複雑なパターンの創成*

——加工の観点

水垣善夫**

Emergence of Complicated Patterns from the Viewpoint of Machining /
Yoshio MIZUGAKI

Key words: milling, geometric model, tool path, traveling salesman problem, multi-objective optimization, genetic algorithm, emergent computation

1. はじめに

家電製品を始めとして情報通信機器や自動車などの高機能化は一層進んでおり、それとともに製品内の各部品の形状がより複雑になっている。これは製品における部品点数の削減を図る上で、部品1個当たりの機能の複合化が図られ、各機能に対応した形状特徴を組み合わせて部品形状が設計されるようになったためと思われる。

部品形状が複雑になれば、その部品ないしはそれに対応した金型を加工するために複雑な工具経路を用いることになる。

また機能部品だけでなく意匠面を有する部品においてもその面形状は外観の滑らかさを重視して高次の微係数まで連続となるように設計されることが多い。そして意匠面を高精度に加工するために、荒加工から仕上げ加工まで幾通りもの工具経路を生成することとなる。

このように加工においても部品形状の複雑化・高精度化に対応して工具経路の複雑化が進んでおり、以下では工具経路を加工における複雑なパターンと考えて、工具経路および工具経路生成法について考える。

なお、複雑なパターンとしては、加工対象形状自体の複雑さや集積回路用マスクパターンなども考えられるが、ここでは主に機械加工における工具経路について考える。

2. 工具経路と工具経路生成法

2.1 加工法と工具経路

機械加工のなかで、切削・研削加工は最も一般的な加工方法¹⁾である。

古くから研究開発が続けられているにもかかわらず、いまだ切削・研削加工が難しいのは、

- (1) 加工現象自体にまだ未解明の領域が残っていること
- (2) 切削速度などの（名目的）加工条件が同一でも、工作機械ごとに剛性や制御系特性が異なるため、加工状態が同一とは限らないこと
- (3) 工具・ジグ・加工液の材質・形状・組成などにより加工雰囲気が大きく左右されること
- (4) 加工条件の選定、工具経路の生成によって、加工精度・加工効率が大きく左右されること

以上の点が挙げられる。

最近の工作機械の場合、高速切削や高圧クーラント加工など様々な加工法が可能となってきている。それでも切削時における工作機械の稼働状態は、完全に観測・制御されているわけではなく、また被削面の複雑形状によって工具経路や加工条件を場所ごとに変える必要があると考えられる。しかし現実的にはいくつかの固定パターン（たとえば走査線や等高線）の工具経路に対して加工条件を選定している状態である。

実際の切削工程では、荒加工から仕上げ加工まで何種類もの工具径の異なる工具を用い、各々の工具経路で送り速度や切込み深さなどの加工条件ができるだけ最適となるように設定している。すなわち生産コストの低減・加工時間の短縮・加工精度の向上などを目指して、使用工具、工具経路、加工条件の順で選定している場合が大半である。

* 原稿受付 平成8年6月10日

** 正会員 九州工業大学工学部（北九州市戸畑区仙水町1-1）

1984年東京大学大学院工学系精密機械工学専攻博士課程修了，工学博士。同年東洋大学工学部機械工学科講師，同助教授を経て，1987年九州工業大学工学部助教授，1995年設計生産工学科教授。生産の自動化・高精度化，ロボット工学，CAM/CAT等の研究に従事

場合によれば、荒加工から仕上加工まで1本の切削工具を用い、加工条件も一定として加工することもあるが、工具経路が加工条件と組み合わせられて評価・生成されている事例は少ないようである。

加工におけるパターンの点から考えれば、切削は単刃加工、研削は多刃加工の違いはあるが、ともに位置・姿勢を変えながら時間的に移動する経路により加工が行われている。広義には、総形工具を用いた旋削や研削、あるいは平削り盤のように切削主運動が工作物側の運動によってなされる場合も含まれる。放電加工においても、単純形状電極を用いた形状創成放電加工²⁾の場合には、電極の移動経路が切削・研削の工具経路と同様に加工精度や加工効率に大きく影響することになる。

このように加工条件の選定の難しさはあるものの、最終的には大半の工具経路は、位置・姿勢が連続的に変化する軌跡であり、一般に3次元空間内の6自由度運動の空間曲線として表現し得る。他方、多点の軌跡とみなすことができるのが、遊離砥粒加工における砥粒挙動や蒸着加工における加工層の成長過程などであろう。

2.2 工具経路生成法

切削では、荒加工、中仕上加工、仕上加工と工程を分割することが多い。

荒加工では、加工効率の向上の観点から加工領域をブロック分割し、除去領域内の最大内接凸包体を加工する方法が旋削³⁾・エンドミル加工⁴⁾ともに報告されている。

エンドミル加工の荒加工では、テーパ付き工具を用いた加工法^{5)~7)}がすでに報告されている。いずれも、エンドミル先端点においては回転速度がゼロとなり切削速度が送り速度と同一となる点に留意している。たとえば円すい荒取り法⁷⁾は、仮想の倒立円すい表面上をスパイラル状にたどっていく工具経路により荒加工を行う方法である。

スパイラル状の工具経路は、仕上加工にも適用されている⁸⁾(図1参照)。

スパイラル工具経路は比較的複雑な部類に入るが、一般には荒加工、仕上加工共通に用いられる基本的な工具経路として、走査線ピックフィードと等高線ピックフィードに基づく経路がある⁹⁾(図2参照)。これらはわかりやすい工具経路であり、工作機械送り駆動系の追従誤差をあまり心配しなくてもよい経路と考えられるが、すべての加工形状に適用できるわけではない。複雑な形状の加工には、やはり複雑な工具経路が必要となってくる。

加工形状自体が複雑で、同時5軸制御などの多軸工作機械によるエンドミル加工¹⁰⁾¹¹⁾が必要なものに、圧縮機のインペラ加工¹²⁾¹³⁾がある(図3参照)。インペラの曲面形状は流体力学上の解析に基づき設計されており、その面性状が稼働効率に大きく影響するため、加工法といえどもなかなか報告されないのが実状である。インペラの翼面やハブ面加工については、走査線や等高線のような工具経路が生

図1 スパイラル工具経路(トロフィーカップ)

(a) 走査線ピックフィード (b) 等高線ピックフィード

図2 ピックフィード⁹⁾

成されているようであるが、工具干渉回避との関係から工具経路生成の自由度は少ないようである。

加工の迅速化を求めて、高速切削や高速送りの研究開発が進められており、工作機械送り駆動系の追従特性と高速送りの観点から、工具経路としてはできるだけ滑らかで方向変化や上下動変化の少ないものが好まれる。しかし加工分野によれば高速送りよりも工具経路の均一化の方を優先させる場合もある。

金型研磨は自動化がなかなか進まない分野であるが、金型研磨ロボットシステムを開発し工具経路にベアノ曲線を用いた研究¹⁴⁾がある。その工具経路生成の基本的な考え方は、平面ベアノ曲線を金型表面に射影した空間経路を工具経路とするものである。図4は、曲面の定義域であるXY平面上でベアノ曲線を生成し、自由曲面に投影して工具経路を生成する様子を示している。図5は、紡錘形状にベアノ曲線に基づく工具経路を発生させた例である。

ベアノ曲線の特徴として、

- (1) 構成する線分の長さを短くすることにより幾らでも細かく平面を被覆することができる平面充てん曲線
- (2) 線分のX方向とY方向の成分比がほぼ1:1で

(a) 5軸制御加工：線切削（線→線）

(b) 3軸制御加工：点切削（点→点）

図3 インベラ加工¹³⁾

図4 ベアノ曲線のオフセット面への写像

ある
(3) 同一パターンの入れ子構造による画一的な生成が可能
などが挙げられる。またフラクタルとしての特徴も有しており、これについては文献¹⁵⁾や本特集中に高安氏による詳しい解説があるのでそちらを参照していただきたい。

ベアノ曲線は折れ曲がりの多い曲線であり、工作機械送り駆動系の追従特性を考えれば一般的には工具経路として好ましくない。しかし実際の金型研磨加工では送り速度が十分遅く（たとえば数十 mm/min）、追従特性の問題よりは工具経路の被覆の均一さの方が重要となっている。実際、走査線工具経路とベアノ曲線応用工具経路とで比較実

図5 ベアノ曲線応用研磨工具経路

験を行い、加工面粗さを測定したところ、滑らかでばらつきの小さい面は後者であった。その理由の一つとして、ベアノ曲線応用経路の方が工具経路のXY成分比のバランスが良いことが考えられる。

送り速度が遅い場合には、色々な工具経路が適用可能となる。金型研磨ロボットシステムでは、ベアノ曲線だけでなく、乱数を用いたランダムな折れ線経路やリサージュ曲線を用いた工具経路なども試みられている。いずれも走査線や等高線に比べて複雑なパターンではあるが、パターン生成規則が単純であり、加工対象形状のいかんにかかわらず画一的であるなど、真に複雑なパターンとはなっていない。

工具経路長や経路の角度変化あるいは工具の接触状態などを評価し、パターン生成規則に組み込むことが必要と思われる。工具干渉回避を考慮した経路生成についてはC-Spaceを用いた方法¹⁶⁾¹⁷⁾が提案されており、今後の発展が期待される。さらに一般的に、パターンの評価基準を最小あるいは最大にするようにパターン生成を繰り返し行い、最適パターンあるいは準最適パターンを目指す研究¹⁸⁾も報告されている。次節ではそのうちの一つ、工具経路長を評価基準とした研究を紹介する。

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた工具経路生成¹⁸⁾の一例

工具経路生成法は、どのような形状モデルを用いるかによりその手法が大きく異なる。以下の方法は、面上の点群データ（空間格子）により面形状を表す階層型格子空間モデル（拡張 Z-map モデル、図6参照）を用いている。点群データによる形状モデルを用いた工具経路生成では、工具が製品形状に接する場合の工具中心の移動面であるオフセット面を生成してから、そのオフセット面上で工具経路を生成することが多い。オフセット面生成法は幾つかの方法が開発されており詳細はそれらに譲るとして、オフセット面自体も格子空間モデルとなる。もし切削工具中心が同じ点を通らないとすれば、結局、工具経路生成はオフセット面上の空間格子を工具中心が通る一巡経路問題に帰

図6 拡張 Z-map モデル

着することとなる。ここでは多軸加工における工具姿勢決定問題は考慮されておらず、同時3軸制御加工による工具経路生成問題と限定している。

この問題は巡回セールスマン問題 (Travelling Salesman Problem: 始点と終点が同一で、必ず各点を一度だけ通る経路生成問題) と本質的に同等であり、TSP 自体については既に多くの解法が報告されている。以下の方法では遺伝的アルゴリズム¹⁹⁾²⁰⁾ (Genetic Algorithm, 以下 GA) を用いており、経路評価基準は空間経路長として最短工具経路の生成を行っている。厳密には工具経路では始点と終点が一致する必要がないため、完全な一巡経路とはなっていない。

経路のデータ表現は、空間格子点の番号を通過順に並べたパス表現を用いている。この通過点列を遺伝子的表現と考へて、選択淘汰、交差、突然変異の操作を施している。パス表現では始点と終点を区別しており、同じ一巡経路でも2つの経路として扱っている。この方法では、2つの(親の)経路から4つの(子の)経路を生成している。そして選択淘汰の段階で、生成された経路を経路長の短い順にソーティングして並べ、経路長のより短い半数の経路を原則的に次世代の親の集団として採用している。

この選択淘汰の段階では、始点と終点がそれぞれ同じで途中経路が異なる複数の経路は最も経路長の短い経路のみを残し、あとは経路長による序列にかかわらず順位を下げる操作を行っている。経路長の計算は、隣接する通過点2点間の直線距離を積算している。

交差の段階では、2点交差の部分写像交差法に類する方法が新たに提案されている。すなわち

- (1) 親 A のパスを(確率的に)2点で切断し、
- (2) 親 A の中間部分にある通過点を親 B から除去し
- (3) 部分的に除去された親 B の通過点列を圧縮して
- (4) 圧縮された親 B を(確率的に)任意の1点で切断し
- (5) 親 B の切断された間に親 A の中間部分を挿入する

操作を行う。

突然変異の段階では、確率的に選ばれた通過点(1点)

図7 電話機モデル

図8 GAによる準最短工具経路平面図

が、確率的に選ばれた通過順序の位置に移動される。

実験例では、電話機のモデル(図7)を対象にそのオフセット面上の1400領域の代表点を通過する最短工具経路の算出を試みた。1400点の順列の数は $1400! \approx 10^{3795}$ となり、最短であるか否かの確認は実質的に不可能となっている。GAは多点探索による確率的探索法であるため、最短経路に到達したか否かの保証が無く、集団における各経路長の総和の変化がほとんど無い世代が一定期間続いた時点で、繰返し計算を打ち切っている。図8は生成された工具経路50000世代目の平面投影図である。空間経路長が4412.72 mmとなっている。図を観察すると、斜面に相当する領域(プッシュボタン部分)は走査線ピックフィールドで工具経路が生成されており、また工具経路が完全には左右対称となっていないことが認められる。

この工具経路生成方式は、評価基準と経路生成アルゴリズムが独立しており、複数の評価指標、たとえば工具経路長、経路方向変化などを評価基準に組み込んだ多目的最適化問題に拡張可能となっている。

4. 今後の課題と展望

加工工具経路は工具干渉しないことが第一であるため、現状では干渉のない経路を生成した後で送り速度・切込み・切削速度などの加工条件を選定していることが多い。工作物の形状が複雑となり工具経路・工具姿勢の設計に幾何的な自由度が少ない場合は、工具干渉回避を優先させなければならないが、本質的には加工条件も同等に配慮すべきである。

エンドミル加工の場合、工具と工作物表面形状の幾何関係から決定される指標だけでも、工具すくい角の変化や1刃当たりの送り量、切りくず厚さ、切りくず長さ、さらには切れ刃部分の切削速度範囲などが考えられる。これらはまだ自由曲面切削の工具経路生成には利用されていないようであるが、本質的には前述のとおり工具経路設計段階で利用されなければならないと考えられる。

加工において工具経路だけでなく加工条件も組み合わせたものを加工パターンと呼ぶとすれば、それはまさしく複雑なパターンとなっている。その複雑なパターンの生成は、CAD/CAM システムや多目的最適化理論などの従来型の枠組みから、自律分散処理、学習機能²¹⁾、進化、協調などに代表される創発型の枠組みへと変化していくのではないかと予想される。複雑なパターンの創成が加工の精密さにつながっていることは象徴的な関係であり、これまでの精密加工の研究成果からも想像に難くない。今後、いわゆる人工生命²²⁾の研究がどのように加工分野に適用できるかも含めて、精密工学の領域がボーダレスに発展していくことは確かなようである。

参 考 文 献

- 1) 精密工学会編：新版精密工作便覧，コロナ社，(1992)。
- 2) 金子 勉，土屋政光：回転円筒形電極による創成放電加工，電気加工技術，**15**，48 (1991) 13。
- 3) 関口 博，竹山秀彦：数値制御旋削における荒削り手順のプ

- ログラミングに関する研究，精密機械，**43**，10 (1977) 56。
- 4) 福井雅彦，高橋百利：高硬度金型材の高効率切削加工の研究——一発大荒・かけ上がり法，型技術，**10**，7 (1995) 26。
- 5) 細井俊明：新しい金型型面加工法，日刊工業新聞社，(1983)。
- 6) 鈴木 裕，山崎和雄，星 鐵太郎，黒宮義久：金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第2報)——実時間工具経路生成について，精密工学会誌，**53**，12 (1987) 1952。
- 7) 鈴木 裕，黒田 豊，坂本正史，原楨真也，元村直行：金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第4報)——自動荒取り機能の開発，精密工学会誌，**57**，12 (1991) 2145。
- 8) Y. Mizugaki, M. Hao and M. Sakamoto: A Study of Geometric Machining Simulation Based on Enhanced Z-map Model, Proc. Int. Conf. Computer & Int. Eng. (ICC & IE 95), Shanghai, (1995.10) 545。
- 9) 日本機械学会編：機械工学便覧 B 2—加工学・加工機器，168，丸善，(1988)。
- 10) 竹内芳美，長坂 学，森重功一：ボールエンドミルの先端切れ刃・側面切れ刃を併用した5軸制御加工，精密工学会誌，**61**，4 (1995) 561。
- 11) G. Elber and E. Cohen: Tool Path Generation for Free Form Surface Models, Computer Aided Des., **26**，6，(1994) 490。
- 12) 白髭昌男：NC 5 軸制御マシニングセンタによるインペラの加工，ターボ機械，**7**，5 (1979) 20。
- 13) 石川島播磨生産技術部：NC 同時5 軸制御によるインペラの加工，石川島播磨技報，**21**，4 (1981) 335。
- 14) Y. Mizugaki, M. Sakamoto and K. Kamijo: Fractal Path Application in a Metal Mold Polishing Robot System, Proc. Int. Conf. Advanced Robotics of IEEE, Pisa, Italy, (1991) 431。
- 15) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，(1986)。
- 16) 近藤 司，川田 毅，五十嵐 悟：C-Space を利用した加工情報の生成に関する研究，1996 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1996) 849。
- 17) 森重功一，竹内芳美，加瀬 究：C-Space を用いた5 軸制御加工における工具経路計画法，1996 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1996) 851。
- 18) Y. Mizugaki, M. Hao and M. Sakamoto: A Study of Shortest Path Generation by Genetic Algorithm, Proc. 1995 European Simulation Multiconference (Modelling and Simulation), Prague, (1995) 218, (ISBN: 1-56555-080-3)。
- 19) 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム，産業図書，(1993)。
- 20) 北野宏明編著：遺伝的アルゴリズム 2，産業図書，(1995)。
- 21) 竹内 勝：遺伝的アルゴリズムによる機械学習，計測と制御，**32**，1 (1993) 24。
- 22) 成瀬継太郎，嘉数侑昇：人工生命——マルチエージェントシステムの適応とその応用，シミュレーション，**13**，4 (1994) 317。