

人の視覚特性に基づく形状解析ツールの開発

神戸大学 ○八木雅彦, ◎佐藤隆太, 白瀬敬一
(株)牧野フライス製作所 尾田光成, 中山野生

要 旨

仕上げ加工面の幾何学的な形状精度と見た目の美しさとは必ずしも一致しない。先行研究により、加工面の見た目の不具合には物体表面の法線方向変化率が関係していることがわかった。本研究ではこれを活用して、工作物の形状データから法線方向変化率を計算し、人が判別可能な法線方向変化率の視認限界と一緒に表示する形状解析ツールを開発した。開発したツールを使って実加工面の評価を行い、見える傷と見えない傷とを正しく判別できることを確認した。

1. 結 言

数値制御工作機械を使った加工では、送り軸の移動方向が反転するとき起こる、象限突起や段差状の軌跡誤差が、しばしば仕上げ加工面に見た目の不具合を引き起こす。このような不具合は、部品加工においては製品自体に、金型加工においてはそこからさらに成形品に転写され、製品や成形品の面品位を低下させてしまう。また形状誤差の大きさと見た目の不具合の明瞭さとは必ずしも一致しないことが知られており、見た目の美しさの評価には人の視覚解像度やコントラストに対する認識の特性など、視覚特性を考慮する必要がある。

これまでも人の視覚特性に基づいて仕上げ加工面の見た目の不良を発見するための研究は存在したが¹⁾、加工面を撮影した画像データに基づく評価であり、実際の形状と不具合の見た目の関係を明らかにするものではなかった。一方、本研究室で行われた先行研究^{2),3),4)}により、人の視覚解像度と加工面形状の法線方向変化率の視認限界とを考慮した仕上げ加工面の評価方法が開発され、その方法によって、加工面の形状データや工具の運動軌跡の法線方向変化率を処理することで、加工面に発生する視覚上の乱れの存在を的確に評価できることが確認された。

そこで本研究では、これまで得られた知見を活用して円弧軌跡に対応した形状解析ツールを開発した。円運動軌跡の測定結果や、円筒状の工作物の形状データを入力すると、円弧の形状とその法線方向変化率とを表示する。作成したツールを使って、制御パラメータや送り速度を変化させて外周加工した2種類の円筒を解析し、視覚上の乱れを適切に評価できることを確認したので報告する。

2. 人の視覚特性に基づく形状解析ツールの開発

2.1 人の視覚特性

人は物体の形状を輝度の変化、つまりコントラストによって認識している。輝度の変化は面の法線方向の変化により発生する。人の視覚特性の1つとして、コントラスト感度と空間周波数が影響することが挙げられる。コントラスト感度とは正弦波状に濃淡が変化する縞模様を見たときの閾値、すなわち縞の強さ(コントラスト)を減らしていった縞が視認できる限界のコントラストの強さを求め、その逆数を取ったものである。空間周波数は視角1度あたりの縞の数である。図1に正常眼でのコントラスト感度と空間周波数の関係を示す⁵⁾。この図から、同じコントラストの強さでも空間周波数によって視認しやすさが異なるということがわかる。また人の網膜には解像度があり、解像度以上に空間周波数の高いコントラストは、その強さに関わらず人の目には見えない。

2.2 形状表面の反射特性

光の反射モデルの1つである Torrance-Sparrow モデル⁶⁾によると、反射光は正反射成分と拡散反射成分に分かれる。拡散反射光は加工面の全方向に均等に広がる性質をもつため、同一形状での輝度変化の大きさは正反射成分の割合に依存する。物体表面の凹凸の傾斜を示す二乗平均平方根傾斜(Rdq: Root Mean Square Slope)⁷⁾が大きくなるほど正反射成分は小さくなる。そのため Rdq が大きくなると形状は認識されにくくなる。

2.3 視覚特性と反射特性に基づく形状評価方法

先行研究²⁾によって提案された、人の視覚特性に基づく形状解析方法の概要を図2に示す。まず加工面の形状データや工具の運

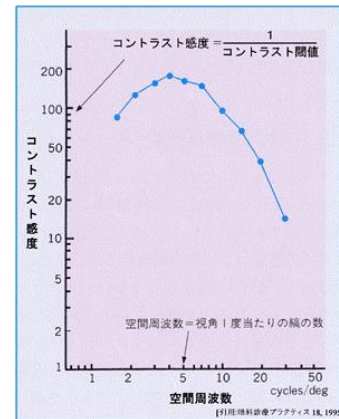


Fig. 1 Relationship between spatial frequency and contrast sensitivity⁵⁾

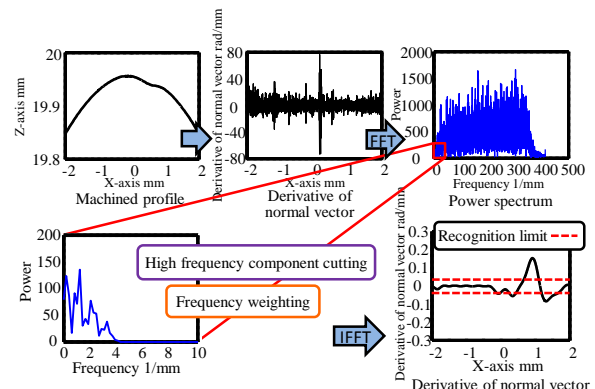


Fig. 2 Shape evaluation method based on human eye characteristics

動軌跡から法線方向変化率を計算する。それを高速フーリエ変換してパワースペクトルを得る。得られたパワースペクトルのうち、人の視覚解像度以上の高周波成分を取り除き、残った成分をコントラスト感度曲線に基づいて重み付けする。その後、逆高速フーリエ変換で再び法線方向変化率に戻す。得られた法線方向変化率を、Rdq との関係として別途評価された法線方向変化率の視認限界と比較し、視認限界を超えた法線方向変化率が確認された場合、実際の加工面には見た目の不具合が観察されることになる。

3. 視覚特性に基づく形状解析ツール

3.1 形状解析ツールの概要

本研究では、上記の形状評価方法に基づいて形状解析ツールを作成した。ツールのユーザインタフェース(GUI)を図3に示す。このツールは一周分の円弧形状の解析が可能であり、ボールバーで測定した円運動軌跡や真円度測定機で測定した円形状データなどを解析することができる。ファイル名、指令半径、円弧軌跡表示

時の1目盛の大きさ、法線方向変化率の視認限界を入力すると、平均半径から誤差を拡大した円弧形状と、円弧表示された法線方向変化率とをみることが出来る。真円度測定機によって測定されたデータを解析する場合には、加工面のRdqについても計算して表示するようにになっている。

3.2 実加工面への適用

作成した形状解析ツールが、加工面の見た目の不具合を適切に評価できるかどうかを検証するため、2通りの条件で円筒の外周切削を行い、加工された2つの円筒の形状データをツールで解析した。条件1では象限突起が発生するように速度ループ比例ゲインと速度ループ積分ゲインを、条件2では段差状の軌跡誤差が発生するようにバックラッシュに関する補正パラメータを、それぞれ既定値から変更している。また、条件1と条件2では送り速度も異なる。加工条件と設定したパラメータを表1に示す。円筒外周切削加工には、ボールねじ駆動の直進軸をもつ5軸制御高精度立て形マシニングセンタを用い、加工後の円筒形状の測定には、株式会社小坂研究所製の真円度測定機「EC600」を用いた。

測定した円筒形状およびその形状データから開発したツールによって計算された法線方向変化率の円弧表示を図4と図5にそれぞれ示す。ここでの法線方向変化率は、人の視覚特性を考慮して、視覚解像度以上の周波数成分を除去し、コントラスト感度曲線に基づく重み付けを行ったものである。図中の(a)および(b)は条件1と2に各々対応している。図5中の破線で表される法線方向変化率視認限界には先行研究によって評価された値を用い、一律0.02 rad/mmに設定している⁴⁾。先行研究⁴⁾によると、Rdqが小さい場合には法線方向変化率の視認限界はほぼ一定となることがわかっており、本研究で解析対象とした2つの円筒形状のRdqは、いずれも十分に小さい。

図4によると、条件1と条件2ではそれぞれ象限突起と段差状の軌跡誤差とが発生しており、その大きさはどちらも約10 μ mである。しかし図5を見ると、条件1では90°付近の法線方向変化率がおおむね視認限界以下に収まっているのに対し、条件2では視認限界を大きく超えていることがわかる。すなわち、条件2では加工面に見た目の不具合が観察される。

加工面の90°付近を撮影した結果を図6に示す。図中の(a)および(b)は、図4および5と同様に条件1と2に各々対応している。図6(a)によると、条件1の場合には加工面に明瞭な不具合は視認できないが、図6(b)によると、条件2では加工面上に明瞭な不具合が確認され、開発したソフトウェアツールによる解析結果と実際の見た目とが一致していることがわかる。

4. 結 言

本研究によって得られた成果を以下に示す。

- (1) 人の視覚特性に基づく形状解析ツールを開発した。
- (2) 開発したツールによる形状解析結果と実加工面とを比較し、解析結果と見た目とが一致することを確認した。

今後、円形状以外の自由曲面にも適用可能な解析ツールを開発するほか、工作機械の運動軌跡やフィードバックデータから、実加工を行わずに事前に見た目の不具合を予測できるようにする予定である。

参 考 文 献

- 1) 公開特許公報, 対象物にあるむらの検出方法および装置(三菱重工業(株)), 特開平 10-96696, (1996).
- 2) 佐藤隆太, 佐藤友樹, 白瀬敬一, 尾田光成, 中山野生, 人の視覚特性に基づく仕上げ加工面評価方法 - 視覚解像度と法線方向変化率視認限界 -, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集 (2015) 253.
- 3) 中西巧, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 尾田光成, 中山野生, 人の視覚特性に基づく仕上げ加工面評価方法 - 法線方向変化率視認限界に及ぼす表面粗さの影響 -, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2016) 745.
- 4) 中西巧, 仕上げ加工面に生じるみだり目の不具合の抑制技術, 神戸大学大学院工学研究科修士論文, (2017).
- 5) 可児一孝編, 眼科診療プラクティス 18 眼科診療機器とデータの読み方, 文光堂 (1995).
- 6) K.E. Torrance and E.M. Sparow, Theory for off specular reflection from roughened surfaces, Journal of the Optical Society of America, Vol.57, No.9, (1967) 1105.

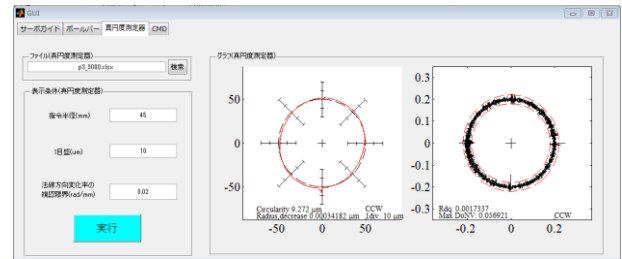


Fig. 3 GUI of developed software tool

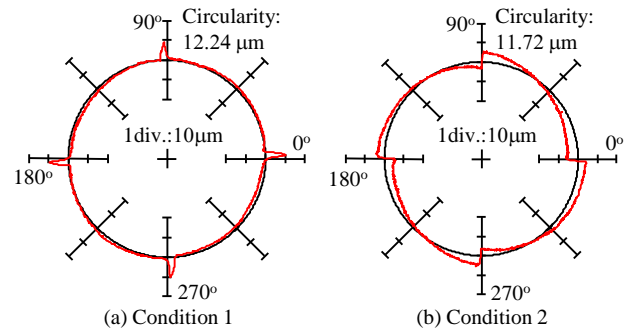


Fig. 4 Comparison of machined profiles

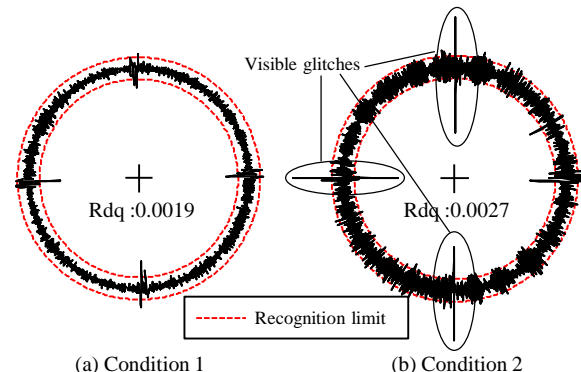


Fig. 5 Derivative of normal vector of the surfaces

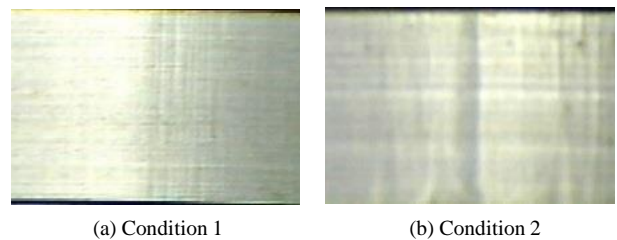


Fig. 6 Comparison of machined surfaces

Table 1 Cutting conditions and parameters

	Condition 1	Condition 2
Tool type	Square-end mill	
Number of flute	2	
Tool diameter	ϕ 10 mm	
Workpiece	Aluminum alloy (A5052), ϕ 45 mm	
Radial depth of cut	0.1 mm	
Feed speed	2000 mm/min	1000 mm/min
Spindle speed	23333 rpm	11667 rpm
Velocity loop proportional gain	X: 88, Y: 88	X: 200, Y: 200
Velocity loop Integral gain	X: 56, Y: 56	X: 192, Y: 192
Backlash comp. value	X: 35, Y: 37	X: -140, Y: -140

- 7) JIS B0601, 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状: 輪郭曲線方式 - 用語, 定義及び表面性状パラメータ, (2013).