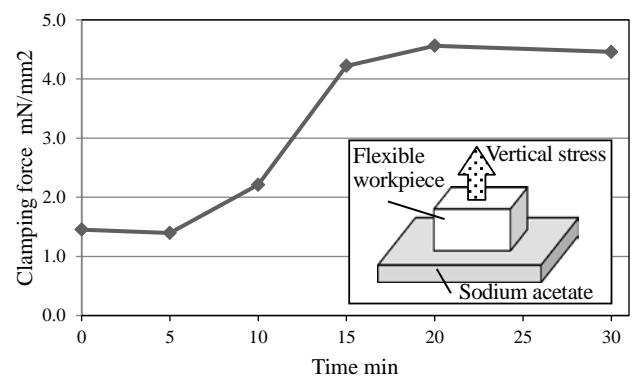


Fig. 3 Clamping force varying with time

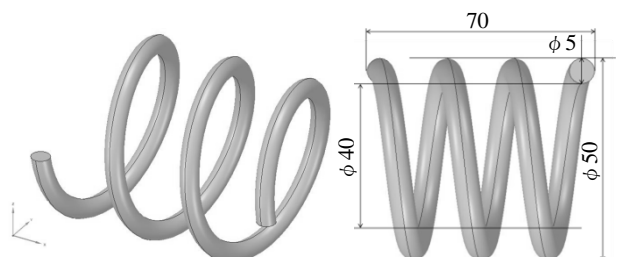


Fig. 4 Target shape

図4のような極めて複雑な形状を加工する場合、本研究で用いる把持手法では、図5に示すように途中で1度把持し直す必要がある。しかし、加工途中の工作物形状は一般に把持が困難な形状になっている。このような難把持形状でも提案する把持手法が有効に活用できるか確認した。

図6に示すように、一度の把持で加工可能な部分は大きく分けて2種類に分類できる。同図(a)を外部、同図(b)を内部と呼ぶ。 T_{oi} を任意点の工具軸ベクトルの初期値、 N_i を任意点の単位法線ベクトル、 V_i を任意点の周方向の単位接ベクトルとする。目標形状の仕上げ加工にはボールエンドミルを使用するため、工具制御点は目標形状から一定距離オフセットした位置に作成した。

容器の形状は機械座標の+Z方向以外を囲んだ直方体を想定しており、この容器を使用する場合、式(1)の工具姿勢では+Z軸方向に姿勢を取るため容器と干渉することはない。

$$T_{oi} = (0 \ 0 \ 1)^T \quad (1)$$

しかし、この姿勢では目標形状と干渉する恐れがある。そのため、目標形状と干渉する場合には、この姿勢を変え工具姿勢を以下のように決定する。

外部の加工では工具姿勢は初期値のままでも目標形状と干渉する可能性が低い、外部の端では目標形状と干渉する恐れがある。そこで、係数 α を掛けた法線ベクトル N を足し合わせて次式から新たな工具軸ベクトル T'_i を算出して干渉を回避した。

$$T'_i = T_{oi} + \alpha N_i \quad (2)$$

この T'_i でも干渉する場合には再び αN_i を足し合わせ、干渉しなくなるまで繰り返す。

内部の加工では法線方向に姿勢を変えるだけでは干渉回避できず、単位接ベクトル V_i を利用して周方向に姿勢を変更する。内部の干渉回避はまず初めに外部と同様に N を使って姿勢を変更する。繰り返した数と係数 α を掛け合わせることで初期姿勢から傾斜量が分かる。この傾斜量には限界値を定め、これを超える場合には V_i を使った姿勢変更の処理へと進むようにした。この姿勢変更でも係数を β とし式(2)と同様に次式で工具軸ベクトル T''_i を求める。

$$T''_i = T'_i \pm \beta V_i \quad (3)$$

工具の進入が可能な領域を図7のように作成して、係数 β の符号を決定した。工具軸ベクトルの終点をこの工具進入可能面が位置する平面内に作成し、その点を含む面または近い面の中心に移動するように β の符号を決定した。これも外部の干渉回避と同様に目標形状と干渉しなくなるまで繰り返す。

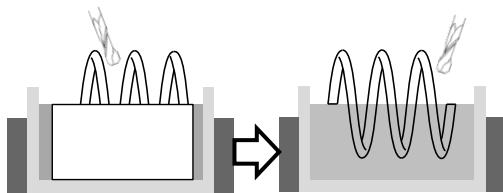


Fig. 5 Machining process by means of proposed clamping

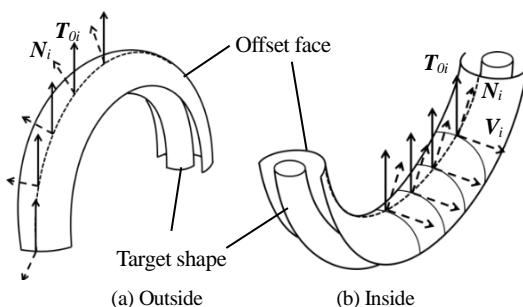


Fig. 6 Vectors for machining of complicated shape

以上では、オフセット面上における各工具制御点での干渉を回避する工具姿勢について述べた。しかし、工具制御点間で目標形状と干渉する恐れはある。そこで工具進入可能面上に退避点を作成し、工具制御点間中の干渉を回避した。具体的には工具軸ベクトルの終点を工具進入可能面上に作成し、どの面上に存在するかを判断する。1つ前の工具軸ベクトルの終点が存在する面と異なれば、この2つの終点を退避点として工具を一度そこまで退避させ、目標形状との干渉を回避する。

5. 加工実験

開発した加工支援システムを使って図4の形状を柔軟工作物であるウレタンゴムから削り出した。加工条件を表1にまとめる。加工結果を図8に示す。容器や目標形状と干渉せずに目標形状と同様の形状を加工することができた。さらに加工途中で把持が困難な形状となった後も酢酸ナトリウム水溶液により把持することで加工を継続できることを確認した。

6. 結論

本研究では酢酸ナトリウム水溶液が凝固開始後の把持力の変化を調査、提案された把持手法を用いた柔軟物・難把持物の加工支援システムを開発した。これらの結果、以下の結論が得られた。

- (1) 酢酸ナトリウム水溶液は凝固し始めてから5分後に把持力は増加し、15分後に安定する。
- (2) 複雑形状の加工を行い、開発した加工支援システムの有用性を確認した。
- (3) 提案された把持手法を用いることで把持が困難な形状でも加工が継続できることを確認した。

参考文献

- 1) 中本圭一, 植地良太, 竹内芳美, 把持の難しい柔軟工作物の巧妙加工, 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.808 (2013), pp.10-17.

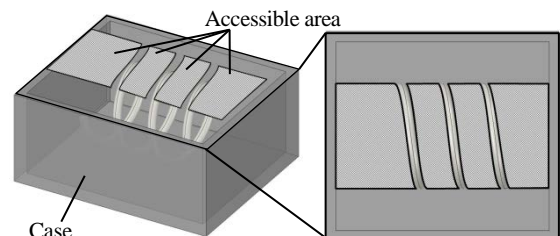


Fig. 7 Generation of approach possible area

Table 1 Cutting condition

Workpiece size	mm	80×80×155
Capacity of case	mm	107×87×49
Number of flute		2
Tool diameter	mm	6
Feed rate	mm/min	Rough: 200, Finish: 75
Spindle speed	min ⁻¹	6,000

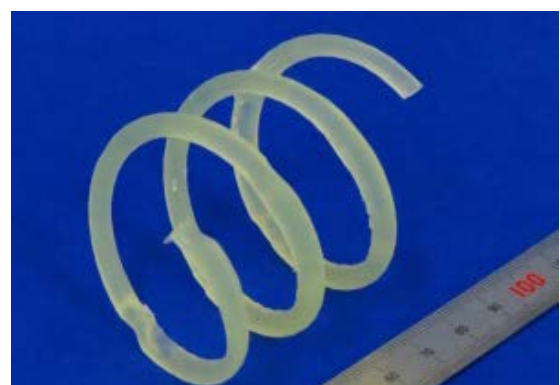


Fig. 8 Machined result