

任意形状内部への加工可能性を保証した部材配置に関する研究 Processable Packing of Multiple Parts into Single Irregular Object

○常國 晋吾^{*1}, 古庄 玄樹^{*2}, 平沢 岳人^{*3}
Shingo TSUNEKUNI^{*1}, Genki FURUSHO^{*2} and Gakuhito HIRASAWA^{*3}

- *1 千葉大学大学院融合理工学府創成工学専攻 博士前期課程
Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba University
- *2 千葉大学大学院融合理工学府創成工学専攻 博士後期課程 修士(工学) 日本学術振興会 特別研究員 DC
Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba University M.Eng., JSPS Research Fellow
- *3 千葉大学大学院工学研究院 教授 博士(工学)
Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University Ph.D.

キーワード : 空間充填; 機械加工; 自動化加工; 最適化; 建築構法

Keywords : Space Filling; Machining; Automatization; Optimization; Architectural Construction;

1. はじめに

コンピュータ上で設計された製品や部材を製造する方法の一つに、CNCを用いた切削加工がある。切削加工とは、製造したい製品や部材(加工部材)を、より大きな材料(ワーク)から、ミルや丸鋸といった切削工具を用いて切り出す手法である。切削加工は製造可能な形態の幅が広く、多くの部材種から構成される複雑な建築を建設する際に、部材の製造方法として非常に有力な選択肢になり得る。しかし、切削加工は時間的・経済的コストを必要とするため、実際の建設で切削加工で製造された部材が用いられることは少ない。

切削加工は主に以下のワークフローで行われる。

1. CNCを動作させるNCコードの生成
 2. CNC把持機構へのワークの取り付け
 3. NCコードを実行し切削加工を開始
 4. 加工終了後、成形された加工部材と残されたワークの撤去
- 一般に切削加工は、一つのワークから一つの加工部材

を生産するため、各加工部材に対して上記のワークフローを行う必要がある。また、加工時間を短縮するためには、ワークを加工部材を含有可能な最小限の大きさに成形することが有効な手段として挙げられるが、このワークの成形時に加工工程が生じ、部材によってはむしろ全体の作業時間としては増大してしまう場合もある。このように切削加工を行う前段階において、部材生産の効率性が低下していることを指摘する。

筆者らは、前述したような単一のワークから単一の部材を加工することによる時間的負担を改善すべく、任意の単一ワークから複数の加工部材を、丸鋸を用いた切削加工によって製造するシステムを考案した。本報では、主に当該システムにおける任意形状内部への加工可能性が保証された部材の配置方法について報告する。

2. 研究概要

単一ワークから複数の部材を加工するシステムのワークフローを図1に示す。システムのワークフローは以下

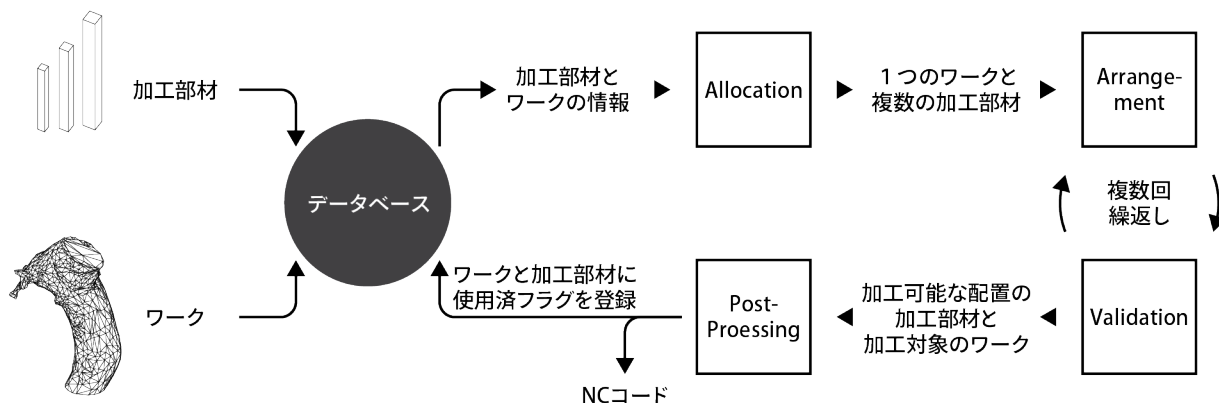


図1 単一ワークから複数加工部材を切削するシステムのワークフロー

の処理に大別出来る。

- **Allocation** - データベースに登録されたワークから、加工したい加工部材より大きいワークを一つ選択し、複数の加工部材と単一のワークから成る組み合わせを構成する。
- **Arrangement** - 加工部材を、他の加工部材、もしくはワークとの接触^{注1)}が起こらないような位置に配置する。
- **Validation** - 配置された加工部材が加工可能な位置、姿勢であるかを判断する。
- **Post-Processing** - 加工可能性が担保された加工部材から NC コードを生成し、かつ最適な部材の加工順序を計算する。

これらの処理により、任意形状のワーク内部に複数加工部材の加工可能な配置を行い、NC コードを生成する。

本稿では、任意形状のワークを表現するメッシュに対して、複数の直方体形状の加工部材を配置し、かつその加工部材が加工可能な位置に配置されているかを確認する手法について研究を行う。なお、加工を行う CNC には 2つの回転軸をもつ 5 軸 CNC を使用し、切削器具には丸鋸を用いる。

3. Arrangement - 部材配置アルゴリズム

充填問題に関する類似研究として、Ma ら¹⁾は、任意形状のメッシュ内部へ任意形状のオブジェクトを可能な限り多く充填するアルゴリズムについて報告している。しかし、当該アルゴリズムは多くの処理時間を必要とすることについても報告されており、比較的大きなワークに大量の部材を充填したい場合、このアルゴリズムをそのまま適用することは望ましくない。また、加工可能性については考慮されていないため、加工が不可能である

Algorithm 1 : Inflating

Inputs : P_{igt} , 未復元加工部材メッシュ
 $P: \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 復元済加工部材メッシュ
 B , ワークメッシュ
 $r: \{r_1, r_2, \dots, r_k \mid r_{i+1} - r_i = s\}$, 拡大倍率
 k , ループ回数限度

for r_i **in** r :

while 試行回数が k に達するまで:

P_{igt} を r_i に拡大

if P_{igt} が P もしくは B と衝突していない:

r_{i+1} のループへ

or P_{igt} が P もしくは B と衝突している:

P_{igt} の衝突が解消されるまで姿勢最適化を実行

if 拡大成功:

return 復元された P_{igt}

else:

return 拡大失敗フラグ

図2 Inflating アルゴリズム

ような姿勢や位置で充填されることも考えられる。よって、本稿では Ma らのアルゴリズムを参照しつつ、直方体の部材を充填するという点と、加工可能性が必要であるという点に注目した配置アルゴリズムを考案した。

3.1. Initial Placement

3.2. で後述する部材の姿勢と位置を最適化を行うため、縮小した加工部材をワーク内部へと配置する。縮小率 r は複数の試行にて良好な結果が取得できた 0.4 とした。

各加工部材の位置は、各加工部材の中心点とワークの Medial Axis^{注2)} を部材数で等分した点が一致する座標とし、姿勢は Medial Axis の接線方向と加工部材の長手方向が一致するようにした。

これ以降の一連の操作は、各加工部材に対して一つずつ順番に行う。

3.2. Inflating

図2に疑似コードを示す。3.1. で配置された加工部材 P_{igt} の r が 1 となるまで、すなわち元の寸法に復元されるまで一定の間隔 s で拡大していく。既に復元されワーク内に配置されている他部材、もしくはワークとの接触が検知された場合、 P_{igt} に対して姿勢最適化を行う。

姿勢最適化は、 P_{igt} における衝突が発生している領域を、図3のように中心点 c から射出されるレイによって取得し、その情報から次式によって移動方向 V_{rest} 、移動量 d_{rest} 、回転ベクトル V_{rot} を得る。回転ベクトルのノルムについては、任意の回転量 r_r とする。これらから座標変換行列を計算し、 P_{igt} に適用する。

$$V_{rest} = V / \|V\|$$

$$d_{rest} = \min(\|col V_i - inner V_i\|)$$

$$V_{rot} = V_{rest} \times a_{nst} \cdot r_r$$

$$V = \sum (col V_i - inner V_i)$$

$$a_{nst} = \arg \min_{a_i} [\min(a_i \cdot V)]$$

$$a_i : \{a_x, a_y, a_z, -a_x, -a_y, -a_z \mid \text{Local Coordinates}\}$$

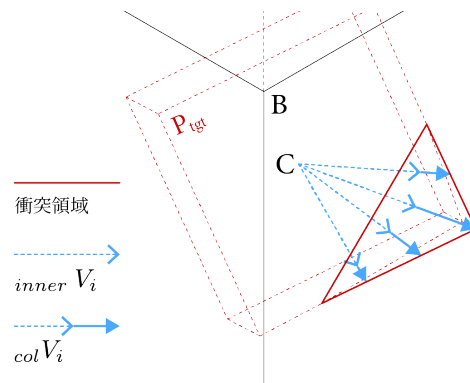


図3 衝突領域の感知

3.3. Sweeping

元の大きさに復元された加工部材を可能な限りワークの端へ近づける操作を行う。加工部材の面上に生成したグリッドを始点とするレイを、面の法線と同じ方向に射出し、既に配置されてる他の部材、もしくはワークと接触するまでの距離を取得する。この取得した距離のうち最小の値を移動量として、面の法線の方向に移動させることにより、衝突する寸前の位置まで部材を移動させることが可能となる。この処理を複数の方向に複数回繰り返し、復元した部材の位置の調整を行う。

4. Validation - 加工可否判定アルゴリズム

CNC による加工では、特定の配置状況において加工が不可能となる。前項で述べたアルゴリズムはこれについて考慮していないため、配置された加工部材の加工可能性は保証されていない。この項では、配置された加工部材の加工可否を判定する方法について述べる。

4.1. 加工不能となる状況と判定方法

- 丸鋸の有効半径による切れ込み深さの制限
丸鋸を用いて加工を行う場合、一度の加工で加工できる深さは丸鋸半径からアーバ半径を減じた値となる。この値が加工の進入距離より小さい場合、加工不可能となる。なお、モータなど加工機本体が接触する場合も考えられるため、適宜アーバ半径を調節する。
- 未加工部材が充填されている領域の損壊
単一のワークに配置された複数の加工部材を連続的に加工するため、ある加工部材を加工している最中に、丸鋸が他の加工部材が配置されている領域へ進入し、以降に加工する加工部材を損壊する可能性がある。
この現象を捕捉するために、加工部材 P_i のある面を加工する際に丸鋸が通過する軌跡をジオメトリ ${}_{pi}T_{face}$ として生成し、未加工部材との衝突判定を行う。丸鋸を面のエッジに沿って進入させると仮定した場合、面を丸鋸で切断する加工は4通り存在する。この4通りについて未加工部材との衝突判定を行い、全て接触している場合はその面は加工不可能であり、すなわちその面を含む加工部材も加工不可能である。この処理を全ての面に対して行い、未加工部材の領域を損傷しないかを確認する。
なお、未加工部材の領域を損傷しないとしても、その領域を切除し脱落させてしまう場合がある。これに対して、加工部材の加工順序をより高く外側に位置する加工部材から加工することによって対処した。

4.2. 加工部材の加工可否判定

4.1. で述べた判定方法をもとに、図4に疑似コードとして示す加工部材の加工可否判断を行う。各加工部材はそれぞれ $6面 * 4通り = 24通り$ の ${}_{pi}T_{face}^j$ と、その加工可

Algorithm2 : Validation

Inputs : ${}_{pi}T_{face}^j: \{ {}_{pi}T_{face,pi}^1, {}_{pi}T_{face,pi}^2, {}_{pi}T_{face,pi}^3, {}_{pi}T_{face,pi}^4 \}$, P_i の face を加工する丸鋸の軌跡の集合
 $P: \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 加工部材メッシュ
face: {top, bottom, right, left, back, front}, 加工面
Outputs : $P_{new}: \{P_1, P_2, \dots, P_i \mid \text{加工可}\}$, 加工可能加工部材メッシュ

```

for  $P_i$  in  $P$ :
     ${}_{pi}L = \text{サイズ}(6; \text{face}, 4; \text{edge}, n; \text{collision})$  の配列
    for  ${}_{pi}T_{face}$  in  $P_i$  の面ごと(6面):
        for  ${}_{pi}T_{face}^j$  in  ${}_{pi}T_{face}$  (4つのエッジに沿った軌跡)
            if  ${}_{pi}T_{face}^j$  と  $P_c$  が衝突:
                 ${}_{pc}L$  の対応する要素に衝突した  $P_c$  を追加
     $L = [{}_{p1}L, {}_{p2}L, \dots, {}_{pi}L]$ 
    while 全ての  $P$  に加工判定が与えられるまで
        for  ${}_{pi}L$  in  $L$ : - ①
            if 全ての面で、少なくとも一つは加工可能な  ${}_{pe}T_{face}^j$  が存在する
                すなわち、 ${}_{pe}L$  の1次元の全てで、2次元のいずれかが空の場合:
                     $P_e$  に加工可判定、 $L$  から  $P_e$  を全て削除
            if ①で全ての  $P_i$  に加工可判定が与えられなかった場合:
                 $L$  において最頻値となる  $P_m$  を削除し  $P_m$  に加工不可判定
    return  $P_{new}$ 

```

図4 加工可否判断アルゴリズム

否を判断するリスト ${}_{pi}L$ を保持している。まずそれぞれの ${}_{pi}T_{face}^j$ が加工可能であるかを判断し、もし不可能である場合は、接触している P_c を ${}_{pc}L$ に記録する。次に加工可能となる P_e を判別し、 L に存在する P_e を全て削除する。全ての加工部材が加工不可となる場合は、 ${}_{pi}L$ の集合 L で最頻値となる P_m を加工不可と判断し、 L から P_m を全て削除する。この一連の操作を全ての加工部材について加工可否が判断されるまで行う。

5. ワーク形状の更新

加工を進めるにつれて、ワークは切断され形状が変化する。この形状変化をアルゴリズムに反映することにより、丸鋸の有効半径による切れ込み深さの制限を緩和することが可能となる。ワーク形状の正確なシミュレーションのためには、丸鋸により切削され欠損する領域と、連続した切削により切り離され固定が継続できない領域を判別する必要がある。本研究ではワーク形状変化のシミュレーションをワークメッシュをボクセル化し、次のような処理を行うことにより実現した。

ある加工部材 P_i の ${}_{pi}T_{face}$ の内部に位置するボクセルを削除する。次に Marching Cubes*2 によりボクセルをメッシュ M へと変換し、 M が一つの水密なメッシュかを確認する。もし M が二つ以上の水密なメッシュからなる場合は、丸鋸によりワークが切断されていると判断できる。この場合は、土台に接続されているメッシュ以外を削除し、ワークを更新する。

6. 加工実験

以上に述べたアルゴリズムの実証実験として、150*150*250[mm]のポリスチレンブロックをワークとして設定し、加工部材の配置と加工可否判断を行い加工を行なった。なお、ある面の加工終了後の位置から、次の面の加工開始位置までの迂回移動は手動で行なった。

図5はワークに配置された加工部材、図6は実際に切り出された加工部材である。加工部材は設計寸法とほぼ等しく、ワークとマシンの衝突も確認されなかった。

7. 考察

図7はシミュレーションで予想された加工後のワークと、実際の加工後のワークをフォトグラメトリによってメッシュ化したものを重畳表示したものである。両者が概ね一致している箇所がある一方で、シミュレーションで全く再現できていない部分があることがわかる。これはメッシュの切断判定において、土台との接続箇所をワーク底面の中央点のみとしたためである。実際のワークは底面全てを接着剤により土台と接続しており、シミュレーションの途中で切断されたと思われた箇所が脱落せず大きく残されたと考えられる。

8. 結論

任意形状のワーク内部へ複数の加工部材を加工可能な状態で配置するアルゴリズムを考案し、実際に加工可能であることが実証実験の結果から明らかとなった。今回の実証実験では7部材を1つのワークから成形し、ワークの設置・脱着の作業を従来の7分の1に簡略化することが出来た。

改善すべき点として、切断シミュレーションの改善と迂回パスの自動化が挙げられる。切断シミュレーションはワーク底面にグリッド上の点を生成し、メッシュがいずれかの点を含んでいるかという処理とすることで改

善が可能である。迂回パスについては、当研究室で開発に取り組んでいる強化学習による迂回パスの自動生成³⁾を用いて自動化を行う予定である。また、本報では直方体部材のみを対象としているが、より自由な形状の自動加工を実現するため、凸包部材へのアルゴリズムについての研究を引き続き行っていく。

[注釈]

- 注1) ワーク内部へ加工部材を配置するため、厳密にはワークと加工部材は常に接触している。本文においては、簡単のためワークのメッシュフェイスと加工部材のメッシュフェイスが交差している状況を衝突していると表現する。
注2) メッシュ形状を曲線で表現したもの。本稿ではメッシュの断面形状を一定間隔で取得し、断面の中心点を制御点として生成した曲線を用いた。

[参考文献]

- 1) Ma, Y., Chen, Z., Hu, W., & Wang, W. 2018. Packing Irregular Objects in 3D Space via Hybrid Optimization. Computer Graphics Forum, 37.
- 2) William E. Lorensen and Harvey E. Cline. 1987. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '87). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 163-169.
- 3) 藤岡凌司、古庄玄樹、加戸啓太、平沢岳人、深層強化学習を用いた五軸加工機の迂回パス生成システムの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp11-12.2021

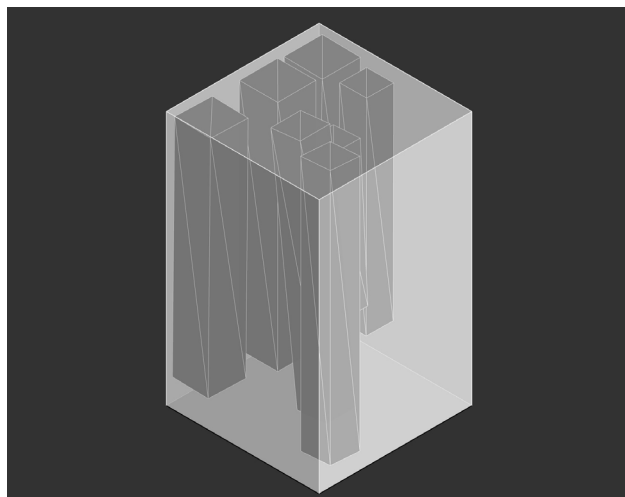


図5 ワーク内に配置された加工部材



図6 成形された加工部材

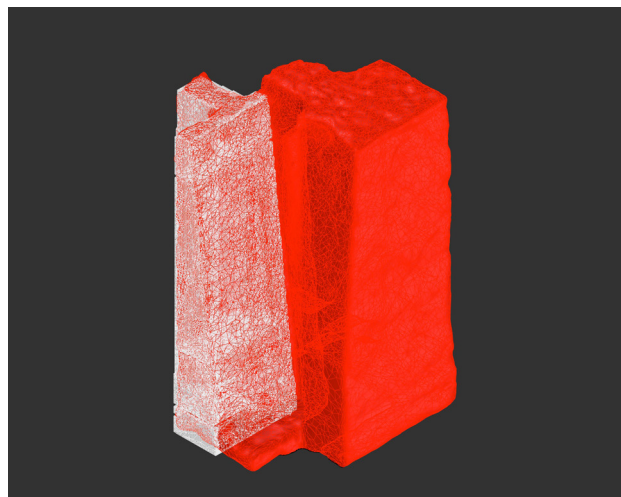


図7 加工後(赤)とシミュレーション後(白)のワーク