遺伝的アルゴリズムによる最適工具群の選択*

郝 明 暉** 水 垣 善 夫*** 坂 本 正 史***

Optimal Tool Selection Based on Genetic Algorithm in a Geometric Cutting Simulation

Minghui HAO, Yoshio MIZUGAKI and Masafumi SAKAMOTO

This paper presents a new method of optimal selection of cutting tools in a geometric cutting simulation. Firstly an area to be cut by an end-milling tool is calculated according to each different tool. The shape of the workpiece is represented in a hierarchical lattice space model, Enhanced Z-map model. Secondly a tool set prepared is coded as a binary bit string, i. e. gene. Each bit corresponds with a certain tool and 1 indicates its use and 0 is not. Thirdly a fundamental Genetic Algorithm consisting of selection, crossover and mutation is applied based on the index which takes account of total cutting time, uncut area, the number of tools used etc. Here it is assumed that the selected tools would be used in descent order of diameter and it would cut its corresponding area as entirely as possible. Some simulations are illustrated and the conclusions are briefly mentioned too.

Key words: CAM system, offset surface generation, Enhanced Z-map model, K offset method, Genetic Algorithm, optimal tool selection

1. 緒 論

金型製品の普及につれて、いかに高速・高精度に金型を加工するかが非常に重要な問題となっている。このような背景のもと、金型用 CAD/CAM システムの開発が盛んに行われている。しかし金型加工の現状から見れば、まだ数多くの問題点が残されている。いかに既知の工具群から最適工具群を選択するかはその一つである。

エンドミル類工具により形状加工を行う際、加工精度・能率を向上するために、より大きい半径を有する工具の使用が望ましい。しかし、工具と加工対象との干渉回避の必要があるので、工具半径が大きいほど、加工不能面積も多くなる。実際は、異なる半径を有する数本の工具を用いて、加工作業を行っている。従って、要求する加工精度を満たす条件下で、いかに既知の工具群から、最少本数の工具及びそのサイズを選択し、加工時間と加工不能面積を最少とするかは、工学的にも工業的にも重要な問題である。近藤ら¹⁾により、加工面積と加工時間の関係の立場から最適選択の提言もあるが、最適化に関する評価関数、最適化の手法については明らかでない。これらの問題については適切な解決方法がまだ確立されず、熟練者のノウハウのみに頼っているのが現実である。

そこで筆者らは、加工面積と加工時間との関係から工具選択の最適化評価関数を考案し、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA) を用いて最適工具選択に関するシステムの開発を行った。

本論文では主に以下に示す点について報告する。

- (1) 加工時間、加工面積及び工具本数などの要因を考慮した工具選択評価関数の提案
- (2) 拡張 Z-map モデルへの情報追加及び K オフセット法による加工面積の高速算出
- (3) 遺伝的アルゴリズムによる最適工具群の算出

2. 評価関数の提案

実際にエンドミル類工具による形状加工を行う際、どのような工具 (形状, サイズ) が使用できるかは既知である。しかし、このような既知工具群からどの工具を選択するか、選択された工具をどのような順番に従って使用するか、各工具により加工する面積をどれぐらいにするか等が問題となる。更に、加工作業が仕上加工か否かによって、これらの問題に関する解決策が違って来る。以上の問題点をすべて一つの評価関数により表現することはほぼ不可能である。

そこで本研究では、計算時間の短縮と実際の加工作業を考慮して、以下の仮定を設けている。

- (1) 加工状態を仕上加工に限定する。(半仕上加工は加工のピッチ間隔を粗くした仕上加工と考える。)
- (2) 工具径の大きいものから順番に使用する。工具群に、ボールエンドミル、フラットエンドミル、コーナールエンドミルが混在している場合、同じ半径の工具に関しては、ボールエンドミル、コーナールエンドミル、フラットエンドミルの順で使用する。
- (3) 未加工面積の内、選定された工具で加工可能な面積はすべて加工する。
- (4) 前の工具で加工した面は、次の工具で加工しない。

以上の仮定に基づいて、工具選択に関する評価関数 f を次式で表現する。

$$\begin{cases} f = \alpha \times T + \beta \times S^* \\ T = \sum_{i=1}^n \delta_i \times (t_i + dt) \\ S^* = S_T - \sum_{i=1}^n \delta_i \times S_i \end{cases} \quad (1)$$

T : 選択された工具による総加工時間

S^* : 選択された工具群での加工不能面積

α, β : それぞれ、加工時間、残り面積の想定加工時間への重視度を表す重み係数 ($\alpha + \beta = 1$)。 β が小さいほど残り面積への重視度が低下し、残り面積が多くなる。又、評価値 f を無次元化するために、 α の単位を 1/s とし、 β の単位は $1/\text{mm}^2$ とする。

* 原稿受付 平成 5 年 9 月 20 日

** 学生会員 九州工業大学工学部 (北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*** 正 会 員 九州工業大学工学部

S_T : 加工形状の総表面積

S_i : i 番目の工具による加工面積

n : 既知工具群の総工具本数

t_i : i 番目の工具による加工時間 (単位: s). これは i 番目の工具サイズ, 送り速度, 加工面積などの既知パラメータを用いて, 近似的に計算できる.

dt : 工具交換相当時間 (単位: s). 工具交換による加工精度の低下に対する重視度でもあり, dt が大きいほど加工精度低下への重視度が高く, 使用する工具本数が少なくなる.

δ_i : i 番目工具の選択状態. 選択時 1, 非選択時 0

このように, 本評価関数は加工時間と残り面積の両方とも重視した上で提案したものである. 特に, 重み係数 dt, α, β の導入により, 工具交換による加工精度の低下, 残り面積への重視度などを定量的に表現しているのが本評価関数の特徴である.

重み係数 dt, α, β などが決められた状態で, 評価値 f が最小となる工具群を, これらの重み係数に基づいた最適工具群とみなすことができる. 又, 評価関数は非負であるため, 工具サイズ, 工具本数に関する最適化問題は式 (2) で表される.

$$\begin{cases} f \rightarrow \min \\ S \geq S_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

S : 選択された工具群による総加工面積

$S_{\min}$: 加工面積の下限

3. 加工面積の高速算出

各工具に関する加工時間を計算するために, その工具による加工面積を計算する必要がある. 第 2 章の仮定から分かるように, ここでの加工面積というのは工具が加工形状と接触可能な面積である. この場合, 単なる加工対象の表面積の計算と異なり, 加工対象形状の全表面にわたって, 用いている工具と加工対象との干渉チェックを行う必要がある. 工具と加工対象との干渉チェックについては, 様々な方法が提案されているが, システムの中核となる形状モデルによって大別でき, 使用するオフセット法によってその計算効率も大きく違ってくる. 特に, 取り扱う工具が複数の場合, 形状モデルにおける複数工具情報に関する記述方法はまだみあたらない. 更に, 工具と対象形状との干渉チェック高速化なども問題である.

そこで複数工具情報の記述, 計算速度の向上を図るために, 本研究では筆者らが提案した拡張 Z-map モデル²⁾に情報を追加し, それをシステムの核とする. 工具と加工形状の切削シミュレーションについては K オフセット法³⁾を使用する. 本章では主に拡張 Z-map モデルへの情報追加, 工具と加工形状との切削シミュレーション及び加工面積の計算について述べる.

3.1 拡張 Z-map モデルへの情報追加

拡張 Z-map モデルの概念を図 1 に示す. これは従来の Z-map モデルに階層性を導入して開発されたものである. 中には, 2 種類 (細分領域, Z-map 領域) のデータ領域を設けている.

細分領域には, 次の階層にある 4 つの領域の先頭アドレス番地が記されている. この領域の繰返し利用によりデータの細分及び階層管理が実現できる.

Z-map 領域は従来の Z-map モデルと同様であるが, ピッチ間隔はその領域の存在する階層によって異なる. また Z-map 領域は, その領域形状の最大高さ, 最小高さ ($Z_{\max}, Z_{\min}$) 情

Fig. 1 Enhanced Z-map model

報も有している.

各領域の性質 (細分領域/Z-map 領域の区別) や各 Z-map 領域内の形状を, Type と呼ぶ変数の値により判別する.

更に工具と加工形状との接触状態を記憶するために, 今回の研究では各 Z-map 領域へ情報を追加した.

ck-map は 1 バイトのキャラクタ配列で, 工具が加工形状のある領域の点 $Z = Z\text{-map}[i][j]$ と接触した場合, $ck\text{-map}[i][j] = R_i$ とする. R_i は使用する工具の番号である. 更に, ck-map 内の番号がすべて同一のものである場合, その番号を T_cd に与える.

拡張 Z-map モデルの特徴として次の点が挙げられる.

- (1) 異なるピッチ間隔のデータが共存できる. データの細分は細分領域の繰返し利用によって, より自由に実現できる.
- (2) 各領域内の形状が, その領域内の Type の値により簡単に判別できる.
- (3) 各 Z-map 領域内の形状の最大・最小高さ $Z_{\max}, Z_{\min}$ が保存されている.
- (4) 加工形状面にある各点・領域内での工具と加工形状との接触状態が, 配列 ck-map 及び変数 T_cd の値により判別できる.

3.2 切削シミュレーション及び加工面積の計算

切削シミュレーション及び加工面積計算のフローチャートを図 2 に示す. システムをスタートしてから, 加工形状の拡張 Z-map モデルを読み込み, すべての配列 ck-map の値を初期化する. 続いて, 使用する工具群の各工具の形状及びそのサイズを定義する. 本システムで定義できる工具は, ボールエンドミル, コーナールエンドミル, フラットエンドミルの 3 種類であり, 連続体モデルにより表現している.

システムは, 定義された工具に対し工具径の大きい物から順番に番号 (R_i) を付けた後, 各工具に関する切削シミュレーションを行う. その処理後, すべての工具に関して加工面積の計算を行い, 結果を保存する.

切削シミュレーションに関する計算処理は基本的には K オフセット法³⁾を使用しており, その概念を図 3 に示す. 加工物の形状を 2.5 次元, 加工機械を 3 次元制御に限定し, 工具及び工作物表面上に点 P_T, P_S (ワーク座標系 O-XYZ 内では, 点 P_T と P_S が同じ X, Y 座標値を有する) をとる. その Z 値の和 $Z = Z_T + Z_S$ が工具被覆領域内で最大値となる場合, その和

Fig. 2 Scanning of contact point and calculation of machined area

Fig. 3 Concept of the K offset method

を工具中心 O_T の高さ Z_0 とすれば、工具と加工形状が P_s (あるいは P_T) で接する。高速に接触点 P_s を抽出するために、K オフセット法では拡張 Z-map モデルの最大・最小高さ情報などの特徴を利用し、接触点算出に関する走査領域を最小に限定した。

ところで図 4 に示すように、前後 2 回に使用する工具形状が同じで半径のみが異なる場合、第 2 章の仮定 (2) から前の工具 (Tool 1) により加工した曲面 (範囲 S_1 内の曲面) が必ず後の工具 (Tool 2) でも加工できる。従って、工具 Tool 2 に関する切削シミュレーションは範囲 $S_2 + S$ 内で行えば良い。具体的な方法は、まず既に抽出した走査領域に対し、各領域内にある T.cd の値を調べる。現在処理中の工具形状と同じ、且つサイズの大きい工具により加工できる領域があれば、それを接触点走査に関する走査領域から除くことにより、算出時間の短縮

Fig. 4 Division of machined area

 Fig. 5 Calculating of machined area of point $P_{i,j}$

が実現できた。

接触点の走査に関しては、文献 3) の方法をそのまま使用する。抽出された接触点に対し、その格子座標 (i, j) を用いて対応する ck-map $[i][j]$ の値を調べる。それが未加工点であれば、工具番号を ck-map $[i][j]$ にセットする。

上述の切削シミュレーションをすべての工具に関して行うことにより、形状モデルのすべての配列 ck-map に工具と加工形状の接触情報が保存される。この情報を用いて、各工具に関する加工面積を計算する。但し、ここでの加工面積とは、定義された工具をすべて使用し、且つ仮定 (3) に基づいたものである。従って、加工面積の計算にあたって、各格子点にある配列要素 ck-map $[i][j]$ の値を参照しながら同じ工具番号を有する点に関して行えばよい。なお各格子点での加工面積を図 5 に示すように 2 つの三角形の面積で近似する。

4. 最適工具群の算出

評価式 (1) から分かるように、これは非連続関数であり、定義された各工具に関しては選択 ($\delta_i=1$) と非選択 ($\delta_i=0$) の 2 つの状態しかない。更に、ある工具が選択された場合、その工具の有する加工時間が前の工具の使用状態に大きく影響され、評価値 f が大きく変化する。よって、評価値 f が工具選択状態により、跳躍的に変化することが予想できる。すなわち、評価式は非連続且つ多峰性を有する関数である。このような特徴を有する関数に対し、各工具の選択状態及び工具本数が加工時間に及ぼす影響を解明して、最適工具群を算出することは困難である。この種の問題に関する最適化手法として、様々なあるが遺伝的アルゴリズムはその一種である。

遺伝的アルゴリズム (GA) は生物進化 (選択淘汰、突然変異) の原理に着想を得たアルゴリズム⁴⁾⁷⁾⁹⁾であり、多点情報を利用した確率探索手法の一種である。この方法は多点探索であり、一般的には多峰性の問題に強い。離散システムへの対応の容易さやアルゴリズムの簡単さ、複雑な計算方法 (微分、行列の計算など) を利用しないなどの点がその特徴である。

特に本最適工具群選択の場合、次節に述べるように工具群の選択状態が簡単にコード化でき、染色体として表現できるので、遺伝的アルゴリズムを用いて、その最適解の算出を試みた。

4.1 工具群のコード化

ここではまず GA に関するいくつかの基本概念⁸⁾を説明し、本工具群選択の問題におけるコード化の方法を論じる。

染色体 (chromosome) が、遺伝情報を伝える実態として存在する。生物にとって、これは塩基 (base) で構成されてい

Table 1 Encoding of cutting tools

Tool number	T_1	T_2	T_3	...	T_{n-2}	T_{n-1}	T_n
Phenotype	1	0	1	...	0	0	1

る物理的実態である。染色体の各位置にどのような遺伝情報が記述されるかが決まっているが、このような位置を遺伝子座 (locus) と呼ぶ。各遺伝子座に対してその形質を決定する塩基配列で表現されたコードを遺伝子 (gene) と呼ぶ。そして、遺伝子の組合せのパターンを遺伝子型 (genotype) という。遺伝子型に基づいて形成された個体を表現型 (phenotype) という。一方、GA の場合ではデータ領域や配列により染色体を表現し、遺伝子座はデータ領域あるいは配列のアドレスに対応する。各アドレスにある配列要素の値が遺伝子と対応する。

GA を利用する場合、まず解決対象となる問題空間 (表現型によって規定される実行可能な集まりからなる空間) と GA 空間 (遺伝子型によって規定される空間) との対応関係を明らかにする必要がある。これはいわゆる問題空間から GA 空間への写像及び GA 空間から問題空間への逆写像を規定する問題であり、コード化 (encoding/decoding) と呼ばれている。更に、コード化と GA の基本演算の一つである交叉とは独立ではない。交叉によって生成された個体が問題空間での無意味な解とならないようにするためには、コード化及び交叉については一定の評価規範が必要である。それは以下のような点⁵⁾⁶⁾と考えられる。

(1) 完備性 (completeness)

すなわち問題空間上の解候補はすべて染色体として表現できること。

(2) 健全性 (soundness)

GA 空間上の染色体はすべて問題空間の解候補に対応できること。

(3) 非冗長性 (nonredundancy)

染色体と解候補は 1 対 1 に対応づけられること。

(4) 形質遺伝性 (character preservingness)

親の形質は交叉により子に適切に継承されること。これは交叉に関する評価規範である。

一方、今回の工具群の最適化問題では、各工具が使用、未使用 ($\delta_i=1$ か $\delta_i=0$) の二つの状態しかない。更に、各工具の使用順番も既に仮定 (2) により決められている。従って、本問題空間は表 1 に示すように簡単にコード化できる。すなわち、定義された工具群に関する選択状態を要素が 1 ビットの一次元配列とする。各ビットの位置が遺伝子座となり、各ビットと工具の対応関係が配列中の位置により一意に決定される。各ビットの値が対応する工具の使用状態を表し、遺伝子として取り扱う。このように、一種の工具選択状態が、一つの配列により一意的に表現でき、この配列を染色体として取り扱うことができる。交叉方法については、一様交叉法¹⁰⁾ (uniform crossover) を使用する。

4.2 アルゴリズム

工具径最適化に関するアルゴリズムを図 6 に示す。システムはスタートしてから、まず基本データ、例えば工具半径、加工可能な面積、各工具の送り速度、最大粗さ等、を読み込む。更に、システム操作者により集団サイズを決定し、交叉相手を選択する確率、突然変異を起こす確率等の基本データを入力する。システムが与えられた工具群に対しコード化を行った後、ランダムに初期集団を生成する。

Fig. 6 GA flowchart

Fig. 7 An experimental object with enhanced Z-map model

生成された集団中の各個体に対し、式 (1) により、その評価値を計算する。続いて、算出された評価値により、その適応度を計算する。但し、システム処理上の便利さを考慮して、最適化を式 (3) のような最大値問題に変換し、 F を適応度とする。

$$\begin{cases} F = \frac{1}{f} \rightarrow \max \\ S \geq S_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

すべての個体に関する適応度の計算が終わると、期待値戦略⁸⁾で交叉相手を決め、交叉作業を行う。これらの作業を終了した後、突然変異を起こし、次世代の個体集団を生成する。

このようなサイクルを指定された収束条件が満たされるまで繰り返す。本システム内では主に各世代中の最小評価値あるいは世代数を利用して、以下のような収束条件を設けている。

- (1) 最小評価値が指定された世代数内で安定になるまで計算する。
- (2) 一世代の個体集団中、最小評価値を有する個体数が操作者により指定された数より多くなるまで計算する。
- (3) 指定された世代まで計算する。
- (4) 収束条件 (1) と (2) 共に満足するまで計算する。

最後に、最小評価値を有する個体を取り出してから、その各遺伝子座での値を工具の使用状態へ還元し、最適の工具組合せを生成する。

5. 実験及び結果

図 7 に、11 枚の曲面 (球面 2 枚、円柱面 3 枚、円すい面 3 枚、円の回転面 2 枚及び平面 1 枚) からできている加工対象形状を示す。最大ピッチが 0.4 mm で、最小ピッチが 0.2 mm である。定義している工具群は半径 20 mm から 2 mm まで 1 mm ずつ減少する計 19 本のボールエンドミルである。これらの工具に関して K オフセット法により加工面積の計算を行った。総計算時間約 15 分であった。図 8 には半径 7 mm のボールエンドミルにより加工を行う際の加工不能部分を示してい

Fig. 8 An area not to be cut by a ball-end milling tool of 7 mm radius

Table 2 One of optimal selections

Tool radius mm	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Genotype	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1

Fig. 9 Results of the experiments (part 1)

る。

又、この19本の工具に対し、GAを用いて、その最適解を求めた。表2には、最適解の一例($dt=420$ 秒)を示す。この場合、集団サイズが40であり、世代数が約300で最適解が安定となる。計算時間は約5秒であった。計算機は、32 bitEWS (124 MIPS) でC言語によりプログラミングした。

又、GAにより算出した最適解が本当に評価関数(1)に関する最適解となっているか否かを実証するために、全域走査法を用いて、その最適解を求めることにした。この場合、工具群のサイズ(定義された工具本数)が19なので、 $2^{19}-1=524,287$ 通りの選択状態がある。これらの選択状態をすべて計算したところ、その最適解がGAにより算出されたものと全く一致した。全域走査に当たる所要時間は約15秒であった。

更に、工具交換による加工精度の低下に対する重視度係数 dt が工具本数、評価値に与える影響(10回計算の平均)を図9に示す。 dt の増大につれて、最小評価値が大きくなり、工具本数が少なくなることが良く分かる。 β 値による最適工具群の変化に関する実験結果を図10に示す。 β 値が小さいほど、

Fig. 10 Results of the experiments (part 2)

選択された工具本数が少なくなり、加工不能面積が多くなることが確認できた。

6. 結 論

加工対象形状を2.5次元と限定した上で、工具本数、加工面積と加工時間の関係に着目し、最適工具群選択に関する研究を行った。研究開発を通じ、以下の成果を得た。

- (1) 拡張Z-mapモデルに情報を追加し、それを工具群情報として取り扱うことが可能となった。又、Kオフセット法を利用することにより、接触点の高速算出が可能となり、加工面積の計算が容易且つ高速的に実現できた。
- (2) 工具本数、加工精度、加工時間などの要因を考慮し、工具選択に関する評価関数を提案した。
- (3) 工具群の使用順序を限定し、遺伝的アルゴリズムを利用することにより、工具群選択の最適化が高速に実現でき、その有用性を実証した。

参 考 文 献

- 1) 近藤 司, 齊藤勝政, 岸浪建史: 曲面加工における工具使用手順決定方法に関する研究, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 201.
- 2) 郝 明暉, 水垣善夫, 坂本正史: 拡張Z-mapモデルによる測定システムの開発, 精密工学会誌, 58, 7 (1992) 1221.
- 3) 郝 明暉, 水垣善夫, 坂本正史: 拡張Z-mapモデルによるCAMシステムの開発——オフセット法の一提案, 精密工学会誌, 60, 2 (1994) 275.
- 4) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 人工知能学会誌, 7, 1 (1992) 26.
- 5) 小林重信: 遺伝的アルゴリズムの現状と課題, 計測と制御, 32, 1 (1993) 2.
- 6) 山村雅幸, 小野貴久, 小林重信: 形質遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法, 人工知能学会誌, 7, 6 (1992) 117.
- 7) J. Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan, 1975 and MIT Press, 1992.
- 8) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993).
- 9) 和田建之介: 進化システム論 遺伝的アルゴリズムの基礎(1), Computer Today, 47, 1 (1992) 49.
- 10) G. Syswerda: Uniform Crossover in Genetic Algorithms, Proc. ICGA-89, (1989).