D31 パッチ分割切削法による曲面への周期的凹凸構造形成 -三角錐パッチ群への適用-

Generation for Geometric Pattern on Curved Surface by using patch Division Milling - Application to triangle pyramid patches -

○学 徐 凱 (東京農工大学)

正 笹原 弘之 (東京農工大学)

Kai XU, Hiroyuki SASAHARA, Tokyo University of Agriculture and Technology, Nakacho2-24-16, Koganei, Tokyo

This study describes a new machining strategy to make regularly aligned micro dimples by a micro ball-end milling process employing a patch division milling technique which can make well aligned cutter marks on the machined surface. First the curved surface which was formed by triangle pyramid employing the method of triangle pyramid patch division milling technique which can substitute for the method of machined surface patch division milling technique is described. Then, it is shown that regularly aligned micro dimples on the triangle pyramids (accumulated truncated triangle pyramid) can be successfully formed.

Key Words: Ball-end-mill, surface texture, geometric pattern

1. 緒言

近年, 多くの製品の生産には金型が用いられているが, その金型の加工には一般的にボールエンドミルが用いられる。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。しかしながら, ボールエンドミルで加工を行う場合は, 加工表面にカスプやカッターマークが残る。このカッターマークは一般的には研磨等の後工程で除去されるのが普通であるが, 逆にカッターマークによる凹凸模様を機能表面として利用することも可能である。

平面を正三角形パッチで覆い尽くして規則的な凹凸模様を形成する方法が開発されており¹⁾, 曲面を多数の任意形状三角形パッチで近似し, それぞれの平面パッチ内に凹凸模様を整理することが可能となっている²⁾。そこで, 本研究の最終的な目的はパッチ分割切削法により, 曲面上を曲面状のパッチで覆い規則的な凹凸模様を形成することである。その第一段階として, 自由曲面を三角錐パッチ群で近似し, そのパッチ上に凹凸模様を形成する加工を行う。そこで, 本研究では任意形状の平面パッチの輪郭を底面として三角錐パッチを作り, その側面に凹凸模様を形成する方法を提案する。さらに, パッチの凹凸模様配列を直線状に整理させる制御を試みる。

2. パッチ分割切削法による工具経路の生成方法

パッチ分割切削法とは, 図 1(a)に太線で示すように, まず加工面全体をいくつかの多角形パッチを組み合わせて分割する。次に, 同図(b)に示すように, 個々のパッチに, 螺旋状の工具経路で, クロスフィード分ずつ内側にずらしながら, 加工面に均一な表面模様が形成される。平面に主軸回転速度, 送り速度, クロスフィード量を調整することにより, 隣り合う工具経路における切れ刃の位相を揃える。カッターマークは直線状に整理する。当然ながら, 工具経路に沿ってカッターマークは等間隔で形成されるが, 任意形状の三角形パッチでも, 直線状に整理することができる。

3. 三角錐側面への工具経路の生成方法

任意形状の三角形において平面パッチについては, 凹凸模様を整理させる手法が既に提案されている。ここでは加工対象が平面パッチから, 三角錐パッチに進化させる方法を説明する。図 2 に三角錐パッチ内を螺旋状の経路で加工する時の加工経路を示す。パッチの頂点と底面の各頂点とを結んだ直線によって分割される 3 つの側面を考える。

Fig.1 Outline of method of patch division milling

Fig.2 Three areas of triangle pyramid patch

3.1 加工方法が制限される条件

平行かつ等間隔の直線が任意の平面に投影されても, 平行かつ等間隔である特徴は変化しない。三角錐側面に螺旋状の加工経路を設定するとき, 3 つの三角錐側面において, この側面の中ですべての工具経路がお互いに平行かつ等間隔となる条件が存在すれば, 任意の平面に投影しても, 各側面での投影線が平行かつ等間隔で他の 2 つの側面の投影線に繋がる。しかし, 実際にはそのような状況はありえない。ただし, 2 つの側面において工具経路が平行また等間隔となることは可能である。

3.2 加工方法の選択

三角錐の側面 1 と側面 2 において平行また等間隔の経路とする。側面 3 の経路では, 側面 1 と側面 2 の経路を螺旋状に接続する。このとき側面 3 では, 図 2 のように工具経路と輪郭 CA は平行ではなく, CA 上は加工されない。一方, 図 3 に示したように, 曲面状のパッチを加工する場合には曲線 CA 上を加工経路とすることができる。そこで三角錐パッチにおいて, 側面 3 の最外周の加工経路は底面上に設定するのでは

なく、輪郭線 CA を含み底面に垂直な面内に設定する。そのために下記に説明する補助三角錐パッチを設定する。加工しない部分なくなる。

Fig.3 Triangle pyramid patch and curved surface

Fig.4 Formation of bottom surface of auxiliary triangle pyramid

Fig.5 Cutter path on auxiliary triangle pyramid

3.3 補助三角錐パッチを作る方法

補助三角錐パッチを作るには、まず、その底面($\triangle ABC$)に着目する。三角形の内角を θ_A , θ_B , θ_C (rad), 底面上での螺旋経路の間隔 f_c とする。点 D を BA の延長線上に設け、 $\triangle DBC$ の内心 Q から D に引いた線と辺 CA が点 E で交差する。点 E から辺 AB までの距離が f_c である。幾何学的に E から CD までの距離も f_c であると、CA と CD のなす角度 β は

$$\beta = \arcsin \left\{ f_c / \left(CA - \frac{f_c}{\sin \theta_A} \right) \right\} \quad (1)$$

となる。 $\triangle DBC$ を確定できて補助三角錐パッチの底面とし、三角錐の高さを求める。半径 R の球面を加工する場合、底面の垂直単位ベクトルと内心 Q の座標から三角錐の高さ h は、

$$R^2 = (Q_x + \bar{x}h)^2 + (Q_y + \bar{y}h)^2 + (Q_z + \bar{z}h)^2 \quad (2)$$

の関係がある。底面 $\triangle DBC$ に垂直かつ面内に CA を含む平面を作り、この平面と側面 $\triangle DIC$ が交わる CD_1 が図 3 に示した側面 3 の最外周の加工経路となる。さらに、点 D_1 から AB までの距離と等しい間隔で補助三角錐の側面を分割する。補助三角錐の頂点 I から点 D_1, B_1, C_1 に引いた線と工具経路との交点を外側から $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n, B_1, B_2, B_3, \dots, B_n, C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ とおく。

3.4 カッターマークを直線状に整列させる

以前の研究では平面パッチの場合に、カッターマークは 3 つの側面において、周回毎の工具経路における隣接 2 点間の工具回転角度が等差数列となることが示されている。周回毎の工具回転角度の変化のを示す等差数列の公差 $\Delta\lambda$ を 2π の整数倍とすることができれば、位相差が 0 となり、カッターマークを直線状に配列することができる。本研究では計算を簡単にするために、まずマトリクスの変換を用いて、パッチの経路を底面に投影する。図 5 から見ると、側面 1 と側面 2 の

経路は平行で、長さも変わらずに等差数列となる。しかし、側面 3 の経路はパッチ輪郭に平行ではなくなるので、等差数列とはならず、従ってカッターマークを整列させることができない。その欠点を克服するために、側面 3 の経路の長さを、周回毎の工具回転角度が等差数列となるよう調整する必要がある。本研究では、曲面を三角錐台を積層して近似することを提案する。 $D_1B_1C_1$ を底面として、三角錐台を作って図 6 に二つの三角錐台の側面 1 と側面 4 のなす角が α となる。側面 4 上に、図 5 で示した D_2B_2 と平行でかつ長さが等しい E_2F_2 を作る。幾何学的に、 D_2B_2 と E_2F_2 が同一な鉛直面におくことができる。そして、 C_1 と E_2 が接続すると経路 C_1E_2 が図 5 で示した C_1D_2 の長さと異なる。最後に側面 B_1C_1U に D_2B_2 と平行になる F_2G_2 を設ける。これによって、側面 3 の経路を等差数列のように調整すると、側面のカッターマークが直線状に整列する。図 5 から見ると、三角錐頂点から辺に引いた垂線と螺旋状の工具経路と交点を外側から $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ とおく。 f_c を一定とすると隣り合う点 P_n から点 P_{n+1} に至る間の工具移動位相 $\lambda_{n \rightarrow n+1}(\text{rad})$ は、

$$\lambda_{n \rightarrow n+1} = \frac{2\pi \left(AB - \frac{f_c}{\tan(\theta_B/2)} + AD + BC - \frac{2f_c}{\tan(\theta_B/2)} + CD_1 \right)}{Nf_t} - 2\pi \left[\frac{f_c \left\{ 2(\tan(\theta_B/2))^{-1} + (\tan(\theta_C/2))^{-1} + (\tan(\theta_D/2))^{-1} + \Delta \right\}}{Nf_t} \right] (n-1) \quad (3)$$

となる。側面 1 の工具移動位相 $\lambda_{n \rightarrow n+1}(\text{rad})$ は、

$$\lambda_{n \rightarrow n+1} = \frac{2\pi \left(AB - \frac{f_c}{\tan(\theta_D/2)} + AD + BC + CD_1 \right)}{Nf_t} - 2\pi \left[\frac{f_c \left\{ 2(\tan(\theta_B/2))^{-1} + (\tan(\theta_C/2))^{-1} + (\tan(\theta_D/2))^{-1} + \Delta \right\}}{Nf_t} \right] (n-1) \quad (4)$$

となる。公式の Δ は、側面 3 の経路の等差である。側面 3 では近似的にカッターマークは直線状に整列できる。

Fig.6 Formation of accumulated truncated triangle pyramid

4. 結言

これまで三角形パッチを対象としていたパッチ分割切削法を発展し、三角錐パッチ・三角錐台パッチを用いて曲面を近似し、その側面に凹凸模様配列を直線状に整列する手法を示した。

5. 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.