パッチ分割切削法による 任意三角形パッチ内への規則的表面模様形成*

福田 理明** 笹原 弘之*** 松田 礼† 堤 正臣***

Generation of Geometric Pattern in Arbitrary Triangle Patches by Using Patch Division Milling

Masaaki FUKUDA, Hiroyuki SASAHARA, Hiroshi MATSUDA and Masaomi TSUTSUMI

This study describes a new machining strategy to make regularly aligned geometric pattern by ball-end milling process employing a patch division milling technique. The surface is divided into a lot of triangle patch segments which is machined with helical tool path. It is newly proposed the way to array cutter marks straightly in arbitrary triangle patches. In addition, it is shown that the inclination angle of cutter marks array against the feed direction can be controlled by the appropriate setting of feed per tooth and cross feed for an arbitrary triangle patch. It is shown that the experimental results and simulation results are in good agreement. It is also reported that the well arranged cutter marks arrays are formed on the triangle patches on the spherical model.

Key words: surface texture, geometric pattern, surface finish, end mill, tool path, machining center

1. 緒 言

近年、複雑な形状を加工するために、5軸制御マシニングセンタによるボールエンドミル加工が広く用いられているが、ボールエンドミルで表面を加工するとカットマーク、カスプが残る。精密金型などではこのカットマークは一般的に研磨等の後工程で除去されるが、逆にこれを積極的に利用し、加工条件を選定することで加工表面に所望の凹凸模様を創成する方法が提案されている¹⁾²⁾。

この特徴を利用し、製品の表面に微小な凹凸模様を任意に形成できれば、耐摺動性や光路補正などの機能を付加できるだけでなく³⁾、濡れ性、撥水性の向上⁴⁾⁵⁾や流動抵抗の低減⁶⁾⁷⁾などの効果も期待できる。また、表面の微小な凹凸模様により装飾性を高めることも可能である。よって、カットマークの配列制御により様々なパターンを形成する手法を明らかにし、適用範囲を自由曲面まで拡張できれば、ボールエンドミルによる形状創成と同時に表面に装飾性や物理的機能を付与できることになり有用である。

著者らの一部により、ボールエンドミルを用いて加工面に規則的な凹凸模様を形成する加工戦略としてパッチ分割切削法が提案され²⁾、パッチ内のカットマークによる模様配列の制御に成功している。更に自由曲面を平面の三角形パッチ群で近似しその内部に凹凸模様を形成する手法を提案している⁷⁾が、この場合、同一形状の三角形パッチで自由曲面上を覆いつくすことは不可能なため、各三角形パッチの形状は様々となり、それら任意形状の三角形パッチに対し、その内部に凹凸模様を規則正しく形成するには至っていない。

そこで本研究では、任意の形状・寸法の平面三角形パッチ内部に凹凸模様配列を直線的に整列する手法を新たに提案する。更に、整列したカットマーク列の傾きを任意の値に制御することを可能とする加工条件の設定方法を提案する。シミュレーションによる模様形成状態と実験結果との比較、および曲

面を平面パッチで近似した形状への適用例について報告する。

2. パッチ分割切削法による表面模様形成

パッチ分割切削法¹⁾²⁾について概略を述べる。パッチ分割切削法では、

- ① 図1(a)に太線で示すように、加工面全体をある同一の多角形パッチ、あるいは、いくつかの種類の多角形パッチを組み合わせて分割する。各パッチは平面とする。
- ② 図1(b)に示すように、個々のパッチ内を、各辺に平行に螺旋状の一筆書きの工具経路で、クロスフィード f_c 分ずつ内側にずらしながら高送り条件で加工する。

これにより、巨視的には多数の多角形パッチで加工面全体が覆われ、微視的には個々のパッチ内にボールエンドミルによるカットマークが凹凸模様として形成される¹⁾²⁾。当然ながら、工具経路に沿ってカットマークは等間隔で形成されるが、与えられたパッチの形状、寸法に対して、主軸回転速度、送り速度、刃数、クロスフィード量等の加工条件を調整し、後述の新たに考案した方法により、任意の形状の三角形パッチに対しても、隣り合

(b) Type of patch and tool path
Fig. 1 Outline of patch division milling technique

* 原稿受付 平成21年3月30日

** 学生会員 東京農工大学大学院(小金井市中町2-24-16)

*** 正 会 員 東京農工大学大学院

† 正 会 員 東京都立産業技術高等専門学校(荒川区南千住8-17-1)

となり、パッチ内の螺旋状の工具経路の周回数 n に対して、初項 d_3 (rad)、公差 $\Delta\lambda$ の定数を持った等差数列になる。式(5)、(6)、(7)の公差 $\Delta\lambda$ の項は全ての領域で同値であり、 $\triangle IAB$ と同様に、 $\Delta\lambda$ が 2π の整数倍となるように、 f_c 、 f_i を決定すれば、 $\triangle IBC$ 、 $\triangle ICA$ の領域にも直線上に整列した Cutter マーク列が形成される。なお、 f_i 、 f_c の具体的な決定方法は後述する。

2.2 Cutter マーク列の傾きを任意の値に設定する条件

2.1 で述べた条件では、隣り合うパスの Cutter マークは直線上に整列するがその傾き(各辺に対する Cutter マーク列の角度)は指定されない。そこで、上記の手法を拡張し、生成された Cutter マーク列の角度を制御する条件を述べる。

図3に、 $\Delta\lambda$ の値が 2π の整数倍であることを想定した場合の、隣り合う経路における工具切れ刃の位相と Cutter マークの形成について模式的に示す。

式(5)の d_i を 2π で割った余剰 R_i (rad) は、幾何学的には図3(a)(i)のように隣り合うパス間の工具の位相差である。このとき、Cutter マークの中心は同図(ii)に○で示す位置に形成される。Cutter マークの工具送りと反対方向へのずれ x_1 (mm) は、

$$x_1 = \frac{R_1}{2\pi} \times \frac{F}{S} \quad (8)$$

で表すことができる。周回を重ねると同図(b)のように Cutter マークが整列し、その配列の傾き α_1 は、

$$\alpha_1 = \left(\arctan \frac{f_c}{x_1} \right) \times \frac{360}{2\pi} \quad (9)$$

で求めることができる。 $\alpha_1 = 90^\circ$ の時、 $\triangle IAB$ 内部の Cutter マーク列はパッチ各辺に対して垂直に並ぶ。 α_1 が $0^\circ < \alpha_1 < 90^\circ$ の範囲にある時、 $\triangle IAB$ 内部の模様の整列は送り方向と逆に傾き、 $90^\circ < \alpha_1 < 180^\circ$ の範囲にある時送り方向に傾く。

従って、所望の傾きで直線上に整列した Cutter マークを形成するには、 $\Delta\lambda$ が 2π の整数倍となり、かつ上記方法で算出された Cutter マーク列の傾き α_i が所望の値となるようクロスフィード量 f_c 、一刃当たりの送り量 f_i を決定すればよい。

$\triangle IBC$ 、 $\triangle ICA$ の領域に関しても $\triangle IAB$ と同様に周回毎の工具送りと反対方向へのずれ x_2, x_3 (mm) を算出でき、式(6)、(7)の d_2, d_3 を 2π で割った余剰を R_2 (rad)、 R_3 (rad) とすると、

$$x_2 = \frac{R_2}{2\pi} \times \frac{F}{S} \quad (10)$$

$$x_3 = \frac{R_3}{2\pi} \times \frac{F}{S} \quad (11)$$

となる。Cutter マーク列の傾き α_2, α_3 (°) においても、

$$\alpha_2 = \left(\arctan \frac{f_c}{x_2} \right) \times \frac{360}{2\pi} \quad (12)$$

$$\alpha_3 = \left(\arctan \frac{f_c}{x_3} \right) \times \frac{360}{2\pi} \quad (13)$$

の様に、式(8)、(9)と類似の関係が成り立つ。

2.3 トレランスを許し加工条件を設定する手法

パッチ形状・寸法が与えられ、 f_c は一定の値として設定する場合、変数となる加工条件は f_i のみとなるが、 $\triangle IAB$ 、 $\triangle IBC$ 、 $\triangle ICA$ 全ての領域内部の Cutter マーク列の傾き $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ が所望の値になるように式(9)、(12)、(13)の関係を厳密に成立させることは実際にはできない。そこで、Cutter マーク列の角度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ に所望の値 $\pm r$ (°) のトレランスを許すことにより、式(9)、(12)、(13)の関係を両立を成立させることを提案する。

パッチ形状が与えられた時、 f_c の値を仮に決め加工経路を算出する。その後、 f_i を仮に決め、式(5)、(6)、(7)に代入し式(8)、

(10)、(11)を経て式(9)、(12)、(13)より $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ が求まる。この $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ が設定したトレランス内であるか否かを判断する。以上の手順において、 f_c の値を微小値(例えば0.001mm)ずつ変化させ、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 全てが所望の値 $\pm r$ (°) となる一刃当たりの送り量 f_i の探索を行う。 f_c が変わると工具経路も変わるので、その度加工経路を算出する。

パッチの形状によっては設定したトレランス内に $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ が収まらない場合もあるが、本報告の範囲では設定角度に対する偏差が 3° から 8° 程度の範囲で解が求まっている。

最終的に、トレランスを満たす条件の組み合わせは複数存在する場合があるが、そのうちで最も設定値との差が小さい条件を選定する。

以上の方法により、パッチ分割切削法においてパッチ内の Cutter マークを直線上に整列させ、更に直線上に整列した Cutter マーク列の傾きの角度を任意に設定することが可能になる。

3. Cutter マーク配列の検証

Cutter マークの配列を表示するシミュレーションを用いて、いくつかの条件で解析を行い、2章で述べた Cutter マーク列を直線上に整列させる方法、及び直線上に整列した Cutter マーク列の傾きの角度を制御する方法の妥当性を示す。更に、切削実験を行い本手法の有効性を示す。

3.1 切削実験方法

切削実験は、立て形マシニングセンタのテーブル上に、NC 傾斜円テーブルを搭載したテーブル旋回形5軸制御マシニングセンタを使用した。工作物はボールエンドミルの切れ刃によって創成される凹凸模様を観察しやすくするために、転写性に優れる快削黄銅を、工具は工具径2mmで1枚刃のボールエンドミルを使用した。また、加工面法線を鉛直から x 軸周りに $-\pi/6$ 回転し、傾斜面を加工した。切削実験後の加工面は CCD カメラを用いて撮影した。

3.2 シミュレーション及び切削実験による検証

まず一例として、三角形パッチ各頂点の座標値を、5軸マシニングセンタ上に設置した厚さ10mmの直方体被削材の底面中心を原点とし、図4に示す3点 A(0, -80.488, -11.566), B(10.0, -87.988, -15.896), C(-5.0, -87.988, -15.896) に設定した場合について示す。

まず、一刃当たりの送り量 f_i を任意に設定しシミュレーション及び切削実験を行った。 $f_i = 0.363$ mm, $f_c = 0.431$ mm とし、2章で述べた設定は一切行っていない。シミュレーション結果を図4(a)に示す。パッチ内部各領域の Cutter マークは送り方向には等間隔に整列しているが、隣り合う工具経路間では波状に並んでいる。切削実験結果もシミュレーション結果と同様にパッチ内に波状に模様が形成され、シミュレーション結果と切削実験の結果はよく一致している。

Fig. 4 Irregularly aligned cutter marks
($f_i = 0.363$ mm/tooth, $S = 1000$ min⁻¹, $F = 362.854$ mm/min, $f_c = 0.431$ mm)

次に、2章で示した、 Δl が 2π の整数倍となる条件となる一刃当たりの送り量 f_t を算出し、それに対応する送り速度 F を設定しシミュレーション及び切削実験を行った。また、ここでは、直線上に整列したカッターマーク列の角度を制御する手法は用いていない。 f_t 、 F 以外の条件は図4の場合と全て同じである。シミュレーションの結果を図5(a)に示す。パッチ内部各領域のカッターマーク列が直線上に整列した様子が観察できる。整列したカッターマーク列の傾きは特に制御を行っていないため、各領域で異なる様子が観察できる。切削実験の結果を図5(b)に示す。切削実験もシミュレーションと同様に、直線上に整列したカッターマークと、直線上に整列したカッターマーク傾きはランダムである様子が観察できる。

更に、2章で示した、直線上に整列したカッターマーク列の角度を制御する手法を用いて、カッターマーク列がパッチ各辺に対して垂直になる一刃当たりの送り量 f_t を算出し、対応する送り速度 F でシミュレーション及び切削実験を行う。 f_t 、 F 以外のシミュレーション条件及び切削条件は図4の場合と全て同じである。また、直線上に整列したカッターマーク列の角度 α_1 、 α_2 、 α_3 のトレランス r は $\pm 8^\circ$ に設定している。図6(a)にシミュレーション結果を示す。パッチ内部各領域のカッターマーク列が直線上に整列し、かつ、直線上に整列したカッターマーク列がパッチ各辺に対して巨視的に垂直になっている様子が確認できる。 α_1 、 α_2 、 α_3 はそれぞれ、 83.5° 、 95.2° 、 95.3° となっており、トレランス内に収まっている。切削実験の結果を図6(b)に示す。切削実験もシミュレーションと同様にカッターマークが整列している様子が確認できる。以上の様に各辺に垂直から $\pm 6.5^\circ$ 以内の傾きを有したカッターマーク列を得ることができ、2章の手法が有効であることがわかる。

また、形状・寸法が異なる別の三角形パッチに対しても同様の提案手法を用いて f_t 、 F の値を探索により定め、シミュレーションを行った。三角形パッチ各頂点の座標値は、5軸マシニングセンタ上に設置した厚さ10mmの直方体被削材の底面中心を原点とし、A(0, -80.488, -11.566), B(2.0, -86.488, -15.03), C(-15.0, -86.488, -15.03)に設定した。図7にシミュレーション結果を示す。パッチ内部各領域のカッターマーク列が直線上に整列し、かつ、パッチ各辺に対してほぼ垂直になっている様子が確認できる。直線上に整列したカッターマーク列の角度 α_1 、 α_2 、 α_3 はそれぞれ、 84.3° 、 89.9° 、 97.6° となっており、各辺に垂直から $\pm 7.6^\circ$ 以内の傾きを有したカッターマーク列を得ることができた。

また、パッチ内の3つの領域でカッターマーク列の傾斜角度を別々に設定できることを示す。図7のシミュレーションで用いたものと同形状の三角形パッチを用い、パッチ内の3つの領域のカッターマーク列の傾き α_1 、 α_2 、 α_3 がそれぞれ 15.0° 、 90.0° 、 30.0° となるように f_t 、 F の値を定めシミュレーションを行った。シミュレーションの結果を図8に示す。 α_1 、 α_2 、 α_3 はそれぞれ、 15.2° 、 93.1° 、 30.7° となっており、設定値から $\pm 3.1^\circ$ 以内の傾きでカッターマーク列を得ることができた。

また、パッチ内の3つの領域でカッターマーク列の傾きの角度を別々に設定できることを利用し、1つの領域のカッターマーク列の角度に、残り2つの領域のカッターマーク列の角度を揃え、パッチ内の各領域のカッターマーク列を1方向に揃えることを試みた。直線上に整列したカッターマーク列の角度 α_1 、 α_2 、 α_3 はカッターマーク列が1方向に揃う様に、それぞれ 130.9° 、 90.0° 、 30.0° に設定した。また、各領域のトレランス r は全て

$\pm 8^\circ$ に設定している。これらの条件を満たす一刃当たりの送り量 f_t 及び対応する送り速度 F を算出する。一刃当たりの送り量 f_t 、送り速度 F 以外の条件は図4の場合と全て同じである。図9(a)にシミュレーション結果を示す。パッチ内部各領域のカッターマーク列が直線上に整列し、かつ、パッチ内の各領域の直線上に整列したカッターマーク列が1方向に揃っている様子が確認できる。 α_1 、 α_2 、 α_3 はそれぞれ、 130.9° 、 92.4° 、 31.9° となっており、設定値から $\pm 2.4^\circ$ 以内に収まっている。図9(b)に切削実験の結果を示す。シミュレーション結果と切削実験の結果は

Fig. 5 Regularly aligned cutter marks without inclination angle control ($f_t=0.404\text{mm/tooth}$, $S=1000\text{min}^{-1}$, $F=404.069\text{mm/min}$, $f_c=0.431\text{mm}$)

Fig. 6 Regularly aligned cutter marks vertical to tool path ($\alpha_1=90\pm 8^\circ$, $\alpha_2=90\pm 8^\circ$, $\alpha_3=90\pm 8^\circ$)

($f_t=0.373\text{mm/tooth}$, $S=1000\text{min}^{-1}$, $F=372.987\text{mm/min}$, $f_c=0.431\text{mm}$)

Fig. 7 Simulation result for another triangle patch ($\alpha_1=90\pm 8^\circ$, $\alpha_2=90\pm 8^\circ$, $\alpha_3=90\pm 8^\circ$)

($f_t=0.309\text{mm/tooth}$, $S=1000\text{min}^{-1}$, $F=617.301\text{mm/min}$, $f_c=0.482\text{mm}$)

Fig. 8 Simulation result which shows an inclination angle control in each region

($\alpha_1=15\pm 8^\circ$, $\alpha_2=90\pm 8^\circ$, $\alpha_3=30\pm 8^\circ$) ($f_t=0.27\text{mm/tooth}$, $S=1000\text{min}^{-1}$, $F=539.67\text{mm/min}$, $f_c=0.498\text{mm}$)

Fig. 9 Controlled alignment of cutter marks along α_2 direction in three regions

$$(\alpha_1=130.893 \pm 8^\circ, \alpha_2=90 \pm 8^\circ, \alpha_3=30 \pm 8^\circ)$$

$$(f_t=0.494\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=493.985\text{mm/min}, f_c=0.483\text{mm})$$

Fig. 10 Cutter marks array in planer triangle patches which approximate the spherical surface

$$(\alpha_1=90 \pm 8^\circ, \alpha_2=90 \pm 8^\circ, \alpha_3=90 \pm 8^\circ)$$

$$(1) (f_t=0.42\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=419.365\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm})$$

$$(2) (f_t=0.363\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=362.854\text{mm/min}, f_c=0.45\text{mm})$$

$$(3) (f_t=0.445\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=445.377\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm})$$

$$(4) (f_t=0.429\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=429.836\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm})$$

よく一致している。ただし、意図したカッターマーク配列とはなっているが、図9で α_1 の角度方向のカッターマーク間のピッチは3つの領域でそれぞれ異なるため、三角形パッチ内全体で一様にはなっていない。

3.3 曲面への適用

提案した任意形状・寸法の三角形パッチ内部にカッターマークを整列させる手法を、球面上に配置した平面三角形パッチ群に適用し、シミュレーション及び切削実験においてその有効性を検証した。球面上の一部を8つのパッチに分割し、左右対称の箇所は同条件とする。各パッチ内部のそれぞれの領域のカッターマーク列を直線上に整列させ、かつ、直線上に整列したカッターマーク列がパッチ各辺に対して垂直になるような一刃当たりの送り量 f_t と対応した送り速度 F を各パッチ毎に算出する。また、単一平面加工時と違い、工具傾斜角度は各パッチ毎に異なった値をとる。図10(a)に左右対称の加工面の左半分の部分のシミュレーション結果を示す。また、図10(b)に切削実験の結果の左半分の拡大図、図10(c)に切削実験の結果の全体図を示す。シミュレーション結果、切削実験結果共に、各パッチ内部のそれぞれの領域のカッターマーク列を直線上に整列させ、かつ、直線上に整列したカッターマーク列がパッチ各辺に対して垂直になっており、各パッチ毎に切削条件を変えることで上記の手法が曲面にも適用できることを示した。

4. 結 言

ボールエンドミル加工により規則的表面模様を形成する加工方法であるパッチ分割切削法を拡張し、任意形状・寸法の三角形パッチ内部にカッターマーク列を整列する手法を提案した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 任意形状の三角形パッチにおいて、パッチ分割切削法における周囲ごとの工具回転角度が等差数列的に変化することを示した。その公差 $\Delta\lambda$ が 2π の整数倍の時、隣接する工具経路間の位相差は一定となり、カッターマークは縦横に直線上に整列することを示した。
- 2) カッターマークが縦横に直線上に整列する状態において、パッチ内の3つの領域でのカッターマーク列の傾き α_1 、 α_2 、 α_3 にある程度のトレランスを許すことにより、任意の傾きでカッターマーク列を形成できることを示した。
- 3) 上記の手法により、曲面を平面の三角形パッチ群で近似した際の各パッチ内部に、整列したカッターマーク列を形成することができることを示した。

参 考 文 献

- 1) 松田礼, 笹原弘之, 瀧澤誠, 堤正臣: パッチ分割切削法による平面への規則的表面模様形成, 精密工学会誌, **72**, 9 (2006) 1123.
- 2) H. Matsuda, H. Sasahara and M. Tsutsumi: Generation of a Regularly Aligned Surface Pattern and Control of Cutter marks Array by Patch Division Milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **48**, 1 (2008) 84.
- 3) 梶田正美: さまざまな働きをもたらす微細表面, 機械と工具, **46**, 8 (2002) 81.
- 4) 諸貫信行, 高山明典, 金子新: 濡れ性制御のためのテクスチャ設計, 日本機械学会論文集(B編), **70**, 693 (2004) 126.
- 5) H. Sasahara, M. Fukuda, H. Matsuda and M. Tsutsumi: Generation of Regularly Aligned Micro Dimples by using a Patch Division Milling, Proc. 10th Int. Conf. EUSPEN, (2008) 24.
- 6) 金子和史, 長谷川雅人, 松本壮平, 尾崎浩一, 成合英樹, 牧博司, 矢部彰: 超微細凹凸面による流動抵抗低減に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), **66**, 644 (2000) 139.
- 7) H. Matsuda, H. Sasahara, M. Fukuda and M. Tsutsumi: Tool Path Generation for the Formation of a Geometric Surface Pattern on a Curved Surface by Patch Division Milling, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **2**, 4 (2008) 504.